

J-PARCでの反K中間子原子核 研究のための円筒型中性子 検出器の性能評価

講演番号: 20pV1-1

東北大学先端量子ビーム科学研究センター
佐々木舜世
for the J-PARC E80 collaboration

目次

1. 反K中間子原子核の研究
2. 次期実験(J-PARC E80実験)
3. 円筒型中性子検出器(CNC)
4. ビームテスト
5. まとめ

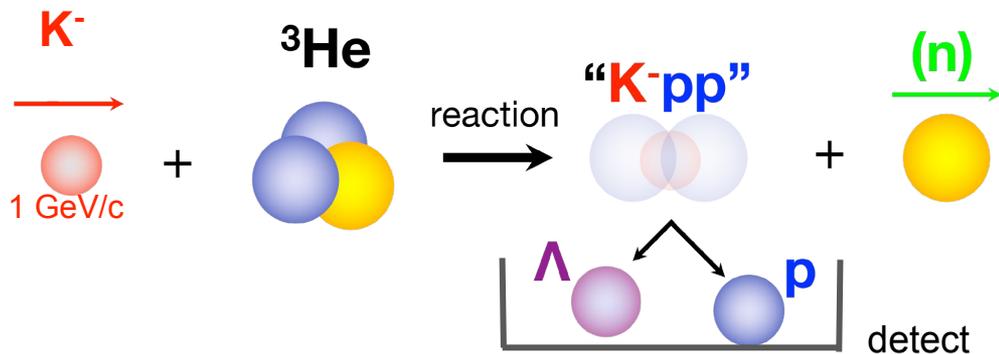
1. 反K中間子原子核の研究

反K中間子原子核

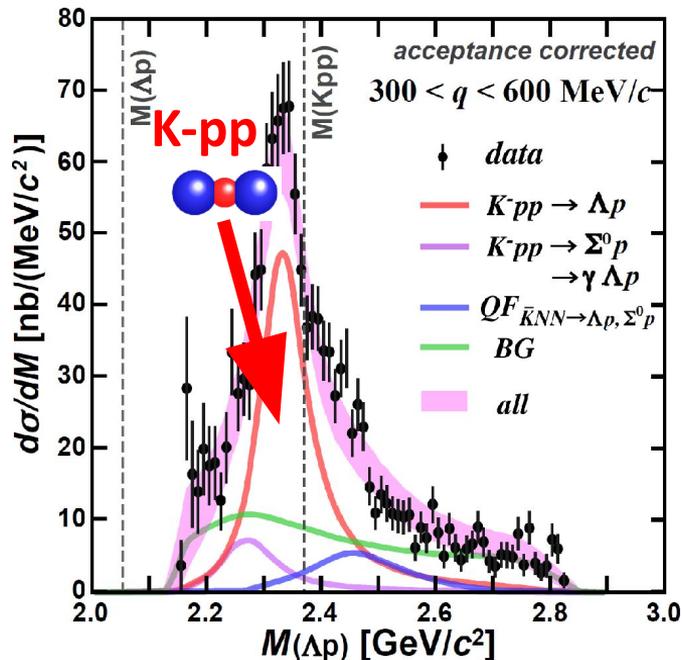
反K中間子原子核 : 反K中間子が構成要素となる新しい形態の原子核

先行実験(J-PARC E15)において、最も単純な反K中間子原子核である K^-pp が発見された

${}^3\text{He}(\text{in-flight } K^-, n)$



- 束縛エネルギー: ~ 40 MeV
- 崩壊幅: ~ 100 MeV

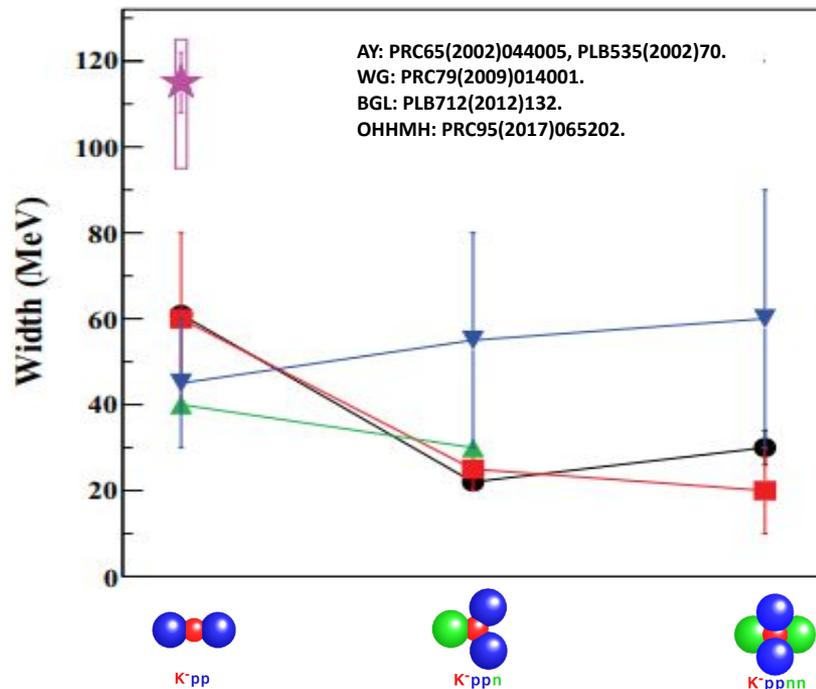
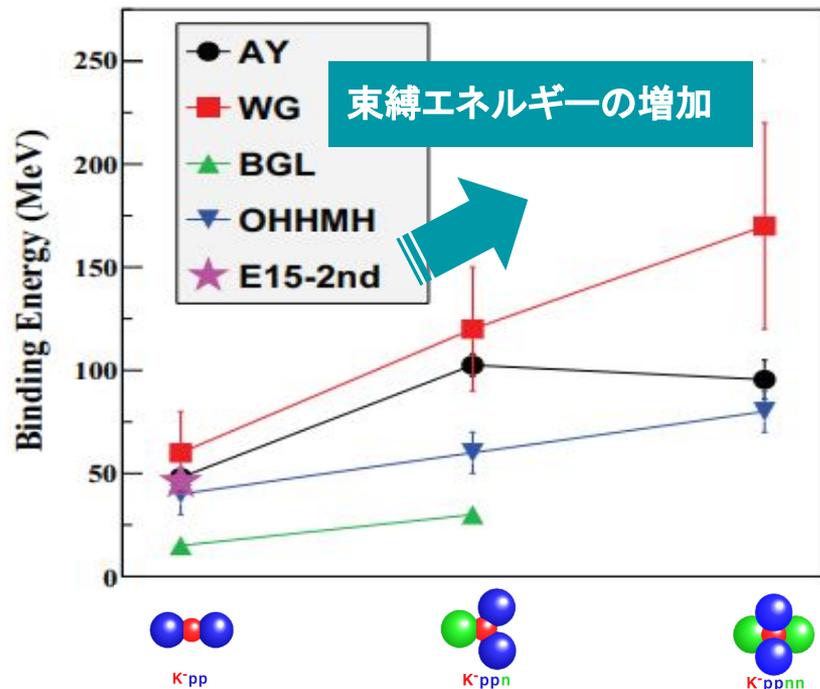


