

高エネルギー重イオン(I) LHC/RHIC/FAIRでの研究 「クォーク・グルーオンプラズ マ物性の精密研究」

郡司 卓(東京大学原子核科学研究センター)

他 核物理の将来高エネルギー重イオンWG



Outline

- ▶ **高エネルギー重イオンの目指す物理**
- ▶ **分野の現状と日本グループの活動**
- ▶ **今後の展望**
 - ▶ A. 進行中あるいは開始間近のプロジェクト
 - ▶ B. 提案したいプロジェクト（期間は設けないがおよそ10年程度まで）
 - ▶ C. 20~30年先を見据えた将来の構想や目標
- ▶ **まとめ**

高エネルギー重イオン衝突の目指す物理

3

1. QCD物質の相構造の解明

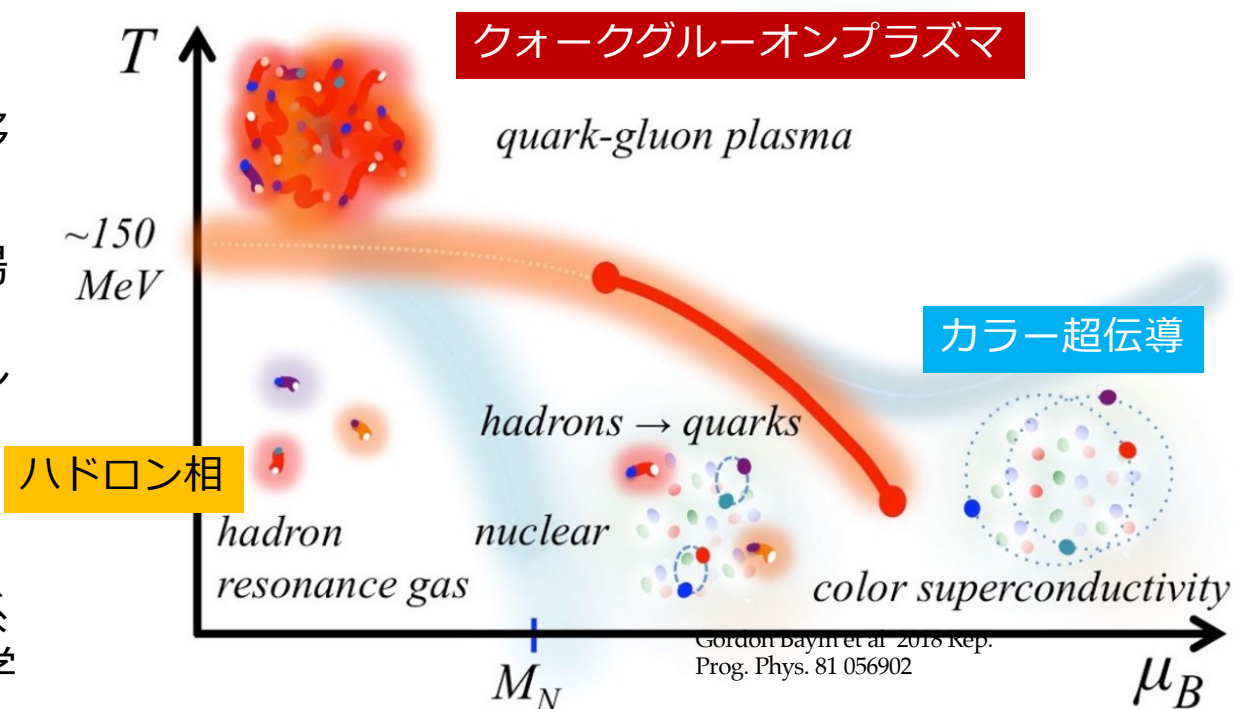
- クォークグルーオンプラズマと物性
- カラー超伝導相の探索とその物性
- 相境界の物質状態と物性
- 臨界点、閉じ込め・カイラル相転移

2. QCD真空構造の解明

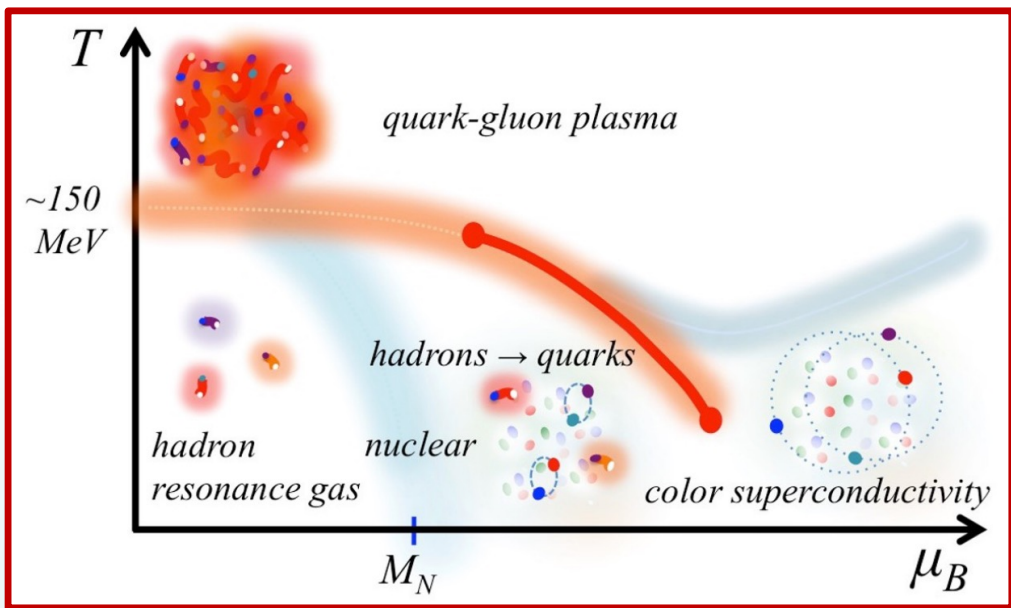
- クォーク対凝縮の温度、密度、磁場などによる変化の実験的検証
- アノマリ現象を通じたトポロジカル電荷揺らぎ存在の実証 (例:カイラル磁気効果)

3. 重イオン衝突の動力学

- 高強度グルーオン場からクォーク系物質生成に至る非平衡QCDの動力学
- QCD流体力学
- QCD相転移(QGPからハドロン化)



高エネルギー重イオン衝突の目指す物理

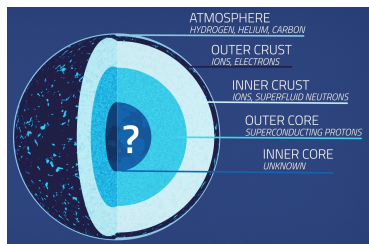
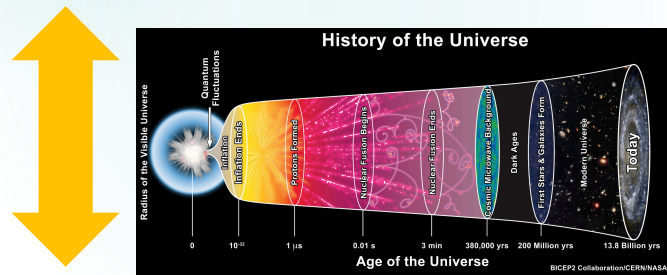


Standard Model of Elementary Particles

three generations of matter (fermions)						interactions / force carriers (bosons)	
I		II		III			
mass	~2 MeV/c ²	~1.28 GeV/c ²	~173.1 GeV/c ²	0	0	~124.97 GeV/c ²	
spin	1/2	1/2	1/2	0	1	0	0
charge	2/3	2/3	2/3	0	0	0	0
quarks	u (up)	c (charm)	t (top)	g (gluon)		H (higgs)	
quarks	d (down)	s (strange)	b (bottom)	γ (photon)			
leptons	e (electron)	μ (muon)	τ (tau)	Z boson			
leptons	ν _e (electron neutrino)	ν _μ (muon neutrino)	ν _τ (tau neutrino)	W boson			

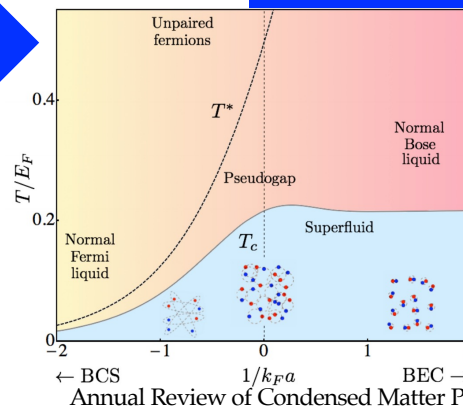
QCDの全容解明

- “素”から“多体系”へ
- クォーク系物質の真空から励起状態へ (相構造、相転移、物性)

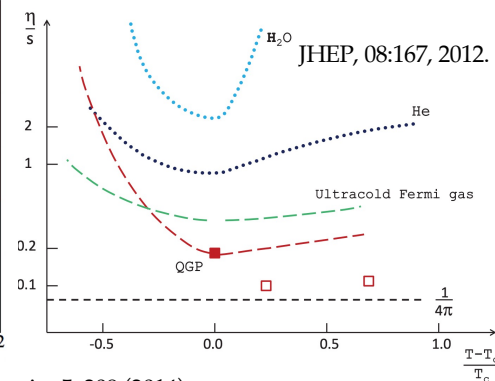


初期宇宙シナリオの完成やコンパクト星の内部

冷却原子系



様々な物質の粘性



素粒子物理学と物性物理学をつなぐ普遍的な自然法則の探求

分野の現状: 高エネルギー重イオン加速器

5

稼働中の加速器

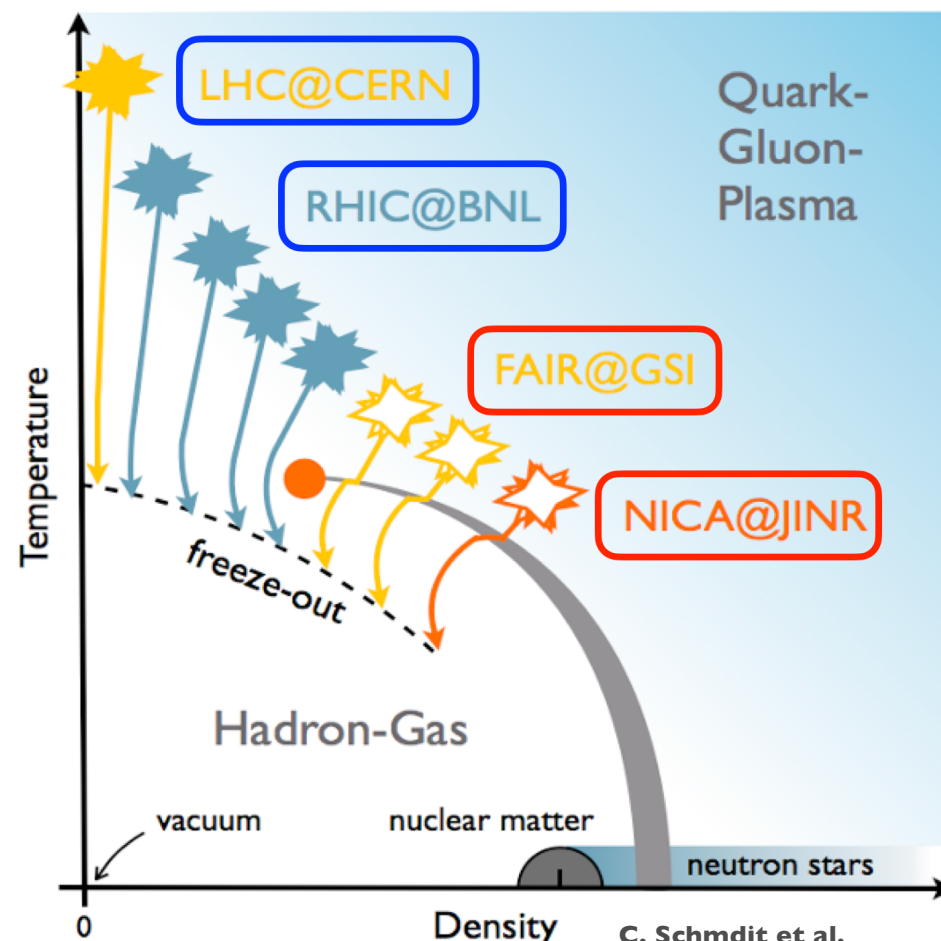
- RHIC@BNL (>2000 , $\sqrt{s_{NN}}=3 - 200$ GeV)
- LHC@CERN (>2009 , $\sqrt{s_{NN}}=2.76, 5.02$ TeV)
- SPS@CERN(固定標的, $\sqrt{s_{NN}} \sim 20$ GeV)
- SIS18@GSI(固定標的, $\sqrt{s_{NN}} \sim 2$ GeV)

