

大立体角スペクトロメータを用いた 軽い反 κ 中間子原子核の系統的研究の準備状況

理研仁科センター 中間子理研ECL研究チーム
七村 拓野 for the J-PARC E80 and P89 collaboration

Contents

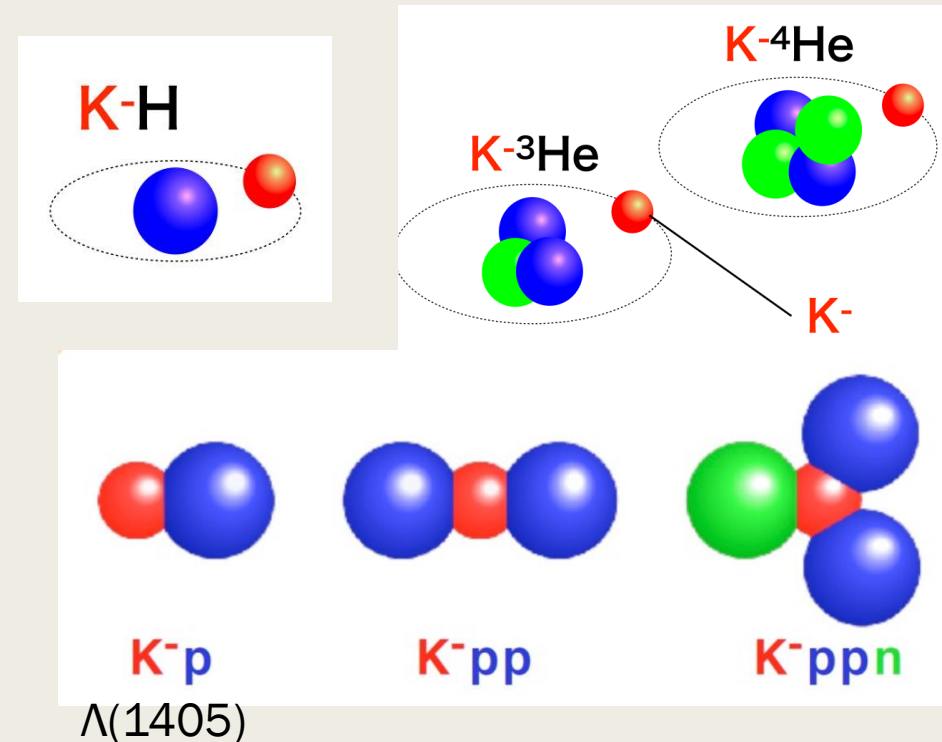
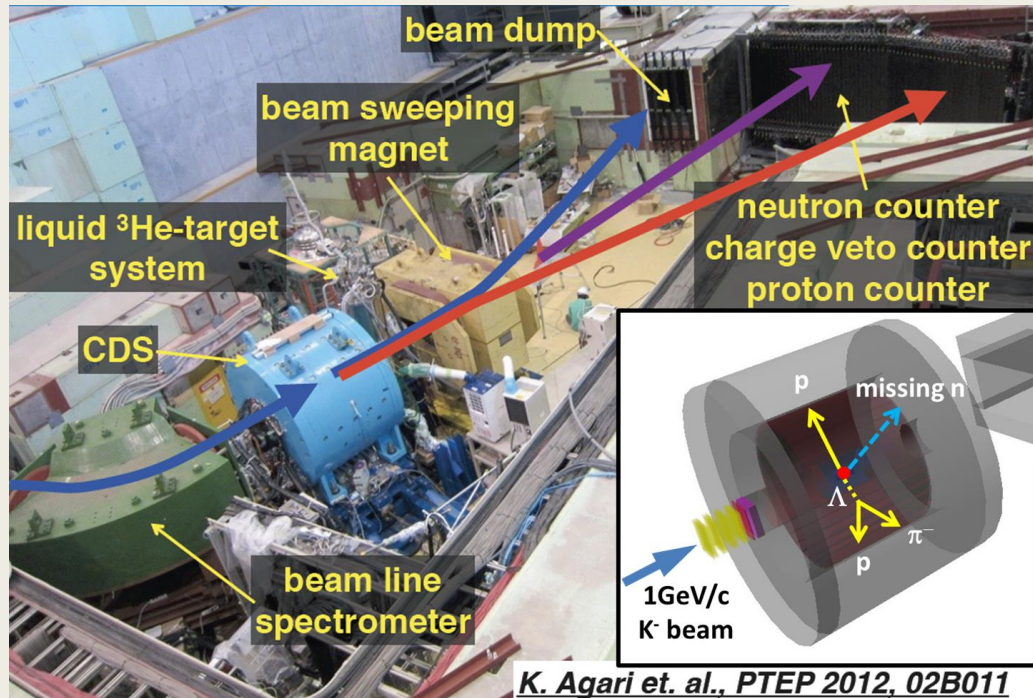
- KbarN相互作用とJ-PARC ハドロン実験施設 K1.8BRでの研究
 - “ K - pp ”に関する主要な先行研究 : J-PARC E15実験
- J-PARC E15実験の手法を発展させたさらなる反 K 中間子原子核の研究
 - スペクトロメータシステムの大立体角化、中性子検出効率の向上
 - 提案されている実験の紹介
 - $\bar{K}NNN$ 探索実験 (E80実験)
 - $\bar{K}NN$ のspinパリティの測定実験(P89)
- スペクトロメータの開発状況、今後のスケジュール

反K中間子と核子との間の相互作用

- アイソスピンが0のとき、強い引力が働く
 - πN のS波相互作用では見られない性質
- $\Lambda(1405)$
 - $\Lambda(uds)$ の励起状態というより、 $K\bar{N}(I=0)$ の引力に由来する結合状態 $\oplus\pi\Sigma$ の共鳴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
 - 強い引力と $\Lambda(1405)$ 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・幅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

