

J-PARCにおける

高密度バリオン物質の研究計画(J-PARC-HI)

佐甲博之(原子力機構先端基礎研究センター/筑波大学数理物質科学研究科)

for J-PARC-HI Collaboration

TCHoU Workshop for the Division of Quark Nuclear Matters (24 Mar. 2022)

Outline

1. 物理目標
2. J-PARC-HI計画の概要
3. 陽子・原子核衝突実験の状況
4. まとめと展望

J-PARC-HI Collaboration

132 members :

Experimental and Theoretical Nuclear Physicists and Accelerator Scientists

Experiment

J. K. Ahn, S. Ashikaga, O. Busch, M. Chiu, T. Chujo, P. Cirkovic, T. Csorgo, D. Devetak, G. David, M. Djordjevic, S. Esumi, P. Garg, R. Guernane, T. Gunji, T. Hachiya, H. Hamagaki, S. Hasegawa, B. S. Hong, S. H. Hwang, Y. Ichikawa, T. Ichisawa, K. Imai, M. Inaba, M. Kaneta, H. Kato, B. C. Kim, E. J. Kim, X. Luo, Y. Miake, J. Milosevic, D. Mishra, L. Nadjdjerdj, S. Nagamiya, T. Nakamura, M. Naruki, K. Nishio, T. Nonaka, M. Ogino, K. Oyama, K. Ozawa, T. R. Saito, A. Sakaguchi, T. Sakaguchi, S. Sakai, H. Sako, K. Sato, S. Sato, S. Sawada, K. Shigaki, S. Shimansky, M. Shimomura, M. Stojanovic, H. Sugimura, Y. Takeuchi, H. Tamura, K. H. Tanaka, Y. Tanaka, K. Tanida, N. Xu, S. Yokkaichi, I. K. Yoo

Theory

Y. Akamatsu, M. Asakawa, K. Fukushima, H. Fujii, T. Hatsuda, M. Harada, T. Hirano, K. Itakura, M. Kitazawa, T. Maruyama, K. Morita, K. Murase, A. Nakamura, Y. Nara, C. Nonaka, A. Ohnishi, M. Oka

Accelerator

E. Chishiro, H. Harada, Y. Hashimoto, N. Hayashi, K. Hirano, H. Hotchi, K. Ishii, T. Ito, M. Kinsho, R. Kitamura, A. Kovalenko, J. Kamiya, N. Kikuzawa, T. Kimura, Y. Kondo, H. Kuboki, Y. Kurimoto, Y. Liu, S. Meigo, A. Miura, T. Miyao, T. Morishita, Y. Morita, K. Moriya, R. Muto, T. Nakanoya, K. Niki, H. Oguri, C. Ohmori, A. Okabe, M. Okamura, P. K. Saha, K. Sato, Y. Sato, T. Shibata, T. Shimokawa, K. Shindo, S. Shinozaki, M. Shirakata, Y. Shobuda, K. Suganuma, Y. Sugiyama, H. Takahashi, T. Takayanagi, F. Tamura, J. Tamura, N. Tani, M. Tomisawa, T. Toyama, Y. Watanabe, K. Yamamoto, M. Yamamoto, M. Yoshii, M. Yoshimoto

ASRC/JAEA, J-PARC/JAEA, J-PARC/KEK, Tokyo Inst. Tech, Hiroshima U, Osaka U, U Tsukuba, Tsukuba U Tech, CNS, U Tokyo, Tohoku U, Nagasaki IAS, Kyoto U, RIKEN, Akita International U, Nagoya U, Sophia U, U Tokyo, YITP/Kyoto U, Nara Women's U, KEK, BNL, Mainz U, GSI, Central China Normal U, Korea U, Chonbuk National U, Pusan National U, JINR, U Belgrade, Wigner RCP, KRF, Stony Brook U, Bhaba Atomic Research Centre, Far Eastern Federal U, Grenoble U

J-PARC-HIの目標 (I)

高密度バリオン物質の探索

– QCD 相構造の探索

- 1次相転移, QCD臨界点, カラー超電導
⇒ イベント毎揺らぎ, レプトン対

– 高密度物質性質の解明

- バリオン密度, 状態方程式 (EOS), 流体的性質 (粘性) 等

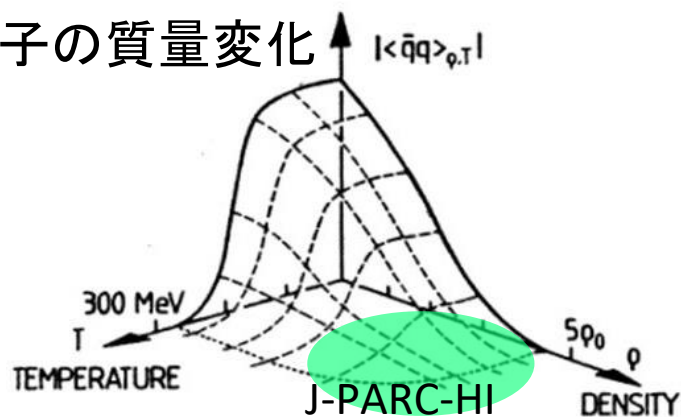
⇒ Collective flow

→ 中性子星研究

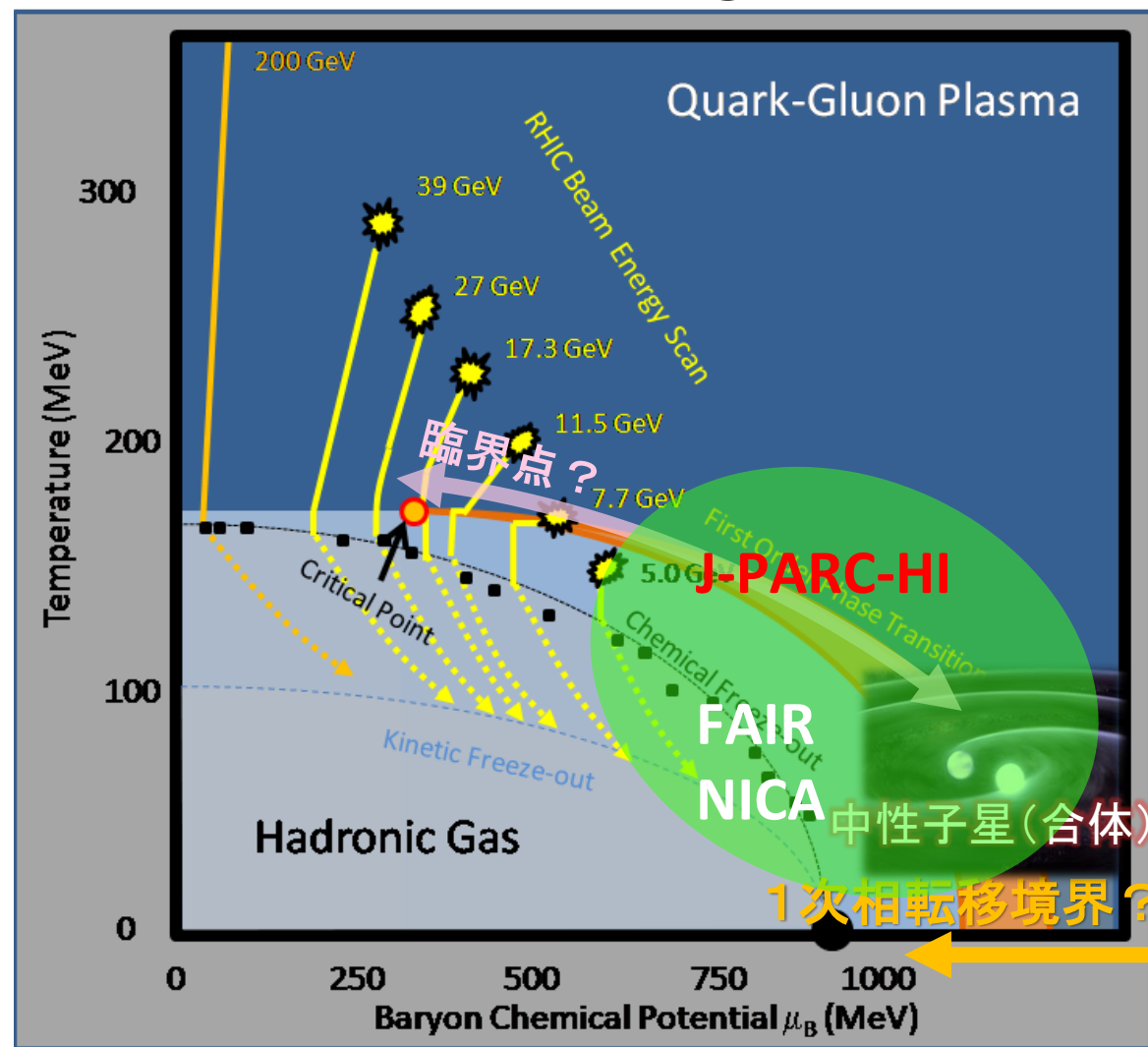
– カイラル対称性の回復

- ベクトル中間子の質量変化

⇒ レプトン対



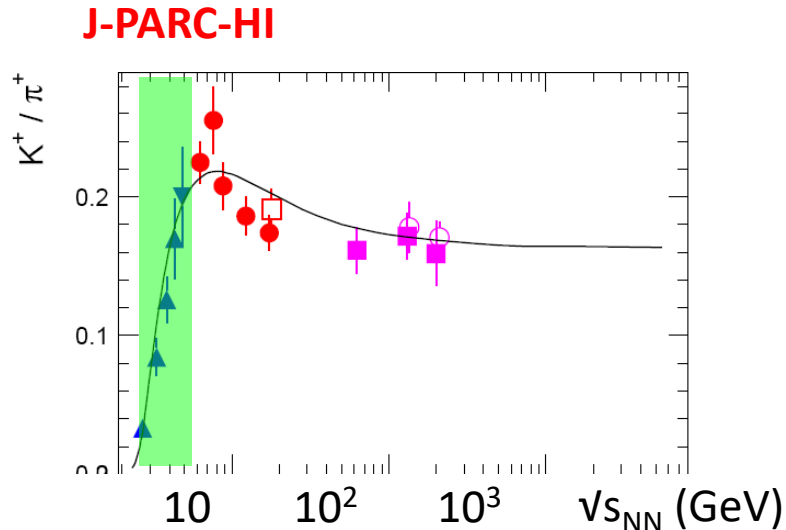
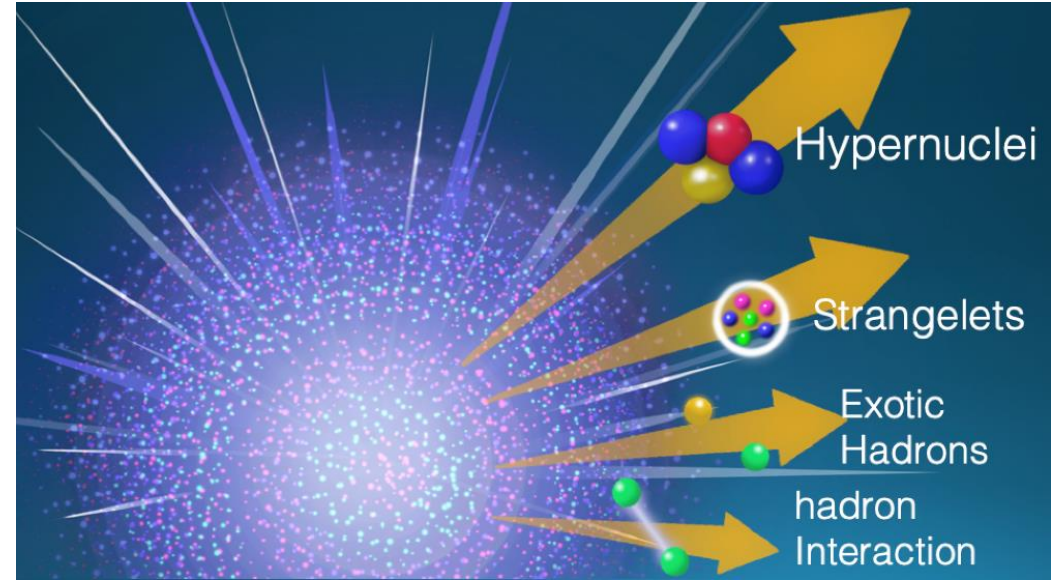
QCD Phase diagram



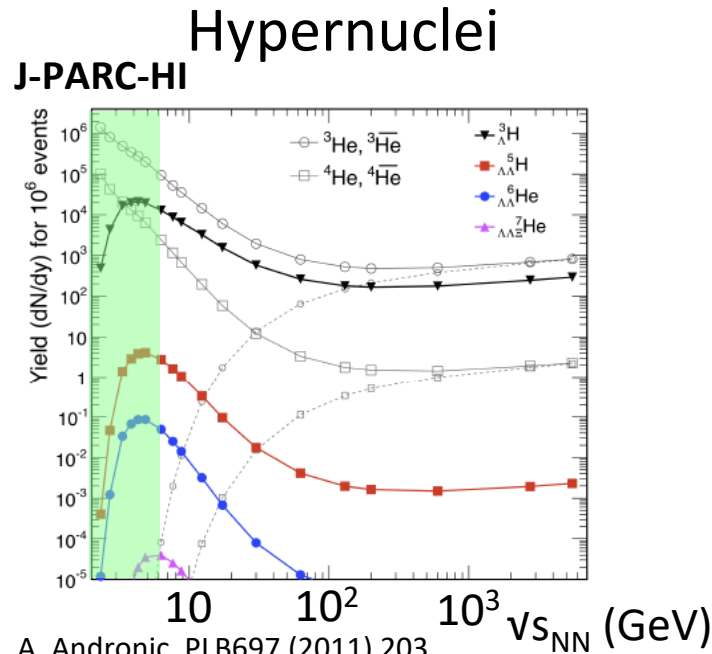
J-PARC-HIの目標 (II)

マルチストレンジネス粒子の探索

- J-PARCエネルギー: スレンジネスの効率的な生成
- 稀粒子の探索
 - ハイパー核, strangelet, ダイバリオン等
- ハイペロン間相互作用
 - Femtoscopy (2粒子運動量相関)
 - スレンジハドロン・クォーク物質の状態方程式 (EOS)

