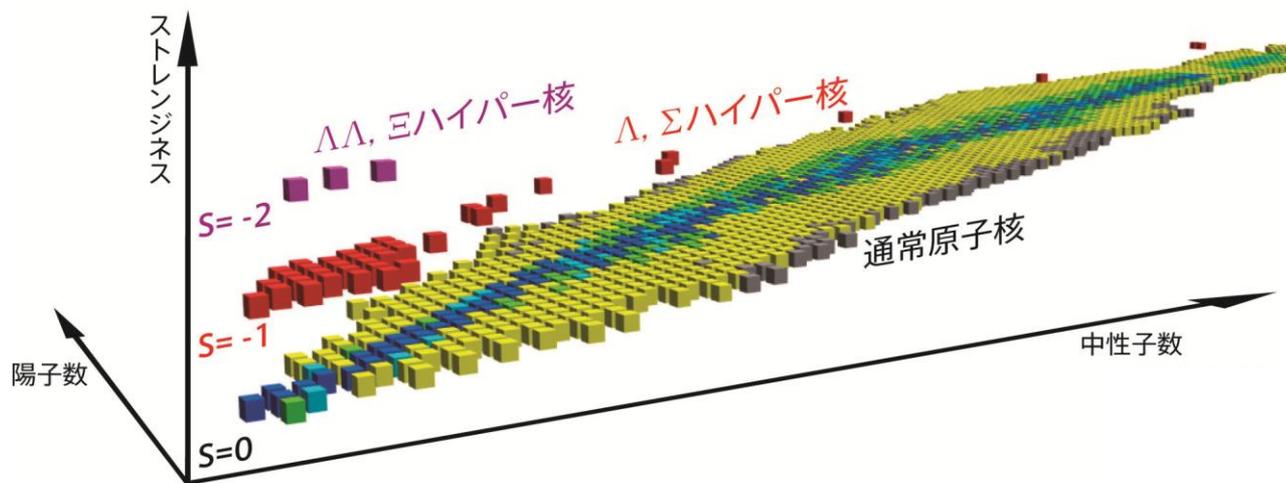


# ハイパー核・ストレンジネス 核物理の将来

ハイパー核・ストレンジネス核物理WG

代表 高橋俊行 (KEK)



# ハイパー核・ストレンジネス核物理WG

高橋俊行(KEK、代表)、中村哲(東北、副代表)、  
藤岡宏之(京都)、佐久間史典(理研)、鈴木隆俊(東京)、  
三輪浩司(東北)、高橋仁(KEK)、谷田聖(ソウル)、  
味村周平(RCNP)、土手昭伸(KEK)、肥山詠美子(理研)、  
永江知文(京都、世話人)

- WG ミーティング (10回)
- うち3回の勉強会 (5名の講師)
- 理論研究会でのタウンミーティング

*勉強会での講師の方々、WGミーティングに参加された方々、  
報告書作成に関して貢献していただいた方々に感謝します。*

# ハイパー核・ストレンジネス核物理の研究目的

- **ストレンジネス**をツールとして核物理の基本的問題に挑む
  - Pauli排他律から自由なハイペロン
    - 原子核深部を探る(一粒子軌道、、、)
    - 核媒質中のハドロン
  - 不純物としてのストレンジネス
    - 原子核の変化
- **$SU(3)_f$** の世界に拡張された核物理
  - ${}^6_{\Lambda\Lambda}\text{He}(ppnn\Lambda\Lambda)$ ,  $H$  particle ( $uuddss$ )
  - Strange Hadronic Matter ( $N_u \sim N_d \sim N_s$ ), Neutron Star Core

