

EICとマルチスケール 量子ダイナミクス

Taku Gunji

Center for Nuclear Study

Quark Nuclear Science Institute

University of Tokyo

RIKEN, Nishina Center

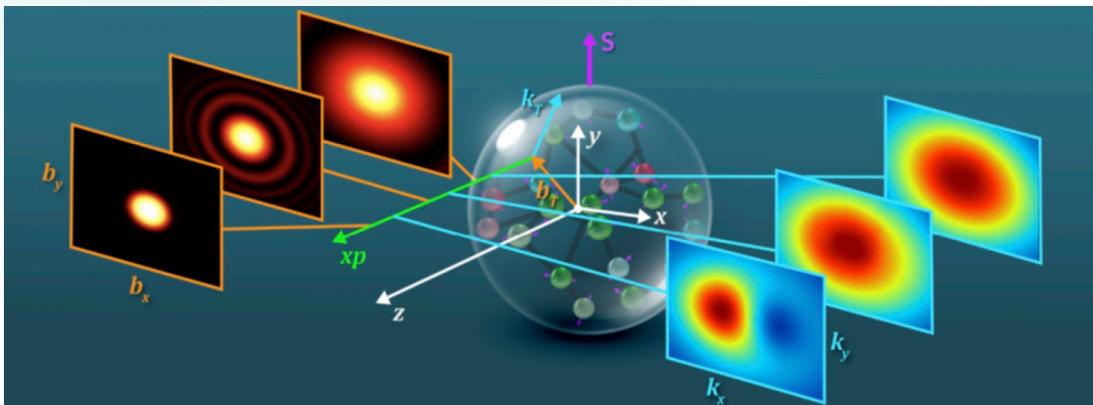
EICが挑む学術 (私見)

① QCDに基づく核子や原子核の理解
核子や原子核を、相対論的ボース粒子 (グルーオン) と相対論的フェルミオン (クォーク) の混合多体系として理解する

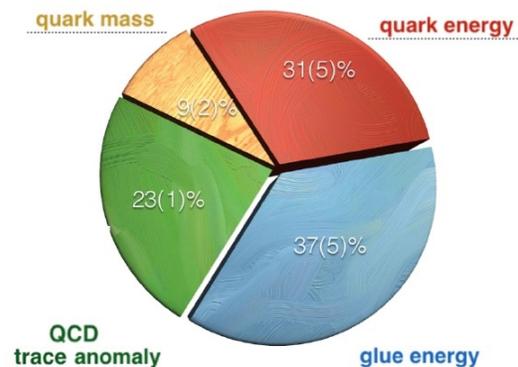
核子のパートン構造
• 多次元構造、質量、スピン、半径、力学的圧力



核子の3次元イメージング (HERAでは1次元のみ)

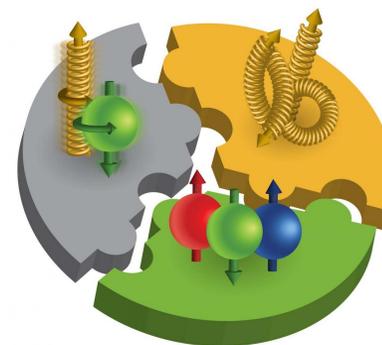


質量分解

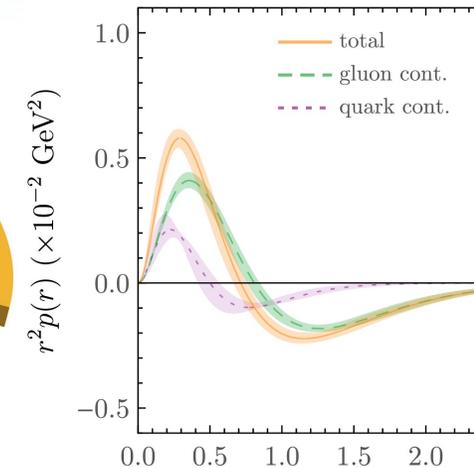


→量子異常(グルーオン凝縮)

核子スピン



力学的圧力



EICが挑む学術（私見）

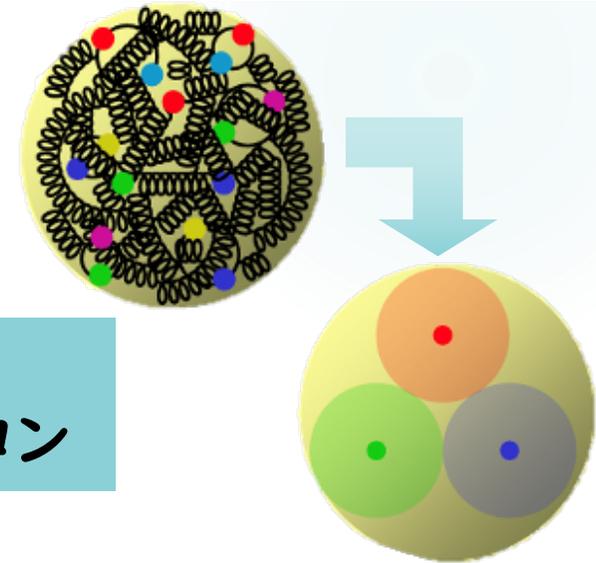
① QCDに基づく核子や原子核の理解
核子や原子核を、相対論的ボーズ粒子（グルーオン）と
相対論的フェルミオン（クォーク）の混合多体系として理解する

