

J-PARCで作る新しい形態の原子核 – 反K中間子原子核 –

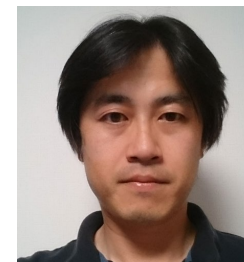
New Form of Nuclei Created at J-PARC – Kaonic Nuclei –



理化学研究所・仁科加速器科学研究センター

専任研究員 佐久間 史典

sakuma@ribf.riken.jp



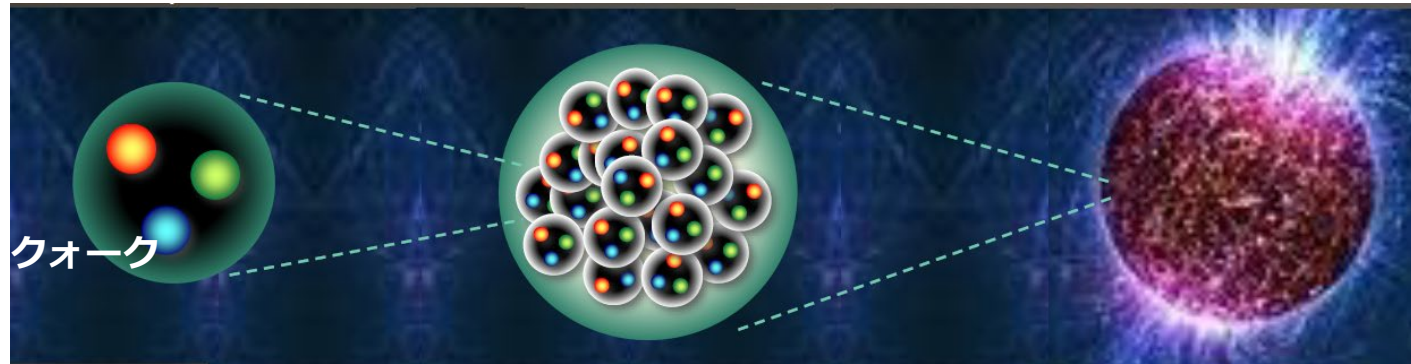
原子核ハドロン物理

= 量子色力学(QCD)によって支配される量子多体系の物理

陽子などの
ハドロン

原子核

中性子星 =
“巨大な原子核”



10^{-15} m

10^4 m

究極のゴール:

**クォークから中性子星に至る“物質の起源と進化”を
QCDを基に解き明かす**

原子核ハドロン物理

= 量子色力学(QCD)によって支配される量子多体系の物理

ハドロン物理

陽子

クォーク x3

クォーク

ダイクォーク

原子核物理

陽子などのハドロン

クォーク

ダイクォーク = クォーク物質の理解へと繋がる重要な手がかり

元素合成

TERRA INCOGNITA

$N=82$, $N=126$

ストレンジネス核物理

中性子星 = “巨大な原子核”

中性子物質?

ハイペロン物質?

クォーク物質?

微視的に解明

ダイクォーク = クォーク物質の理解へと繋がる重要な手がかり

クォークから中性子星スケールへの橋渡し

巨視的な情報

重イオン物理

格子QCD

Hadrons to Atomic nuclei

HAL

from Lattice QCD

天体物理

$M [M_{\odot}]$

$R [km]$

GW170817

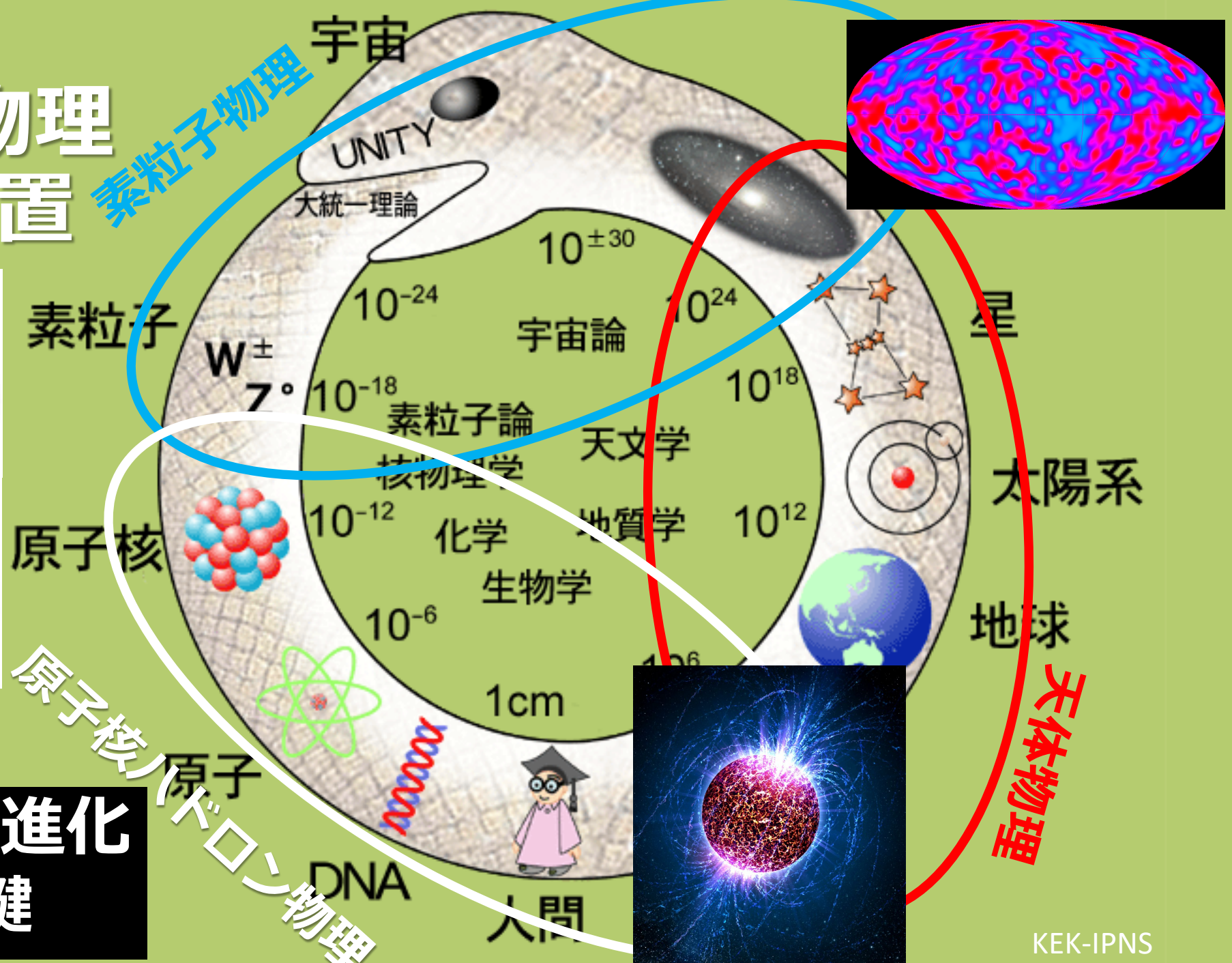
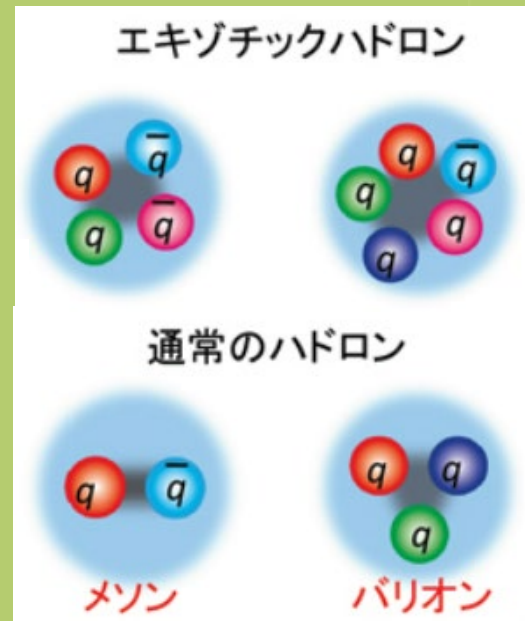
J0740+6620

NICER

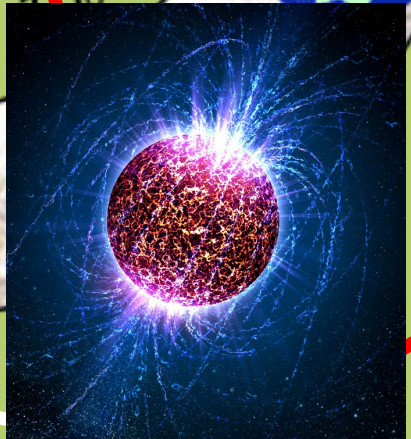
BOB, V18, N93, UIX, APR, Skyrme, NLWM, DDM, BOB(N+Y), V18(N+Y), SFHo(N+Y)

原子核 ハドロン物理 の立ち位置

素粒子物理

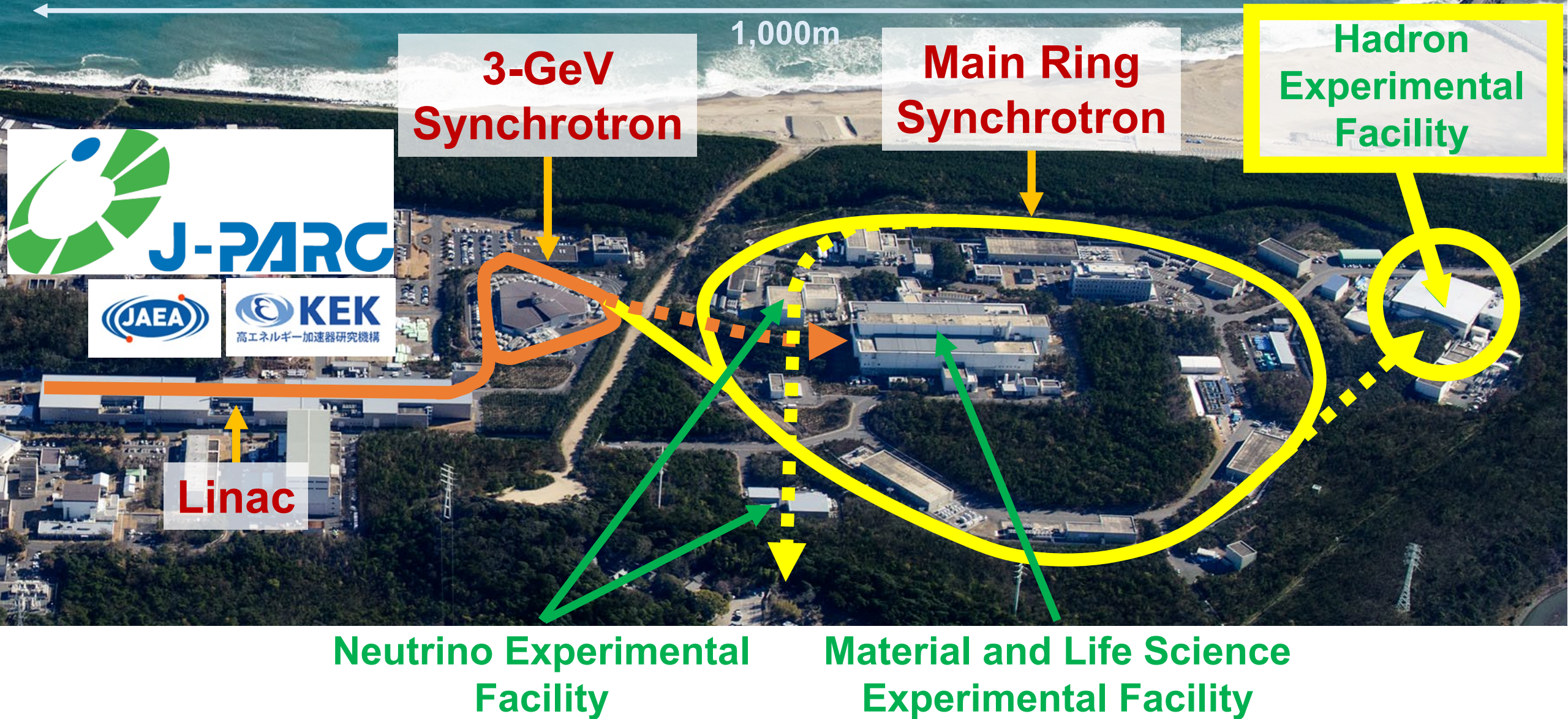


物質の起源と進化 の重要な鍵



J-PARC

Japan Proton Accelerator Research Complex



3-GeV Synchrotron

Main Ring Synchrotron

Hadron Experimental Facility

Linac

Neutrino Experimental Facility

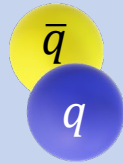
Material and Life Science Experimental Facility

The block contains the J-PARC logo (a stylized green and white figure) and the logos for JAEA (Japan Atomic Energy Agency) and KEK (High Energy Accelerator Research Organization). The KEK logo includes the text "高エネルギー加速器研究機構".