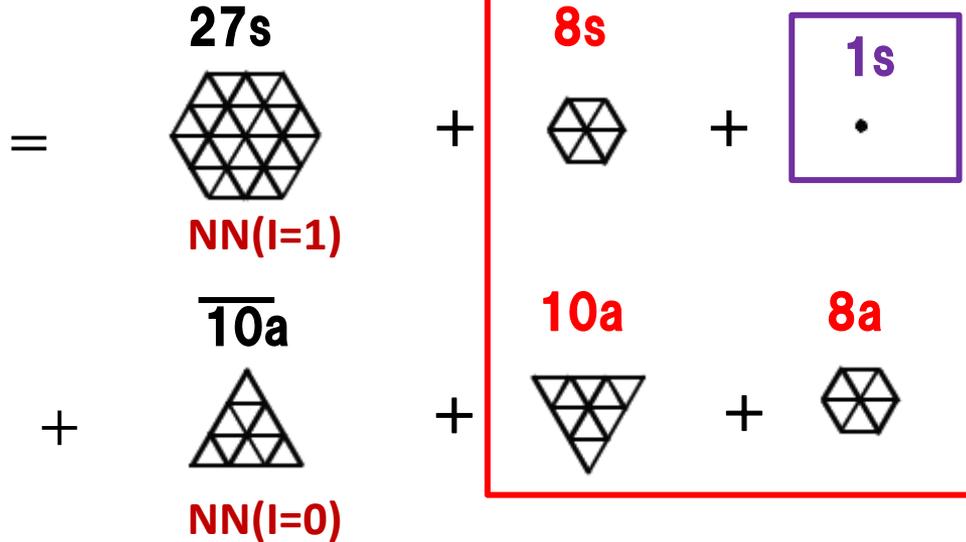
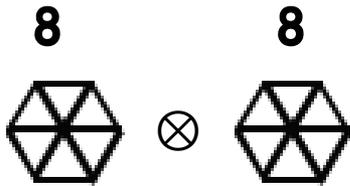
# Key Questions & Key Words

- バリオン間相互作用を理解できるか？ **(相互作用)**
  - 強い相互作用(いわゆる2体核力)の斥力芯とLS力の起源
  - 弱い相互作用
- 高密度核物質の性質は？ **(無限系)**
  - スtrenジネスと高密度、状態方程式
  - Strange Hadronic Matter / Strange Quark Matter
  - 中性子星コアでのストレンジネス(ハイペロン)の割合
- 原子核中でのハドロンの振る舞いは？ **(有限多体系)**
  - いわゆる3体力
  - 核媒質中でのハドロンの性質変化
  - スtrenジネス注入による核の変化

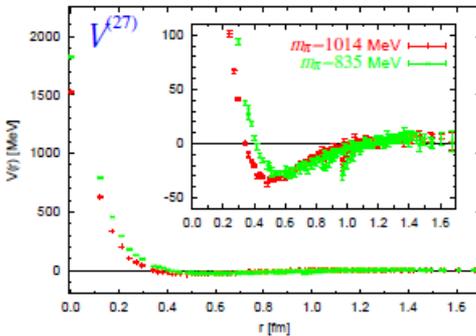
# (八重項)バリオン間の強い相互作用

Strangenessが関与する項

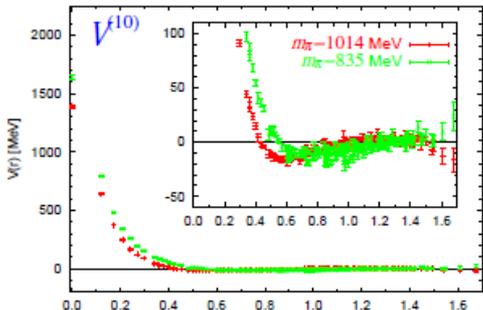
S=-2 System  
に固有



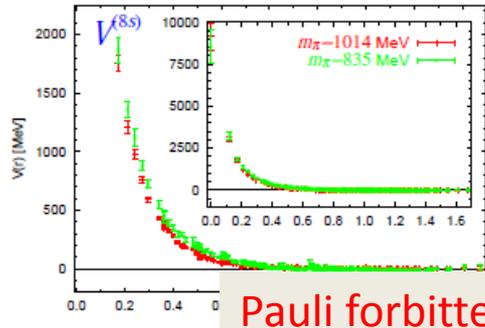
27



10  $\Sigma^+ p (^3S_1)$

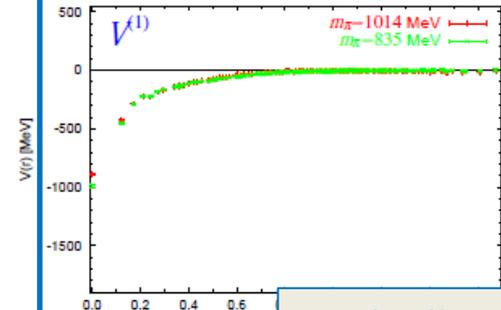


8s  $\Sigma^- p (^1S_0)$



Pauli forbidden

$$1 \quad H = -\sqrt{\frac{1}{8}} \Lambda \Lambda + \sqrt{\frac{3}{8}} \Sigma \Sigma + \sqrt{\frac{4}{8}} \Xi N$$