核子のパートン構造

- 多次元構造、質量、スピン、半径、力学的圧力

構成子クォークの創発

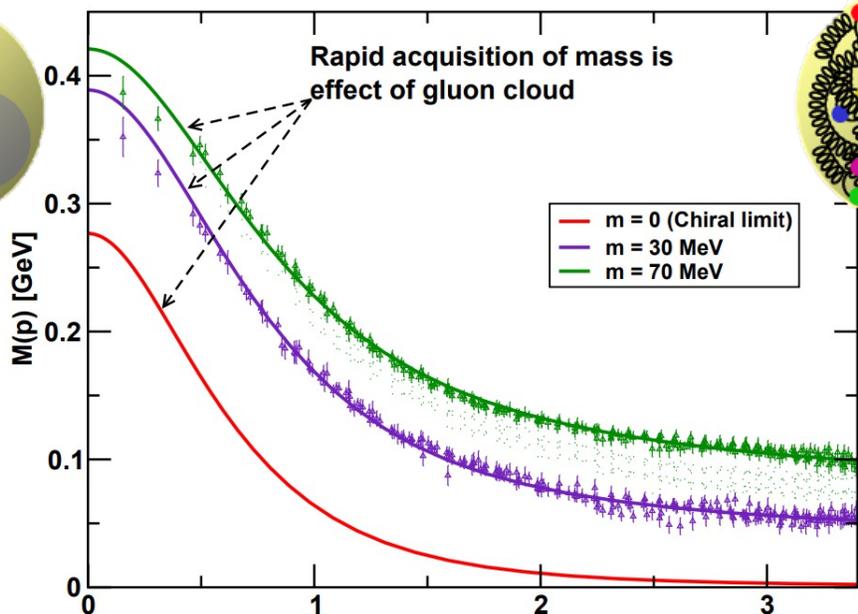
- 質量、バリオン共鳴、ダイクォーク、エキゾチックハドロン



EICが挑む学術（私見）

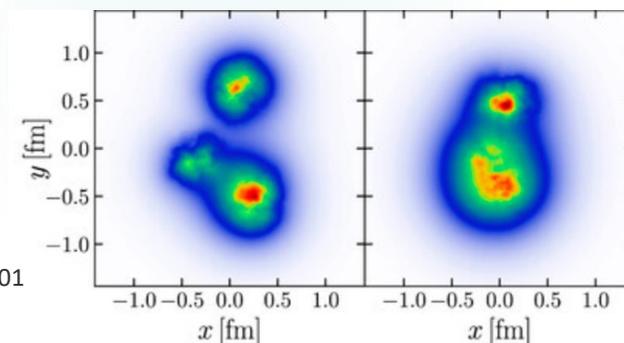
① QCDに基づく核子や原子核の理解
 核子や原子核を、相対論的ボース粒子（グルーオン）と
 相対論的フェルミオン（クォーク）の混合多体系として理解する

構成子クォークの質量獲得

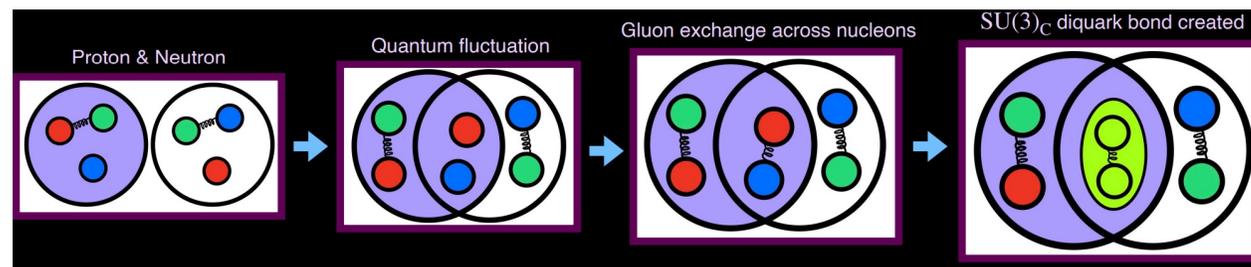


[Bhagwat et al., Phys. Rev. C 68 (2003) p [GeV]

LHCでのp-A衝突における
 集団運動の測定から、核子
 は非常に短い時間スケール
 で大きく揺らいている。ダイ
 クォーク構造? *Rep. Prog. Phys.* 84 082301



