

J-PARCでの高強度重イオンビームによる 高密度クォーク物質の研究

小沢 恭一郎(KEK) for the J-PARC Heavy Ion project team

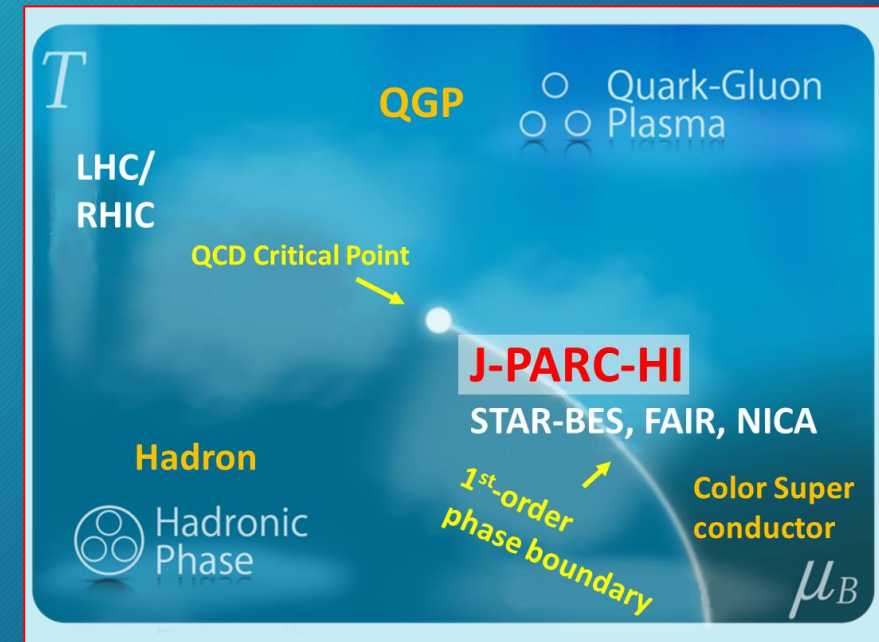
Outline

2

- 計画の概要
- 目指す物理
- 施設計画
- まとめ

計画の概要

- J-PARCにおける重イオン実験を実現
- 中性子星内部に匹敵する超高密度物質を実験室で生成・研究
 - 超高密度の物質相の探求
 - 高密度物質が真空構造を破壊する相転移現象の確立
 - 人類の物質観を転換する研究を我が国発のプロジェクトで先導
- 超高密度極限という科学のフロンティアを開拓
- 施設計画
 - 重イオン用インジェクターと実験装置の導入
 - RCSの前段にLINACとBooster Ring
 - ハドロンホールに実験装置
 - 段階的なビーム強度の増強
 - Phase I: Boosterの再利用と既存実験装置のアップグレード
 - Phase II: Full spec accelerator and spectrometer (世界最高強度)



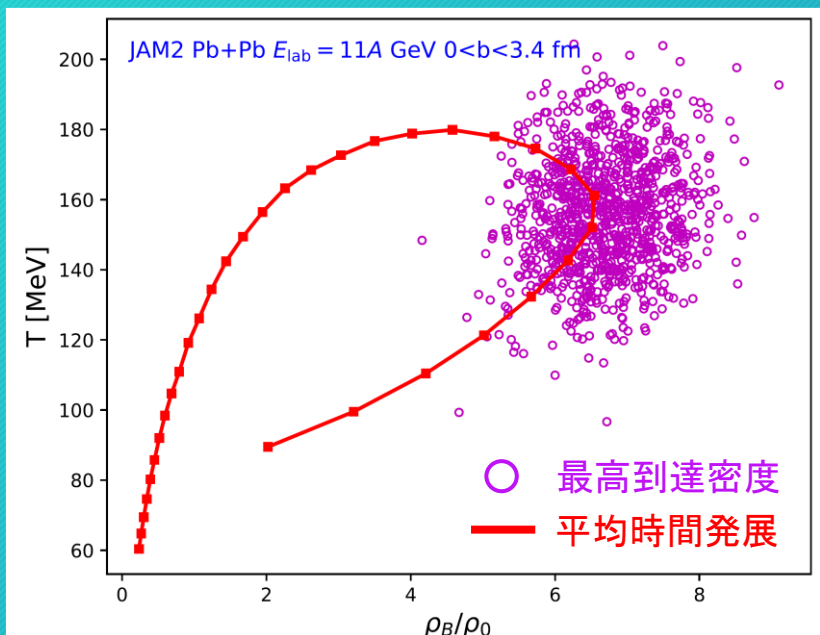
強い相互作用の相図の探索

重イオンビーム実験の目指す物理

- ハドロン物理の目標
 - クォークレベルから物質、特にハドロンや原子核を理解する事
- 強い相互作用の相構造
 - クォークからハドロンへの変化は、強い相互作用の相(“QCD真空”)の変化
 - カイラル対称性の自発的な破れ
 - NGボソンとしての軽い π 中間子の出現
- 相転移を実験室で再現し、直接的に探究する重要性
 - 高エネルギー密度状態や高バリオン密度状態によりハドロン相の“QCD真空”を破壊しクォーク相へと転移
- RHIC/LHCでの実験を通じ高温状態への理解は進んだが、高密度状態への理解が課題
 - 有限密度媒質としての原子核の理解には、密度方向への研究が必要
 - 物理現象として、興味深い相構造(臨界点、一次相転移、カラー超伝導)が理論的に示唆されている
 - 中性子星やクォーク星の状態方程式に対する直接的な情報が得られる可能性

