

中間子束縛系分光実験

理化学研究所 仁科センター 板橋健太

核内ハドロン分光実験

π , K , $\eta(N^*)$ 分光実験

理化学研究所 仁科センター 板橋健太

ハドロン質量の起源

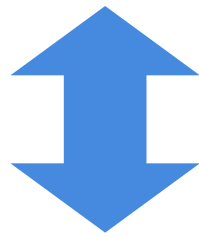
I. ヒッグス機構

II. カイラル対称性の破れ

ハドロン質量の起源

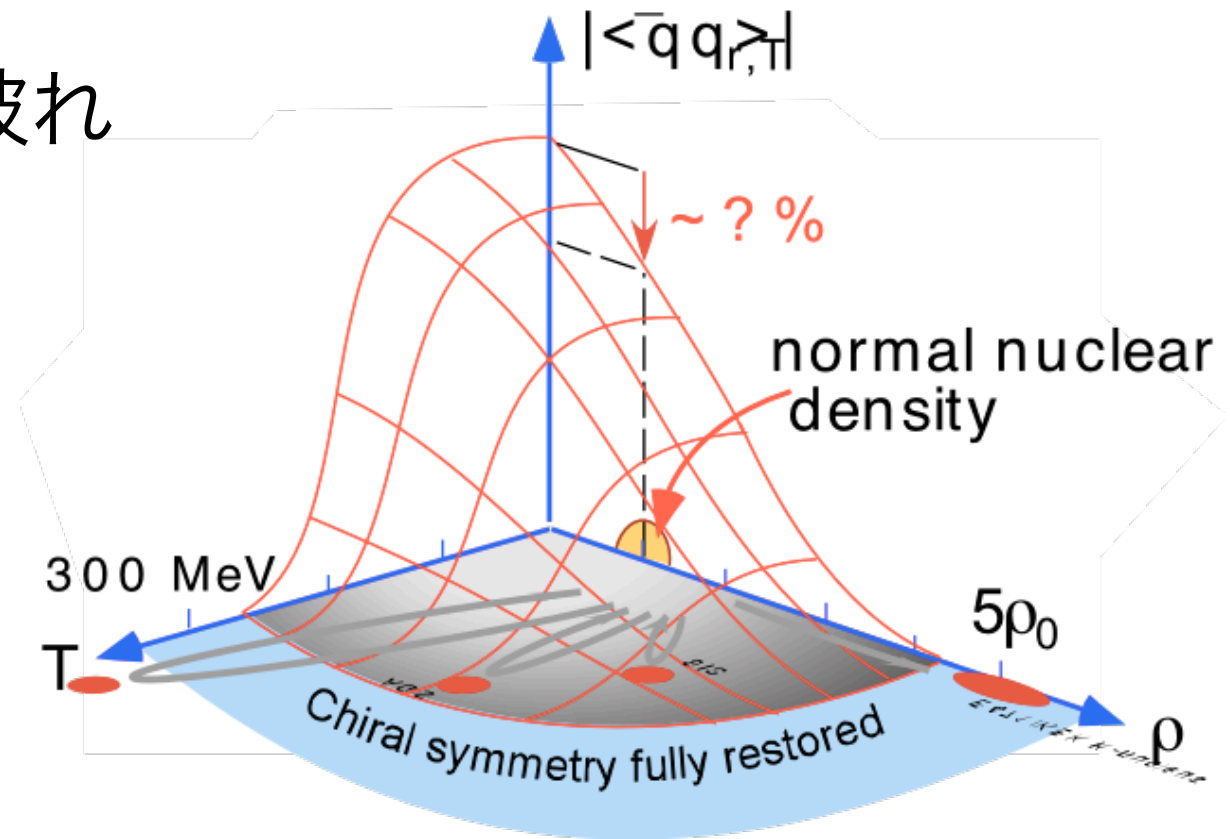
I. ヒッグス機構

II. カイラル対称性の破れ



真空の構造

Order parameter of Chiral symmetry $\langle \bar{q}q \rangle$



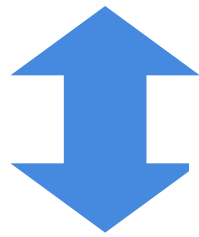
Weise, NPA553(93)59c

Nambu, Jona-Lasino,
PR122 (61) 345, 124 (61) 246

ハドロン質量の起源

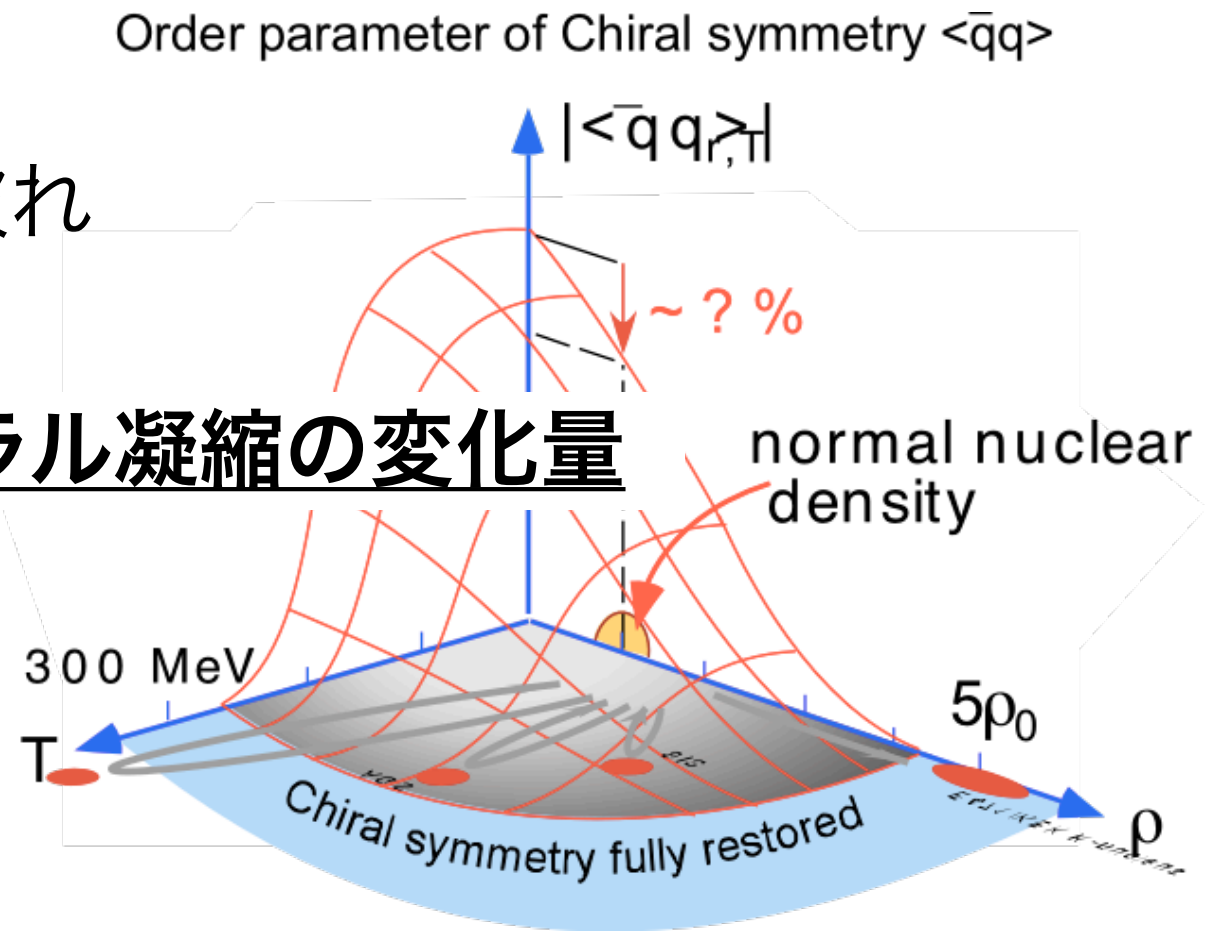
I. ヒッグス機構

II. カイラル対称性の破れ



真空の構造

カイラル凝縮の変化量



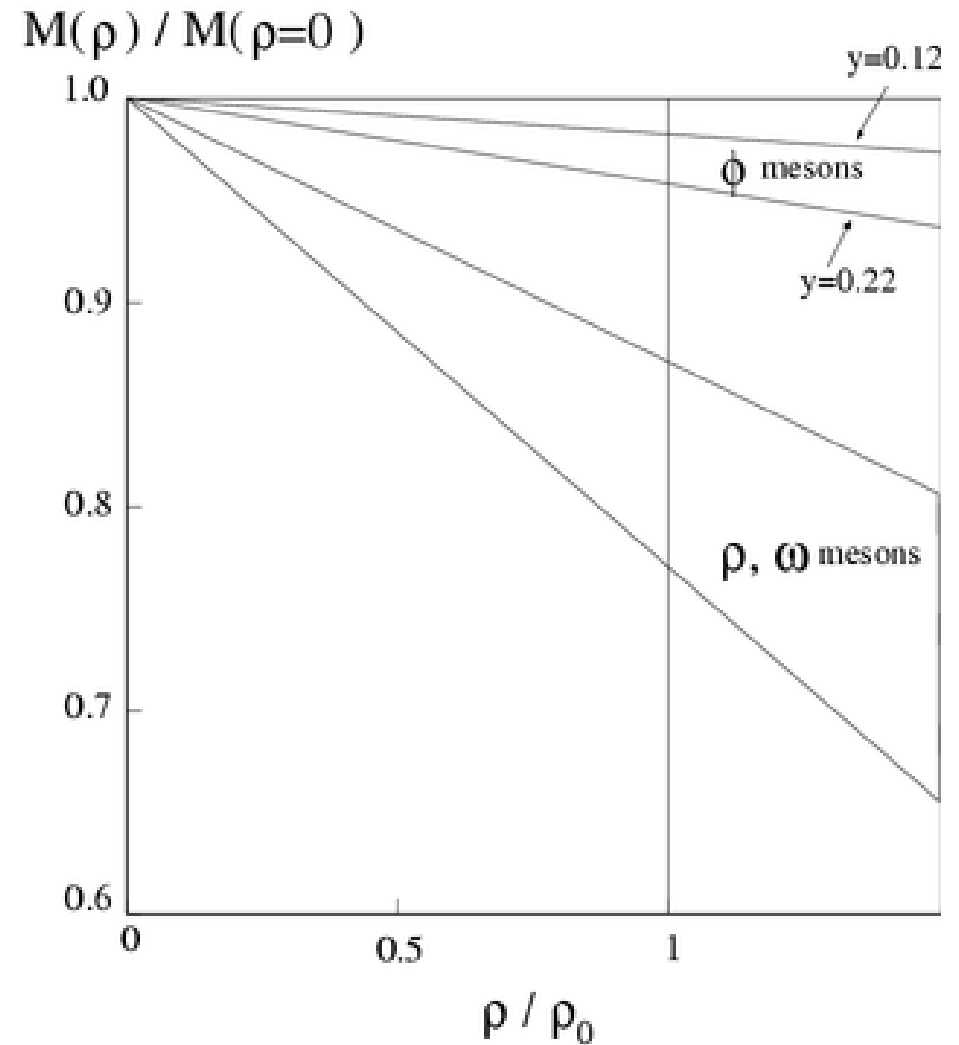
Weise, NPA553(93)59c

Nambu, Jona-Lasino,
PR122 (61) 345, 124 (61) 246

質量 \Leftrightarrow カイラル凝縮

ハドロン質量

@高エネルギー密度

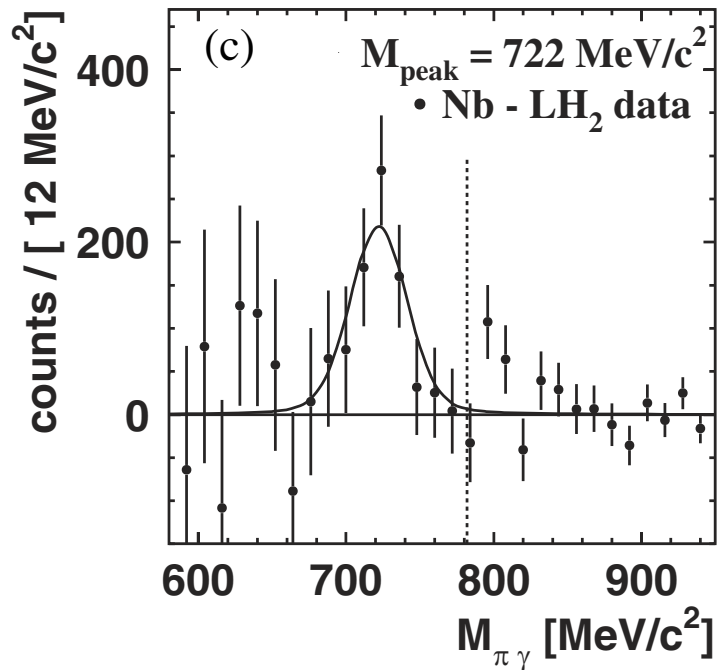


Hatsuda and Lee,
PRC46(92)R34, PRC52(95)3364

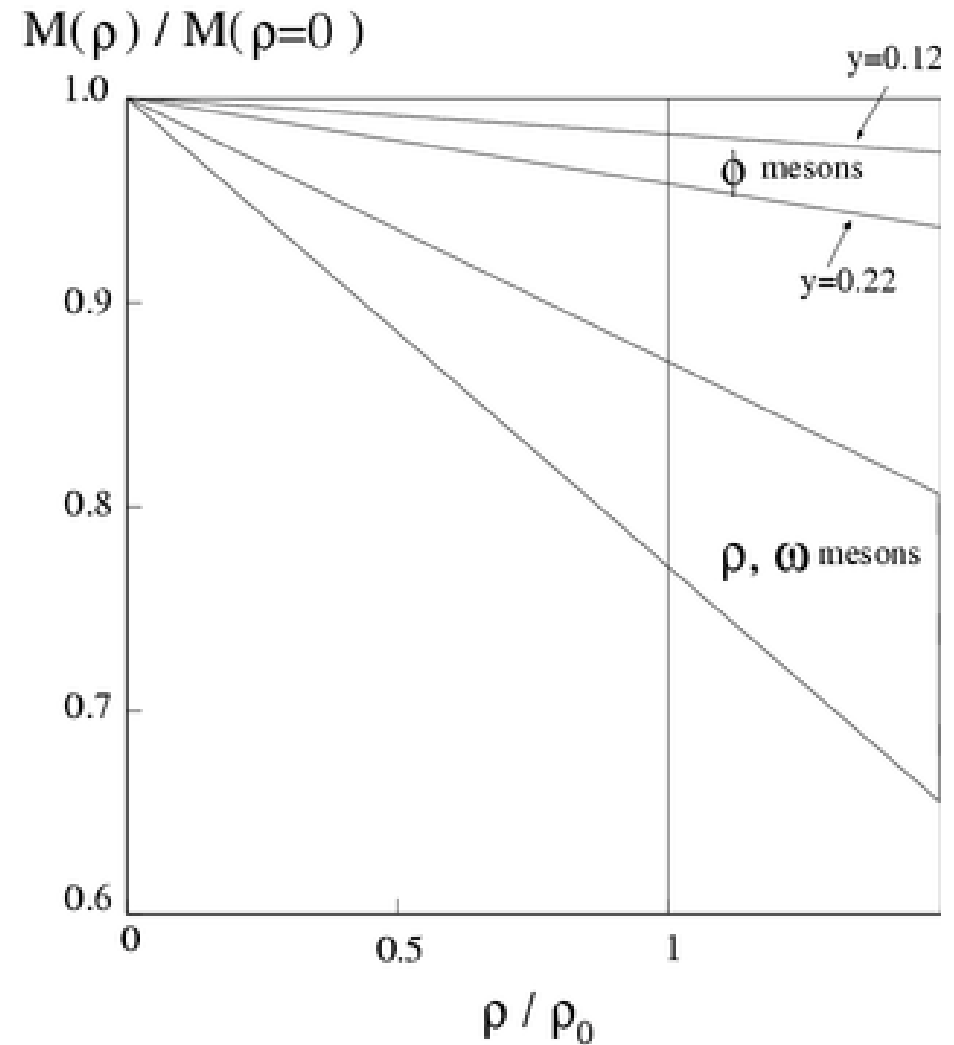
質量 \Leftrightarrow カイラル凝縮

ハドロン質量

@高エネルギー密度
TAPS



Trnka, PRL 94(05)192303

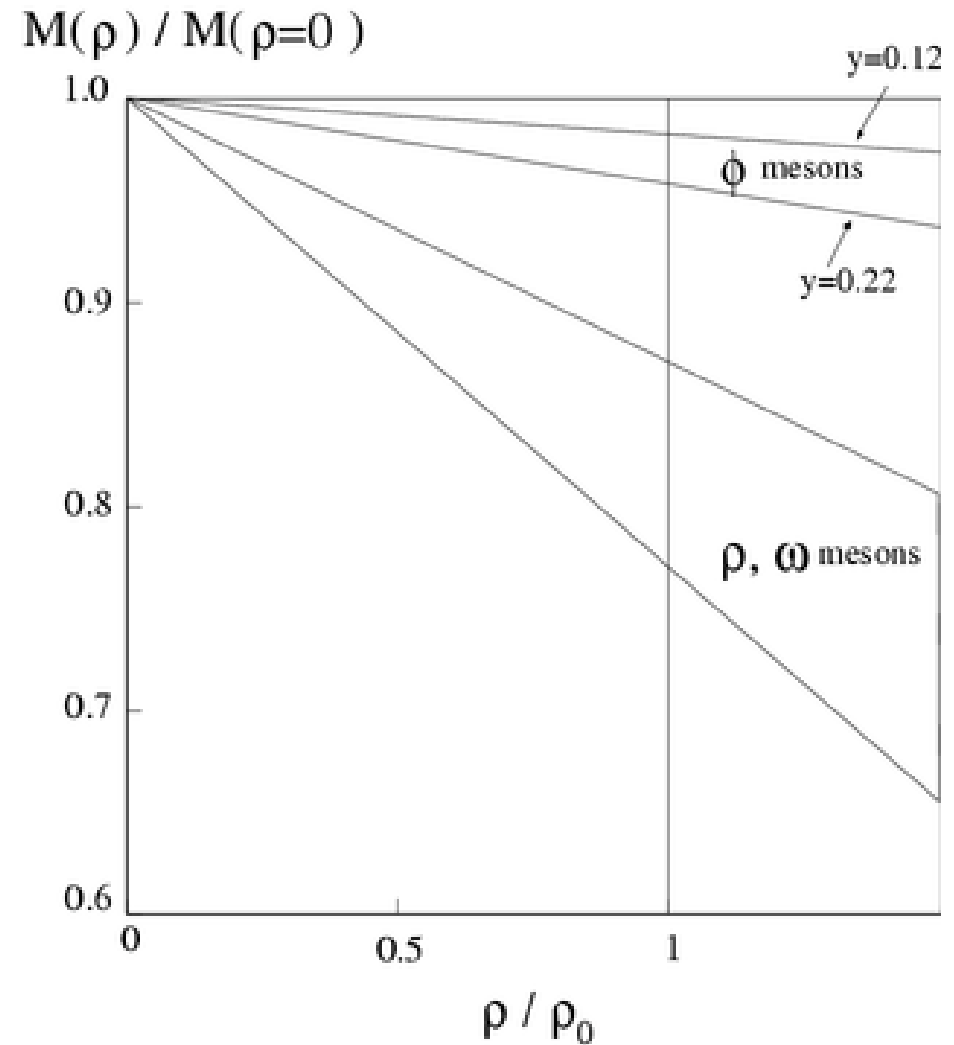
