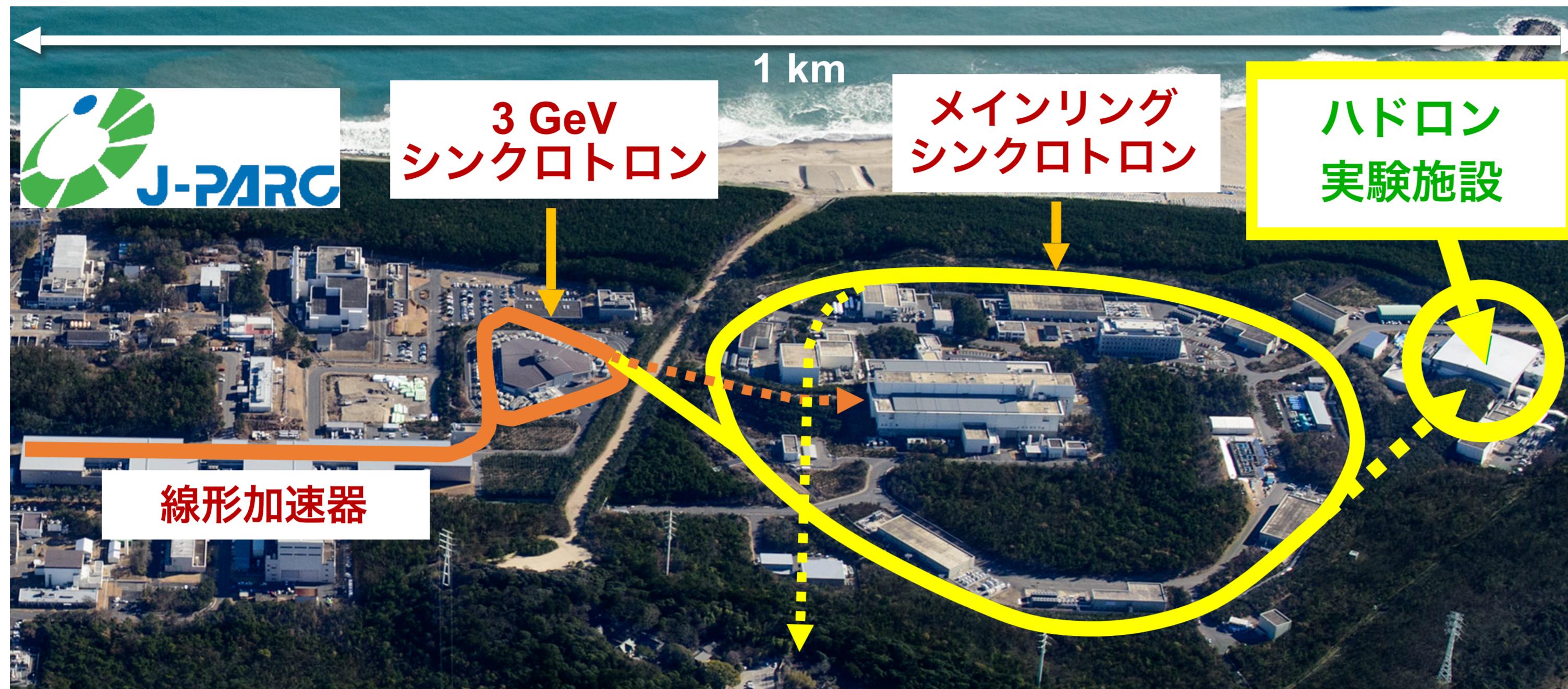


J-PARCでの“奇妙な”原子核研究

中間子理研ECL研究チーム

大強度陽子加速器施設 J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex)

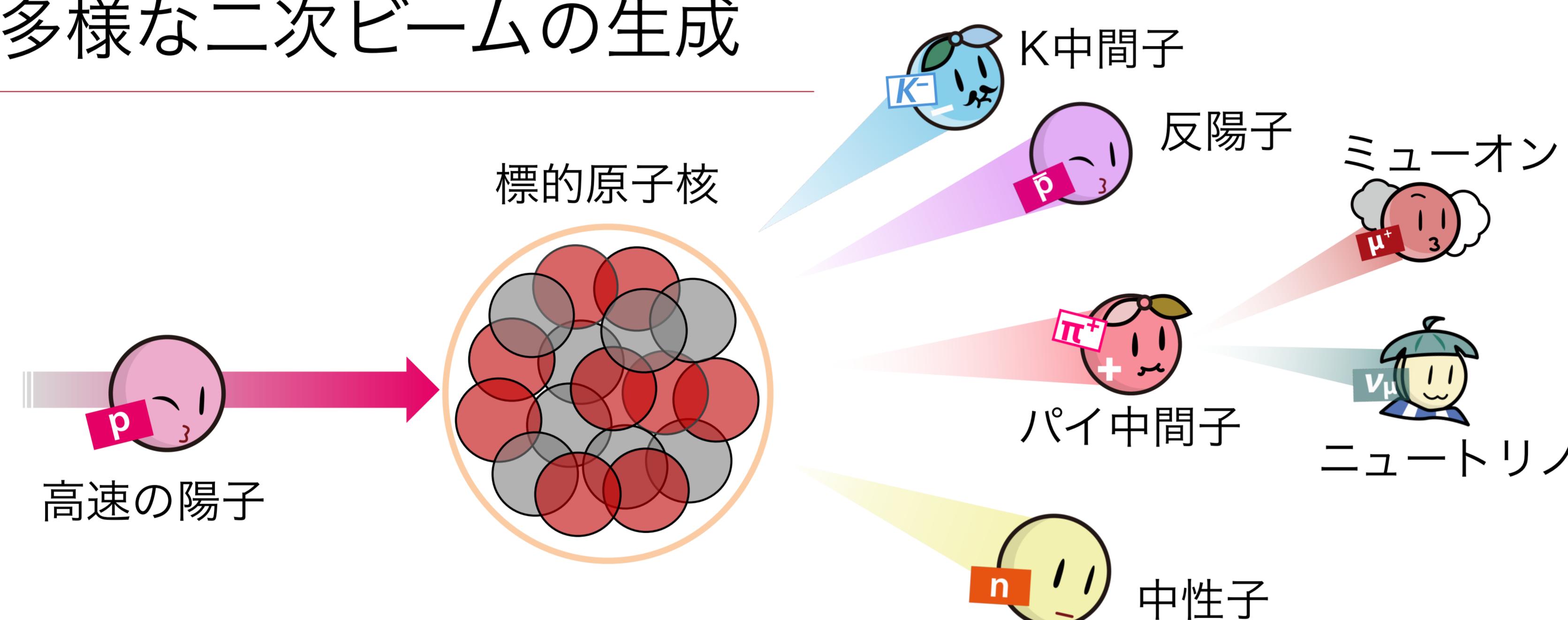
茨城県東海村にあるJ-PARCは、世界最高の大強度陽子ビーム（ビーム中の陽子数が多い！ビーム1かたまりあたり約100兆個）を生成しています。陽子ビームを標的にぶつけることで多様な二次ビームを生成し、いろいろな実験に用いられています。



ここRIBFとの違いは？

	J-PARC - MR	RIBF - SRC
加速方式	シンクロトロン	サイクロトロン
加速粒子	陽子	重イオン
粒子あたりの最大エネルギー	30 GeV (ほぼ光速)	核子あたり ~350 MeV (光速の70%)
ビームの多様性	陽子、二次粒子 K, π, μ, ν など	3000種類以上の放射性同位体
大きさ	直径約500 m	直径18.4 m

多様な二次ビームの生成



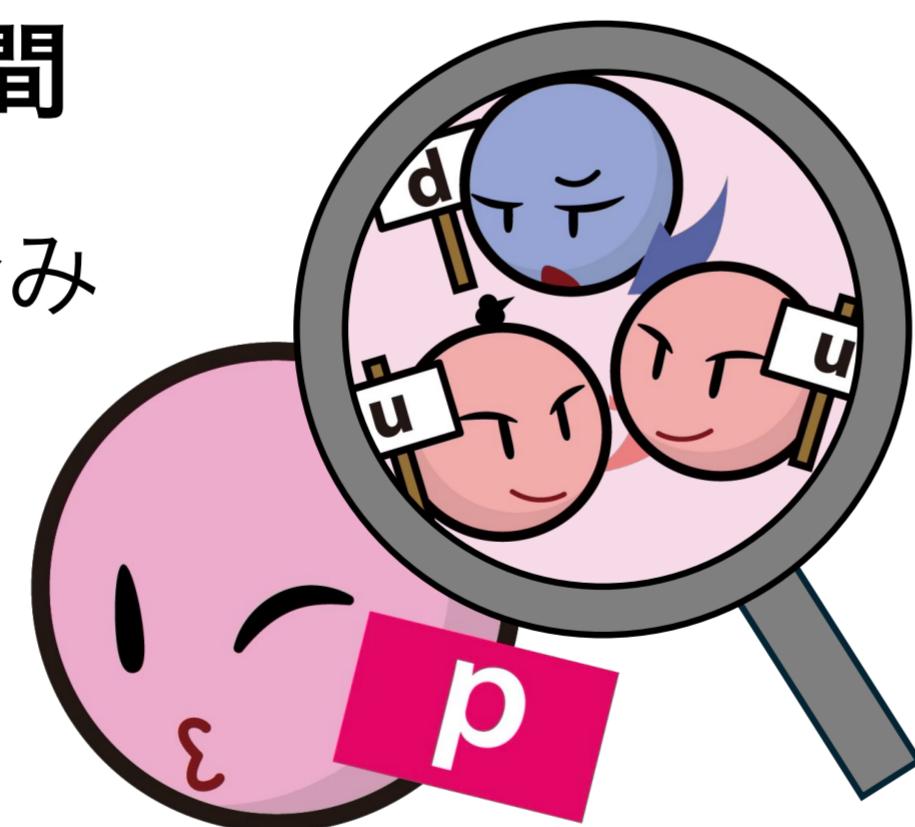
加速した陽子を標的にぶつけると、「ハドロン」や素粒子を含むさまざまな種類の二次ビームが出てきます。

ハドロンとは？

クォーク同士がくっついてできた複合粒子のことで、クォークの組み合わせなどで定義されたさまざまな種類のハドロンが見つかっています。ここでは2つのタイプを紹介します。