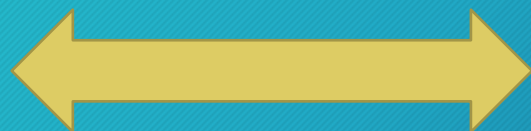
J-PARCエネルギー領域での探索

JAM2 Calculation by Y. Nara:
<https://gitlab.com/transportmodel/jam2>



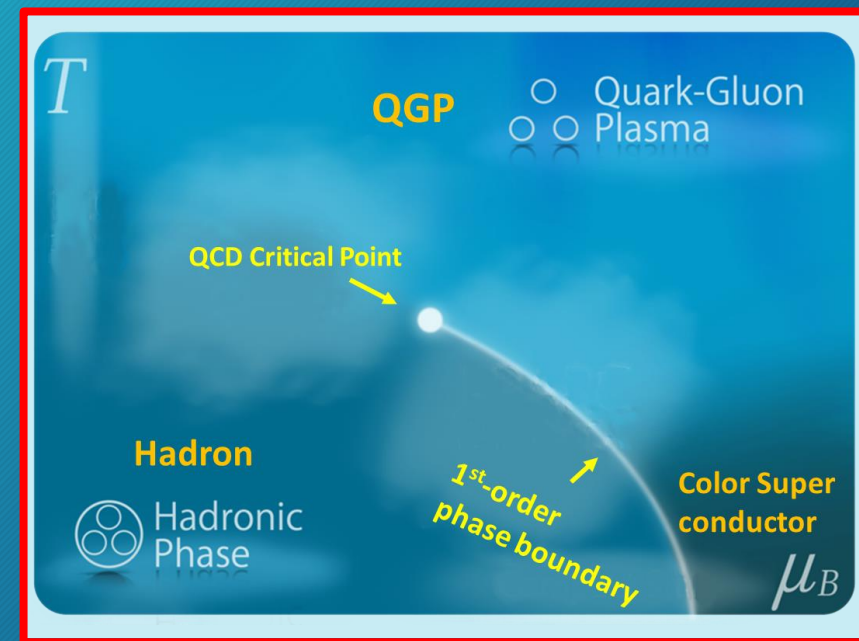
実験で得られる温度と密度
過去のデータに基づくモデル計算@J-PARC

学術の構想・素粒子原子核シンポジウム



相図の横軸は正確には定まっていない
臨界点・一次相転移線の位置の確定
クォーク相・カラー超伝導相の探索

中性子星の中心密度は、5~7 ρ_0 程度
J-PARCでの直接研究に適している

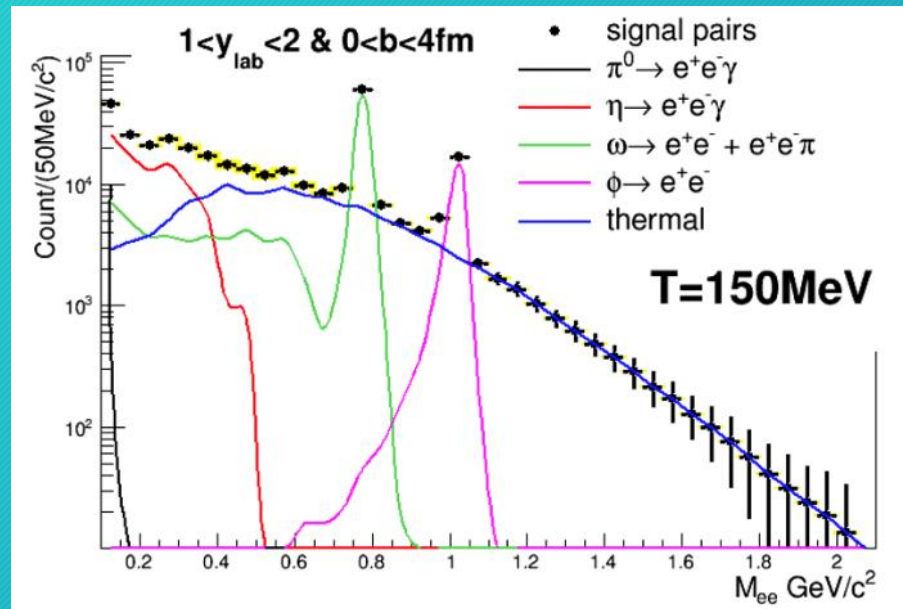


理論的に示唆される強い相互作用の相図

