

# 物質質量の起源を実験的に探る

理研・岩崎先端中間子研究室

佐久間 史典

- I. 物理の動機
- II. 通常原子核密度での実験 [KEK-PS E325]
- III. 高密度状態(?)での実験 [J-PARC E15]

# I. 物理の動機 物質の質量

- 物質の構成要素:

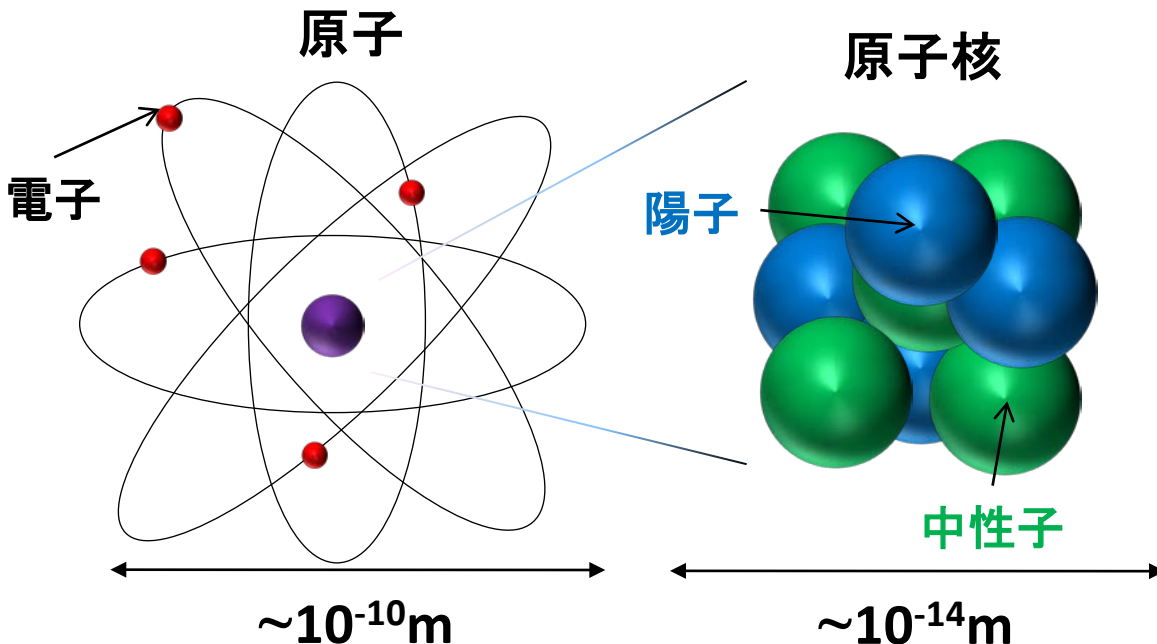
分子 → 原子 → 原子核+電子

→ 核子[陽子/中性子]

- 物質の質量の99.9%以上は、原子核の質量

電子:  $\sim 0.5\text{MeV}$  ( $\sim 9.1 \times 10^{-31}\text{kg}$ )

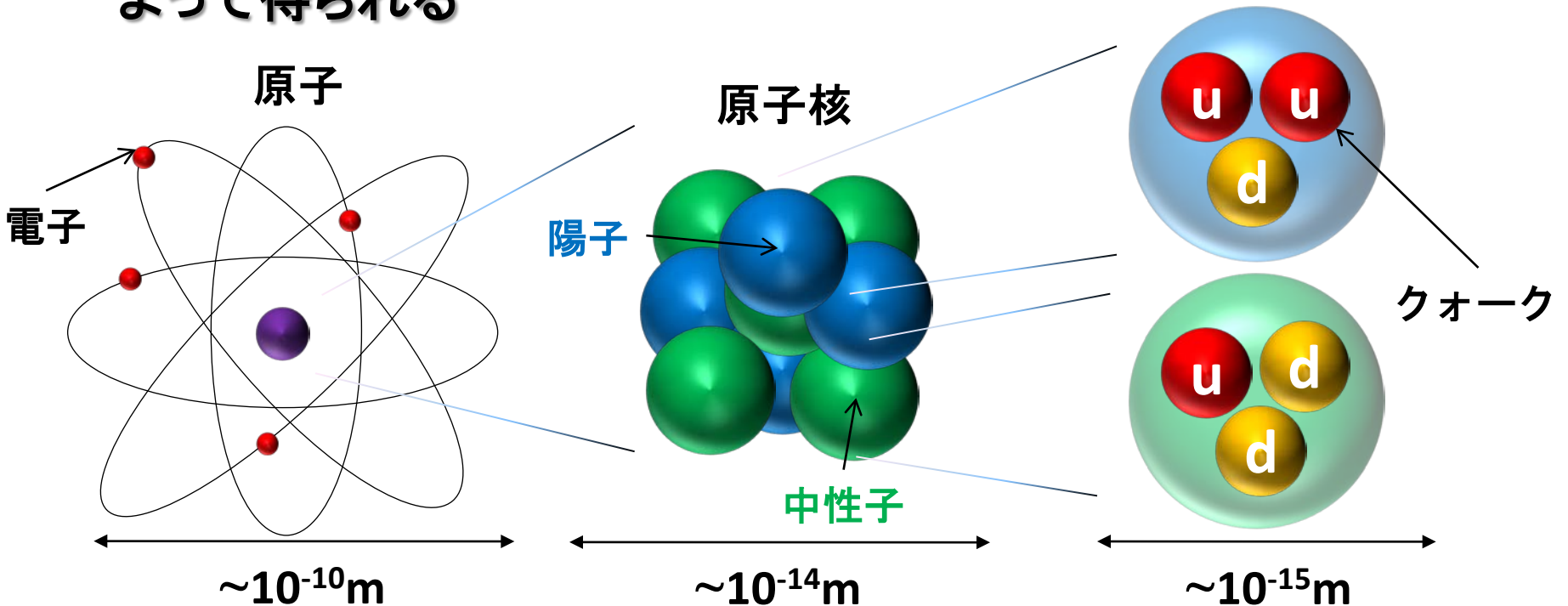
核子[陽子/中性子]:  $\sim 940\text{MeV}$  ( $\sim 1.7 \times 10^{-27}\text{kg}$ )



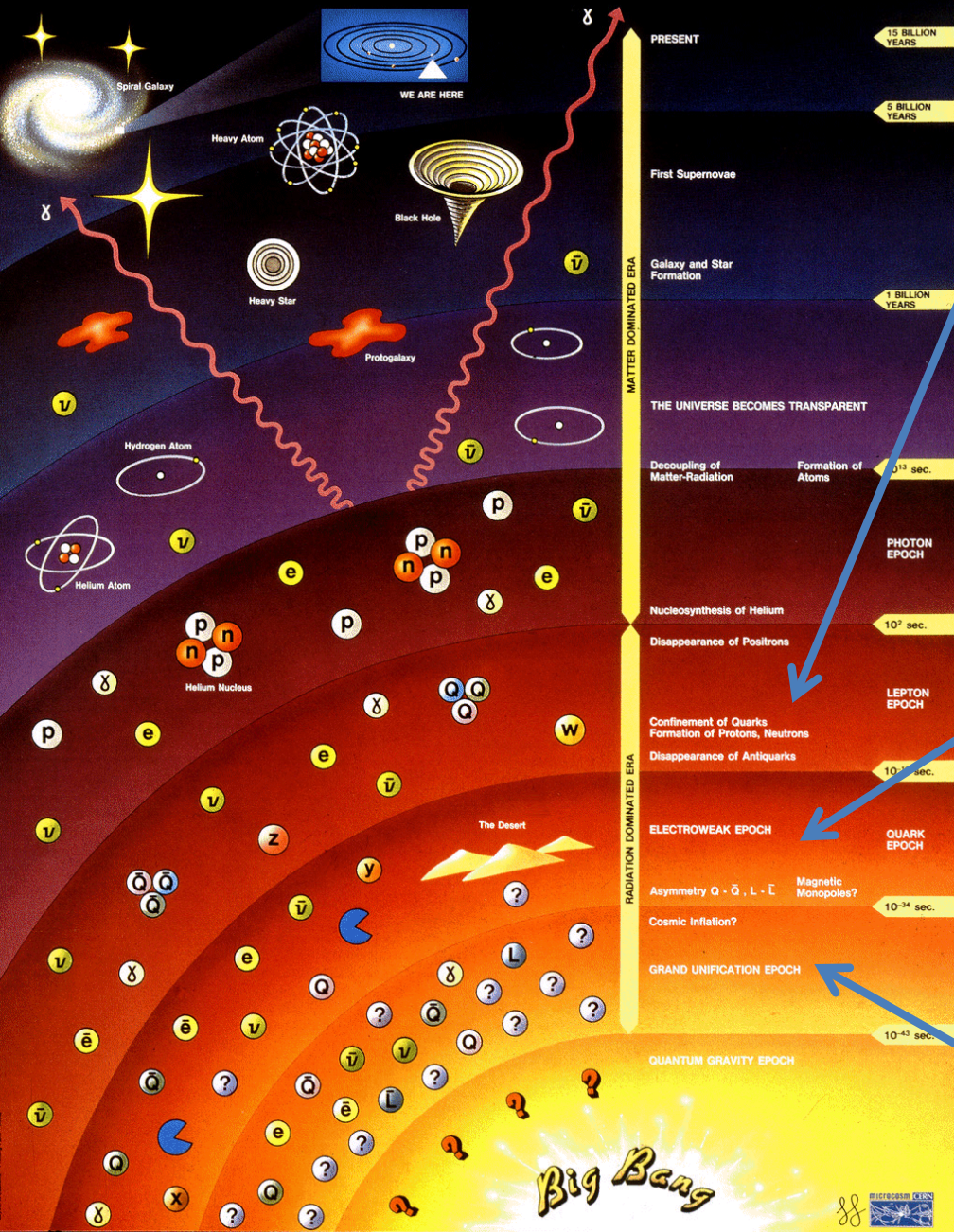
- 核子は3つのクォークから構成される
- クォークは核子の1/3の質量を持つ?



- クォークの”裸”の質量は~3MeVしかない!(ヒッグス機構による)
- 残り~99%は強い相互作用(カイラル対称性の自発的破れ)によって得られる



# History of the Universe



# 質量の起源

## クォーク質量 ~ 300 MeV

- カイラル対称性の破れ (クォーク凝縮)
- 強い相互作用がもたらす、“クォーク閉じこめ”による核子・中間子の生成

*我々の目指す物理*

## クォーク質量 ~ 3 MeV

- 電弱対称性の破れ(ヒッグス機構)

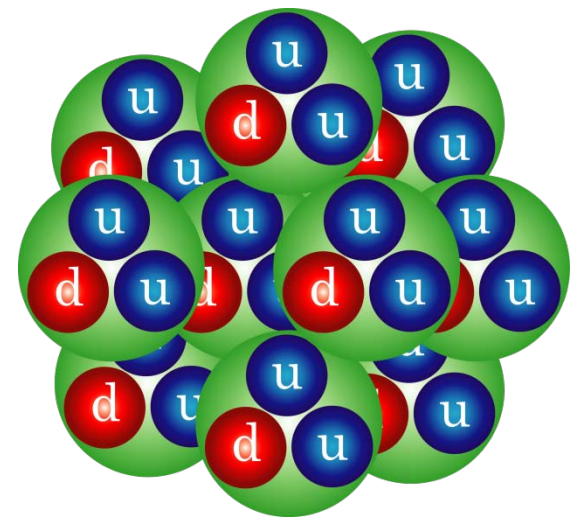
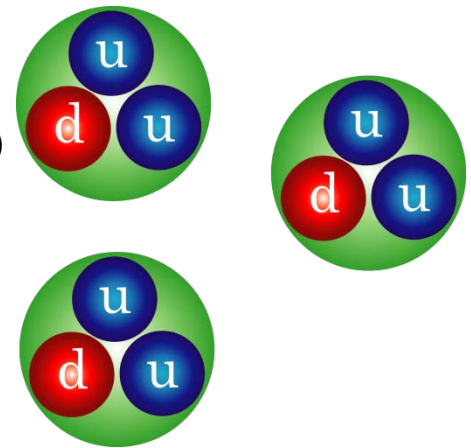
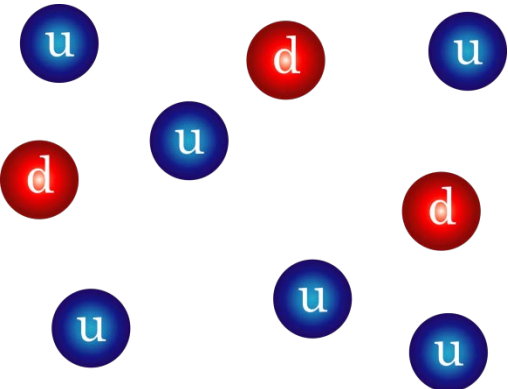
*LHCなどでのヒッグス粒子探索*

## クォーク質量 0 MeV

- 対称性の破れは無い

# QCD質量は周りの環境によって変化する!

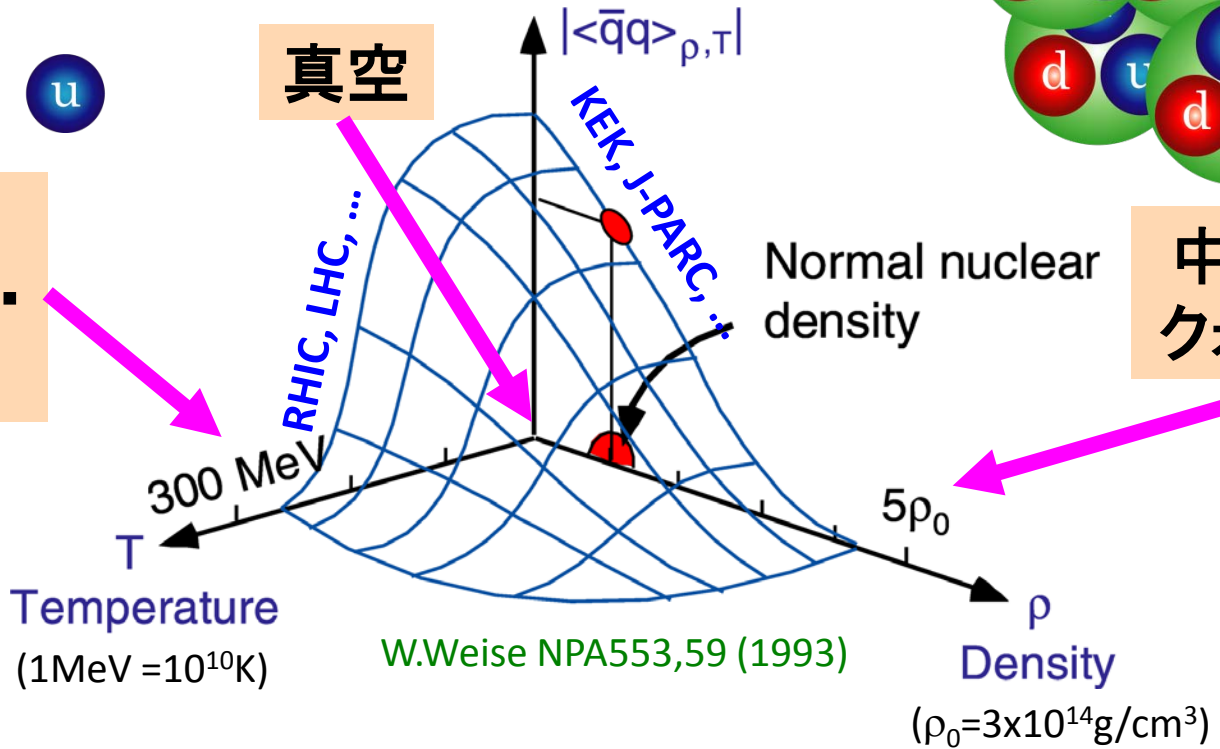
$\langle \bar{q}q \rangle$  =カイラル対称性の  
 オーダーパラメータ  
 $\propto$  (クォークの有効質量)