T.Yamaga et. al., PRC102(2020)044002.

1. 反K中間子原子核の研究

次のステップ: 核子数依存性

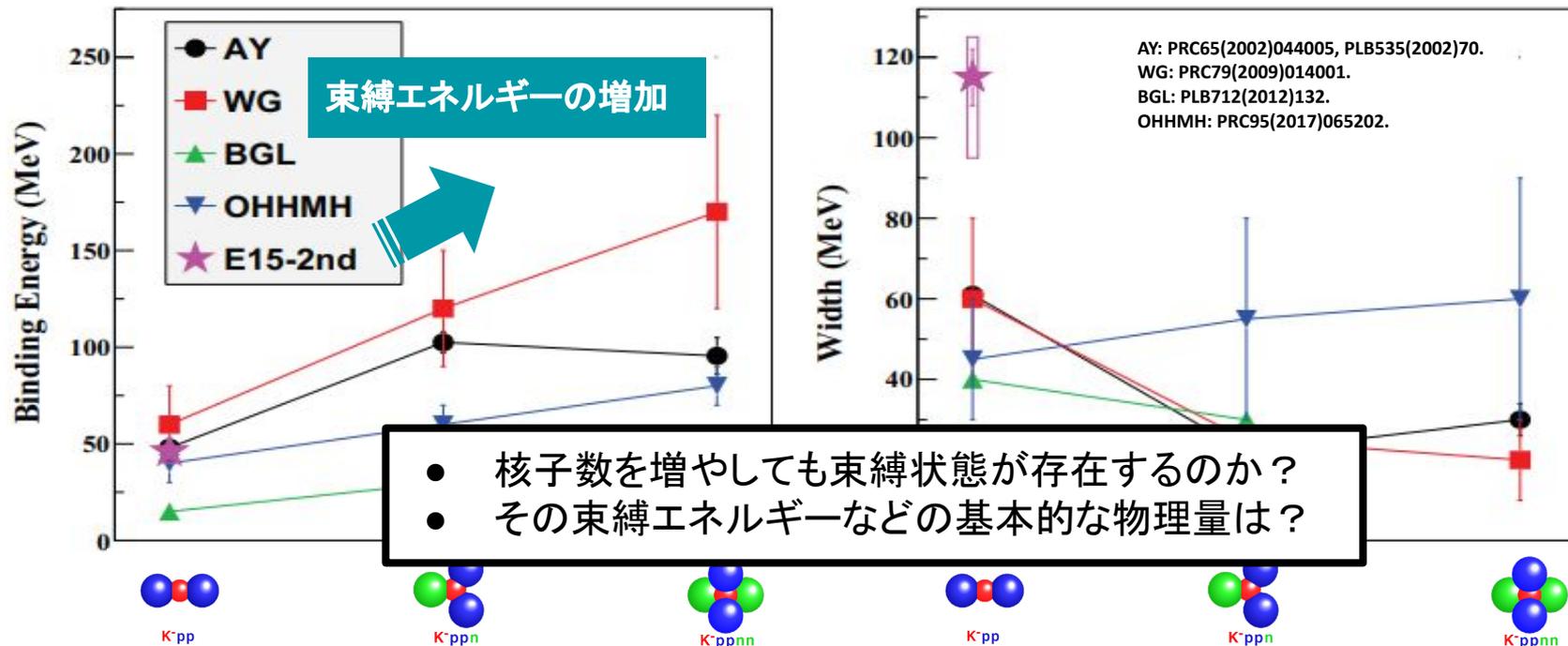
核子が増えるごとに束縛エネルギーが増していくことが理論的に示唆されている



1. 反K中間子原子核の研究

次のステップ: 核子数依存性

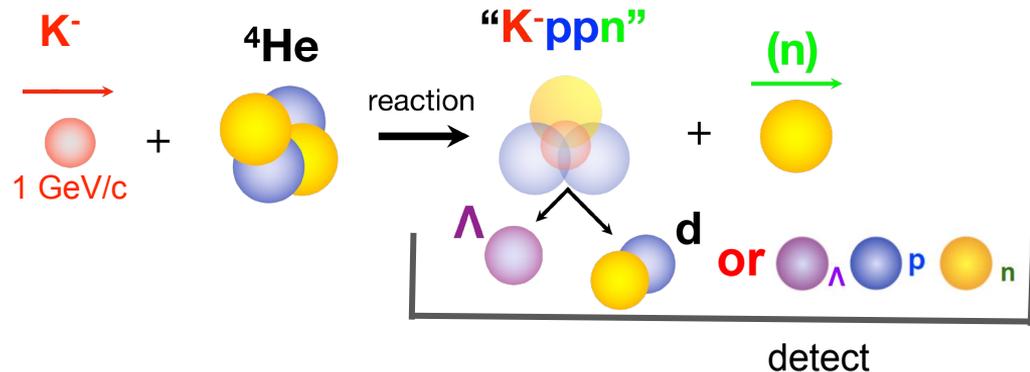
核子が増えるごとに束縛エネルギーが増していくことが理論的に示唆されている



2. 次期実験(J-PARC E80実験)

