

# 日本の核物理の将来 「高エネルギー重イオン物理 の将来」

郡司 卓(東大CNS)

江角 晋一(筑波), 大山 健(Heidelberg), 坂井 信吾(LBL)

坂口 貴男(BNL), 志垣 賢太(広島), 下村 真弥(ISU),

中條 達也(筑波), 鳥井 久行(東大CNS),

蜂谷 崇(理研), 平野 哲文(上智), 福嶋 健二(慶応)

世話人: 早野龍五(東大)

# Outline

- \* 高エネルギー重イオンWGに関して
- \* 高エネルギー重イオンの夢
- \* 高エネルギー重イオンの夢に向けた取り組み
- \* 高エネルギー重イオンのこれまでの取り組み
- \* 高エネルギー重イオンの現状と今後
- \* 必要となるリソース
- \* さらなる発展に向けた研究組織の設立
- \* 他のWGと連携
- \* まとめと展望

# 高エネルギー重イオンWGに関して

- \* 12人で構成

- \* 10人(実験、6人国内機関+4人海外機関)+2人(理論)

- \* 合計15回の小会合と2回の分科会

- \* <http://indico.cns.s.u-tokyo.ac.jp/categoryDisplay.py?categId=11>

- \* ご協力ありがとうございました。

- \* レポート第一稿

- \* Introduction/Recent Achievement/Future Program

- /Outlook(Facility upgrade, Resources)/他のWGとの連携

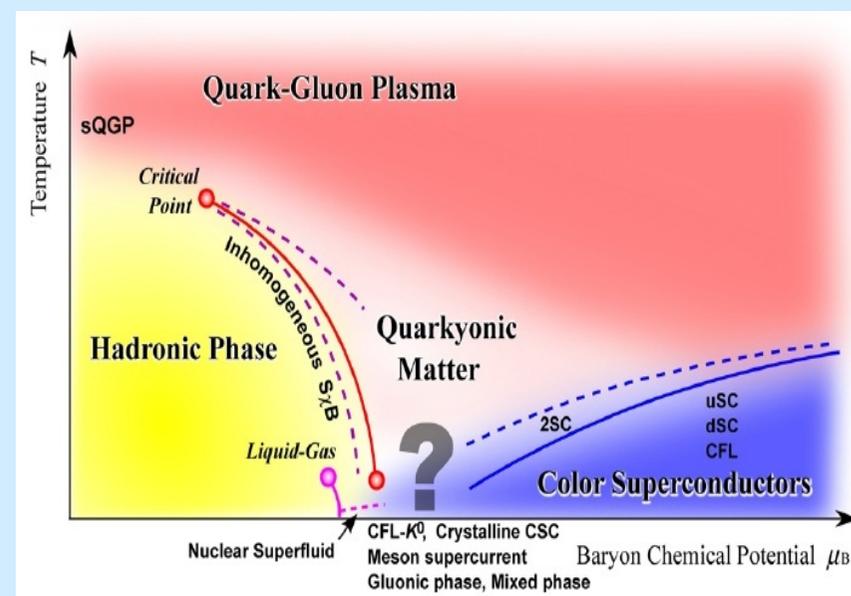
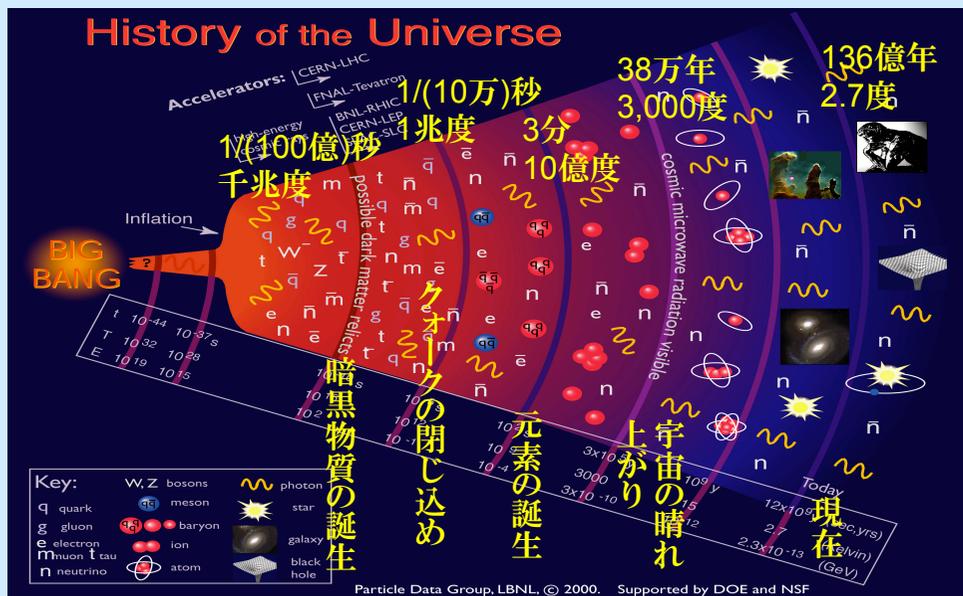
- \* [http://www.cns.s.u-tokyo.ac.jp/~gunji/LRP/LRP\\_HEHIC\\_ver5.pdf](http://www.cns.s.u-tokyo.ac.jp/~gunji/LRP/LRP_HEHIC_ver5.pdf)