建設中の加速器

- FAIR-SIS 100 (固定標的, $\sqrt{s_{NN}} \sim 2-5$ GeV)
- NICA (衝突型, $\sqrt{s_{NN}} \sim 4-15$ GeV)

計画段階

- FAIR-SIS300 ($\sqrt{s_{NN}} \sim 6-8-10$ GeV)
- FCC@CERN ($\sqrt{s_{NN}} \sim 39$ TeV)
- J-PARC-HI ($\sqrt{s_{NN}} \sim 2-5$ GeV)
 - 将来計画案「J-PARCでの重イオン加速による高密度QCDの研究」



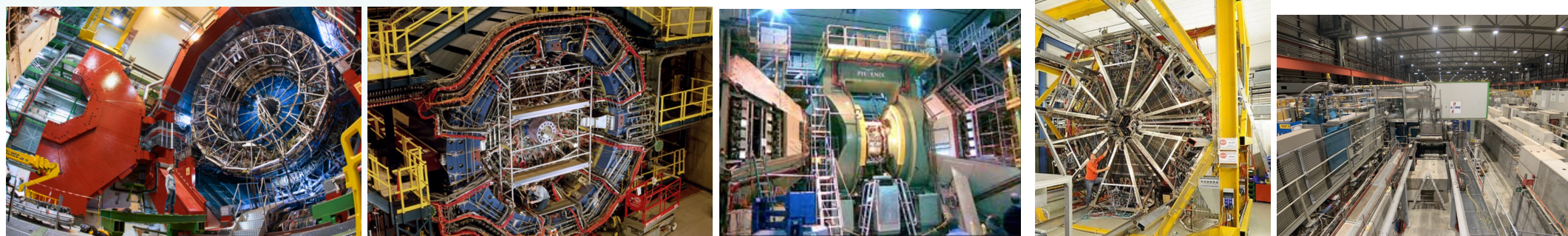
分野の現状: 高エネルギー重イオン実験

6

加速器	実験	エネルギー	核種	
LHC@CERN	ALICE	2.76, 5.02 TeV	Pb-Pb	$L_{int} \sim 0.8 \text{nb}^{-1}$
	ATLAS	2.76, 5.02 TeV	Pb-Pb	$L_{int} \sim 1.7 \text{nb}^{-1}$
	CMS	2.76, 5.02 TeV	Pb-Pb	$L_{int} \sim 1.7 \text{nb}^{-1}$
	LHCb	2.76, 5.02 TeV	Pb-Pb	centrality > 60%
RHIC@BNL	STAR	3 (fixed target) – 200 GeV	pp, p-A, d-A, He-A, A-A	衝突エネルギー走査による臨界点探索
	PHENIX	7.7 – 200 GeV	pp, p-A, d-A, He-A, A-A	No data taking > 2016 $L_{int}(\text{narrow}) \sim 8.4 \text{nb}^{-1}$
SPS@CERN	NA61/SHINE	5.1-17.3 GeV	pp, p-Pb, Pb-Pb, Be-Be, Xe-La, Ar+Sc,	hadron
SIS18@GSI	HADES	2.3-3.4 GeV	pp, Au+Au, C+C, Ar+KCl, p-A, Ag+Ag	dielectron

エネルギーフロンティア
QGP物性

QGP物性の系統性(核種・エネルギー)
臨界点探索
高密度フロンティア



分野の現状: 日本グループの活動

7

RHIC-PHENIX実験

>500人、75の研究機関

- 2000-2016. 現在はsPHENIX実験の準備中
- 現実験代表：秋葉康之(理研)
- 国内参加機関 (PHENIXの~20%)
 - 理研、筑波、東大、広島、奈良女、東工大
 - 長崎総合科学大学、KEK、京都、立教
- 日本グループの大きな貢献
 - EC委員 (下村、江角、浜垣)
 - 解析WG議長 (下村、江角、小沢、志垣、中條、浜垣)
 - 検出器 (杉立、三明、浜垣、秋葉)
 - 地域解析センターCCJ@理研
- 総論文数 (被引用数) : 228 (~22000)
 - 日本人研究者が関わる論文: ~100 (~45%)
- 日本人博士号 : 46人



日米科学技術協力事業による長期的なサポート

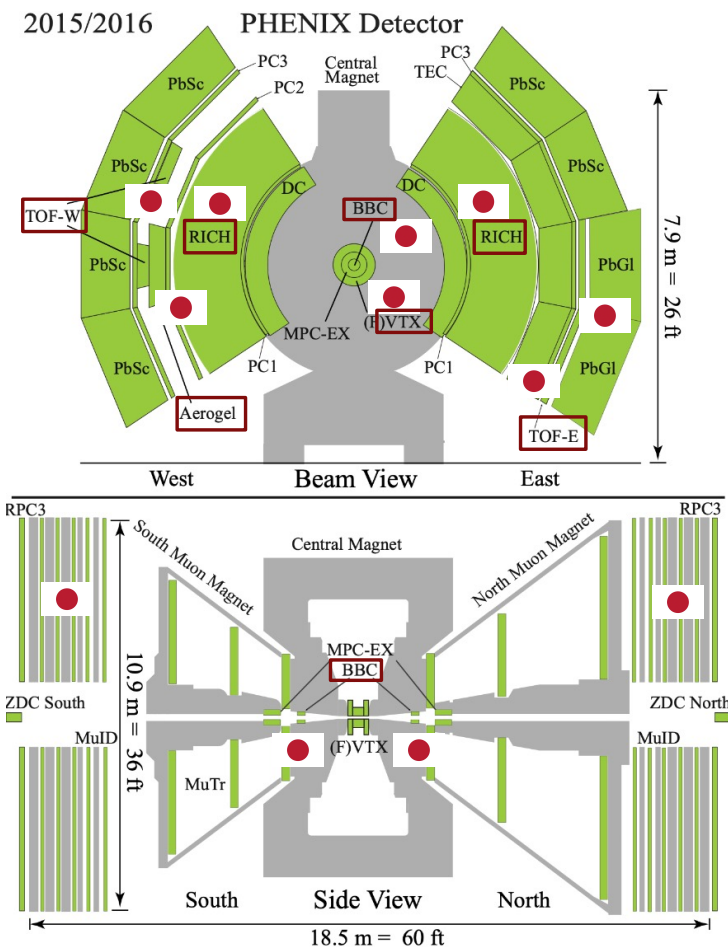


RHIC-STAR実験

738人、72の研究機関

- 2000~, 現在もデータ収集を続ける
- 筑波大学が参加
- 日本グループの貢献を拡大中
 - 物理解析コーディネーター (新井田)
 - 解析WG議長 (江角)
- 総論文数 (被引用数) : 309 (~24000)
- 日本人博士号 : 4

競争的資金が基盤

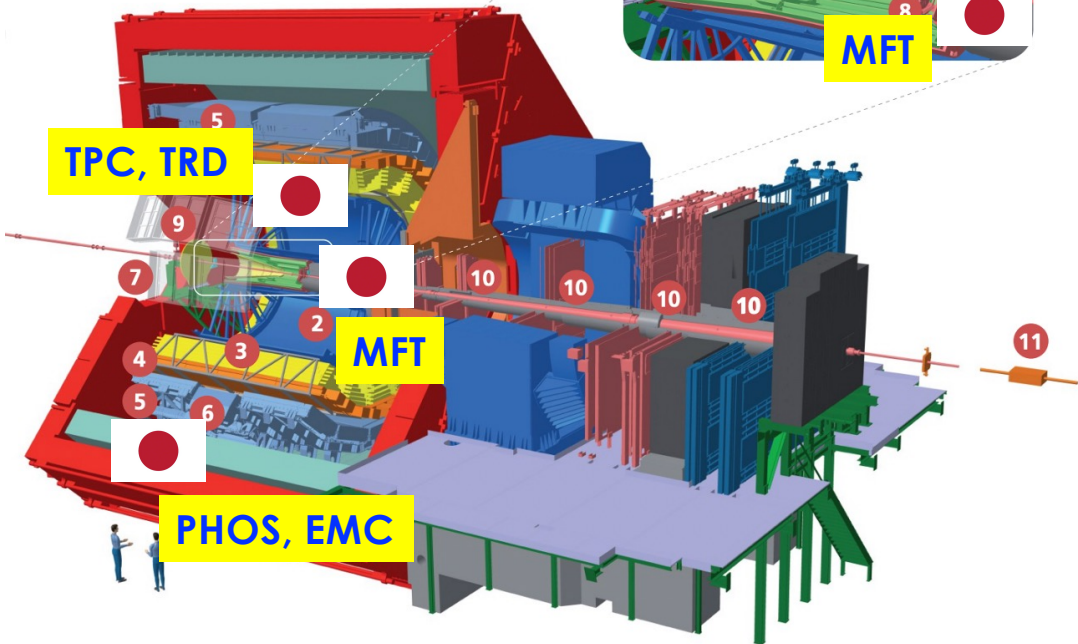
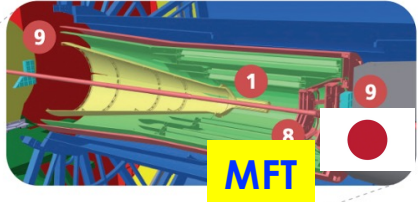
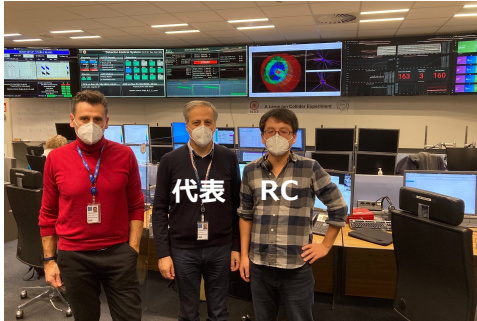


分野の現状: 日本グループの活躍

LHC-ALICE実験

2023人、173の研究機関

- 2009年実験開始、現在もデータ収集中
- 国内参加機関 (ALICEの~2%)
 - 筑波、東大、広島、奈良女、佐賀大、長崎総合科学大学
- **日本グループの貢献. 着実に中枢へ**
 - CB副議長 (大山、浜垣)
 - 実験全体運用責任者 (郡司)
 - 解析WG議長 (中條、坂井、郡司、関畑、Norbert)
 - 検出器やトリガー (杉立、中條、大山、志垣、郡司、山口)
 - Tier2解析センター@広島、筑波、長崎
- 総論文数 (被引用数) : 415 (~20000)
 - **日本人研究者が関わる論文: ~25 (~6%)**
- 日本人博士号 : 13



競争的資金が基盤(長期的基盤なし)