クォーク・  
 グルーオン・  
 プラズマ

真空

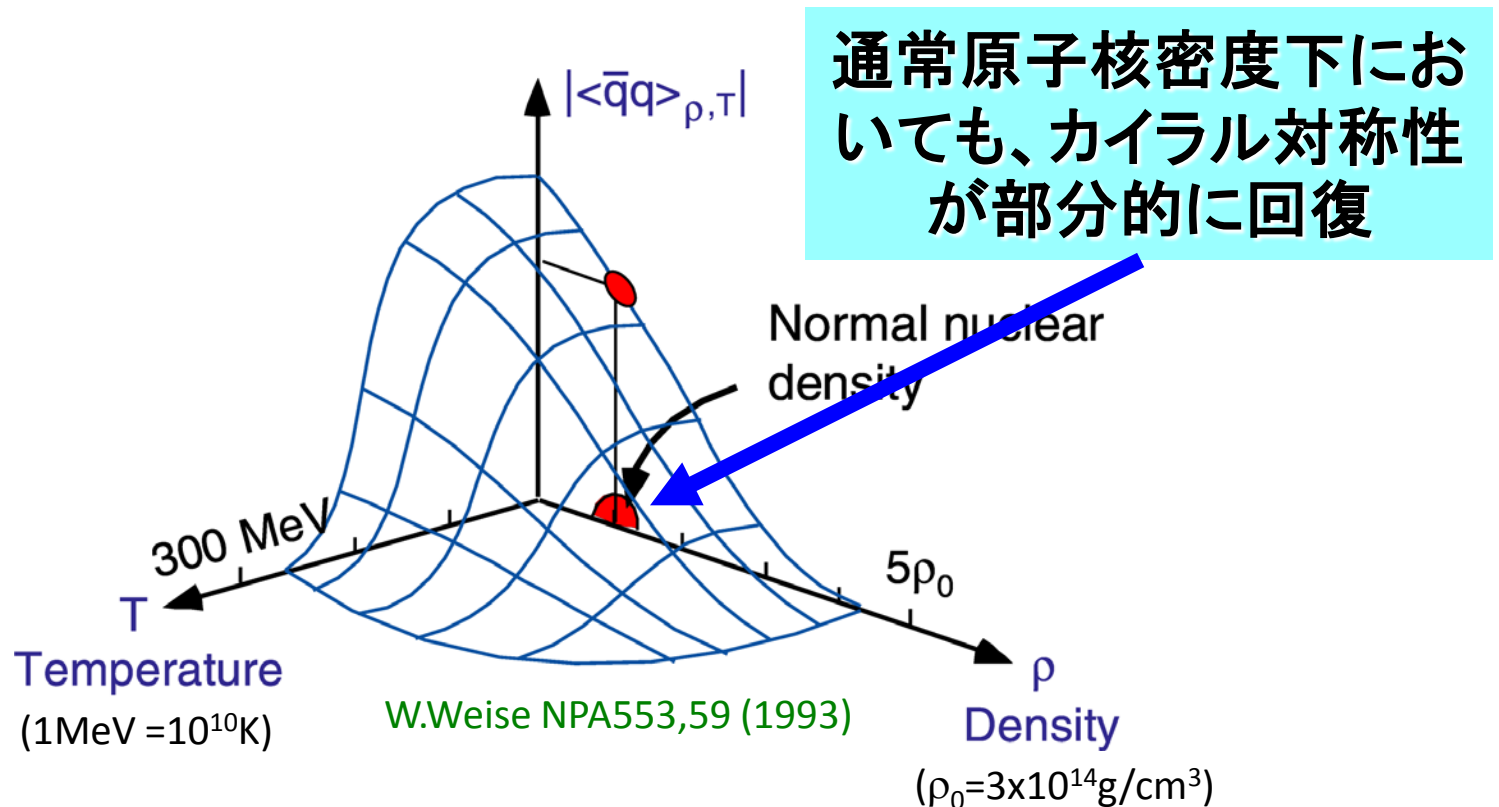
中性子星  
 クォーク星



# II. 通常原子核密度 での実験

KEK-PS E325

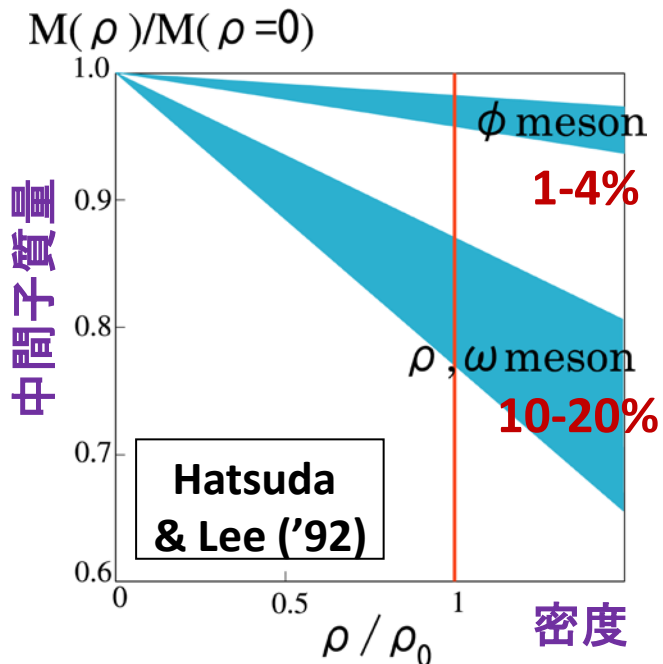
原子核密度効果によるカイラル対称性回復減少の研究



# ねらう物理

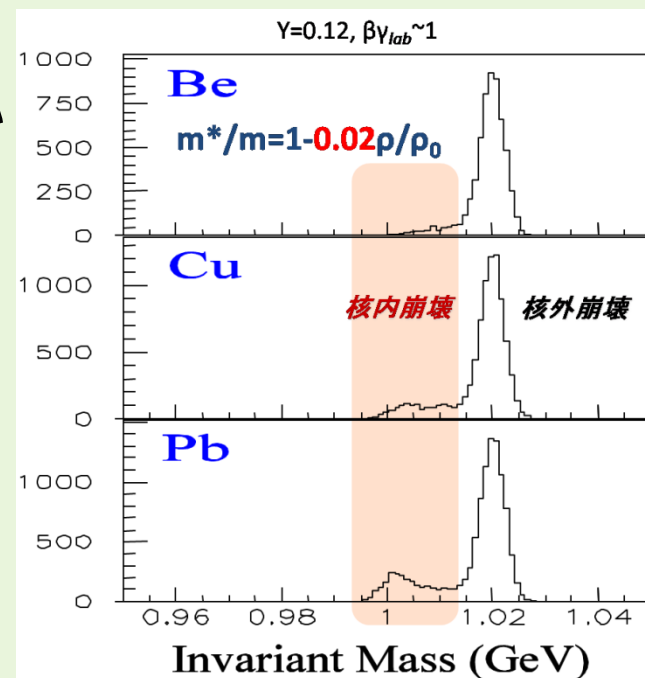
QCDに基づく理論計算：  
ベクトル中間子( $\rho, \omega, \phi$ )の質量スペクトラム  
が密度に相関して変化する

原子核中でのベクトル中間子質量を  
計ることによって、  
クォークの有効質量の変化を測定する



## Vector Meson, $\phi$

- 予想される質量変化はそれほど大きくない  
→ 20-40 MeV/c<sup>2</sup> @  $\rho = \rho_0$
- 狭い崩壊幅 ( $\Gamma = 4.3$  MeV/c<sup>2</sup>)  
→ 質量スペクトラムの変化に敏感
- 小さい崩壊Q値 ( $Q_{K+K^-} = 32$  MeV/c<sup>2</sup>)  
→  $\phi$ 又はKが核物質効果を受けること  
によって、崩壊比が変化する可能性



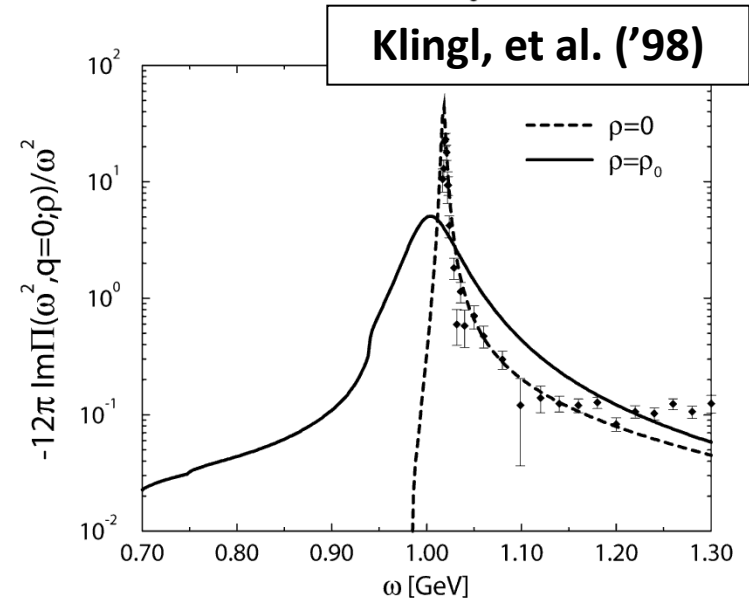
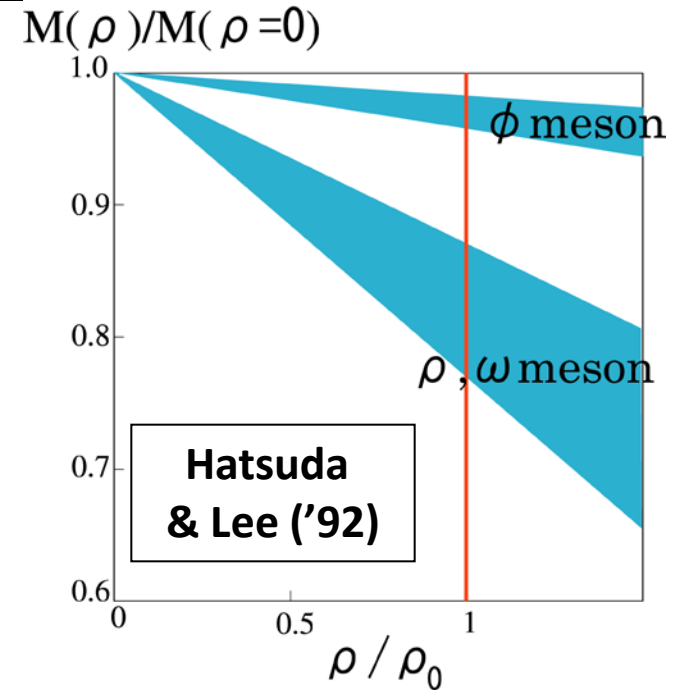
# 理論予想

## dropping mass

- Brown & Rho ('91)  
 $m^*/m=0.8$  ( $\rho=\rho_0$ )
- Hatsuda & Lee ('92)  
 $m^*/m=1-0.16\rho/\rho_0$  for  $\rho/\omega$   
 $m^*/m=1-0.03\rho/\rho_0$  for  $\phi$
- Muroya, Nakamura & Nonaka ('03)  
Lattice Calc.

## width broadening

- Klingl, Kaiser & Weise ('97&98)  
 $1\text{GeV}$  for  $\rho$ ,  $45\text{MeV}$  for  $\phi$  ( $\rho=\rho_0$ )
- Oset & Ramos ('01)  
 $22\text{MeV}$  for  $\phi$  ( $\rho=\rho_0$ )
- Cabrera & Vicente ('03)  
 $33\text{MeV}$  for  $\phi$  ( $\rho=\rho_0$ )





# 世の中の実験

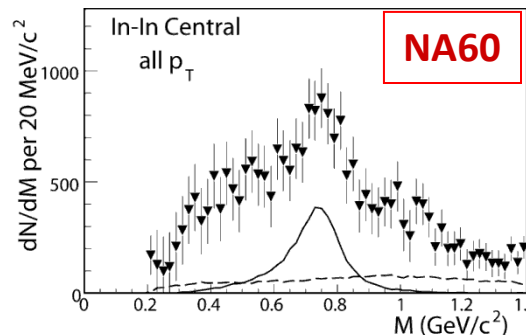
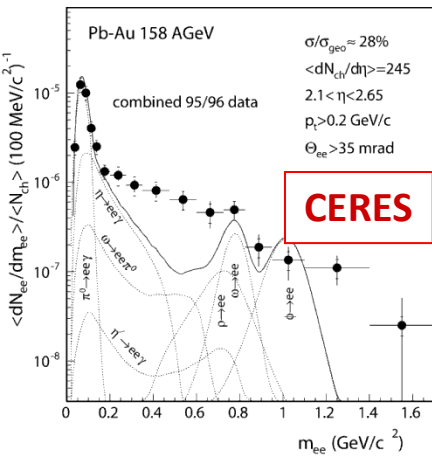
## in Hot matter

### ● CERES(NA45)@CERN-SPS ('93)

- Pb+Au 158A GeV
- $e^+e^-$
- $\rho$  broadening, no mass shift

### ● NA60@CERN-SPS ('06)

- In+In 158A GeV
- $\mu^+\mu^-$
- $\rho$  broadening, no mass shift



## in Cold matter

### ● LEPS@SPRING8 ('05)

- $\gamma+A$  1.5-2.4 GeV
- $K^+K^-$
- $\phi$  broadening

### ● CLAS@J-LAB ('07)

- $\gamma+A$  0.6-3.8 GeV
- $e^+e^-$
- $\rho$  broadening, no mass shift

### ● CBELSA/TAPS@ELSA ('05)

- $\gamma+A$  0.9-2.2 GeV
- $\gamma\gamma\gamma$
- $\omega$  broadening, no mass shift ???

