

EXPERIMENTAL STUDY OF $\bar{K}NN$ AND
FUTURE KAONIC NUCLEI EXPERIMENTS AT J-PARC

J-PARC (K1.8BRビームライン)における
 $\bar{K}NN$ の実験的研究と
これからの反K中間子原子核に関する実験

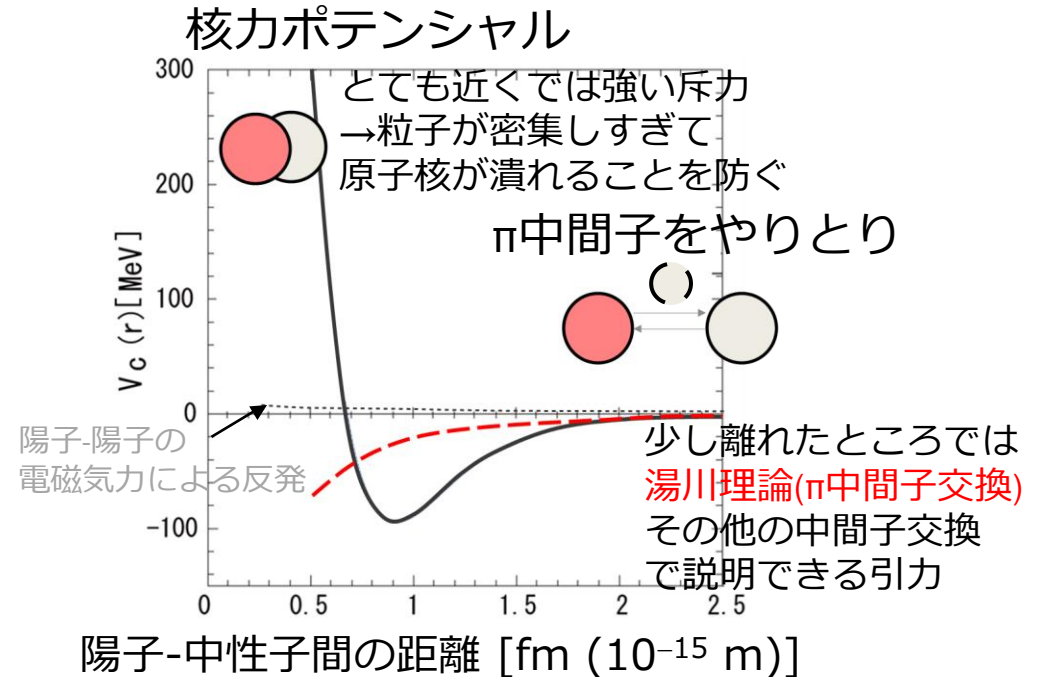
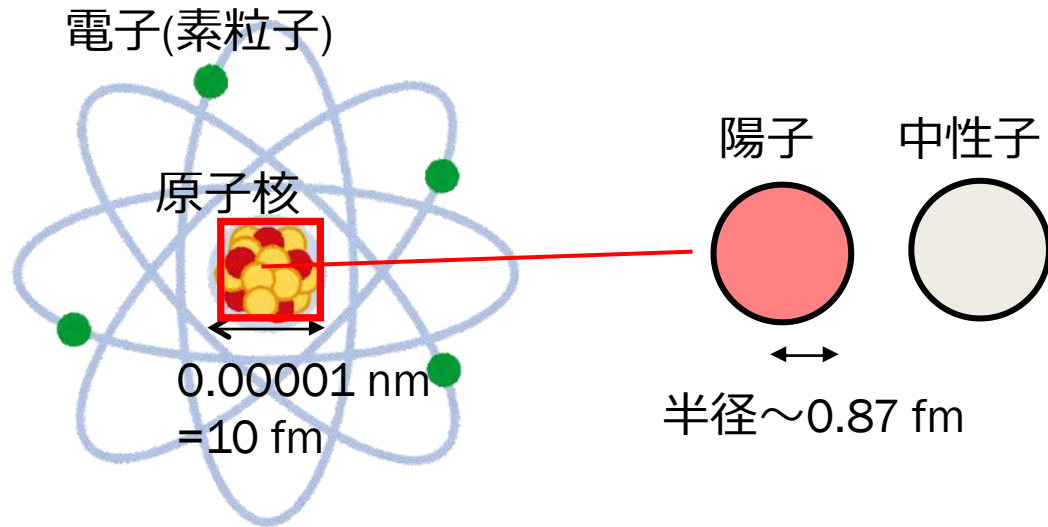
JAEA 先端基礎研究センター 博士研究員
七村 拓野

CONTENTS

- 強い相互作用の研究
 - QCD、クォーク・ハドロン・原子核
- 反K中間子と核子間の相互作用とK1.8BRビームライン@J-PARC
 - “ K - pp ”探索実験 (J-PARC E15実験)
- これからの反K中間子原子核原子核の実験的研究
 - 大立体角スペクトロメータの開発
 - 予定されている実験
 - $\bar{K}NNN$ 探索実験 (E80実験)
 - $\bar{K}NN$ 状態のスピンパリティの測定実験(P89)

原子核と核力

- 原子核は陽子と中性子からできている
- 核力:陽子と中性子を結び付け原子核を形作る
 - **π 中間子**交換(湯川秀樹が提唱)などにより生み出される力
 - 自然界の強い相互作用



クォークとハドロン

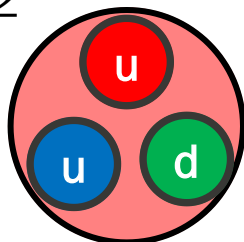
- 陽子と中性子をさらに細かく見ると、素粒子クォーク3つから構成されている
- π 中間子もクォークと反クォークの組から構成されていることがわかった
 - 6種類あるクォークのうちのアップクォークとダウンクォーク
- u, d 以外のクォークの組み合わせも含めて、
 - クォーク3つから構成されている粒子の仲間をバリオン
 - クォークと反クォークの2つから構成されている粒子の仲間をメソン(中間子)
 - 合わせてハドロン

アップ (u)	チャーム (c)	トップ (t)
 $\sim 2 \text{ MeV}/c^2$ ($300 \text{ MeV}/c^2$)	 $1.15 \sim 1.35 \text{ GeV}/c^2$	 $170 \sim 180 \text{ GeV}/c^2$
ダウン (d)	ストレンジ (s)	ボトム (b)
 $\sim 8 \text{ MeV}/c^2$ ($300 \text{ MeV}/c^2$)	 $\sim 100 \text{ MeV}/c^2$ ($450 \text{ MeV}/c^2$)	 $4 \sim 5 \text{ GeV}/c^2$

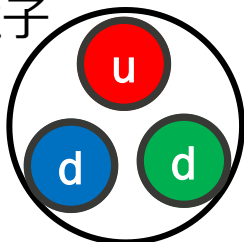
ハドロン

バリオン

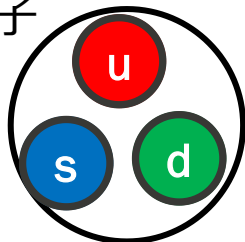
陽子



中性子

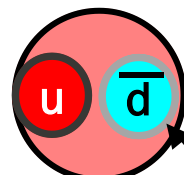


Λ 粒子



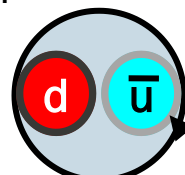
メソン(中間子)

π^+



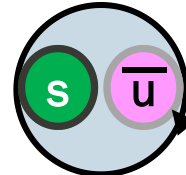
反dクォーク

π^-



反uクォーク

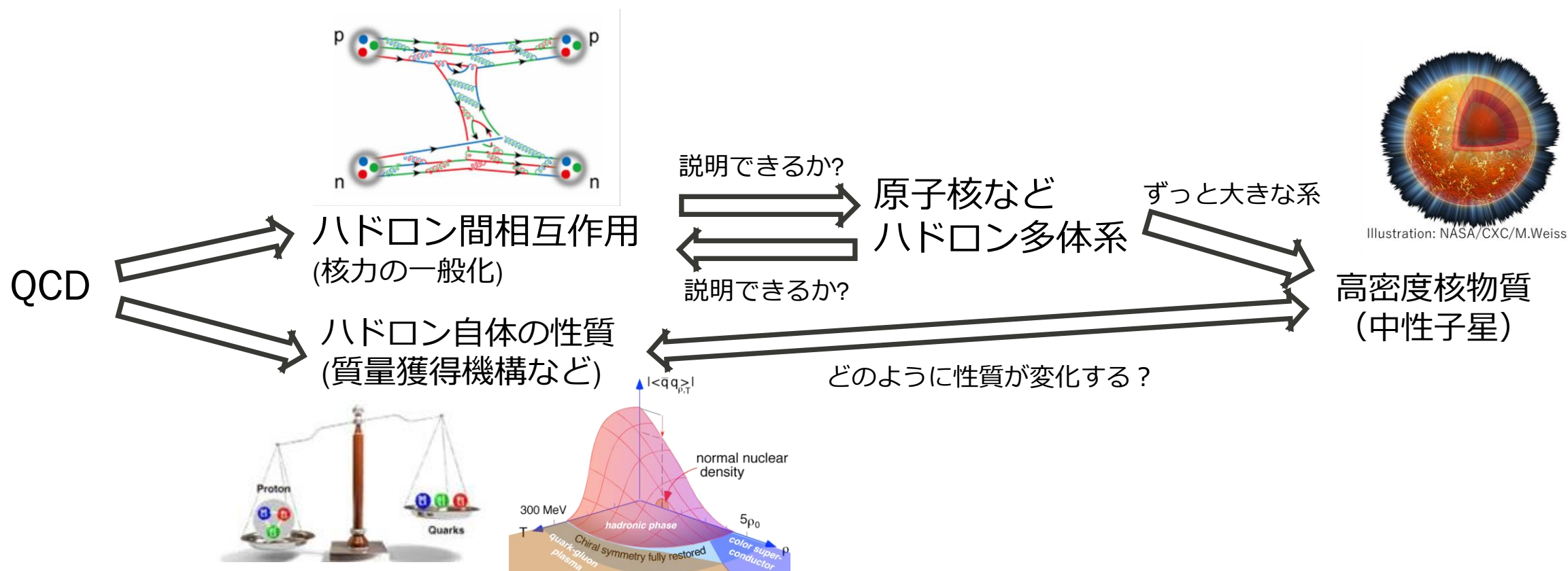
K粒子



反uクォーク

強い相互作用の研究

- 確立された基本原理である量子色力学(QCD)に基づき、クォーク・ハドロン・原子核にまたがる豊かな現象を理解したい
 - 実験データの集積と現象論の構築
- 近年は第一原理計算も発展