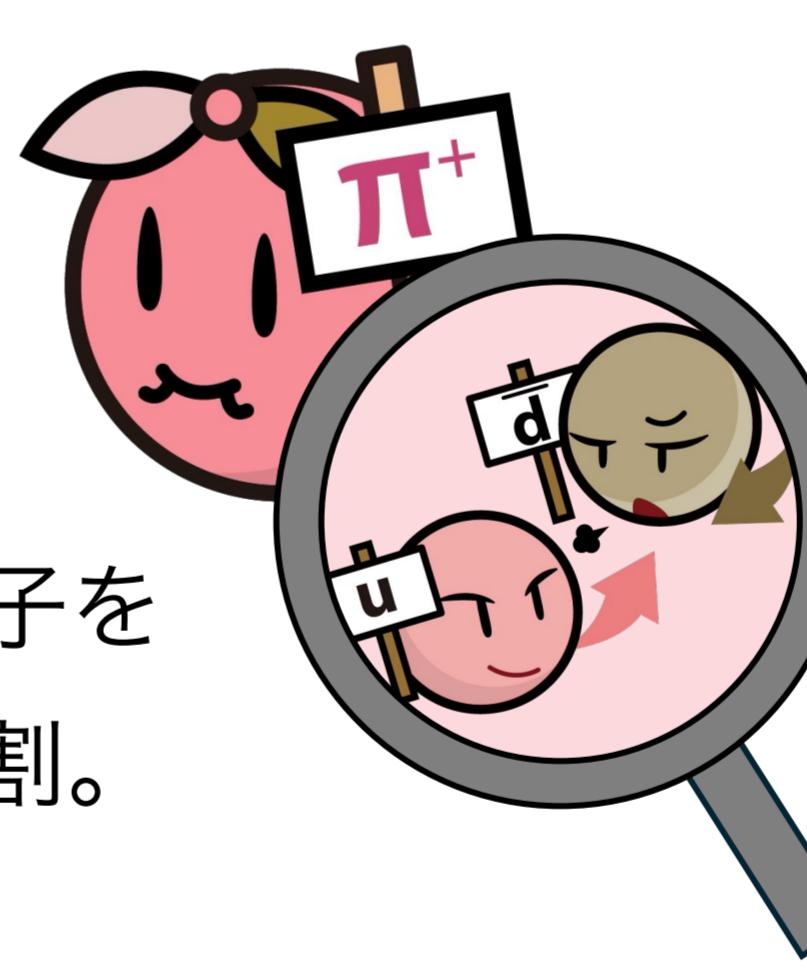
陽子/中性子の仲間

クォーク3つを含み宇宙の物質をつくる粒子。

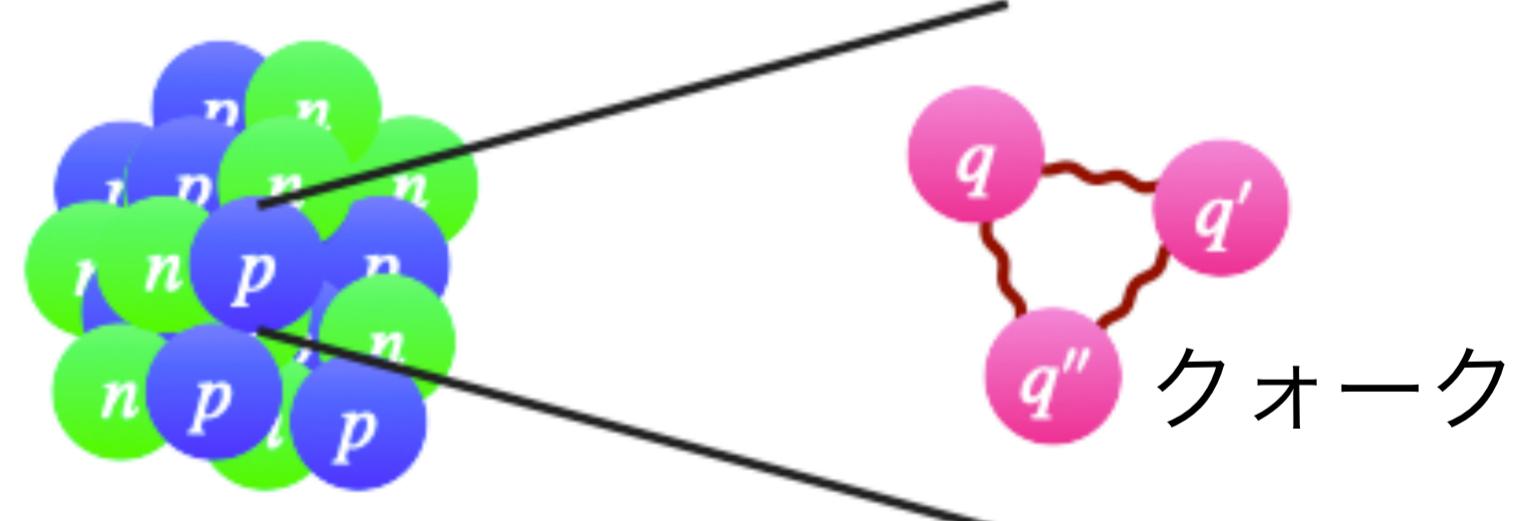


中間子

クォーク2つからなり、陽子や中性子をくっつける糊の役割。

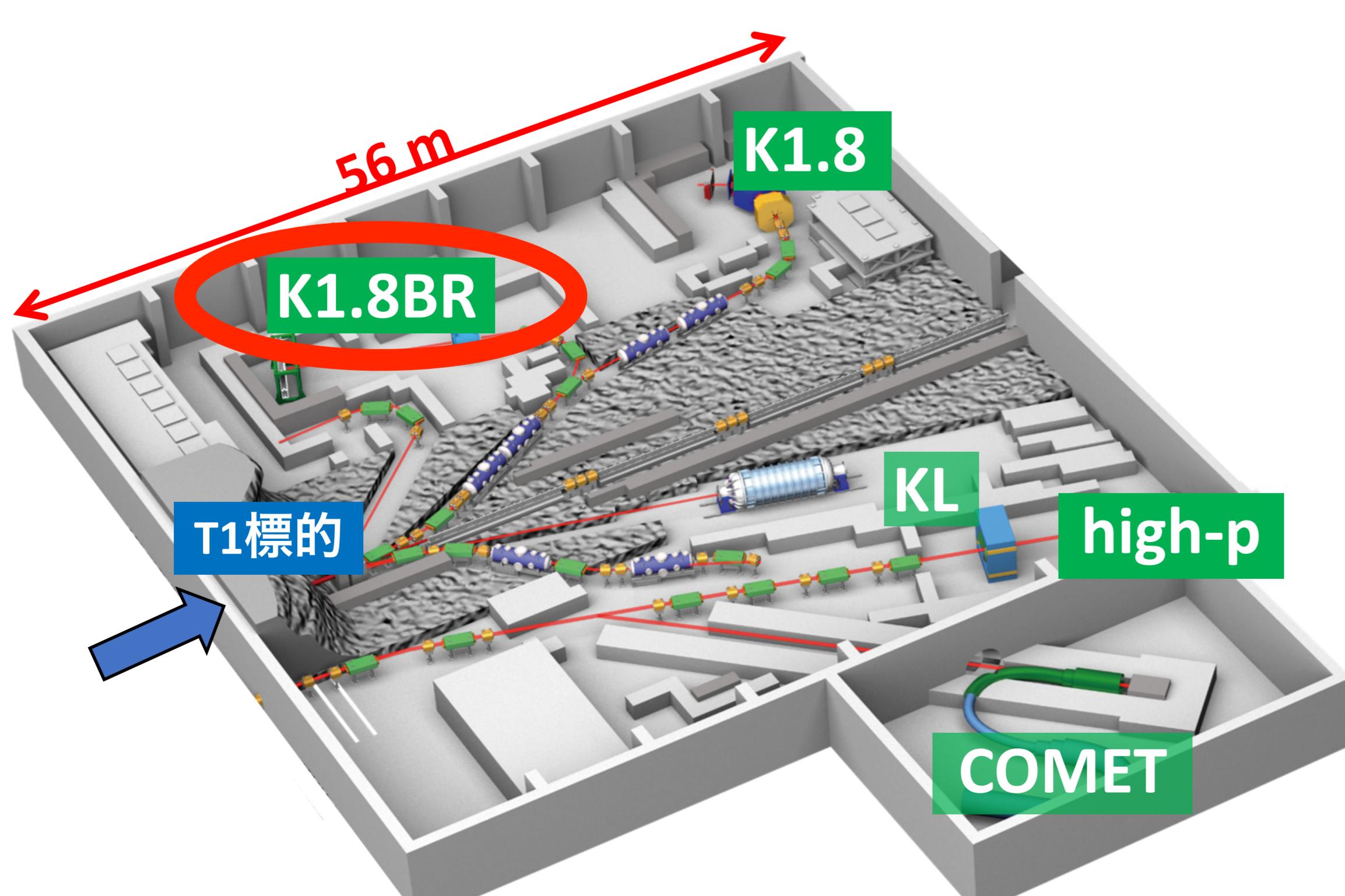


原子核 $\sim 10^{-14} \text{ m}$



核子(陽子/中性子) $\sim 10^{-15} \text{ m}$

ハドロン実験施設



メインリングで30 GeVに加速された陽子は約2秒かけてゆっくりと取り出され、ハドロン実験施設に輸送されます。T1標的（金原子核）で生成される二次ビームには多種の粒子が混ざっているので、このままでは使えません。多くの磁石をうまく組み合わせて、「使いたい」粒子のみを実験エリアまで輸送しています。

この施設では多様な二次ビーム、もしくは高エネルギー一次陽子ビームを用いて物質を作る力やその起源を探求する素粒子・原子核実験が展開されています。

我々のグループは主にK1.8BRというビームラインでK中間子ビームを用いた研究をしています。

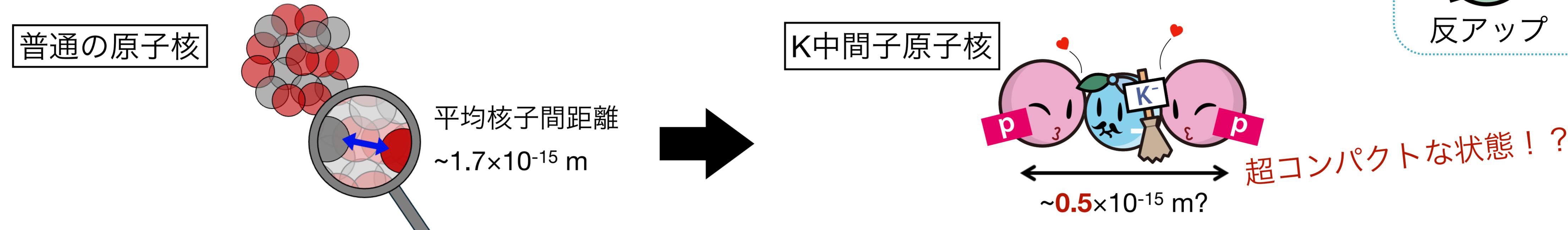
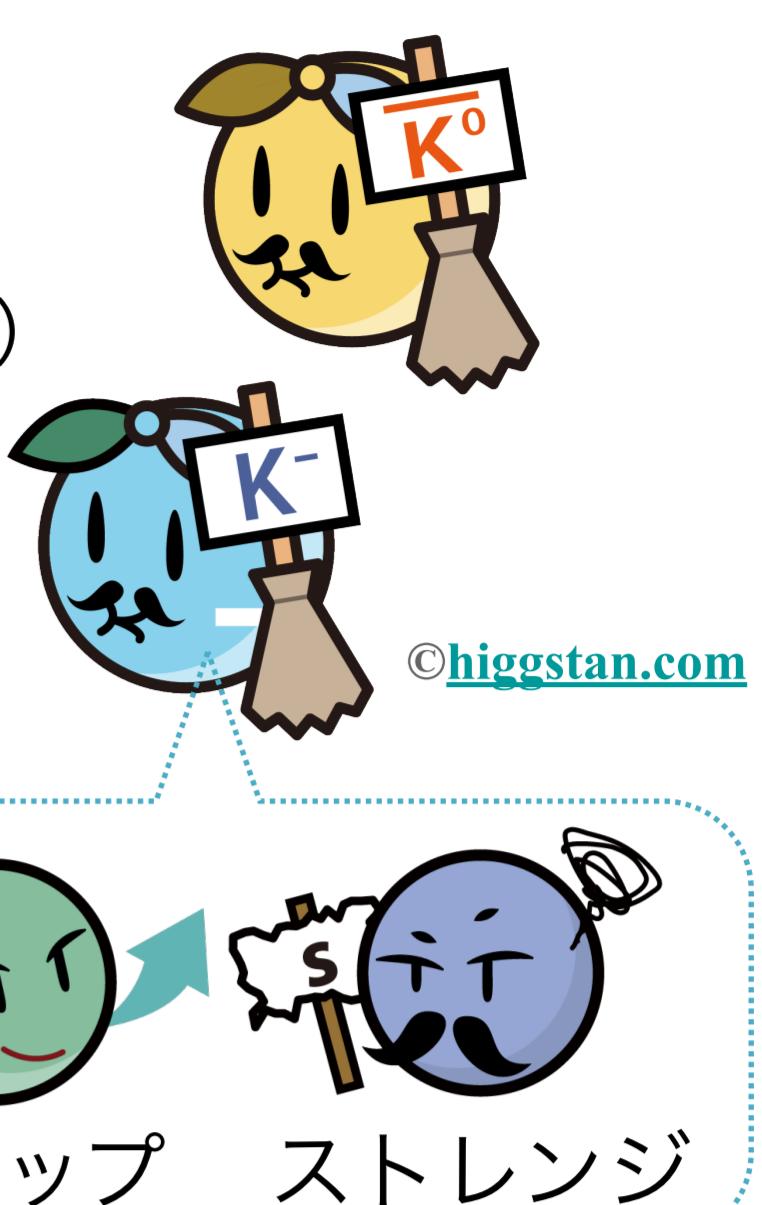
超コンパクトな原子核？「K中間子原子核」とは

原子核の中では、核子（陽子や中性子）同士が「強い力」で引き合って結びついています。この力を伝えるのが「中間子」と呼ばれる粒子です。では、その中間子が自分自身、原子核の中にとじこめられたらどうなるのでしょうか？

特にK中間子は、核子との間にとても強い引力が働くと考えられています。

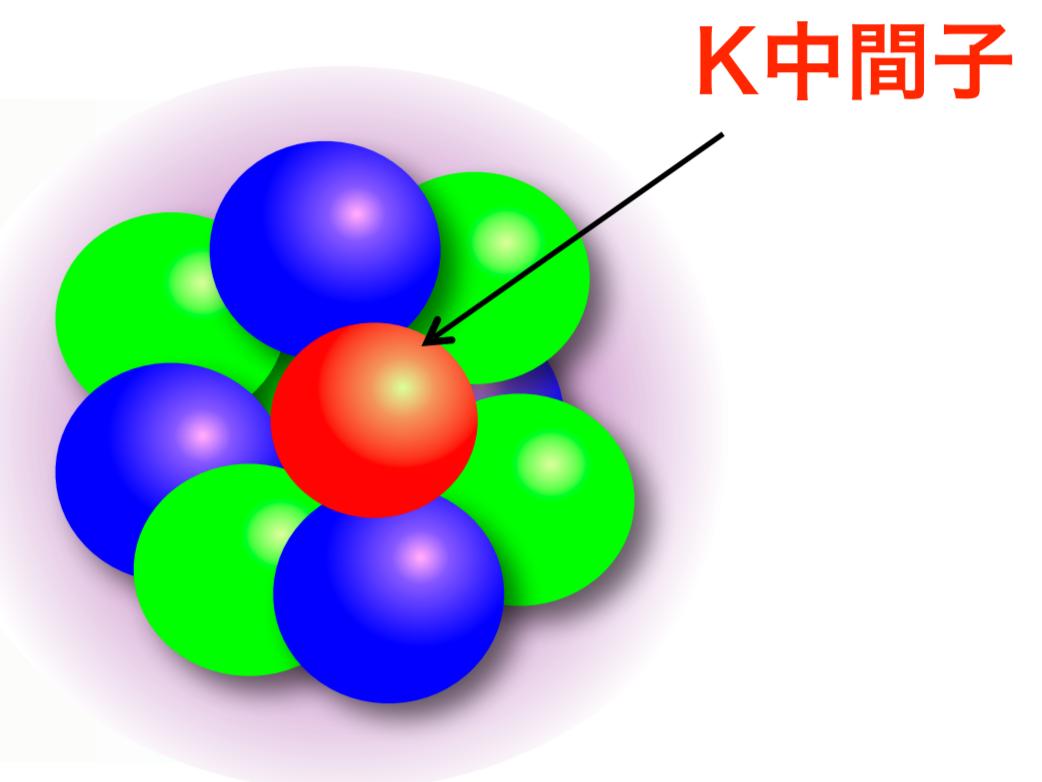
K中間子が原子核の中に入り込んだ“奇妙な”原子核「K中間子原子核」は、普通の原子核よりもずっと高密度な物質になり得るかもしれません。

原子核の構成要素となれる
反K中間子たち
(ストレンジネス量子数 = -1)



K中間子原子核の性質を調べることで物質の成り立ちのヒントを得る

- ・中間子が入ると原子核はどんな状態に変わらるのか？
- ・超高密度な極限状態における強い力はどのように働く？
- ・宇宙の中性子星の中心やクォーク物質はどんな状態になっている？

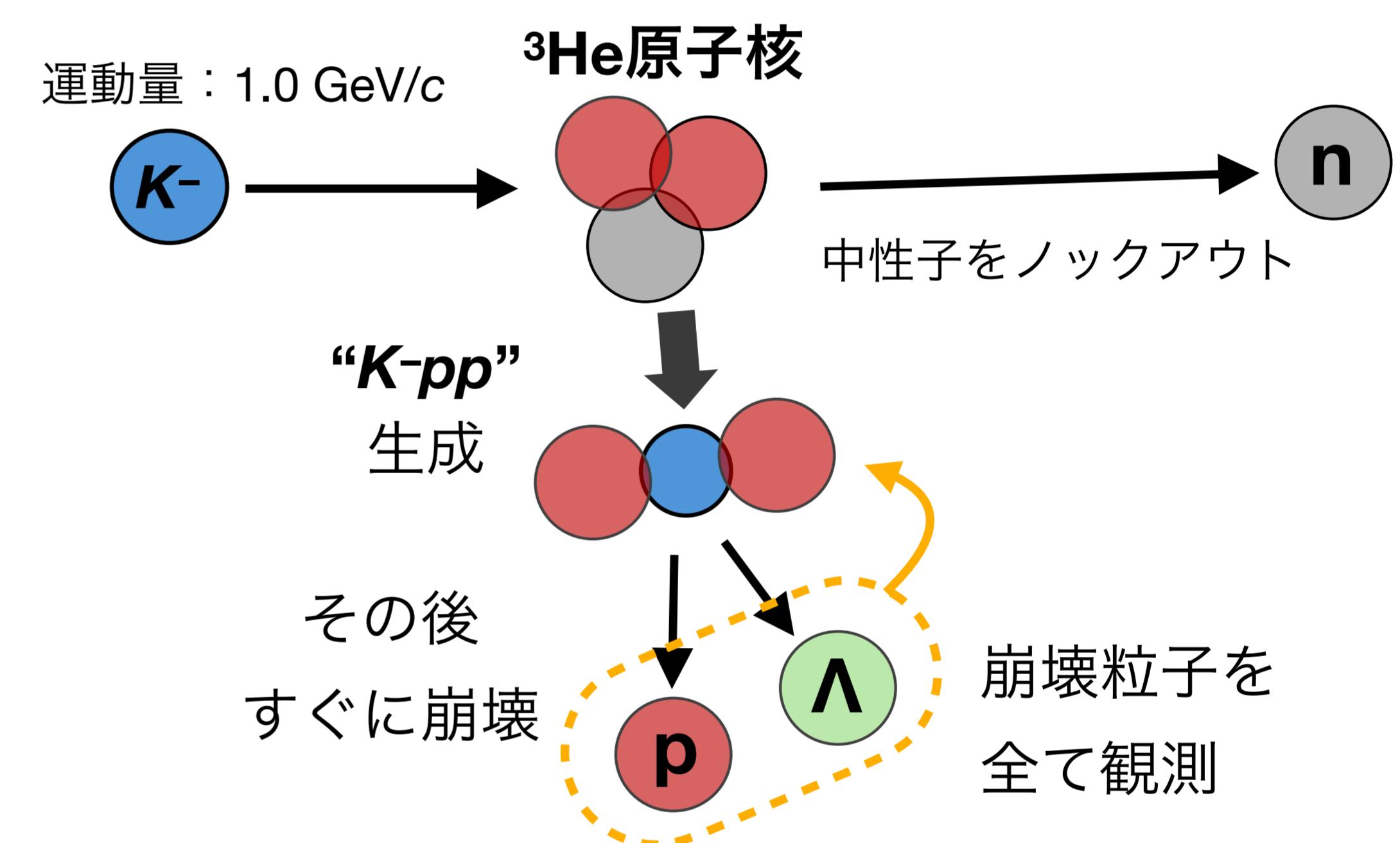


どうやって調べる？

J-PARCで供給される高速のK中間子ビームを用い、直接標的の原子核に打ち込みます。

^3He 原子核から中性子をたたき出すと、K中間子が1つと陽子が2つのK中間子原子核“K-pp”を生成することができます。

K中間子原子核はとても寿命が短いため、すぐに崩壊します。この時に出てくる全ての崩壊粒子の運動量を詳しく測定することで、崩壊前のK中間子原子核の質量や寿命などの情報を調べることができます。