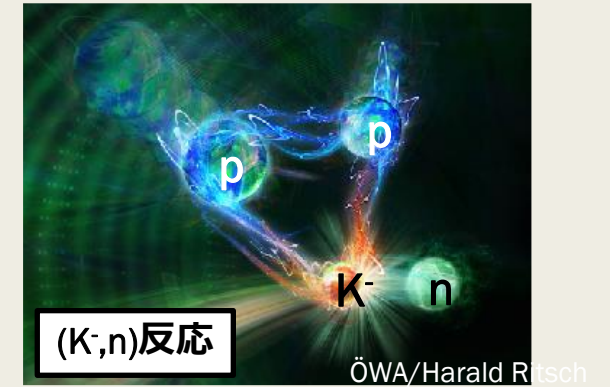
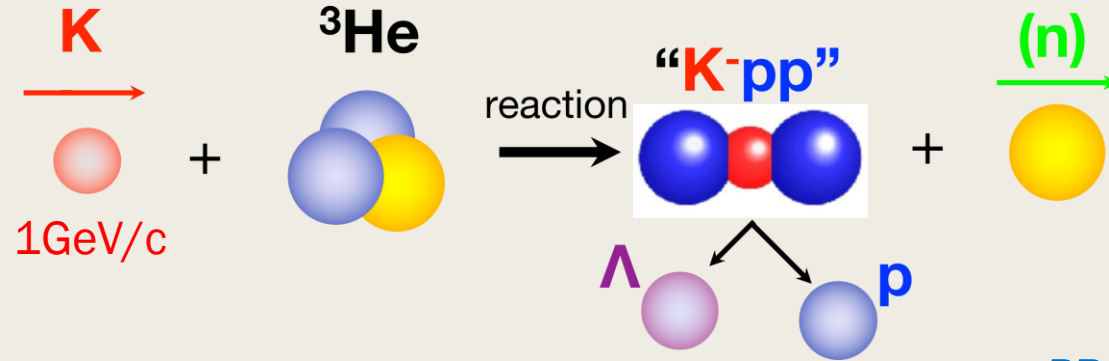
J-PARCハドロン実験施設K1.8BRビームライン

- 反K中間子と核子の間の相互作用に関する実験が重点的に行われてきた
 - 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 $\bar{K}NNN$ (T77-byproduct)の探索実験



”K-pp”の主要な先行研究(J-PARC E15-2nd)

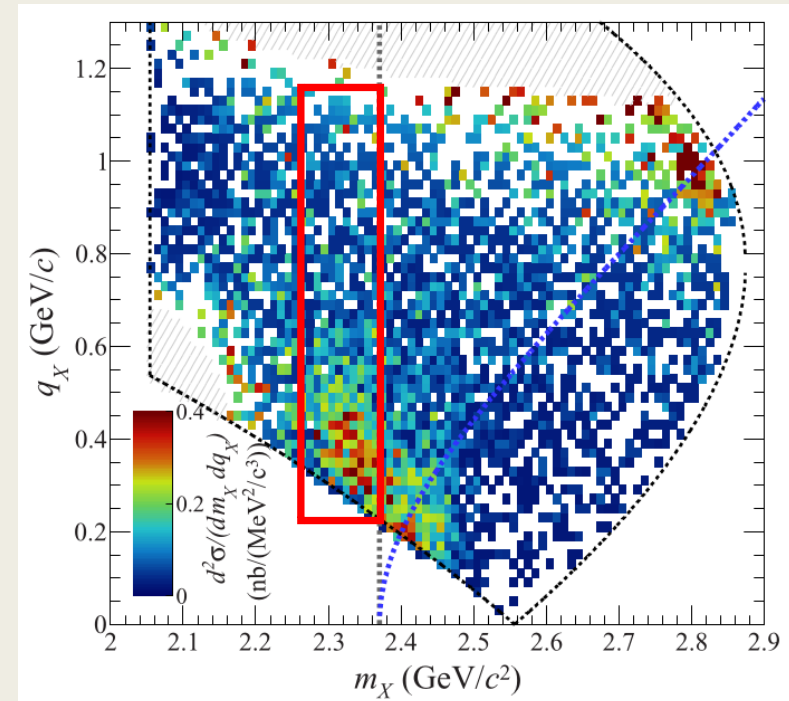
- K-ビームを³He標的に照射して”K-pp”を探索



- Key points

- *In-flight* ³He(K⁻, n)反応
 - Kとnを”そつと”置き換える反応
- *Exclusive analysis*
 - “K-pp”→Λpの終状態粒子(ppπ)をすべてとらえる
 - Invariant massと運動量移行を再構成
 - 信号を2次元プロット上で明確にした

PRC102(2020)044002.