RHICからLHC

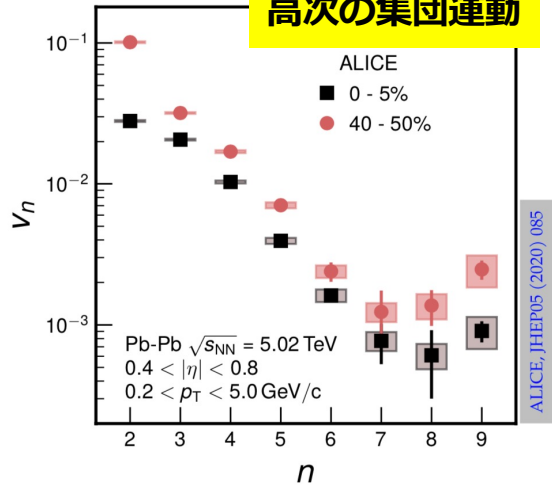
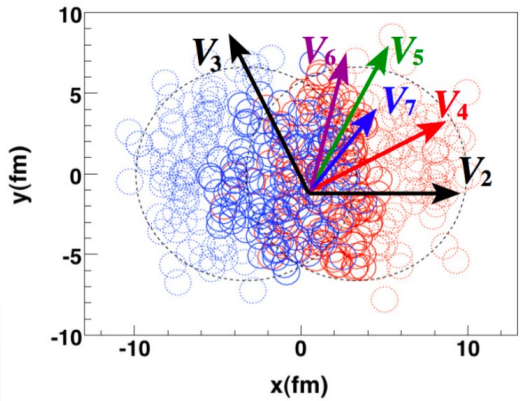
- 実験規模は4倍増
- 日本の規模は増えていない
- しかし、着実な貢献と中枢へ

→日本グループの力と信頼

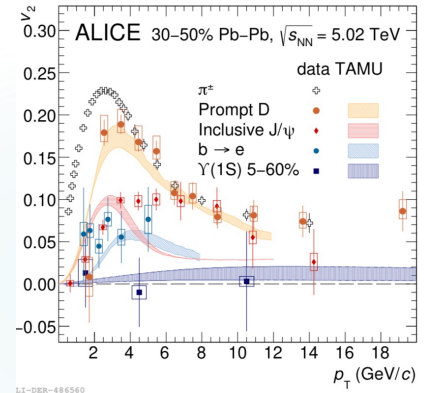
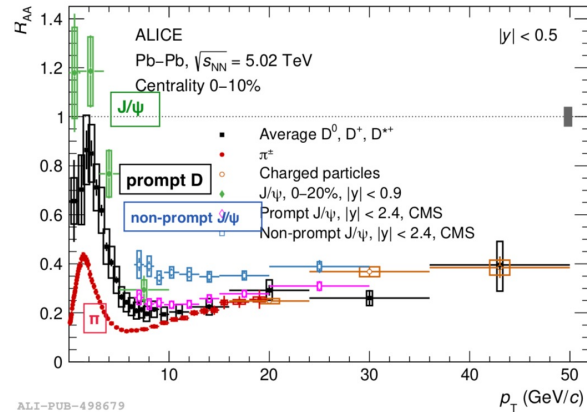
ALICEの先導には、国内基盤の増強と競争的資金ではない長期的なサポートが必須

最近の進展: 多くの測定

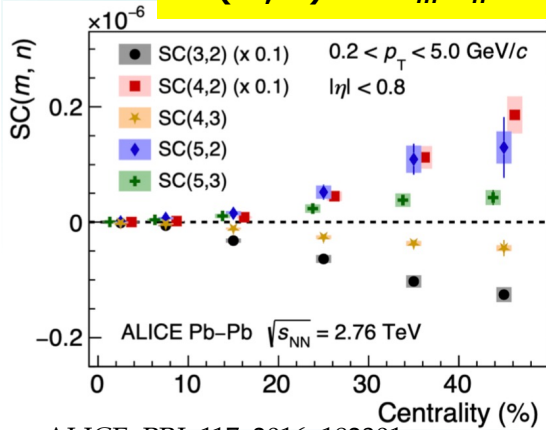
高次の集団運動



チャームやボトムクォークのエネルギー損失と集団運動

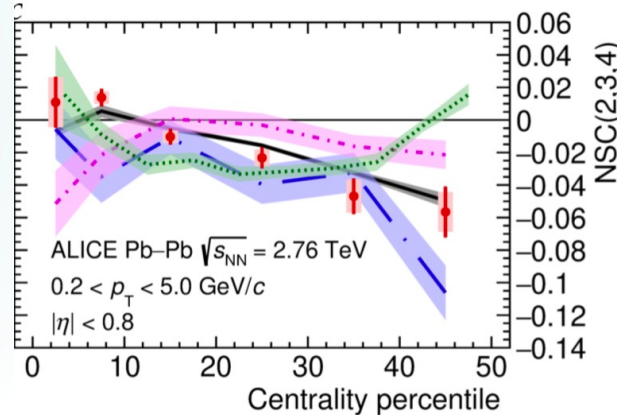


$SC(m, n) = \langle v_m^2 v_n^2 \rangle$



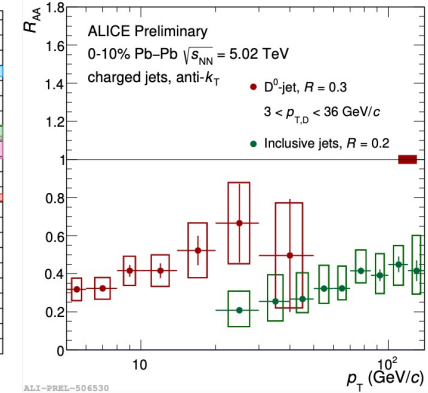
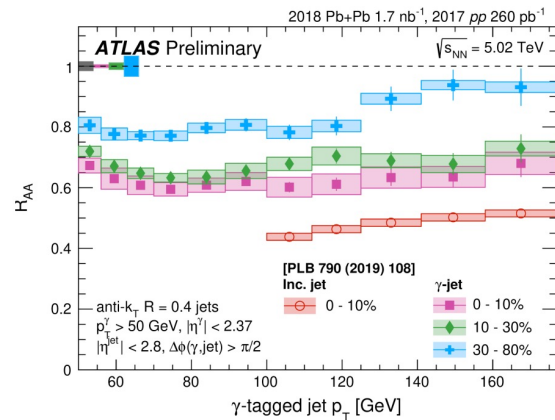
ALICE, PRL 117, 2016, 182301

$SC(k, l, m) = \langle v_k^2 v_l^2 v_m^2 \rangle$



ALICE, PRL 127, 2021, 092302

ジェットのエネルギー損失、クォーク、グルーオン、フレーバー依存性

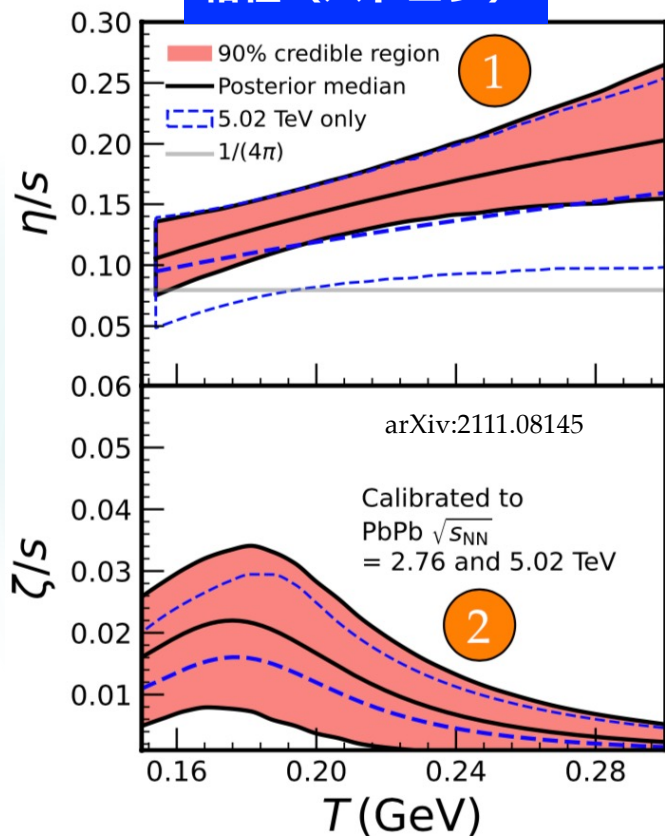


ALI-PREL-506530

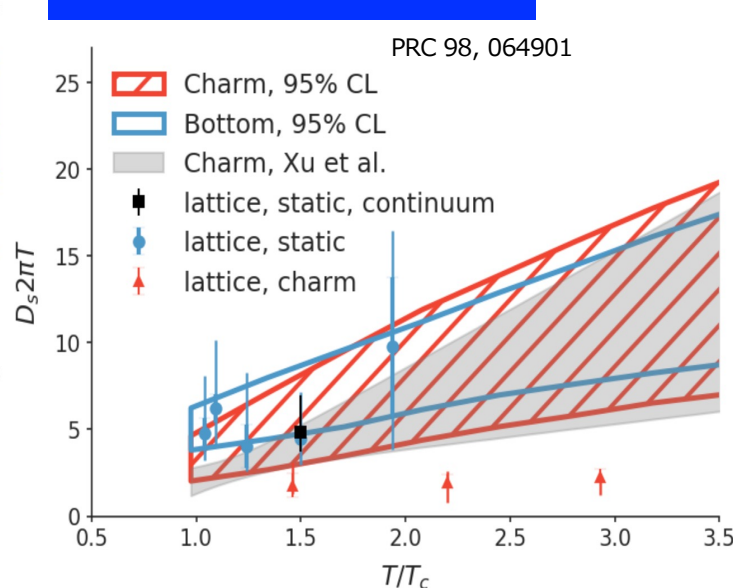
最近の進展: 物性の温度依存性

▶ 流体計算 + ベイズ推定

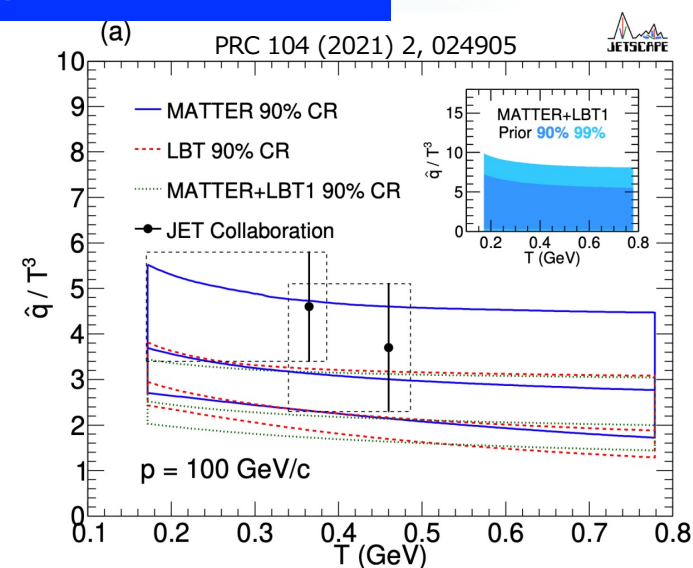
粘性 (ハドロン)



拡散係数 (重クォーク)



阻止能 (ジェット)