熱力学的な測定を複合的に実施することで相構造の物理に迫る

期待される測定：温度

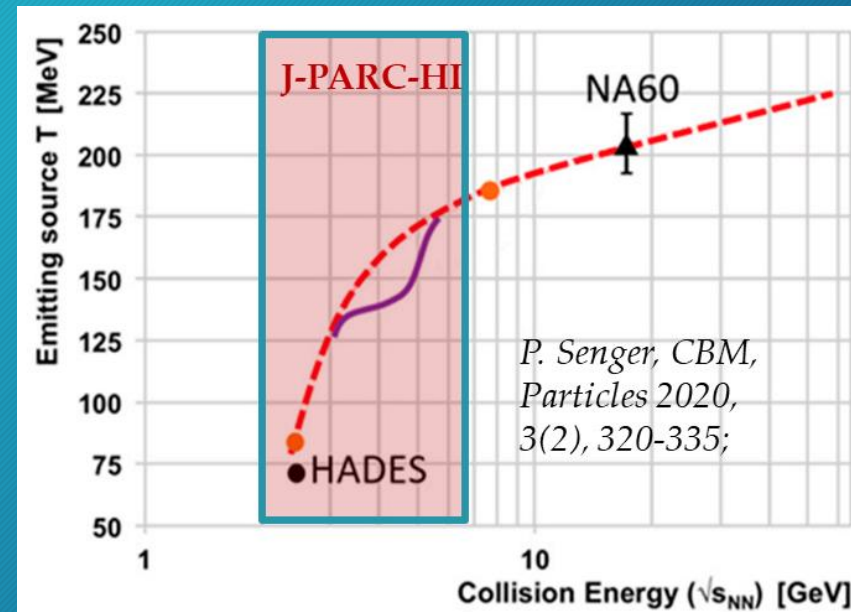
生成された系からの熱輻射による温度測定



電子・陽電子対の不変質量分布

学術の構想・素粒子原子核シンポジウム

エネルギー依存性を測定
その構造から相転移の相図上の位置を探索

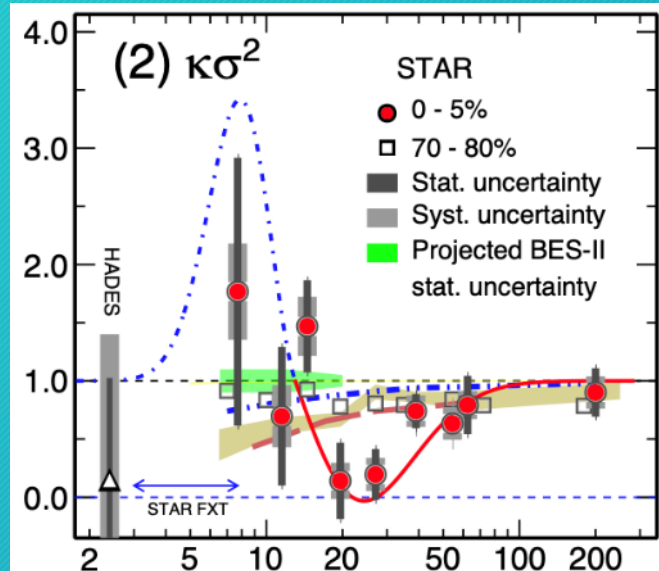


温度の衝突エネルギー依存

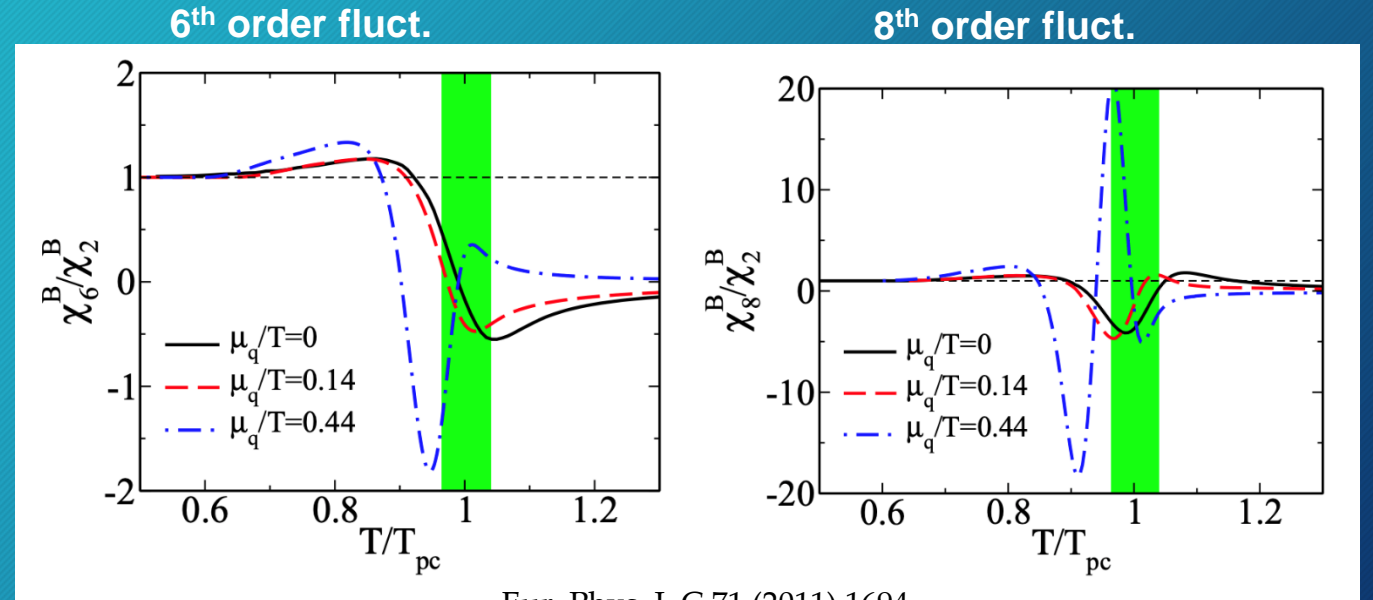
2022/9/24

期待される測定：相転移に伴う揺らぎ

- 保存量揺らぎの高精度測定
 - 系の相関長や相転移近傍(臨界点、クロスオーバーや一次相転移)に感度



4次のモーメントの衝突エネルギー依存性