- \* 今後も分科会を開催し、戦略や取り組みの具体化を検討したい

# 高エネルギー重イオンの夢

## \* 高エネルギー重イオンの夢

- \* 宇宙初期での極限物質の様相とその進化、物質創成の謎の解明
- \* 星の終焉での極限物質の様相、高密度QCD多体系の相構造の解明
- \* QCD真空の構造、ハドロン質量の発現機構の解明
- \* 高強度ゲージ場と非平衡QCDダイナミクスの解明



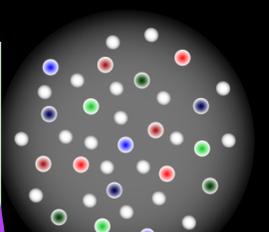
# 夢に向けた取り組み

- \* **高エネルギー重イオンの夢に向けた取り組み**
  - \* **高エネルギー重イオン衝突によるクォークグルオンプラズマ(QGP)物性の精密研究、高強度カラー場のダイナミクスと熱平衡化機構の解明**
    - \* RHIC/LHC/post LHC
    - \* **高・中間エネルギー重イオン衝突による有限密度QCD相構造の研究**
      - \* RHIC/FAIR/J-PARC
    - \* **高エネルギー重イオン衝突を用いたカイラル対称性の回復現象の研究**
      - \* LHC/RHIC/FAIR/J-PARC
  - \* **国際共同実験を中心とした研究遂行**
    - \* これまでの国際ネットワークの活用
    - \* 実験策定や検出器建設段階から携わりinitiativeを取る

# 宇宙における物質(クォーク多体系)の進化

温度 ↑

ビッグバン (初期宇宙)



高エネルギー  
原子核衝突実験  
(RHIC@BNL, LHC@CERN)

相転移

クォーク・グルーオン・  
プラズマ (QGP)

膨張による冷却

新領域: 高密度状態

ハドロン  
バリオン(重粒子) メソン(中間子)

高インテンシティー  
原子核衝突実験  
(FAIR@GSI, NICA@Dubna, J-  
PARC, RHIC@BNL)

ハドロン物理  
(J-PARC, RCNP-LEPS,  
Jefferson Lab.)

? 超伝導状態

精密核物理  
(RCNPサイクロ,...)

中性子星

クォーク星?

H, He → Fe

ストレンジネス核物理 (J-  
PARC)

重力圧縮

重力圧縮

不安定核物理  
(RIファクトリー@理研,...)

sクォーク出現

密度

Fe → U 超新星爆発

通常の原子核

高密度核物質

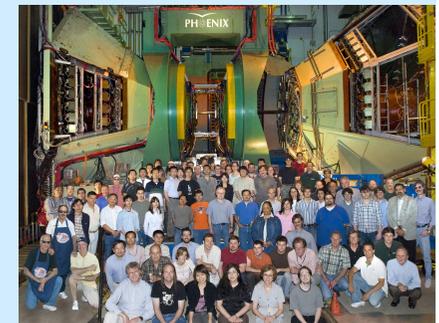
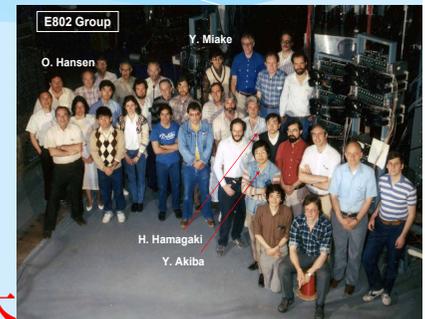
クォーク物質

田村さんスライド(日本学術会議素核研分科会2009)を勝手に修正

# これまでの取り組み

## \* 高エネルギー重イオンの歴史

- \* 1974- LBL BEVALAC ( $E_{CM}/A=2\text{GeV}$ )
  - \* 日本Grの先駆的な貢献
- \* 1986- BNL AGS/CERN SPS ( $E_{CM}/A = 5-17\text{GeV}$ )
  - \* 高バリオン密度(AGS)、QGP生成の尻尾(SPS)
    - \* スレンジネス収量増大、 $J/\psi$ 収量抑制、低質量レプトン対収量増大
- \* 2000- BNL RHIC ( $E_{CM}/A = 200\text{GeV}$ )
  - \* QGP生成の確証(流体的な振舞、強結合QGP)
    - \* 高横運動量ハドロン・重クォークの収量抑制、楕円フロー、熱的光子、 $J/\psi$ 収量抑制、低質量レプトン対の収量増大など
  - \* PHEIX実験: 日本Grの多大な寄与(9国内機関)
    - \* 学術論文>100, 引用数>10000, 博士論文>100
- \* 2010- CERN LHC ( $E_{CM}/A = 2.76\text{TeV}, 5.5\text{TeV}$ )
  - \* QGPの物性研究
  - \* ALICE実験: 東大、筑波、広島



# 今後の展開

## \* 重イオン加速器の世代と共に \* 第一世代

- \* 稼働: 1960年代から
- \* Fixed target at SIS-AGS-SPS
- \* Lattice-QCD( $T_c$ ) = 灯台の役割