# 実験の特徴

12GeV  $p + A \rightarrow \rho, \omega, \phi + X$   
Invariant Mass of  $e^+e^-$ ,  $K^+K^-$

- 原子核内で崩壊する確率が多い  
2GeV/c程度の遅いベクターメソンを測定
- primary proton beam  $\sim 10^9$  / spill
- 薄いターゲット:  
int. length: 0.2% / 0.05% (C / Cu)  
rad. length: 0.4% / 0.6% (C / Cu)

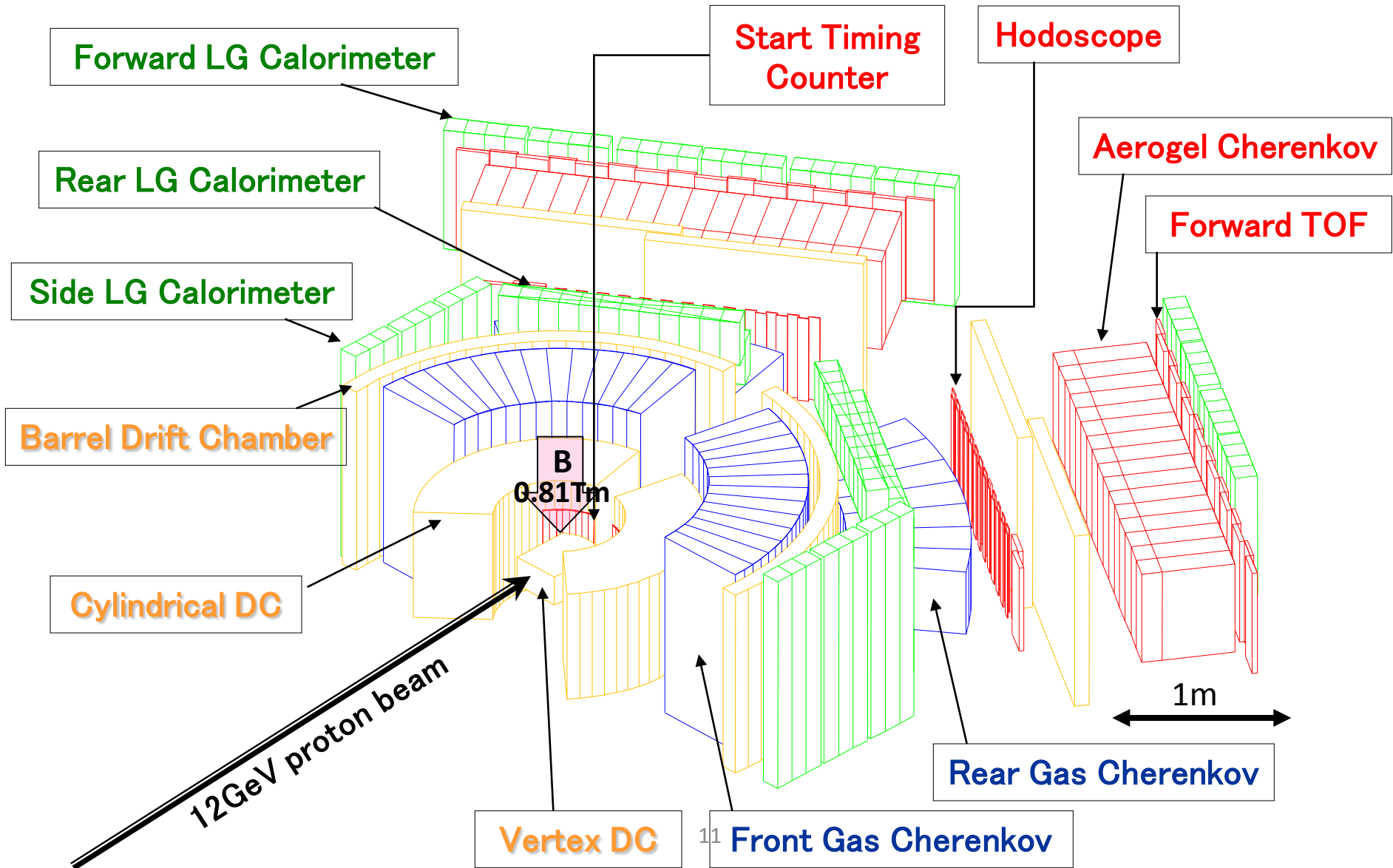
薄いターゲットと大強度ビームの組み合わせによって、 $\gamma$ -conversionからのbackgroundを減らすことが可能になる

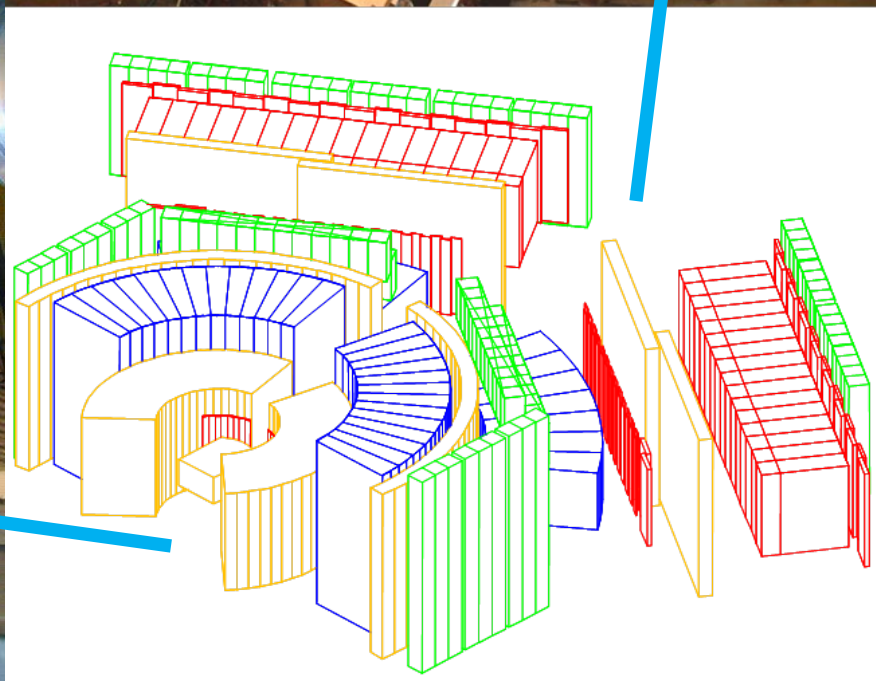
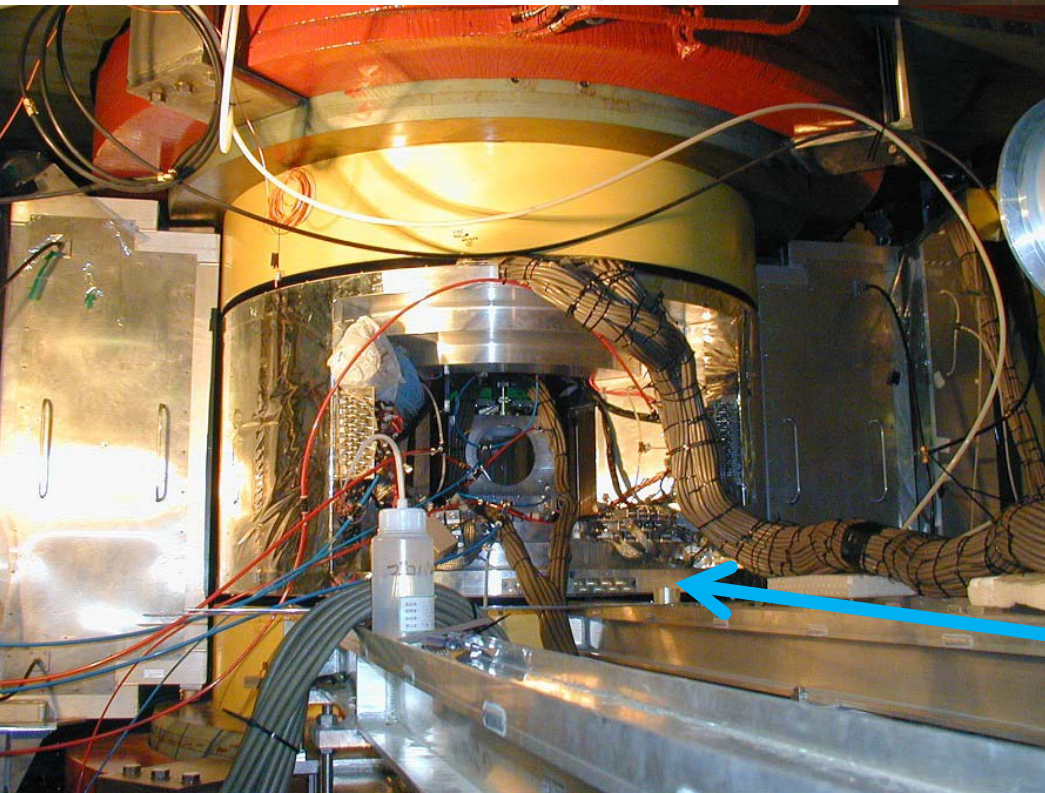
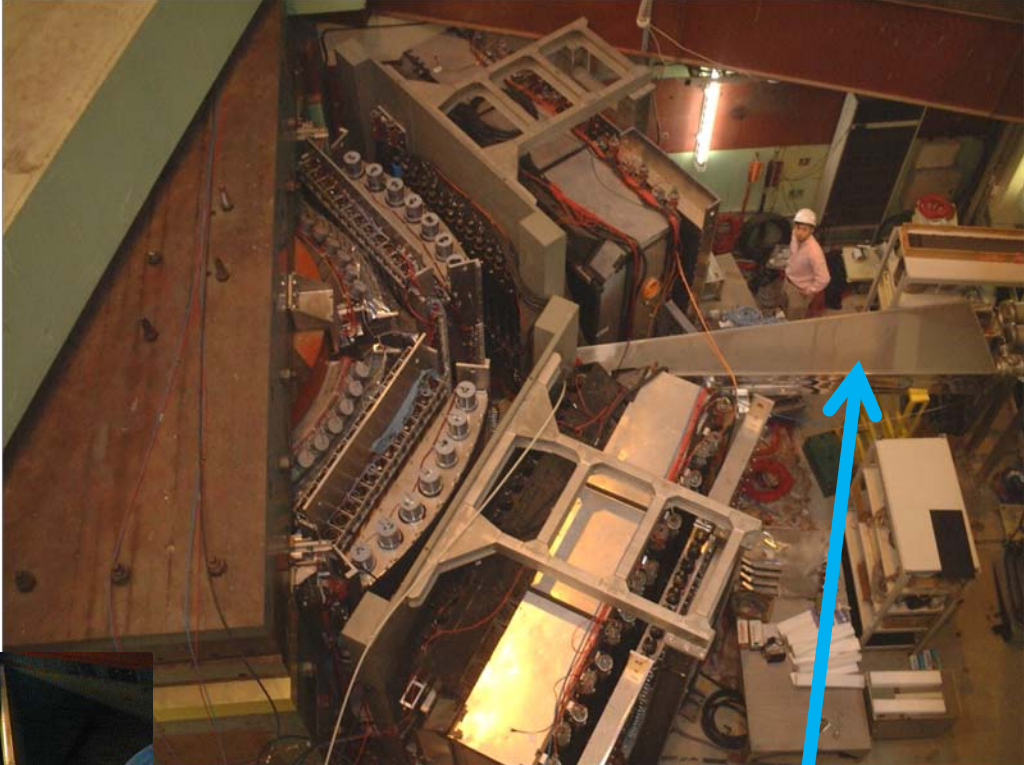
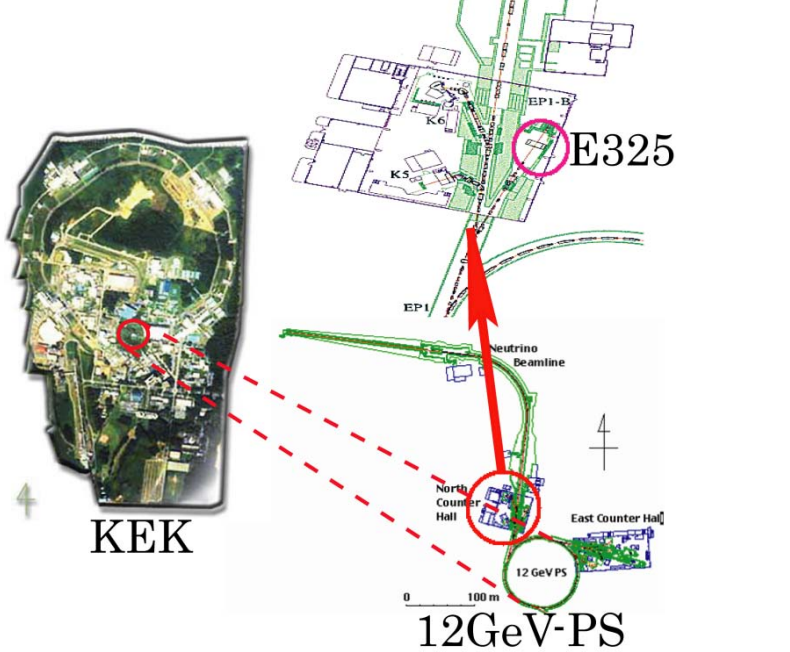
## History

- '93 proposed
- '96 construction start
  - ✓ *NIM*, A457, 581 ('01).
  - ✓ *NIM*, A516, 390 ('04).
- '97 first  $K^+K^-$  data
- '98 first  $e^+e^-$  data
  - ✓  $\rho/\omega$ : *PRL*, 86, 5019 ('01).
- '99~'02
  - x100 statistics in  $e^+e^-$ 
    - ✓  $\rho/\omega$ : *PRL* 96, 092301 ('06).
    - ✓  $\phi \rightarrow ee$ : *PRL* 98, 042501 ('07)
    - ✓  $\alpha$ : *PRC*, 75, 025201 ('06)
  - x6 statistics in  $K^+K^-$ 
    - ✓  $\phi \rightarrow KK$ ,  $\alpha$ : *PRL* 98, 152302 ('07)

# setup

M.Sekimoto *et al.*, NIM, A516, 390 (2004).