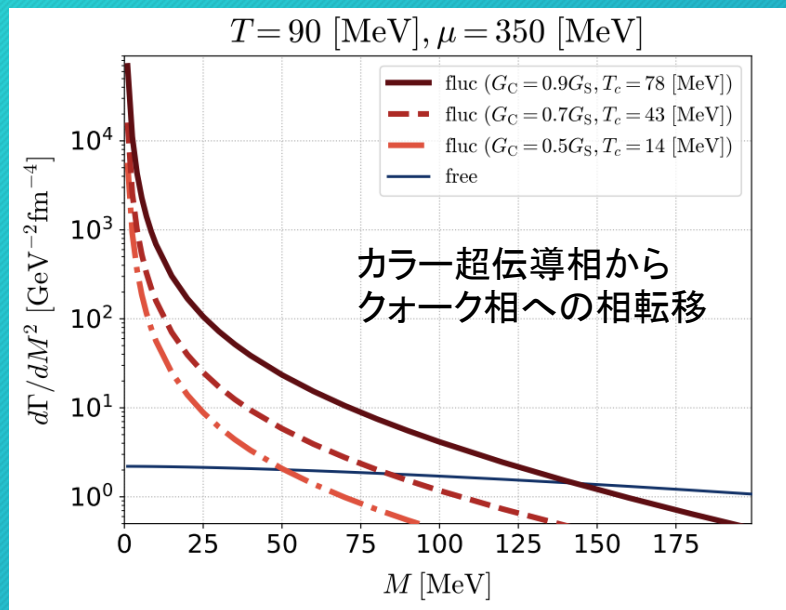


Eur. Phys. J. C 71 (2011) 1694

カラー超伝導相の探索

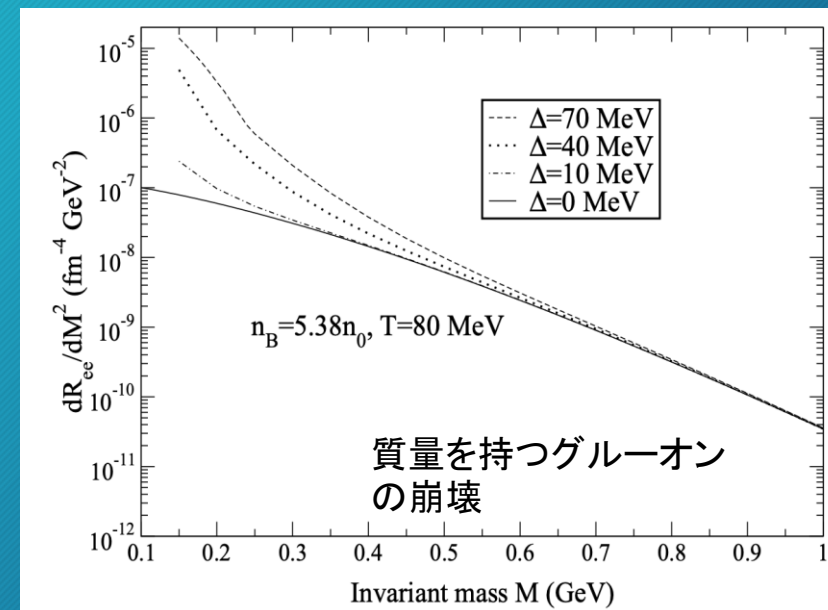
低質量&低運動量電子対の収量増大

T. Nishimura, M. Kitazawa, T. Kunihiro, arXiv:2201.01963



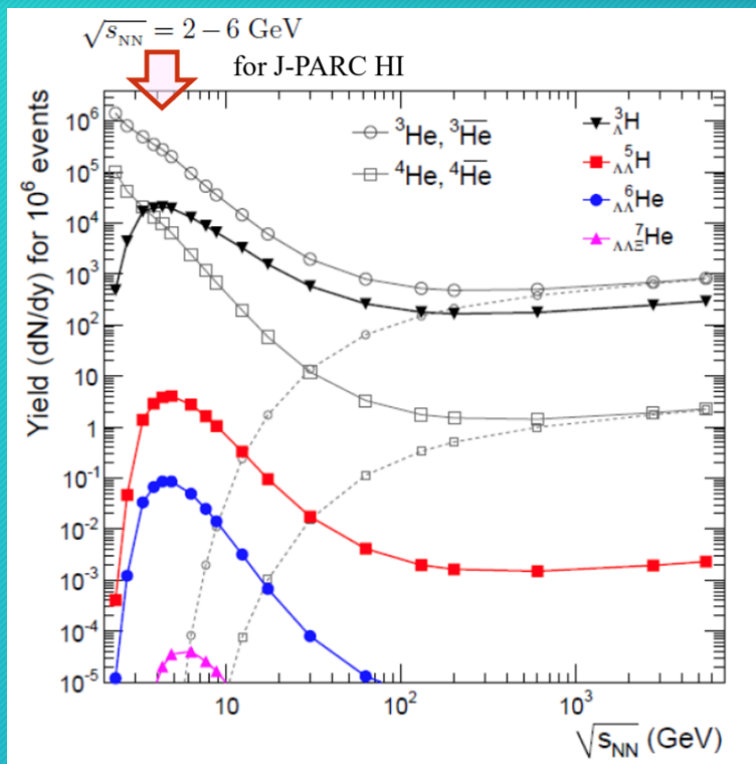
電子・陽電子対の不変質量分布

Jaikumar, Rapp, Zahed, Phys. Rev. C 65, 055205

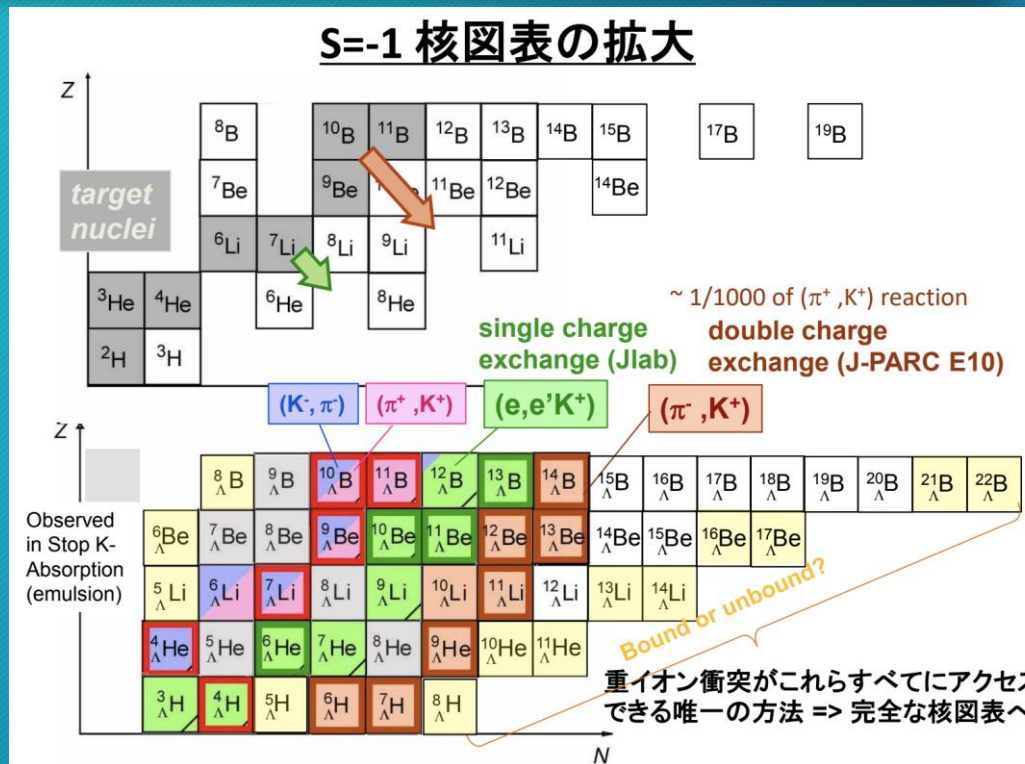


電子・陽電子対の不変質量分布

ストレンジネス核物理



ハイパー核の生成レート