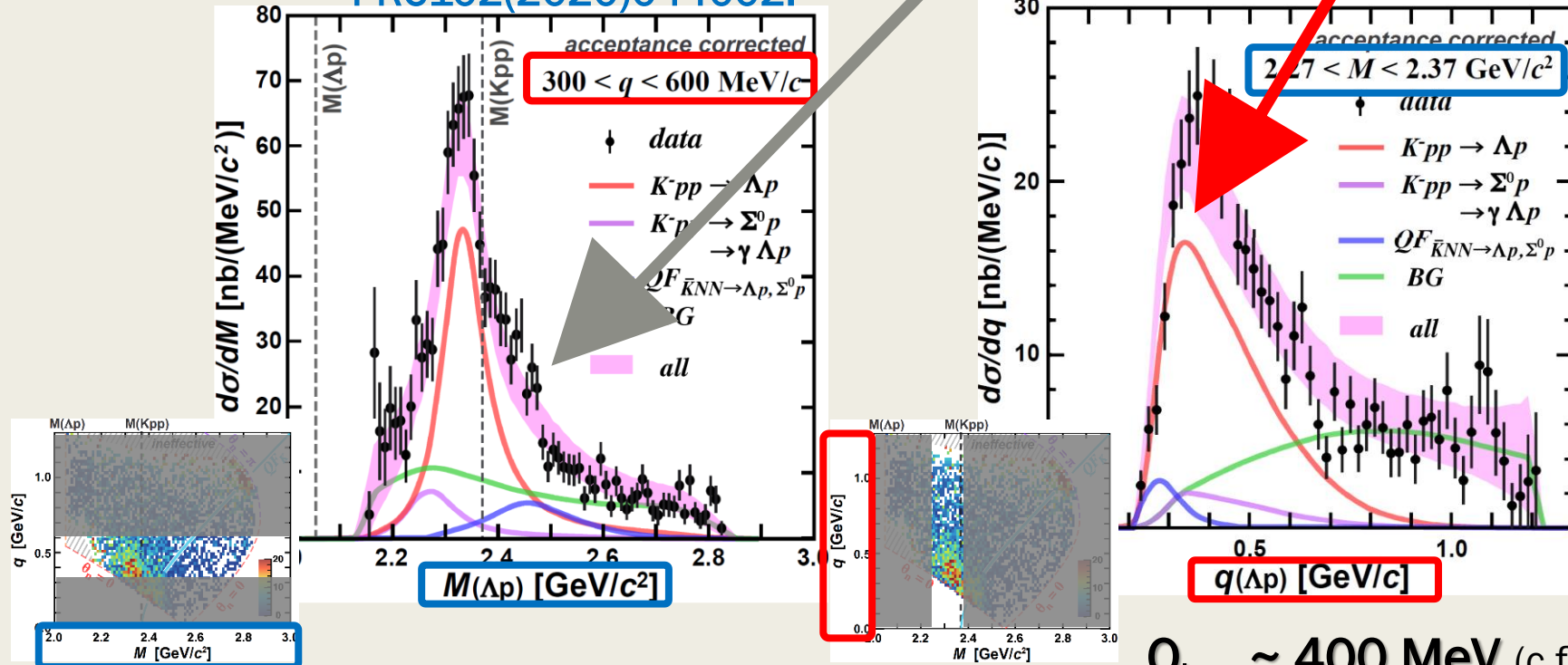


”K-pp”の主要な先行研究(J-PARC E15-2nd)

- 2次元プロットから”K-pp”の性質を引き出す

$$\sigma(M, q) \propto \rho(M, q) \times \frac{(\Gamma_{Kpp}/2)^2}{(M - M_{Kpp})^2 + (\Gamma_{Kpp}/2)^2} \times \exp\left(-\frac{q^2}{Q_{Kpp}^2}\right)$$

PRC102(2020)044002.



$Q_{Kpp} \sim 400$ MeV (c.f. $Q_{QF} \sim 200$ MeV)

$B_{Kpp} \sim 40$ 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
 ($2R_{Kpp} = 2\hbar/Q \sim 1.2$ fm)

さらなる反K中間子原子核の研究へ(1)

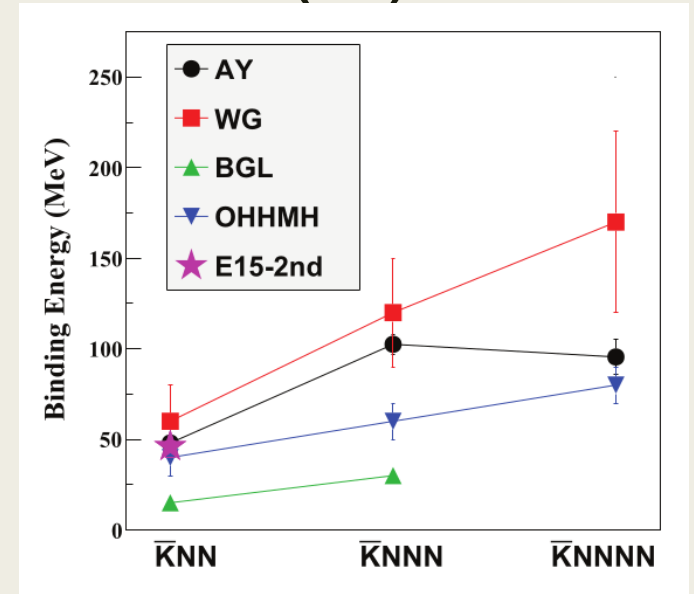
■ この手法をより広い対象に適用したい

- 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“ $K\text{-}pp$ ”より高密度という予想も

- 様々な崩壊モード

- “ $K\text{-}pp$ ” $\rightarrow\Lambda p$ (中間子を含まない崩壊モード)の他に “ $K\text{-}pp$ ” $\rightarrow\Lambda\pi N$ (中間子を含む崩壊モード)など
 - E15実験の mesonic decay branchの結果(PRC, 110, 014002 (2024))
- 核子数の多いものは “ $K\text{-}ppn$ ” $\rightarrow\Lambda d$, “ $K\text{-}ppn$ ” $\rightarrow\Lambda pn$ 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
 - 1核子吸収と多核子吸収のどちらが起きやすいか?

密度が高いと2核子吸収に由来する Non-mesonicの割合が増えるという計算結果



T. Sekihara et al., Phys. Rev. C, 86, 065205 (2012).

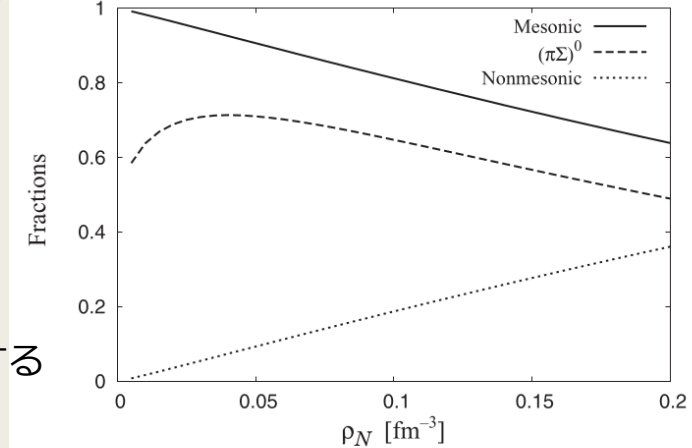


FIG. 13. Fractions of mesonic, sum of $(\pi\Sigma)^0$, and nonmesonic absorption to total absorption.