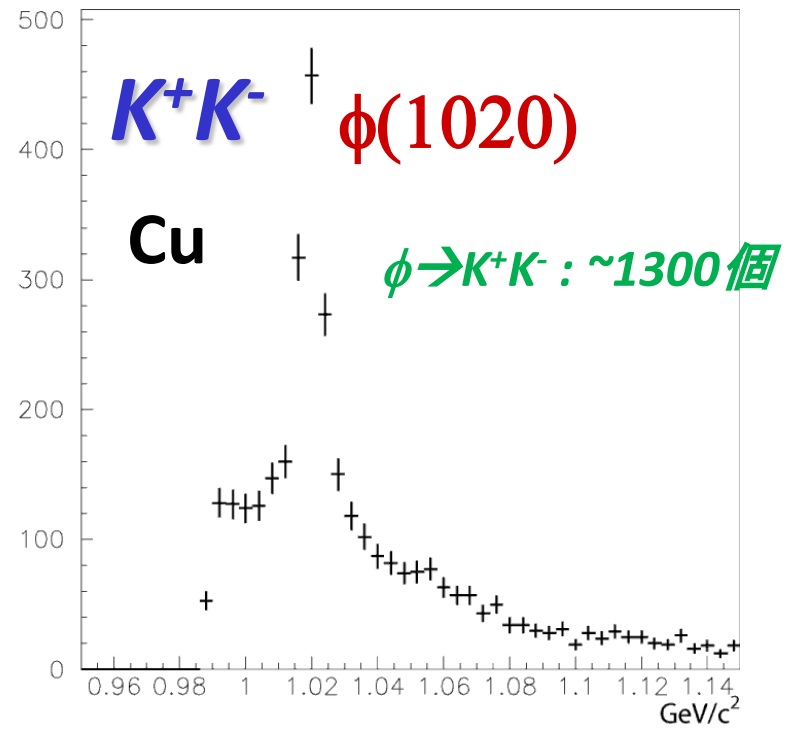
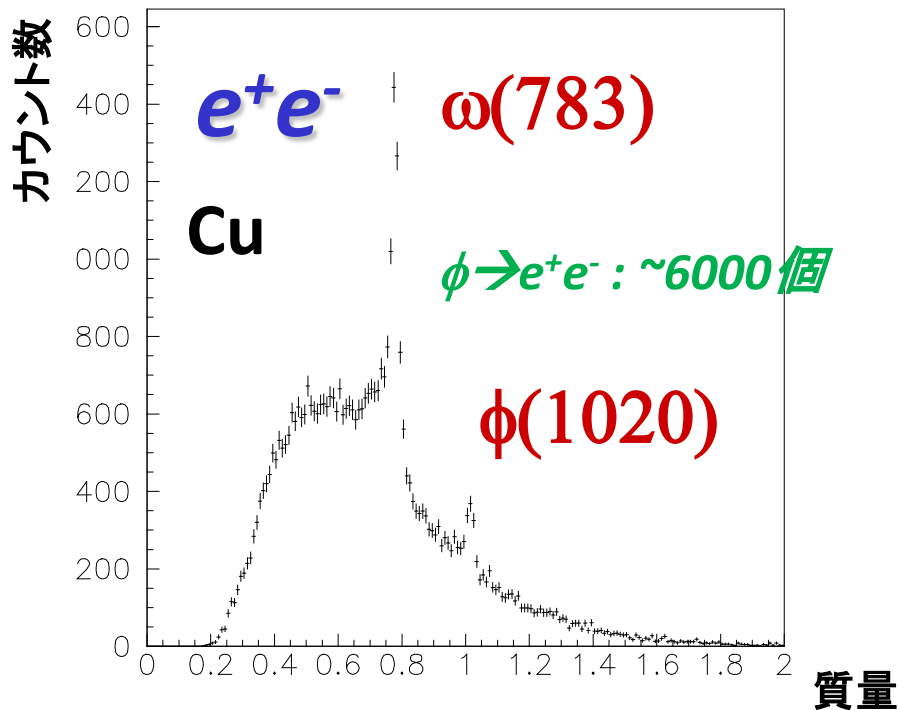
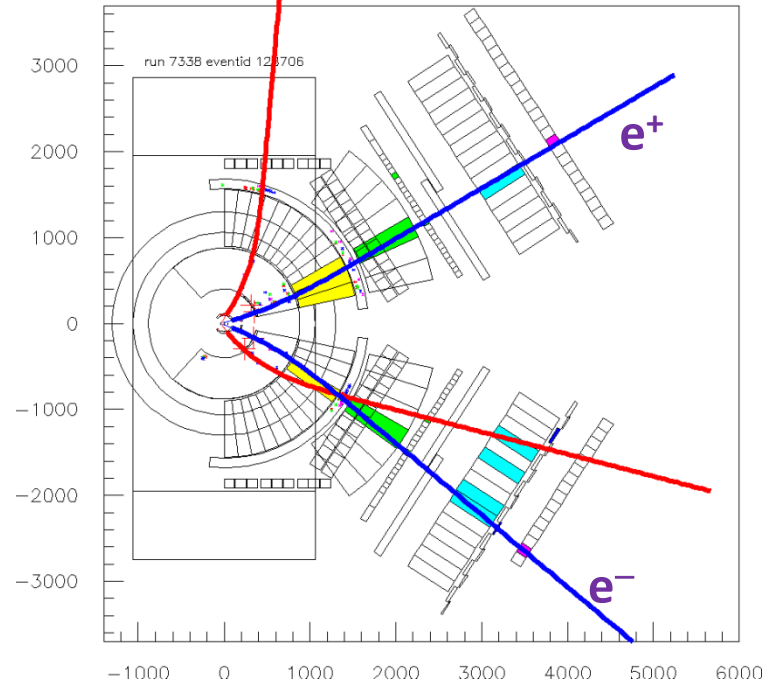




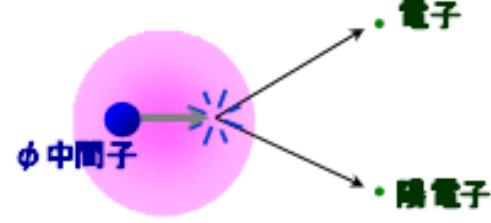
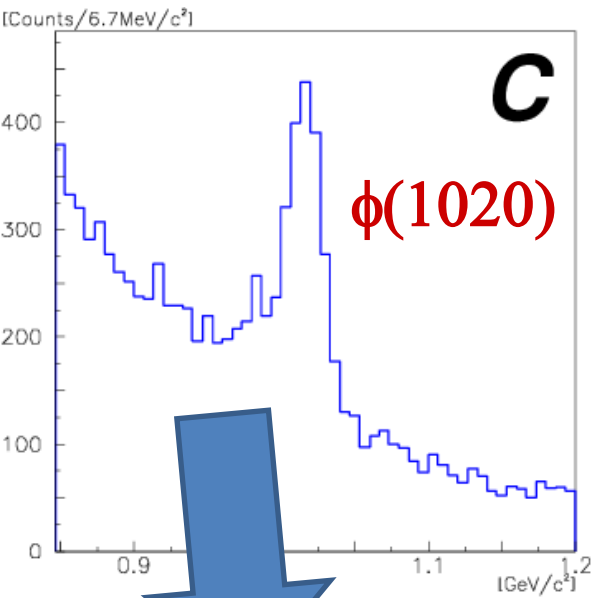
# 実験結果

$e^+e^-/K^+K^-$ の運動量から親粒子の運動量・質量を求める

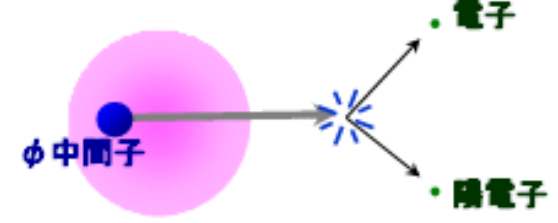
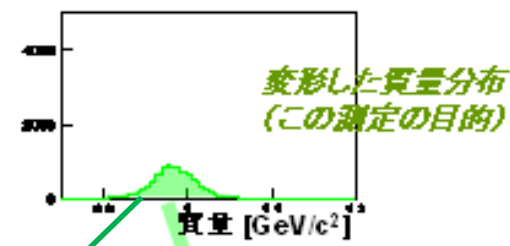
質量分解能 $\sim 1\%$  [ $\phi \rightarrow e^+e^-$ ]は  
世界最高の測定



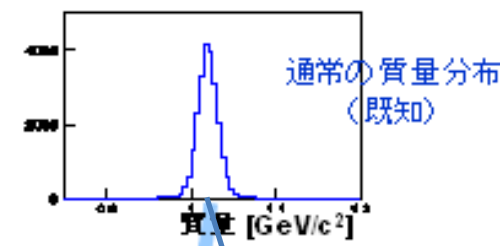
# $\phi \rightarrow e^+e^-$ の結果



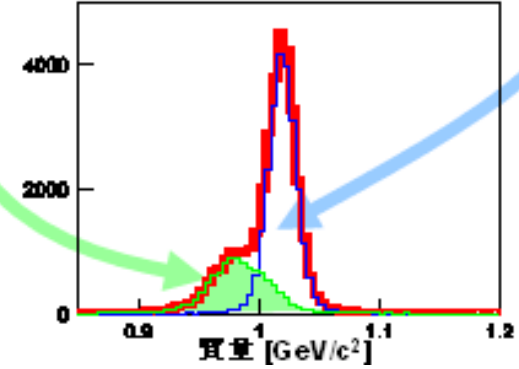
原子核内で崩壊した  $\phi$  中間子



真空中に出たあと崩壊した  $\phi$  中間子

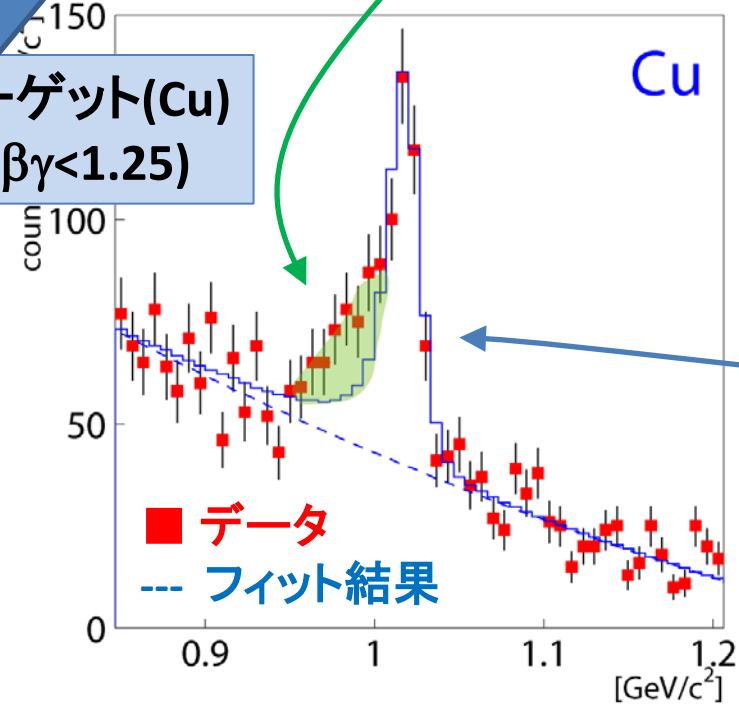


二つの重ねあわせが観測される



大きい原子核・遅い中間子  
で顕著になるはず

大きいターゲット(Cu)  
遅い領域( $\beta\gamma < 1.25$ )



質量の変化が見えた!  
( $\phi$ 中間子で世界初)

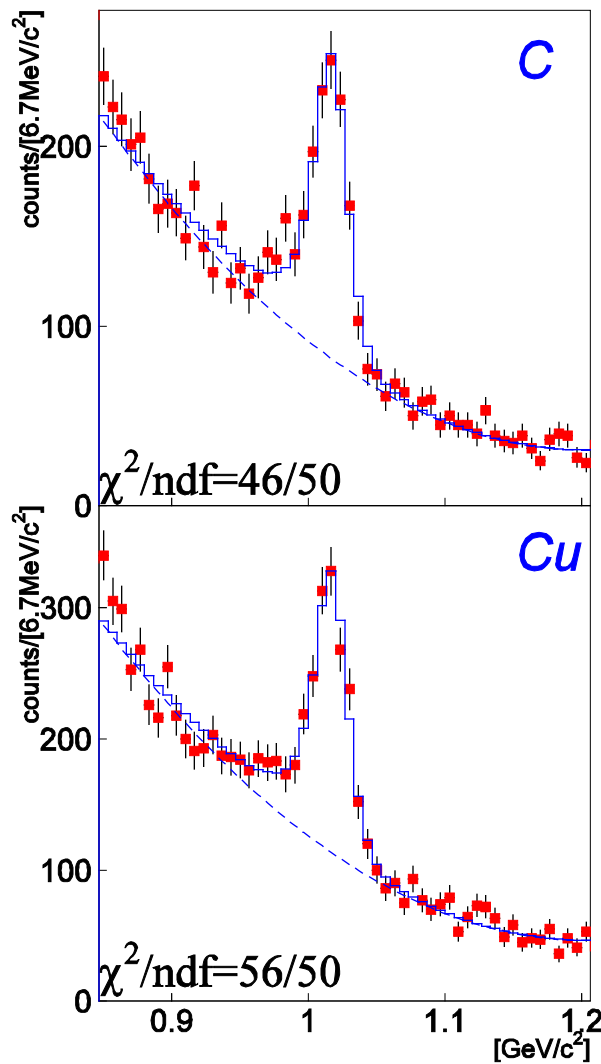
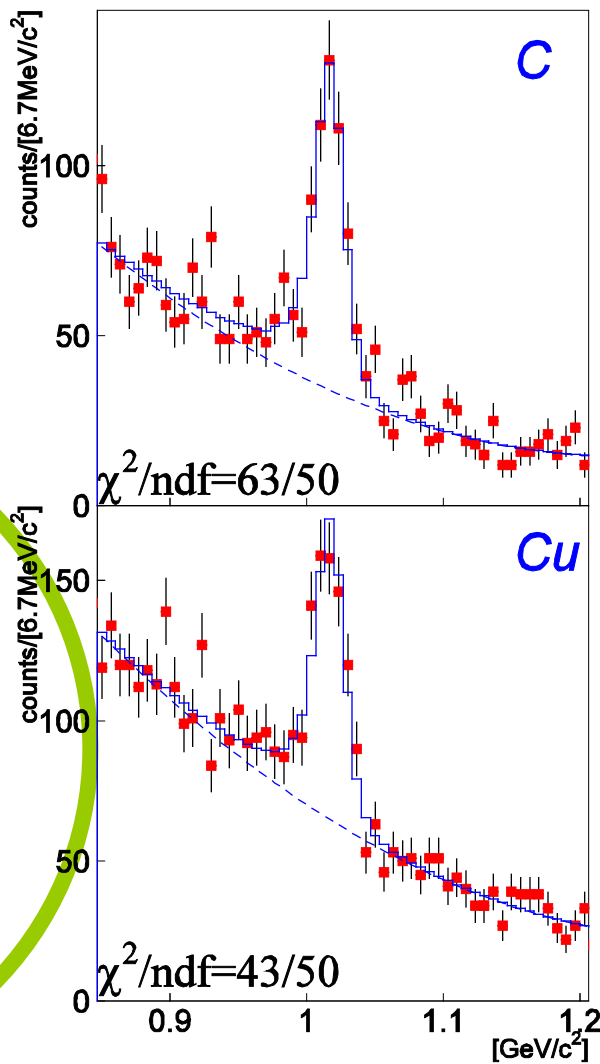
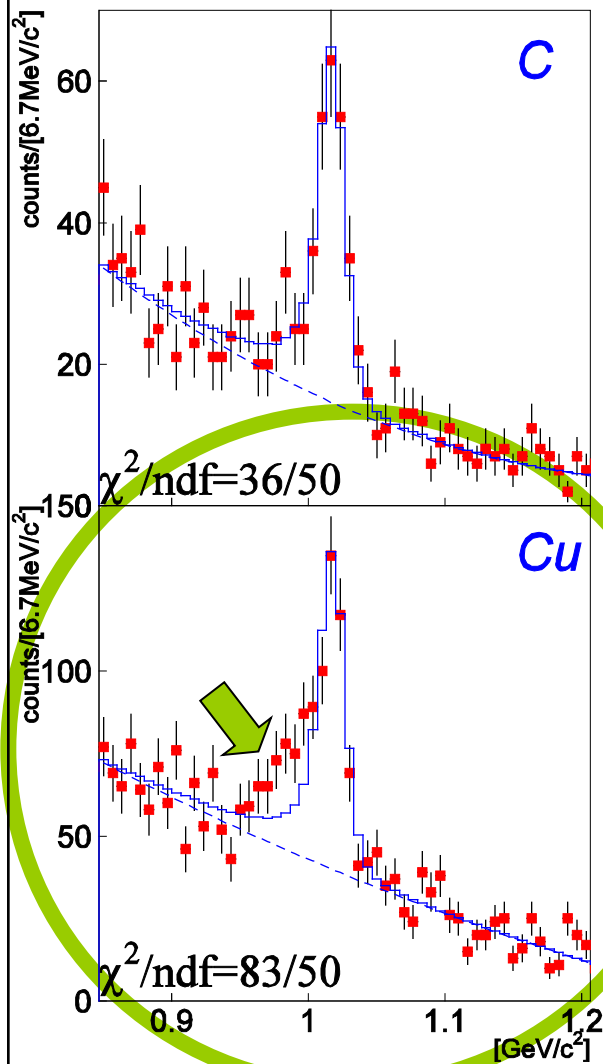
$\beta\gamma < 1.25$  (遅い)

$1.25 < \beta\gamma < 1.75$

$1.75 < \beta\gamma$  (早い)