ストレンジネス核物理

- uクォーク、dクォーク以外のクォークも含むハドロンを作ると、ハドロンがクォークでできていることに由来する効果などによって特徴的な性質を持つことがある
 - 強い斥力(Σ^+ -p相互作用), 強い引力(flavor-singlet, $\bar{K}N(I=0)$)
- sクォークはu,dクォークに比較的質量が近い
 - 対称性に基づいた取り扱い、もしくは破れの効果
 - 中性子星中などに出現する可能性

アップ (u)

$\sim 2 \text{ MeV}/c^2$
($300 \text{ MeV}/c^2$)

チャーム (c)

$1.15 \sim 1.35 \text{ GeV}/c^2$

トップ (t)

$170 \sim 180 \text{ GeV}/c^2$

ダウン (d)

$\sim 8 \text{ MeV}/c^2$
($300 \text{ MeV}/c^2$)

ストレンジ (s)

$\sim 100 \text{ MeV}/c^2$
($450 \text{ MeV}/c^2$)

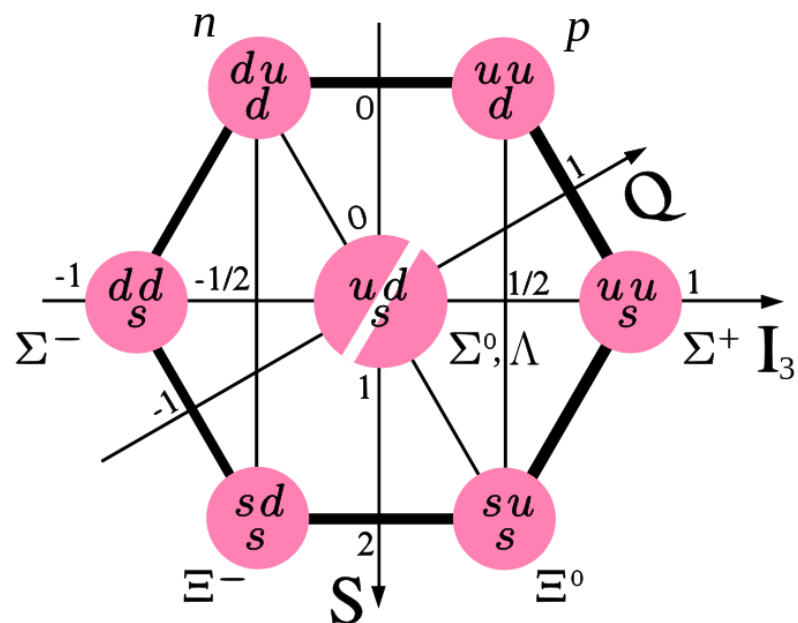
ボトム (b)

$4 \sim 5 \text{ GeV}/c^2$

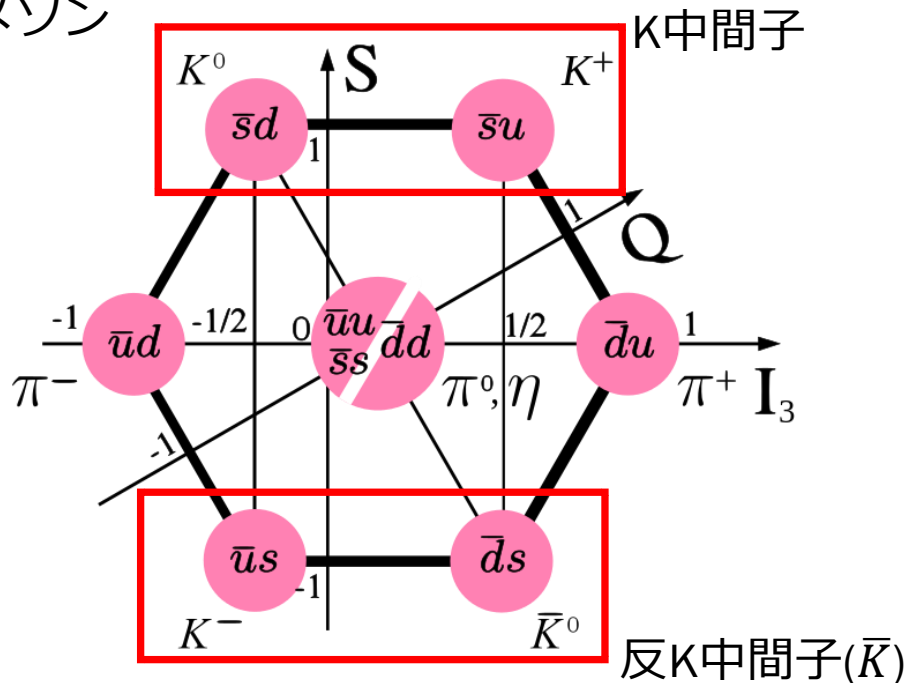
()内はバリオンを構成するときの
"実質的な"クォークの質量

→ストレンジクォークを含むハドロン多体系を調べる

バリオン

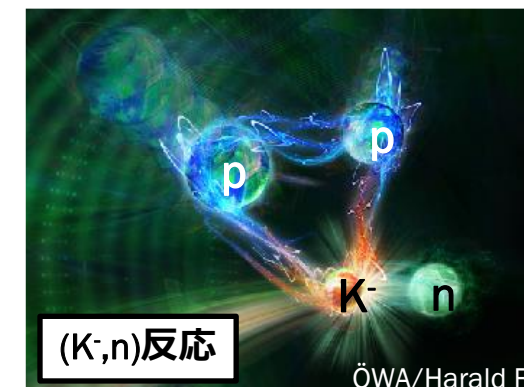
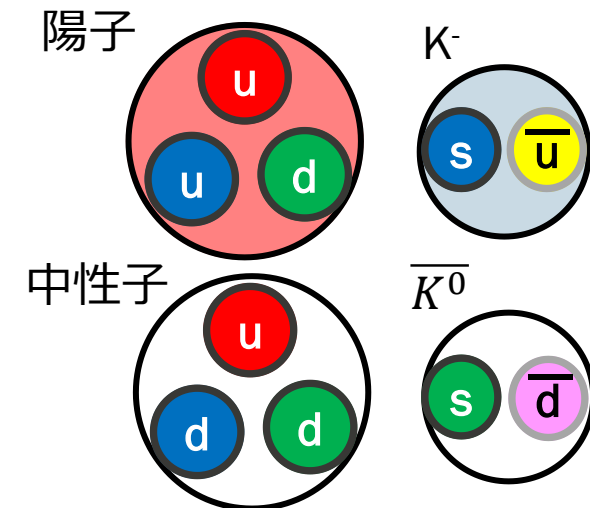


メソン



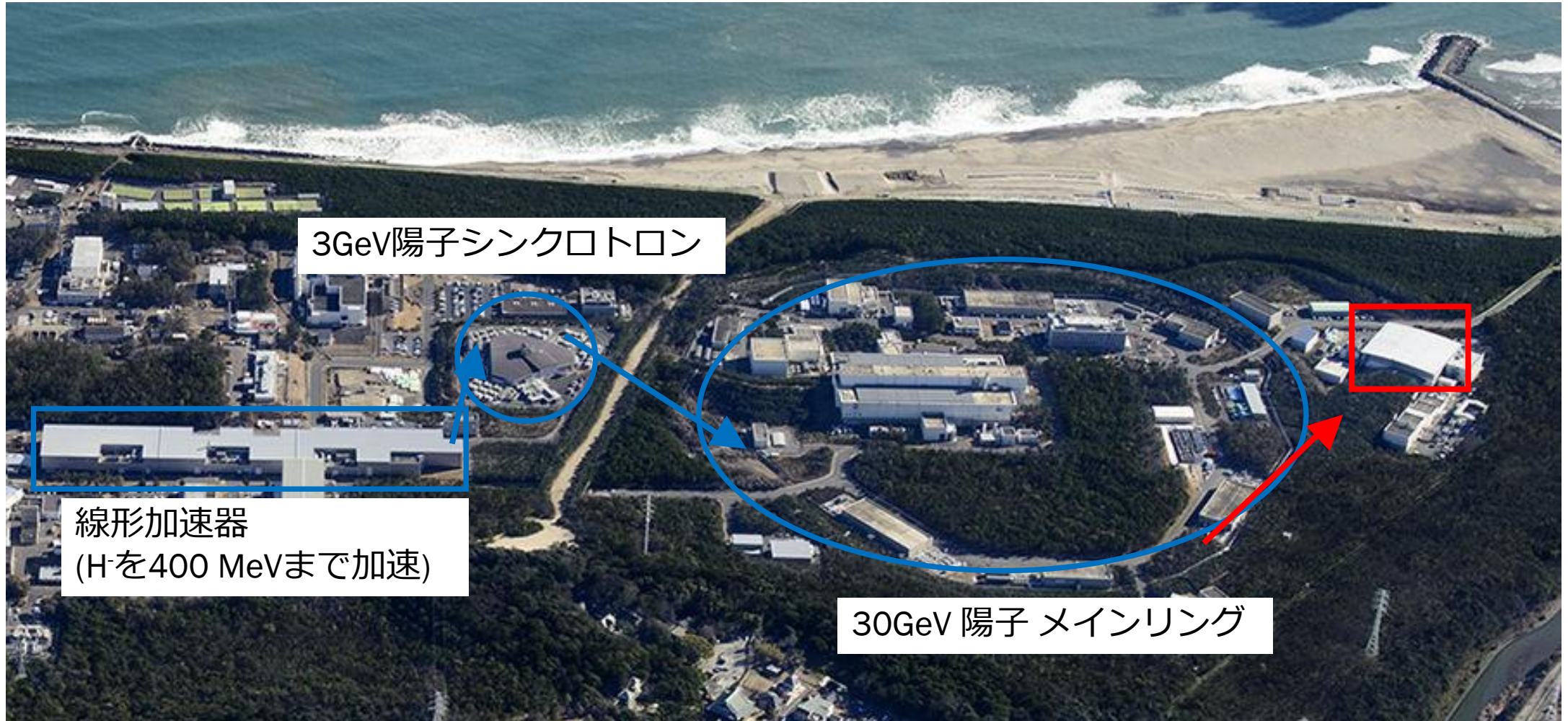
反K中間子と核子の間の相互作用

- アイソスピンが0のとき、 π 中間子-核子では見られない強い引力が働く
 - “K-と陽子”, “中性子と $\bar{K}^0$ ”
- $\Lambda(1405)$
 - $\Lambda(uds)$ の励起状態としてより、反K中間子-核子の結合状態としてよく説明される、メソン-バリオン間相互作用を強く反映した状態
- 反K中間子原子核
 - 強い引力から存在が予想される
 - 核子が引き寄せられ通常原子核より高密度になるという予想も
 - ハドロン質量の起源・高密度核物質の状態の手がかりに？
 - “ K^-pp ”:最も軽い反K中間子原子核
 - 様々な反応で存否・束縛エネルギーに関して様々な結果
 - 反応による生成機構の理解なども重要



