

EIC計画が切り拓く 原子核物理学の新たな地平

郡司 卓

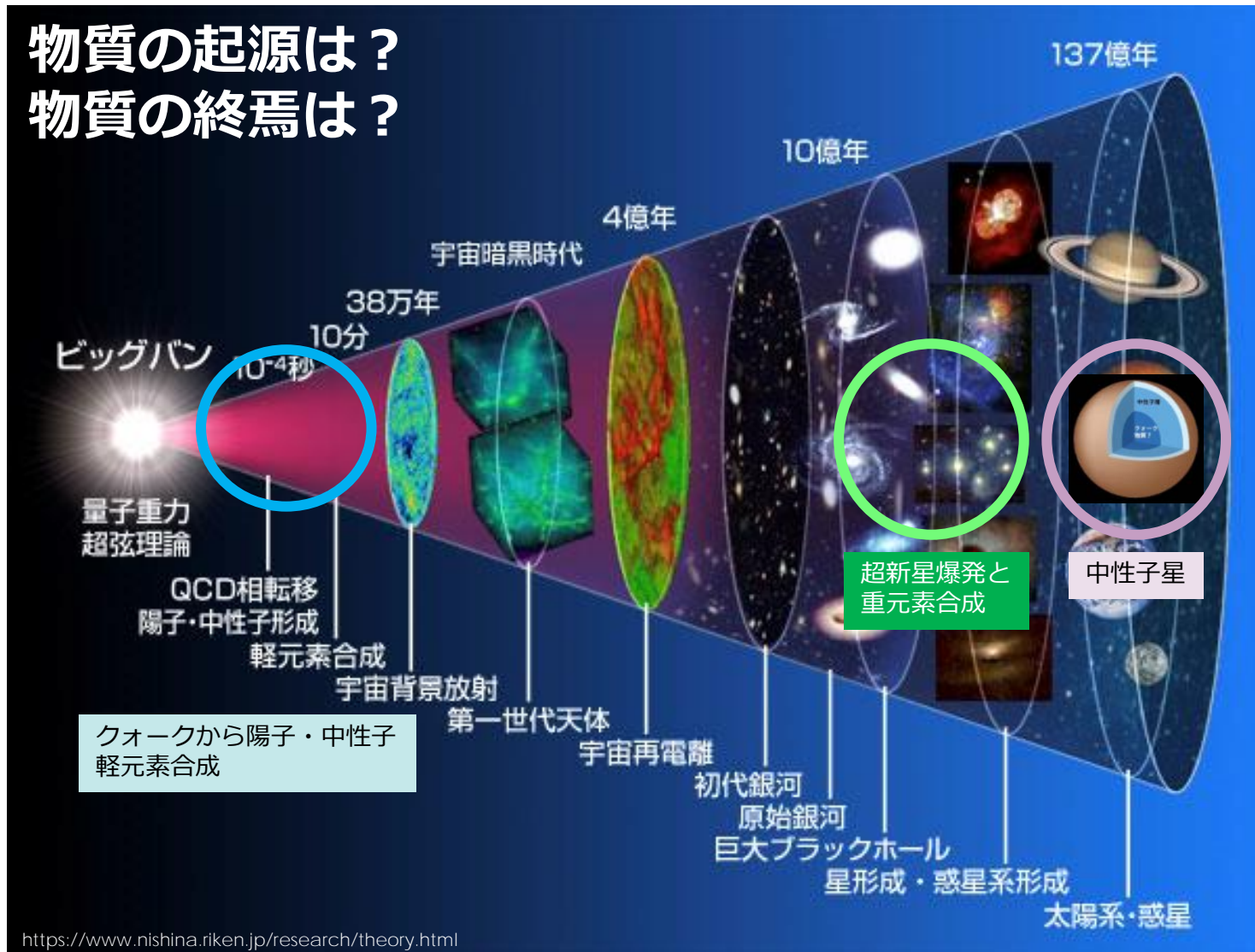
(EIC-EPIC実験執行部委員、EIC-EPIC日本機関代表)

東京大学大学院理学系研究科原子核科学研究センター

- ▶ 原子核物理の目標
- ▶ EICが目指すもの
- ▶ EICの意義：原子核物理の新たな展開
- ▶ 世界の動向と日本の戦略と体制
- ▶ まとめ

宇宙における「物質の起源と進化」の解明

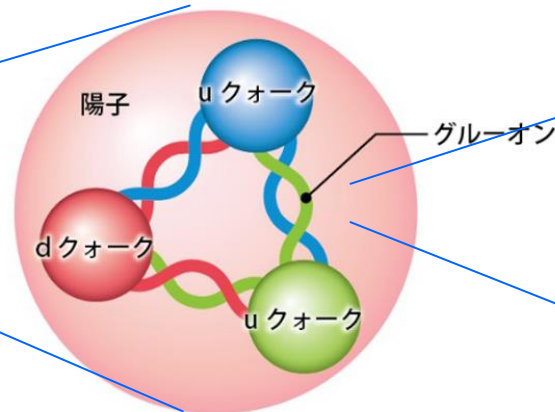
物質の起源は？
物質の終焉は？



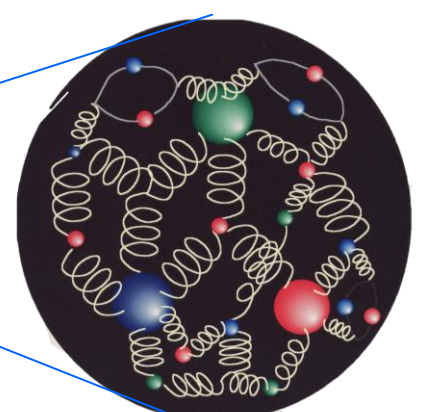
原子核物理を支える様々な加速器



原子核
(MeV)



陽子や中性子
構成子クォーク (GeV)



クォークと
グルーオン (TeV)

日本に拠点 (RIBF)



理研
阪大RCNP
HIMAC

日本に拠点 (J-PARC)



J-PARC@原研
Spring8
東北大電子光

海外拠点 (RHIC, LHC)



RHIC@BNL

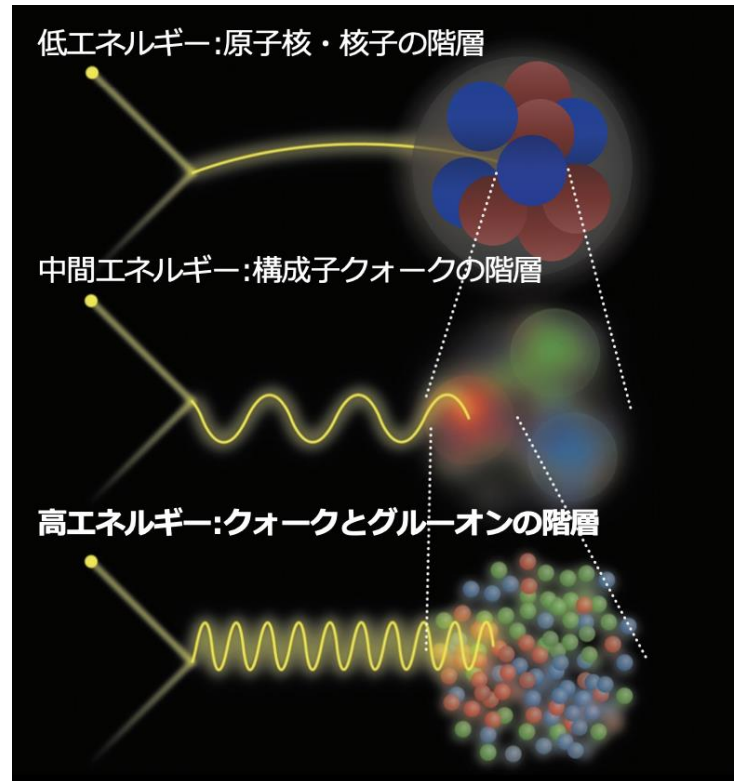
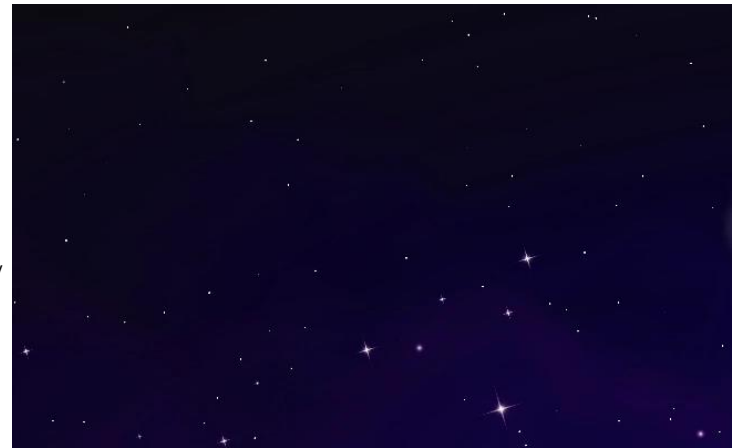


LHC@CERN

Electron-Ion Collider (EIC)@BNL

様々な加速器を使って、物質の起源と進化の解明へ
EICが全ての階層を繋ぎ、飛躍的な発展をもたらす

「電子-イオン衝突型加速器」 核子や原子核の中を覗く 精密マルチスケール電子顕微鏡



世界初の高エネルギー電子と核子・原子核の衝突型加速器 ($\sqrt{s} = 29-140 \text{ GeV}$)

- 偏極電子 + 偏極陽子、偏極重陽子、偏極 ^3He
- 偏極電子 + 原子核 (O, Cu, Au)

① 物質の質量問題

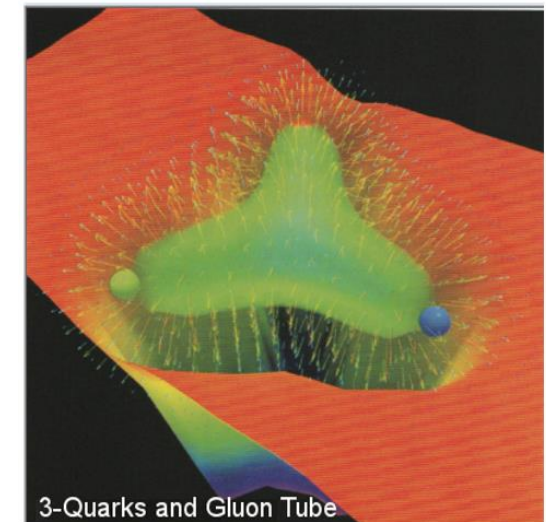
銀河や恒星や地球をつくる陽子や中性子や原子核の質量の起源は1%がヒッグス機構で99%はクォークとグルーオンのダイナミクス。
この99%の中身が理解されていない

*EICでは、陽子・中性子だけでなく、 n 中間子、 K 中間子の質量構造も分かります



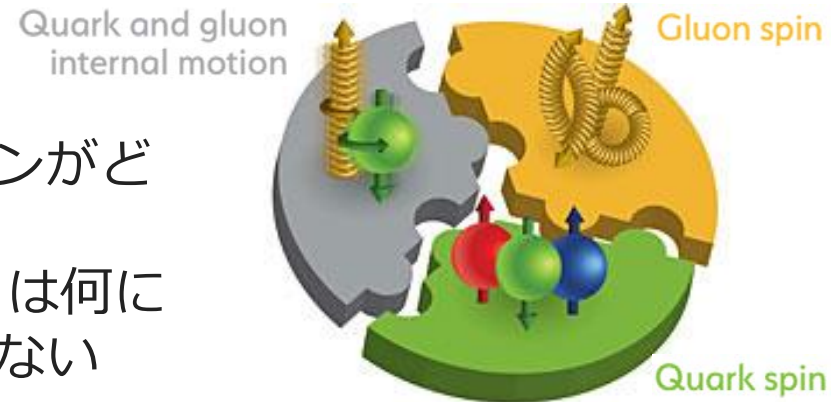
② クォークの結合問題

クォークはほぼ質量ゼロの相対論的粒子であるが、それらがどのように結合して核子や原子核を形成しているのかが理解されていない



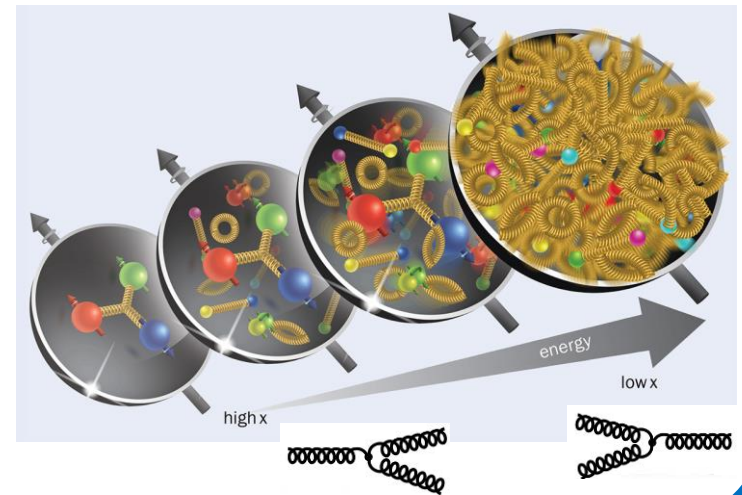
③ 核子のスピン問題

相対論的に運動するクォークとグルーオンがどのように核子スピン $1/2$ を作り出すのか
構成子クォークの寄与は25%程度で残りは何によって生み出されるのかが理解されていない



Electron-Ion Collider 計画

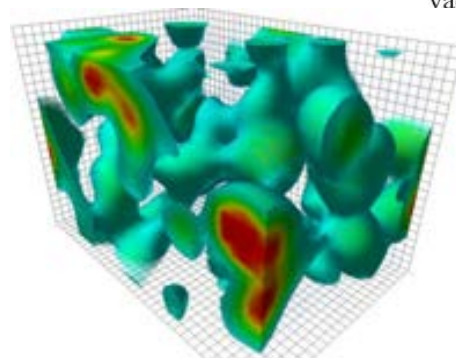
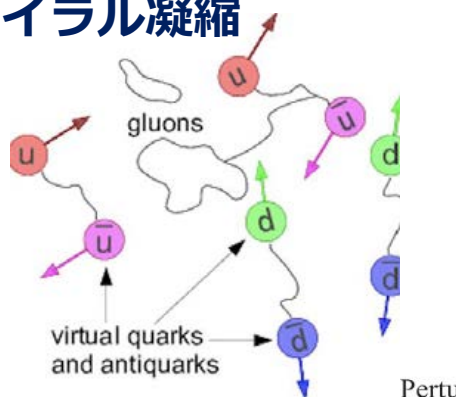
これらは、いずれも、グルーオンと呼ばれる自己相互作用するボース粒子が本質的役割を果たす。**EICはグルーオンと量子ゆらぎの役割を検証する絶好の場。**
相対論的ボース粒子（グルーオン）と相対論的フェルミ粒子（クォーク）の混合多体系としての核子や原子核のサイエンスに人類が初めて挑戦する。



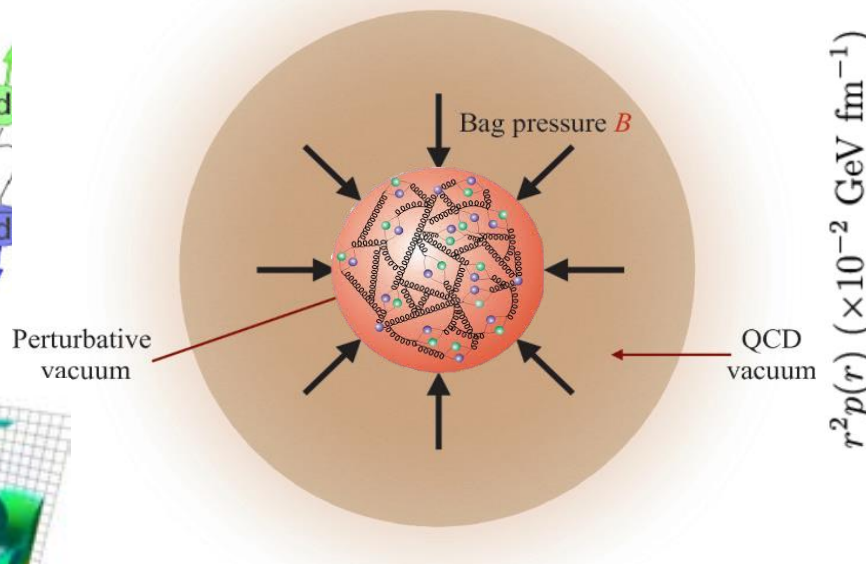
QCDの真空構造（カイラル凝縮、グルーオン凝縮）の理解

人類が初めて相対論的粒子系の真空構造を解明することにつながる
南部理論の検証

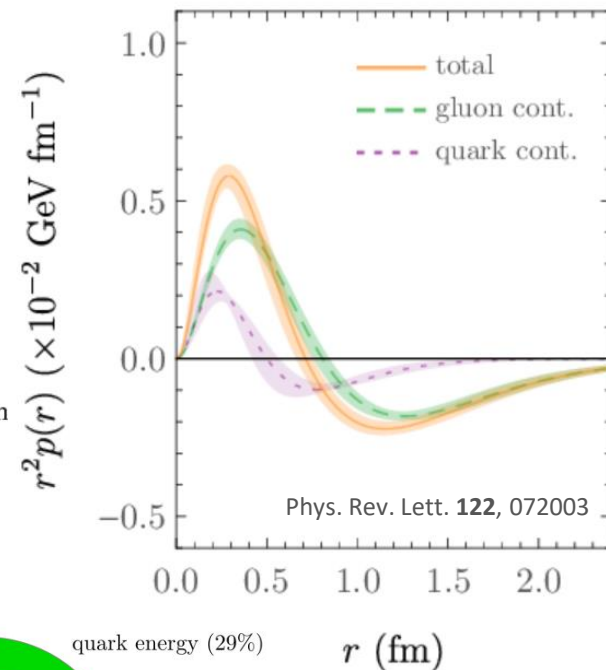
カイラル凝縮



グルーオン凝縮 (トレースアノマリー)

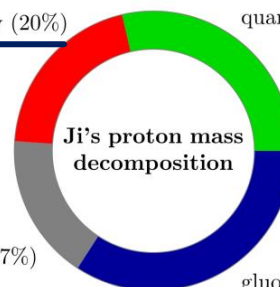


陽子内の圧力



trace anomaly (20%)

quark energy (29%)

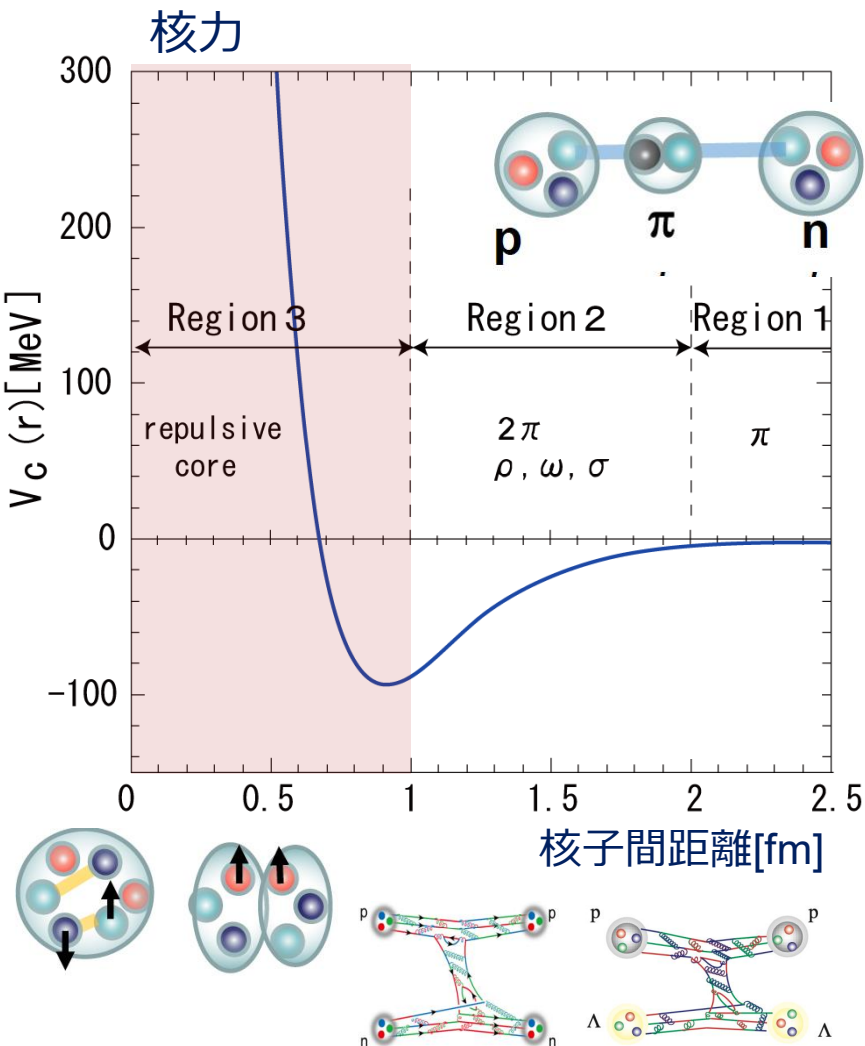


quark mass (17%)

gluon energy (34%)

陽子質量の内訳

中間子交換描像を超える新奇な原子核とハドロンの理解



原子核 ≠ 核子の重ね合わせ

原子核内部では、核子中のクォークやグルーオンの振る舞いに変化し、核子間の相互作用が影響を受ける。
 (短距離核子相関、 $d \cdot \alpha$ クラスタ、3体力) *e+d, e+³HeでのNNとNNN相関