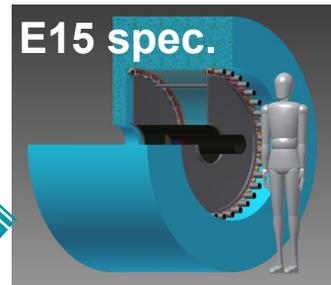
$\bar{K}NNN$ の探索

${}^4\text{He}(\text{in-flight } K^-, n)$ で $\bar{K}NNN$ を探索



- 先行実験と同様の手法
- Λd 、 Λpn 二つの崩壊モードを検出し、崩壊比などを比較

Upgrade



2. 次期実験 (J-PARC E80実験)

ソレノイド検出器の高度化

①大立体角化 (59%→93%)

→より広い運動学的領域のデータ収集

②中性子検出能力の向上

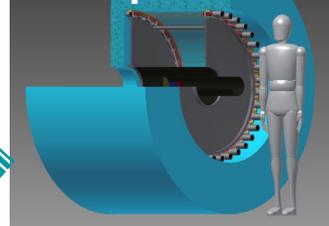
→中性子を複数終状態にもつ反応も検出可能

円筒型中性子検出器 (CNC)

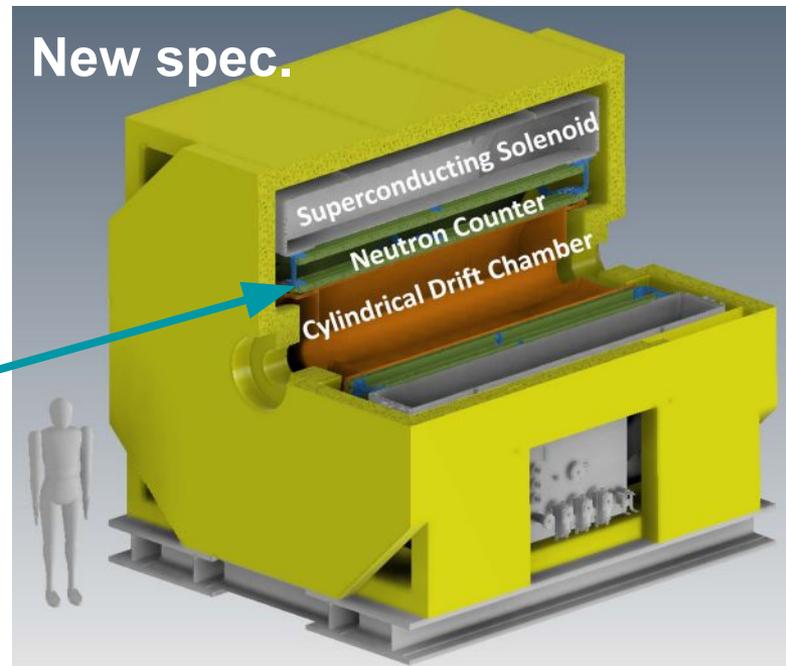
- TOFによる荷電粒子 (π , K, p, d) の識別
- 中性子の検出とTOFによる運動量の測定
- 将来: ポラリメータトラッカーのための散乱体

Upgrade

E15 spec.

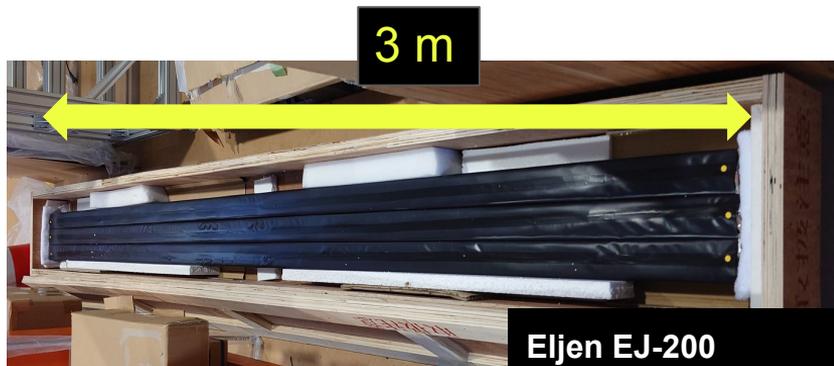
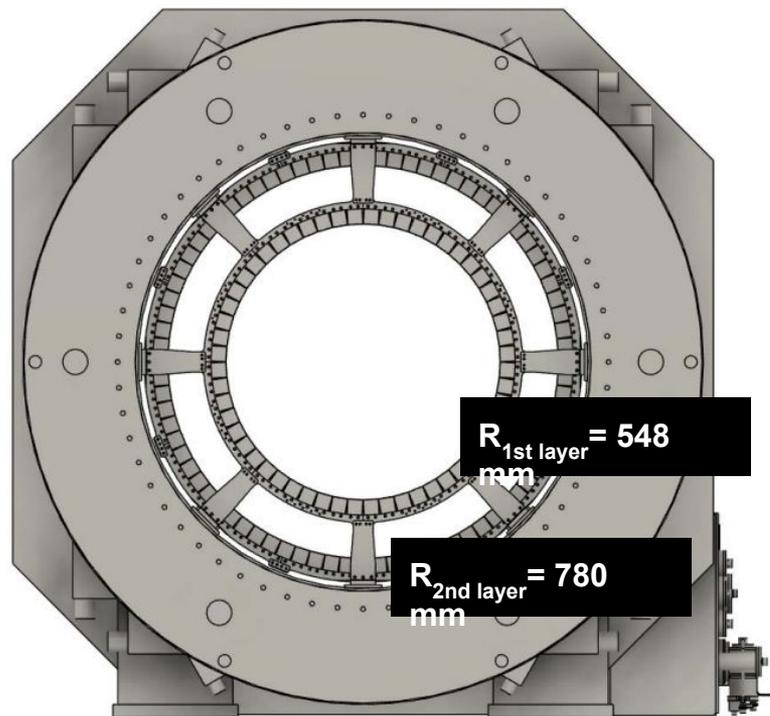


New spec.



