

高エネルギー重イオンWGLレポート  
“極限状況下での素粒子・  
ハドロン物性”

郡司(東大CNS)

江角(筑波), 大山(Heidelberg)、坂井(LBL)

坂口(BNL)、志垣(広島)、下村(ISU)、

中條(筑波)、鳥井(東大CNS)、

蜂谷(理研)、平野(上智)、福嶋(慶応)

世話人: 早野(東大)

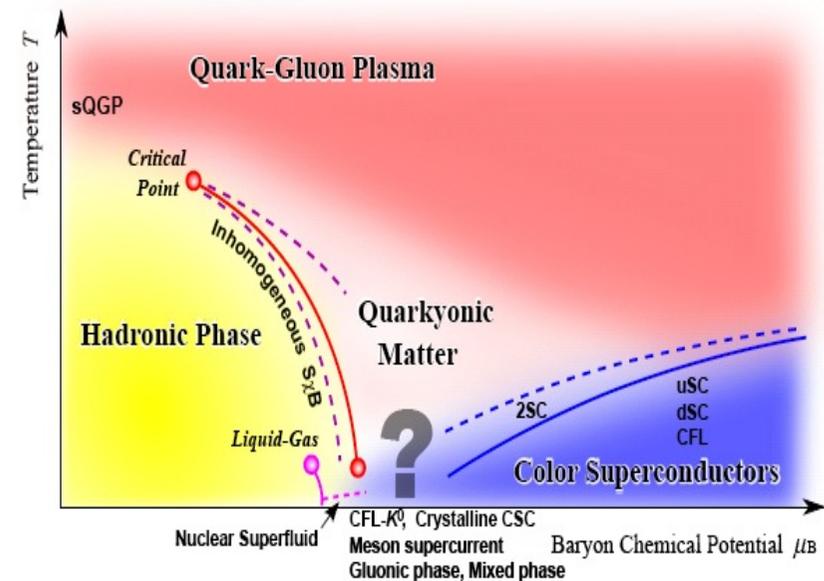
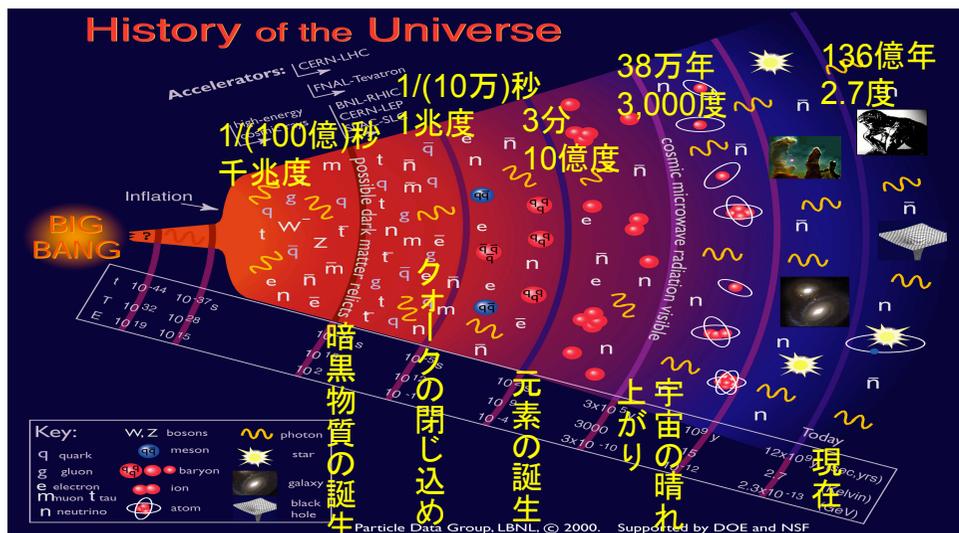
2011年7月29日 核物理の将来 タウンミーティング@RCNP

# Outline

- 我々の夢、Key words (questions)
- 本WGの研究テーマ、方向性
- 現状報告
- 原稿の章立て
  - Recent Achievement
  - Future Program
  - Outlook (Facility, Detectors)
- Resources
- 第2稿に向けて

# 我々の夢, Key words (questions)

- 原始宇宙の様相とその進化を理解したい
  - 物質の存在形態とその性質
  - 宇宙初期に見られたQCD相転移機構
- 極限状態におけるハドロン物質の振舞を理解したい
  - 豊かな相構造の可能性とその探索
  - 各相の特徴、相転移付近での特徴的な振舞
- ハドロン質量の発現機構を理解したい
  - QCD真空構造の理解



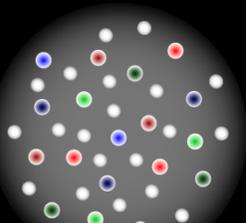
# 本WGの研究テーマ、方向性

- 研究課題
  - 「極限状況下における素粒子・ハドロン物性」
- 研究の方向性
  - 強相関QGP物性の精密研究
    - 「発見」の場から「精密研究」への展開
  - 高密度QCD相構造の解明
    - 未知なる沃野の研究分野
    - QCD臨界点(線)、非一様混合相の探索や性質解明
  - カイラル対称性の回復
    - QCD真空の構造変化の解明
    - 対称性が回復した場として、重イオン衝突は有意義
  - コミュニティの拡大・活性化とリソース拡充化
- 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,  
CERN, GSI, ...)

? 超伝導状態

精密核物理  
(RCNPサイクロ,...)

中性子星

クォーク星?

$H, He \rightarrow Fe$

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

$Fe \rightarrow U$

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

# 現状報告

- 第1稿の完成 (5/1)
  - <http://indico.cns.s.u-tokyo.ac.jp/getFile.py/access?resId=0&materialId=0&confId=51>
    - Overview/Recent Achievement/Future Program/Outlook (Facility, Detector, Resources), (計25ページ)
- 第1稿を基にした討論会を開催 (5/1)
  - <http://indico.cns.s.u-tokyo.ac.jp/conferenceDisplay.py?confId=51>
  - 新たな研究テーマの可能性、アイデアの議論やコメント
- 国際会議Quark Matter 2011での最新結果(5/23-28)
  - 最新結果から得られたの新たな知見、問題点
  - 今後の具体的な研究展開案への重要なインプット
    - 関連する国内研究会(heavy ion café, heavy ion café+pub合同)で議論

# 章立て: Overview

- イントロ
  - 我々の夢、学術的背景と意義
  - これまでの実験参画の歴史
  - 現在の実験参加状況とコミットメント

- RHIC-PHENIX実験

- 600人、70機関、14ヶ国
- 成果:
  - 出版論文数 > 120
  - 引用数 > 10000
  - 博士号取得数 > 130
  - 3回の記者発表
- 日本Grの寄与:
  - 100人程度(2004年時、spinも含む)
  - 日米科学協力事業(高エネルギー)
    - 建設時: 2-3億円/年
    - ラン開始後: 物品費:1億円/年、旅費: 1.5千万円/年
  - 検出器の建設/operation
    - RICH, TOF, Aerogel
    - MRPC, BBC
  - 解析、解析GrのConvener

- LHC-ALICE実験

- 1000人、118機関、33ヶ国
- 成果
  - 出版論文数 > 18
  - 引用数 > 580
  - 博士号取得数
- 日本Grの寄与
  - 23人程度(2% of ALICE)
  - 特推、基盤研究、頭脳循環プログラム
    - 年平均:数千万
  - 検出器の建設/operation
    - PHOS (広島)
    - TRD (筑波、東大)
    - EMCAL for ALICE upgrade
    - FOCAL for ALICE upgrade
  - 解析への寄与
    - Grid-Tier2 (広島)

# 章立て: Recent Achievement

- これまでに得られた成果の精査
- 問題点の提議と今後の研究展開への指針
- “QGP物性の精密研究”
  - 過去10年間の着実な進歩
    - QGP形成に関する実験的成果(RHIC/LHC)
      - 高横運動量ハドロン・ジェットの収量抑制、ハドロン・ジェット対の変質
      - 低運動量ハドロンの集団運動(楕円フロー)
      - 熱的光子の測定、などなど
    - 相対論的流体計算の発展と時空発展の記述
      - 実験測定量との突き合わせを通じてQGPの物性研究(状態方程式、輸送係数、遮蔽長、阻止能など)が可能
    - 格子QCD計算(EOS, 静的性質)、CGC理論(高エネルギーQCD反応)
    - ゲージ/重力対応(強結合QCDの理解)
  - 「発見」から「精密研究」への展開
    - 衝突初期条件(グルオン飽和)の定量化、small-xの物理
    - 熱化メカニズムの解明、非平衡QCDの理解
    - 系統的な実験測定
      - 異なる衝突エネルギー( $T, \rho$ )での比較測定