物質の起源と進化を探る

物質・反物質の対称性

物質優勢宇宙の誕生



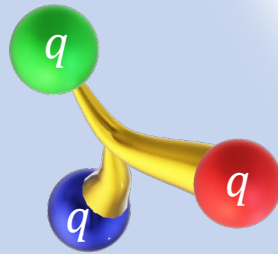
フレーバー物理

CP対称性の破れ
弱い相互作用
→ 新物理探索

K中間子稀崩壊
 $\mu \rightarrow e$ 転換

物質創成の起源

クォークからハドロンの生成



ハドロン物理

ハドロンの質量獲得機構
クォーク相互作用

ハドロン分光
核内中間子

極限物質へ

中性子星深部における
高密度物質の性質



ストレンジネス核物理

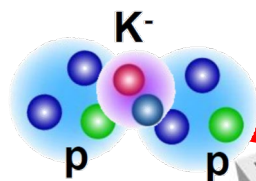
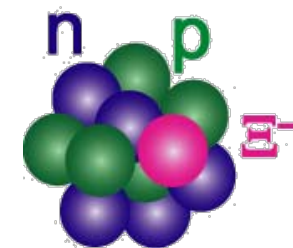
ハドロン相互作用がおりなす
ハドロン多体系

ハイペロン-核子散乱
ハイパー核分光

現在のハドロン実験施設

- < 1.1 GeV/c
- ~ 5x10⁵ K⁻/spill
- **核内K中間子**

- < 2.0 GeV/c
- ~ 10⁶ K⁻/spill
- **S=-1 及び S=-2 ハイパー核**



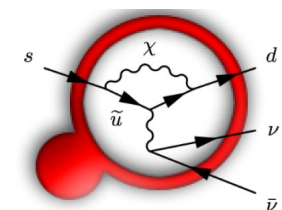
K1.8BR

K1.8

56 m

KL

- 16 deg extraction
- ~ 2.1 GeV/c ~ 10⁷ K⁰_L/spill
- **K⁰_L → π⁰νν̄稀崩壊**



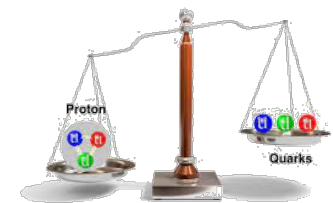
T1 target

charged
neutral

primary 30GeV

high-p

- 2020年始動
- 30 GeV proton ~ 10¹⁰
- < 31 GeV/c unsepa. π ~ 10⁷
- **核内φ中間子**



muon

COMET

2023年始動

- μ⁻ beam
- **μ-e転換**

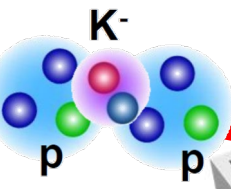


- 金標的
- < 95 kW

- 30 GeV陽子一次ビーム
- 65kW (7x10¹³ ppp, 5.2s)
- [2021年6月現在]

現在のハドロン実験施設

- $< 1.1 \text{ GeV}/c$
- $\sim 5 \times 10^5 \text{ K}^-/\text{spill}$
- **核内K中間子**



K1.8BR

56 m

charged

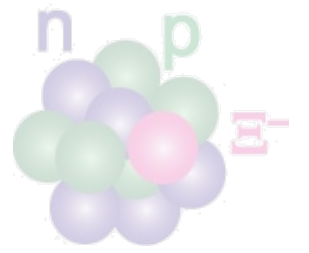
- 金標的
- $< 95 \text{ kW}$

- 30 GeV陽子一次ビーム
- 65kW (7×10^{13} ppp, 5.2s)
- [2021年6月現在]

T1 target

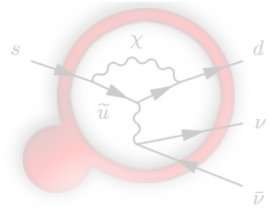
K1.8

- $< 2.0 \text{ GeV}/c$
- $\sim 10^6 \text{ K}^-/\text{spill}$
- **S=-1 及び S=-2 ハイパー核**



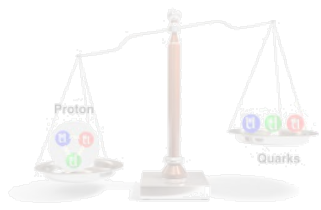
KL

- 16 deg extraction
- $\sim 2.1 \text{ GeV}/c \sim 10^7 \text{ K}_L^0/\text{spill}$
- **$K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 稀崩壊**



high-p

- 2020年始動
- 30 GeV proton $\sim 10^{10}$
- $< 31 \text{ GeV}/c$ unsepa. $\pi \sim 10^7$
- **核内 ϕ 中間子**



muon

COMET

2023年始動

- μ^- beam
- **μ -e 転換**



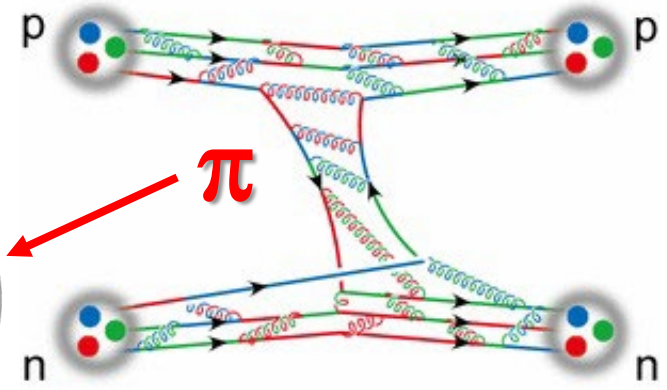
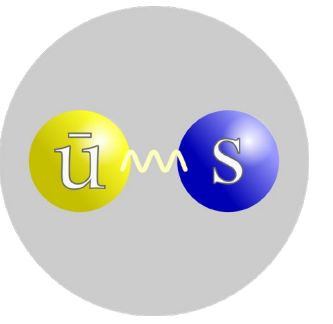
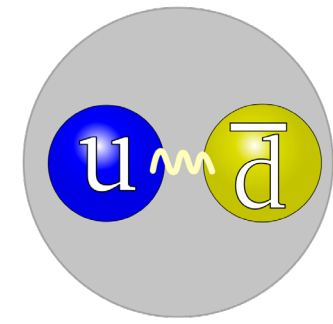
反K中間子の面白さ

●中間子：クォークと反クォークが結合した粒子

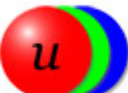
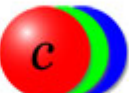
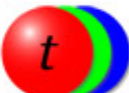



- π中間子は核子同士を結びつける核子同士の接着剤
- “仮想粒子”として原子核内に存在

●反K中間子：sクォークと反u/dクォークが結合した粒子

- 核子との間に非常に強い引力相互作用 = 強力接着剤
- 主に加速器で“実粒子”として生成



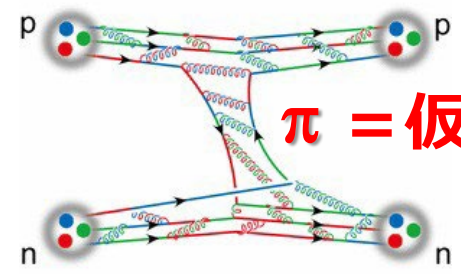
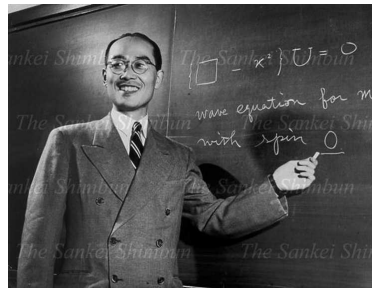
クォーク

電荷	世代		
	I	II	III
$+\frac{2}{3}e$	 アップ	 チャーム	 トップ
$-\frac{1}{3}e$	 ダウン	 ストレンジ	 ボトム

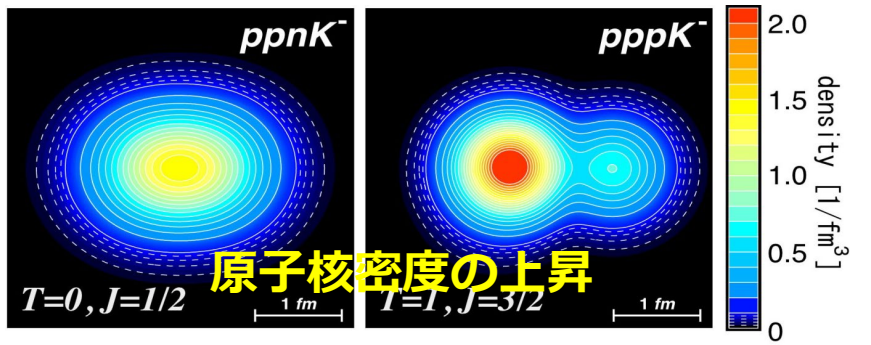
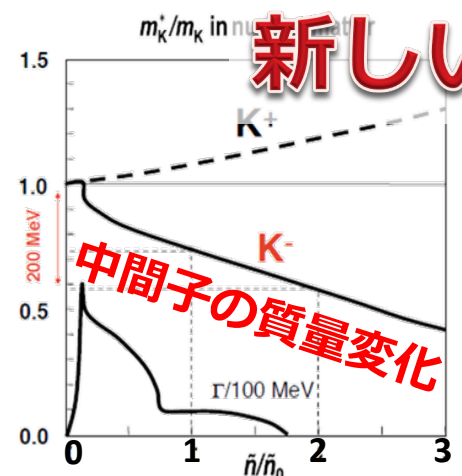
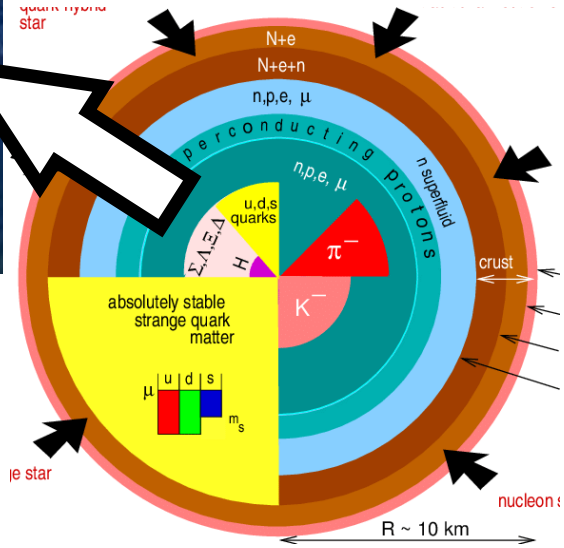
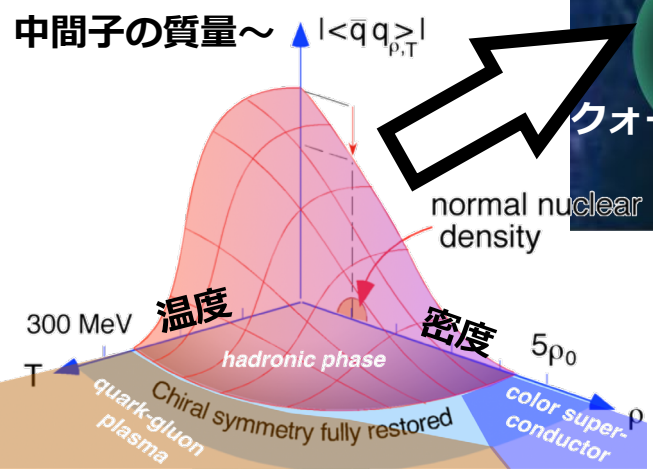
→核子同士をもっと強く結びつけることが出来る可能性

反K中間子が“実粒子”のまま原子核に埋め込まれた原子核 反K中間子原子核を用いた、新たなアプローチ

QCD質量起源 の謎



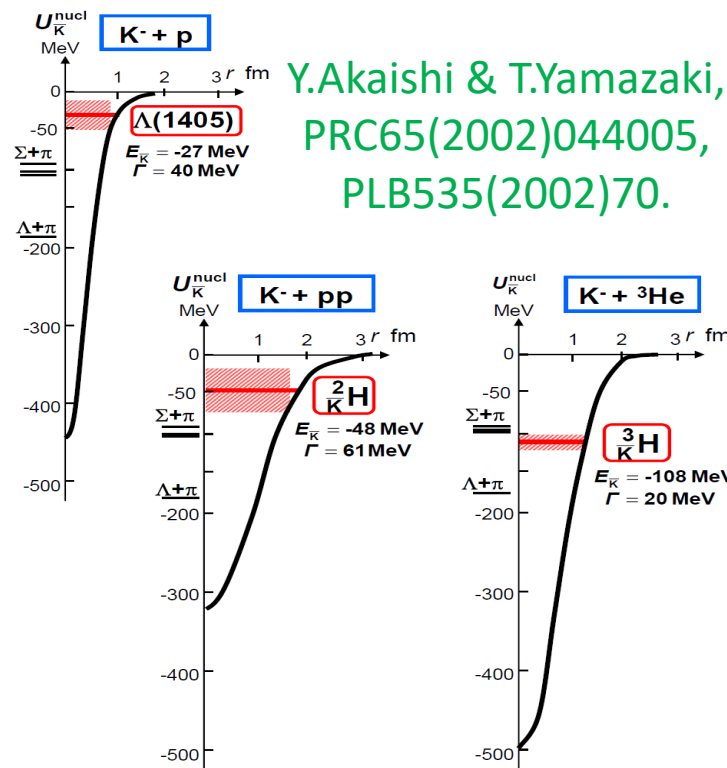
高密度核物質 の謎



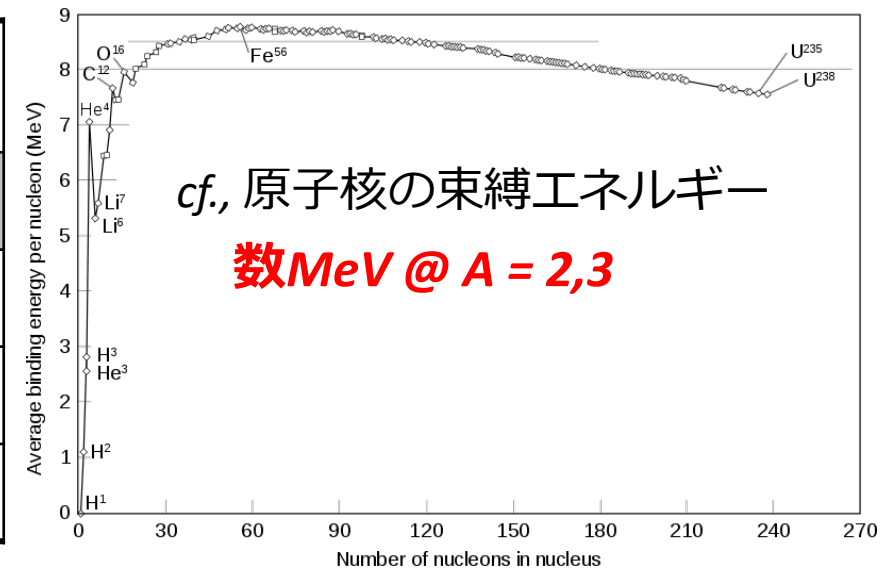
密度上昇

新奇的な原子核 = 反K中間子原子核

- 1960年代に提唱され[Y.Nogami, PL7(1963)288]、その後約半世紀後の2000年代初頭から議論が盛んになる
 - 1990年代後半、反K中間子原子測定（X線測定）の進歩がトリガー
 - アイソスピンI=0の反K中間子-核子間の強い引力相互作用が定量的に議論出来るように
 - $\Lambda(1405)$ 粒子は反K中間子-核子の束縛状態であるという描像が一般的に



反K中間子原子核	束縛エネルギー[MeV]	崩壊幅[MeV]
$\Lambda(1405) = K^-p$	27	40
K^-pp	48	61
K^-ppp	97	13
K^-ppn	118	21