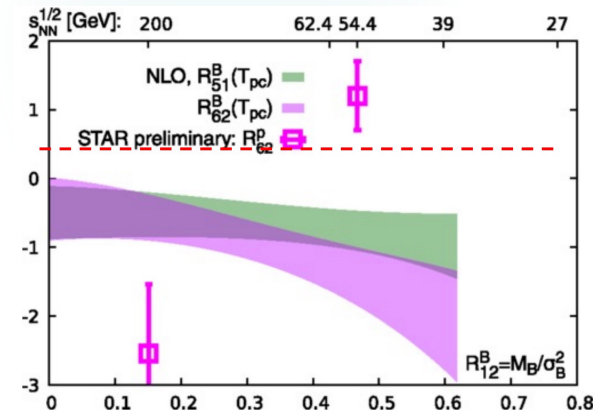
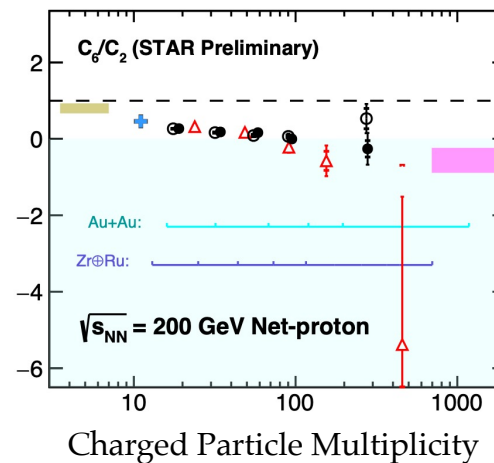
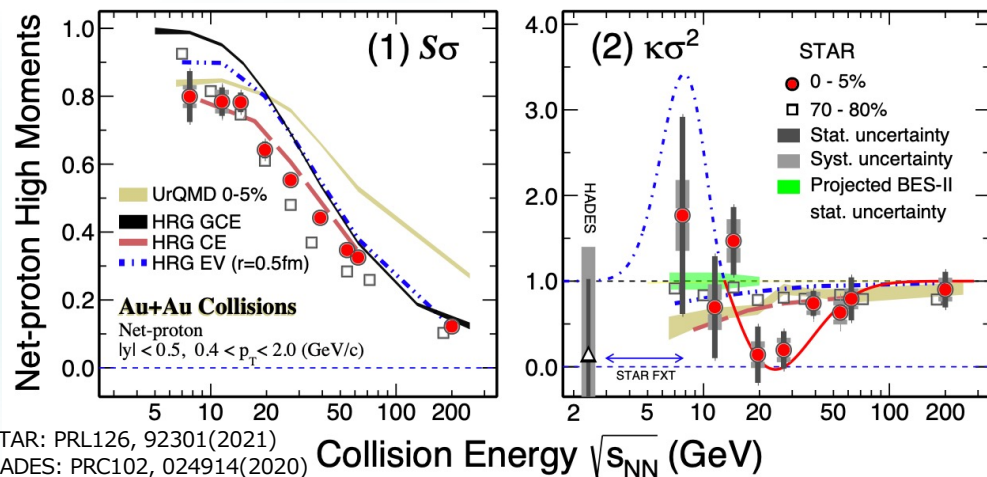


最近の進展

▶ 統計の増加や衝突エネルギー一走査

▶ 保存量の高次揺らぎ → 相境界の様相の解明へ

▶ 相転移近傍(臨界点、クロスオーバー、一次相転移)における相関長の振舞



臨界点の探索

BES-Iのデータ(STAR実験)

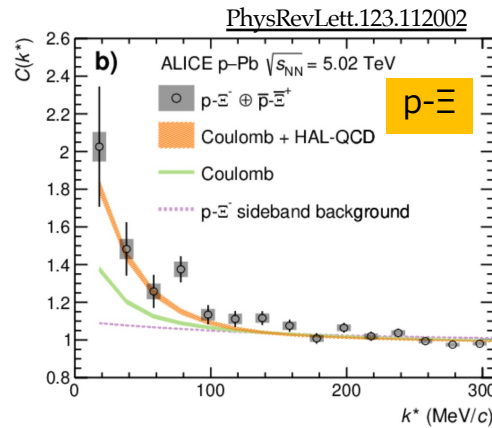
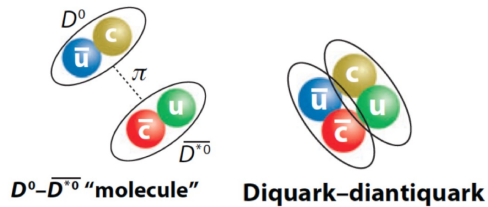
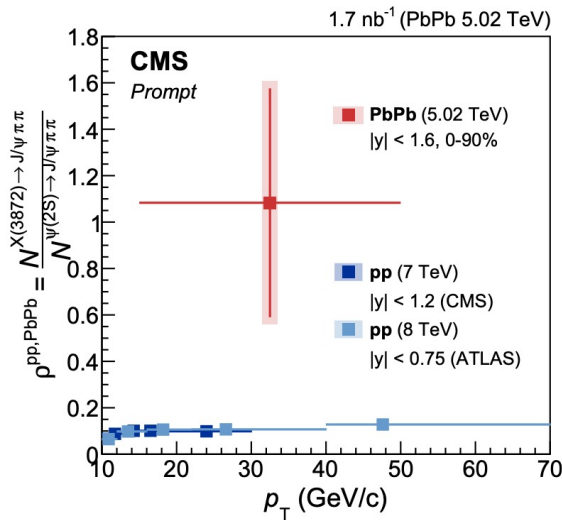
→ 発見に至らず

$C_6/C_2 < 0 @ 200 \text{ GeV}$
 → QGPの直接的な証拠

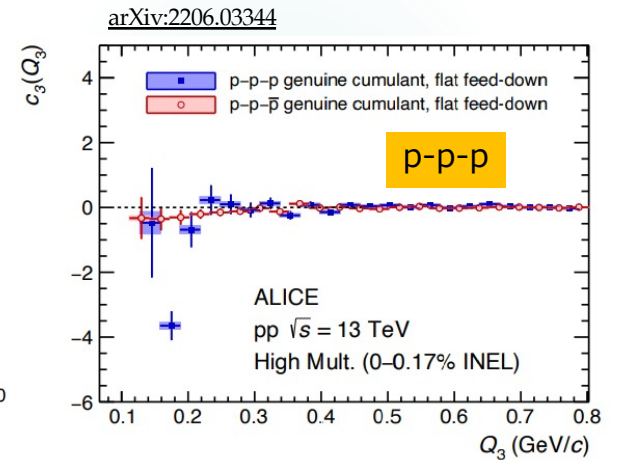
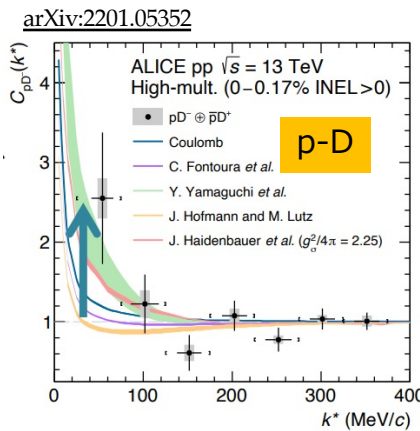
最近の進展

エキゾチックハドロン、ハイパー核、femtoscopyを用いたハドロン間相互作用

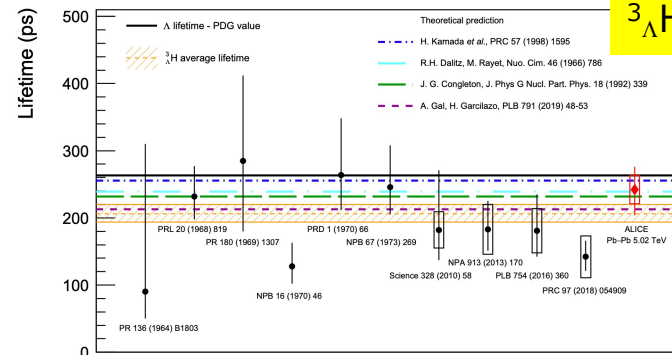
X(3872)の収量増大



Femtoscopyによるハドロン間相互作用



$^3\Lambda$ と寿命



高エネルギーハドロン衝突や QGPを用いたハドロン物理研究

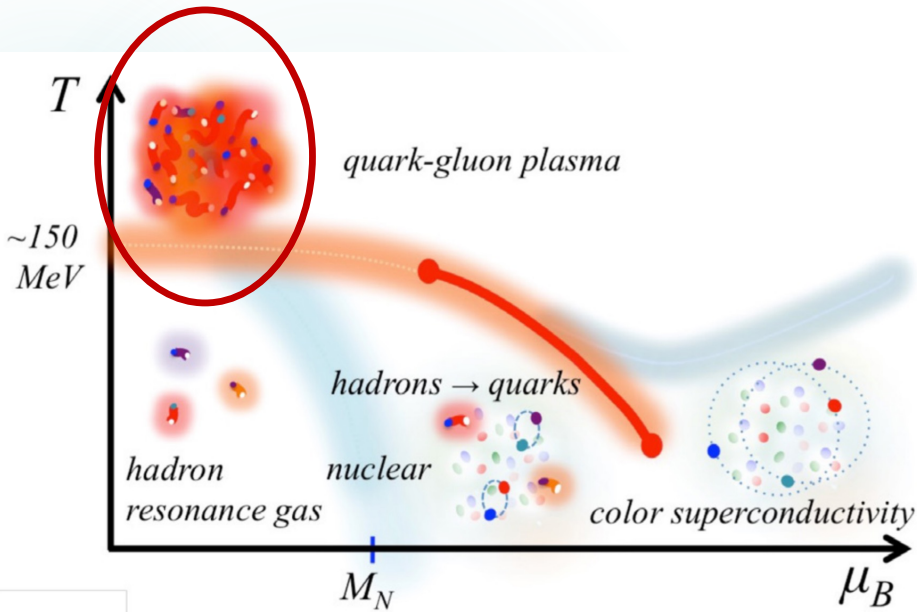
課題と今後の目標

- ▶ **実験データの高精度化や新たなプローブの測定が課題**
 - ▶ **重イオン衝突ダイナミクスの統一的理解**
 - ▶ 初期状態 → 熱化・流体化 → QGP(QCD流体) → 終状態(ハドロン化)
 - ▶ 小さい系~大きい系、GeV~TeV
 - ▶ **QGP物性の高精度化、QGP物性の温度依存性**
 - ▶ **臨界点の探索、QCD相構造や相転移の解明、カラー超伝導の探索**
 - ▶ **カイラル対称性の回復・破れ機構、閉じ込め機構 (ハドロン化機構)**
 - ▶ **ハドロン間相互作用の高精度化(チャームや3体相関へ)**

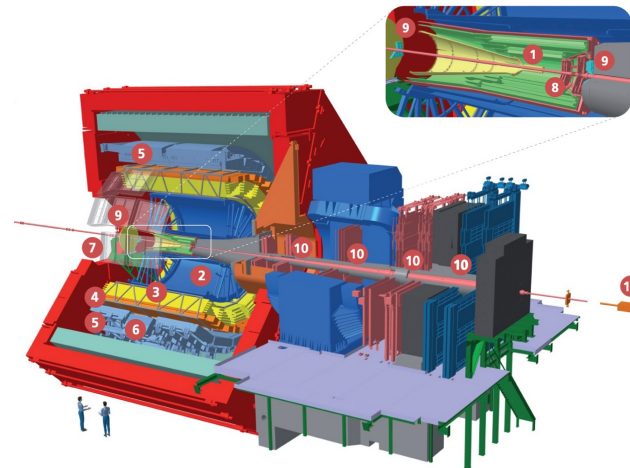
**クォーク系物質の全容解明(新物質相、物性、相転移、相構造)へ
QCDの基本的性質(閉じ込め、カイラル対称性、相互作用)の解明へ**