# 章立て: Recent Achievement

- これまでに得られた成果の精査
- 問題点の提議と今後の研究展開への指針
- “高密度QCD物質相構造の研究”

## – 重要なstarting point

- 最近の理論の進展(格子QCD計算、有効模型計算)
  - 非常に豊かな相構造の示唆
    - » 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
    - » Quarkyonic相、Di-quark励起・凝縮

- 中性子星観測データ(高密度物質のEOS)、冷却原子気体(強相関物性)

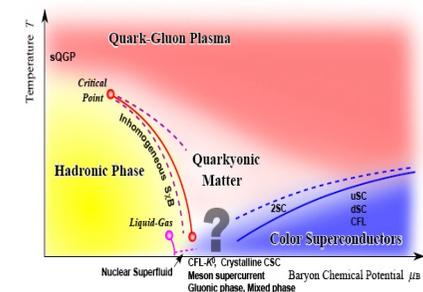
## • 最高バリオン密度への道

- SPS/AGSでの中間エネルギー原子核衝突
- RHICのBeam energy scan program

## – 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

- これまで未測定かつ衝突初期に敏感な稀事象の測定、透過プローブの測定
  - 重クォーク、ジェット、レプトン対、光子
  - FAIR/NICA加速器への参画。J-PARCでの重イオン実験の検討

The phase diagram of dense QCD

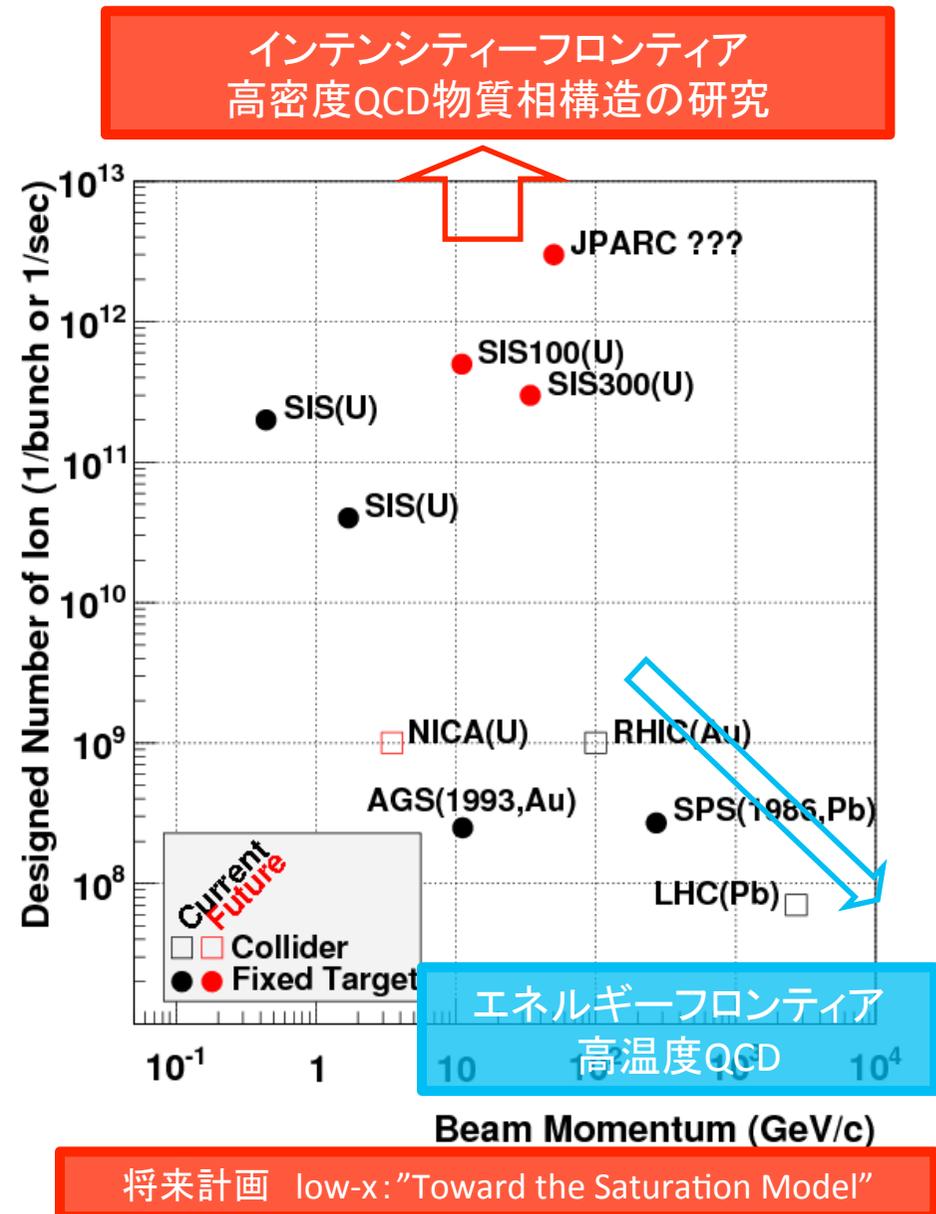


# 章立て: Recent Achievement

- これまでに得られた成果の精査
- 問題点の提議と今後の研究展開への指針
- “カイラル対称性の回復研究”
  - 重イオン衝突(A+A)での取り組み
    - 低質量レプトン対収量超過(HADES/CERES/PHENIX)
      - $\pi\pi \rightarrow \rho(\text{modified}) \rightarrow ll, qqbar \rightarrow \gamma^* \rightarrow ll, \eta'$  enhancement?
    - 低質量ベクトル中間子測定(NA60/PHENIX)
    - RHICの結果を含め統一的な答えがないのが現状
  - 温度を変数に、非閉じ込めという状況下で見るQCD真空構造の直接的研究
    - $pA/\gamma A$ を用いた密度スケールに対するQCD真空構造研究と並ぶ重要な研究テーマ
    - 系統的な測定(異なる衝突エネルギー)が重要
  - 問題点と要検討
    - 測定上の困難さ(S/N、QGPの時空発展)
    - 検出器デザイン、他の測定項目の可能性

# 章立て: *Future Program*

- 目指す方向性と研究計画
- 重イオン加速器の世代
- 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。10-50GeVビーム。
    - Low energy collider: NICA, RHIC
    - Fixed target: SIS, JPARC
    - 高密度QCD物質の研究