J-PARC K1.8BRビームライン

■ J-PARC @茨城県東海村



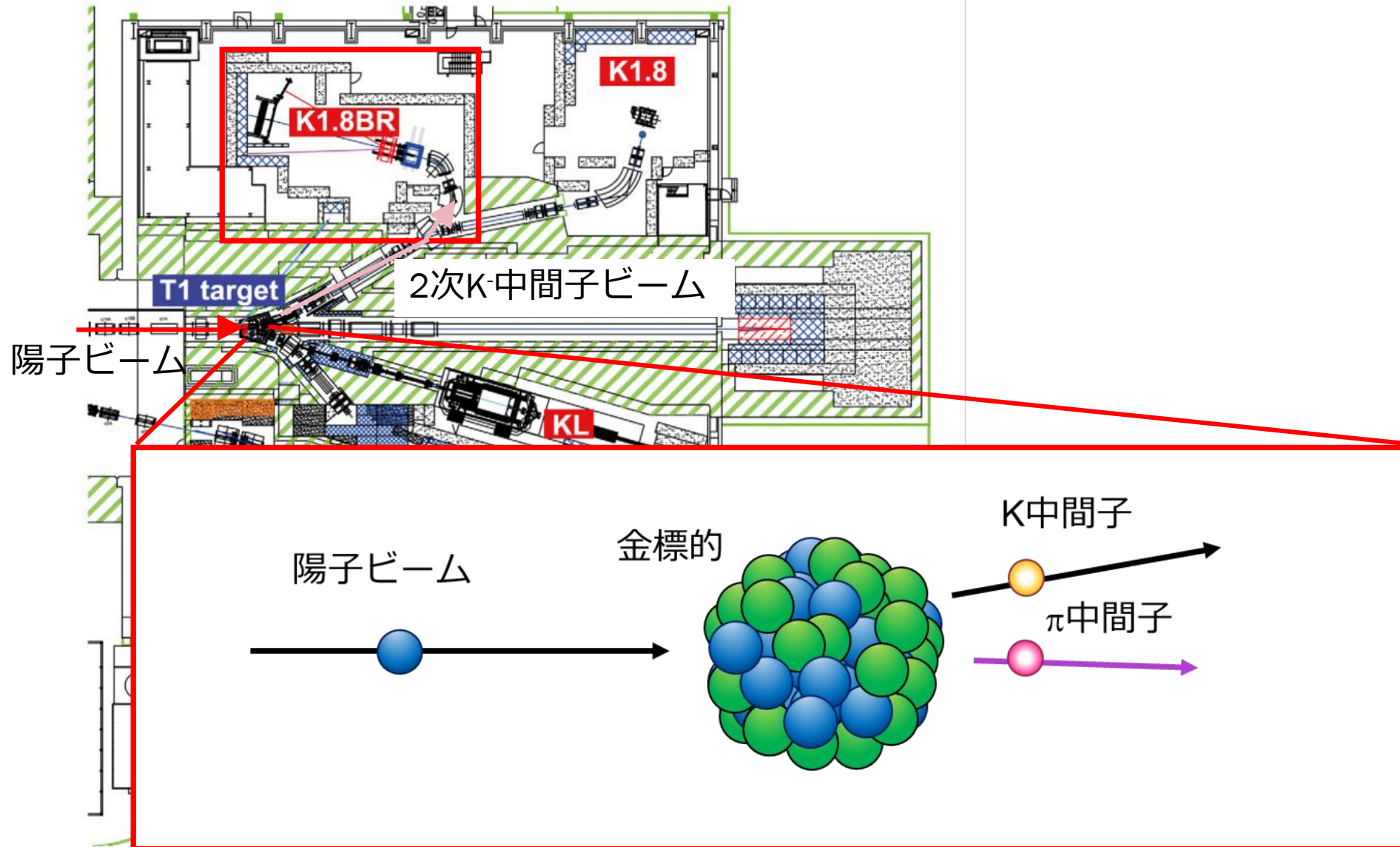
J-PARC K1.8BRビームライン

■ J-PARC ハドロン実験施設



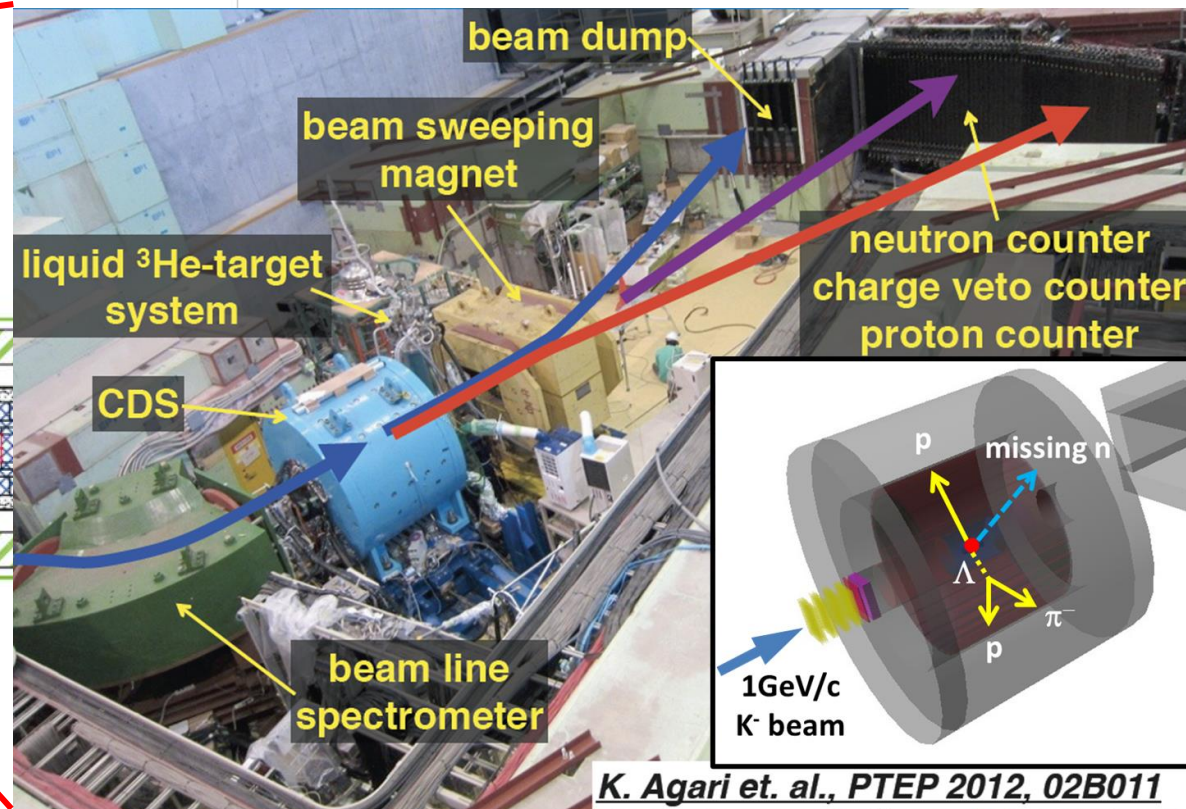
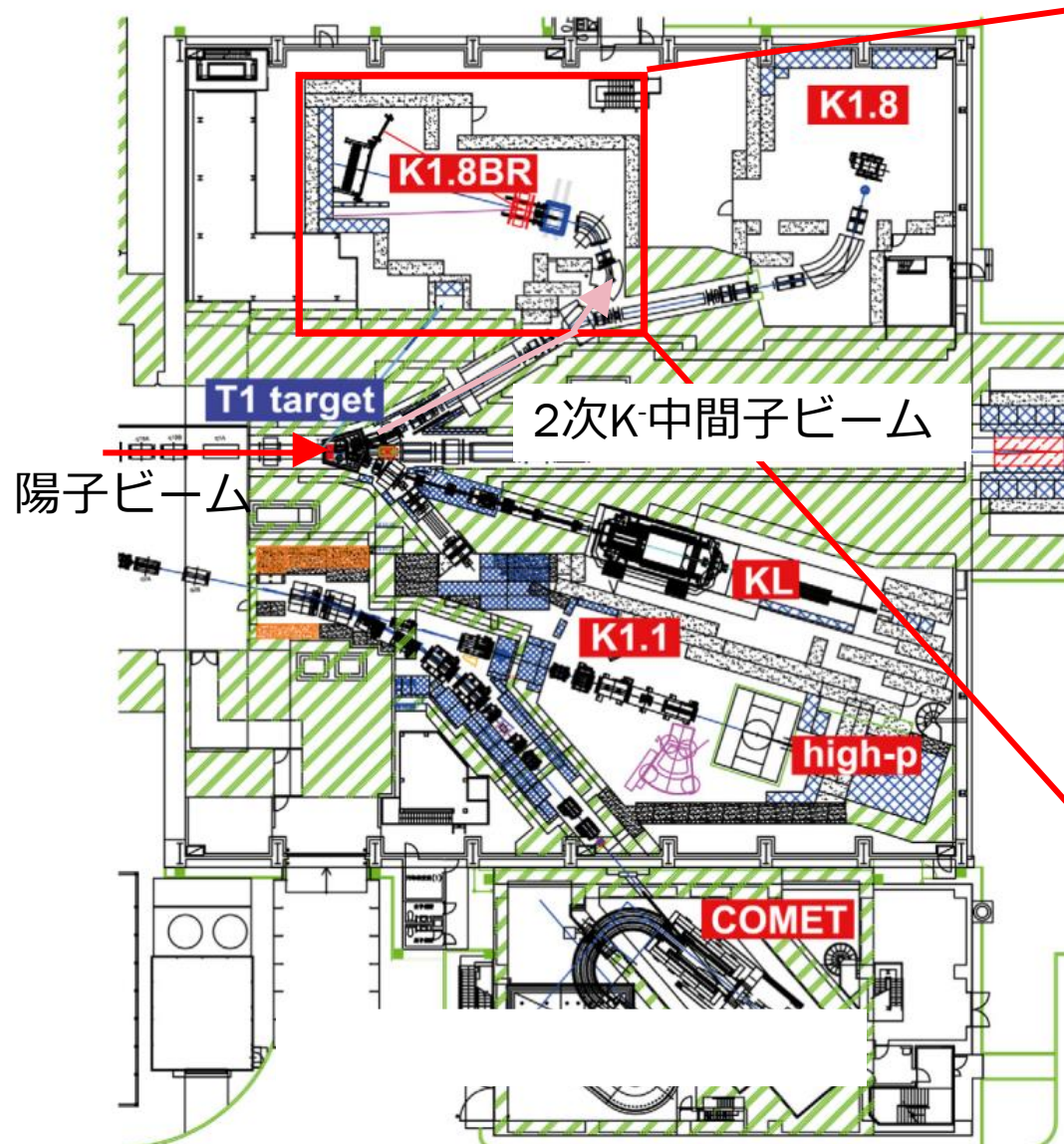
J-PARC K1.8BRビームライン