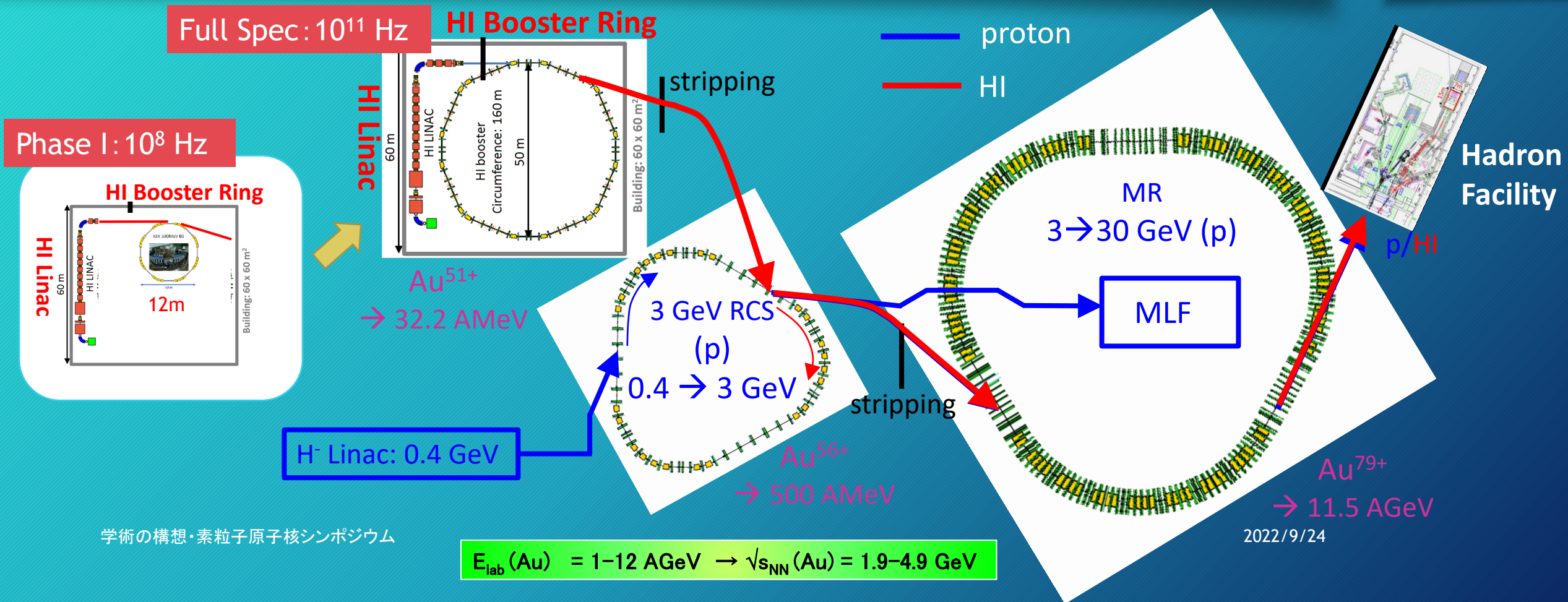


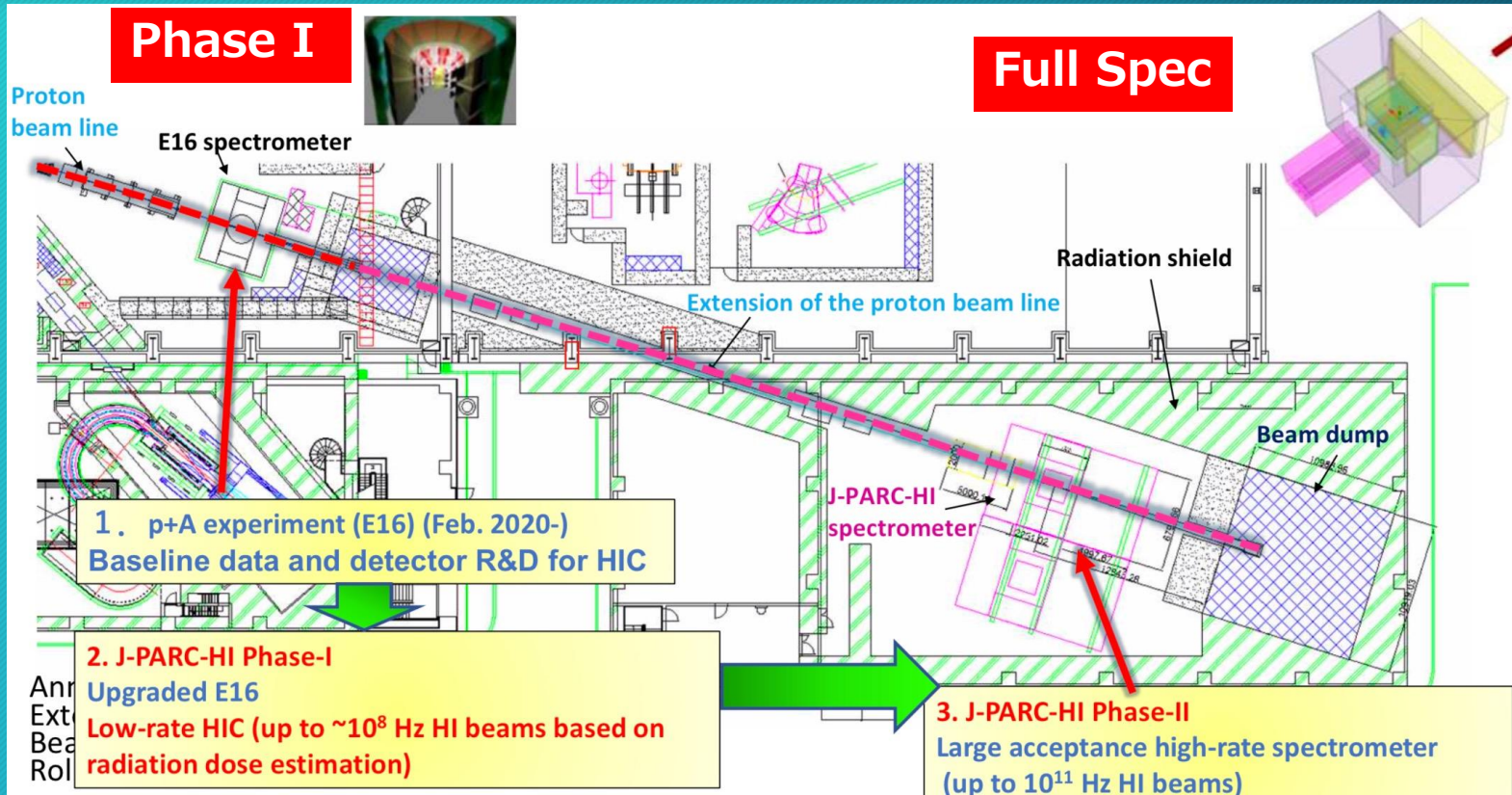
J-PARCでの重イオン実験計画

- J-PARCにおいて重イオン加速を実現し、重イオンビームと原子核標的により高密度媒質を生成し、高密度クォーク相を発見する
 - Phase 1として、最速での実験開始を目指す
 - 加速器: 10^8 Hz 程度のビーム量・重イオン用線形加速器+KEK Booster Ring
 - 測定器: Interaction rate: 100 kHz、Particle Multiplicity: ~ 30/module
 - E16実験のアップグレード
- 従来より飛躍的に高精度・高統計の測定を実施することで、カラー超伝導相などの新しい物質相の探索を進め、相構造の全容を解明する
