

物質の質量の 起源に迫る

RNC

岩崎 雅彦

中務・肥山(理論) + 森田(実験)

近未来 ... 10年後

J-PARC E15 / E17

KN physics

J-PARC E16

Yokkaichi, En'yo, ...

ϕ physics

Riken J-PARC Center under RNC?

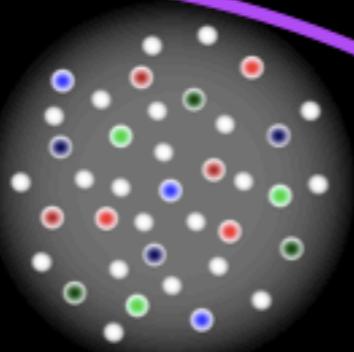
K, ϕ physics?

charm physics??

宇宙における物質 (クォーク多体系)

温度

ビッグバン (初期宇宙)



相転移

クォーク・グル
プラズマ (QGP)

膨張による冷却

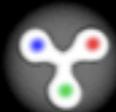
ハドロン

“気体” → 流体的

高エネルギー
原子核衝突実験
(RHIC@BNL,
LHC@CERN)

バリオン (重粒子)

メソン (中間子)



ハドロン物理
(J-PARC, JLab,
...)

“液”

? 超伝導状態?

元素合成

不安定核物理
(RIBF@理研)

中性子星

ストレンジネス核物理 (J-
PARC)

クォーク星?

$H, He \rightarrow Fe$

u, dクォークのみ

$Fe \rightarrow U$

超新星爆発

重力圧縮

重力圧縮

sクォーク出現

密度

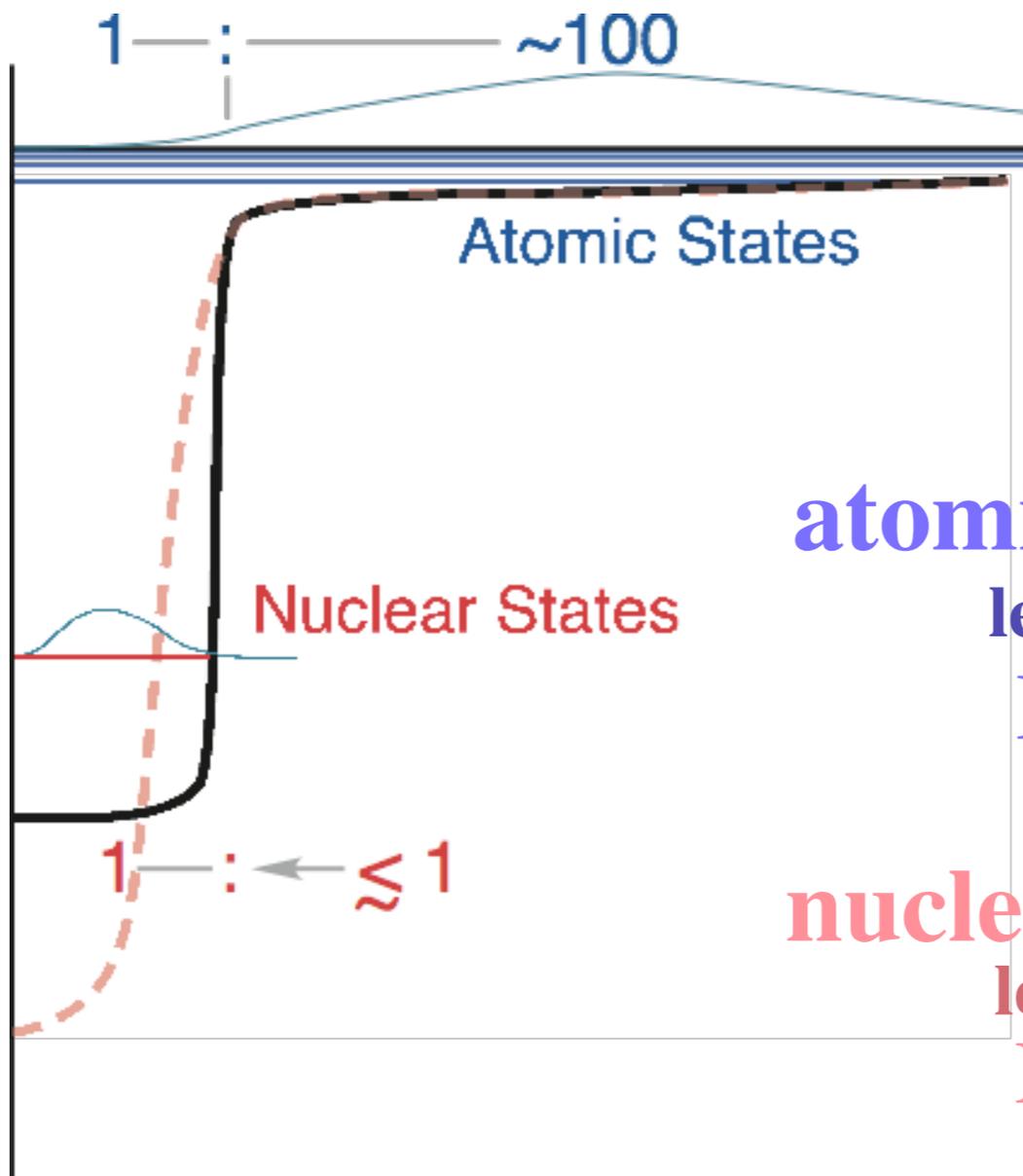
通常の原子核

高密度核物質

クォーク物質

Study of $\bar{K}N$ interaction by E17 / E15

sharing resources: area, setup etc.



atomic states

level shift and absorption width

E17: K^- ^3He $3d - 2p$ x-ray

K at rest

nuclear states

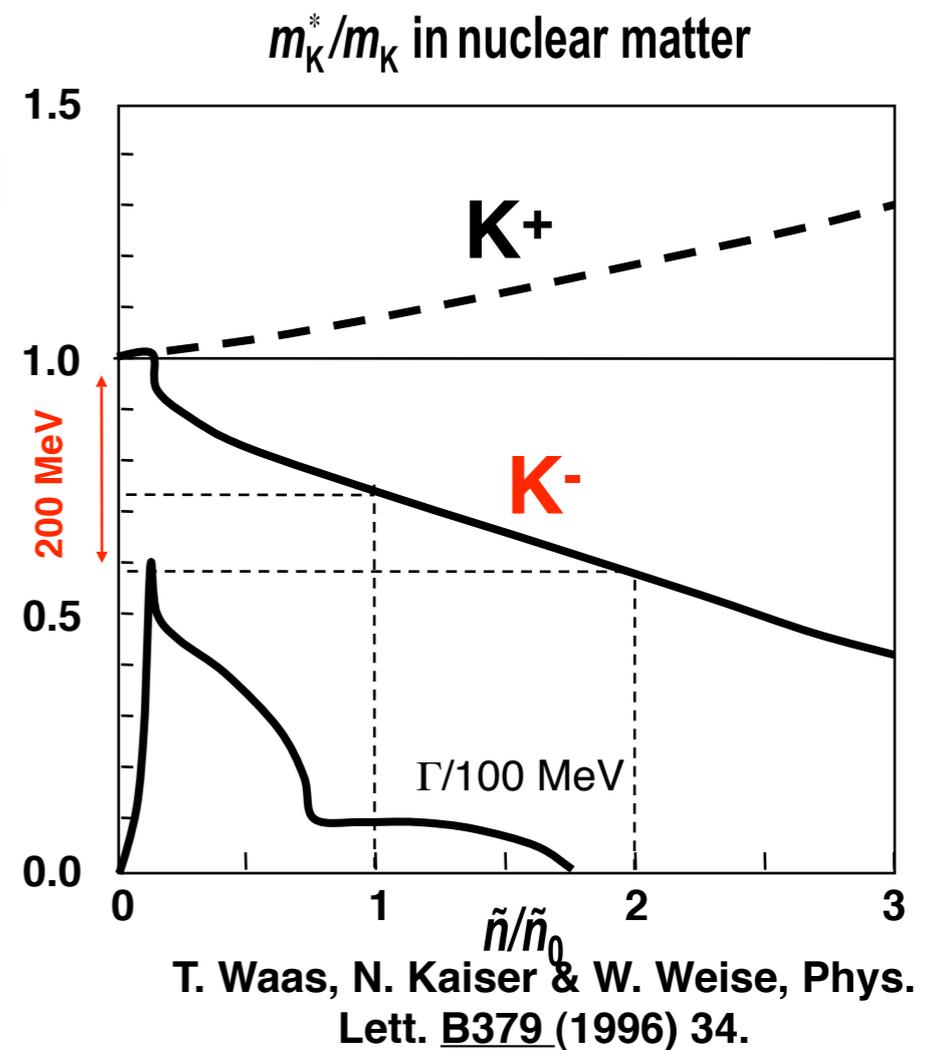
level energy and decay width

E15: $^3\text{He}(K^-, n)$ missing &

invariant mass

K @ 1 GeV/c

strongly attractive in $I=0$ channel



$\bar{K}N$ study by atomic states

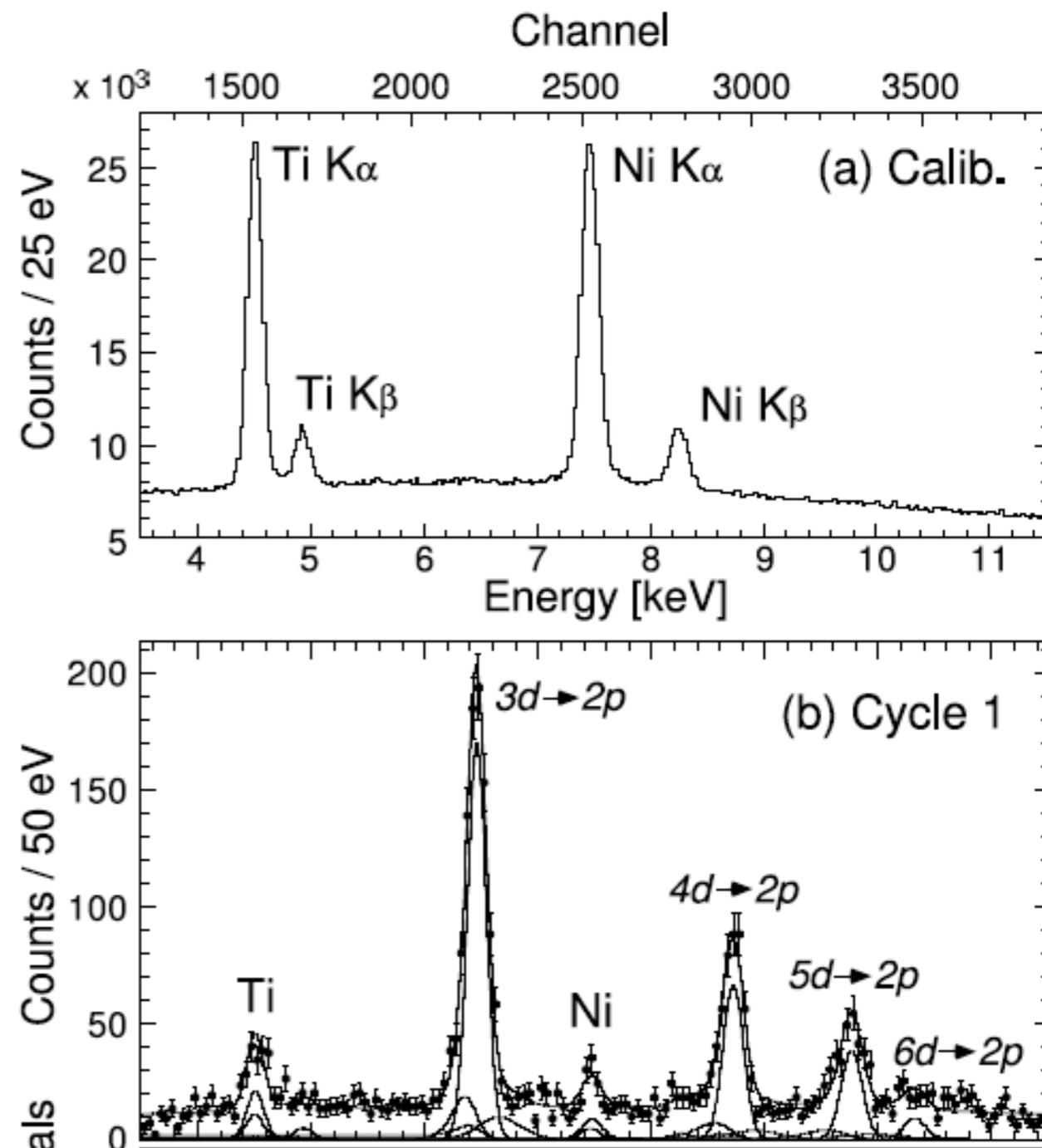
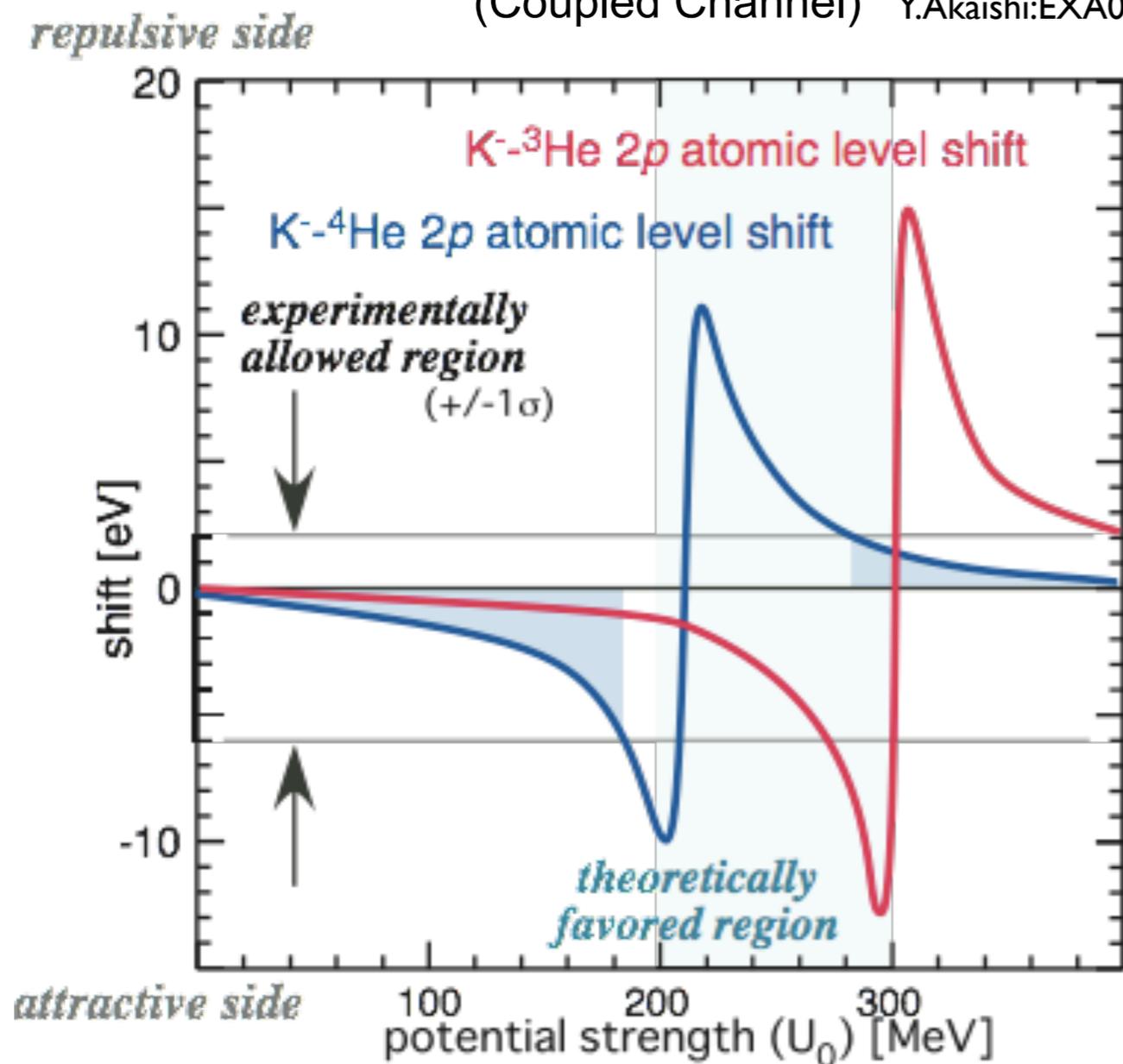
K at rest

level shift and absorption width

E17: $K^{-3}\text{He}$ $3d - 2p$ x-ray

cf. KEK PS-E570

Calculated 2p level shift by Akaishi
(Coupled Channel) Y.Akaishi:EXA05



New data from Osaka group

(one of new data : in-flight)

in-flight (K^- , n) reaction @ 1 GeV/c

*indicating very deep potential
Kaon condensation?*

T. Kishimoto et al., Prog. Theor. Phys. 118 (2007) 181

fit = Green's function

- deep & wide KN pot.