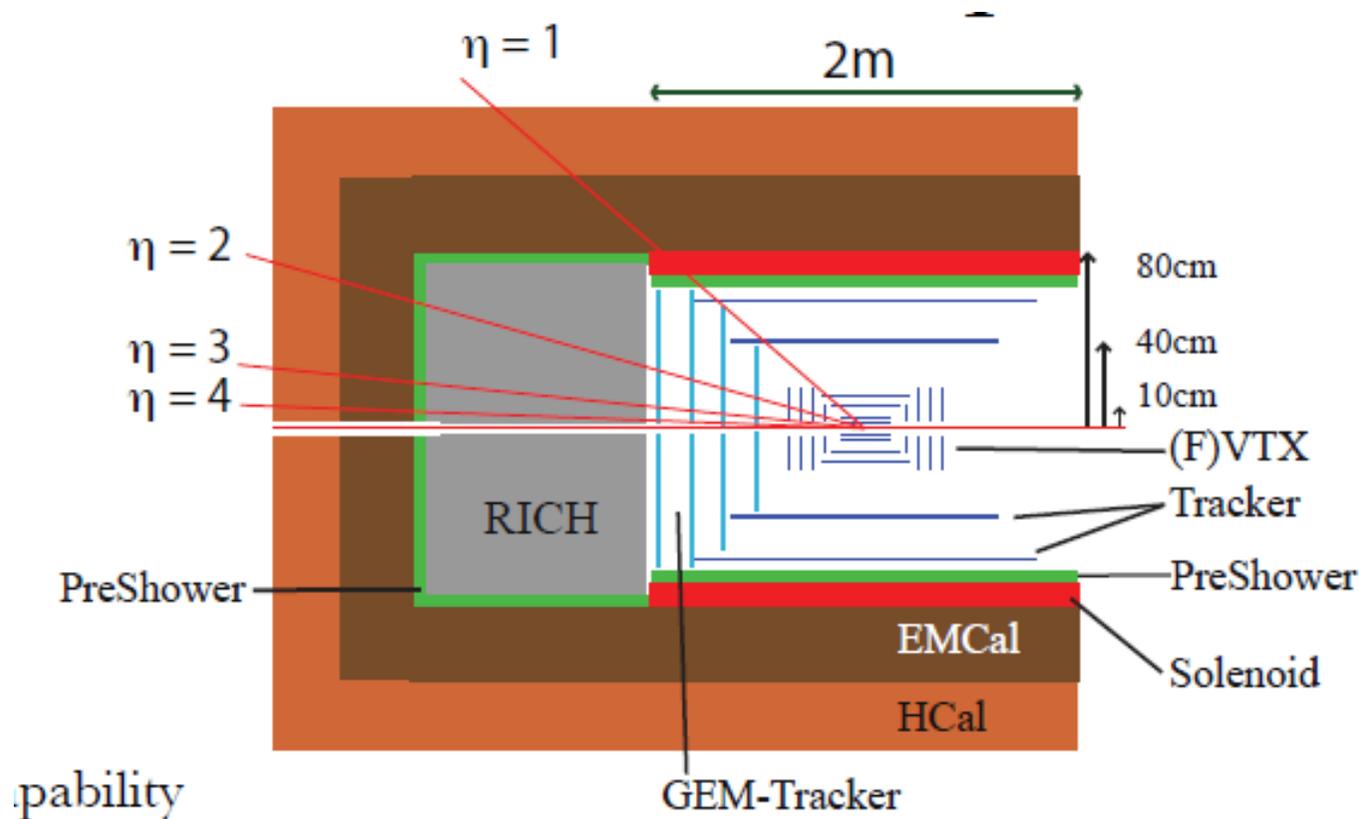


# 章立て: Future Program

- “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)、クォーコニア
      - 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)

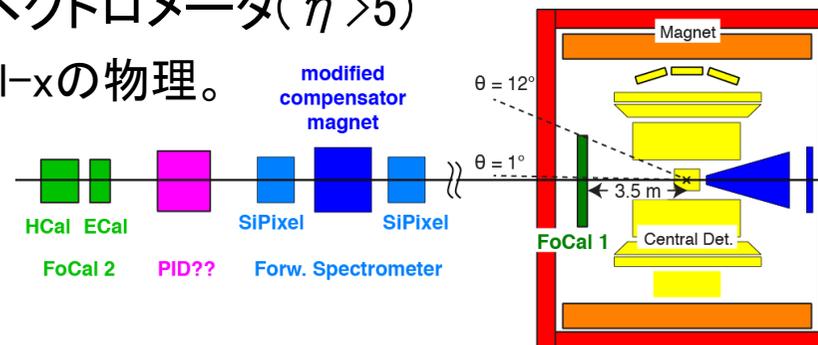
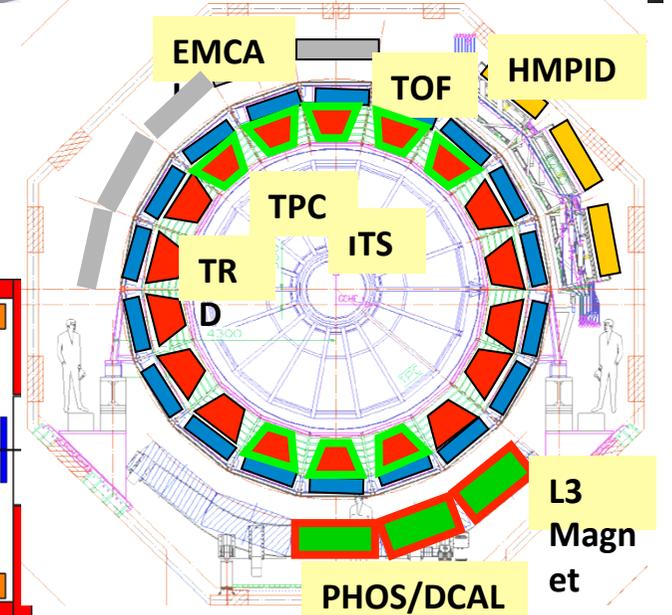
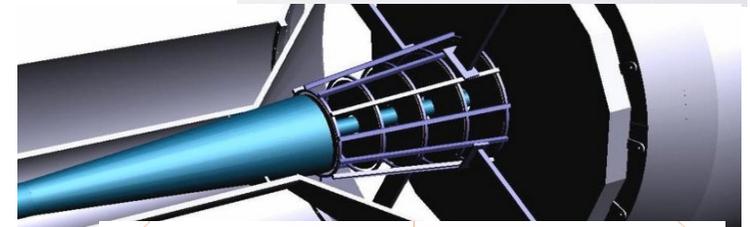
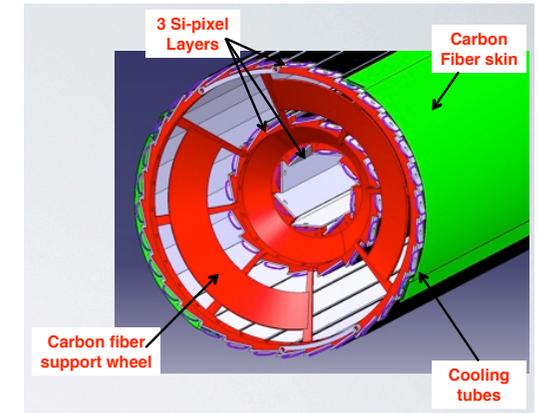
# 章立て: Future Program

- 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。



# 章立て: Future Program

- 展開計画

- 今後10年

- LHC(ALICE): 物理解析。LHCエネルギーでのQGP物性量の算出
    - RHIC:エネルギースキャンを用いたQGP物性の系統的研究。sPHENIXの準備
    - 検出器upgrade
      - Jet測定の為の電磁 & ハドロンカロリメータの開発・建設(ALICE/sPHENIX)
      - 初期条件・熱化解明にむけた前方方向電磁カロリメータ開発・建設(ALICE)
      - 低質量レプトン対の精密測定に向けた検出器アップグレード (ALICE/sPHENIX)