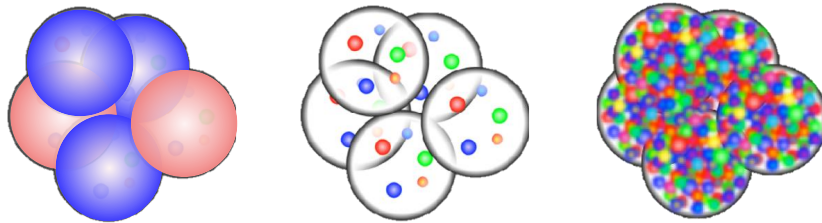
エキゾチックなハドロンや原子核

クォーク4、5、6個からなる新種のハドロンが発見されている
 (d励起状態、テトラ・ペンタクォーク、K中間子原子核、ハイパー核)

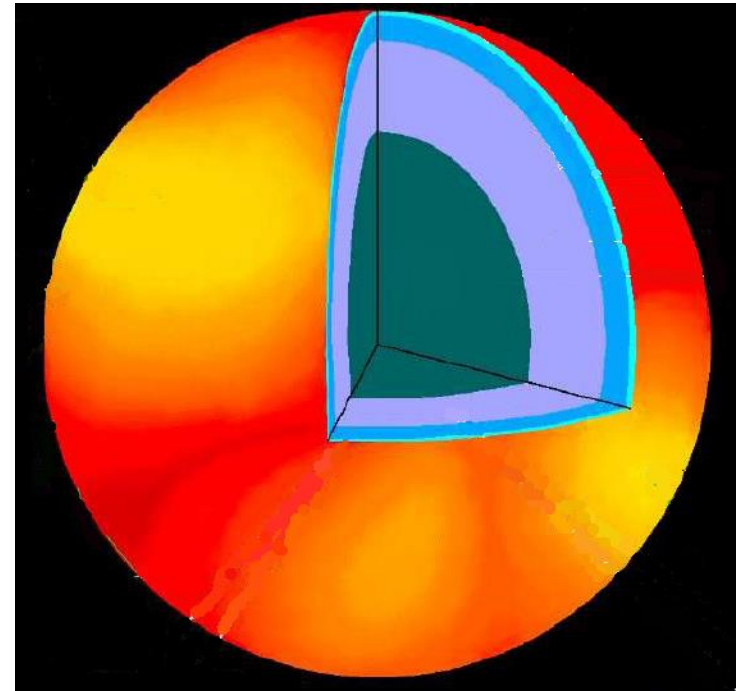
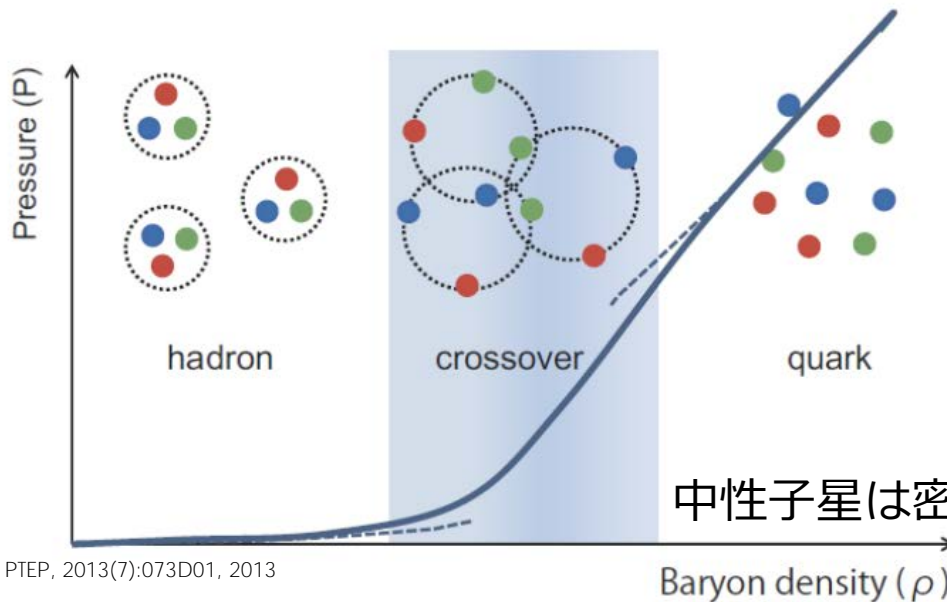
これらの現象を理解するには、**クォークとグルーオンのダイナミクスとクォークから原子核までの階層を超えた知見が不可欠**

中性子星の内部構造の理解

原子核や核子がクォークとグルーオンに分解していく様子
中性子星内部のような超高密度物質の理解につながる



EICはエネルギーの関数



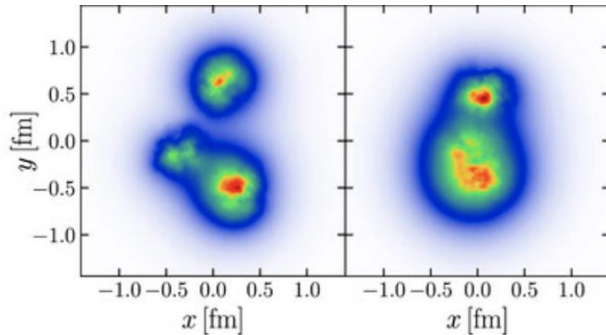
クォーク・グルーオンプラズマの理解

「量子ゆらぎ」の根源的理解

→ クォークグルーオンプラズマの初期条件 → 輸送特性の正確な理解

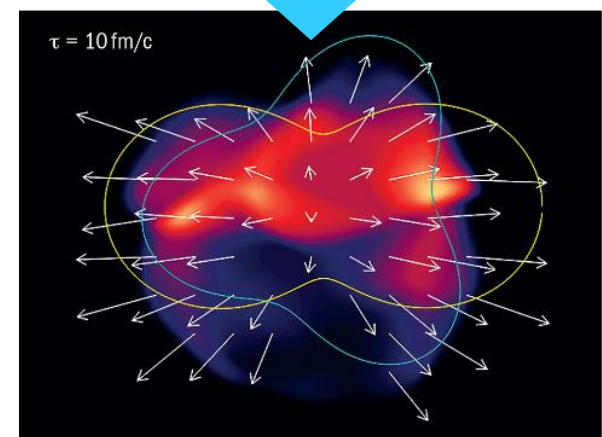
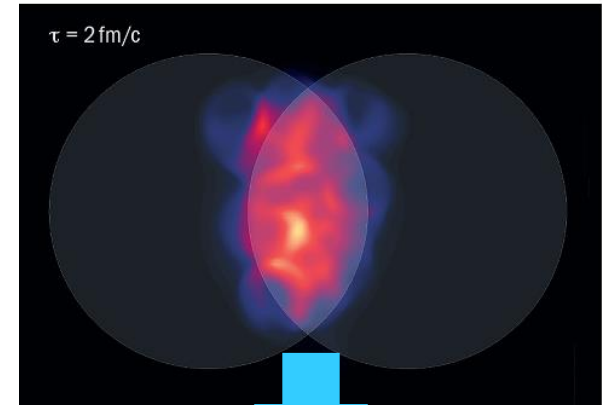
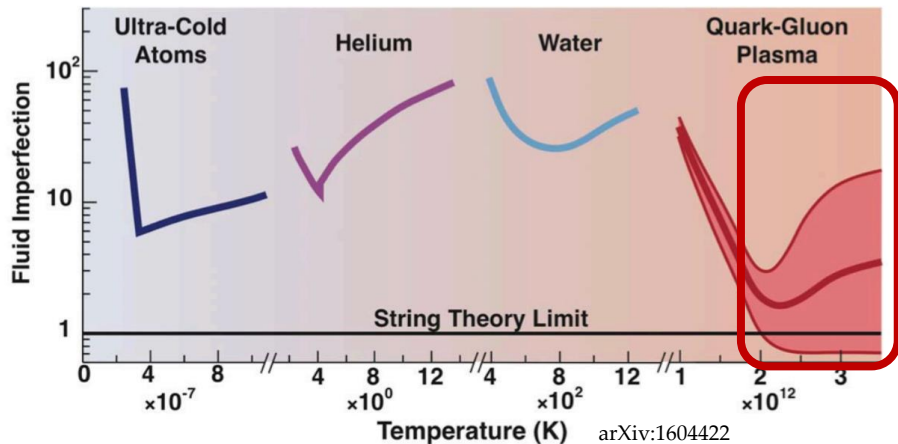
陽子や原子核の量子揺らぎ

原子核衝突の初期条件



Björn Schenke 2021 Rep. Prog. Phys. 84 082301

様々な物質の粘性

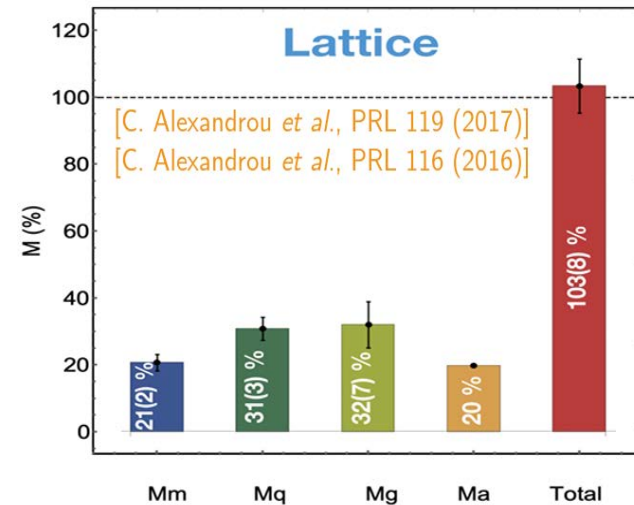
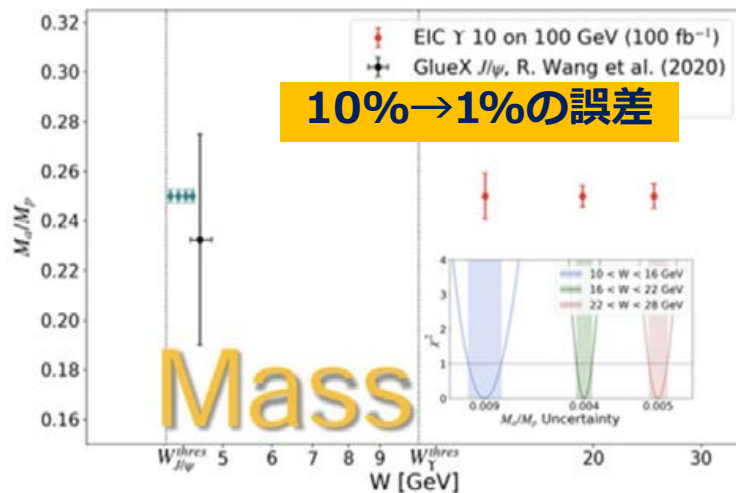


実験と計算科学の好循環

EIC実験が精密な実験データを提供

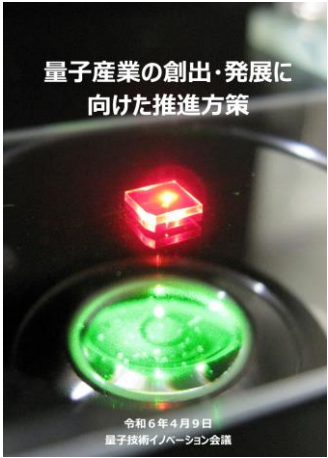
富岳をはじめとする格子QCD計算と量子計算の発展

EICに関連するパートン分布関数や、粒子生成など実時間現象については、古典計算よりも量子計算が威力を発揮する可能性が高い



- 真空から核構造・中性子星まで、原子核全体にブレークスルーをもたらす
- 加速器実験、量子センシング、スパコン、量子コンピュータが一体となった「相対論的量子物質科学」
 - (量子計算で)核構造から非平衡過程まで記述できれば、核物理は完成(私見)
- 科学技術やイノベーション創出を支えるための学理へと発展する

科学技術やイノベーション創出を支えるための学理



<“Fundamental Quantum Science 構想”>

- ✓ 量子科学技術を幅広く応用するためには、新たな量子デバイスの構成要素として有望とされる核スピンのコヒーレンスの起源や、外部環境との相関を考慮に入れた量子開放系の挙動等、未解明な学理に対する理解を深め、量子系の能動的制御を可能にすることが必要であり、広い意味での核物理、光・レーザ、情報学、数学等の科学の理解が極めて重要となる。大学等の学科・専攻で、このような学問を探究し、卓越した研究成果を創出できる優秀な人材の育成が必要である。
- ✓ このため、量子系の能動的な制御に向けた量子科学技術の基礎学理を探究する大学・研究機関等の研究体制を抜本的に強化し（Fundamental Quantum Science 構想）、国内外の優秀な若手研究者を惹き付け、卓越した研究成果を創出できる優秀な人材の育成を進める。

激動する核融合研究の中で学術研究が果たすべき役割

*内閣府HP https://www8.cao.go.jp/cstp/fusion/fusion_gaiyo.pdf



<“核融合・フュージョンエネルギー”への貢献>

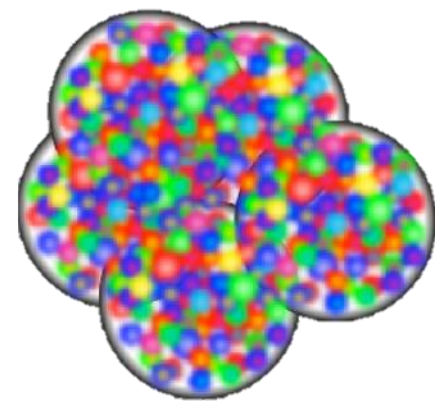
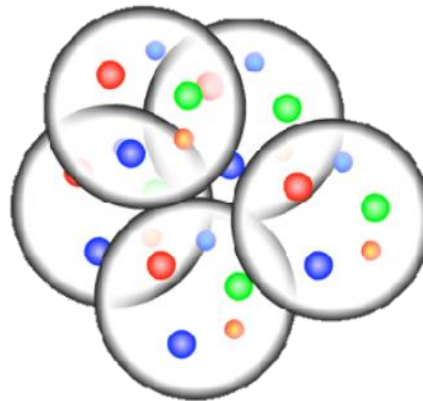
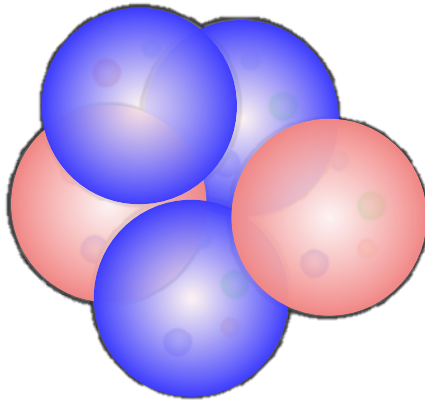
- ✓ 核融合研究は、量子（イオンと電子）の多体系が非線形相互作用する系の集団運動の解析。原子核物理も量子（クォークとグルーオン、核子）の同様の解析を目的としていて、共通の数学的構造
- ✓ 核融合の実験は、超伝導マグネット、センシング、データ処理等、原子核物理の加速器実験と要素技術や分析手法は共通
- ✓ 原子核物理と核融合研究の新たなフェーズでの融合（共同研究、人材の流動等）により、イノベーションにつながる基礎学術の発展を通して、経済社会の変革を実現

核子・原子核 = 量子もつれや量子性が強固に保たれた系

核子のもつれ

(構成子)クォークのもつれ

グルーオンのもつれ



FQSにおける核物理

- スピン・フレーバー・カラーの量子もつれがつくる核子や原子核の構造・秩序やダイナミクスを階層を超えて探求し、“強靱な量子性”を発現させる基本原理を解明する。
- クォーク・原子核階層における非平衡開放系の挙動、量子相関のデコヒーレンスや散逸の原理を探求する

原子核物理 = 基礎量子科学の学理探求の核心

量子多体系の創発

ダイナミクス

- 複数の量子がお互いの振る舞いを感じながら相関を持つことで発現する創発ダイナミクスの基礎原理を解明
- 物性科学、原子分子科学、化学の分野を超えた総合的な研究を展開し、日常的環境下かつ巨視的なスケールの現象に潜在する量子性を明らかにする

量子強靱化

- 量子コンピュータが正確に動作するための量子コヒーレンスの保持など、“強靱な量子性”を発現させる基本原理の探求
- 量子系に特有の量子もつれとそのデコヒーレンスの問題、環境からの擾乱による散逸の問題、量子情報の基礎理論

Fundamental Quantum Science

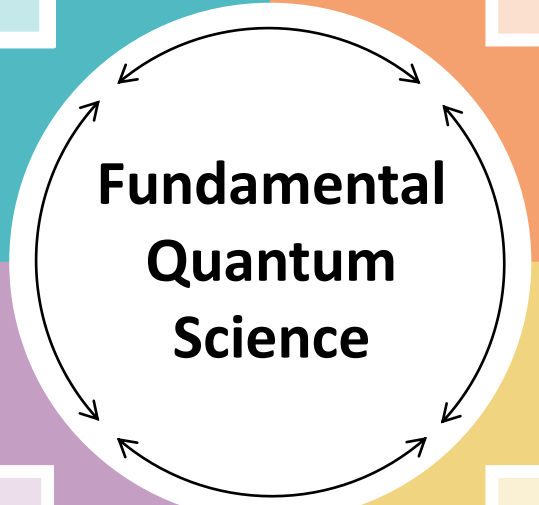
量子開放系の非平衡現象

- 量子系はほとんどの場合、環境と接触しておりエネルギーや物質の流れを伴う非平衡開放系である。これを記述する理論体系は未だ完成されていないが、量子統計力学に情報という観点を持ち込むことで新しい発展が期待される。

量子極限計測

- 量子とはそもそも「離散的な塊」を意味し、物理量がデジタルであることを示している。この事実は、物理量が極限的な精度で定まることを意味している。極限的な精度をもつ量子極限計測の原理構築と実装を行う。

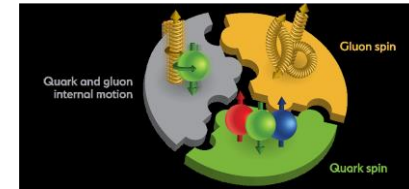
原子核物理 = 基礎量子科学の学理探求の核心



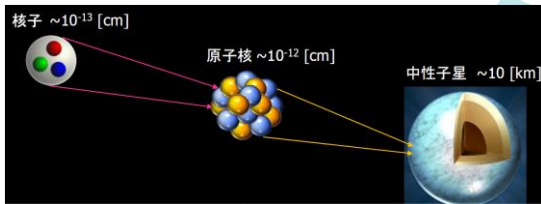
量子多体系の創発
ダイナミクス

量子強靱化

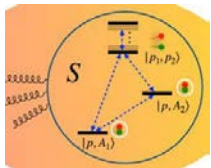
核子～原子核における
スピンとフレーバーの
量子もつれ



クォーク～原子核
～元素～中性子星
にいたる階層構造

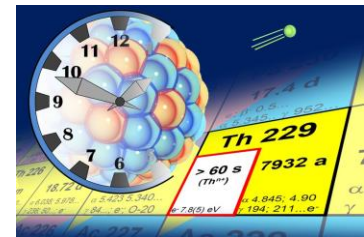


クォーク・グルーオン系
の非平衡状態
重元素生成反応
非束縛原子核系

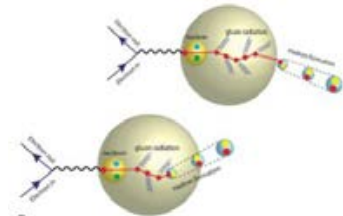
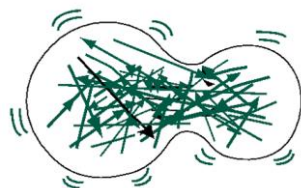


量子開放系の
非平衡現象

量子極限計測

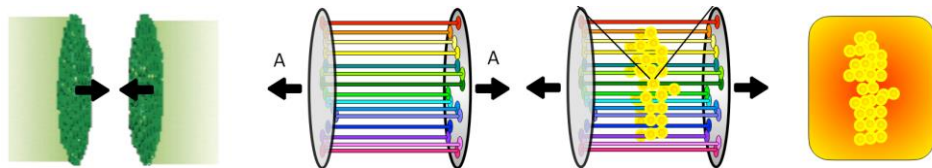


原子核時計による
超精密時間測定

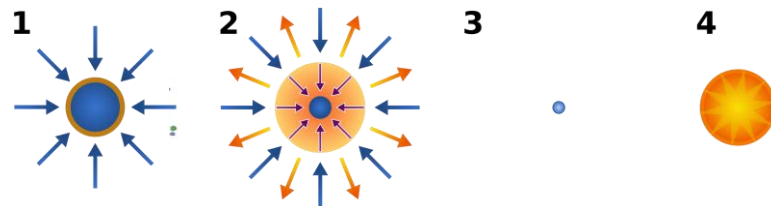


<“核融合・フュージョンエネルギー”への貢献>

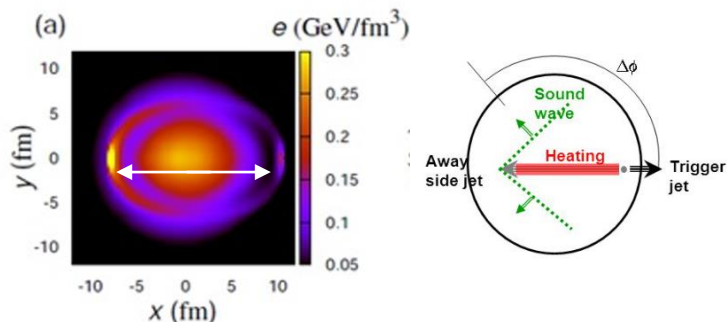
クォーク・グルーオンプラズマの熱化機構
クォーク・グルーオンプラズマの相対論的時空発展