目標を実現する実験計画

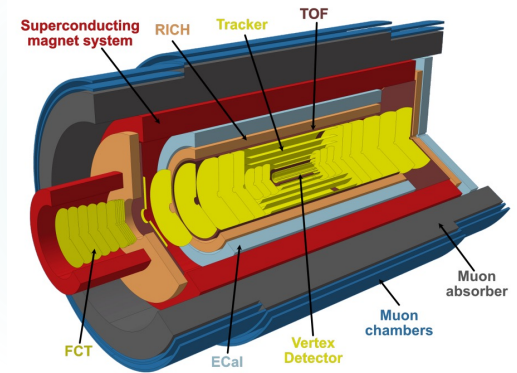
- ▶ 重イオン衝突ダイナミクスの統一的理解
 - ▶ 初期状態 → 熱化・流体化 → QGP(QCD流体) → 終状態(ハドロン化)
 - ▶ 小さい系~大きい系、GeV~TeV
- ▶ QGP物性の高精度化、QGP物性の温度依存性
- ▶ 臨界点の探索、QCD相構造や相転移の解明、カラー超伝導の探索
- ▶ カイラル対称性の回復・破れ機構、閉じ込め機構 (ハドロン化機構)
- ▶ ハドロン間相互作用の高精度化(チャームや3体相関へ)



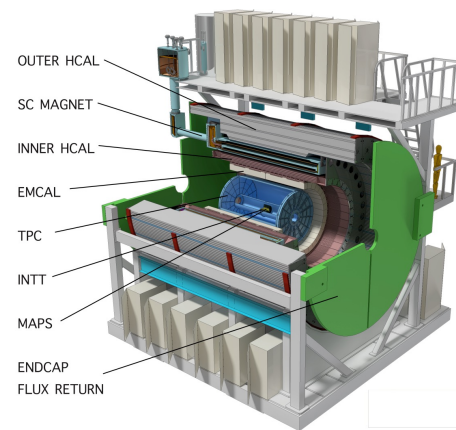
ALICE高度化 (2022-2032)



ALICE3 (2035-)



sPHENIX (2022-2025)



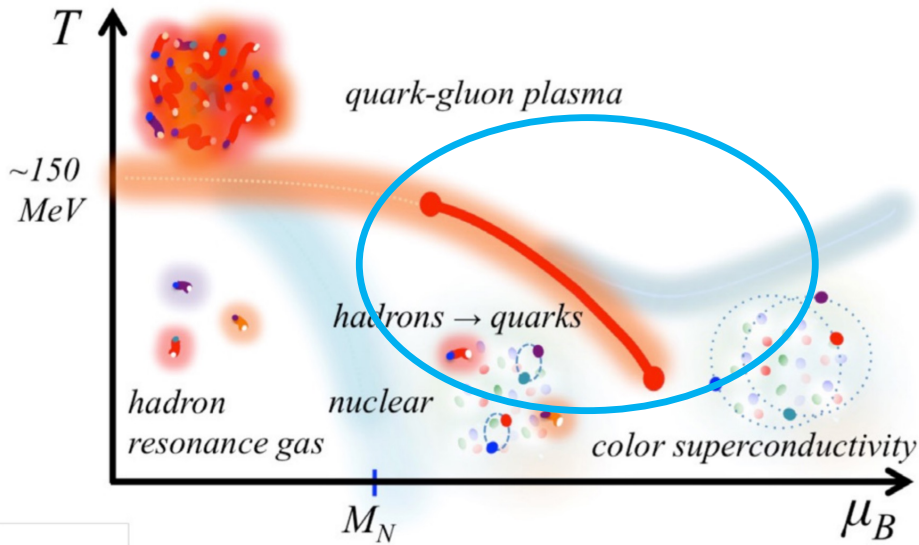
目標を実現する実験計画

▶ 重イオン衝突ダイナミクスの統一的理解

- ▶ 初期状態 → 熱化・流体化 → QGP(QCD流体) → 終状態(ハドロン化)
- ▶ 小さい系~大きい系、GeV~TeV

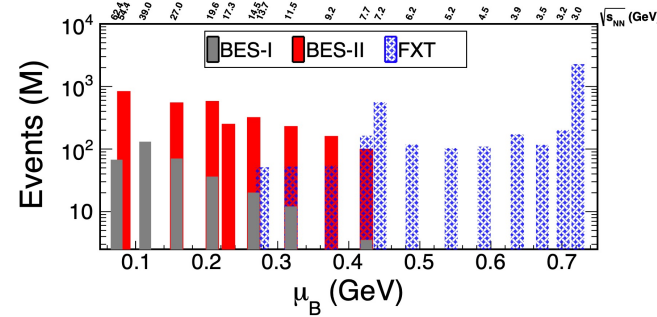
▶ QGP物性の高精度化、QGP物性の温度依存性

- ▶ 臨界点の探索、QCD相構造や相転移の解明、カラー超伝導の探索
- ▶ カイラル対称性の回復・破れ機構、閉じ込め機構 (ハドロン化機構)
- ▶ ハドロン間相互作用の高精度化(チャームや3体相関へ)

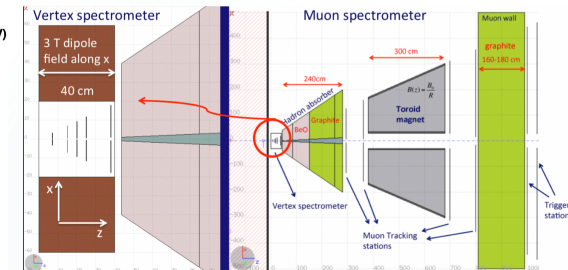


STAR-BES-II (データ解析)

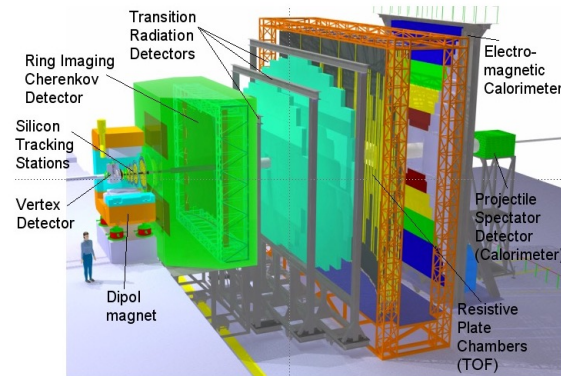
Data taken by STAR BES-I&II + Fixed-Target program



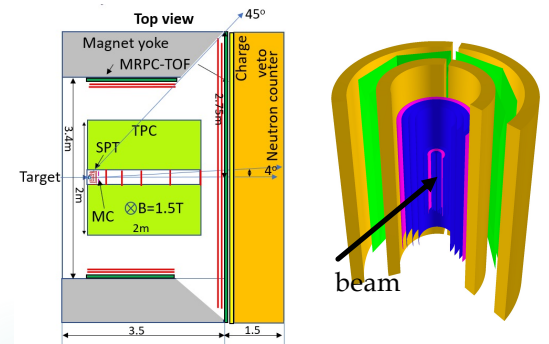
NA60+(2025-)



FAIR-CBM (2029-)

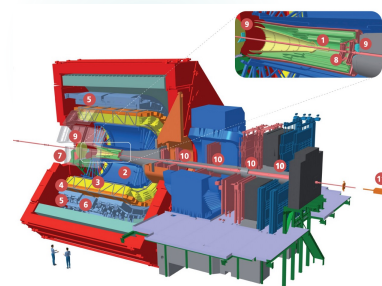


J-PARC-HI(2029?-)

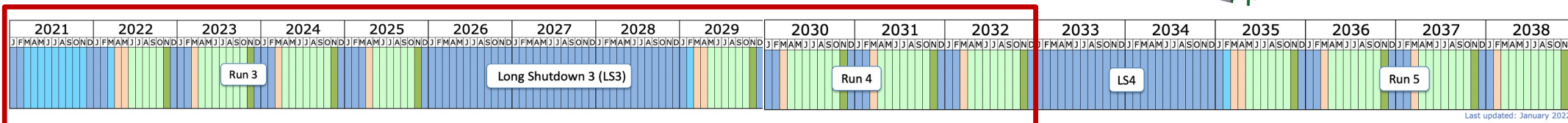


今後の展望：ALICE2実験

A. 進行中あるいは開始間近のプロジェクト



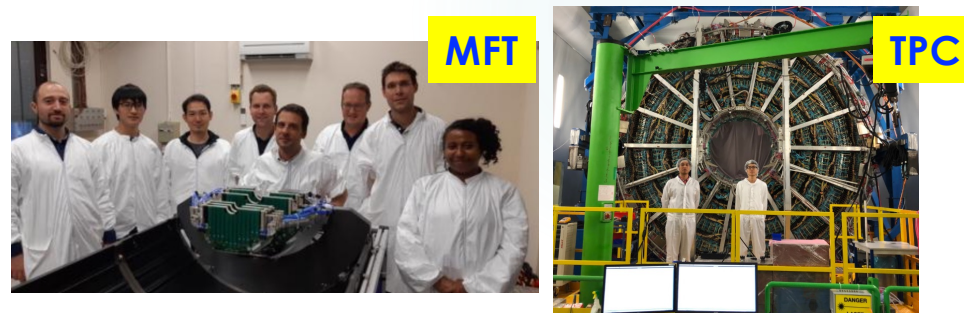
16



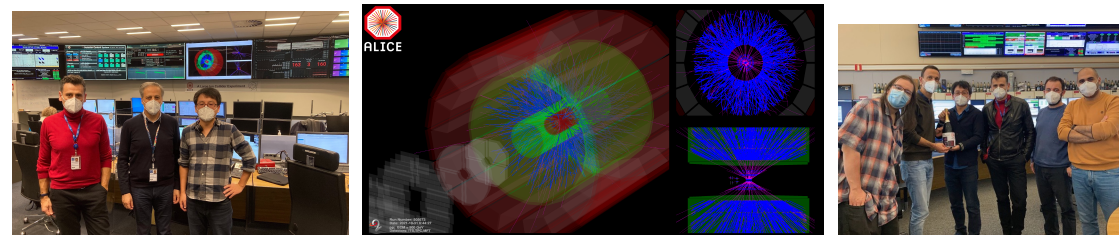
ALICE実験高度化「ALICE2」(2022-2032)

- TPC (東京大、長崎総科大), MFT(広島大)
- ITS, O²(GPUによる3 TB/sのオンライン処理)

- 地上試験・実験エリアへの設置 (2019-2020)



- コミッショニングとビーム試験@900GeV(2021)
 - 検出器やO²の動作を確認



前回のマスタープラン資料(2018)

- 試作段階(2015)から実機製作(2018)の着実な進展

ITS

GEM-TPC
clean room at P2

CR0 (online data processing)

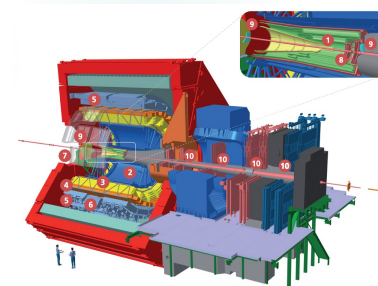
MFT

ITS

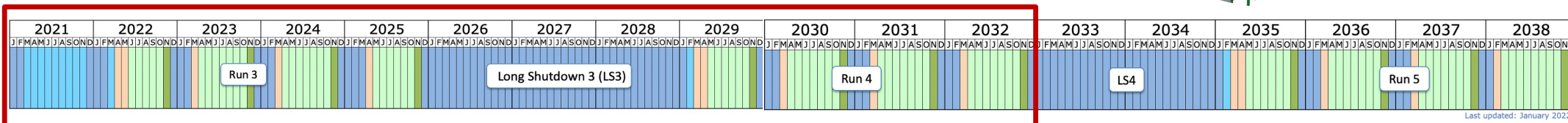
Yellow Report on the HL/HE-LHC.
WG5: Future physics opportunities for high-density QCD at the LHC with heavy-ion and proton beams
arXiv:1812.06772