さらなる反K中間子原子核の研究へ(2)

■ 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

(参考) ハドロン状態の确实性の指標 [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?

■ 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

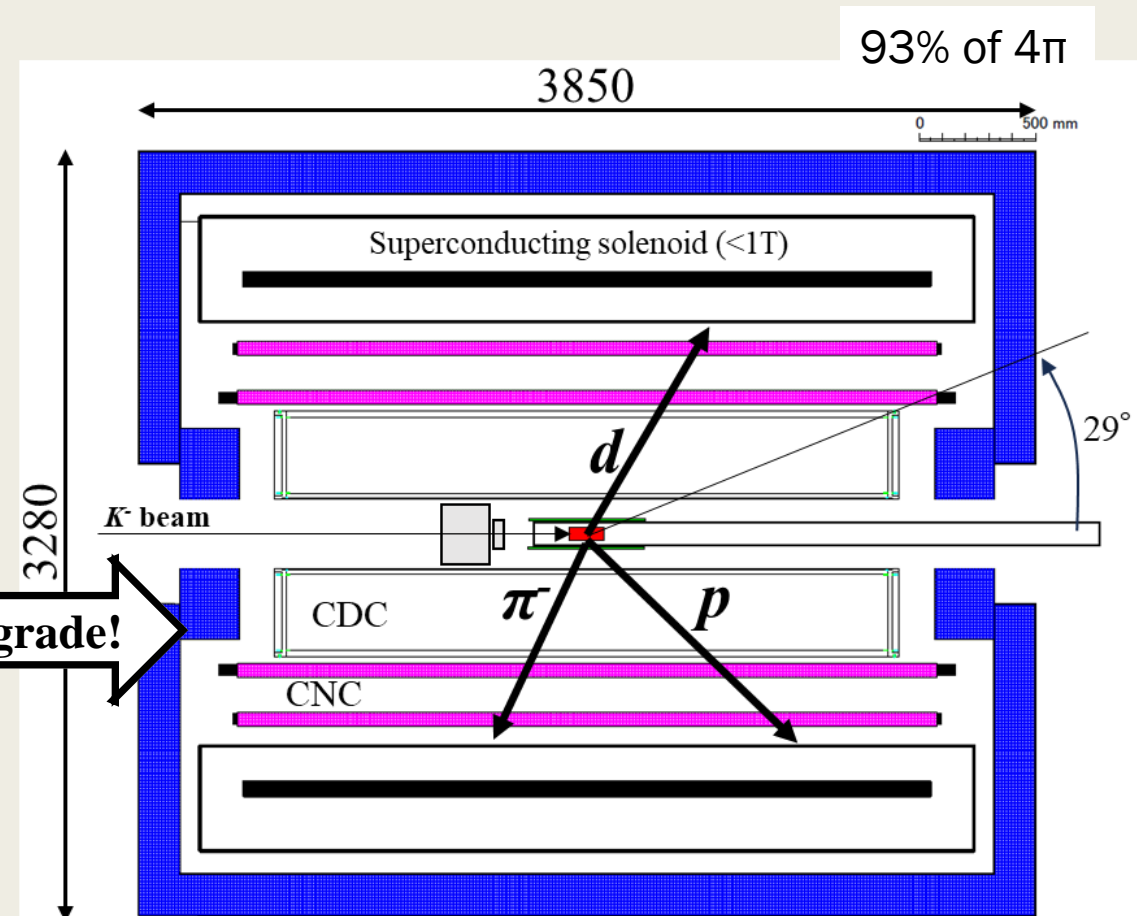
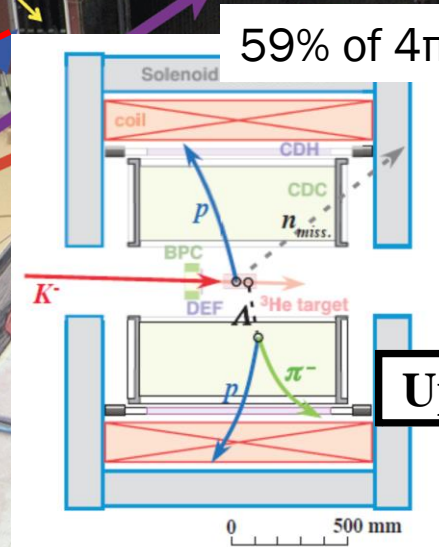
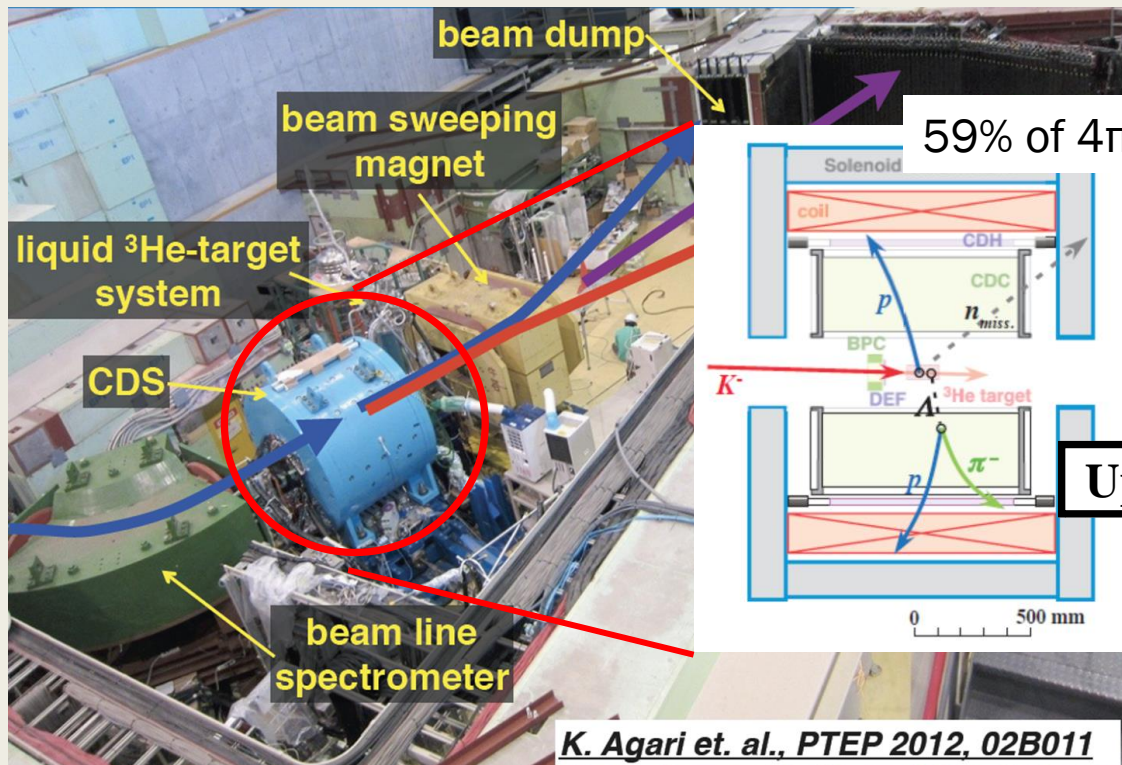
■ (K, N)反応で反K中間子原子核状態をより多く作る