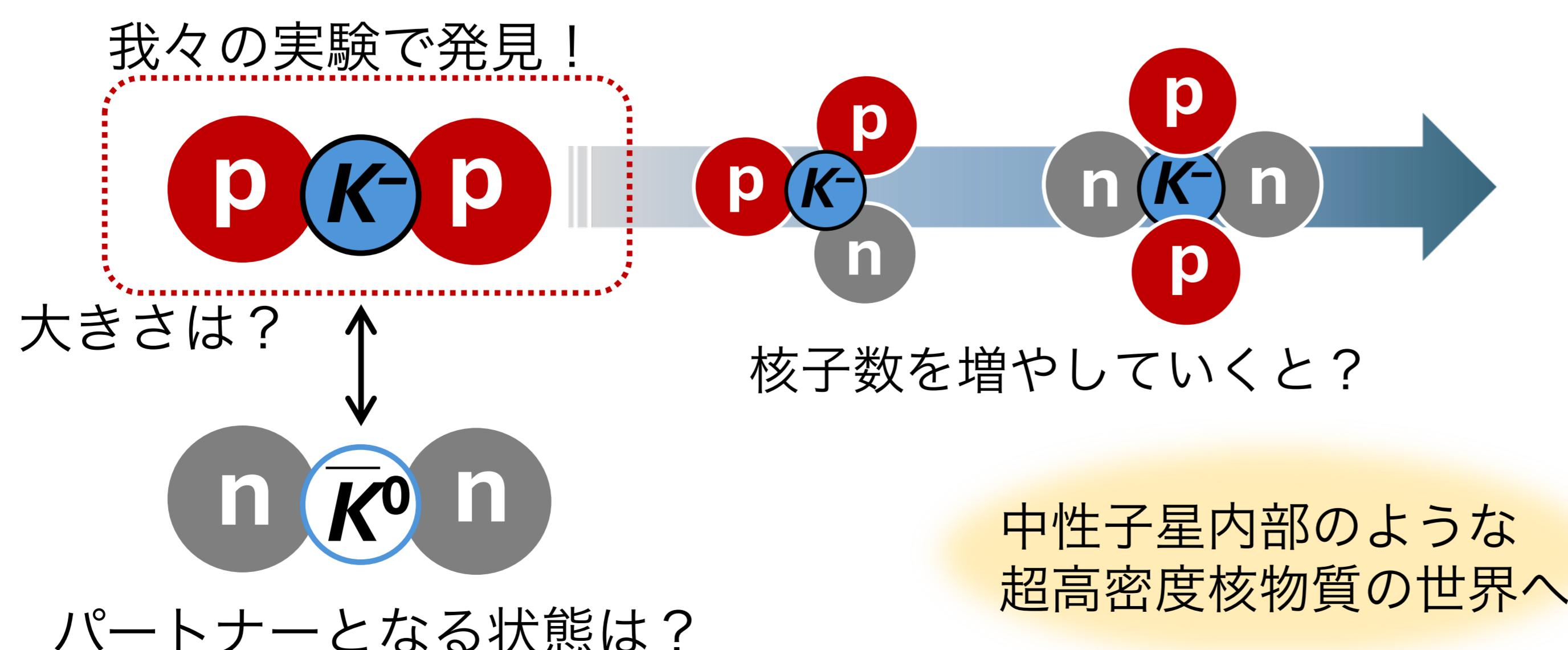
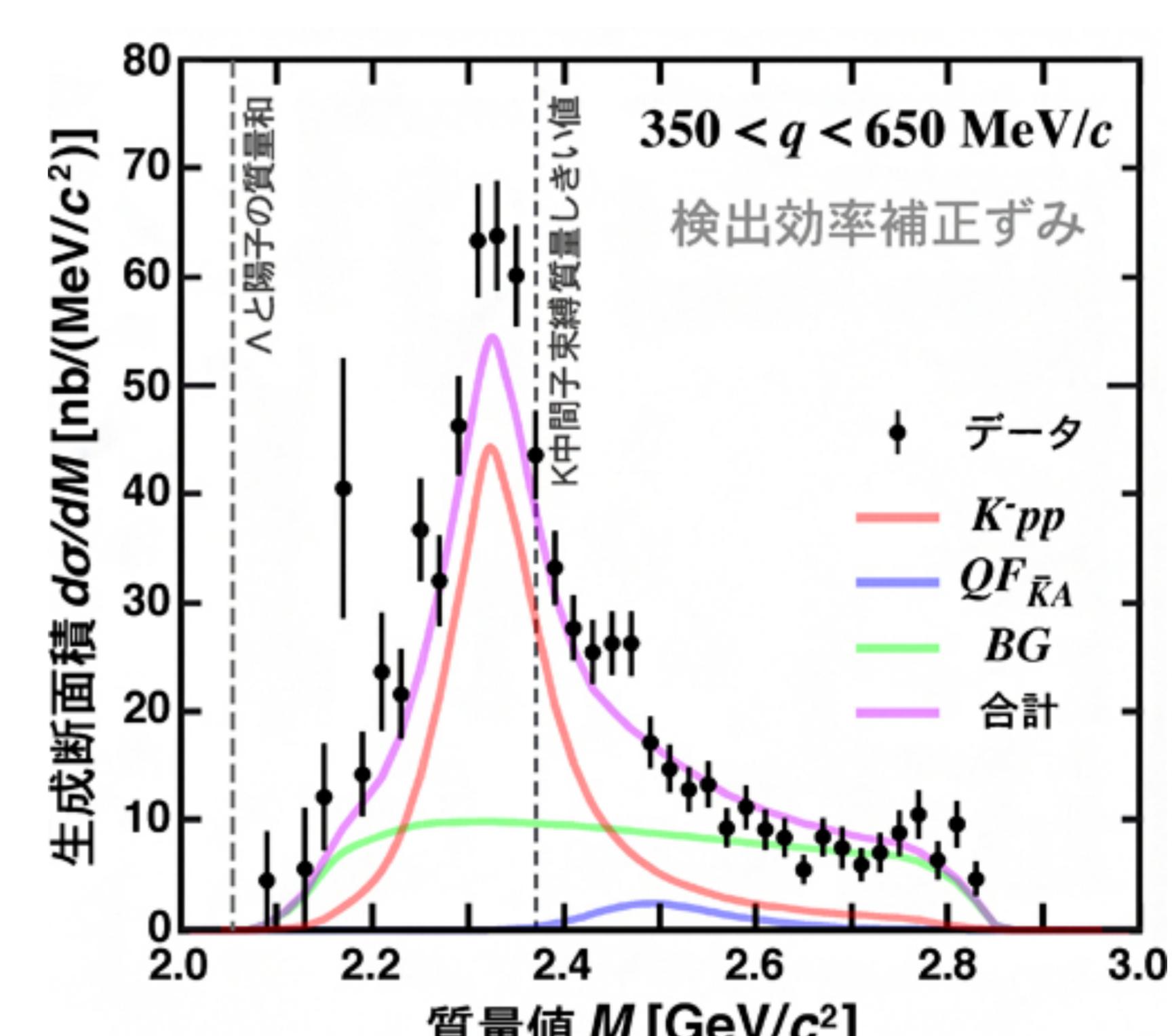
J-PARCで発見されたK中間子原子核、次はその性質を明らかに

我々の実験では、上記の反応により生成されたK中間子原子核“K-pp”的明瞭な質量ピーカーを観測しました（右図）。

K中間子原子核の探索は世界中で行われていますが、明確なピーカーを観測したのはJ-PARCにおける本実験のみです。

◎J-PARC実験の利点

- ・大強度K中間子ビームを使ったシンプルな生成反応
- ・大立体角を覆う検出器で全崩壊粒子を観測



K中間子原子核を発見した検出器群をアップグレードし、これらの性質を調べる研究がスタートしています！

J-PARCで発見された「最もシンプルなK中間子原子核」を起点に、次はその性質に迫ります。

実際にその大きさはどのくらいでしょうか。またパートナーとなる状態“ $\bar{K}^0 nn$ ”も存在するかもしれません。

さらに核子数やK中間子が2, 3, 4...と増えていくとその質量や密度はどうなるでしょうか。

標的を囲む円筒型検出器群

飛行時間検出器

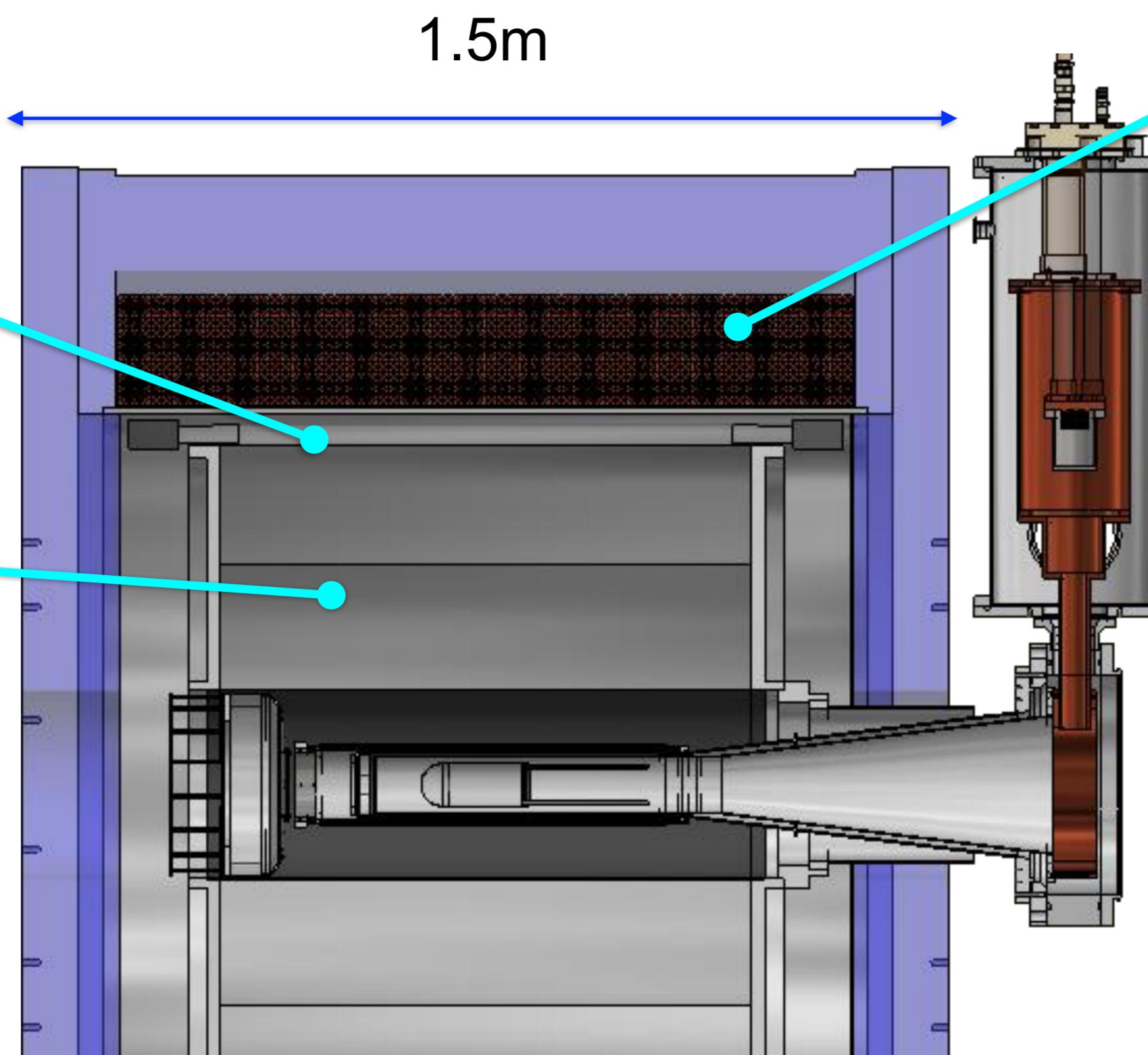
飛行時間を計測して粒子の速さを求め、粒子の種類を識別します。

飛跡検出器

横に実物あります！

ガスで満たされた領域内に信号検出用ワイヤー(陽極)と電場生成用ワイヤー(陰極)が多数張られています。陰極ワイヤーに-2800Vという高電圧をかけることで、陰極ワイヤーから六角形セルの中心にある陽極ワイヤーへ向かう電場が作られます。