今後の展望：ALICE2実験

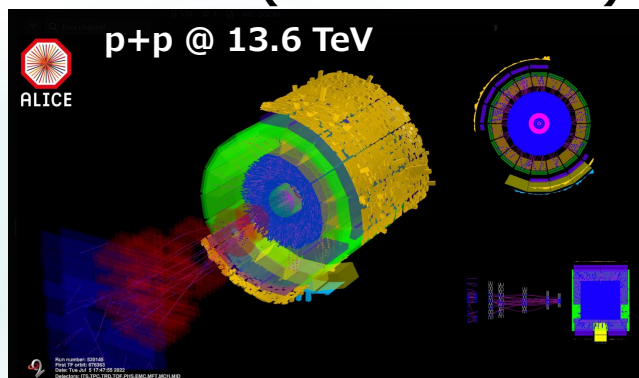
A. 進行中あるいは開始間近のプロジェクト



17



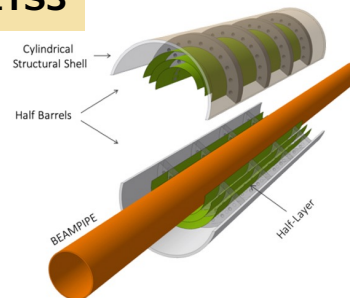
- Run3の開始 (2022年7月5日)



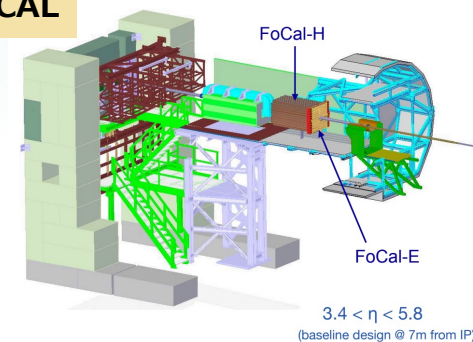
- LS3(2026-2028)に ITS3 & FoCAL

- FoCAL(筑波大、奈良女子大、長崎総科大、佐賀大)

ITS3

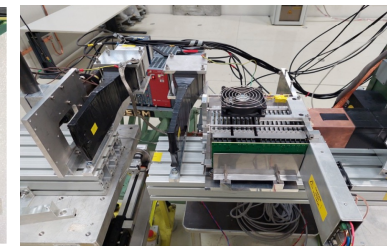
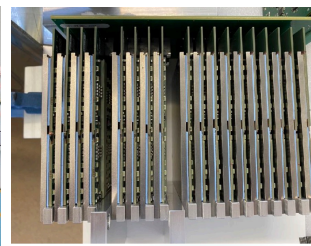


FoCAL



- Run3+Run4で、これまでの100倍のデータを収集予定. $L_{int} \sim 13 \text{nb}^{-1}$

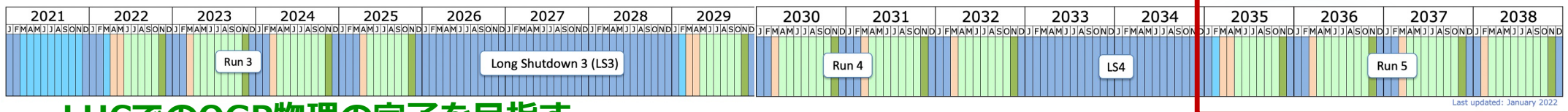
- QGP物性の高精度化、ハドロン間相互作用、カイラル対称性やハドロン化の物理
 - 初期状態(グルーオン飽和)、初期状態~QGP生成機構の研究 → FoCAL(W+Si)



今後の展望：ALICE3実験

B. 提案したいプロジェクト（期間は設けないがおよそ10年程度まで）

C. 20~30年先を見据えた将来の構想や目標



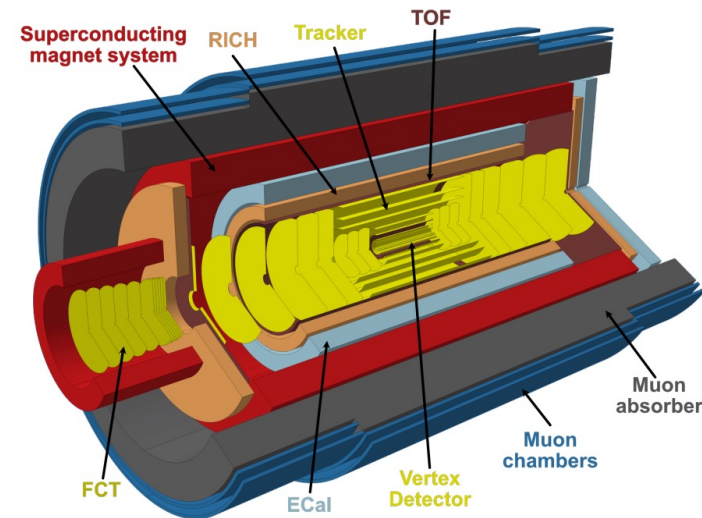
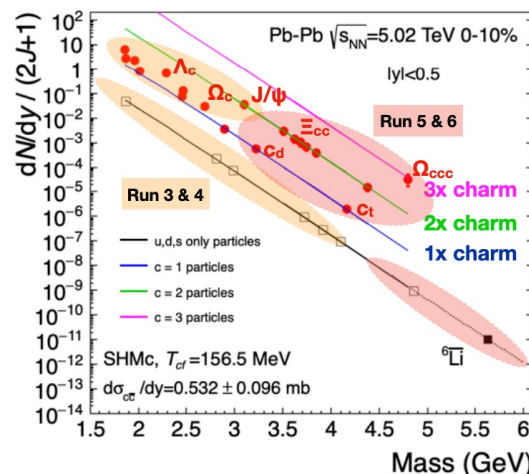
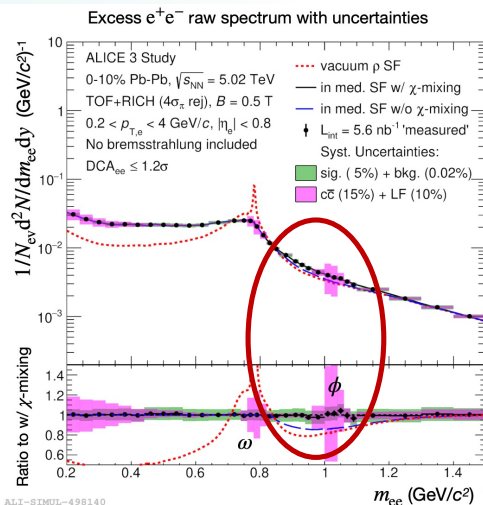
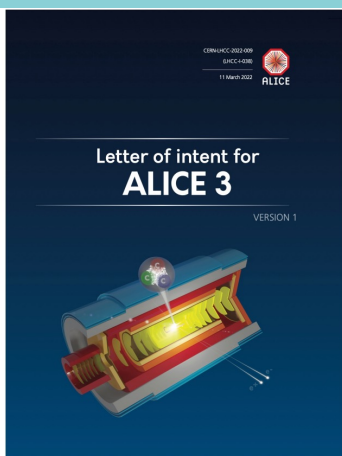
• **LHCでのQGP物理の完了を目指す**

- QGP物性の温度依存性の精密化
- カイラル対称性の回復や破れの機構
- 重クォークの熱化やハドロン化

ALICE3計画 (2035-)

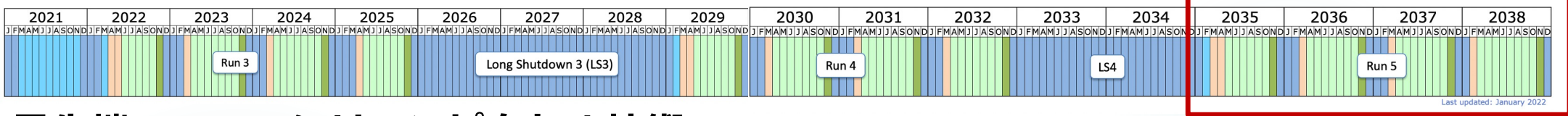
- A novel detector with **ultimate performance** for HI physics
- **Large acceptance** in rapidity ($|\eta| < 4$) and p_T (> 50 MeV)

<https://cds.cern.ch/record/2803563?ln=en>



今後の展望：ALICE3実験 (2035-)

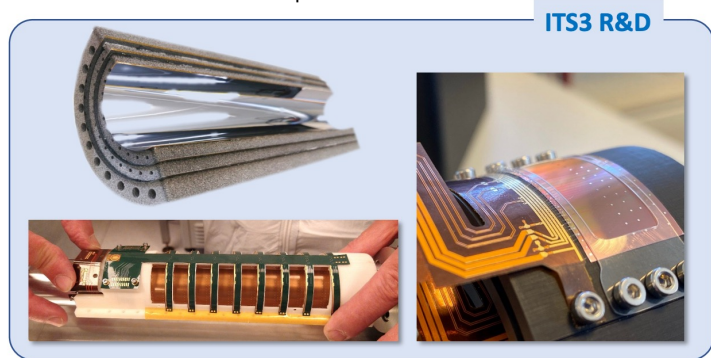
- B. 提案したいプロジェクト（期間は設けないがおよそ10年程度まで）
- C. 20~30年先を見据えた将来の構想や目標



最先端のMAPSシリコンピクセル技術

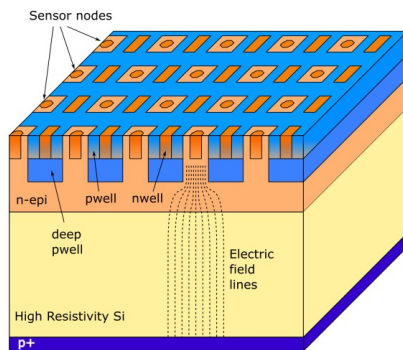
Trackers

Wafers-sized, curved sensors (based on ITS3)
65nm technology
 $\sim 0.1\% X_0$ / layer, $\sigma_{pos} \approx 2.5 \mu\text{m}$, $\sim 60\text{m}^2$



TOF

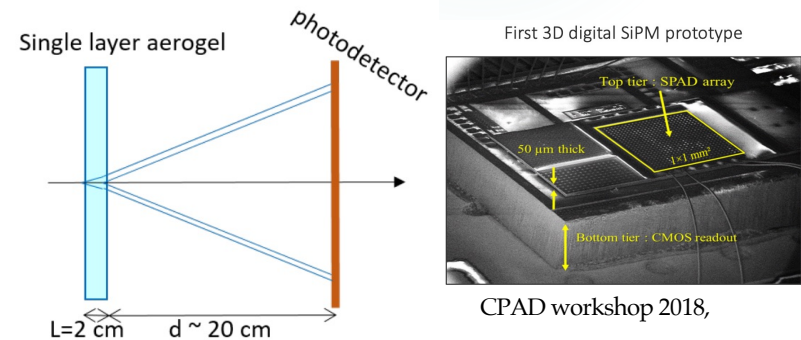
CMOS sensors with gain layer ($\sigma_{TOF} < 20\text{ps}$), $\sim 45\text{m}^2$



日本グループの参加を検討中
(→ 主導には長期的かつ安定した組織と予算措置が必要)