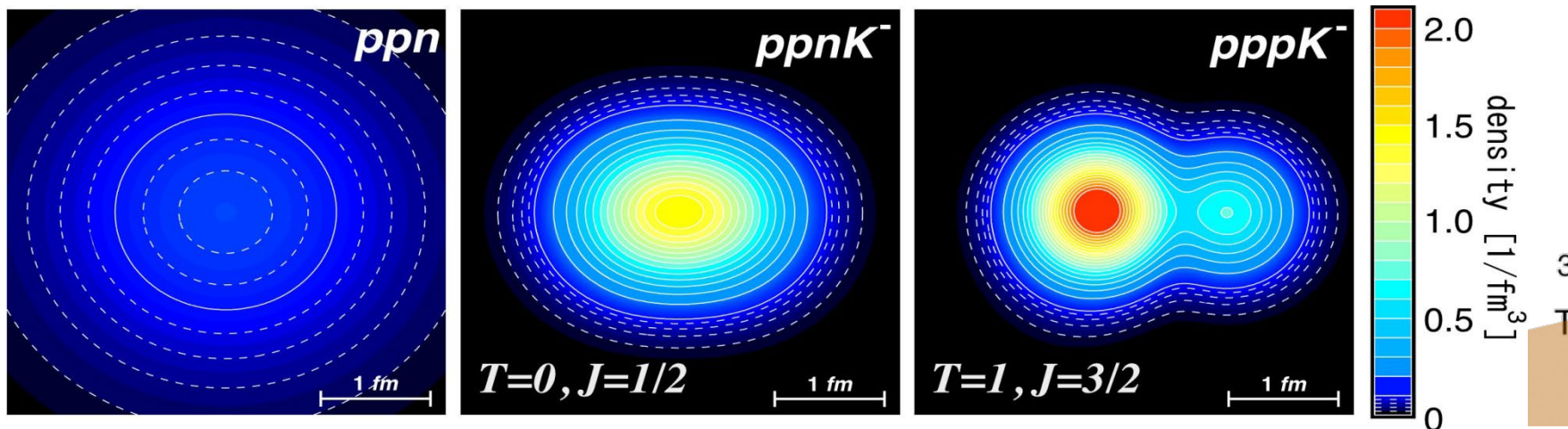


- ✓ 深い束縛エネルギー → コンパクトな状態？ 高密度状態？
- ✓ 広い崩壊幅 → 準安定状態？
- ✓ 中間子が実粒子として原子核中に存在 = クォーク反クォークが共存

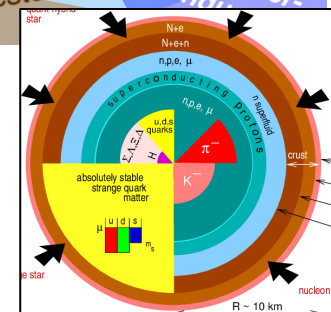
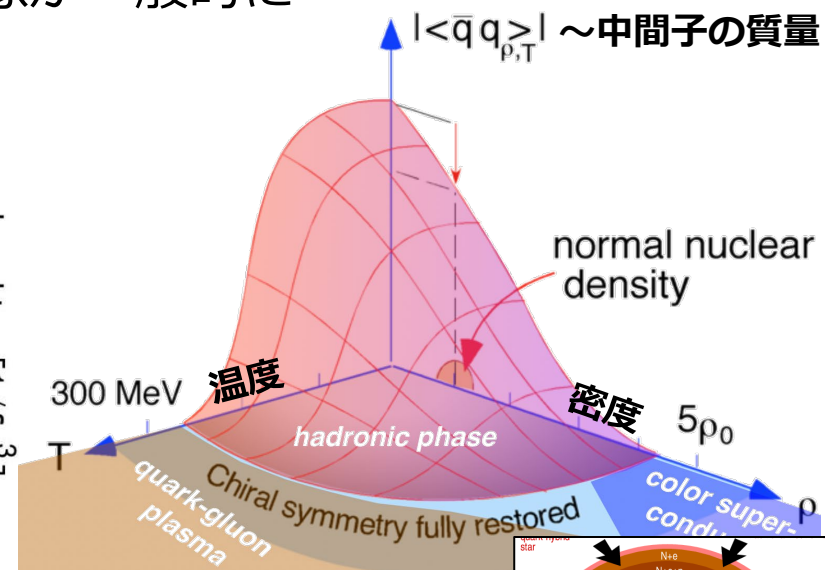
新奇的な原子核 = 反K中間子原子核

- 1960年代に提唱され[Y.Nogami, PL7(1963)288]、その後約半世紀後の2000年代初頭から議論が盛んになる
 - 1990年代後半、反K中間子原子測定（X線測定）の進歩がトリガー
 - アイソスピン $I=0$ の反K中間子-核子間の強い引力相互作用が定量的に議論出来るように
 - $\Lambda(1405)$ 粒子は反K中間子-核子の束縛状態であるという描像が一般的に

AMD (Antisymmetrized Molecular Dynamics) 計算



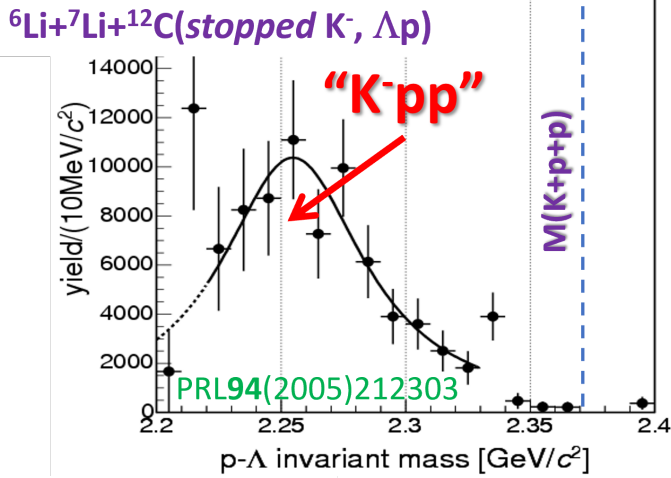
T.Yamazaki, A.Dote, Y.Akaiishi, PLB587(2004)167



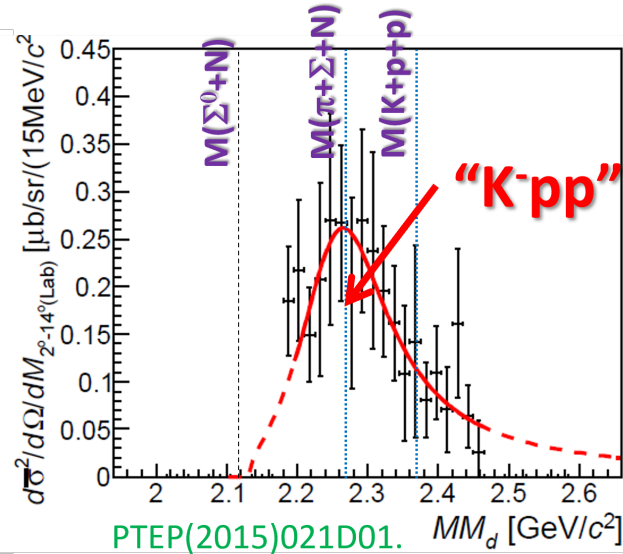
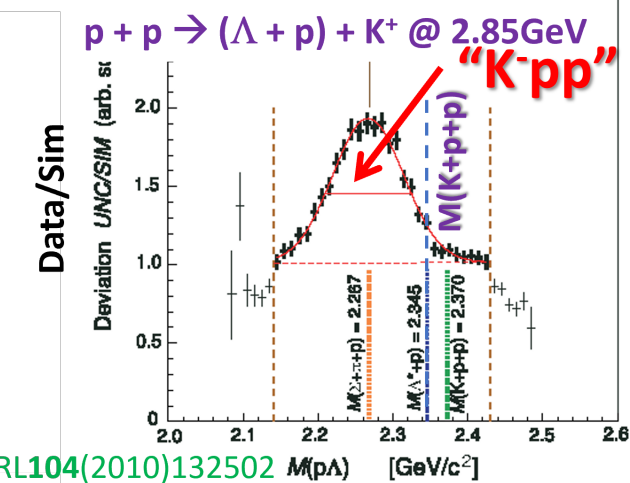
実験室において、超高密度物質を作れる？
核媒質中での中間子性質の変化が見える？

“K-pp”束縛状態探索 — 歴史

FINUDA@DAΦNE



DISTO@SATURNE



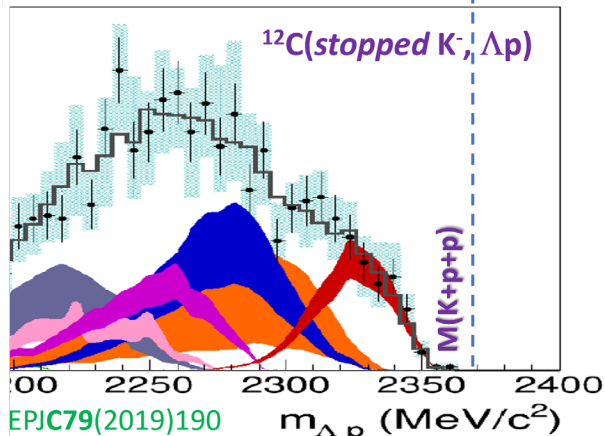
E27@J-PARC

$d(\pi^+, K^+)\Sigma^0 p @ 1.69 \text{ GeV}/c$

LEPS@SPring-8

$d(\gamma, K^+\pi)X @ 1.3-2.4 \text{ GeV}/c$
PLB728(2014)616.

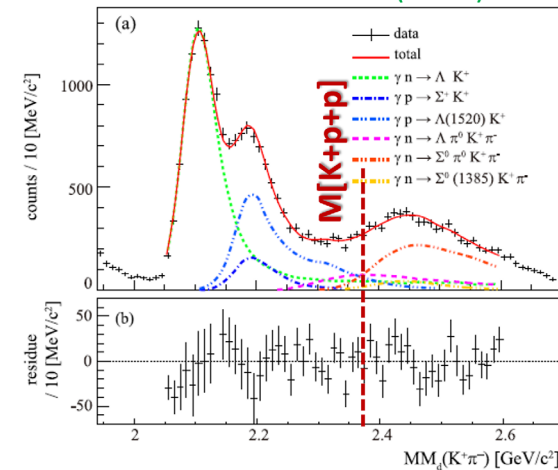
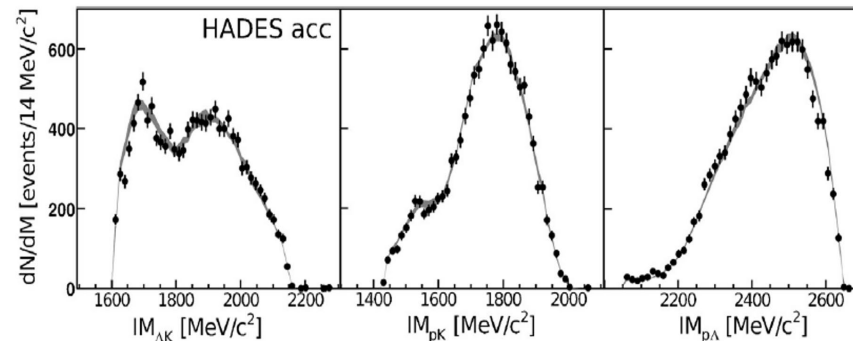
AMADEUS@DAΦNE



HADES@GSI

PLB742(2015)242

$p + p \rightarrow (\Lambda + p) + K^+ @ 3.5\text{GeV}$



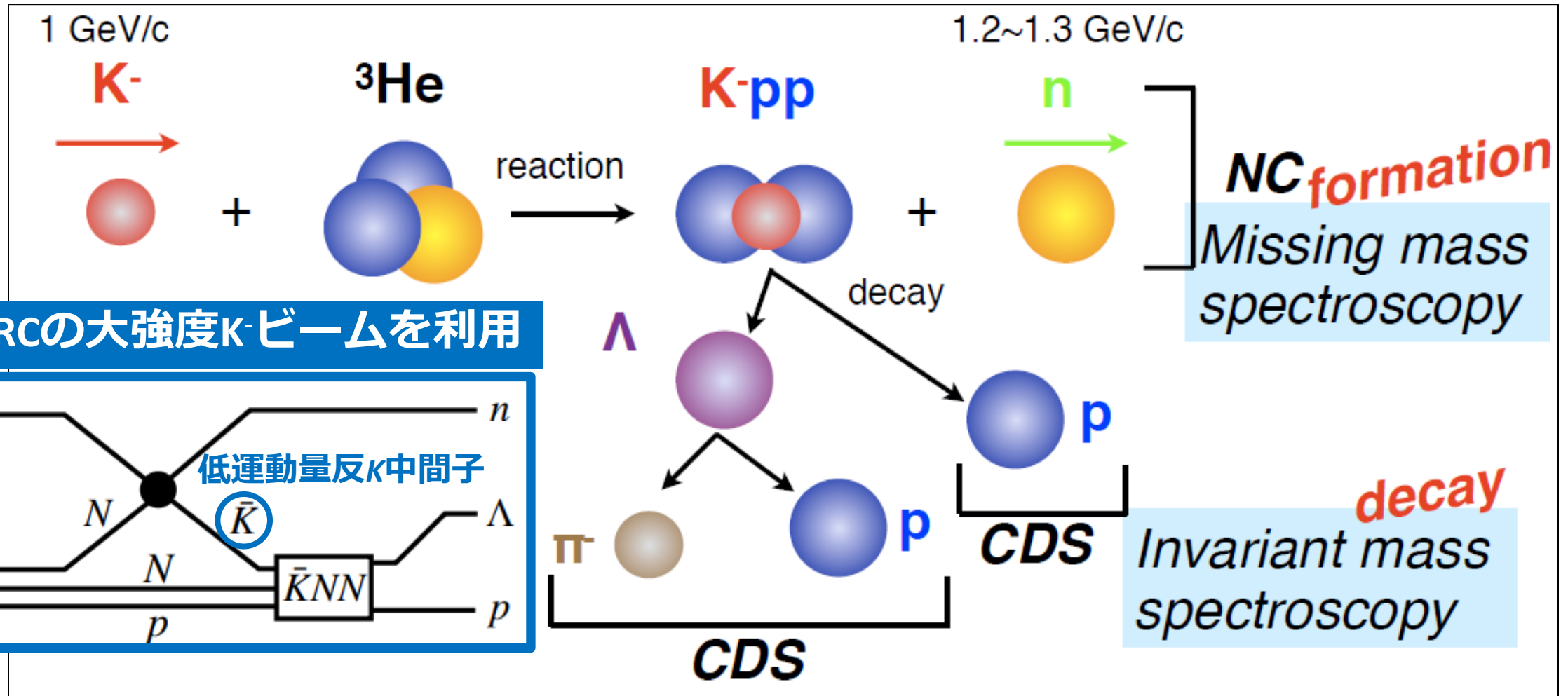
- 世界各地で探索が行われたが、決定的な証拠は見つからず
 - 複雑な反応 & 理解が難しいバックグラウンド