3. 円筒型中性子検出器 (CNC)

CNCの構成



Eljen EJ-200
60 mm角、長さ3000 mm /本

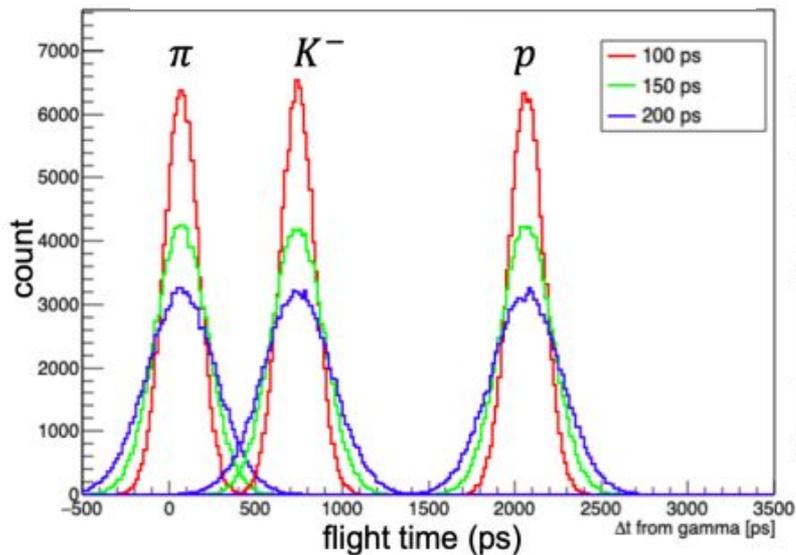
56+80本の2層のプラスチックシンチレータで構成

プラスチックシンチレータの厚みが3 cmから12 cmへ、立体角込みで中性子検出効率が約7倍

3. 円筒型中性子検出器 (CNC)

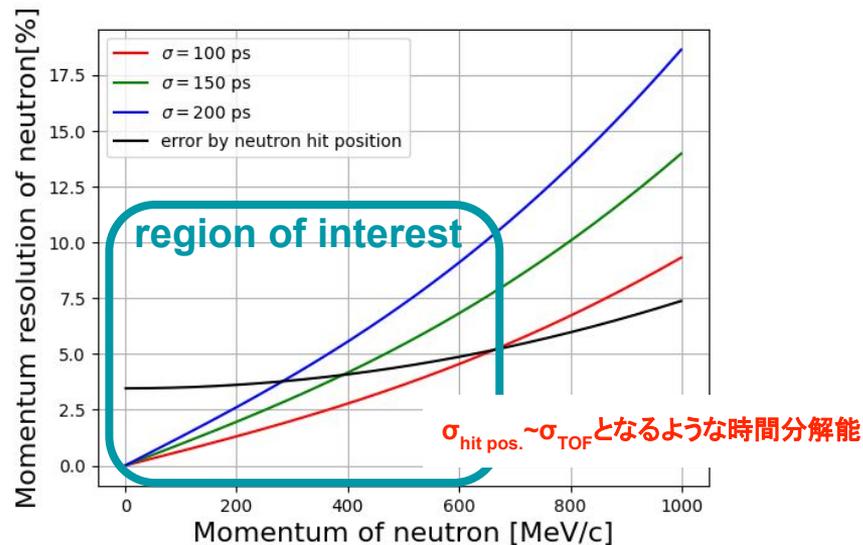
CNCの要求性能

荷電粒子の粒子識別 @500 MeV/c



TOF lengthを50 cmとして計算

中性子の運動量分解能



時間分解能の要求性能: 100 ps cf. 先行実験は長さ79 cmで100 psを達成

3. 円筒型中性子検出器 (CNC)

CNCのこれまでの研究

シンチレータの大きさ	ライトガイド	読出素子	時間分解能
2600 mm(W)×120 mm(H) ×50 mm(T)	あり	PMT	~ 115 ps



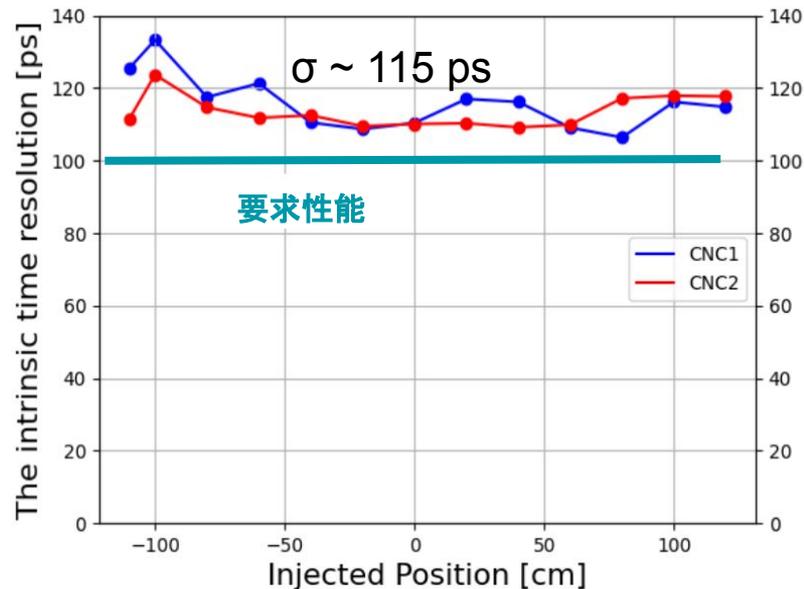
(Y. Kimura JPSmeeting2024)

シンチレータの大きさ	ライトガイド	読出素子	時間分解能
2600 mm(W)×60 mm(H) ×50 mm(T)	なし	MPPC	~ 60 ps

今回、実機 (3000 mm(W)×60 mm(H)×60 mm(T)) に対して、ビームテストを実施

- CNC実機が要求性能を満足するか
- 信号読み出し素子として PMTとMPPCどちらを用いるか

時間分解能の位置依存性



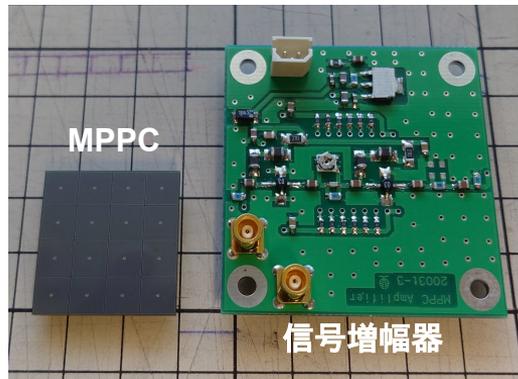
Y. Kimura JPSmeeting2024

3. 円筒型中性子検出器 (CNC)