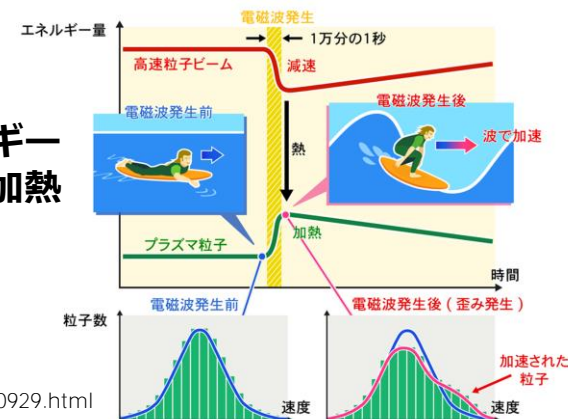
レーザー核融合のダイナミクス



クォーク・グルーオンプラズマ中での高エネルギー粒子のエネルギー損失と伝搬・再加熱（自己組織化）



核融合プラズマ中の高エネルギー粒子の挙動とプラズマの自己加熱

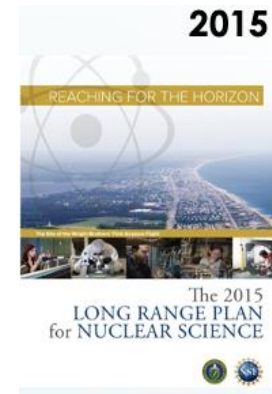


<https://www.nifs.ac.jp/news/researches/220929.html>

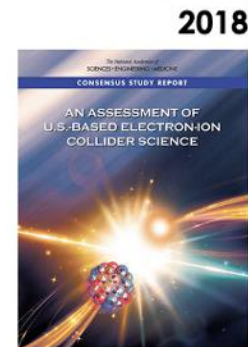
互いの交流・連携がプラスになると期待

- ・ 高密度プラズマの基礎学理（非線形効果、揺らぎ、構造形成、開放系、輸送特性、阻止能）
- ・ ミクロ（高エネルギー粒子）とマクロ（流体）の共進化
- ・ ミクロからマクロをつなぐ（粒子から流体へ）マルチスケール・シミュレーション技術
- ・ より効率的な新しい核反応の探索（例、 p -B反応）
- ・ 技術（高精細測定器、放射線耐性、高速データ収集と処理）と人材育成

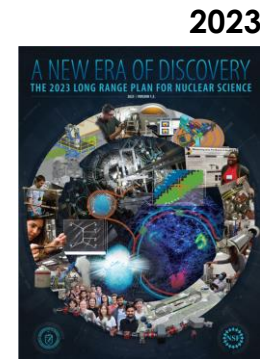
- 2015年：原子力科学諮問委員会(NSAC)による長期計画の策定
 - 新規施設建設の最優先課題
- 2018年：米国科学アカデミー (NAS) による科学的及び社会的インパクトに対する高評価の答申を得た
- 2019年12月：米国DOEによるCD-0の承認
 - 科学的意義の承認
- 2020年1月：ブルックヘブン国立研究所 (BNL) が建設場所として選ばれた
- 2021年：検出器コラボレーションの形成と提案
 - 2021年3月：検出器提案のコール
 - 2021年12月：3つの検出器提案の提出
- 2021年6月：米国DOEによるCD-1の承認
 - 計画の大筋と予算\$1.7B-\$2.8Bの承認
- 2023年：NSACの長期計画における最重要施設計画に



“These questions can only be answered with a powerful new electron ion collider (EIC), providing unprecedented precision and versatility. The realization of this instrument is enabled by recent advances in accelerator technology. We recommend a high-energy high-luminosity polarized EIC as the highest priority for new facility construction following the completion of FRIB.”



“In summary, the committee finds a compelling scientific case for such a facility. The science questions that an EIC will answer are central to completing an understanding of atoms as well as being integral to the agenda of nuclear physics today. In addition, the development of an EIC would advance accelerator science and technology in nuclear science; it would also benefit other fields of accelerator-based science and society, from medicine through materials science to elementary particle physics.”

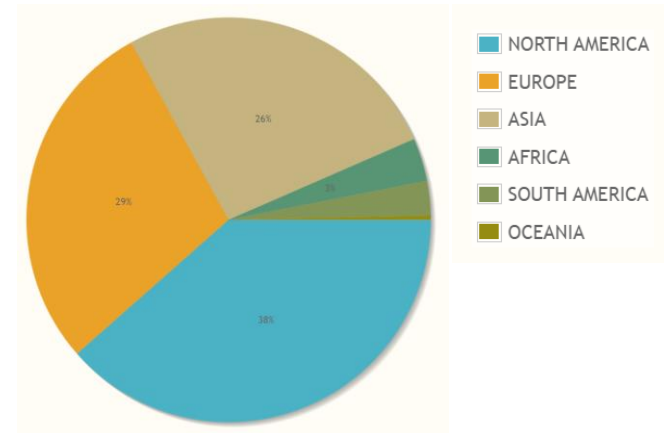
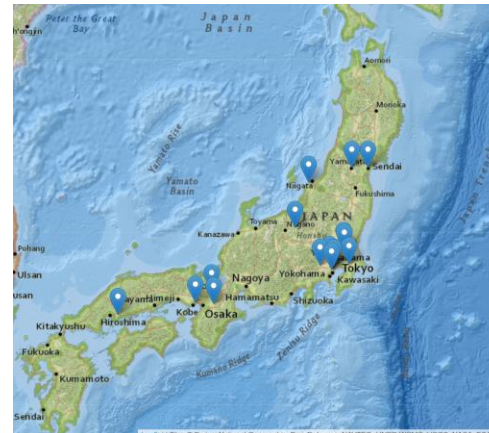
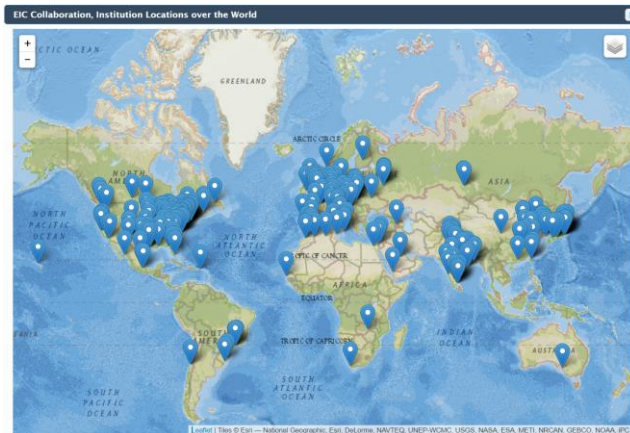


“We recommend the expeditious completion of the EIC as the highest priority for facility construction. The EIC will be a unique, large-scale, high-luminosity electron-hadron collider and the only new major advanced collider to be built in the world in the next decade..... The EIC was put forward as the highest priority for new facility construction in the 2015 Long Range Plan. Since then, the EIC was launched as a DOE project in 2019, and the conceptual design was approved in 2021. Its expeditious completion remains the highest priority for facility construction for the nuclear physics community.”

▶ EIC ユーザーグループの設立（2016年）

<https://www.eicug.org/>

- ▶ 1400の研究者、38カ国、290の機関から構成
- ▶ セミナーの定期的な開催。EIC Users meetingの開催(年1回)



▶ Resource Review Boardの設立

- ▶ EICの予算状況や予算計画に関する議論
- ▶ 約10カ国の資金提供機関の代表者が参加
 - ▶ 日本は郡司・後藤(理研)がオブザーバー参加
- ▶ これまで3回開催（2023.4, 2023.12, 2024.5）



- ▶ 各国が予算をつけ始めている段階
 - ▶ イギリスが\$74.2M(加速器も含む)のサポートを決定 (2024.3)
 - ▶ イタリアやフランスも準備中



Newsroom Photos Videos Fact Sheets Lab History News Categories

Contact: [Karen McNulty Walsh](#), (631) 344-8350, or [Peter Genzer](#), (631) 344-3174

share: [f](#) [x](#) [in](#)

United Kingdom Invests in DOE's Electron-Ion Collider Project to Understand Matter at the Smallest Scale

March 27, 2024



John Hill, Deputy Director for Science and Technology at Brookhaven National Laboratory, with Ruqaiyah Patel, Deputy Director of UKRI North America, at a recent reception held by UKRI's North America office to mark the funding of EIC.

Editor's note: The following [news release](#) was issued today by the U.S. Department of Energy. Comments from DOE's Brookhaven National Laboratory and DOE's Thomas Jefferson National Accelerator Facility (Jefferson Lab) – partners in building the Electron-Ion Collider (EIC) – appear at the end of the news release. For more information about the EIC, contact: Karen McNulty Walsh, kmcnulty@bnl.gov (631) 344-8350.

The U.S. Department of Energy's (DOE) [Electron-Ion Collider](#) (EIC), a unique international particle collider being constructed to explore the building blocks of matter at the smallest scale, will get a significant boost from colleagues in the United Kingdom (UK). The UK Department for Science, Innovation and Technology (DSIT), through the UK Research and Innovation (UKRI) Infrastructure Fund, has announced its commitment to support UK personnel involved in research, development, and major equipment contributions towards the successful completion and subsequent research program of the EIC.

The contribution from DSIT is one of the first from DOE's international partners and will help to develop the new detector and infrastructure for the EIC. Spanning a period of seven years, the financial support from the DSIT will support a consortium of UK laboratories and universities to partner with the EIC collaboration. The EIC will be looking for answers to some of the most important questions in nuclear physics, like how [quarks and gluons](#) interact via the strong force to create the most fundamental building block in nature—the proton.

"The EIC is a great example of international collaboration. This unique collider will delve deeper than ever into the origin of the building blocks of nature – and breakthroughs from it will impact the world's understanding of the universe," said Asmeret Asefaw Berhe, Director of the DOE's Office of Science. "It continues a long-standing tradition of ground-breaking scientific exploration with one of DOE's oldest and strongest partners."

UKRI's support for EIC – £58.8 (\$74.2) million to develop new detector and accelerator infrastructure – came as part of the agency's [announcement](#) of plans for £473 (\$598) million investment in infrastructure to equip UK science and innovation for the future.

"Through these investments, UKRI continues to equip the research and innovation community with the tools it needs to explore and develop the science and technologies needed for the coming decades," said Mark Thomson, Executive Chair for the Science and Technologies Facilities Council and Infrastructure Champion for UKRI. "These projects will strengthen the UK community's quest for discovery and innovative applications. The long-term nature of this investment also helps to maintain the UK's key position on the world stage of research and innovation for the future. On a personal level, I am particularly pleased that today's announcement will strengthen the UK's collaboration with the U.S. Department of Energy, in the development and delivery of a major new scientific facility."

▶ 日本のリーダーシップへの期待

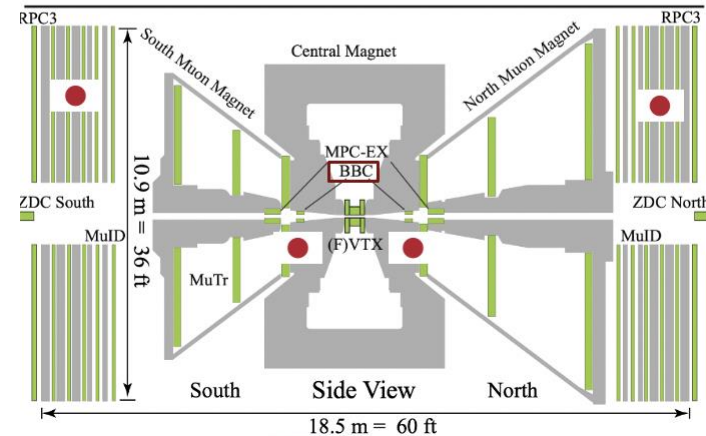
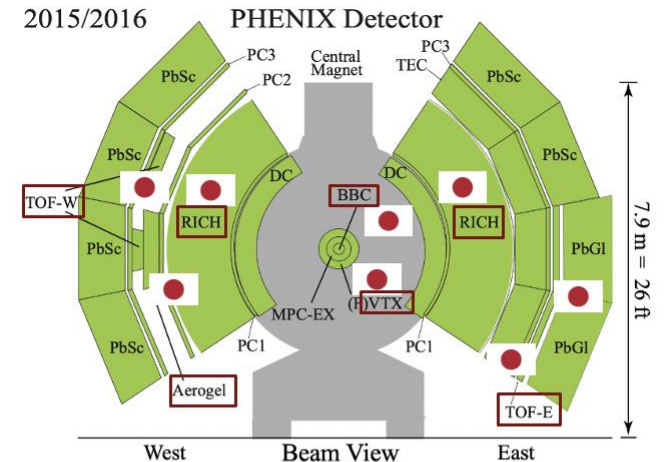
▶ BNLにおけるこれまでの日本の実績

▶ PHENIX実験

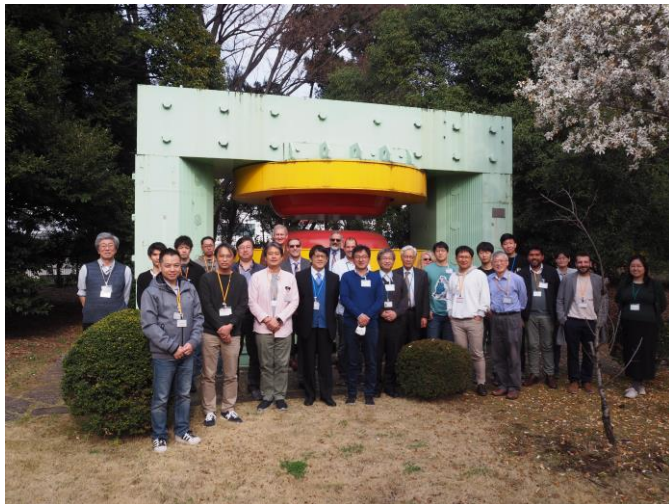
- ▶ 多くの検出器を建設 (30億/100億)
- ▶ 12機関、20%(~100人) T2Kと同規模
- ▶ 2人のスポークスパーソン
- ▶ QGP、スピン(日本発)を牽引
- ▶ 50名の博士号

▶ 理研BNLセンター

- ▶ 日本グループの最前線基地
- ▶ 国際頭脳循環と国内外の研究者人材育成
 - ▶ 日本に40名、米国に40名、欧州に10名のテニユアを輩出



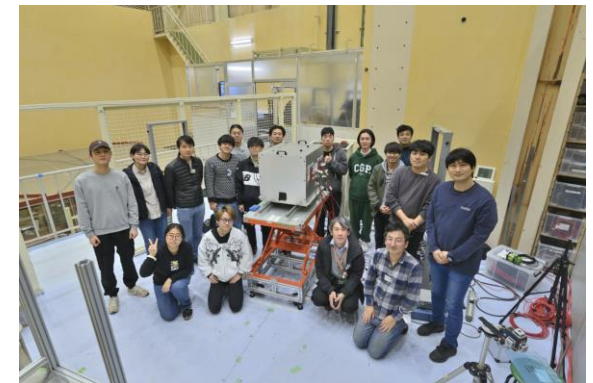
- ▶ US-DOE-BNLは日本にアジアを取りまとめる立場を期待
- ▶ アジア間の連携を強化：
 - ▶ EIC-Asiaワークショップの定期開催
 - ▶ 韓国(2022)、理研(2023)、台湾(2024)、中国(2024)
 - ▶ 月例EIC-Asia meeting (zoom)
 - ▶ 検出器やシミュレーションに関する共同研究



EIC-Asia workshop (2023)



ZDCビーム試験(2024)
日本・台湾・韓国



MAPSビーム試験(2024)
日本・韓国

▶ ePIC実験に参加する日本グループ（10の大学・研究機関 + SPADI）

- ▶ 核子構造（山形、理研、日本）
- ▶ 高エネルギー重イオン（東大、筑波、広島、奈良女）
- ▶ 高エネルギー素粒子物理（信州、神戸）
- ▶ データ収集系（SPADI-Alliance）

分野を超えて結集

▶ 現在、複数機関と議論中



SHINSHU UNIVERSITY

山形大学
YAMAGATA UNIVERSITY

University of Tsukuba

National University Corporation
Tsukuba University of Technology

Center for Nuclear Study
The University of Tokyo

RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science

RIKEN

NIHON UNIVERSITY

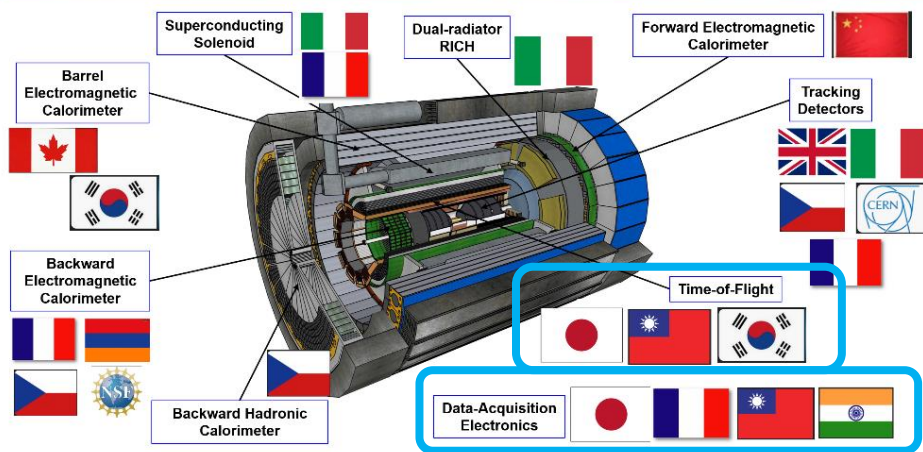
国立大学法人
奈良女子大学
Nara Women's University

KOBE UNIVERSITY

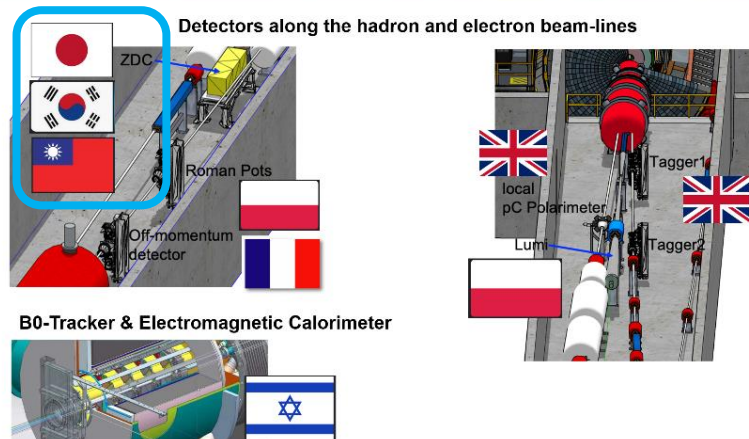
HIROSHIMA UNIVERSITY

SPADI Alliance
Signal processing and data acquisition infrastructure alliance

Central Detector Non-DOE Interest & In-Kind



Far-Forward/Far-Backward Detectors Non-DOE Interest & In-Kind



- ① TOF: 粒子を同定する高時間分解能のAC-LGADセンサー
- ② ZDC: 事象を判別する高空間分解能の半導体センサー
- ③ DAQ: AIベースのリアルタイム解析を伴う高度なデータ収集系

- ▶ 測定器を所有することで、その測定器を使ったデータ解析を主導
- ▶ データ収集系の主導は、その後のデータ解析の主導に直結
- ▶ 日本の基盤技術の国際標準化。RIBFやJ-PARC等に導入し、相互乗入を実現
- ▶ 量産開始：2026年

主要な役職の確保



Executive Board

At-Large Members: Barbara Jacak <bvjacak@lbl.gov>, Taku Gunji <gunji@cns.s.u-tokyo.ac.jp>, Paul Newman <paul.newman@cern.ch>
 DEI Member: Megan Connors <meganconnors@gmail.com>
 Early-Career Member: Fernando Flor <fernando.flor@yale.edu>
 Coordinators: Markus Diehenthaler <mdiefent@jab.org>, Salvatore Fazio <salvatore.fazio@unical.it>, Rosi Reed <rosijreed@gmail.com>



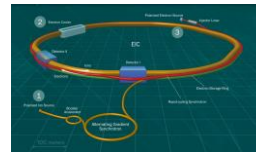
FAR FORWARD
 DSL: Alex Jentsch (BNL)
 DSTC (B0): Zvi Citron (Ben-Gurion)
 DSTC (Roman Pots/OMD): Alex Jentsch (BNL)
 Co-DSTC (ZDC): Yuji Goto (RIKEN)
 Co-DSTC (ZDC): Miguel Arratia (UCR)



AC-LGAD TOF
 DSL: Zhangbu Xu (Kent State)
 Dep. DSL: Satoshi Yano (Hiroshima)
 DSTC's: Mathieu Benoit (ORNL), Matthew Gignac (Santa Cruz)

③DAQ:AIベースのリアルタイム解析を伴う高度なデータ収集系

- Society 5.0「フィジカル空間とサイバー空間」の融合と実証
- 「良質なデータ」 x 「計算可能領域の拡張」 x 「AI x 数理で予測の科学」



良質で膨大なデータ

核子や原子核内部に関する良質なデータ
x 理論計算の良質なデータ
→ 将来の核物理や核エネルギーにむけた良質なデータを提供

計算可能領域の拡張

ストリーミングデータ処理における大規模なヘテロジニアス計算技術、理論計算の高精度化、量子コンピュータを用いたデータ解析や理論計算や反応計算



量子コンピュータ



スパコン「富岳」

AI x 数理で予測の科学を開拓

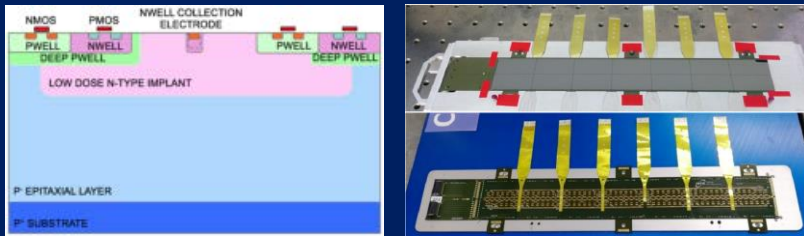
AI x 数理を大規模なリアルタイム環境下で実現 (100Tbpsのストリーミングデータ処理)