ダイクォークの生成と短距離核子関連の関係性? EIC Detector II Workshop, 2022



Transition GPDs → Baryon resonance structure

EICが挑む学術（私見）

① QCDに基づく核子や原子核の理解
核子や原子核を、相対論的ボーズ粒子（グルーオン）と
相対論的フェルミオン（クォーク）の混合多体系として理解する

核子のパートン構造

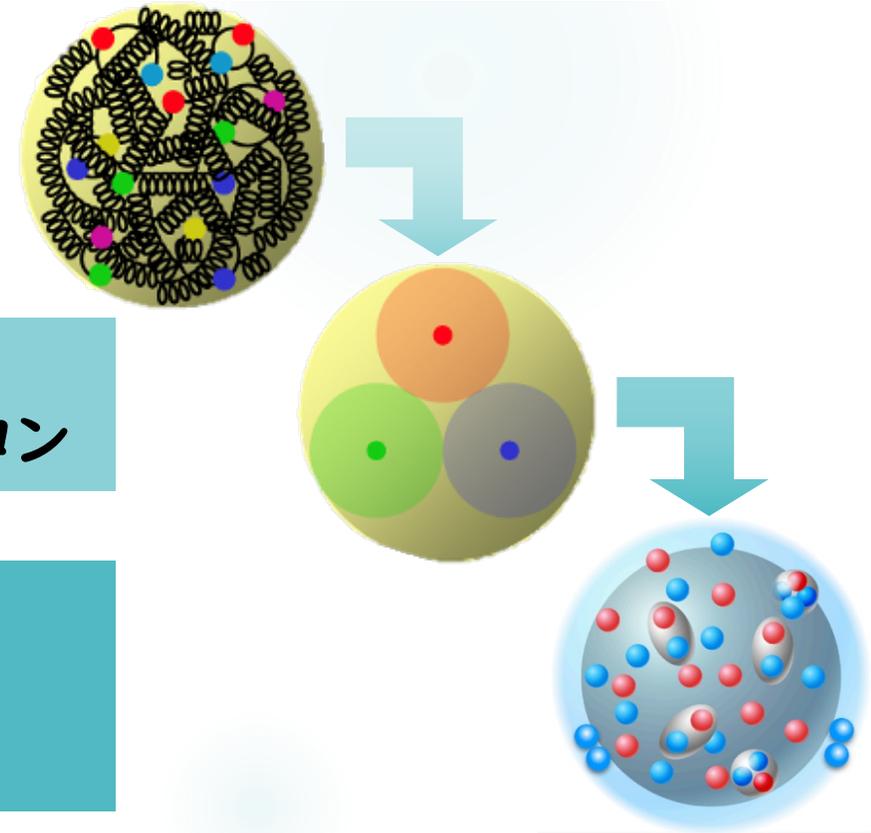
- 多次元構造、質量、スピン、半径、力学的圧力

構成子クォークの創発

- 質量、バリオン共鳴、ダイクォーク、エキゾチックハドロン

原子核の構造

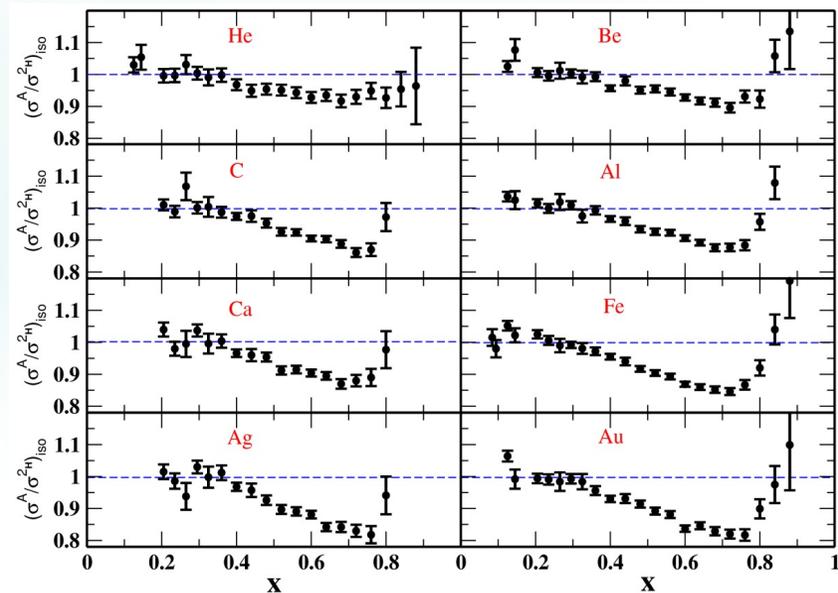
- EMC効果、短距離核子相関、 d/α クラスター、
多体力・多体相関、カイラル対称性の部分的回復



EICが挑む学術 (私見)