“K-pp”束縛状態探索 @ J-PARC E15実験

• ${}^3\text{He}(in\text{-flight } K^-, n)$ reaction @ 1.0 GeV/c



✓2核子吸収やハイペロン崩壊からのバックグラウンドを運動学的に分離可能

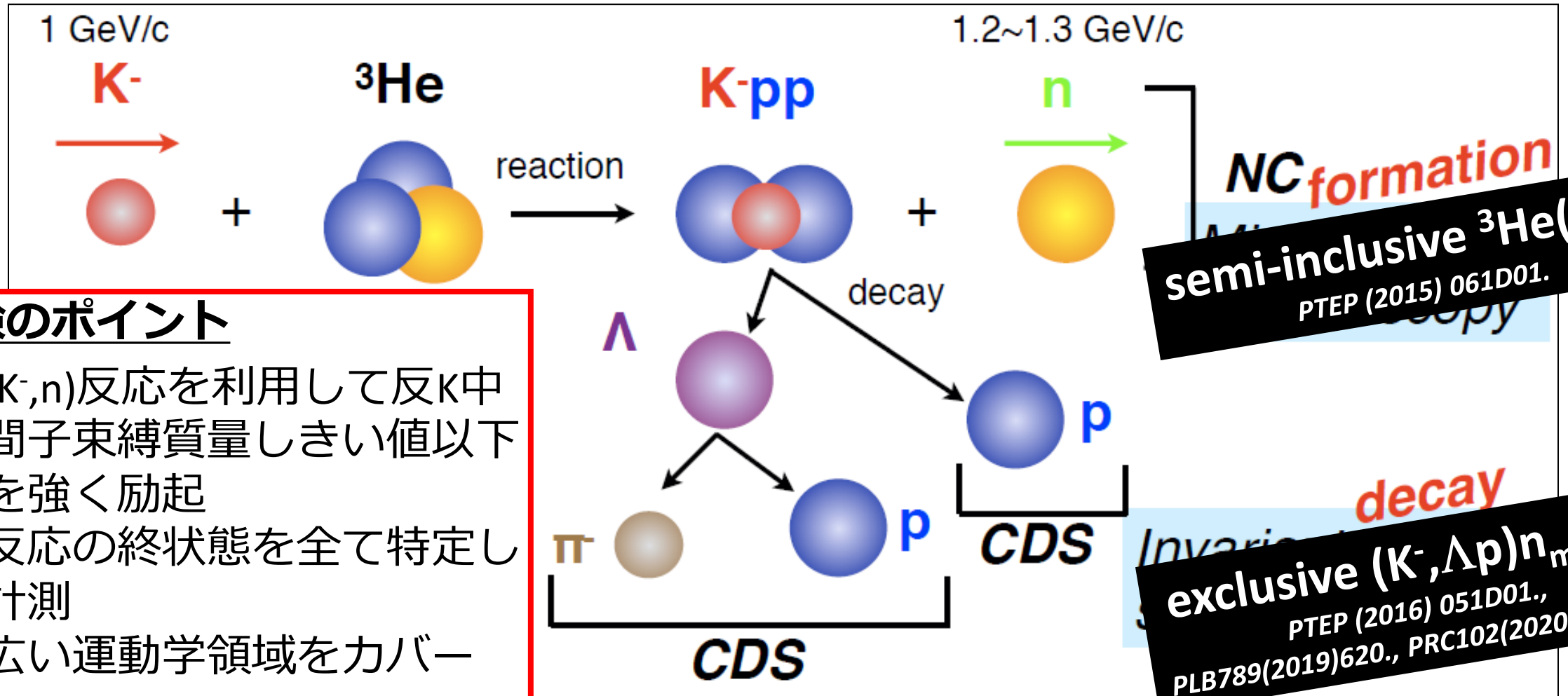


“K⁻pp”束縛状態探索 @ J-PARC E15実験

• ${}^3\text{He}(\text{in-flight } K^-, n)$ reaction @ 1.0 GeV/c



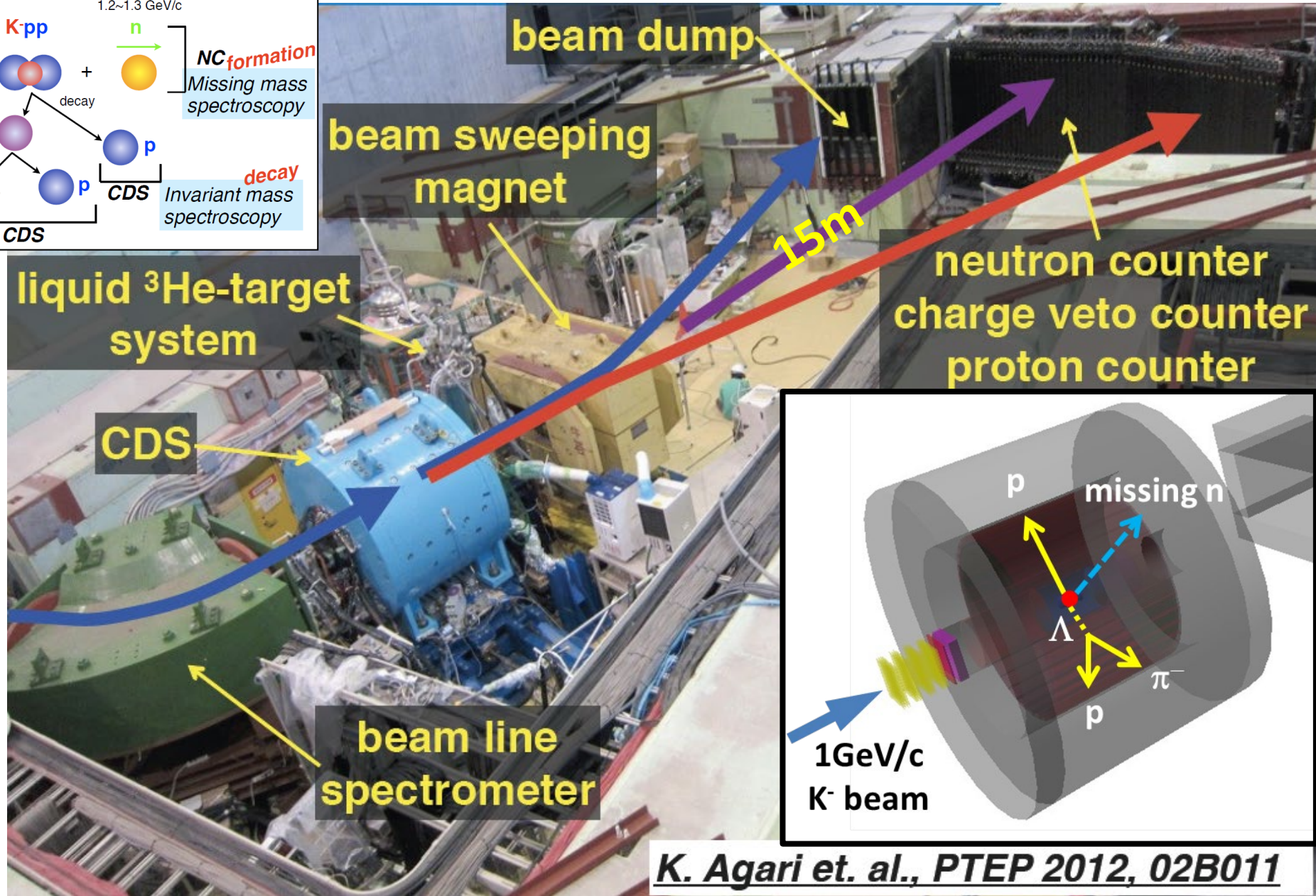
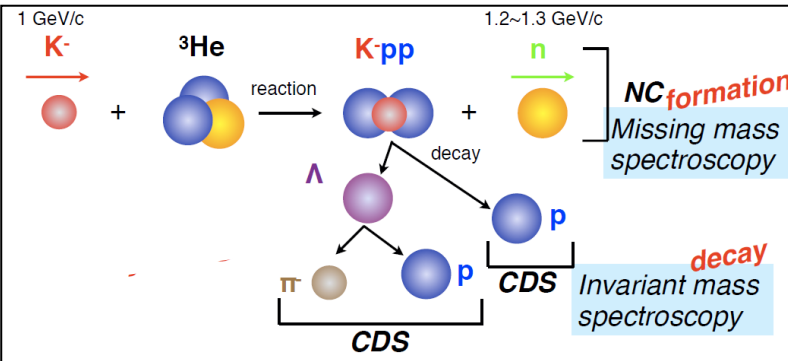
✓2核子吸収やハイペロン崩壊からのバックグラウンドを運動学的に分離可能



