

2006年12月13日(水) 特定領域研究会2006 @ 熱海

***Precision spectroscopy
of Kaonic Helium-3 $3d \rightarrow 2p$ X-rays
(J-PARC E17 実験)***

理研 岡田 信二

for J-PARC E17 collaboration

J-PARC E17 Collaboration

● 理化学研究所：

飯尾雅実, 板橋健太, 岩崎雅彦, 松田恭幸,
大西宏明, 岡田信二(Technical coordinator),
應田治彦(Co-spokesperson), 佐久間史典,
鈴木隆敏, 友野大, 山崎敏光

● 東京大学：

早野龍五(Spokesperson), 石川隆, 竜野秀行

● 高エネルギー加速器研究機構：

石元茂, 鈴木祥仁

● 東京工業大学：

福田芳之, 佐藤将春

● 東京理科大学：

千葉順成, 花木俊生

● ステファンマイヤー研究所 (オーストリア)：

P. Buehler, M. Cargnelli, A. Hirtl,
石渡智一, P. Kienle, J. Marton,
E. Widmann, J. Zmeskal

● LNF-INFN (イタリア)：

C. Curceanu, C. Guaraldo, M. Iliescu,
D. Pietreanu, D. Sirghi, F. Sirghi

● ソウル大学 (韓国)：

H. Bhang, S. Choi, H. Yim

● ヴィクトリア大学 (カナダ)：

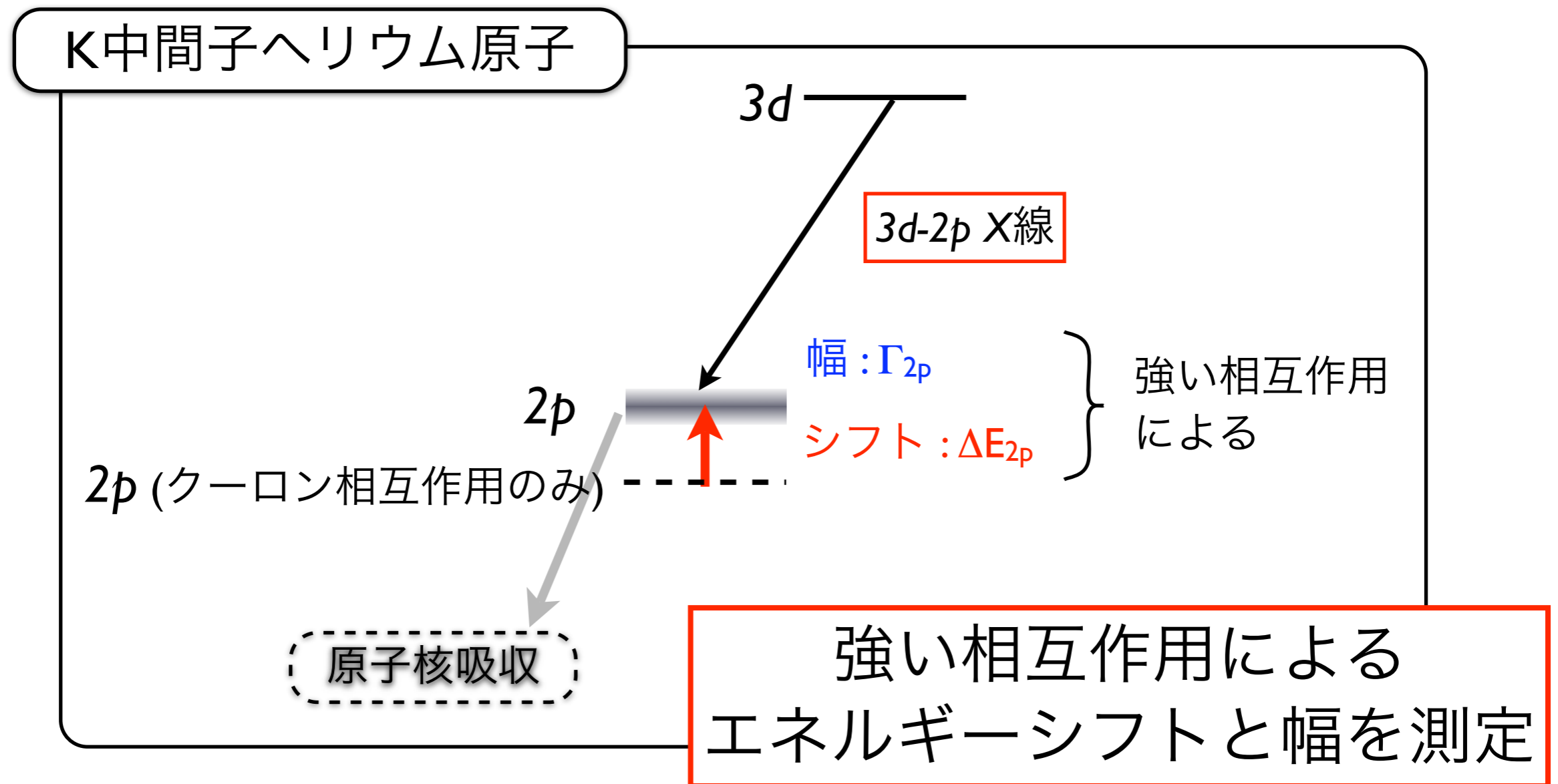
G. Beer

9機関から38名

Introduction

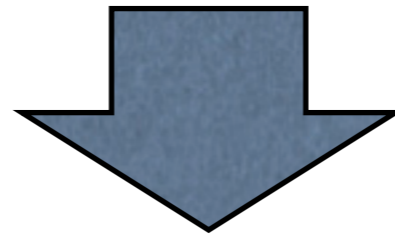
J-PARC E17 : 何を測定するか？

➔ K中間子ヘリウム3原子X線エネルギー



本実験の目的

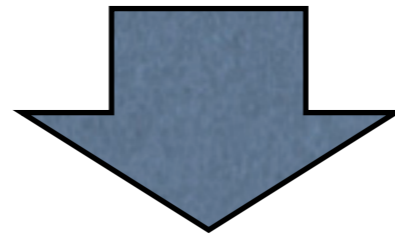
K中間子ヘリウム3原子の最終軌道(2p)のシフトを
~2eVの精度で決定すること



- K-⁴Heの結果(E570)及び理論(赤石計算)との比較：
 - ▶ **K-ヘリウム間のポテンシャルの深さ**
 - ▶ **K中間子原子核の存在**
- シンプルな系における、K中間子-原子核間の強い相互作用の**アイソスカラー/ベクター部**に関する新たな知見

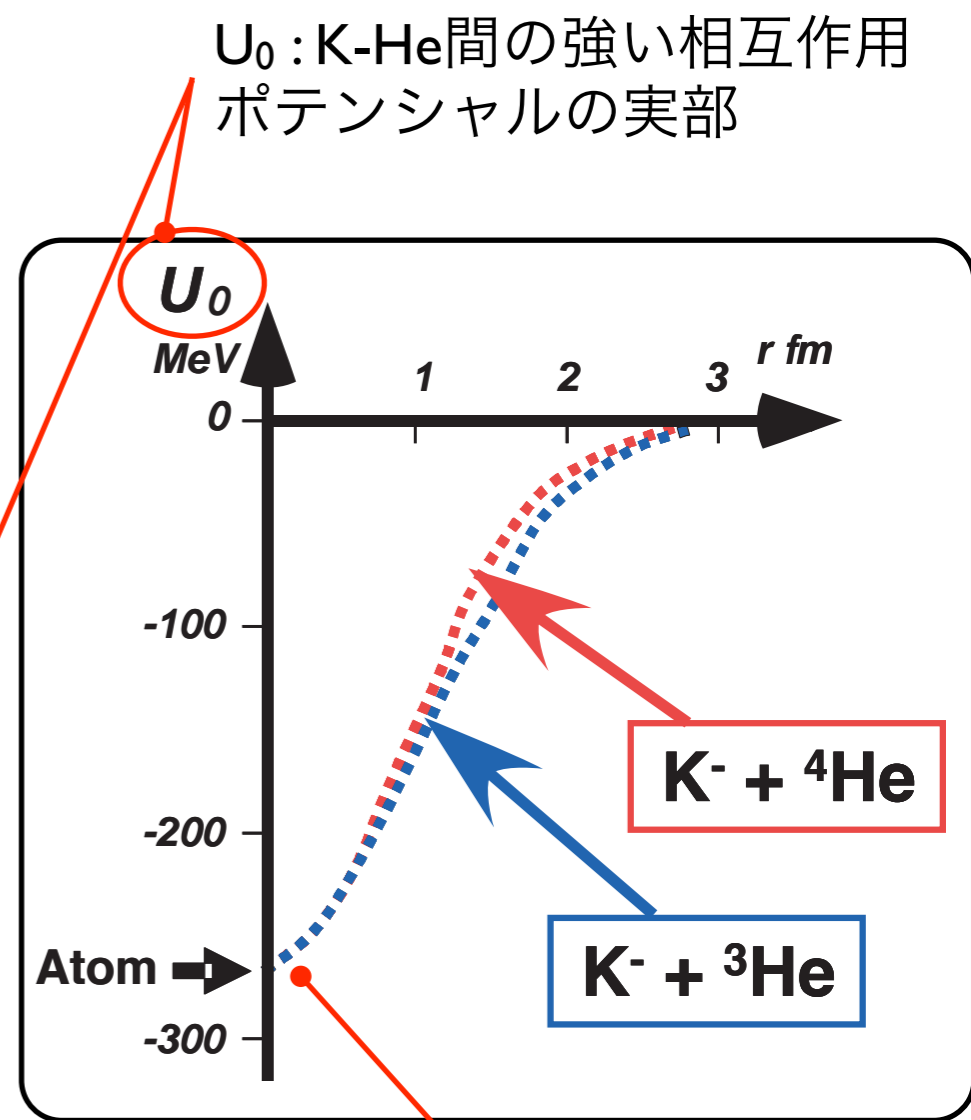
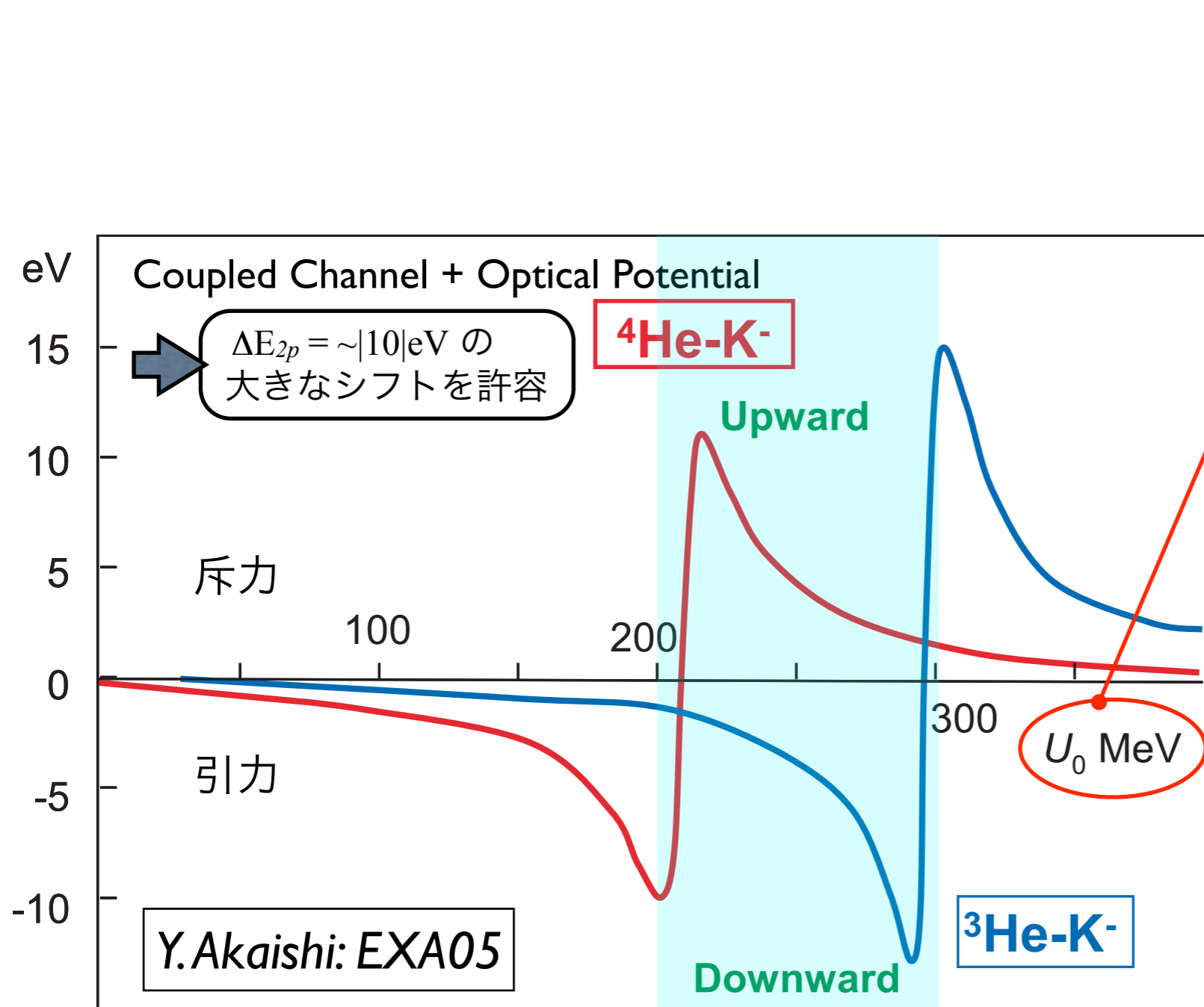
本実験の目的

K中間子ヘリウム3原子の最終軌道(2p)のシフトを
~2eVの精度で決定すること



- K-⁴Heの結果(E570)及び理論(赤石計算)との比較：
 - ▶ **K-ヘリウム間のポテンシャルの深さ**
 - ▶ **K中間子原子核の存在**
- シンプルな系における、K中間子-原子核間の強い相互作用の**アイソスカラー/ベクター部**に関する新たな知見

K-³HeとK-⁴He : Coupled-channel 計算



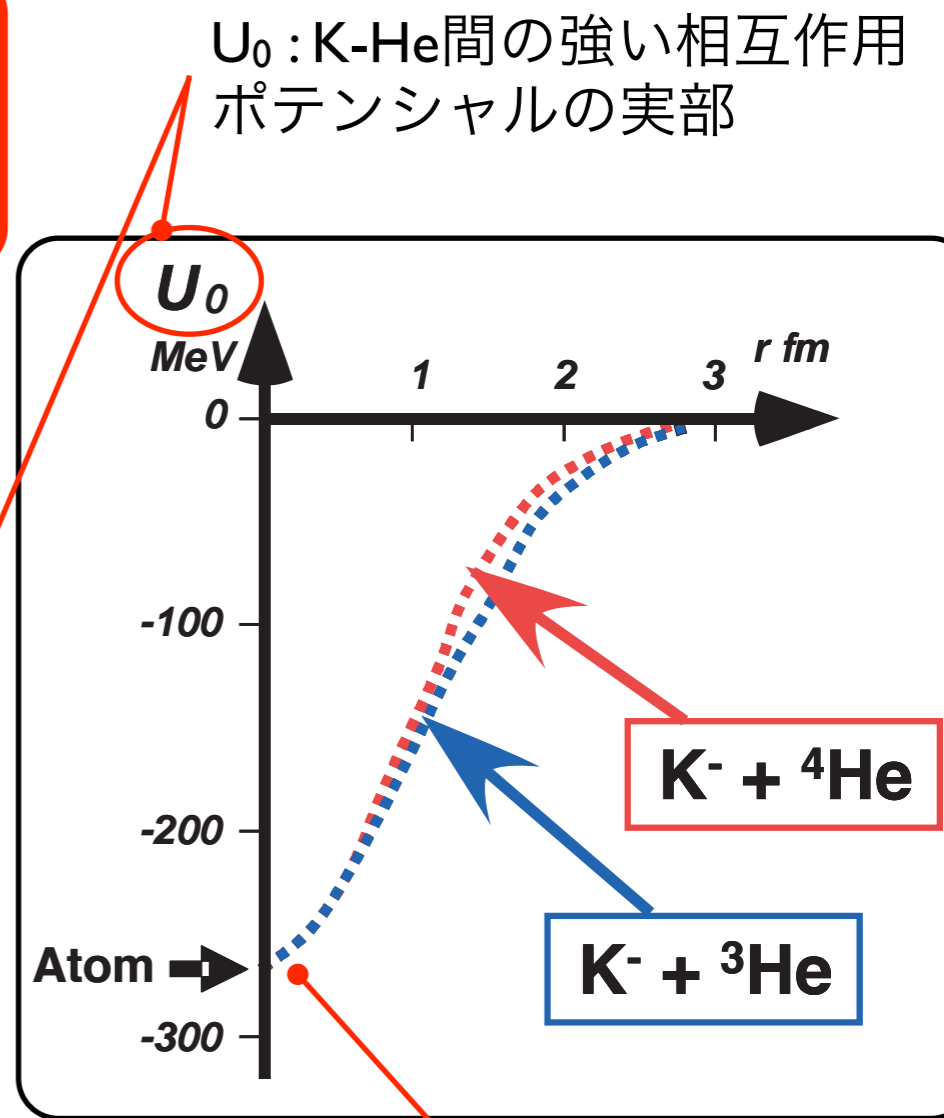
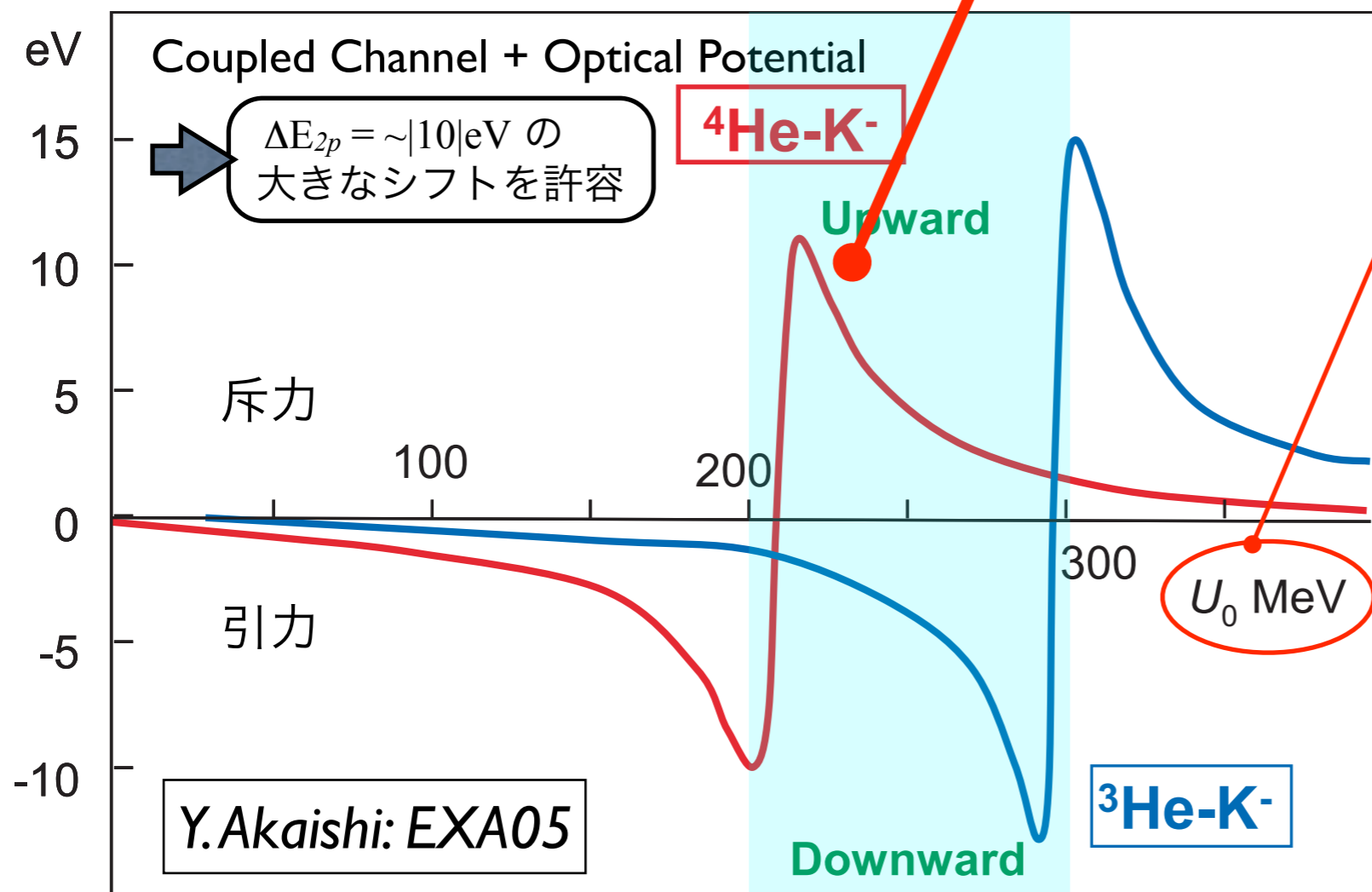
U_0 : K-4He, K-3Heでほぼ同じ!

K-³HeとK-⁴He : Coupled-channel 計算

KEK-PS E570で実験 (2005年10月~12月)

E570以前に3度実験が行われており、
いずれも大きなシフト(~40eV)を報告

詳細は、明日午後「パラレル3」
セッションの竜野のトークにて



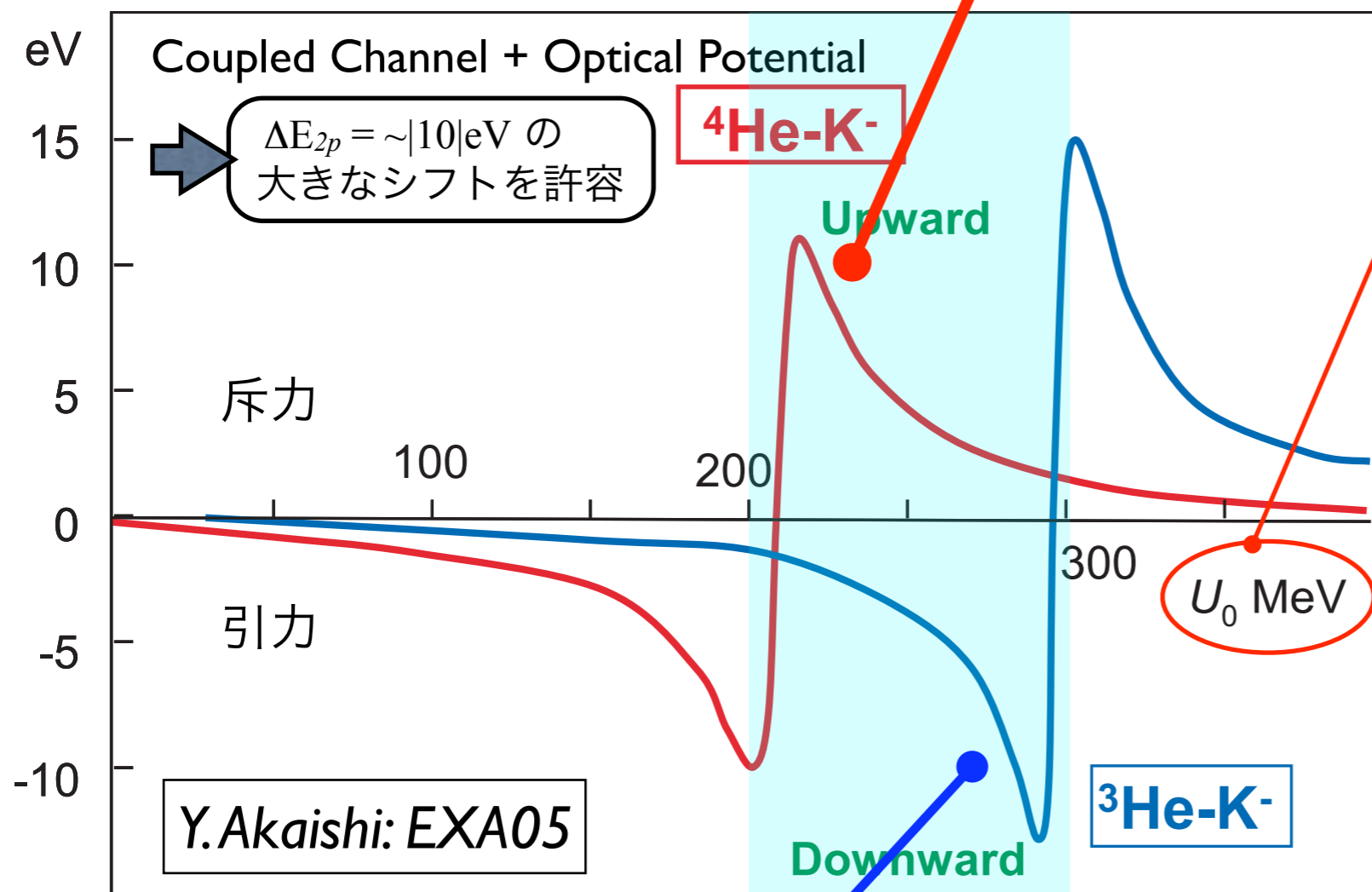
U_0 : K-4He, K-3Heでほぼ同じ!