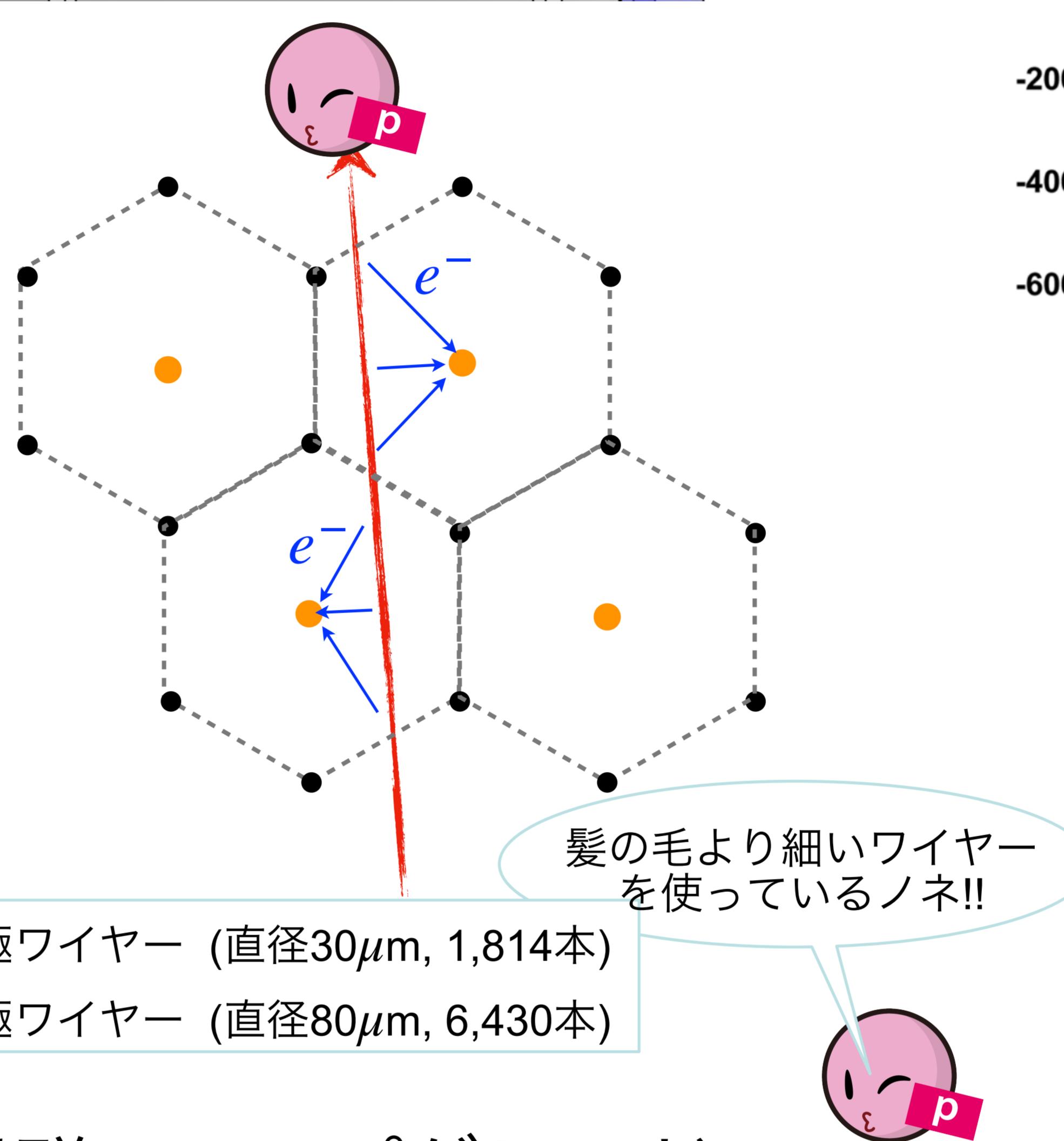
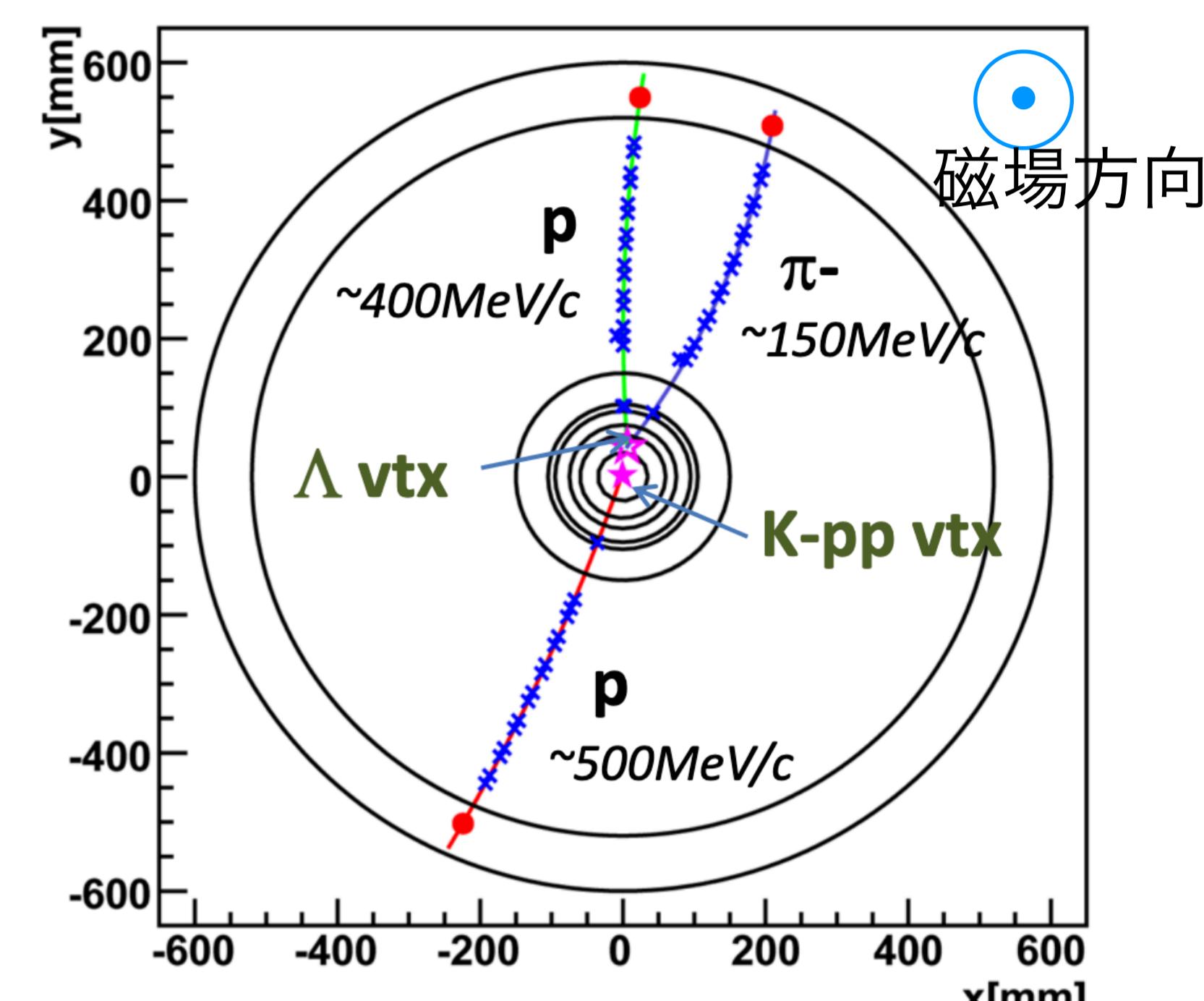
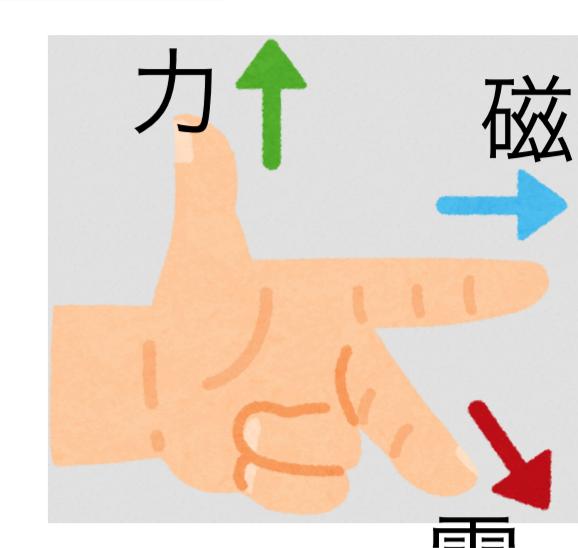
荷電粒子が検出器を通過すると、気体原子を電離します。生じた電子は、セル内の電場によって陽極ワイヤーへ向かって移動します。陽極ワイヤー付近では急激に電場が強くなり、電子達は加速されエネルギーが増し、さらに周囲の原子を次々に電離させます。この過程が繰り返されることで電子の数は雪だるま式に増え、最終的に数万個の電子が信号として読み出されます。



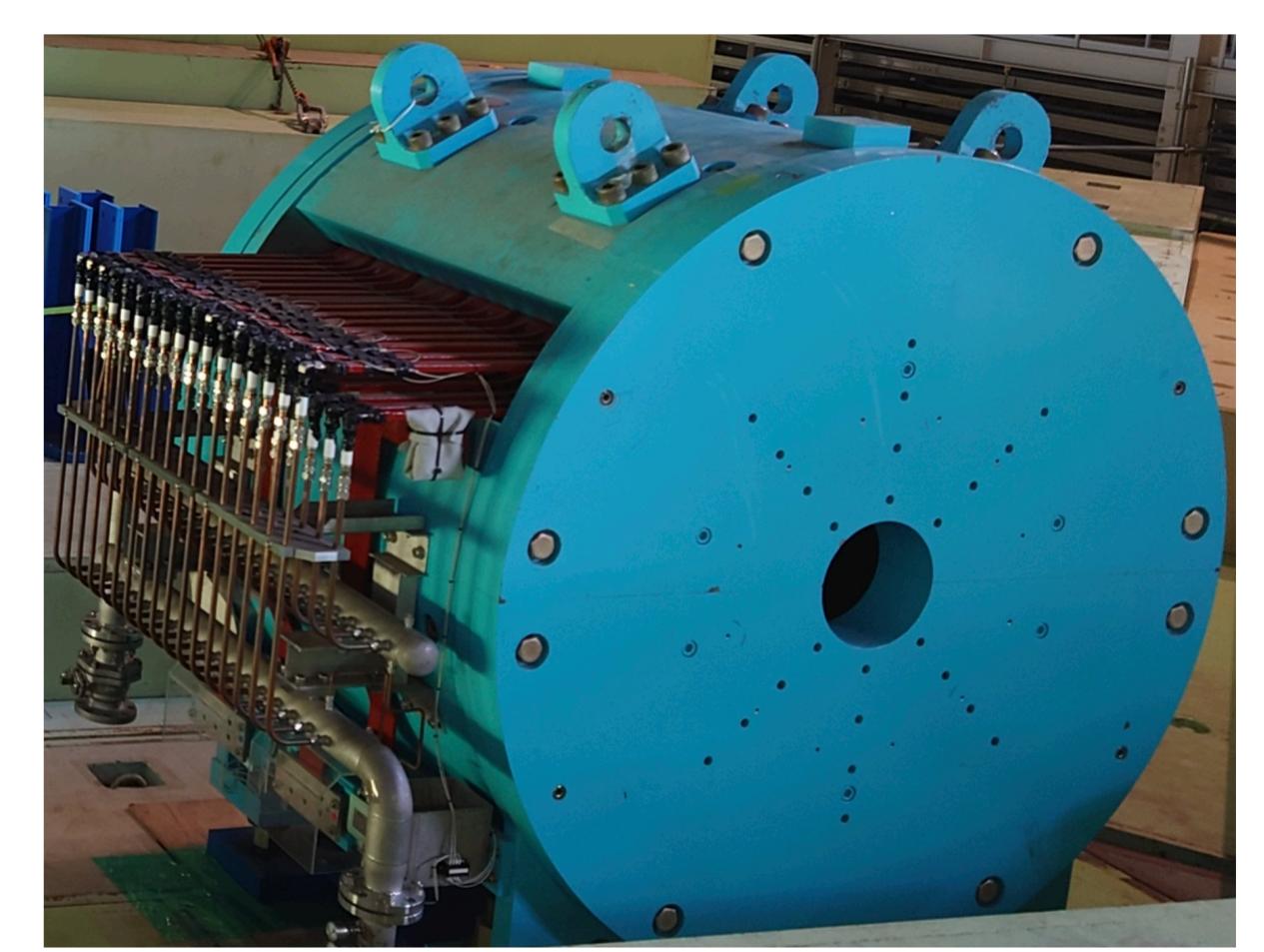
常伝導ソレノイド磁石

磁場から力を受けた荷電粒子は螺旋上の飛跡を残します。その曲がり具合から運動量を計算できます。

フレミング左手の法則



- 陽極ワイヤー (直径30μm, 1,814本)
- 陰極ワイヤー (直径80μm, 6,430本)