■ J-PARC ハドロン実験施設 K1.8BRビームライン



J-PARC K1.8BRビームライン

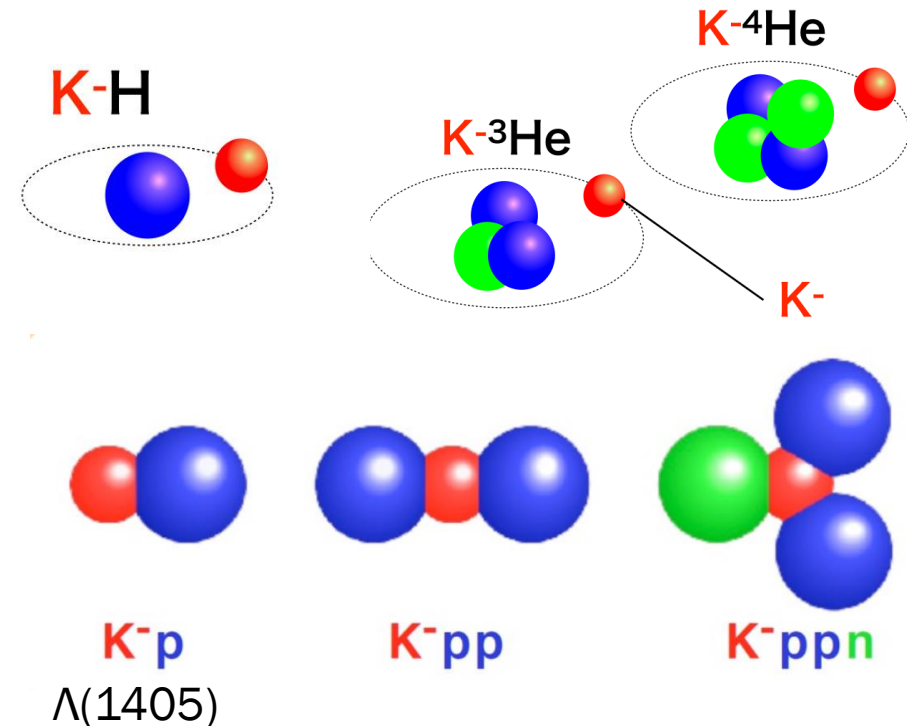
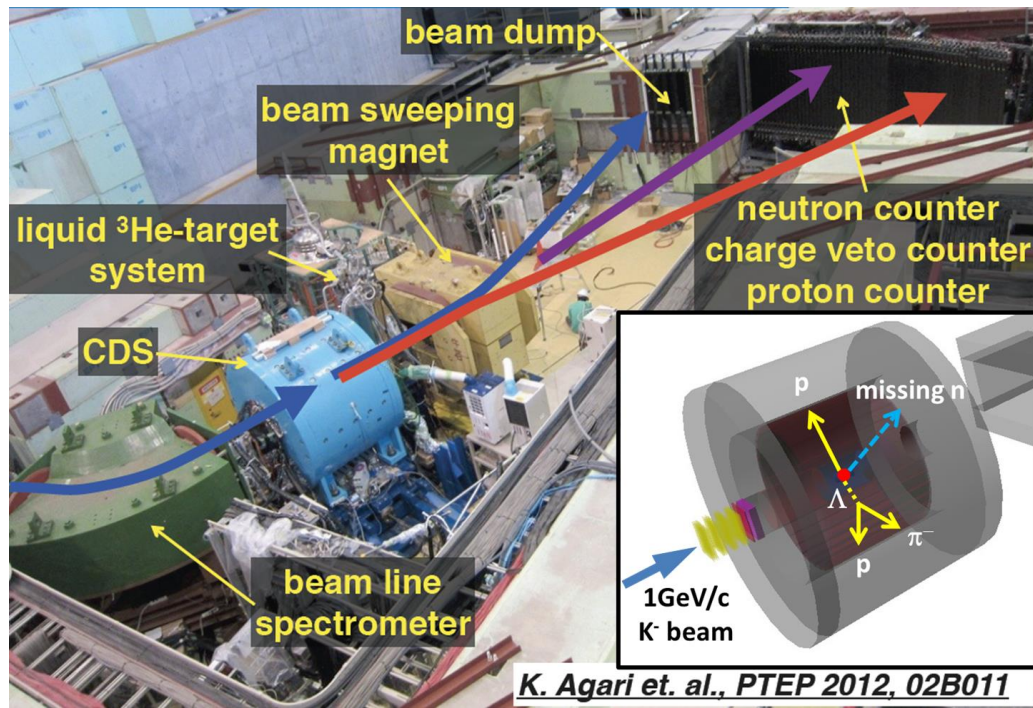
■ J-PARC ハドロン実験施設 K1.8BRビームライン



反K中間子原子・反K中間子原子核の生成に向けた比較的エネルギーの低いK-中間子ビームをパルスあたり数十万個使うことができる (0.7-1.2 GeV/c)

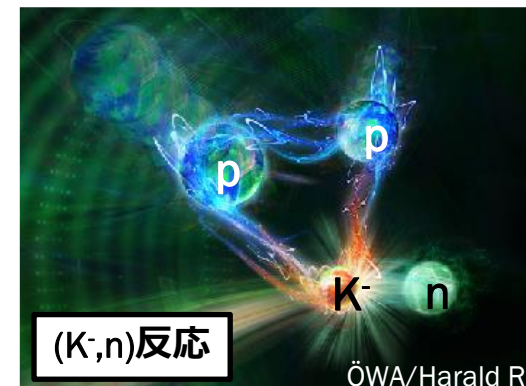
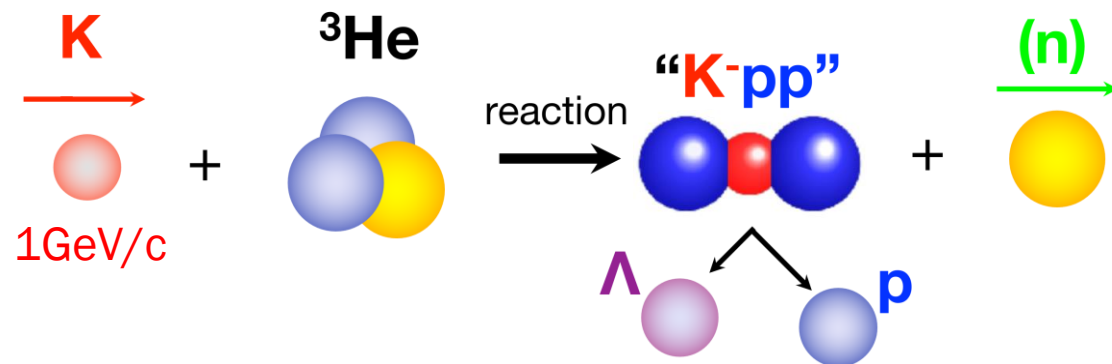
J-PARC K1.8BRビームライン

- K1.8BRビームラインで行われてきた実験
 - K中間子原子 : K^-H (E57), K^-He (E62) のX線測定
 - $\Lambda(1405)$: $\Lambda(1405)$ の分光実験 (E31)
 - 反K中間子原子核 : “ K^-pp ” (E15) と “ $\bar{K}^0NNN$ ” (T77-byproduct) の探索実験
- 反K中間子と核子との間の相互作用を解き明かすための実験が重点的に行われてきた



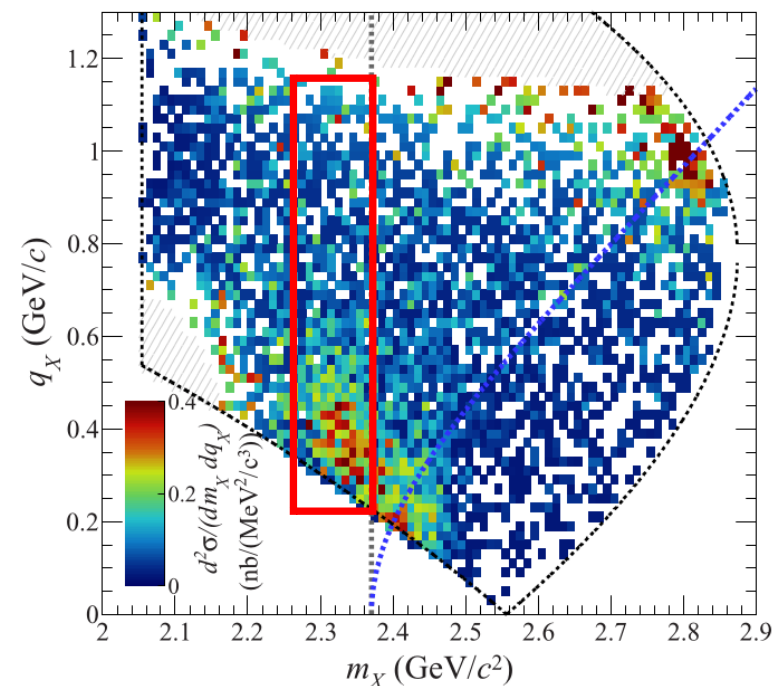
大成功した”K-pp”探索実験 (J-PARC E15-2nd)