小さい原子核

大きい原子核

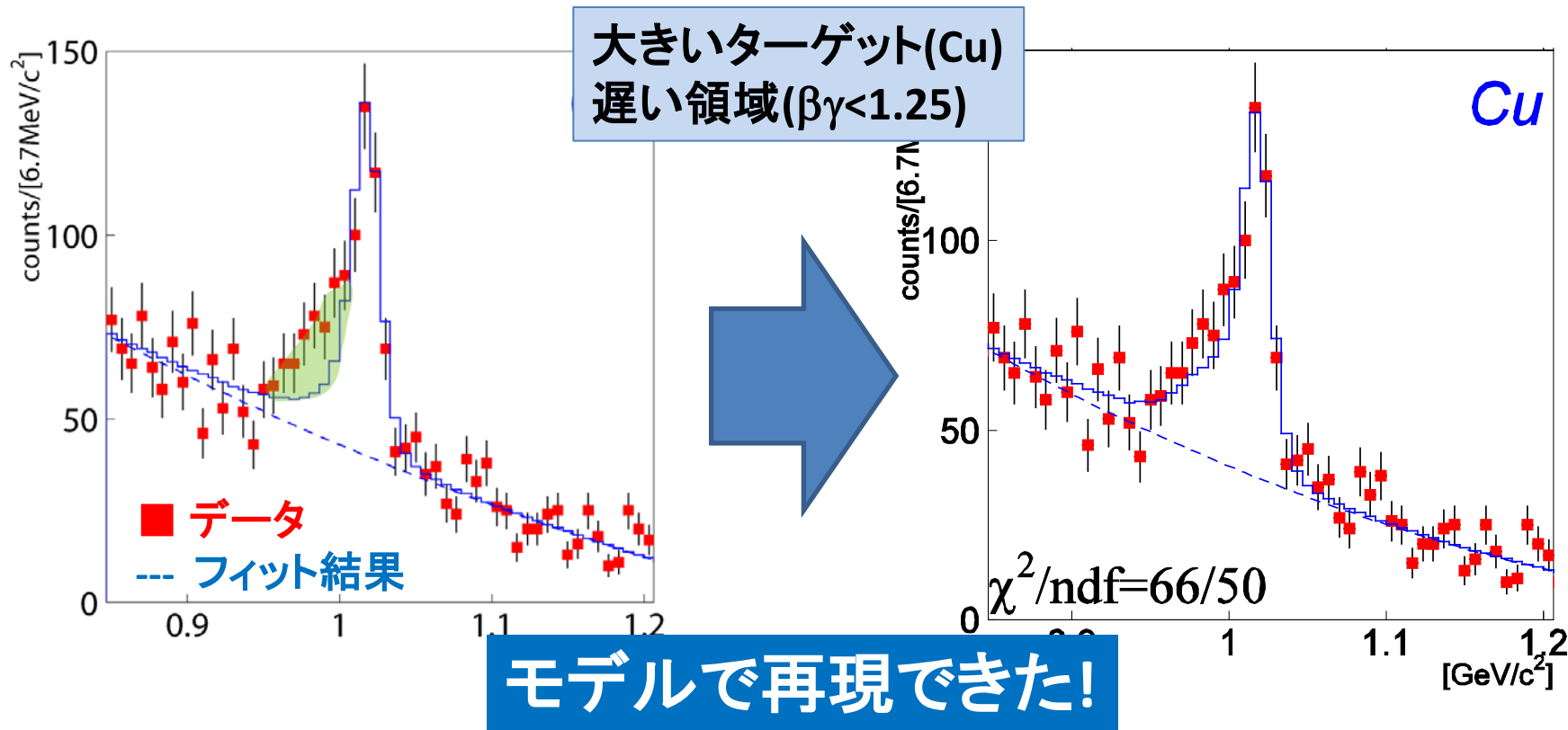


予想通り、大きい原子核・遅い中間子でのみ質量が変化している

# 理論モデルに基づく質量変化の再現

- 密度に依存する質量変化の理論式
- 核密度分布
- 中間子運動量分布

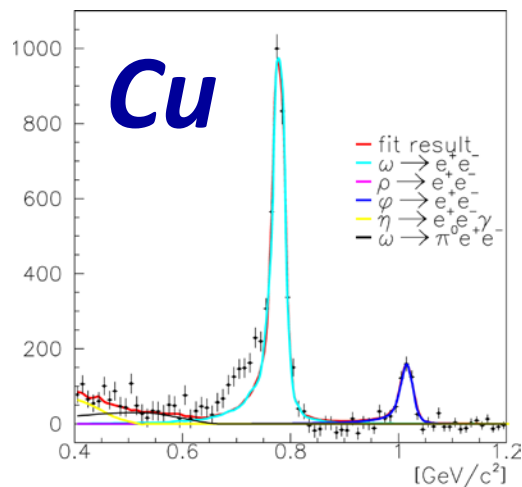
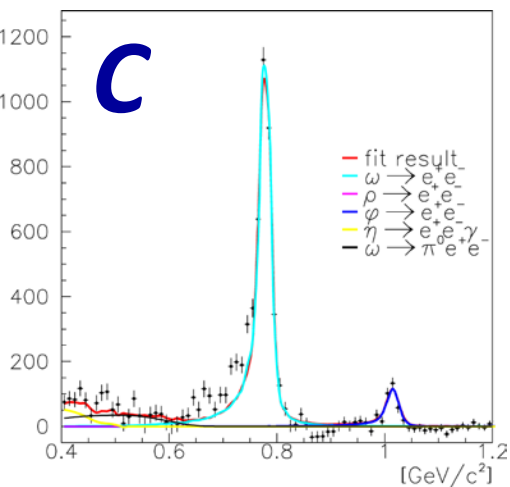
これらを組み合わせ、予想される形を計算してデータをフィットする



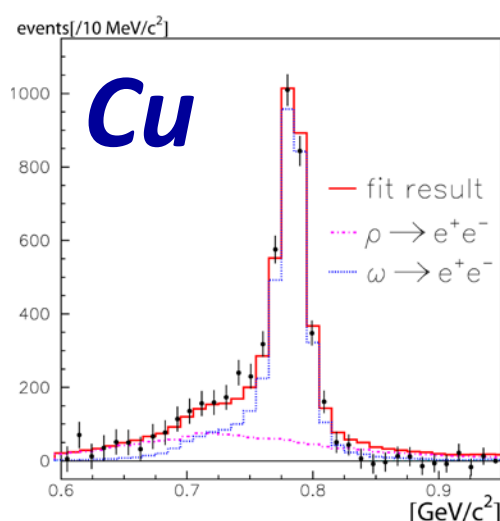
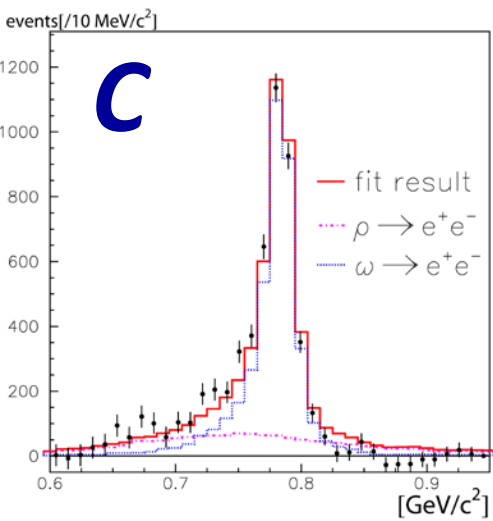
質量 :  $3.4^{+0.6}_{-0.7}\%$  減少  
崩壊幅 :  $3.6^{+1.8}_{-1.2}$  倍増加



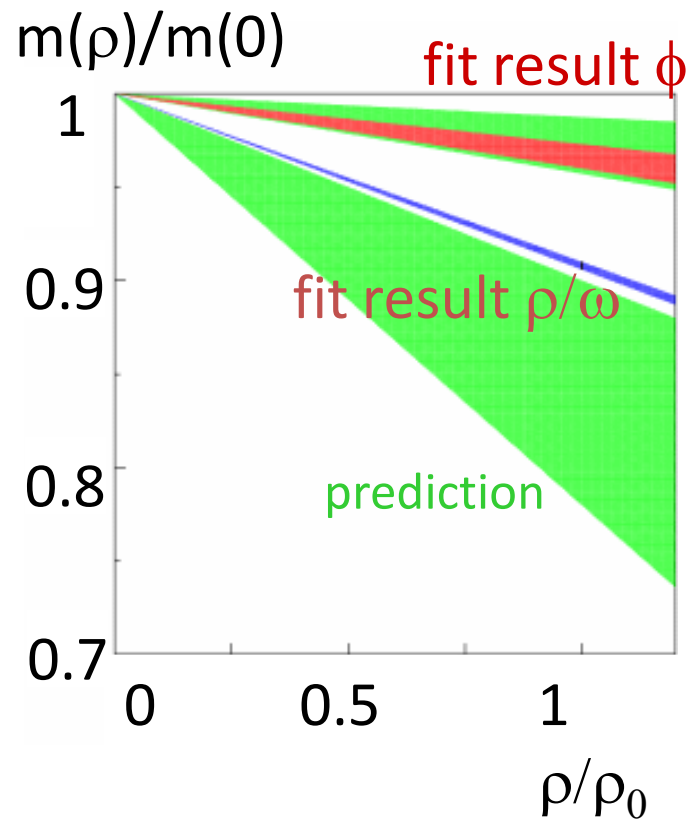
# $\rho/\omega \rightarrow e^+e^-$ の結果



質量 :  $9.2^{+0.2}\%$  減少  
崩壊幅 : 変化無し



# 理論予想との比較



理論予想と  
矛盾しない結果

# 現在の状況

S.Leupold, V.Metag and U.Mosel, arXiv: 0907.2388

## HADRONS IN STRONGLY INTERACTING MATTER

STEFAN LEUPOLD<sup>a</sup>, VOLKER METAG<sup>b</sup> AND ULRICH MOSEL<sup>a</sup>  
stefan.leupold@theo.physik.uni-giessen.de

*a: Institut fuer Theoretische Physik*

*b: II. Physikalisches Institut*

*Universitaet Giessen, Giessen, D-35392, Germany*

We review the current status of theories and experiments aiming at an understanding and a determination of the properties of light vector and scalar mesons inside strongly interacting hadronic matter. Starting from a discussion of the relevant symmetries of QCD and their connection with the hadronic description through QCD sum rules we then discuss hadronic models used to calculate the in-medium self-energies of hadrons and their spectral functions. The difficulties to link these calculated properties to actual observables are emphasized. Finally, we review in detail all the running experiments searching for in-medium changes of vector and scalar mesons, both with relativistic heavy-ion reactions as well as with elementary reactions on (cold) nuclei. Inconsistencies among experimental results are discussed. While almost all experiments observe a considerable broadening of vector mesons inside the nuclear medium, no evidence for mass changes is observed in the majority of the experiments.

# KEK-PS E325実験の結論と課題

- 世界最高の質量分解能と高統計なデータを用いて、通常原子核密度下におけるベクトル中間子質量への核物質効果を検証した
- 原子核中での $\rho/\omega/\phi$ の質量減少を見出した
  - これらの質量変化は理論的な予想を取り入れたモデル計算により再現できた
  - $\phi$ 中間子では世界初の観測
- $\phi \rightarrow e^+e^-$ の統計をさらに上げて、系統的な測定を行うのが今後の課題である
- 質量変化の度合いから、カイラル対称性の回復度合いを定量的に導き出す??? → 理論の助けが必要

# J-PARCでの新たな実験

## E325から“J-PARC E16”へ (stage-1 approval)

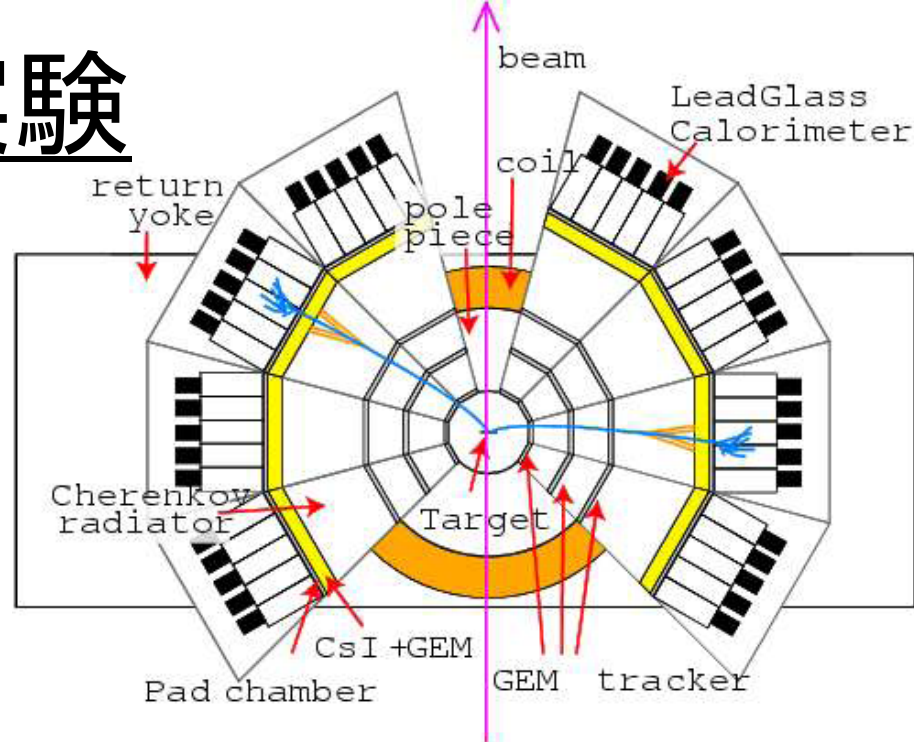
- 30/50GeV陽子ビームを用いた  
 $\rho$ ,  $\omega$ ,  $\phi$ ,  $J/\psi$  の電子対崩壊測定

- 高統計測定

- E325実験の100倍の統計
- $\sim 6 \times 10^5$  の  $\phi \rightarrow e^+e^-$

- 系統的測定

- 様々な原子核サイズを用いる  
(p, C, Cu, Pb, etc.)
- インパクト・パラメーター依存性
- 質量の運動量依存性 (分散関係)



- 5倍のアクセプタンス
- 2倍の生成断面積
- 10倍のビーム強度 ( $10^{10}$  ppp)
- 10倍の反応頻度  
→高レートに耐える測定器の開発

理論予想に対する決定力向上  
→電子対測定によるベクトル中間子測定の決定的実験へ!