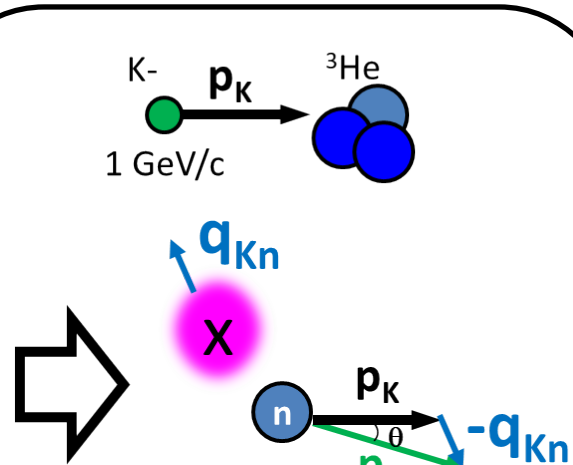
実験のポイント

- ① (K^-, n) 反応を利用して反K中間子束縛質量しきい値以下を強く励起
- ② 反応の終状態を全て特定し計測
- ③ 広い運動学領域をカバー

実験セットアップ @ K1.8BR

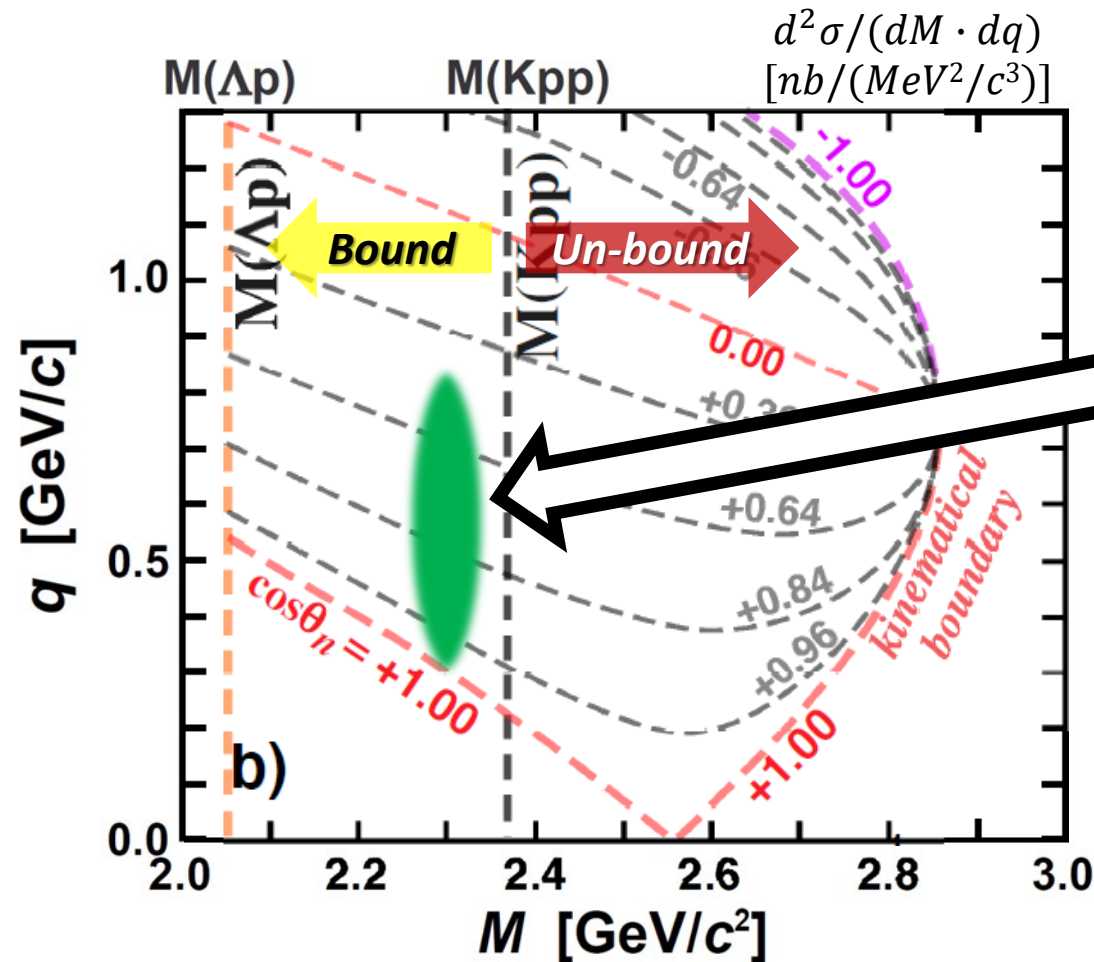


運動量移行解析による束縛状態探索

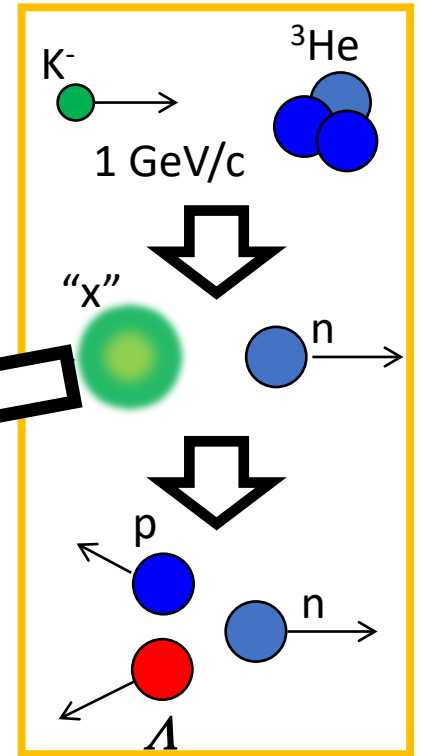


(K⁻,n)反応における運動量移行解析

- ✓ $M(\Lambda p)$ vs. q
- ✓ (e, e')反応同様、空間形状に感度を持つと期待される



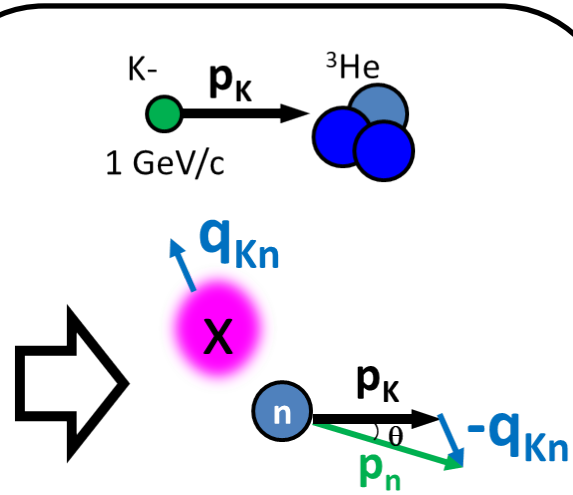
q : (K⁻,n)運動量移行量
 M : Λp 不変質量



束縛状態が存在すれば、閾値 $M(Kpp)$ 以下に運動量移行に独立なピーク構造がある

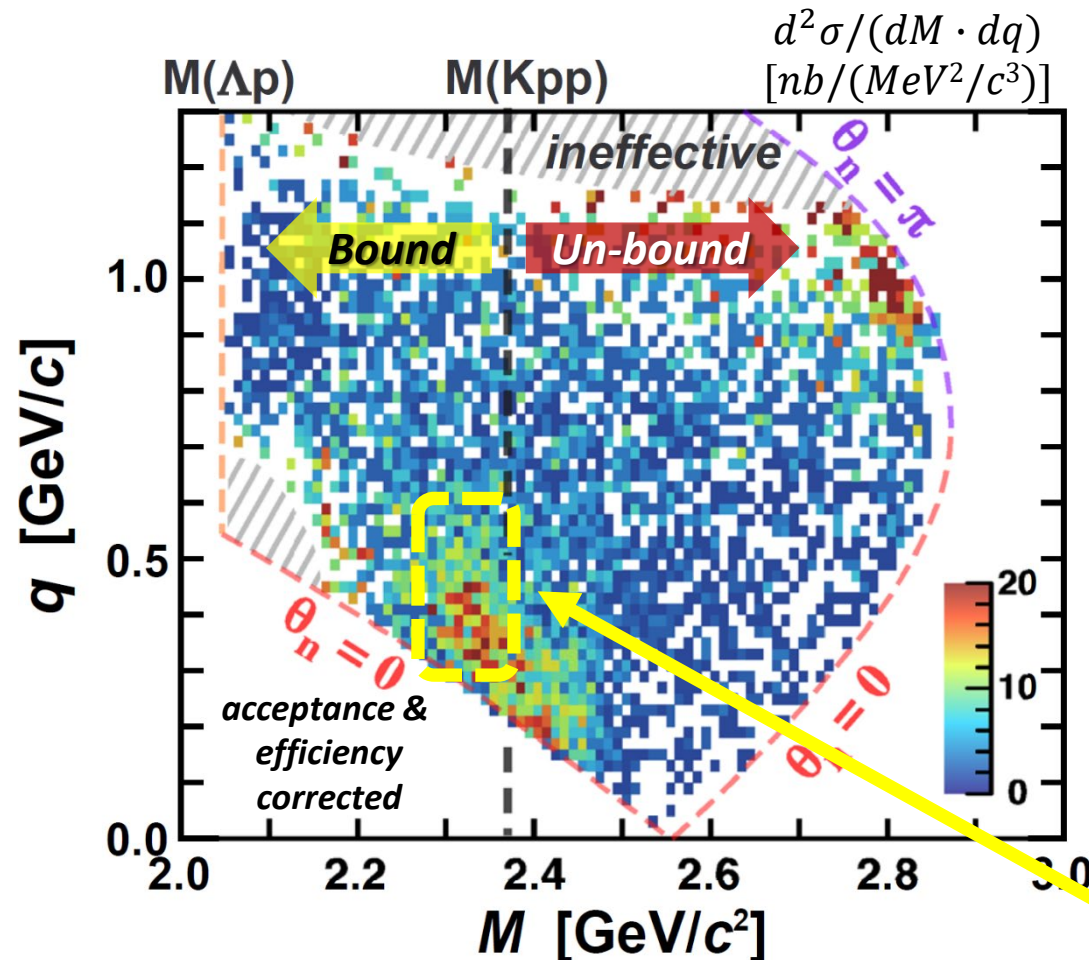
運動量移行解析による束縛状態探索

PLB789(2019)620., PRC102(2020)044002.



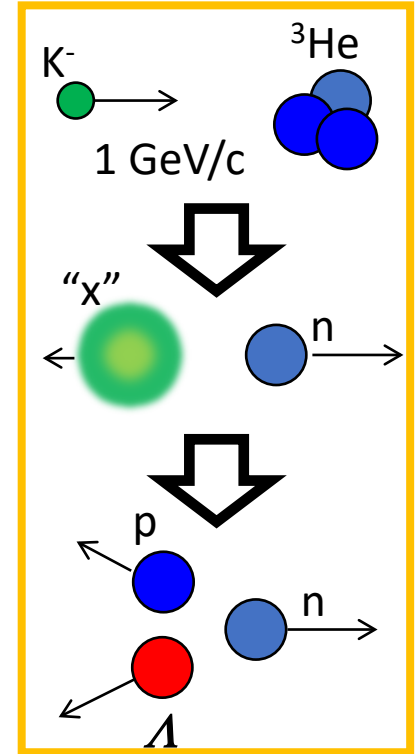
(K-,n)反応における運動量移行解析

- ✓ $M(\Lambda p)$ vs. q
- ✓ (e,e')反応同様、空間形状に感度を持つと期待される



q : (K-,n)運動量移行量

M : Λp 不変質量



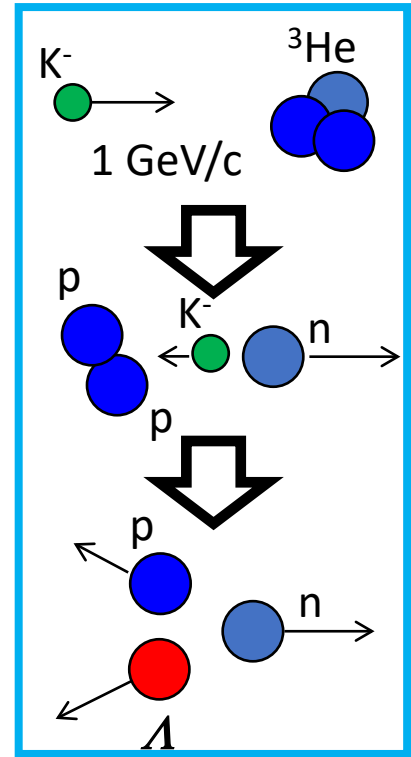
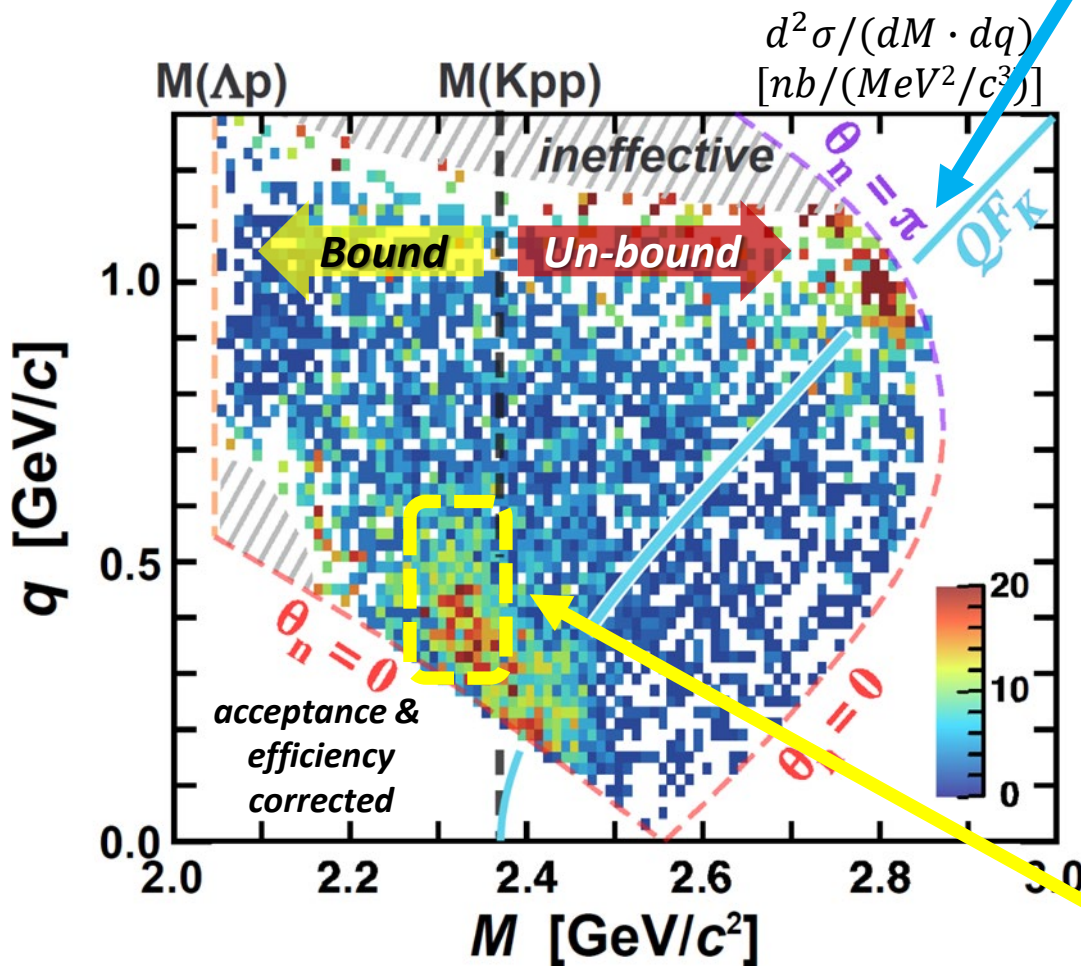
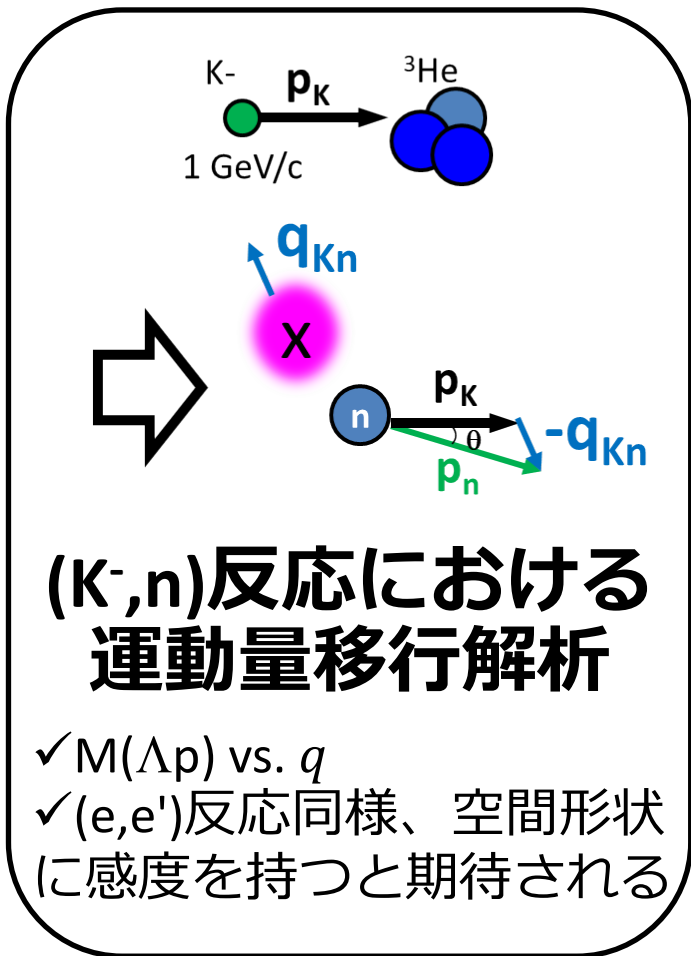
運動量移行に独立な
ピーク構造 =

束縛状態の存在

運動量移行解析による束縛状態探索

準弾性K-散乱の証拠
(+2核子吸収反応)

PLB789(2019)620., PRC102(2020)044002.