 - 世界最高強度での実験を目指す
 - 加速器: ビーム強度: $10^9 \sim 10^{11}$ Hz・重イオン用ブースターリングの新設
 - 測定器: 重イオン専用大立体角測定器の建設

加速器アップグレード

11

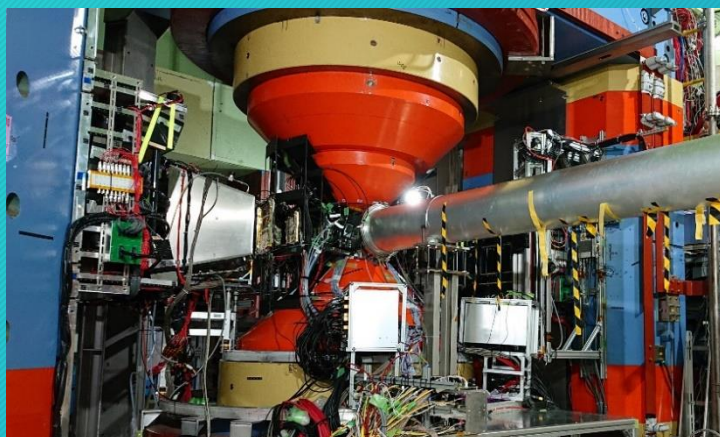




Phase I 実験

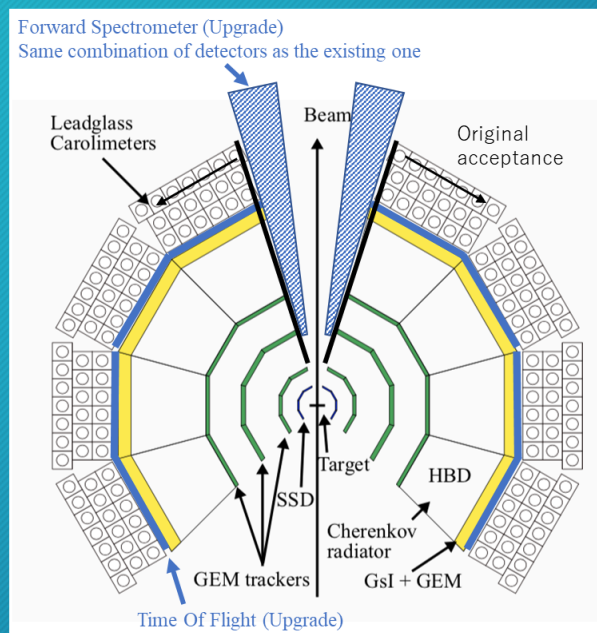
13

- 既存の実験のアップグレードによる電子・ハドロン測定
 - 10^8 Hz beam, IR rate \sim 100 kHz
 - 高密度クォーク物質からの輻射(電子対生成に反映)による温度測定
 - 衝突エネルギーの走査による1次相転移の探索
 - ハドロン粒子相関によるクォーク相からの粒子放出異方性の測定