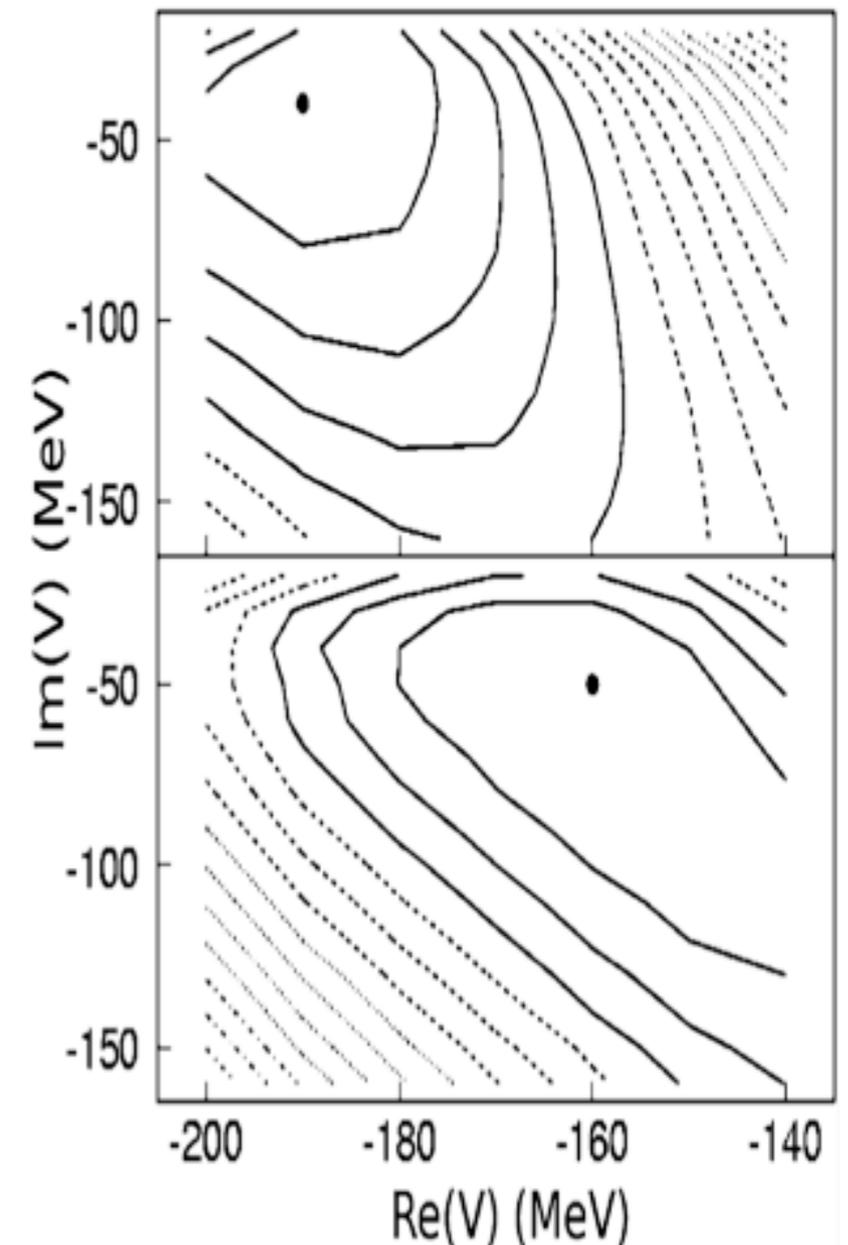
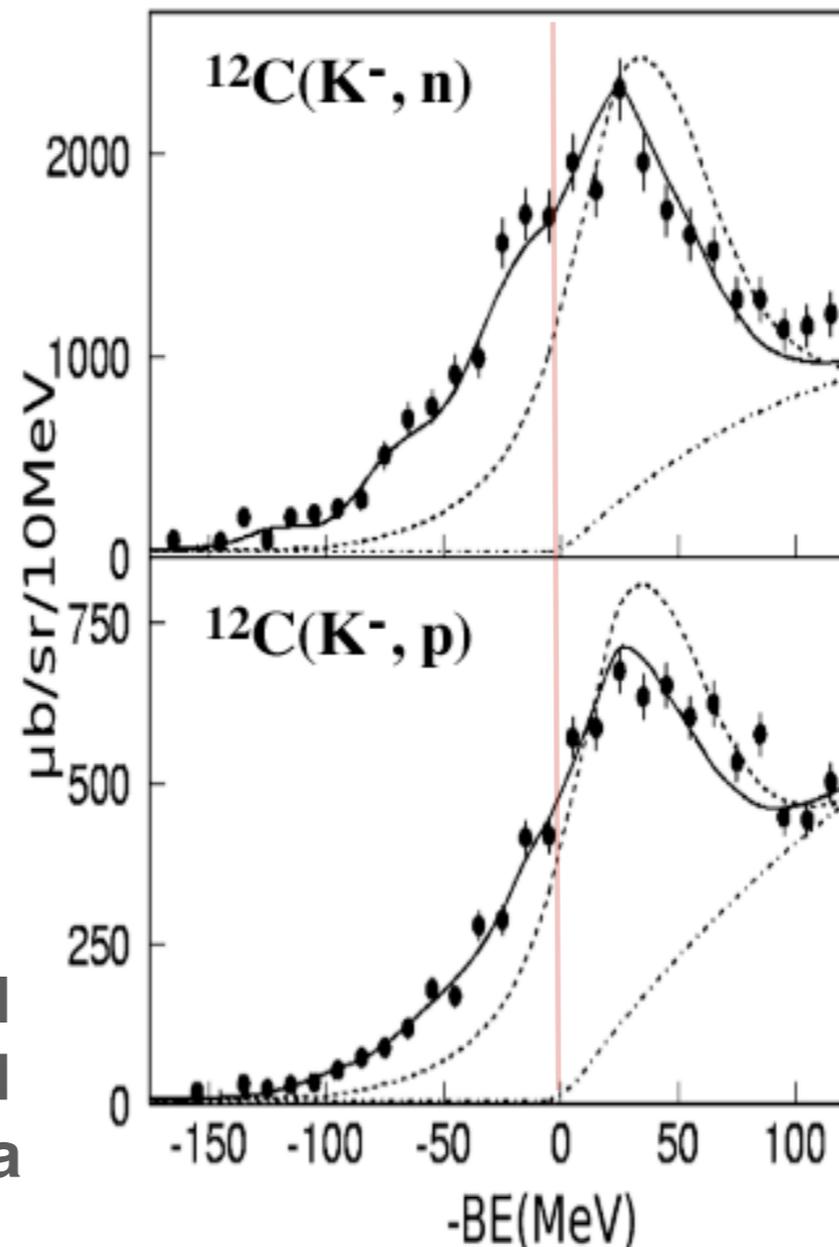
$\text{Re}(V) \sim 200 \text{ MeV}$

$\text{Im}(V) \sim 50 \text{ MeV}$

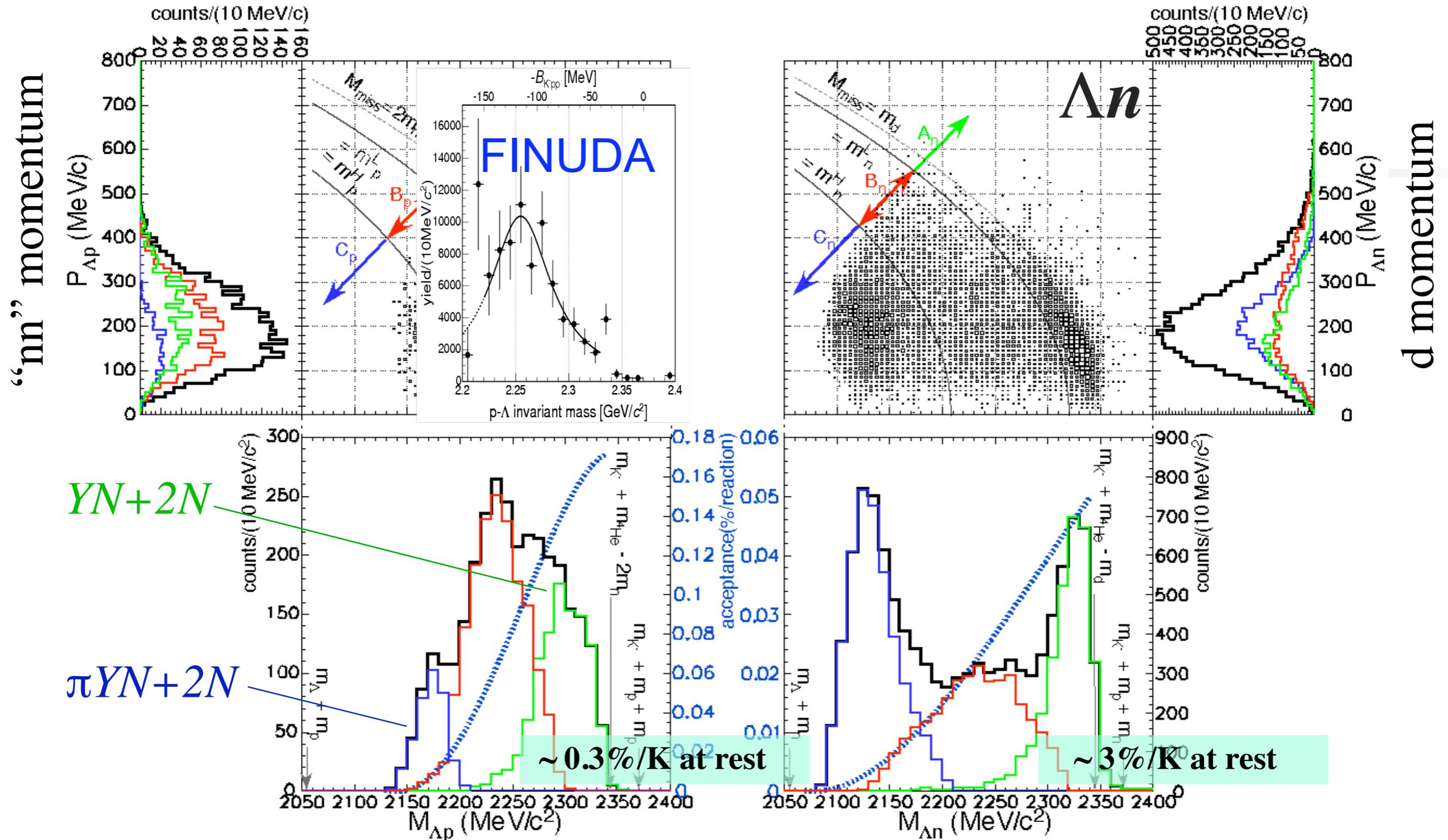
- lower background

in-flight ensures ...

2N process suppressed
kinematically separated
not seen in the spectra



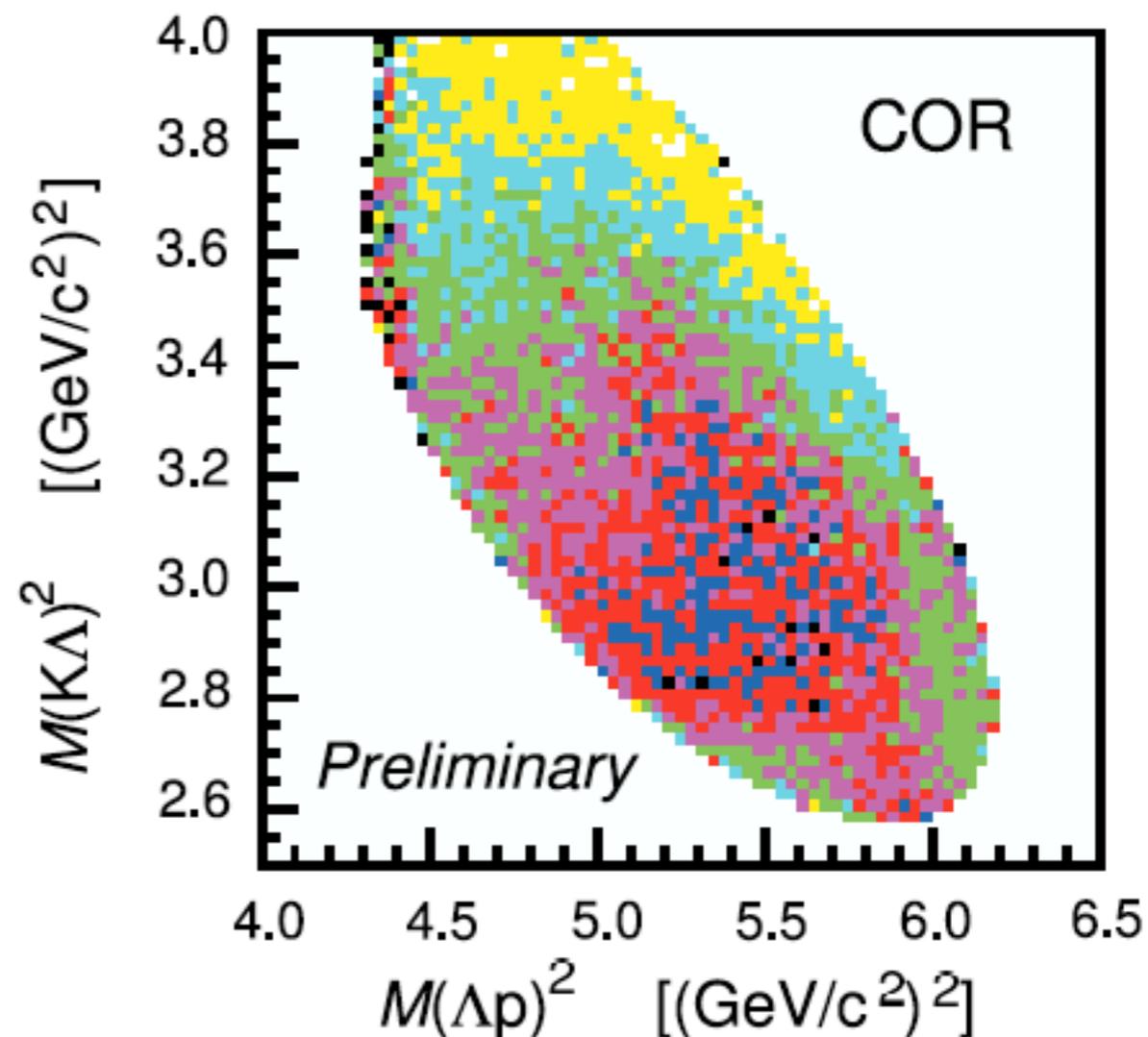
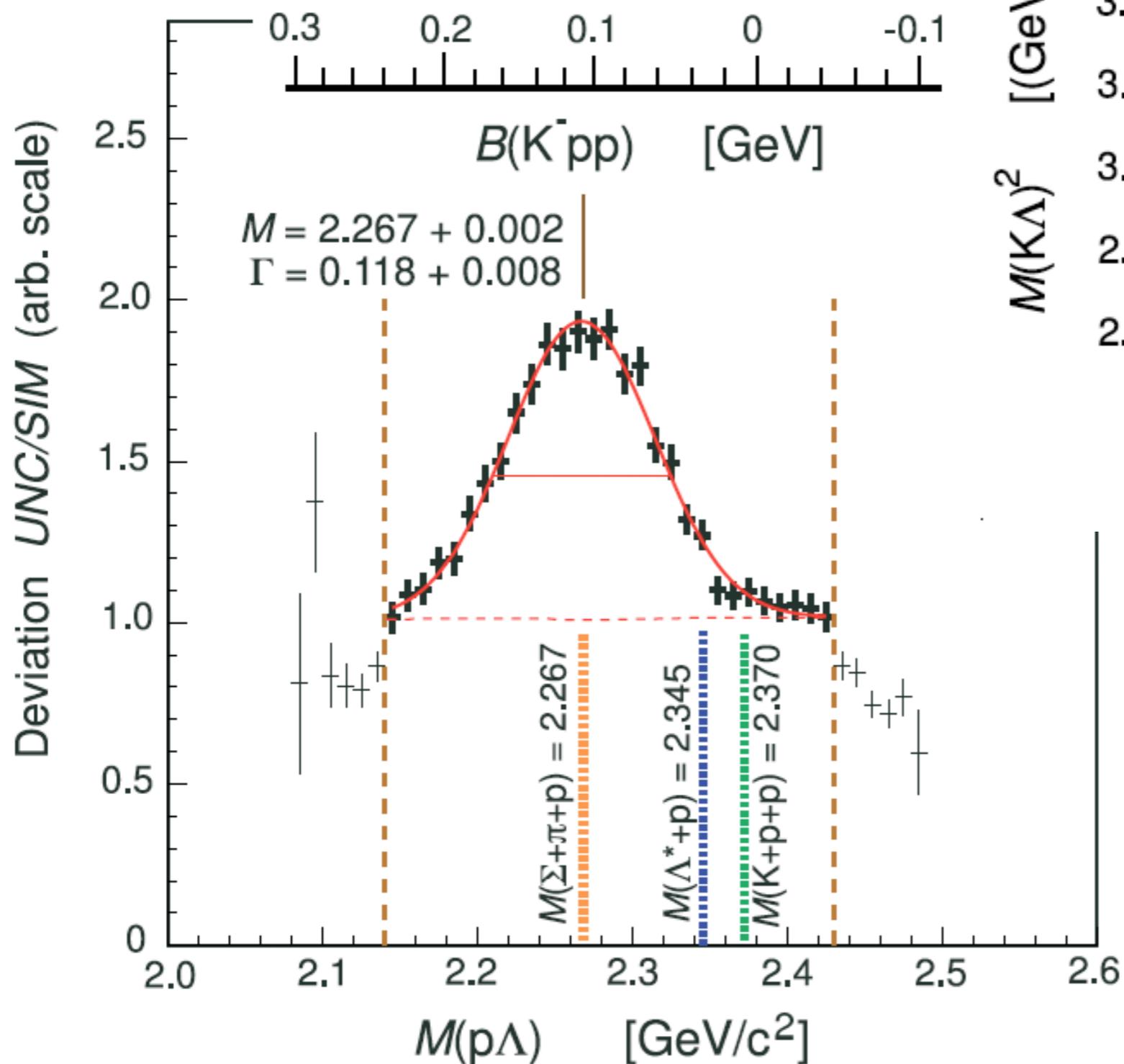
ΛN invariant mass v_s ΛN total momentum



1. ' NN ' _{$l=0, s=1$} dominance of $K^- 'NN$ ' _{l, s} $\rightarrow \Lambda N$
2. More intense contribution of $B_{p/n}$

severe background 2N abs.
for kaon at rest kinematics

DISTO experiment: exclusive $pp \rightarrow K^+\Lambda p$ at $T_p = 2.85$ GeV



T. Yamazaki, P. Kienle, K. Suzuki et al.

arXiv:0810.5182

“ K^-pp ” is the lightest, most fundamental kaonic nuclei,
 theoretical and experimental measures
 $B.E.$ and Γ are not converged!

(a) SGM: Shevchenko-Gal-Mares,

Faddeev cal.
 with phenomenological $K^{\bar{N}}$ int.

PRL98 (2007) 082301.

Theory

- YK: Yamazaki, Akaishi
- SGM: Shevchenko, Gal, Mares
- IS: Ikeda, Sato
- DHW: Dote, Hyodo, Weise
- IKMW: Ivanov, Kleine *et al.*
- NK: Nishikawa & Kondo
- AYO: Arai, Yasui, Oka
- YHNJ: Yamagata, Hirenzaki *et al.*
- WG: Wychech, Green,

Experiment

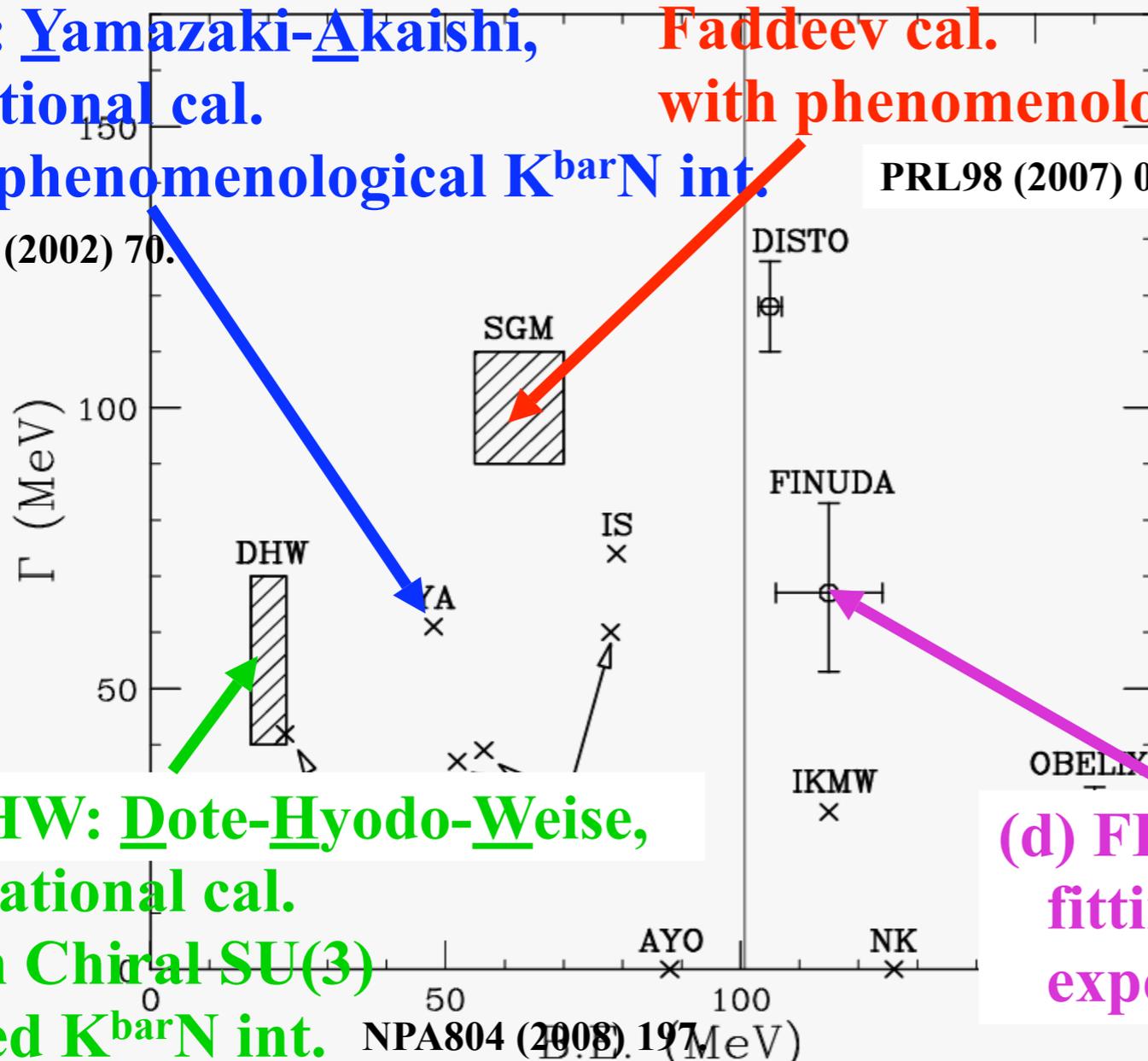
- FINUDA

(d) FINUDA:
 fitting to FINUDA
 experimental data

PRL94 (2005) 212303.