Pauli allowed

# バリオン間の強い相互作用 —研究計画—

斥力芯の起源

**Quark間のPauli 効果** と **Color-Magnetic Interaction**  
を明らかにする

$\Sigma^{\pm}p$  散乱実験 (J-PARC E40, ~5年後)

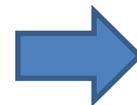
- (微分)断面積のエネルギー依存性
- 偏極観測量  $\Leftrightarrow$  8s-8aの干渉項、LS力

ダブルストレンジネス系の研究 (~5年後)

- $H$  particle,  $\Lambda\Lambda$  相関  $\Rightarrow$  共鳴  $H$

$\Xi^{-}p$  散乱、 $\Xi^{-}p \rightarrow \Lambda\Lambda$  測定 (10-20年後)

$\Lambda p$  散乱の偏極観測量測定 (10-20年後)



**大立体角スペクトロメータ**

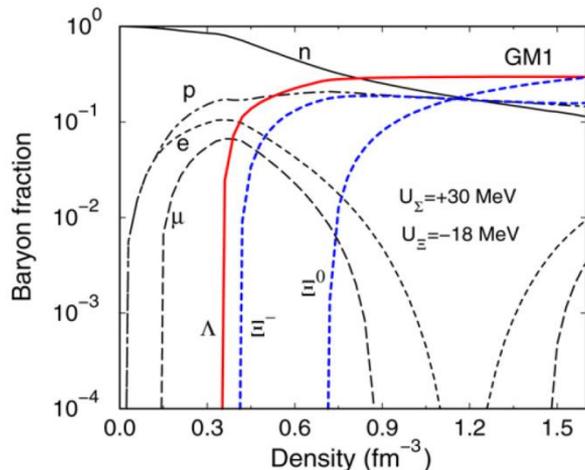
# 高密度核物質とストレンジネス

## 低温・高密度( $\rho > 2\rho_0$ )でのEoS

ストレンジネス(ハイペロン、K、...)が深く関与

$$\mu_Y = m_Y + \frac{k_F^2}{2m_Y} + U_Y(k_F)$$

## 中性子星コアでのストレンジネス



J.Schaffner-Bielich,  
NPA804(2008)309

- $\Lambda N$  int. in n-rich environment

n-rich  $\Lambda$  hypernuclei

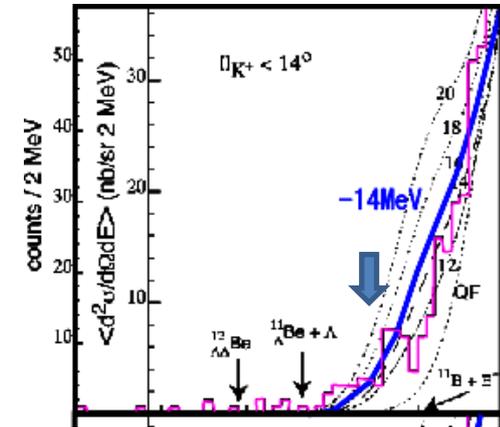
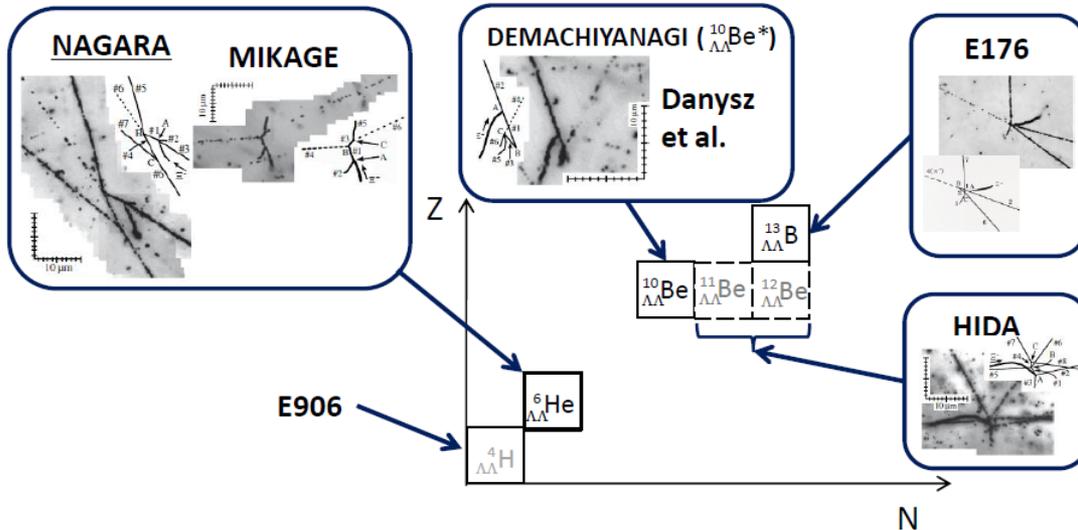
- $\Sigma^- N$  int.  $\Sigma N$  Scattering
- $\Xi^- N$  int.  $\Xi$  hypernuclei
- $\Lambda\Lambda, \Sigma\Sigma, \Xi\Xi$  multi-strangeness system
- $K^- N$ , Kaon Condensation  
Kaonic nuclei/atom