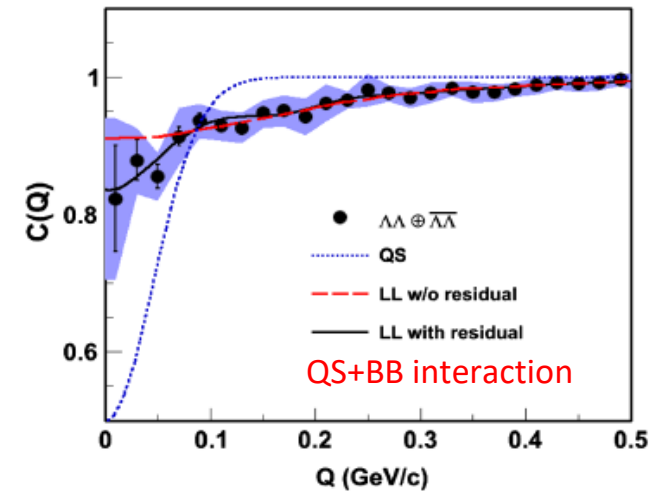


A. Andronic, et al, Nucl. Phys. A 837 (2010) 65



A. Andronic, PLB697 (2011) 203

$\Lambda\Lambda$ correlation function



STAR, PRL114 (2015) 022301

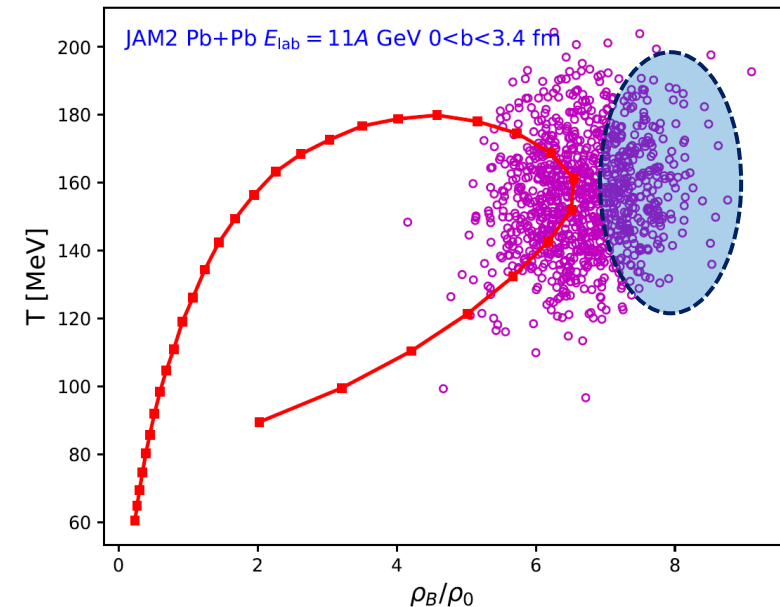
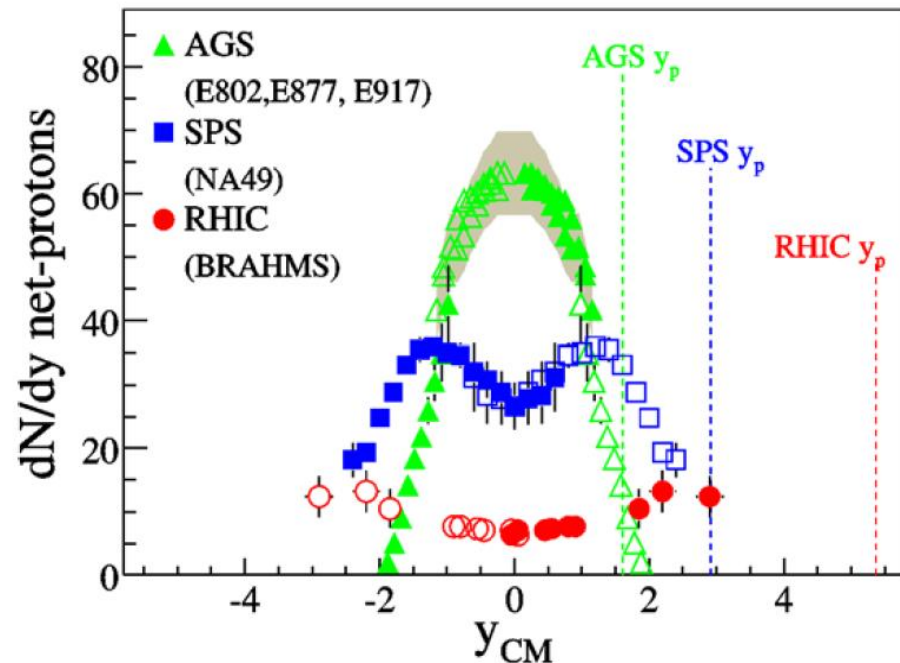
J-PARCエネルギーにおけるバリオンストップピング

J-PARCエネルギー(~10 AGeV)におけるバリオンストップピング

- 陽子のRapidity分布が高いピークを持つ
- 高密度物質の生成 ($\rho \sim 7\rho_0$)
- 衝突系が達成する最高密度は、各衝突事象で大きな揺らぎを持つ

→J-PARC-HI における超高統計で最高密度に達した事象を探索
(高密度トリガー)

I. Arsene et al. / Nuclear Physics A 757 (2005) 1–27



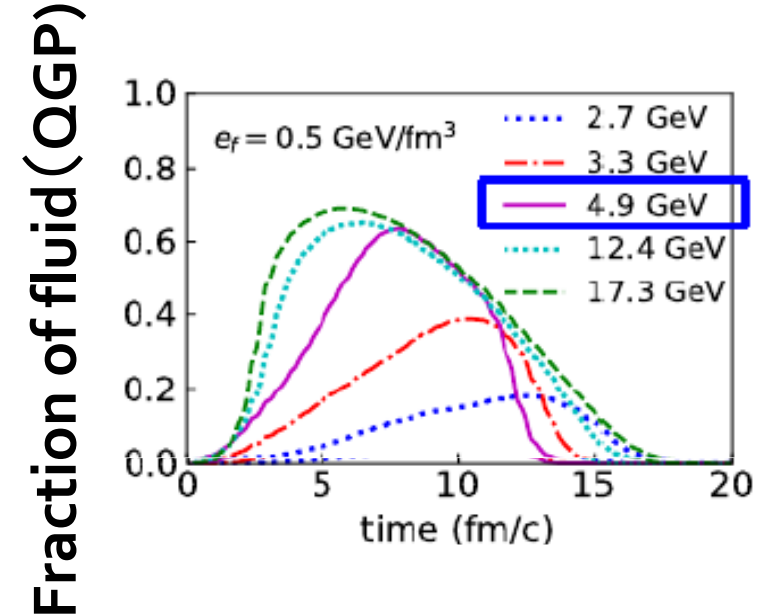
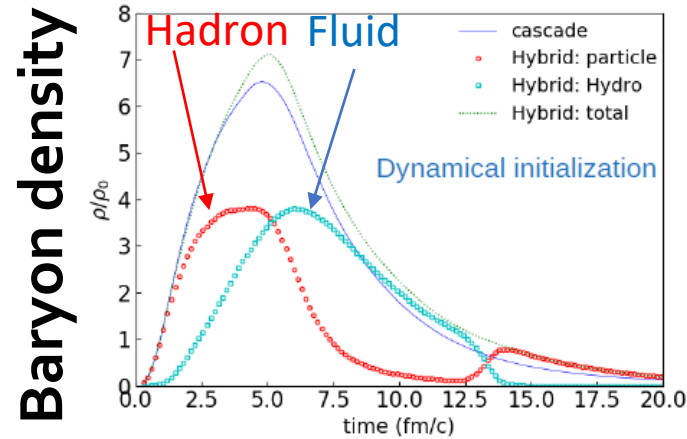
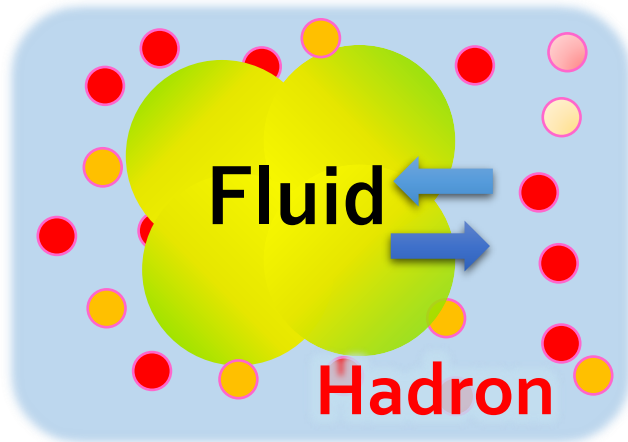
JAM model calculations by Y. Nara (2022)

J-PARCにおけるQGPの生成可能性

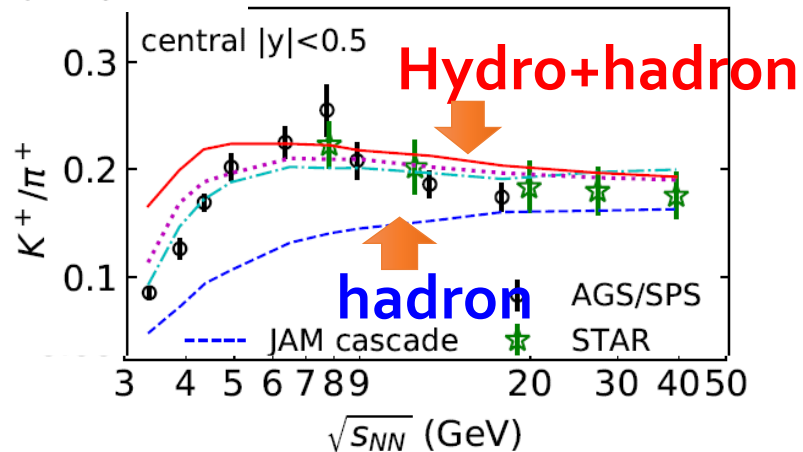
流体(QGP)+ハドロンカスケード(JAM)

Dynamically integrated transport model

Akamatsu, Ohnishi, Kitazawa, Nara, et al, PRC98 024909 (2018)



- JAM+hydro (e=0.5)
- JAM+hydro (e=0.8)
- JAM+hydro (e=1.0)



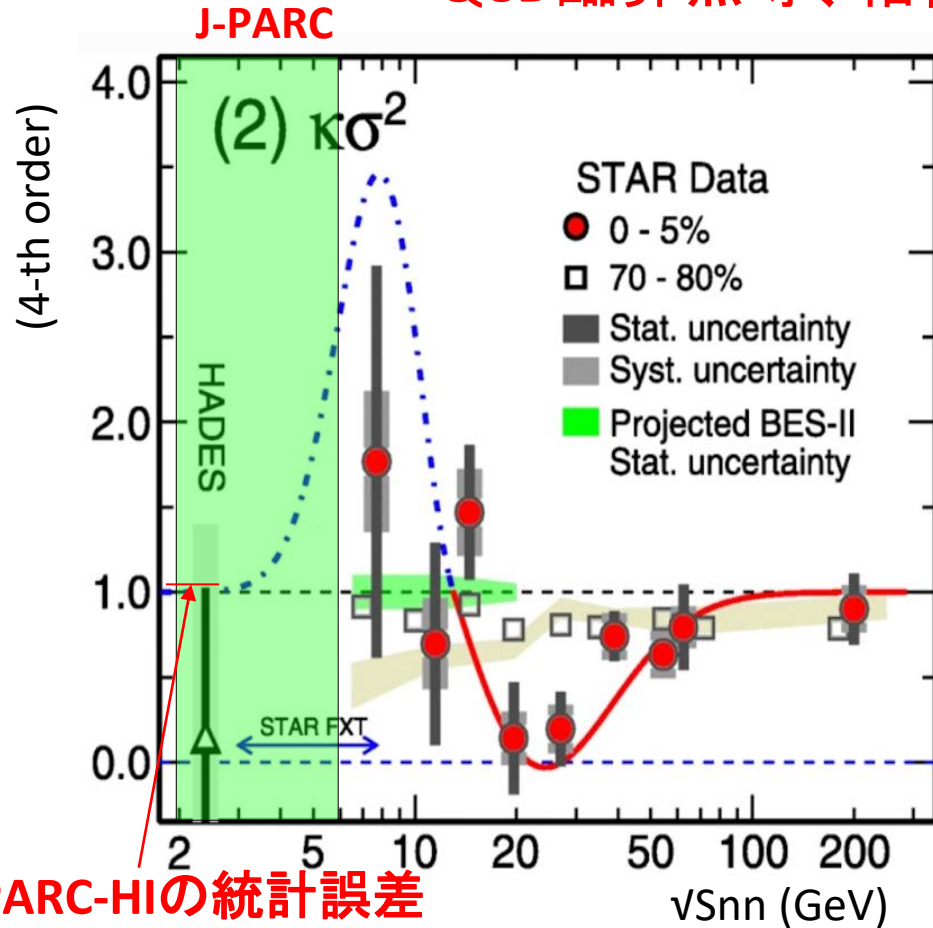
K⁺/π⁺ データは流体成分(QGP)の導入によってのみ再現可能

→J-PARCエネルギーにおけるQGPの存在を示唆

保存電荷の事象毎ゆらぎ

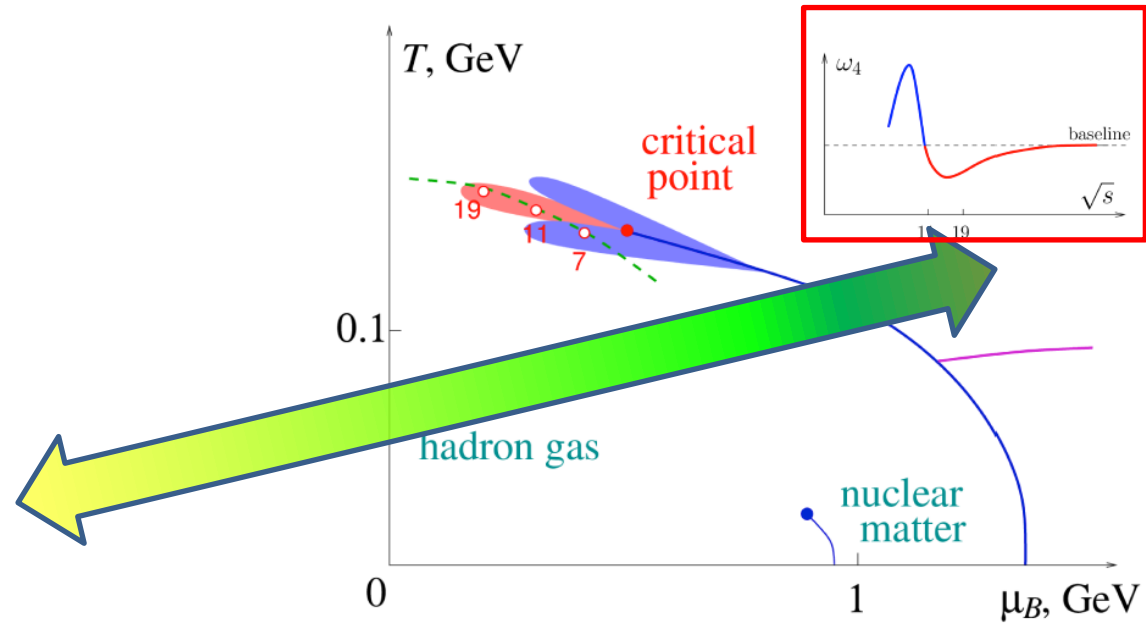
特に高次の揺らぎ:

QCD臨界点等、相構造探索の有力なProbe



J-PARC-HIの統計誤差
<1% (1MHz x 1 day)

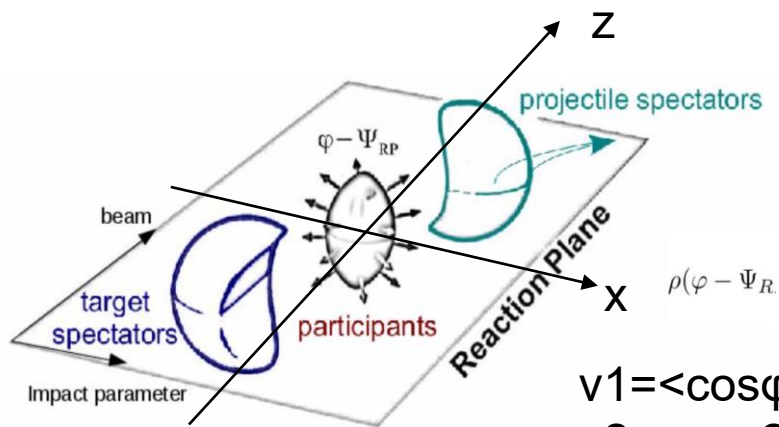
Theory M.A. Stephanov,
PRL107, 052301 (2011).



4次揺らぎの低エネルギーにおける増加
→ 臨界点の兆候?

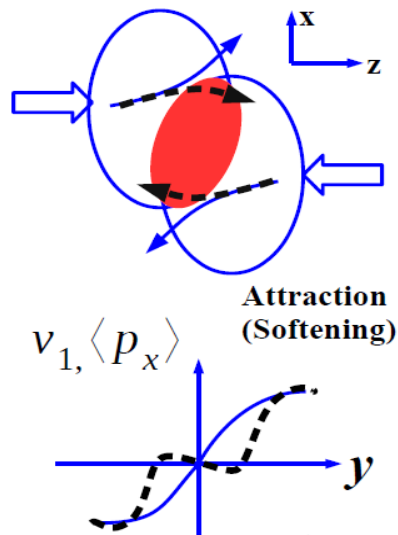
Collective flow

A. Ohnishi, Reimei Workshop, Aug 2016

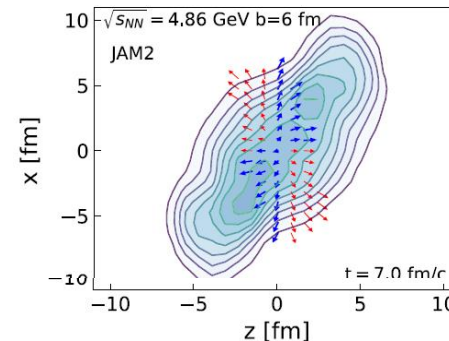


$$v_1 = \langle \cos \varphi \rangle$$

$$v_2 = \langle \cos 2\varphi \rangle$$



V1: Directed flow



$dv_1/dy < 0$: EOSのソフト化?
Flowとantiflowのバランス?

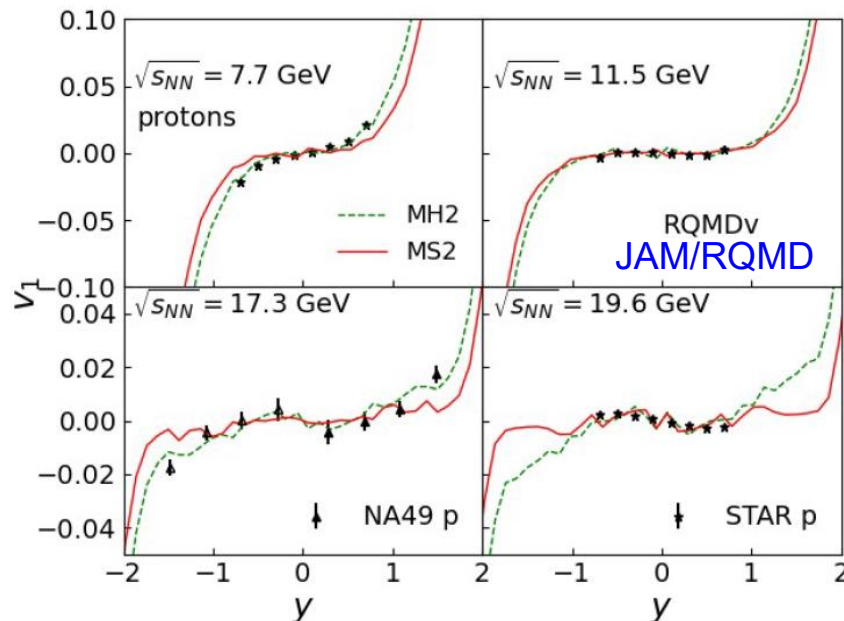
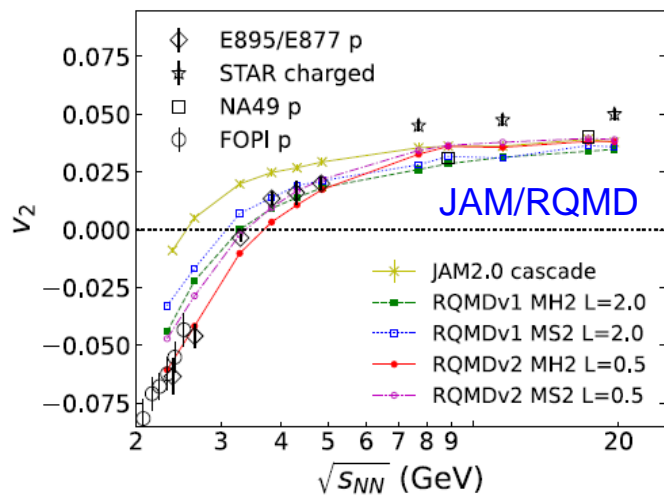
V1, V2のtransportモデルとの比較によるEOSへの制限

初期のマターの形状

→EOSに基づいた圧力勾配

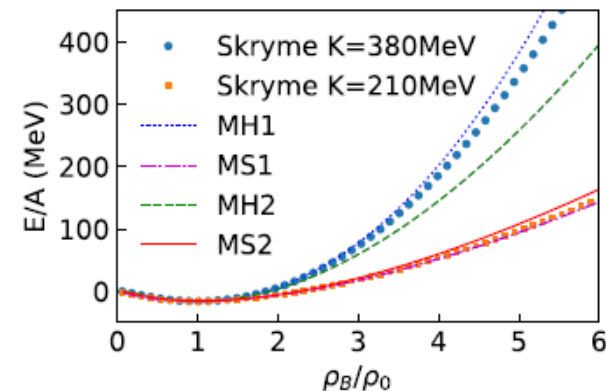
→粒子放出の方位角異方性

V2: Elliptic flow



Y. Nara, J-PARC-HI Evening, 2021

EOS



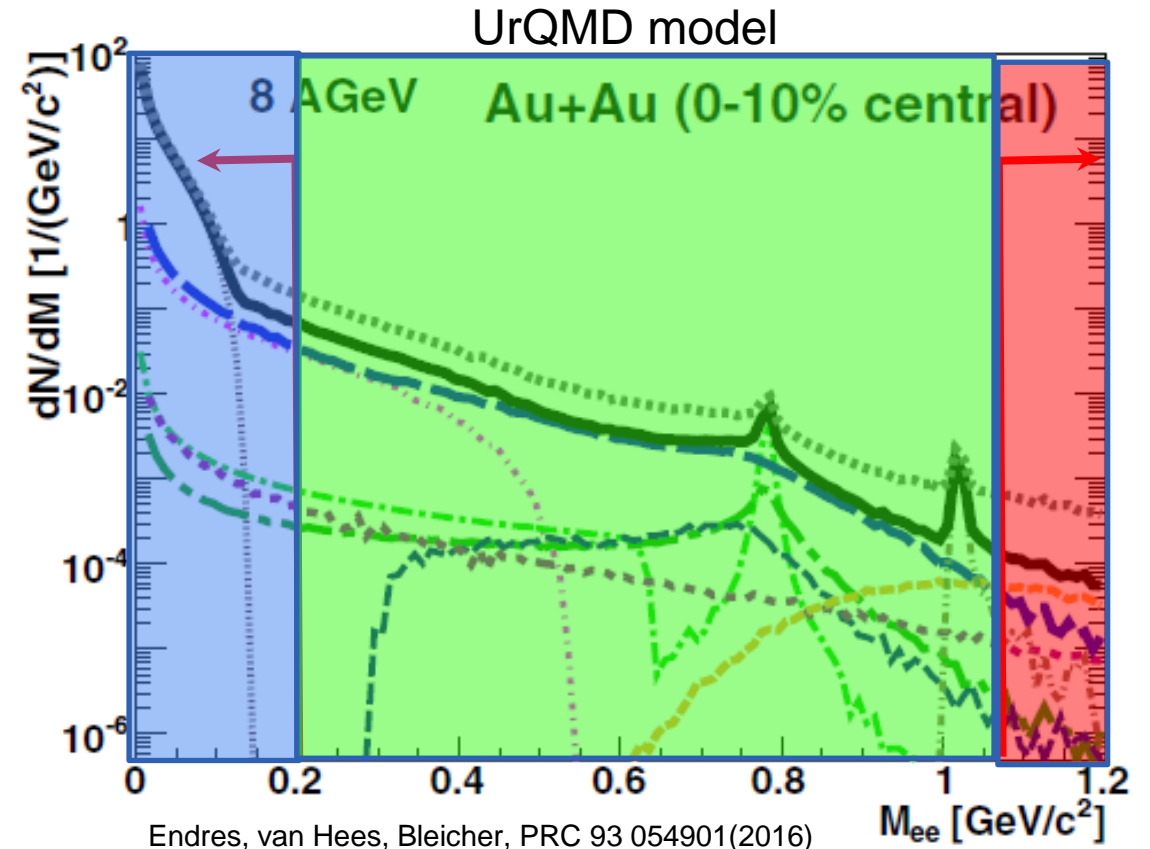
Y. Nara, A. Ohnishi, PRC 105 014911 (2022)

Y. Nara, A. Ohnishi, PRC 105 014911 (2022)

レプトン対生成

- 強相互作用をしない“Penetrating probe”
 - レプトン対生成の際のマターの情報を保持
 - 質量範囲によって様々な物理の研究が可能

1. π^0 Dalitz崩壊 + diquark対消滅による光子放出
カラー超電導の探索
2. ρ, ω, ϕ 崩壊
カイラル対称性回復による質量変化
3. 熱光子 ($1.1 \sim 3 \text{ GeV}/c^2$)
マターの温度測定
“Caloric curve”による相転移探索
→最初のJ-PARC-HI Proposal
4. チャーモニウム生成・抑制 ($m > 3 \text{ GeV}/c^2$)

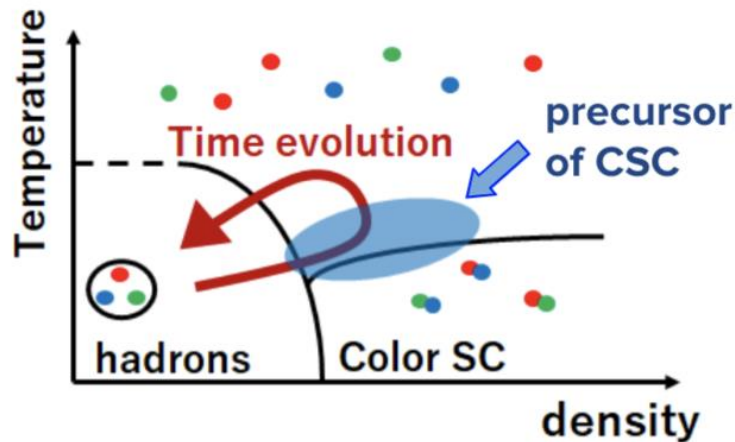


低質量電子対

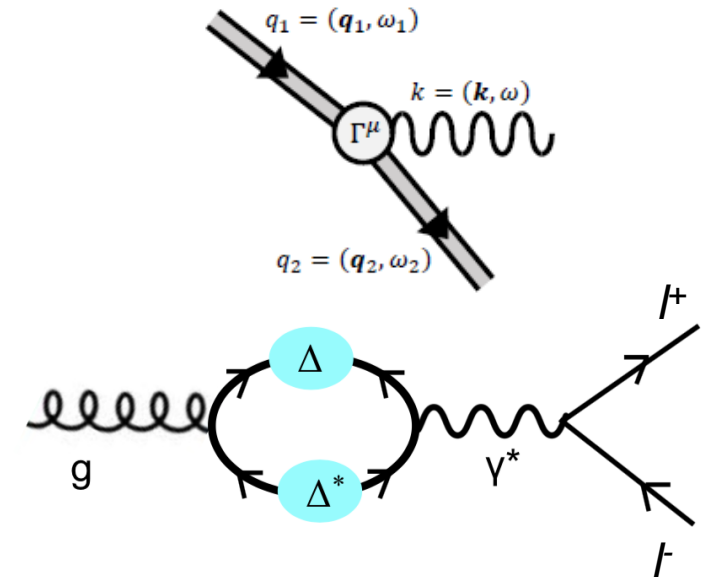
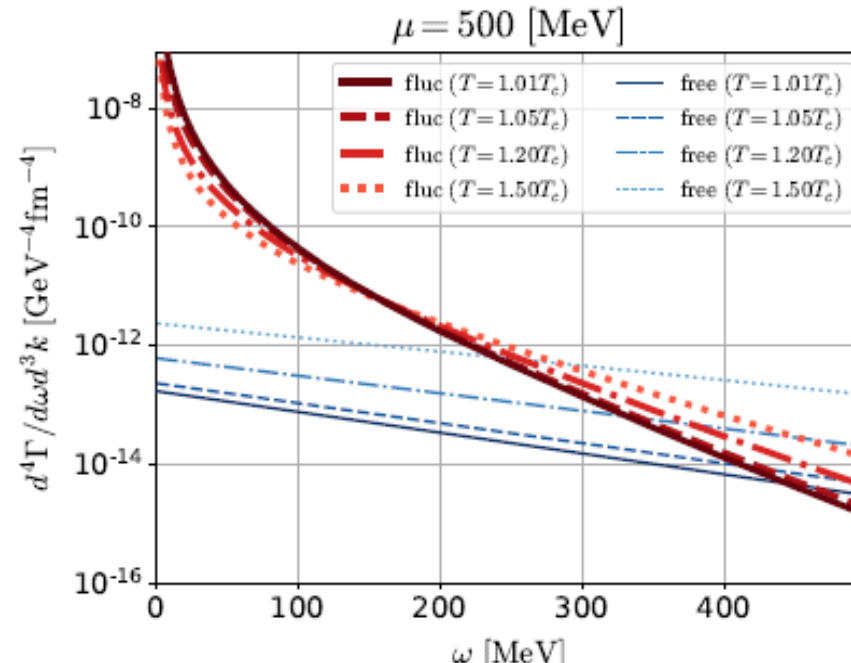
▶ カラー超電導(前兆現象) のシグナル