- K-ビームを³He標的に照射して”K-pp”を探索



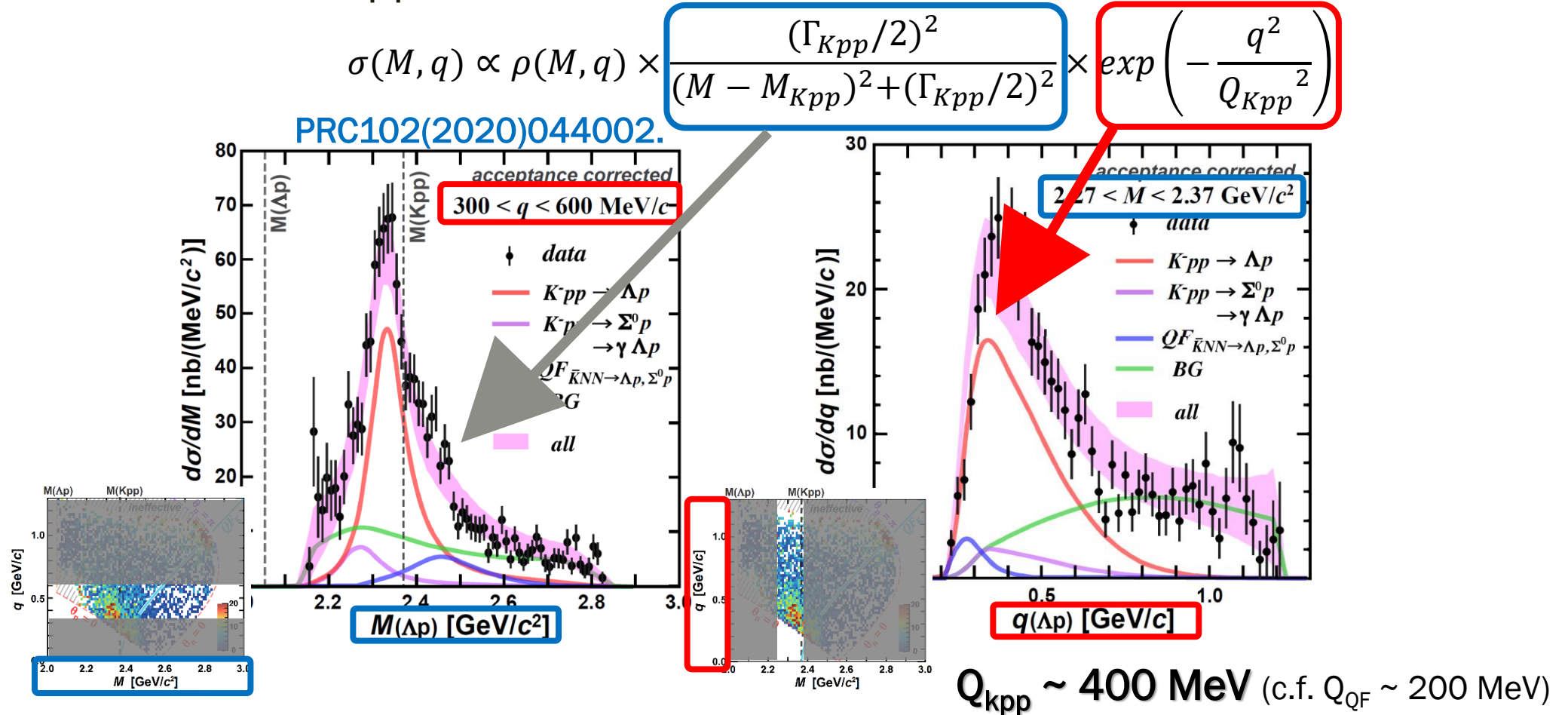
- Key points

- *In-flight* ${}^3\text{He}(K^-, n)$ 反応
 - Kとnを”そっと”置き換える反応
- *Exclusive analysis*
 - “K-pp” $\rightarrow \Lambda p$ の終状態粒子($pp\pi$)をすべてとらえる
 - 反応でできたものの質量と移行した運動量を再構成
 - バックグラウンドと信号を区別できる



大成功した”K-pp”探索実験 (J-PARC E15-2nd)

- 2次元プロットから”K-pp”の性質を引き出す



$B_{Kpp} \sim 40$ MeV, $\Gamma_{Kpp} \sim 100$ MeV
 → 深い束縛エネルギー、広い幅

→ 広い運動量移行範囲
 “K-pp” が空間的にコンパクトであることを示唆
 ($R_{Kpp} = \hbar/Q \sim 0.6$ fm)

さらなる反K中間子原子核の研究へ

■ この手法をより広い対象に適用したい

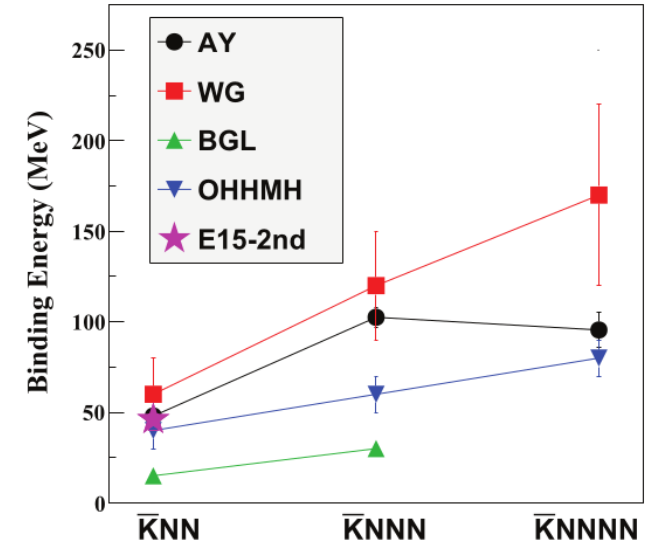
- 核子数の多い“ $\bar{K}NNN$ ”, “ $\bar{K}NNNN$ ”...

■ 束縛エネルギーの大きさ、密度などはどう変わる?

- 束縛エネルギーの質量依存性の理論計算結果は様々
- 通常原子核や“ Kpp ”より高密度という予想も

- 様々な崩壊モード

- “ Kpp ” $\rightarrow\Lambda p$ (中間子を含まない崩壊モード)の他に “ Kpp ” $\rightarrow\Lambda\pi N$ (中間子を含む崩壊モード)など
- 核子数の多いものは “ $KNNN$ ” $\rightarrow\Lambda d$, “ $KNNN$ ” $\rightarrow\Lambda pn$ など...
- 崩壊比は反K中間子原子核の密度などの内部構造を反映する
 - Kがいくつの核子に同時に吸収されやすいか?



密度が高いとKが2核子に吸収されたことに由来する中間子を含まないモードの割合が増えるという計算結果

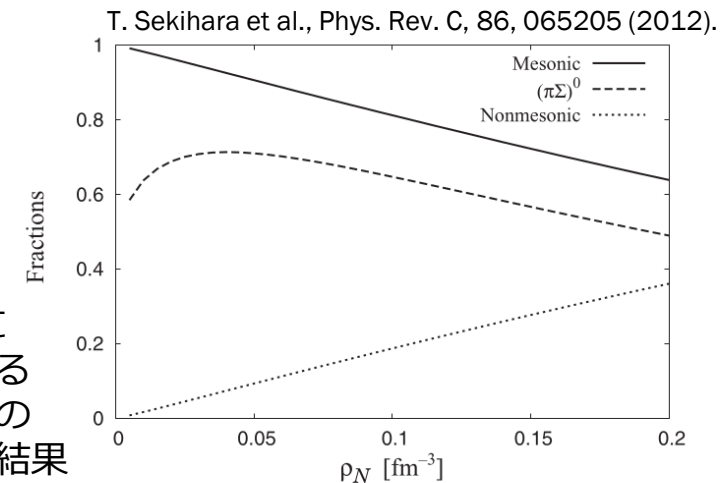


FIG. 13. Fractions of mesonic, sum of $(\pi\Sigma)^0$, and nonmesonic absorption to total absorption.

さらなる反K中間子原子核の研究へ

■ この手法をより広い対象に適用したい

- “ $\bar{K}NN$ ”状態の確立

- “K $\bar{p}p$ ”の量子数の決定
 - スピンパリティなど

■ “K $\bar{p}p$ ”の荷電パートナー“ $\bar{K}^0nn$ ”の観測

- “K $\bar{p}p$ ”が原子核的状态なら“ $\bar{K}^0nn$ ”も存在するはず
- 生成断面積は“ $\bar{K}NN$ ”状態のスピンパリティに関する情報を与える
- “ $\bar{K}^0nn$ ” $\rightarrow \Lambda n$ など崩壊モードに中性子を含みやすい

■ これらの測定を行うためにアップグレードすべき要素

- Kビーム強度の向上

- (K $\bar{p}$, N)反応でたくさん反K中間子原子核を作る

- 検出器の覆う立体角、中性子検出効率の向上

- 反K中間子原子核状態からの崩壊粒子を全てとらえる割合を向上させる

(参考)ハドロンの存在の確実性の指標(PDG)

Existence is certain, and properties are at least fairly explored.

現在の“K $\bar{p}p$ ”の状況?

Existence ranges from very likely to certain, but further confirmation is desirable and/or quantum numbers branching fractions, etc. are not well determined.

**

Evidence of existence is only fair.