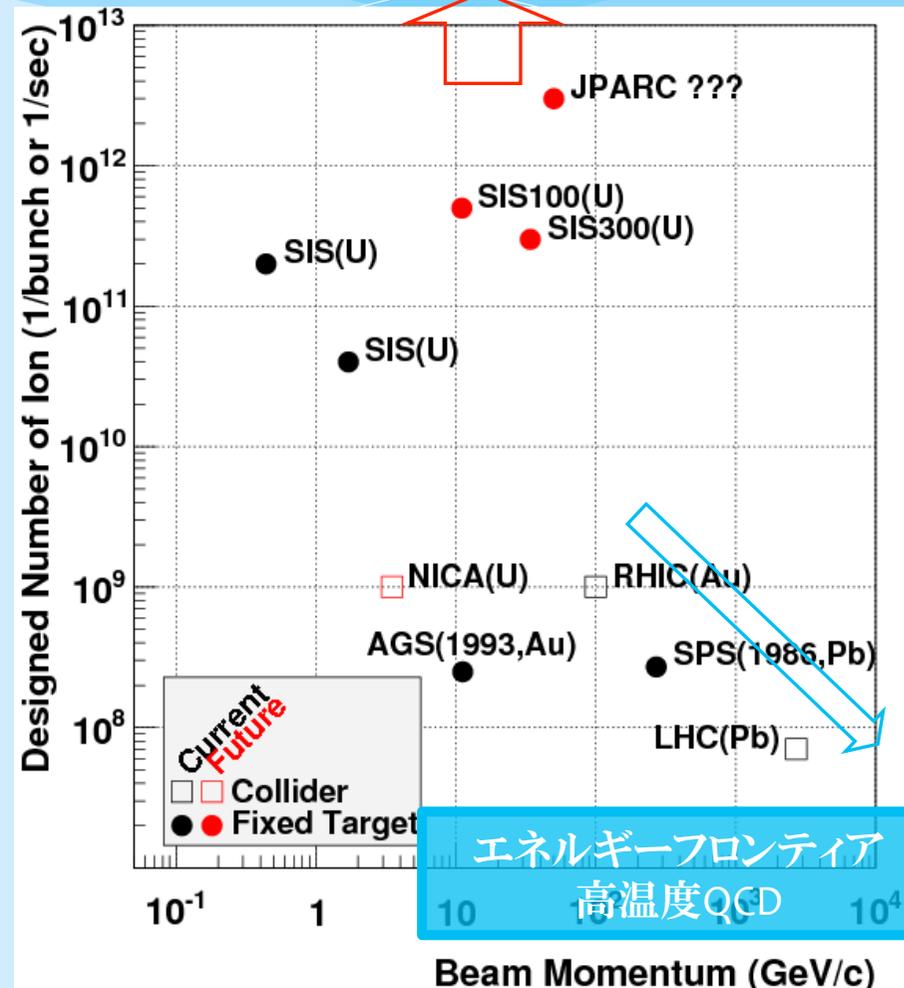
## \* 第二世代

- \* 提案: 1980年台以降
- \* 稼働: 1990年-2020(2030)年
- \* 高エネルギー = コライダーへ
  - \* RHIC-LHC
  - \* QGPの探索の終結と物性研究、QGP生成機構の解明へ

## \* 第三世代(将来計画)

- \* 提案: 2000年台
- \* 稼働: 2020年頃以降
- \* 高インテンシティー
  - \* 高密度を狙う。10-50 GeVビーム。
  - \* Low energy collider: NICA, RHIC
  - \* Fixed target: SIS, JPARC
  - \* 高密度QCD物質の研究

インテンシティーフロンティア  
高密度QCD物質相構造の研究



エネルギーフロンティア  
高温QCD

将来計画 low-x: "Toward the Saturation Model"

