

J-PARCにおける重イオン将来計画

佐甲博之(JAEA)

for J-PARC HI Collaboration

高密度核物質に挑む実験の将来－施設・装置の観点から

2015/12/5

Outline

1. 研究目的
2. 計画概要
3. 加速スキーム
4. スペクトロメーター設計
5. シミュレーション
6. R&Dプラン
7. まとめ

J-PARC HI Collaboration

S. Nagamiya (JAEA/KEK/RIKEN)

H. Sako, K. Imai, K. Nishio, S. Sato, S. Hasegawa, K. Tanida, S. H. Hwang, H. Sugimura, Y. Ichikawa (ASRC/Japan Atomic Energy Agency)

H. Harada, P. K. Saha, M. Kinsho, J. Tamura (J-PARC/Japan Atomic Energy Agency)

K. Ozawa, K. Itakura, Y. Liu (J-PARC/KEK)

T. Sakaguchi, M. Okamura (Brookhaven National Lab.)

K. Shigaki (Hiroshima Univ.)

M. Kitazawa, A. Sakaguchi (Osaka Univ.)

T. Chujo, S. Esumi, B. C. Kim (Univ. of Tsukuba)

T. Gunji (CNS, Univ. of Tokyo)

H. Tamura, M. Kaneta (Tohoku Univ.)

K. Oyama (Nagasaki IAS)

H. Masui (Wuhan Univ.)