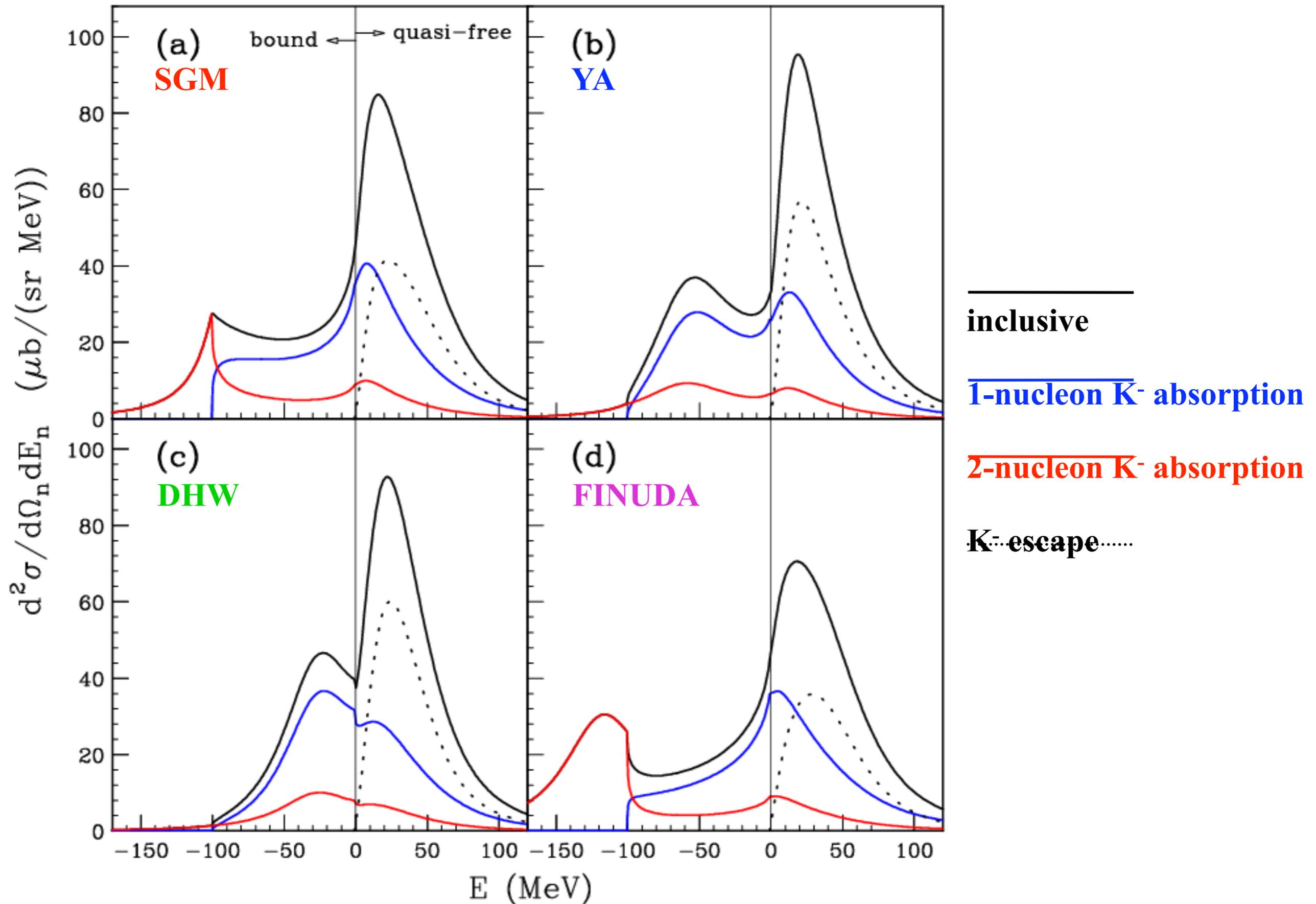
(b) YA: Yamazaki-Akaishi,
 variational cal.
 with phenomenological $K^{\bar{N}}$ int.

PLB535 (2002) 70.



(c) DHW: Dote-Hyodo-Weise,
 variational cal.
 with Chiral SU(3)
 based $K^{\bar{N}}$ int. NPA804 (2008) 197

◆ Decomposition into semi-exclusive spectra



${}^3\text{He}(\text{K}^-, n)$ $\text{K}^- {}^3\text{He} \rightarrow \text{pp K}^- + n$

E15 @ J-PARC

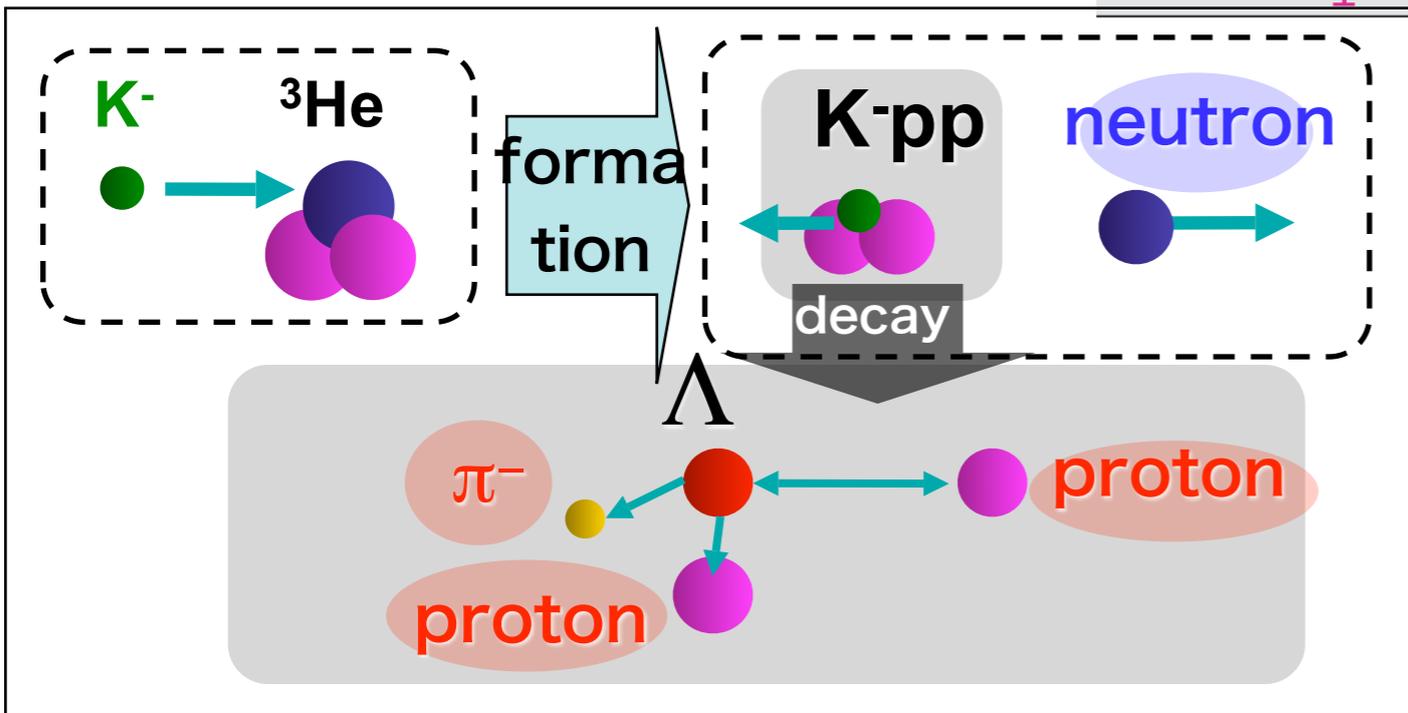
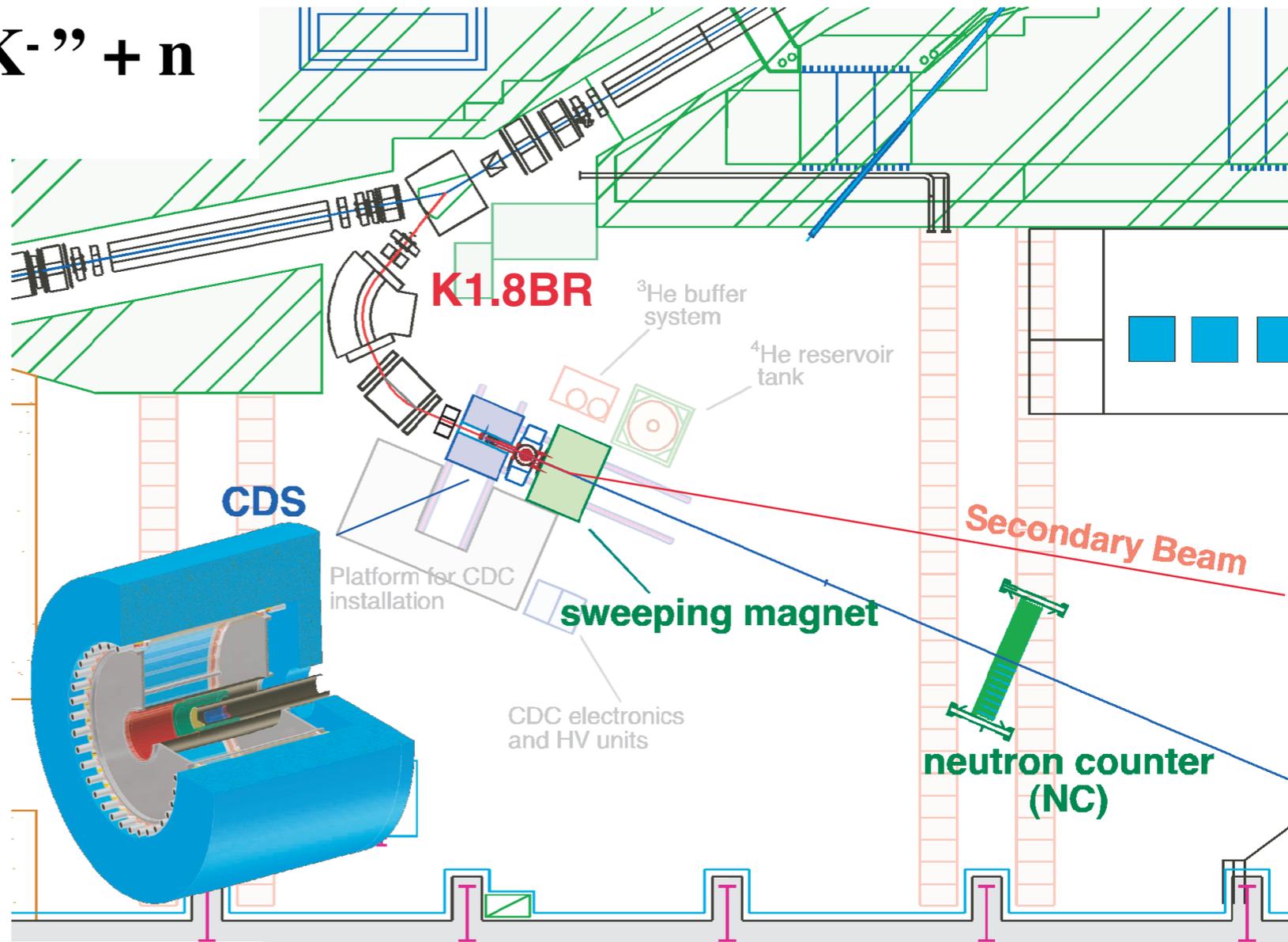
1 GeV/c

missing & invariant mass

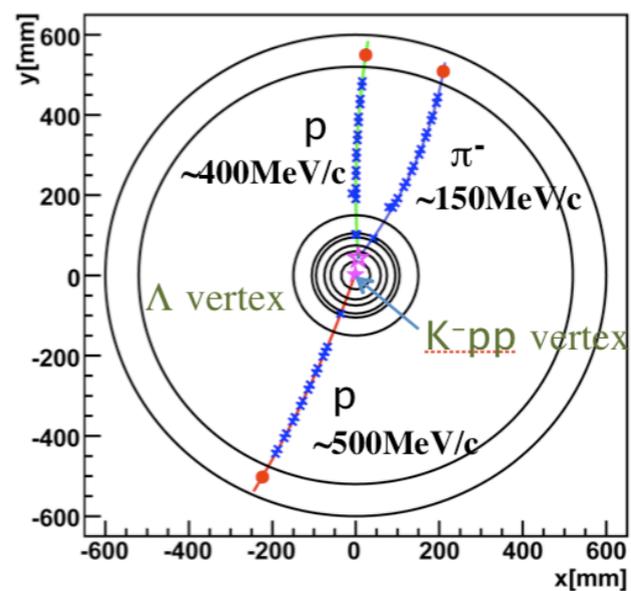
 Cylindrical Detector System

- 1) solenoid
- 2) CDC
- 3) hodoscope

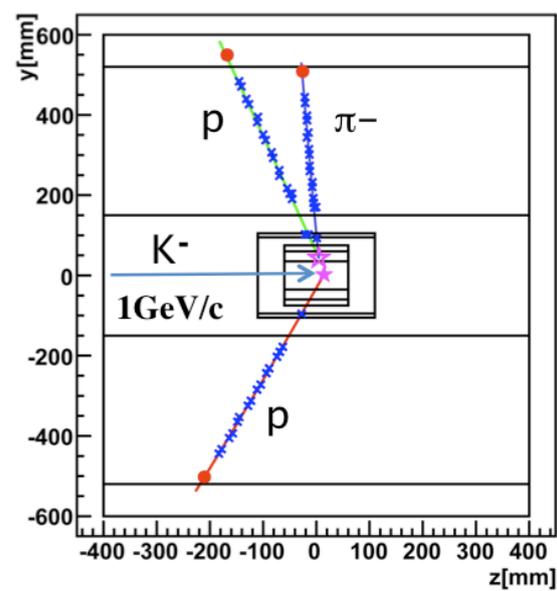
-  ${}^3\text{He}$ target
-  neutron counter
-  beam line detector



CDS xy-plane



CDS zy-plane



Reality of E15/E17

Neutron Counter
(Exist)

Just – Actual design

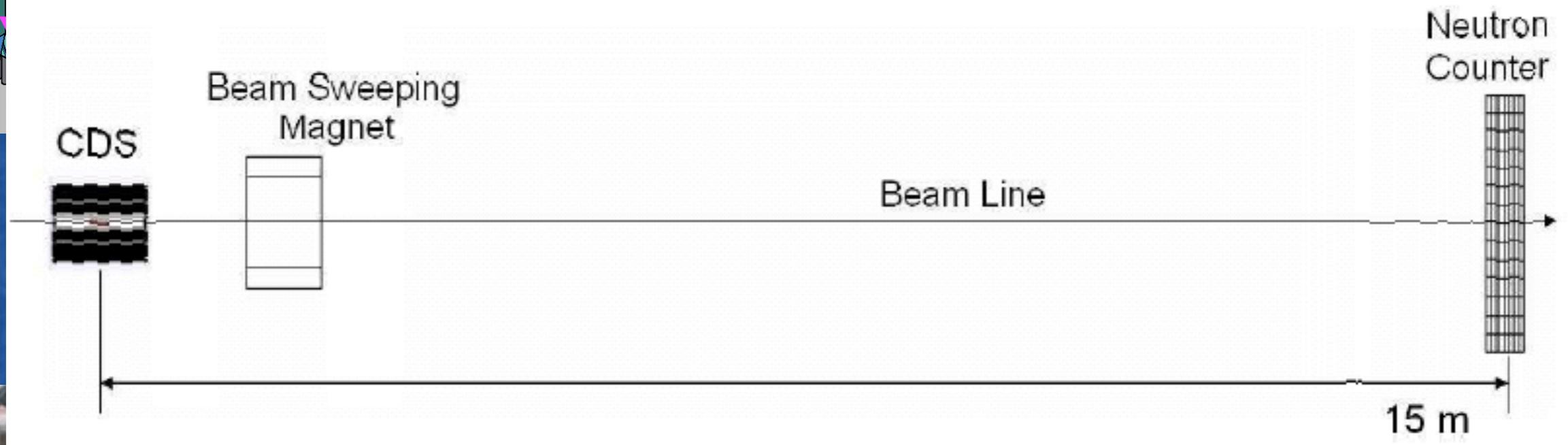
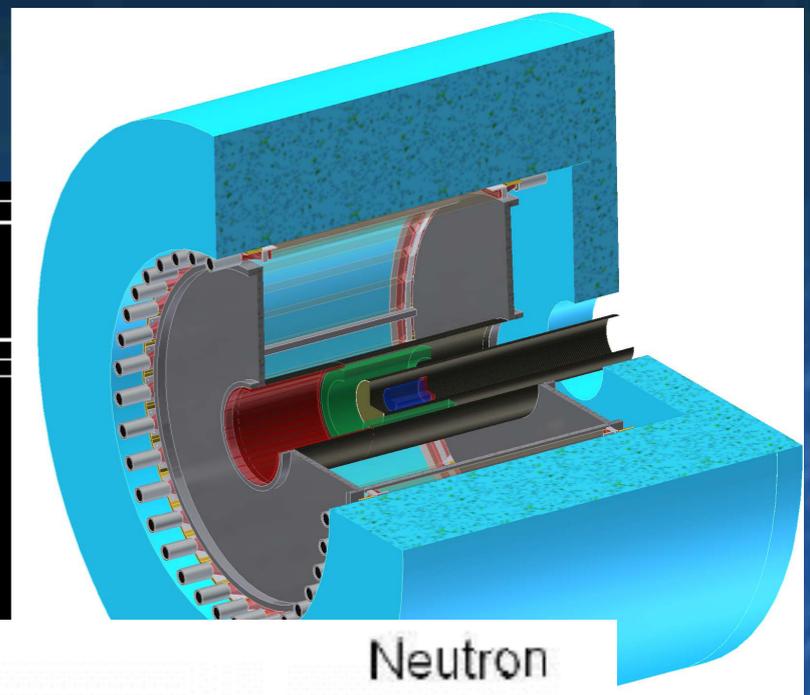
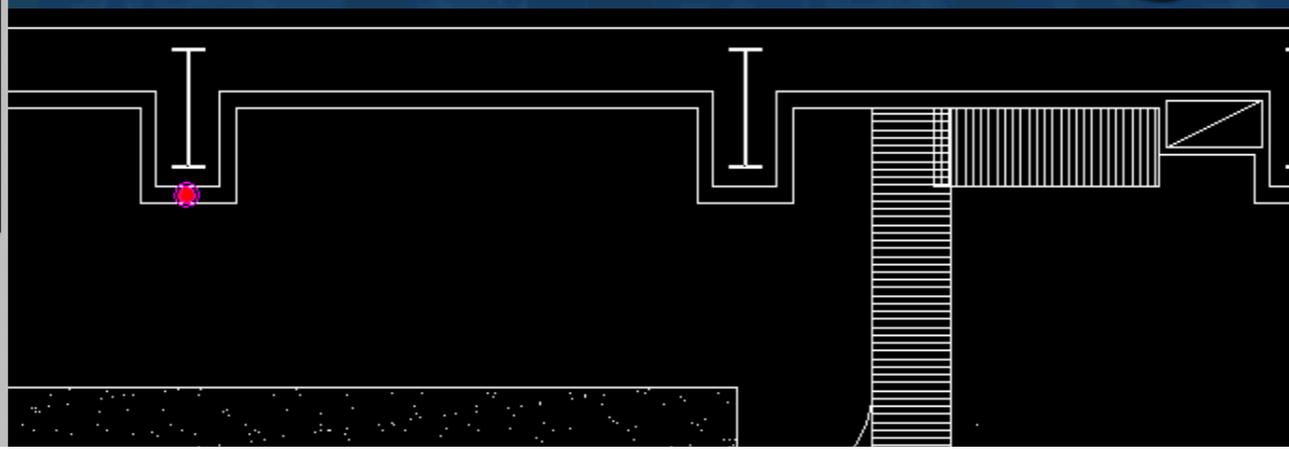
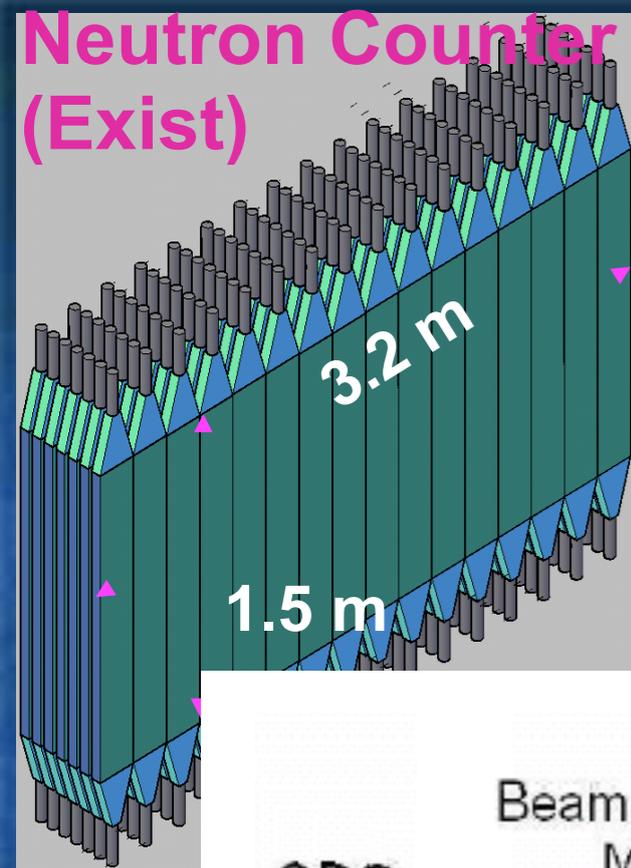
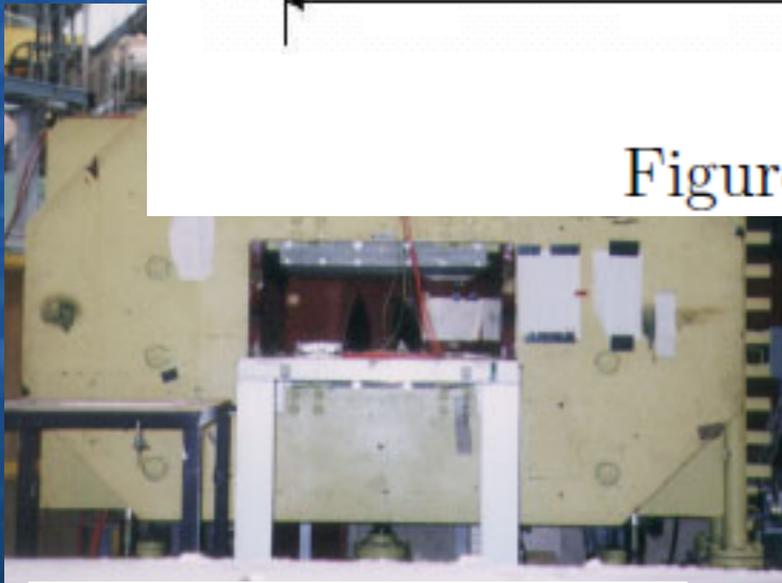
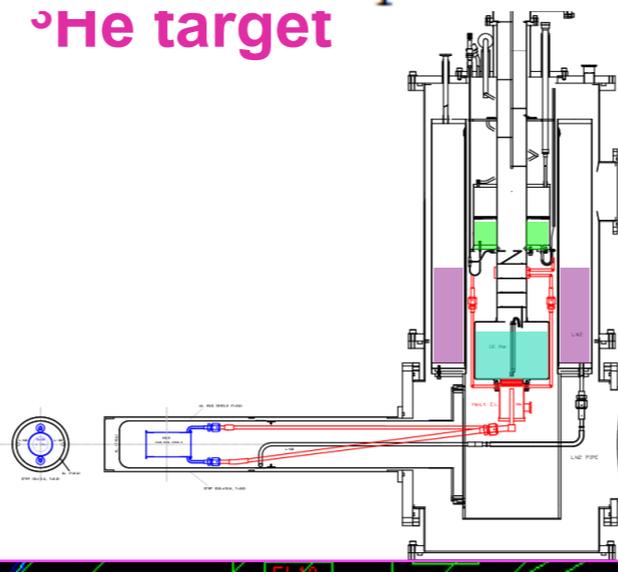