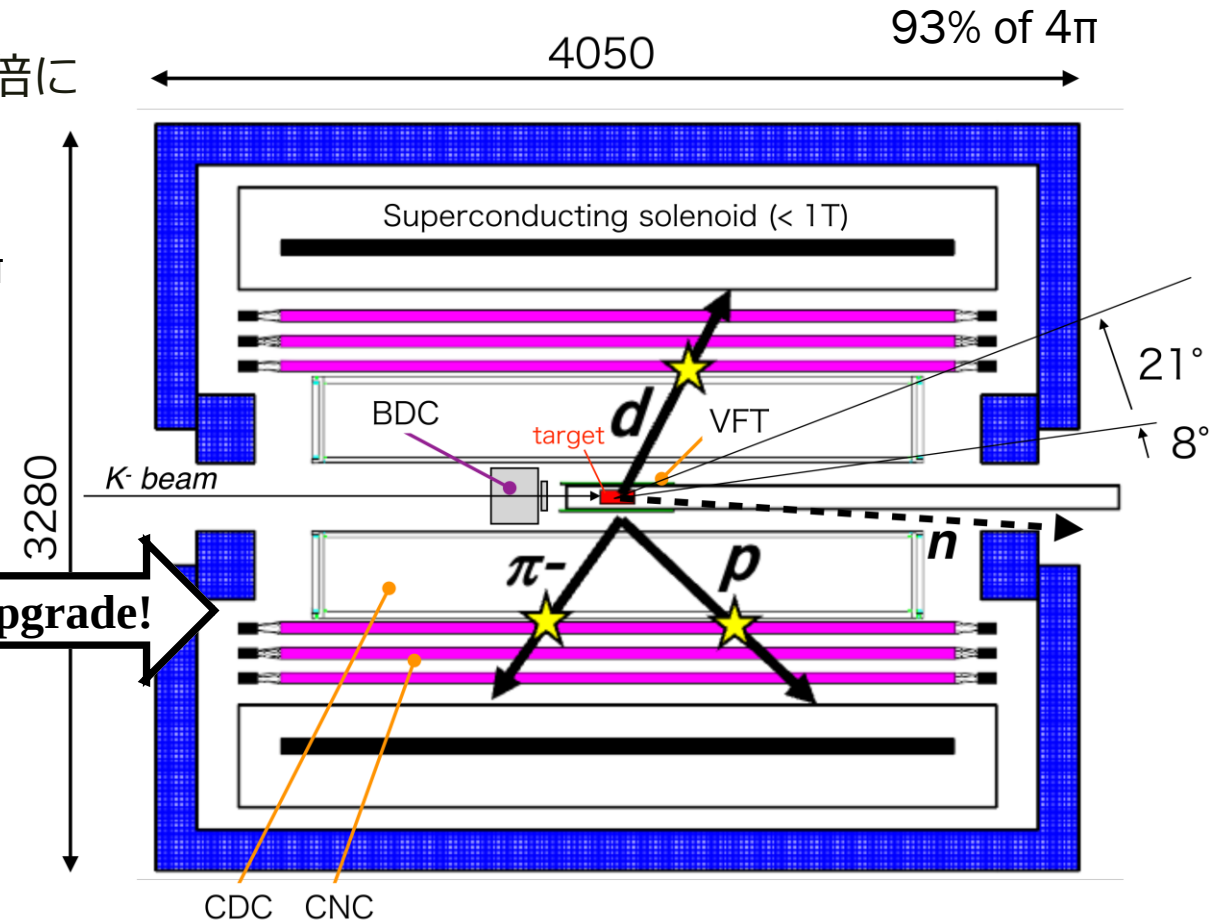
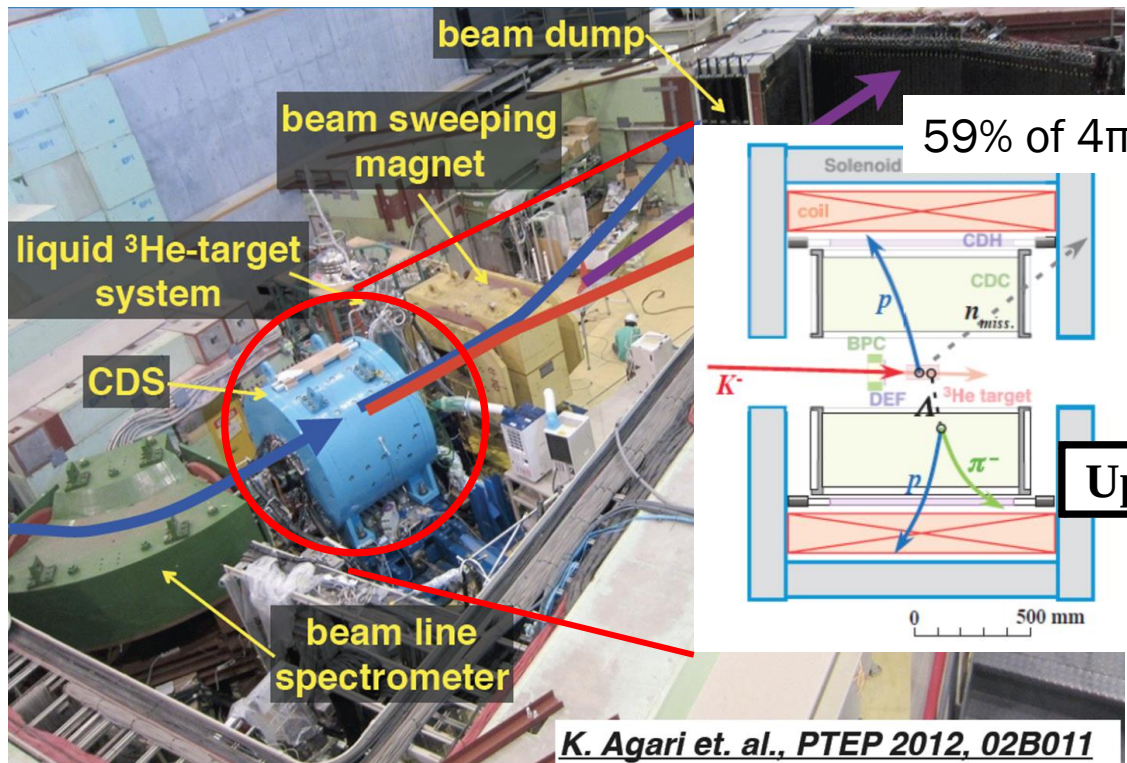
*

Evidence of existence is poor.

E15実験以前の“K $\bar{p}p$ ”の状況?

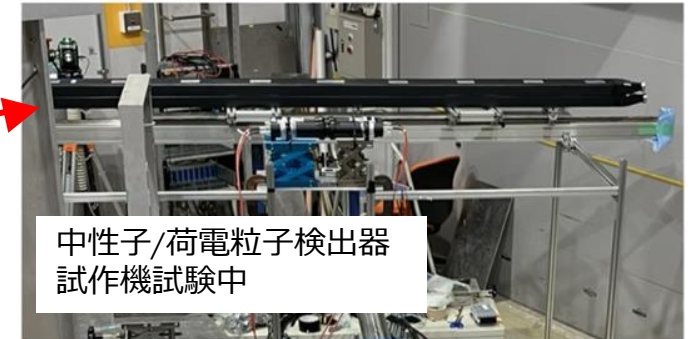
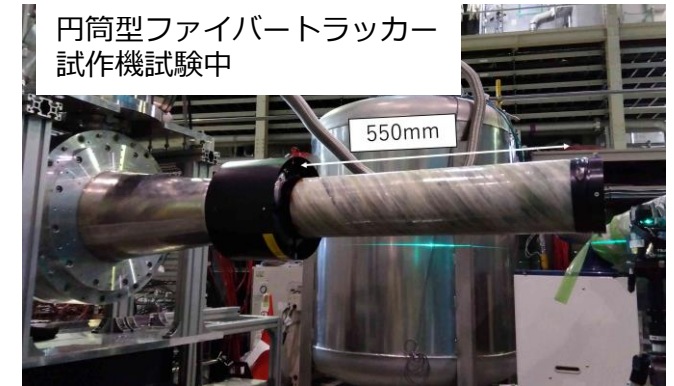
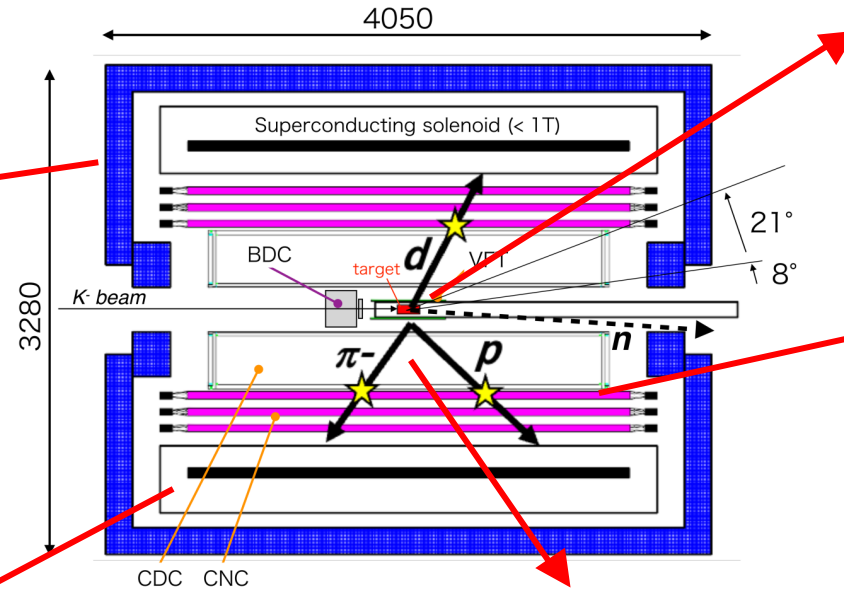
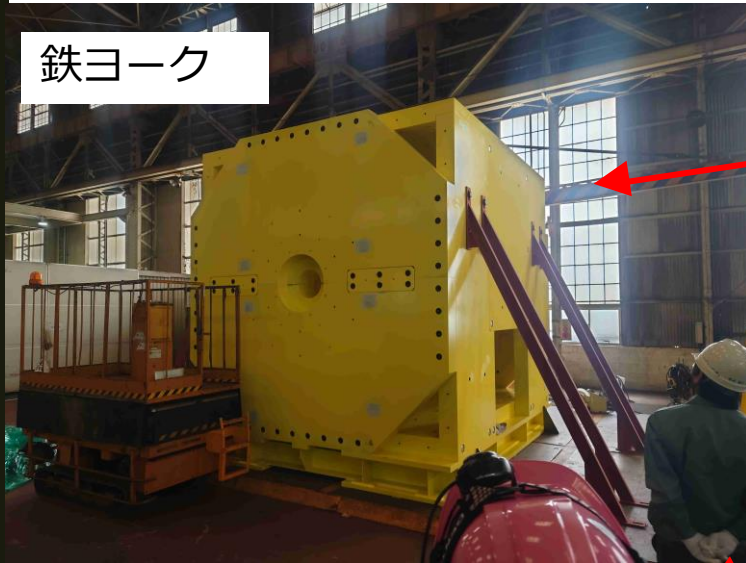
K1.8 BRでの新スペクトロメータ建造

- 新スペクトロメータのデザイン
 - 立体角の向上
 - 3倍程度長い検出器、性能は維持か向上
 - シンチレータ(荷電粒子/中性子検出器)の厚さ $3\text{cm} \rightarrow 5\text{cm} \times 3\text{ layer}$
- ビームラインも(差し引き)2.5 m短縮予定
 - 1.0 GeV/c K-ビームの崩壊が抑えられ強度1.4倍に

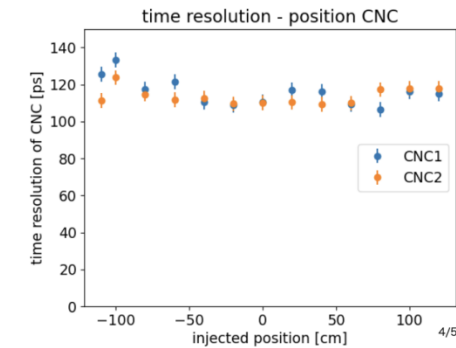
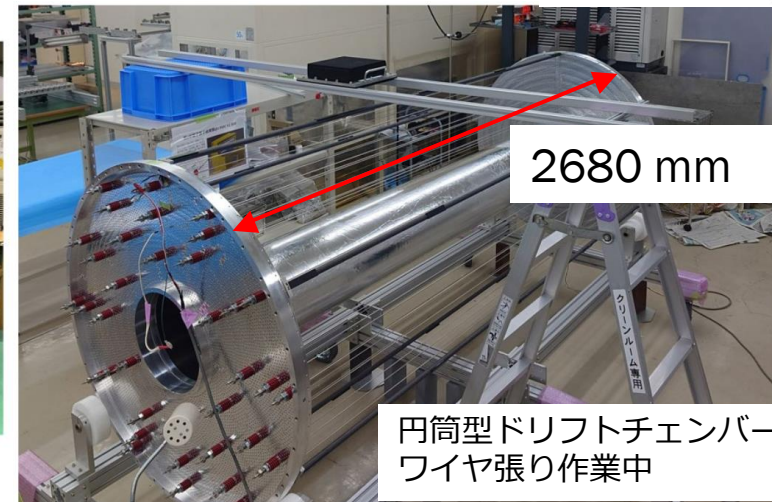