K-³HeとK-⁴He : Coupled-channel 計算

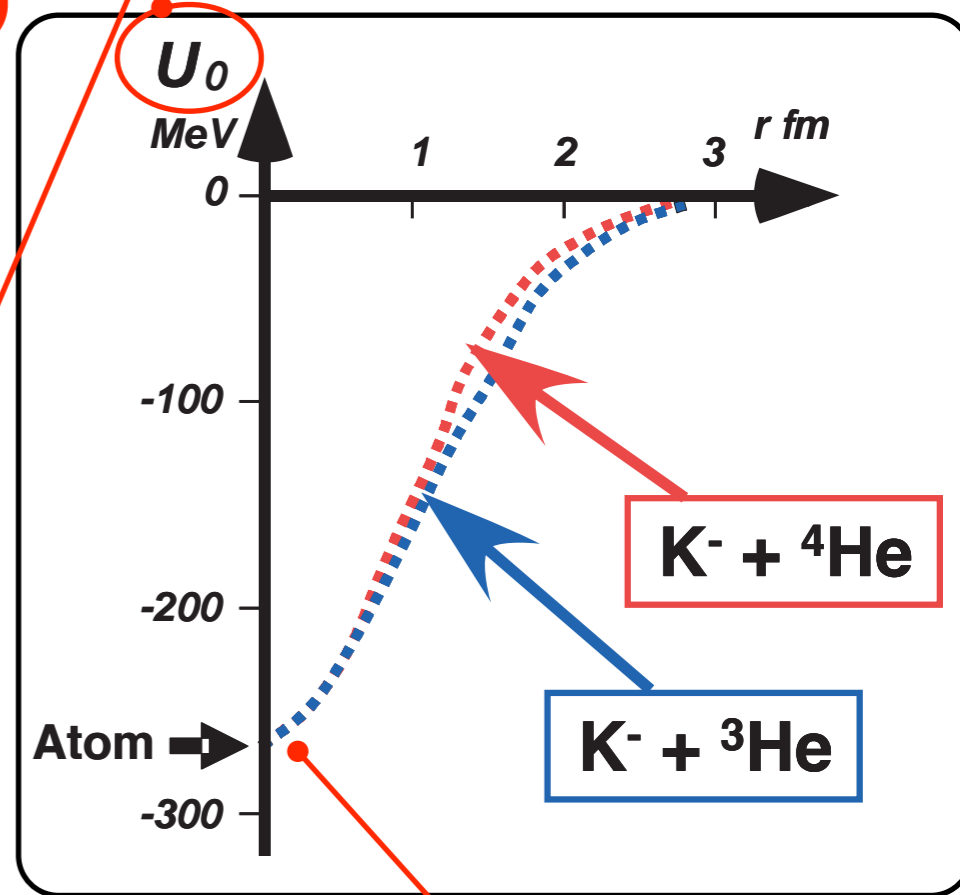
KEK-PS E570で実験 (2005年10月~12月)

E570以前に3度実験が行われており、
いずれも大きなシフト(~-40eV)を報告

詳細は、明日午後「平行3」
セッションの竜野のトークにて



U_0 : K-He間の強い相互作用
ポテンシャルの実部



U_0 : K-⁴He, K-³Heでほぼ同じ!

J-PARC E17実験 (DAY-1)

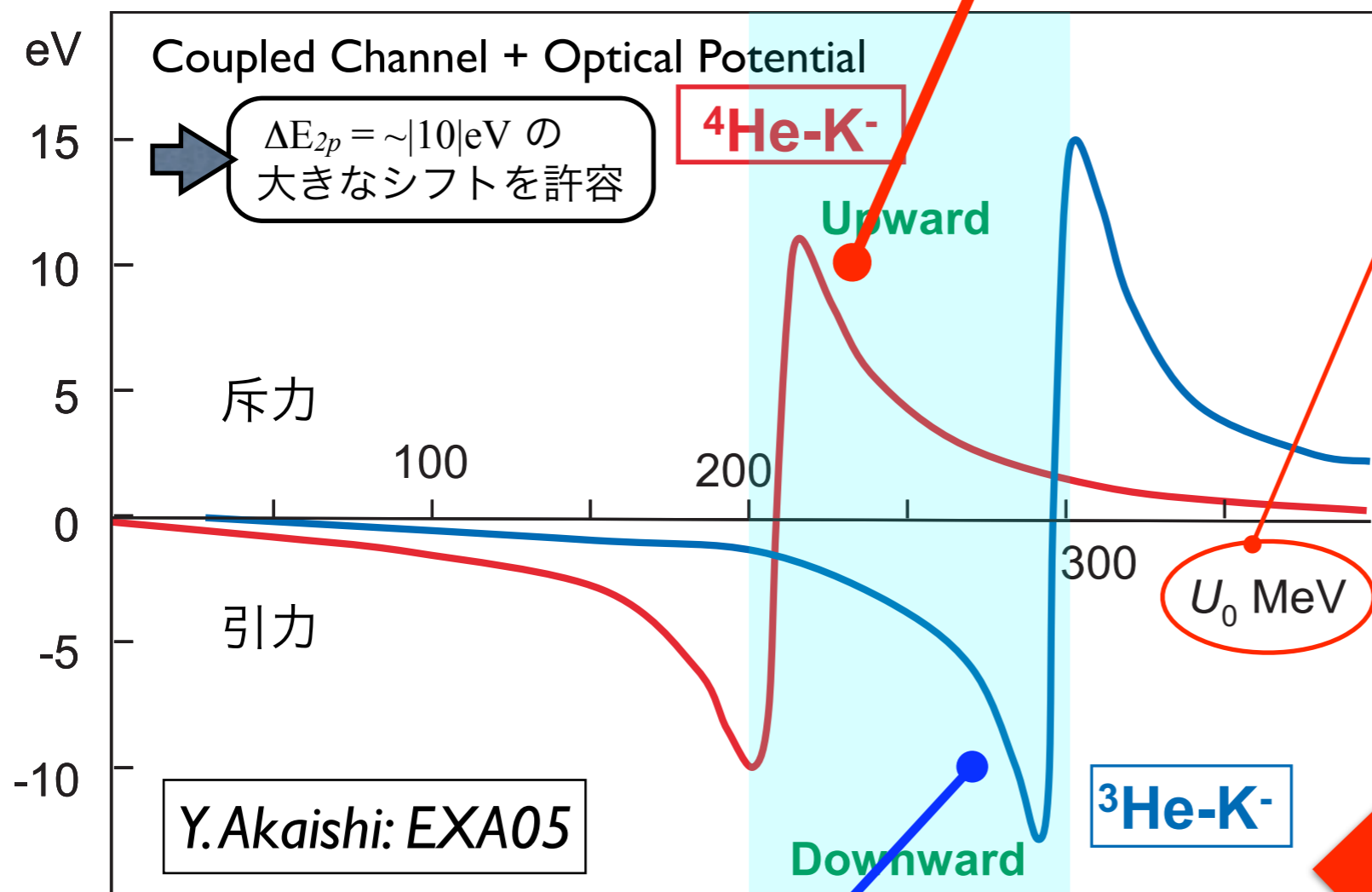
K-³Heは本実験が初

K-³HeとK-⁴He : Coupled-channel 計算

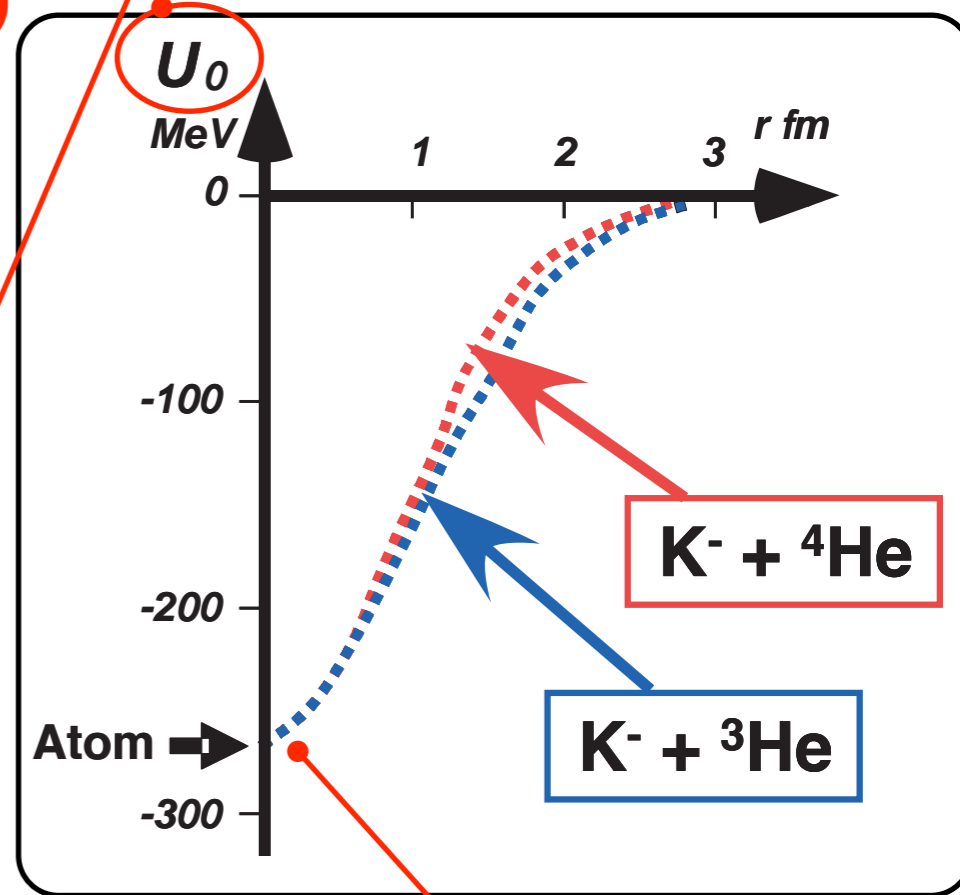
KEK-PS E570で実験 (2005年10月~12月)

E570以前に3度実験が行われており、
いずれも大きなシフト(~40eV)を報告

詳細は、明日午後「平行3」
セッションの竜野のトークにて



U_0 : K-He間の強い相互作用
ポテンシャルの実部



U_0 : K-4He, K-3Heでほぼ同じ!

J-PARC E17実験 (DAY-1)

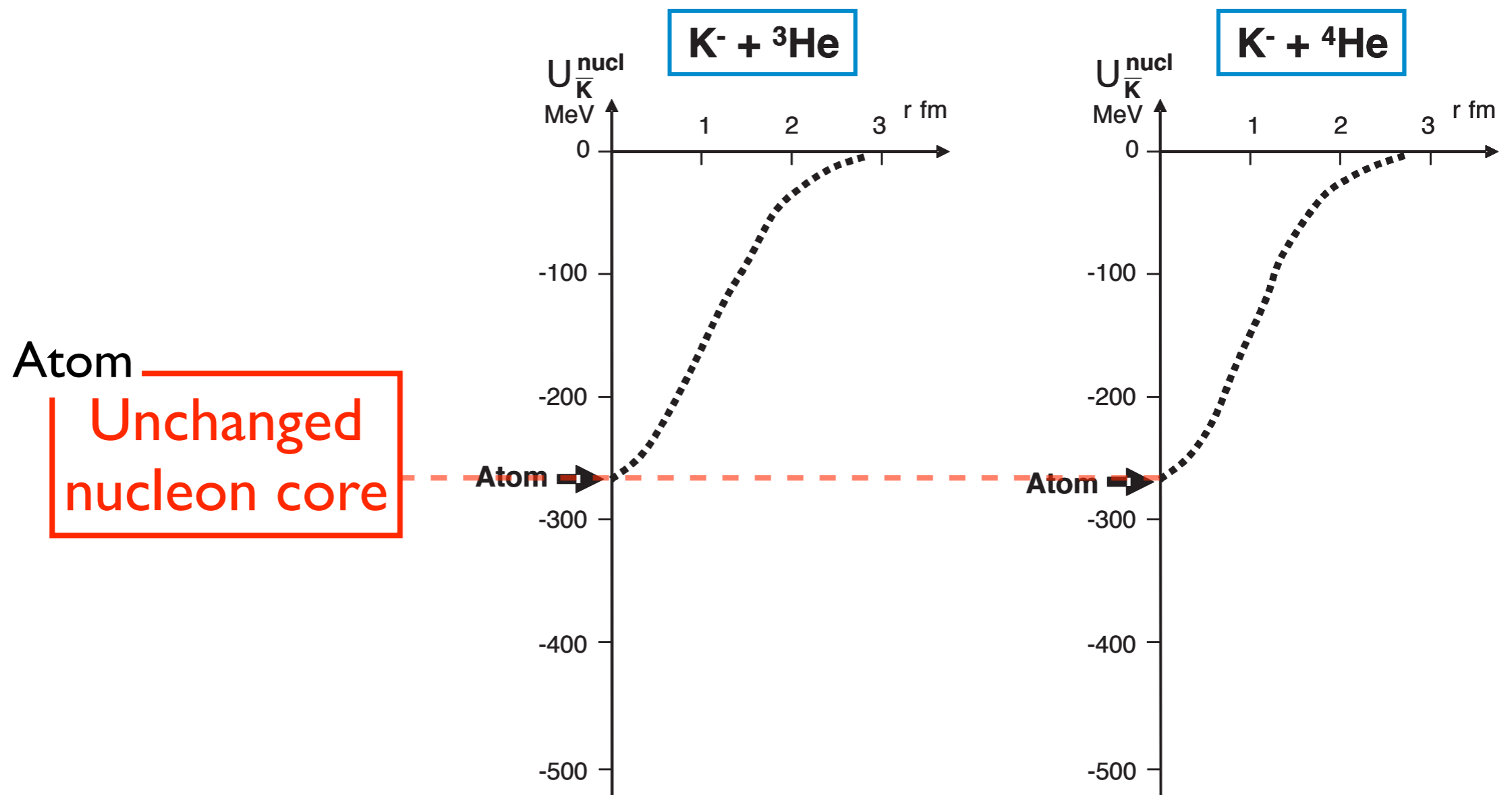
K-³Heは本実験が初

K-He間のポテンシャル
の深さに関する情報

K中間子原子核の存在に関する重要な情報

赤石・山崎の計算：K中間子の深い束縛状態を予言

K-^{3,4}He間の(強い相互作用の)ポテンシャル実部

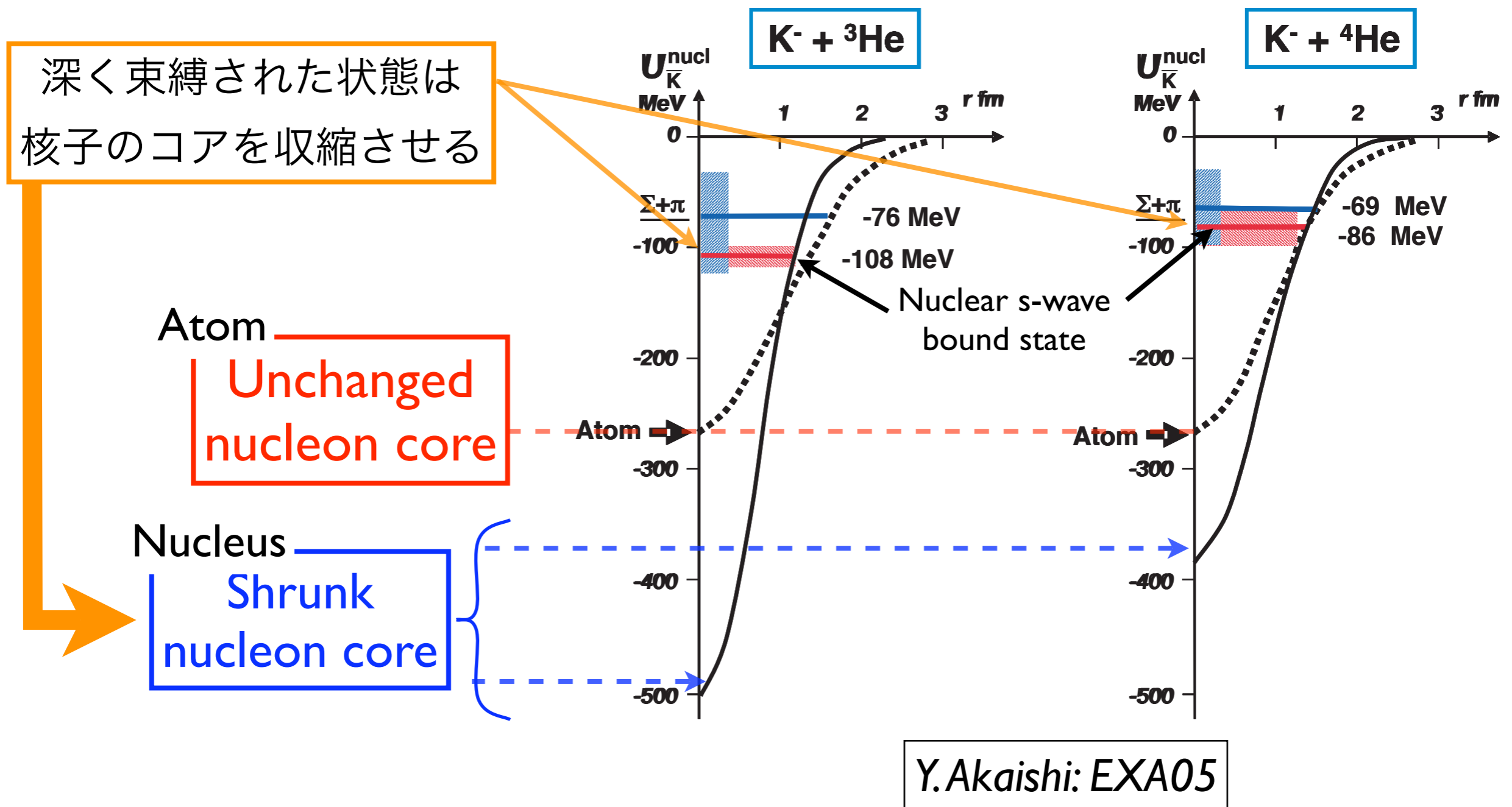


Y.Akaishi: EXA05

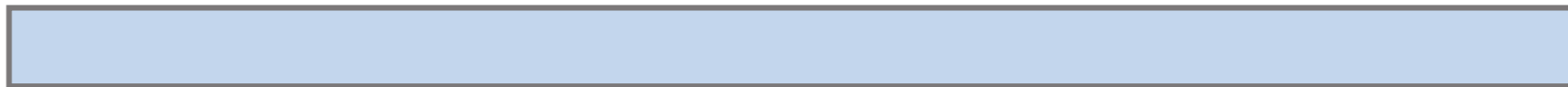
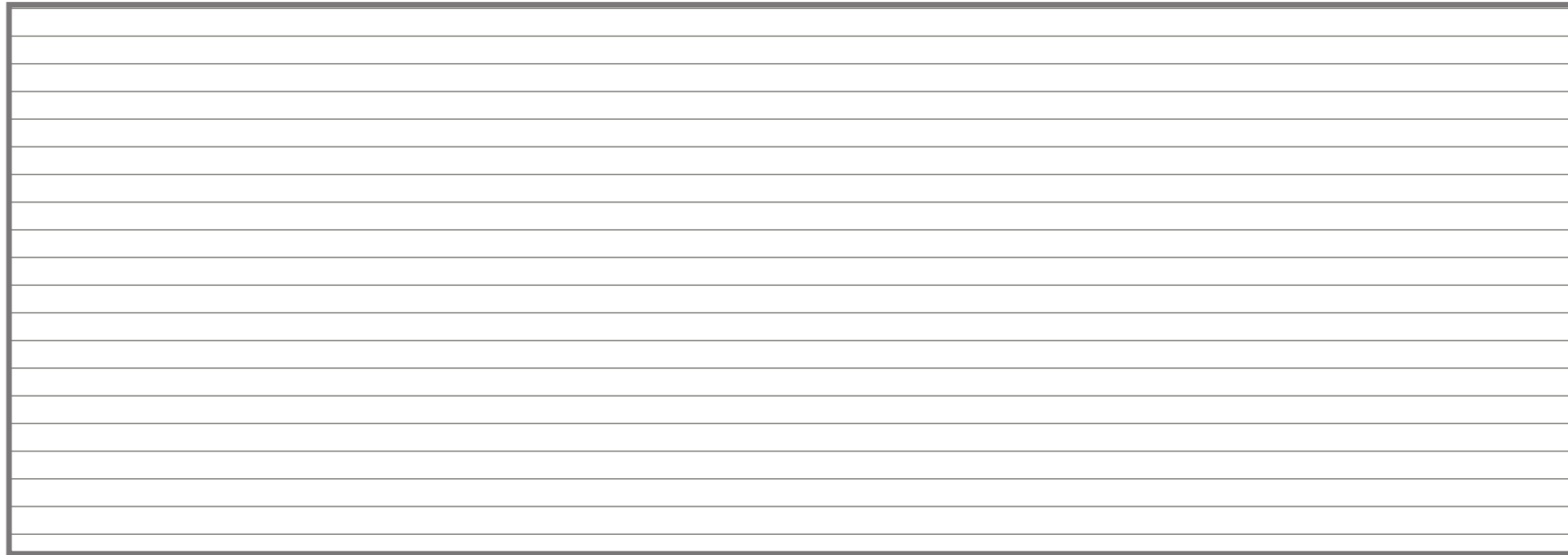
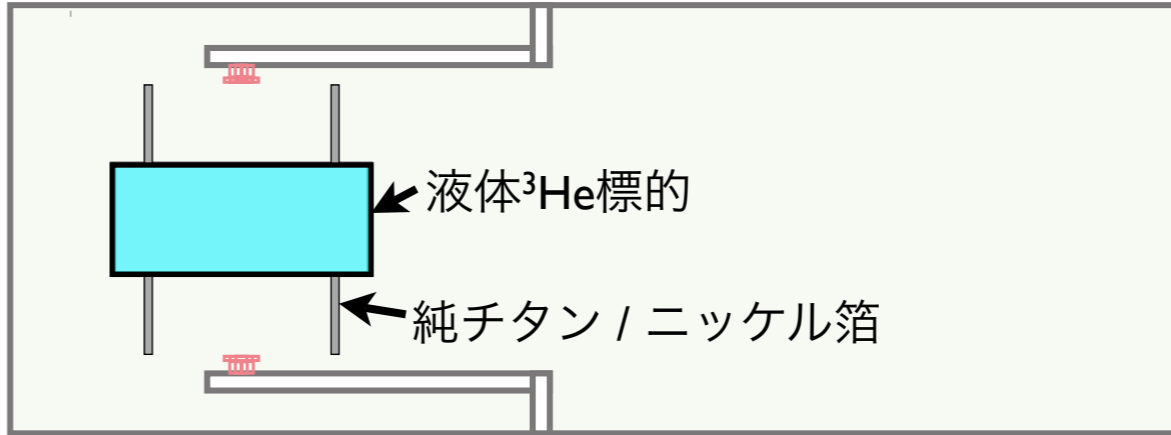
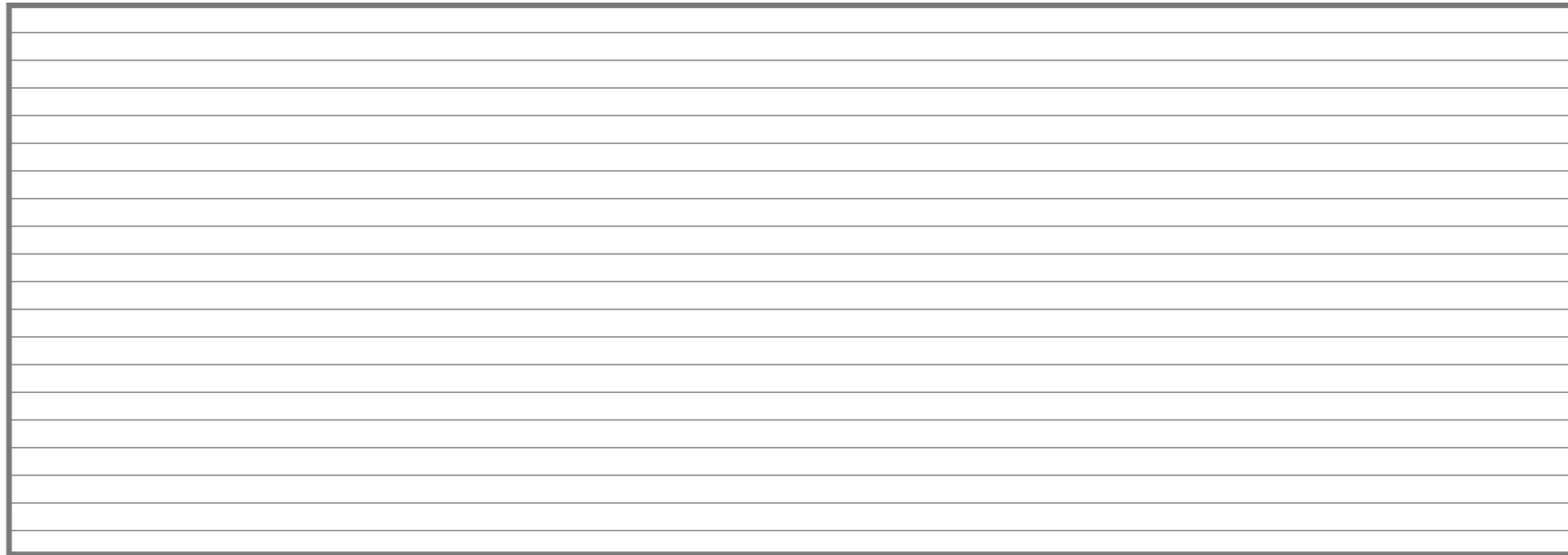
K中間子原子核の存在に関する重要な情報