Figure 1: Detector setup for the proposed experiment



Kaon beam sweeper

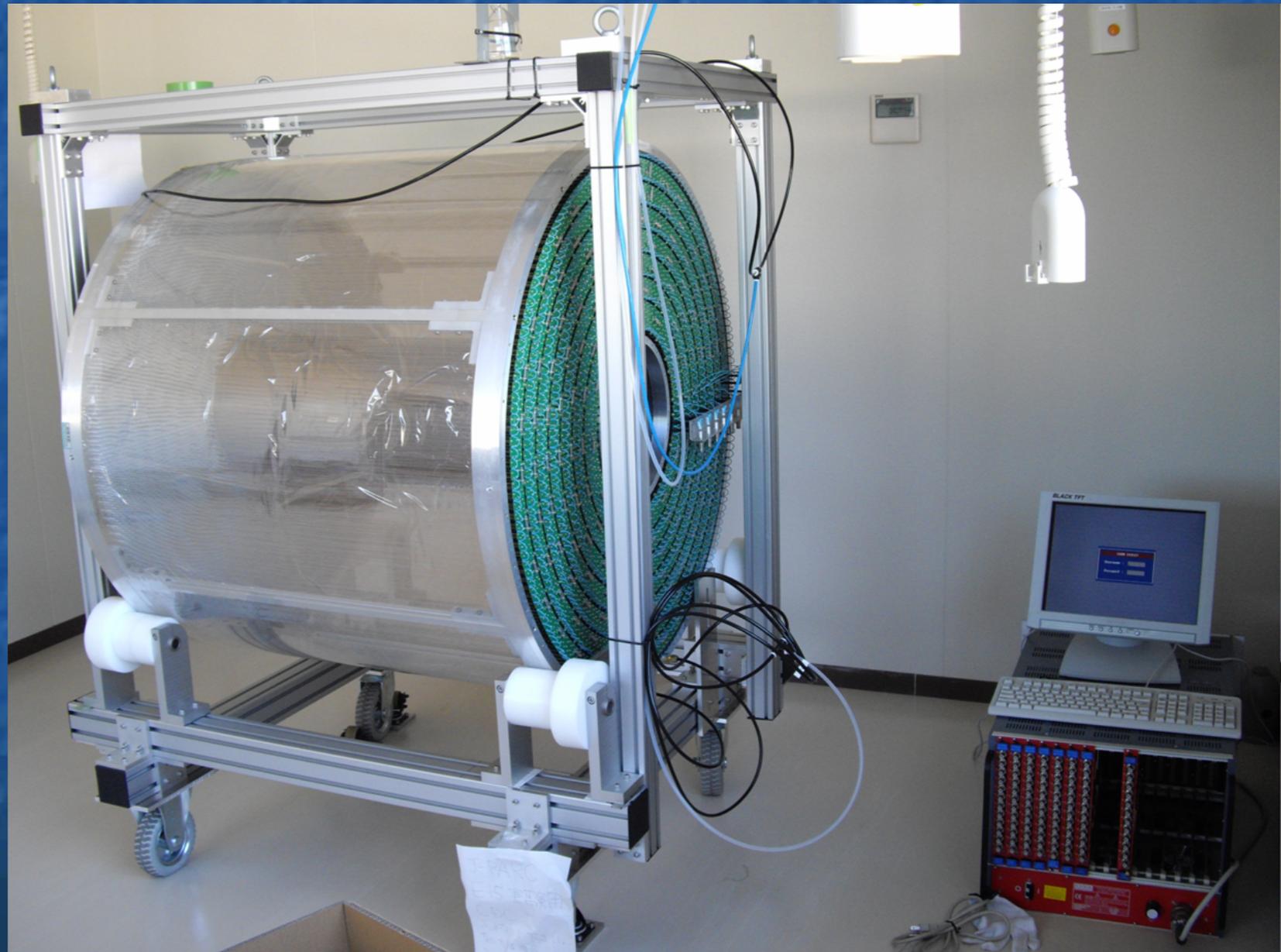
^3He target



Beam Line Spectrometer

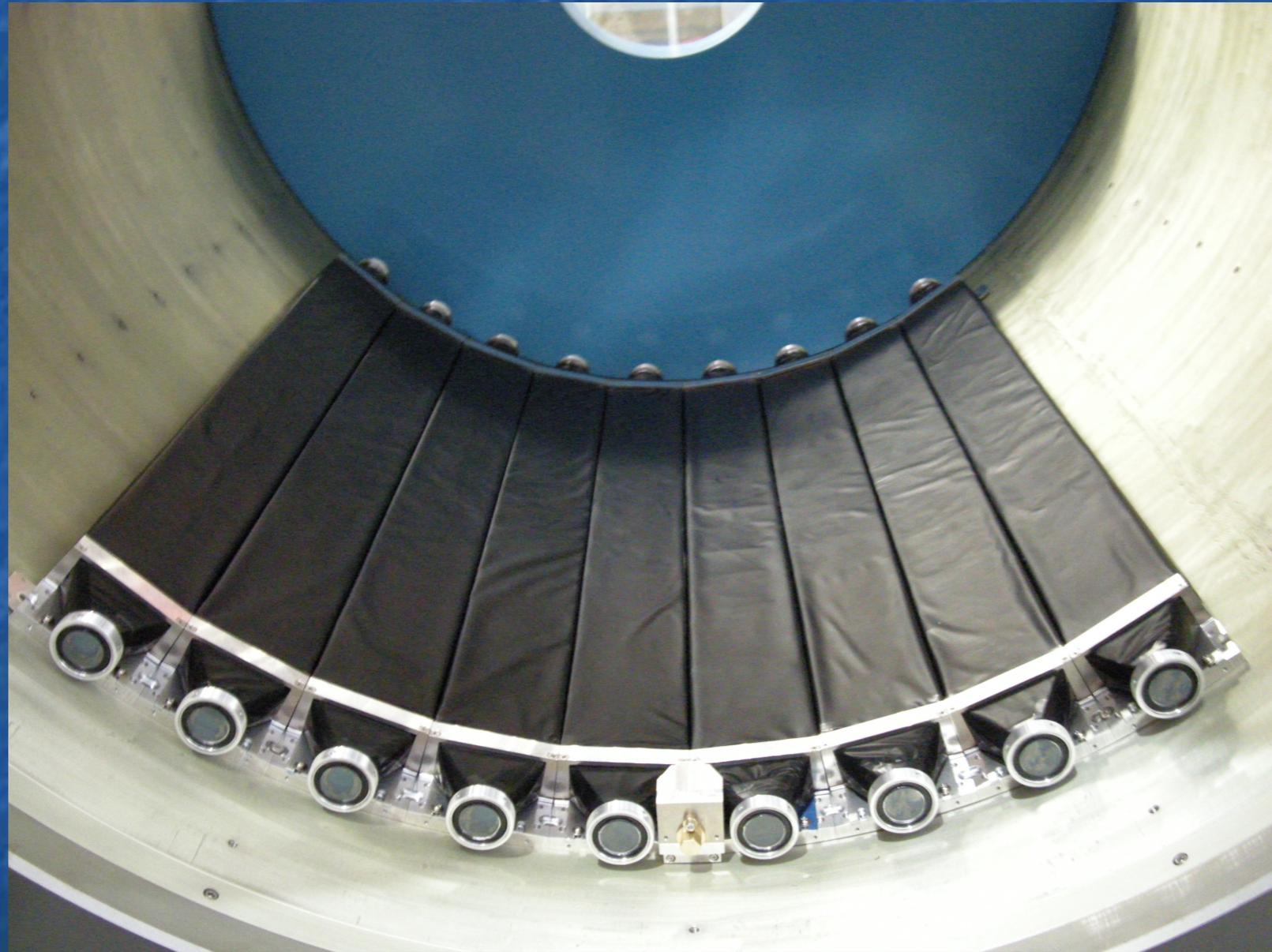
CDC is now at J-PARC

- We brought CDC to J-PARC site.
 - Now aging of the CDC is started



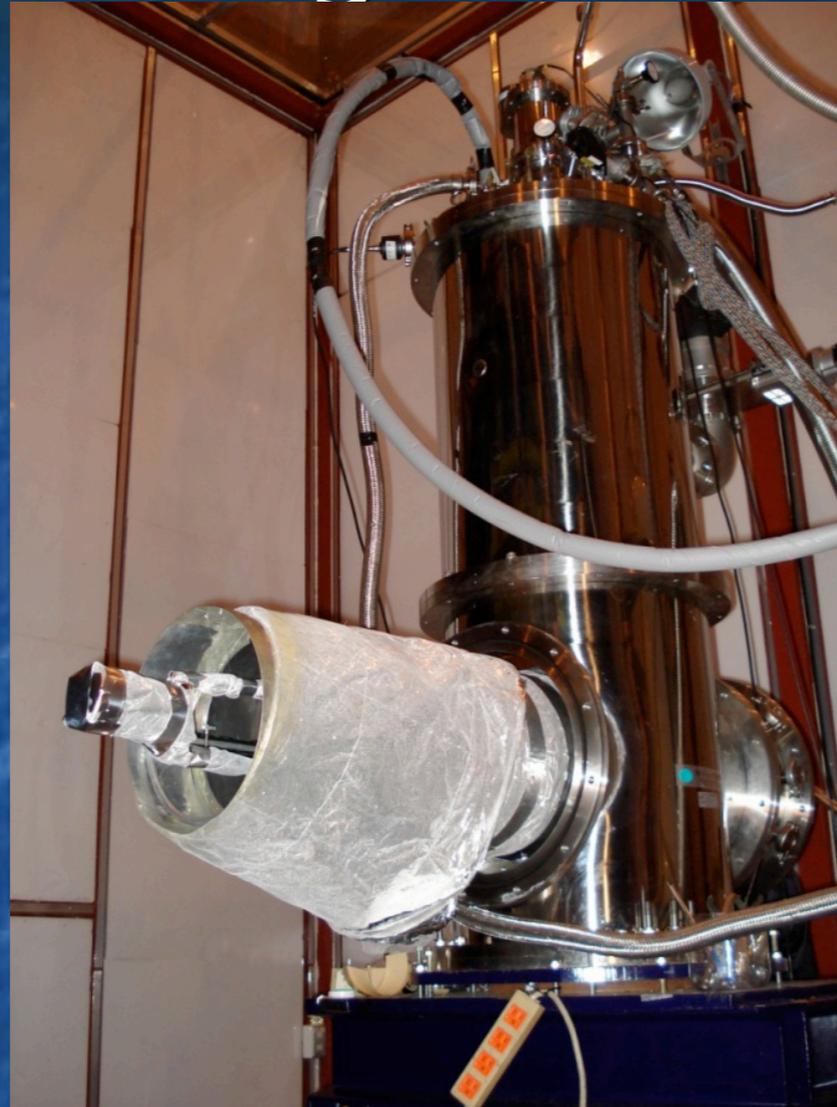
CDH prototype together with Solenoid magnet

- CDH prototype were mounted inside solenoid magnet for test purpose



**Fabrication of the CDH element will be completed by Nov/2008
CDH will be installed inside Solenoid magnet by mid Dec/2008**

Liquid ^3He Target for E15



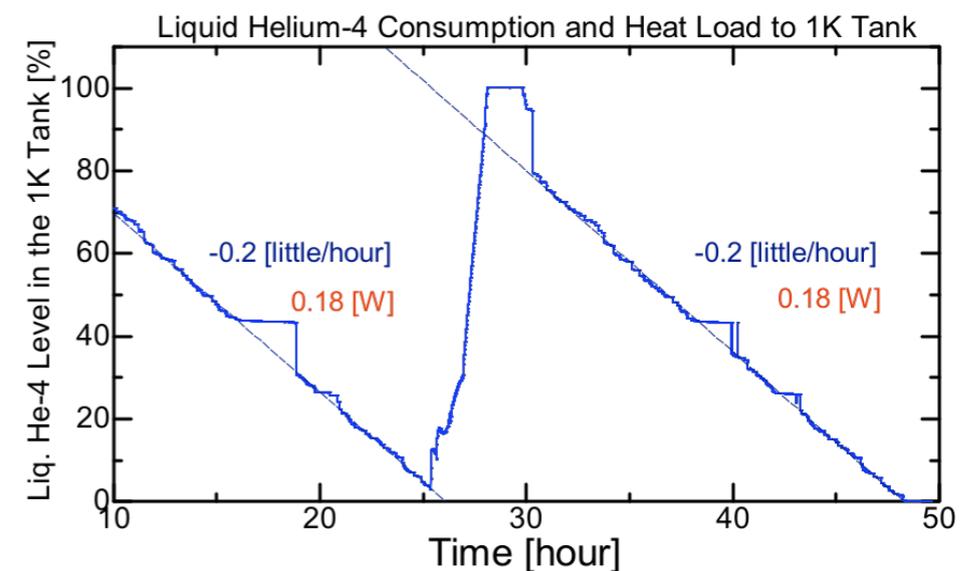
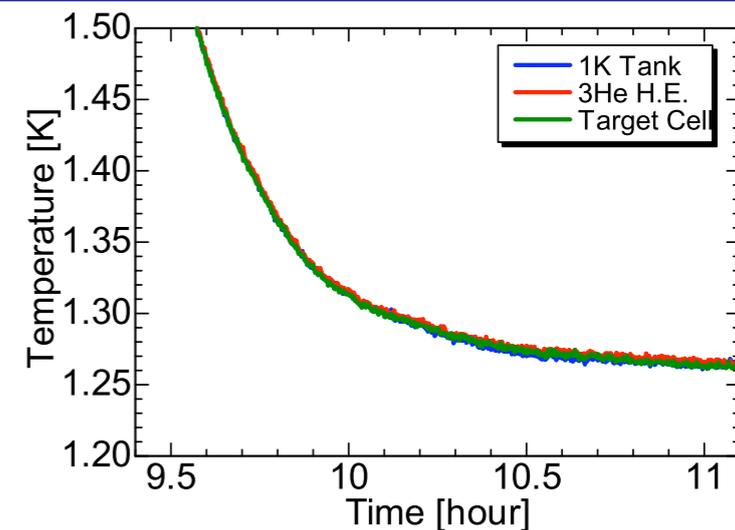
^3He liquefied system is completed by the end of **this year**



The x-ray detection device will be installed in the target **next year**

E17 will start in January, 2009
(First experiment? @J-PARC)

Cooling test with ^4He gas



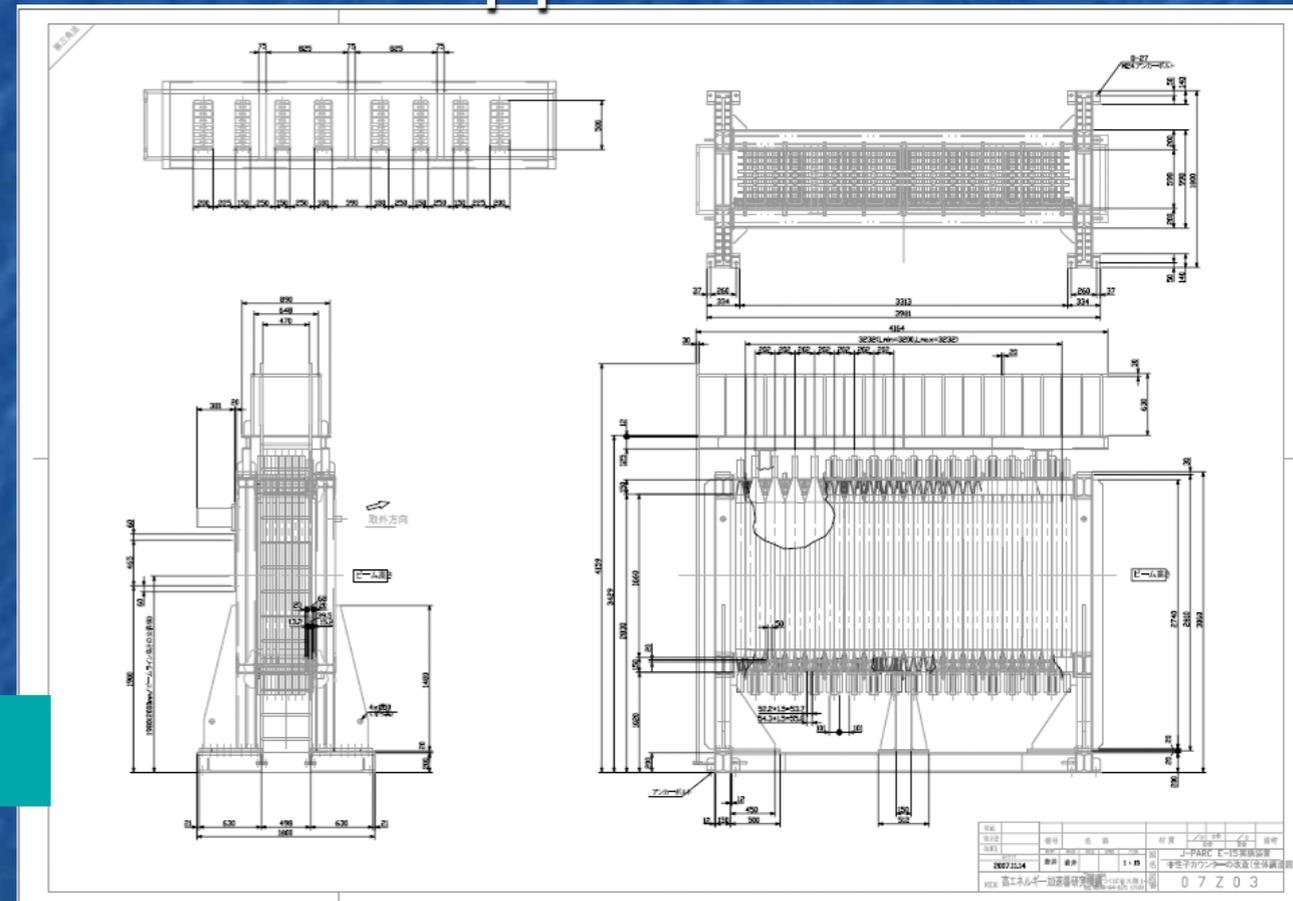
Temperature of the Target Cell	1.25 K
Temperature of the 1K Tank	1.24 K
Pressure in the 1K Tank	1.2 Torr
Liq. ^4He Consumption	45 L/day