K1.8 BRでの新スペクトロメータ建造

■ 主要要素とその開発状況



@ GeV- γ irradiation room in ELPH



K1.8 BRでの新スペクトロメータ建造

■ 全体のスケジュール

- スペクトロメータのインストールは2025年夏以降の見込み
 - $^3_\Lambda\text{H}$ 寿命測定実験(現在のスペクトロメータの最後の実験)→ Λ^* resonance searchの後
- スペクトロメータのコミッショニングが2026年に行われる見込み
 - 液体水素標的を使った1週間のrun
- それに続き、 ^4He を標的にした $\bar{K}NNN$ 探索実験 (E80実験)が行われる
 - "K-ppn"→ Λ dチャンネルなど

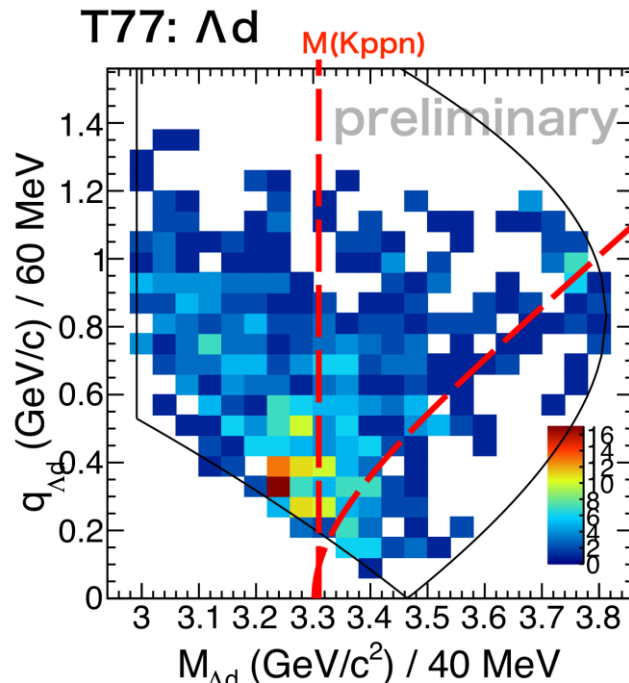
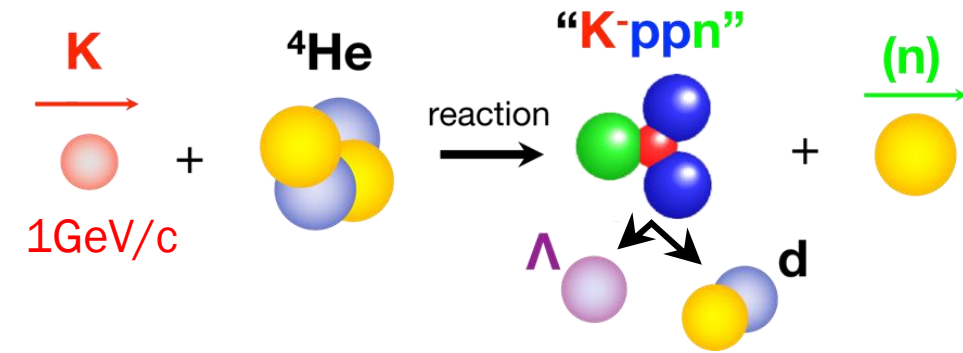
	FY2022				FY2023				FY2024				FY2025				FY2026-					
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4		
SC Sorenoid	Design		Purchase (Yoke, SC wire)		Construction								Installation & test		Integration				Commissioning		Physics run	
CNC	Design & prototype test										purchase & assemble		test & commissioning									
CDC	Design						Construction		test & commissioning													
VFT			prototype test & performance evaluation						production		test & commissioning											
K1.8BR beam line	E73 (lifetime measurement of hypertriton) experiment								E72 (Λ^* resonance search with HypTPC)				area rearrangement		with new CDS							

新スペクトロメータで行う予定の実験の紹介

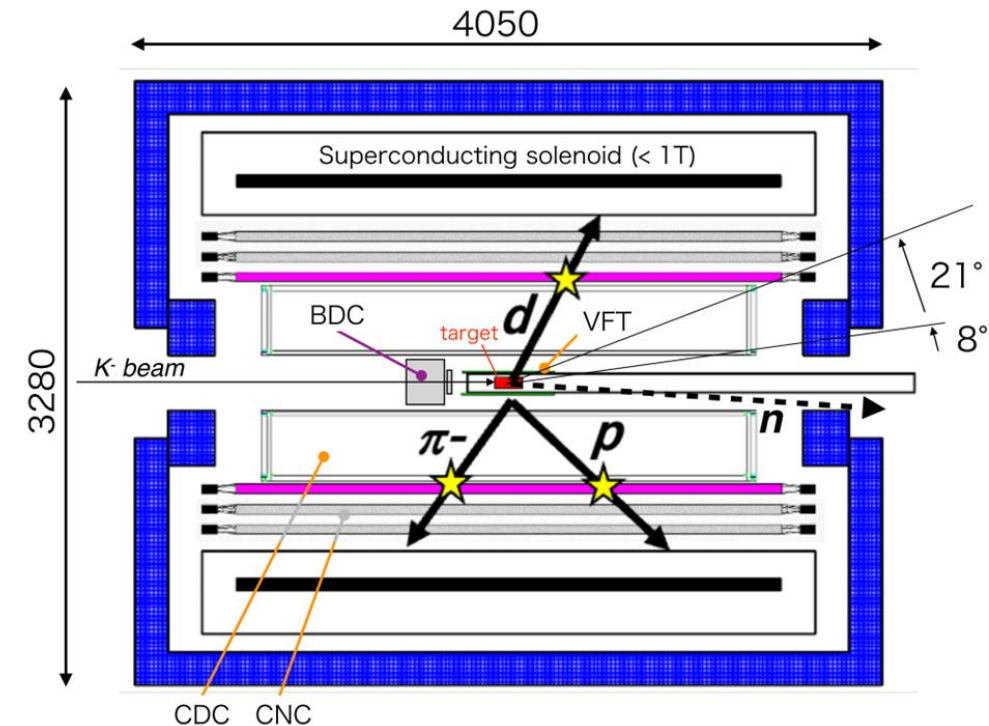
J-PARC E80 and P89

$\bar{K}$ NNN探索実験 (E80実験)

- K-ビームを ^4He 標的に照射して“K-ppn”を探索
 - Λd 2体崩壊は検出・解析がしやすい
 - 新スペクトロメータを使った最初の実験に最適
 - 既存のスペクトロメータで取得した少量のデータ
 - $\Lambda p n$ 3体崩壊も測定できる可能性あり
 - 中性子検出効率の向上が効く



既存のスペクトロメータで
取得した少量のデータ
“K-pp” $\rightarrow\Lambda p$ の場合と類似した
2次元プロットが見られる

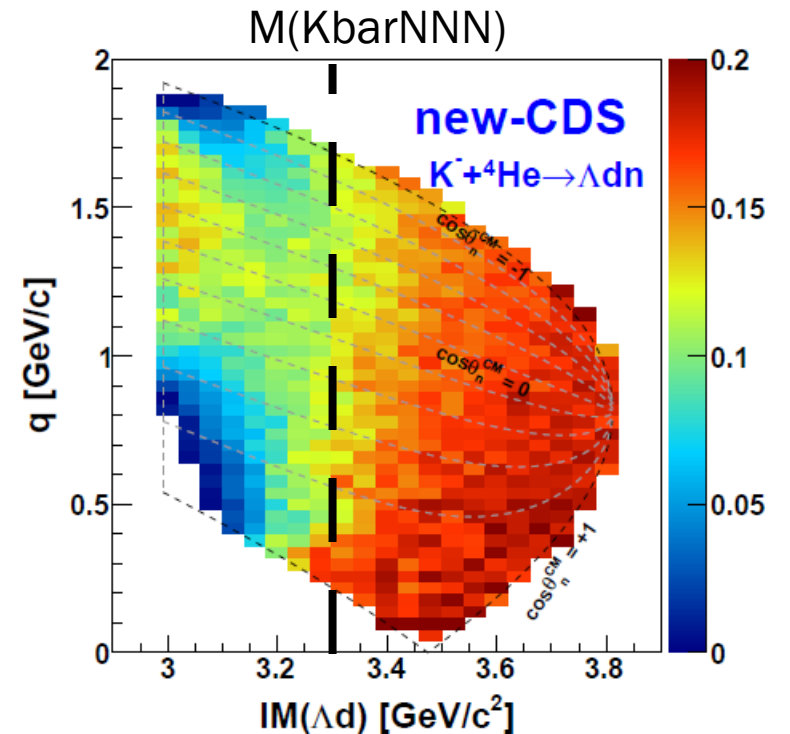
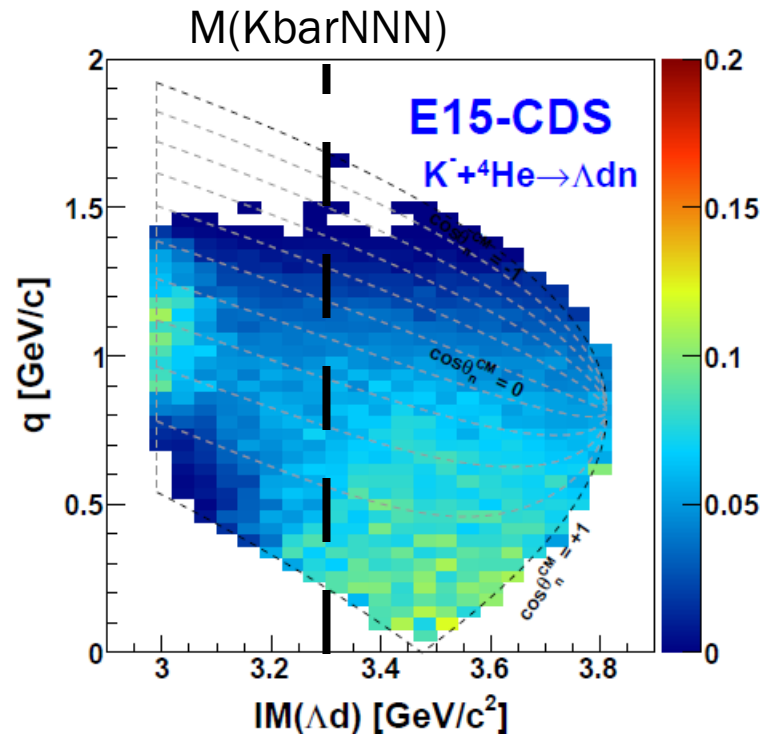
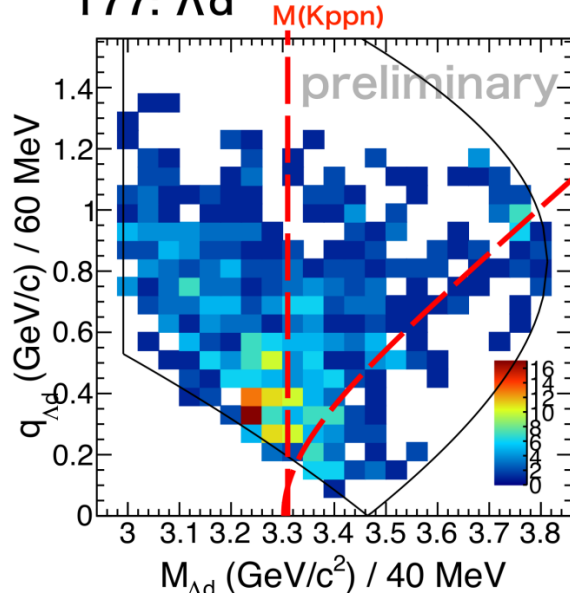