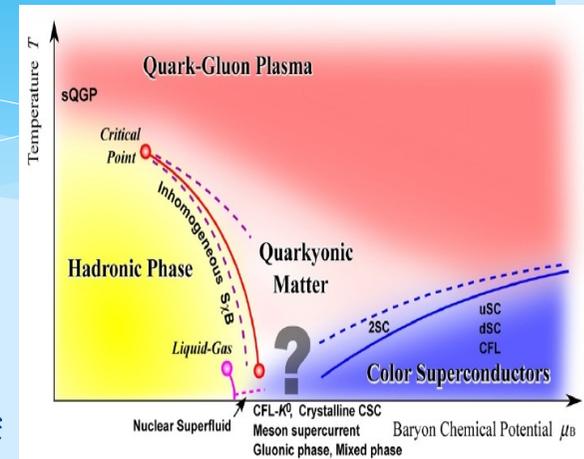
# QGP物性の精密研究：現状と今後

- \* 理論・実験の着実な進展
  - \* 強結合QGPの発見(RHIC/LHC)
  - \* 相対論的流体計算(熱平衡系の時空発展の記述)、格子QCD計算(高温QCD物質のEOS)、CGC理論(高エネルギーQCD反応)、ゲージ/重力対応(強結合QCDプラズマの理解)
- \* 「発見」から「精密研究」への展開
  - \* RHIC-LHC(-post LHC)に渡る包括的なQGP物性研究
    - \* QGP物性の温度、エネルギー密度依存性
      - \* 強く相互作用する量子多体系の物理、物性物理とのクロスオーバー
    - \* post LHCへの新しい取り組み(多方向同時衝突、宇宙線、レーザー)
      - \* (例)弱結合QGP物性研究への道、新しい概念への挑戦
  - \* 早期熱平衡化機構の解明、高強度カラー場のダイナミクス
    - \* 衝突初期条件(グルオン飽和)の定量性とその後の時空発展
      - \* 非平衡QCDのダイナミクス、重イオン物理の新基軸
- \* 実験アップグレード計画(PHENIX/ALICE)と技術革新の推進

# QCD相構造の研究：現状と今後

## \* 最近の進展

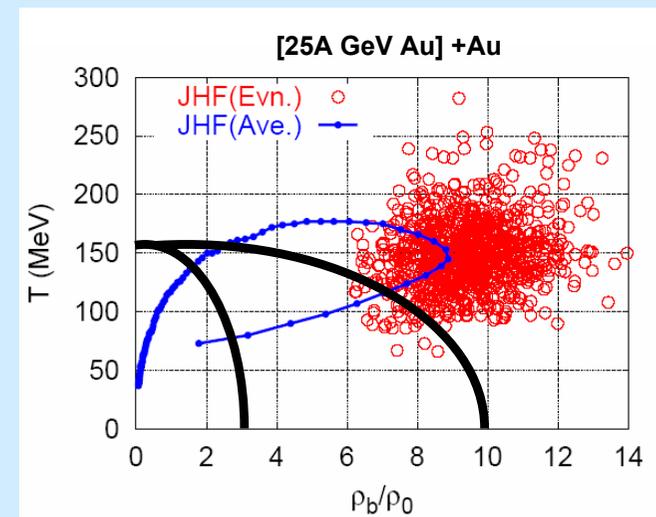
- \* 豊かな相構造(格子QCD、有効模型計算)
  - \* 臨界点(線) (模型によって色々な予言)
  - \* (一時相転移に伴う)非一様混合相
  - \* クォークオニック相、ダイクォーク励起・凝縮



- \* 中性子星観測(高密度物質EOS)、冷却原子気体(強相関物性)

## \* 高インテンシティビームを用いた原子核衝突への新展開

- \* 最高バリオン密度、AGS-SPSのエネルギー
- \* RHICのビームエネルギー走査実験の推進
  - \* 高輝度化加速器アップグレード
- \* FAIR/J-PARCでの重イオン衝突実験の推進
  - \* 物理・実験アプローチの戦略化が必要
    - \* 衝突初期に敏感な稀事象
    - \* 透過的なプローブ