- 10年後

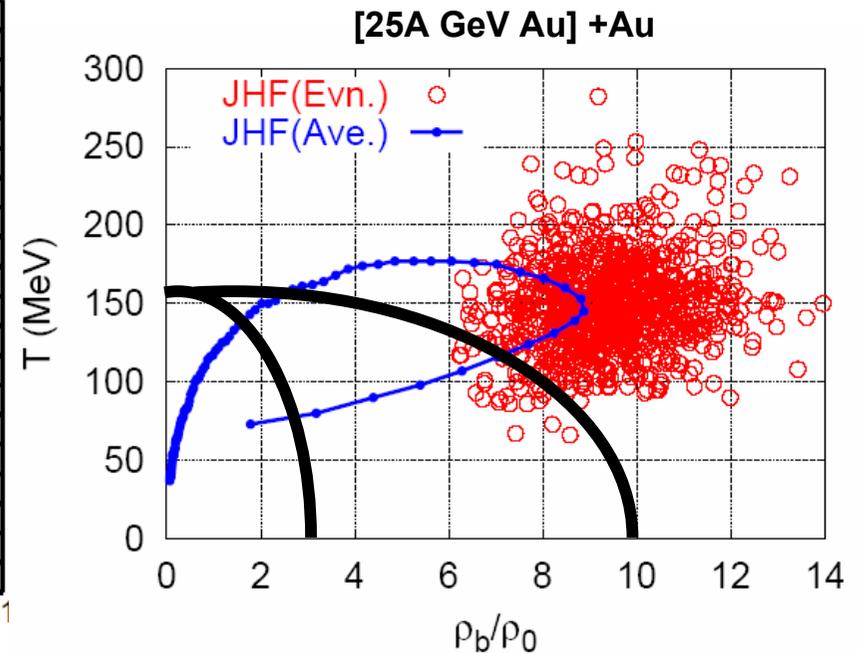
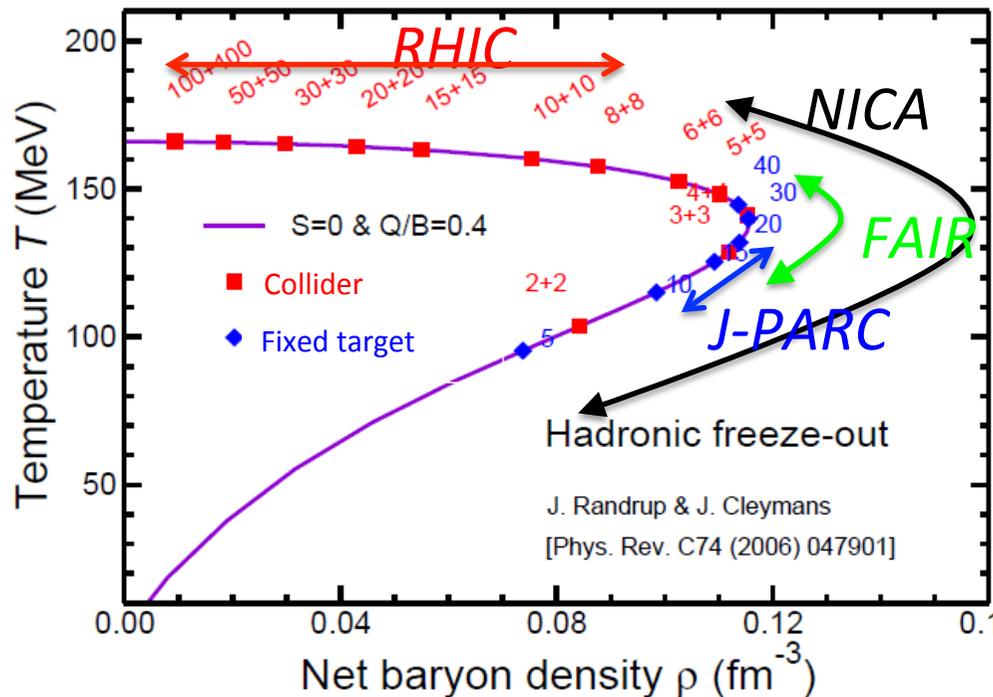
- LHC(ALICE):forward物理。グルオン飽和の定量化、早期熱化機構の解明
    - RHIC(sPHENIX): jetやレプトン対など稀事象を用いたQGP物性研究
    - 次世代ALICE実験の計画立案とR&D
      - 時間sliceに敏感なレプトン・光子測定を主眼とする実験計画、検出器R&D

- 20年後

- 次世代ALICE実験の建設と実験の遂行。時間sliceなプローブを使った物性量の系統的研究、時空発展シナリオの完成

# 章立て: Future Program

- 高密度QCD物質の相構造研究
- 高・中間エネルギーでの重イオン衝突
  - 初期状態プローブ(ハード過程)、透過的なプローブを使った研究
    - AGSエネルギーでの光子・レプトン測定実験はない
    - チャームを用いた稀事象の測定



# 章立て: Future Program

- 研究計画

- 現在～10年後

- RHICにおけるエネルギー स्क্যান: Coolingの可能性について探る。
    - FAIRへの参画: 検出器開発: EMCALやRICH
    - J-PARCでの重イオン加速の可能性
      - 現イオン源+3GeVシンクロトロン代わりに、FFAGイオン源やタンデム+ブースターの可能性について探る。まずは研究会開催に向けて画策中。

- 10年～20年後

- RHICにおける高ルミノシティエネルギー スキャン
    - FAIR-SIS100を用いたデータ解析。
    - J-PARCでの加速器ならびに検出器建設

- 20年後以降

- FAIR-SIS300に向けた検出器開発&実験開始。
    - J-PARCでの加速重イオンを用いた実験開始。

# 章立て: Outlook

- Future Programを基にしたFacility, Detector upgrade案
- LHC
  - LHC upgrade: Luminosity(x10, ~2020), Energy(x2, ~2030), (LHeC)
  - ALICE upgrade (~2020), sALICE? (~2030)
- RHIC
  - RHIC upgrade (RHIC-II): Electron cooling, eRHIC
  - PHENIX upgrade (sPHENIX) (~2017)
- FAIR
  - SIS100(~2018), SIS300(~2030?), CBM実験(RICH, EMCAL)
- J-PARC
  - 加速器の整備(~2020)

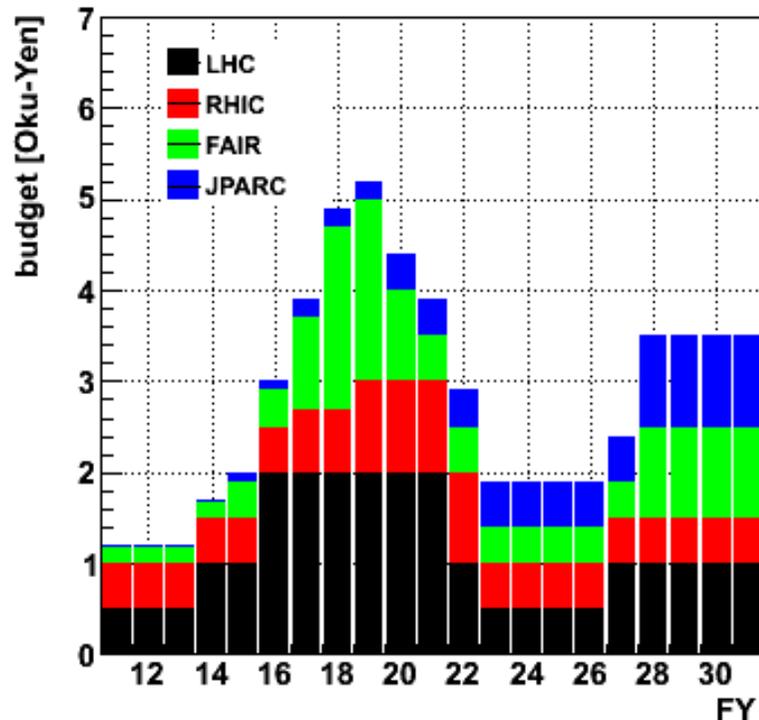
# Resourceの概略

- 投入されてきたリソース
  - RHIC-PHENIX建設時:
    - 人員:約30-40人(9研究・大学機関)
    - 主な予算:2-3億円/年(日本学術振興会:日米科学協力事業(高エネルギー))
  - RHIC-PHENIX 2004年時(高統計Au+Auラン)
    - 人員:約100人(10研究・大学機関) \*spin研究者も含む
    - 主な予算:物品費:1億円/年、旅費:1.5千円/年(日米科学協力事業(高エネルギー))
- 現在投入されているリソース
  - RHIC-PHENIX:
    - 人員:約60人(8研究・大学機関) \*spin研究者も含む
    - 主な予算:TBC/年(日本学術振興会:日米科学協力事業(高エネルギー))
  - LHC-ALICE:
    - 人員:約20人(3研究・大学機関)
    - 主な予算:各機関の自助努力が基本であった
      - 平均すると約6千万円/年(特別研究推進、基盤研究、大学運営費)
      - 頭脳循環プログラム(東大・広島)、宇宙史一貫教育プログラム(筑波)
        - » 頭脳循環を海外派遣事業の目玉にしたいとの事(学振)

# Resourceの概略

## • 今後必要となるリソース

- 全て行うリソースの確保は難しい。議論を重ねて戦略を練る予定

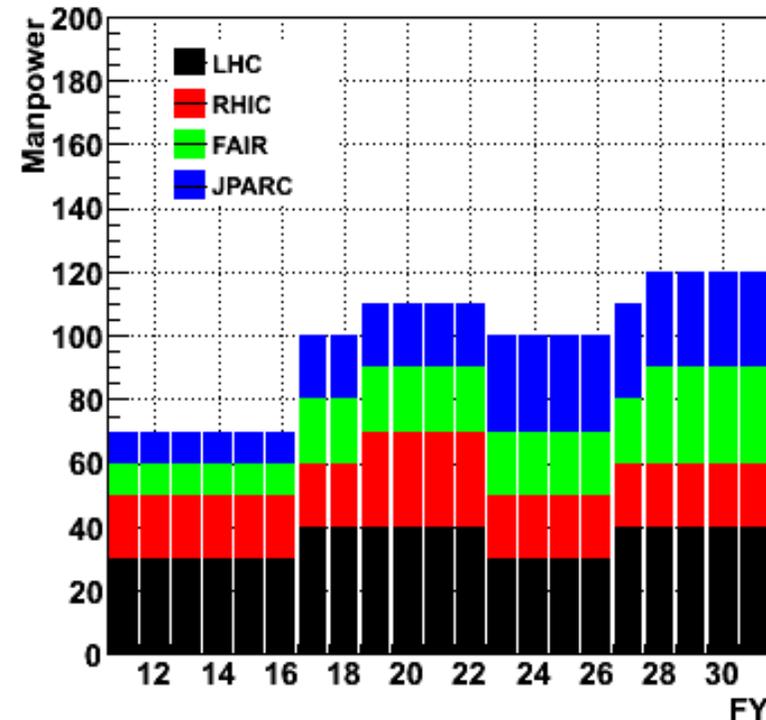


DCAL建設 HCAL/FCAL建設 sALICEのR&D/建設

sPHENIXのR&D 建設

FAIR 検出器R&D 建設 SIS300 実験 R&D 建設

J-PARC実験 R&D 建設



\*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

# コミュニティの組織化

- この物理の発展にはコミュニティの活性化が重要
  - 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、魅力ある物理はもちろんの事、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)やその物理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)「初期宇宙」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
- この点も継続して検討していく予定