赤石・山崎の計算：K中間子の深い束縛状態を予言

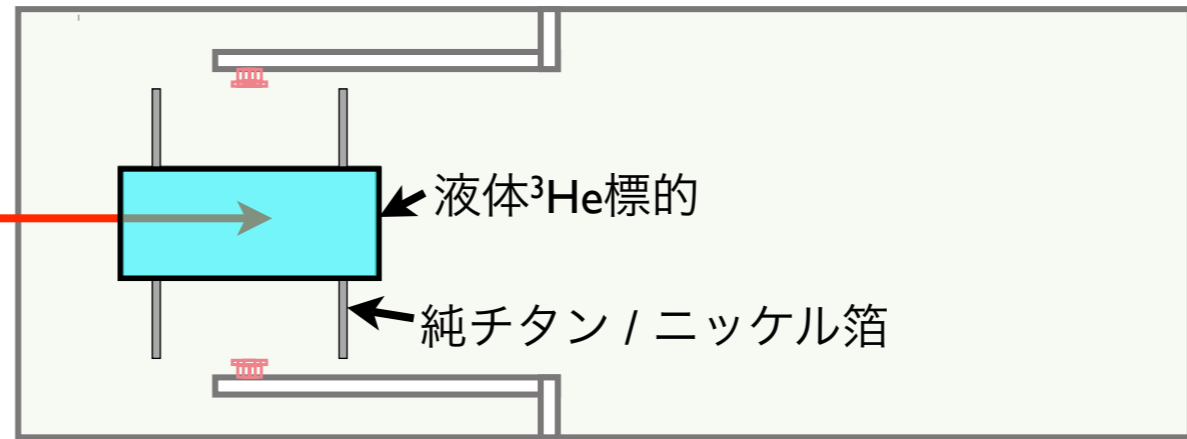
K-^{3,4}He間の(強い相互作用の)ポテンシャル実部



実験手法



K中間子ビーム



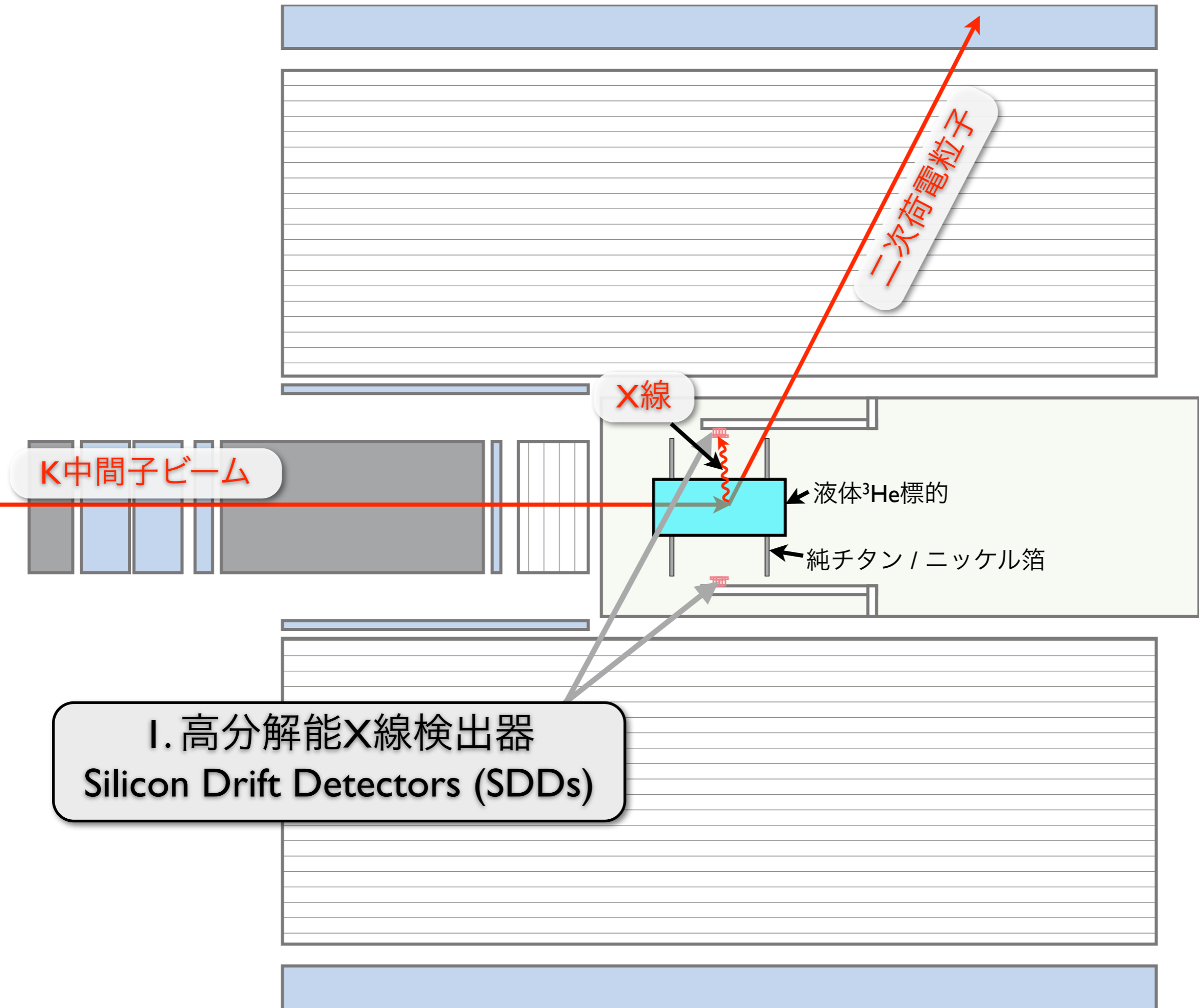
K中間子ビーム

X線

二次荷電粒子

液体³He標的

純チタン/ニッケル箔



K中間子ビーム

X線

二次荷電粒子

液体³He標的

純チタン/ニッケル箔

I. 高分解能X線検出器
Silicon Drift Detectors (SDDs)

2. 標的の内静止事象の選択 (Fiducial Volume Cut)

円筒形ドリフト
チェンバー(CDC)

二次荷電粒子

小型ドリフトチェンバー

K中間子ビーム

X線

液体 ^3He 標的

純チタン/ニッケル箔

1. 高分解能X線検出器 Silicon Drift Detectors (SDDs)

2. 標的内静止事象の選択 (Fiducial Volume Cut)

円筒形ドリフト
チェンバー(CDC)

二次荷電粒子

小型ドリフトチェンバー

K中間子ビーム

π 中間子

X線

液体 ^3He 標的

純チタン/ニッケル箔

特性X線

1. 高分解能X線検出器 Silicon Drift Detectors (SDDs)

2. 標的内静止事象の選択 (Fiducial Volume Cut)

円筒形ドリフト
チェンバー(CDC)

二次荷電粒子

小型ドリフトチェンバー

K中間子ビーム

π 中間子

X線

液体 ^3He 標的

純チタン/ニッケル箔

特性X線

1. 高分解能X線検出器
Silicon Drift Detectors (SDDs)

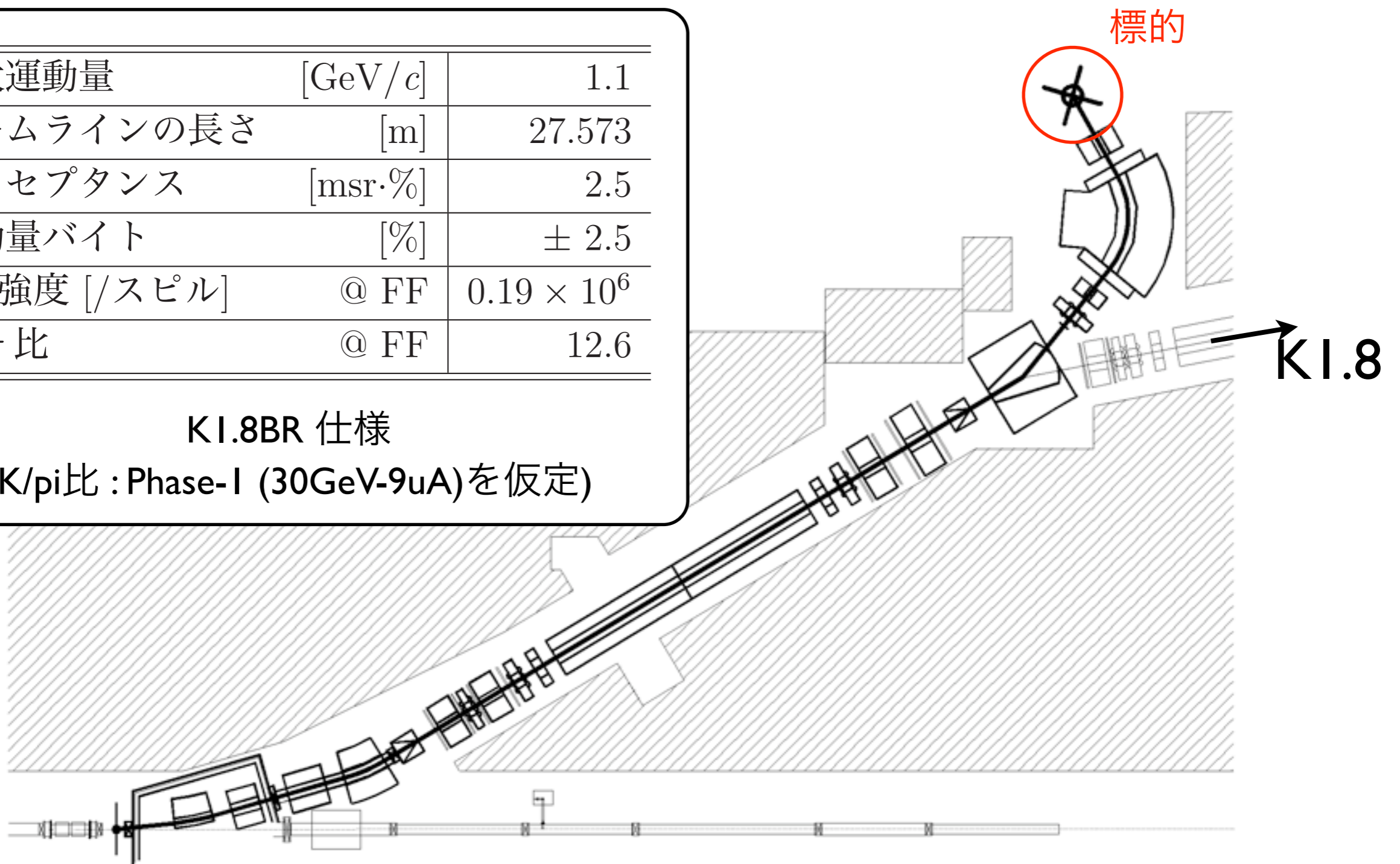
3. ビームを用いた
エネルギー較正
(シグナルと同時計測)

ビームライン

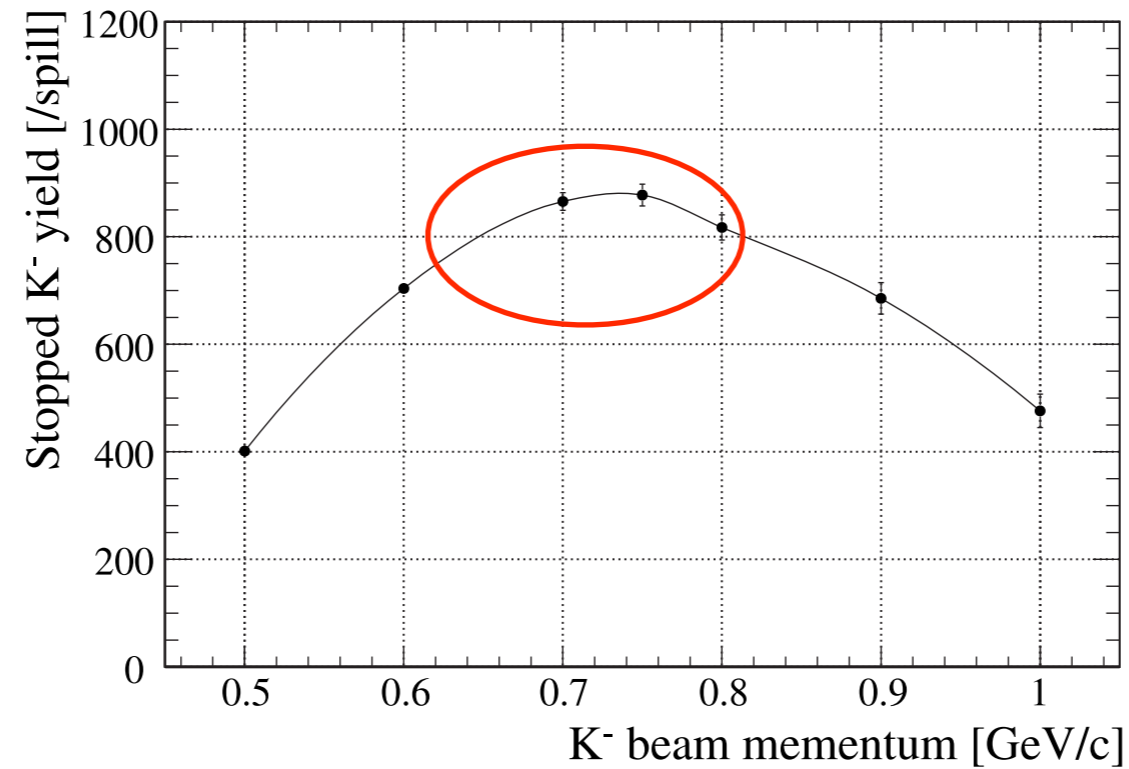
KI.8BR ビームライン

最大運動量	[GeV/c]	1.1
ビームラインの長さ	[m]	27.573
アクセプタンス	[msr·%]	2.5
運動量バイト	[%]	± 2.5
K^- 強度 [/スピル]	@ FF	0.19×10^6
K/π 比	@ FF	12.6

KI.8BR 仕様
(K/π 比 : Phase-I (30GeV-9uA)を仮定)



ビーム中心運動量の選択



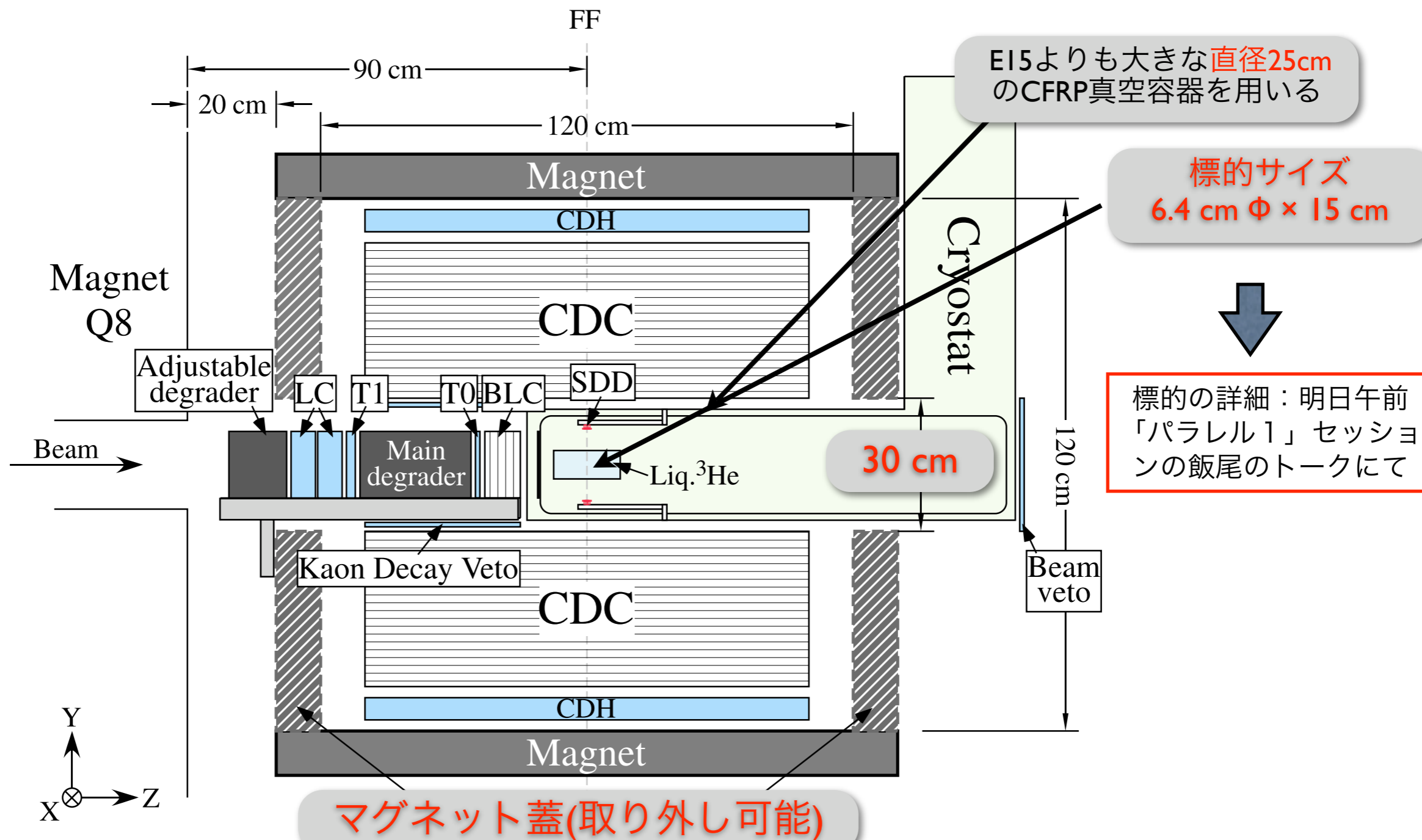
KI.8BRにおけるスピル当たりの
の静止K-の収量の計算結果
(TURTLE + Sanford-Wang)

750MeV/c付近を用いる

(E570で用いた650MeV/c入射からのK収量と大きな差はない)

実験装置

セットアップ概略図



標的の詳細：明日午前「パラレル1」セッションの飯尾のトークにて

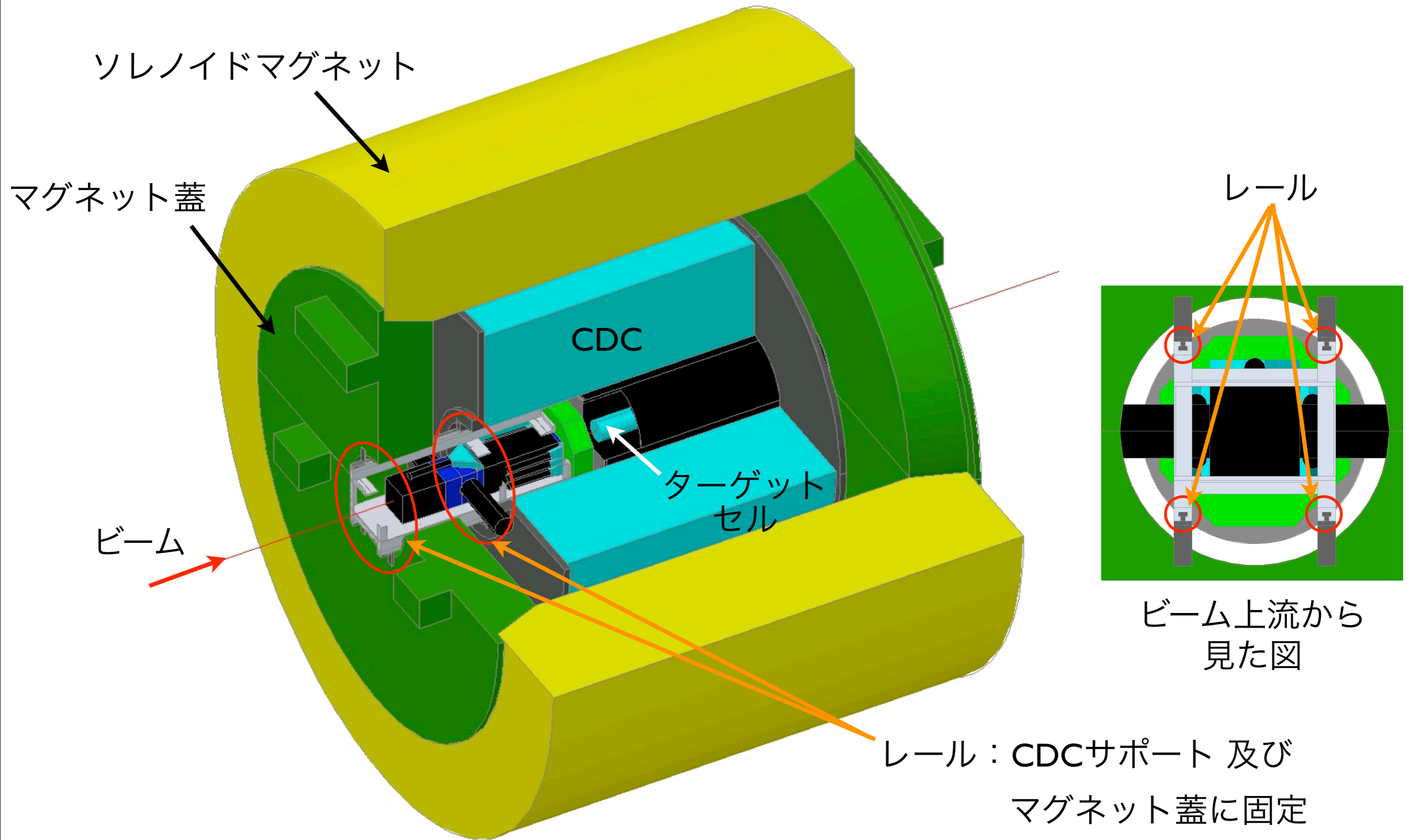
トリガーロジック：(K_{STOP} \otimes CDH \otimes SDD) \oplus (SDD_{self trig.})

$$(K_{\text{STOP}} = \overline{\text{LC}} \otimes \text{T1} \otimes \text{T0} \otimes \overline{\text{K}_{\text{DECAY VETO}}} \otimes \overline{\text{BEAMVETO}})$$