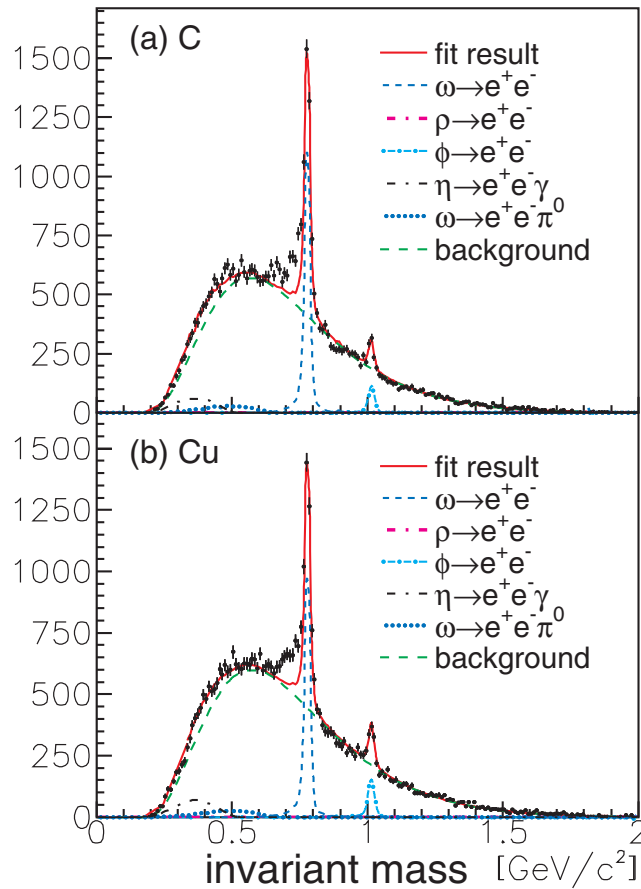


Hatsuda and Lee,
PRC46(92)R34, PRC52(95)3364

質量 \Leftrightarrow カイラル凝縮

ハドロン質量

@高エネルギー密度
[events / (10 MeV/c)]



Naruki, PRL 96 (06) 092301

Hatsuda and Lee,
PRC46(92)R34, PRC52(95)3364



π 中間子原子精密分光実験

核子と中間子の多体問題
の統一的描像に向けて

素過程: $n(d, {}^3\text{He})\pi^-$

$q \sim 0$

Missing Mass
Spectroscopy

標的: 錫の同位元素

116, 120, 124



NiSHiNA
CENTER

RIKEN Nishina Center, Kenta Itahashi

K. Suzuki et al.
PRL 92 (2004) 072302

π 中間子原子精密分光実験

核子と中間子の多体問題
の統一的描像に向けて

素過程: $n(d, {}^3\text{He})\pi^-$

$q \sim 0$

Missing Mass
Spectroscopy

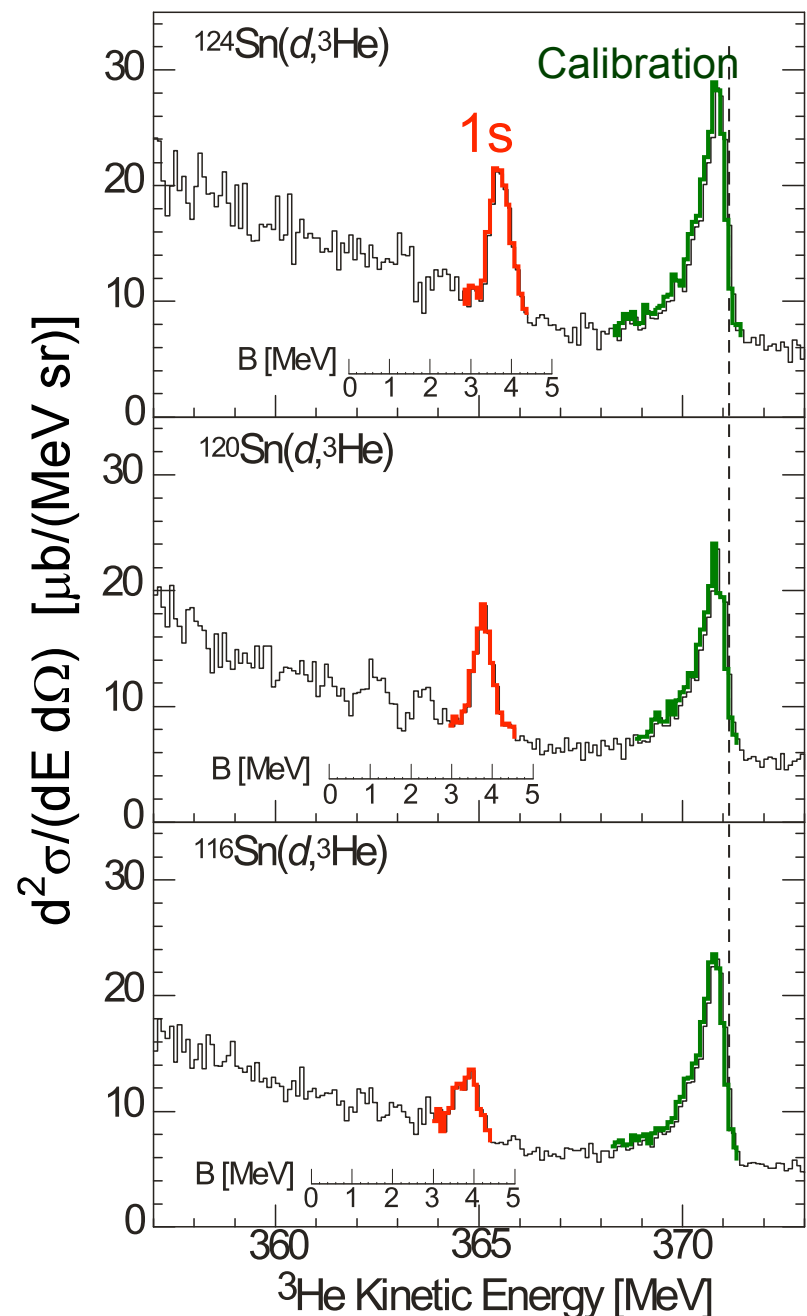
標的: 錫の同位元素

116, 120, 124



NiSHiNA
CENTER

RIKEN Nishina Center, Kenta Itahashi



K. Suzuki et al.
PRL 92 (2004) 072302

π 中間子原子精密分光実験

核子と中間子の多体問題
の統一的描像に向けて

Isotope	B_{1s}	Stat.	ΔB_{1s} (MeV)
	(MeV)		Syst.
^{115}Sn	3.906	± 0.021	± 0.012
^{119}Sn	3.820	± 0.013	± 0.012
^{123}Sn	3.744	± 0.013	± 0.012