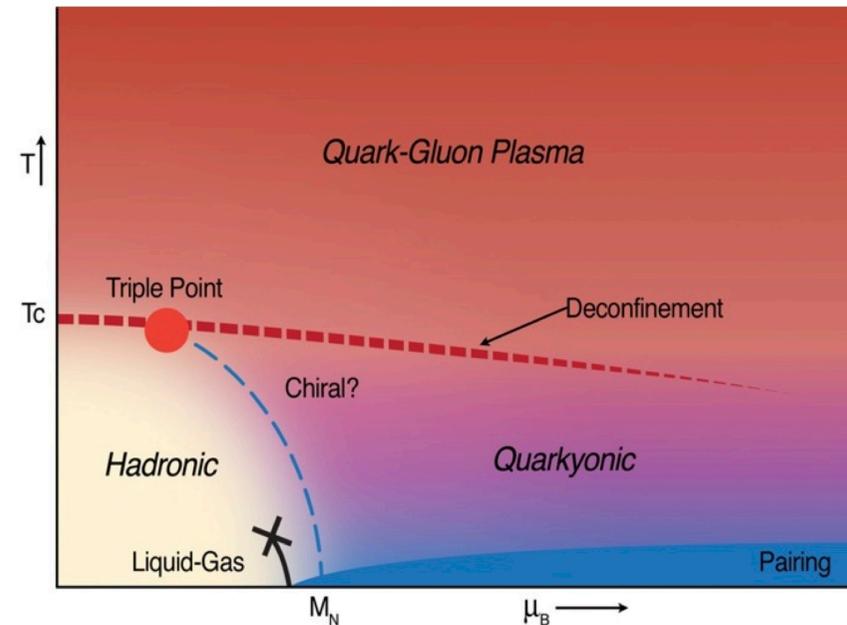
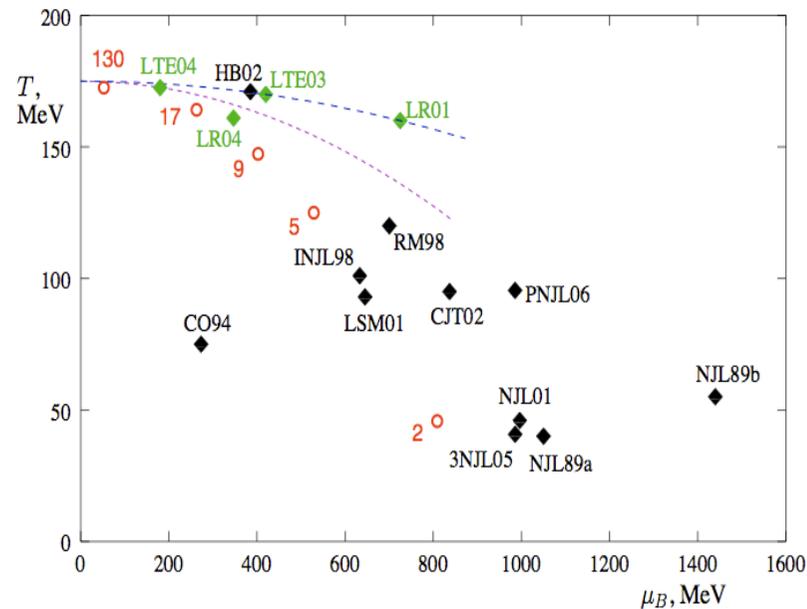
# 第2稿に向けて

- 第2稿に向けて
  - 本研究の方向性の再考
    - QGP物性研究、高密度QCD相構造研究、カイラル対称性の研究
    - ストレンジネス物理、エキゾチックハドロン物理、small-x物理
      - 他のworking groupとの繋がり
      - RHIC/LHCでもハイパー核、エキゾチックハドロン探索が進められている
  - 最新結果(QM2011,5月末)からの知見、問題点、より具体的な方針のまとめ
  - Boundary conditionを除外した議論
    - 新規加速器建設？多方向同時衝突？スペクトロメータを宇宙にあげる？
- 公開議論(予定)
  - 8月中旬(small-xの物理)
  - 9月中旬(高密度QCD相構造)
- 学会前に第2稿の完成を予定

*Backup slides*

# 高インテンシティフロンティア

- 高密度QCD物質の物性研究
  - 高密度領域では多様なQCD相構造の可能性
    - 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
    - Quarkyonic相、Di-quark励起・凝縮
    - 実験主導の物理(どんな相がどこにあるか)

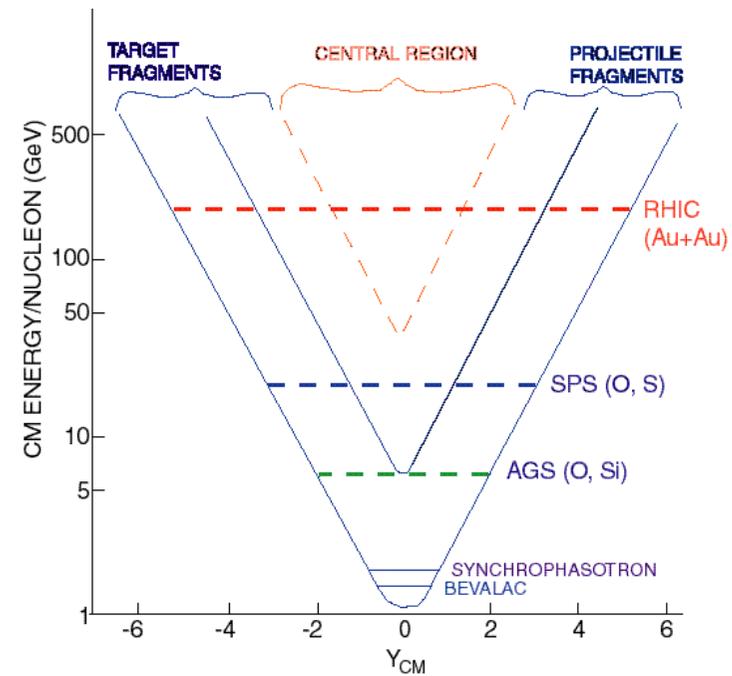
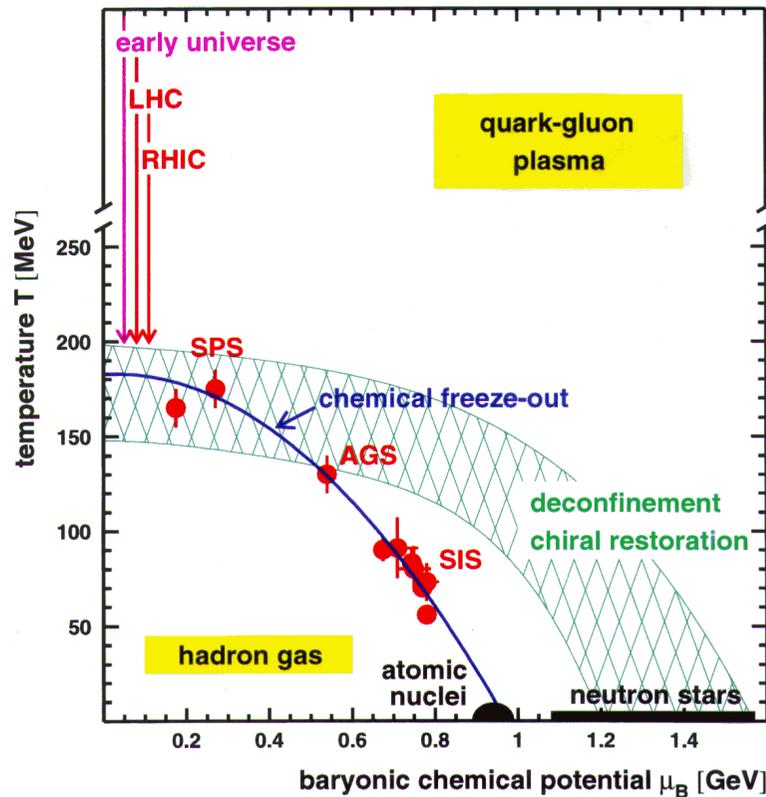
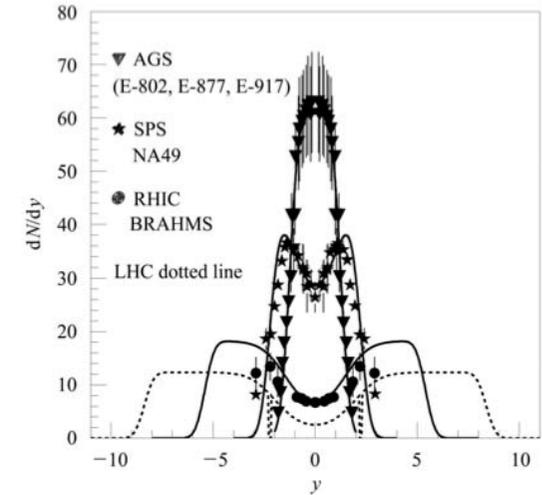