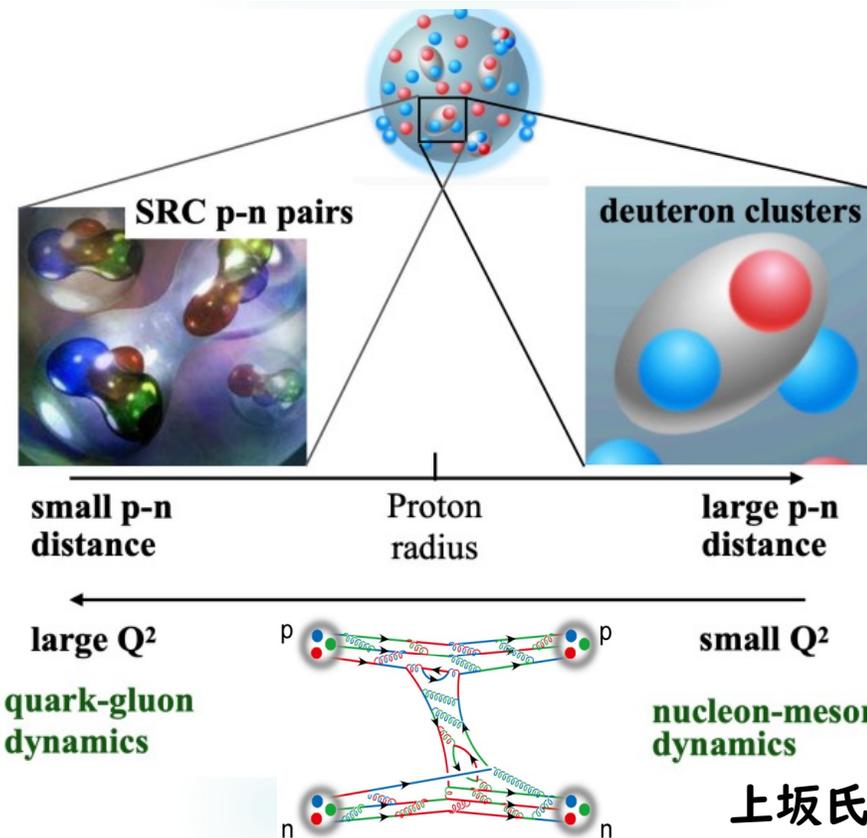
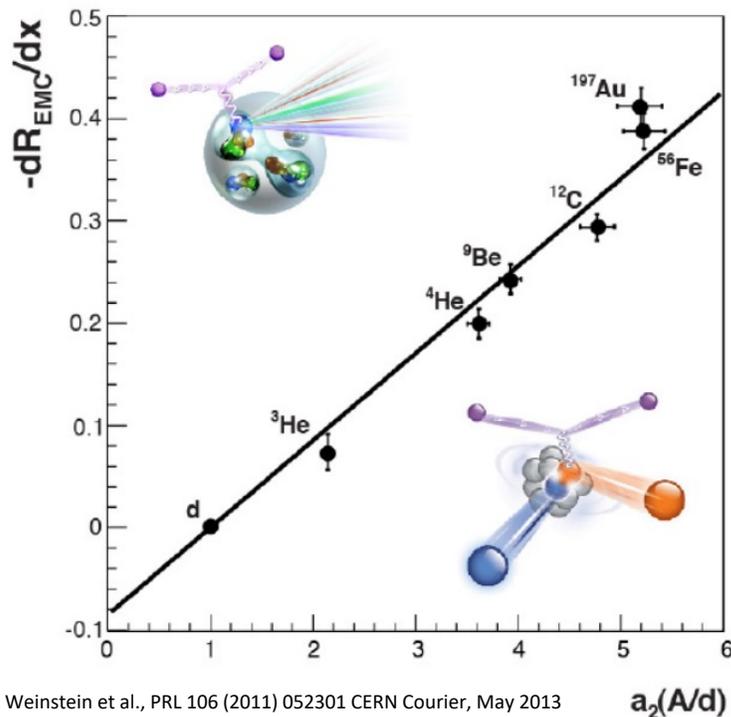
① QCDに基づく核子や原子核の理解
 核子や原子核を、相対論的ボーズ粒子 (グルーオン) と
 相対論的フェルミオン (クォーク) の混合多体系として理解する