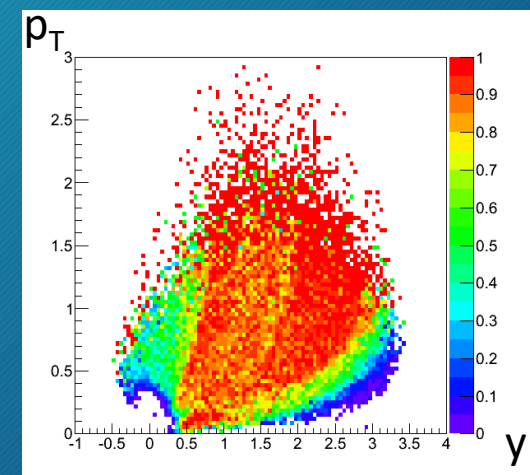


既存の実験装置の写真

学術の構想・素粒子原子核シンポジウム



アップグレードの概念図



Proton acceptance in A+A

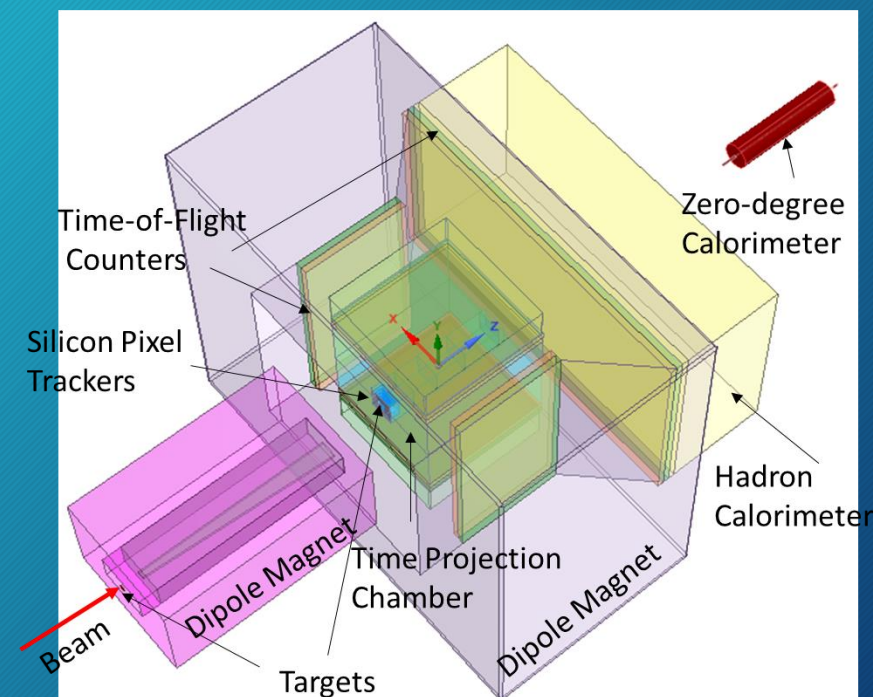
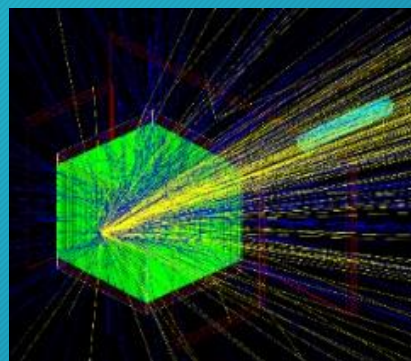
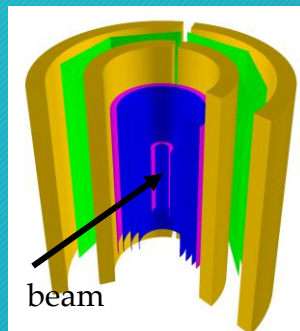
2022/9/24

Full Spec 実験

14

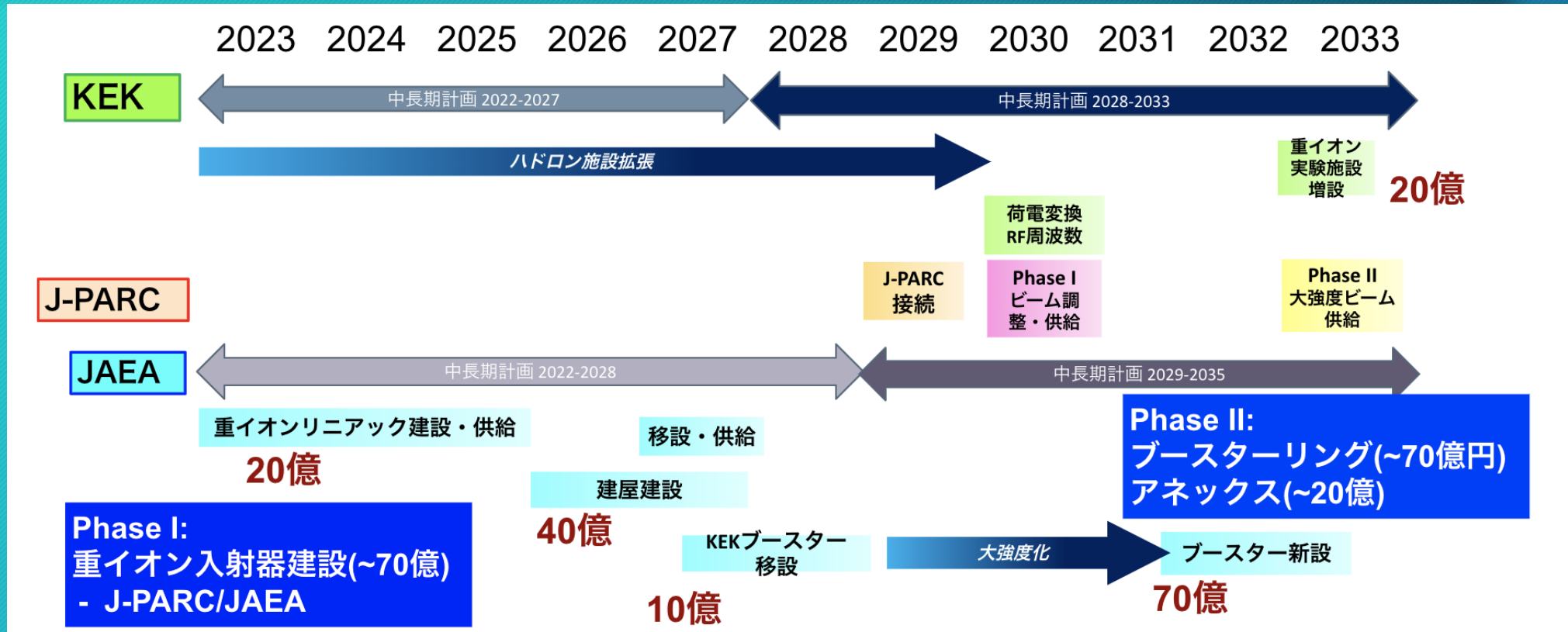
- 新しい実験エリアと高レート用スペクトロメータの建設
 - 10^{11} Hz beam
 - 高次の揺らぎ測定
 - 低質量低運動量レプトン対
 - 低運動量重クォーク(メソン、バリオン)
 - 網羅的な軽いハイパー核の研究