# 高密度QCD物質研究の性格

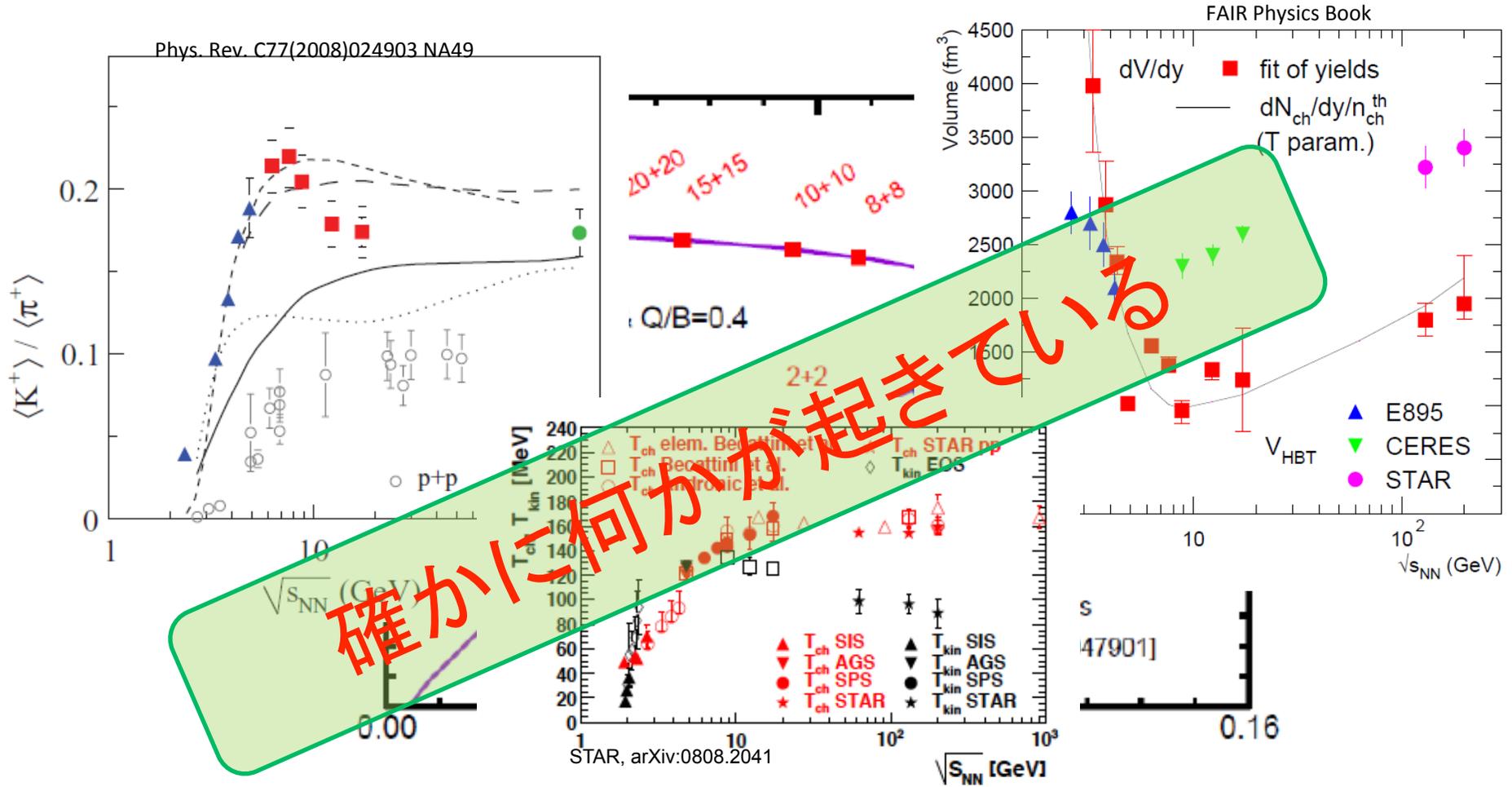
- 高温QCD相転移
  - Lattice-QCDが灯台としての役割
    - 臨界温度(エネルギー密度) $T_c \sim 200\text{MeV}$ を目指せ！
  - いわゆる“Standard Model”に似ている
    - 予想される臨界(点)=Higgs粒子の探索
- 高密度QCD相構造
  - 多様な相構造の可能性
  - いわゆる“Beyond the Standard Model”に似ている
    - 理論は(現状では)“可能性”のサポートに過ぎない
    - 実験への期待 – “あるべき”物理の検証ではなく、“あるかどうか分からない”物理からの発見

# これまでの実験からの期待

- フリーズアウト時の(T,  $\mu$ )
- Baryon density (Baryon stopping)
  - AGS energy:  $\rho = 2\gamma_{cm}\rho_0 \sim 6\rho_0$