運動量移行に独立な
ピーク構造 =
束縛状態の存在

q : (K,n)運動量移行量
 M : Λp 不変質量

平面波インパルス近似(PWIA)を用いた解析

時間積分から来る B.W. 型のエネルギー項 空間積分からくる運動量項

Plane Wave Impulse Approximation

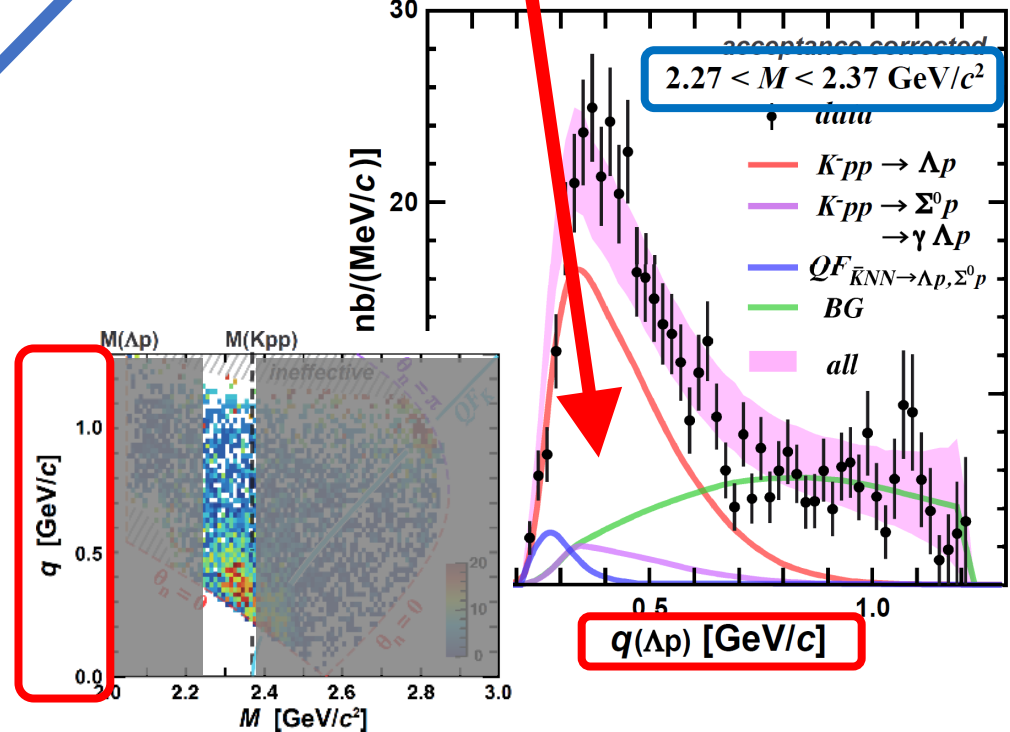
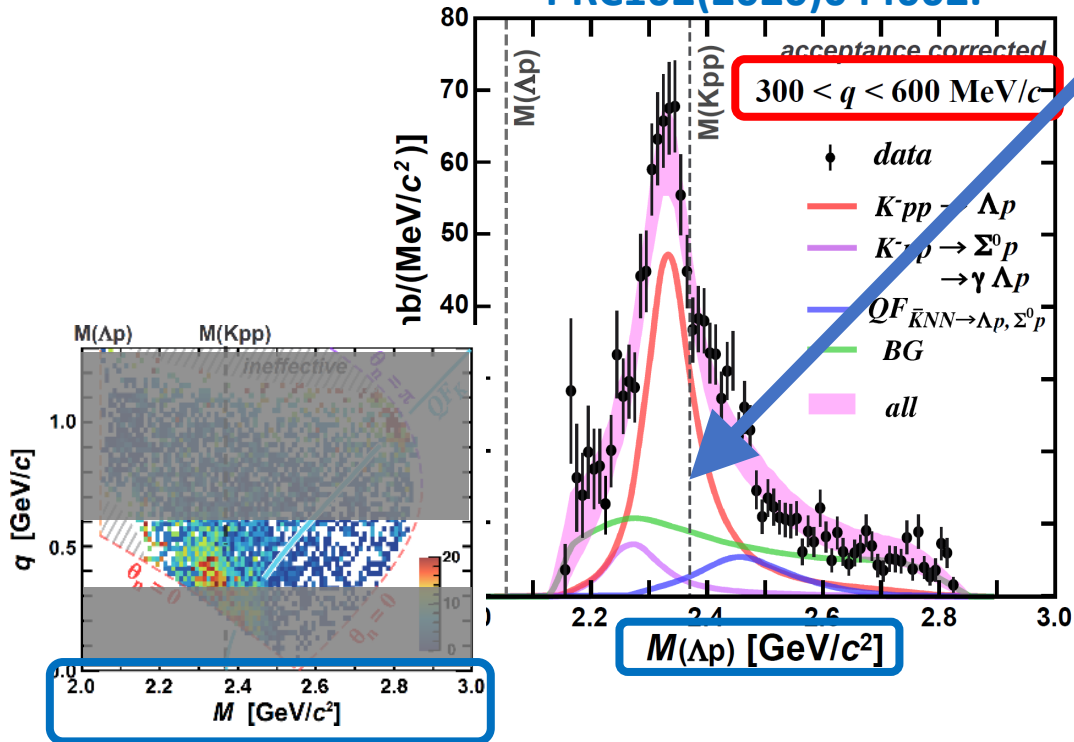
Fit with PWIA

$$\sigma(M, q) \propto \rho(M, q) \times$$

$$\frac{(\Gamma_{Kpp}/2)^2}{(M - M_{Kpp})^2 + (\Gamma_{Kpp}/2)^2} \times$$

$$\exp\left(-\frac{q^2}{Q_{Kpp}^2}\right)$$

PRC102(2020)044002.



強い束縛 = 強い $K^{\text{bar}}N$ 引力

$$B_{Kpp} \sim 40 \text{ MeV}, \Gamma_{Kpp} \sim 100 \text{ MeV}$$

束縛エネルギー

崩壊幅

広い運動量幅 = コンパクトな系を示唆

$$Q_{kpp} \sim 400 \text{ MeV} \text{ (cf., } Q_{QF} \sim 200 \text{ MeV)}$$

反応形状因子 (構造因子)

理論計算によるデータの解釈

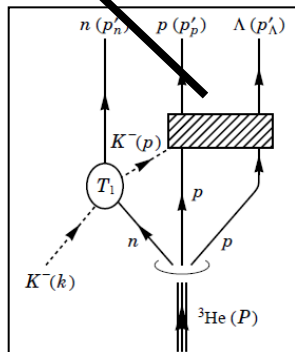
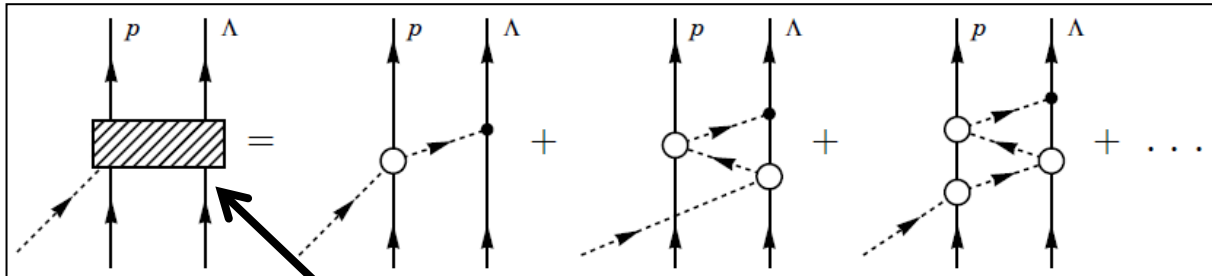
カイラルユニタリーモデルに基づいた計算では、
構造は“K⁻pp”束縛状態であることと無矛盾

PTEP

Prog. Theor. Exp. Phys. **2016**, 123D03 (27 pages)
DOI: 10.1093/ptep/ptw166

On the structure observed in the in-flight
 ${}^3\text{He}(K^-, \Lambda p)n$ reaction at J-PARC

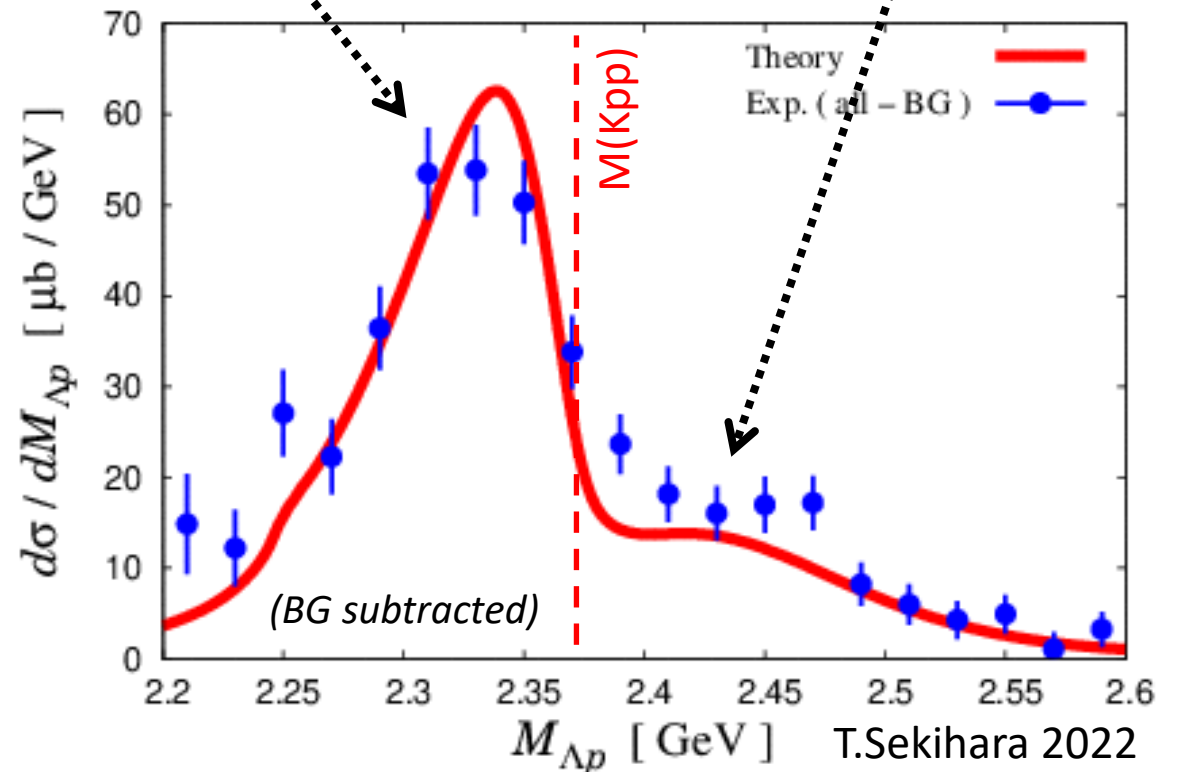
Takayasu Sekihara^{1,*}, Eulogio Oset², and Angels Ramos³



**理論的解釈が
不可欠！**

**K⁻bar NN
束縛状態**

**準弾性K-散乱
(+2核子吸収反応)**



我々は何を発見したのか？

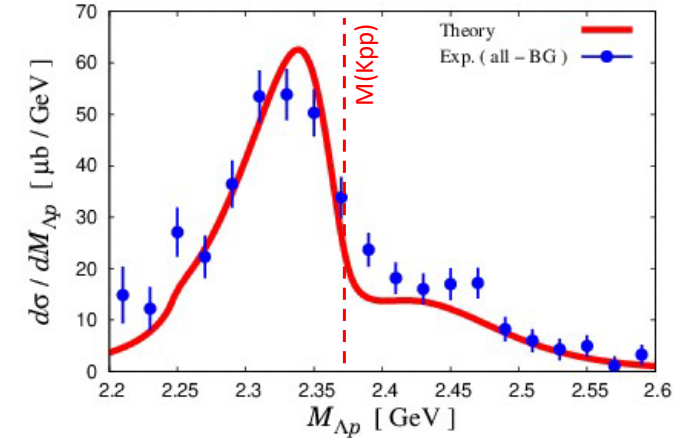
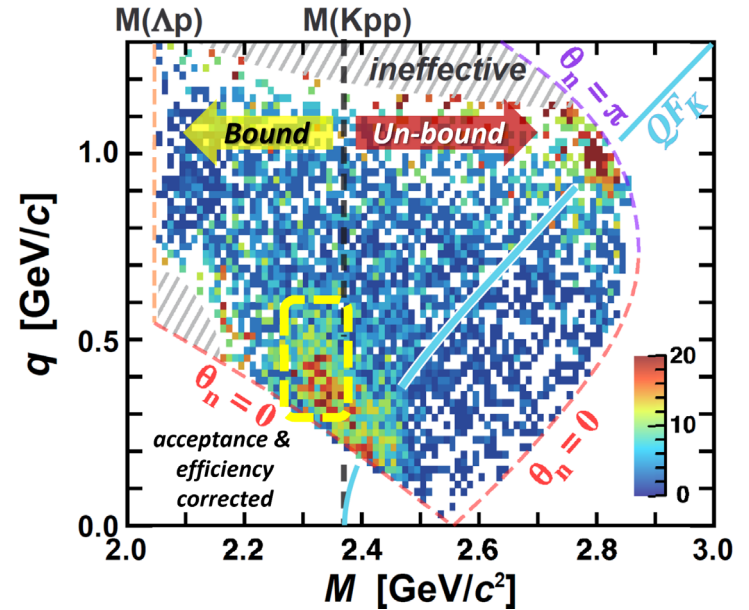
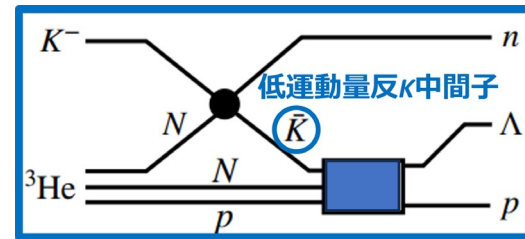
✓ 運動量移行に依存しない質量閾値 $M(Kpp)$ 以下の構造

- 束縛状態が存在
- 通常原子核より約10倍大きい束縛エネルギー
- 大きな運動量移行で生成

✓ 準弾性K-散乱の証拠

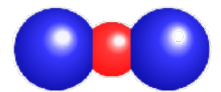
- 反応中に中間状態の反K中間子が存在

◆ “K⁻pp”を用いた理論計算と無矛盾



観測した束縛状態 = “K⁻pp”束縛状態

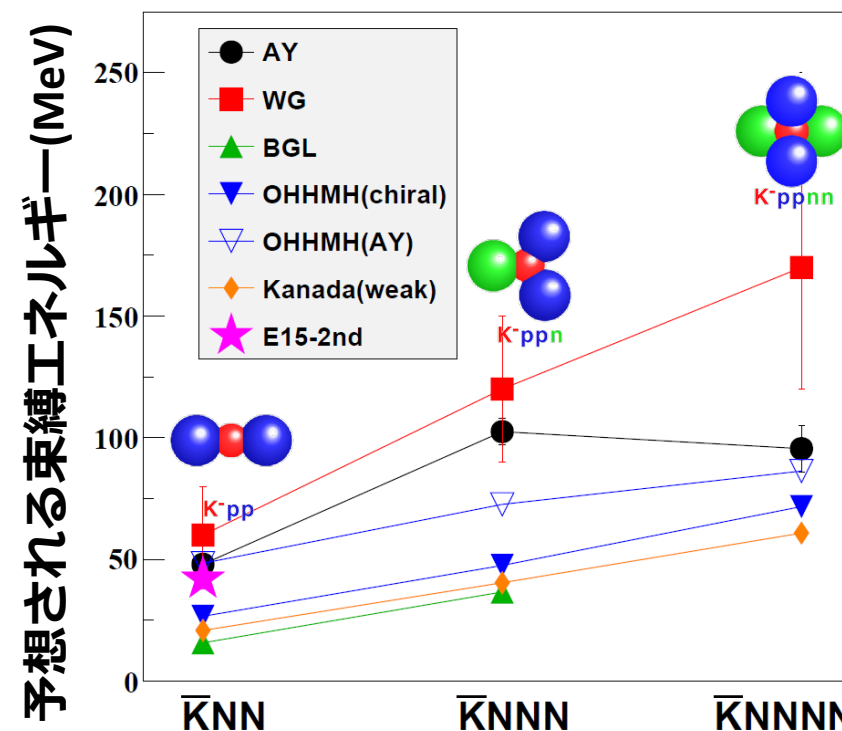
→ コンパクトで密度の高い状態である可能性を示唆



K⁻pp

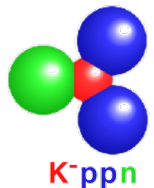
反K中間子原子核のさらなる解明へ向けた 次のステップ

1. 反K中間子原子核の核子数依存性を実験的に初めて導出する
 - 実験的解析が比較的易しい少数系に着目
 - 束縛エネルギー・崩壊分岐比・運動量移行
2. 精密な理論計算とその核子数依存性により内部構造を解明する