CNCの読み出し素子



- FM-PMT(Hamamatsu)**
- 1.5 inch H8409(R7761)
 - 19-dynodes
 - 面積: $\sim 570 \text{ mm}^2$ ($\Phi=27 \text{ mm}$)
 - 量子効率: 20 %



- MPPC(Hamamatsu)**
- S13361-6050AE-04
 - 6 mm角の4×4 array hybrid × pararell結合で1 ch読出
 - 面積: $\sim 580 \text{ mm}^2$
 - 量子効率: 40 %
- 信号増幅器**
- 2段のRF増幅器
 - PZC回路

→オプティカルグリースで両端に接着

相対光量

FM-PMT: ~ 1

MPPC: ~ 2



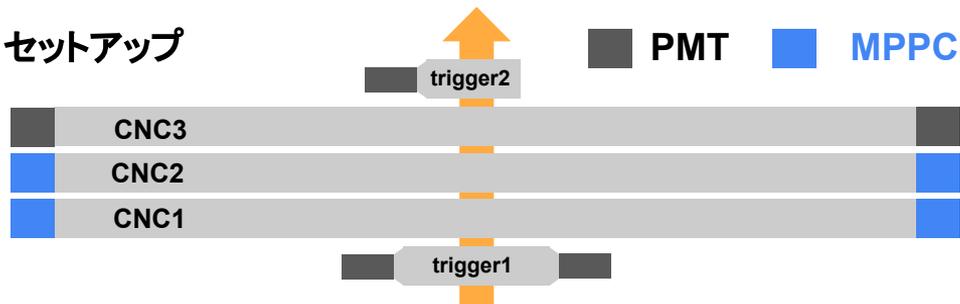
MPPCの方が良い時間分解能が期待される

4. ビームテスト

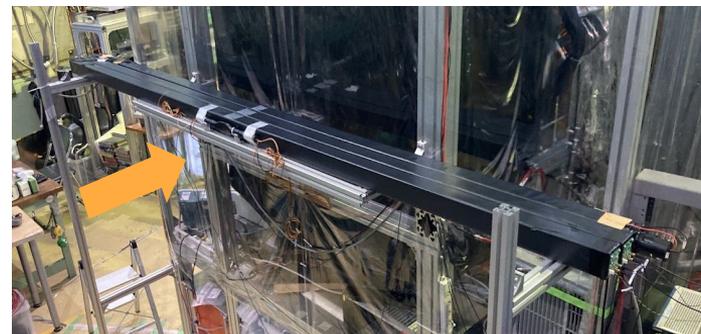
ビームテスト @J-PARC K1.8BR

2025年 2月 測定

セットアップ



実際のセットアップの例

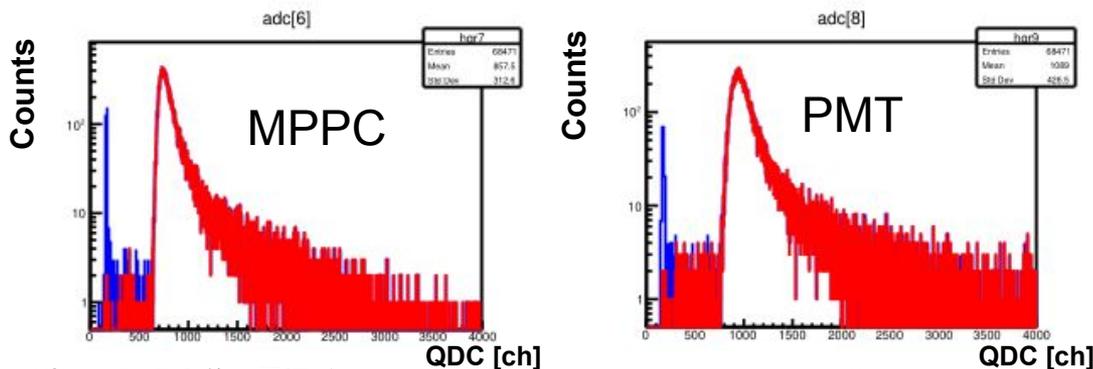


trigger1 : 40 mm(W) × 40 mm(H) × 5 mm(T)
trigger2 : 50 mm(W) × 40 mm(H) × 5 mm(T)

$\pi^- \sim 700 \text{ MeV/c}$
trigger coin. rate : $\sim 1 \text{ kHz}$

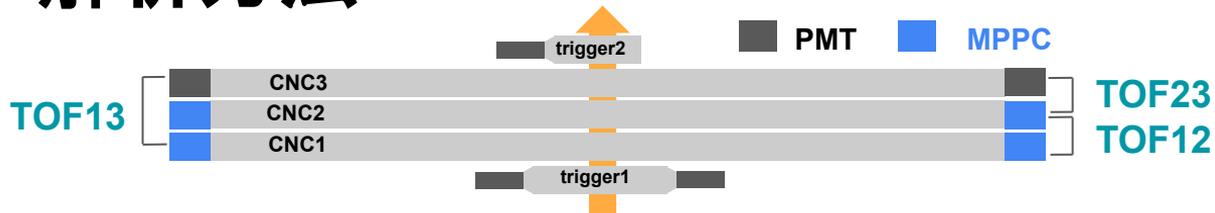
discriminator : QTC (GeVγ-1370)
QDC : CAEN V792
TDC : CAEN V1290

典型的なQDC分布 (青 : trigger coin. or clock 赤 : TDC > 0)