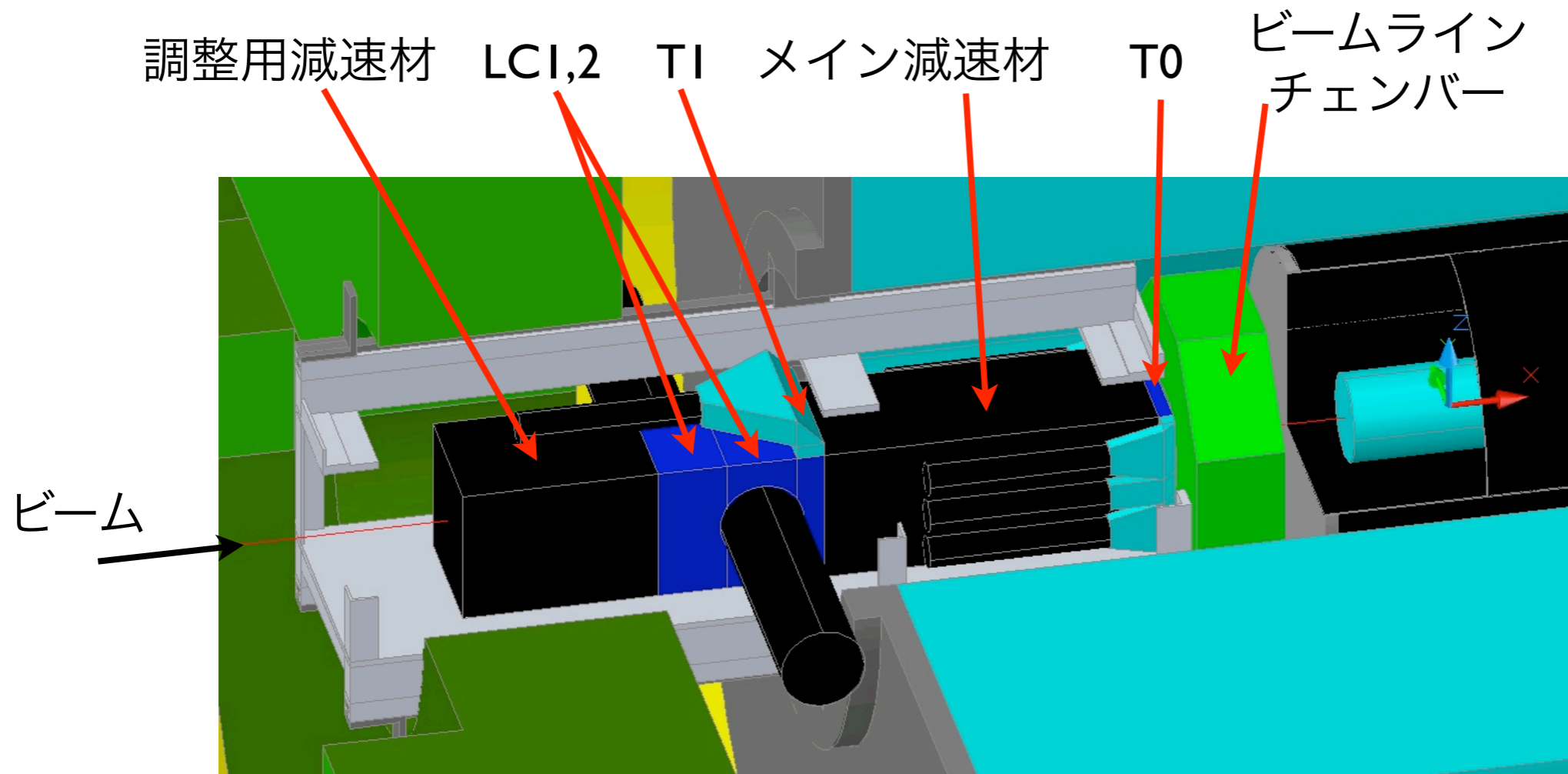
E570実験でのデータに基づき期待されるトリガーレートは、

- K_{STOP} \otimes CDH \otimes SDD = 数/spill
- SDD_{self trig.} = 数百/spill

セットアップ鳥瞰図



静止Kのための検出器群



必要なカーボン減速材の厚さ：約 38 / 48 / 58 cm
(入射ビーム運動量 650 / 700 / 750 MeV/cに対して)

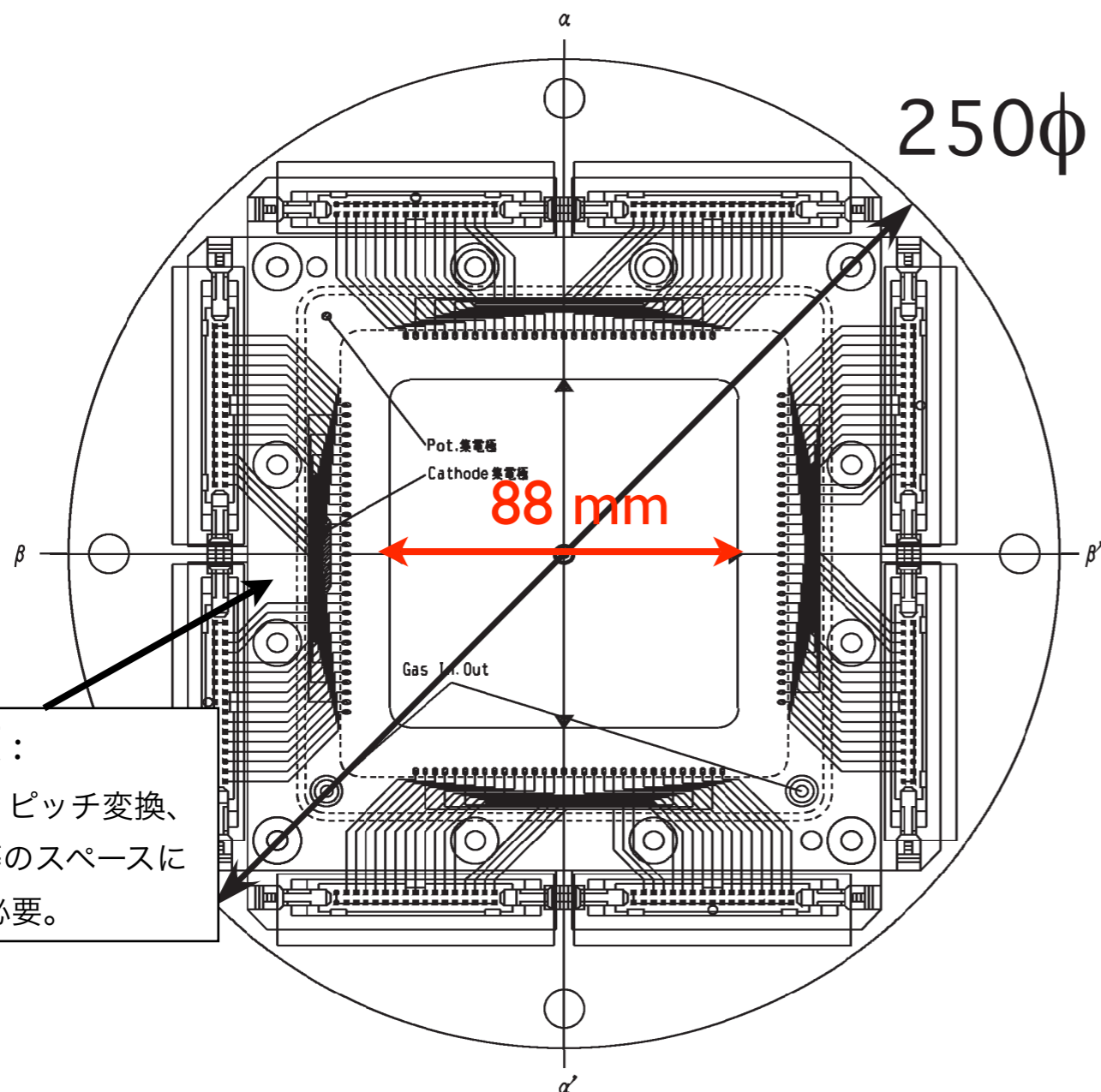
(カーボン減速材 総重量：~10 kg)

ビームラインチェンバー

CDC及びマグネットエンドキャップの穴：300 mm ϕ

円筒型荷電粒子VETOカウンタとCDSケーブル引き出し用スペース：200 ~ 300 mm ϕ

➡ 250 mm ϕ 以内に収める

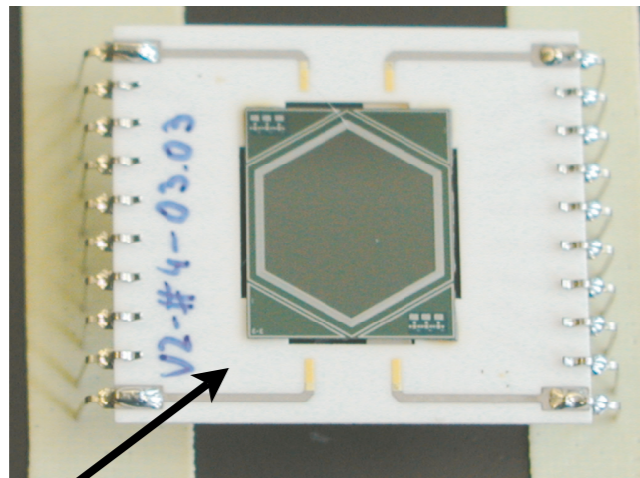


- 2.5 mm ピッチ
- 16センスワイヤー / 1面
- 有効面：88 x 88 [cm²]
- 8面 (XX'YY' XX'YY')

➡ 十分収まる

G10基板：
ワイヤー、ピッチ変換、
Oリング等のスペースに
~40 mm 必要。

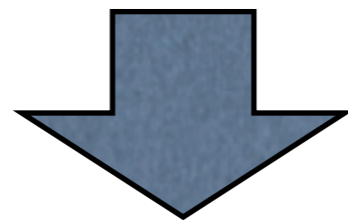
X線検出器 (SDD)



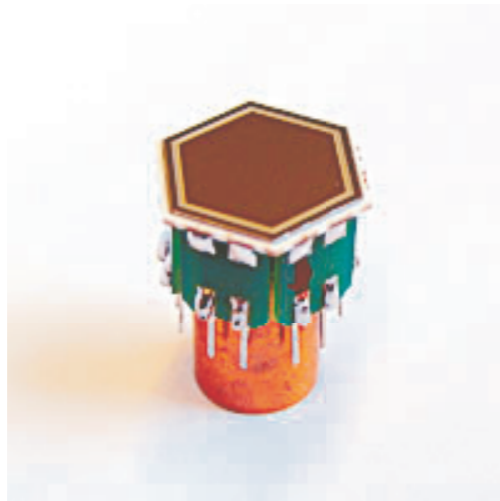
KETEK SDD プロトタイプ (100mm²):
E570で使用

(現在12台所有)

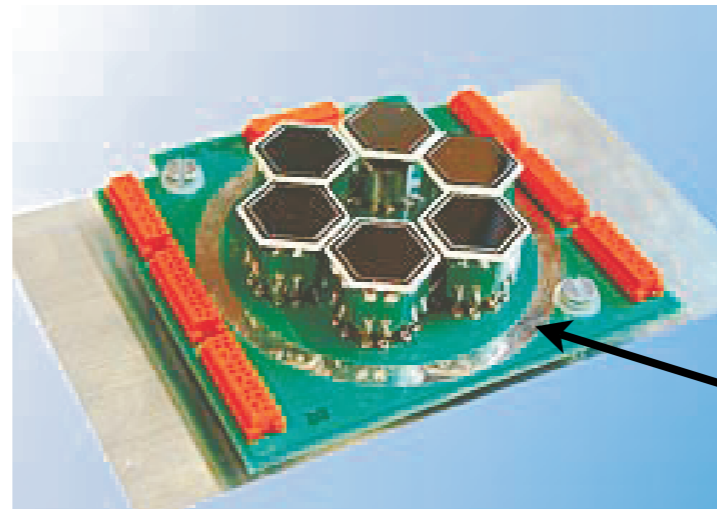
セラミック
(SDDサポートの熱収縮等
により、破壊されやすい)



パッケージ化



スリムライン
コンポーネント



KETEK VITUS SDD アレー

モジュール化
➡ 集積可能

読み出し部分も完全に
パッケージ化され、扱
いやすい

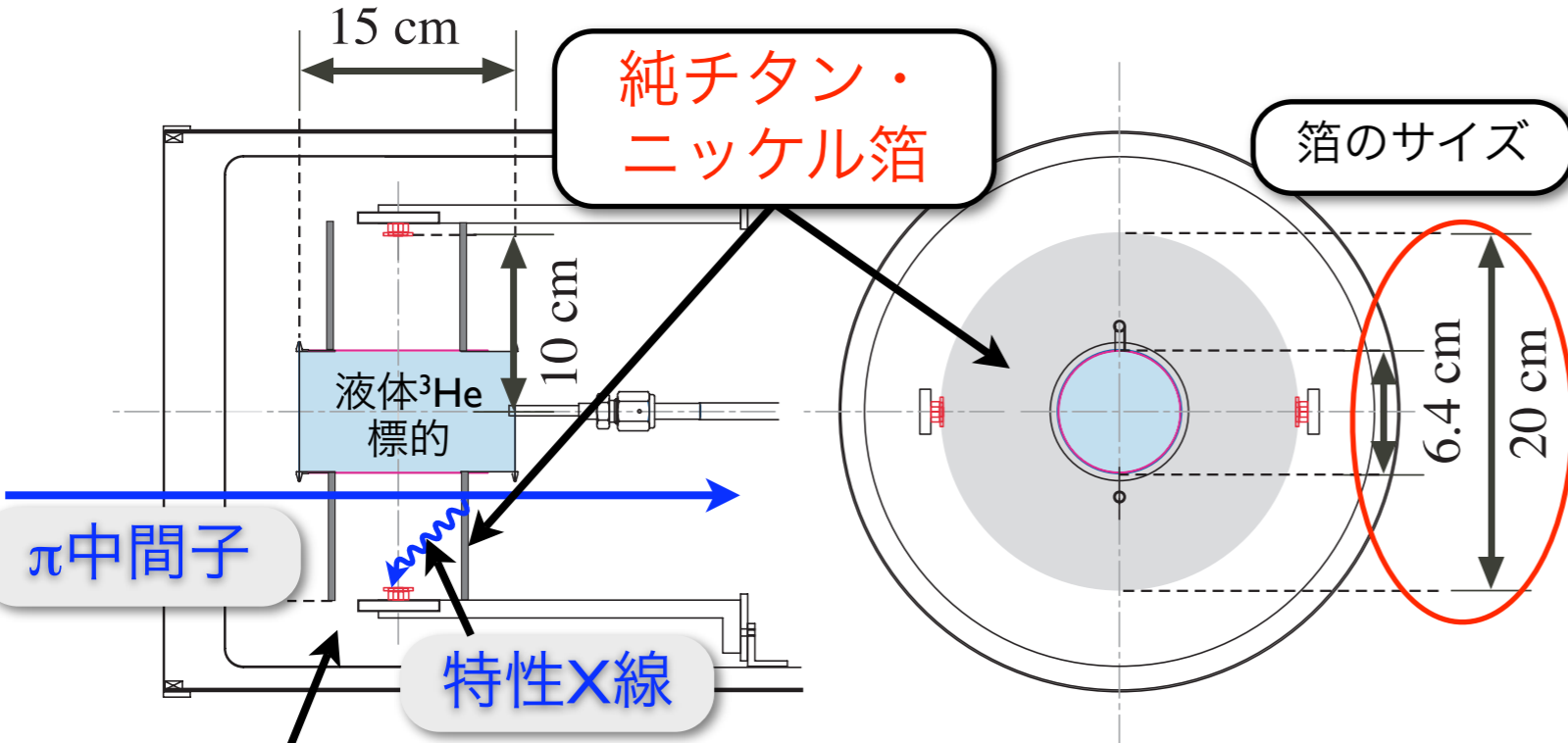
実験の特徴

2pのシフトを~2eVの精度で決定するために

ビームを用いたエネルギー較正

Top View

Side View



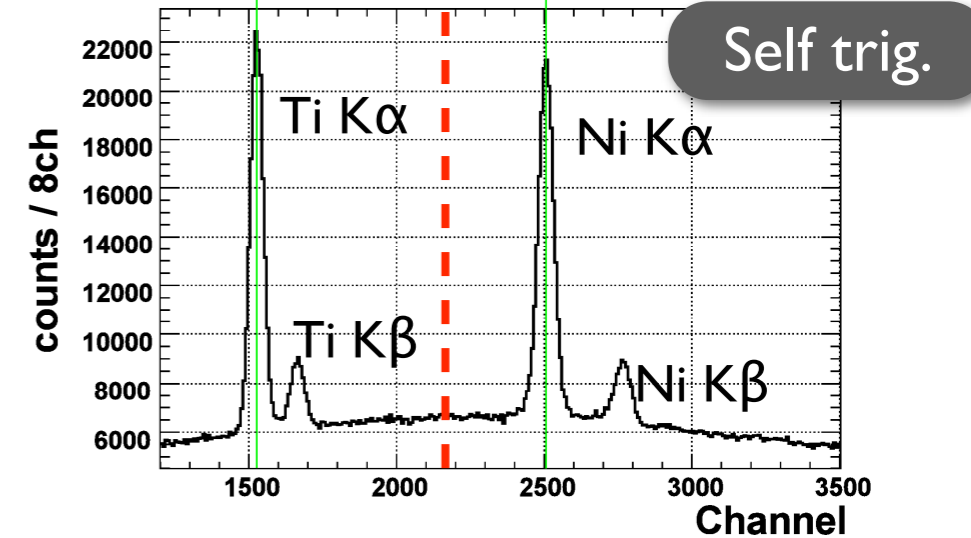
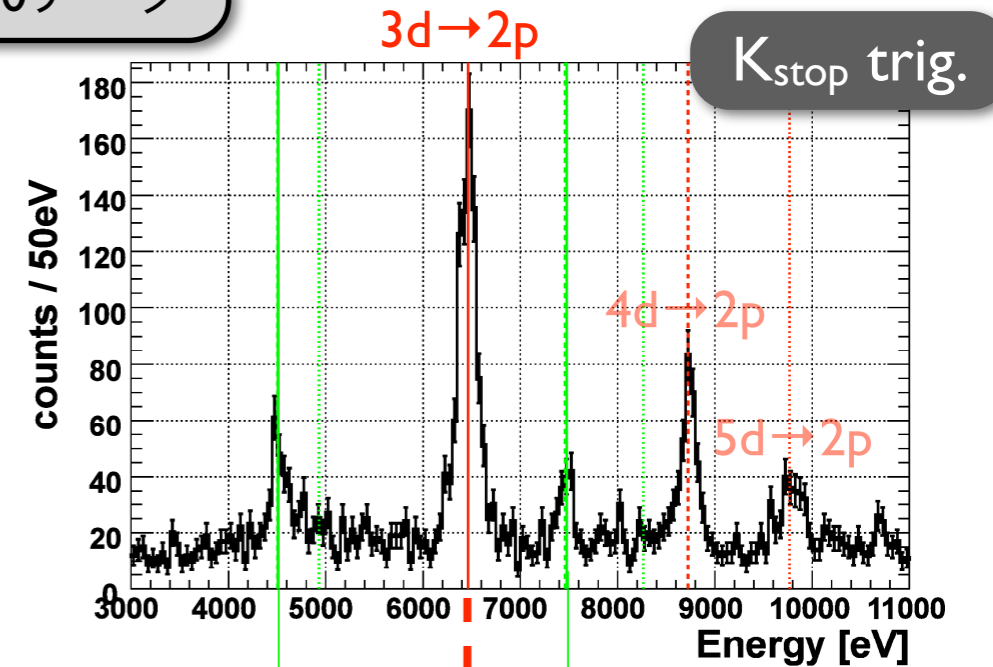
Ti・Ni箔を通過するMIPS粒子 π が生成する特性X線
 ➡ 良いエネルギー指標