# 研究を進めるために何が必要か？

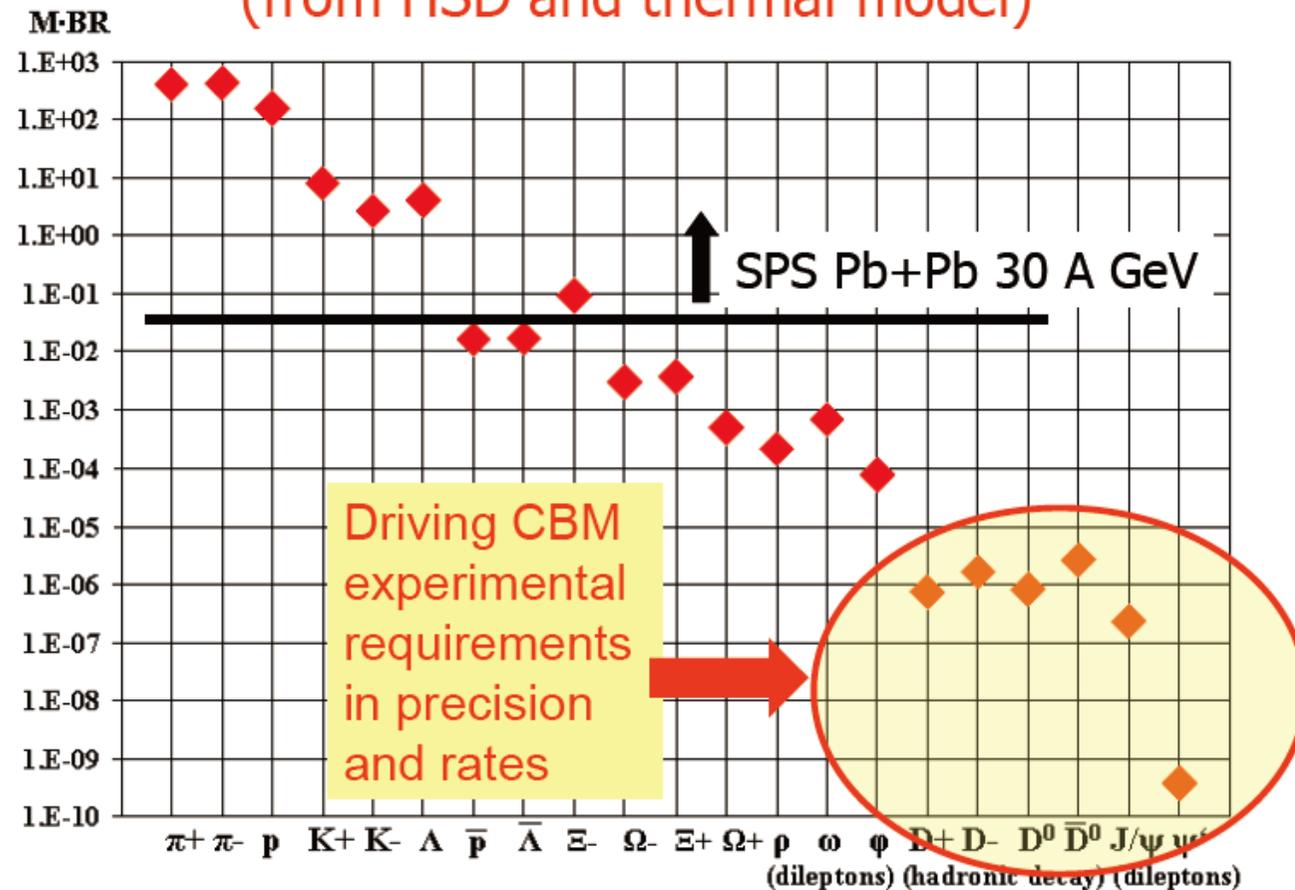


10-50GeV/cのビーム(sqrt(s)=2-10GeV)  
高密度への道。

# レア粒子測定

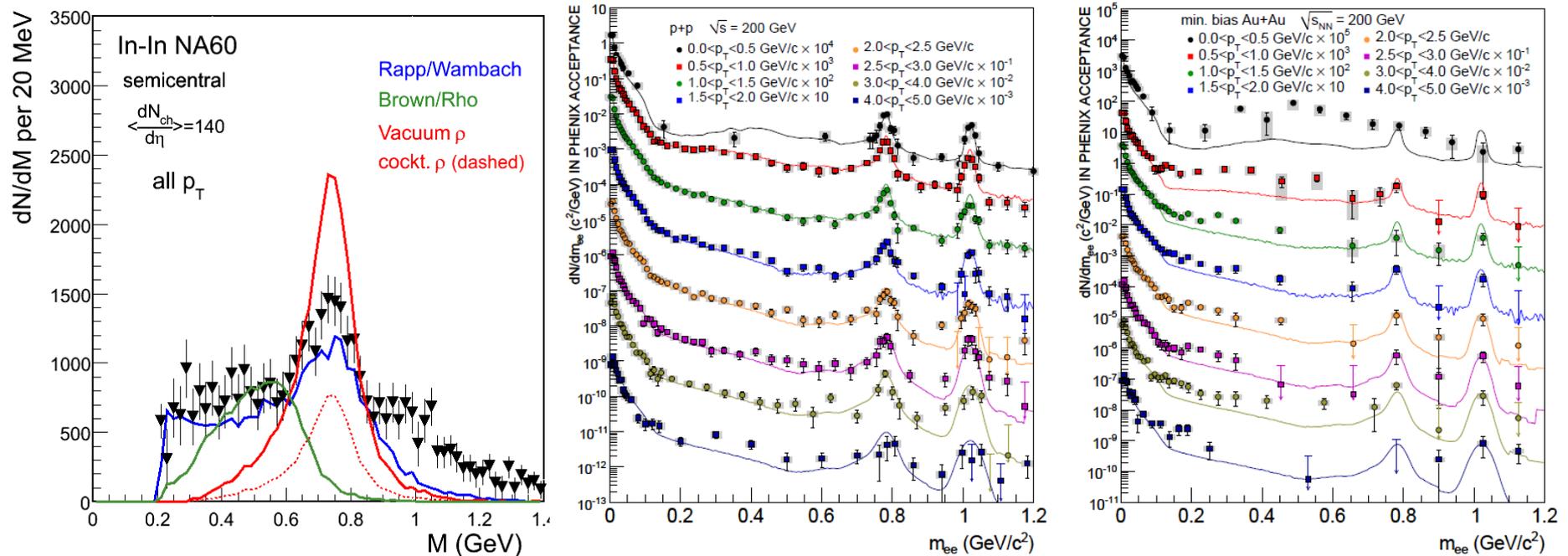
## From strangeness to charm

Particle multiplicity x branching ratio  
for min. bias Au+Au collisions at 25 GeV  
(from HSD and thermal model)



# これまでの結果

- 重イオン衝突(A+A)での取り組み
  - 低質量レプトン対収量超過(HADES/CERES/PHENIX)
    - $\pi\pi \rightarrow \rho(\text{modified}) \rightarrow \ell\ell$ ,  $q\bar{q} \rightarrow \gamma^* \rightarrow \ell\ell$ ,  $\eta'$  enhancement?
  - 低質量ベクトル中間子測定(NA60/PHENIX)
  - RHICの結果を含め統一的な答えがないのが現状



# 実験手法/測定に関する考察

- 低質量ベクトル中間子、 $K^*$ , Sigma
  - $e^+e^-$  測定
    - 電子識別 (RICH, TRD) + ダリツ電子除去用検出器が必要
  - $\mu^+\mu^-$  測定
    - ダリツの問題 (ほとんど) なし
    - Pion decay muonの除去/ID (absorber, decay vertex検出器)
  - Hadron decay (ex,  $\omega \rightarrow \pi^0 + \gamma$ ,  $K^* \rightarrow K + \gamma$ )
    - Gamma conversionを用いた測定
- 他の測定項目
  - カイラル磁場効果? 光子、電子対生成?
- PHENIX/ALICEの現状の精査と今後のアップグレード計画への参加
- FAIR/J-PARCも含めた広エネルギー領域での系統測定

# WG04 としての将来計画素案

- 現在 ~ 10 年後
  - PHENIX HBD/VTX データ解析 (+ s-PHENIX)
  - ALICE 低質量ベクトル中間子測定
  - ALICEのアップグレード計画
    - Forward vertex検出器
  - FAIR/J-PARC へ向けた R&D
  - J-PARC 重イオン加速 R&D (／建設)
- 10 年後 ~ 20 年後
  - FAIR/J-PARC 検出器建設
  - 次世代検出器 (e.g. s-ALICE) R&D
- 20 年後 ~
  - FAIR/J-PARC/s-ALICE における系統測定

自然を支配する基本法則はどのようなものか。  
物質を構成する究極の要素は何か。  
宇宙はなぜ現在の姿になっているのか。  
宇宙にはどのような物質が存在し、それはどのようにして作られたのか。

2000年以上も前から人類の探究心を駆り立ててやまないこれらの  
問いに答えること、これが素粒子原子核物理学の究極の目標である。

その探究によって得られる自然の根本原理は、人類共通の知的財産であり、  
宇宙・物質や生命のあり方に関する深い洞察を与え、科学および技術全般の礎となる。

### 20世紀後半の物理学における三大成果（私見）

1. 素粒子の標準理論 : 基本法則の確立 (縦糸)
2. 超伝導のBCS理論 : 普遍法則の発見 (横糸)
3. ビッグバン宇宙論 : 基本法則と普遍法則の絡み合い(美しい衣)