# ダブルストレンジネス核 — $\Lambda\Lambda$ 核と三核 —

これまで発見されたものは、 $\Lambda\Lambda$ 核数例のみ  
曖昧さなく同定されたものは、NAGARAのみ

$^{12}\text{C}(K^-, K^+)$

P.Khaustov et al.,  
PRC61 (2000) 054603



## Hybrid-Emulsion法によるダブルハイパー核の研究 (J-PARC E07, ~5年後)

- $\Lambda\Lambda$ 核100事象  $\Rightarrow \Delta B_{\Lambda\Lambda}$ の原子核依存性
- ダブルストレンジネス系の弱崩壊

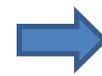
## ( $K^-, K^+$ )反応による $\Xi$ 核分光、 $^{12}_{\Xi}\text{Be}$ (J-PARC E05, ~5年後)

- $\Delta M_{\text{FWHM}}=3\text{MeV}$ による初めての $\Xi$ 核の観測
- $\Xi$ の原子核ポテンシャル  $\Rightarrow \Xi N$ 相互作用
- 状態の幅  $\Rightarrow \Xi N \rightarrow \Lambda\Lambda$ 相互作用

# マルチ・ストレンジネス系の研究 ーその後ー

## 大立体角ハイペロン崩壊検出器 (Large-Acceptance Hyperon-Decay Spectrometer) によるダブルストレンジネス系の研究 (5-10年後)

- High-rate/ $4\pi$ -detector  $\Rightarrow$  TPCをベース
- $\Lambda\Lambda$ 相関  $\Rightarrow$  共鳴 $H$ の探索



**Large-Acceptance  
Hyperon-Decay Spectrometer**

## $\Xi$ 核分光の展開 (5-15年後)

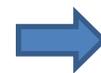
- A-dependence, Coulomb-Assisted Bound States
- Spin/Isospinを制御した $\Xi N$ 相互作用  $\Rightarrow$   ${}^7_{\Xi}\text{H}(\alpha\Xi^{-}nn)$ ,  ${}^{10}_{\Xi}\text{Li}(\alpha\alpha\Xi^{-}n)$
- $(K^{-}, K^0)$ 反応  $\Delta I=0$ の $\Xi$ 核生成



**$K^0$  スペクトロメータ**

## $S=-3$ 多体系の研究(生成) (20年後)

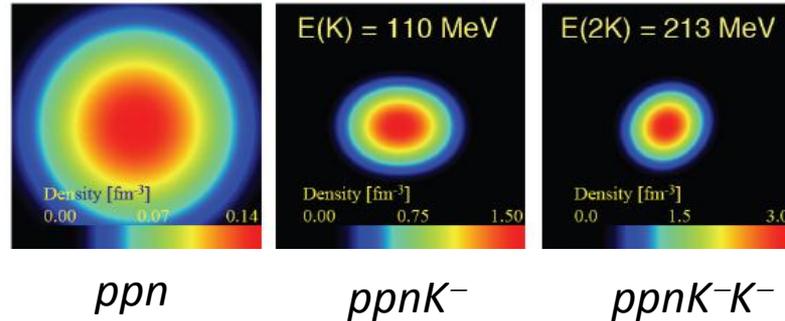
- $\Omega^{-}$ 吸収からの生成 5-10GeV/c  $K^{-}$  or  $p_{\text{bar}}$  beam
- 重イオン衝突
- 反原子核ビーム( $d_{\text{bar}}$ )



**10GeV/c Mass-Separated Beam Line**

# Kaonic Nucleiの研究

## 高密度状態が実現!?



## 最も単純な系、 $K^-pp$ の束縛状態の存在確認(～5年後)

始状態・終状態(すべての粒子)双方を測定する完全実験で!