EICの理論計算 (格子QCD計算) が京・富岳のような超列計算機の開発をドライブ

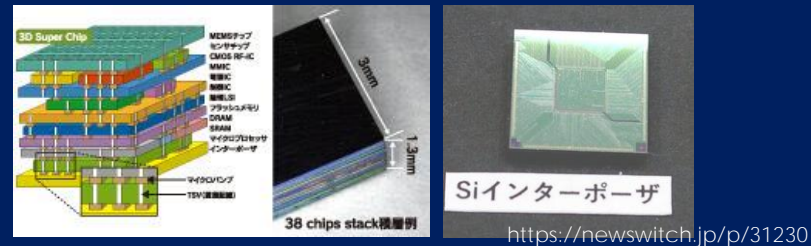
RIBFやJ-PARCやBelle2のみならずビッグデータ社会自体への波及効果も大きく、日本が中心となって進める意義は大きい (SPADI-Alliance)

- 加速器実験は最新テクノロジーの塊。測定器建設後も継続的に新しい技術開発を続けなければ、世界の技術進歩から取り残されてしまう
- ePIC実験の高度化(2040年、2050年頃)のための開発を継続
- 中核となる基礎技術は、高度半導体・量子センサー技術、高密度実装技術、高速省電力データ転送技術、ハードウェアアクセラレーション技術

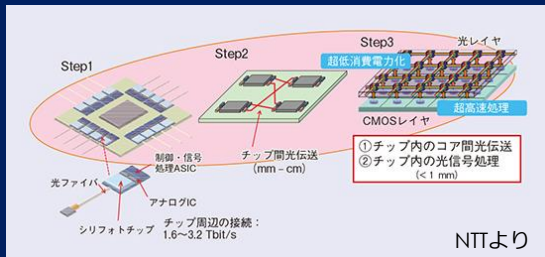
①高精度に「ものを見る」 TPSCo, 浜松ホトニクス (例、MAPSセンサー、LGADセンサー)



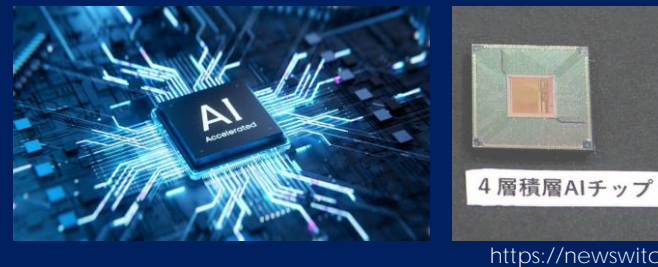
②高密度に「信号を集める」 東北マイクロテック (例、3次元積層、チップレット)



③超高速かつ低消費電力で「転送する」 NTT (例、オールフォトニクス)



④超高速に処理する 東北マイクロテック (例、FPGA, GPU, AIチップ)



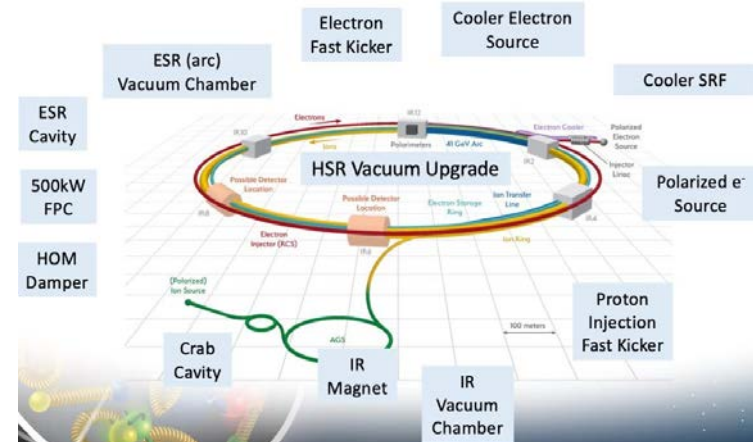
産学連携を加速し、次世代に向けた技術のプラットフォームを構築
様々な国際研究をリード、高度人材の育成、産学イノベーションの創出

▶ superKEKBの技術は重要

- ▶ クラブ交差技術
- ▶ シンクロトロン計算とBGの見積もり
- ▶ ビームパイプやコリメータのデザインとシミュレーション

▶ EIC Accelerator Collaborationの設立

- ▶ 技術の継承と人材育成
- ▶ 相互の加速器開発や運用へのコミット



EIC Accelerator Collaboration

- The EIC design, construction, and future upgrades have many exciting scientific and technical challenges, creating opportunities for a worldwide accelerator collaboration to become part of this exciting endeavor
- The EIC Accelerator Collaboration co-chairs
 - Prof. Carsten Welsch (Univ. of Liverpool, UK) and Prof. Andrei Seriyi (JLAB and Old Dominion University)
- The collaboration kick-off meeting will be held as a satellite meeting at the IPAC2024 conference in May 2024 in Nashville, TN, USA



IPAC24 EIC ACCELERATOR COLLABORATION SATELLITE EVENT

The Electron-Ion Collider (EIC) will be a discovery machine for unlocking the secrets of the "glue" that binds the building blocks of visible matter in the universe. It will be constructed at Brookhaven National Lab on the basis of the Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) and consist of two intersecting accelerators: one producing an intense beam of electrons, the other one a high-energy beam of protons or heavier atomic nuclei, which are steered into collisions.

EIC Accelerator Collaboration Charter

- The Charter describes the Collaboration structure and general rules
- Accompanied by the MoU, which is non-binding (staff matters, legal duties, IP, etc.), highly flexible when it comes to the Parties involved and the R&D covered, and easy to sign
- **Collaborative Working Groups** are topical groups that are established to cover variety of activities related to EIC. Activities of the Working Groups are coordinated by leaders, who are appointed by Co-Chairs of Accelerator Collaboration in coordination with ICB and EIC project Technical Director:
 1. Beam dynamics, beam optics
 2. Beam-beam effects
 3. Beam cooling at collisions
 4. Beam polarization generation, preservation and diagnostics
 5. Second IR
 6. EIC commissioning
 7. EIC upgrades
 8. In-kind accelerator contributions
 9. Synergies with other projects (e.g. FCC, MC)



理研

（仮称）物質・生命・宇宙を貫く量子干渉現象の解明に向けた量子基礎科学拠点

量子科学の潜在力を未来に向けて最大限に引き出すために、新たな視点で量子を基礎に立ち返って見直す「基礎量子科学拠点」を立ち上げる。EICがその柱の一つになる。

R7概算要求検討中



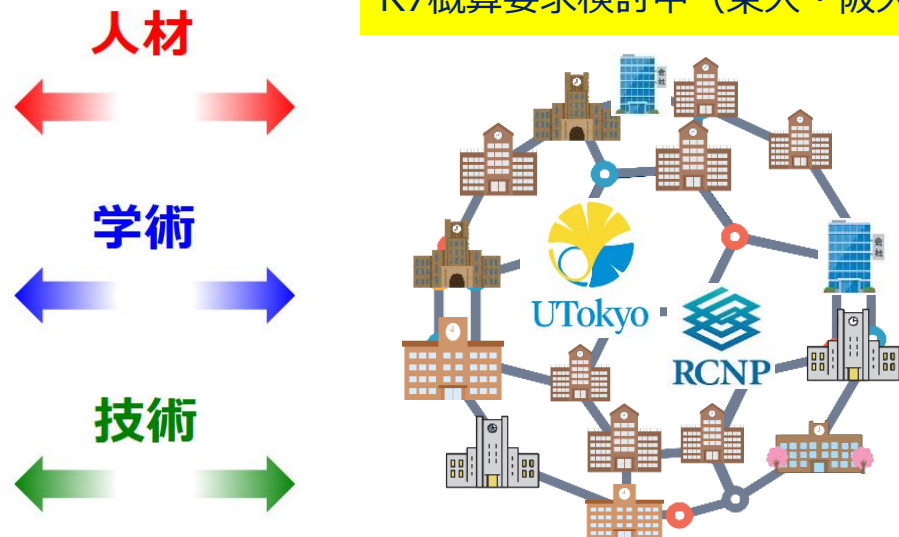
<https://ithems.riken.jp/ja/access/riken-wako-campus>

アカデミア

国際量子物理ネットワーク拠点(IQPN)

EICを推進するクォーク・核物理研究機構を東京大学に設置（R6年度）
大学間連携により、オールジャパン体制やアジアとの連携をもとに、大型国際共同研究を牽引する体制の確立

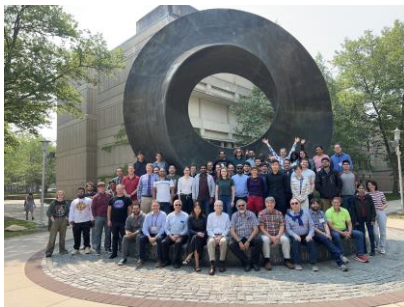
R7概算要求検討中（東大・阪大）



- **大学**：国内のアカデミアの知を集約し、優秀な人材を確保、技術の国際標準化を主導
- **理研**：測定器量産のためのインフラ、BNLにEIC拠点を整備、日本人研究者の受入・支援

大学教育

- 大学間連携や理研との連携による研究者育成事業
 - 組織横断的な大学教育の推進
 - トップレベル研究者による講義
 - 受け入れ教員の配置
 - 学生に対する研究費等の支援
- 学生や若手研究者向けの国際スクール
- BNLへの学部生の派遣
- BNL Summer student
- 海外の若手研究者の招聘と講義



CFNS-CTEQサマースクール(2023)

人材流動性

- 大学間連携や理研との連携によるブランチの創設
 - 理研内に大学のオフィス
 - 大学に理研のオフィス
 - 大学間のオフィス
- 若手研究者のステップアップのためのポジション
- 学生や若手研究者のBNL長期派遣のサポート
 - RBRCの活用：理研の職員・客員・所属学生だけでなく、コラボ全体を研究・生活両面から支援
- 理研と大学、大学間でのクロスアポイントメント

▶ 学会シンポジウム

- ▶ 2021年秋：Symposium 'Electron-Ion Collider (EIC) Project - Nuclei and nucleons explored by electrons -'

- ▶ **2024年秋（申請済）：電子ーイオン衝突型加速器EICが展開する新たな原子核・素粒子物理**

▶ 国内研究会・勉強会

- ▶ 「素粒子・原子核コライダー物理の交点」（2020年）

- ▶ **「EICで展開する新たな原子核・素粒子物理」（2024年5月末）**

- ▶ 約30の機関から合計約80名の参加（学生24名）

- ▶ **Streaming Readout workshop XII（2024年12月、日本で開催）**

- ▶ 高エネルギーQCD・核子構造勉強会(22回開催)

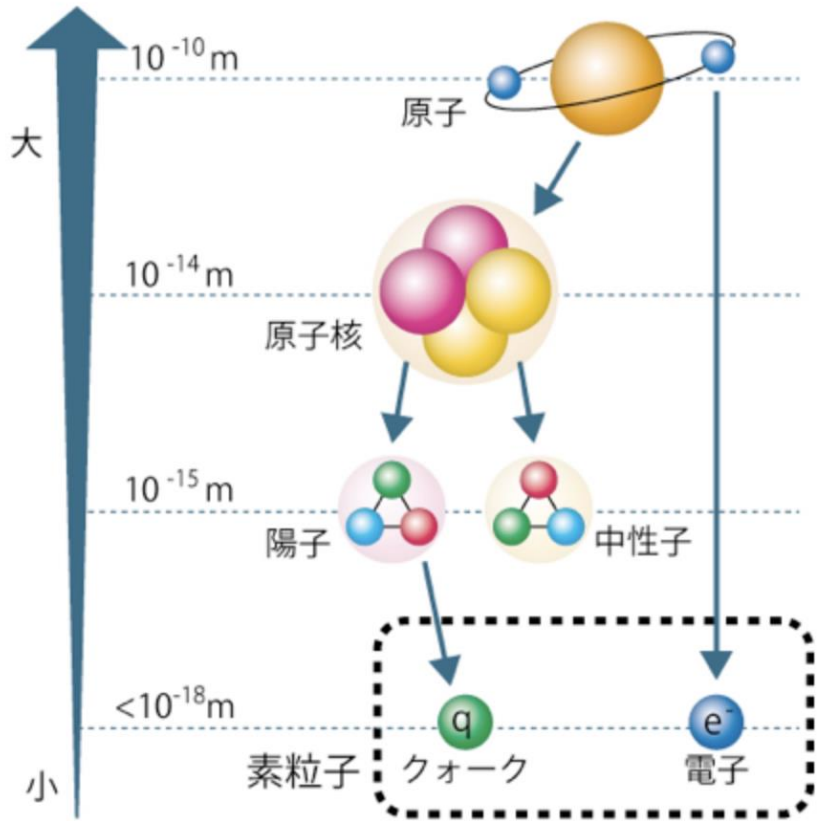
- ▶ Heavy-Ion Café (40回)、Heavy-Ion Pub(40回)

▶ 原子核談話会通信やQCDDMOFでの活動報告

- ▶ **コミュニティの理解を得ていく努力を継続する**

- ▶ **EICは、原子核3階層に飛躍的な新知見をもたらす**
- ▶ **EICの意義：**
 - ▶ クォークとグルーオンのダイナミクスから原子核に至る新しい知見
 - ▶ 量子技術やイノベーション創成に繋がる基礎学理の探求
 - ▶ 波及性の高いビッグデータ収集技術と次世代量子技術の確立
- ▶ **国際的な戦略：**
 - ▶ 各国が予算をつけ始めている。日本は、EICの成功を握る測定器やシステムを担当し（TOF/ZDC/DAQ）、その後の物理解析を主導し、物理結果を早期に創出する
- ▶ **組織体制：**
 - ▶ 東大QNSIと阪大RCNPを中核とする大学間連携と理研の体制を構築中
 - ▶ 人材育成およびEIC推進のために理研と大学側との連携体制を構築中
 - ▶ アジア間の連携

補足資料



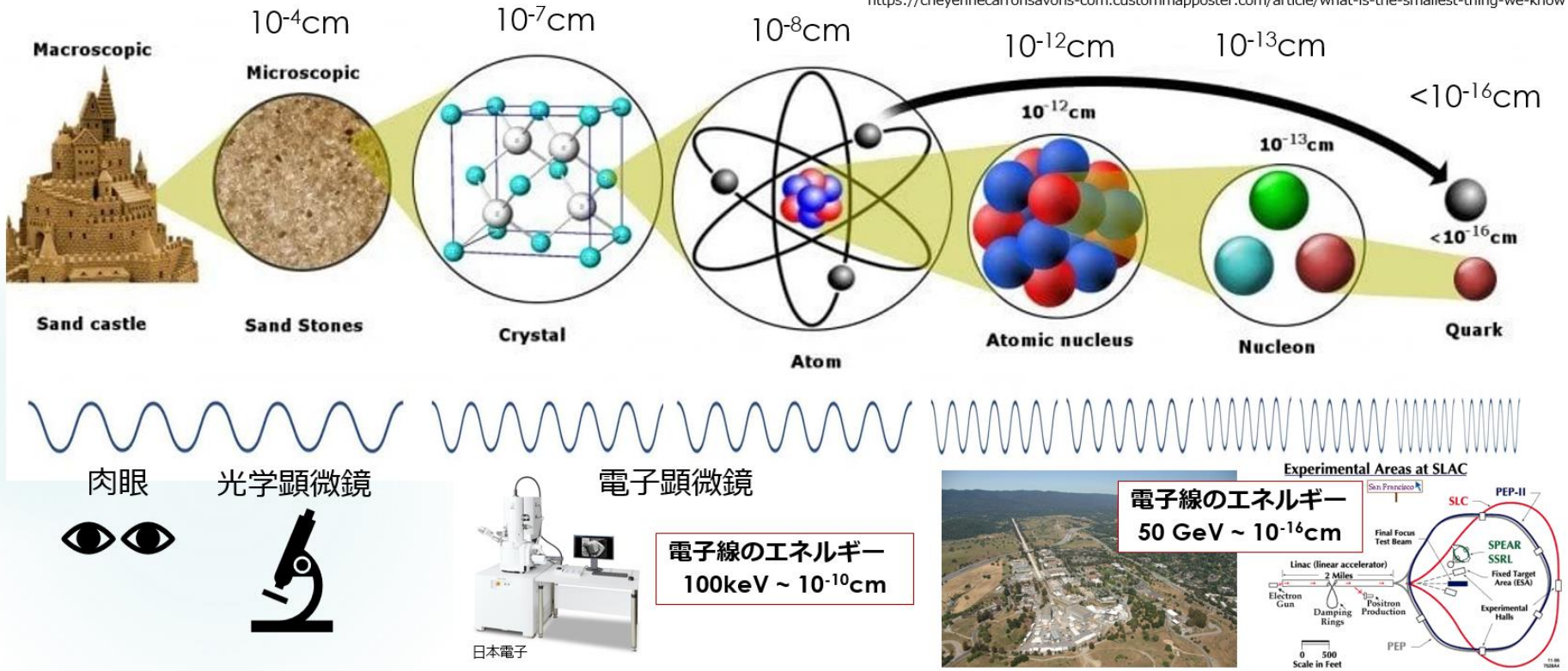
	第1世代	第2世代	第3世代
クォーク	アップ u	チャーム c	トップ t
	ダウン d	ストレンジ s	ボトム b
レプトン	ν_e eニュートリノ	ν_μ μ ニュートリノ	ν_τ τ ニュートリノ
	e 電子	μ ミューオン	τ タウ
	物質粒子		
強い力	弱い力	電磁力	
グルーオン g	$W^+ W^-$ W ボソン	γ 光子	H ヒッグス粒子
	Z Z ボソン		ヒッグス場に 伴う粒子
力を伝える粒子			
標準理論に含まれる素粒子			

出典：東京大学素粒子物理国際研究センター

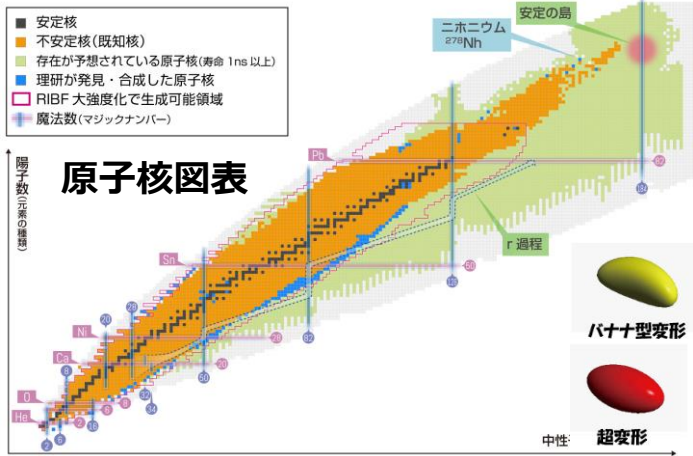
クォークとグルーオンから核子（陽子や中性子）、核子から原子核に至る階層性が如何にして生まれるのかを理解する

加速器の必要性

<https://cheyennecarronsavons-com.custommapposter.com/article/what-is-the-smallest-thing-we-know>