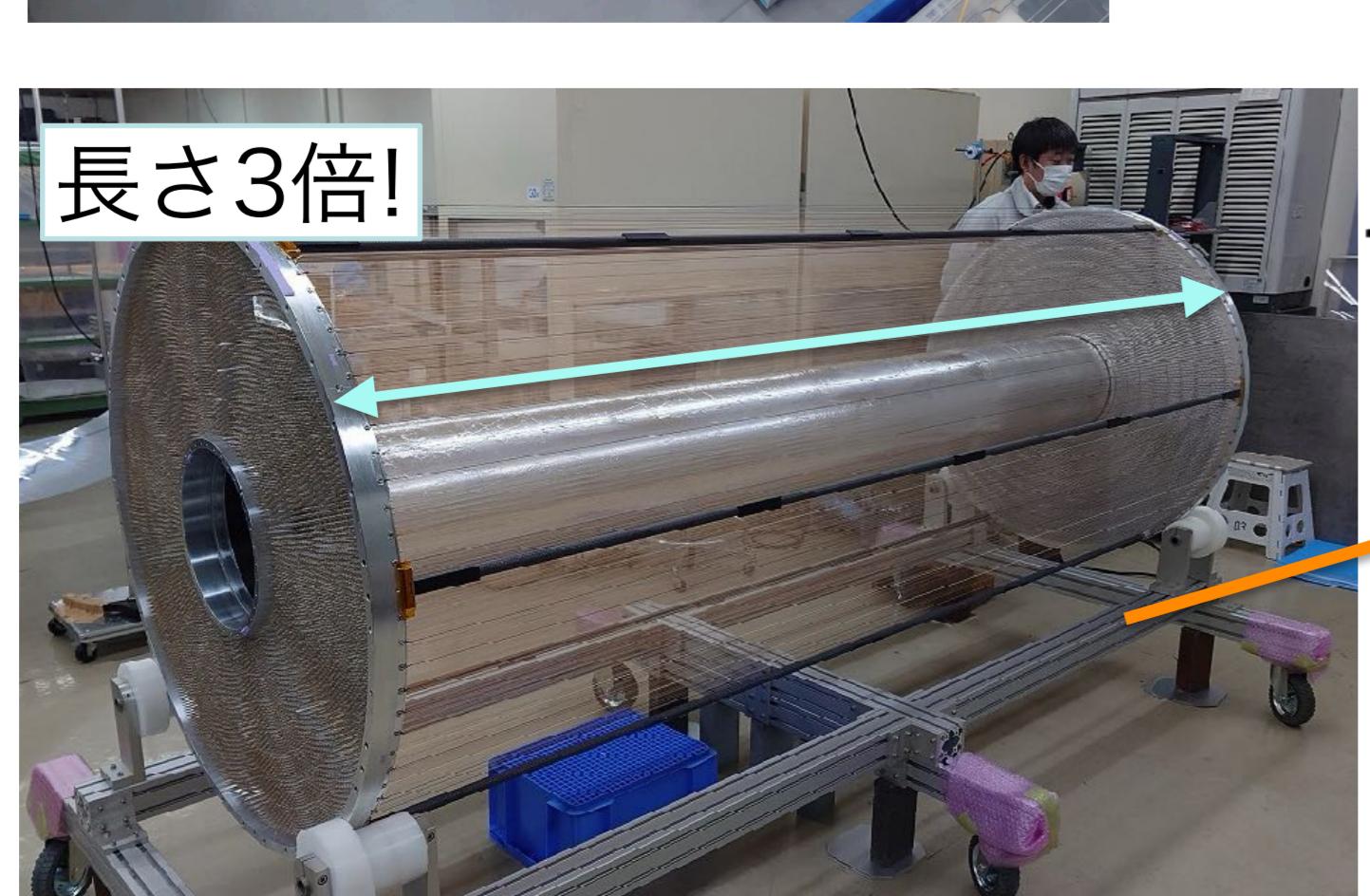
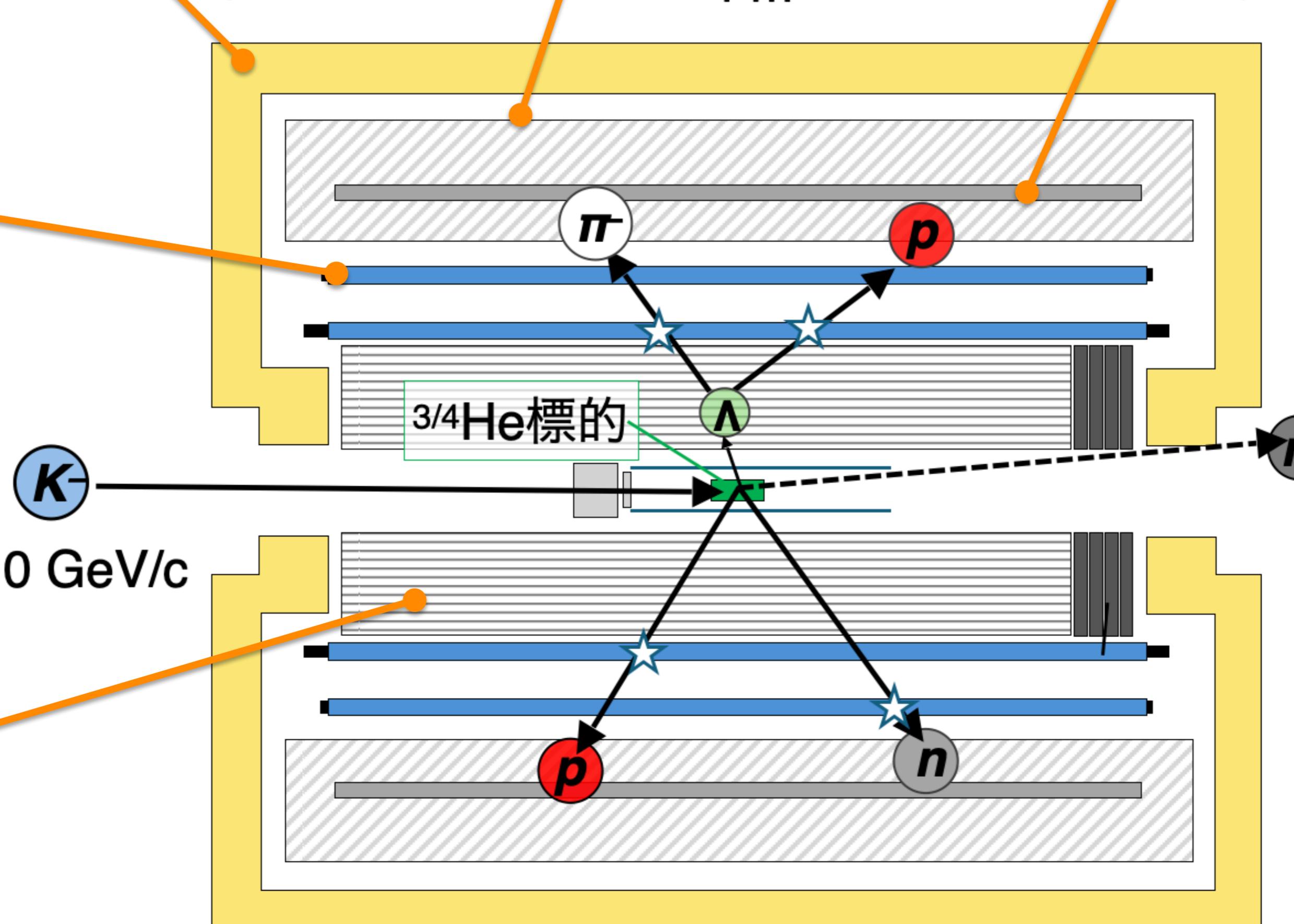
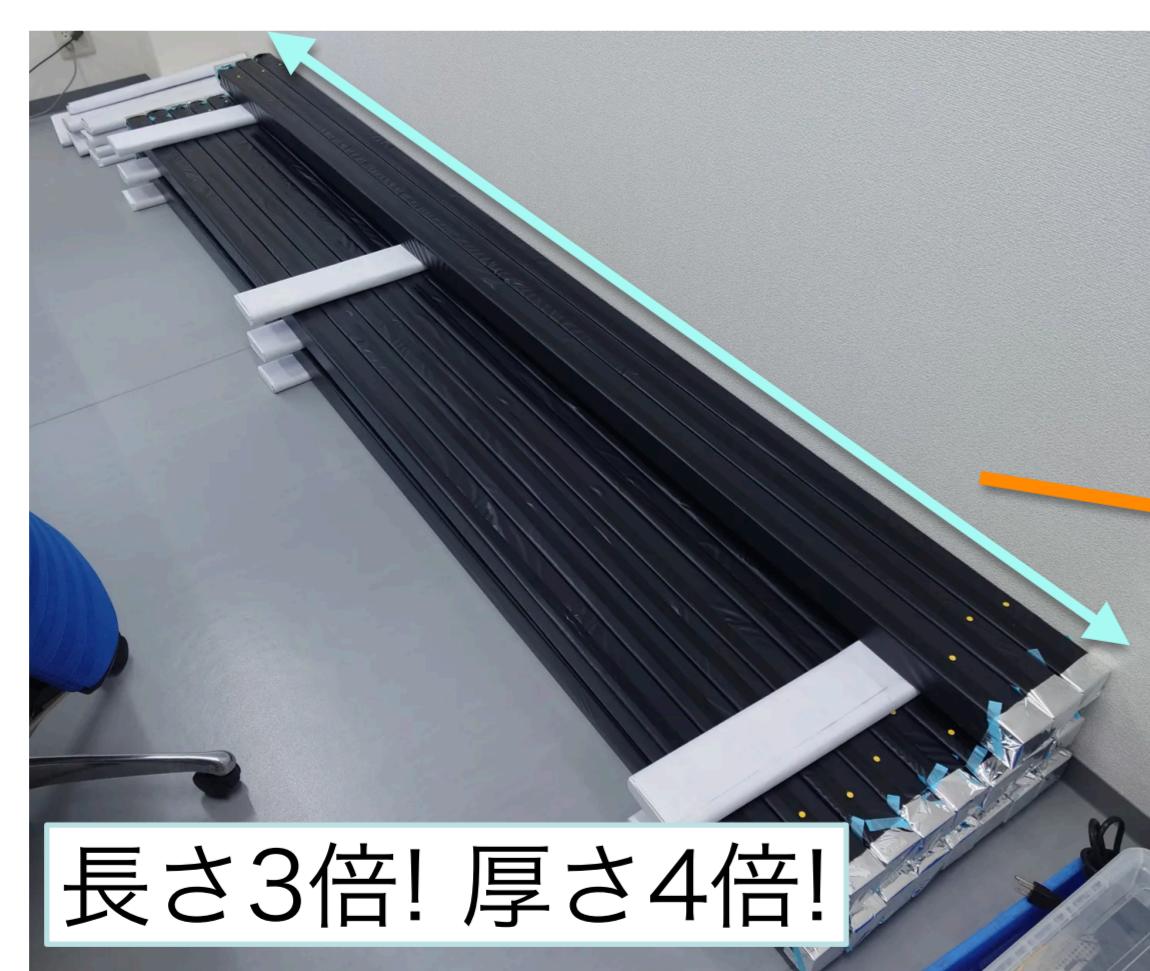
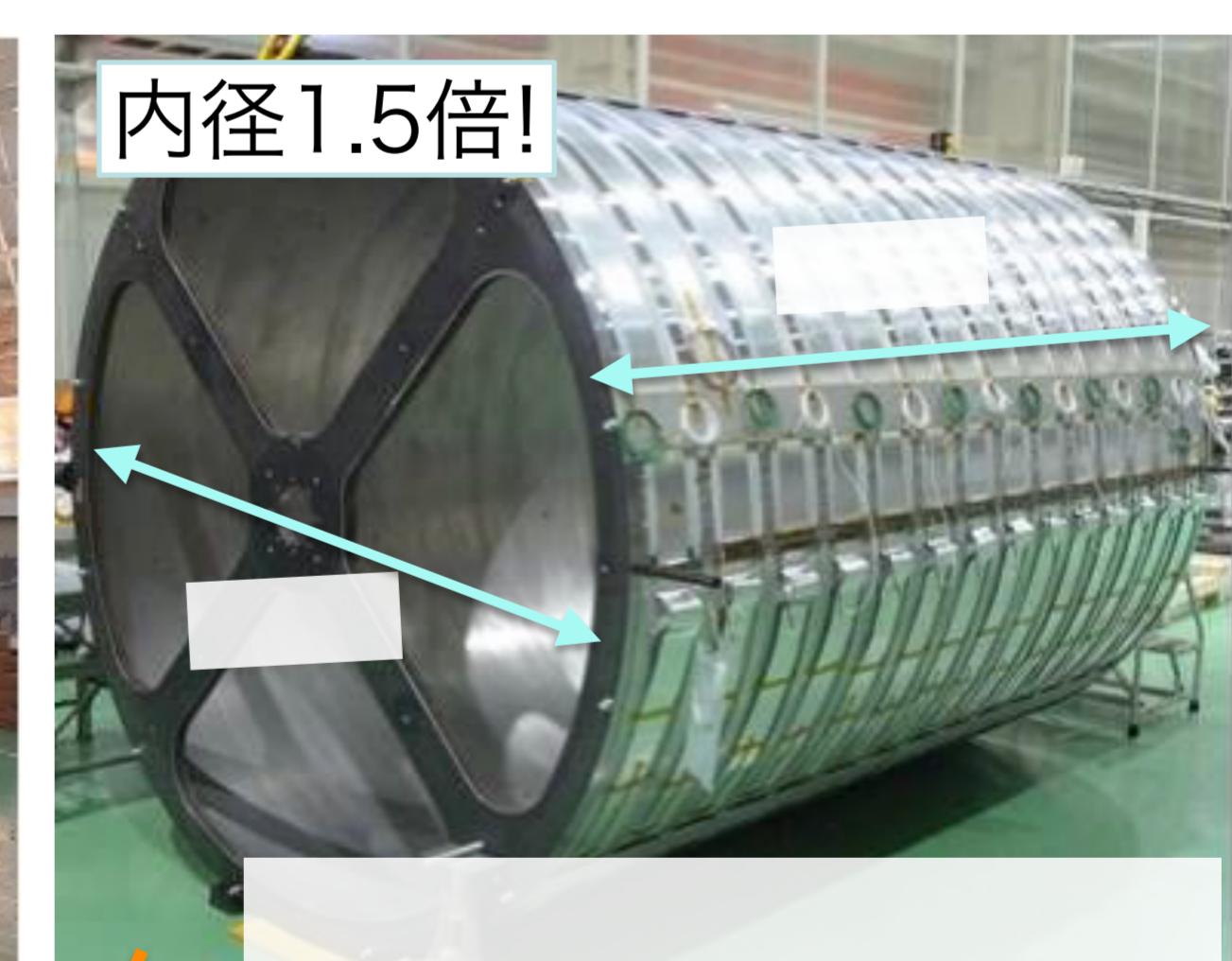


RIBF地下のどこかに隠れてるよ！
探してみてね！

新“大立体角”円筒型検出器群へアップグレード

私たちは現在はアップグレードさせた新たな円筒型検出器群を開発・建設しています。

- とにかく検出器を長く! → ほぼ全方向で粒子を検出できるように！
- 飛行時間検出器の厚みを4倍に! → 中性子を検出してより多種のK中間子原子核の調査も可能に！