Y. Nara (Akita International Univ.)

T. R. Saito (Mainz Univ. and GSI)

- 高エネルギー重イオン実験研究者
- 加速器研究者
- QCD理論研究者
- ハドロン・原子核実験研究者

J-PARC重イオン将来計画の目的

RHIC/LHCでは、高温、低バリオン密度でQGPが発見され、その物性が研究されている。しかし、臨界点や一次相転移境界線等、QCD相構造を示す証拠は未発見

⇒

J-PARC重イオン衝突

実験室で生成可能な最高密度の物質

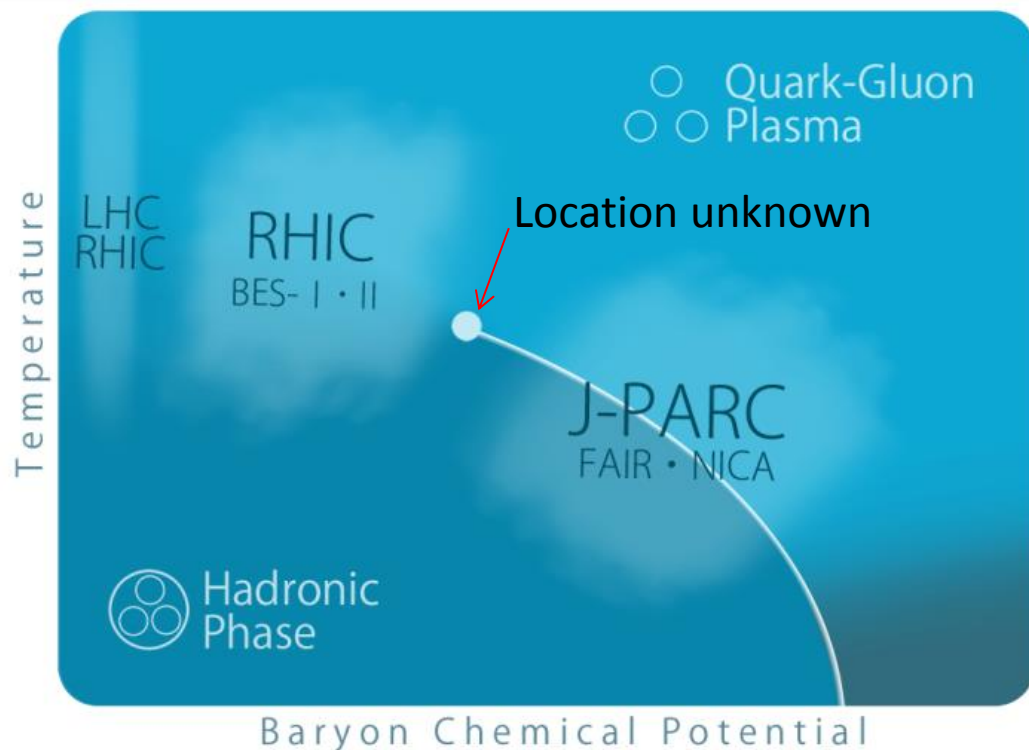
熱平衡時に通常原子核の5倍の密度：中性子星内部に匹敵

世界最高強度の重イオンビームを用いて

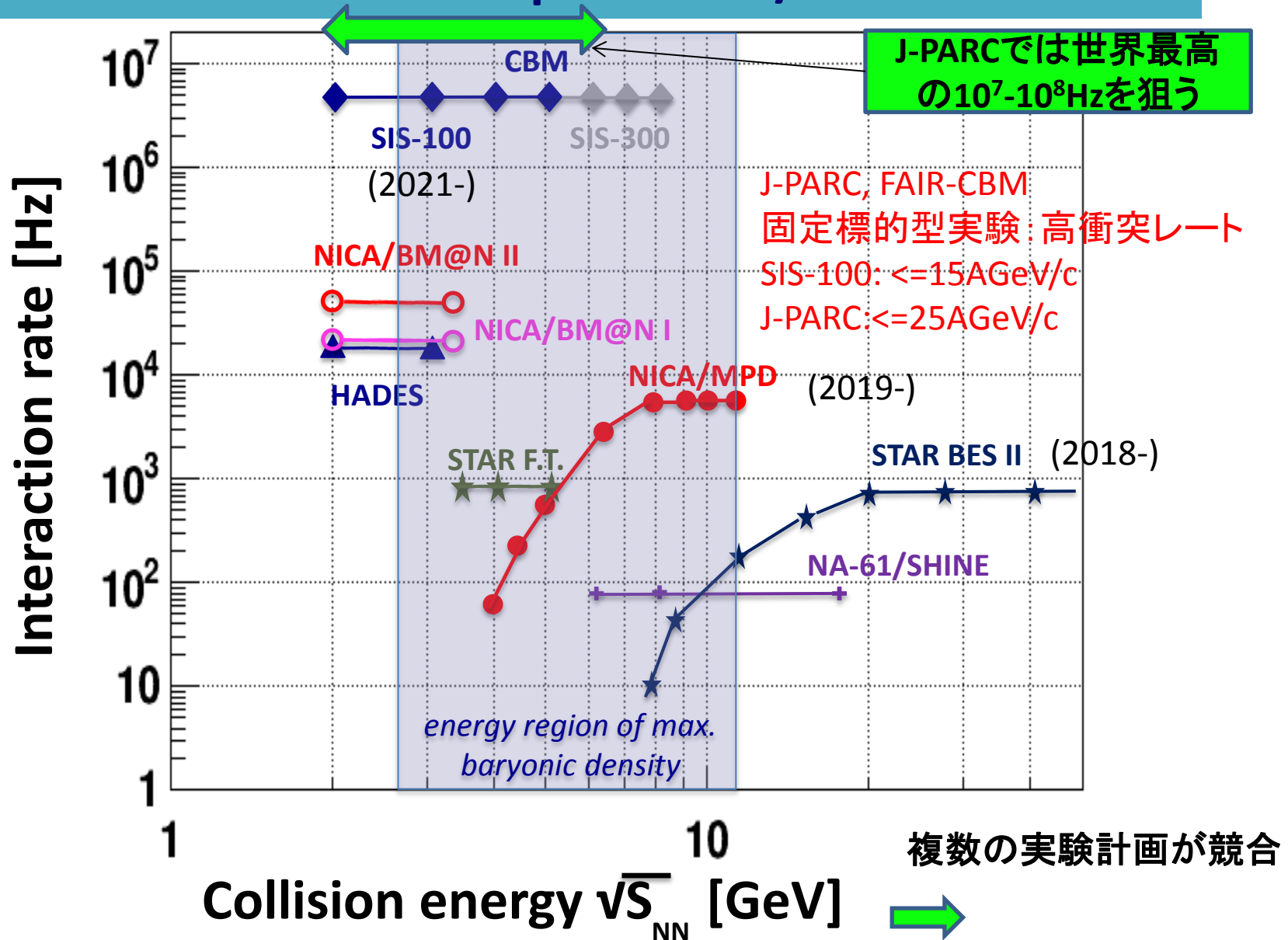
- ▶ 臨界点と相転移境界線の探索
- ▶ 高密度におけるハドロンの性質 (例:カイラル対称性回復)
- ▶ 高密度におけるハドロン・原子核物理

高温の物理から高密度の物理へ

日本主導の高密度重イオン物理



Present and future HI experiments/machines



J-PARC 重イオンプログラム

- イオン種
 - p, Si, Ar, Cu, Xe, Au(Pb), U
 - ハイパー核実験のため軽イオン(Li, C,...)
- ビームエネルギー
 - 1-19 A GeV (U, $\sqrt{s_{NN}} = 2-6.2\text{GeV}$)
- ビームレート
 - 1サイクル(数秒)当たり 10^{11} イオン :
 - 世界最高強度のイオンビームを目指す
 - 加速器科学としても非常に重要