素過程: $n(d, {}^3\text{He})\pi^-$

$q \sim 0$

Missing Mass
Spectroscopy

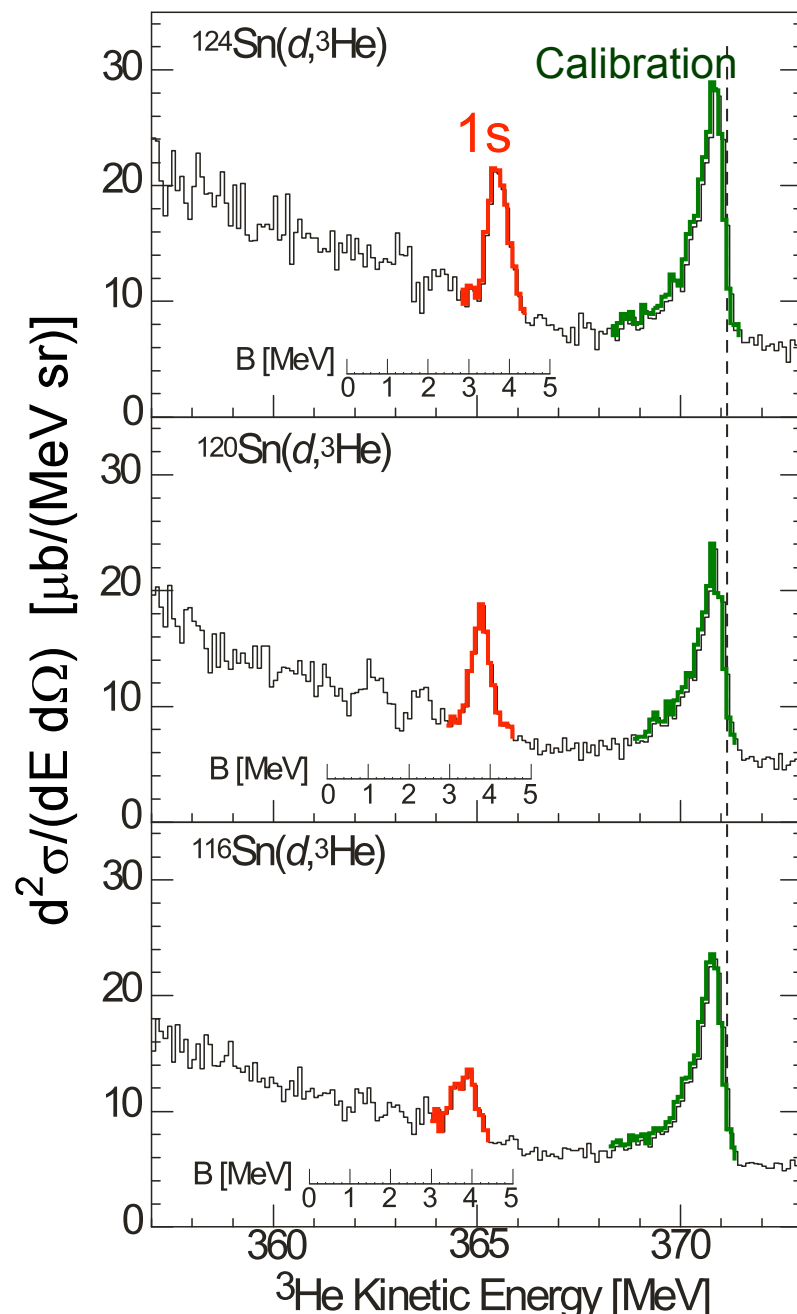
標的: 錫の同位元素

116, 120, 124



NISHINA
CENTER

RIKEN Nishina Center, Kenta Itahashi



K. Suzuki et al.
PRL 92 (2004) 072302

カイラル凝縮の変化を導き出すまで

Isotope	B_{1s} (MeV)	Stat.	ΔB_{1s} (MeV) Syst.
^{115}Sn	3.906	± 0.021	± 0.012
^{119}Sn	3.820	± 0.013	± 0.012
^{123}Sn	3.744	± 0.013	± 0.012

Strong interaction optical potential

$$U_{\text{opt}} = V_{\text{s-wave}} + V_{\text{p-wave}}$$



scattering experiment

$$V_{\text{s-wave}} = b_0 \rho(r) + b_1 \Delta \rho(r) + B_0 \rho^2(r)$$

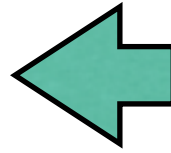
$$\rho(r) = \rho_n(r) + \rho_p(r) = \text{nuclear density}$$

$$\Delta \rho(r) = \rho_n(r) - \rho_p(r)$$

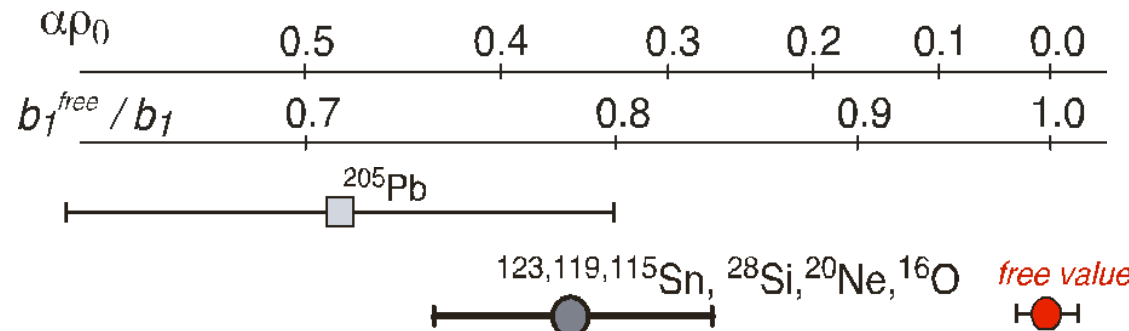
b_0 isoscalar part parameter

b_1 isovector part parameter

Iso-vector 部分の
相互作用の決定



Likelihood contour
in potential parameters



Strong interaction optical potential

$$U_{\text{opt}} = V_{\text{s-wave}} + V_{\text{p-wave}}$$

scattering experiment

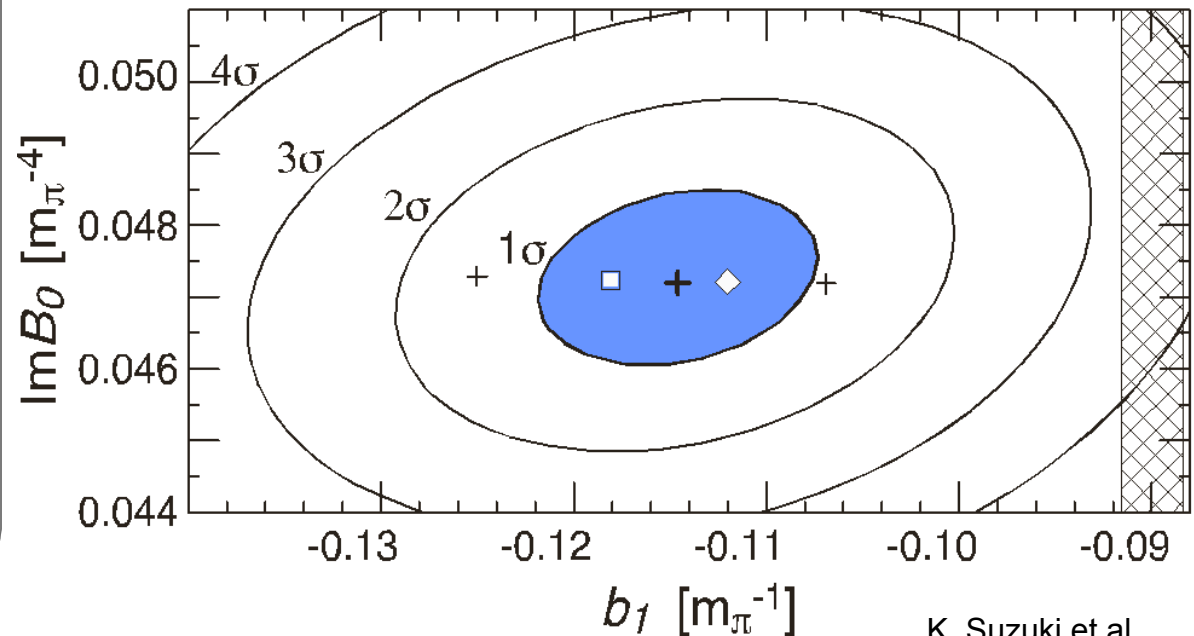
$$V_{\text{s-wave}} = b_0 \rho(r) + b_1 \Delta\rho(r) + B_0 \rho^2(r)$$