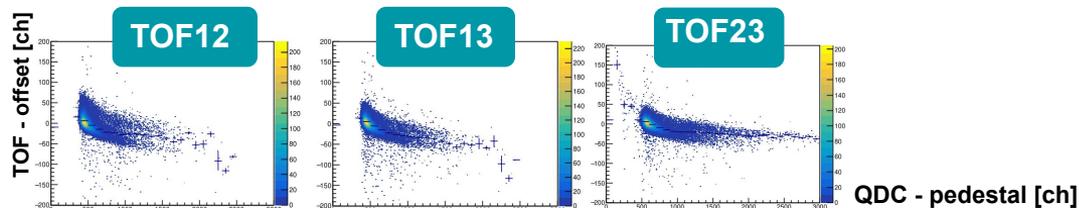
4. ビームテスト

解析方法

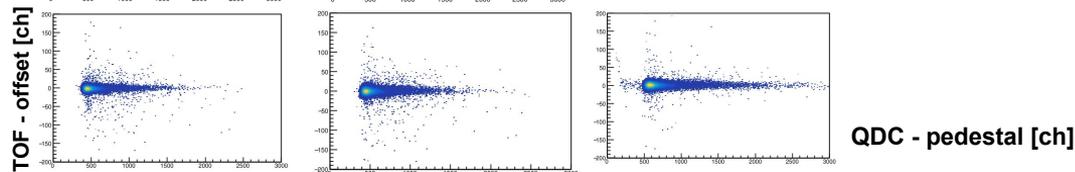


印加電圧
 PMT: 1700 V
 MPPC: $V_{br} + 7.5$ V

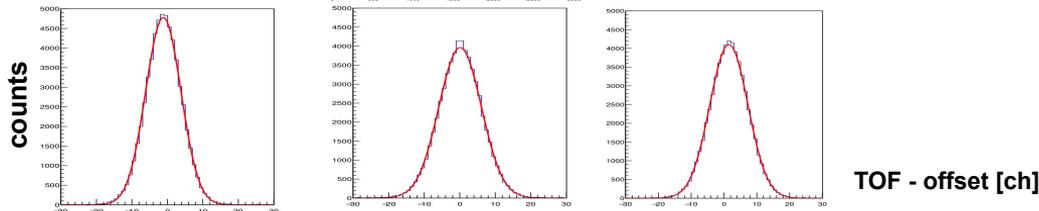
TOF vs charge
 (補正前)



TOF vs charge
 (補正後)



TOF分布
 (補正後)



$$\sigma_{12}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2$$

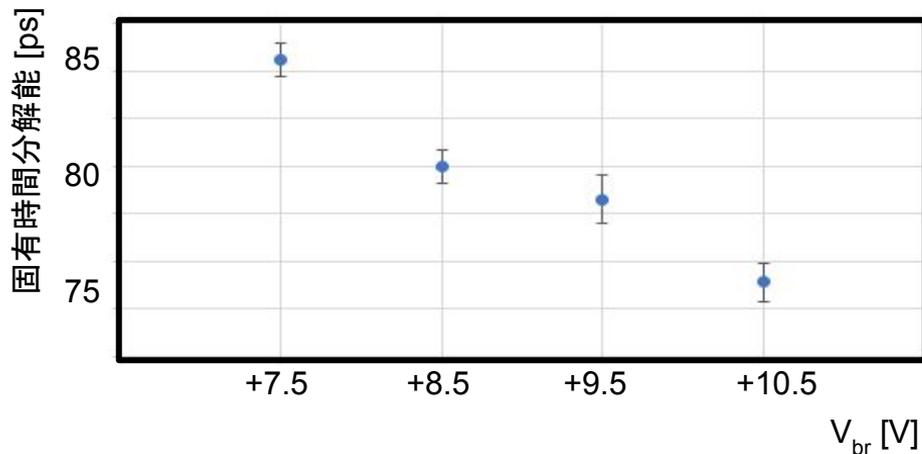
$$\sigma_{13}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_3^2$$

$$\sigma_{23}^2 = \sigma_2^2 + \sigma_3^2$$

4. ビームテスト

解析結果

MPPCの時間分解能のバイアス依存性



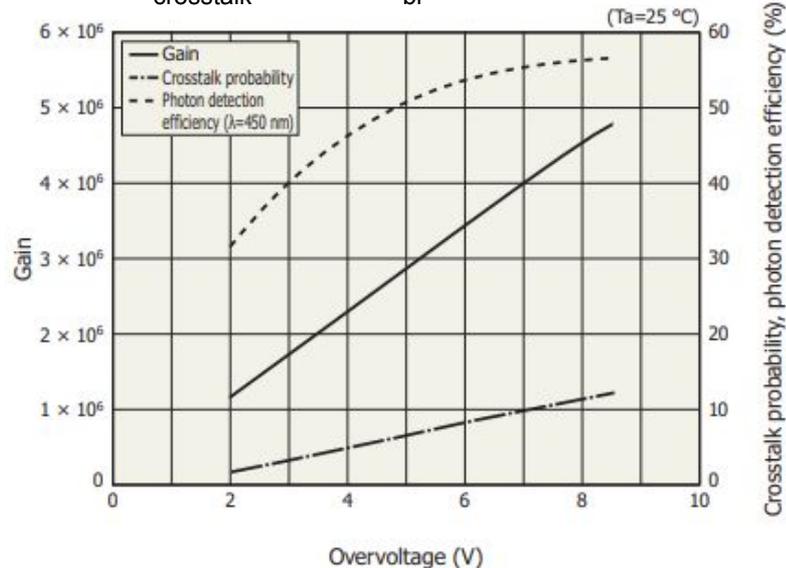
要求性能達成!

$$\sigma_{MPPC} = 84.5 \pm 0.7 \text{ ps} @ V_{br} = +7.5$$

V

$$\sigma_{PMT} = 118.6 \pm 0.5 \text{ ps}$$

Gain、 $P_{crosstalk}$ 、eff.の V_{br} 依存性 (Hamamatsu)



高バイアス

→eff., gain up

→光量up

→良い時間分解能

5. まとめ

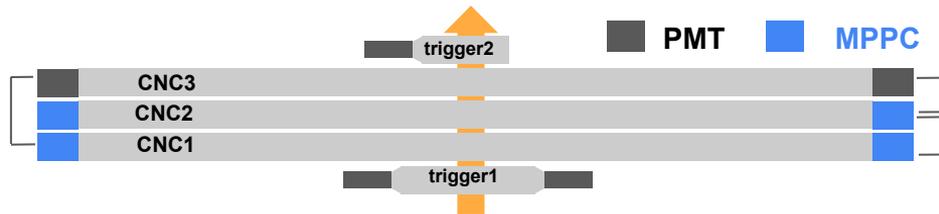
まとめと今後の展望

- 我々は、反K中間子原子核の系統的調査の第一歩となる J-PARC E80実験に向けて、大立体角化・中性子検出能力を向上させた新しいスペクトロメータを開発している
- 検出器システムの重要な役割を担う円筒形中性子検出器(CNC)の実機に対して、MPPCを読み出し素子として用いた場合時間分解能が要求性能である 100 psを満たしていることを確認し、CNCの信号読み出し素子として MPPCを用いることを決定した
- 今後、2026年秋のインストールに向けて信号増幅器の最適化(ダイナミックレンジ、電荷情報の取得法など)を進めていく