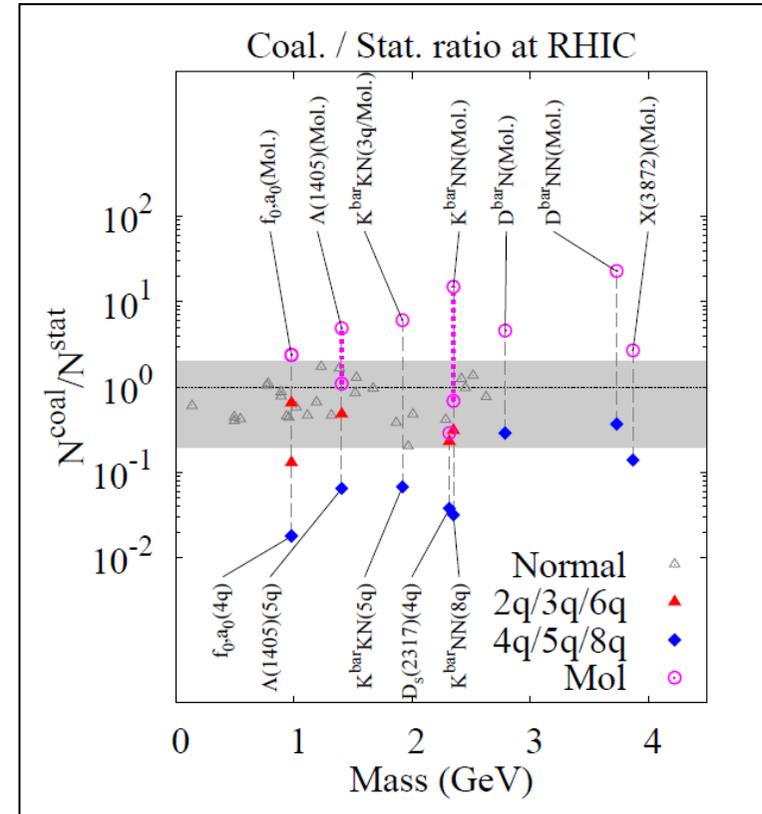
高エネルギー重イオン分野の醍醐味: 3度美味しい!  
高エネルギー重イオン分野の課題: 新しい概念を産み出せるか?



TABLE II: Yields in one unit of central rapidity with oscillator frequencies  $\omega = 550$  MeV,  $\omega_s = 519$  MeV, and  $\omega_c = 385$  MeV.

	RHIC				LHC			
	2q/3q/6q	4q/5q/8q	Mol.	Stat.	2q/3q/6q	4q/5q/8q	Mol.	Stat.
$f_0(980)$	3.8, 0.73( $s\bar{s}$ )	0.10	13	5.6	10, 2.0 ( $s\bar{s}$ )	0.28	36	15
$a_0(980)$	11	0.31	40	17	31	0.83	$1.1 \times 10^2$	46
$D_s(2317)$	$1.3 \times 10^{-2}$	$2.1 \times 10^{-3}$	$1.6 \times 10^{-2}$	$5.6 \times 10^{-2}$	$8.7 \times 10^{-2}$	$1.4 \times 10^{-2}$	0.10	0.35
$X(3872)$	—	$4.0 \times 10^{-5}$	$7.8 \times 10^{-4}$	$2.9 \times 10^{-4}$	—	$6.6 \times 10^{-4}$	$1.3 \times 10^{-2}$	$4.7 \times 10^{-3}$
$\Lambda(1405)$	0.81	0.11	1.8–8.3	1.7	2.2	0.29	4.7–21	4.2
$\bar{K}KN$	—	0.019	1.7	0.28	—	$5.2 \times 10^{-2}$	4.2	0.67
$\bar{D}N$	—	$2.9 \times 10^{-3}$	$4.6 \times 10^{-2}$	$1.0 \times 10^{-2}$	—	$2.0 \times 10^{-2}$	0.28	$6.1 \times 10^{-2}$
$\bar{K}NN$	$5.0 \times 10^{-3}$	$5.1 \times 10^{-4}$	0.011–0.24	$1.6 \times 10^{-2}$	$1.3 \times 10^{-2}$	$1.4 \times 10^{-3}$	0.026 – 0.54	$3.7 \times 10^{-2}$
$\bar{D}NN$	—	$2.9 \times 10^{-5}$	$1.8 \times 10^{-3}$	$7.9 \times 10^{-5}$	—	$2.0 \times 10^{-4}$	$9.8 \times 10^{-3}$	$4.2 \times 10^{-4}$

ExHIC Coll.  
arXiv:1011.0852 [nucl-th]  
to appear in PRL



➤ First project: Production rate

TABLE IV: meson (RHIC)

	2q	4q	Mol.	Stat.	M [MeV]	$IJ^P$	decay mode
$T_{cc}^1$	—	$1.1 \times 10^{-5}$	$1.2 \times 10^{-5}$	$4.3 \times 10^{-4}$	3797	$01^+$	$K^+\pi^- + K^+\pi^- + \pi^-$
$T_{cb}^0$	—	$1.0 \times 10^{-8}$	$1.4 \times 10^{-7}$	$6.6 \times 10^{-7}$	7130	$00^+$	$K^+\pi^- + K^+\pi^-$
$D_s(2317)$	$1.9 \times 10^{-2}$	$5.8 \times 10^{-4}$	$7.1 \times 10^{-3}$	$5.9 \times 10^{-2}$	2317	$00^+$	$D_s\pi$ (strong decay)
$X(3872)$	$4.0 \times 10^{-4}$	$1.1 \times 10^{-5}$	$1.5 \times 10^{-4}$	$2.9 \times 10^{-4}$	3872	$01^+$	$J/\psi\pi\pi$ (strong decay)
$Z^+(4430)$	$1.3 \times 10^{-4}$	$3.6 \times 10^{-6}$	$2.4 \times 10^{-6}$	$4.8 \times 10^{-6}$	4430	$10^+$	$J/\psi\pi$ (strong decay)
$Z^+(4250)$	$1.3 \times 10^{-4}$	$3.6 \times 10^{-6}$	$3.5 \times 10^{-7}$	$1.3 \times 10^{-5}$	4250	$10^-$	$J/\psi\pi$ (strong decay)

TABLE V: baryon (RHIC)

	3q	5q	Mol.	Stat.	M [MeV]	$IJ^P$	decay mode
$\Lambda(1405)$	0.65	$0.97 \times 10^{-1}$	1.5	1.8	1405	$0\frac{1}{2}^-$	$\pi\Sigma$ (strong decay)
$\Theta^+$	—	$0.97 \times 10^{-1}$		0.95	1530	$0\frac{1}{2}^+$	$KN$ (strong decay)
$\bar{K}KN$	—		$1.8 \times 10^{-2}$	$3.1 \times 10^{-1}$	1920	$\frac{1}{2}\frac{1}{2}^+$	$K\pi\Sigma, \pi\eta N$
$\Theta_{cs}$	—	$4.7 \times 10^{-4}$		$7.6 \times 10^{-3}$	2980	$\frac{1}{2}\frac{1}{2}^+$	$\Lambda + K^+\pi^-$
$\bar{D}N$	—	$4.1 \times 10^{-4}$	$1.2 \times 10^{-2}$	$1.8 \times 10^{-2}$	2790	$0\frac{1}{2}^-$	$K^+\pi^-\pi^- + p$
$BN$	—	$2.7 \times 10^{-6}$	$4.0 \times 10^{-5}$	$5.8 \times 10^{-5}$	6200	$0\frac{1}{2}^-$	$K^+\pi^-\pi^- + \pi^+ + p$

TABLE VI: dibaryon (RHIC)

	6q	Mol.	Stat.	M [MeV]	$IJ^P$	decay mode
$H$	$3.8 \times 10^{-3}$		$1.5 \times 10^{-2}$	2245	$00^+$	$\Lambda\Lambda$ (strong decay)
$\bar{K}NN$	—	$1.7 \times 10^{-3}$	$1.5 \times 10^{-2}$	2352	$\frac{1}{2}0^-$	$\Lambda N$ (strong decay)
$\Omega\Omega$	—	$2.6 \times 10^{-6}$	$1.4 \times 10^{-4}$	3228	$00^+$	$\Lambda K^- + \Lambda K^-$
$H_c^{++}$	$3.5 \times 10^{-5}$		$4.7 \times 10^{-4}$	3377	$10^+$	$\Lambda K^- \pi^+ \pi^+ + p$
$\bar{D}NN$	—	$2.2 \times 10^{-5}$	$6.2 \times 10^{-5}$	3734	$\frac{1}{2}0^-$	$K^+\pi^- + d, K^+\pi^-\pi^- + p + p$
$BNN$	—	$5.8 \times 10^{-8}$	$1.6 \times 10^{-7}$	7147	$\frac{1}{2}0^-$	$K^+\pi^- + d, K^+\pi^- + p + p$

1. Mol=usual hadron  
> Exotic

2. Realistic  
measurement of exotics  
are possible

# 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