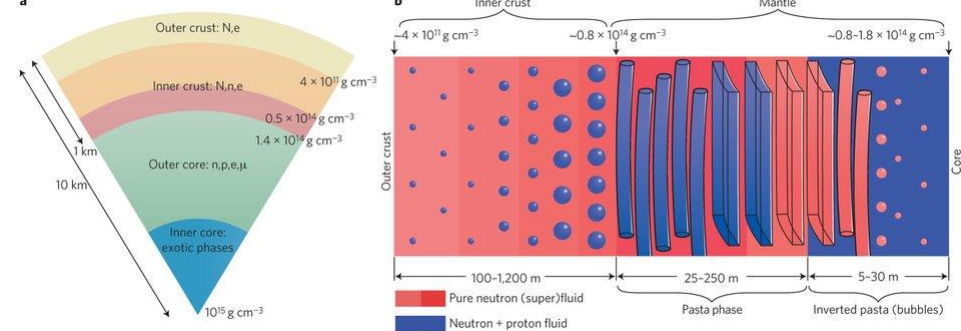
原子核より小さな世界は大型加速器を使わないと見えない



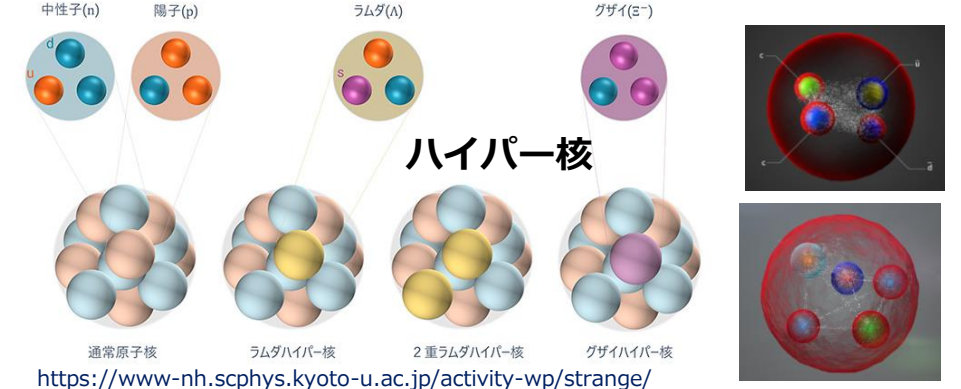
原子核図表

変形核

中性子星の内部構造

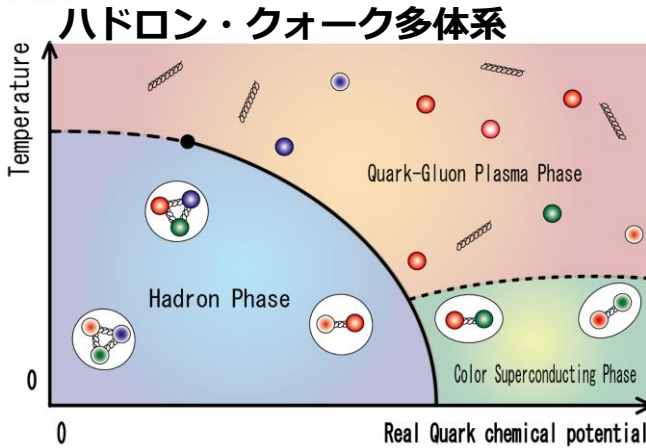


エキゾチックハドロン

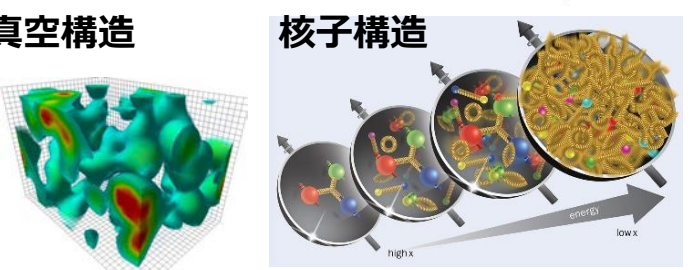


ハイパー核

<https://www-nh.scphys.kyoto-u.ac.jp/activity-wp/strange/>



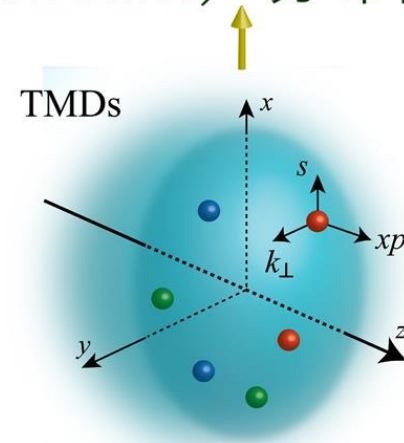
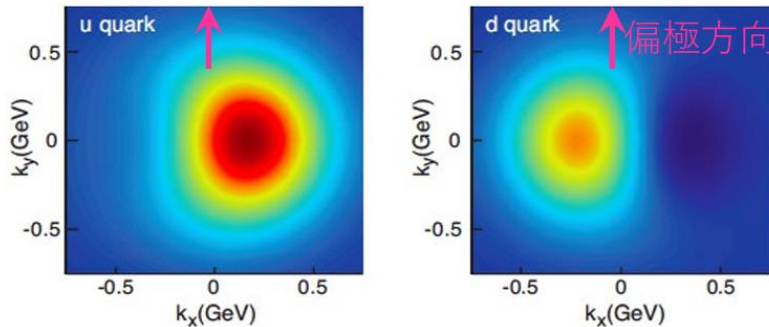
ハドロン・クォーク多体系



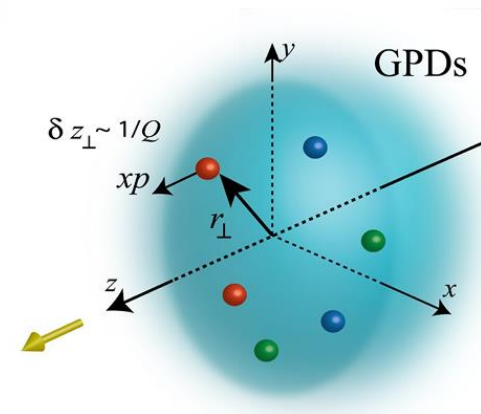
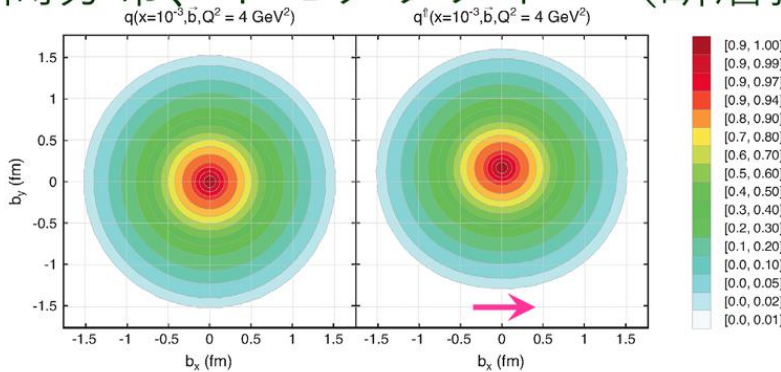
QCDを使って、クォークや核子多体系の多様性を統一的に理解できるか？

核子内のクォーク・グルーオン分布の3次元構造

- 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）



核子内のクォーク・グルーオン分布の3次元構造

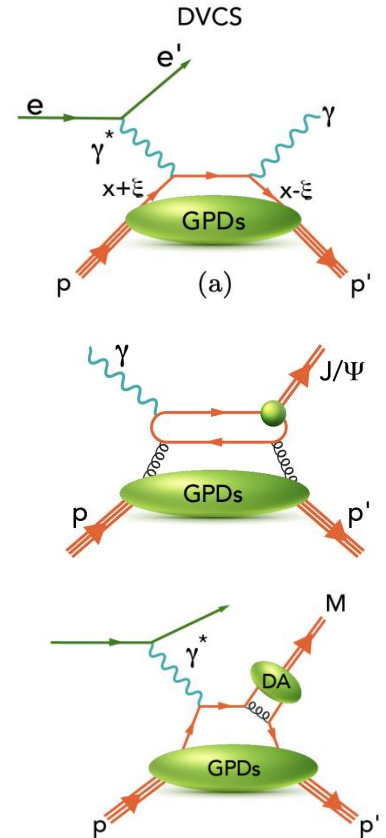
$$T^{\mu\nu} = \begin{bmatrix} \text{Energy density} & & & \\ T_{00} & T_{01} & T_{02} & T_{03} \\ \text{Energy flux} & \text{Momentum density} & & \\ T_{10} & T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{20} & T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{30} & T_{31} & T_{32} & T_{33} \\ & \text{Momentum flux} & & \end{bmatrix}$$

Shear stress
せん断応力

Normal stress (pressure)
垂直応力

$$\langle p', \vec{s}' | T_a^{\mu\nu} | p, \vec{s} \rangle = \bar{u}(p', \vec{s}') \left[A_a(t) \frac{P^\mu P^\nu}{M_N} + \underline{D_a(t)} \frac{\Delta^\mu \Delta^\nu - g^{\mu\nu} \Delta^2}{4M_N} + \bar{C}_a(t) M_N g^{\mu\nu} + \underline{J_a(t)} \frac{P^{\{\mu} i\sigma^{\nu\}\lambda} \Delta_\lambda}{M_N} - \underline{S_a(t)} \frac{P^{[\mu} i\sigma^{\nu]\lambda} \Delta_\lambda}{M_N} \right] u(p, \vec{s})$$

Angular momentum Spin



③ 核子のスピン問題

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

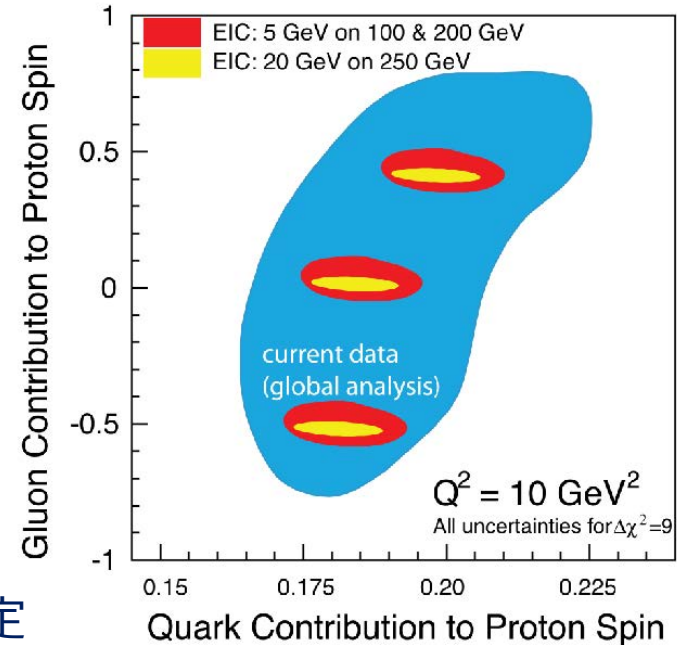
$\Delta\Sigma/2$ = Quark contribution to Proton Spin

L_Q = Quark Orbital Ang. Mom

Δg = Gluon contribution to Proton Spin

L_G = Gluon Orbital Ang. Mom

- EICで偏極DISによりグルーオンスピンの寄与を測定
- GPD and Ji sum rule (1997)



$$\frac{1}{2} = J^q(\mu) + J^g(\mu)$$

Ji Sum rule (1997)

$$J^q(\mu) = \frac{1}{2} \Delta\Sigma + L^q(\mu)$$

Spin of quarks contribution

Orbital angular momentum of quarks

$$J^q = \int dx x [H^q + E^q]$$

$$J^g = \int dx [H^g + E^g]$$

Total angular momentum of gluons

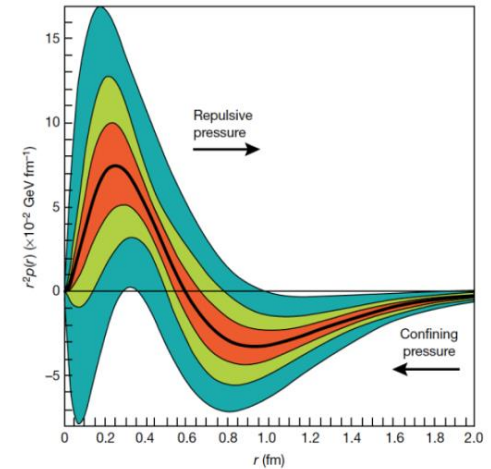
② クォークの結合問題

$$D(0) = -\frac{4}{15} M_N \int d^3r r^2 s(r) = M_N \int d^3r r^2 p(r)$$

Shear stress

Pressure

Jefferson LabのGPDデータを用いた圧力分布



Nature, 557, May 17, 2018

① 物質の質量問題

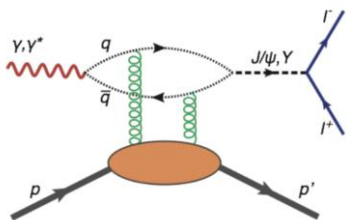
$$T_{\mu}^{\mu} = m_q \bar{\psi}_q \psi_q + \gamma_m m_q \bar{\psi}_q \psi_q + \frac{\tilde{\beta}(g)}{2g} F^2$$

$$M = \frac{\langle p | \int d^3x T^{00}(0, \mathbf{x}) | p \rangle}{\langle p | p \rangle} \Big|_{\text{at rest}} = \underbrace{M_q + M_g}_{\text{quark \& gluon energies}} + \underbrace{M_m}_{\text{quark mass}} + \underbrace{M_a}_{\text{trace anomaly}}$$

$$M_q = \frac{3}{4} \left(a - \frac{b}{1 + \gamma_m} \right) M, \quad M_g = \frac{3}{4} (1 - a) M,$$

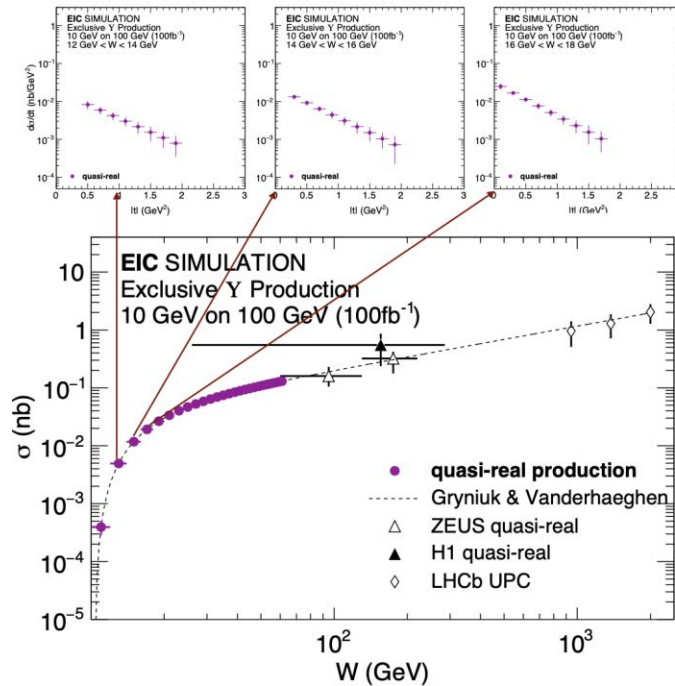
$$M_m = \frac{4 + \gamma_m}{4(1 + \gamma_m)} b M, \quad M_a = \frac{1}{4} (1 - b) M$$

a = quark momentum fraction
b = QCD trace anomaly parameter

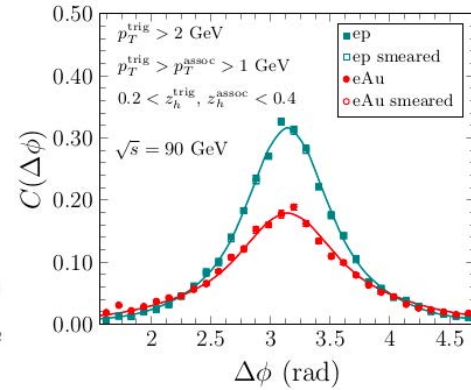
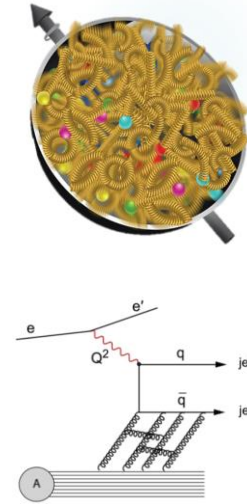
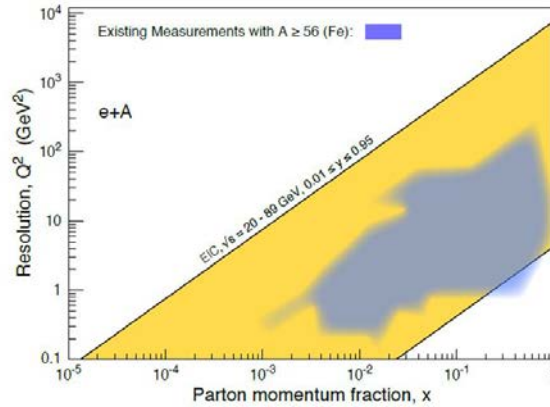
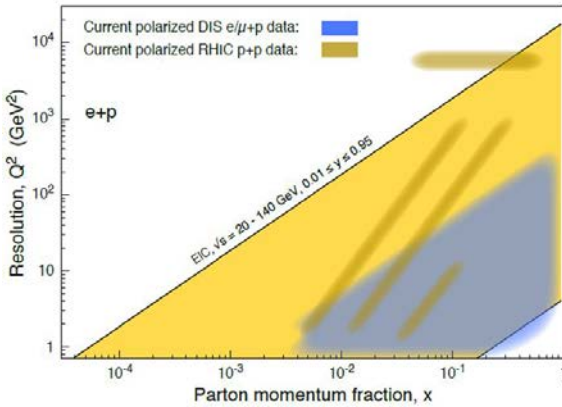


$$\frac{d\sigma_{J/\psi N \rightarrow J/\psi N}}{dt} \Big|_{t=0} = \frac{1}{64\pi} \frac{1}{m_{J/\psi}^2 (\lambda^2 - m_N^2)} |F_{J/\psi N}|^2$$

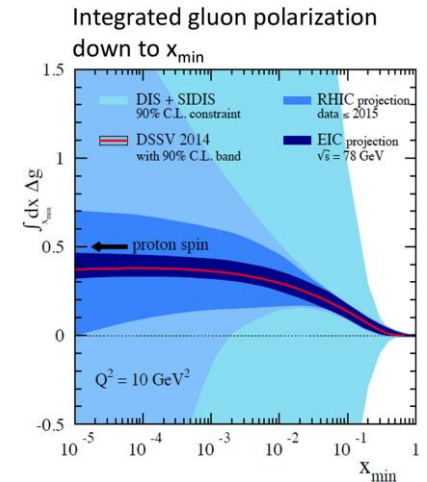
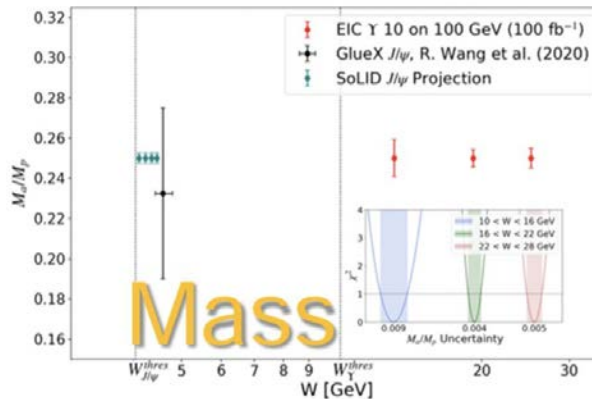
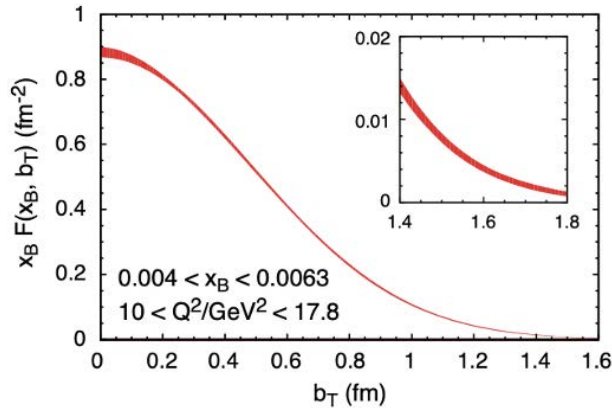
$$F_{J/\psi N} \simeq r_0^3 d_2 \frac{2\pi^2}{27} 2M_N^2 (1 - b).$$



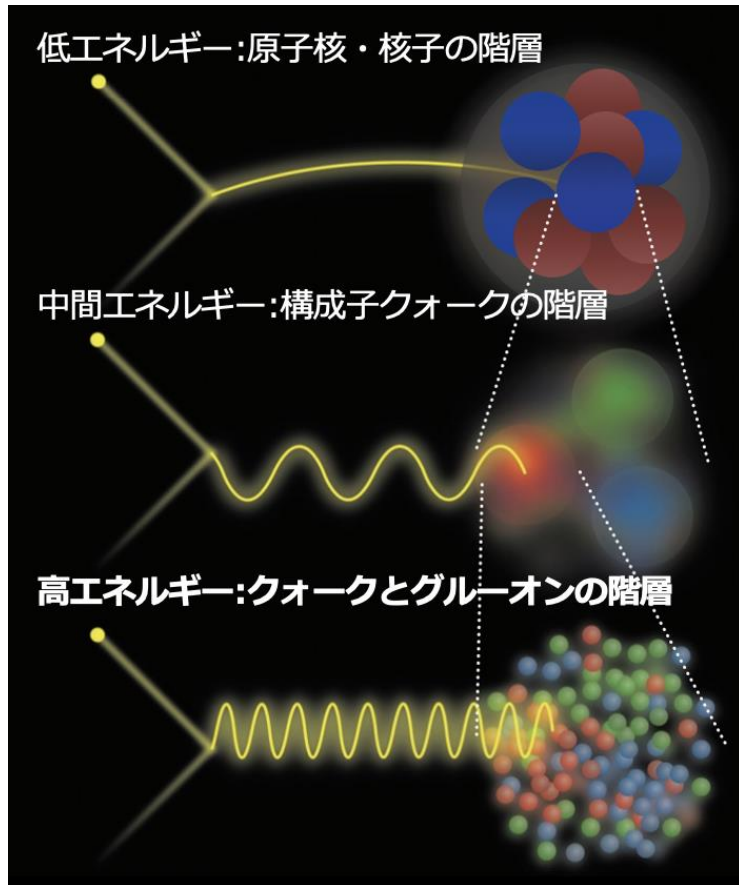
未踏の(x, Q²)を走査→ 構造とダイナミクスの完全な理解へ



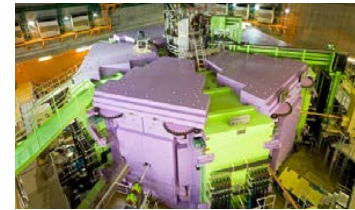
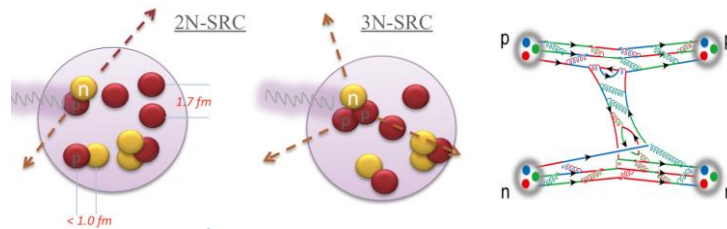
高いビーム輝度→3D構造、質量、スピンの理解へ