Neutron counter

- We will use same neutron counter used for KEK E549 experiment (exist!)
- But, support structure will be rebuild for E15



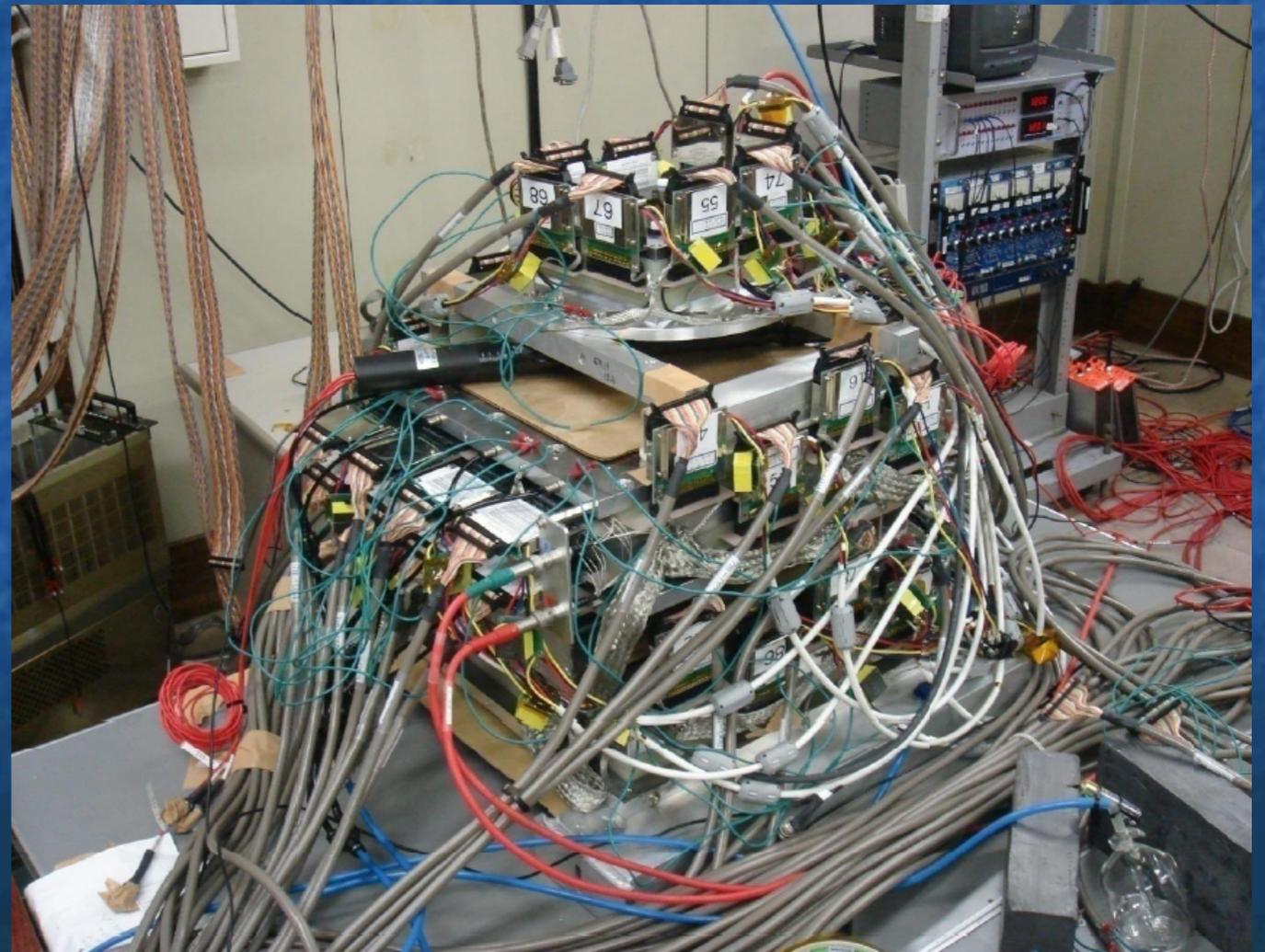
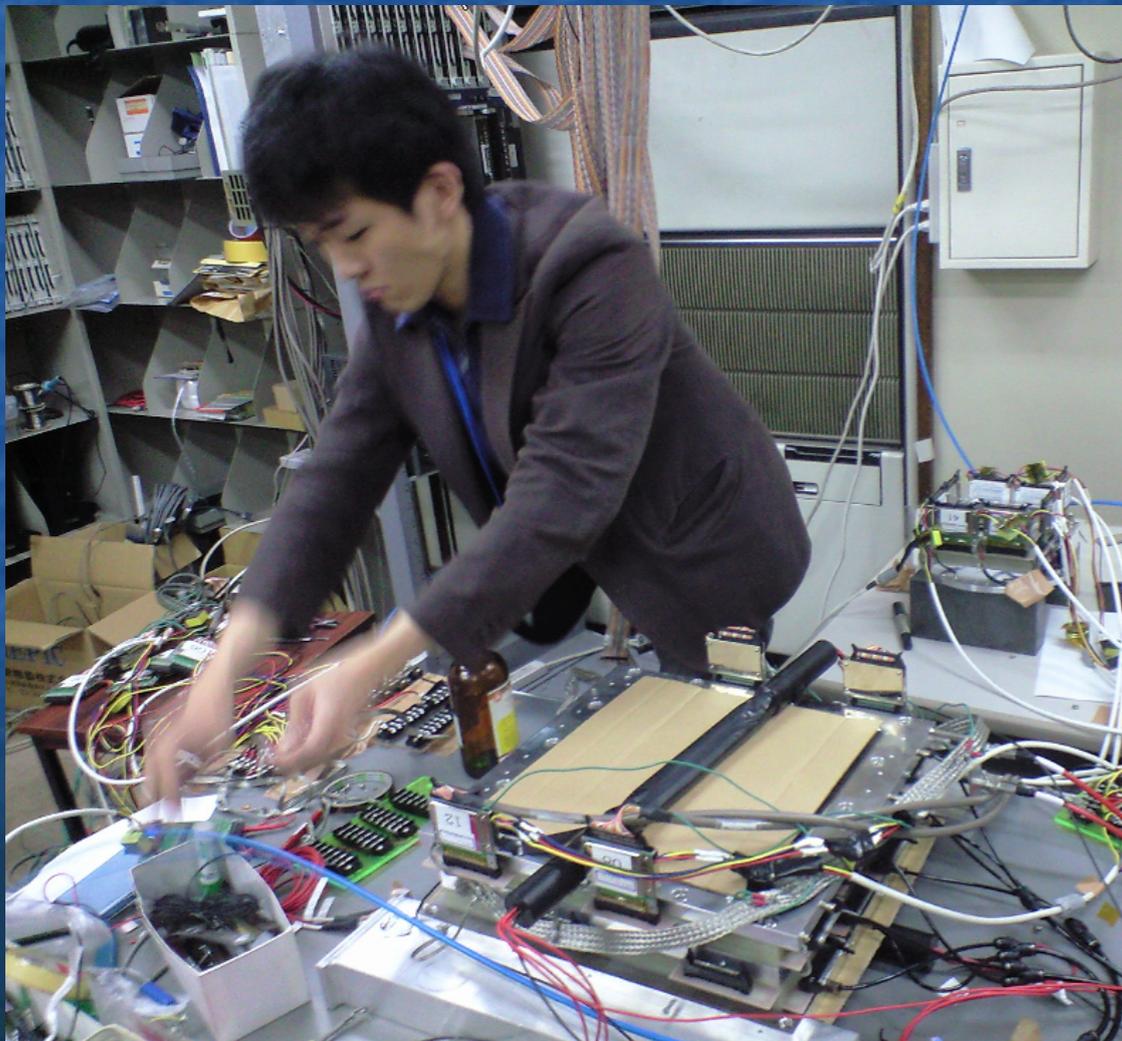
New NC support structure



Move to J-PARC

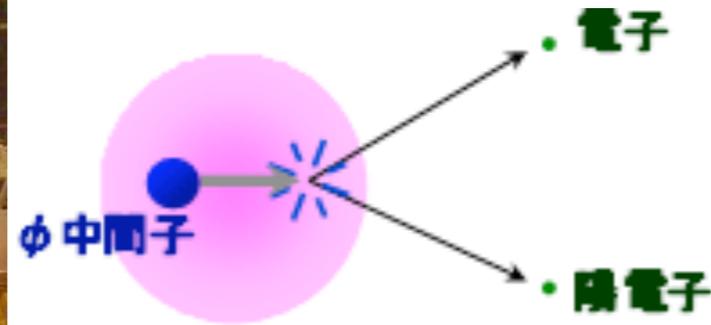
Beam line spectrometer

- Extremely busy because beam line spectrometer need to be ready by Jan. 2009
 - Design of the spectrometer is almost completed
 - Commissioning of the detector is under the way

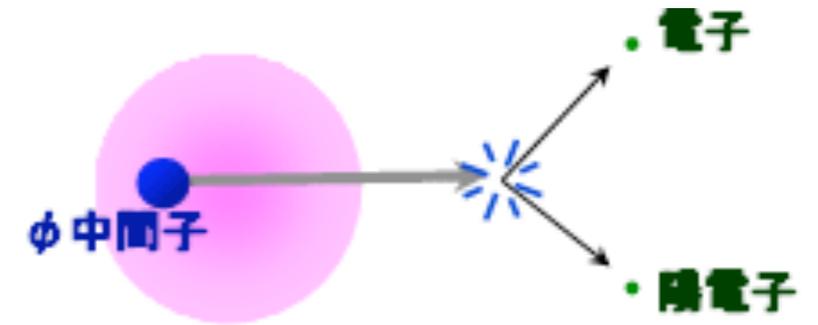


現在までの ϕ 質量変化研究

Yokkaichi, En'yo, ...



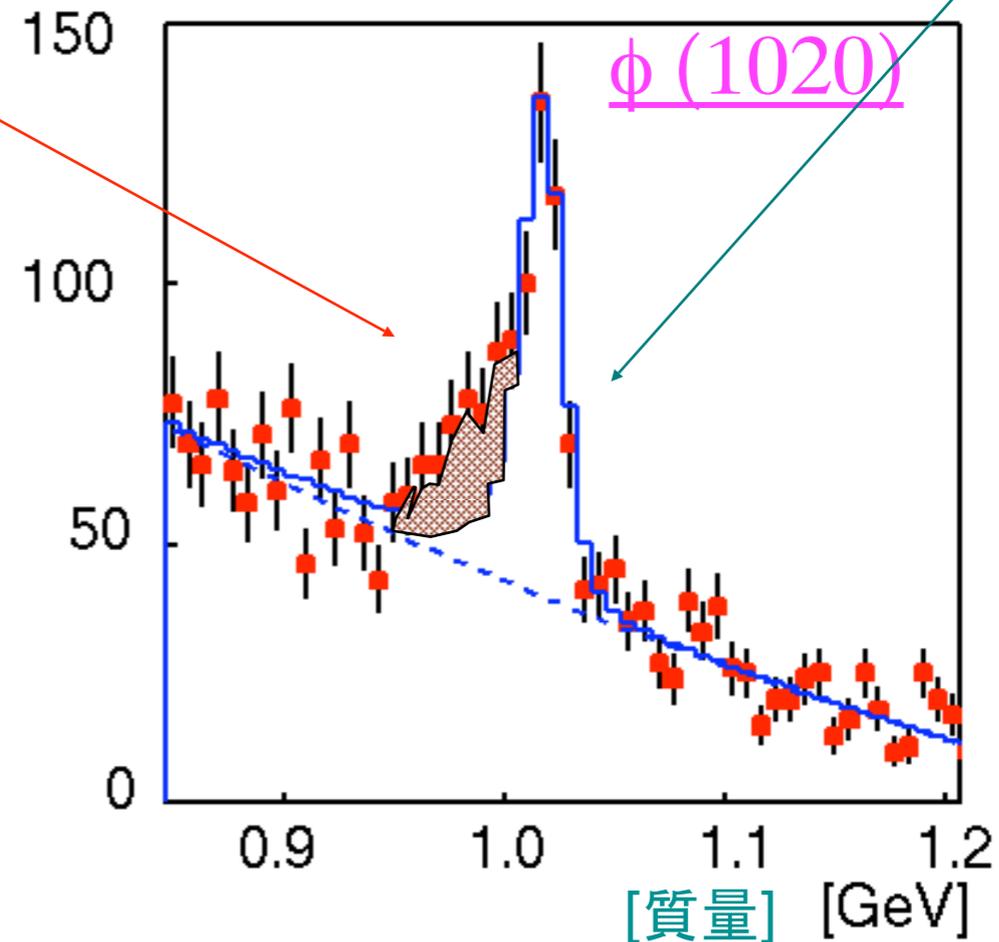
原子核内で崩壊した ϕ 中間子



真空中に出たあと崩壊した ϕ 中間子

- C/Cu 原子核中での中間子(ρ / ω / ϕ) 質量分布の変化を電子対崩壊で検出
- (ϕ 中間子については世界初)
- 質量分解能 および 統計(2000 ϕ /標的)で世界最高の測定

質量は減少した。しかし、そのメカニズムを確定するためには統計精度が不足。

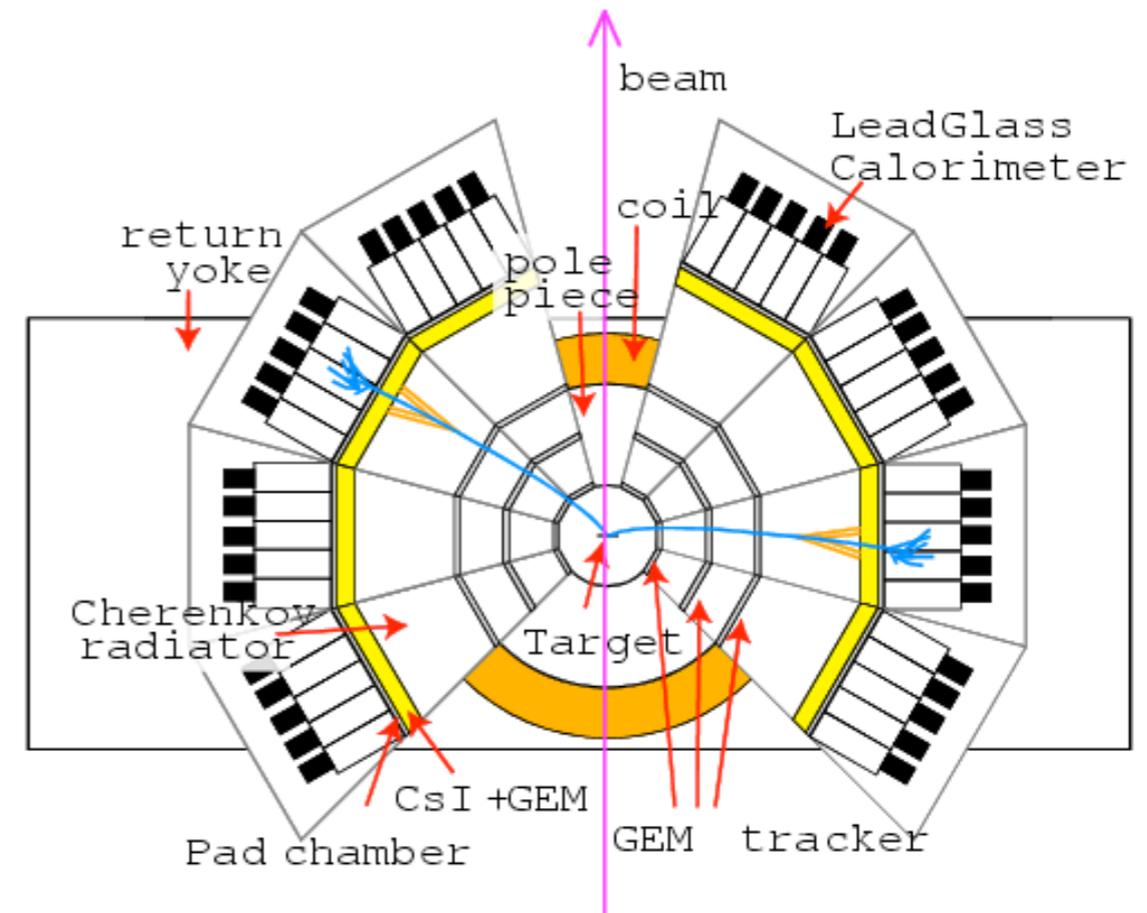


新測定器の必要性

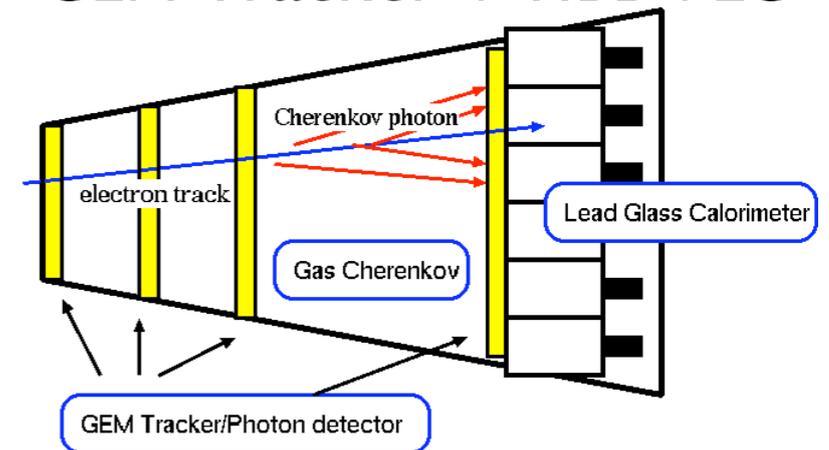
plan view

20

- 従来の**5倍**の大立体角を覆う
- 従来の**10倍**のビーム強度で使える
 - **GEM Traker**
 - 0.7mm pitch ADC readout もしくは
 - 0.4mm pitch digital readout
 - 予想レート 5KHz/mm² に耐える
- **2段構成の電子検出器 (10⁻⁴ π rejection)**
 - **ハドロンブラインド検出器(HBD)**
 - **CF₄ Gas Cherenkov +Csl-GEM Photocathode**
 - 従来の**100倍**のアクシデンタルトリガーを防ぐセグメント細分化
 - **Leadglass EMC**
- **~70K Readout Channels (in 27 segments)**
 - cf. 従来 3.6K, PHENIX:~300K
- 従来の**2倍**の生成断面積 合計**100倍**の統計



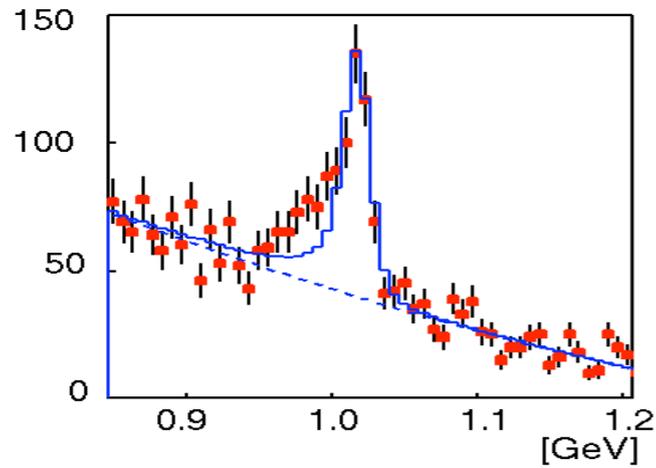
GEM 電子検出器 =
GEM Tracker + HBD+LG



Yokkaichi, En'yo, ...