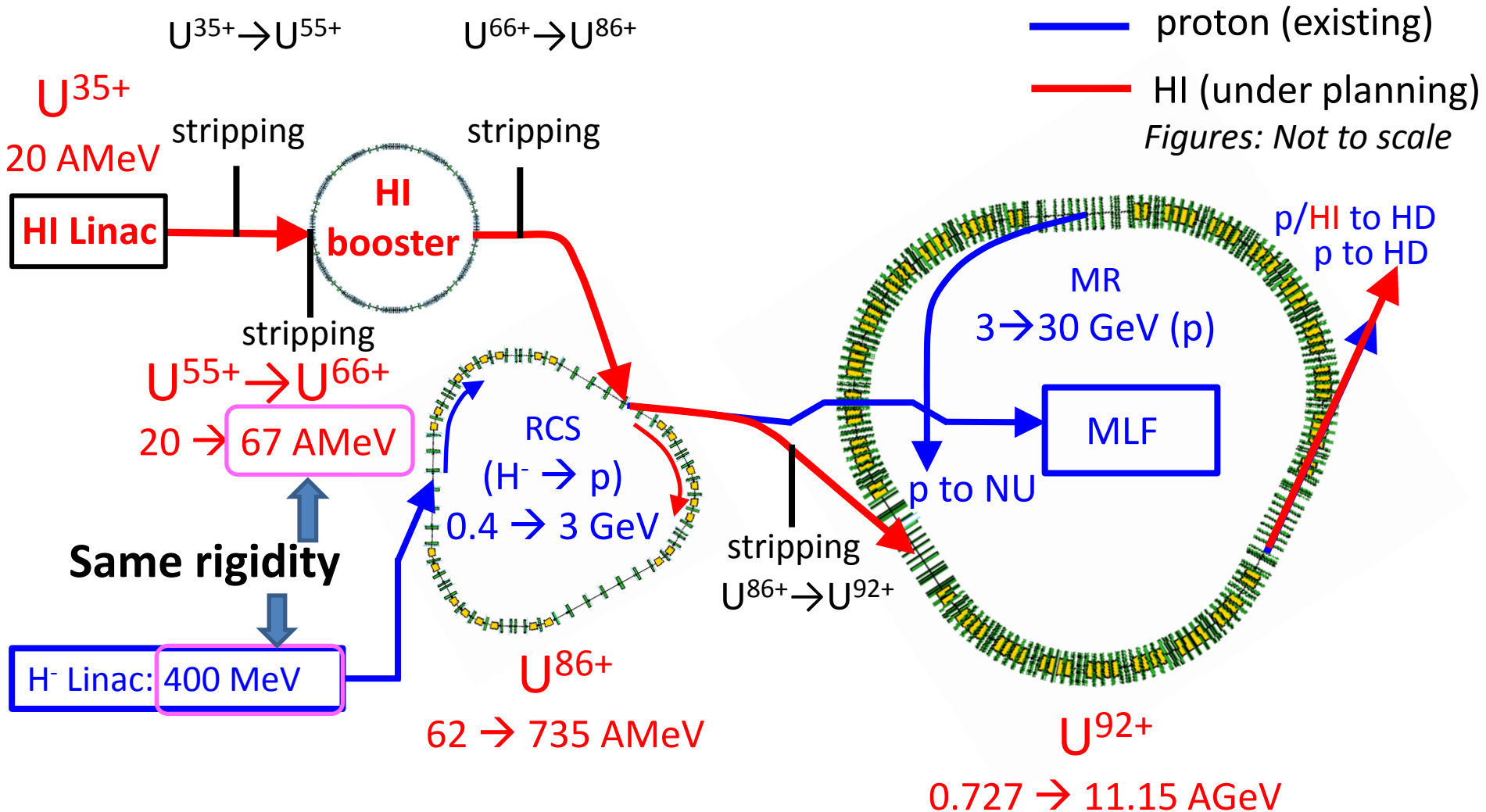
RCS/MRでの重イオンビーム加速

1. 既存の3 GeVシンクロトロン(RCS)、50 GeV シンクロトロン(MR)
重イオン入射器とRCS入射 セクションのみ追加
2. 大アクセプタンス $\Rightarrow$ 高強度ビーム加速が可能
横方向 $\varepsilon > 486\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$, 縦方向 $\Delta p/p > 1\%$
3. 高強度陽子ビーム加速を既に実現
MRからの遅い取出しの陽子ビーム: 1.3×10^{14} (2017)

拘束条件

- ・RCSではMLF(Material and Life sciences Facility)との並行運転が必須:
重イオンビーム $\Rightarrow$ MR
陽子ビーム $\Rightarrow$ MLF
- ・RCSは磁場等のパラメータの自由度が少ない
一方入射rigidityを400MeV陽子に合わせれば、RCS、MRで重イオンを加速可能

重イオン加速スキーム

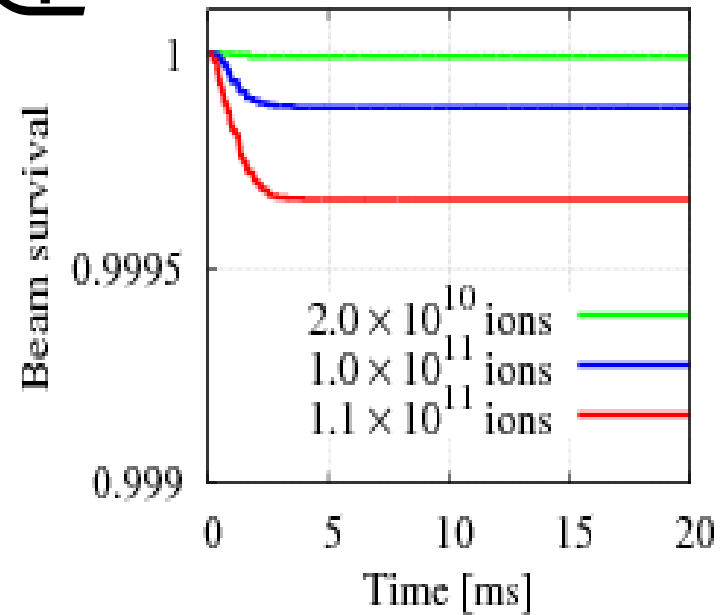
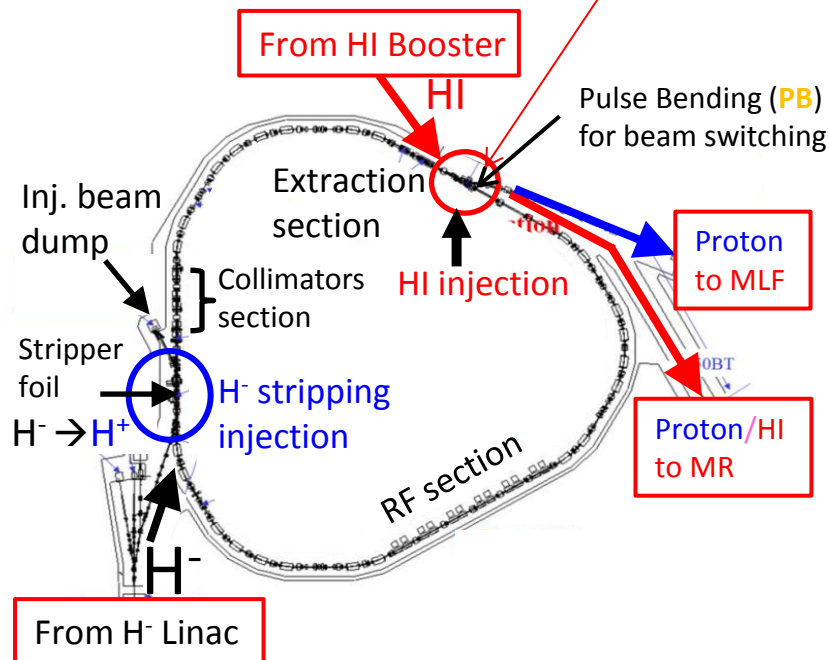


重イオン加速

- RCSのシミュレーション

– U^{86+} イオン $4 \times 10^{11}/\text{cycle}$
においてビーム損失0.05% 以下

- 重イオン入射部(候補)



QCD相構造探索

- レプトン対

- Penetrating probe。カイラル対称性回復の探索
- 仮想光子のinternal conversion⇒QGPからの光子探索

- 相構造探索

- Event selection: 高統計データにより、centralityに加えて高バリオン数、高strangeness数等によって、より高密度の事象選択
- 高次Event-by-event fluctuationsによる臨界点探索
- エネルギー依存性 (K/π ratio, ...)