- 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

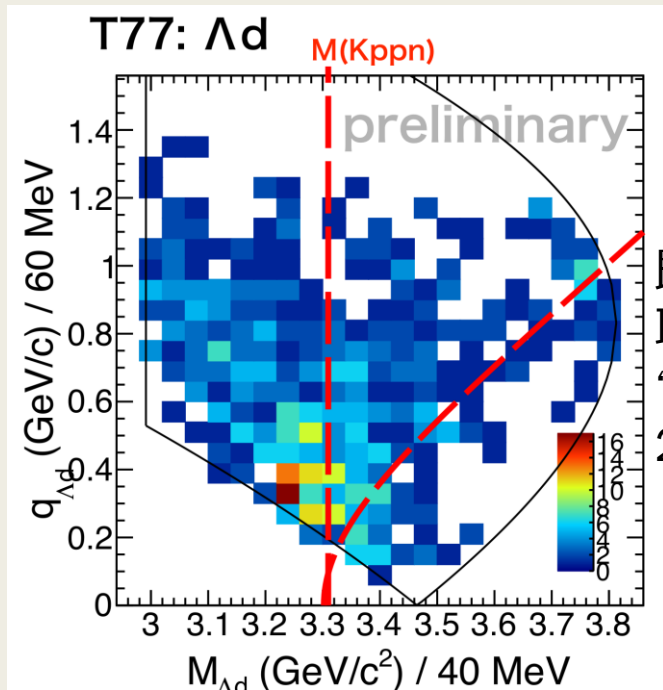
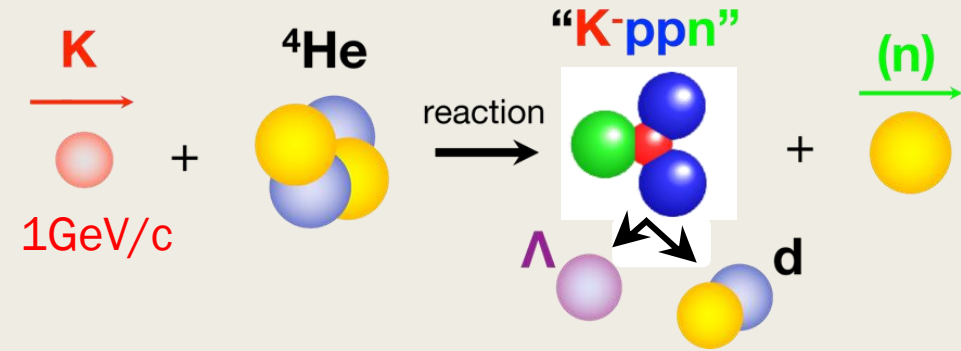
K1.8 BRでの新スペクトロメータ建造計画

- 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 $3\text{cm} \rightarrow 6\text{cm} \times 2\text{ layer}$
- ビームラインも(差し引き)2.5 m短縮予定
 - 1.0 GeV/c K-ビームの強度は現在の1.4倍に

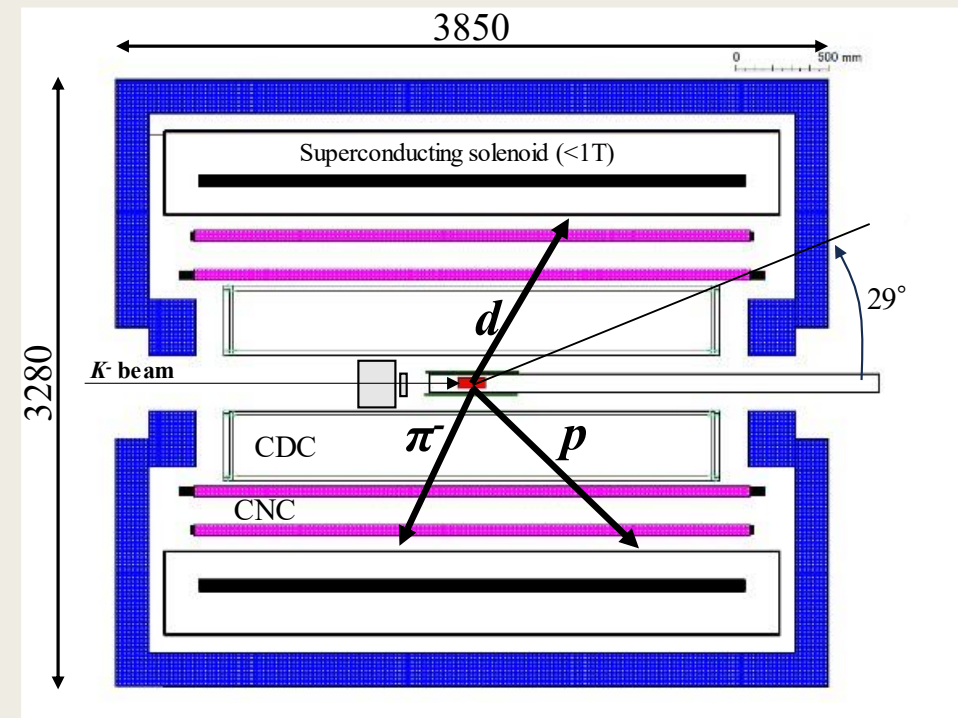


$\bar{K}NNN$ 探索実験 (E80実験)