EMC効果



bound nucleon ≠ free nucleon

EMC効果と短距離核子相関



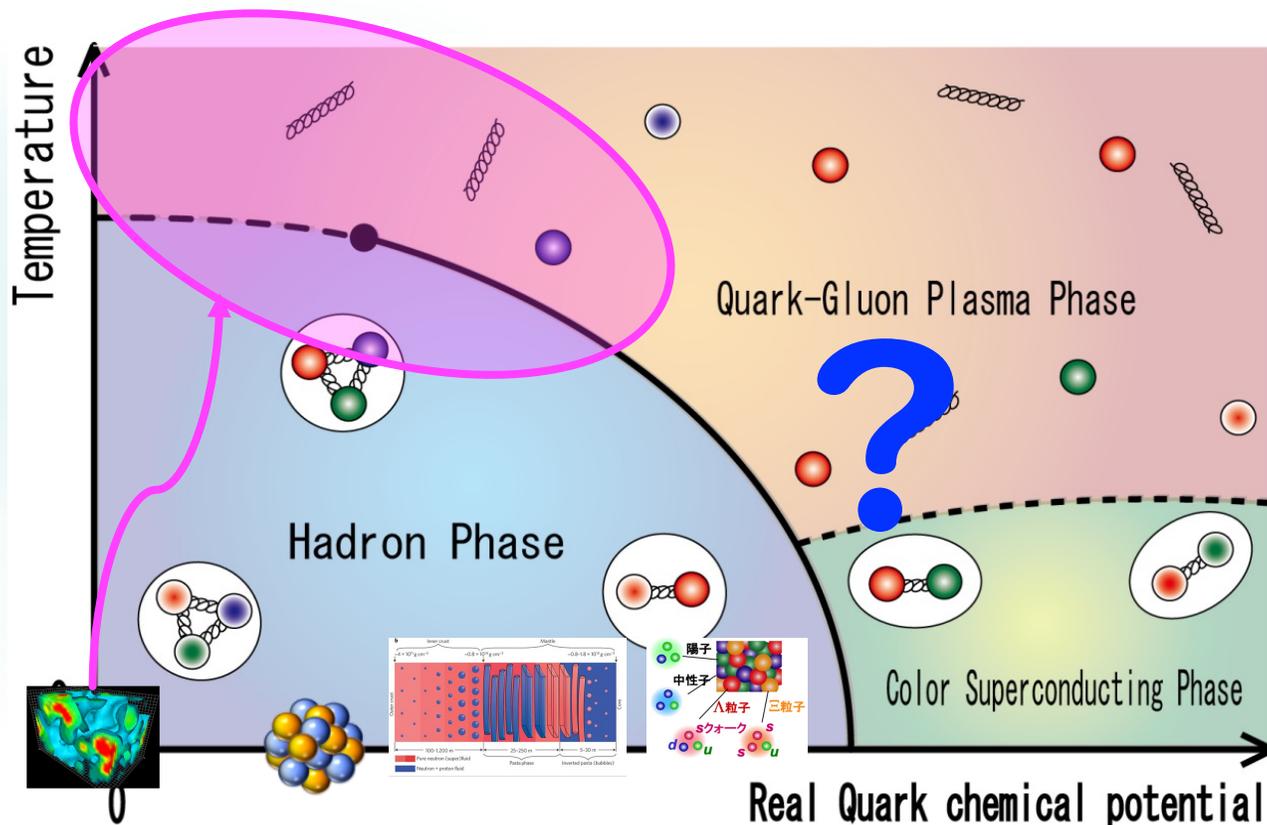
上坂氏

EICが挑む学術（私見）

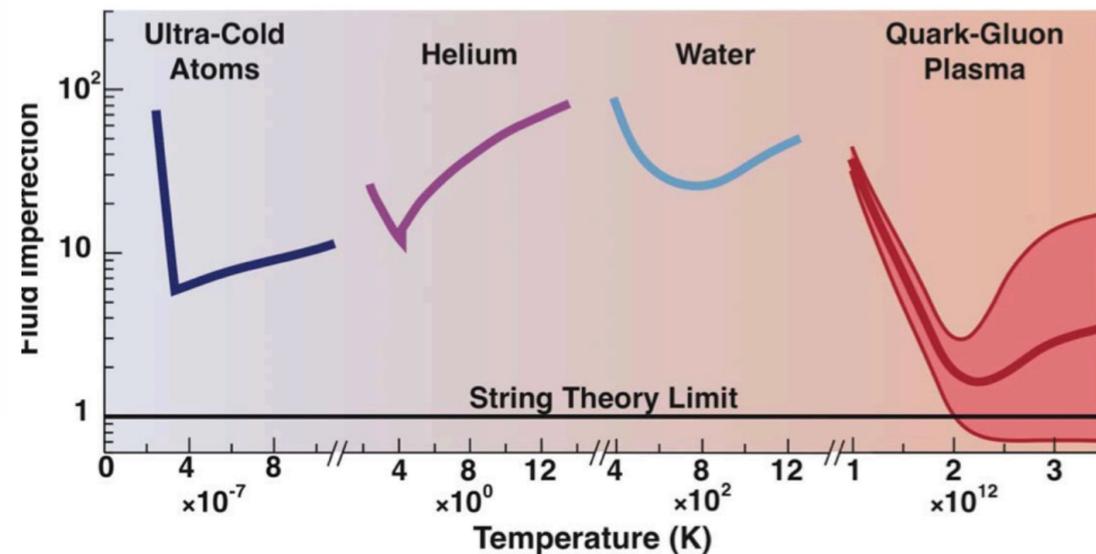
② QCDに基づくフェムトスケールの強相関物性
(高温(宇宙初期)・高密度(中性子星))・高エネルギーの下で
創発する新しい量子多体系の性質(QCD真空の変質)を探求する

EICが挑む学術(私見)

② QCDに基づくフェムトスケールの強相関物性
(高温(宇宙初期)・高密度(中性子星))・高エネルギーの下で
創発する新しい量子多体系の性質(QCD真空の変質)を探求する