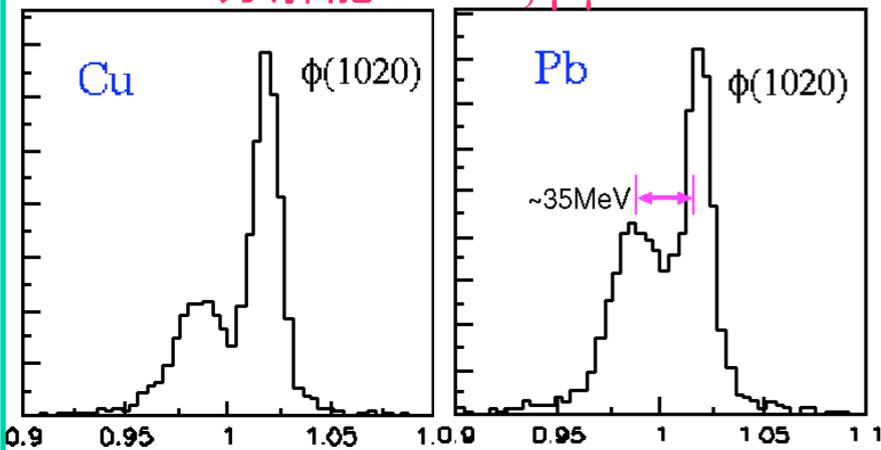
高統計・高精度がもたらすE16のハイライト

明確な分離構造の測定



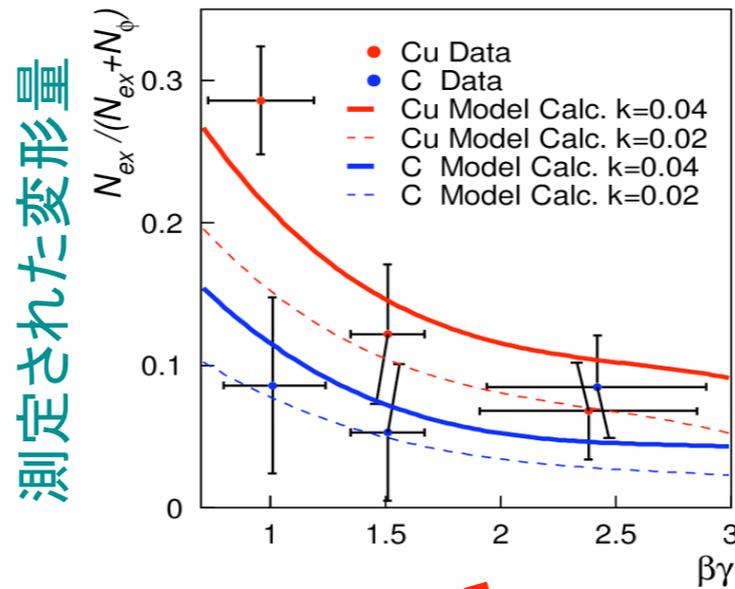
分解能 11 MeV, $\beta\gamma < 1.25$

↓
分解能 5 MeV, $\beta\gamma < 0.5$



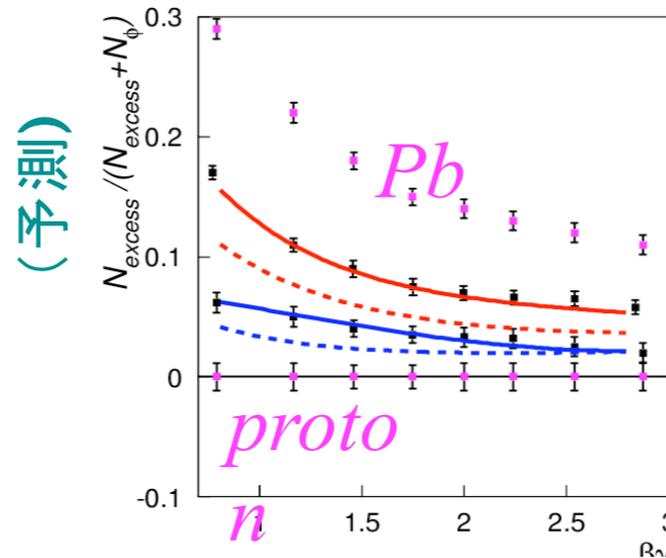
質量変化現象の確定
原子核サイズ依存性の確定

核内崩壊量の定量化



測定された変形量

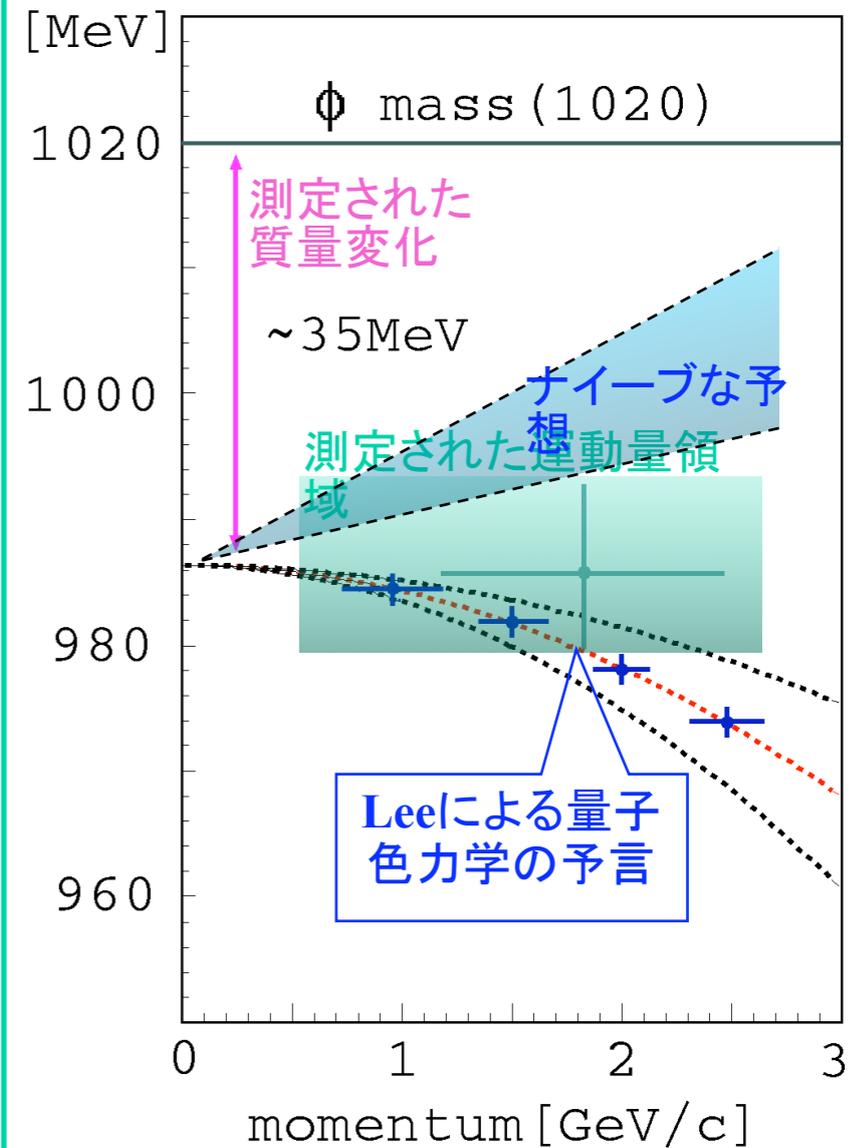
100倍 ↓



(予測)

核内中間子生成・崩壊の
モデルの確定

核内分散関係の導出



質量と崩壊幅の運動量
依存性の確定

ハドロノン物理

— [将来方向は何か？

物質の質量の起源

- ❖ K中間子を軸に ... 結果依存
- ❖ Φ 中間子を軸に
 - ❖ $p(\bar{p}, \Phi)\Phi$ 反応を用いた Φ 中間子原子核探索実験・前方KK運動量分布
 - ❖ $p(\pi, n)\Phi$ 反応を素過程として用いた低運動量 Φ 中間子に特化した原子核中の

我々が展開してゆくべき K, ϕ meson physics

- ❖ K中間子原子核探索実験 J-PARC E15 (on going!)
anti-K N の相互作用の明確な答えを出す
- ❖ 原子核中で生成された $\phi \rightarrow ee$ 測定 J-PARC E16 (on going!)
- ❖ ϕ 中間子原子核生成 探索実験 J-PARC LoI
- ❖ 原子核中で生成された $\phi \rightarrow \mu\mu$ 測定
コンセプトアルデザイン進行中
Bremsstrahlungは無視出来る！

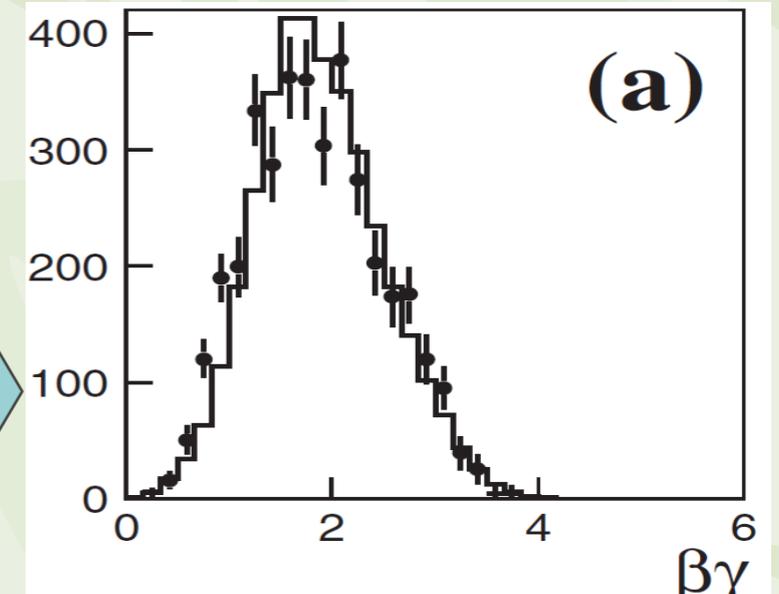
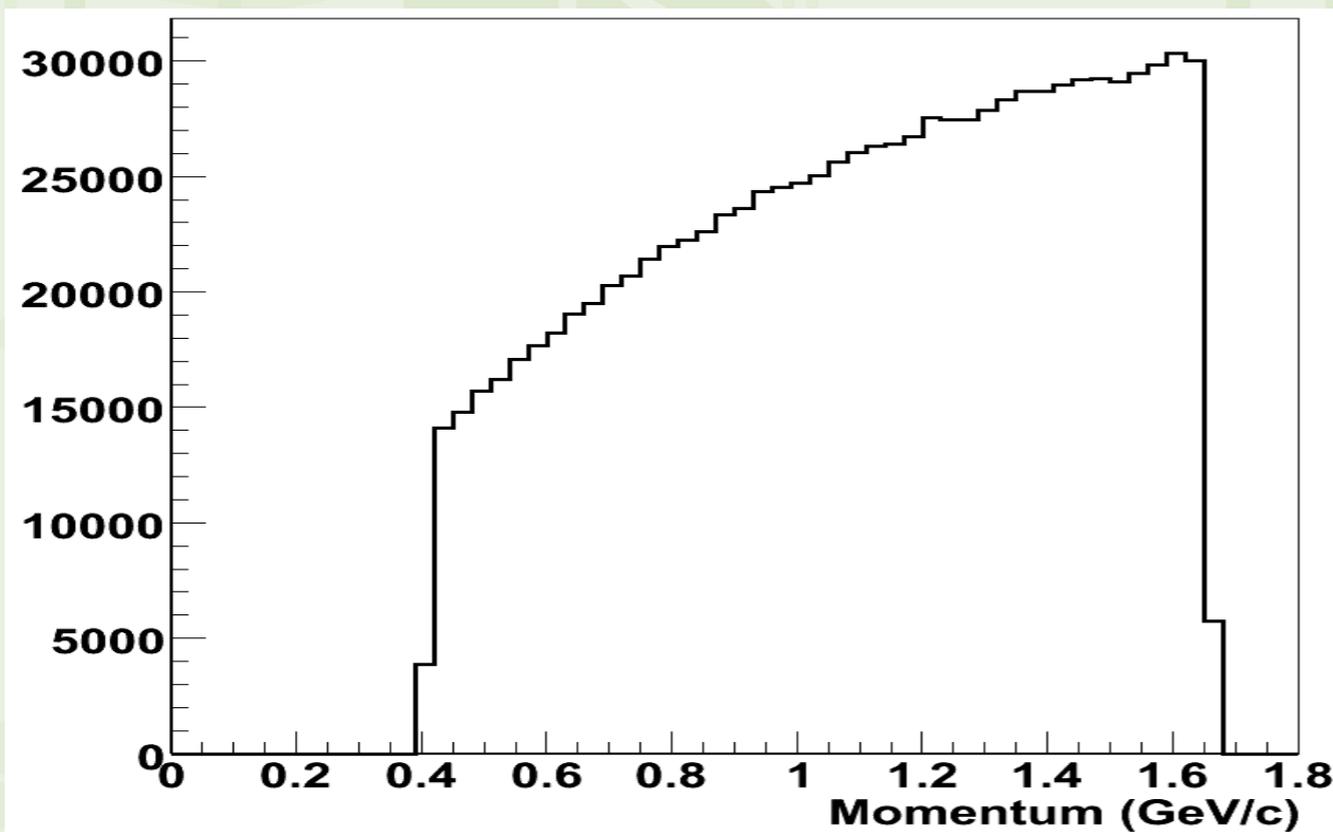
$$\phi \rightarrow \mu \mu$$

Bremssは無視出来る！

❖ π 中間子ビームを用いた ϕ 中間子生成

❖ 素過程生成断面積 $\sim 20\mu\text{b}$

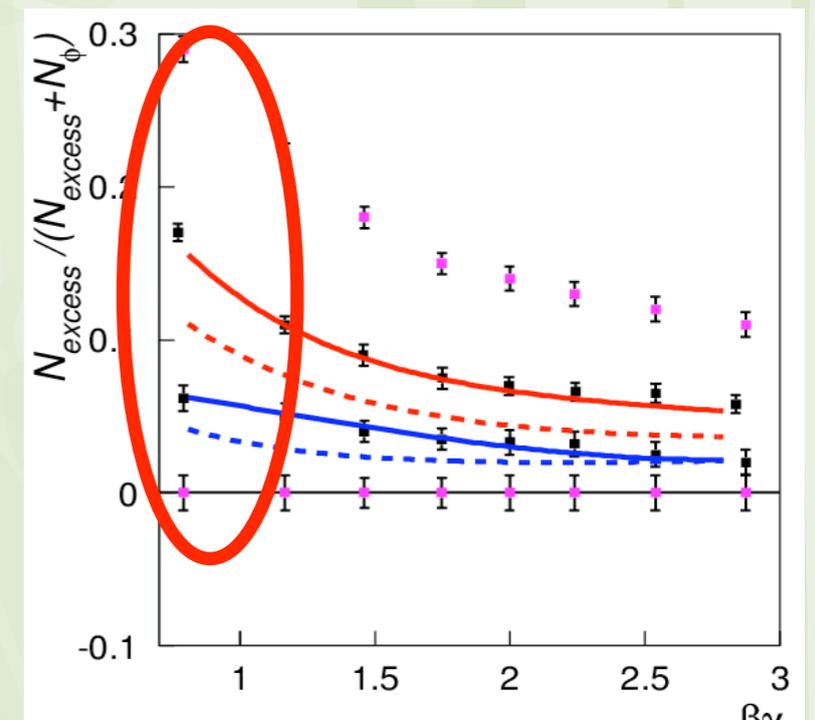
❖ 生成 ϕ 中間子運動量分布



ϕ mass shift を見た
KEK-E325 の $\beta\gamma$ 分布

❖ ϕ 中間子からのレプトン対生成測定から、効率的に mass shift の情報が得られる

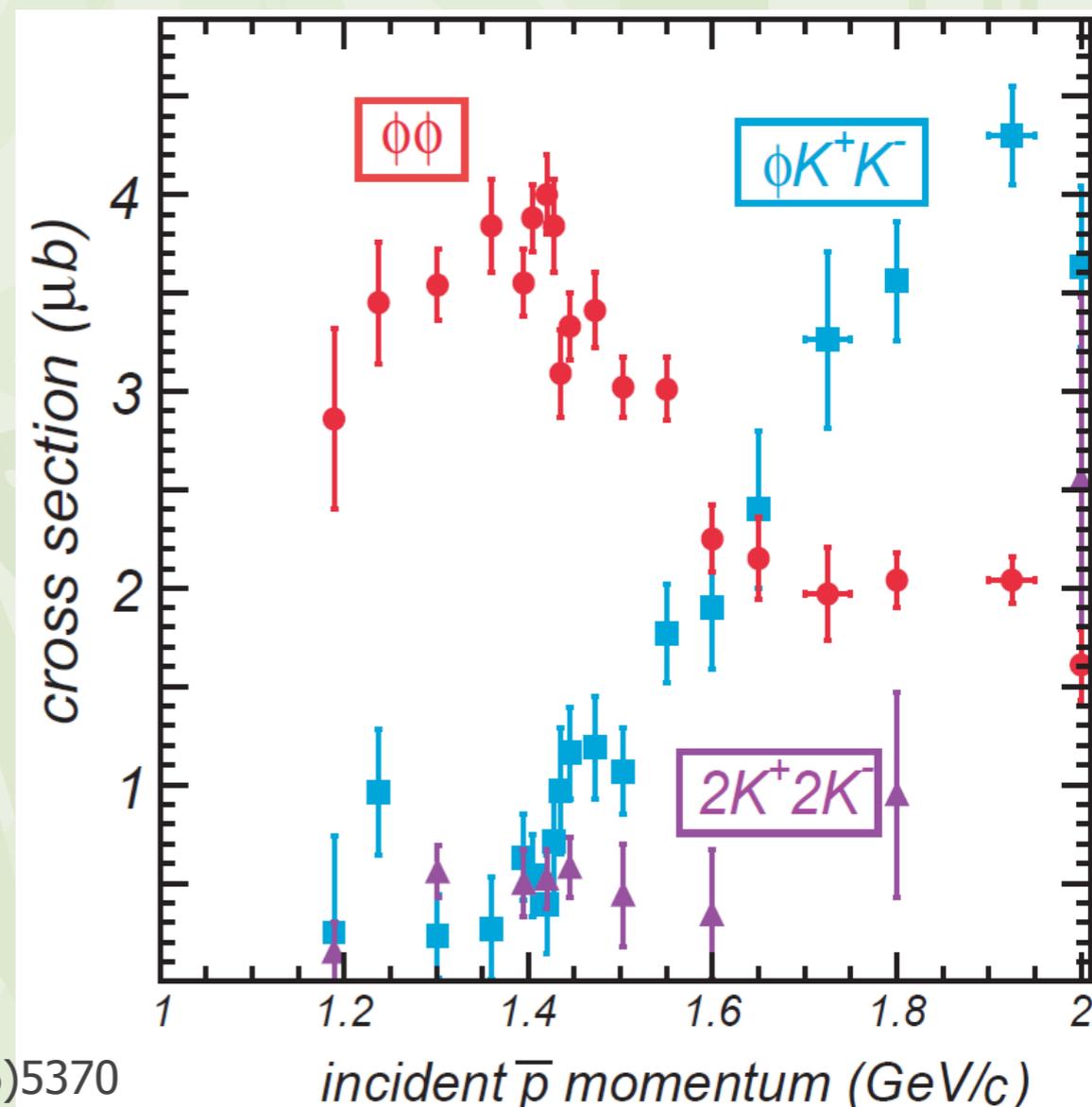
❖ 10分の一の生成断面積は10倍の標的厚でカバー： $\phi \rightarrow \mu\mu$ 測定も一つの道。