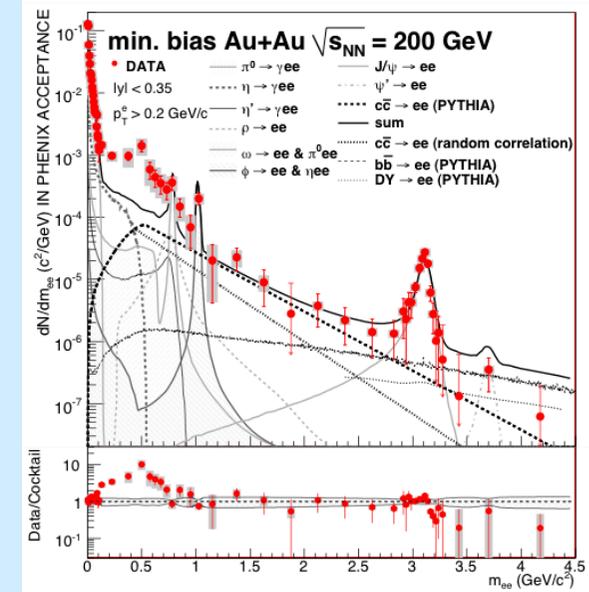
# カイラル対称性回復現象の研究： 現状と今後

## \* 意義と背景

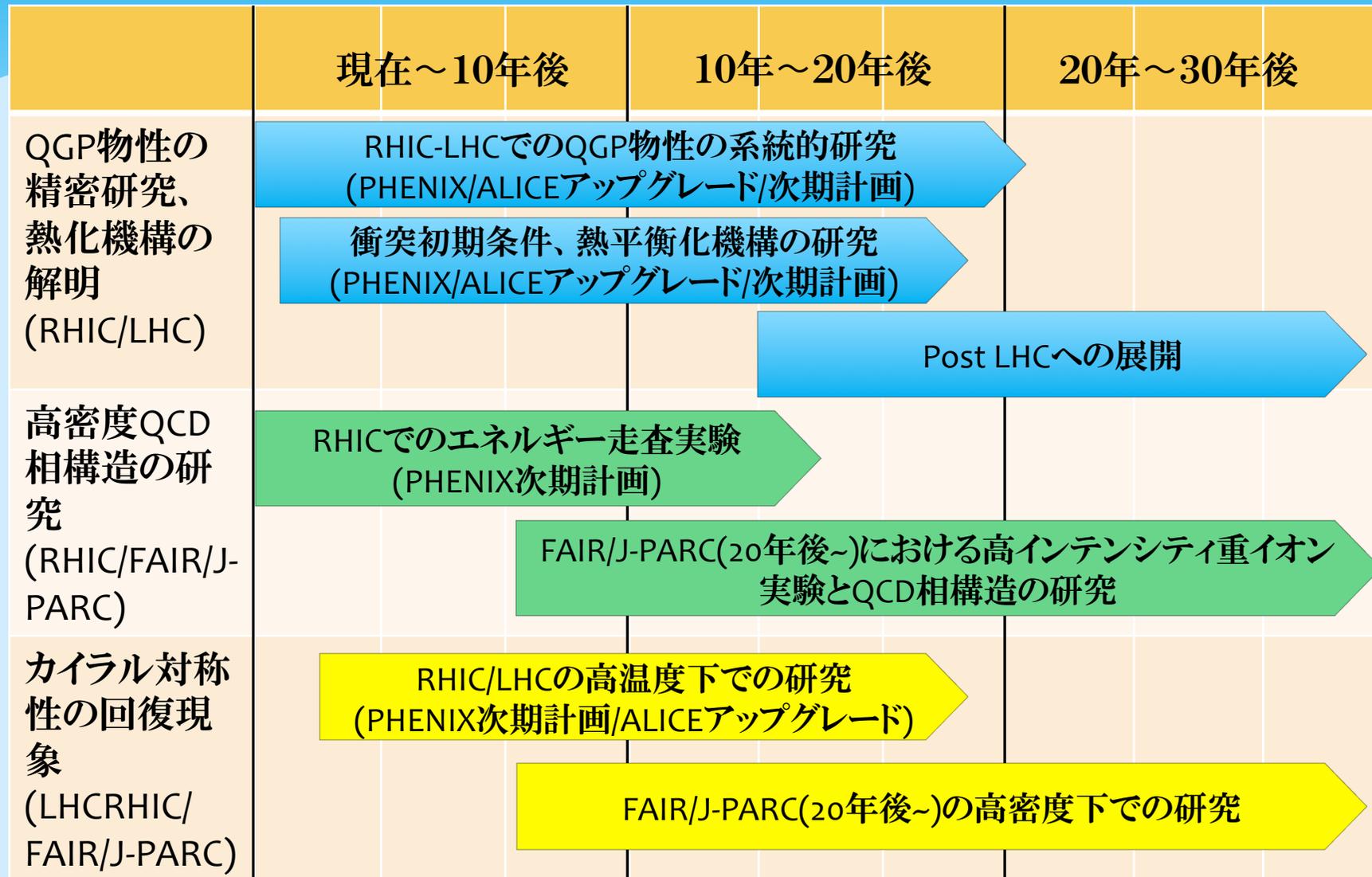
- \* 非閉じ込めという状況下で見るQCD真空の直接的研究
  - \* 温度スケール(RHIC/LHC)、密度スケール(FAIR/J-PARC)
- \* 重イオン衝突での先行実験結果
  - \* 低質量レプトン対の収量超過(HADES/CERES/PHENIX)
  - \* 低質量ベクトル中間子測定(NA60/PHENIX)

## \* 系統的な研究と改善に向けた取り組み

- \* エネルギー、衝突核種依存性
- \* 現状の精査と今後の新規・アップグレード計画
  - \* 高粒子多重度中でのS/Nの向上(検出器開発)
  - \* 他の測定項目の可能性
    - \* ミューオン対(RHIC/ALICEアップグレード)
    - \*  $\sigma$ 中間子、擬スカラー、 $K^*$ (FAIR/J-PARC)
    - \* カイラル磁気効果(RHIC/ALICE)



# 実行計画タイムライン



\*加速器建設/検出器/DAQ system/TriggerのR&Dは当然の事ながら毎年の重要なeffort(上には書かれていない)