シミュレーション

- E570実験からの求めたK殻電離断面積を使用
- TURTLEで求めた π の広がり・E17セットアップを考慮

π^- の絶対強度 $\sim 0.25 \times 10^6$ の場合：1シフト
 ISDD当たり ~ 4000 イベントの特性X線強度

E570データ



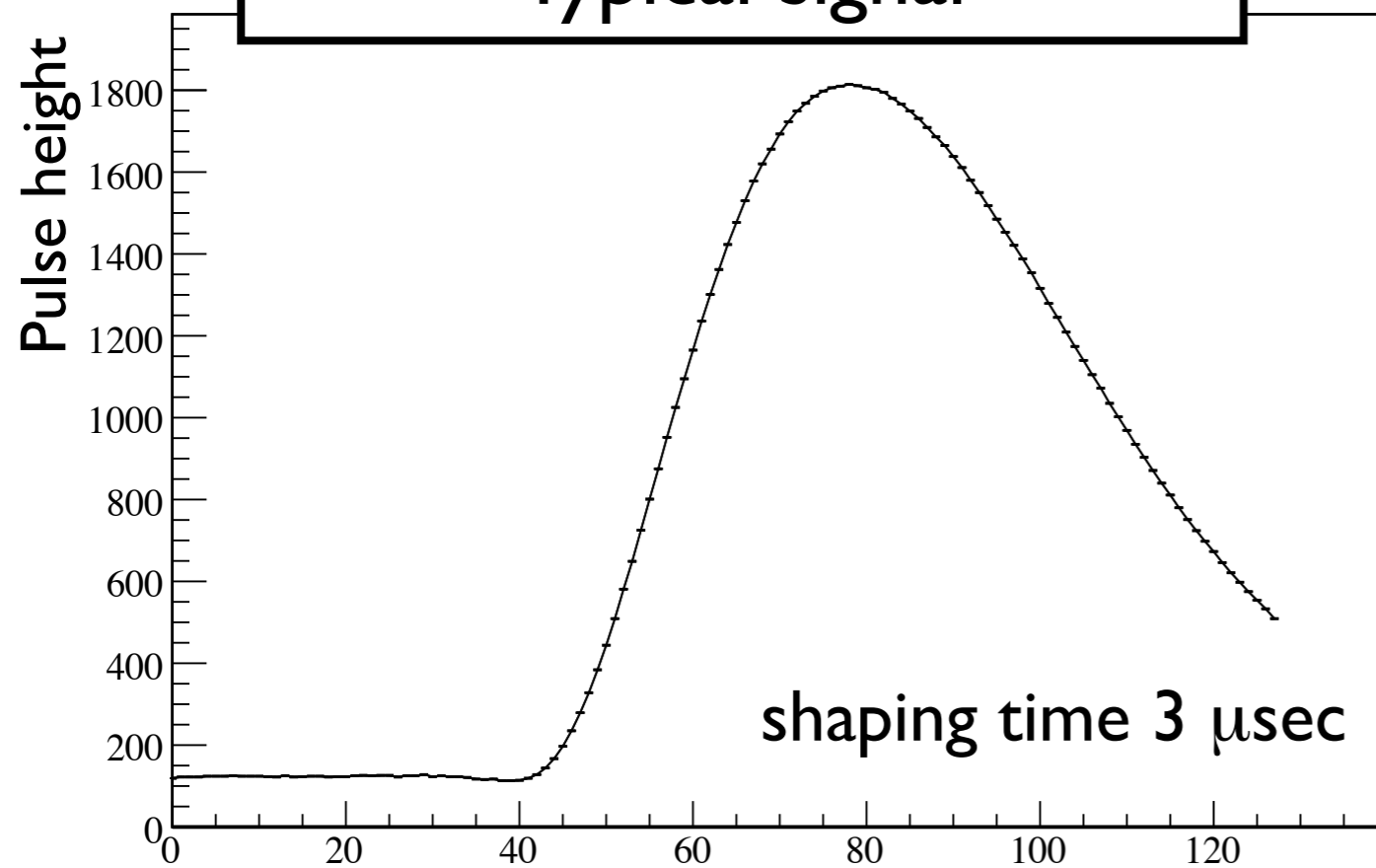
➡ in-situ キャリブレーション

- ➡ ゲイン等の長期ドリフトに強い
- ➡ 数eVの精度

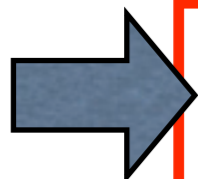
パイルアップ除去

フラッシュADCを用いたパイルアップ事象の除去

フラッシュADCデータ
Typical signal

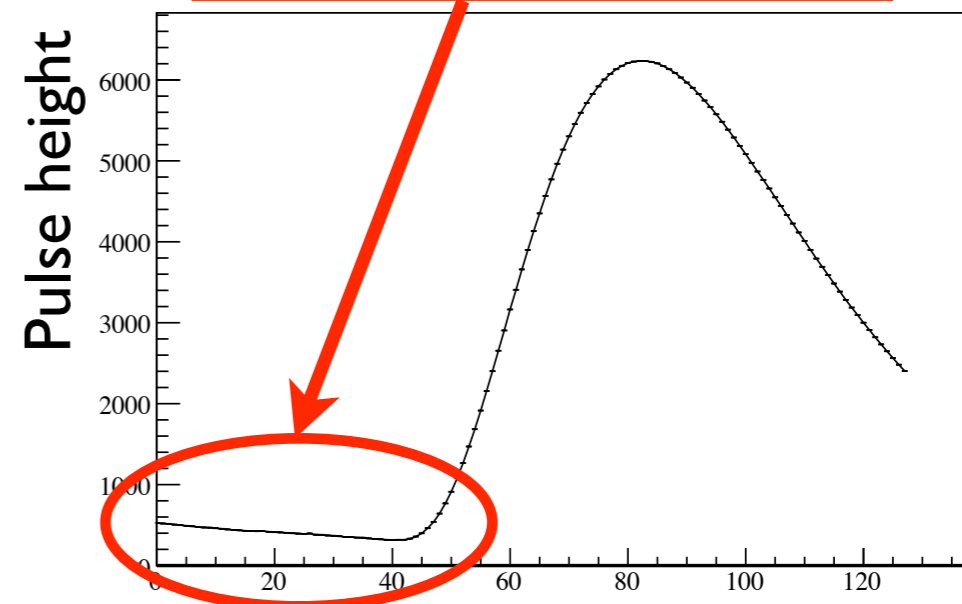


80 nsec / data point (12.5 MHz)

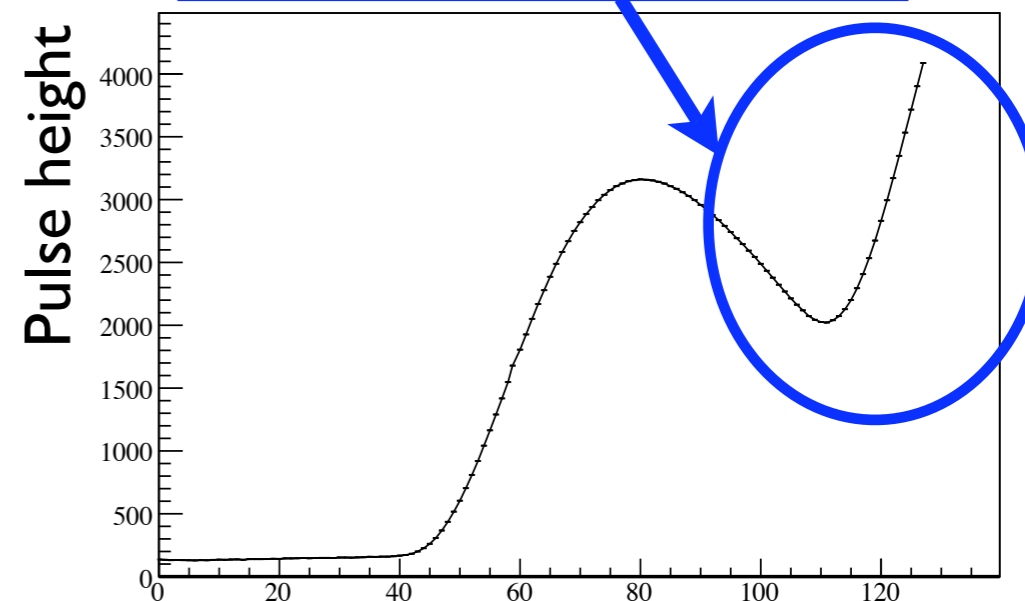


詳細は、明日午後「パラレル3」
セッションの竜野のトークにて

pre-pileup event



post-pileup event



プリアンプを真空容器内部へ

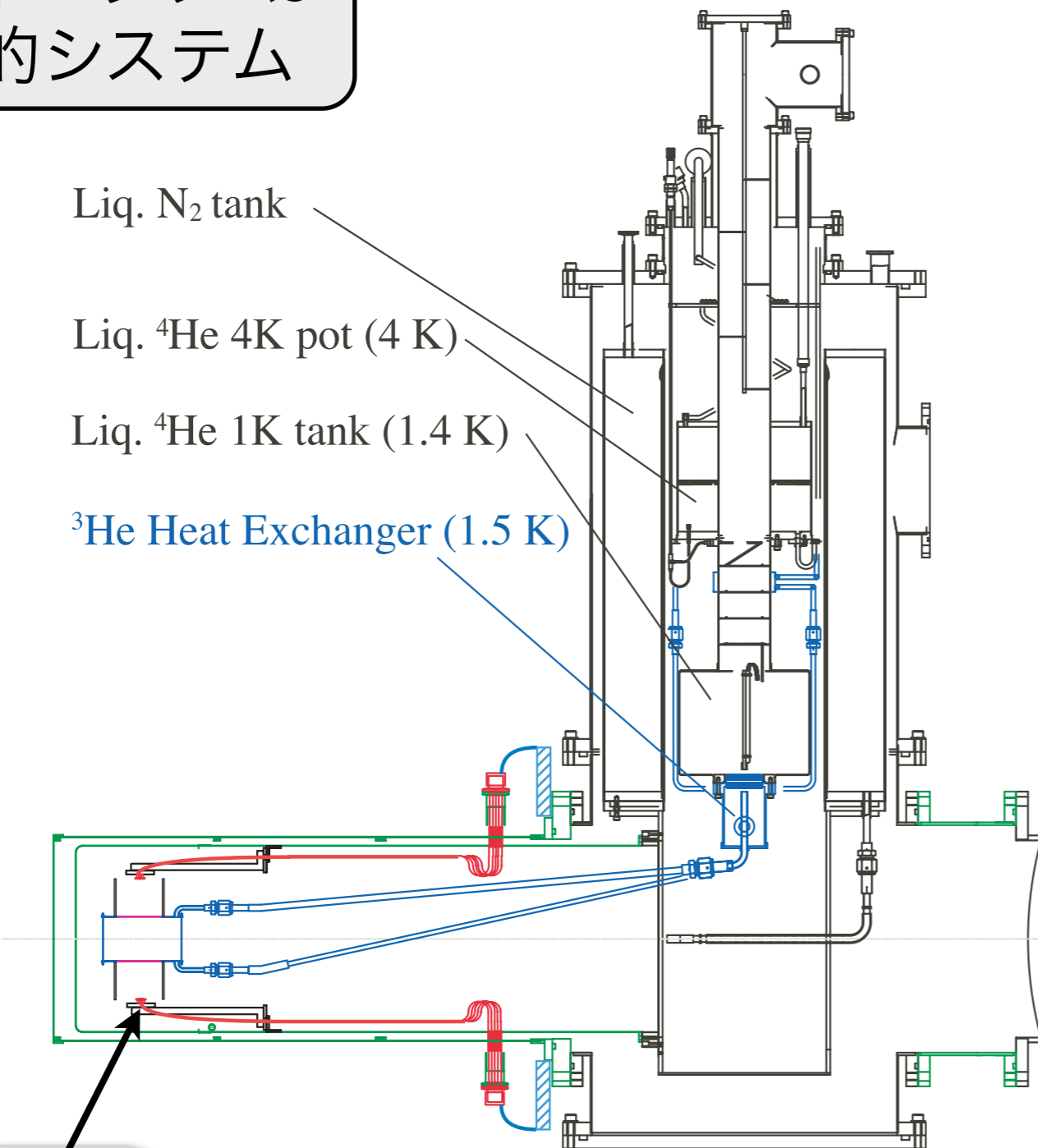
液体ヘリウム3 標的システム

Liq. N₂ tank

Liq. ⁴He 4K pot (4 K)

Liq. ⁴He 1K tank (1.4 K)

³He Heat Exchanger (1.5 K)



SDDs

低ノイズ

- ✓ 微弱なシグナルの引き回し距離が減る
(~50 cm (E570) → ~数 cm (E17))
⇒ 低ノイズ ⇒ 安定した良い分解能

ポートからの熱流入減

- ✓ SDDシグナルの取出口を標的から遠ざけることが可能 ⇒ 標的への熱流入減

プリアンプの真空内における動作は既に確認済み

今後行う R & D

- ▶ プリアンプの外部制御について
- ▶ プリアンプから発熱はどの程度か

プリアンプを真空容器内部へ

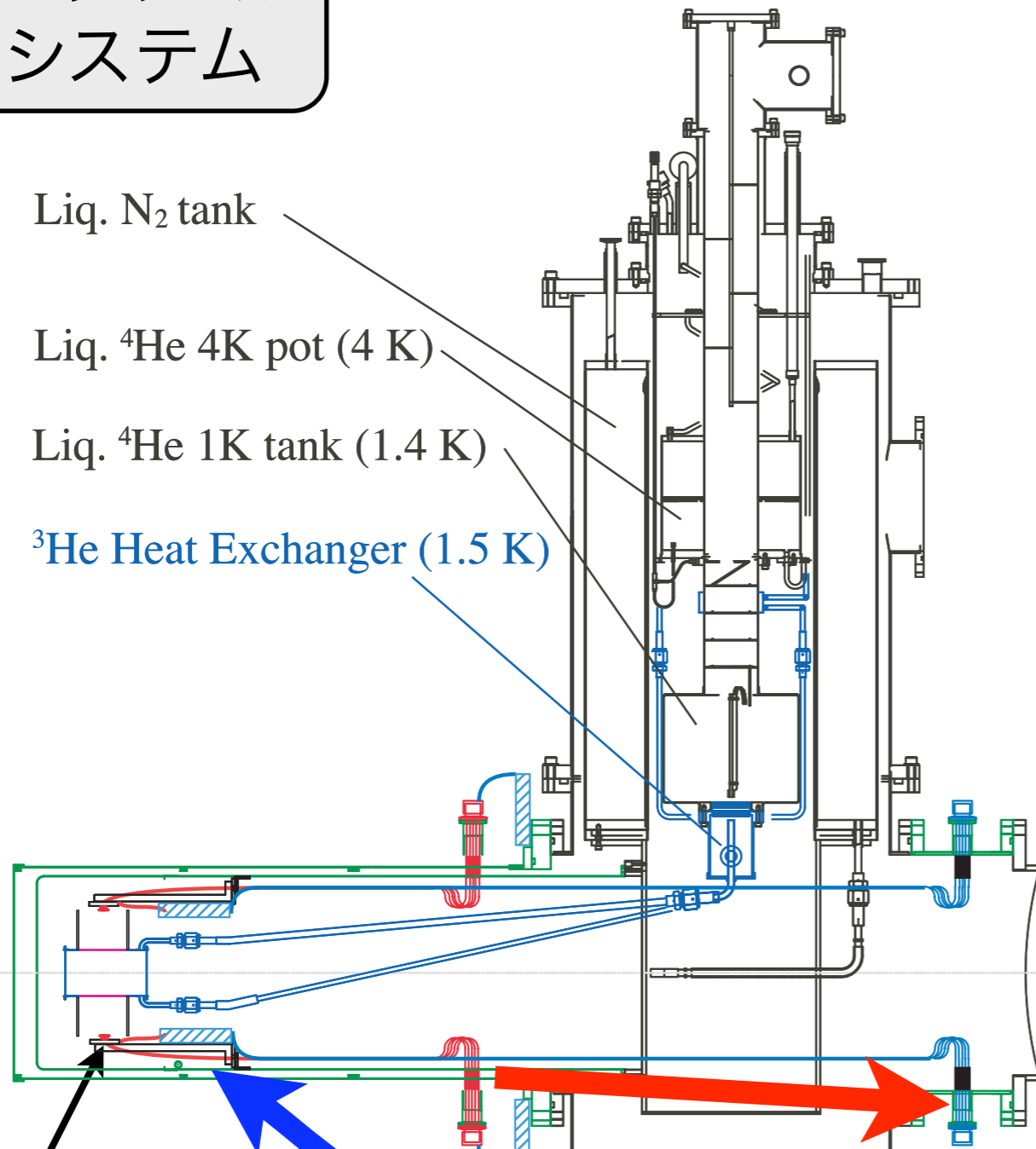
液体ヘリウム3
標的システム

Liq. N₂ tank

Liq. ⁴He 4K pot (4 K)

Liq. ⁴He 1K tank (1.4 K)

³He Heat Exchanger (1.5 K)



SDDs

プリアンプ
真空中へ

ハーメチック
ポート
遠ざける

低ノイズ

✓ 微弱なシグナルの引き回し距離が減る
(~50 cm (E570) → ~数 cm (E17))
⇒ 低ノイズ ⇒ 安定した良い分解能

ポートからの熱流入減

✓ SDDシグナルの取出口を標的から遠ざけることが可能 ⇒ 標的への熱流入減

プリアンプの真空内における動作
は既に確認済み

今後行う R & D

- ▶ プリアンプの外部制御について
- ▶ プリアンプから発熱はどの程度か

プリアンプを真空容器内部へ

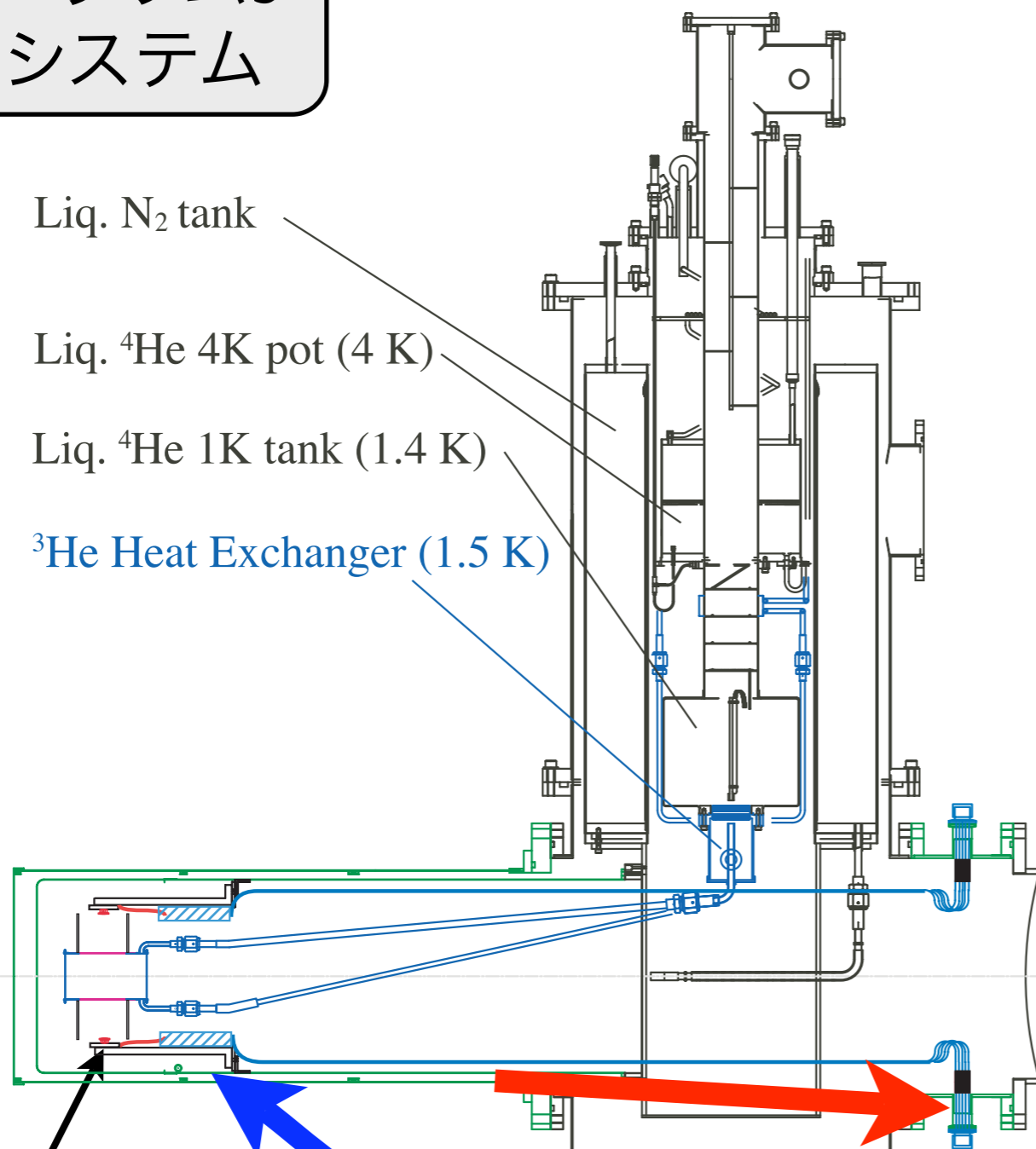
液体ヘリウム3
標的システム

Liq. N₂ tank

Liq. ⁴He 4K pot (4 K)

Liq. ⁴He 1K tank (1.4 K)

³He Heat Exchanger (1.5 K)



SDDs

プリアンプ
真空中へ

ハーメチック
ポート
遠ざける

低ノイズ

✓ 微弱なシグナルの引き回し距離が減る
(~50 cm (E570) → ~数 cm (E17))
⇒ 低ノイズ ⇒ 安定した良い分解能

ポートからの熱流入減

✓ SDDシグナルの取出口を標的から遠ざけることが可能 ⇒ 標的への熱流入減

プリアンプの真空内における動作は既に確認済み

今後行う R & D

- ▶ プリアンプの外部制御について
- ▶ プリアンプから発熱はどの程度か

ビームタイムの見積もり

～2eV(E570と同等)の統計を得るには...

	K1.8BR の場合
プロダクション (最大強度: 30GeV-9 μ A)	3.5 日
コミッショニング	10 日*

* 検出器に対するコミッショニング
新規ビームラインの調整期間は別途必要

ビーム強度が一桁弱い場合においても、
一ヶ月程度(35日)でデータ収集が可能

- ➡ “DAY-1”実験として申請
- ➡ E15実験より前に同ビームラインで行うことを提案

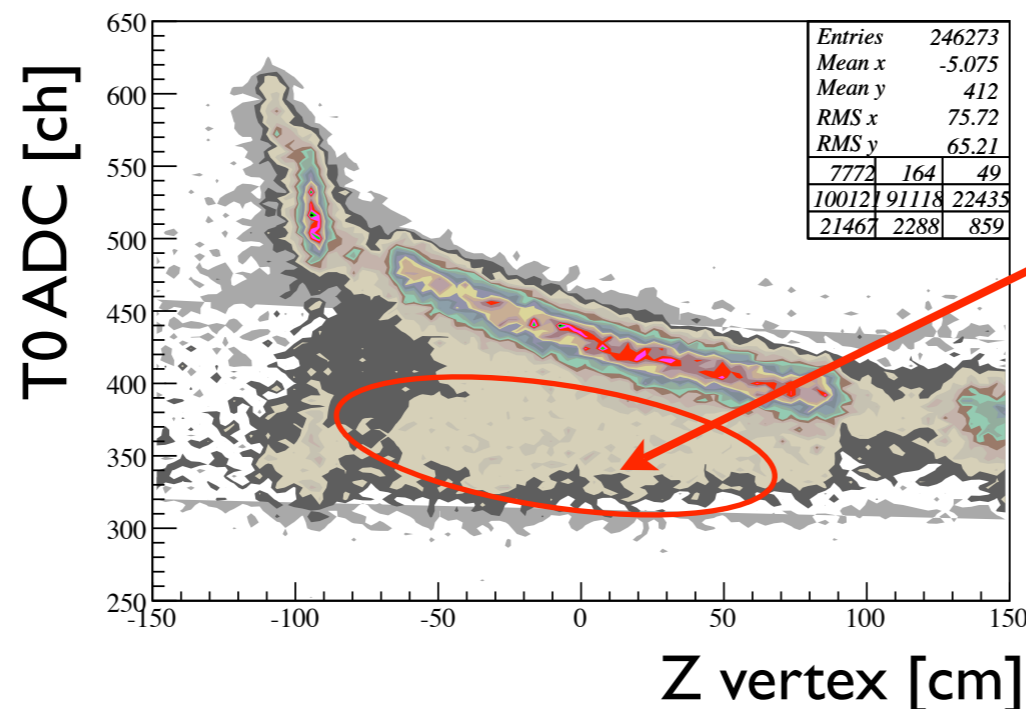
まとめ

- E17実験：「K-³He原子の最終軌道(2p)のシフトを~2eVの精度で決定」
 - ▶ 1)オプティカルポテンシャルの深さ、2)K中間子原子核の存在、に関する重要な情報
 - ▶ K-原子核間 強相互作用のアイソスカラー / ベクターに関する新たな知見
- 現在、DAY-1に向けて準備している
 - ▶ E15実験の共有部分の開発
 - ▶ X線検出器系の改良
 - ▶ ビームライン検出器群設計

backup

ビームラインカウンター

- **LC** : ルサイトチェレンコフカウンター (2台)
 π / K 分離のため
- **TI** : シンチレーションカウンター (1台、片読み)
トリガーにおけるビーム決定のため (defining counter)
- **T0** : シンチレーションカウンター (3台、両読み) ...減速材の直後に設置
減速されたK-のエネルギー損失 \Rightarrow in-flight K- 事象との選別



in-flight K-事象の除去

(E570データ)

タイムスケジュール

E15共通部分の実験装置製作 (含 標的)

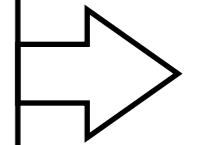
KI.8BRビームライン
完成予定

X線検出器系のR & D
(SDDプリアンプ真空内部設置
に伴う読み出し系のR & D等)