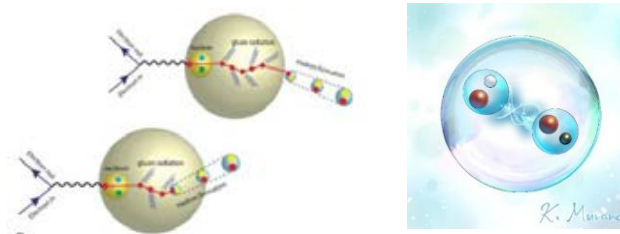
仮想光子のエネルギーを実験で選択可能
核子～構成子クォーク～クォーク階層にまたがる研究が可能
→ 階層の枠を超えた研究、国内外施設との連携強化



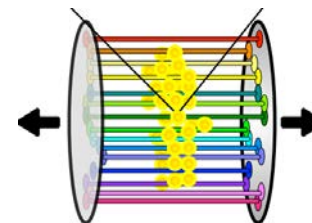
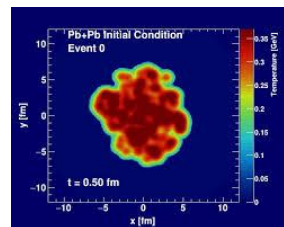
短距離核子対相関、EMC効果

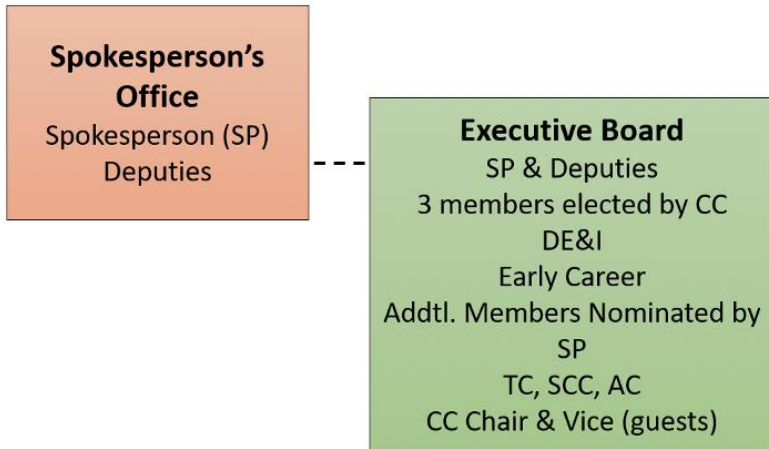


ハドロン化・ハドロン構造・質量獲得機構





QGP初期条件・早期熱化機構





At-large members:

Barbara Jacak (Berkeley), Taku Gunji (Tokyo), 

Paul Newman (U. of Birmingham) 

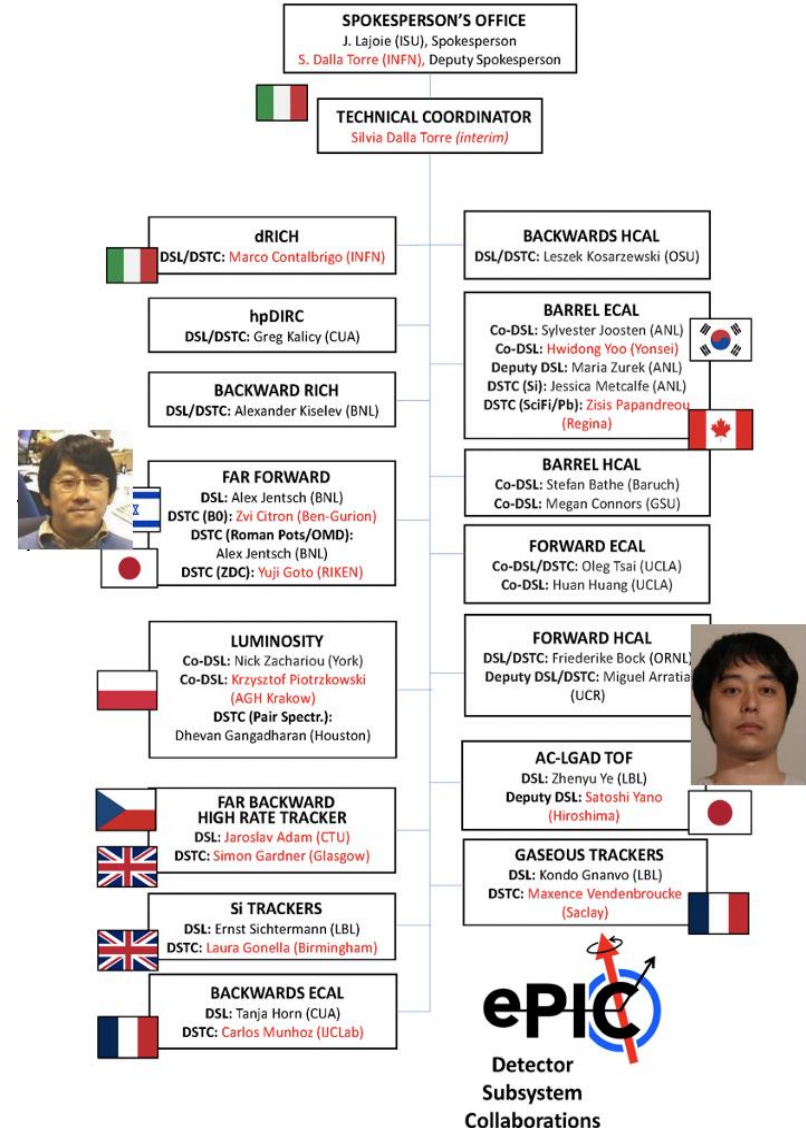
DEI member: Megan Connors (GSU)

Early Career member: Fernando Flor (Yale U.)

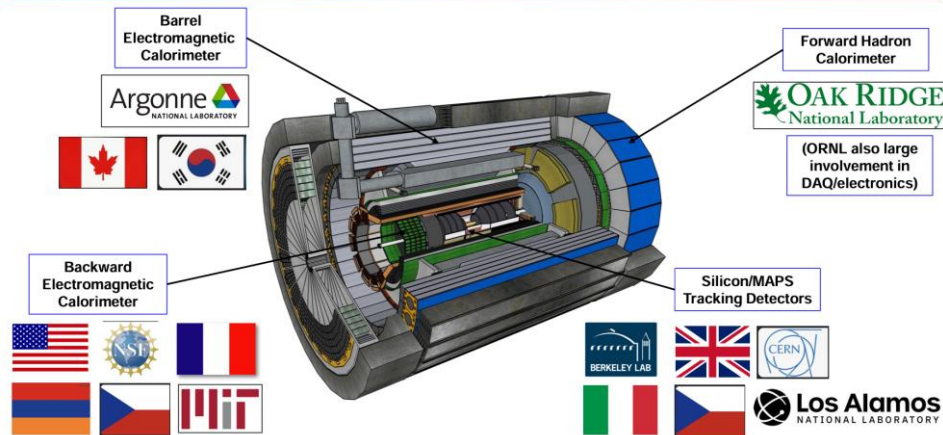
Top level coordinators: Markus Diefenthaler (JLab), Salvatore Fazio (Calabria), Rosi Reed (Lehigh U.), TC (vacant)



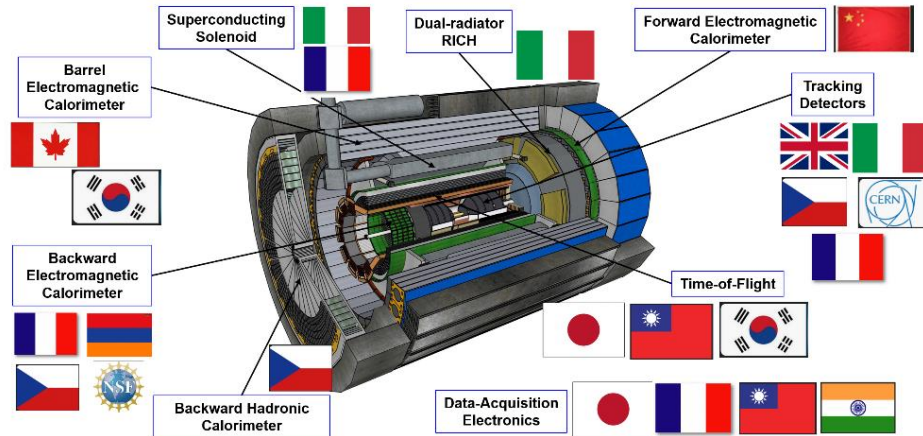
CC chair and vice-chair (non-voting): Ernst Sichtermann (LBNL), Bernd Surrow (Temple U.)



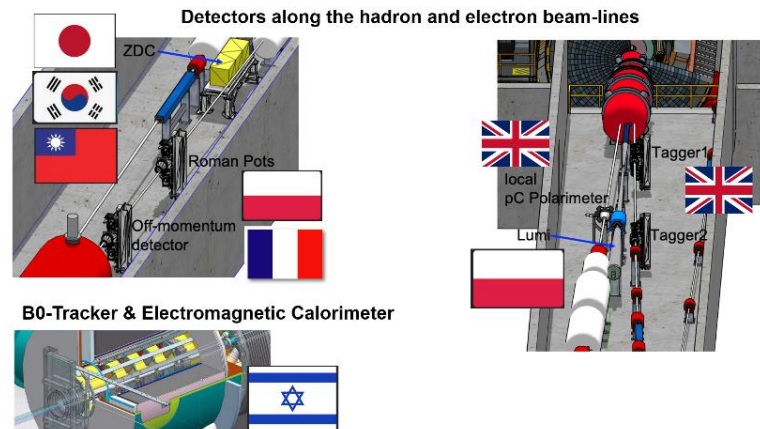
US National Laboratory (Main) Involvement – not including BNL and JLab



Central Detector Non-DOE Interest & In-Kind



Far-Forward/Far-Backward Detectors Non-DOE Interest & In-Kind



Electron-Ion Collider
EIC RRB Meeting

Electron-Ion Collider



- ① TOF: 粒子を同定する高時間分解能のAC-LGADセンサー
- ② ZDC: 事象を判別する高空間分解能の半導体センサー
- ③ DAQ: AIベースのリアルタイム解析を伴う高度なデータ収集系

- ▶ **ePIC実験の現在の国内体制、現在の規模は50名程度**
 - ▶ ALICE実験との協働：物理の中味は大いに同根。実験が長期化、複雑化する中、学生にタイムリーで面白いテーマを与えるには並走がよく、人材育成にも有効
- ▶ **100名程度まで拡張するための方策：**
 - ▶ **大型の国際共同実験を進めるには拠点が必須**
 - ▶ **東大を中核とする大学間連携と理研の体制 → R7概算要求検討中**
 - ▶ **物理の広がり + 技術の広がりを使って多くの機関に参加**
 - ▶ **日本の技術を国際標準化し、RIBFやJ-PARCに利用することで、相互乗入を容易にする。国内の実験機関と議論を継続する**
 - ▶ 15大学 5名 = 75人の学生 + 20名の教員。理研10名
 - ▶ **理論、計算分野の発展に向け、理論・計算分野との議論も進める。**
 - ▶ 理研はBNL等と組んでQCD専用計算機を完成させた経験がある。

wide center-of-mass energy \sqrt{s} : ~20 – 140 GeV :

- map the out nucleon and nuclei structure from high to low x



polarized electron and hadron (p, He-3) beams:

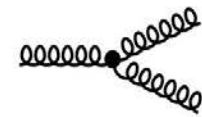
- access to spin structure of nucleons and nuclei
- Spin vehicle to access the spatial and momentum structure of the nucleon in 3d
- Full specification of initial and final states to probe q-g structure of NN and NNN interaction in light nuclei



nuclear beams: d to Pb

- accessing the highest gluon densities → saturation
- quark and gluon interact with a nuclear medium

gluon emission



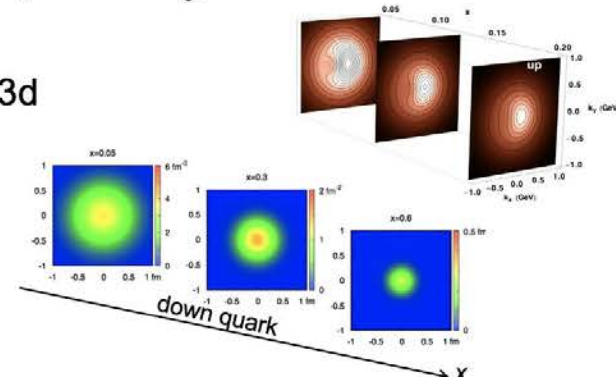
?
=

gluon recombination



high luminosity 10^{33} - 10^{34} cm⁻²s⁻¹ :

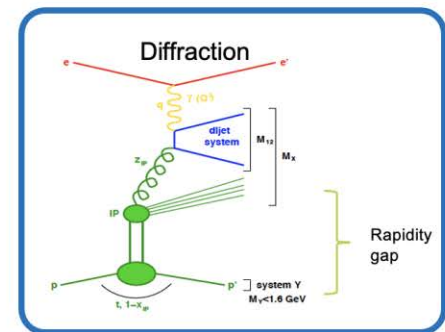
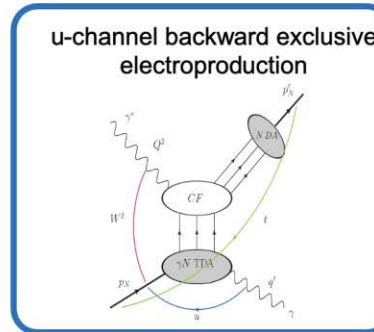
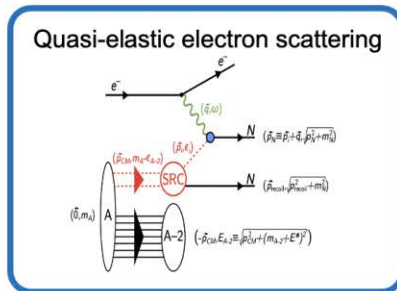
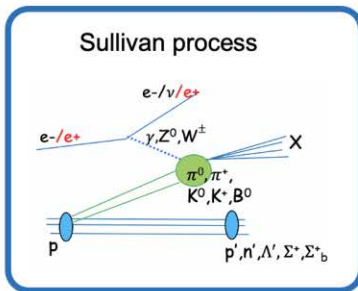
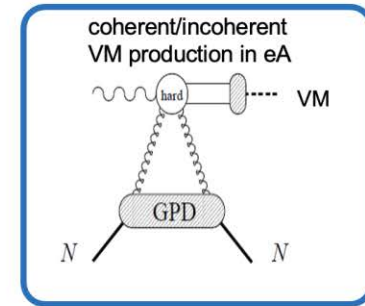
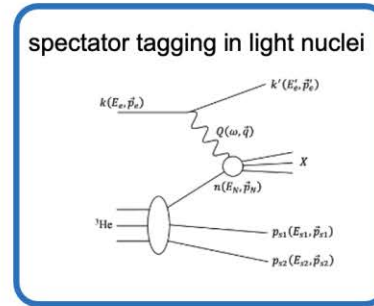
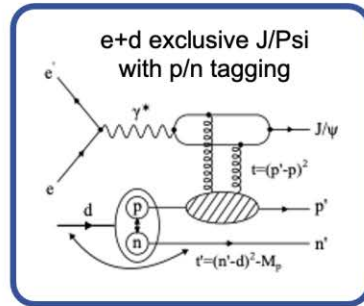
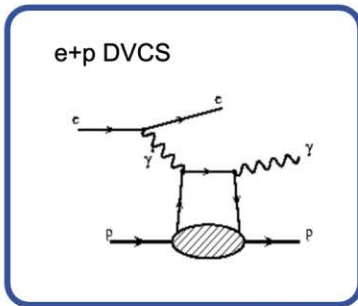
- mapping the spatial and momentum structure of nucleons and nuclei in 3d
- access to rare probes, i.e. W_s



large acceptance (0.2 – 1.3 GeV) through forward focusing IR magnets

- spatial imaging of nucleons and nuclei

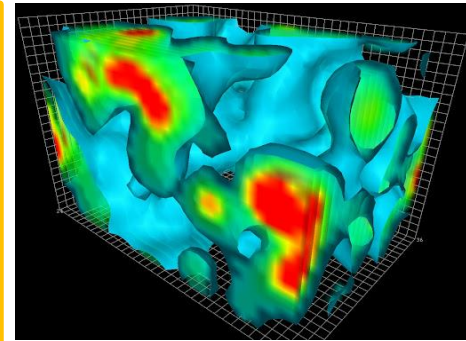
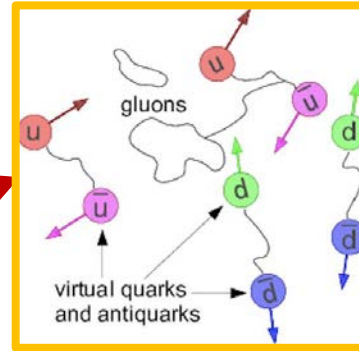
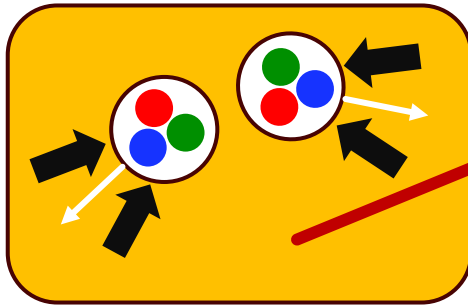
Far-Forward Physics at EIC



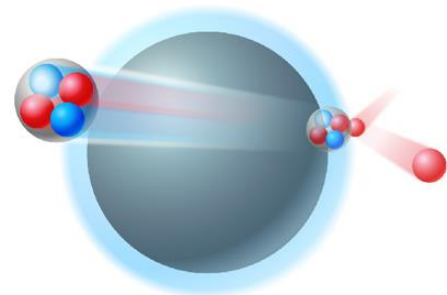
All these processes require the detection of protons, neutrons, photons and hadrons at small scattering angles → *MAJOR EIC science and detector emphasis*

- ▶ 「量子もつれ」が階層を超えた概念となり、その本質的な理解が、原子核の理解を加速する

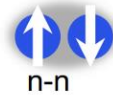
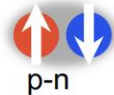
QCD真空構造の理解 (EICで説明)



核子内部から中性子星内部の構造進化



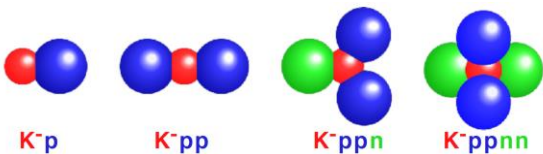
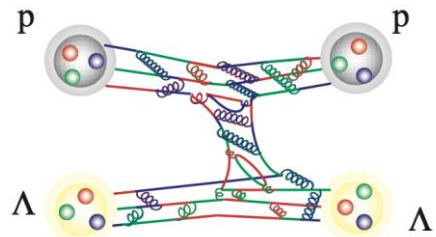
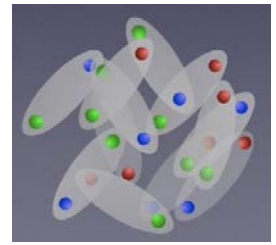
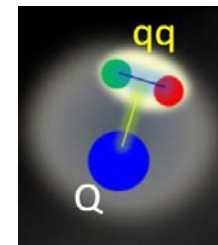
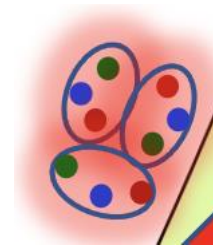
Pair correlation
Spin(S), Isospin(T), Space (L)



$T=1, S=0$
(1S_0)



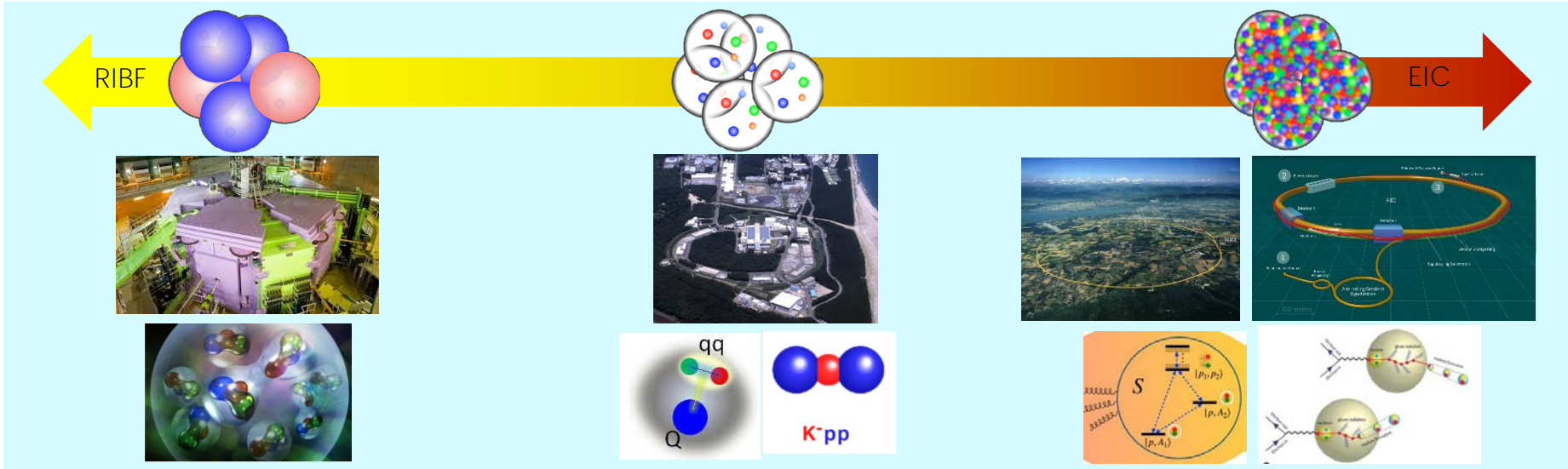
$T=0, S=1$
(3S_1)