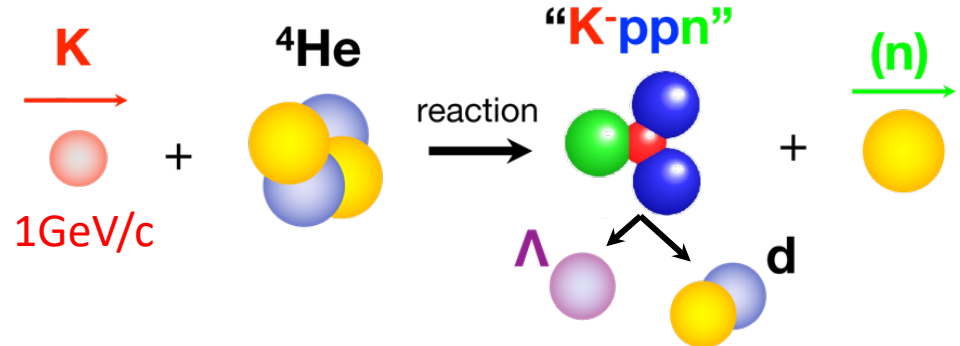
- 「陽子や中性子と同様、中間子も実粒子として原子核の構成要素となり得る」という新しい原子核描像をより確固たるものへ
- 有限バリオン密度での中間子質量変化・ $\bar{K}N$ 間の強い引力による高密度化など、ハドロン間相互作用が作り出すハドロン多体系の物性の探究へ

“K⁻ppn”/“K⁻ppnn” の包括的測定 @ J-PARC E80実験



状態	反応	崩壊
“K ⁻ ppn”	⁴ He(K ⁻ ,n)	Λd/Λpn/...

①



②

Λpnなどの多粒子崩壊の崩壊分岐比を測定

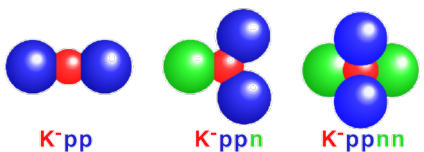


状態	反応	崩壊
“K ⁻ ppnn”	⁶ Li(K ⁻ ,d)	Λt/Λdn/...

③

初の⁶Li(K⁻,d)測定

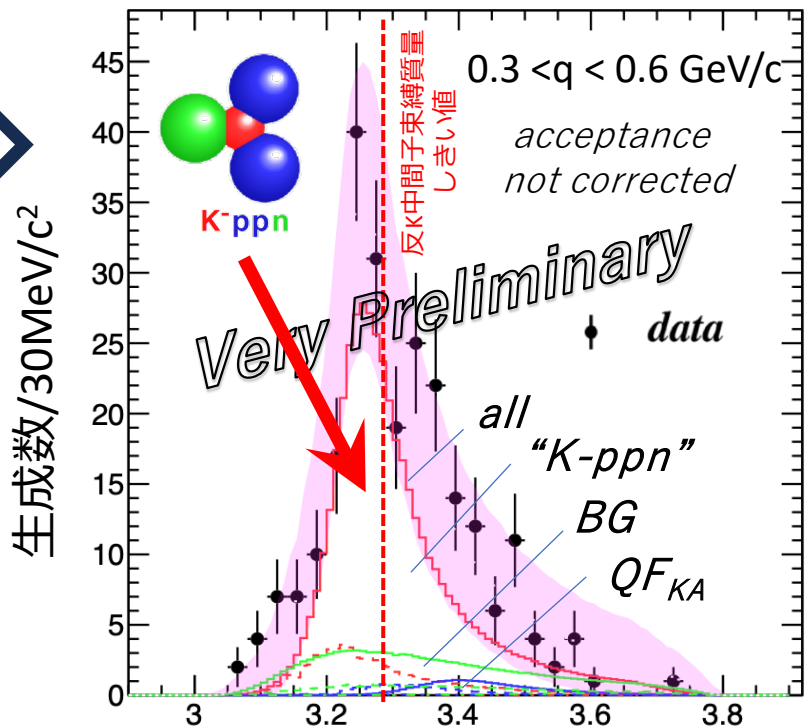
④



より核子数依存性を導出

同じ反応を用いたテスト実験結果

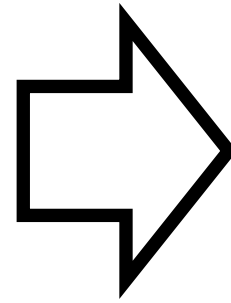
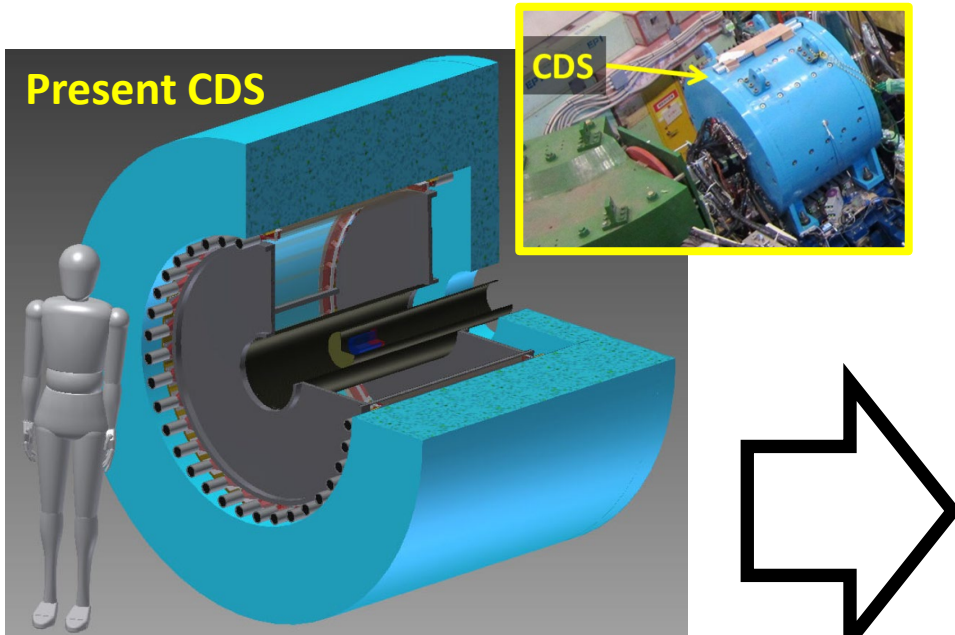
“K⁻ppn”束縛状態を示唆



崩壊粒子から求めた質量 (GeV/c²)

- “K⁻ppn”は“K⁻pp”より大きな束縛エネルギーを示唆 (~60MeV)

大型超伝導ソレノイド・スペクトロメーター



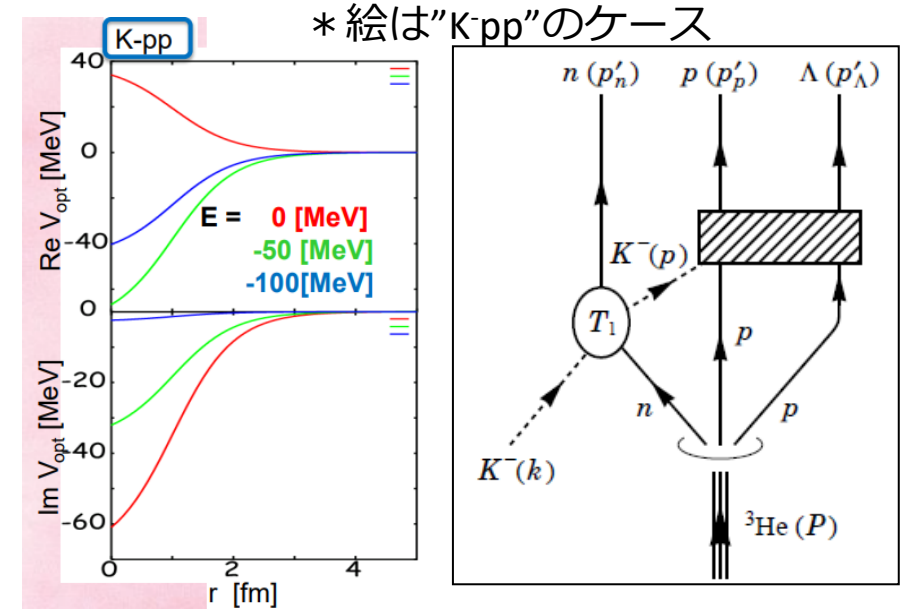
- ✓立体角: x1.6 (59%→93%)
- ✓中性子検出効率: x8 (3%→15%x1.6)

**2つの大型科研費を得て
鋭意製作中
(2026年度完成予定)**

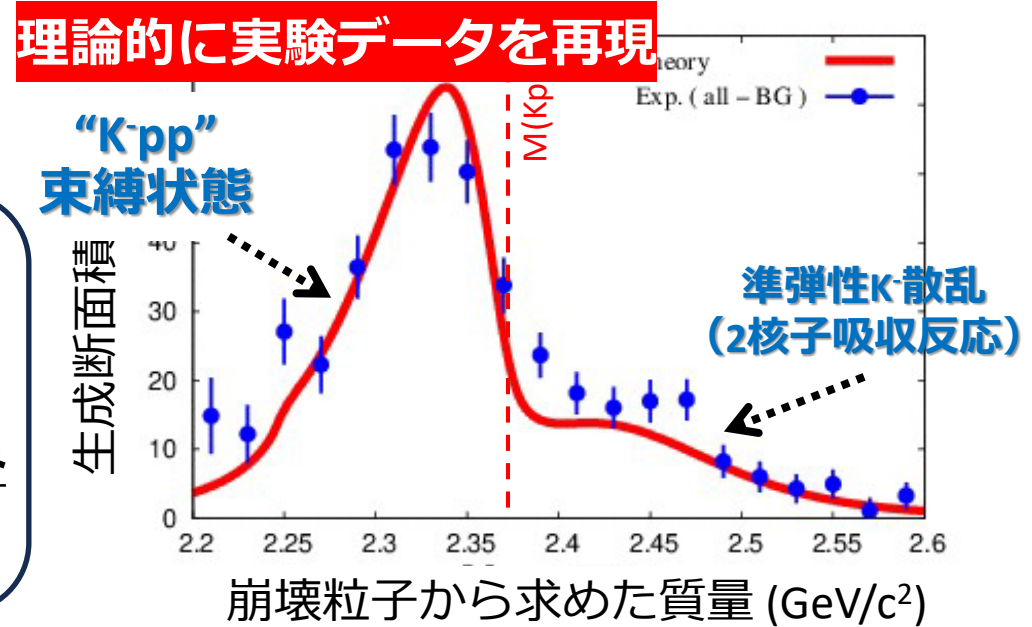


内部構造解明に向けた理論研究

- ① **カイラル動力学**に基づいて $\bar{K}^{-3}\text{He}$ 、 $\bar{K}^{-4}\text{He}$ 系の精密な光学ポテンシャルを構築する
- ② 得たポテンシャルを用いて構造計算を行い、反応計算により**スペクトル**を導出する
- ③ 実験と理論で得たスペクトルを比較し、核子数依存性の観測量と理論とを系統的に研究することにより、その**内部構造解明**に挑む



PTEP(2016)123D03

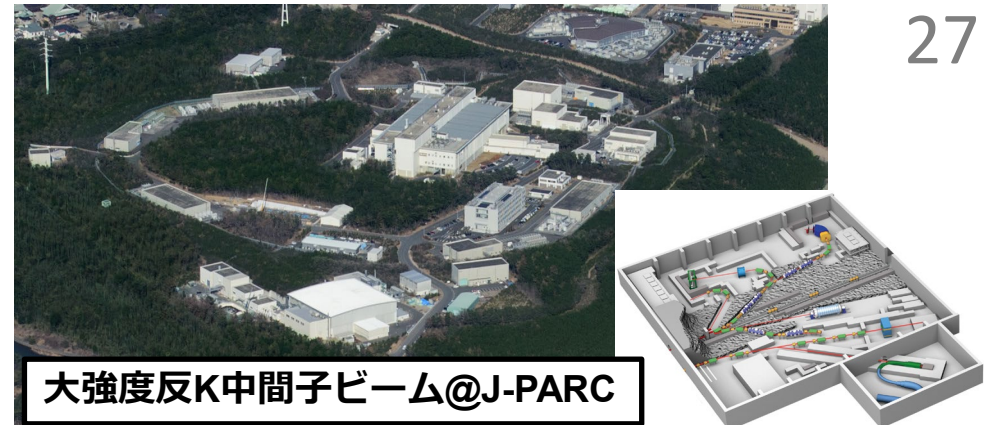


低エネルギーQCDの理解には、基礎となる $\bar{K}N$ 相互作用の**第一原理計算**が不可欠

格子QCDに基づく $\bar{K}N$ 相互作用導出の新たな試み

格子QCD-有効理論-実験を繋ぐ**理論的枠組みの構築**を行い、反K中間子原子核の第一原理計算に基づく理解へ繋げる

まとめ



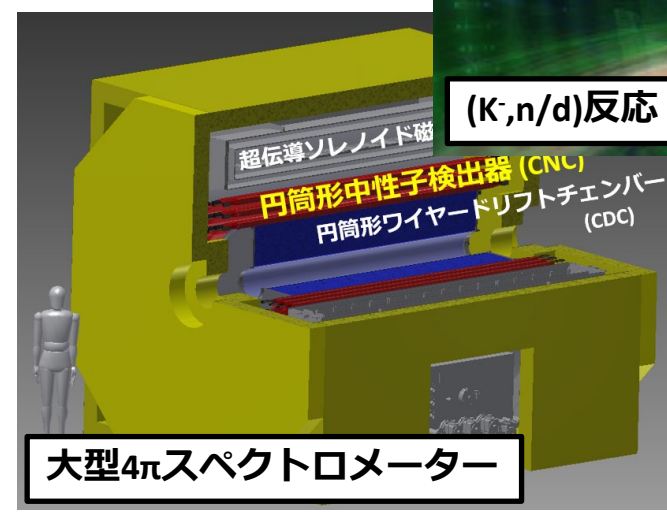
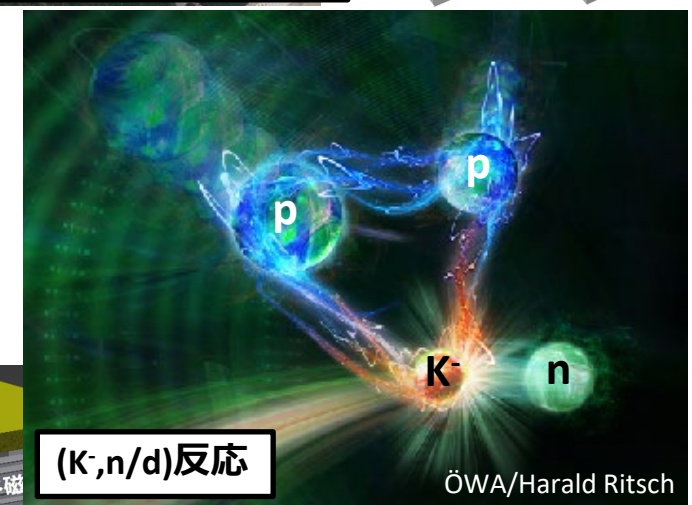
●反K中間子原子核“ K^-pp ”を発見@J-PARC E15