- 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
 - Λpn 3体崩壊も測定できる
 - 中性子検出効率の向上が効く
 - $\bar{K}NNN$ の内部構造への情報を与える



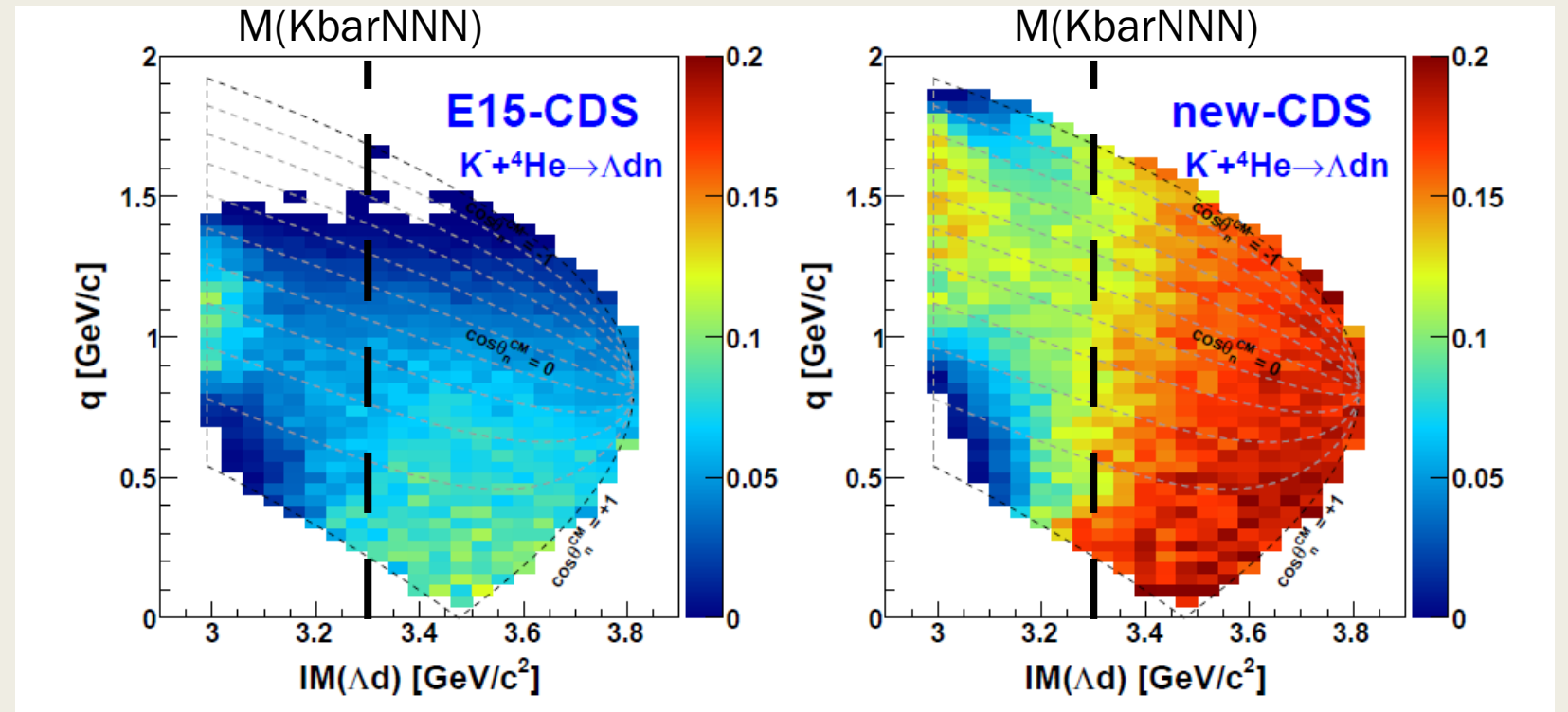
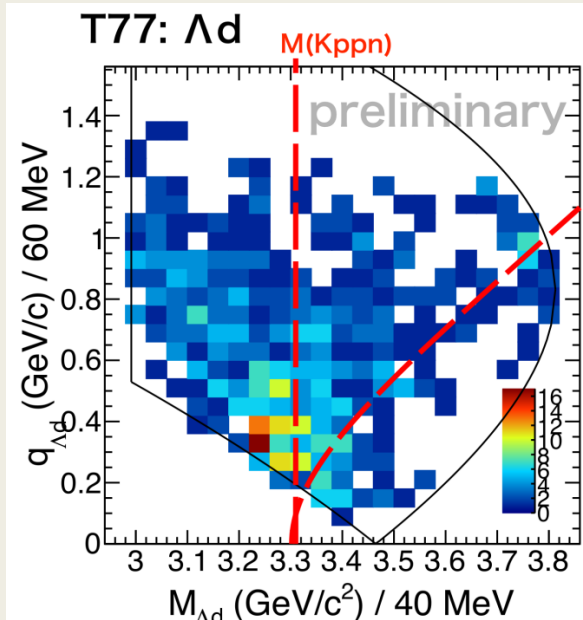
既存のスペクトロメータで取得した少量のデータ “ K -pp” → Λp の場合と類似した2次元プロットが見られる



\bar{K} NNN探索実験 (E80実験)