RHICとLHCでの高エネルギー重イオン衝突

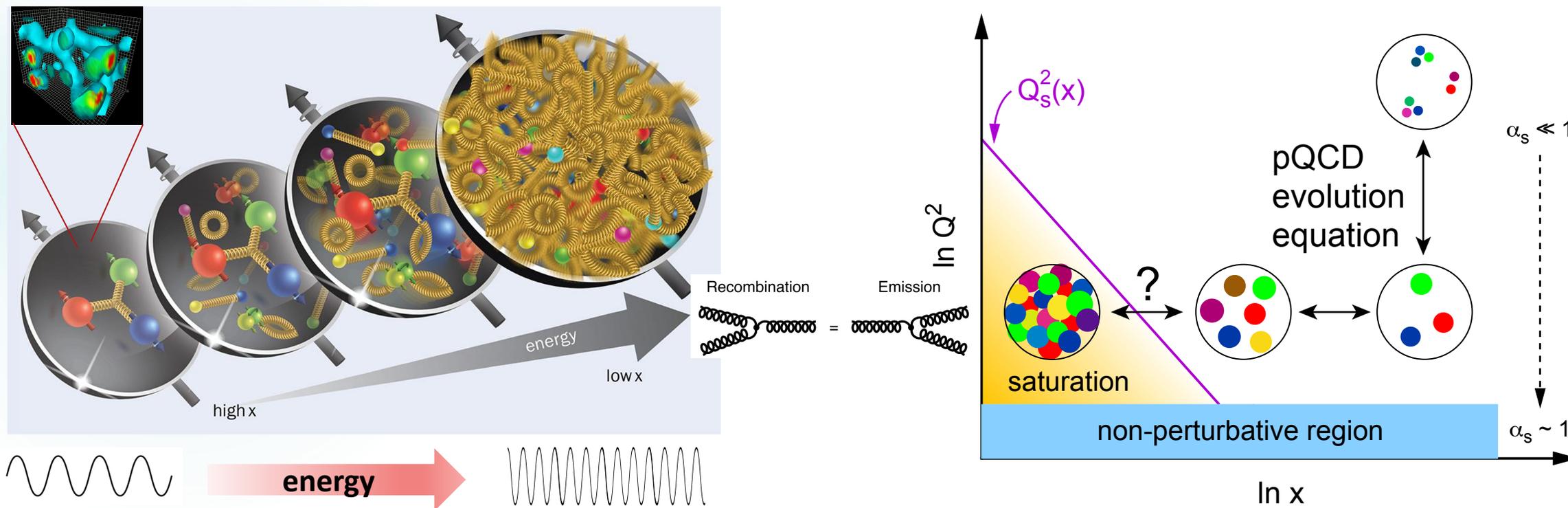


FAIR(>2028)やJ-PARC-HI(計画中)での
重イオン衝突

EICが挑む学術（私見）

② QCDに基づくフェムトスケールの強相関物性
(高温(宇宙初期)・高密度(中性子星))・高エネルギーの下で
創発する新しい量子多体系の性質(QCD真空の変質)を探求する

高エネルギー原子核の普遍的な構造 = カラーガラス凝縮(グルーオン飽和)

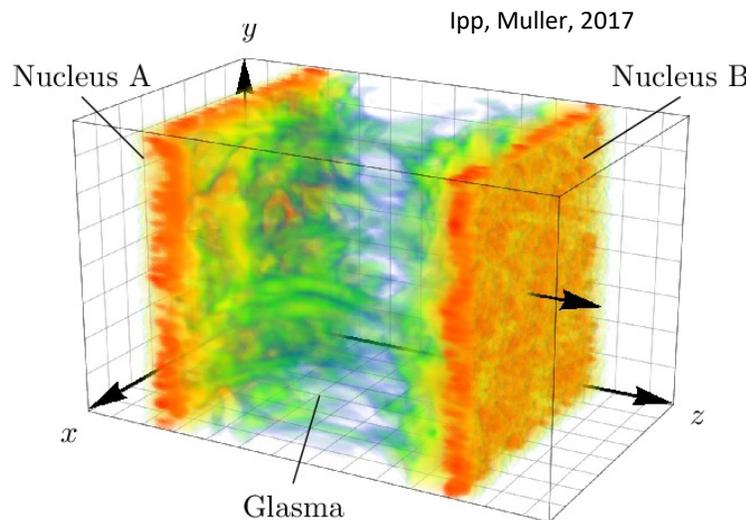
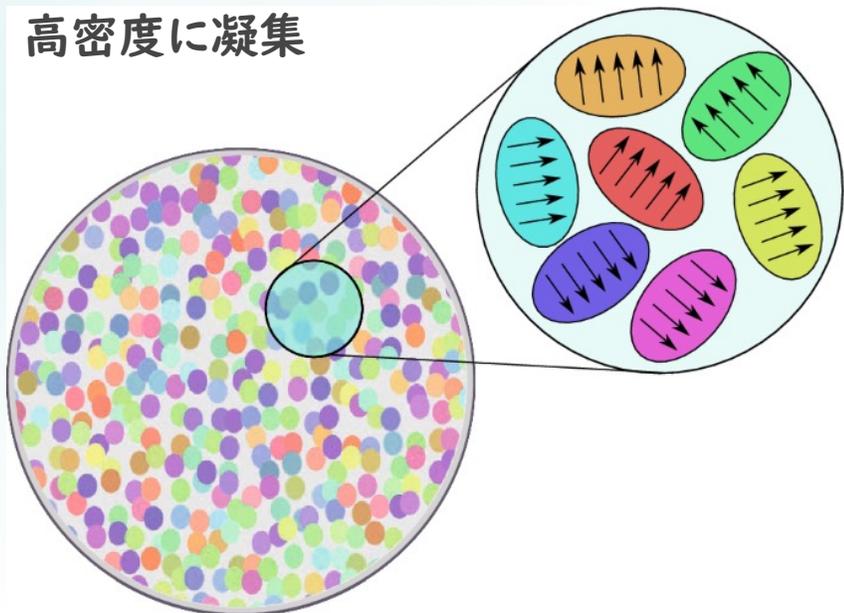


