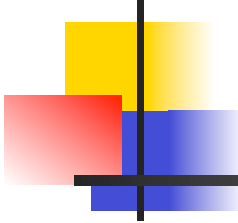


Kaon核実験的研究の現状と今後の進展の可能性に関して

1. Kaon核関連の諸実験の状況
2. 各論
 - (i) 静止K実験(FINUDA/E549)
 - (ii) in-flight実験(AGS-E930/KEK-E548)
3. 議論

東京大学理学部 鈴木 隆敏



諸実験の状況 – stopped K-実験

実験	標的	手法	(公称の)結果
FINUDA	${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}/{}^{12}\text{C}$	不変質量法 $A(\text{K}^-_{\text{stopped}}, YX)A'$ $Y=\Lambda, \Sigma^-$ $X=p, n, d, t$	(K ⁻ pp)->Λpの発見。 B.E. ~ 120 MeV Γ~70 MeV (K ⁻ ppn)->Λdの発見。 B.E. ~ 60 MeV Γ~35 MeV (K ⁻ ppnn)->Λt??
KEK E549	${}^4\text{He}$	ミッシングマス法 ${}^4\text{He}(\text{K}^-_{\text{stopped}}, N)A'K^-$ ${}^4\text{He}(\text{K}^-_{\text{stopped}}, d)A'K^-$ 不変質量法 ${}^4\text{He}(\text{K}^-_{\text{stopped}}, YX)A'$ $Y=\Lambda, \Sigma^-$ $X=p, n, d$	幅の狭いK ⁻ ppn/K ⁻ pnnの生成率は小さい(<1%)。 幅の広い/連続状態としての $\text{K}_{\text{bar}}\text{NN}/\text{K}_{\text{bar}}\text{NNN}$ 状態の存在?

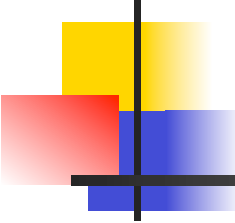


諸実験の状況 - in-flight K-実験

実験	標的	手法	(公称の)結果
BNL E930	^{16}O	ミッシングマス法 $^{16}\text{O}(\text{K}^-, n)^{15}\text{OK}^-$	Bound regionに明らかな強度。 p-stateの"evidence"(B.E. 90 MeV)。 s-state(B.E. 130 MeV)?
KEK E548	$^{12}\text{C}/^{16}\text{O}$	ミッシングマス法 $A(\text{K}^-, N)^{A'}\text{K}^-$	Bound regionに明らかな強度。 ピーク/バンプ構造は存在せず。 $^{12}\text{C}(\text{K}^-, p)^{11}\text{BK}^-$ ->Re(V)~-160 MeV, Im(V)~-50MeV $^{12}\text{C}(\text{K}^-, n)^{11}\text{CK}^-$ ->Re(V)~-190 MeV, Im(V)~-40MeV

諸実験の状況 - その他の実験

実験	標的	手法	(公称の)結果
FOPI(GSI)	Ni	不変質量法 Ni + Ni \rightarrow (K \bar{p} pn) + X K \bar{p} pn \rightarrow Λ +d	K \bar{p} pn B.E. \sim 150 MeV $\Gamma \sim$ 100 MeV
OBELIX	^4He	不変質量法 $^4\text{He}(\text{pbar}_{\text{stopped}}, \Lambda p)X$ $^4\text{He}(\text{pbar}_{\text{stopped}}, \Lambda d)X$	K \bar{p} p B.E. \sim 160 MeV $\Gamma \sim$ 20 MeV K \bar{p} pn B.E. \sim 120 MeV $\Gamma <$ 60 MeV
DISTO	p	不変質量法 $pp \rightarrow K^+(K\bar{p}p)$ $K\bar{p}p \rightarrow \Lambda p$	K \bar{p} p B.E. \sim 100 MeV $\Gamma \sim$ 120 MeV