# $p(\bar{p}, \phi)\phi$ 反応を用いた実験

→ J-PARC proposal

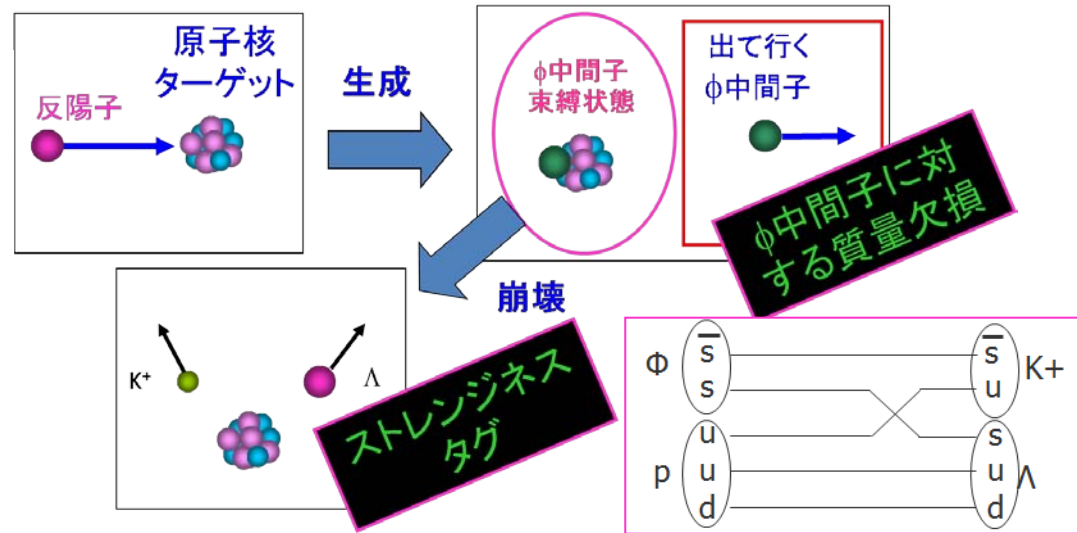
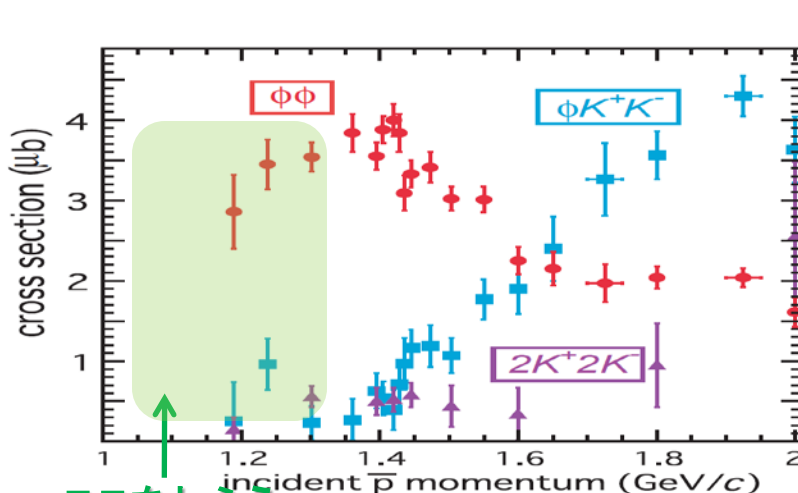
E325実験の結果、 $\phi$ 中間子は原子核中で $\sim 35\text{MeV}$ 程度軽くなることが分かった

一方、 $\Lambda$ ハイパー核の束縛エネルギーは $\sim 30\text{MeV}$ 程度  
かつ、似た質量を持つ[ $\phi$ 中間子の質量 :  $1020\text{MeV}$ ,  $\Lambda$ 粒子の質量 :  $1116\text{MeV}$ ]

$\phi$ 中間子も原子核に束縛されるのでは?

さらに、そのような状況では $\phi$ 中間子は $K^+K^-$ へ崩壊できず、 $\phi p \rightarrow K^+\Lambda$ と崩壊する可能性がある

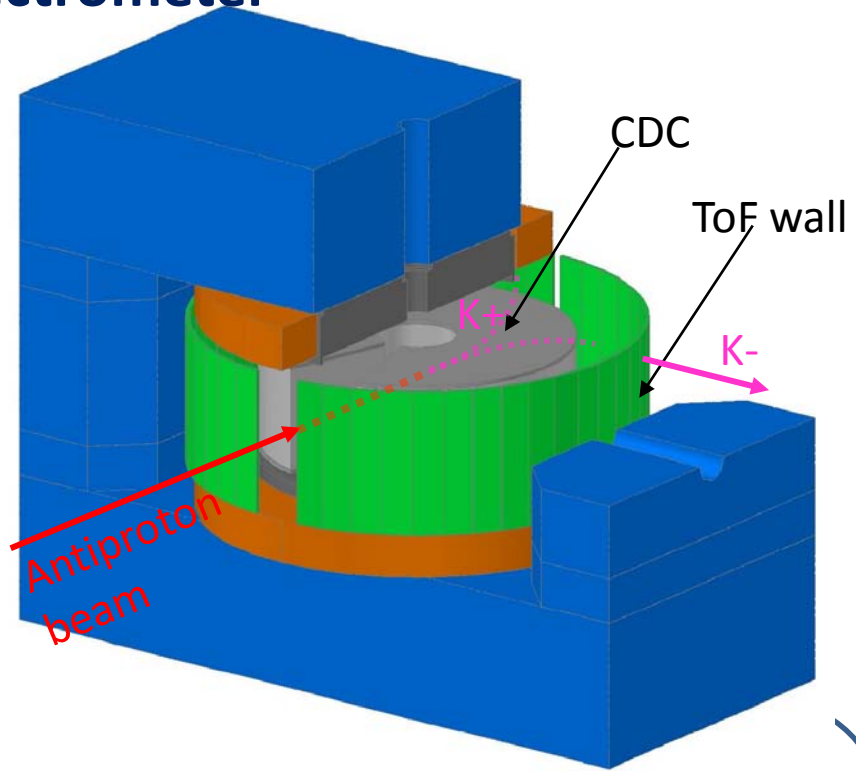
「 $\phi$ 中間子束縛状態」が観測されれば、レプトン対崩壊実験とは異なるアプローチで核媒質効果の検証となり得る!



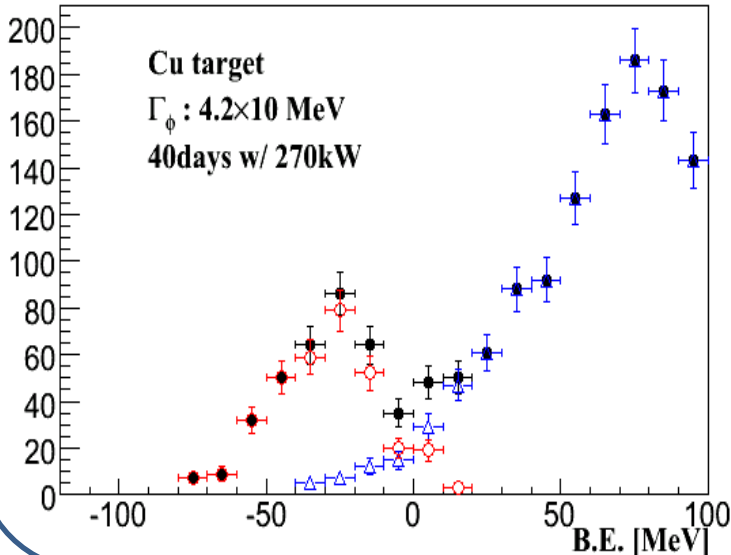
ここをねらう

# Large solid angle charged particle spectrometer (with large gap dipole magnet)

- Large acceptance for forward going  $\phi$  meson (for missing mass analysis)
- Large solid angle for the decay particles,  $K^+$  and  $\Lambda$ , from  $\phi$  mesic nucleus



## expected signal



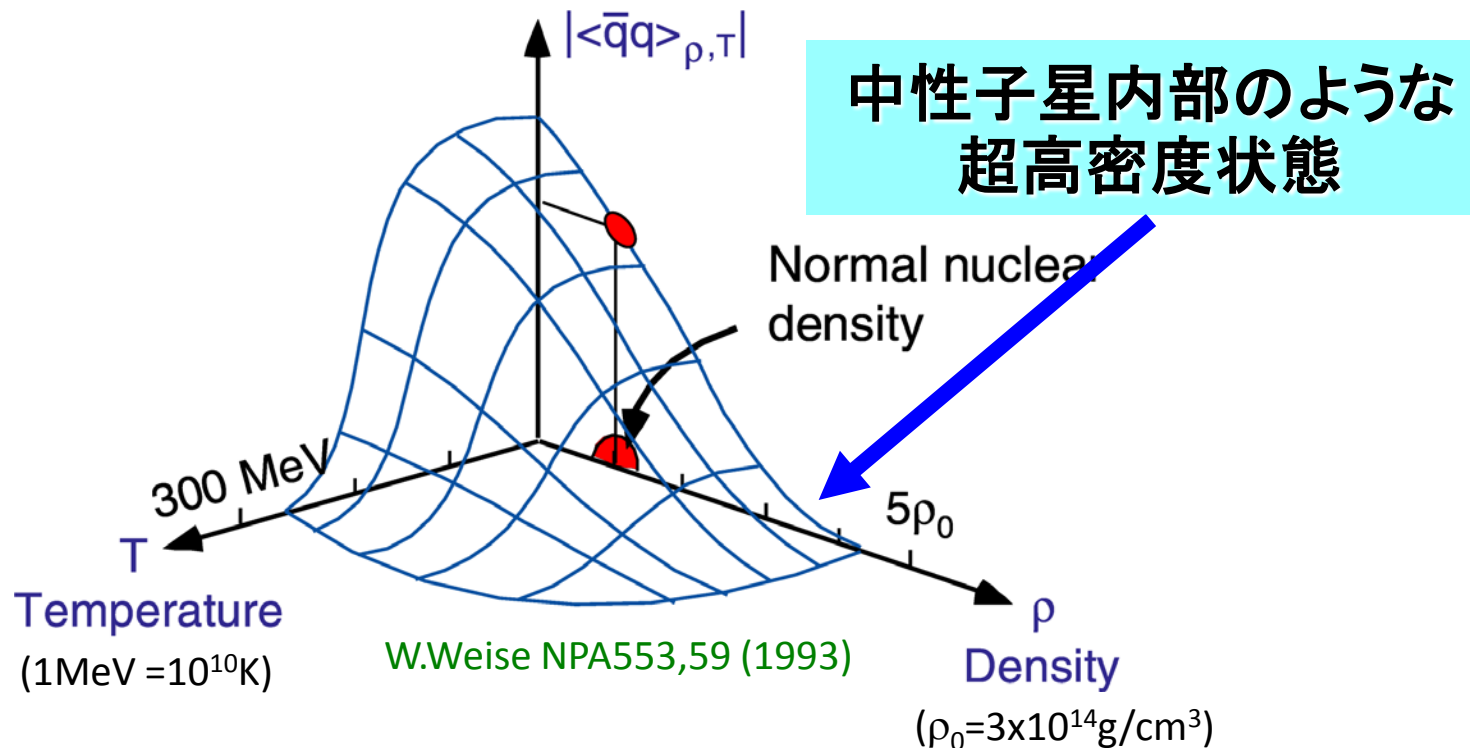
- ❖ Assumption in the simulation:
  - ❖ Spectrometer missing mass resolution = 18 MeV ( $\sigma$ )
  - ❖ Fermi momentum in nucleus is taking into account in the simulation
  - ❖  $\Gamma_\phi$  in nucleus assumed to be broaden 10 time more than natural width
  - ❖ bound state with 30 MeV B.E. exist

Blue triangle: Missing mass spectra of unbound  $\phi$  meson  
 Red circle : Expected signals

# III. 高密度状態(?) での実験

## J-PARC E15

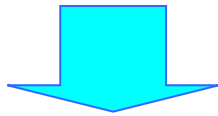
*A search for deeply-bound kaonic nuclear states  
by in-flight  ${}^3\text{He}(K, n)$  reaction*



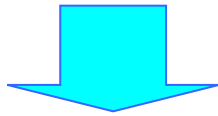
# ねらう物理

反K中間子は、核子との間に強い引力をもつ  
と言う実験結果に基づいた

理論計算によると、**中性子星に匹敵する超高密度状態**を実験室で得られる可能性がある!



**K中間子原子核**

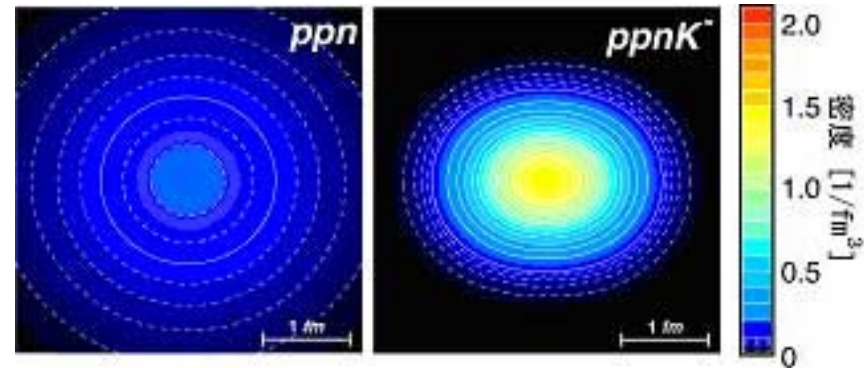


比較的簡単な**K<sup>-</sup>pp束縛状態**の存在を確かめる



超高密度物質中での  
ハドロンの性質の検証

K中間子原子核	束縛エネルギー [MeV]	幅 [MeV]	密度
K <sup>-</sup> p	27	40	3.5ρ <sub>0</sub>
<b>K<sup>-</sup>pp</b>	48	61	<b>3.1ρ<sub>0</sub></b>
K <sup>-</sup> ppp	97	13	9.2ρ <sub>0</sub>
K <sup>-</sup> ppn	118	21	8.8ρ <sub>0</sub>



$$(\rho_0 = 3 \times 10^{14} \text{g/cm}^3 = 0.17/\text{fm}^3)$$

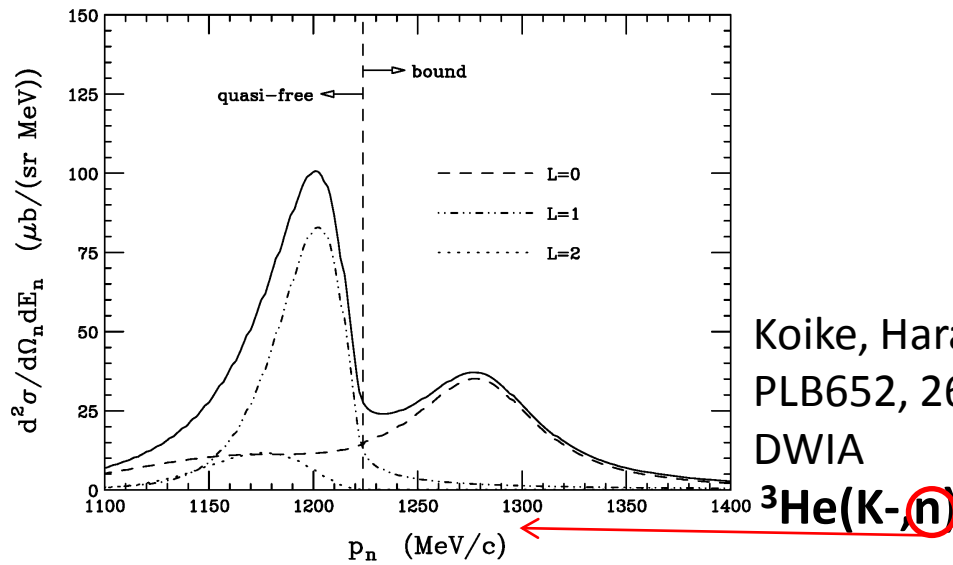
T.Yamazaki, A.Dote, Y.Akaiishi PLB587,167(2004).