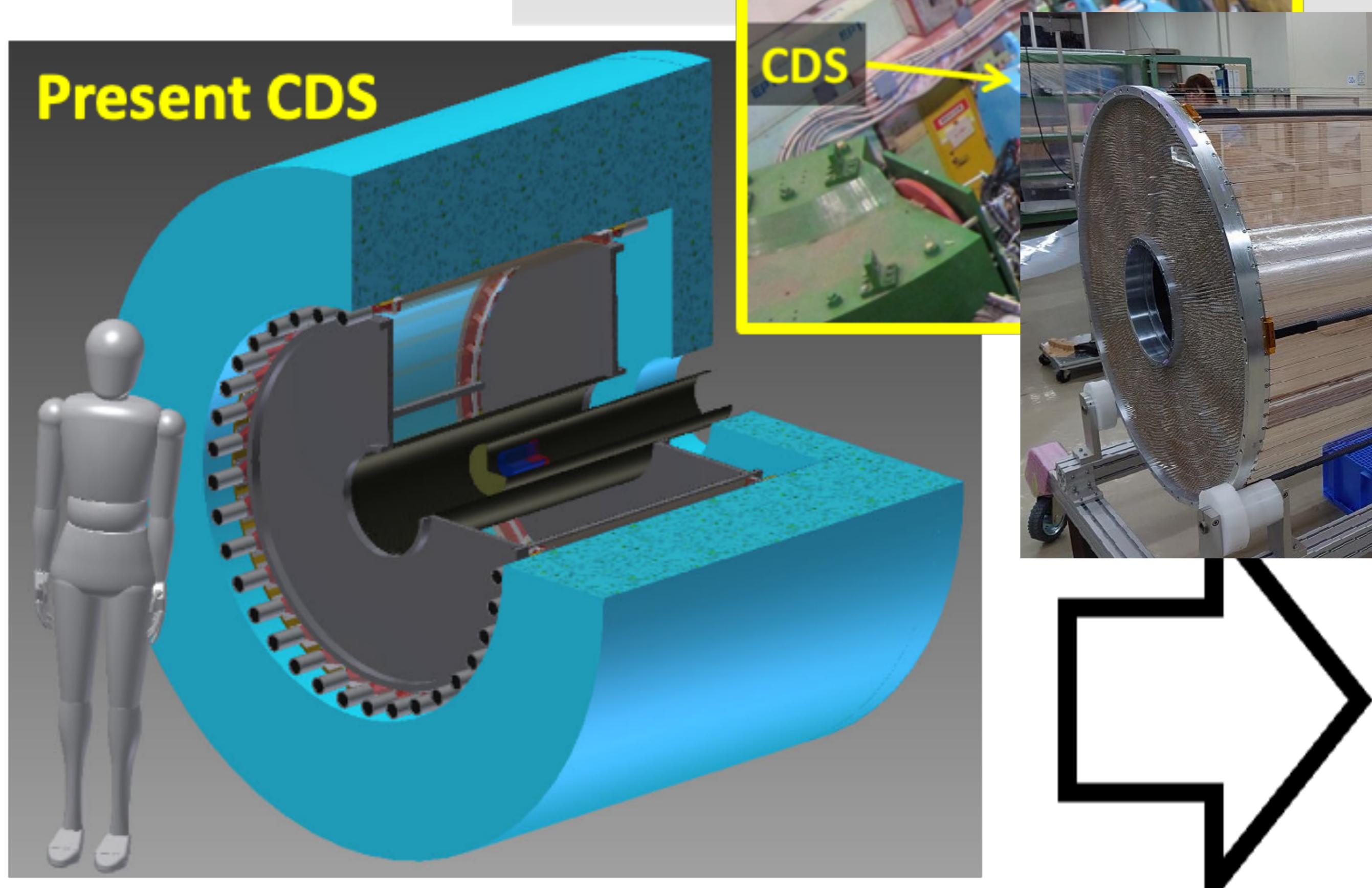
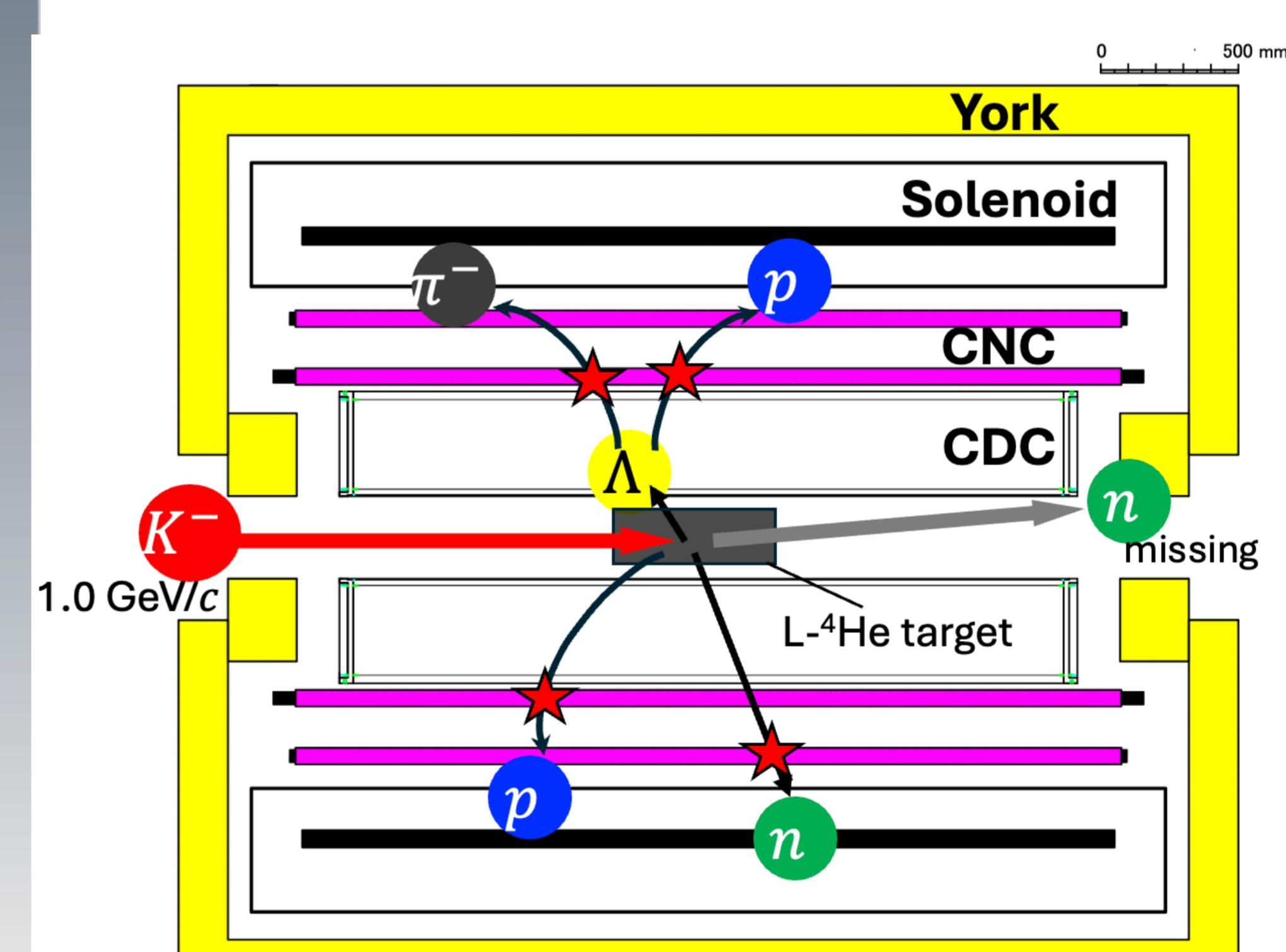
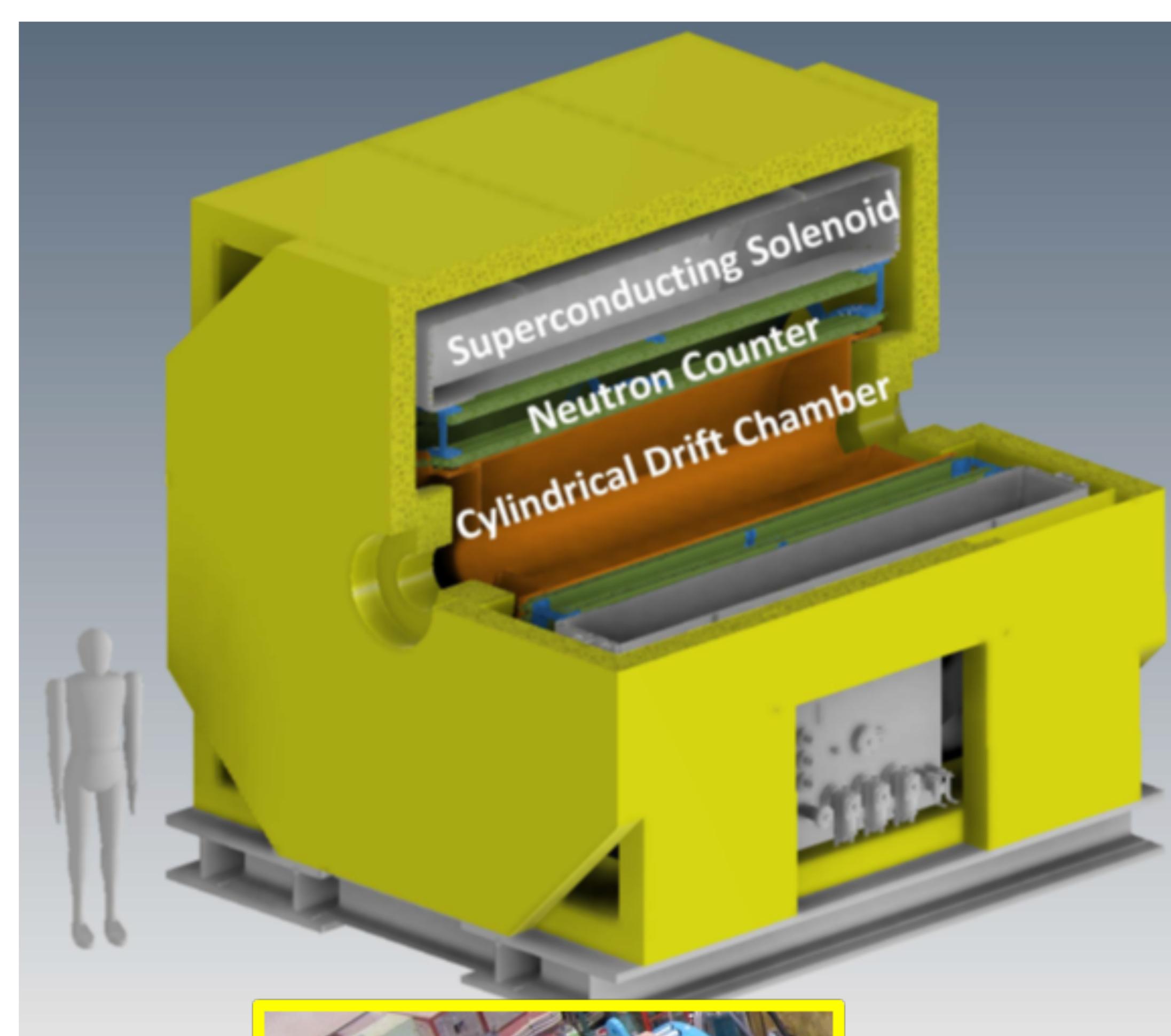
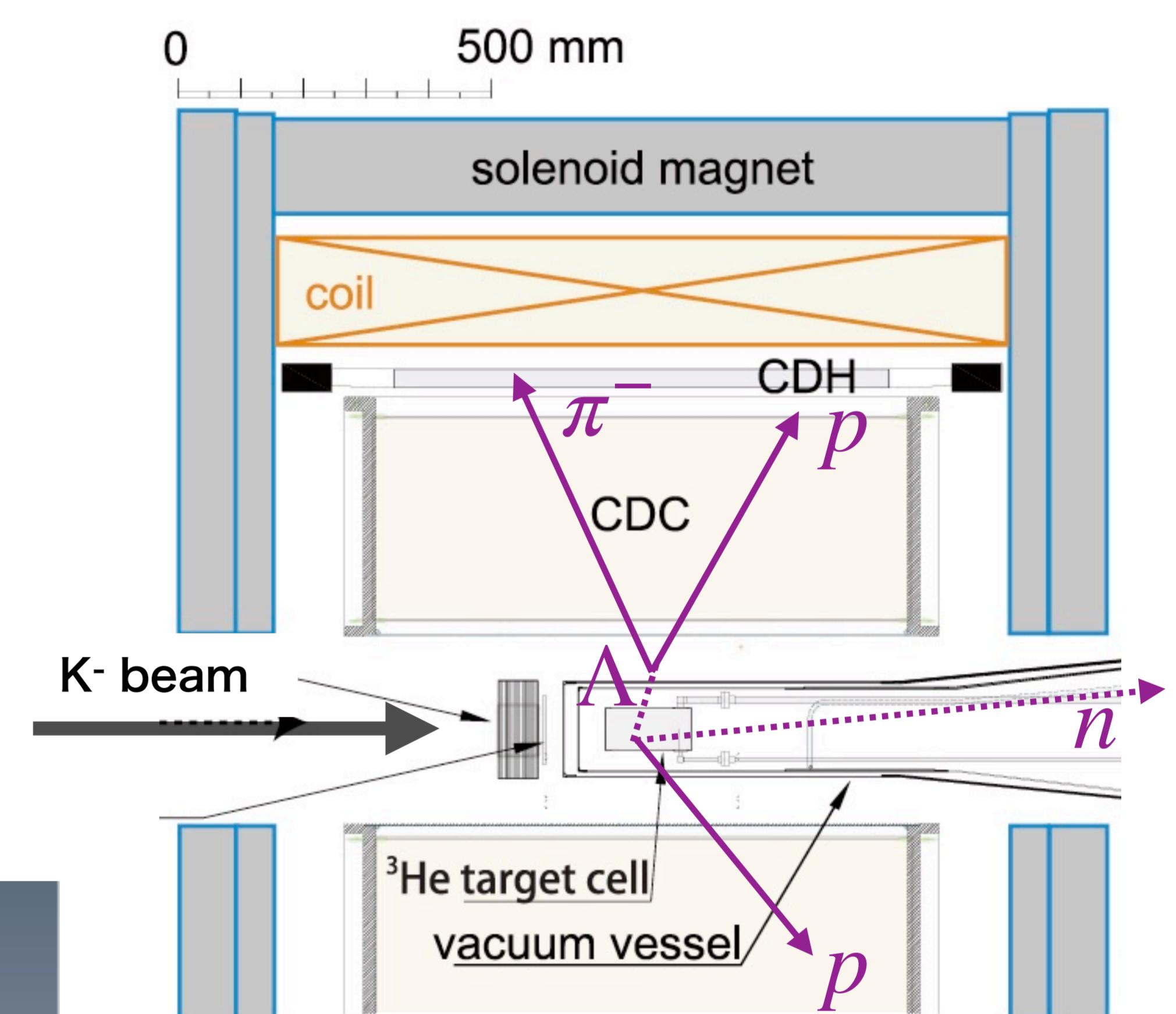
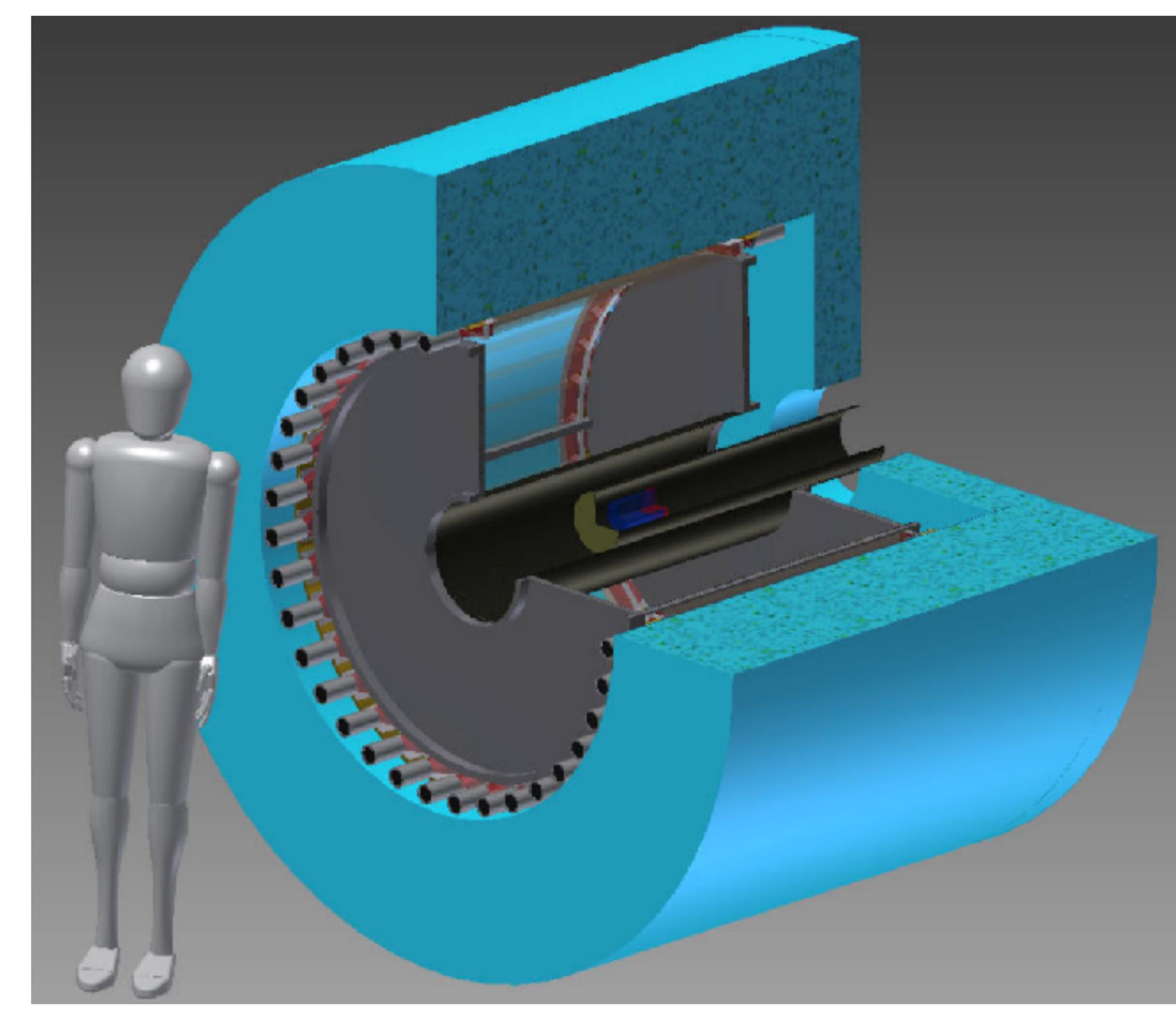
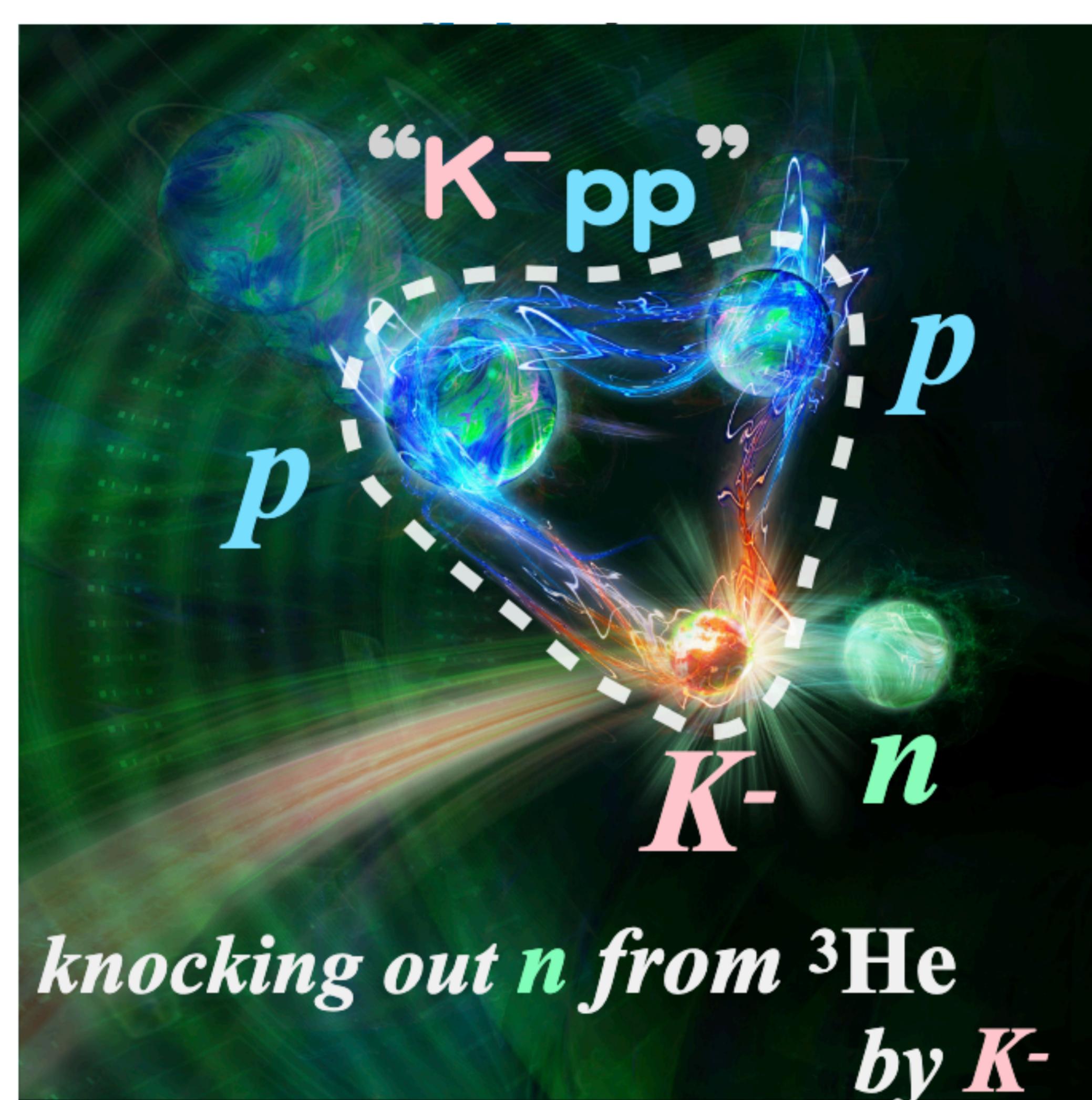
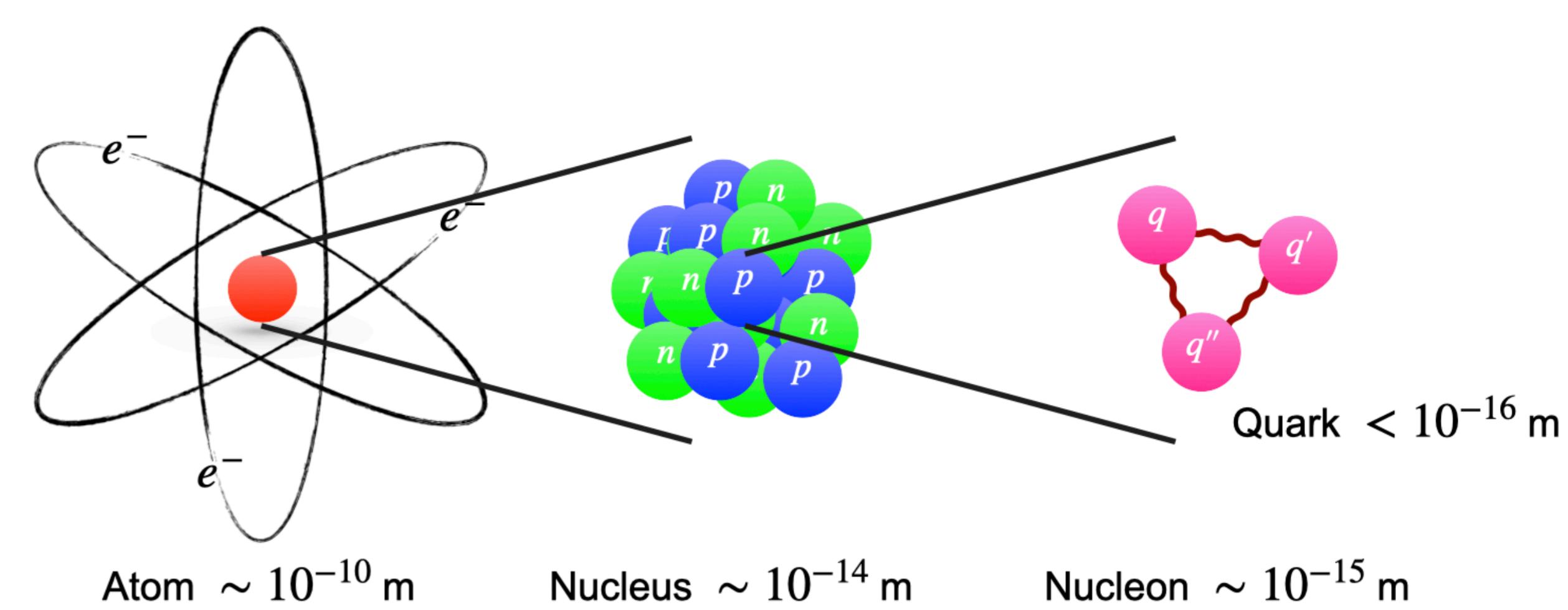
K中間子原子核の系統的調査・性質解明へ向けて、新しい検出器群の開発＆建設が続々と進んでいます！
2027年、いよいよ初陣。
新検出器の活躍をお楽しみに
o(^o^)o