ビームライン検出器の
設計・製作・テスト

実機のインストール
及び動作チェック

実験開始



2007年1月

2008年1月

2009年1月

多くの実験装置をE15実験と共有可能

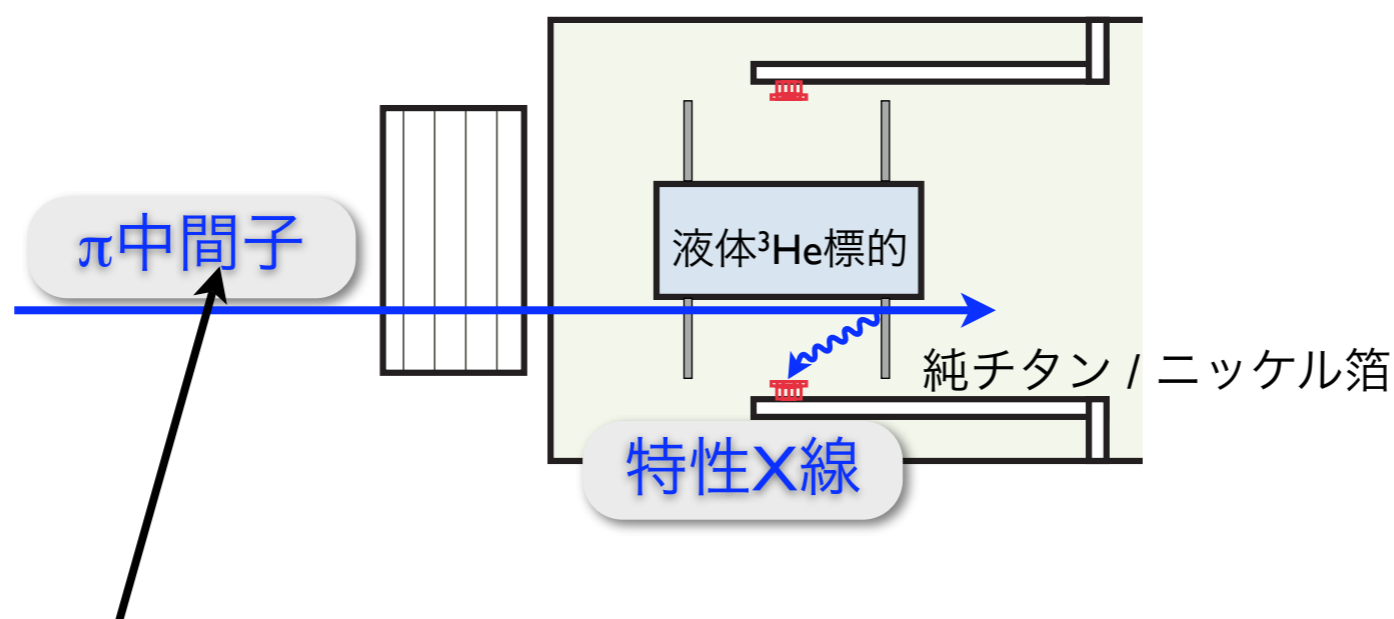
- 必要となる**実験装置**でも共通する部分が多い
- 多くの**実験協力者**がオーバーラップ

	本実験 E17	E15
反応	静止 K ⁻	In-flight K ⁻
二次ビームライン	K1.8BR	
二次ビーム運動量	0.75 GeV/c K ⁻	1.0 GeV/c K ⁻
入射ビーム検出	(静止 K) ビームライン検出器群	ビームラインスペクトロメーター
標的	液体ヘリウム 3 (~500 cm³)	
崩壊荷電粒子検出	円筒型検出器システム (CDS)	
磁場	無し	有り (ソレノイド電磁石)
X線検出	シリコンドリフト検出器 (SDD)	-
(前方) 中性子検出	-	中性子カウンター

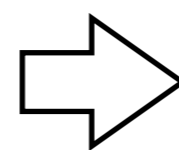
効率的な実験実施の為、共通する部分を共同開発する

π^- の絶対強度 $\sim 0.25 \times 10^6$ 必要

ビームを用いたエネルギー較正

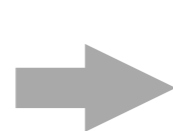


Kビームに混在するMIPS粒子 π がTi・Ni
箔を通過する際に生成する特性X線
➡ 良いエネルギー指標



コントロールされた
 π 混入が必要

π^- の絶対強度は、 $\sim 0.25 \times 10^6$ 必要



K/ π 比 ~ 0.75 程度が望ましい
(K強度190k/spillを仮定)

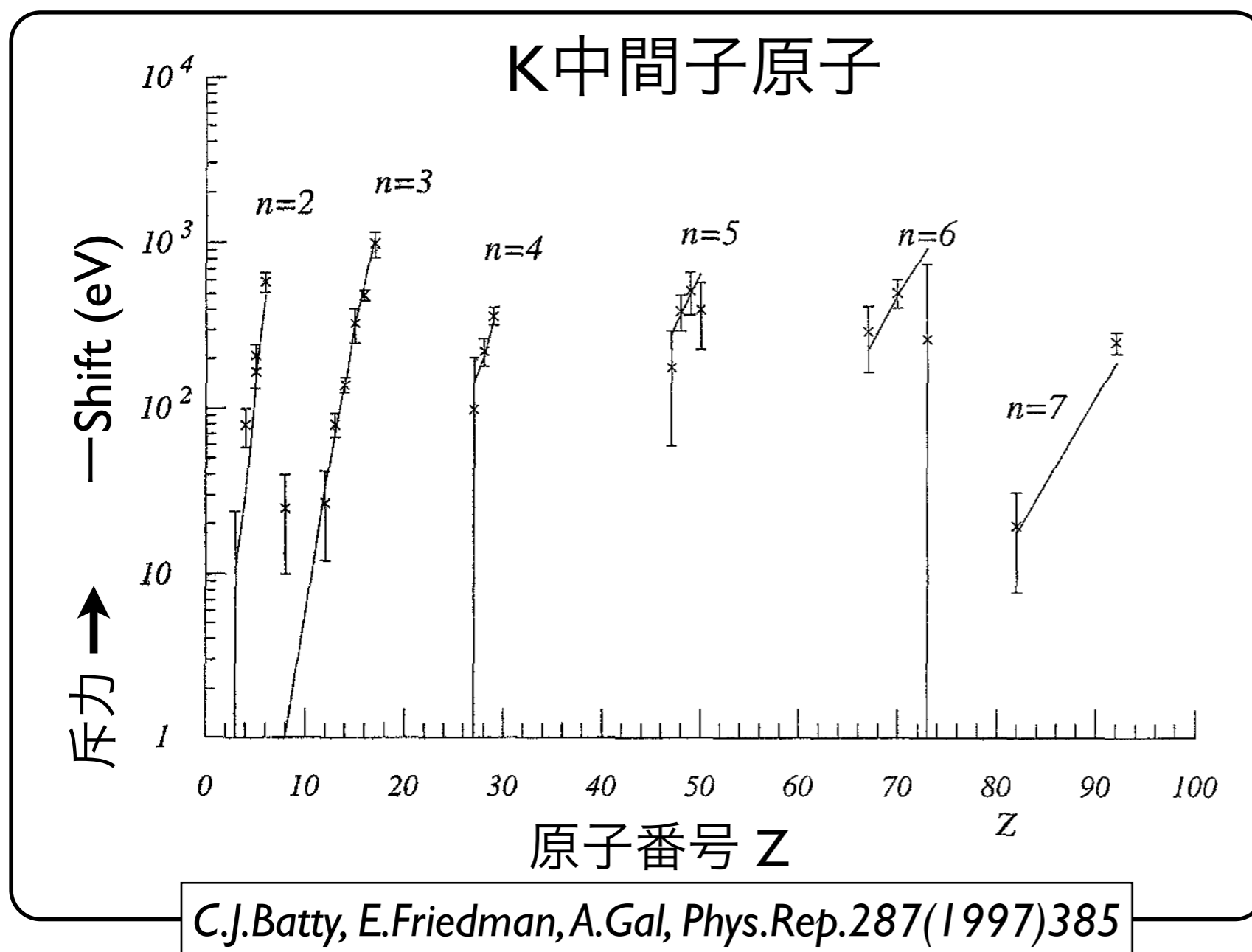
TURTLEでは"クラウド π "の見積もりは出来ない
この比はセパレーター電圧等で調整可能

K中間子原子：過去の実験結果と解釈

- 実験データ：Z = 1(H)~92(U) 存在 (24points)
- データを現象論的にグローバルフィット
(w/ オプティカルポテンシャル)

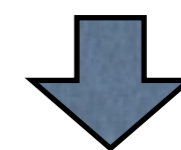


Z ≥ 3 に対して
良いフィット



Effective scattering length :
 $a_{\text{eff}}(\rho) = b_0 + B_0 [\rho(r)/\rho(0)]^\alpha$
 $b_0 = -0.15 + 0.62i$, $B_0 = 1.61 - 0.02i$, $\alpha = 0.18$

- $\chi^2 \sim 98$
- Data points for the fit : 65
(Shift:24, Width:24, Relative Yield:17)