共通の言葉でRIBF+J-PARC+EICの物理を捉え、階層を超えた研究が開花

基礎量子科学の学理探求の核心

FQS



核融合、核分裂

エネルギー変換の学理

エネルギー・
質量の起源

クォーク～原子核におけるスピンとフレーバーの量子もつれ
クォーク～原子核～元素～中性子星にいたる階層構造

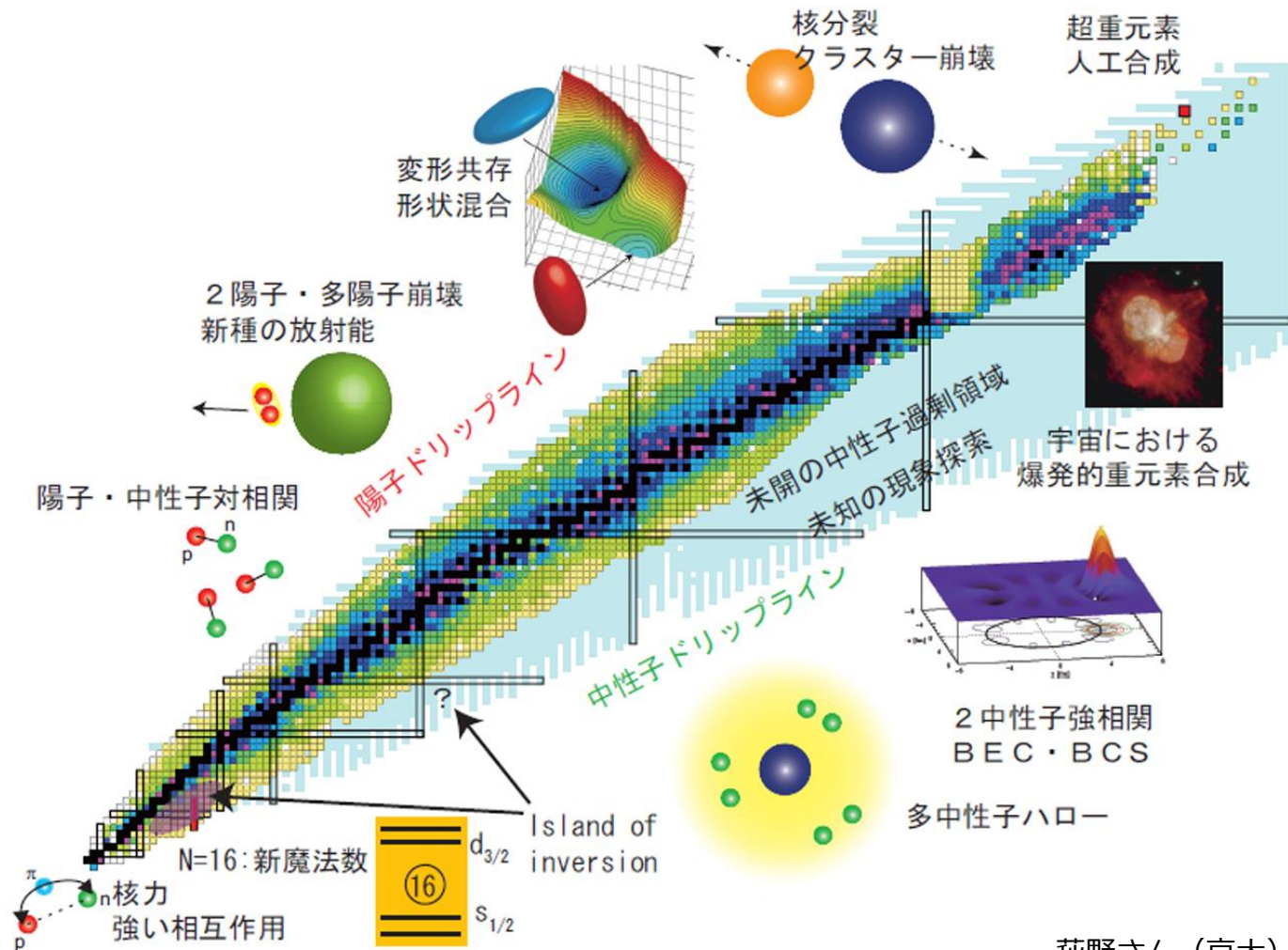
非束縛原子核系

量子ダイナミクスの学理

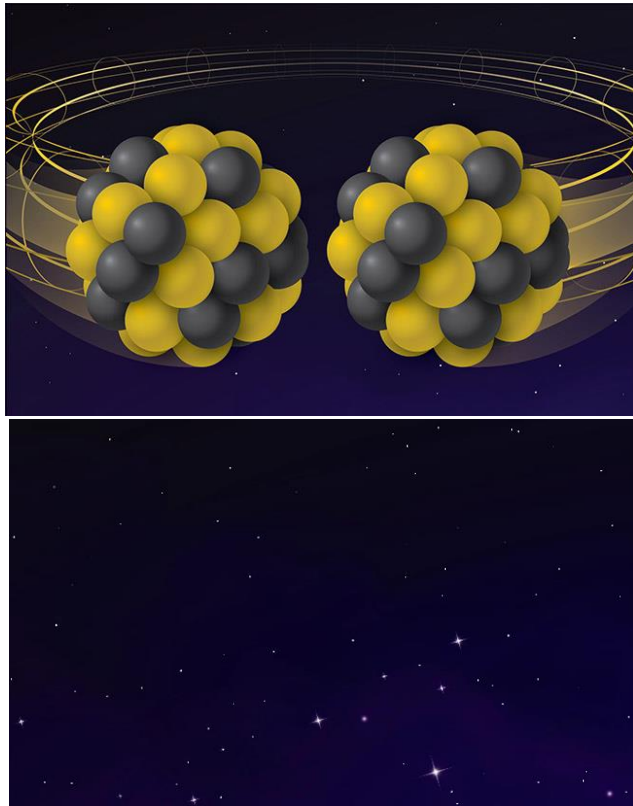
クォーク・グルオン
系の非平衡状態

ドリップ線近傍の原子核の性質は？

中性子過剰核 = 新物質

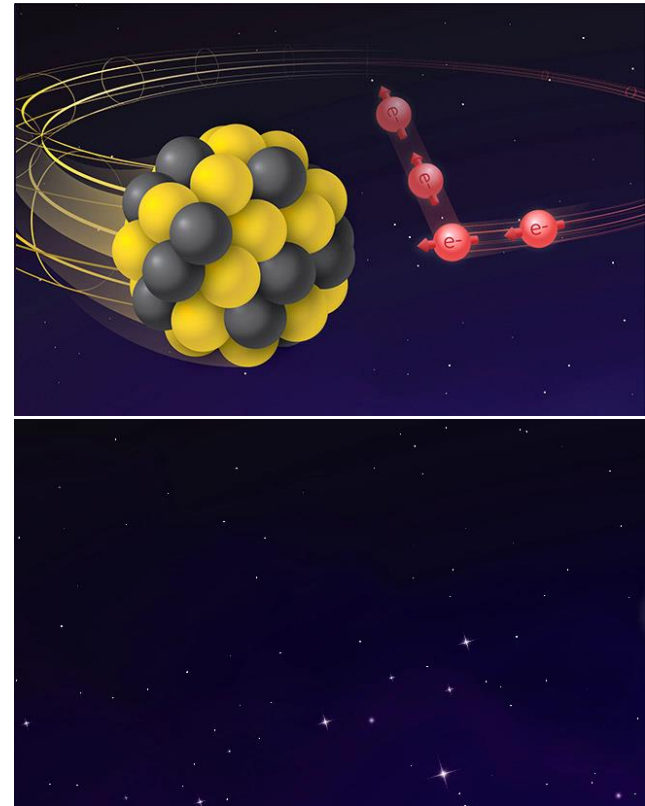


RHIC: 相対論的重イオン衝突型加速器



高温下でのクォークとグルーオンのダイナミクス
初期宇宙における物質生成

EIC: 電子-イオン衝突型加速器



高密度・高エネルギー下でのクォークとグルーオンのダイナミクス
核子や原子核の極限構造と秩序

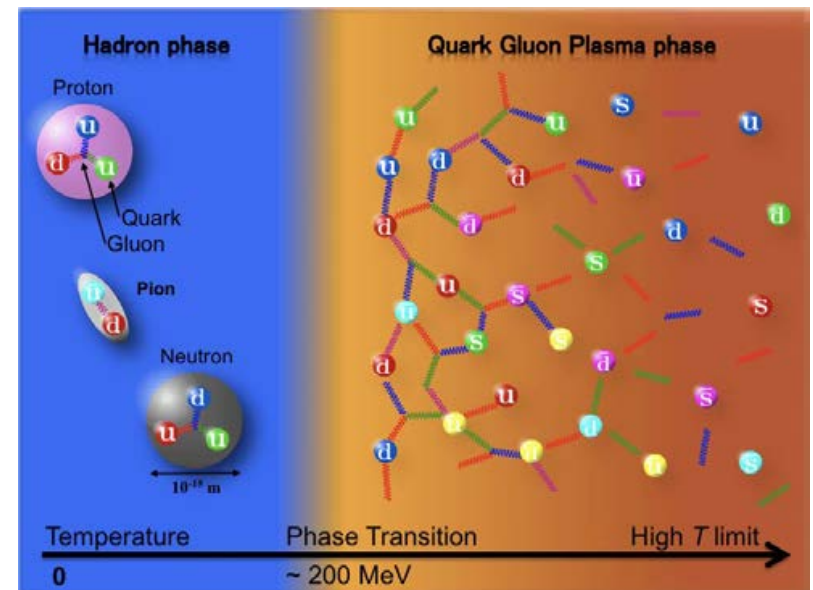
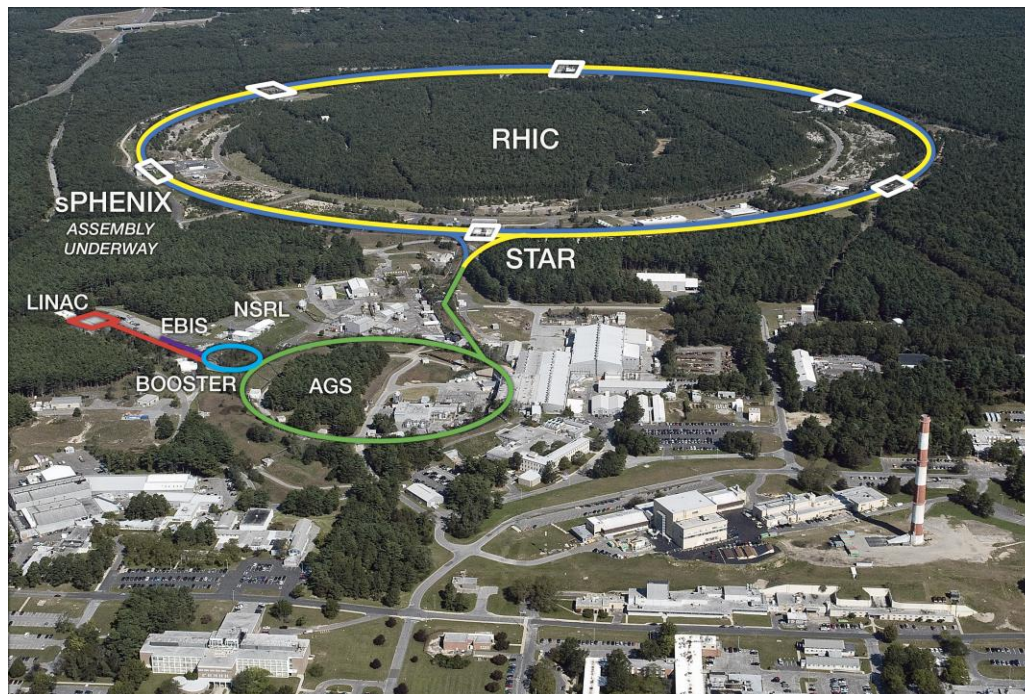
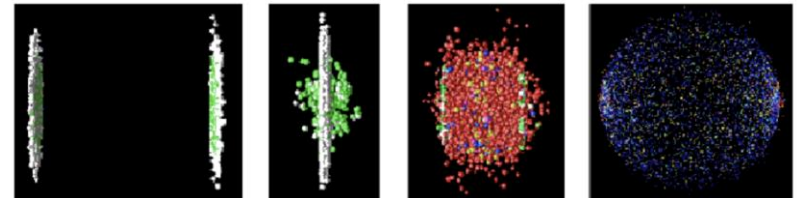
▶ 相対論的重イオン加速器RHIC@BNL (2000-)

▶ 世界で初めての重イオン同士の衝突型加速器 ($\sqrt{s_{NN}} = 7.7 - 200 \text{ GeV}$)

▶ 2つの目的

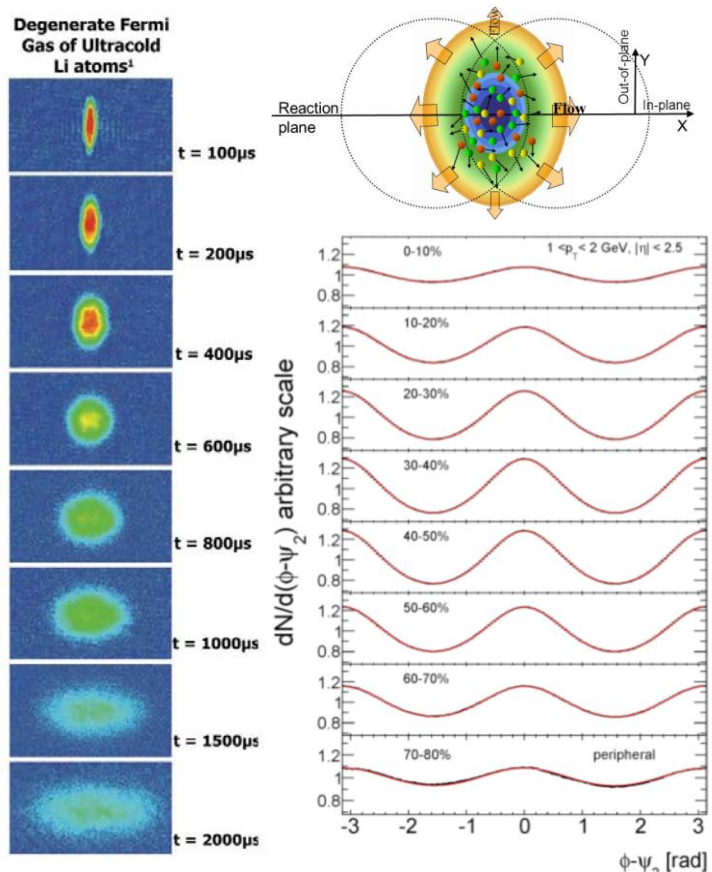
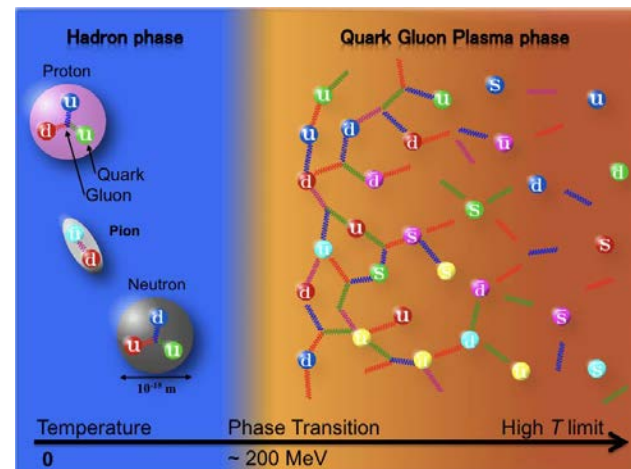
▶ 重イオン衝突：クォークグルーオンプラズマを作る

▶ 偏極陽子衝突：スピンの構造を解明する

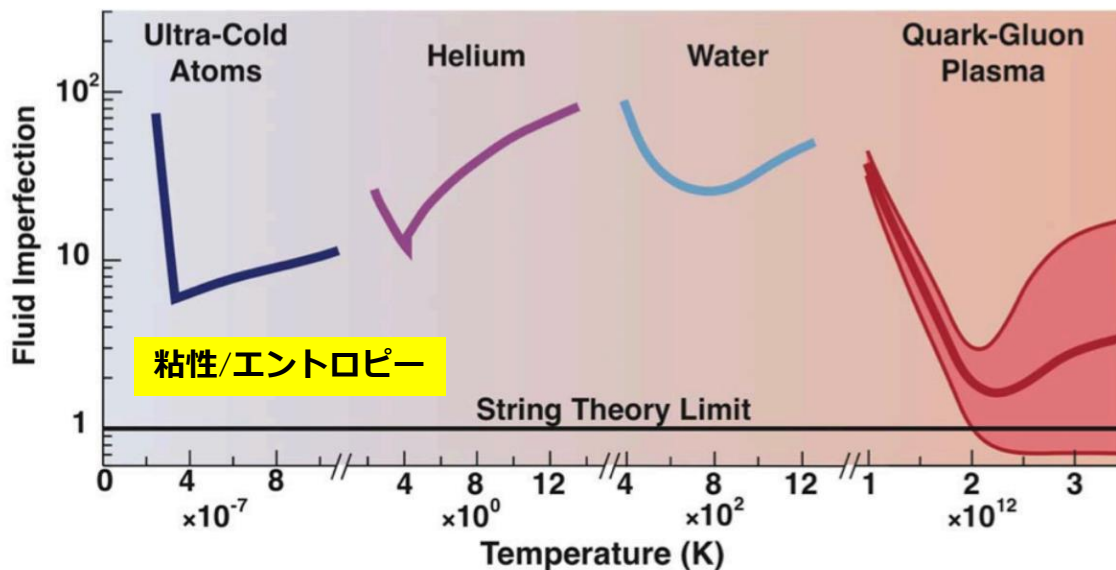


▶ RHICでの成果

- ▶ クォークグルーオンプラズマの発見
- ▶ 核子スピン：グルーオンスピンの寄与



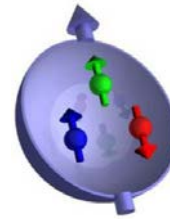
Science 298, 2179 (2002)



強相関クォークグルーオンプラズマの発見

▶ RHICでの成果

- ▶ クォークグルーオンプラズマの発見
- ▶ 核子スピン：グルーオンスピンの寄与

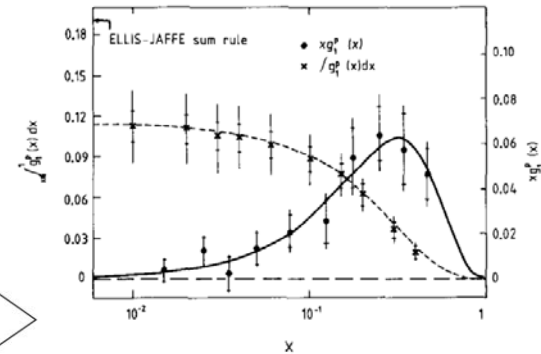
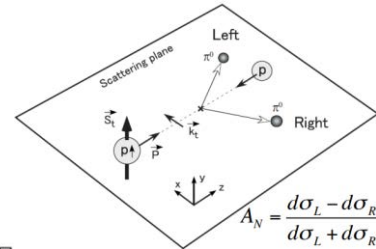


▶ 構成子クォーク描像

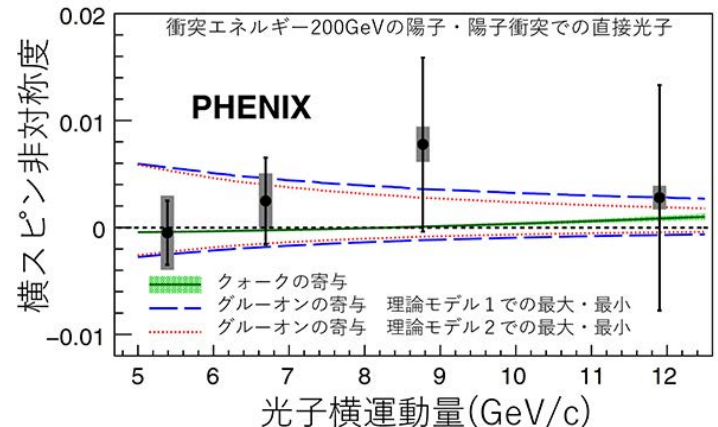
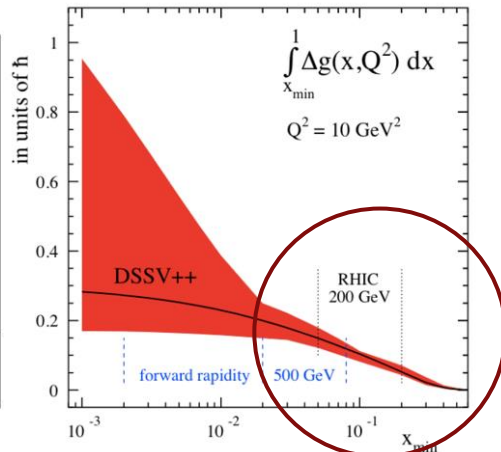
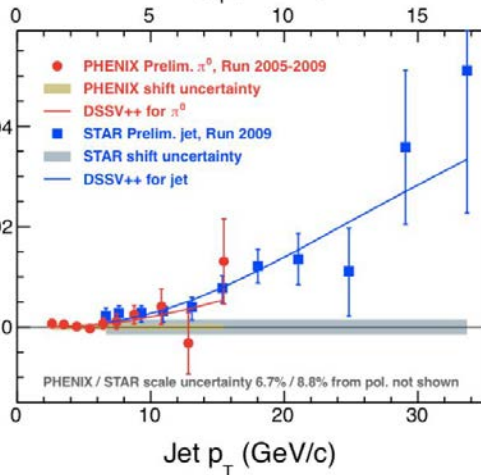
- ▶ クォークスピン = 100%
- ▶ EMC実験：クォークスピン ~25% ("Spin Crisis")

$$\frac{1}{2} = \frac{1}{2} \underbrace{\frac{\Delta\Sigma}{\sim 0.12}} + \underbrace{\frac{\Delta G}{\Delta G (\sim 0.3)}} + \underbrace{L_Q}_{\sim 0} + \underbrace{L_G}_{\sim 0}$$

$$A_{LL} = \frac{\sigma(++) - \sigma(+-)}{\sigma(++) + \sigma(+-)}$$

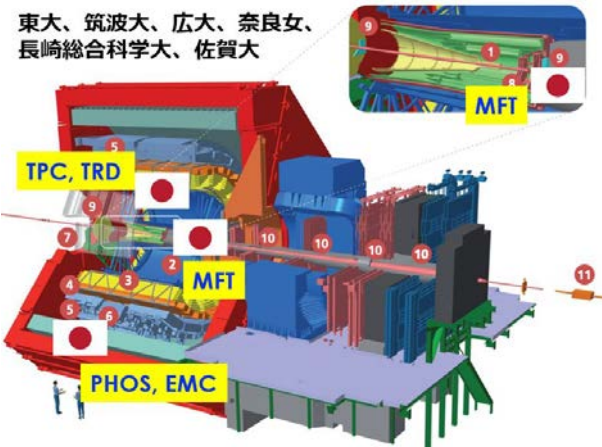
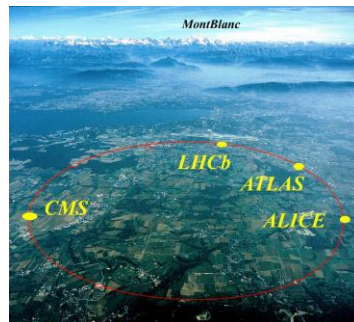