Back up

Slewing補正

TOF13

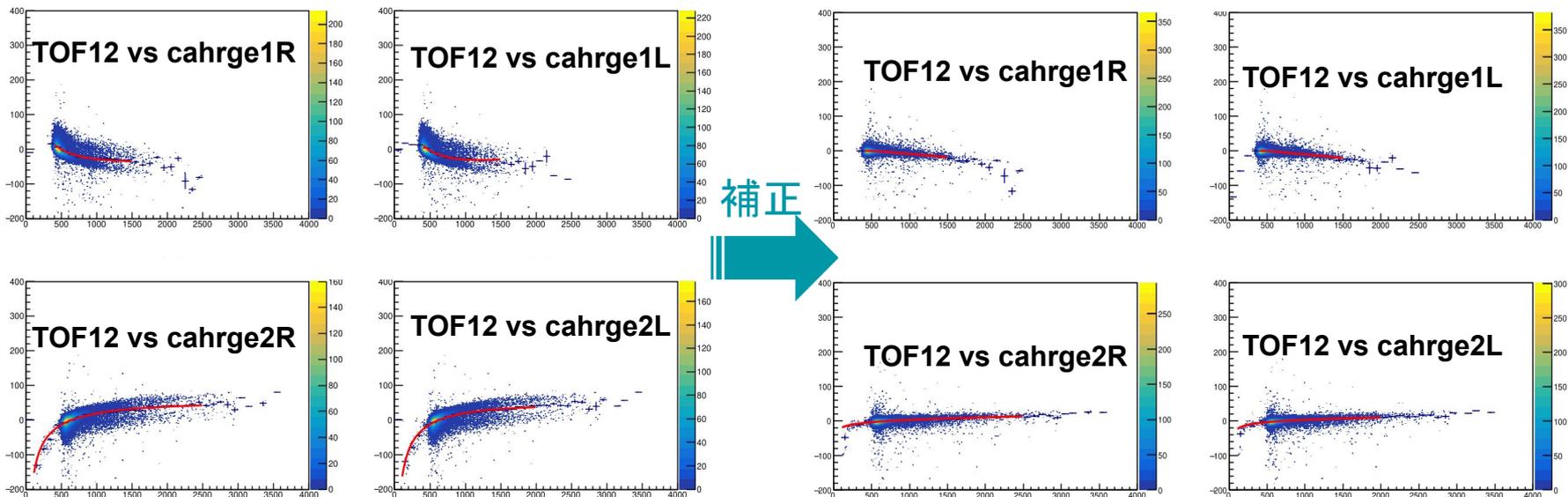


TOF23
TOF12

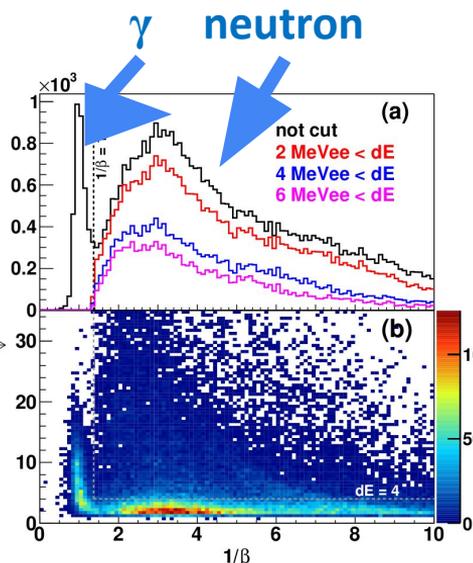
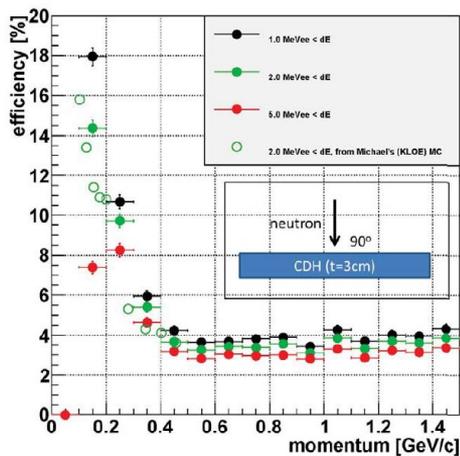
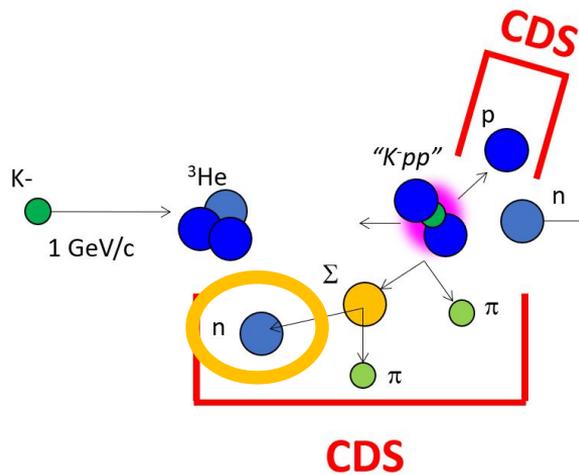
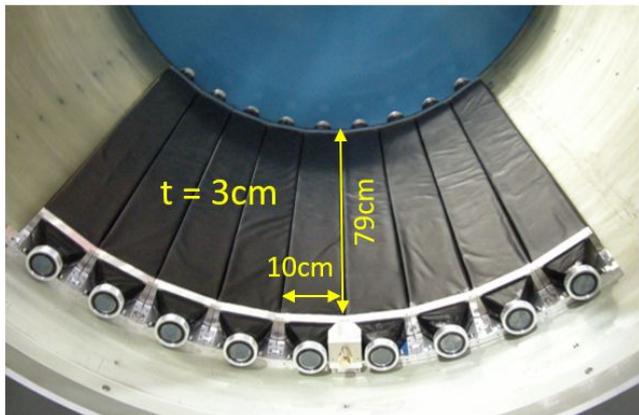
- 各CNCのヒットタイミングは両端の平均で定義
- Slewing補正: 各segmentに対してTOFをfitting、5回iteration