衝突初期: 低温・高密度 → カラー超電導相に近づく

T_c 付近の低質量電子対の増大: diquarkの光子放出、またはdiquarkの対消滅



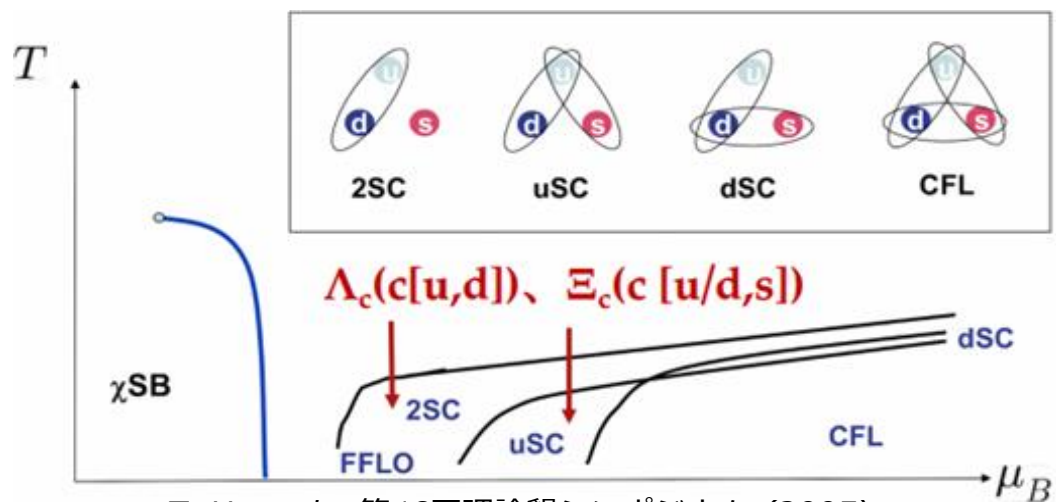
T. Nishimura, M. Kitazawa, T. Kunihiro, arXiv:2201.01963



チャームハドロン生成

チャームクォーク: 高密度物質中の“重い不純物”

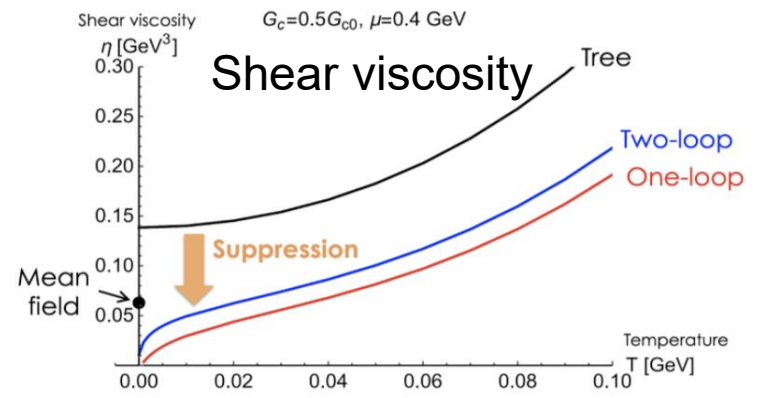
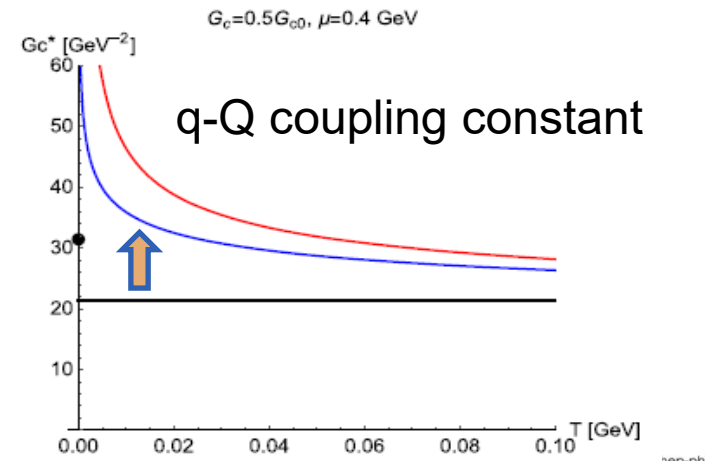
- **チャームハドロンのフロー**
 - QGP中の輸送の性質
 - QCD近藤効果の探索
- **チャームバリオン生成 (増大)**
 - ダイクォーク自由度の探索
 - カラー超電導相の探索



T. Hatsuda, 第18回理論懇シンポジウム (2005)

QCD 近藤効果

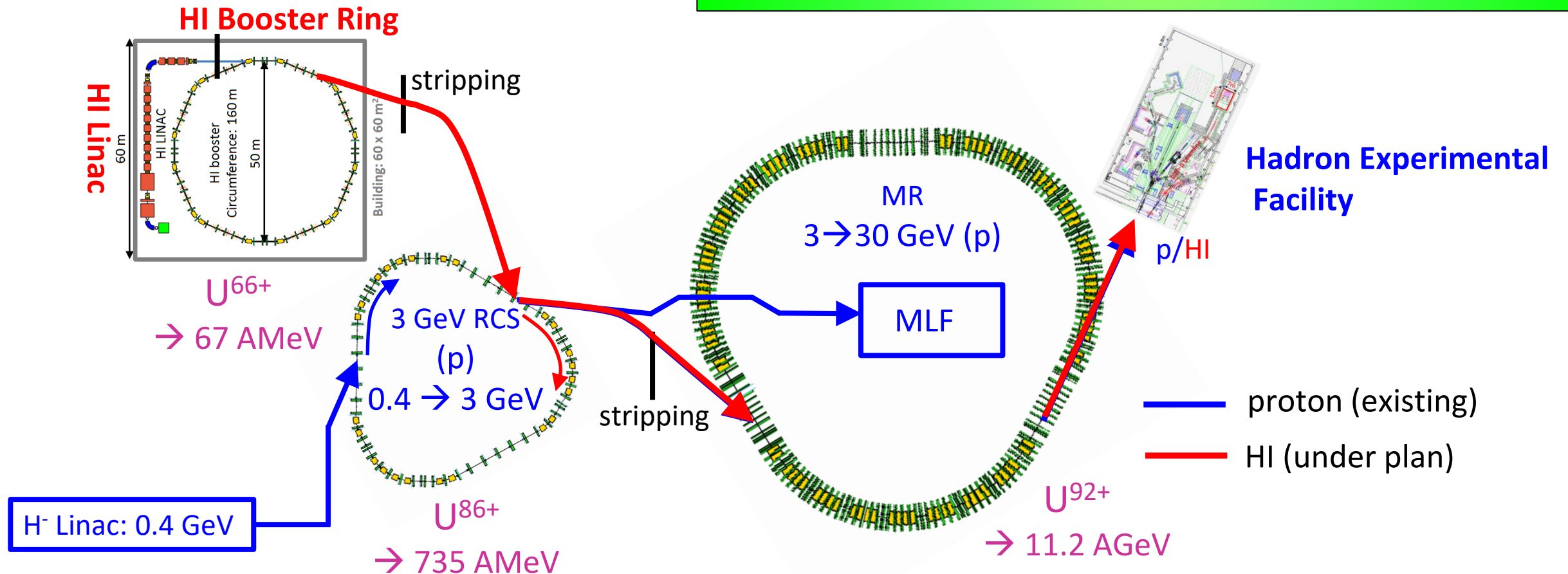
低温でのq-Qの相互作用の増大
 → 抵抗率の増加
 → 粘性の低下 (フローで観測可)



Yasui, Ozaki, PRD 96, 114027 (2017)

J-PARCにおける重イオン加速

- p beam rate (2021) = 64kW \rightarrow 2.7×10^{13} / spill
- HI beam rate $\sim 10^{11}$ Hz (世界最高強度)
- $E_{\text{lab}}(U) = 1\text{-}11$ AGeV
- $\sqrt{s_{\text{NN}}}(U) = 1.9\text{-}4.9$ GeV



Staging Strategy (加速器) (検討中)

JAEAにおける
重イオンリニアック計画

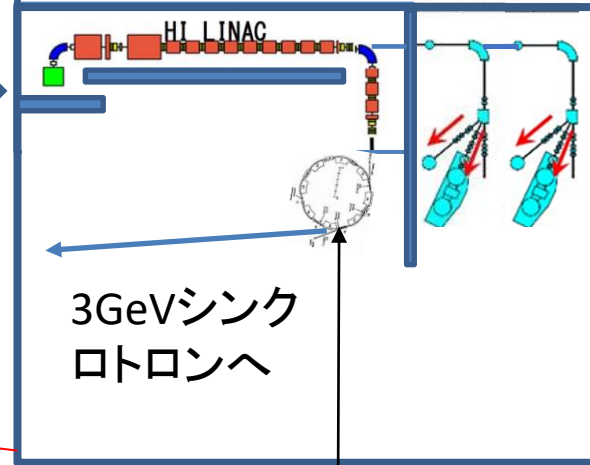


超電導
重イオン
リニアック

J-PARCへ移設

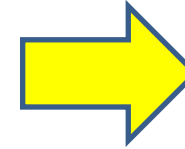


Phase I
~2026
 10^8 / spill



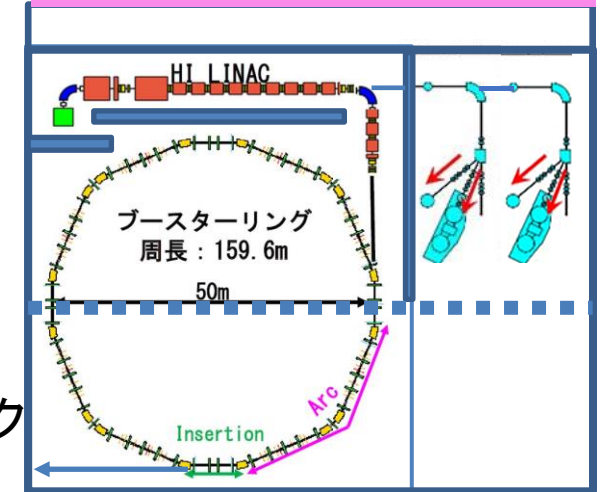
KEK-PS Boosterを移設

Upgrade

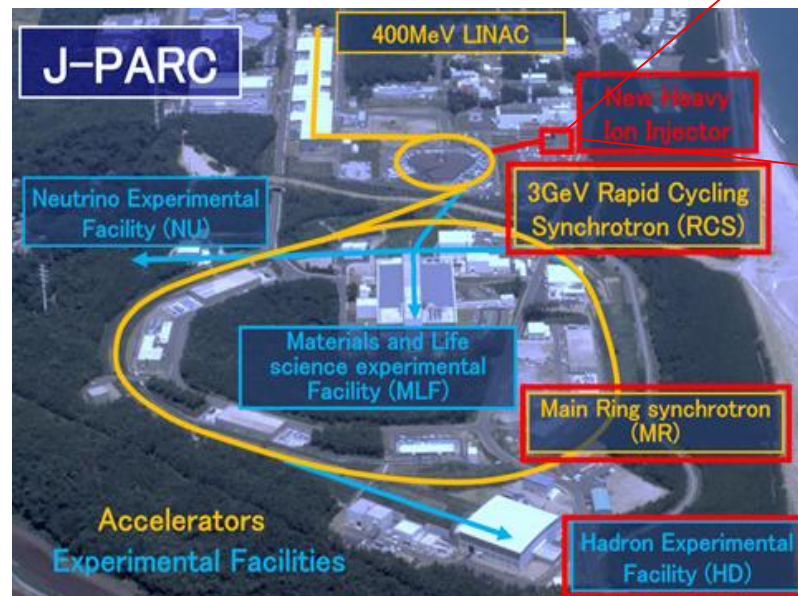


Phase II
~ 2032
 10^{11} / spill

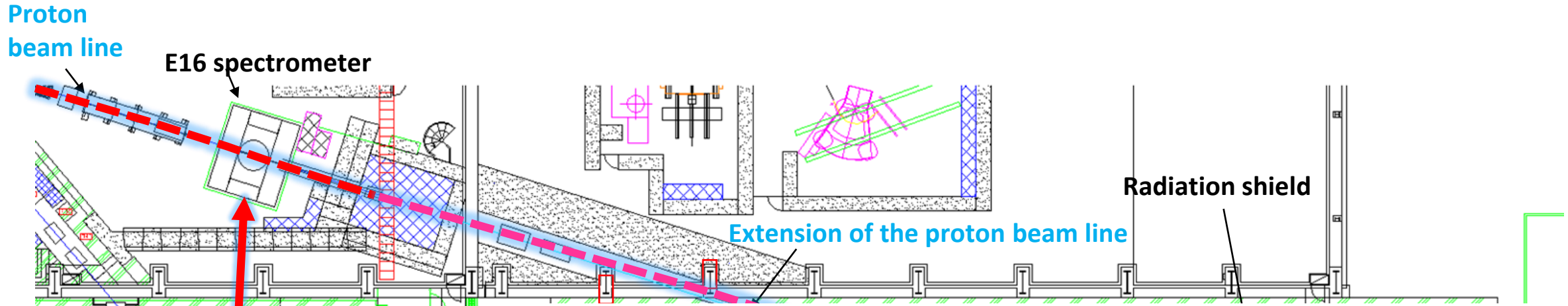
3GeVシンク
ロトンへ



新大強度Booster建設



Staging Strategy (実験) (検討中)