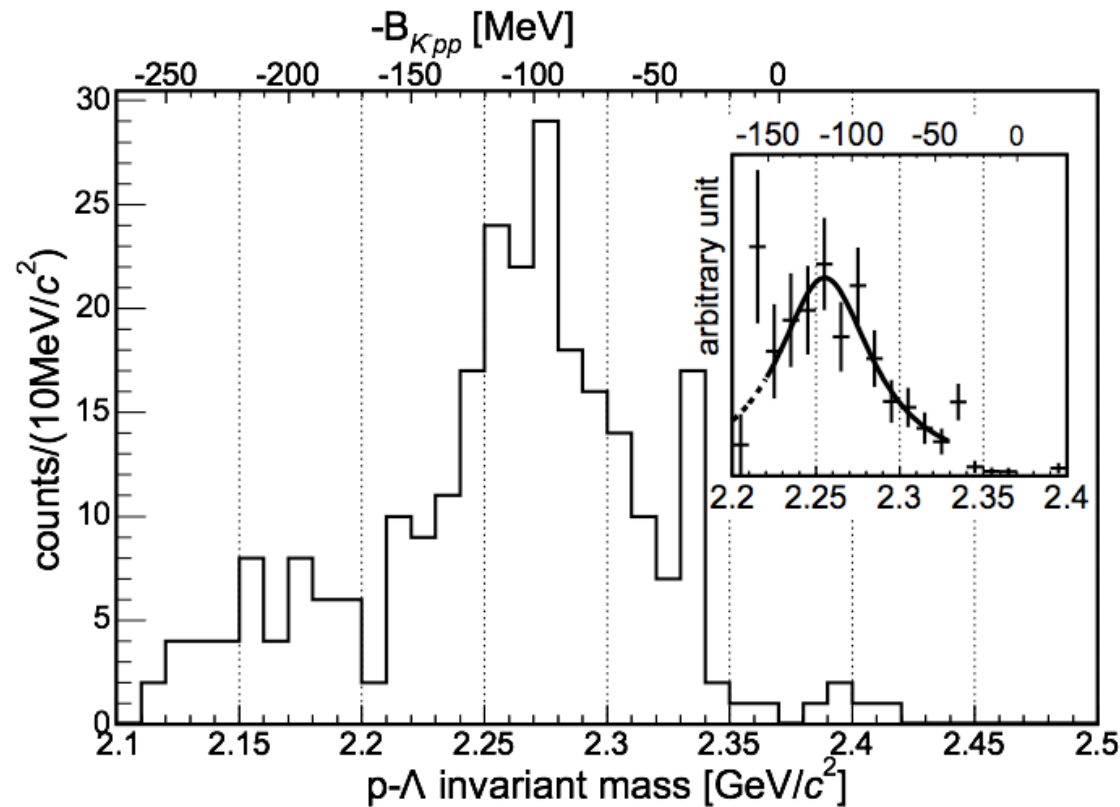


静止K-による実験の特徴

- * 貴重なK-ビームを最大限有効利用(KEK-PSのような低強度の加速器でも高い統計を得やすい)。
- * エネルギーが低く始状態が0エネルギーなので分解能は出しやすい。
- * 原子状態からの遷移なので始状態の角運動量に不定性が有る。
- * “ある程度は既知”の物理バックグラウンドが存在(これはもちろんin-flight法も同様)。

FINUDA実験(K⁻pp→Λp)

PRL **94** 212303 (2005)



A + K⁻ → “K⁻pp” + X?

K⁻pp → Λ + p ??

このとき

B.E. ~ 120 MeV

Γ ~ 70 MeV

2核子吸収+弾性/非弾性FSI?