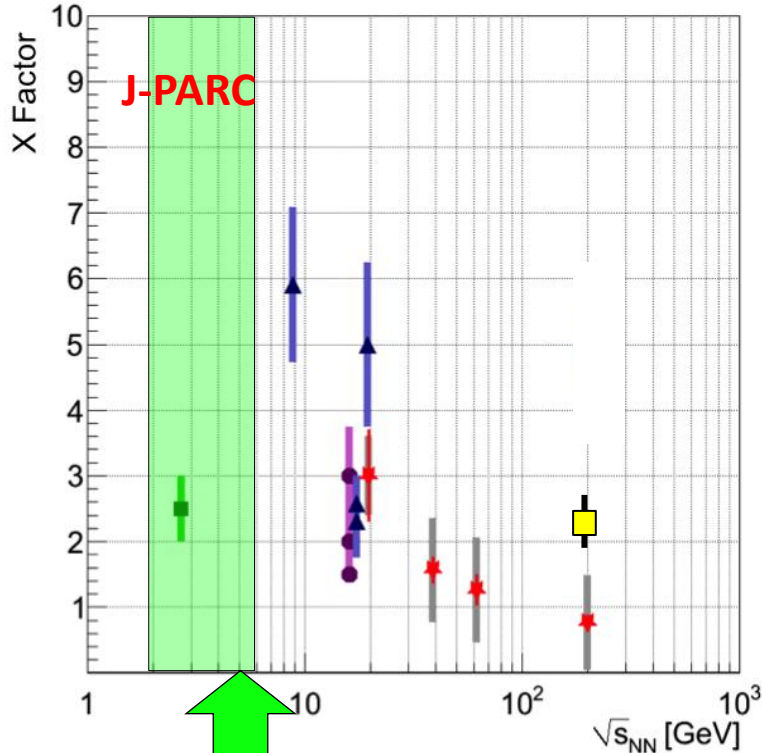
- チャーム

- J/ψ , D , ...
 - 衝突初期の高密度物質のプローブ？

低質量レプトン対

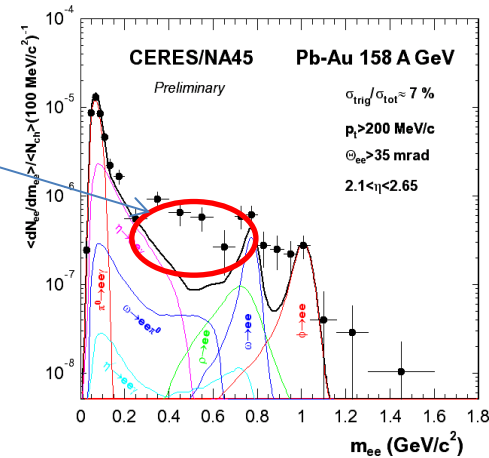
低質量レプトン対増加ファクター

Measured / cocktail in $m=0.2-0.8 \text{ GeV}/c^2$



最高バリオン密度のエネルギー

5-8 GeV ? (J. Randrup, PRC74(2006)047901)



J-PARCエネルギーで増加ファクターは最大となるか？

- Dielectron
 - γ conversion at low mass (background)
- Dimuon
 - $\pi, K \rightarrow \mu$ decay (background)
 - Higher rate beam can be used

• High statistics at J-PARC

– Moment analysis $\int dm_{ee} N(m_{ee}) m_{ee}^n$

→ More direct comparison to theoretical models (relation to chiral symmetry restoration)

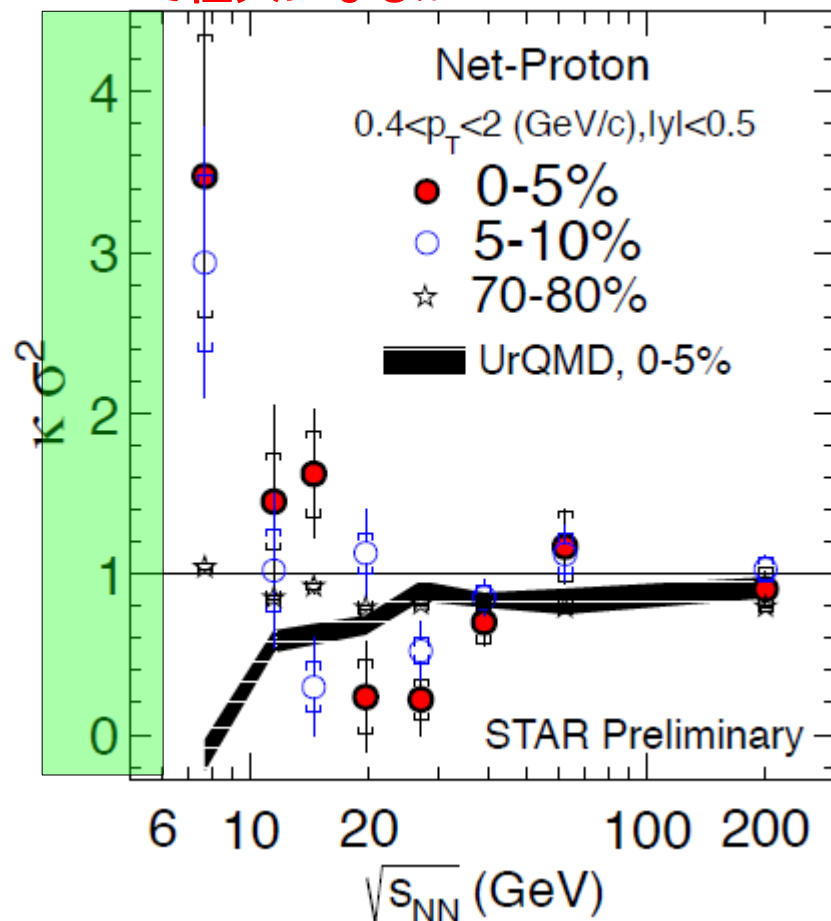
Hayano and Hatsuda, RMP **82**, 2949

Event-by-event Fluctuations

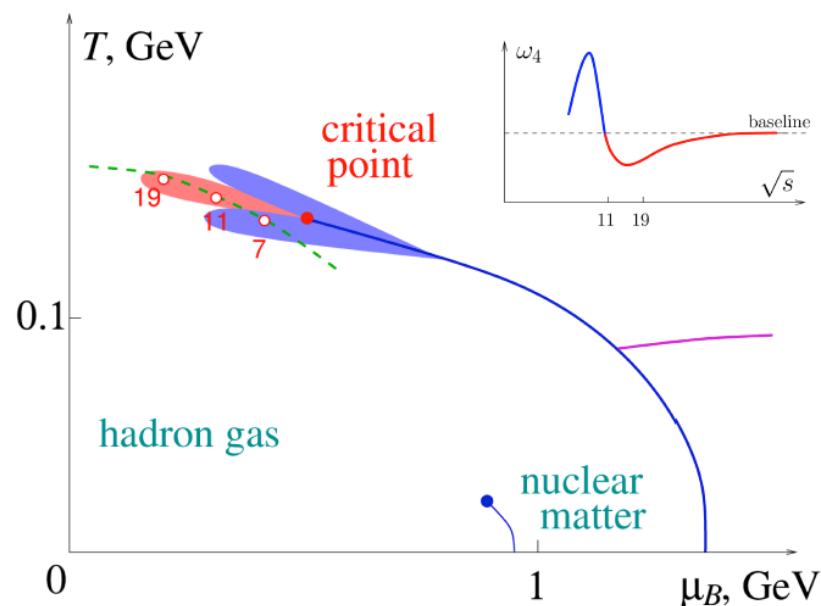
Ebe fluctuations : Probe to search for the critical point
w/ higher-order fluctuations

Theory

J-PARCで極大になるか？



M.A. Stephanov,
PRL107, 052301 (2011).