# リソースに関して

## \* これまでのリソース:

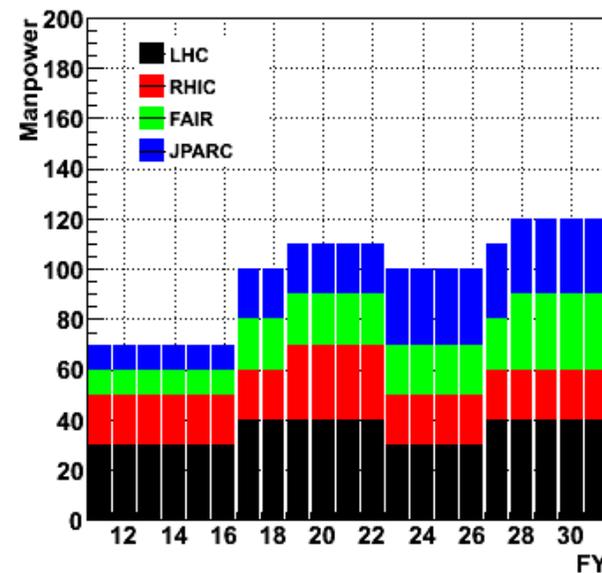
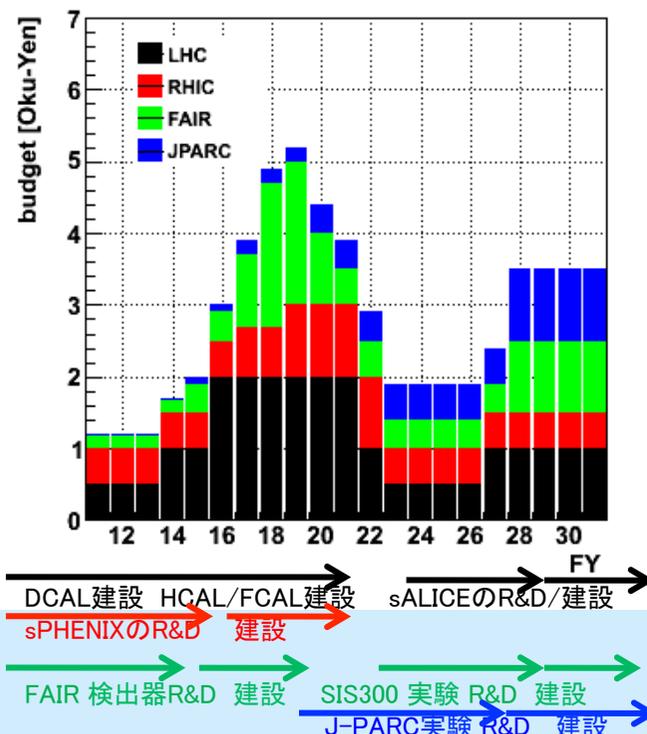
\* RHIC-PHENIX: 2-3億円/30-40人/年(建設時)、1億円/100人/年(Run4)

\* LHC-ALICE: これまでの平均で0.5億円/20人/年

\* 予算母体: 日本学術振興会・日米科学協力事業(高エネルギー)  
\* 予算母体: 各研究機関の自助努力  
特別研究推進、基盤研究、大学運営費  
頭脳循環プログラム

## \* 今後必要となるリソース:

\* 加速器建設(FAIR/J-PARC)に関するリソースは含んでいない



\* RHICでの経験(予算、人員)より求めたもので、今後の議論で精度を高めていく

# 研究組織の拡充化

- \* この物理の発展にはコミュニティの活性化と拡充化が重要
  - \* 高エネルギー重イオン衝突実験は国際共同実験。多くの研究機関の協力のもとで遂行
  - \* コミュニティの活性化には、魅力ある物理、豊富な人的資源、研究資金(検出器開発、現地での研究遂行費)が不可欠
    - \* 掲げる物理(Big picture/big science) で繋がる大規模研究組織の確立は一つの方法
      - \* (例)EMMI@GSIのような「極限状況下での物性」で繋がる組織
      - \* (例)「強結合系」「初期宇宙」、「高強度場」、「高密度天体」で繋がる物理
      - \* BNL/CERN/FAIRなど海外における研究拠点の充実化
      - \* その一方で、先導性や魅力のある検出器・関連技術開発もコミュニティの活性化に重要なアイテム。技術開発においても引っ張っていく
  - \* 具体的な戦略の議論を開始した。今後も継続予定。

# 他WGとの連携

- \* ハドロンWG
  - \* カイラル対称性の(部分的)回復
  - \* 重イオン衝突でのエキゾチックハドロン生成
- \* ストレンジネスWG
  - \* 重イオン衝突でのハイパー核生成
  - \* ハイパー核生成 by 反重イオンビーム(反deuteron)
  - \* 高密度原子核(deeply kaonic bound state)
- \* 核子構造WG
  - \* Small  $x$ におけるパートン構造(系の初期条件とダイナミクス)
- \* 精密核物理WG
  - \* 高密度核物質の相構造、状態方程式
- \* 計算核物理WG
  - \* 有限密度格子QCD計算、流体数値計算シミュレーション

# まとめと展望

- \* **高エネルギー重イオンの夢**
  - \* 宇宙初期での極限物質の様相とその進化、物質創成の謎の解明
  - \* 星の終焉での極限物質の様相、高密度QCD多体系の相構造の解明
  - \* QCD真空の構造、ハドロン質量の発現機構の解明
  - \* 高強度ゲージ場と非平衡QCDダイナミクスの解明
- \* **高・中間エネルギー重イオン衝突**
  - \* LHC/RHIC/FAIR/J-PARC/post LHC計画
  - \* 実験アップグレード計画、実験次期計画、加速器アップグレード計画
- \* **研究組織の充実化の必要性**
- \* **他のWGとの連携**
- \* **最終レポートの完成と実行に向けた戦略化**
  - \* ご協力よろしくお願ひ致します。

# Backup slides

# 章立て: Future Program

## \* “QGP物性の精密研究”

### \* RHIC-LHCに渡る包括的なQGP物性研究

- \* QGP物性の温度、エネルギー密度依存性

- \* RHIC: 7.7 GeV – 200 GeV

- \* LHC: 2.76TeV (or 900 GeV) – 5.5 TeV

- \* 異なるエネルギーでの重イオン衝突の時空発展の完全理解

### \* RHIC-LHCで類似プローブを使った系統的な研究

- \* ジェット、ジェット対(ハドロンとの相関)、光子-ジェット

- \* エネルギー損失機構(阻止能)、失ったエネルギーの振舞(輸送係数)