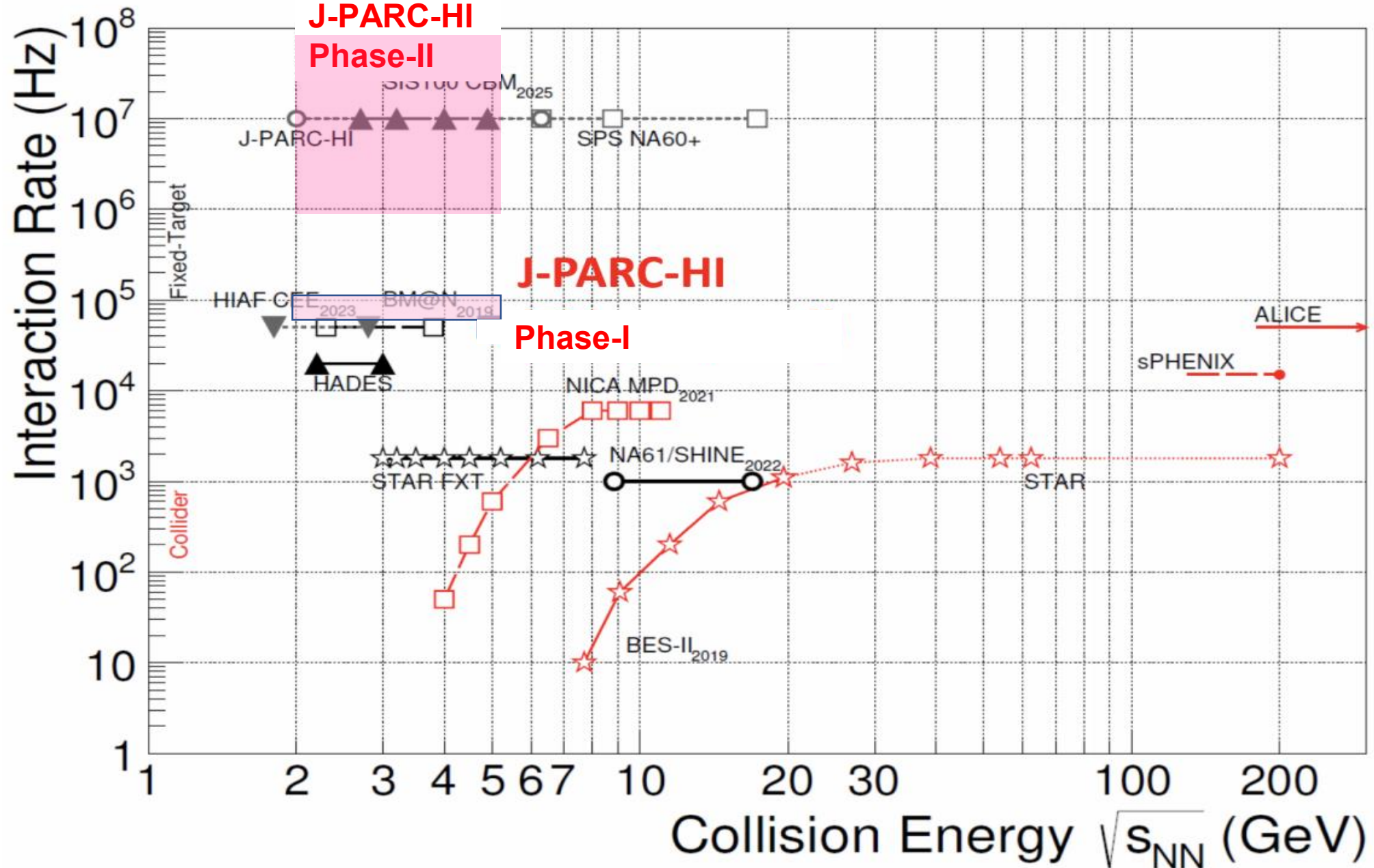


1. J-PARC-HI Phase0 :p+A experiment (E16) (2020-)
Baseline data and detector R&D for HIC

2. J-PARC-HI Phase-I
Upgraded E16
Low-rate HIC (up to $\sim 10^8$ Hz HI beams)

3. J-PARC-HI Phase-II
Large acceptance high-rate spectrometer
(up to 10^{11} Hz HI beams)

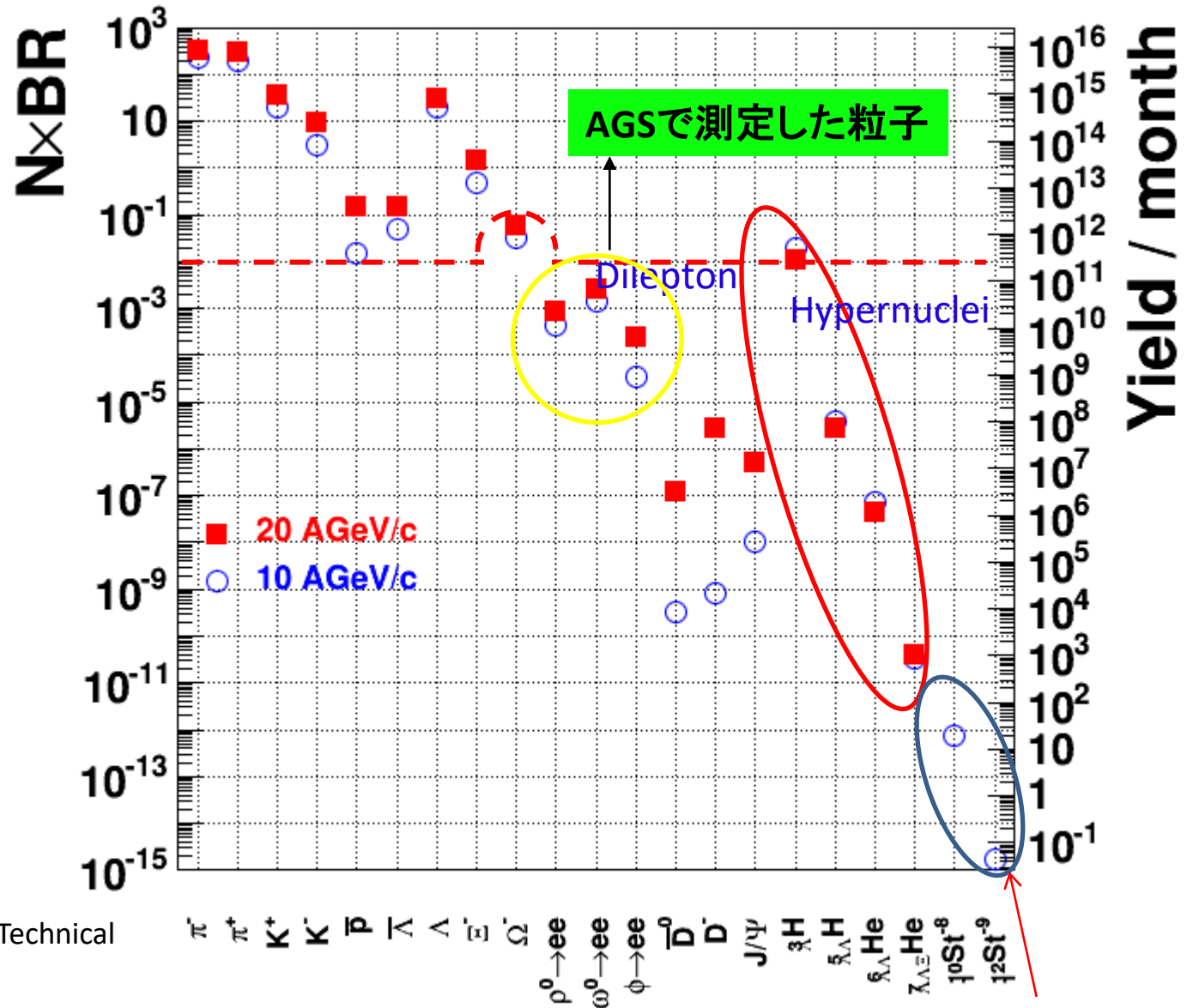
重イオン加速器のレートとエネルギーの比較



J-PARC-HIにおける粒子生成

Beam : 10^{10} Hz (Phase II)
 0.1 % target
 → Min-bias interaction rate
 10^7 Hz

In 1 month experiment:
 $\rho, \omega, \phi \rightarrow ee$ $10^9 - 10^{11}$
 Hypernuclei $10^3 - 10^{11}$
 J/ ψ 10^5

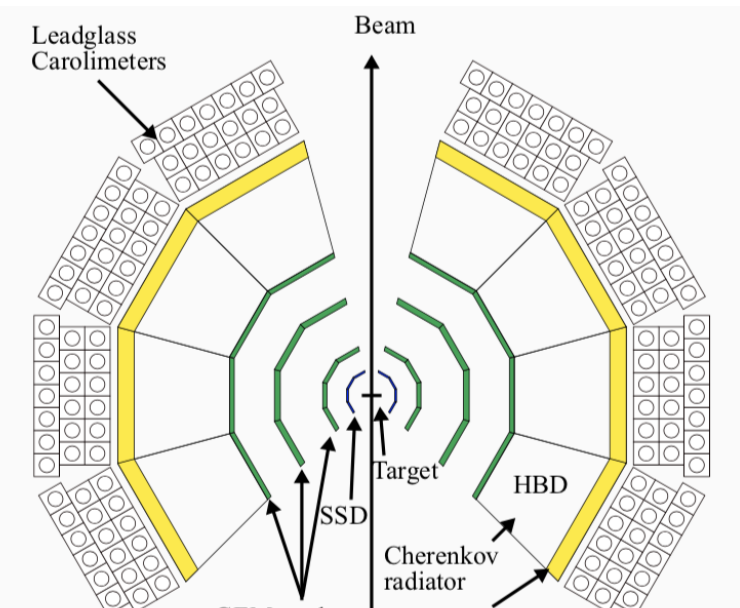
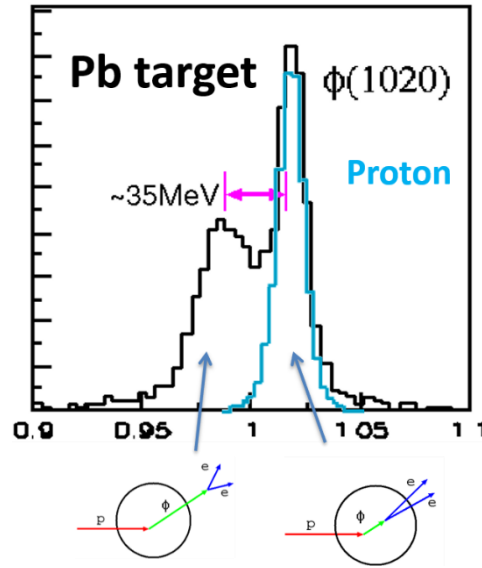
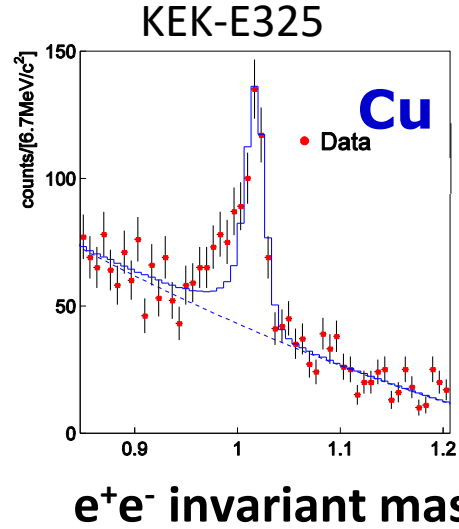


HSD calculations in FAIR Baseline Technical Report (Mar 2006)
 A. Andronic, PLB697 (2011) 203

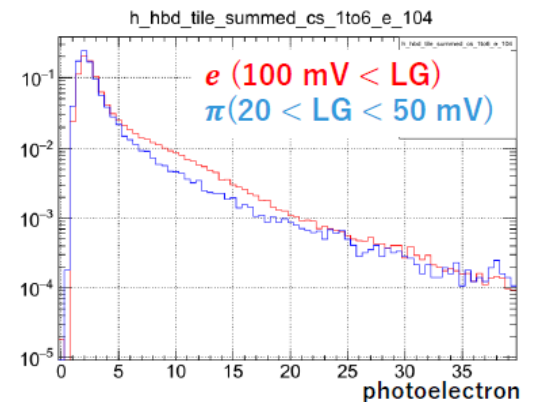
Strangelets: P. Braun-Munzinger J.Phys.G21 (1995)L17

J-PARC E16 : p+Aにおける電子対測定 (2020年6月-)