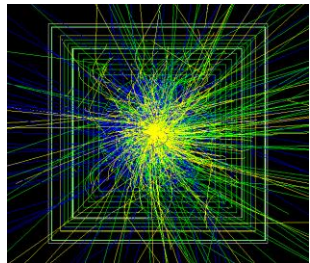
低エネルギーでの4th-
order fluctuationsの増大
臨界点の兆候？

重イオン物理とハドロン・原子核物理 の関係

通常原子核の5倍

通常原子核密度

重イオン衝突実験



QCD相構造の解明

エキゾチックハドロン
収量による構造解明

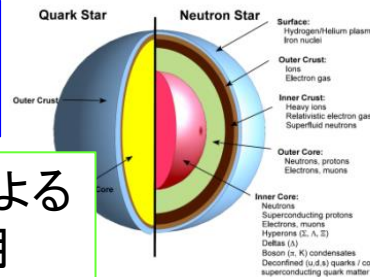
$|S| \geq 3$ ハイパー核
Neutron, proton-rich

Chiral symmetry
Restoration with dilepton

Flowによる
EOS 研究

二粒子相関による
YY,YN 相互作用
の研究

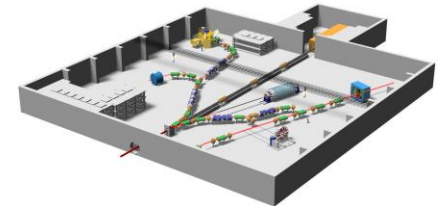
中性子星



太陽質量の2倍
⇒硬いEOS
Y,N三体力?
Quark-hadron
phase transition?

J-PARCハドロン実験
との協力

ハドロンビームによる
ハドロン・原子核物理



エキゾチックハドロン
Pentaquark, dibaryon
K原子核

ハイパー核
 $S=-1,-2$

ϕ modification
with dielectron in
 $p+A$ (E16)

生成粒子の収量

10^{10} Hzビーム

0.1 % 標的

→ Min-biasレート10MHz

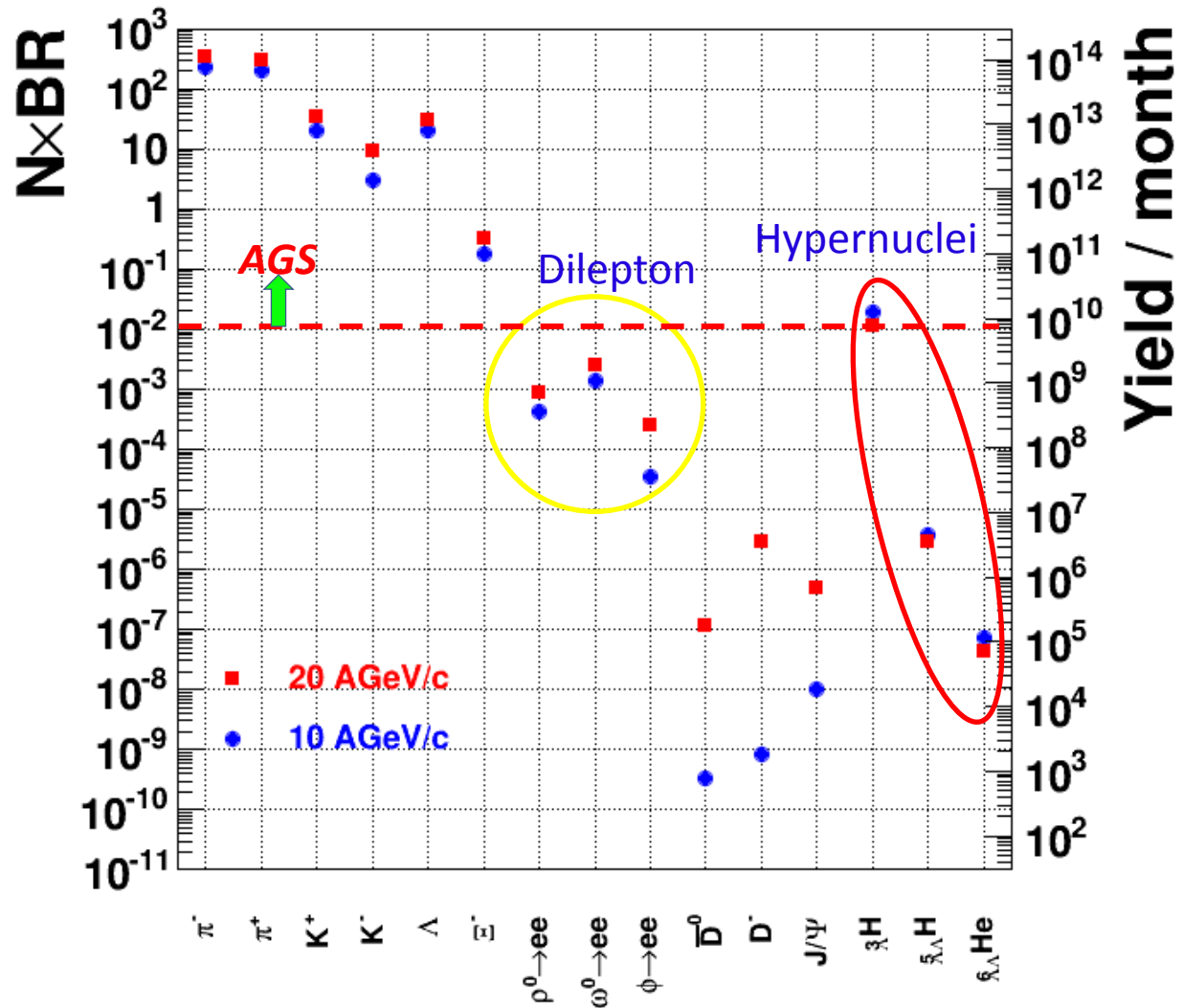
1% 事象選択 (*e.g.* centrality)