RICH

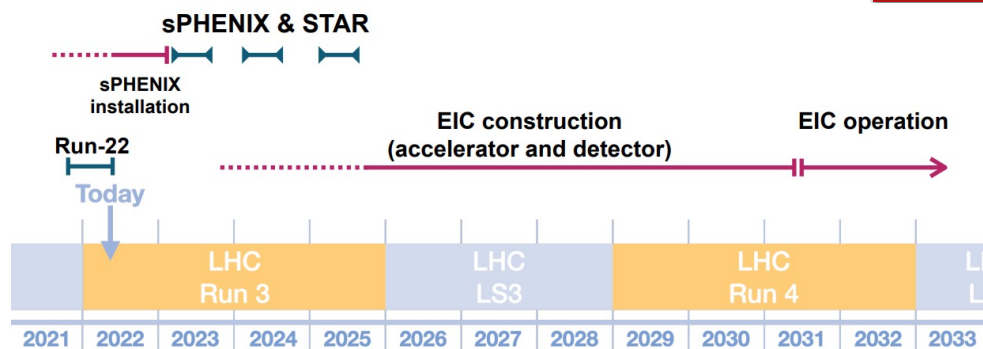
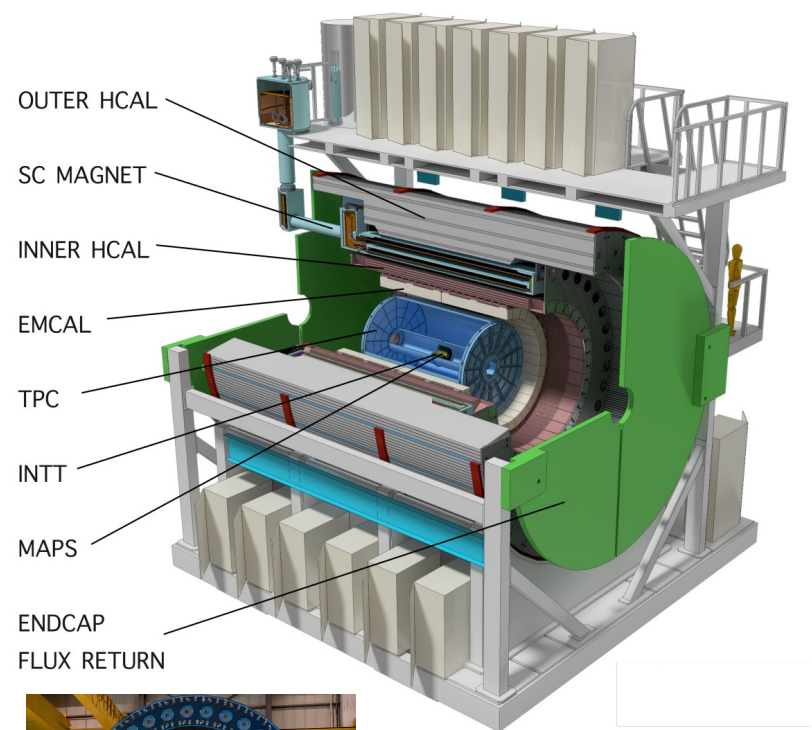
Digital SiPM based on CMOS Imaging technology, $\sim 60\text{m}^2$



この技術を日本主導で開拓したい → 素粒子原子核実験や産業(医学、イメージング、自動運転) への応用

今後の展望：sPHENIX実験

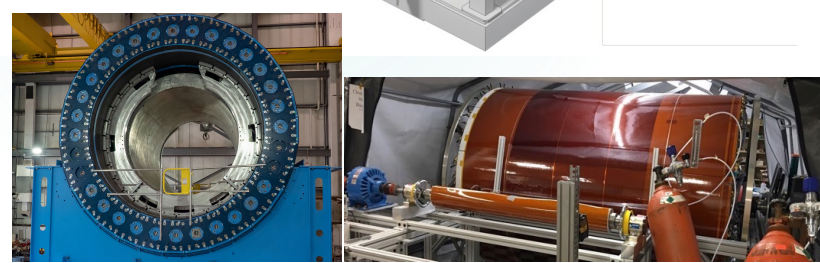
A. 進行中あるいは開始間近のプロジェクト



- 2022年に建設完了予定
 - **INTTシリコンストリップ** (理研、奈良女子大)



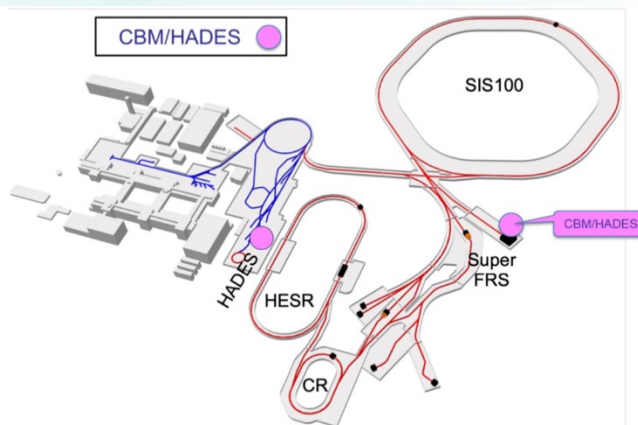
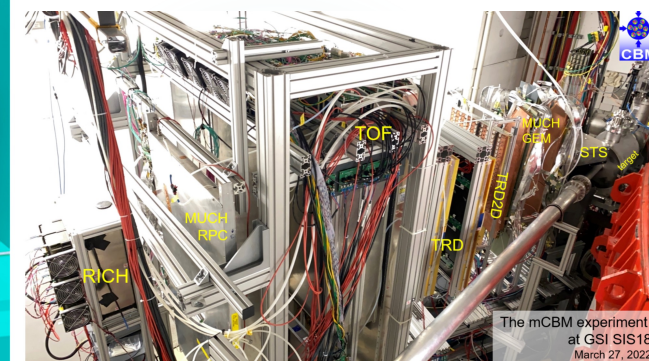
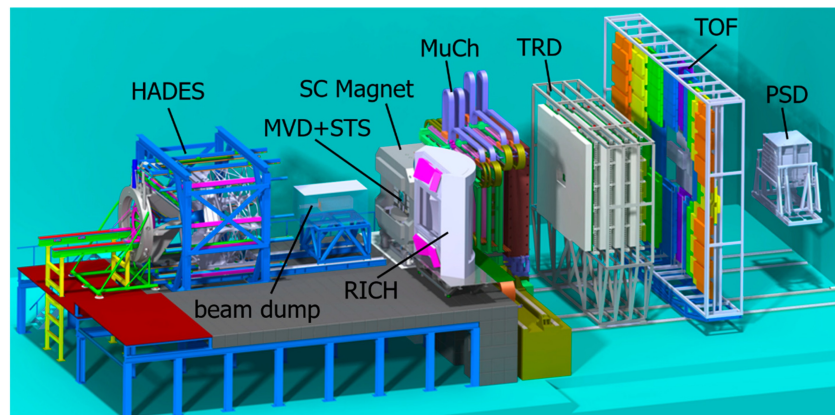
- **重イオン実験(2023-2025), $L_{int} \sim 20nb^{-1}$**
 - QGP物性の高精度化(ジェット、重クォーク、クォーコニウム)とRHICにおけるミッションの完了



今後の展望：CBM実験

21

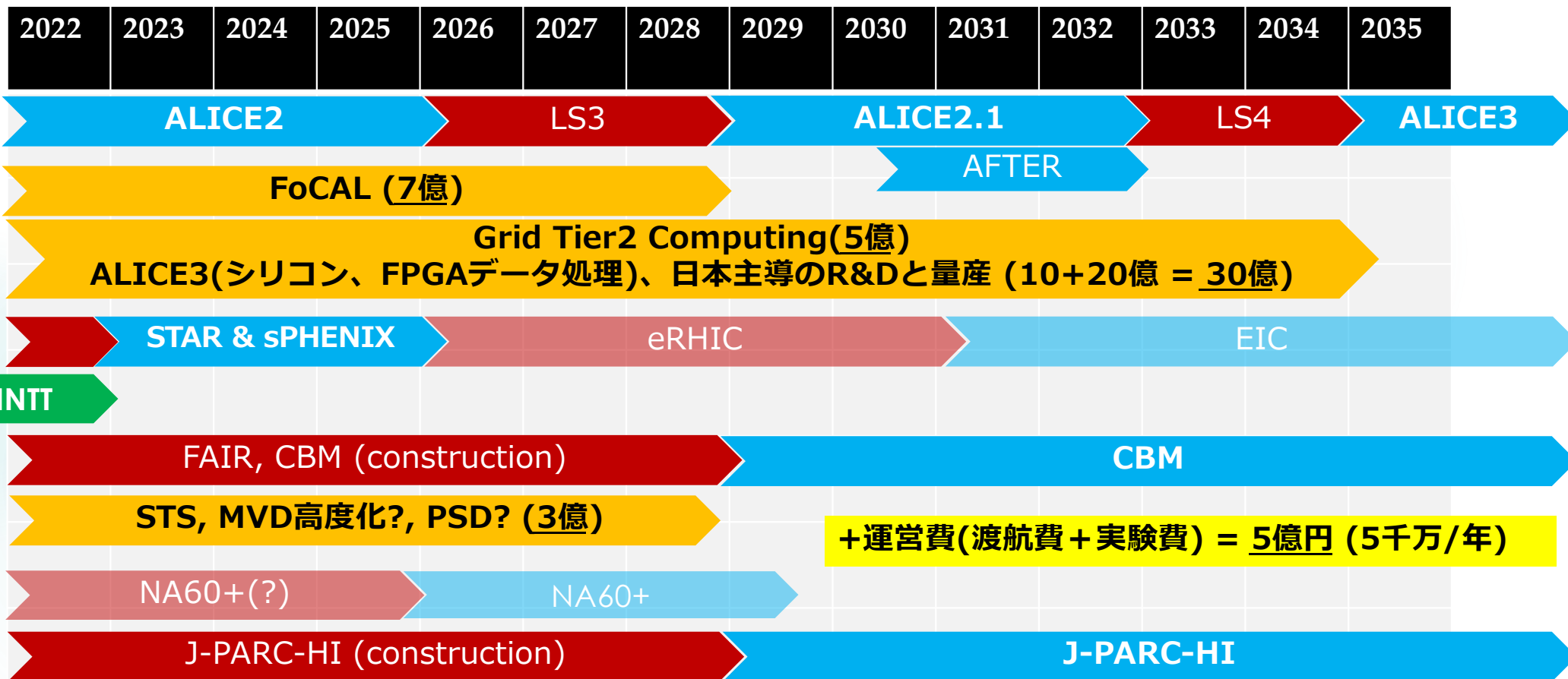
B. 提案したいプロジェクト（期間は設けないがおよそ10年程度まで）



- 臨界点の探索、高密度QCDの物性(状態方程式)、カイラル対称性の物理(ρ - a_1 カイラル混合)、ハイパー核
- 諸事情により大幅な遅れ。2028-2029年の開始を想定
- mCBM実験 (2020-2022)
 - 高レート化での検出器やDAQ(連続読出)の評価,
 - ベンチマークラン (2022.3) : $^{56}\text{Fe} + ^{58}\text{Ni}$, $T_{\text{lab}} = 1.8 \text{ AGeV}$
- 筑波大学、KEKが準メンバーとして参加を開始
 - ソフトウェア、STSへの貢献

日本グループの拡大を検討中

今後の展望：年次計画と予算規模



実験と理論共有のコンピューティングセンター(核物理全体で広く要求・共有できないか?)