# 理論

various theoretical predictions for kaonic nuclei, e.g.,  $K$ -pp

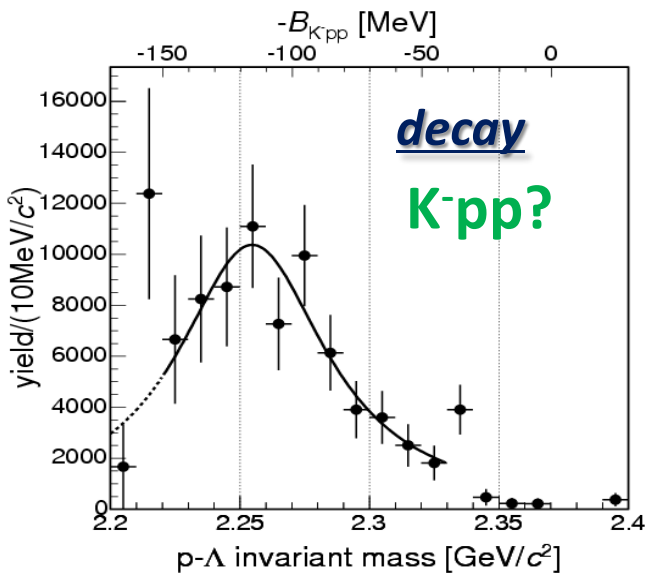
	Method	Binding Energy (MeV)	Width (MeV)
Akaishi, Yamazaki PLB533, 70 (2002).	ATMS	48	61
Ivanov, Kienle, Marton, Widmann nucl-th/0512037	Chiral Lagrangian	118	58 (non-mesonic)
Shevchenko, Gal, Mares PRL98, 082301 (2007).	Faddeev	55-70	90-110
Ikeda, Sato PRC76, 035203 (2007).	Faddeev	79	74
Dote, Hyodo, Weise nucl-th/0802.0238	chiral SU(3)	19+/-3	40-70 ( $\pi\Sigma N$ -decay)



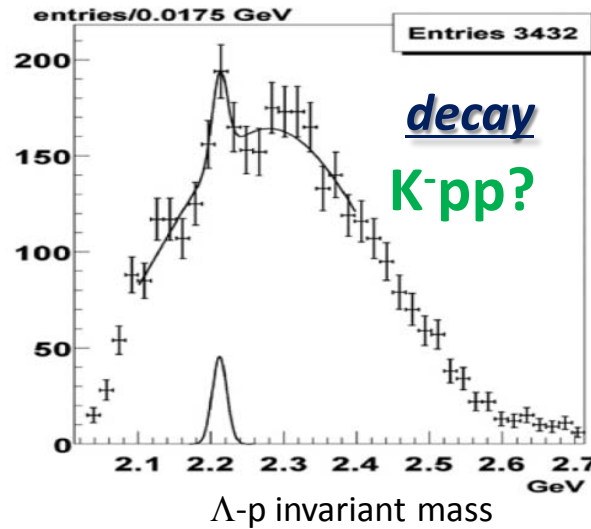
- whether the binding energy is *deep* or *shallow*
- how *broad* is the width ?



K<sup>-</sup>ppn?



FINUDA@DAΦNE  
PRL, 94, 212303 (2005)

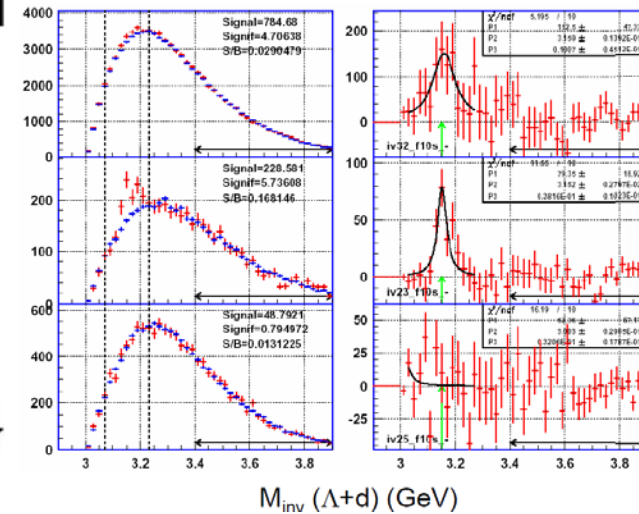
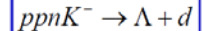


OBELIX@CERN-LEAR  
NP, A789, 222 (2007)  
*signature of kaonic nuclei*

Subevents rotated  
Vertex shifted  
Lambda Cut "s"

decay

Possible decay channel:



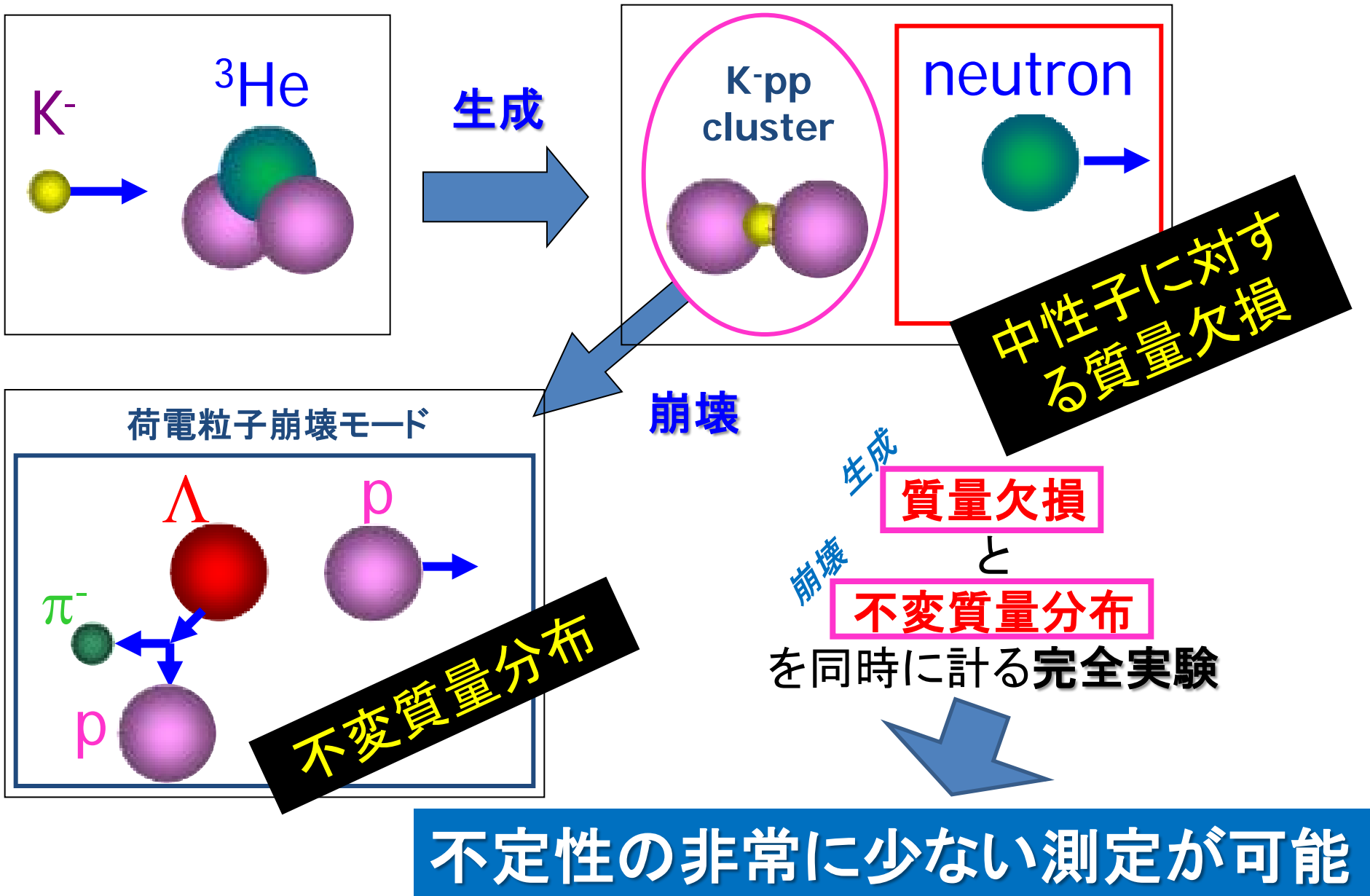
FOPI@GSI

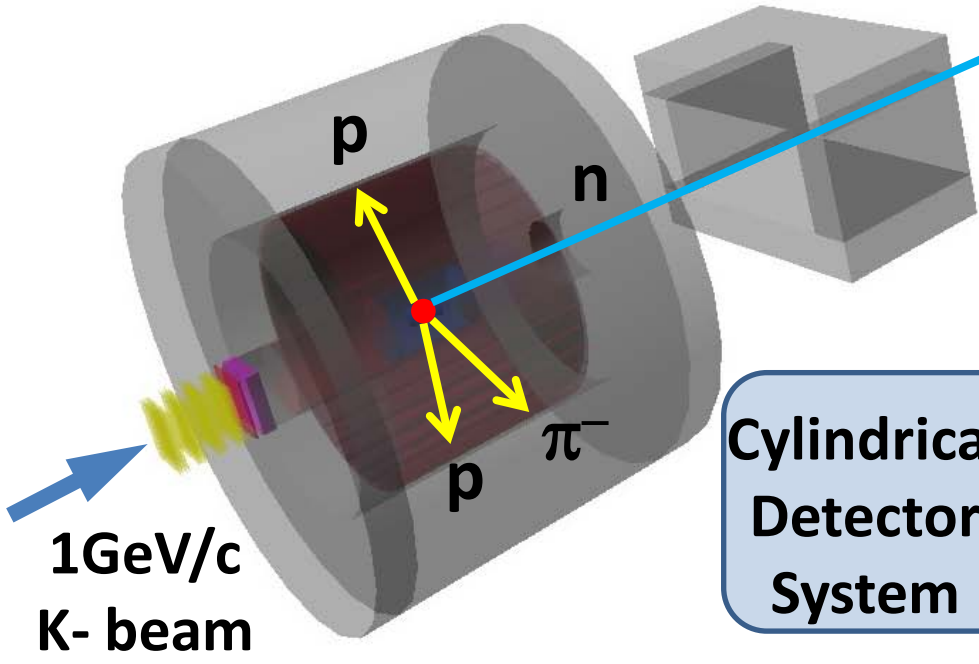
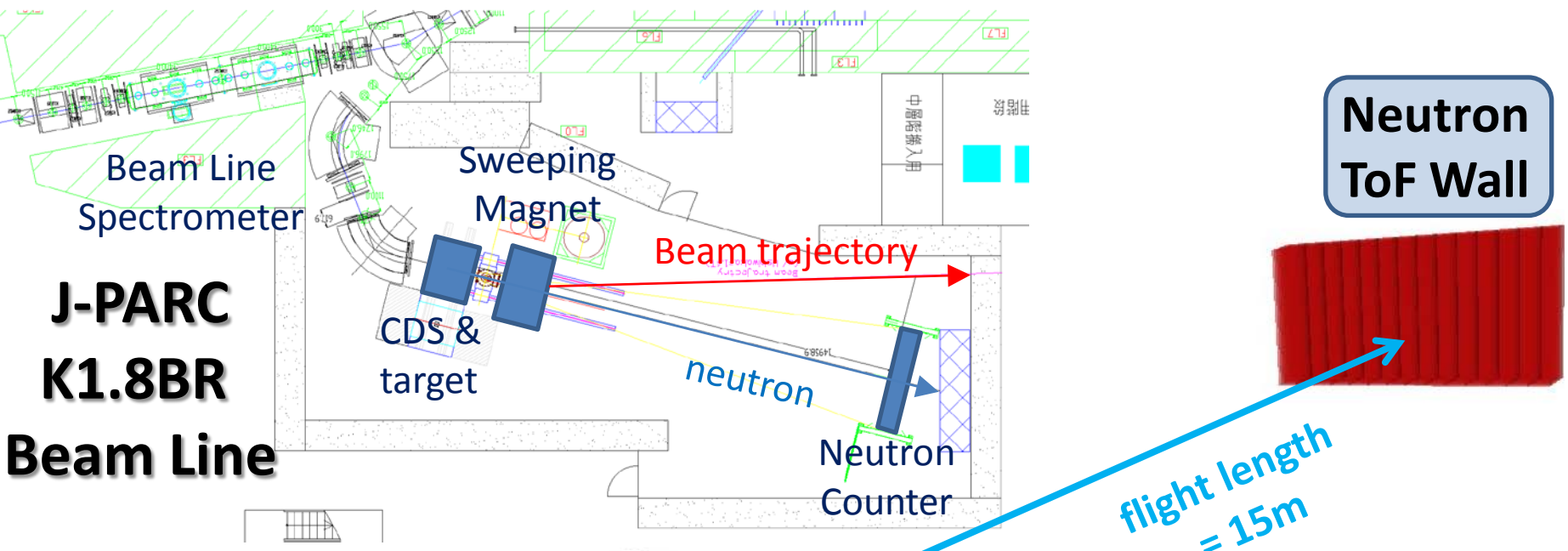
each experiment measures only formation or decay  
(except for E549 experiment)

***the situation is still controversial !!!***

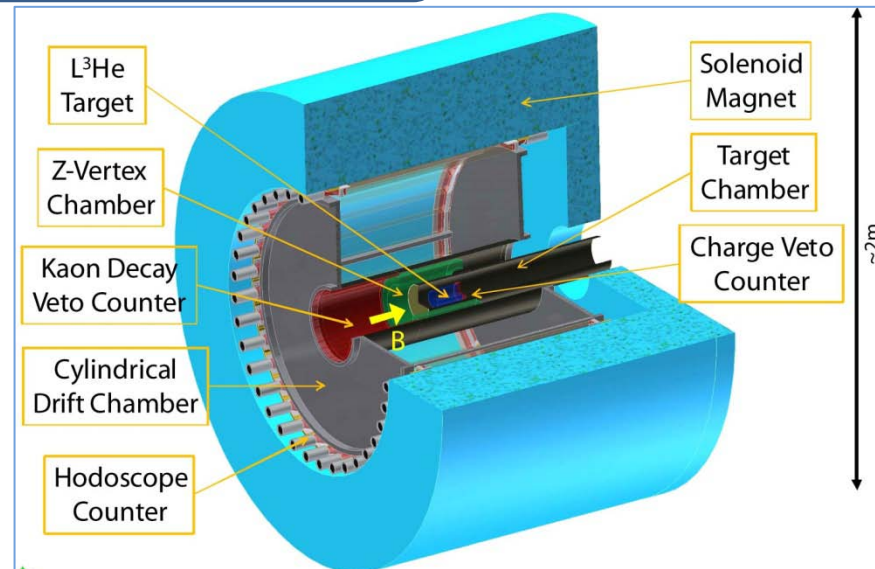
We need conclusive evidence with  
observation of formation and decay !