→ DAQ rate = 100 kHz

一か月の実験で

レプトン対 $\rho, \omega, \phi \rightarrow ee$ 10^7 - 10^9

ハイパー核 10^5 - 10^{10}



HSD calculations in FAIR Baseline Technical Report (Mar 2006)

A. Andronic, PLB697 (2011) 203

超高計数率技術への挑戦

- 高レート対応
 - Fast detectors
 - Silicon trackers, GEM trackers, ...
 - 高速DAQ
 - Min-bias event rate = 10MHz
 - data rate $\sim 1\text{TB/s} \sim \text{ALICE upgrade}$
 - Triggerless DAQ+software trigger (ALICE,CBMで採用)
 - 大立体角 ($\sim 4\pi$)
 - Coverage for low beam energies
 - Maximum multiplicity for e-b-e fluctuations
- ➡ • Toroidal 磁石スペクトロメーター

Beam View

Muon Tracker

Neutron counter

EMCAL

RICH

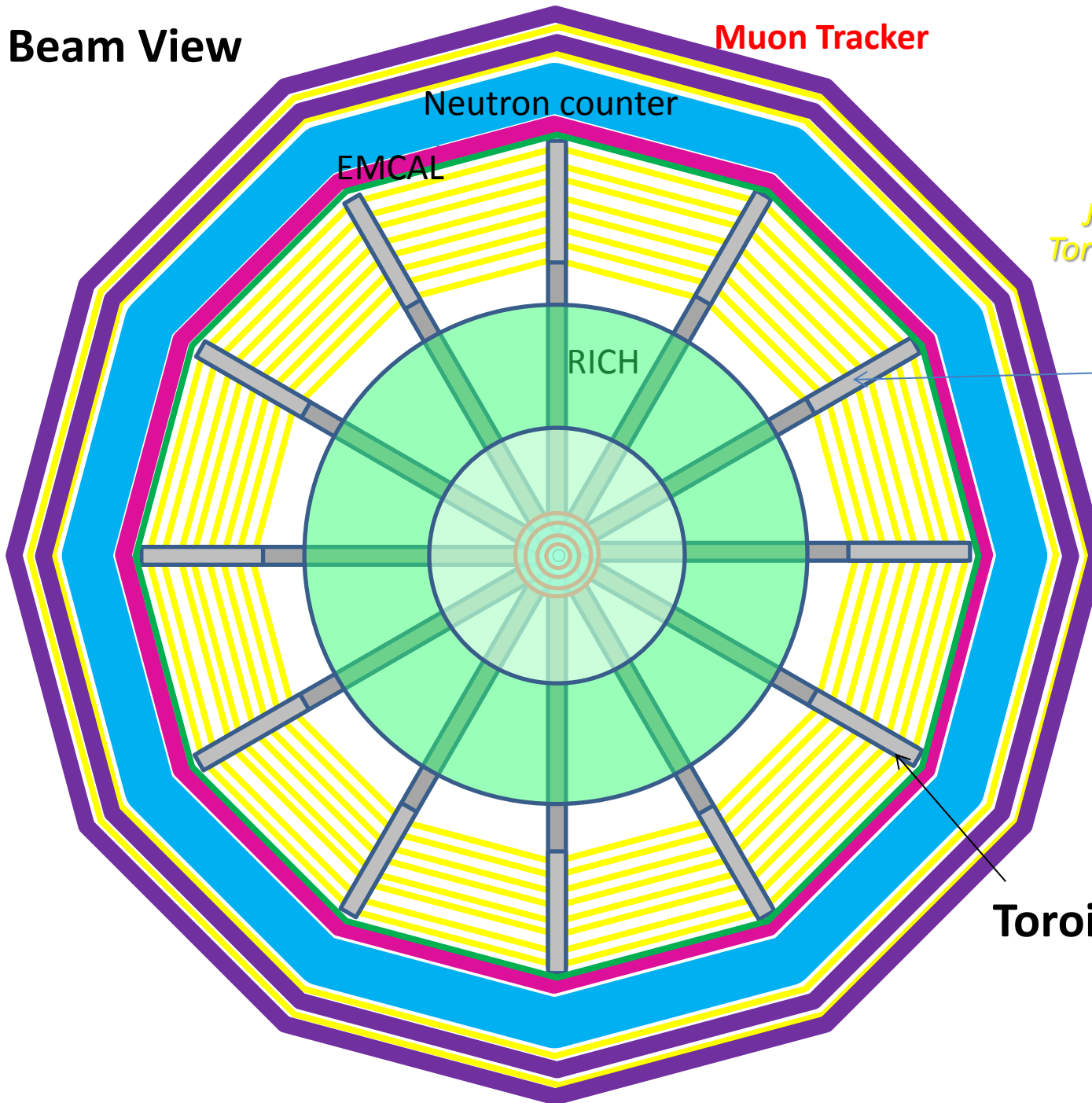
JHITS

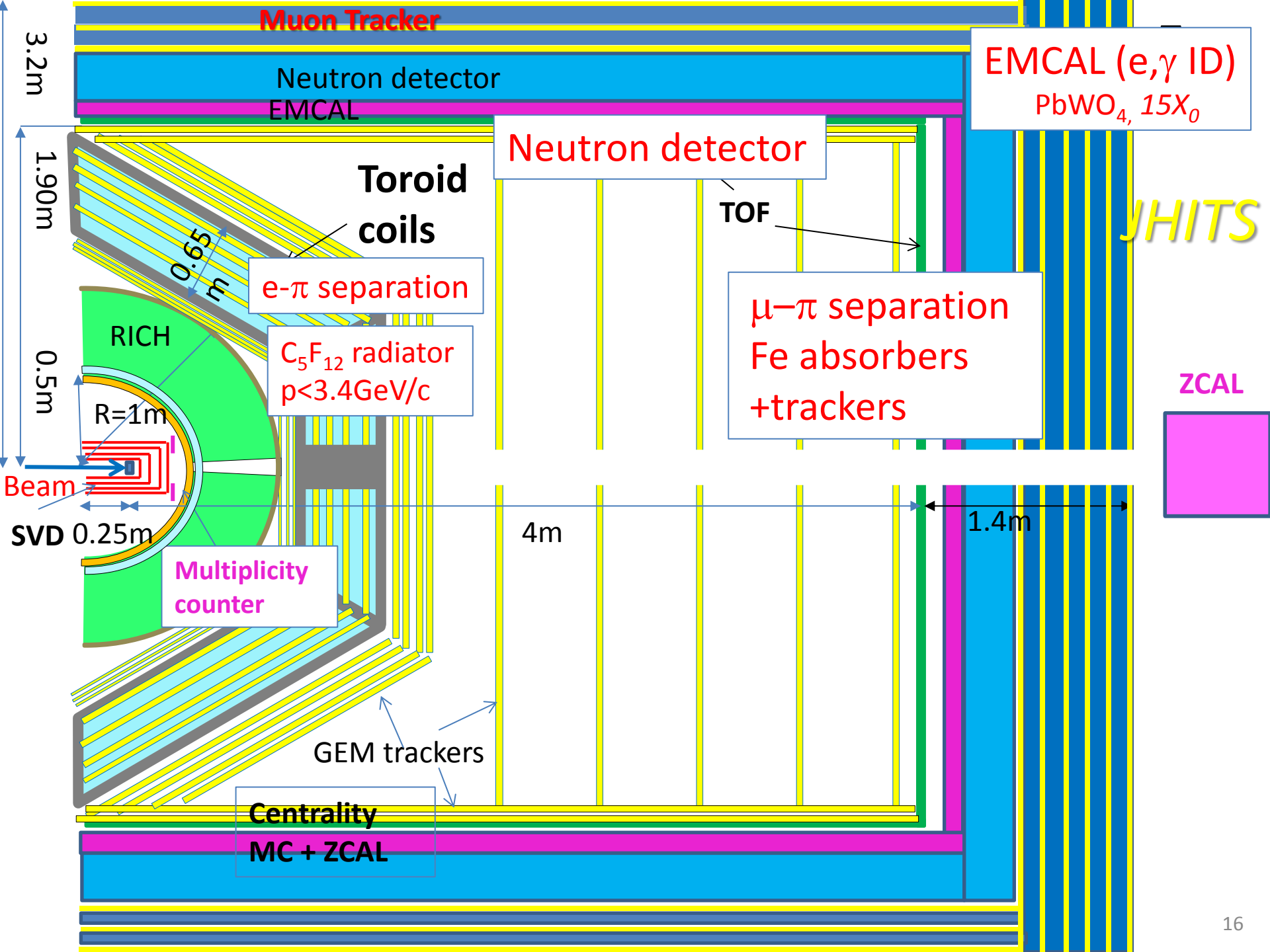
*J-PARC Heavy Ion
Toroidal Spectrometer*

Coils = insensitive
area

12-fold coils
 $B\phi$ variations $\sim \pm 20\%$

Toroid coils





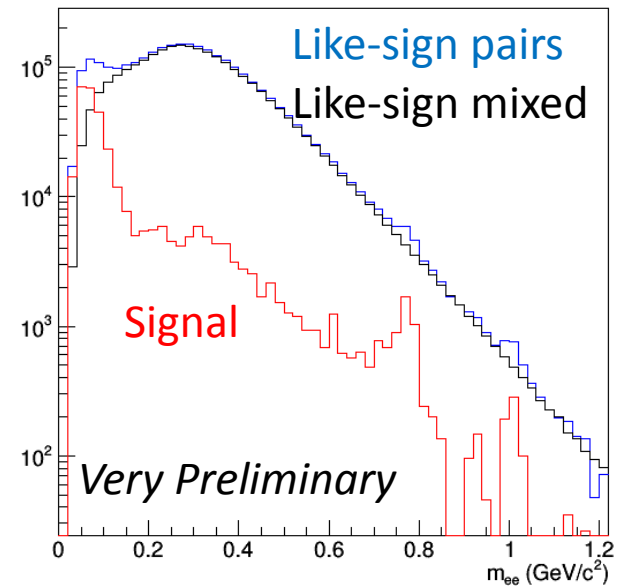
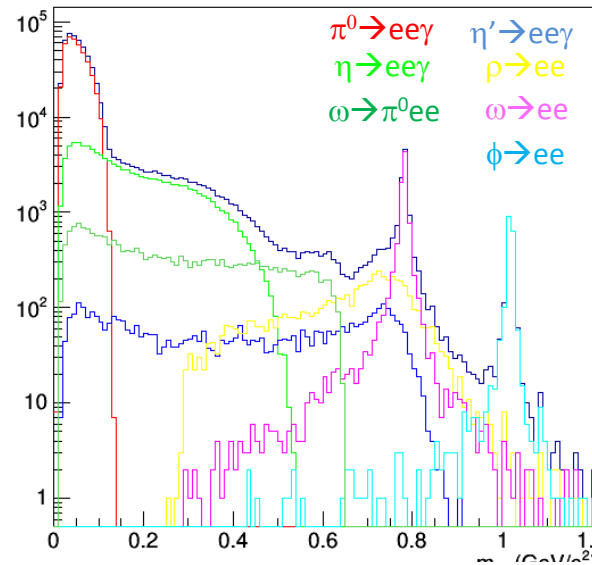
レプトン対シミュレーション