- \* 重クォーク(ジェット、メソン/バリオン)、クォークonia

- \* 遮蔽長、輸送係数、

- \* レプトン対、熱的光子

- \* 熱的性質、カイラル対称性

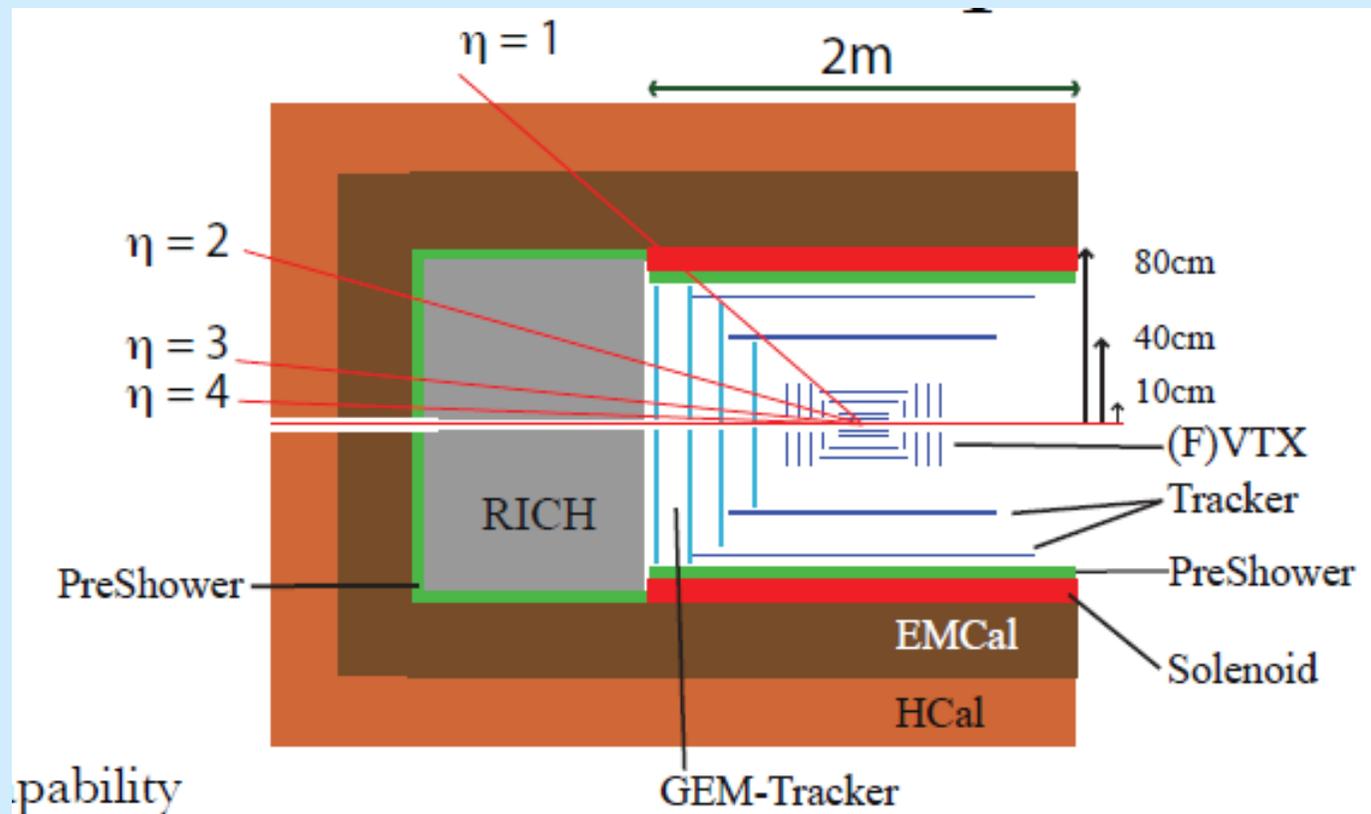
- \* 前方rapidityでのsmall-xの物理

- \* 衝突初期条件、広いrapidity gapでの粒子相関(衝突直後の情報)