$\bar{K}$ NNN探索実験 (E80実験)

- Λ d 2体崩壊に関する検出器アクセプタンス
 - 既存のスペクトロメータの数倍に
- 3週間のビームタイムでの収量見積もり
 - $N(K\text{-ppn} \rightarrow \Lambda d) \sim 12000$ イベント, $N(K\text{-ppn} \rightarrow \Lambda pn) \sim 1500$ イベント
 - E15実験での“K-p” $\rightarrow \Lambda p$ が1700 イベント

Result with existing CDC

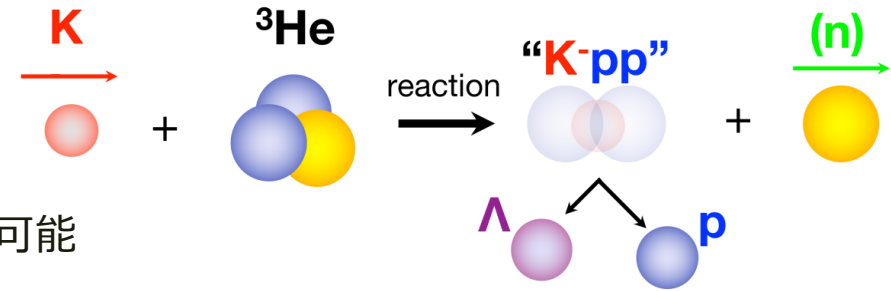
T77: Λ d



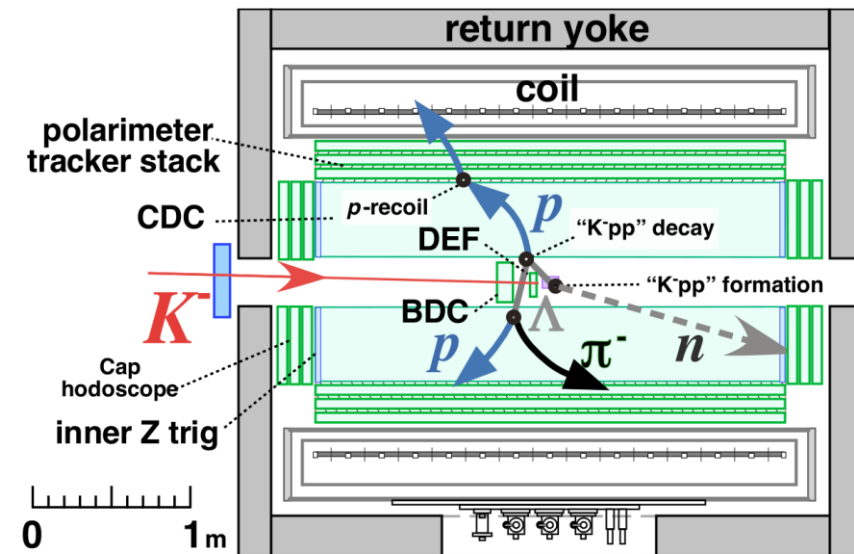
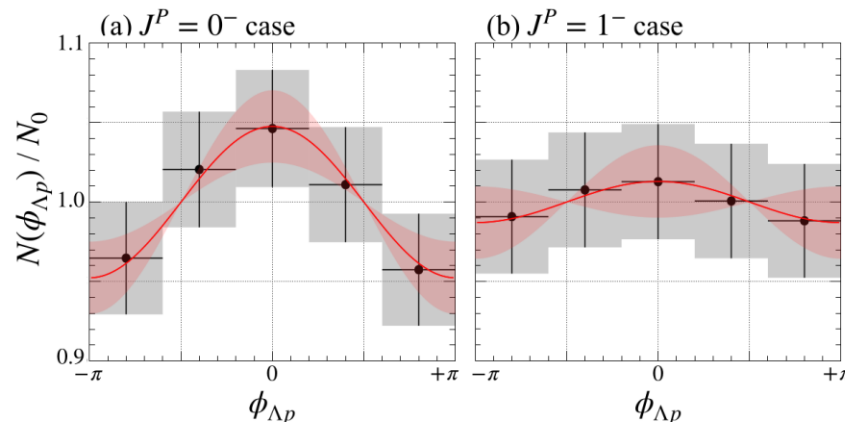
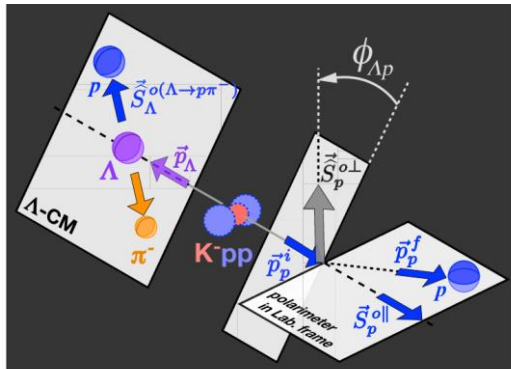
$\bar{K}NN$ 状態のスピンパリティの測定実験(P89)

- スピンパリティの候補: $0^-, 1^-$
- “ K^-pp ” $\rightarrow\Lambda p$ 崩壊の Λ と陽子のスピンの相関を測定

- ^3He を標的、E15実験の数百倍の統計が必要
 - ビーム強度・検出器アクセプタンスの向上により8週間で取得可能
- Λ のスピンの向きは $\Lambda\rightarrow p\pi$ -崩壊から測定
- 陽子のスピンの向きはシンチレータ中の炭素との p -C散乱を使って測定
 - 散乱後の陽子の方向を測るトラッカーが追加が必要
- 0^- のとき、 1^- の仮説を95 % C. L.で棄却可能

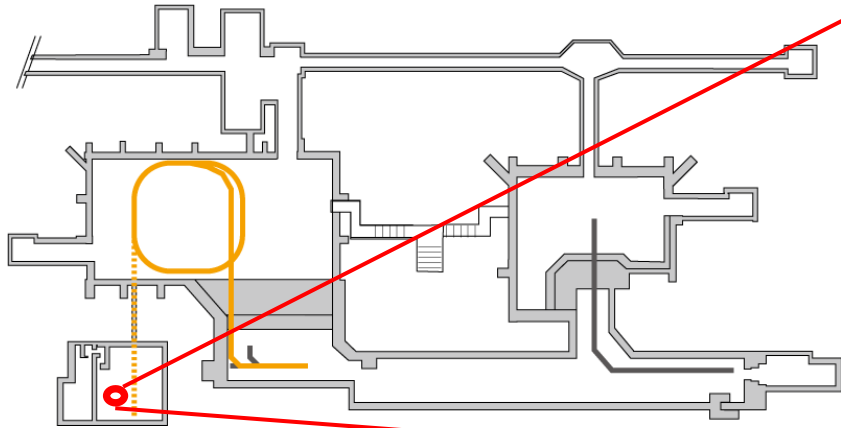


- “ K^-pp ”の荷電パートナー“ $\bar{K}^0nn$ ”の測定
 - 原子核的状態としての $\bar{K}NN$ の確立
 - 生成率はスピンパリティを反映



本プロジェクトとELPHの関わり

- GeVガンマ測定棟における陽電子ビームを利用した検出器試験
 - 本プロジェクトに限らず、多くの実験で用いる検出器試験でお世話になっています。
 - 「一番使いやすいほぼ光速の荷電粒子ビーム」



2023年10月

- 共同研究者
 - 大西センター長をはじめとした核物理研究部のスタッフ・学生が参加
 - 木村 佑斗氏による中性子検出器(2m60cm長のシンチレータ)のテスト実験に関する発表 in 個別発表セッション

Summary

- クォーク・ハドロン・原子核にまたがる豊かな現象をQCDに基づいて理解するうえで、様々なハドロン間相互作用を調べることが重要である。
- 反K中間子と核子の間には強い引力が働くチャンネルがあり、それにより生み出される反K中間子原子核は通常の原子核よりも大きな束縛エネルギーを持ち、高密度となる可能性が予想されるなど興味深い性質を持つ。
- J-PARC ハドロン実験施設K1.8 BRビームラインでは、反K中間子と核子の間に働く相互作用を解き明かすための実験が重点的に行われてきた。特に“K⁻pp”探索実験(J-PARC E15実験)は“K⁻pp”の存在に関する強い証拠を与え、反K中間子原子核がコンパクトな系である可能性も示唆した。
- 大立体角で中性子検出効率も向上させた新スペクトロメータを開発中で、様々な崩壊モード、核子数の多い反K中間子原子核の測定や、高統計のデータからの“K⁻pp”のスピンパリティの決定といった更なる研究が可能になる。
- このプロジェクトはELPHの研究者との共同研究や、検出器テストビームラインの共同利用に支えられています。