低運動量電子測定用にALICE 3で計画中のシリコン検出器の採用も検討中



Schematic view of Hyper-nuclei spectrometer

年次計画

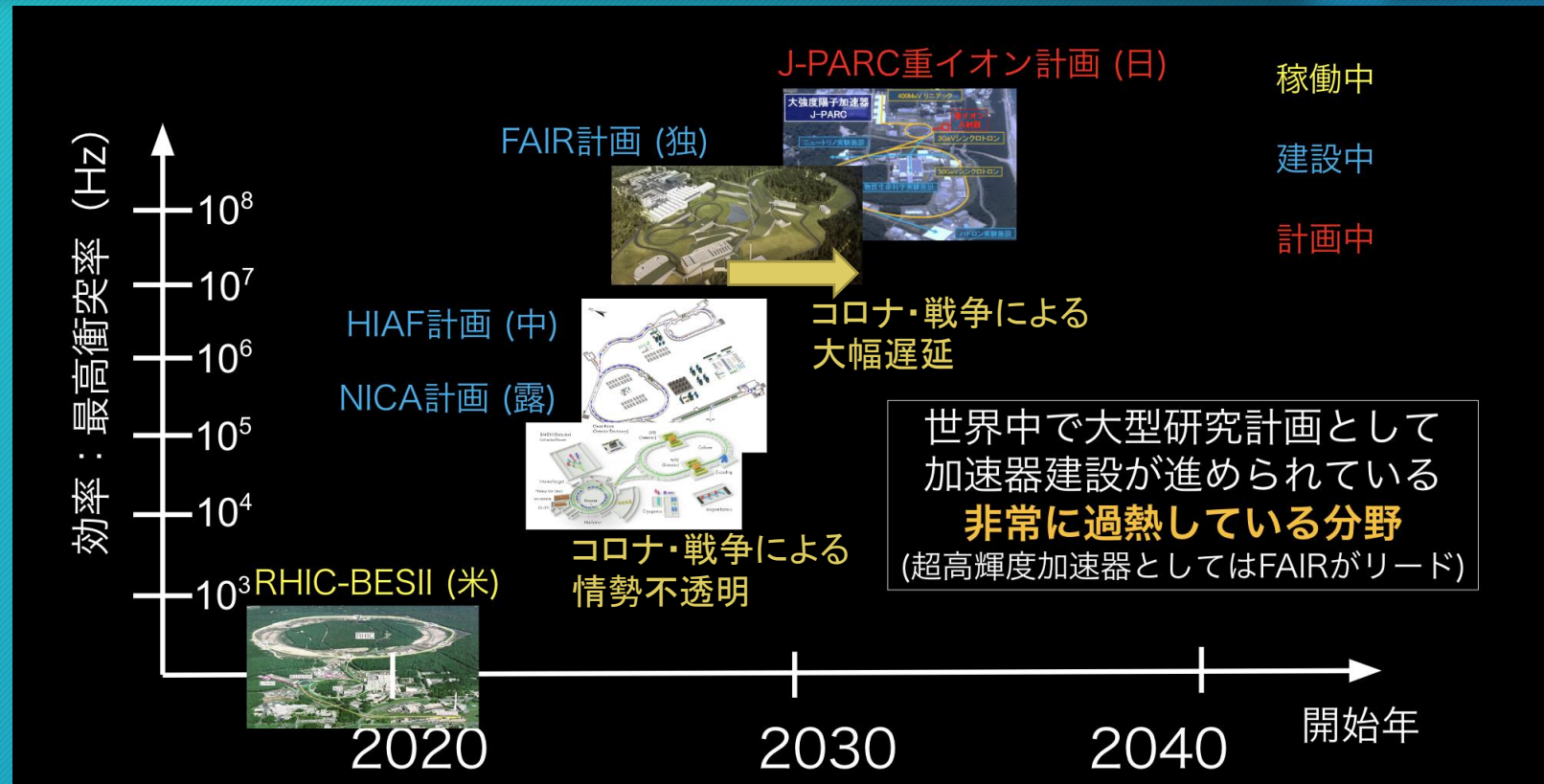


世界情勢

同等のエネルギー領域での
加速器・実験計画は存在
物理の重要性

ポイントは、高輝度化
ゆらぎ・カラー超伝導相
探索などカギとなる測
定は高統計を必要

RHIC/LHCで得られた知見を
反映した測定
最新の検出器・回路技
術を導入した実験計画



まとめ

- 高密度QCD = 重イオン物理の新たな潮流
 - 臨界点、一次相転移、カラー超伝導相、クォークキヨニック相
- J-PARCエネルギー領域での実験の重要性
 - 高密度核物質を生成
 - 高密度クォーク相やその他の新たな相に手が届く可能性
- 加速器計画+測定器計画を立案
 - 加速器: 新LINAC+KEK PS booster (Phase-I, 70億), 新booster (Phase-II, 90億)
 - 実験: E16 upgrade (Phase-I), J-PARC-HI spectrometer (Phase-II)