EICが挑む学術（私見）

② QCDに基づくフェムトスケールの強相関物性
(高温(宇宙初期)・高密度(中性子星))・**高エネルギー**の下で
創発する新しい量子多体系の性質(QCD真空の変質)を探求する

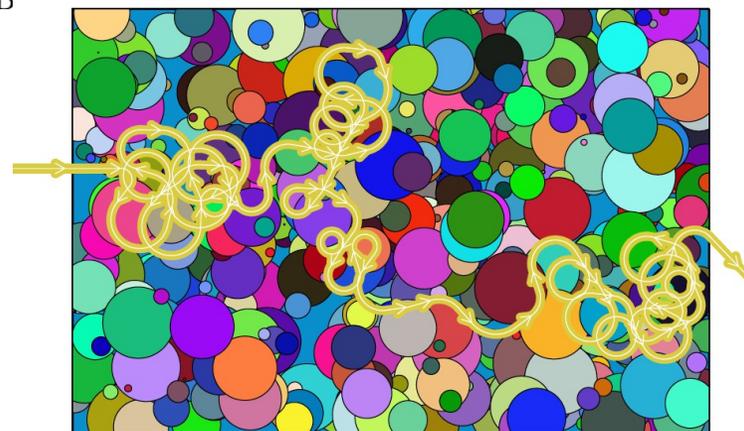
高エネルギー原子核の普遍的な構造 = カラーグラス凝縮(グルーオン飽和)

グルーオンがボーズ凝縮のように
高密度に凝集



高エネルギー重イオン衝突で作られる
QGPの熱化過程に重要

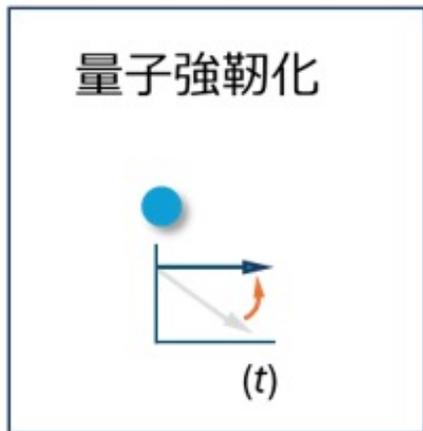
M. Asakawa, S.A. Bass & B. Mueller: Phys.
Rev. Lett. 96: 252301 (2006)



高エネルギー重イオン衝突で作られる
QGPの小さな粘性に寄与？(異常粘性)

広義の「基礎量子科学」の発展

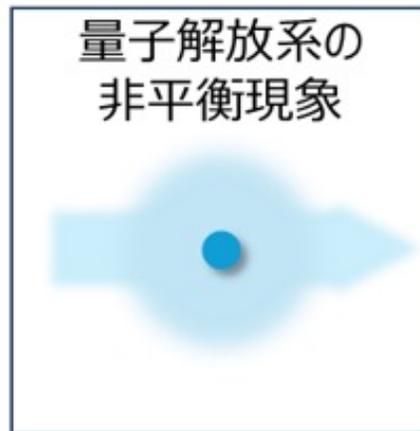
- ▶ 量子技術の最先端が加速度的に拡大している一方、量子論の深い基礎的理解は未だ不十分。



より長く（時間）



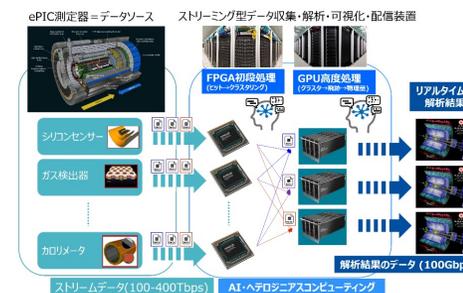
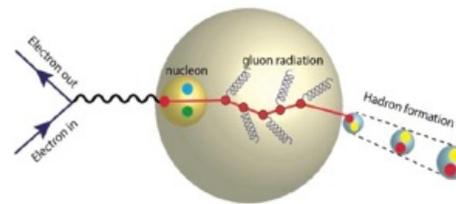
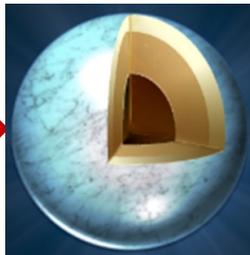
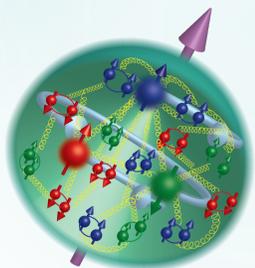
より多く（数）