Generated

Reconstructed

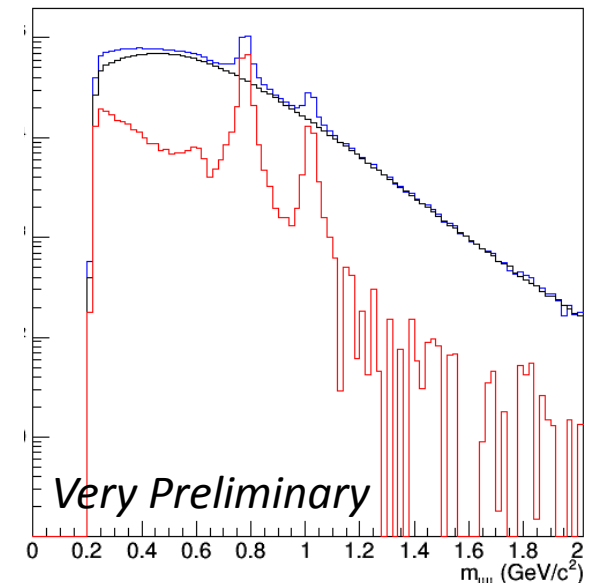
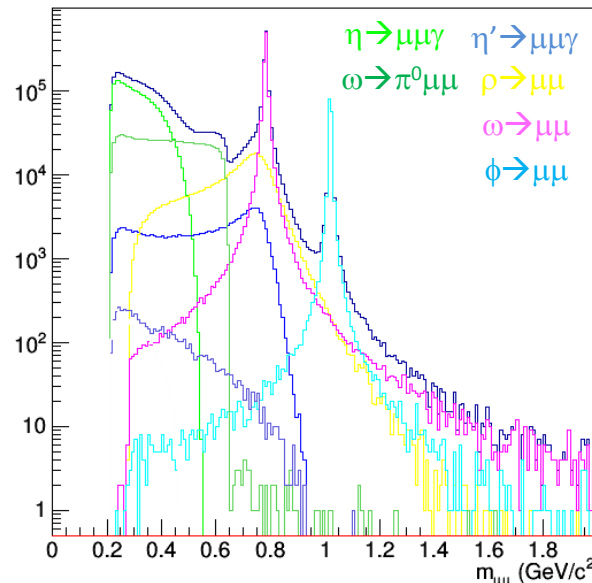
Dielectrons

$\theta_{ee} > 5^\circ$
 $2^\circ < \theta < 80^\circ$
 $p_T > 0.1 \text{ GeV}/c$



Dimuons

$\theta_{ee} > 2^\circ$
 $2^\circ < \theta < 80^\circ$
 $p_T > 0.1 \text{ GeV}/c$

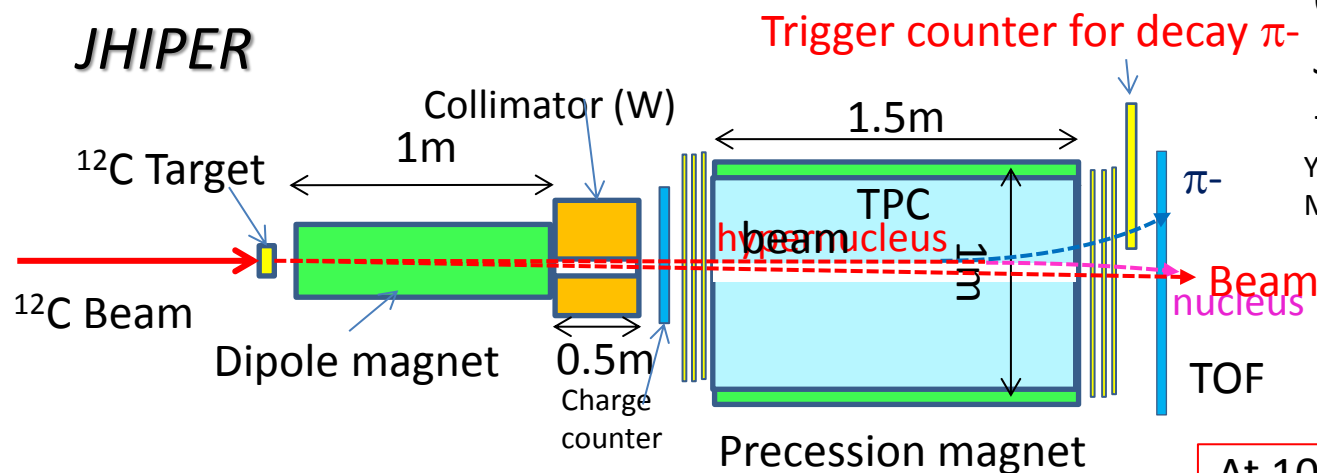


e^+e^- cocktail (8.6 M events),
 $\mu^+\mu^-$ cocktail (500 M events)
 Full reconstructed tracks
 No background (γ conversion, weak decays)
 M_{ee} spectrum : like-sign
 pairs – like-sign mixed pairs

ハイパー核スペクトロメーター (preliminary)

- Hypernuclei in ion collisions
 - $S=-3$ Hypernuclei
 - Proton-rich and neutron-rich hypernuclei
- Hypernuclear measurement at y_{beam}
 - Life time
 - Magnetic moment

JHIPER



C+C at 15 AGeV/c
JAM-1.622 (RQMD/S mode)
+ GEANT4

Y. Nara, et al, Phys. Rev. C61,024901(1999)
M. Isse, et al, Phys.Rev. C72 (2005) 064908



$BdL = 6\text{Tm} \rightarrow \text{Precession angle} \sim 68^\circ$
(assuming μ_{Λ})

Ideas based on design for Japan Hadron Facility
and HypHI LOI

M. Asakawa et al, KEK Report 2000-11
T. R. Saito et al, HypHI Letter of Intent, 2005

At 10^7 Hz interaction rate
 $\rightarrow$ Track rate in TPC : 9.3×10^6 Hz
 $\rightarrow$ Trigger rate : 4.0×10^3 Hz
 Experiment with full beam rate
 may be feasible!

R&D

- 30ps MRPC-TOF
(筑波大、KEK、JAEA)
- 10MHz DAQ, software trigger
(長崎総科大、JAEA)
- Muon detector
(BNL、KEK, 筑波大、JAEA)
 - J-PARC E16のp+A実験で検出器試験を行うとともに物理実験の可能性を探る
 - E16,E50実験と協力してR&Dを進める

まとめ

J-PARC重イオン衝突は中性子星に匹敵する高密度におけるQCD相構造探索、ハドロン研究のため極めて重要。世界最高強度の重イオンビームにより高統計の測定が可能

- **重イオン加速**: 入射器の追加によって可能。世界最高強度を達成する可能性
- **実験**: **大立体角トロイダル型スペクトロメーター**によるレプトン対、揺らぎ等の測定
- R&D: J-PARCの陽子ビーム実験(E16)で行う
- ハドロン・原子核研究分野との協力、国際協力による計画推進
- 日本グループが行っているLHC、RHIC、J-PARCの研究を推進することによりQCD相図の統一的な研究が可能

予定

- 2016年3月 white paper完成
- 2016年7月 J-PARCへのLOI提出
- 10年後の実験開始？