Φ production via \bar{p} beam

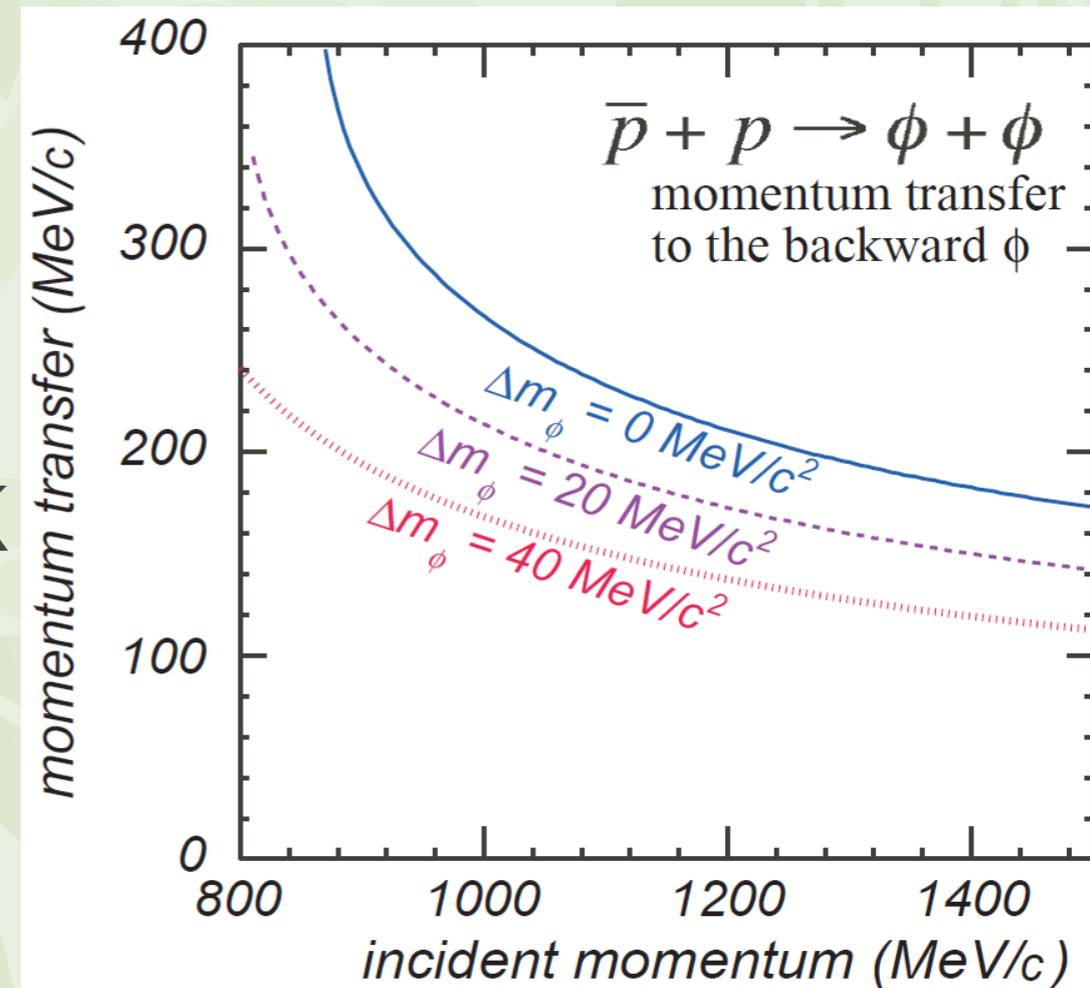
- ❖ $\bar{p}+p \rightarrow \Phi\Phi$ measurement in 1.2-2.0 GeV/c at CERN LEAR (originally exotic particle search)
- ❖ OZI rule broken process
 - ❖ total cross section of $\bar{p}+p \rightarrow \Phi\Phi$ **as large as** $\sim 4 \mu\text{b}$ @ 1.3 GeV/c
 - ❖ $\Phi\Phi$ dominant up to \bar{p} at 1.4 GeV/c
- ❖ this means ...
 - ❖ \bar{p} beam @ 1.3 GeV/c
 - ❖ $\Phi\Phi$ is more than 90 %

$\bar{p}+p \rightarrow \Phi\Phi$ reaction for Φ production channel



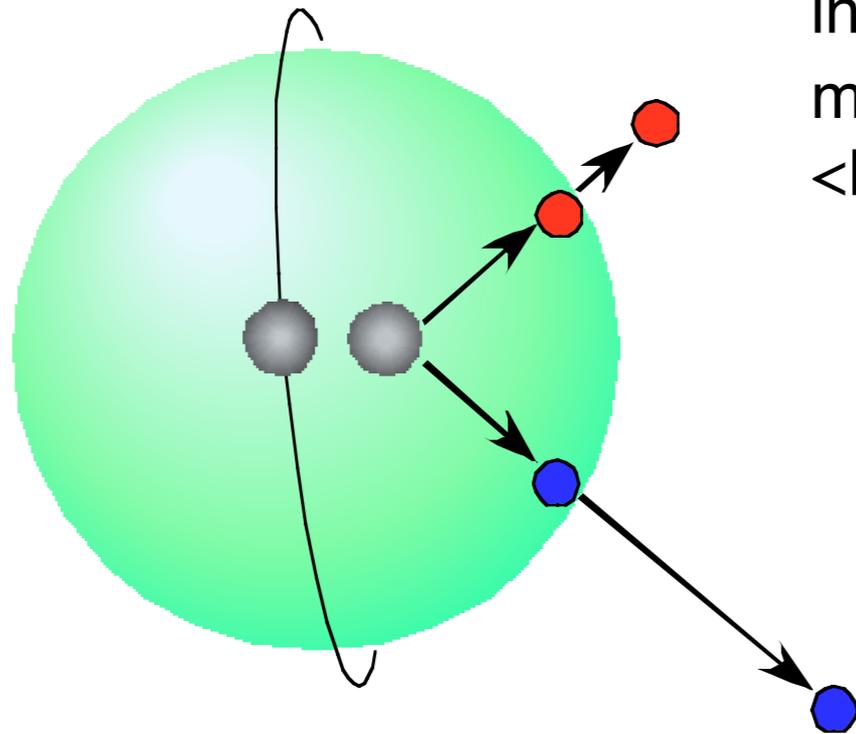
Bound state search

- ❖ $\bar{p} + p \rightarrow \phi\phi$ reaction
- ❖ momentum transfer by \bar{p} at 1.3 GeV/c : $\sim 200 \text{ MeV/c}$
(ϕ momentum relative to nucleus)
- ❖ smaller than Λ hypernuclear formation via (π^+, K^+) reaction
- ❖ Experiment
- ❖ Missing mass by forward $\phi \rightarrow KK$
- ❖ backward ϕ tag by $K^+\Lambda$ decay

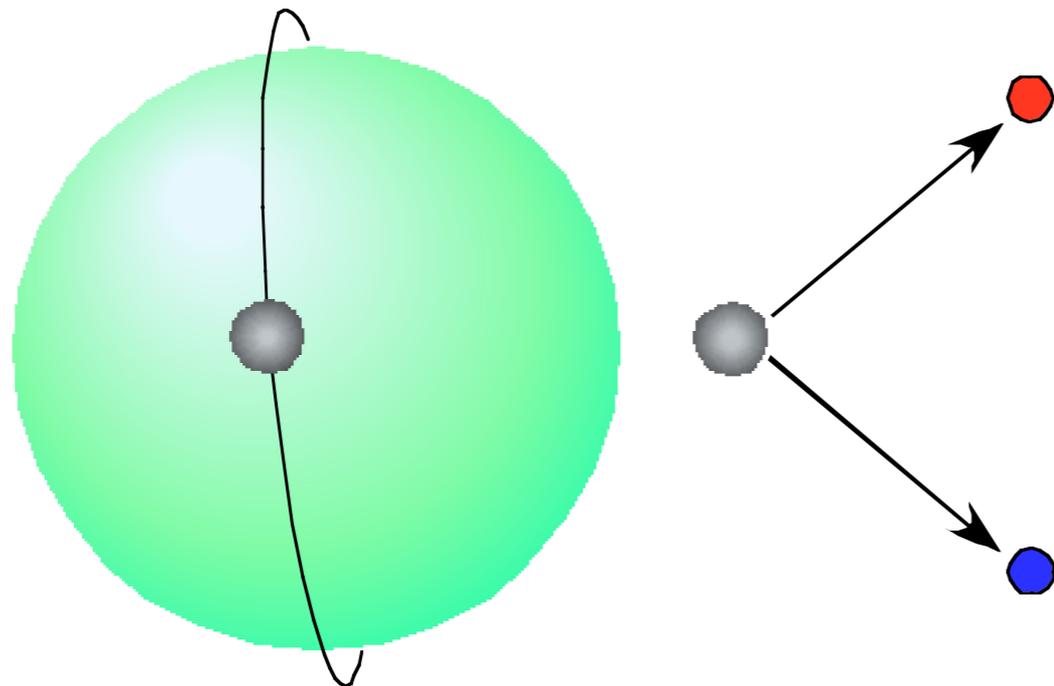


- *All the particles marked by strangeness*
- *Backward ϕ is ensured to be in a nucleus*

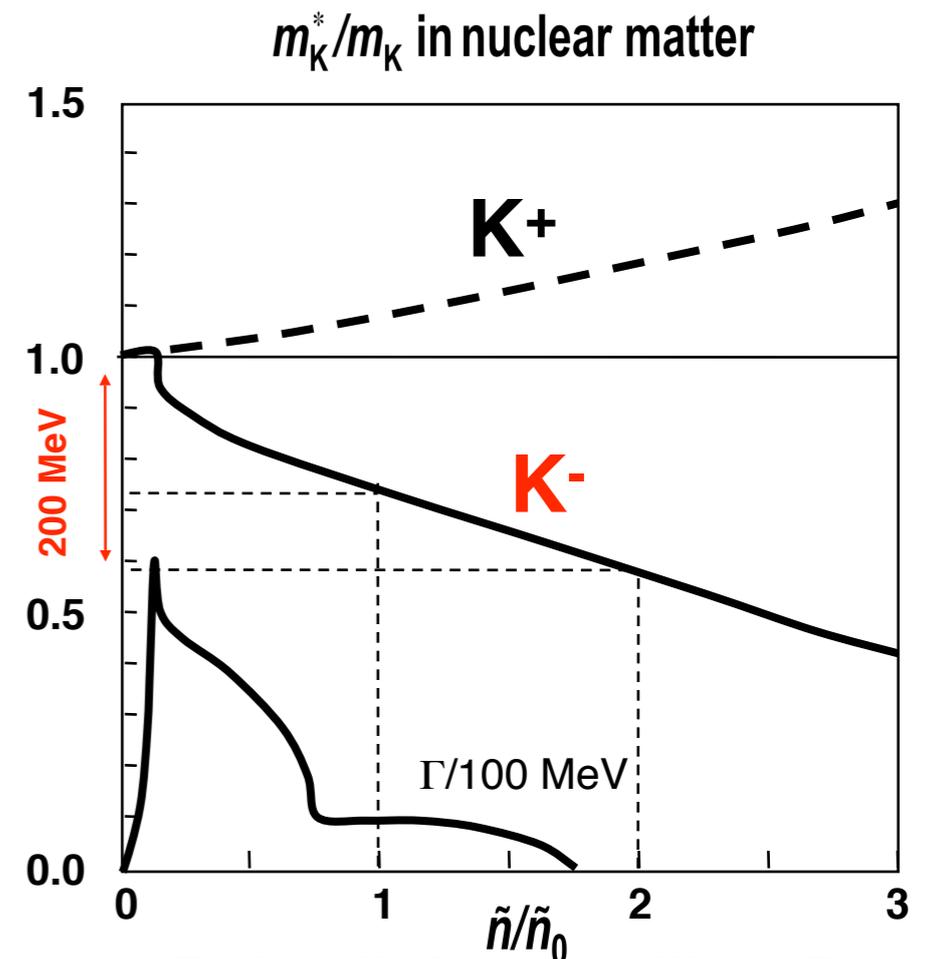
KK momentum distribution ?



invariant mass $< m_\phi$
 missing mass $< E_{th}$
 $\langle P_{K^-} \rangle < \langle P_{K^+} \rangle$



invariant mass $= m_\phi$
 missing mass $< E_{th}$
 $\langle P_{K^-} \rangle \approx \langle P_{K^+} \rangle$

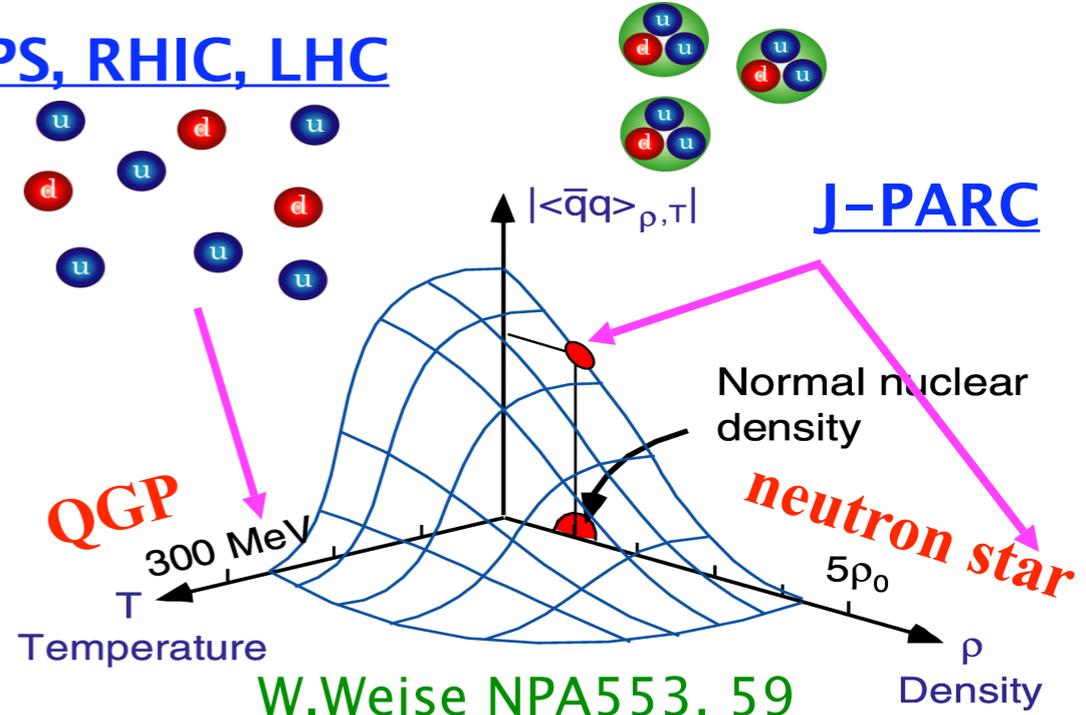


T. Waas, N. Kaiser & W. Weise, Phys. Lett. **B379** (1996) 34.

~ 次世代汎用原子核研究用分光器 ~

SPS, RHIC, LHC

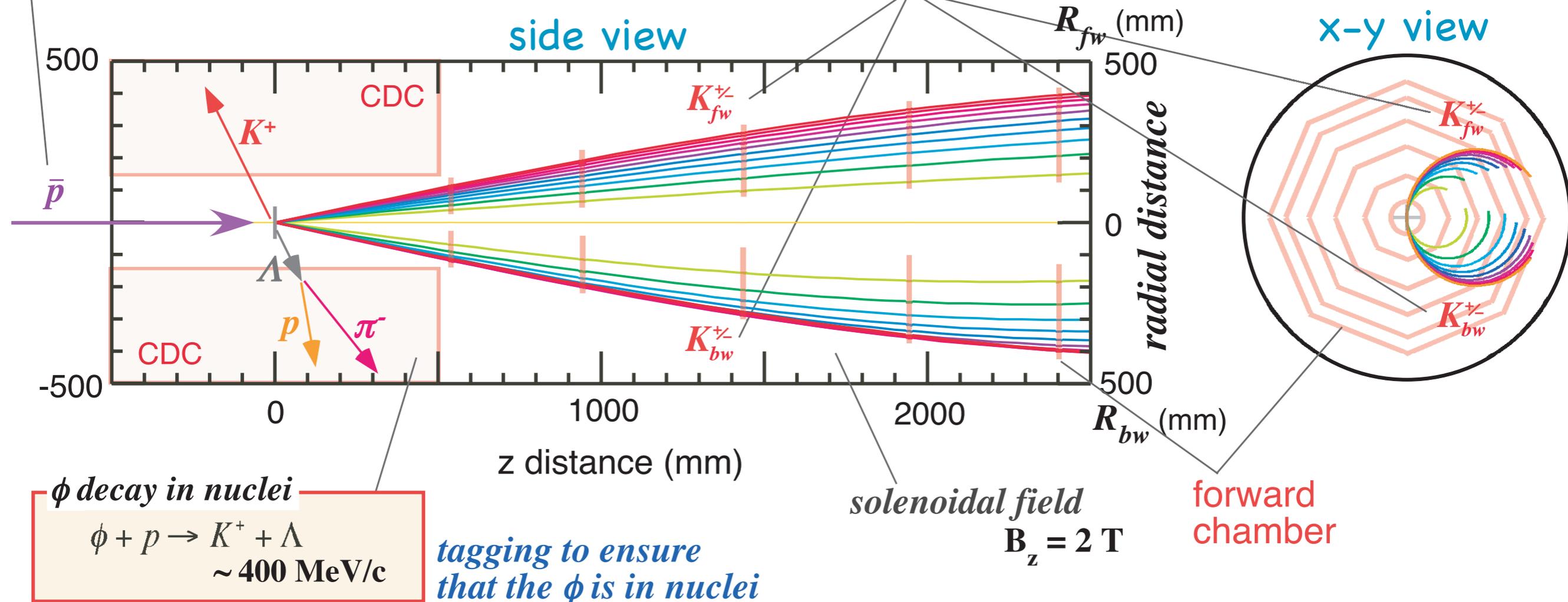
J-PARC



primary reaction
 $\bar{p} + p \rightarrow \phi + \phi$
 $\bar{p} @ 1.3 \text{ GeV}/c$

$\phi \rightarrow K^+ + K^-$
 $\phi @ 1.2 \text{ GeV}/c \ B_z = 2 \text{ T}$
 $\Delta \cos \theta_{\text{CM}} = 0.1 \text{ step}$

spectroscopy of the forward ϕ



ϕ decay in nuclei
 $\phi + p \rightarrow K^+ + \Lambda$
 $\sim 400 \text{ MeV}/c$