$\rho(r) = \rho_n(r) + \rho_p(r)$ = nuclear density

$$\Delta\rho(r) = \rho_n(r) - \rho_p(r)$$

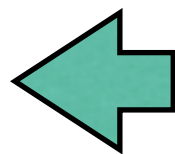
b_0 isoscalar part parameter

b_1 isovector part parameter

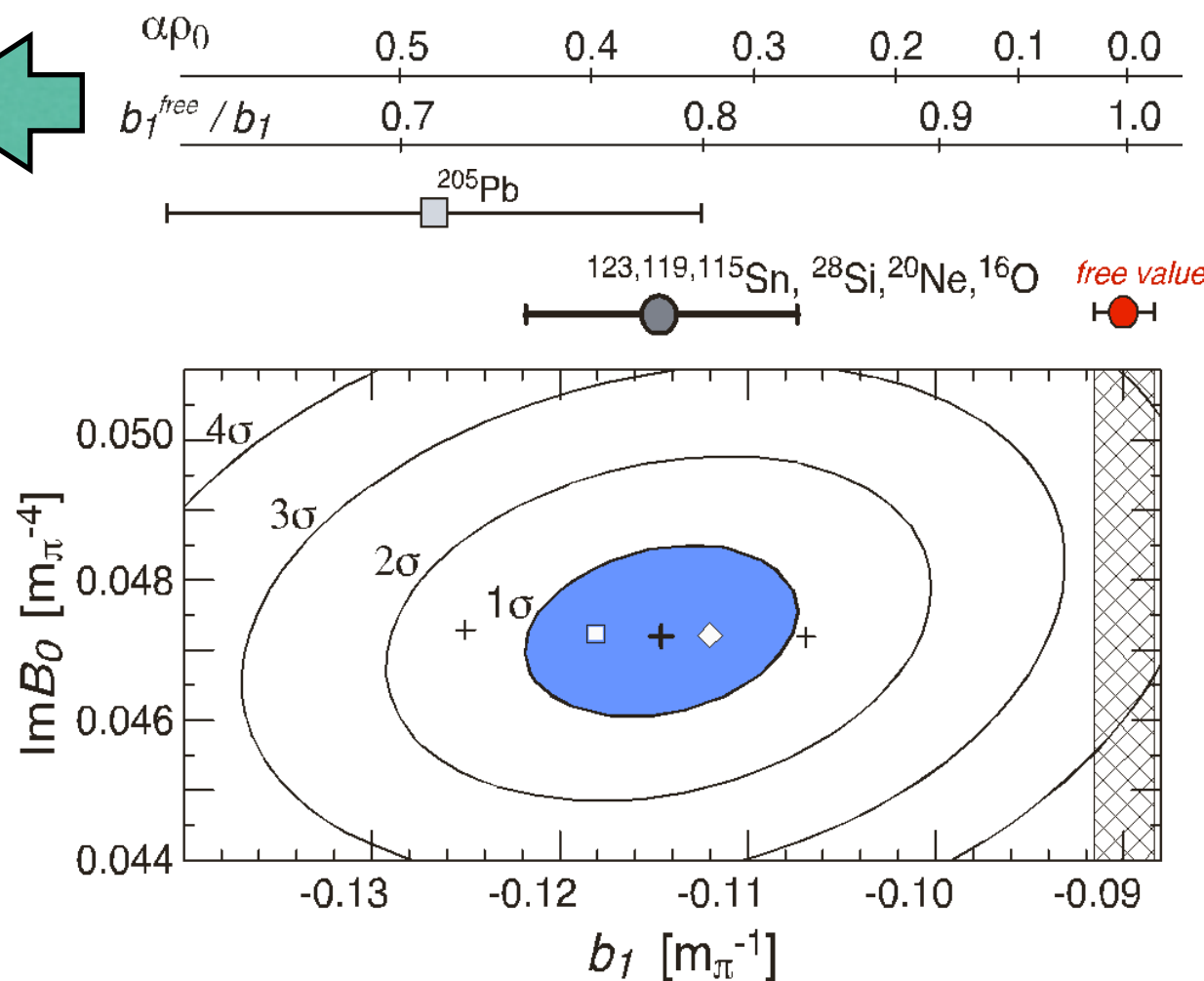


K. Suzuki et al.
PRL 92 (2004) 072302

Iso-vector 部分の
相互作用の決定



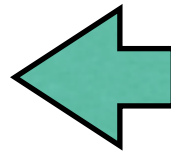
Likelihood contour
in potential parameters



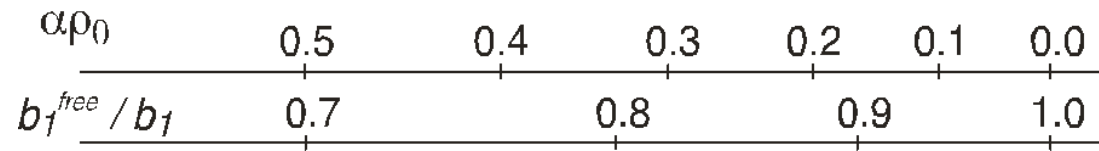
カイラル凝縮の変化を導き出すまで

核子と中間子の多体問題
の統一的描像に向けて

Iso-vector 部分の
相互作用の決定



Likelihood contour
in potential parameters



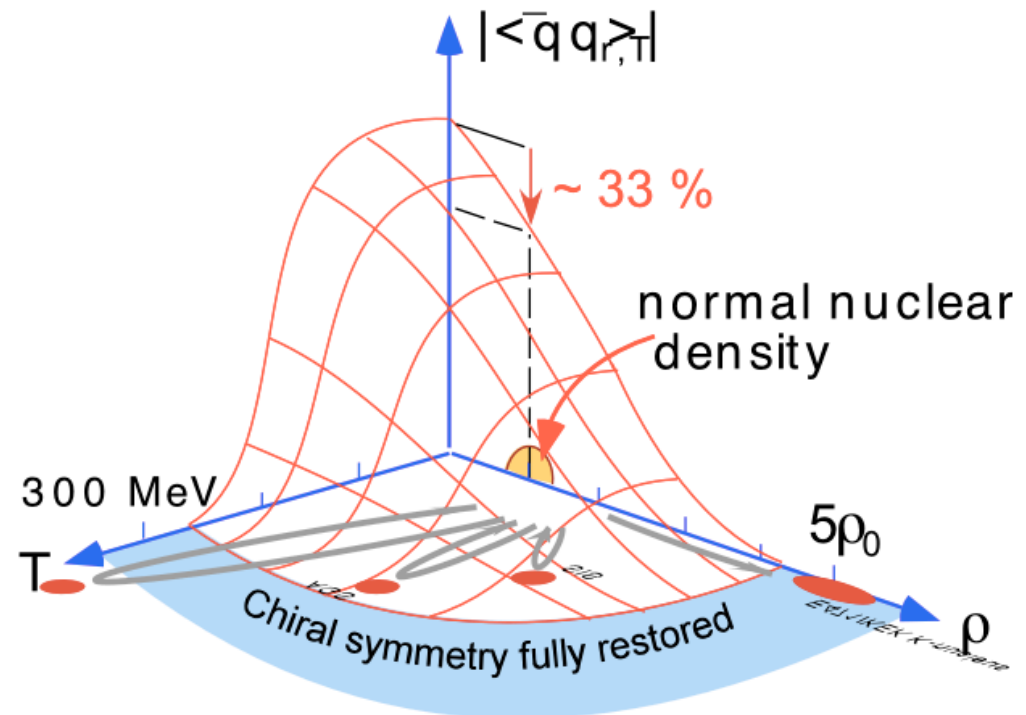
Theoretical Investigations:

$$\frac{\langle \bar{q}q \rangle_\rho}{\langle \bar{q}q \rangle_0} \approx 1 - \frac{\sigma_N}{m_\pi^2 f_\pi^2} \rho,$$

$$\frac{b_1^{free}}{b_1^*(\rho)} \approx \frac{f_\pi^*(\rho)^2}{f_\pi^2} \approx 1 - \alpha\rho.$$

In-medium GOR relation

Order parameter of Chiral symmetry $\langle \bar{q}q \rangle$



Keys to High Precision Spectroscopy = Beam Optics

Basis of Optics =

Analyze ^3He momentum in TA-F5 section.

TA-F5:

$\Delta\Omega = 80 \times 100 \mu\text{Sr}$

$D = 5,000 \text{ mm}$

Beam:

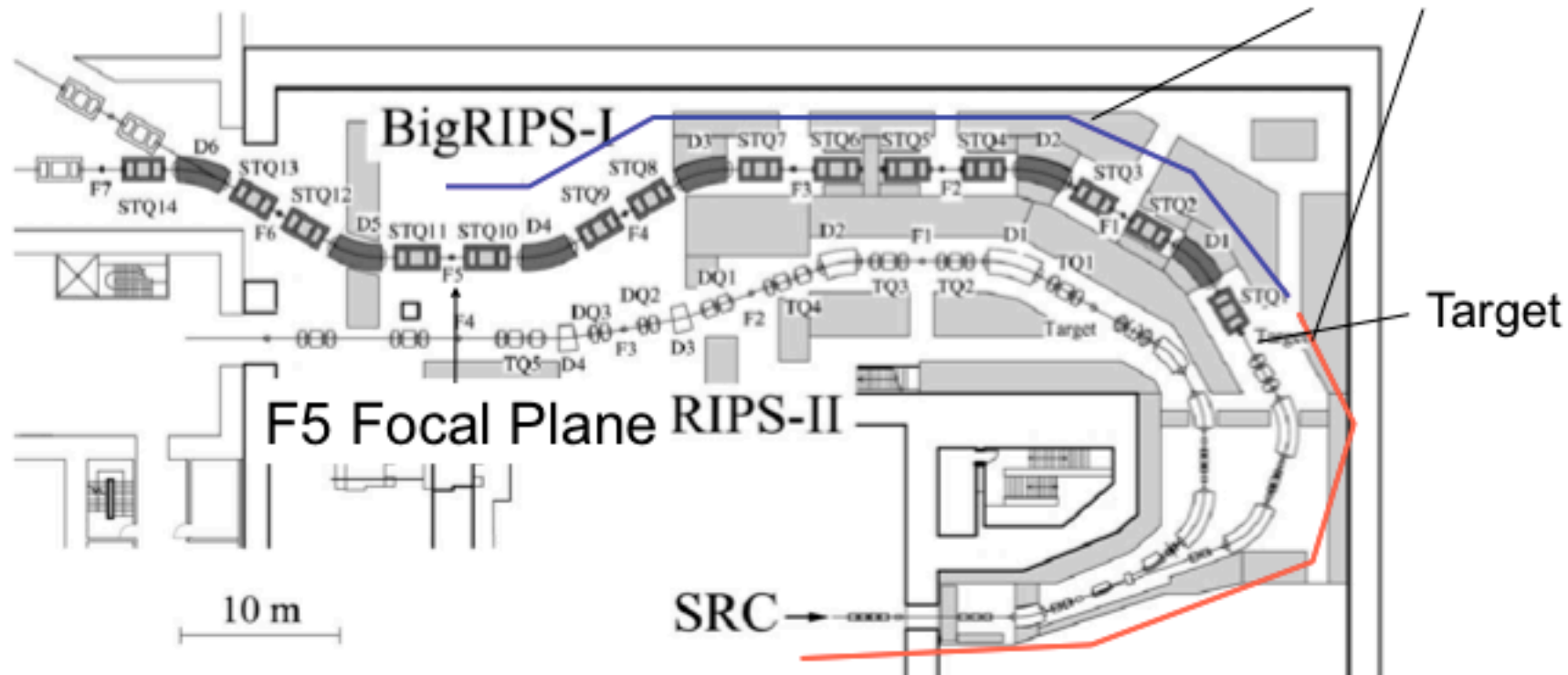
250 MeV/u deuteron beam

$\Delta p/p = 1 \times 10^{-3} ?$



Resolution 400 keV => 150 keV

Dispersion matching between
SRC-TA & TA-F5



Keys to High Precision Spectroscopy = Beam Optics

Basis of Optics =

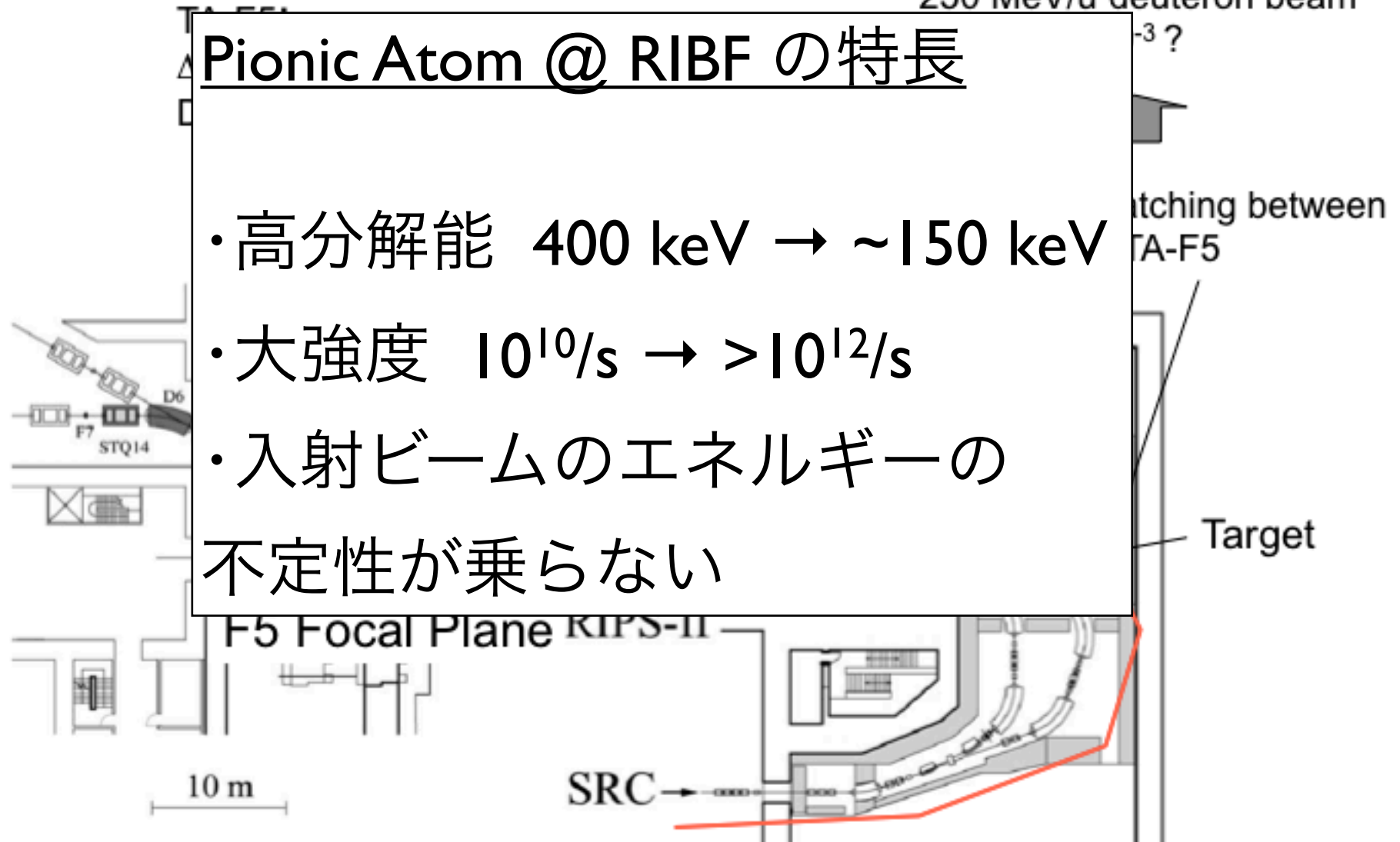
Analyze ^3He momentum in TA-F5 section.