より広い条件で（環境）



より精密に



EICを含め、原子核物理学を起点としたマルチスケールの基礎量子科学を振興

マルチスケール量子ダイナミクス連携研究部

仁科加速器科学研究センター組織図
2025.4

- 理事長 五神 真
- 理研仁科センターアドバイザーカウンシル
- 理研BNL研究センター研究評価委員会
- 物理科学領域
- 仁科加速器科学研究センター 櫻井 博儀
 - 副センター長: 上垣外 修一
 - 副センター長: 上坂 友洋
 - 副センター長: 阿部 知子
 - 副センター長: 上野 秀樹
 - 特別顧問: 森田 浩介
- 運営調整会議
- 実験課題採択委員会
- 安全審査委員会
- RIビームファクトリーマシントイム委員会
- 理研BNL研究センター管理運営委員会



仁科内
連携

マルチスケール量子ダイナミクス連携研究部 (2025/1-)

部長 上坂(RIBF-EIC連携予算執行、人事)
副部長 近日中に非公募人事予定(EIC予算執行)

EIC: TOF, ZDC, DAQ開発

RIBF-EIC: シリコントラッカー、DAQ、中性子検出器
トラッキングゲルマ開発
(RIBF系研究室、基盤系研究室から兼務)

連携

連携

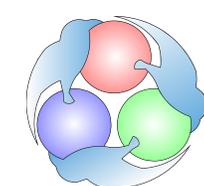
基礎量子科学プログラム (FQSF)
HQ(永長、川上、青木)、
他センターの研究

東大QNSI

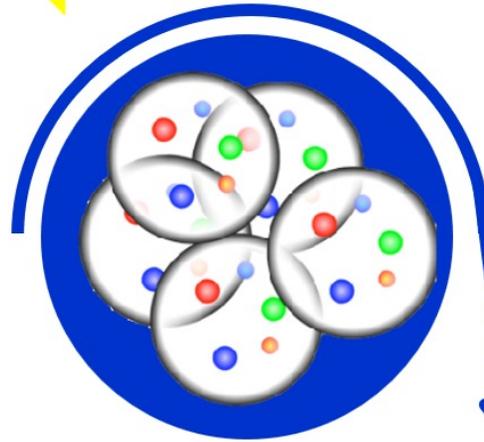
高エネルギーQCD
研究部門

クォーク多体系
研究部門

核子多体系研究部門



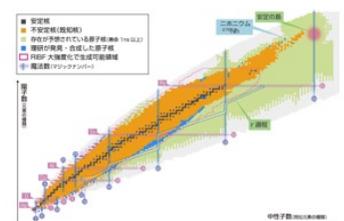
理研におけるEICの位置づけ



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
- 核子対凝縮
- 集団運動
- 状態方程式
- 重元素核反応



EICとRIBFの連携が原子核の根源的な問題を解決

核子質量の起源
QCD真空の理解

クォーク・反クォーク凝縮@RIBF実験
グルーオン凝縮@EICの両方が質量の理解に必要な
南部理論の実験的検証



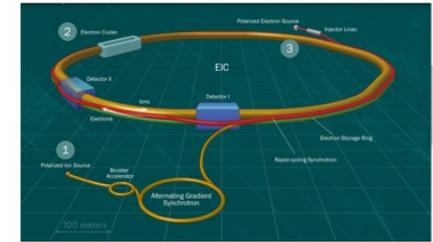
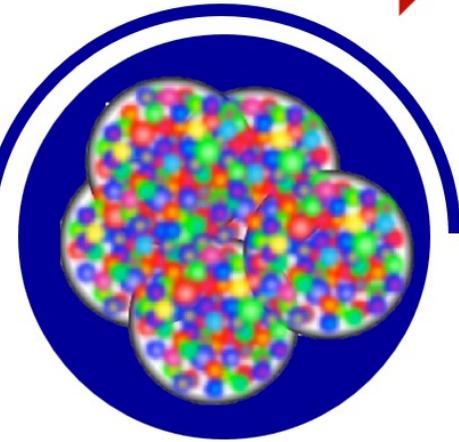
異なる「分解能」でみる
階層構造とスピン構造



ミクロな核子相関からマクロな原子核の記述
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
スピン・アイソスピン vs. スピン・カラー・フレーバー
核子スピンと核スピンの構成要素と相互作用（殻構造）

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



EICのミッション

クォークから核子：核子の基本的性質

- 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



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
- (冷却原子型)量子計算

理研におけるEICの位置づけ

低エネルギー(低分解能)

高エネルギー(高分解能)

原子核物理学は現代物理学の基本概念が集約された学問領域であり、EICを通じて得られる陽子の質量やスピンの起源等に関する知見は、量子物理学を様々な階層で活用するための根幹的な理解をもたらす。

EICで解明される強い相互作用の詳細な性質は、RIBFが探究する原子核の多体量子系としての性質の解明に対し、理論的基盤を提供する。これにより、両施設の知見を融合させた「マルチスケール量子ダイナミクス研究」が発展する。

理論・実験・計算科学を統合し、マイクロなクォーク・グルーオンのレベルからメソスコピックな原子核、さらにマクロな物質レベルまでを貫く階層横断的な量子ダイナミクスの普遍法則の解明を目指す。

マルチスケール量子ダイナミクス連携研究部は、EICと関係すれば基本的に何でもできるところ!

- 状態方程式
- 重元素核反応



- フュージョンエネルギー
- (冷却原子型)量子計算

- グルーオン凝縮
- 核内状態方程式