合計50億

海外での研究とJ-PARC-HIの両輪

海外での研究

国内施設での研究



海外での研究とJ-PARC-HIの両輪 + 国内研究組織基盤の拡充（高エネルギーQCD構想）
→ 両重イオン物理に対する日本の先導性の拡充。技術・人・知の国際循環

未来構想ビジョンに向けて 高エネルギーQCDフロンティア と国際連携

郡司 卓(東京大学原子核科学研究センター)

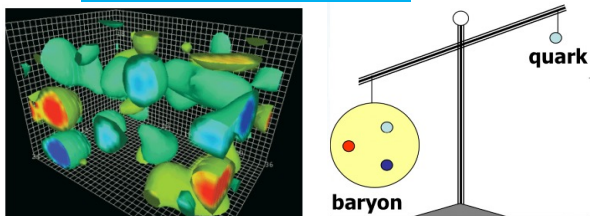
高エネルギー重イオンWG, 核子構造WG, 計算物理WG



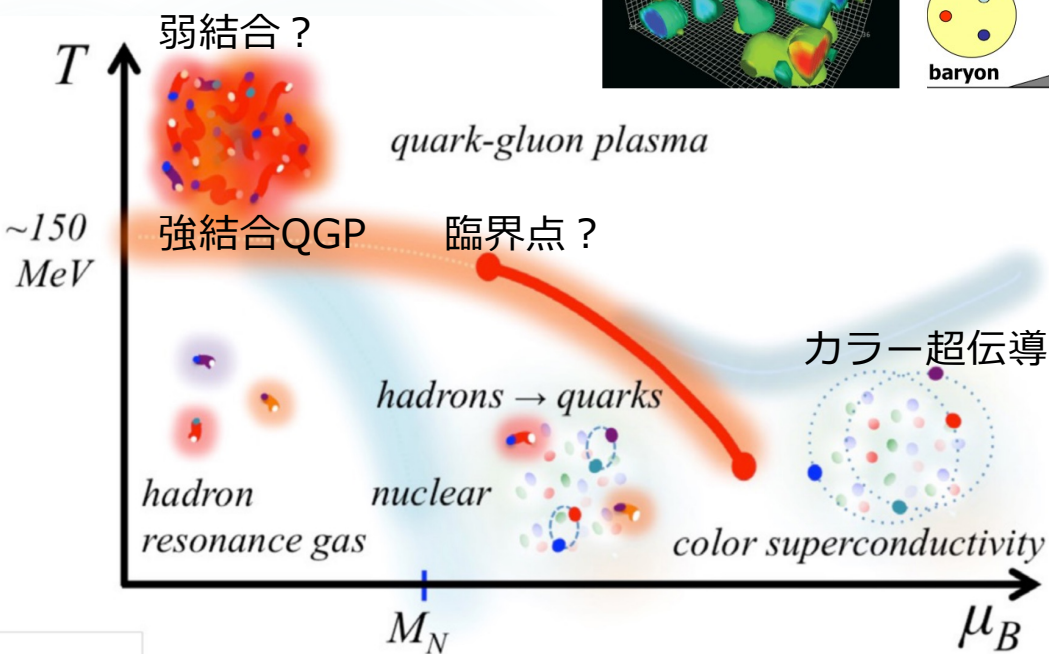
高エネルギーQCDフロンティア

クォークとグルーオンがもたらす豊かな性質や相構造

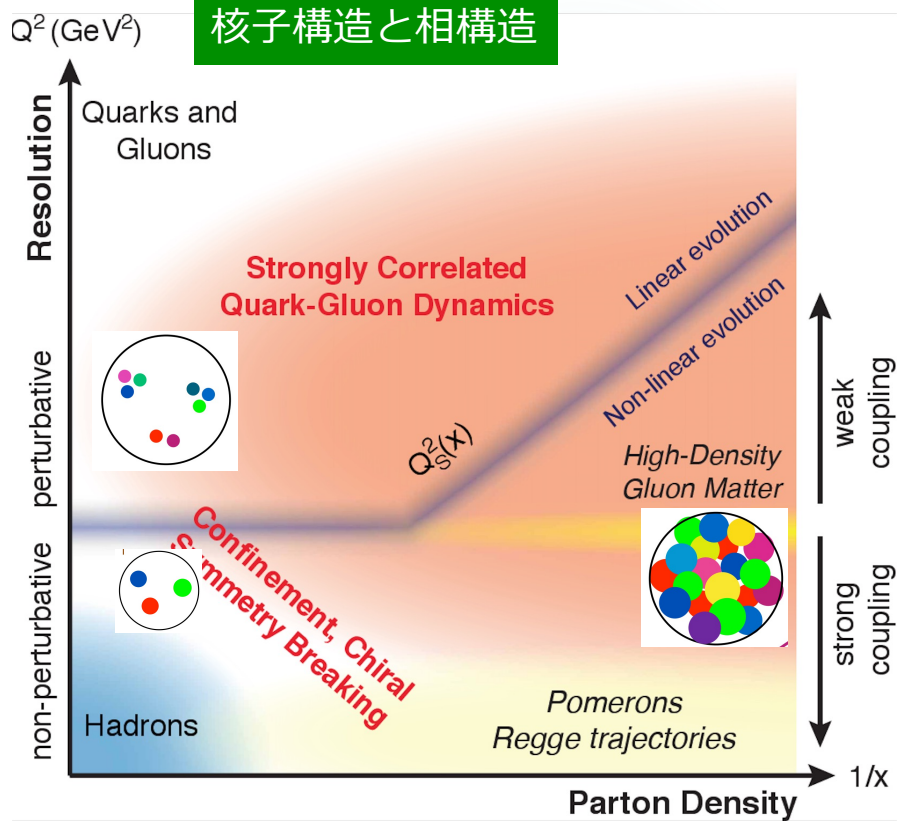
QCD真空と質量



QCD物質と相構造



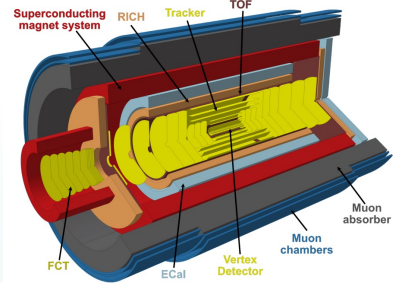
核子構造と相構造



高エネルギーQCDフロンティアと国際連携

クォーク・グルーオンが支配する物理を中心に展開

LHC + RHIC
 QGP物性、閉じ込め&カイラル相転移、QGP生成機構



QCD理論
 QCD流体力学
 QCD熱統計力学
 非平衡QCD
 高密度QCD
 QCD有効理論
 非線形QCD

高温QCD物理

高密度QCD物理

高エネルギーQCDフロンティア

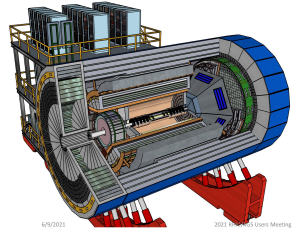
FAIR + J-PARC-HI
 臨界点、カラー超伝導、閉じ込め&カイラル相転移、物性

共通技術開発(検出器・データ処理・計算)
 主に海外施設で研究を展開し、長期的に国際共同研究を先導
 海外研究の国内拠点：高エネルギーQCDセンター

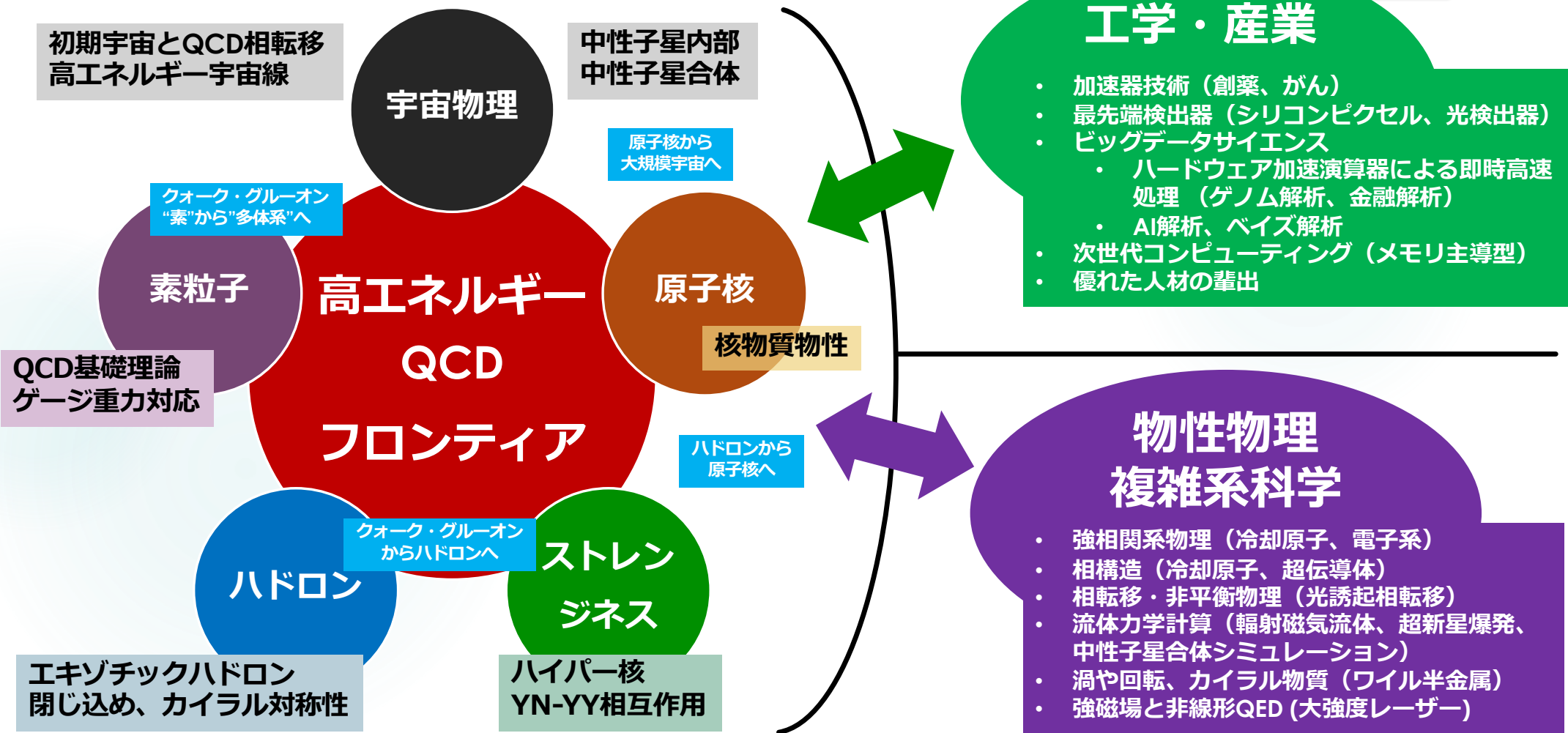
計算QCD
 格子QCD計算
 QCD流体計算
 有効理論計算
 PDF計算

核子構造

EIC
 パarton分布、グルーオン飽和、核子の質量・スピン・大きさ



周辺分野との関連



まとめ

▶ QGP物理の着実な進展@RHIC & LHC

- ▶ 様々なプローブによるQGP物性、高次揺らぎの測定、ハドロン物理

▶ 実験データの高精度化や新たなプローブの測定が課題

- ▶ LHC: ALICE高度化、ALICE3計画
- ▶ RHIC: sPHENIX実験、STAR-BES-IIデータ解析
- ▶ SPS-NA60+, FAIR-CBM, J-PARC-HI

▶ 将来計画の主導。検出器R&D, 建設, 運用に責務

- ▶ FoCAL、INTT、ALICE3のMAPSシリコンピクセル技術(→次世代の汎用実験技術)
- ▶ 加速演算器によるオンラインデータ処理(→次世代の汎用実験技術)
- ▶ 長期プロジェクト → 競争的資金では実現し難い「長期的かつ安定した組織と資金」が不可欠

▶ 実施機関

→高エネルギーQCDフロンティア

- ▶ 筑波大学、東京大学、理化学研究所、奈良女子大学、広島大学、佐賀大学、長崎総合科学大学