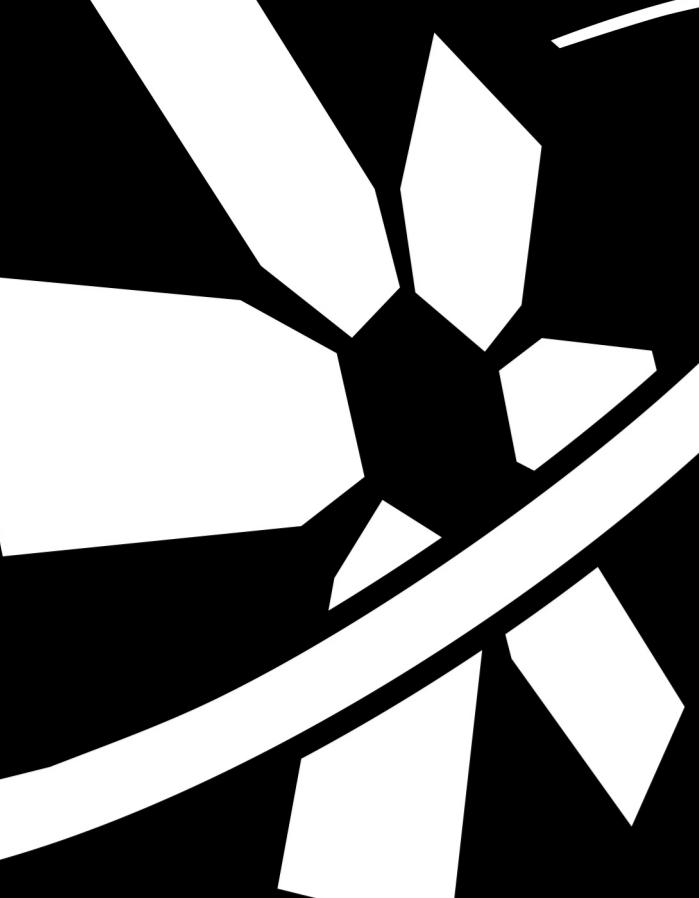
ぜひ10分の1模型も見ていってね！！



素材置場

1st generation	2nd generation	3rd generation
Mass: ~2.2 MeV/c ² +2/3 e “Up” 	Mass: ~1.28 GeV/c ² “Charm” 	Mass: ~173.1 GeV/c ² “Top” 
Mass: ~4.7 MeV/c ² -1/3 e “Down” 	Mass: ~96 MeV/c ² “Strange” 	Mass: ~4.18 GeV/c ² “Bottom” 





茨城県東海村にあるJ-PARCは世界最高の大強度陽子ビームによる研究を展開しています。

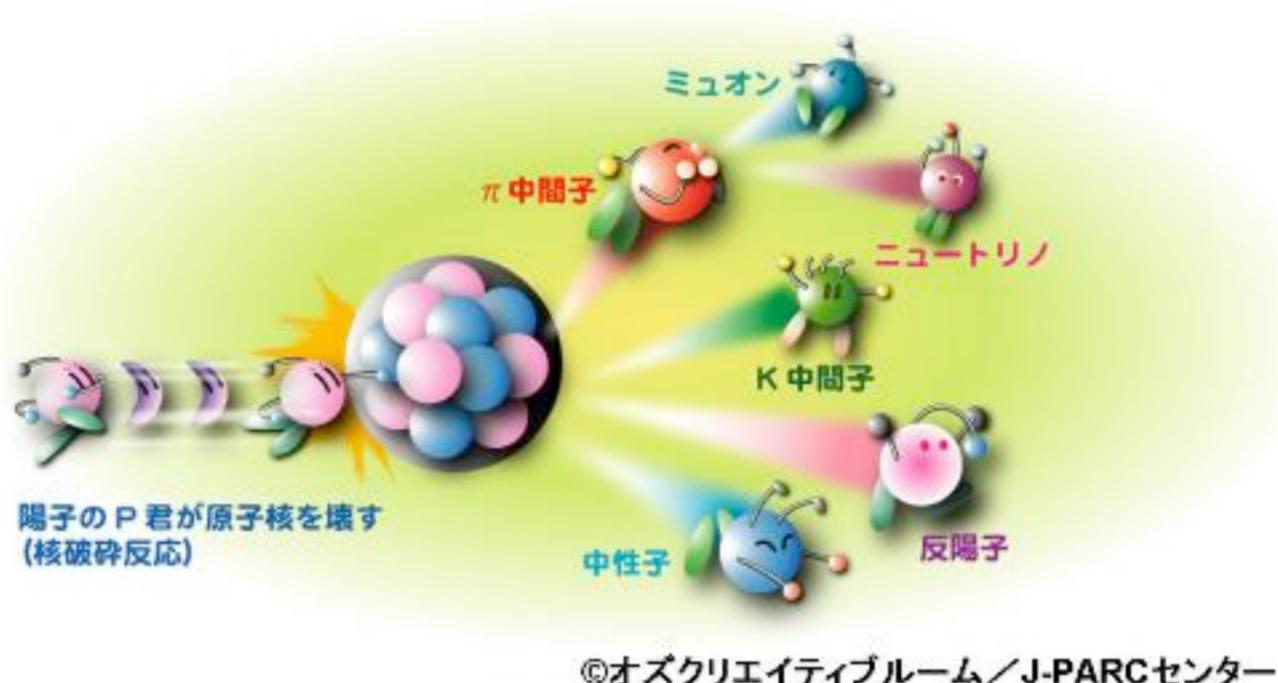


CDCは荷電粒子の飛跡を観測するための検出器で、ガスで満たされた領域内に1816本の信号検出用のワイヤーと6428本の電場生成用のワイヤーが貼られています。
(原理)

1. 高速で飛ぶ荷電粒子がガス原子中を電離させる。
2. 電離によって飛び出た電子は電場生成用ワイヤーによる電場によってエネルギーを得、次から次へとガス原子を電離させる。
3. こうして增幅した電子達が電場に導かれ、最終的に信号検出用ワイヤーへと吸い込まれる。