Beam:

250 MeV/u deuteron beam

Pionic Atom @ RIBF の特長

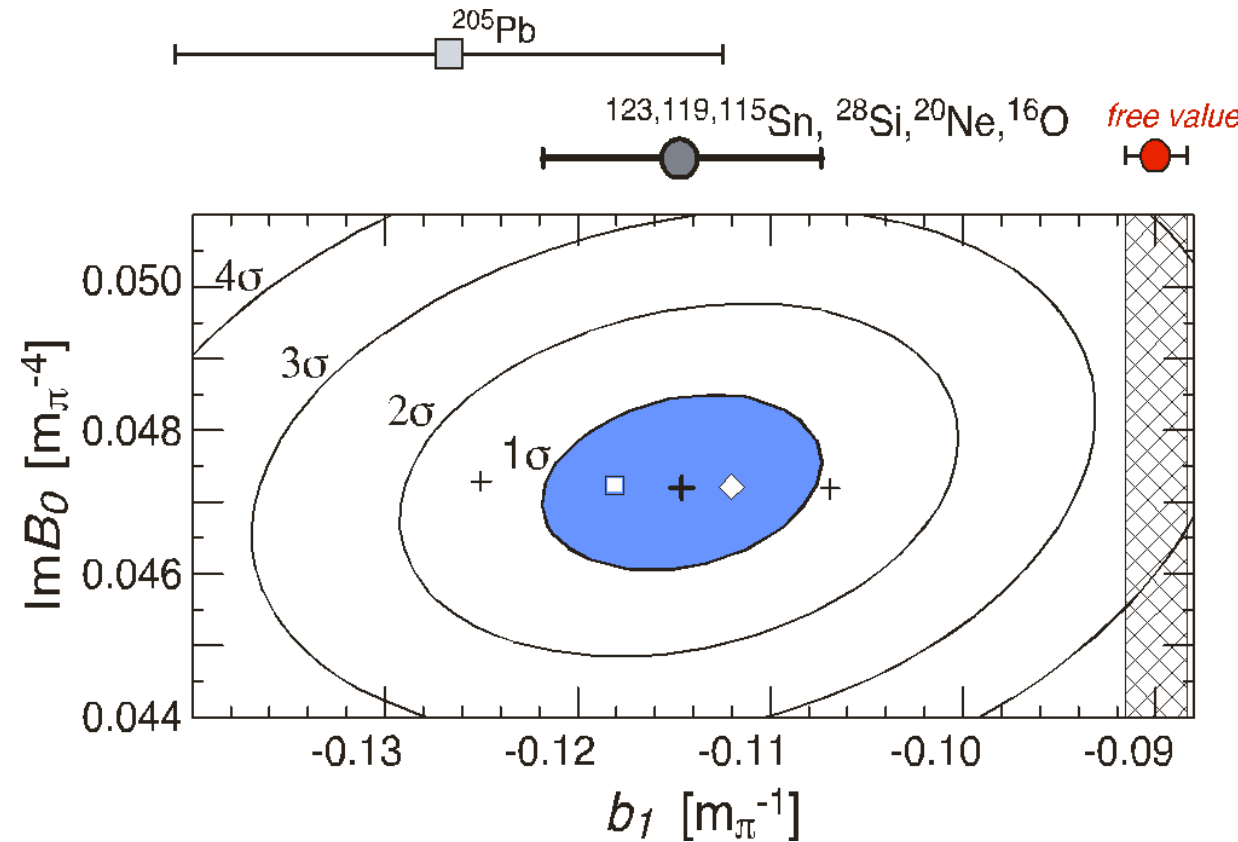
- 高分解能 400 keV \rightarrow \sim 150 keV
- 大強度 $10^{10}/\text{s} \rightarrow >10^{12}/\text{s}$
- 入射ビームのエネルギーの
不定性が乗らない



Pionic Atom @ RIBF で

最初に測るべきもの

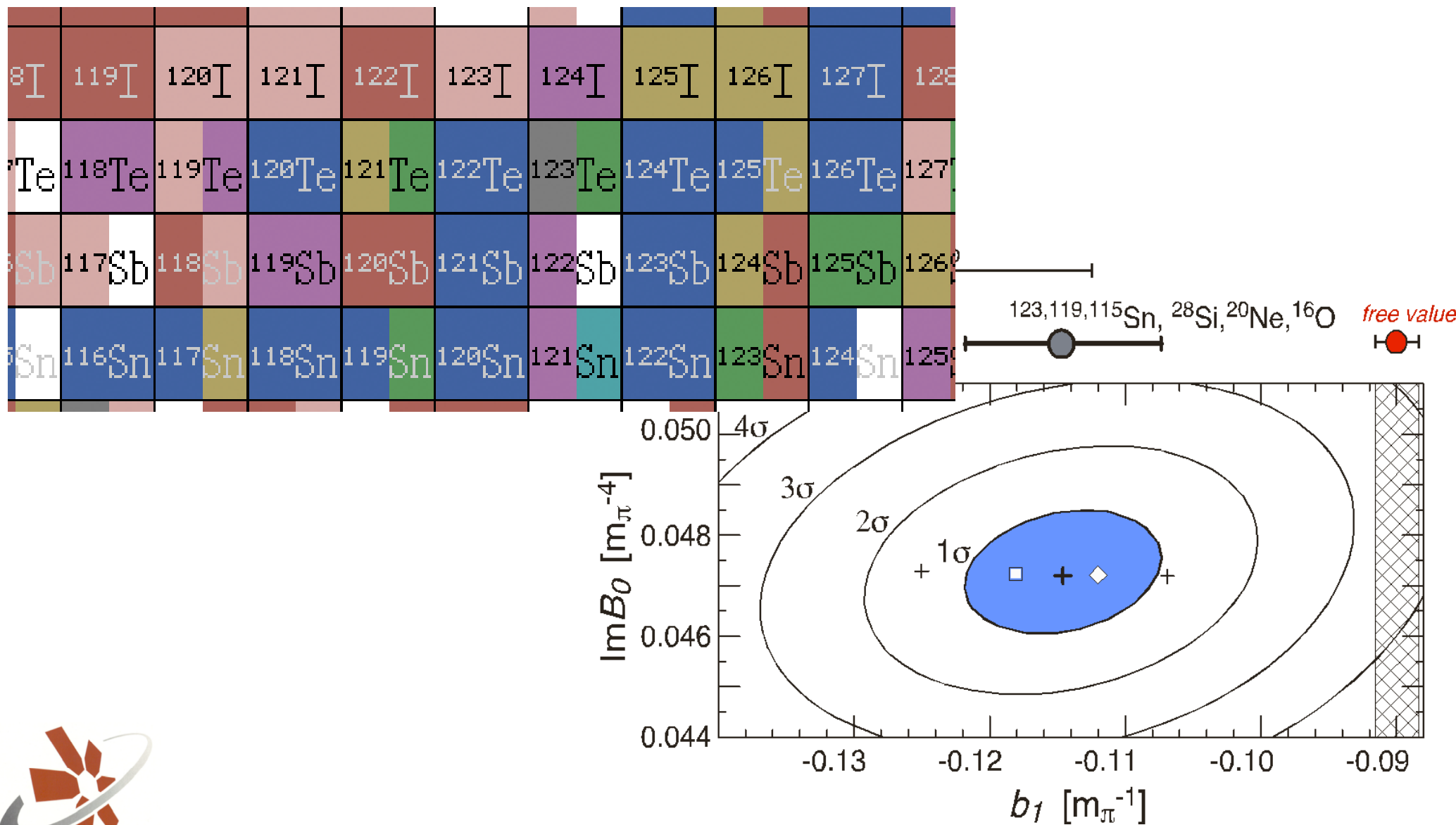
核子と中間子の多体問題
の統一的描像に向けて



Pionic Atom @ RIBF で

核子と中間子の多体問題
の統一的描像に向けて

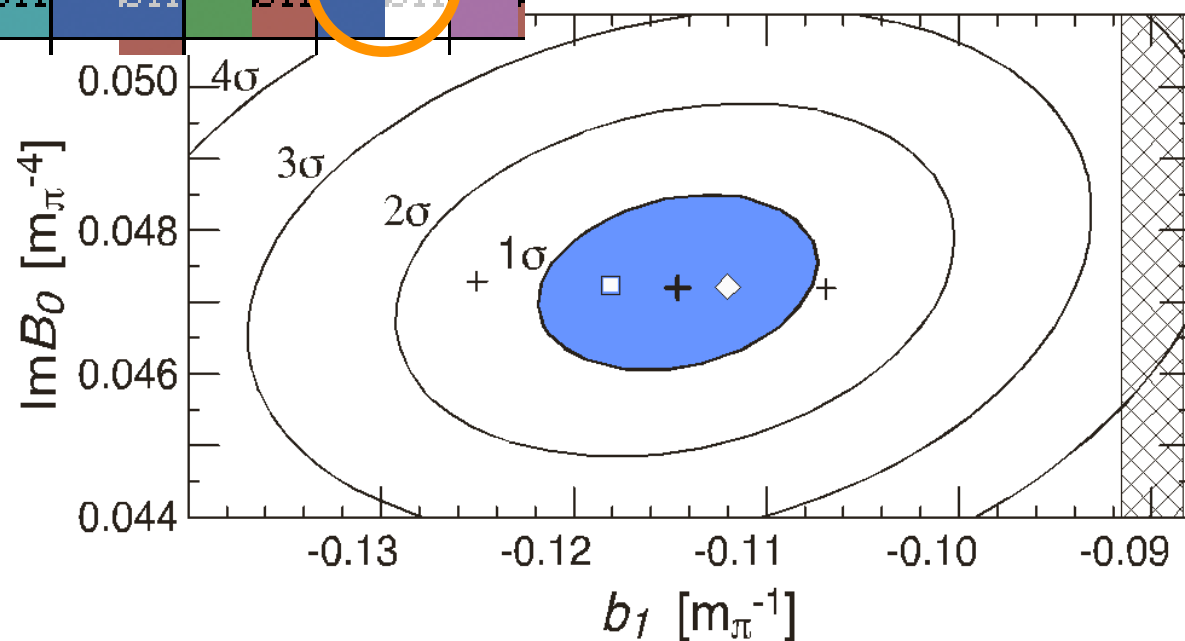
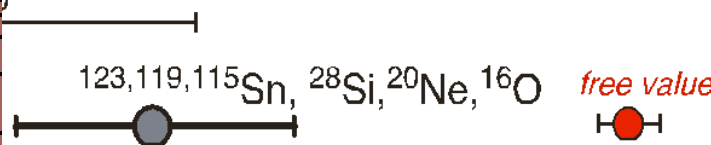
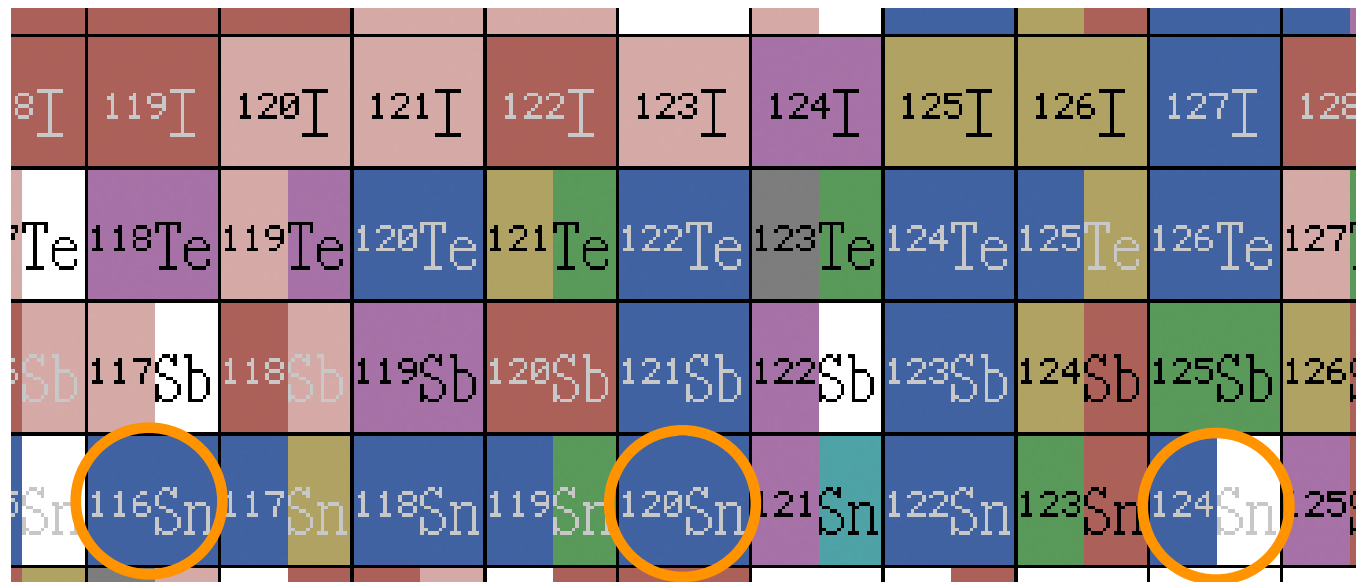
最初に測るべきもの