# 実験の特徴





**Beam Sweeping Magnet**

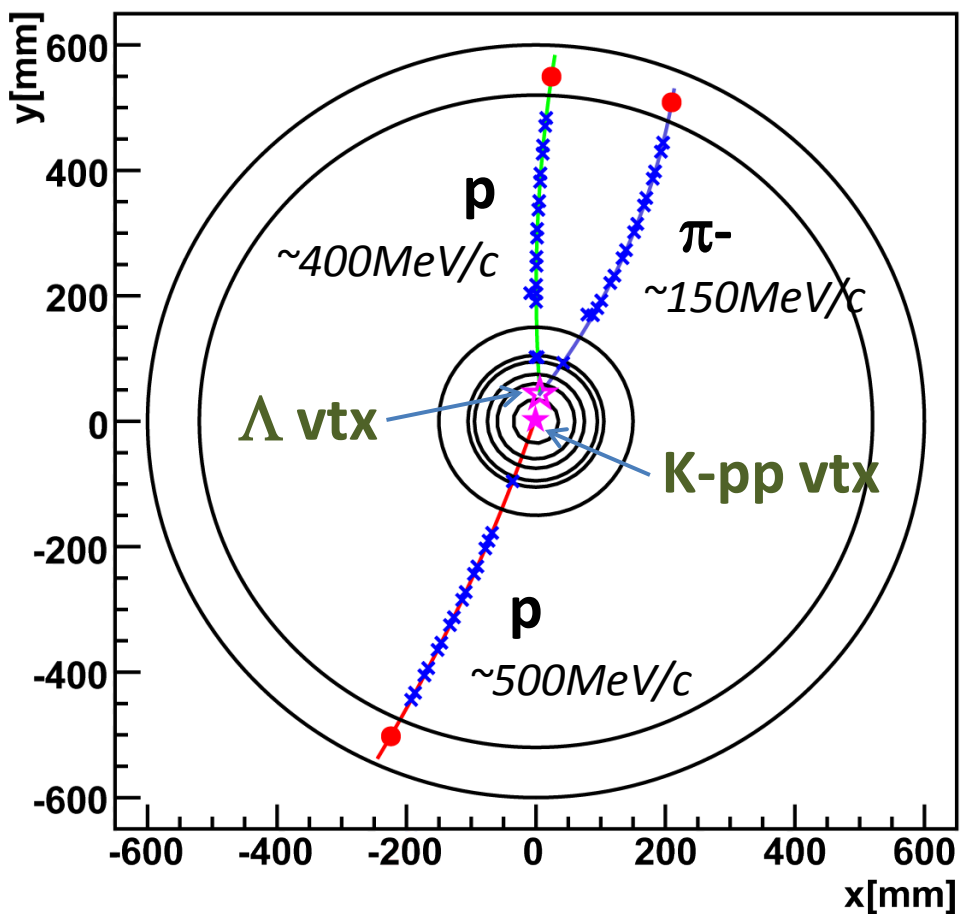


# 期待されるeventの例

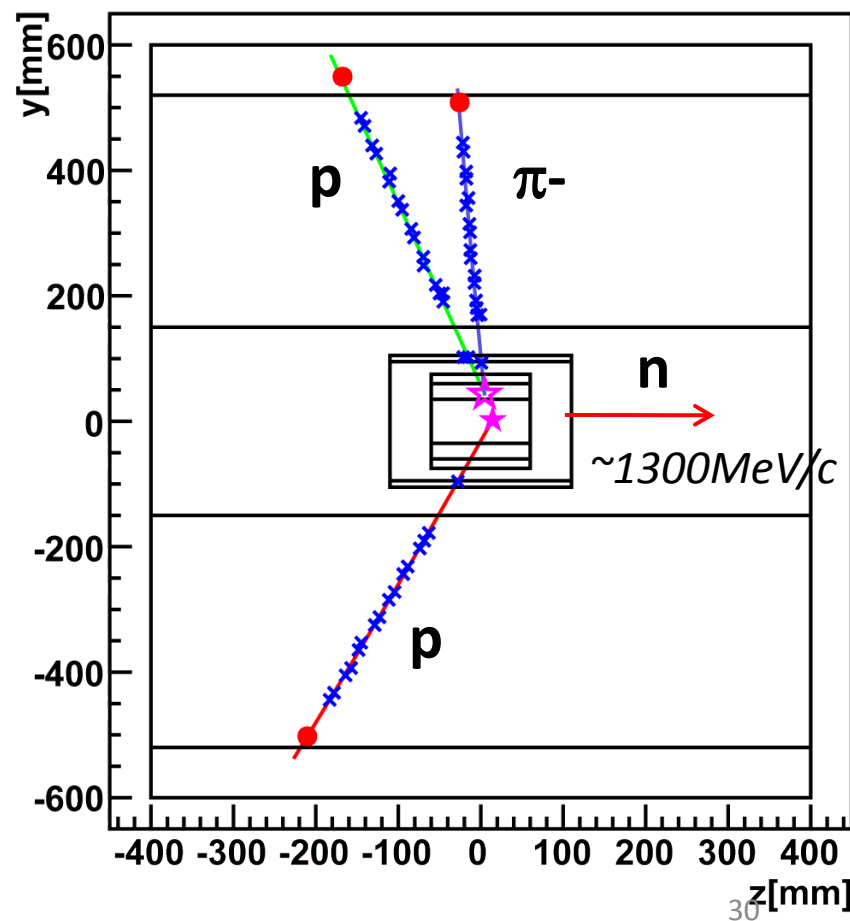
*Calculated using Geant4*

- binding energy =  $100\text{MeV}/c^2$
- Isotropic decay of K-pp
- with forward neutron

CDS xy-plane

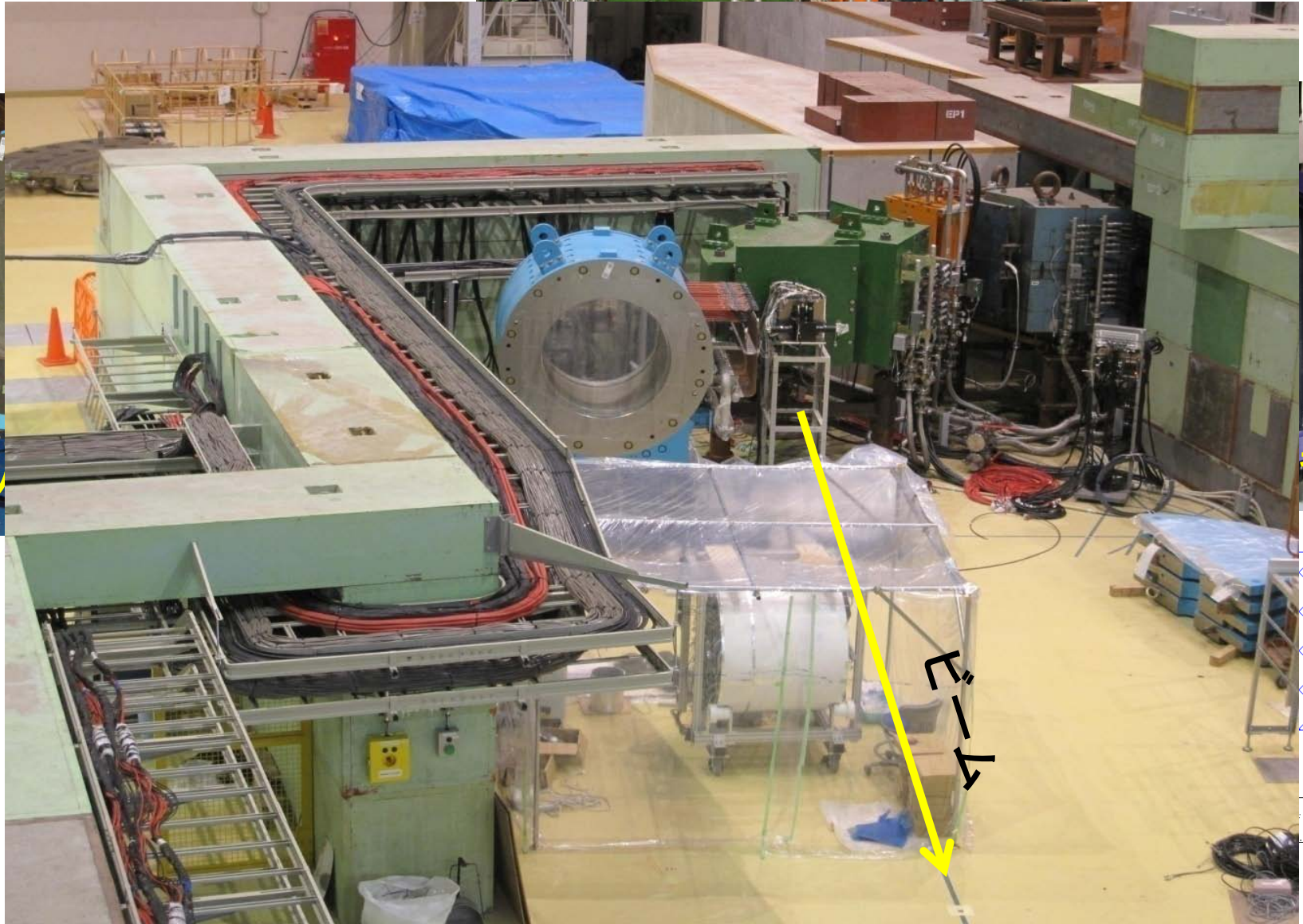


CDS zy-plane



# 現在の進行状況

ビームライン検出器

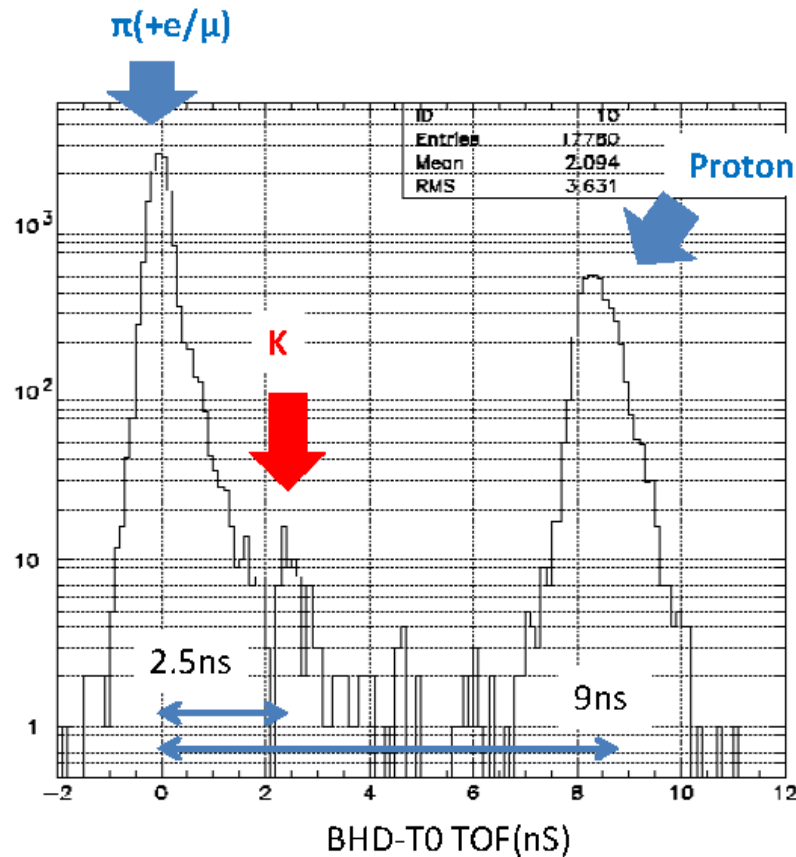


順調に準備を進めています

# 2009年2月のrun

On Feb. 12<sup>th</sup>, 2009, the first beam was transported to K1.8BR beam-line!

TOFによる $\pi(+\mu/e)/K/\text{proton}$ の分離



2009/02/15

オフライン解析

飛行距離(BHD-T0)= 7.7m  
運動量1.1GeV/c

800spill

BHD&PA&T0  
多重度=1  
(平均多重度5@BHD)

RF-On ; Slit full open

セパレーター OFF  
(unseparated beam)

$N(K^+) \sim 1/300 N(\pi^+)$



# time schedule

2009年1月	1.8BRビームラインでビームチューンが始まる (J-PARC 50GeV PS のファーストビーム!!!)
2010年1月	E17実験開始 (Kaonic $^3\text{He}$ X-ray spectroscopy) = E15実験の双子の実験
2011年頃	E15実験開始

## E15実験のまとめ

*K-ppとくれば、K-K-pp?*

- J-PARC E15実験はK中間子原子核(K-pp束縛状態)の探索を行い、K中間子原子核の存否に対する決定的な実験結果を提供する
- E15実験のスペクトロメーターは、現在着々と準備が進められている

# K<sup>-</sup>K<sup>-</sup>pp ?

静止反陽子を用いたdouble-strangeness生成



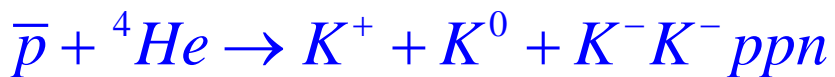
は、エネルギーが~100MeV足りなくて不可能



しかし、もし、KKpp束縛状態などが十分深い束縛状態をもって存在するのならば、静止反陽子とHe等を用いて2つのK中間子を含むK中間子原子核を作り出せる可能性がある!



**B.E.>109MeV**  $\longleftrightarrow$  **B.E.=117MeV,  $\Gamma=35\text{MeV}$**



**B.E.>129MeV**  $\longleftrightarrow$  **B.E.=221MeV,  $\Gamma=37\text{MeV}$**

*theoretical calc.*

[Yamazaki, Dote, Akaishi

PL,B587,167 2004.]

## 過去、静止反陽子を用いてdouble-strangeness生成を見た実験は?

唯一、CERN LEARで行われたOBELIX実験において、double-strangeness生成が報告されているが、非常に少ない統計しかない

**NP A797, 109 (2007). [OBELIX at rest]**

$\text{pbar}+{}^4\text{He} \rightarrow 2\text{K}^+2\Sigma^-p \rightarrow 2\text{K}^+2\pi^-2n\text{p}:$   $(0.17\pm 0.04)\times 10^{-4}$

$2\text{K}^+\Sigma^-\Sigma^+n\pi^- \rightarrow 2\text{K}^+\pi^+2\pi^-3n:$   $(2.71\pm 0.47)\times 10^{-4}$

$2\text{K}^+\Sigma^-\Lambda n \rightarrow 2\text{K}^+p2\pi^-2n:$   $(1.21\pm 0.29)\times 10^{-4}$

$2\text{K}^+\text{K}^-\Lambda 2n \rightarrow 2\text{K}^+\text{K}^-p\pi^-2n:$   $(0.28\pm 0.14)\times 10^{-4}$

## J-PARCにおける、反陽子を用いたdouble-strangeness生成実験

stopped-pbar+He  $\rightarrow$  K<sup>-</sup>K<sup>-</sup>pp  $\rightarrow$   $\Lambda\Lambda$ を測定する実験を企画中  **$\rightarrow$  J-PARC Lol**

Letter of Intent for J-PARC

Double Anti-kaon Production in Nuclei by Stopped  
Anti-proton Annihilation

*dated on 17 / 06 / 2009*

M. Iwasaki<sup>1</sup>, P. Kienle<sup>2,3</sup>, H. Ohnishi<sup>1</sup>, F. Sakuma<sup>1\*</sup>, and J. Zmeskal<sup>2</sup>

<sup>1</sup>RIKEN, Japan

<sup>2</sup>Stefan Meyer Institut für subatomare Physik, Austria

<sup>3</sup>Technische Universität München, Germany

**K<sup>-</sup>K<sup>-</sup>pp等のK中間子原子核、さらにはH-dibaryon等  
エキゾチック原子核の探索を、高統計・高解像度で行う**

# V. まとめ

● **KEK-PS E325実験**において、通常原子核密度下でベクトル中間子 ( $\rho, \omega, \phi$ ) の質量が減少していることを確かめた

● **J-PARC E15実験**においては、中性子星内部のような超高密度物質であることが期待される **K中間子原子核** を探査する

● **J-PARC**において、 $\phi$ 中間子を用いた新しい実験や、2つのKを含むK中間子原子核探索実験などを通して、“**強い相互作用による質量起源**”を探る実験的研究を行っていく