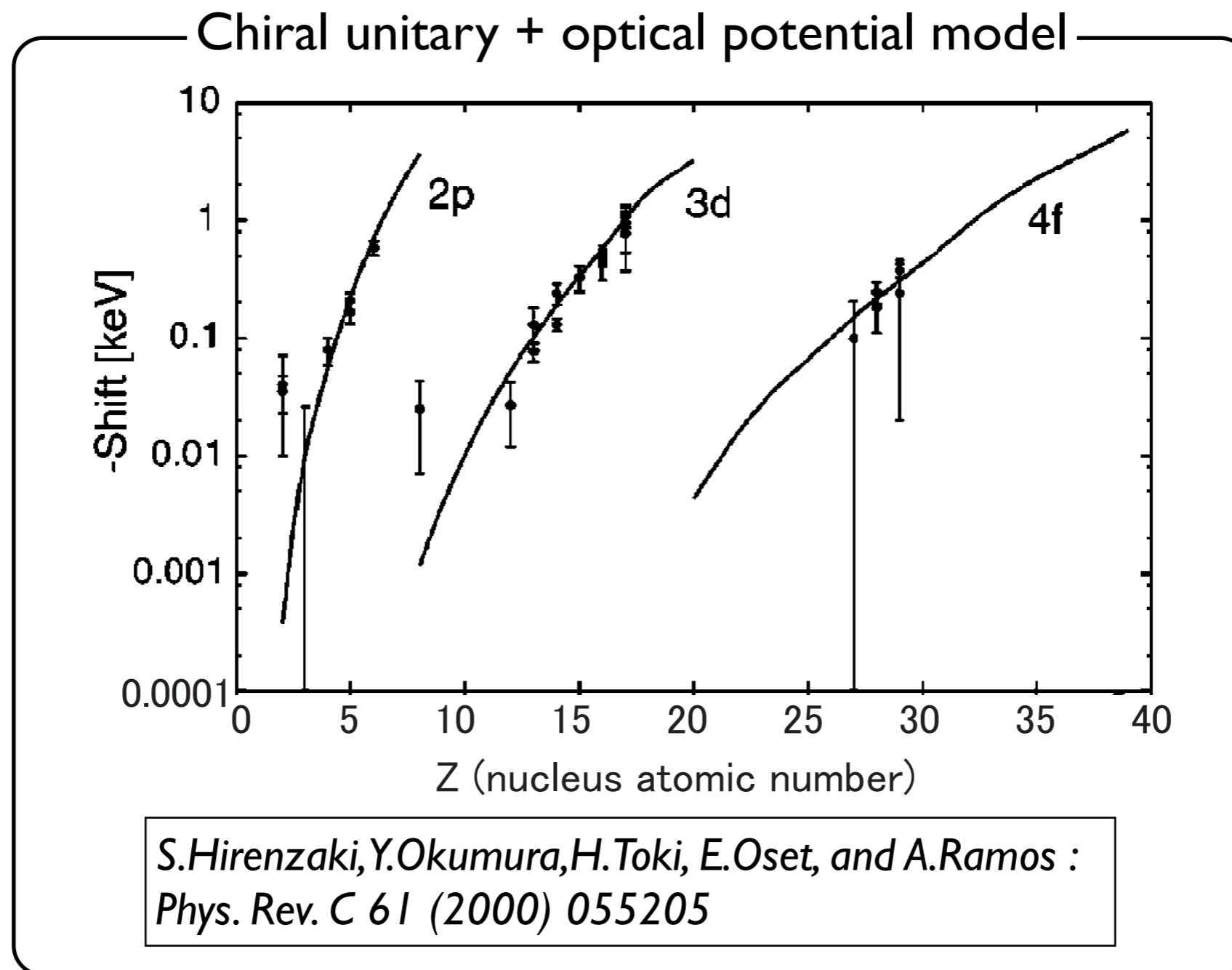


オプティカルポテンシャル

- 虚部：大きい ($W_0 \sim 70$ MeV)
- 実部(深さ)：
深くても浅くても再現

“Chiral Unitary + Optical Pot.” : 良い一致

(現象論的な) グローバルフィットでなくとも良い一致

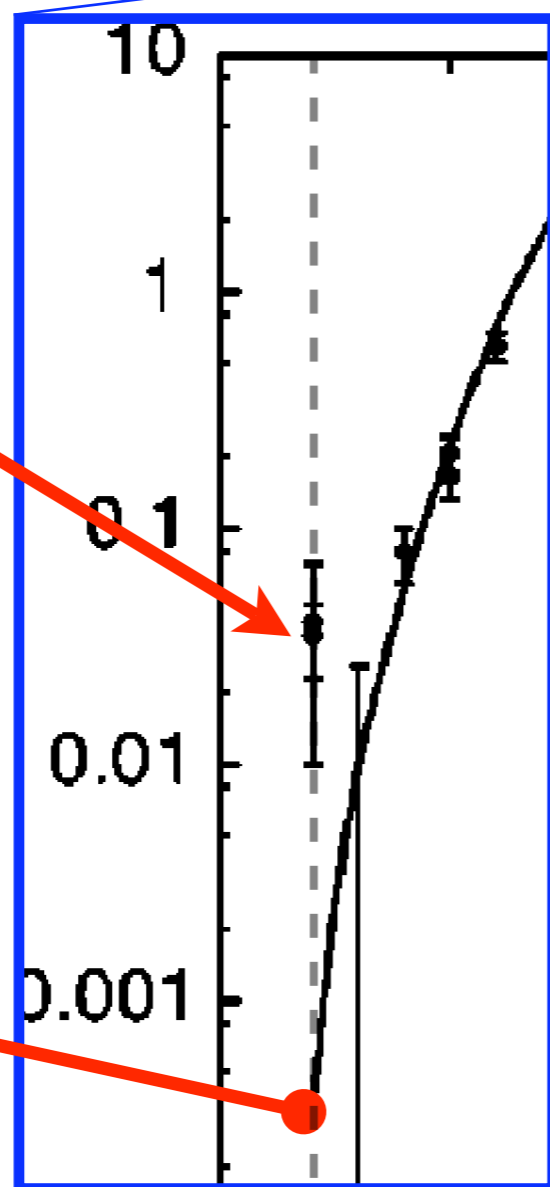


K中間子ヘリウム原子の不一致

大きな斥カシフト

過去の実験値

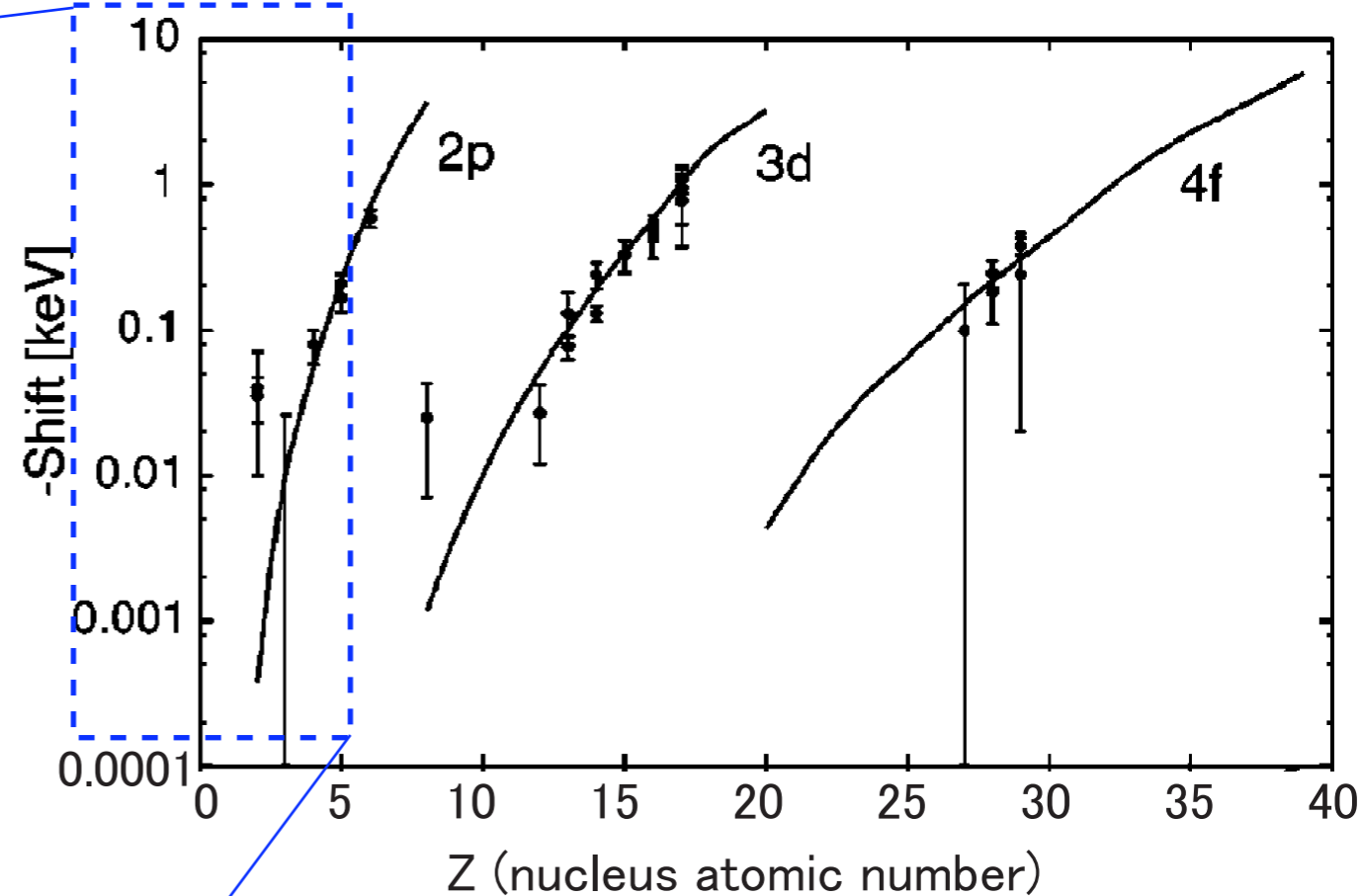
~ -40 eV



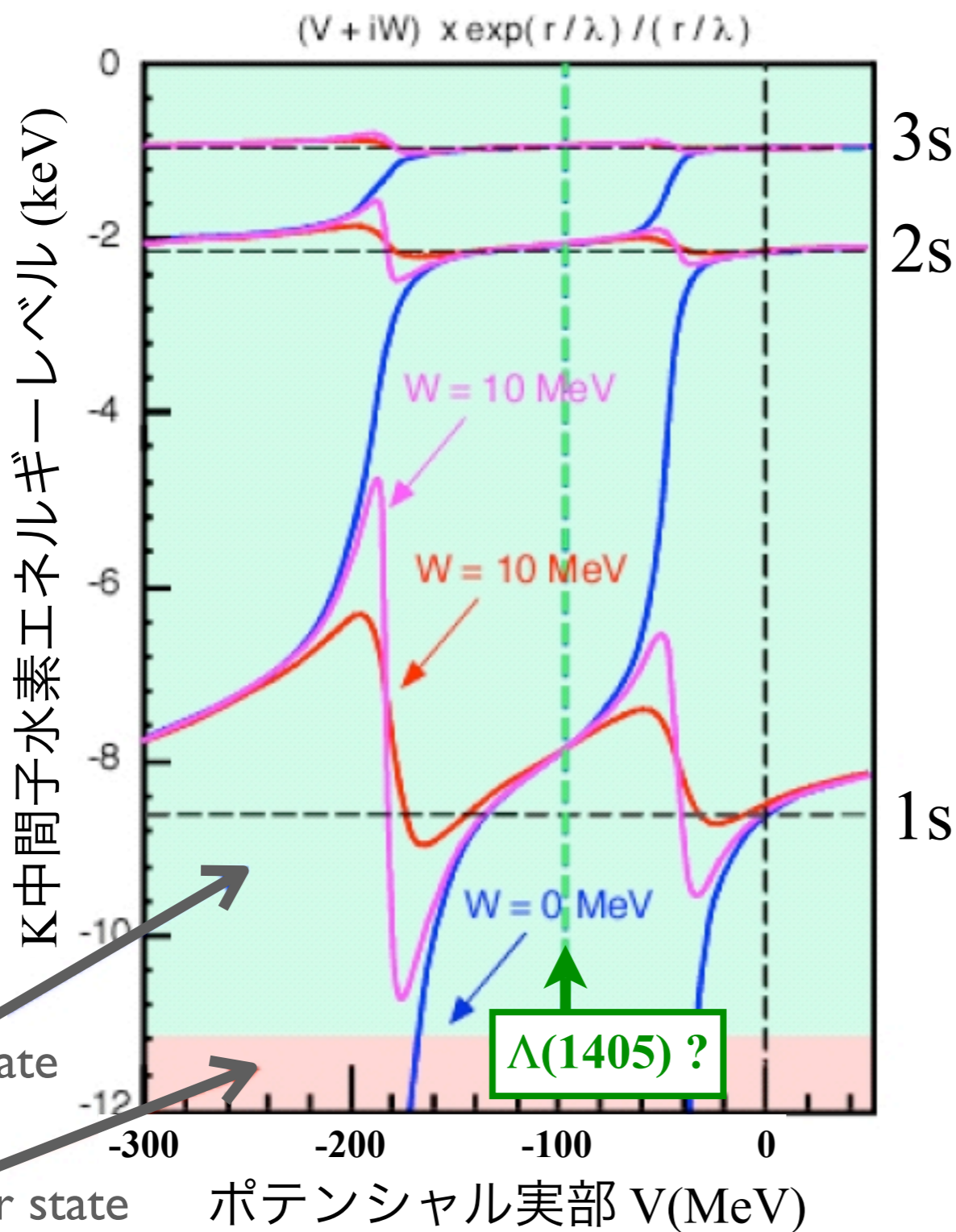
理論値

~ -0.2 eV

$z=2$



K中間子水素原子は？

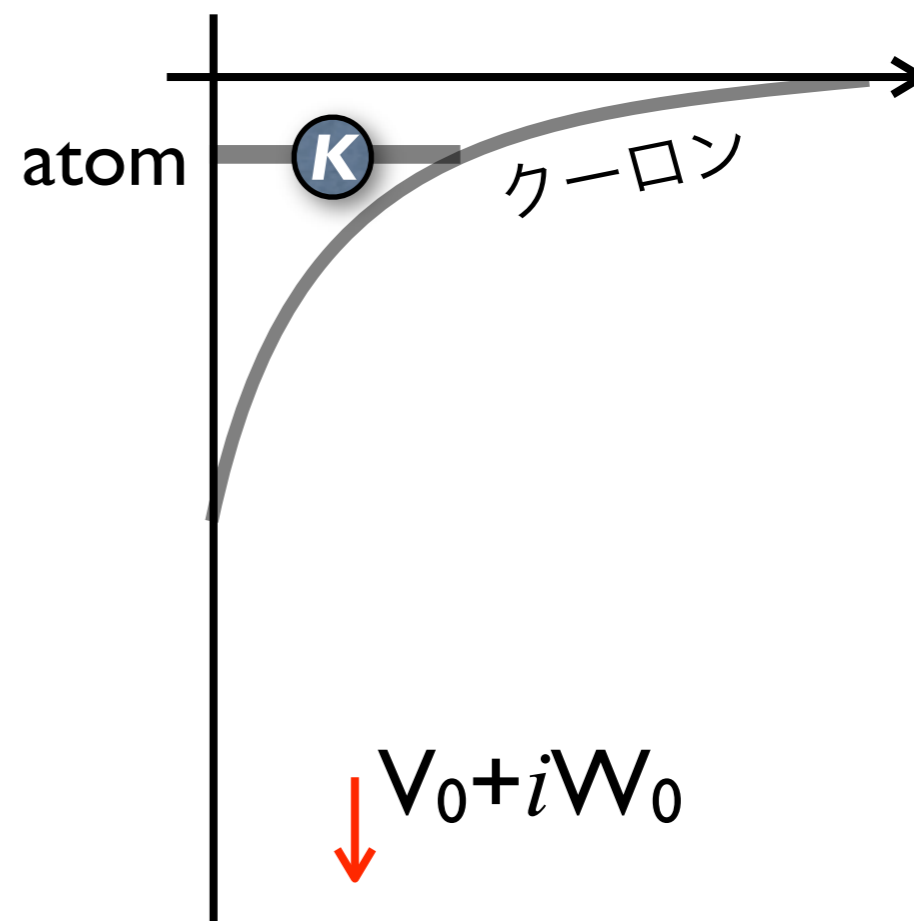


斥力シフト

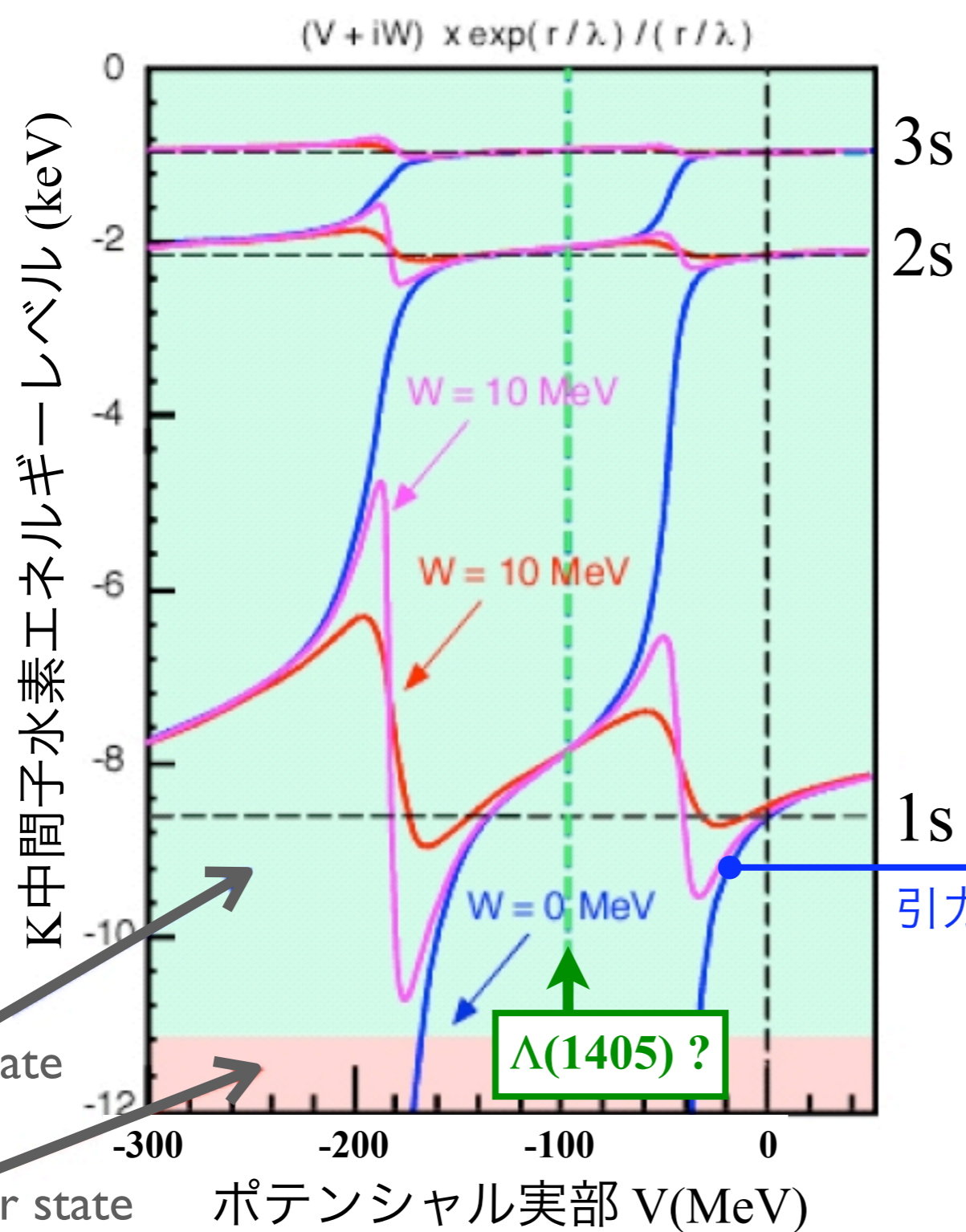
$\Delta E_{1s} = -323 \text{ eV} (\pm 63 \pm 11)$
 M.Iwasaki, PRL78(1997)3067



KN相互作用は
斥力？ or 強い引力？



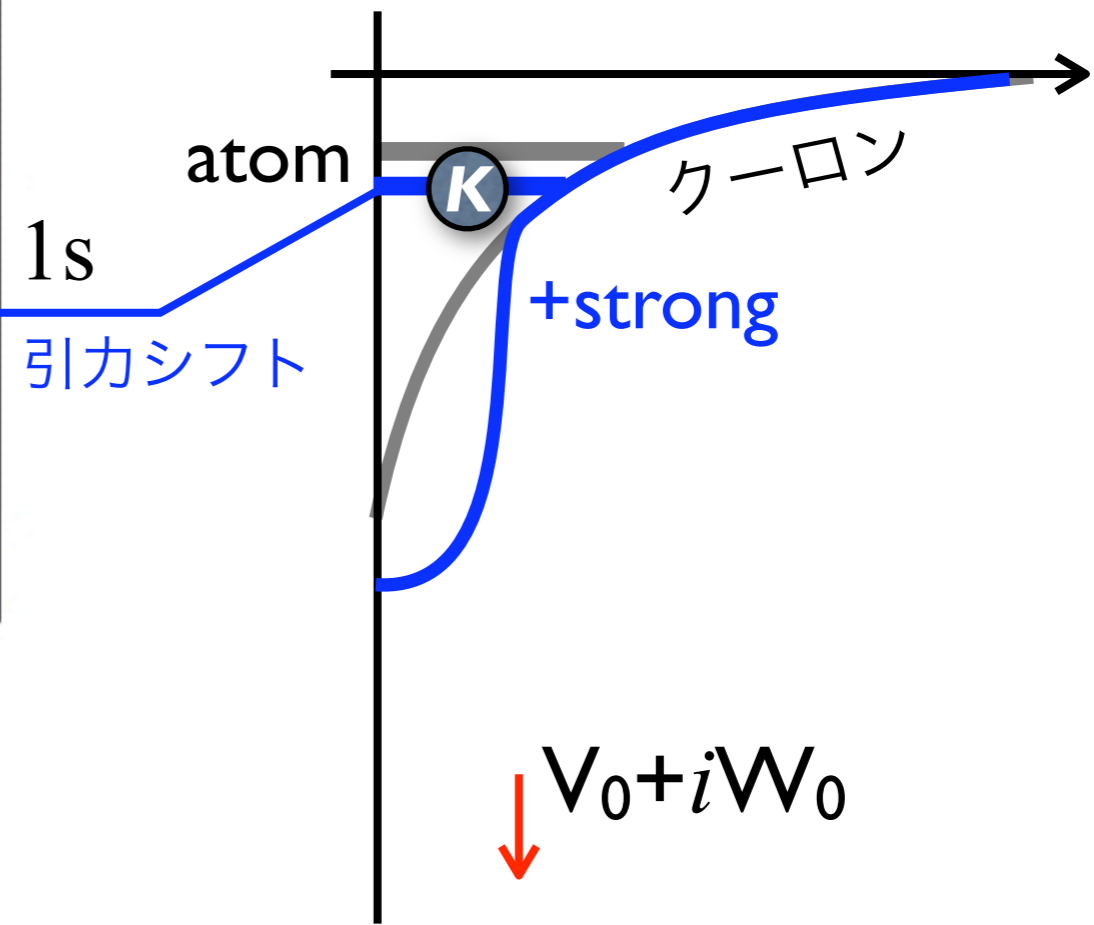
K中間子水素原子は？



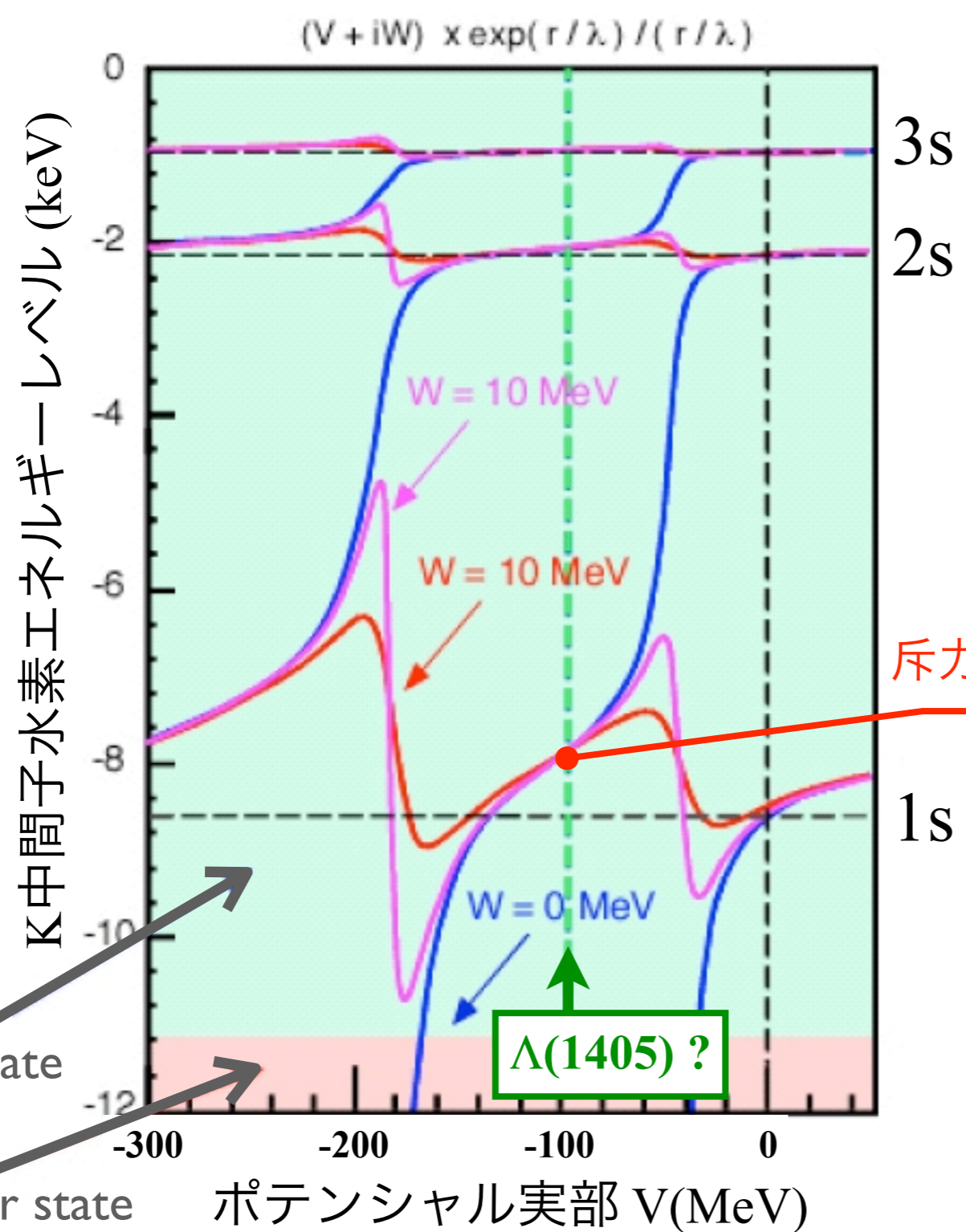
斥カシフト
 $\Delta E_{1s} = -323 \text{ eV } (\pm 63 \pm 11)$
 M.Iwasaki, PRL78(1997)3067



KN相互作用は
 斥力？ or **強い引力？**

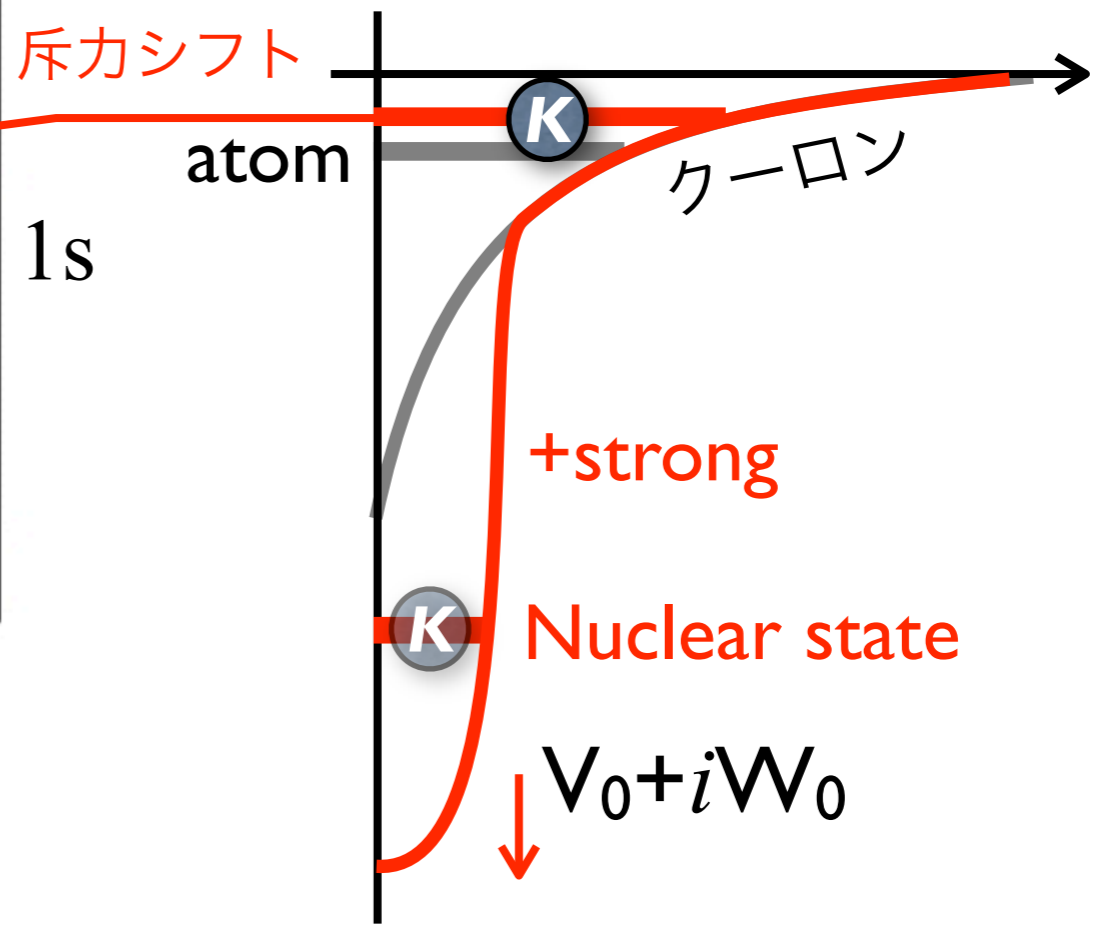


K中間子水素原子は？



斥カシフト
 $\Delta E_{1s} = -323 \text{ eV } (\pm 63 \pm 11)$
 M.Iwasaki, PRL78(1997)3067

KN相互作用は
 斥力？ or **強い引力？**

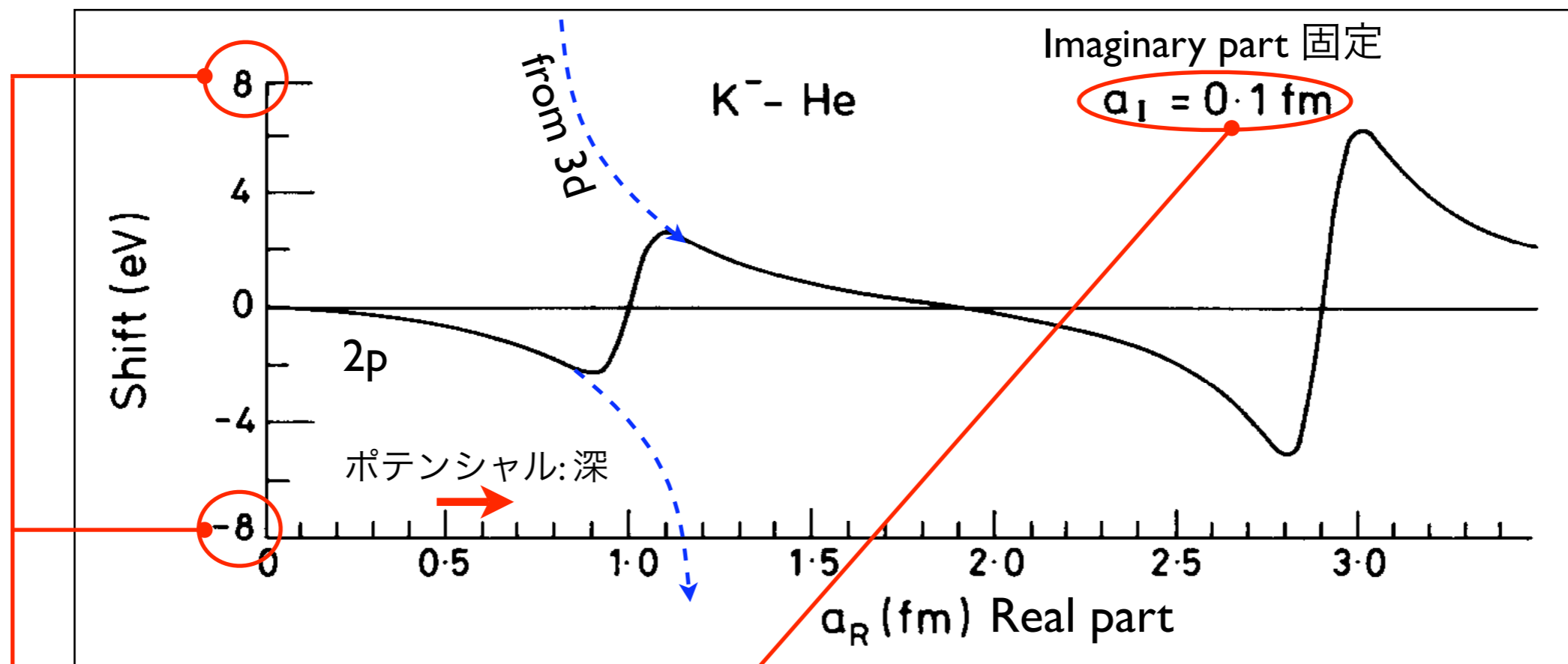


Atomic state

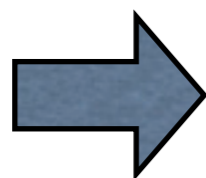
Nuclear state

K中間子へリウムの場合

C.J.Batty, Nucl.Phys.A508(1990)89c



虚部が小さい時のみ、この効果は顕著



しかし、実際には(グローバルフィットの結果は)虚部=大
➡ 大きなシフトをおこすのは困難 ...

DAQシステム

E15実験のシステムに対して必要なチャンネルを追加した形で構成

COPPERシステム + TKOシステム

● X線検出器：COPPERシステム

✓ ピークホールドADC：ウィルキンソン型及び逐次近似型ADC

✓ フラッシュADC：パイルアップ事象の棄却

✓ TDC：フルレンジ数 μ 程度TDC

(⇒ E570で用いたTKO/VMEシステムのものもは既存)