Pionic Atom @ RIBF で

核子と中間子の多体問題
の統一的描像に向けて

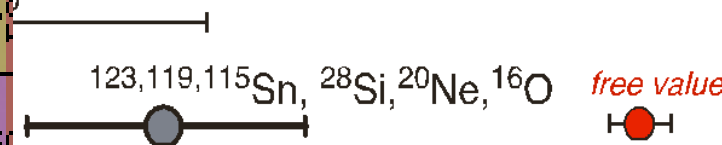
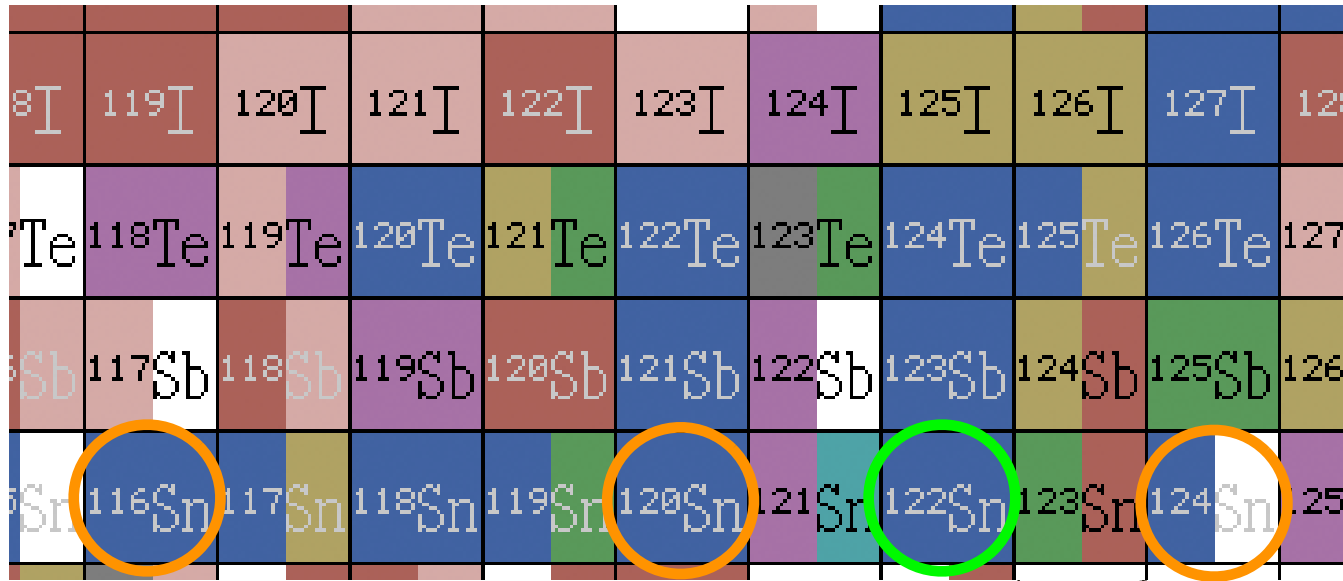
最初に測るべきもの



Pionic Atom @ RIBF で

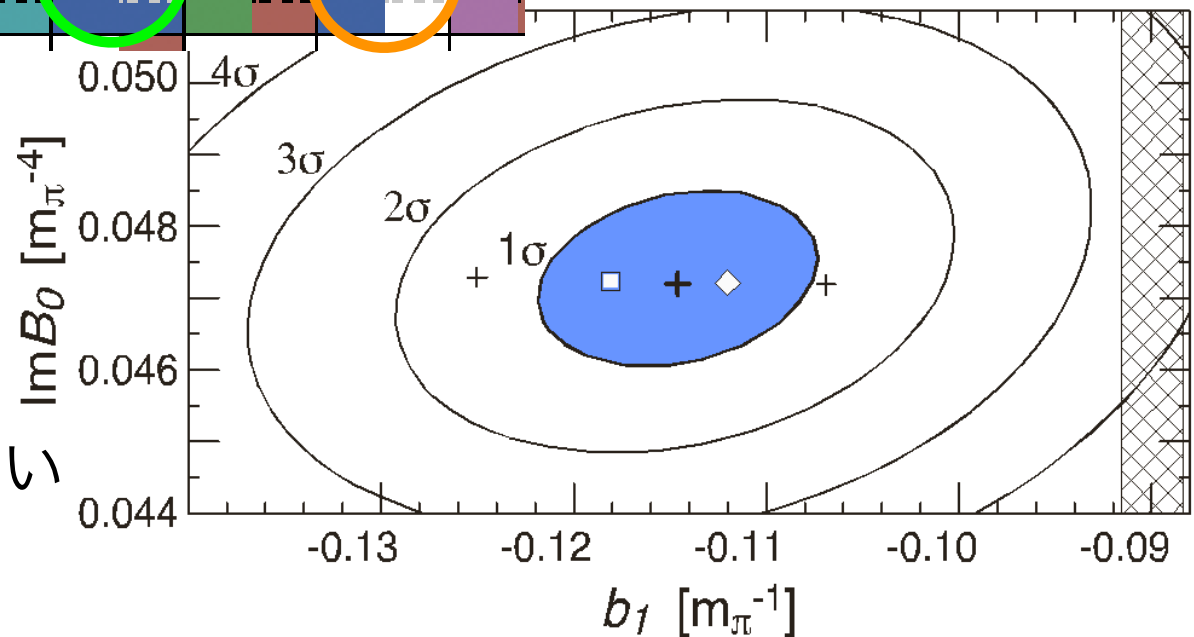
核子と中間子の多体問題
の統一的描像に向けて

最初に測るべきもの



^{122}Sn が適当

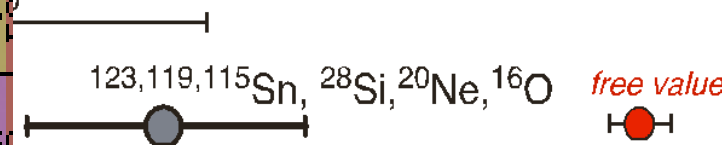
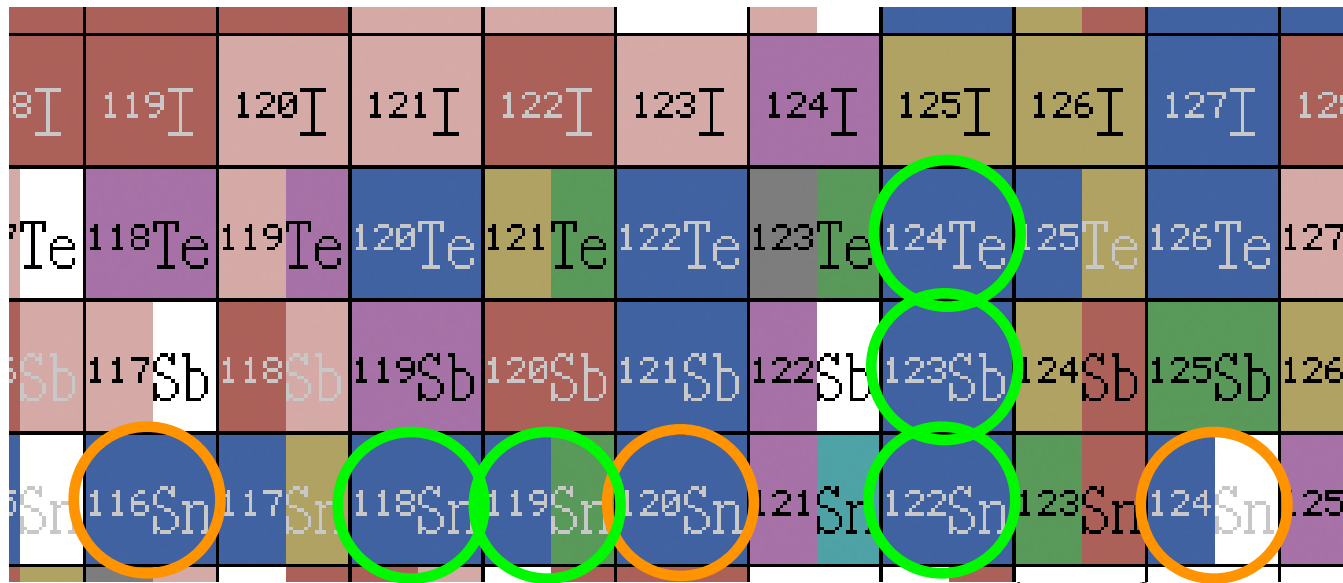
- 断面積が大きい
- 中性子の配位が良い
- 以前、計測されていない



Pionic Atom @ RIBF で

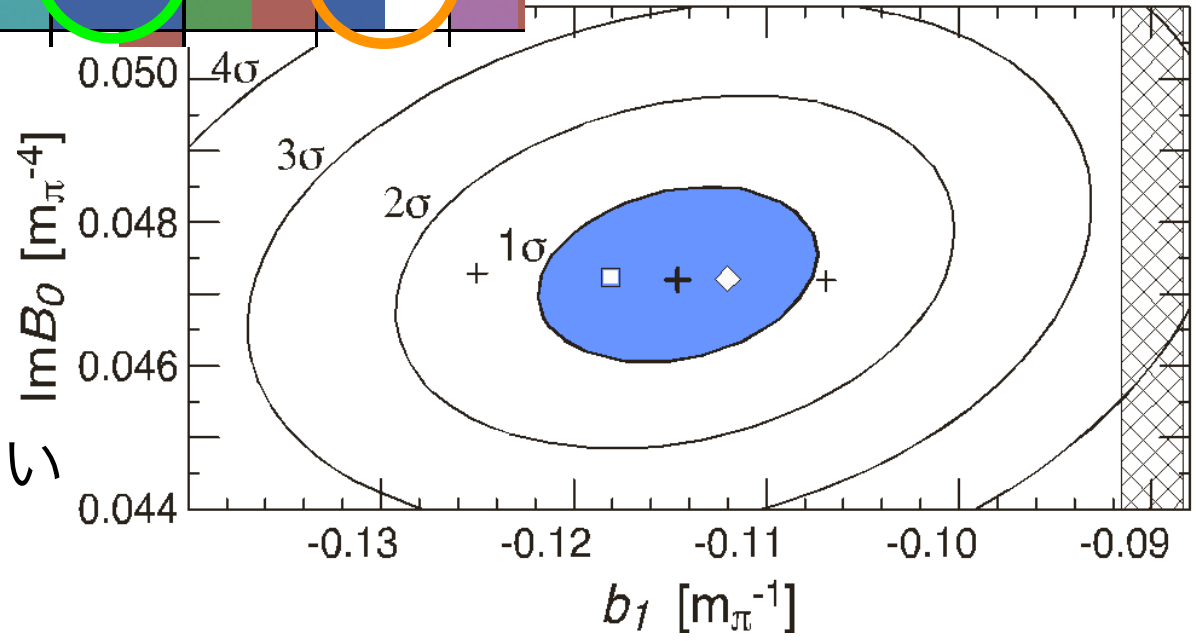
核子と中間子の多体問題
の統一的描像に向けて

最初に測るべきもの



^{122}Sn が適当

- 断面積が大きい
- 中性子の配位が良い
- 以前、計測されていない



Pionic Atom は、興味深い結果をもたらしたが、
他のハドロンについては、どのような将来計画が
あるのか？

他にどのような将来計画があるのか？

γ -induced -- TAPS(η, ω) LEPS(φ)...