# 章立て: Future Program

## \* PHENIXの時期計画”sPHENIX”へ

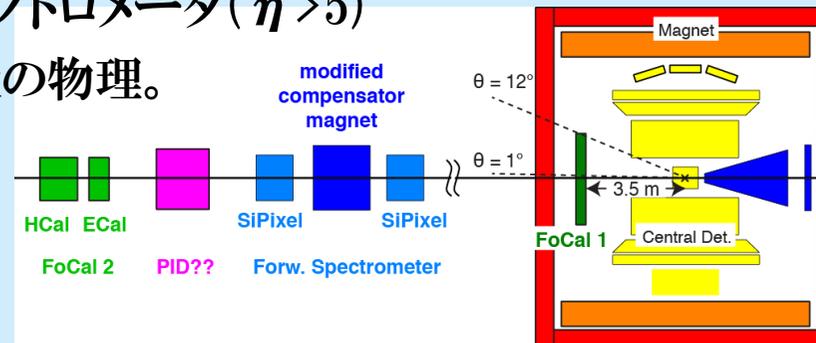
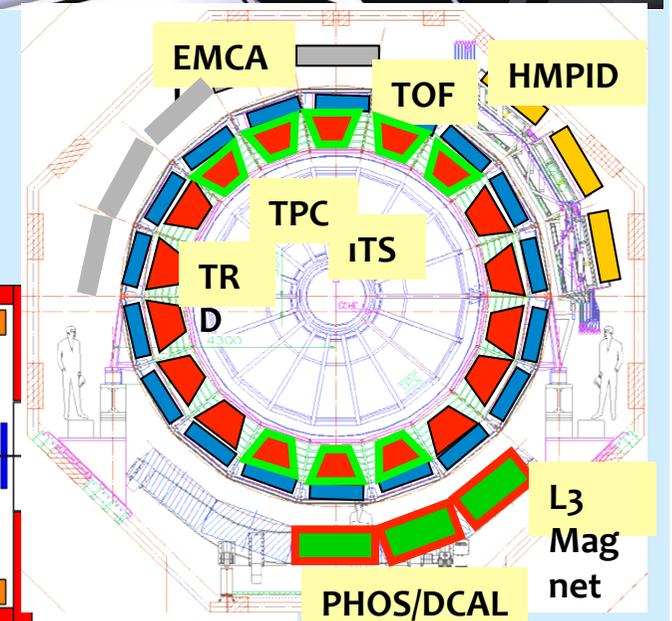
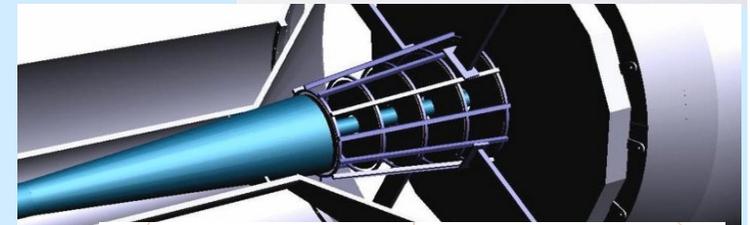
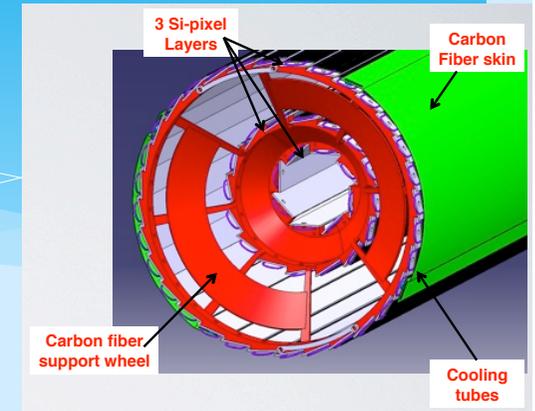
- \* ジェット、重クォークの測定、(PID、光子、電子対測定実現性は議論中)
- \* 前方でPID測定 (small-xの物理)
- \* Totalで\$~60Mのプロジェクト。Stagingして建設



# 章立て: Future Program

## \* ALICE upgrade計画

- \* 最内層pixel検出器
  - \* 重クォーク、(重クォークバリオン、重クォークジェット)
- \* Forward方向pixel検出器
  - \* 重クォーク、低質量ベクトル中間子
- \* PID用RICH検出器
  - \* 高横運動量ハドロン識別、ジェット種
- \* Di-jet用カロリメータ
  - \* ジェット対測定
- \* 前方W+Siカロリメータ ( $3 < \eta < 5$ )
  - \* Small-xの物理。
- \* 前方スペクトロメータ ( $\eta > 5$ )
  - \* Small-xの物理。



# カイラル対称性の研究

## \* 背景と方向性

### \* 通常原子核密度中での部分的回復の研究

#### \* ストレンジネス・ハドロン物理の主テーマの一つ

- \* ベクトル中間子( $\rho, \omega, \phi$ )の核密度中での質量・幅の変化
- \*  $\Pi$  中間子と原子核の束縛中での  $\pi$  崩壊定数測定

### \* 高温・高密度状況下での対称性の回復に関する研究

#### \* QCD相図(非閉じ込め相転移、カイラル相転移)とも密接に関連する物理。RHIC/LHCでのQGP生成は強い動機づけ

#### \* FAIR/J-PARCの高密度原子核系でも検証する事は重要

#### \* これまでの実験的研究

- \* HADES(GSI), CERES(SPS), NA60(SPS), PHENIX(RHIC)での低質量レプトン対の収量増大。統一的な見解はまだない(特にPHENIXの結果)
- \* FAIR/J-PARCの高バリオン密度領域での、重イオン衝突でのレプトン測定はまだない

#### \* 重イオン衝突における実験的な検証には、これまでの研究成果を精査し、有効な手段(測定量や手法)を検証する必要がある

- \* LMVは間接的。Medium modificationとカイラル対称性との関連性
- \* 他のプローブの可能性( $\sigma$ メソン、擬スカラー中間子)
- \* まだまだ議論を重ねて行きたい