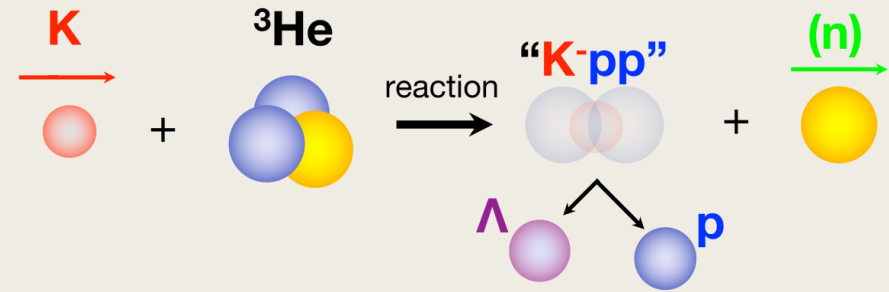
- Λd 2体崩壊に関する検出器アクセプタンス
 - 既存のスペクトロメータの数倍に
- 3週間(=100G K^- on target)のビームタイムでの収量見積もり
 - $N(K^-ppn \rightarrow \Lambda d) \sim 12000$ イベント, $N(K^-ppn \rightarrow \Lambda pn) \sim 1200$ イベント
 - E15実験での“ K^-pp ” $\rightarrow \Lambda p$ が1700 イベント

Result with existing CDC



$\bar{K}NN$ 状態のスピンパリティの測定実験(P89)

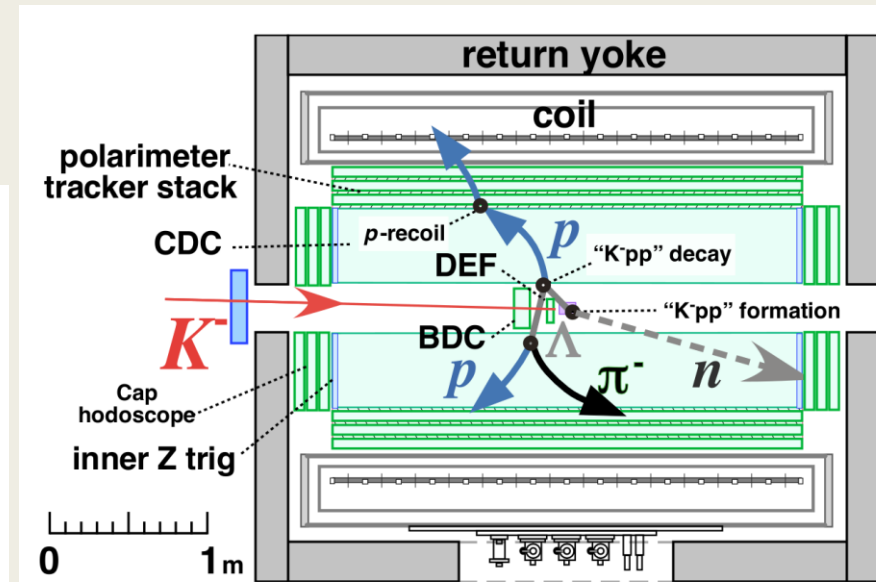
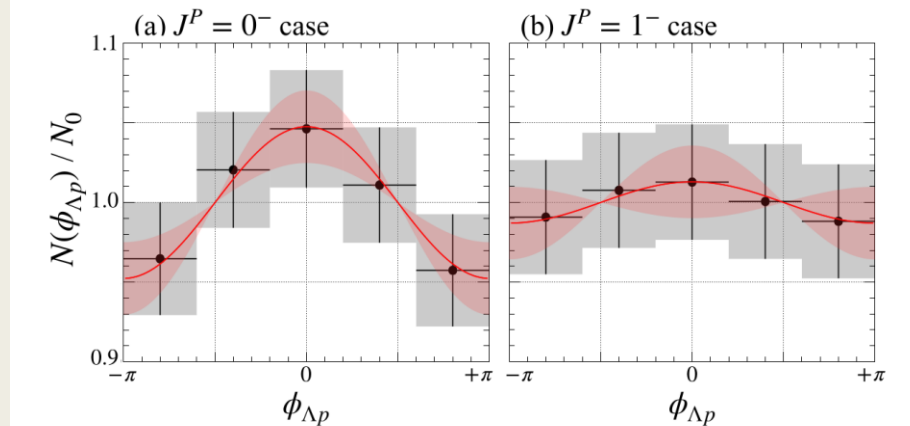
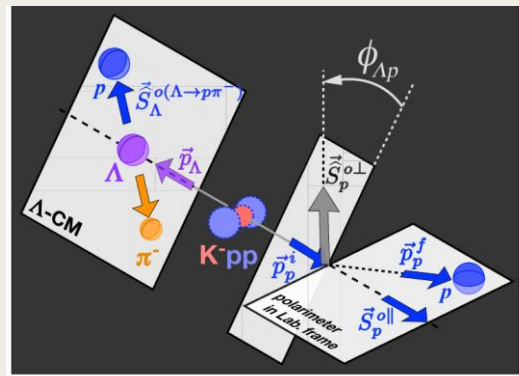
- スピンパリティの候補: $0^-, 1^-$
- “ K^-pp ” $\rightarrow\Lambda p$ 崩壊の Λ と陽子のスピンの相関を測定



- ${}^3\text{He}$ 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週間程度
- 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 ($\langle A_{pC} \rangle \sim 0.3$)
 - 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