ϕ 中間子の原子核中における質量変化



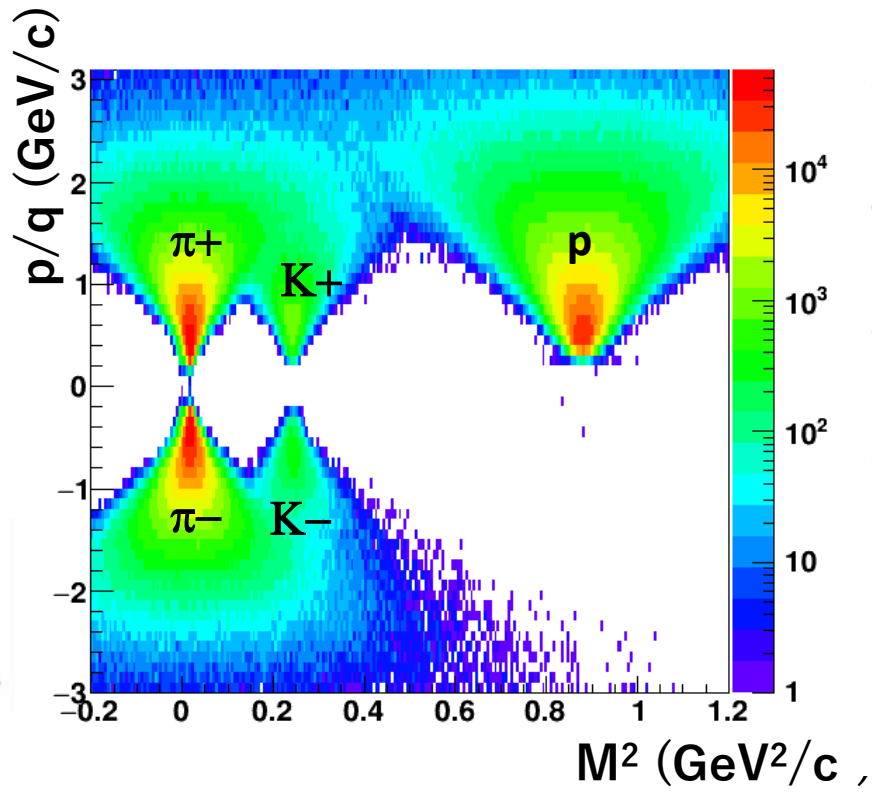
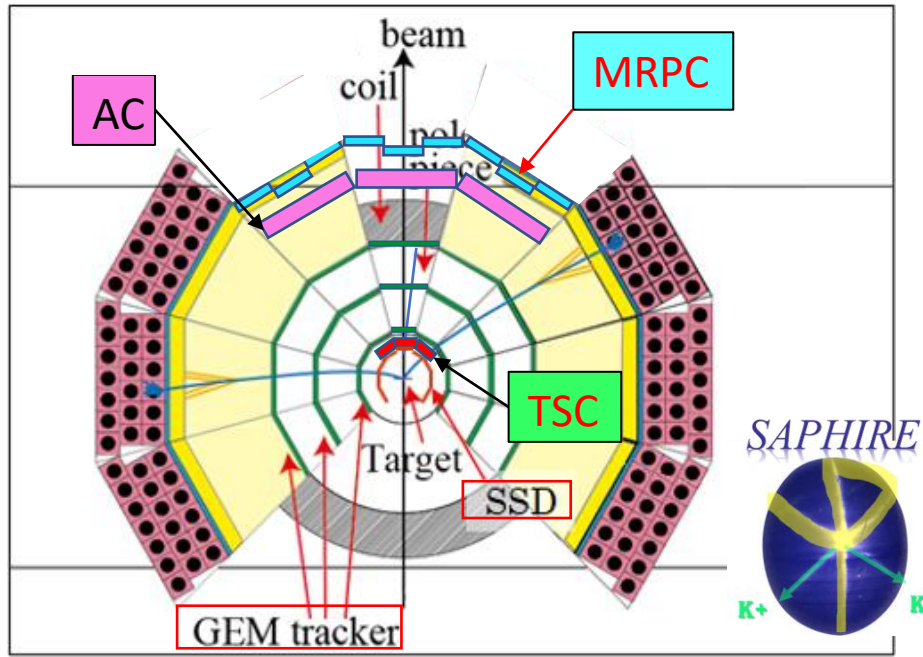
- Run0 (コミッショニング) 2020-2021
- Run1 (本実験) 2023-



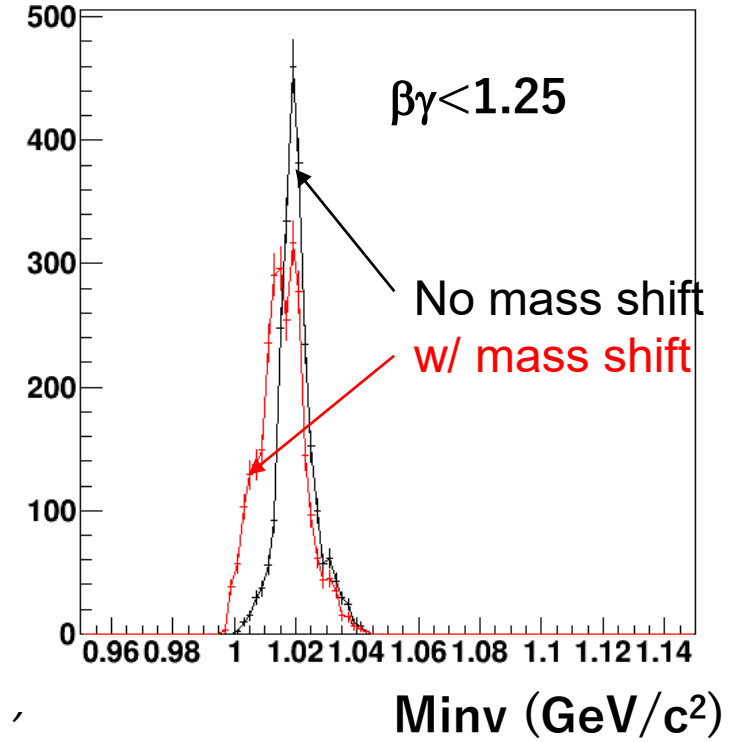
HBD pulse height distribution

P88:陽子・原子核衝突での $\phi \rightarrow K^+K^-$ 測定

Top and bottom layers



p+Cu: HSD model
w/ detector effects (GEANT4)



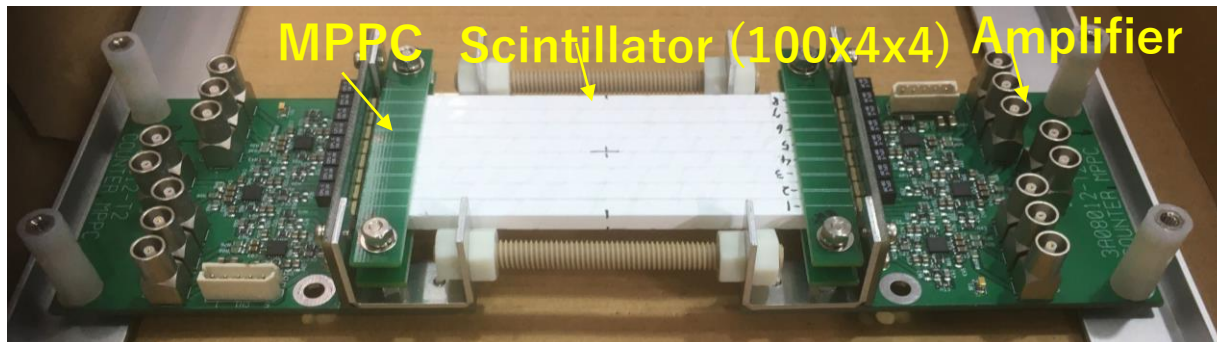
- 高統計の不変質量と収量の測定 (100x KEK-E325)
- 原子核依存性(p+C, p+Cu, p+Pb)
- ➔ J-PARC-HIにおけるハドロン測定のベースライン

P88の検出器開発状況 (筑波大-JAEA)

Spring-8でのMRPC試験機製作(2020年)



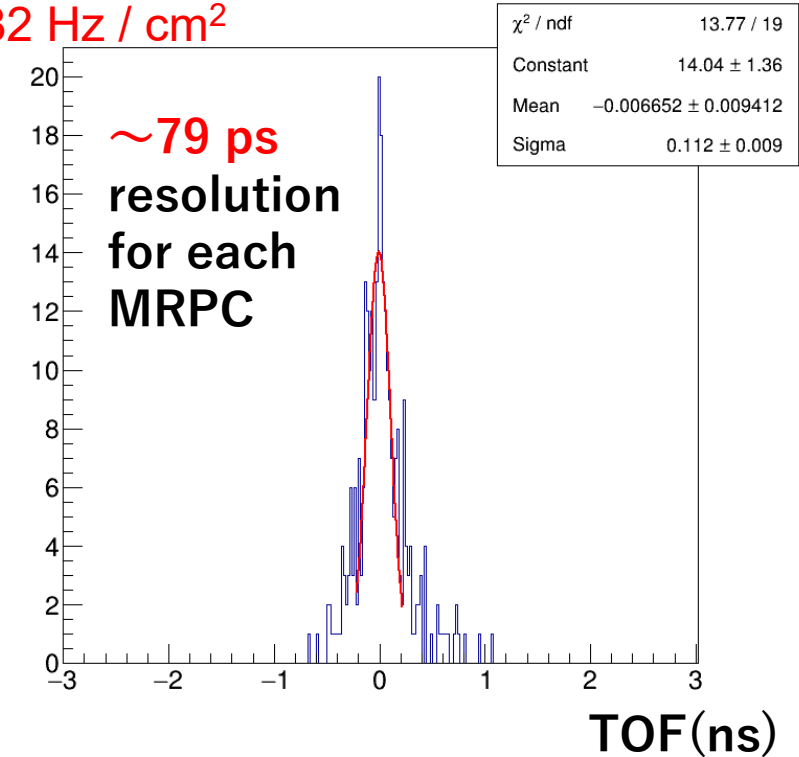
Start Timing Counter試験機



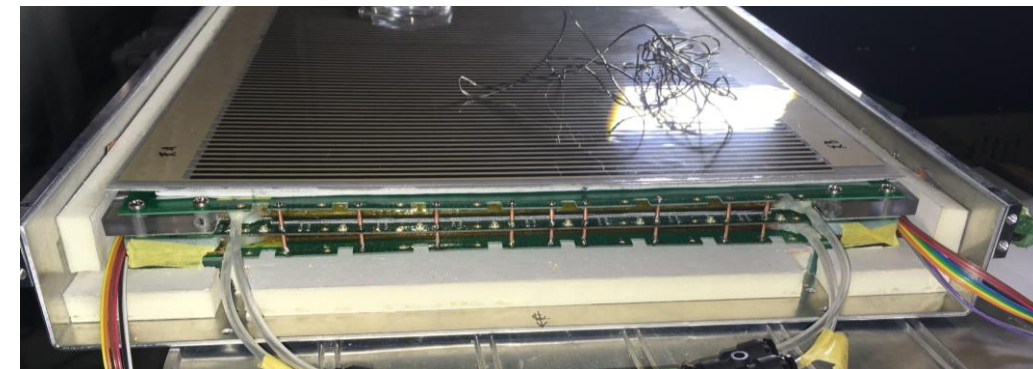
時間分解能 ~ 55 ps

E16におけるMRPC1-MRPC2の時間分解能

~ 82 Hz / cm^2



耐高レートMRPC試験機(2022年)



E16のアップグレードによるJ-PARC-HI Phase-I

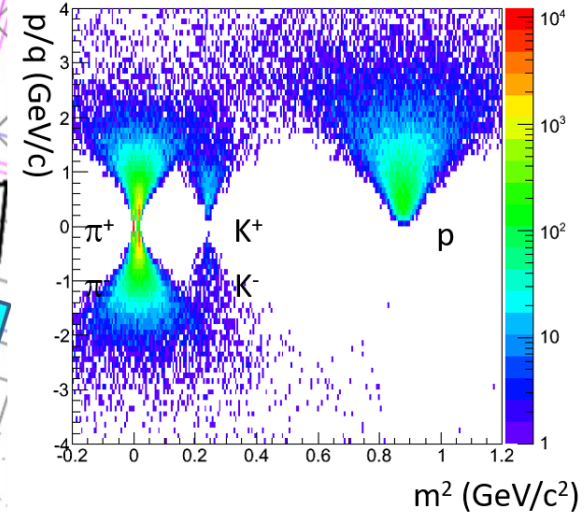
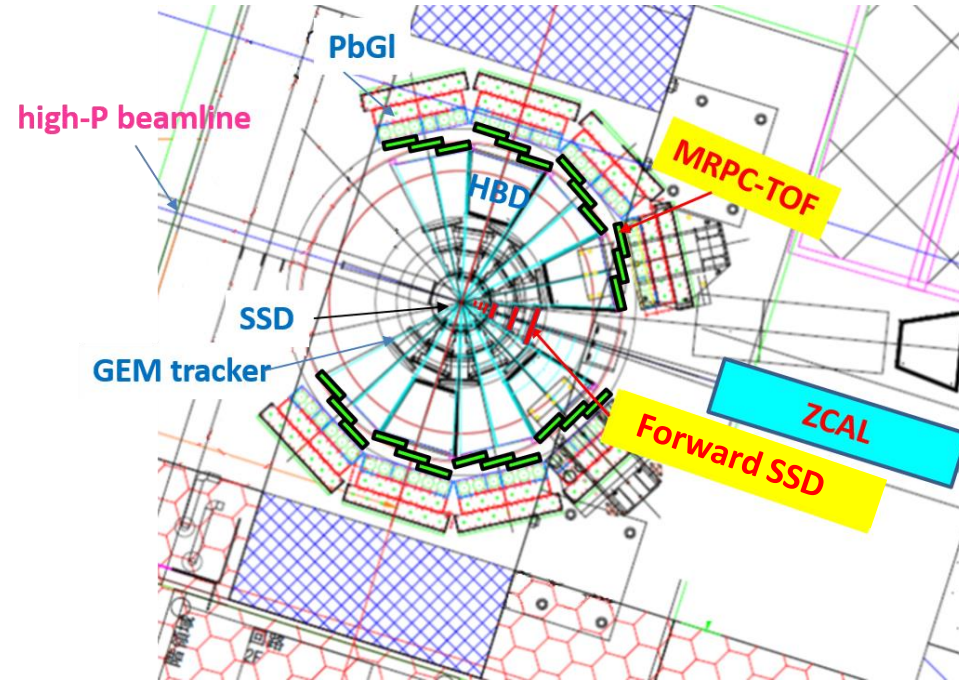
- Detector upgrades for A+A

1. MRPC-TOF for hadron ID
2. Forward SSD for mid-rapidity coverage
3. ZCAL for centrality

Max. A+A interaction rate:

10^5 Hz

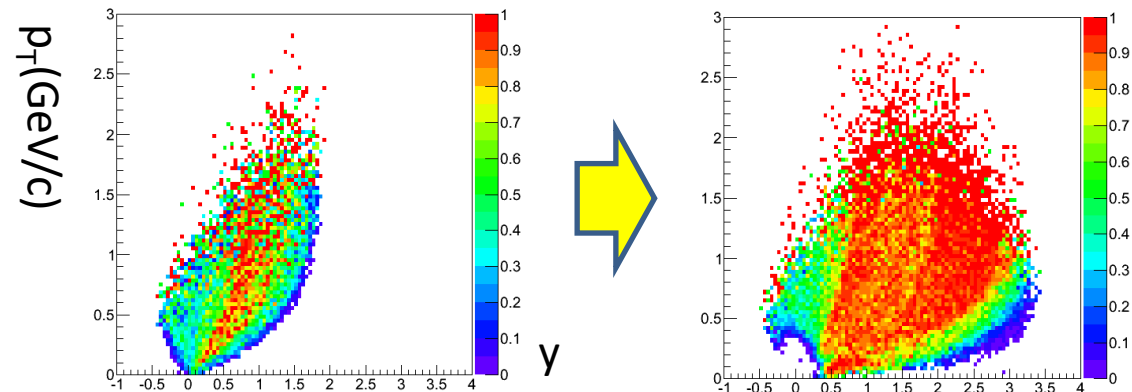
- Flow, Fluctuations, Di-electron measurements