● ビームラインチェンバー：COPPERシステム

E15における最下流チェンバーと同じ読み出しシステム

● ビームラインカウンタ群：TKOシステム

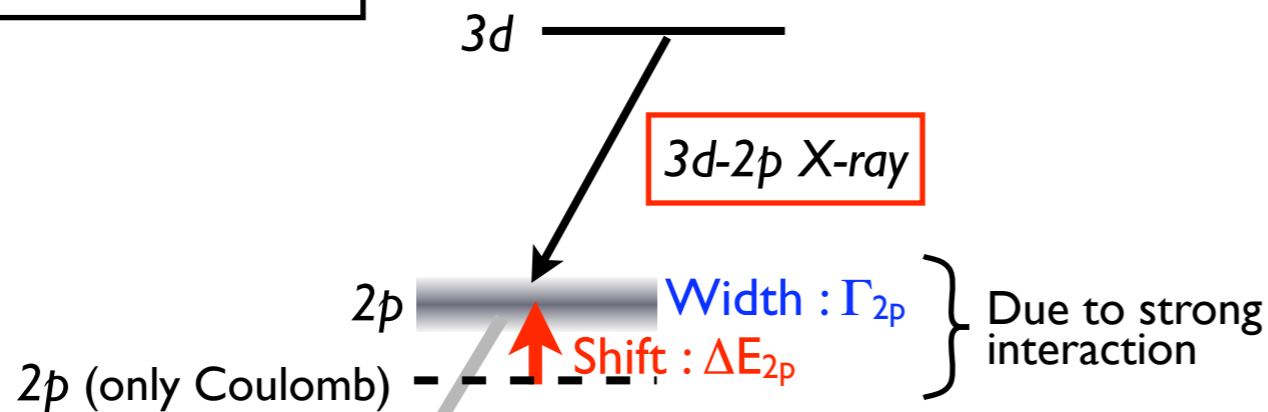
既存のTKOシステムを使用

目的

K中間子ヘリウム3原子の最終軌道(2p)のシフトを
~2eVの精度で決定すること

手法

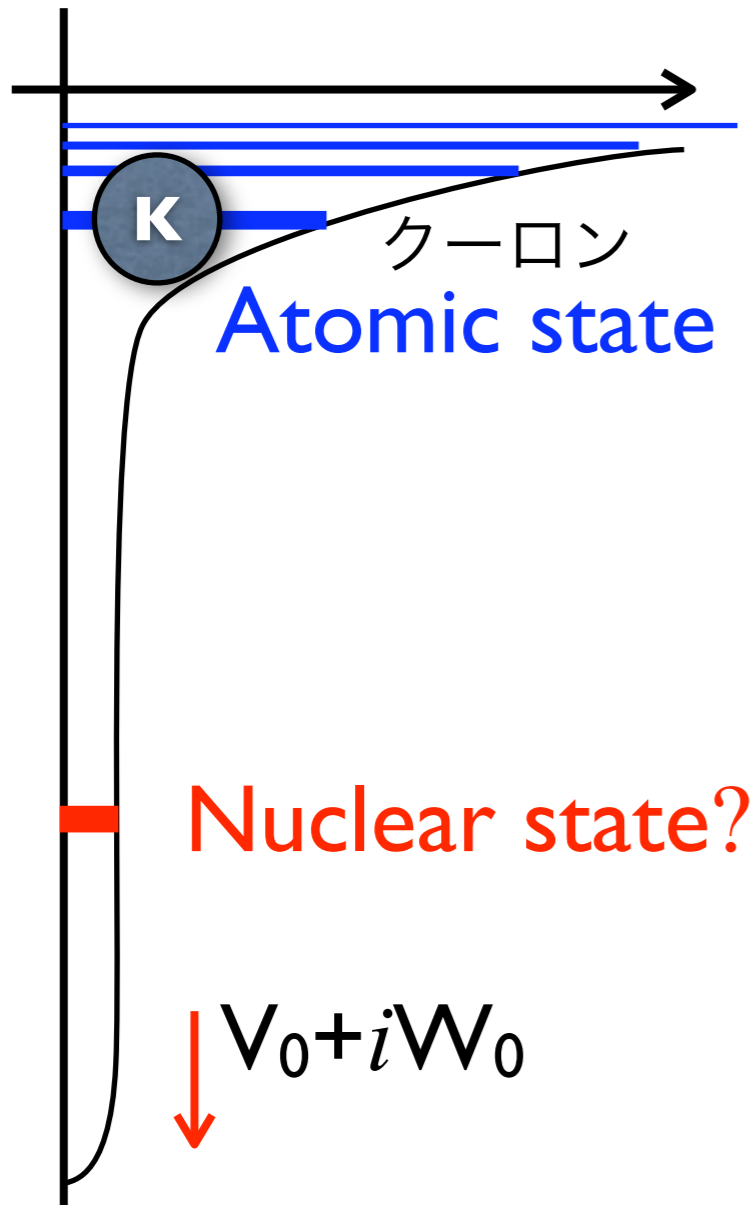
Kaonic Helium atom



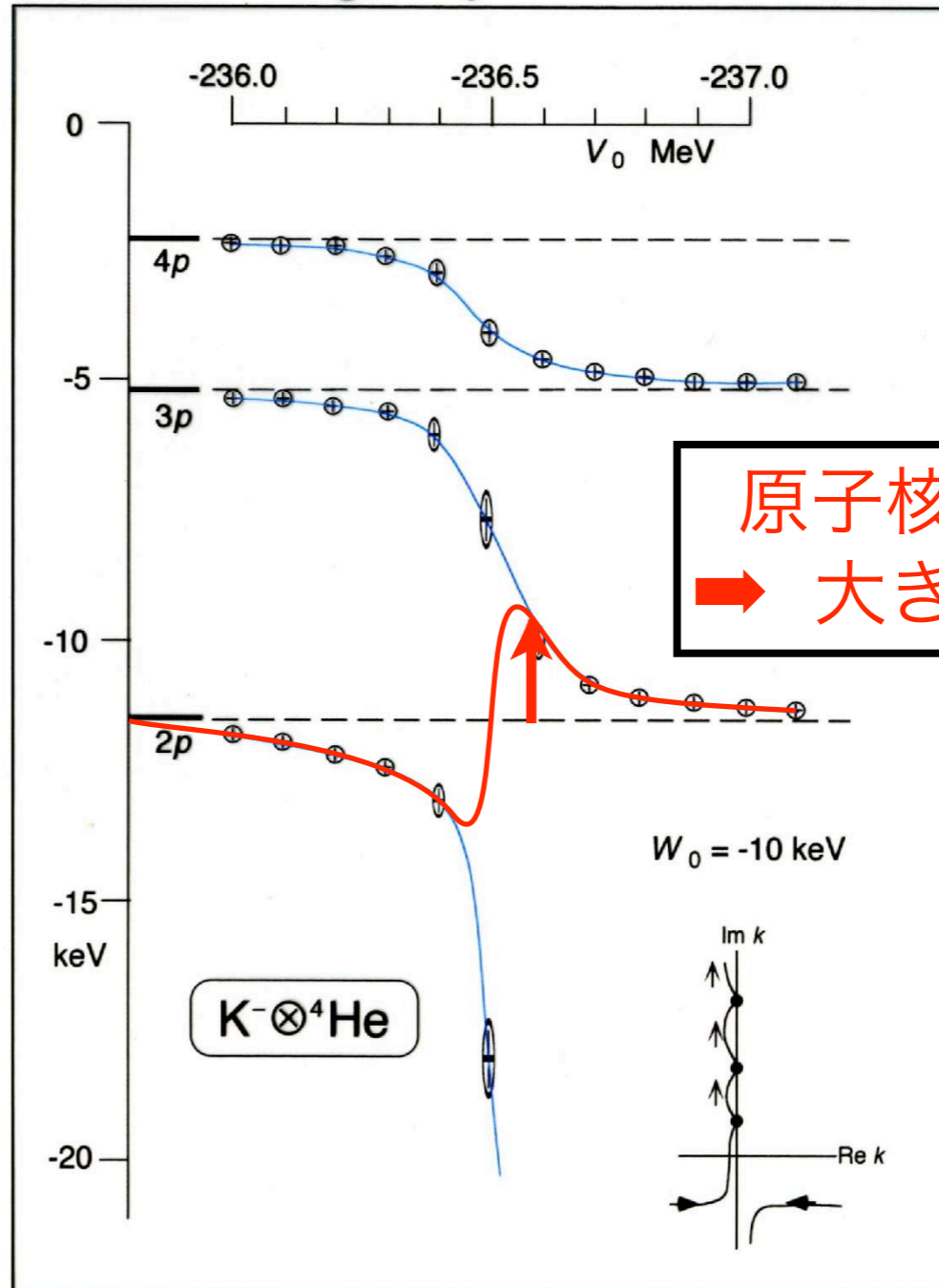
- ✓ 液体ヘリウム3を標的とした静止K-反応
- ✓ 脱励起過程から放出される3d->2p X線を高分解能X線検出器で精密分光

実験手法の本質的な部分は
KEK-PS E570実験において確立されている

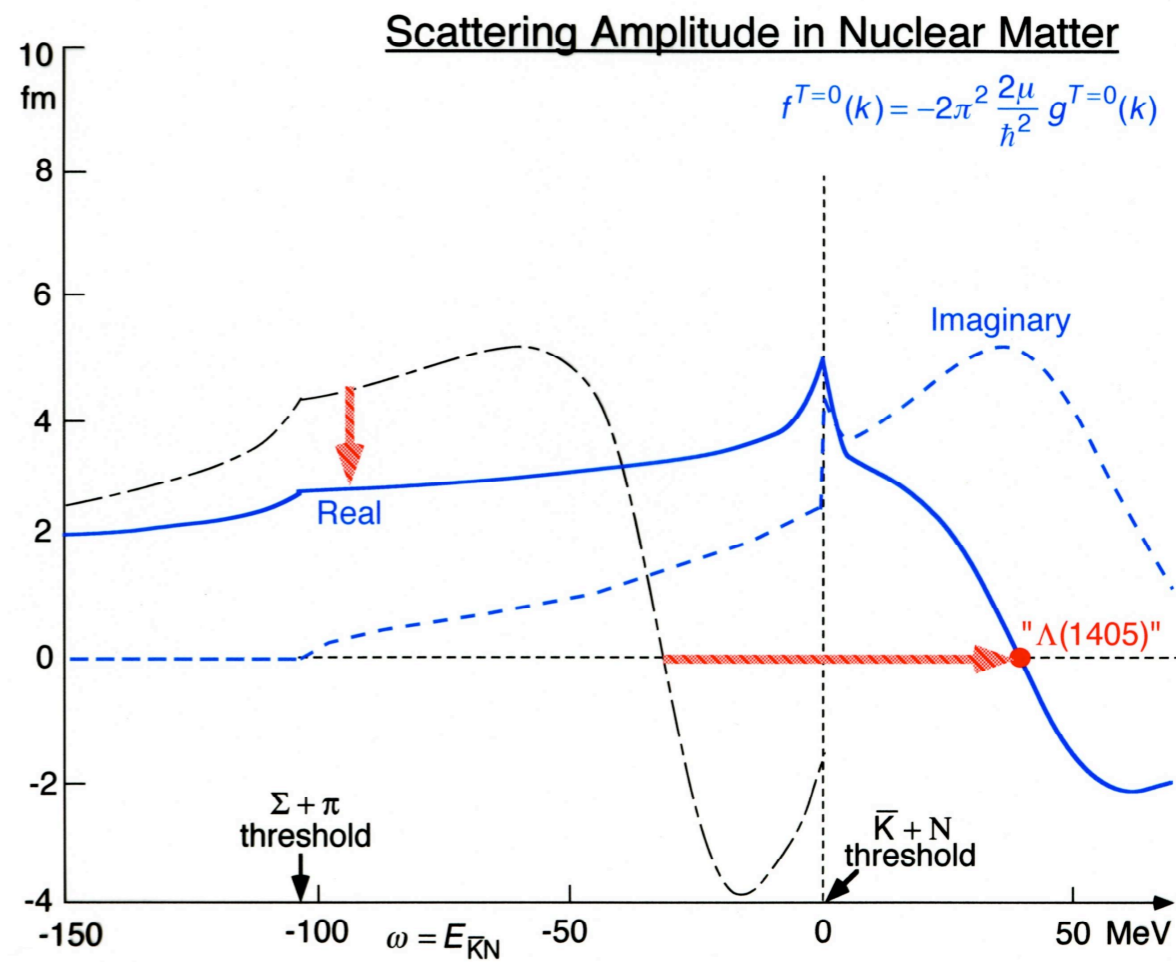
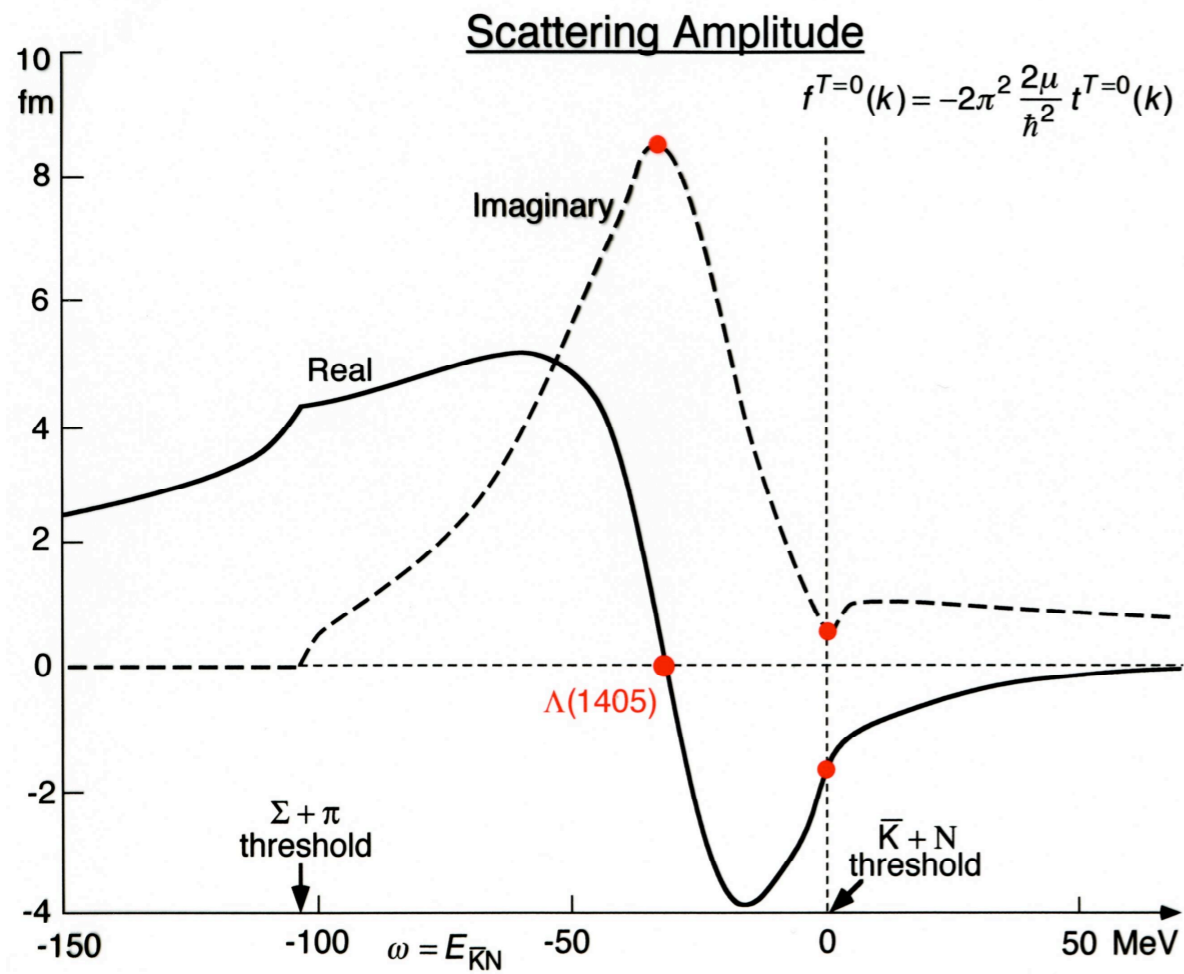
ポテンシャルの深さとレベルシフト

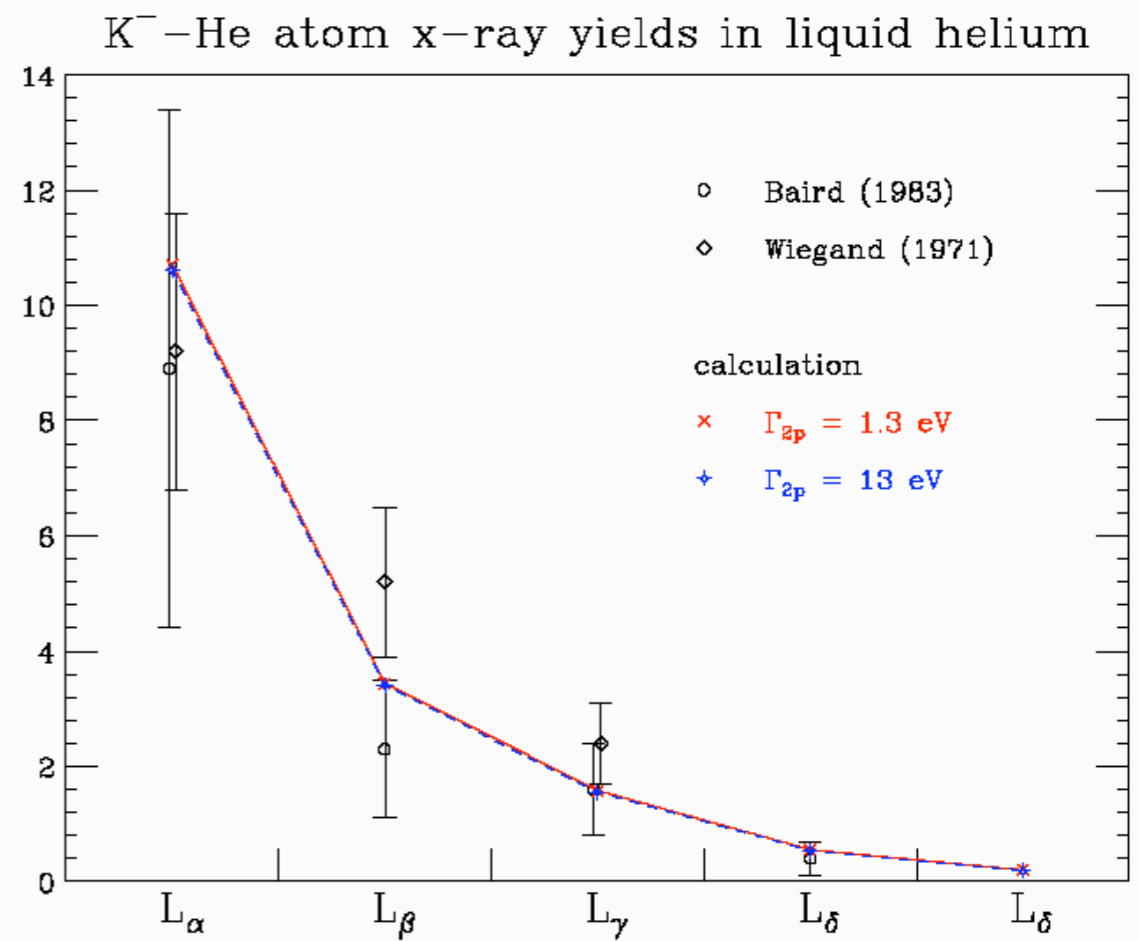
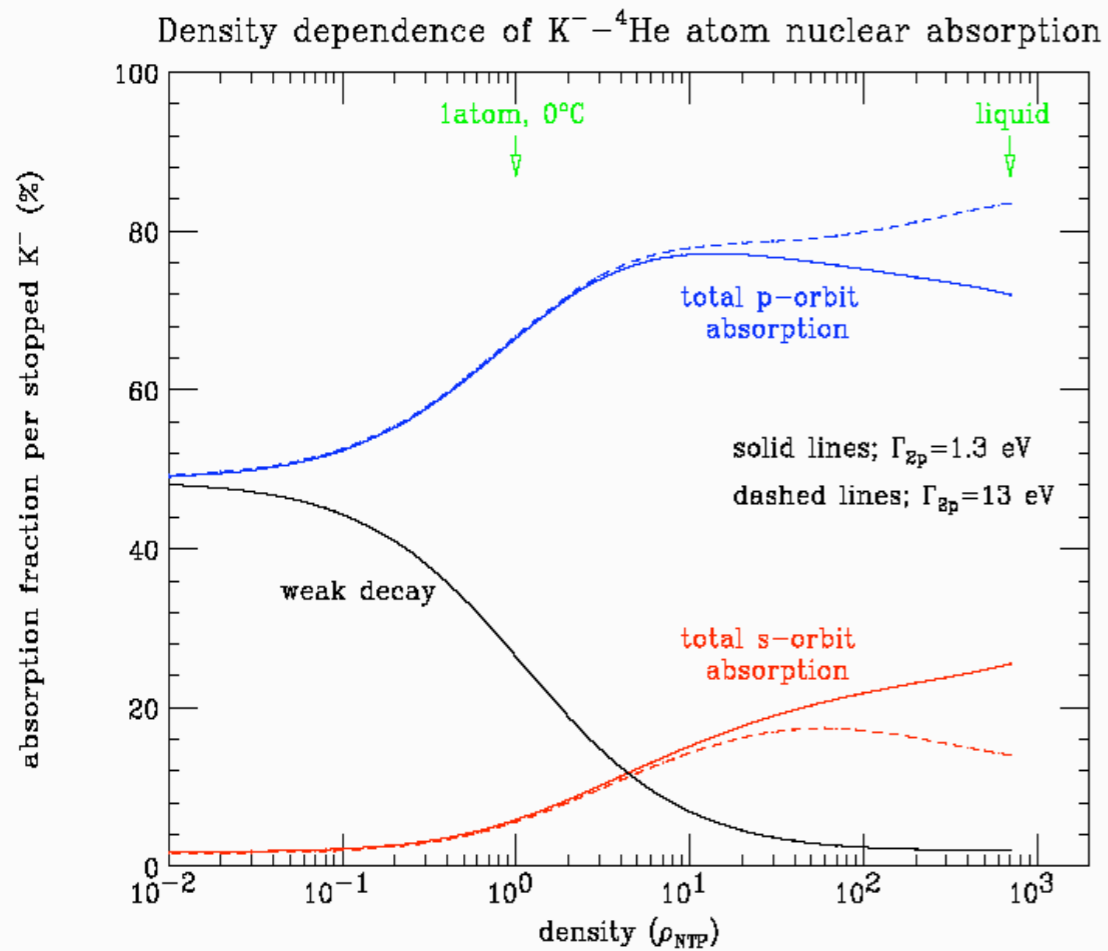


Weak Imaginary Potential Case

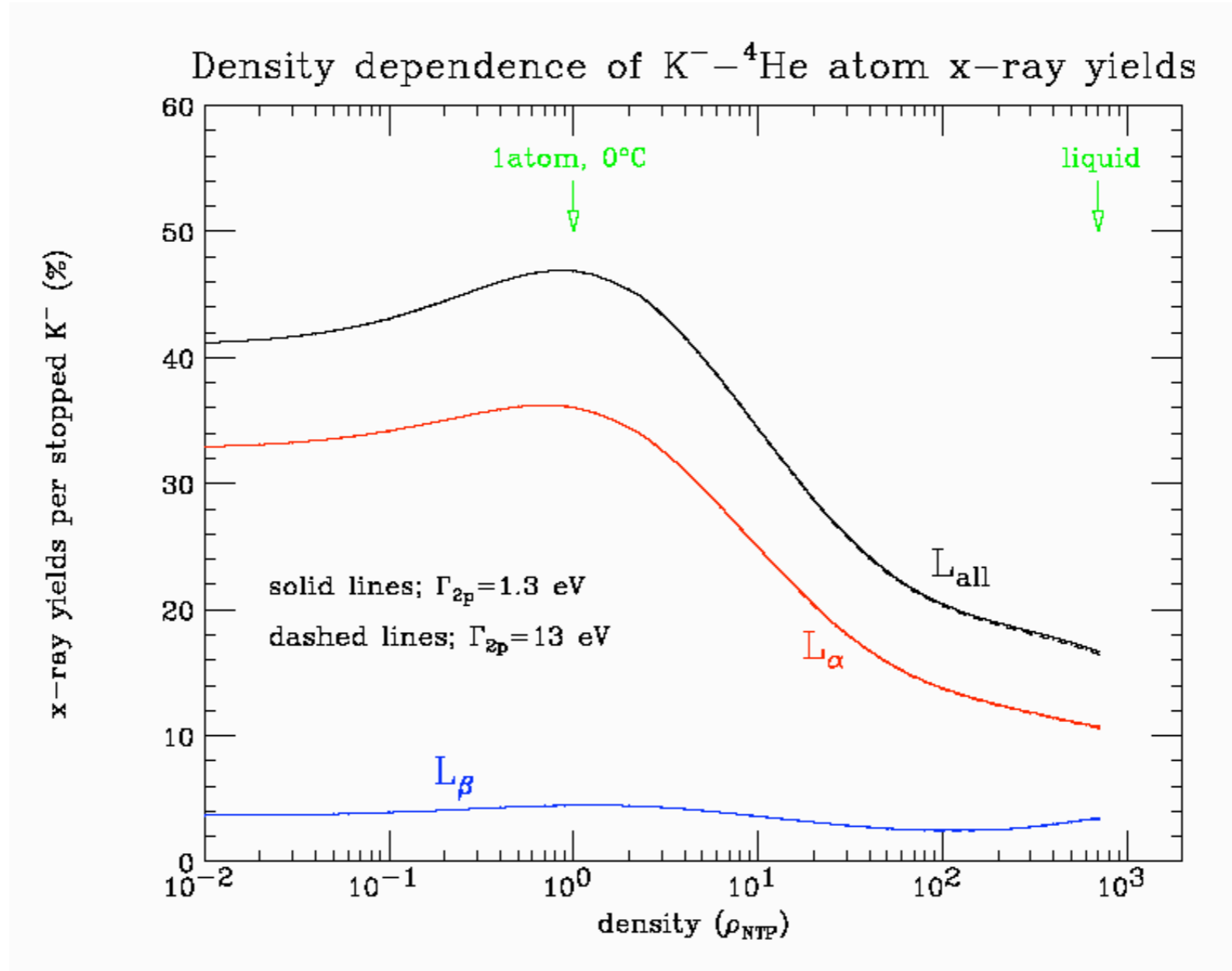


Y.Akaishi: EXA05





calculated by T.Koike



calculated by T.Koike

参加機関別責任分担

X線検出器 : 理化学研究所 - 東京大学 - ステファンマイヤー研究所 - LNF-INFN

円筒型検出器システム (CDS) : E15 実験 FIFC 資料 (実験組織の章) を参照

ヘリウム3 標的 : 理化学研究所 - 高エネルギー加速器研究機構

(静止 K のための) 入射ビーム検出器群 : 理化学研究所

データ収集系 : 理化学研究所

現状

- E15と共通セットアップに関して：
特定領域研究計画「マルチストレンジネス多体系の分光」
⇒ 「K中間子が拓く超高密度クォーク物質の研究」
- E17に特化した予算について：申請中

(E15共有部分を除いた) 実験装置概算見積

品目	概算金額 (千円)
X線検出システム	9,700
標的システム	3,000
ビームライン飛跡検出器システム	4,700
DAQシステム	6,000
データサーバー	3,600
計	27,000

チャンネル数

		システム	チャンネル	実験
CDC システム	TDC	TKO	1842 ch	E15 / E17
CDH システム	ADC	TKO	100 ch	
	TDC	TKO	100 ch	
ビームライン チェンバー	TDC	COPPER	128 ch	E17
ビームライン カウンター	ADC	TKO	10 ch	
	TDC	TKO	10 ch	
SDD	PH-ADC	COPPER (/TKO)	16 ch	
	FADC	COPPER (/VME)	16 ch	
	TDC	COPPER (/TKO)	8 ch	
Total			2230 ch	