●次のステップ@J-PARC E80

- ✓ 実験的に核子数依存性を導出する (“ K^-ppn ”, “ K^-ppnn ”)
 - 2026年度実験開始予定
 - 大強度K-ビーム@ハドロン実験施設が実現
- ✓ 理論研究と共に内部構造の解明を目指す



- 新しい原子核描像の確立
- ハドロン多体系物性の探究



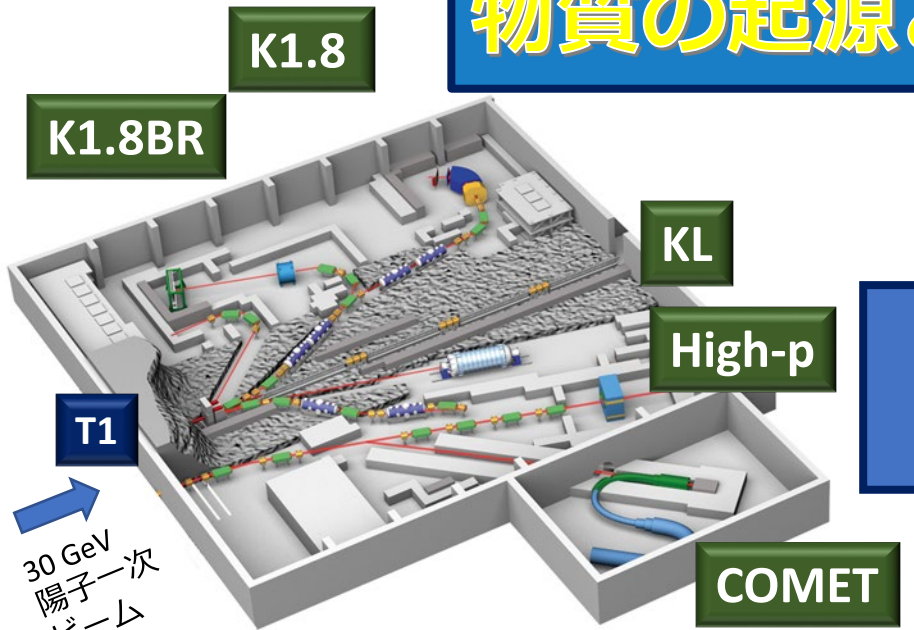
クォークから中性子星へ至る、量子多体系の謎に挑む

ハドロン実験施設拡張計画

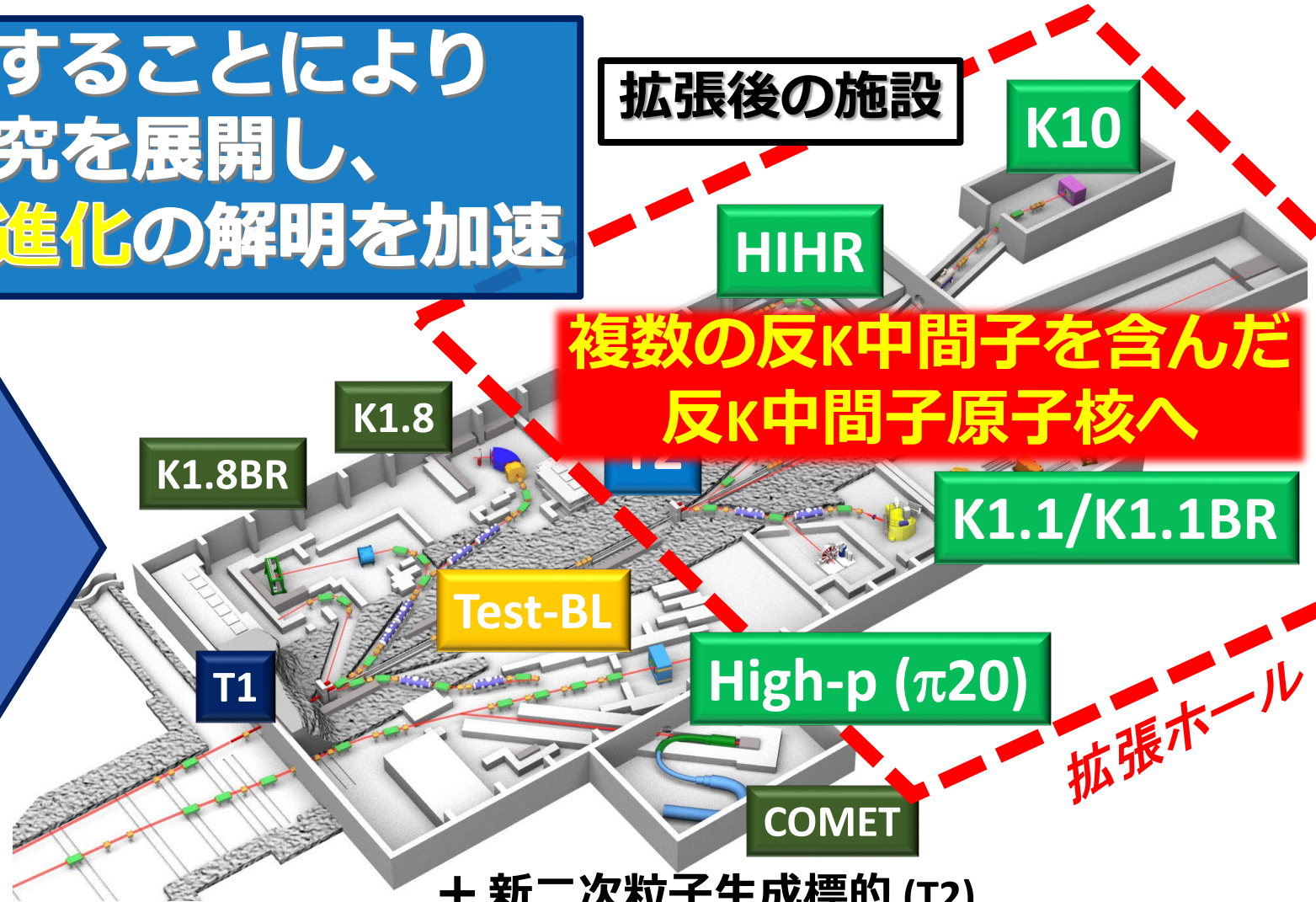
現在の施設
(2009～)

施設を拡張することにより
新たな研究を展開し、
物質の起源と進化の解明を加速

拡張後の施設



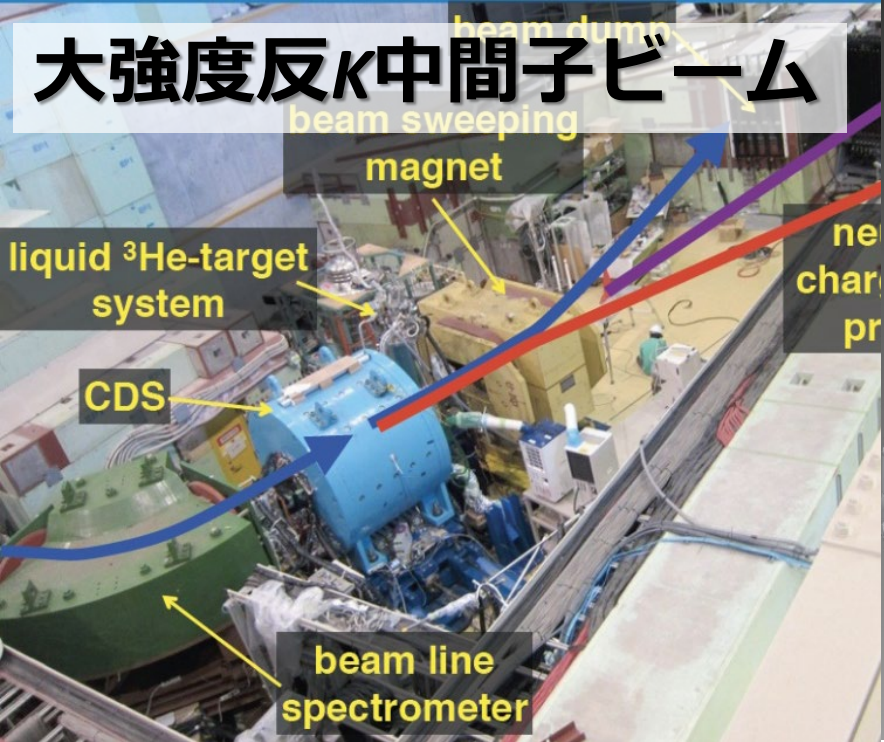
二次粒子生成標的 (T1)
荷電粒子ビームライン (K1.8/K1.8BR)
高運動量ビームライン (High-p)
中性粒子ビームライン (KL)
ミュオンビームライン (COMET)



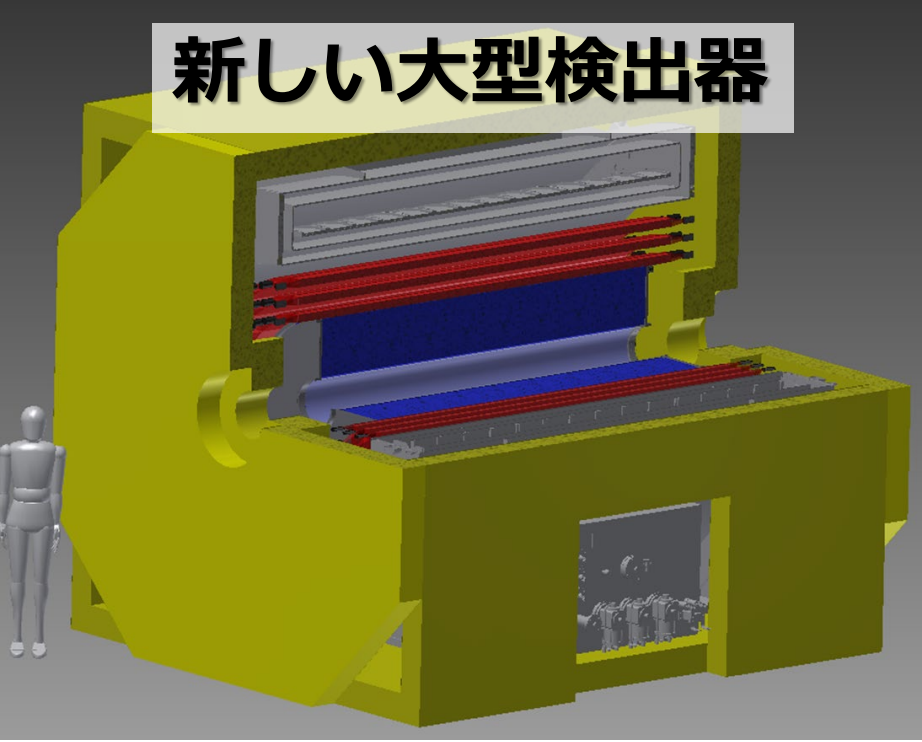
+ 新二次粒子生成標的 (T2)
+ 新ビームライン (HIHR, K1.1/K1.1BR, KL2, K10)
+ 機能を向上させたビームライン (High-p (π20), Test-BL)

拡張ホール

大強度反K中間子ビーム

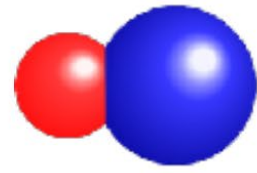


新しい大型検出器

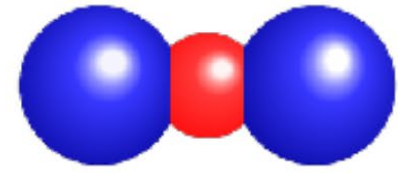


反K中間子原子核 の新たな幕開け

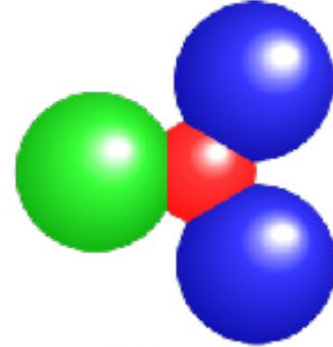
ありがとうございました



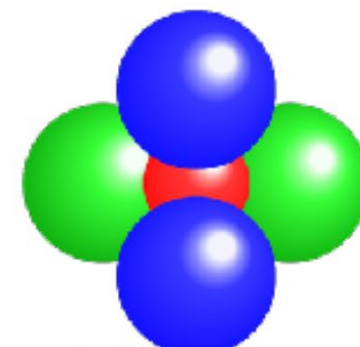
K^-p



K^-pp



K^-ppn



K^-ppnn