例: TOF12のSlewing補正

$$f(x) = a \cdot \sqrt{\text{charge}} + b / \sqrt{\text{charge}} + c \quad (a, b, c \text{ は定数}) \text{ で fit}$$

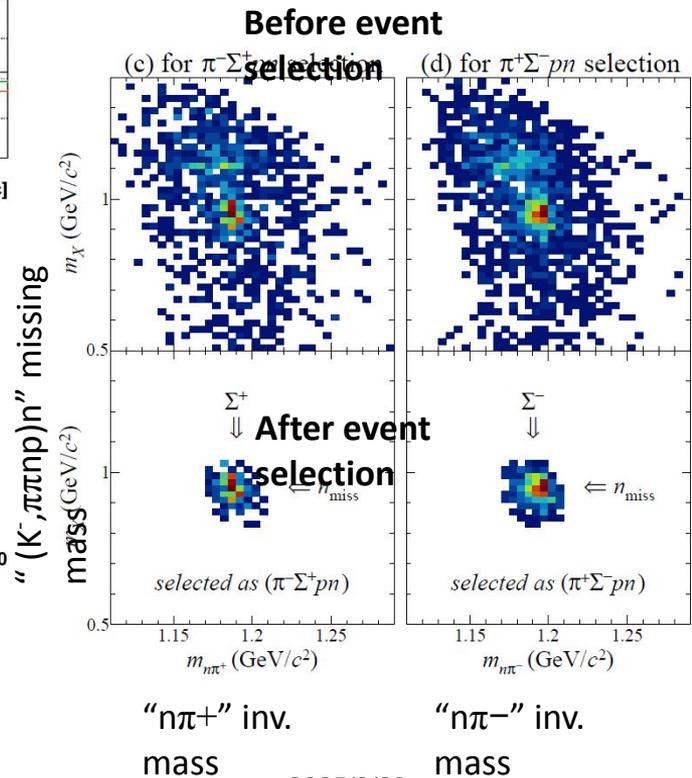


Neutron Detection



世(東北大)RIPIS 修(中)課程(角)

Successful recognition of $\pi\Sigma pn$



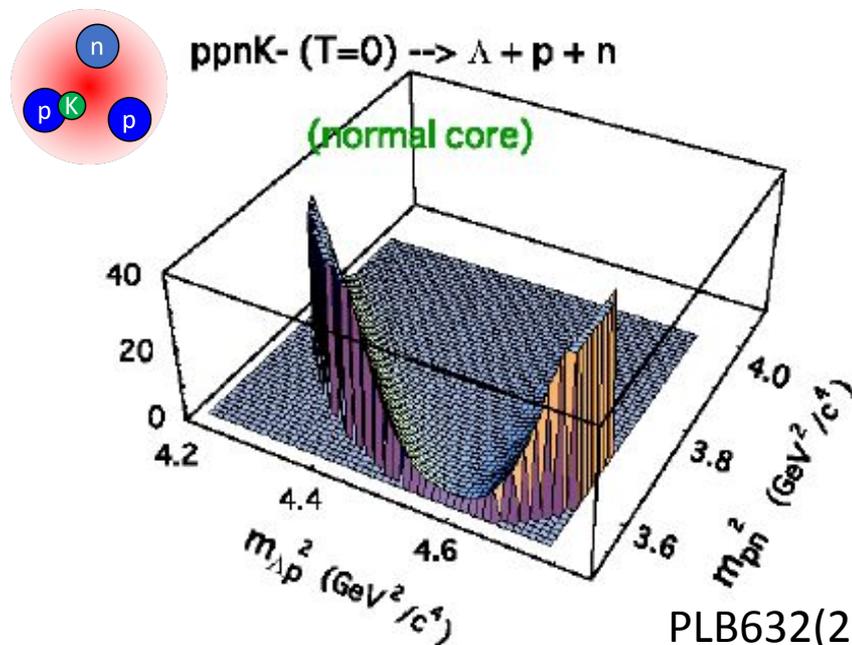
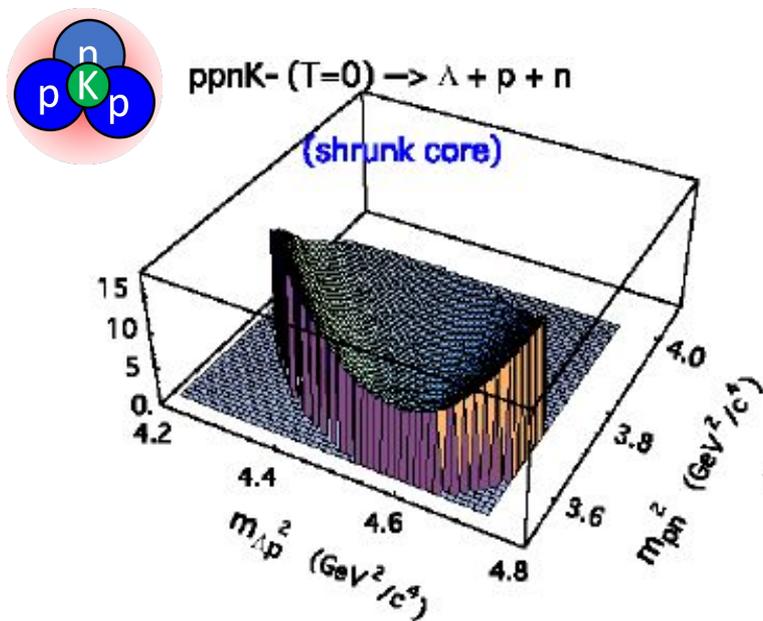
" $n\pi^+$ " inv. mass

" $n\pi^-$ " inv. mass

2025/3/20

Dalitz plotから迫る反K中間子原子核の密度情報

Kppnから崩壊した3粒子のDalitz plotから、生成された束縛状態の密度情報が得られる



PLB632(2006)187