Proton acceptance in A+A

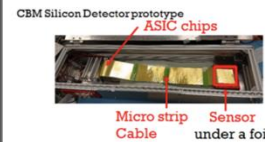
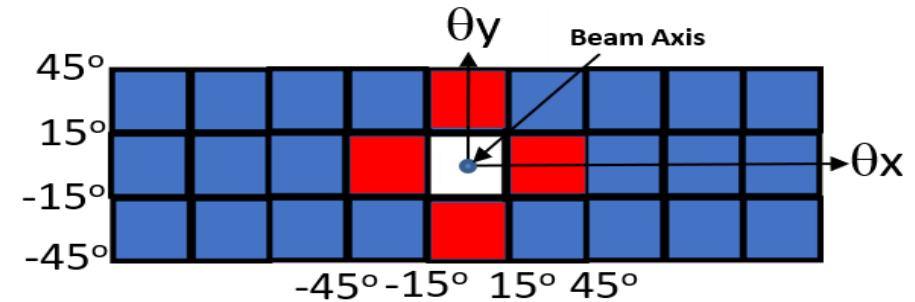
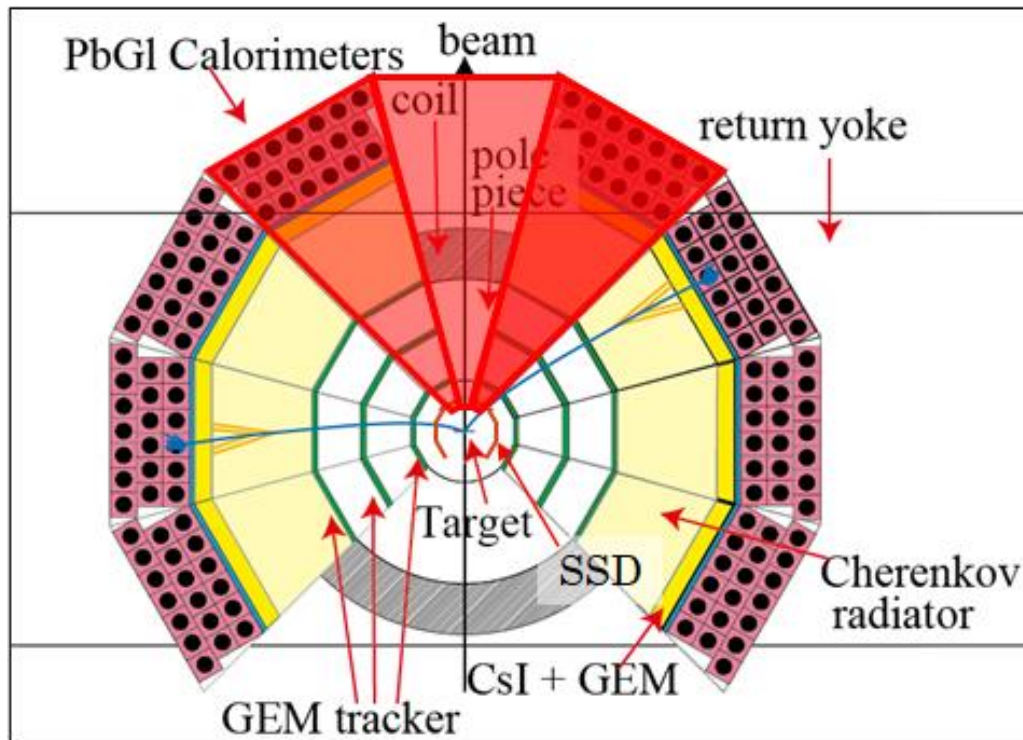
Current E16

w/ Fwd SSD



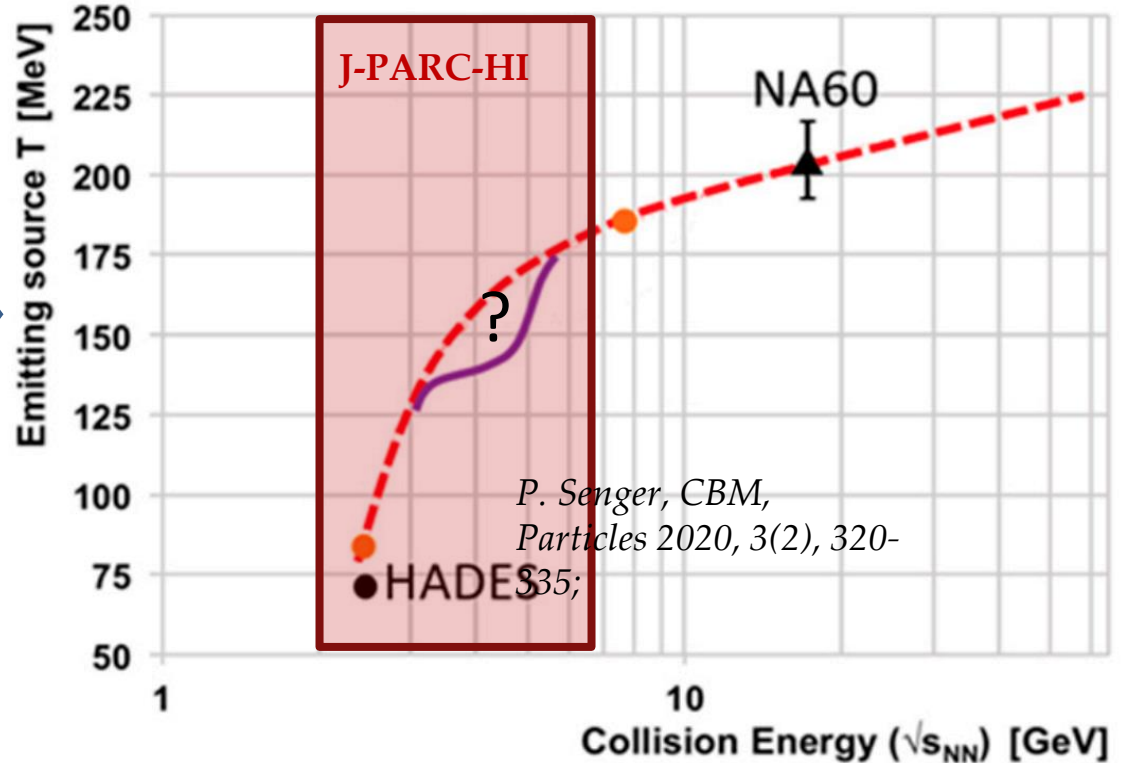
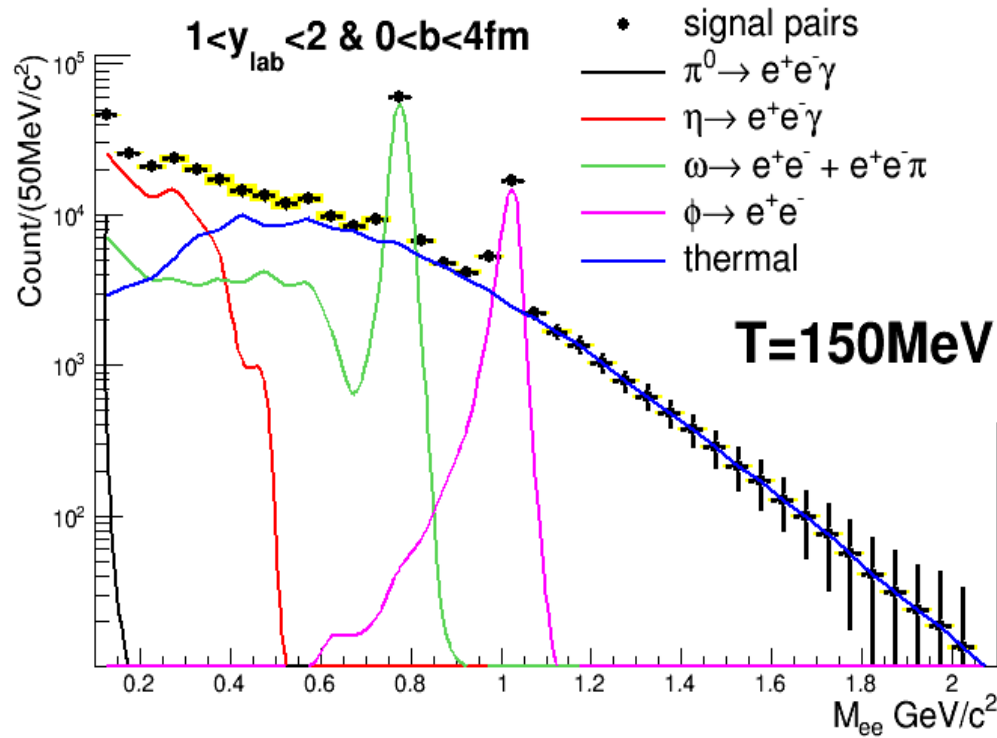
J-PARC-HI Phase Iの最初のProposal E16アップグレードによる電子対測定(2021年²¹7月)

- ▶ Forward trackers upgraded for high multiplicity in HIC
- ▶ Lead Glass Calorimeter upgraded to Lead Tungsten (PWO_4)



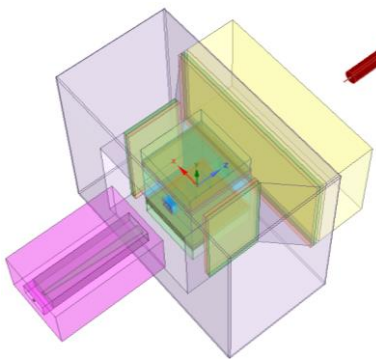
電子対の不変質量分布 (シミュレーション)

100 days run, 0.1% sys error assumed for combinatorial background subtraction (PHENIX, ALICE)



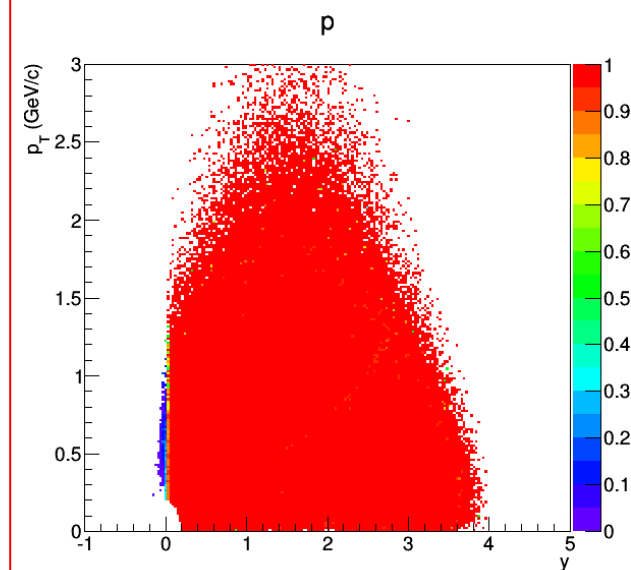
- ~ 6% accuracy of T can be expected from $M_{ee} > 1.1 \text{ GeV}/c^2$ in the case of 150 MeV

Phase II実験 (ハドロン測定セットアップ)

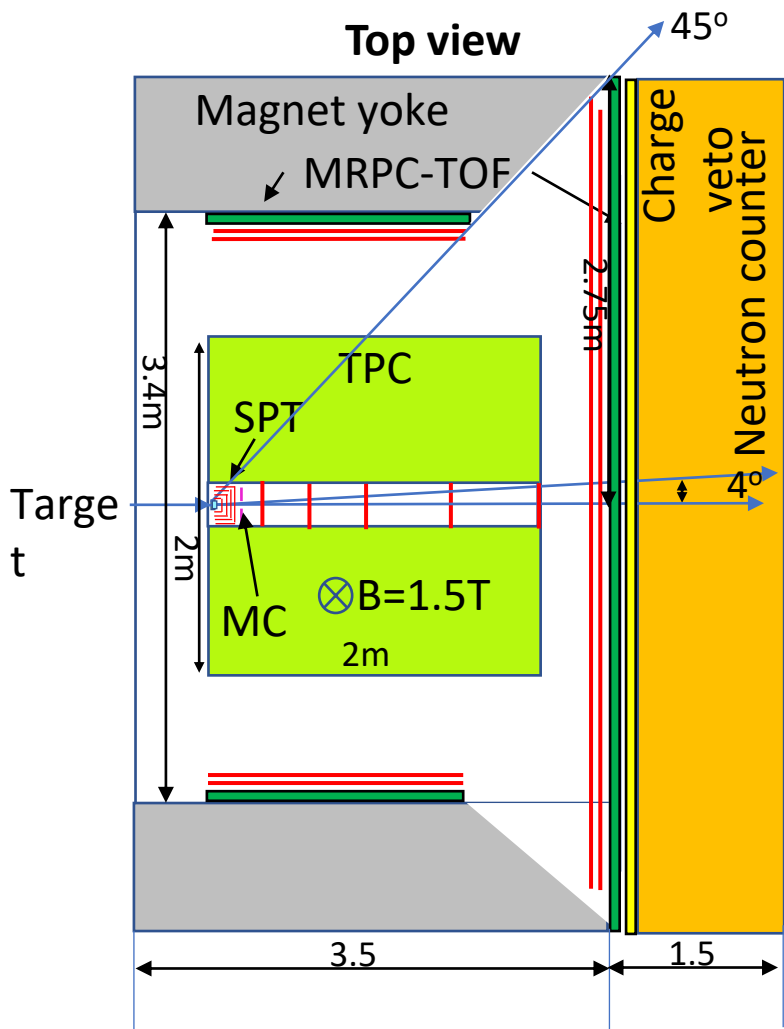


- Identified charged particles
- $\sim 4\pi$ acceptance
 - Silicon Pixel Tracker (SPT) ($\theta < 4^\circ$)
 - TPC ($\theta > 4^\circ$)
 - MRPC-TOF
- Interaction Rate : ≤ 1 MHz
 - Triggerless DAQ system
- Centrality : Multiplicity counter + Zero-degree calorimeter