(e, e'p) -- JLab

J-PARC では...

他にどのような将来計画があるのか？

J-PARCハドロンビームライン整備に向けての野海研究会

BL	p(GeV/c)	part.	Int.	Apparata	Physics
K1.8	1.5~2 1.2	K- pi K+	10M 10M	SKS+、 KURAMA SKS0/-,n-spec	S=-2 Nuclear spectroscopy ω -Nuclear spectroscopy Θ^+ -Nucleus
K1.8BR	1	K- pi	1M	KURAMA Neutron-Spec. CDC	K-Nucleus Spectroscopy η -Nucleus Spectroscopy
K1.1	1.1	K-	10M	Hyperball-J π^0 -spec/SKS-II	S=-1 γ -ray Nuclear Spectroscopy YN scattering
K1.1BR	0.8	K+ K-	1M	TROIDAL、 E949Spec	T-violation Θ^+ spectroscopy, ^3He - Σ spectroscopy
HIHR	1~2	pi+ pbar	1G 1M	HR-SPEC K0-SPEC ϕ -Spec/n-spec	S=-1 Spectroscopy Θ^+ -spectroscopy ϕ, η, ω -Nuclear Spectroscopy
HP	30~50 2~50 5~10	p pi+ K,pbar	10G	ϕ -SPEC HP-SPEC	ϕ chiral restoration Q-G distribution/Q-G spin distribution Charmed hypernuclear spectroscopy
KL	2~	K0		K0-Spec	K0- \rightarrow pi0nunu
Muon	0.04	mu-		COMET	mu-e変換
Nu	0.5	$\nu, \bar{\nu}$		Liq. Sci. Track'r	Δs in Nucleon

他にどのような将来計画があるのか？

J-PARCハドロンビームライン整備に向けての野海研究会

BL	p(GeV/c)	part.	Int.	Apparata	Physics
K1.8	1.5~2 1.2	K- pi K+	10M 10M	SKS+、 KURAMA SKS0/-,n-spec	S=-2 Nuclear spectroscopy <u>ω-Nuclear spectroscopy</u> Θ^+ -Nucleus
K1.8BR	1	K- pi	1M	KURAMA Neutron-Spec. CDC	<u>K-Nucleus Spectroscopy</u> <u>η-Nucleus Spectroscopy</u>
K1.1	1.1	K-	10M	Hyperball-J π^0 -spec/SKS-II	S=-1 γ -ray Nuclear Spectroscopy YN scattering
K1.1BR	0.8	K+ K-	1M	TROIDAL、 E949Spec	T-violation Θ^+ spectroscopy, ^3He - Σ spectroscopy
HIHR	1~2	pi+ pbar	1G 1M	HR-SPEC K0-SPEC ϕ -Spec/n-spec	S=-1 Spectroscopy Θ^+ -spectroscopy <u>ϕ, η, ω-Nuclear Spectroscopy</u>
HP	30~50 2~50 5~10	p pi+ K, pbar	10G	ϕ -SPEC HP-SPEC	<u>ϕ chiral restoration</u> Q-G distribution/Q-G spin distribution Charmed hypernuclear spectroscopy
KL	2~	K0		K0-Spec	K0- \rightarrow pi0nunu
Muon	0.04	mu-		COMET	mu-e変換
Nu	0.5	$\nu, \bar{\nu}$		Liq. Sci. Track'r	Δs in Nucleon

他にどのような将来計画があるのか？

J-PARCハドロンビームライン整備に向けての野海研究会

BL	p(GeV/c)	part.	Int.	Apparata	Physics
K1.8	1.5~2 1.2	K- pi K+	10M 10M	SKS+、 KURAMA SKS0/-,n-spec	S=-2 Nuclear spectroscopy <u>ω-Nuclear spectroscopy</u> Θ^+ -Nucleus
K1.8BR	1	K- pi	1M	KURAMA Neutron-Spec. CDC	<u>K-Nucleus Spectroscopy</u> <u>η-Nucleus Spectroscopy</u>
K1.1	1.1	K-	10M	Hyperball-J π^0 -spec/SKS-II	S=-1 γ -ray Nuclear Spectroscopy YN scattering
K1.1BR	0.8	K+ K-	1M	TROIDAL、 E949Spec	T-violation Θ^+ spectroscopy, ^3He - Σ spectroscopy
HIHR	1~2	pi+ pbar	1G 1M	HR-SPEC K0-SPEC ϕ -Spec/n-spec	S=-1 Spectroscopy Θ^+ -spectroscopy <u>ϕ, η, ω-Nuclear Spectroscopy</u>
HP	30~50 2~50 5~10	p pi+ K,pbar	10G	ϕ -SPEC HP-SPEC	<u>ϕ chiral restoration</u> Q-G distribution/Q-G spin distribution Charmed hypernuclear spectroscopy
KL	2~	K0		K0-Spec	K0- \rightarrow pi0nunu
Muon	0.04	mu-		COMET	mu-e変換
Nu	0.5	$\nu, \bar{\nu}$		Liq. Sci. Track'r	Δs in Nucleon

J-PARC E15

- ${}^3\text{He}(K^-,n)$ 反応を用いて
K⁻pp 束縛状態の分光を目指す
- TOF による Missing Mass 測定と、Decay Counter による
Invariant Mass の同時測定



J-PARC E15

○ ${}^3\text{He}(K^-,n)$ 反応

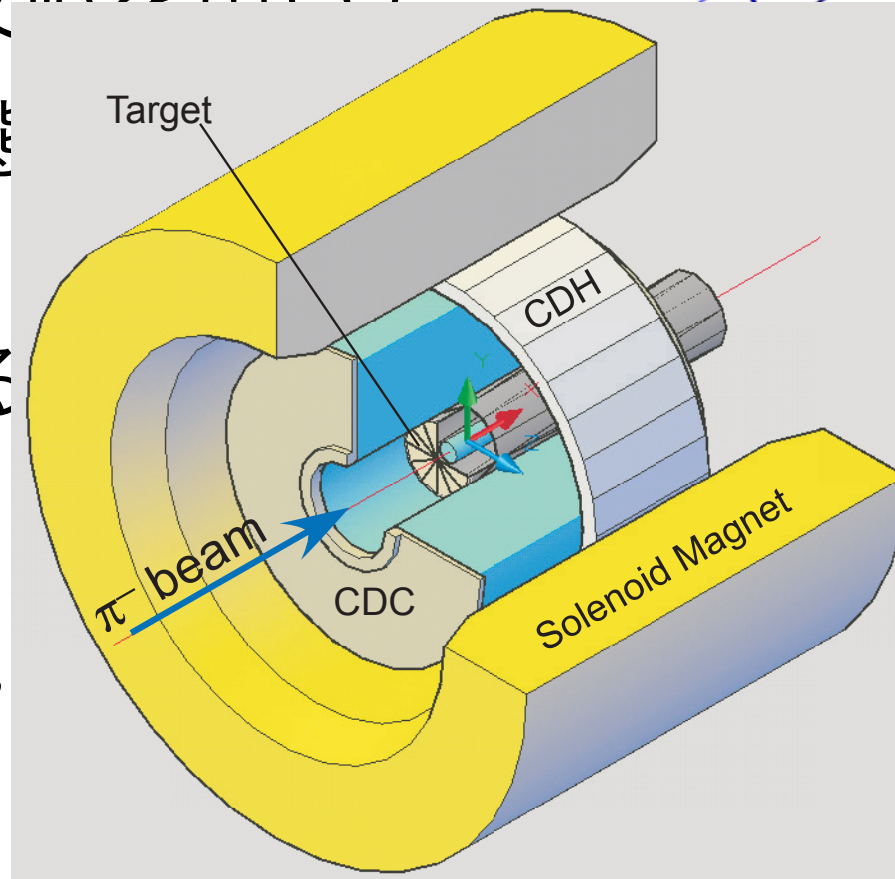
K^-pp 束縛状態

○ TOF による

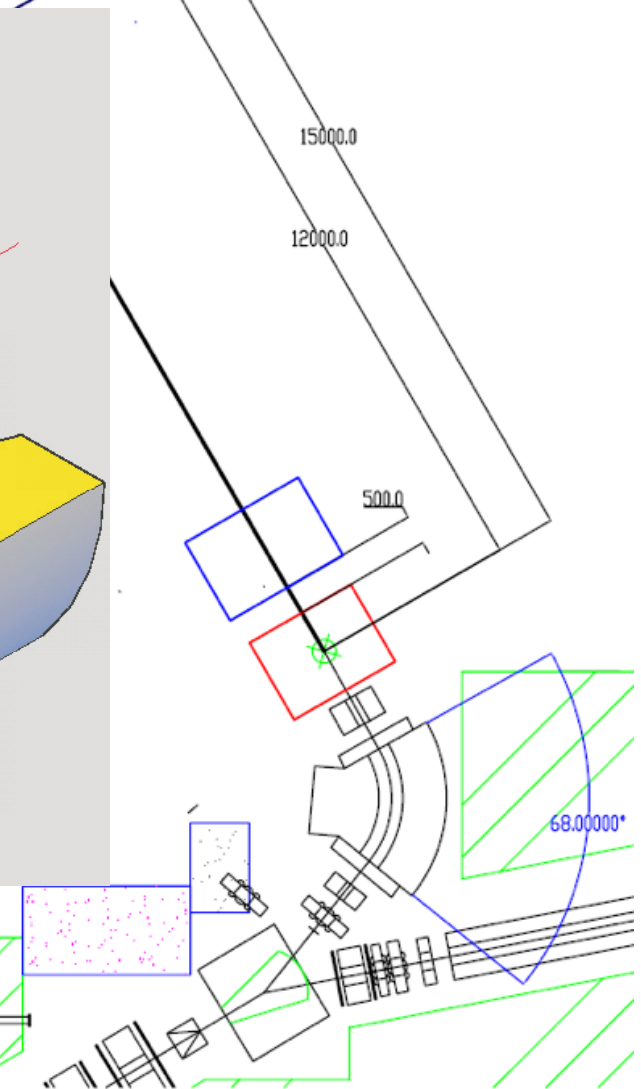
定と、Decay

Invariant Mass

標的周辺の検出器群



E15: DeepK 探索実験



J-PARC E15

- ${}^3\text{He}(K^-,n)$ 反応を用いて
K⁻pp 束縛状態の分光を目指す
- TOF による Missing Mass 測定と、Decay Counter による
Invariant Mass の同時測定



J-PARC E15

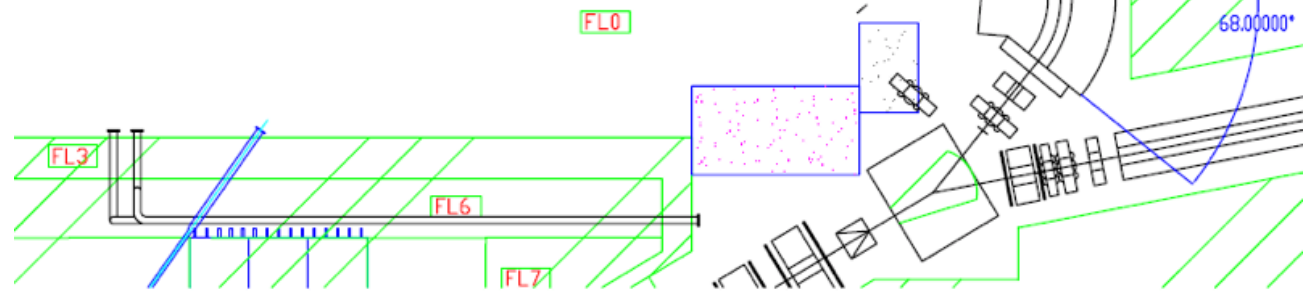
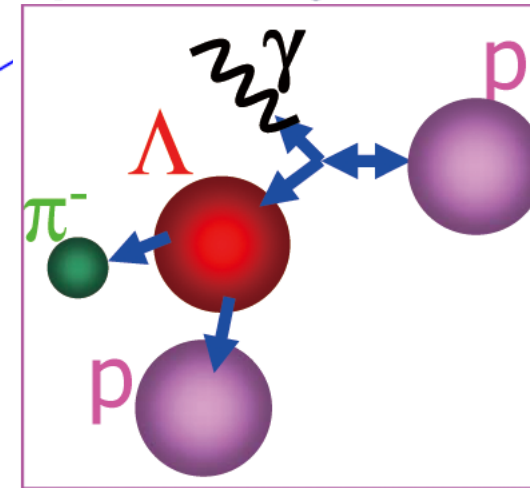
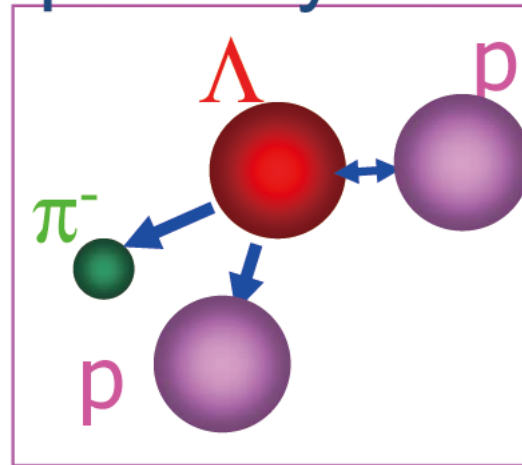
○ ${}^3\text{He}(\text{K}^-, n)$ 反 Λ p decay mode Σ^0 p decay mode