- $K^-$  (in-flight) +  ${}^3\text{He} \rightarrow "K^-pp" + n, "K^-pp" \rightarrow p + \Lambda \rightarrow p + p + \pi^-$  (J-PARC E15)
- $\pi^+ + d \rightarrow "K^-pp" + K^+, "K^-pp" \rightarrow p + \Lambda \rightarrow p + p + \pi^-$  (J-PARC E27)
- $p + p \rightarrow \Lambda + p + K^-$  (GSI FOPI)
- $K^-$  (stopped) +  ${}^{3/4}\text{He} \rightarrow \Lambda + p + n$  etc (AMADEUS, J-PARC Lol)
- $\gamma + d \rightarrow "K^-pp" + K^*(K + \pi)$  (LEPS/LEPS-2)

## " $K^-pp$ "の詳細研究 (5-20年後)

- 崩壊分岐比
- $\Lambda/p$ の偏極度測定  $\Rightarrow J^\pi$ の決定?

## 重い $K^-$ 束縛系の探索(5-10年後)

- $K^-ppn/K^-ppp$

## 二重 $\bar{K}$ 束縛系( $K^-K^-pp$ )の探索 (5-20年後)

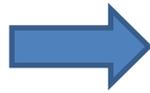
- $(K^-, K^+)/ (K^-, K^0)$ 反応
- $p\_bar$  beam
- $p-p/p-A$ 反応

# 多体系効果 —ストレンジネス注入による変化—

中性子過剰核構造(中性子ハロー、Parity Inversion, etc)の変化

中性子過剰 $\Lambda$ ハイパー核の研究 (5–15年後)

$(e, e'K^+)$ ,  $(\pi^-, K^+)$  反応



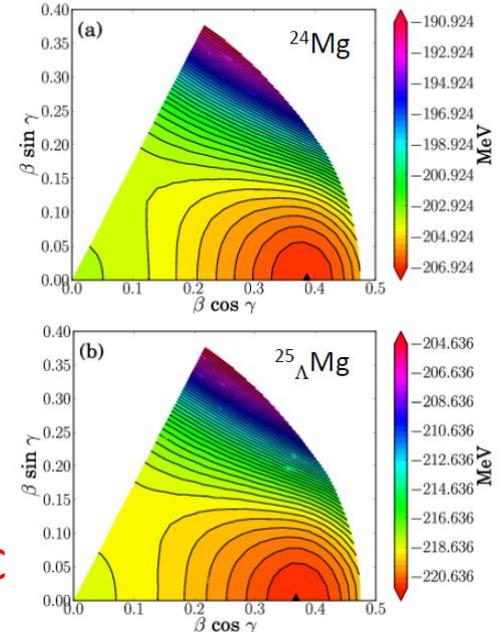
**High-Intensity High-Resolution Beamline**

- $P_{\max} \sim 2\text{GeV}/c$
- Dispersion-matching
- $10^8\text{--}10^9\text{ Hz}$  beam
- a few keV resolution

変形核の $\Lambda$ による変形の変化

$^{25}_{\Lambda}\text{Mg}$  の $\gamma$ 線分光 (5–15年後)