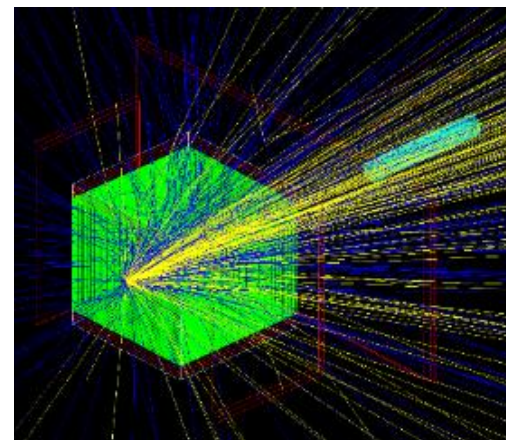
y- p_T Acceptance



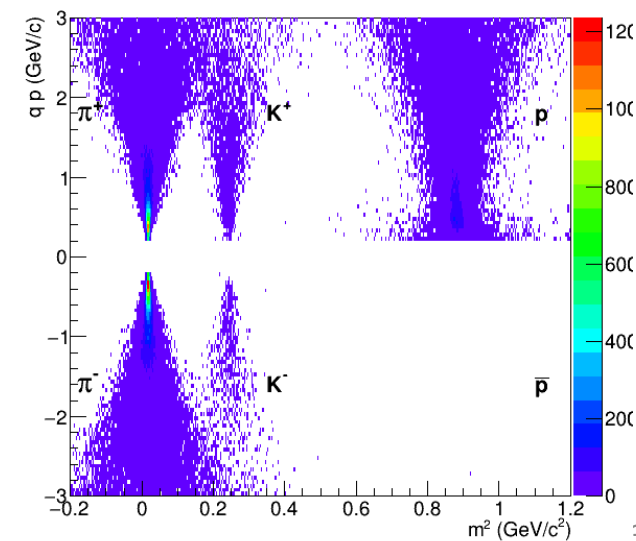
Top view



ZCAL



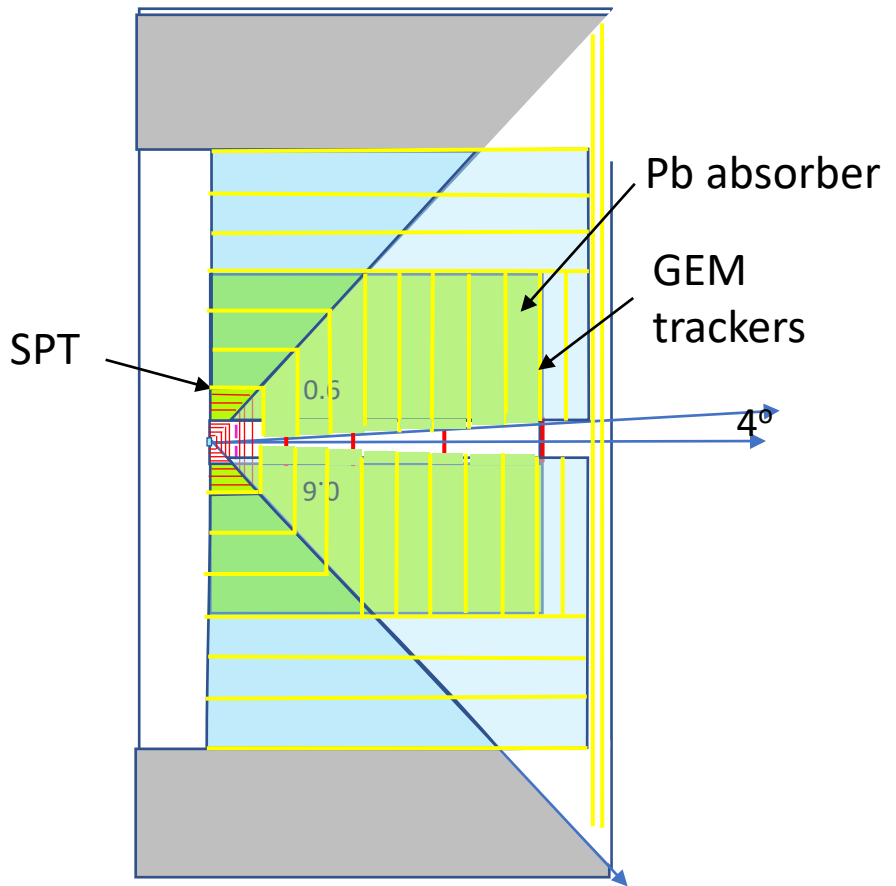
PID with TOF



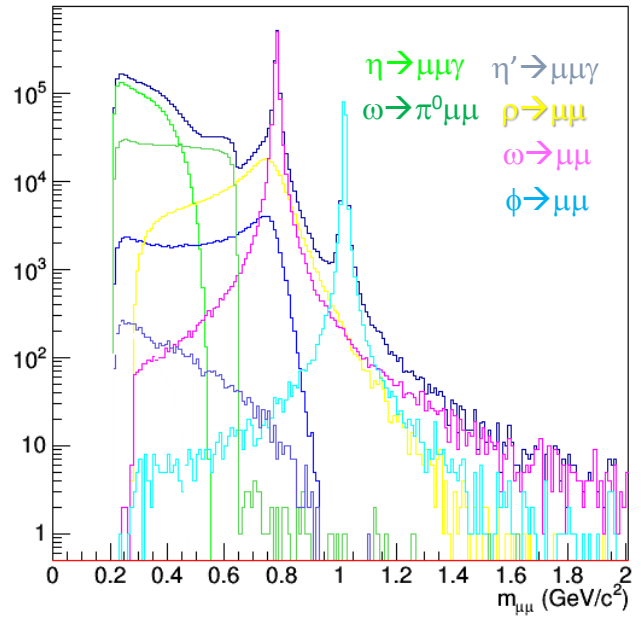
Phase II 実験 (Dimuonセットアップ)

- Replace TPC by:
 - Pb absorbers and GEM trackers
 - Dimuon Online Trigger
 - 7-layer forward and barrel Silicon Pixel Trackers
- Interaction Rate : 10 MHz
- Dimuon trigger : event reduction of $\sim 3/100$ at $6 \lambda_1$ absorber

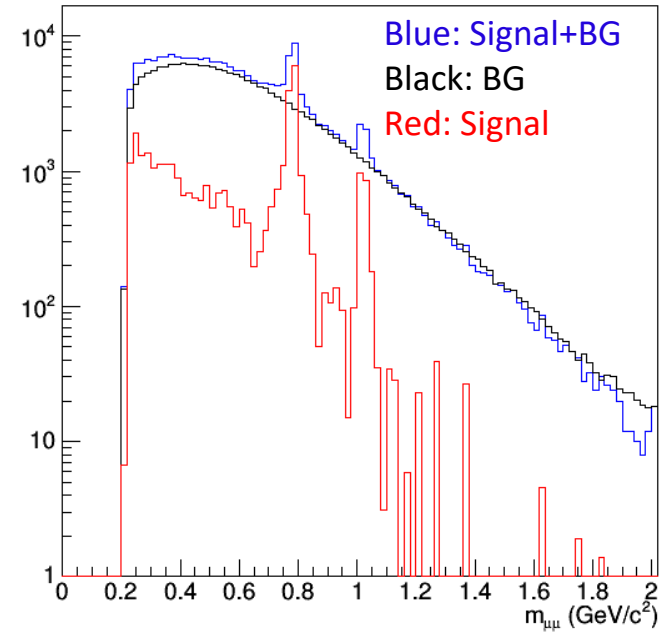
J-PARC-HI simulation, U+U
 $\sqrt{s_{NN}}=4.5$ GeV, Min-bias (54k)



Generated cocktail



Reconstructed spectrum



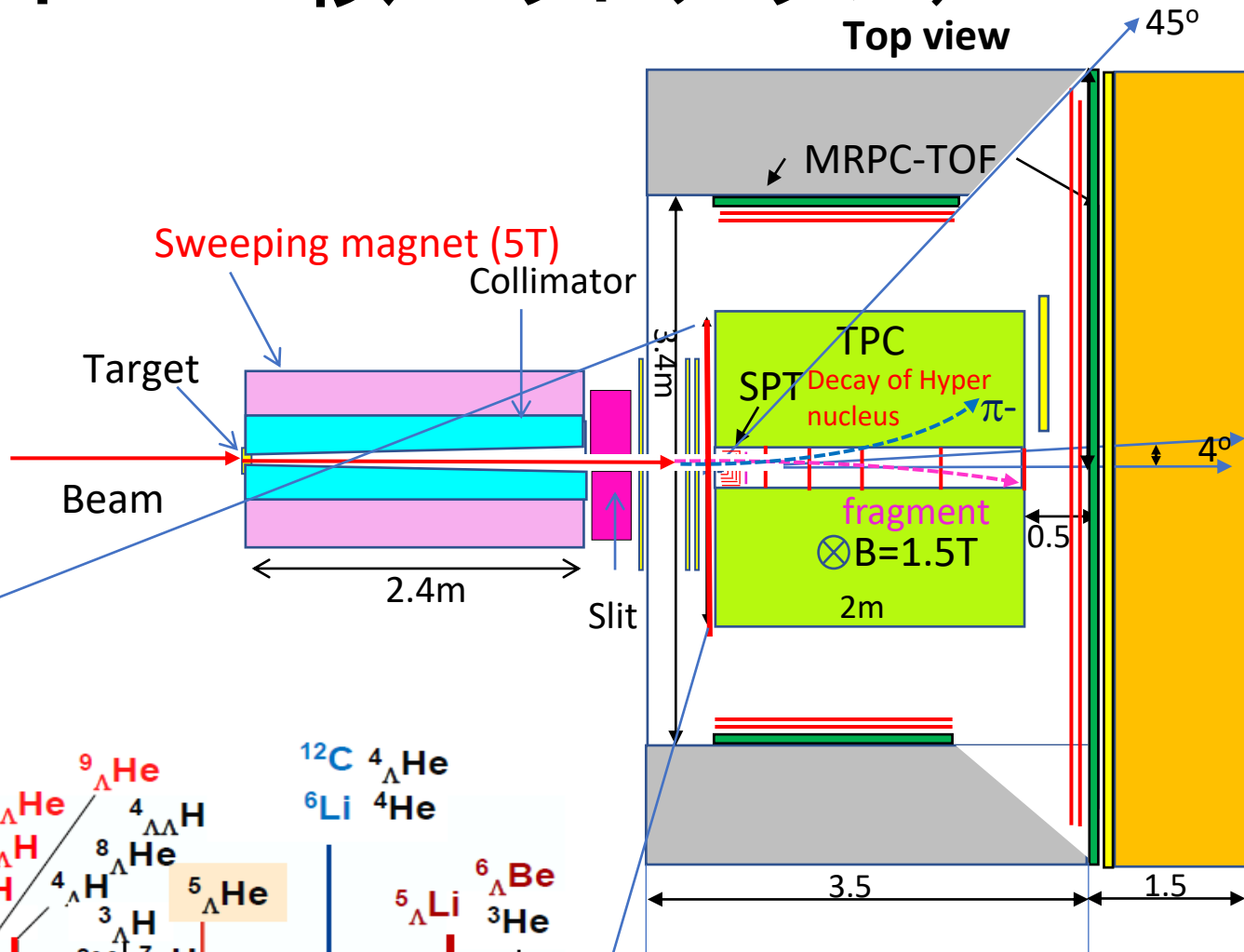
$\theta_{ee} > 2^\circ$
 $2^\circ < \theta < 80^\circ$
 $p_T > 0.1 \text{ GeV}/c$

Phase II 実験 (ハイパー核セットアップ)

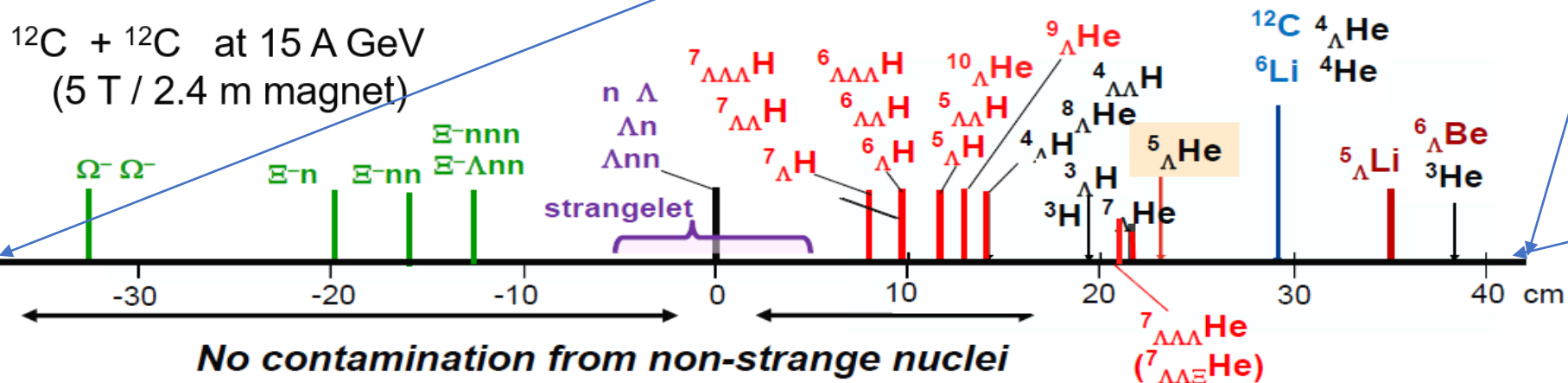
Closed geometry : Sweeping磁石とコリメータ
 アクセプトランスをbeam rapidityに限定

Beamとbeam fragmentsのみ2nd dipole磁石に到達

- ハイパー核の寿命と磁気モーメントの測定
- 新たなハイパー核、strangelet、ダイバリオンの探索
- Interaction Rate : ~100 MHz



$^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ at 15 A GeV
 (5 T / 2.4 m magnet)



Horizontal Position
 $\propto Z/A$

まとめと展望

J-PARC-HI : 世界最高強度の重イオンビームによるQCD相構造、高バリオン物質、multi strangeness物質の精密測定と探索

- Fluctuations, flow, dileptons, charmed hadrons等の測定
ステージング
 - Phase 0: p+A at E16
 - Phase I : A+A at upgraded E16
 - Phase II: A+A with Large acceptance dipole spectrometer
- 2020年にE16 実験(p+A)開始、2023年に本実験開始予定
- J-PARC PACに最初の実験提案を提出(2021年7月)
- 詳細な実験計画の検討(電子対測定等)
- J-PARCハドロン施設拡張後のPhase-I実験開始を目指す