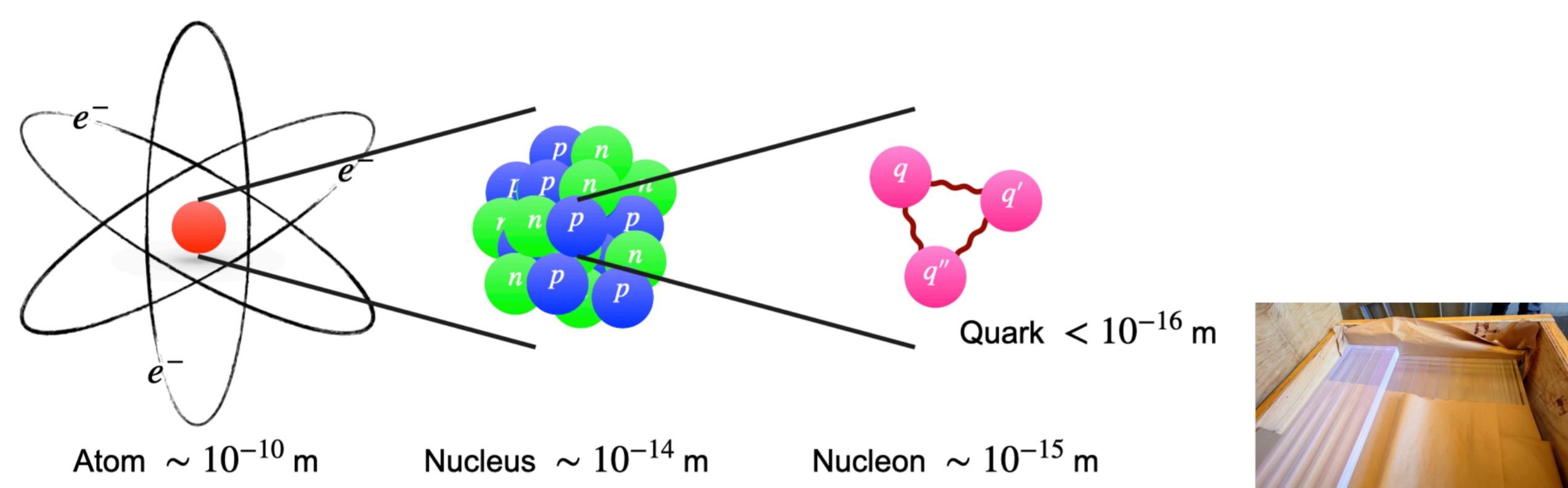
約200umの精度で荷電粒子の飛跡が得られます。

	J-PARC - MR	RIBF - SRC
加速方式	シンクロトロン	サイクロトロン
加速粒子	陽子	重イオン
粒子あたりの最大エネルギー	30 GeV (ほぼ光速)	核子あたり~400MeV (光速の70%)
ビームの多様性	大強度陽子、二次粒子としてK-, pi, n, mu等	3000種類以上の放射性同位体



加速器はそれぞれ狙いがあって建設されます。RIBFが重イオンを用いて多様な「原子核」を研究対象とするのに対し、J-PARCは世界最強クラスの陽子ビームを用いて多様な二次粒子(素粒子レベルの粒子であるK, pi, mu, nuなど)を生成し、原子核よりさらにミクロなスケールである「素粒子物理・ハドロン物理」の研究を展開しています。

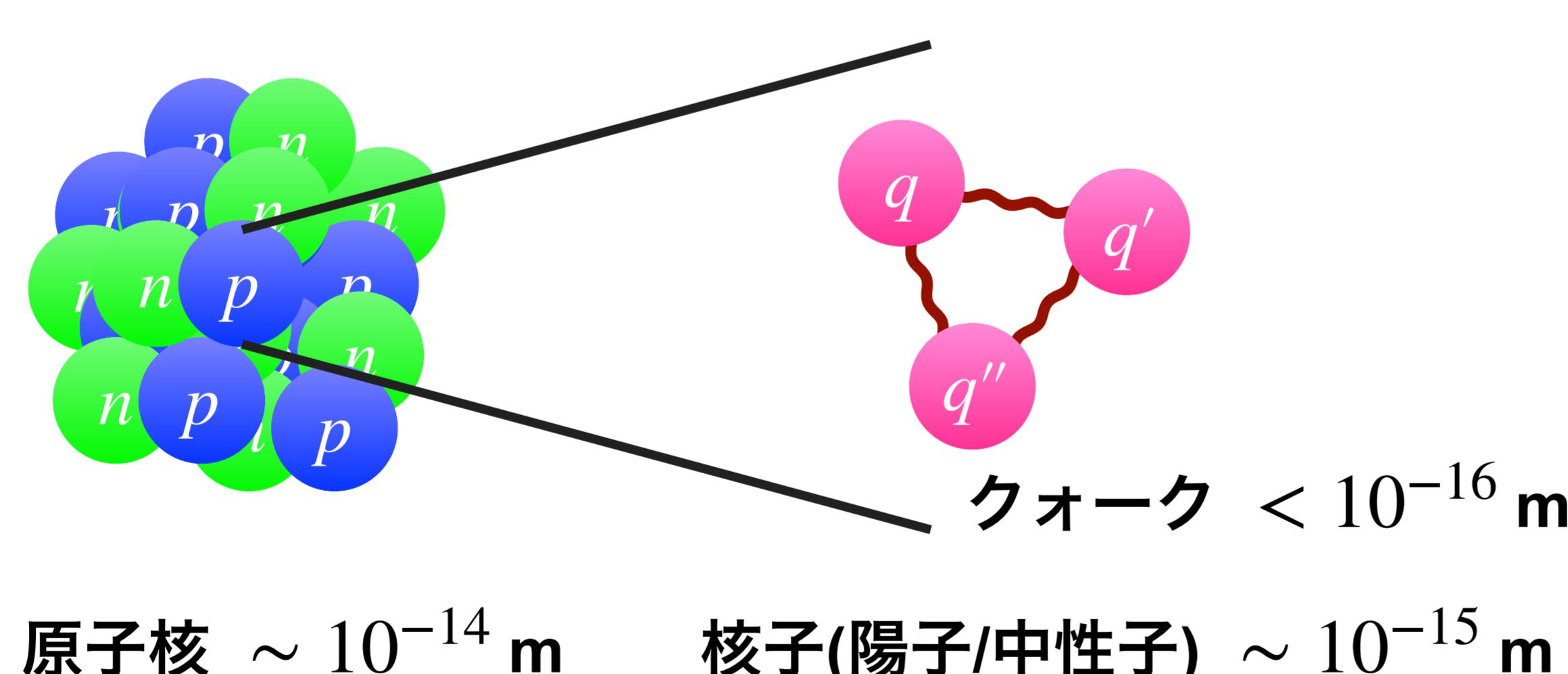
素粒子とは？？？



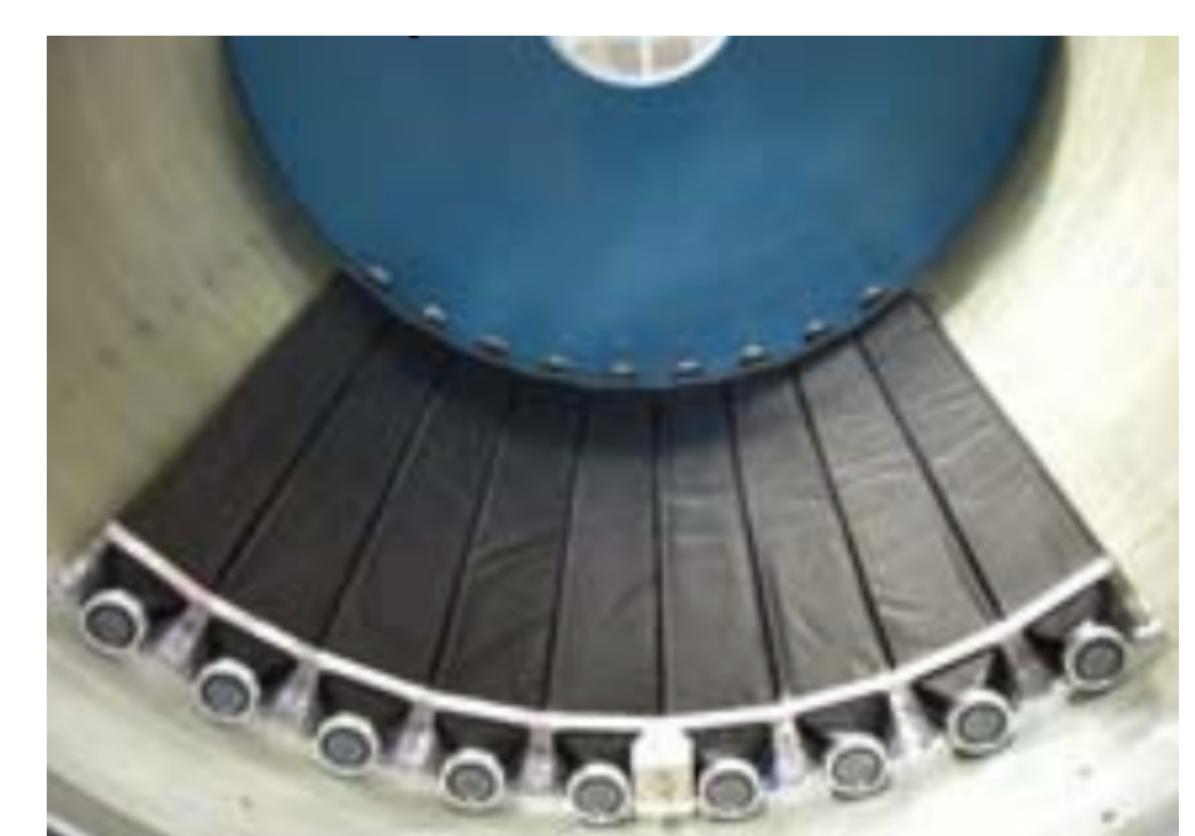
原子は電子と原子核から、原子核は核子(陽子、中性子)から、核子は素粒子と考えられている
クオーケ3つから構成されています！！！
(素粒子はクオーケ以外にもあります。電子や
ミューオンやニュートリノも素粒子の一種で
す。)

なぜ陽子？

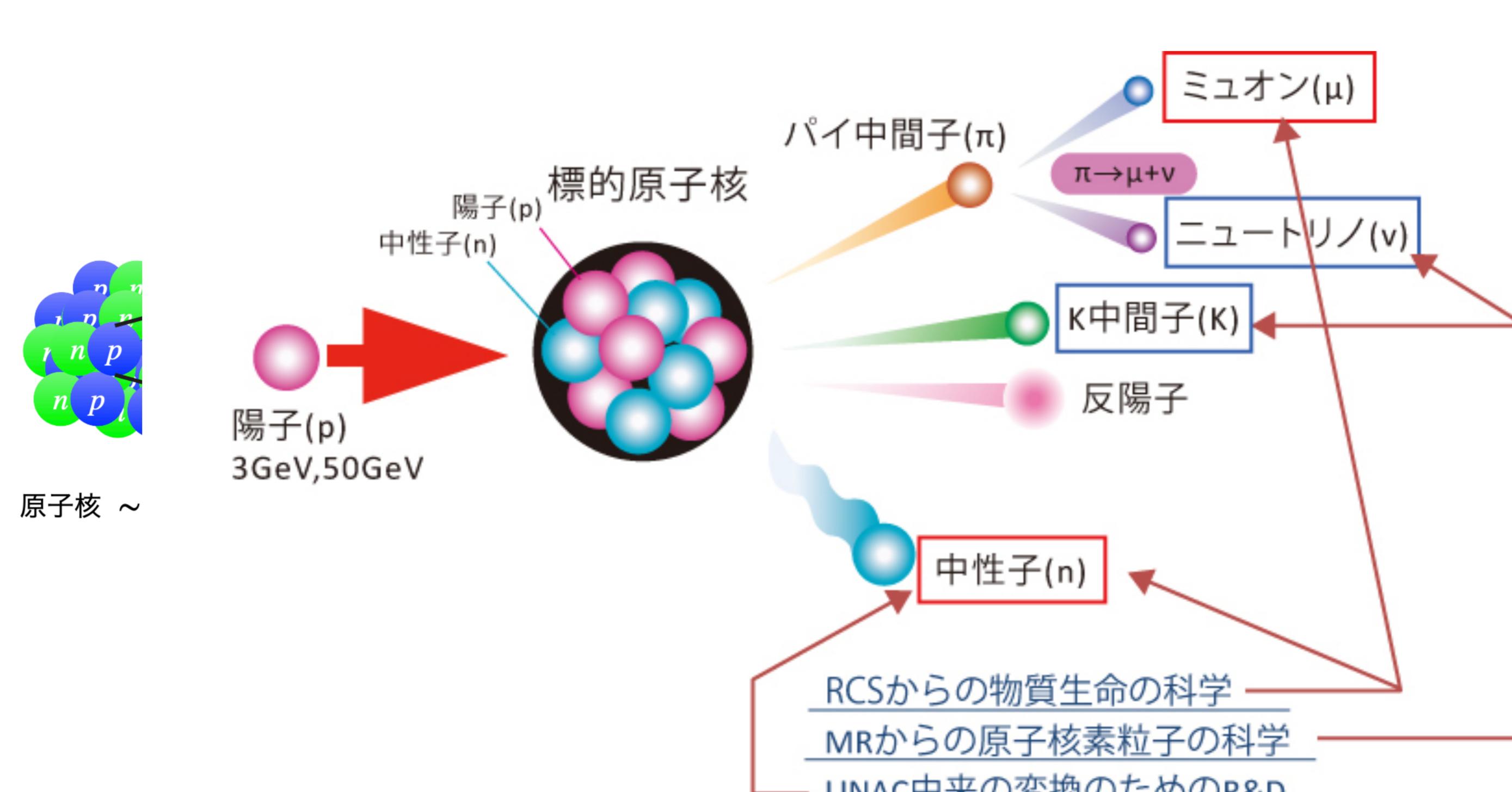
✓ 加速粒子としては陽子と重イオンの他に、電子も多くの加速器で使われている。しかし電子は質量が小さい分、
30 GeVまで加速させるにはとんでもなく大きな加速半径が必要となる（制動放射によるエネルギーロスのため）。



シンチレーション検出器



Hodoscope Counterは粒子の飛行時間を測定するための検出器です。荷電粒子が通過することで発光するシンチレータという物質を取り囲むように配置しています。その時間の精度としておよそ70psの分解能があります。



A vertical column of eight black and white graphic symbols, likely representing a sequence of characters or a logo. The symbols include: 1) A large 'N' shape formed by two thick diagonal lines meeting at a point. 2) A stylized letter 'S' with a red dot at its top right. 3) Two thick black squares side-by-side. 4) Three horizontal bars with a red dot at the right end of the bottom bar. 5) A large 'A' shape formed by two thick diagonal lines meeting at a point. 6) A large circle with a small tail extending from its bottom right. 7) Two thick black squares side-by-side. 8) A large 'J' shape formed by two thick diagonal lines meeting at a point.