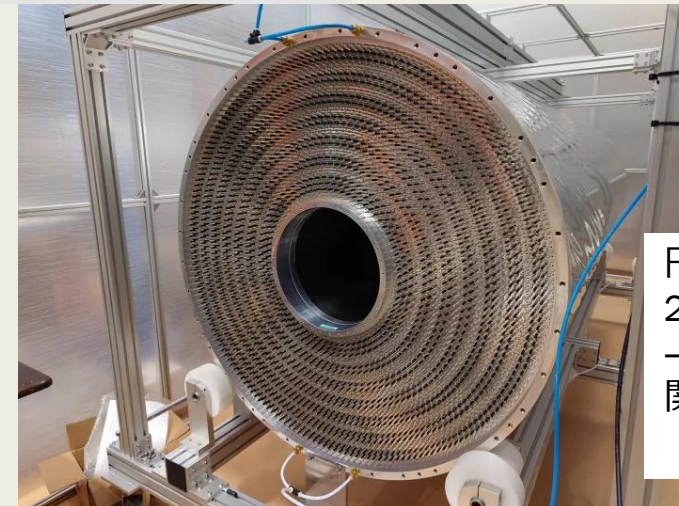
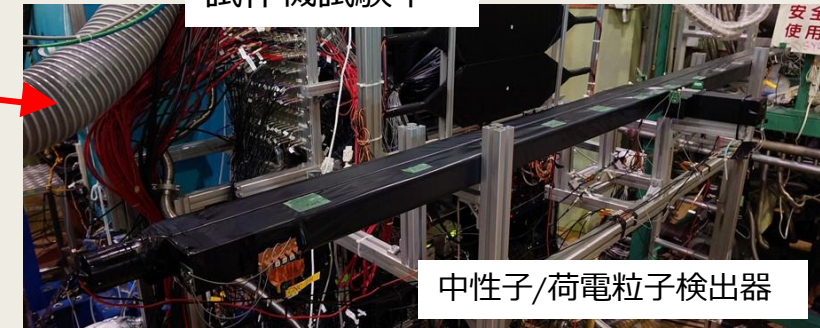
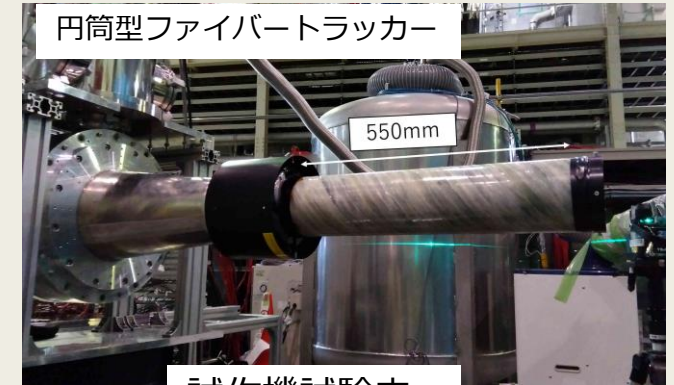
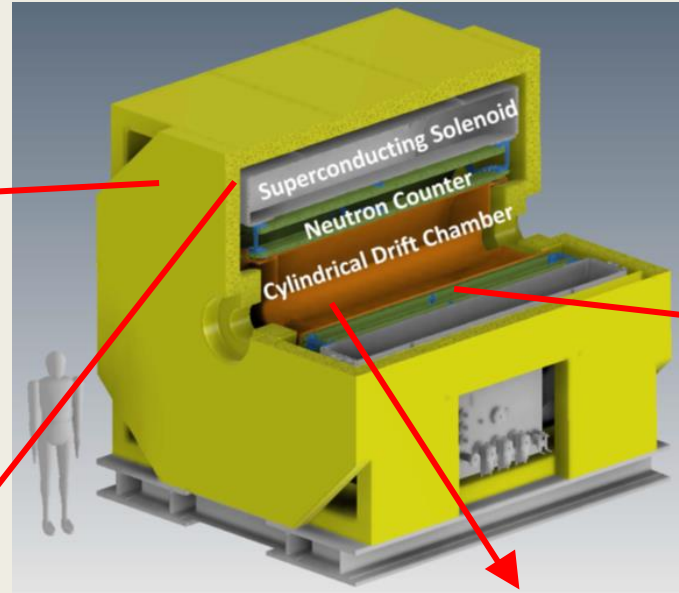
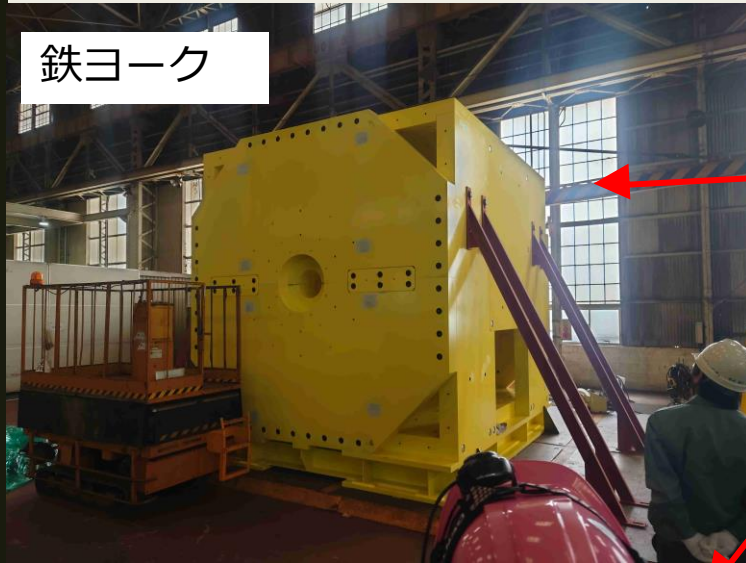
- “ K^-pp ”の荷電パートナー“ \bar{K}^0nn ”の探索

- 原子核的状態としての $\bar{K}NN$ の確立
- 生成断面積はスピンパリティを反映



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



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2026年度開始
 - $^3_\Lambda\text{H}$ 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ビームコミッショニングが2026年度末までに行われる
 - 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"→ Λd チャンネルなど

	FY2022-2023				FY2024				FY2025				FY2026				FY2027-			
					Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
SC Sorenoïd	Design, Purchase, Construction				Construction				Stored (at KEK)				Integration	Commissioning w/beam	Physics run	Analysis & publication, Other experiments				
CNC	Design & prototype test, purchase								assemble		test & commissioning									
CDC	Design		Construction		test & commissioning															
VFT	prototype test & performance evaluation								production											
K1.8BR beam line	E73 (lifetime measurement of hypertriton) experiment								E72 (Λ^* resonance search with HypTPC)				area rearrangement		with new CDS					

まとめ

- 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関与する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。
- 新スペクトロメータを建設したのちのビームコミッショニングおよび物理データ取得(\bar{K} NNN探索実験)は2026年度末から開始する見込みである。