$^{24}\text{Mg}(2_1^+, 4_1^+, 2_2^+) \otimes s_{\Lambda}$  のエネルギー測定

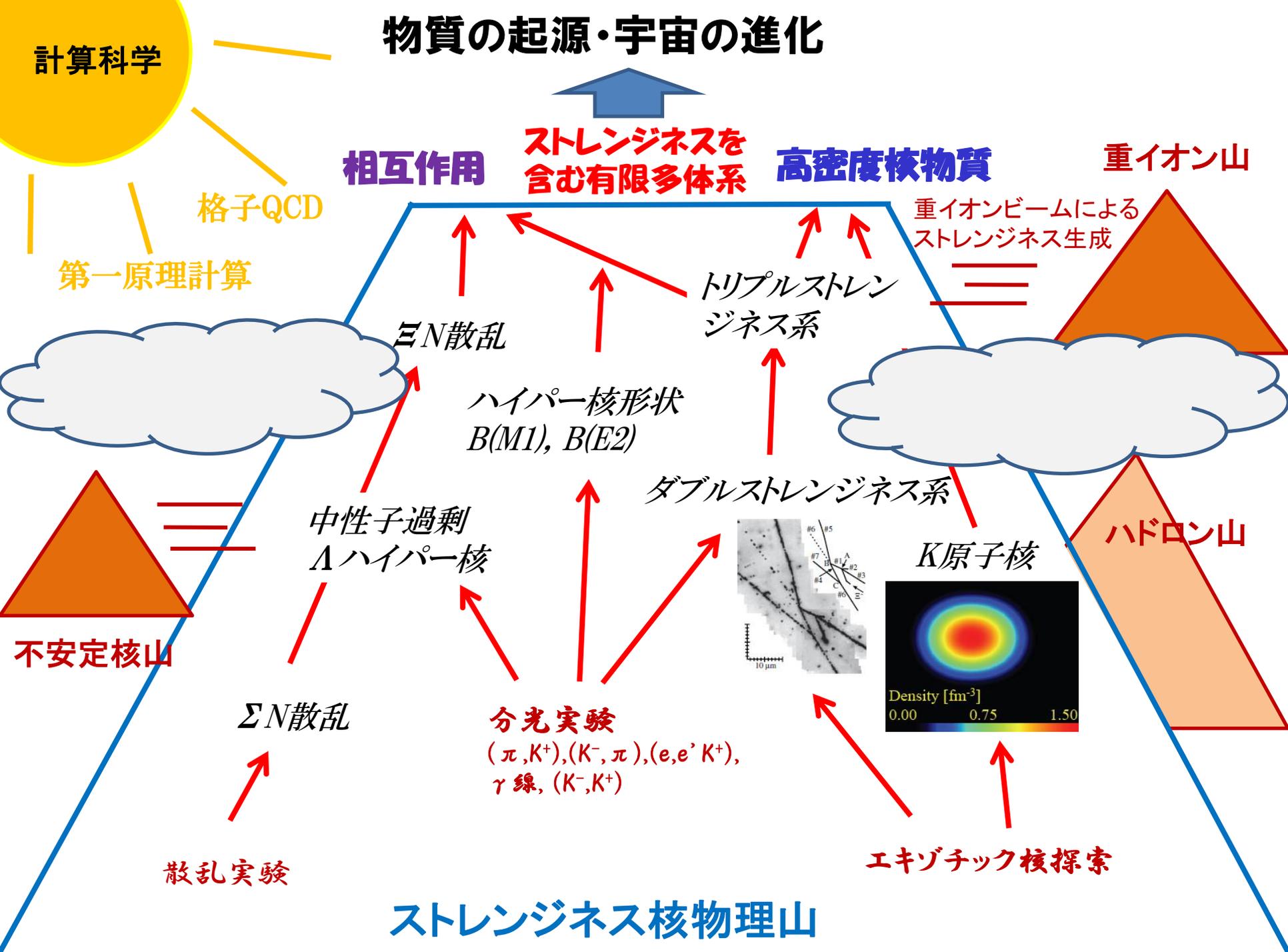


M.T.Win et al, PRC

# 研究施設と課題

- J-PARCハドロン実験施設
  - Beam Powerの増強 5kW⇒100kW⇒270kWへ
  - ビームの質の向上 spill内Duty , Cycle Dutyの向上
  - ハドロンホール拡張
    - K1.1 / HIHR-BL / 10GeV/c Separated BL
  - 大型検出器
    - LAHDS / K0 spectrometer /  $\pi^0$  spectrometer /  $4\pi$  Ge検出器
- 電子(光子)ビーム
  - JLab / Mainz / LEPS2 / ELPH
- 重イオンビーム
  - GSI / RHIC

# 物質の起源・宇宙の進化



# ハイパー核・ストレンジネスWG 公開情報

- 報告書第1版 (Wiki上)
  - [http://www-nh.scphys.kyoto-u.ac.jp:8080/np\\_strange\\_wg/index.php?plugin=attach&refer=FrontPage&openfile=strangeness\\_ver1.pdf](http://www-nh.scphys.kyoto-u.ac.jp:8080/np_strange_wg/index.php?plugin=attach&refer=FrontPage&openfile=strangeness_ver1.pdf)
- ワーキンググループ議事録等 (Wiki)
  - [http://www-nh.scphys.kyoto-u.ac.jp:8080/np\\_strange\\_wg/](http://www-nh.scphys.kyoto-u.ac.jp:8080/np_strange_wg/)
- WGメンバー(+α)のML
  - [np\\_strange\\_wg@scphys.kyoto-u.ac.jp](mailto:np_strange_wg@scphys.kyoto-u.ac.jp)

報告書へのコメントをお待ちしております。MLまたはWGメンバーへ。