K⁻pp 束縛状態

○ TOF による

定と、Decay Counter による

Invariant Mass の同時測定



J-PARC E15

- ${}^3\text{He}(K^-,n)$ 反応を用いて
K⁻pp 束縛状態の分光を目指す
- TOF による Missing Mass 測定と、Decay Counter による
Invariant Mass の同時測定



J-PARC L-24

- 素過程 $p(\pi^-, n)\eta$ の反応を用いて核内 $N(1535)$ の分光を目指す
- 0 度、 q の小さい所での測定が可能
- TOF による Missing Mass 測定と、Decay Counter による Invariant Mass の同時測定



J-PARC L-24

○ 素過程 $p(\pi^-, n)\eta$ の反応を用いて核内 $N(1535)$ の分光を目指す

○ 0 度、が可能

$\eta \Leftrightarrow N^*$ -hole モードの
レベル交差？

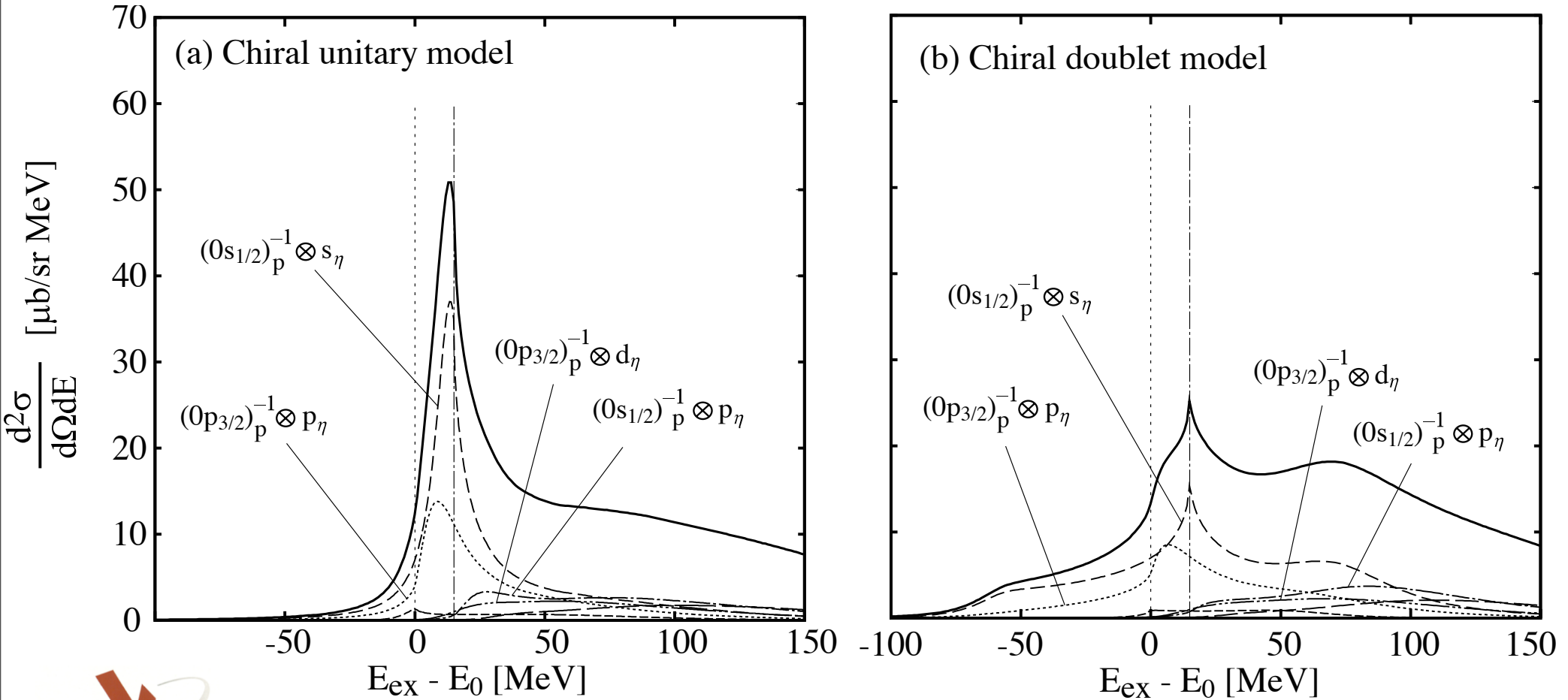
○ TOF (N^* は核子のカイラルパートナー？)
定と、Decay Counter による

Invariant Mass の同時測定



In-medium $N^*(1535)$ Spectroscopy

永廣、慈道、比連崎等

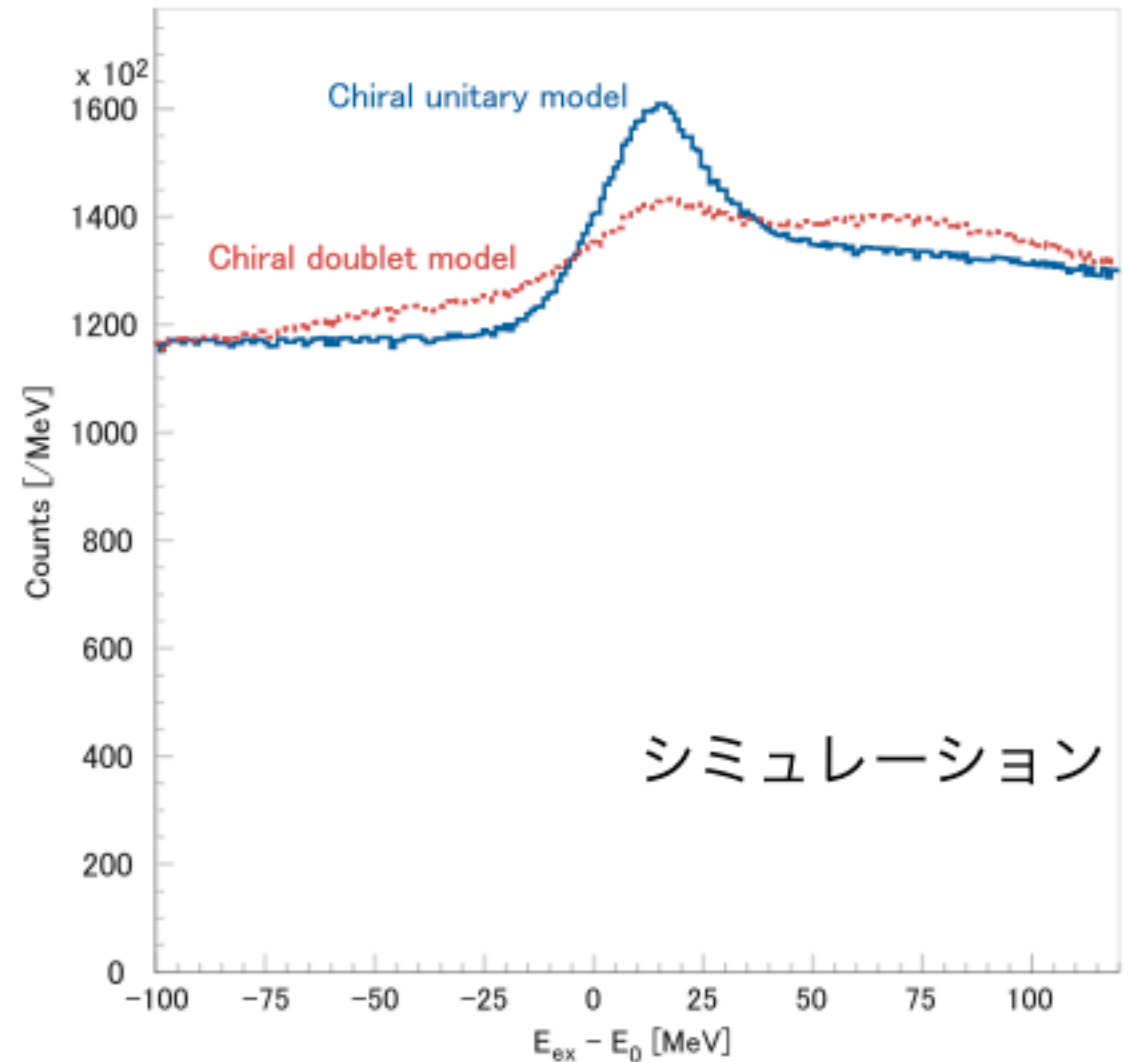


予想スペクトル

${}^7\text{Li}(\pi, n)$ @ 780 MeV/c

仮定

- 分解能 $20\text{MeV}/c^2$ (FWHM)
- Chrien とCM系で同じ
バックグラウンドレベル
- BK は主に $2\pi, 3\pi$ 生成



予想スペクトル

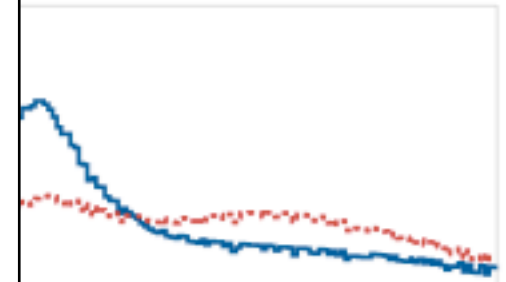
${}^7\text{Li}(\pi, n) @ 780 \text{ MeV}/c$

仮定

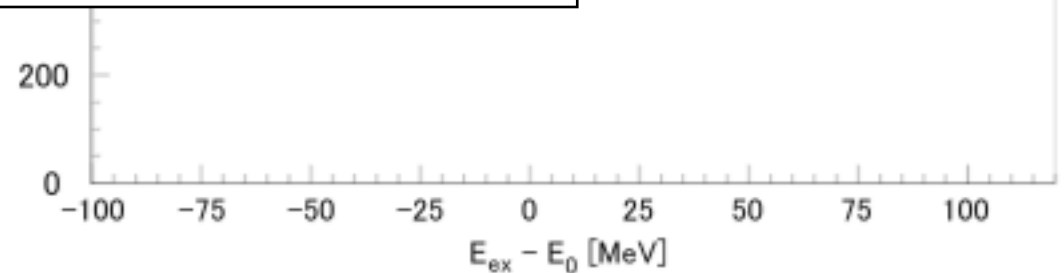
- 分解能 $20 \text{ MeV}/c^2$ (F)
- Chrien とCM系でバックグラウンド
- BK は主に $2\pi, 3\pi$

• 十分、Chiral Unitary, Chiral Doublet モデルを弁別出来そう

• $N^* \rightarrow p\pi$ ($470 \text{ MeV}/c$) の Decay mode をタグするとBK の抑制も期待



シミュレーション



まとめ

- 媒質中のハドロン分光実験は、大きく二分される。

- 1、非定常状態

- 2、束縛状態

2は、量子状態まで決定出来るという所から、不定性が小さい点で有利

- Pionic Atom は、RIBF での高精度測定が可能

- 測定は、不変質量法と、欠損質量法の二種があるが、両方同時計測を目指す実験が準備中。

欠損質量法 + 強力なタグ

- 核内ハドロン分光実験は、カイラル対称性をキーワードに、様々なデータを集め（ようとし）ている。

全体を統一的に理解するために、まず何が必要かの議論は必要であろう。