$\pi^0 p_T$ (GeV/c)



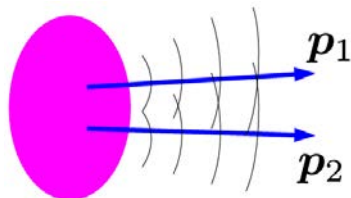
▶ LHC-ALICE実験の成果

- ▶ 40カ国、169機関、2000人
- ▶ 6国内機関
- ▶ クォークグルーオンプラズマの精密研究
- ▶ ハドロン間相互作用



東大、筑波大、広大、奈良女、長崎総合科学大、佐賀大

「フェムトスコピー」相関関数を利用



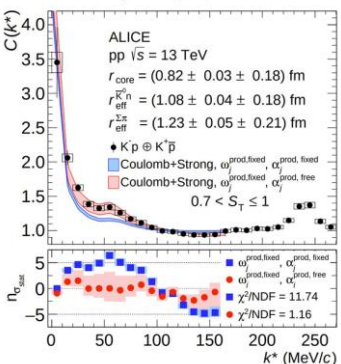
高エネルギー原子核の特性を活かした新しいハドロン物理研究 (J-PARCと極めて相補的)

$$C(p_1, p_2) = \frac{N_{12}(p_1, p_2)}{N_1(p_1)N_2(p_2)} \simeq \int dr S(r) |\varphi_q(r)|^2 \quad (q=\text{rel. mom.})$$

源関数 相対波動関数

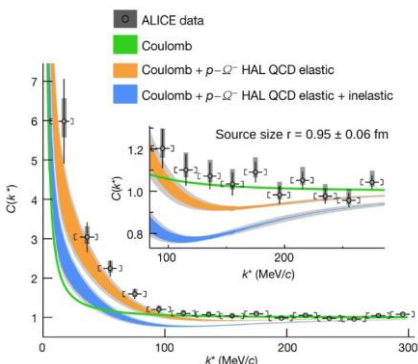
K p interaction

ALICE Coll. Phys. Rev. Lett. 124, 092301 (2020)
ALICE Coll. Eur. Phys. J. C 83 (2023)



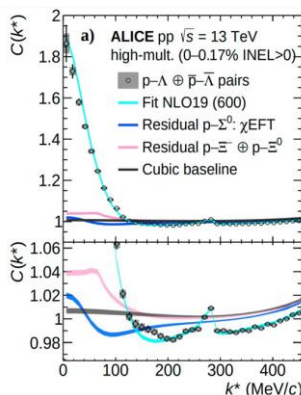
pΩ-, pΞ- interaction

ALICE Coll. Nature 588, 232 (2020)



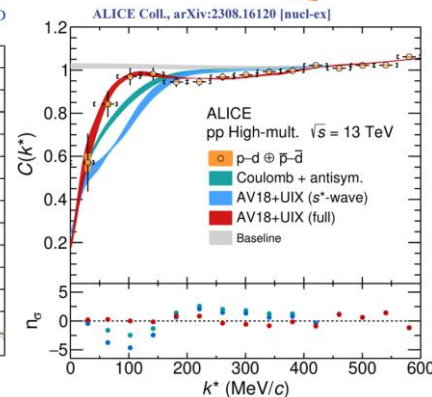
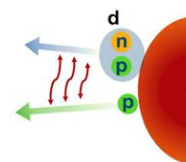
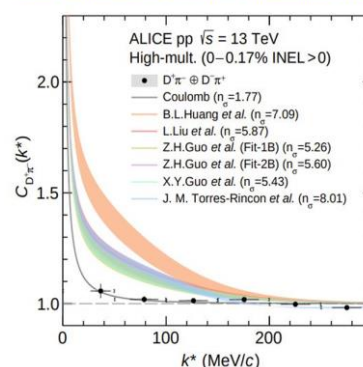
pΛ interaction

ALICE Coll. Phys. Lett. B 833 (2022) 137272



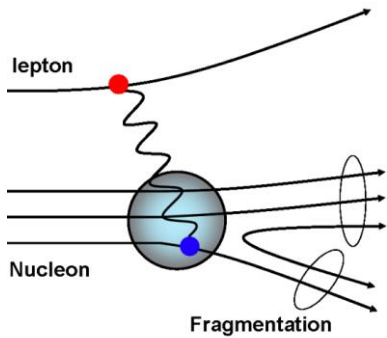
pD, Dπ, DK, D*π, D*K interactions

ALICE Collaboration Phys. Rev. D 106, 052010 (2022)
ALICE Coll., arXiv:2401.13541 [nucl-ex] submitted to PRD

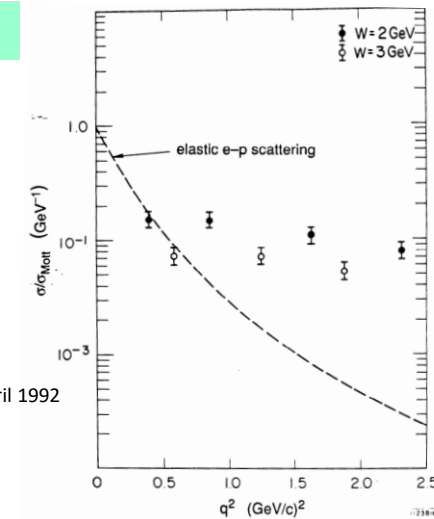


▶ 核子や原子核の中身を調べる電子(ミュオン)散乱実験の歴史

- ▶ SLAC : クォークの発見
- ▶ CERN EMC/NMC :
 - ▶ クォークスピン~25% (スピנקライシス)
 - ▶ 原子核は核子の重ね合わせではない (EMC効果)
- ▶ HERA :
 - ▶ 核子のパートン構造と摂動QCD

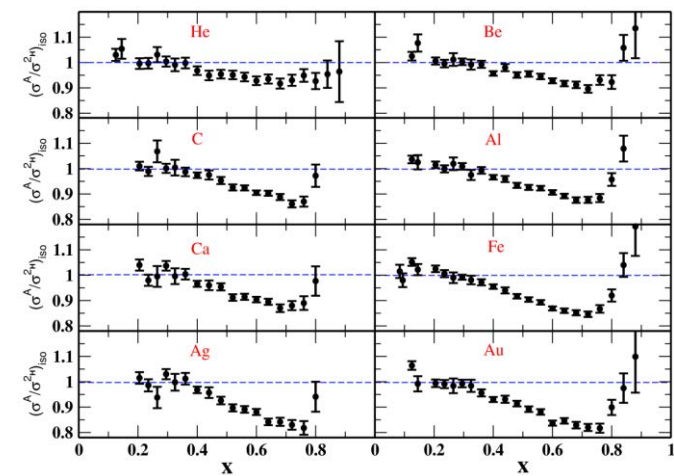


SLAC



SLAC-PUB-5724 April 1992

EMC/NMC

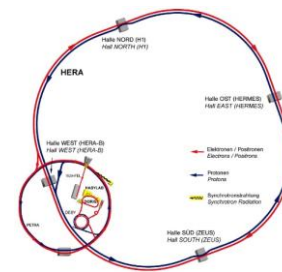


Phys. Rev. D 49, 4348 (1994)

1980	1990	2000	2010
SLAC			Electrons, 3 different detectors, H ₂ , D ₂ , heavy targets
	FNAL E665		Muons, iron toroid, iron target
CERN BCDMS			Muons, iron toroid, H ₂ , D ₂ , C targets
CERN EMC	NMC		Muons, open spectrometer, H ₂ , D ₂ , heavy targets
CERN CDHSW			Neutrinos, iron toroid, iron target
	FNAL CCFRW		Neutrinos, iron toroid, iron target
		NuTeV	Neutrinos, iron toroid, iron target
	HERA H1 AND ZEUS		Electron-Proton Collider
	SLAC Polarised targets		Polarised electron beam and targets
	CERN SMC	COMPASS	Polarised muon beam and targets
	HERA HERMES		Polarised electron beam and targets
		JLAB HALL A and B	Polarised electron beam and targets

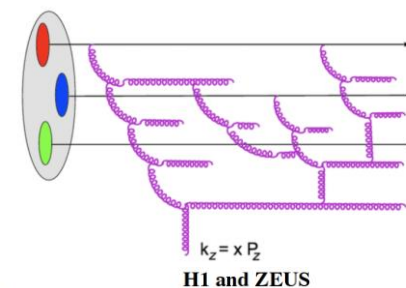
27.5×920 GeV (重心系エネルギー 314 GeV) ドイツ・DESY 研究所 (1992-2007)

- ▶ 2つの汎用実験 (H1, ZEUS - 日本の素粒子実験グループ)
- ▶ 固定標的実験 (核子スピン実験 HERMESなど)
- ▶ 高い Q^2 = 「小さい光子」, 低い x での陽子構造

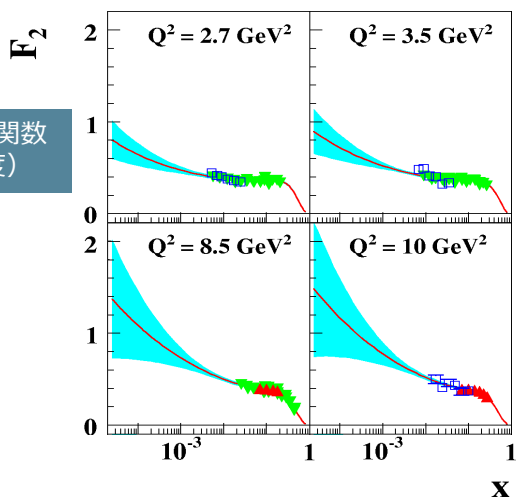


主な結果

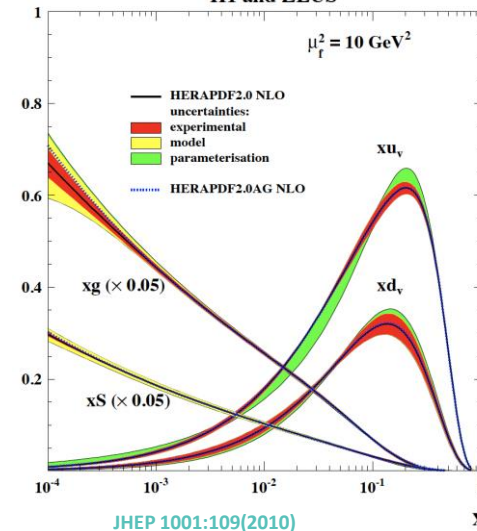
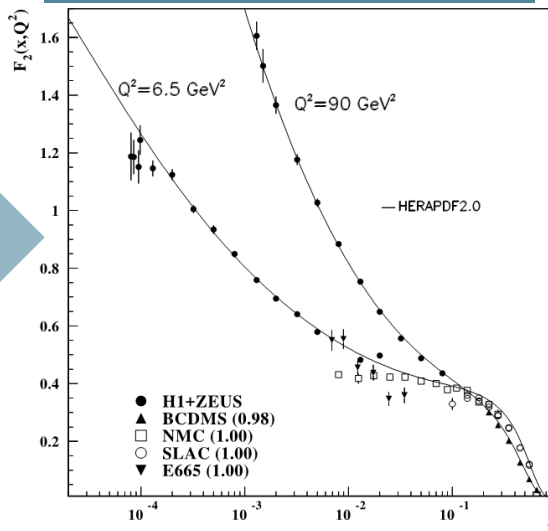
- ▶ 低い x の**大量のグルーオン**
 - ▶ pQCDで説明できる: **QCD の勝利**
 - ▶ LHC (2010-) の基礎データ
 - ▶ **グルーオン飽和の可能性を示唆**



HERA以前の構造関数
(~パートン密度)



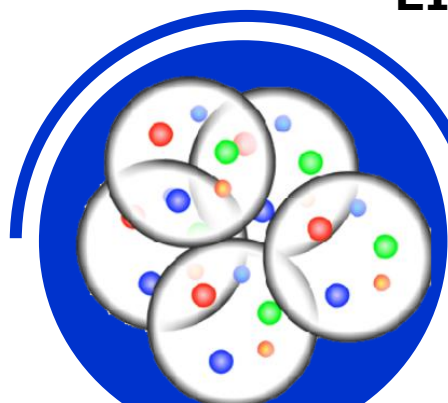
HERA測定とQCDフィット



低エネルギー(低解像度)

高エネルギー(高解像度)

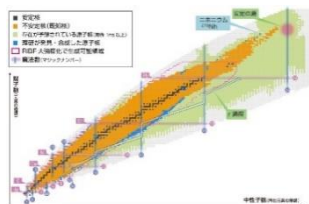
EICとRIBFの連携が原子核の根源的な問題を解決



RIBFのミッション

核子から原子核：多様性の創発

- 核構造と魔法数
- 核内核子相関
- 核物質状態方程式
- 重元素の起源
- 三核子力効果
- 非束縛(開放系)原子核の秩序形成

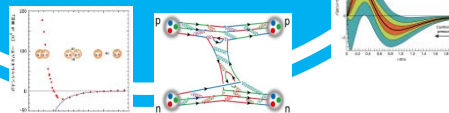


異なる「分解能」でみる階層構造とスピン構造

スピンとフレーバーの量子もつれが作る核子と原子核の構造
 ミクロな量子相関からマクロな核の記述
 原子核内の重陽子クラスター(核子相関)問題；
 核子ダイナミクスとクォーク・グルーオンダイナミクス
 原子核依存性で迫る中性子星の内部構造への視座

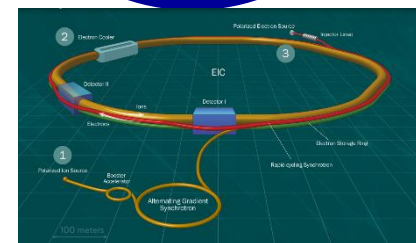
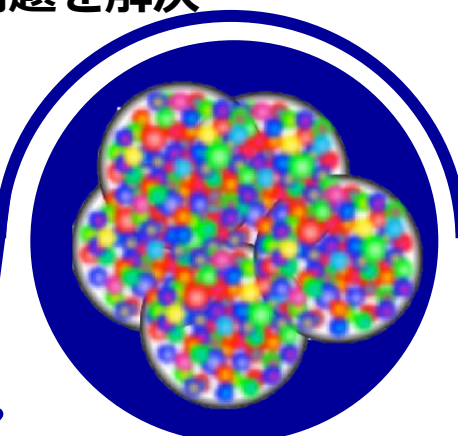
物質が潰れない機構(状態方程式)

核内と原子核(中性子物質)のEoS
 核力の斥力芯をパートンから理解



次世代の量子科学

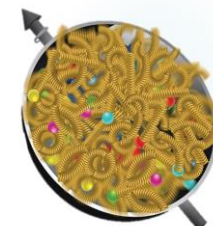
- 強相関・開放系の学理
- 量子センサー・デバイス
- フュージョンエネルギー
- 量子計算



EICのミッション

クォークから核子：核子の秩序形成

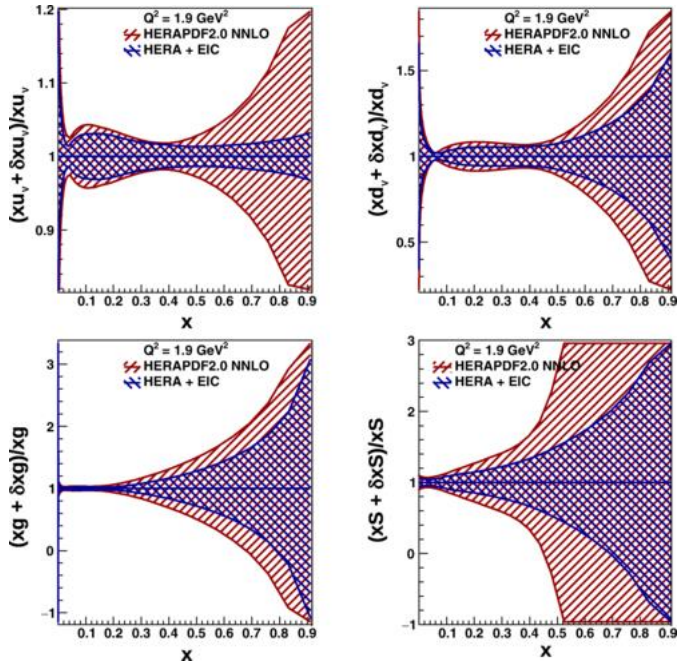
- 量子ゆらぎ
- グルーオン飽和
- 3次元内部構造
- 質量とスピンの起源
- グルーオン凝縮
- 核内状態方程式



HERAからEICへ

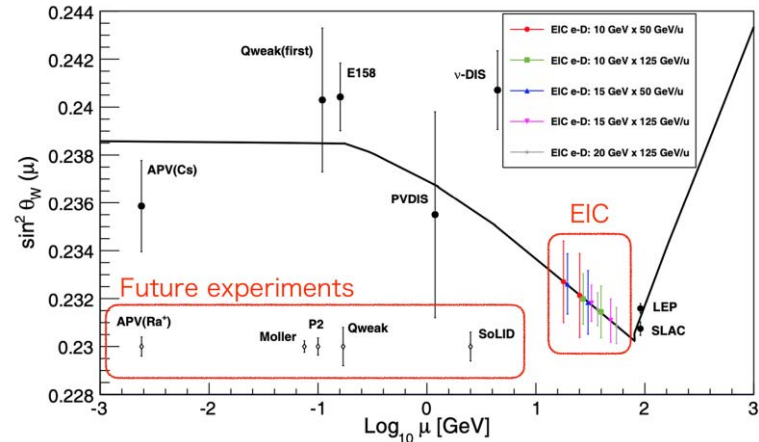
パートン密度

現在 vs post-EIC: high-x で劇的改善

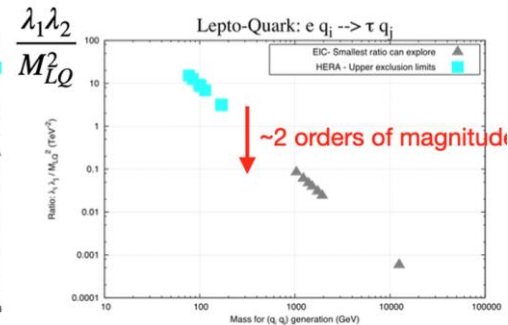
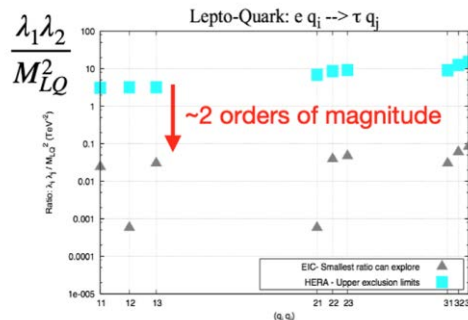
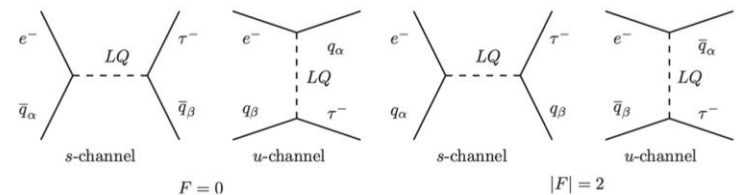


$$\mathcal{L} = \frac{G_F}{\sqrt{2}} \left[\bar{e} \gamma^\mu \gamma_5 e (C_{1u} \bar{u} \gamma_\mu u + C_{1d} \bar{d} \gamma_\mu d) + \bar{e} \gamma^\mu e (C_{2u} \bar{u} \gamma_\mu \gamma_5 u + C_{2d} \bar{d} \gamma_\mu \gamma_5 d) \right]$$

$$C_{1u} = -\frac{1}{2} + \frac{4}{3} \sin^2(\theta_W), \quad C_{2u} = -\frac{1}{2} + 2 \sin^2(\theta_W), \quad C_{1d} = \frac{1}{2} - \frac{2}{3} \sin^2(\theta_W), \quad C_{2d} = \frac{1}{2} - 2 \sin^2(\theta_W),$$



Charged lepton flavor violation : e-τ transition



LHC新物理
探索感度向上へ