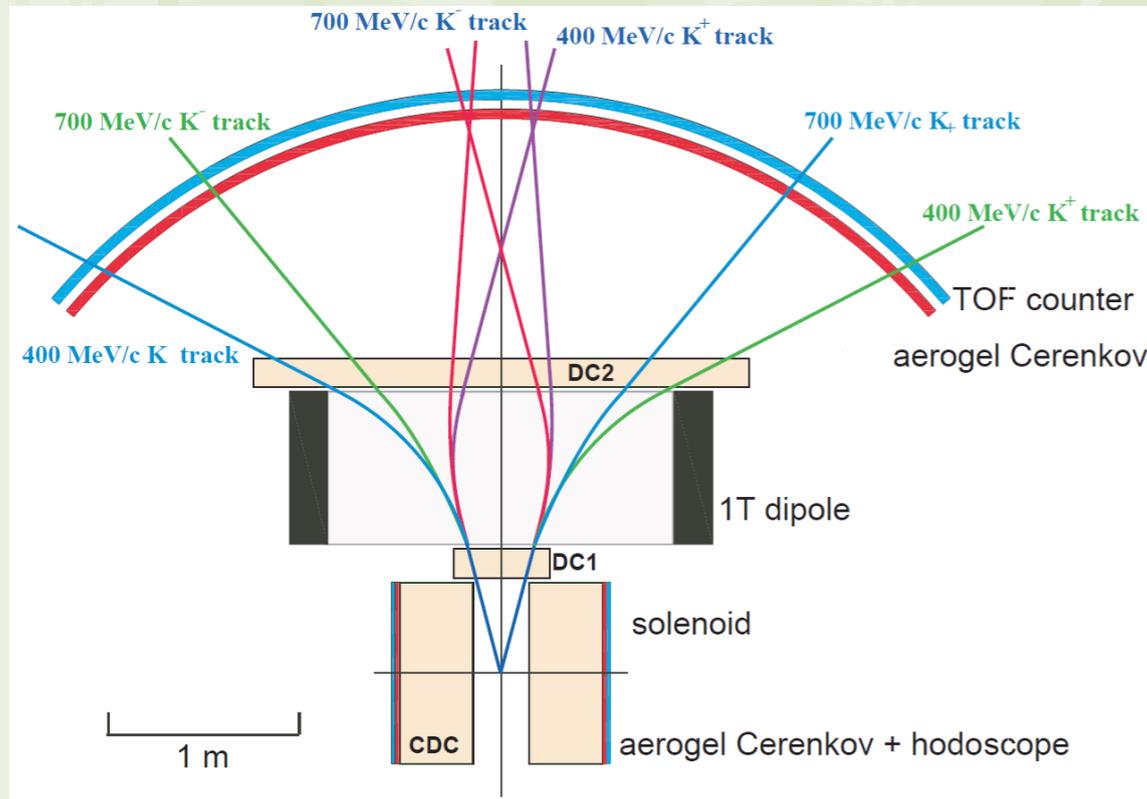
tagging to ensure that the ϕ is in nuclei

solenoidal field $B_z = 2 \text{ T}$

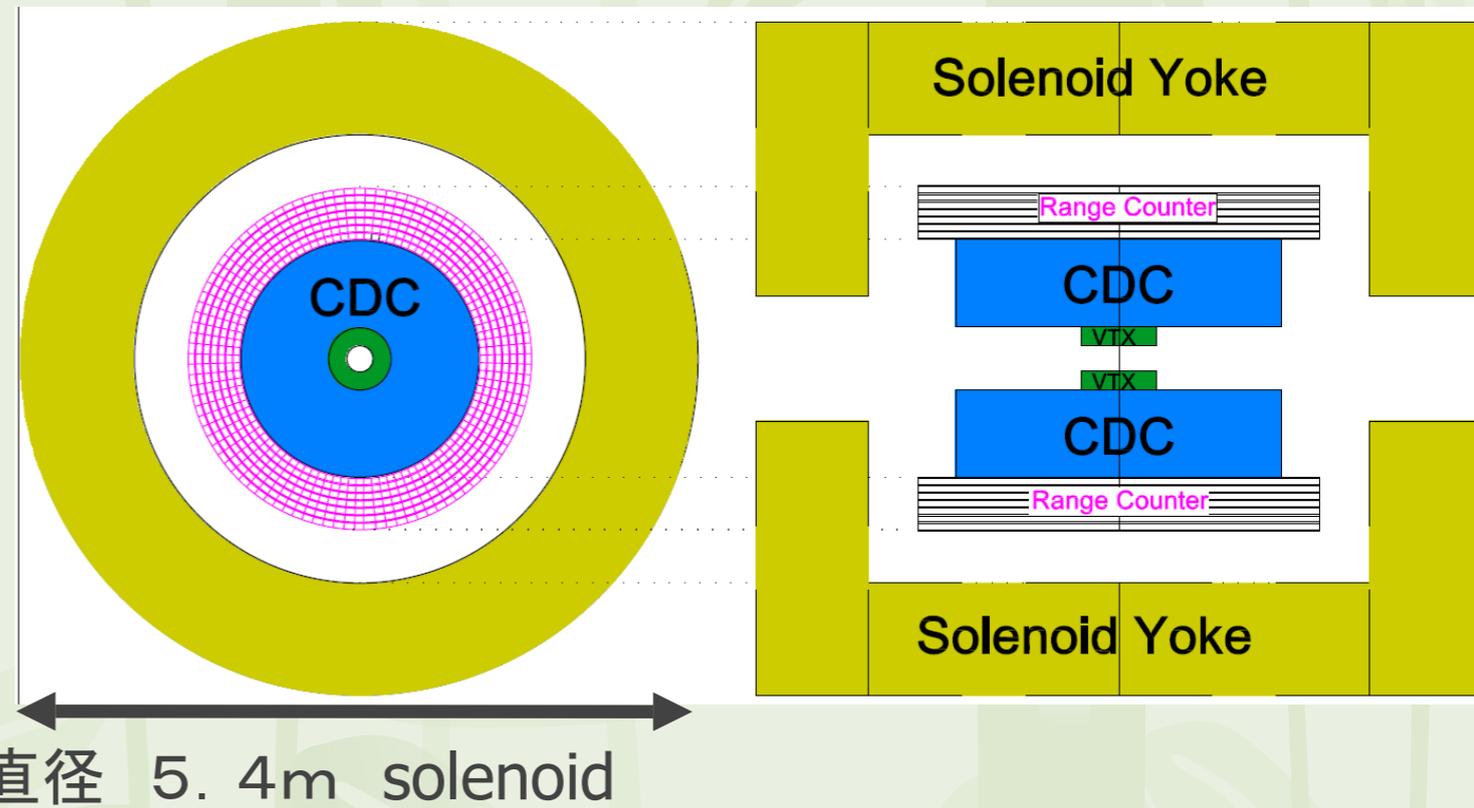
forward chamber

ハドロン実験プラットフォーム

Φ 中間子原子核生成実験



$\Phi \rightarrow \mu\mu$ 測定実験



機能をモジュール化したハドロン実験プラットフォーム

実験に併せてコンポーネントを組み合わせる

前方:

両アーム・中心高分解能・中性子

中心: CDC

レンジカウンター・EM cal.

将来？

ホール拡張：K1.8 & K1.1 小回りの利く研究・人材育成

大型Legoスペクトロメータ：ハドロン

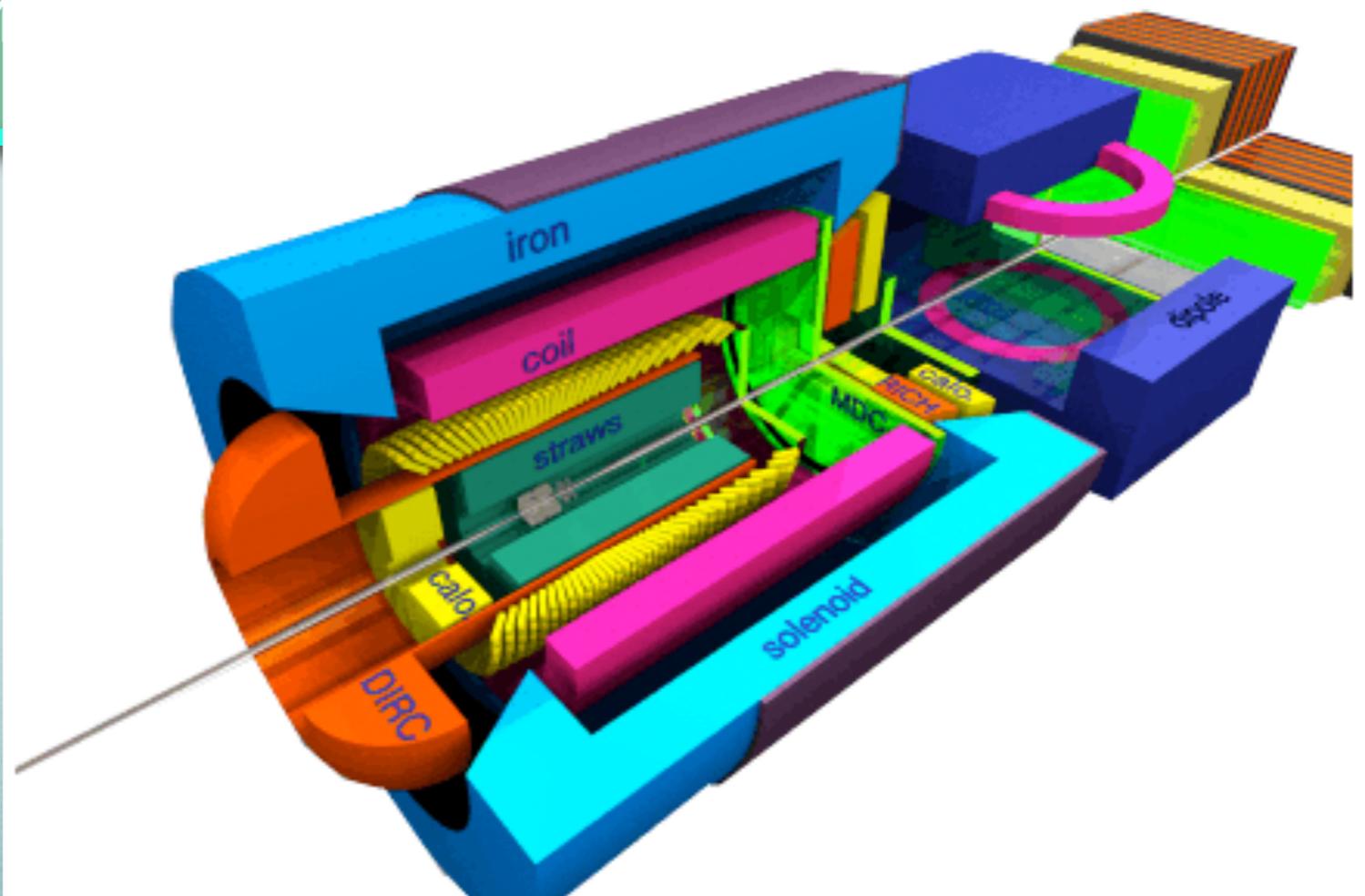
全て測る・モジュール化する・自在に変形する

PANDA?

高分解能：大

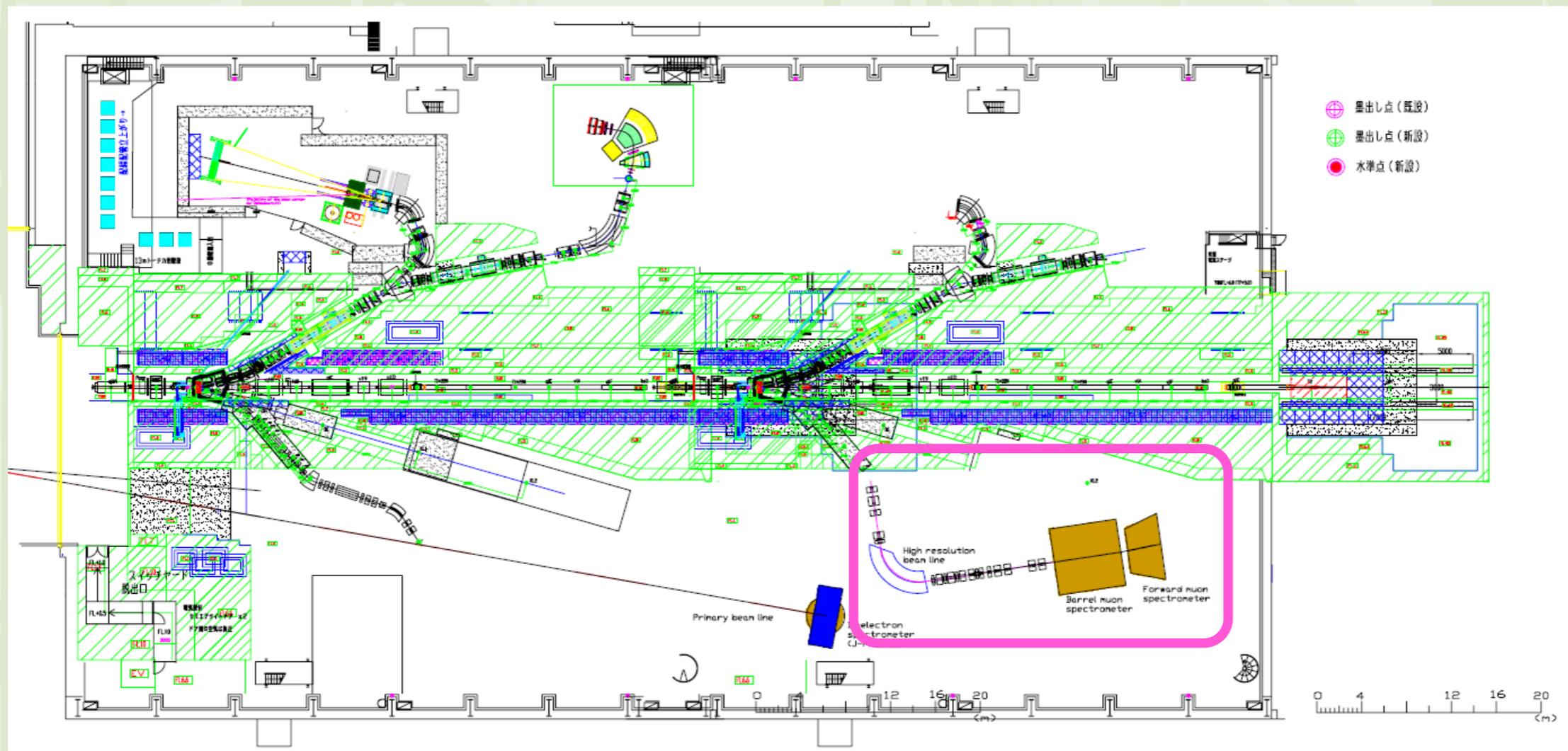
分解能に特

The Panda Detector (as proposed in the GSI CDR from Nov. 2001)



実験実施場所

❖ J-PARC 素粒子原子核実験施設 ハドロンホール



ハドロンホール内に専用ビームライン および 大型測定器 の建設を行い
Φ 中間子に関する物理の決着をつける

Try to Establish
RIKEN J-PARC
Center

Sub-Nuclear System RD

Hadron Physics

Hadron experiment Platform

Large Scale Detector at J-PARC

Particle Physics

New Muon Source development

New generation Slow μ • RIKEN-RAL

*Ultra-low emittance muon beam
to realize $g-2$: high dens. & low temp. & laser*

物質の質量の起 源に迫りたい

- 既に認められている実験
- J-PARCへの積極的コミット

Thank You!

Sub-Nuclear System RD

Hadron Physics • Confinement

Origin of Hadron Mass

- 99.95% of the Material Mass is from Nuclei
- Nuclei consist of proton and neutron
- quark mass is only 1% of proton and neutron

Where other 99% comes from ?

Is Nambu's Theory correct?

Major subject at J-PARC

実験的検証：真空の性質を変えて質量を測る

素粒子の質量の変化を検出する

原子核物質内の中間子の質量/崩壊幅などの変化が量子色力学をもとに予言されている。

- 通常原子核密度での質量の変化

本研究の前身：KEKで測定に成功

From QCD to Nuclei

- QCDからハドロンへ

 - QCDの課題

 - 非摂動QCD：カラー閉じ込め、真空の構造、 (T, μ, m_q) 相図

 - ↓

 - ハドロン 複雑な真空を反映するノーマルモード

 - 多様な対称性とその破れ

 - 場の理論の (相対論的) 多体 (複合粒子) 問題

 - 基底状態から励起状態へ

 - エキゾティック! 構成クォーク (量子数・自由度) の数をカウント

- ハドロンから原子核

 - 有限量子多体系

 - 核子、ハイペロン、メソン、励起状態 を含む多彩な原子核

 - 一般化核力 \Leftrightarrow QCD

 - 核内のクォーク自由度の現れ

素粒子物性部門

ハドロン物理

ハドロン実験プラットフォーム

実験を選ばず、いずれ絶対に必要
最優先課題・ハドロン物理の鍵

素粒子物理

まずはミュオン源開発

ミュオン源が死活問題・科研費開発優先

◆ Energy-dependent K^- -“pp” optical potential

$$U_{K^-pp}^{\text{opt.}}(r) = (V_0 + i W_0 \underbrace{f(E)}_{\substack{\uparrow \\ \text{phase space factor}}}) \exp [-(r/b)^2]$$

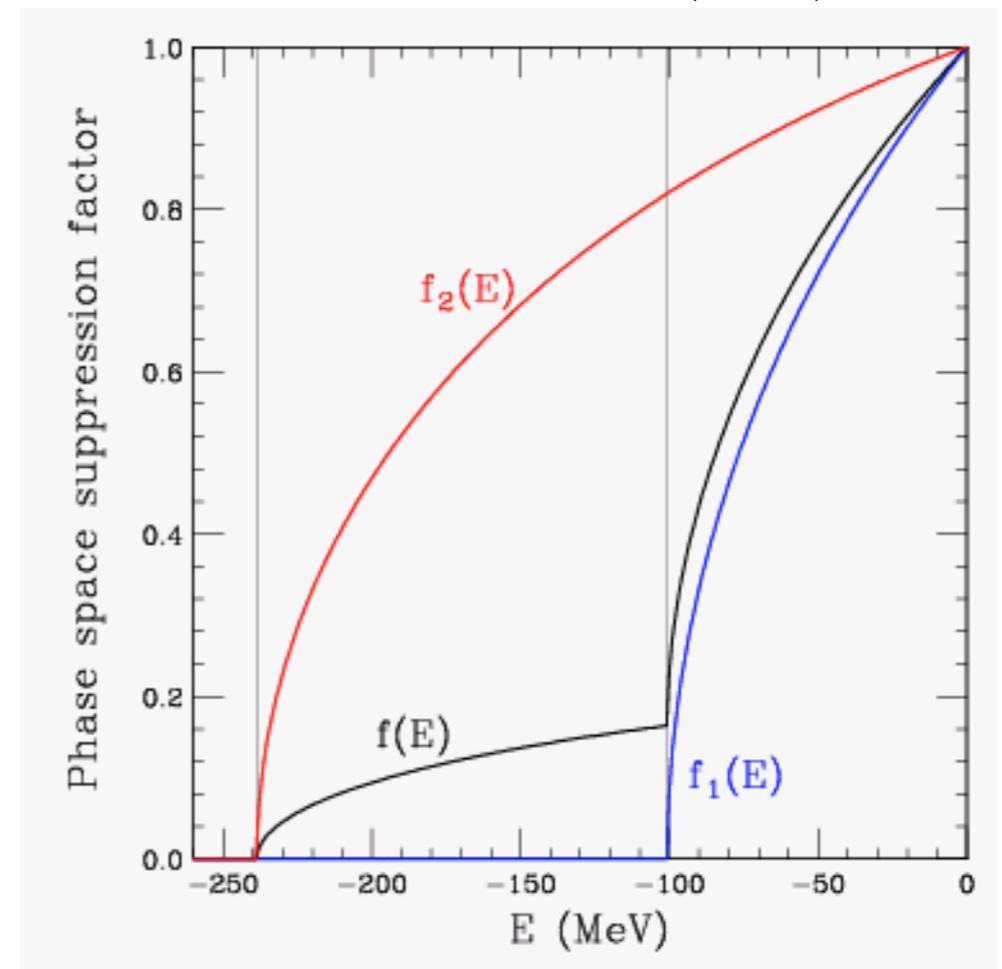
Mares, Friedman, Gal,
PLB606 (2005) 295.

$$\mathbf{f(E) = 0.8 f_1(E) + 0.2 f_2(E)}$$

- $\mathbf{f_1(E) : 1\text{-nucleon } K^- \text{ absorption}}$



- $\mathbf{f_2(E) : 2\text{-nucleon } K^- \text{ absorption}}$



The Green's function is obtained by solving Klein-Gordon eq.;

$$\{(\omega - V_{\text{Coul.}}(\mathbf{r}))^2 + \nabla^2 - \mu^2 - 2\mu \underbrace{U_{K^-pp}^{\text{opt.}}(\mathbf{r})}\} G(\omega; \mathbf{r}, \mathbf{r}') = \delta^3(\mathbf{r} - \mathbf{r}')$$

◆ Parameters of the employed optical potentials

	Potentials	V_0 (MeV)	W_0 (MeV)	B.E. (MeV)	Γ (MeV)
(a)	SGM	-350	-165	72	115
(b)	YA	-300	-93	51	68
(c)	DHW	-240	-100	22	69
(d)	FINUDA	-405	-300	116	67

* $b = 1.09$ fm for all potentials;

The shrinking effect of the core nucleus is small.

◆ Employed K^- - pp optical potentials