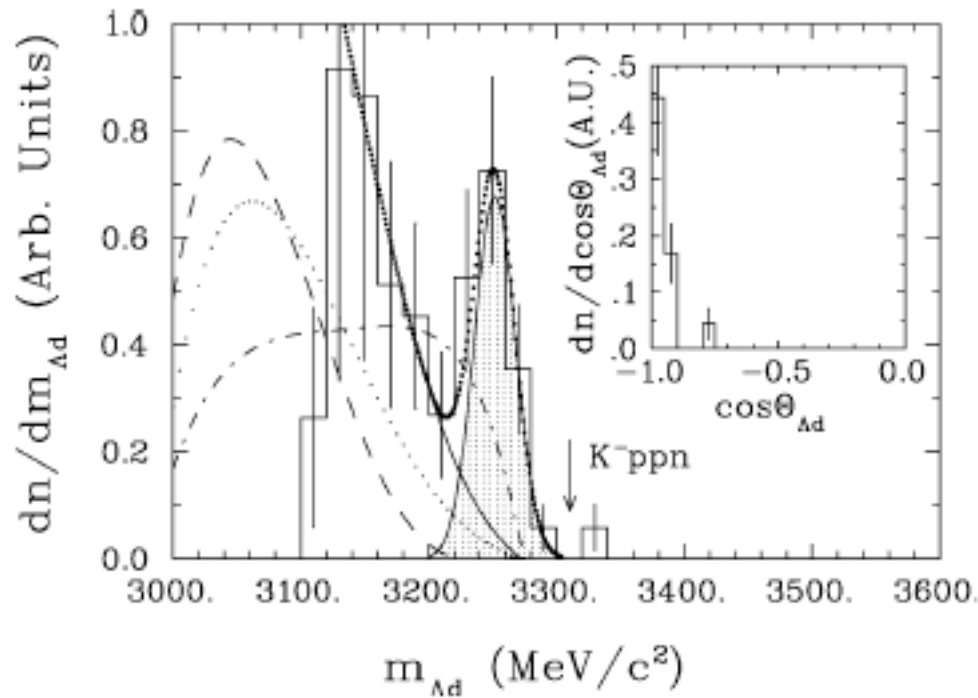
2核子吸収+Σ⁰の電磁崩壊?

3核子吸収?

より大きなK核?

“これだけ見たら”様々な可能性
有り。

FINUDA実験(“K⁻ppn”->Λd)



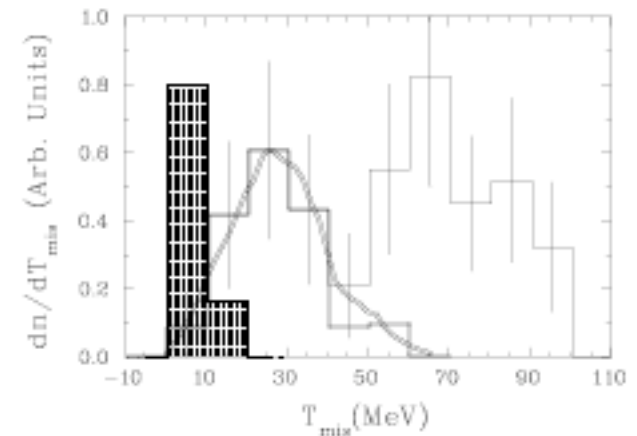
${}^6\text{Li} + \text{K}^- \rightarrow \text{“K-ppn”} + (\text{n}) + (\text{d})?$
 $(\alpha + \text{K}^- \rightarrow \text{“K-ppn”} + \text{n})?$
 $\text{K-ppn} \rightarrow \Lambda + \text{d} ??$

このとき

B.E. ~ 60 MeV

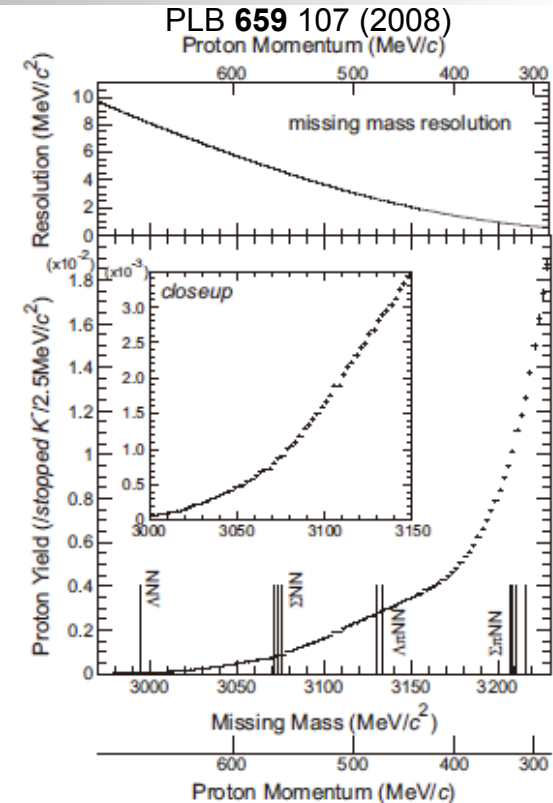
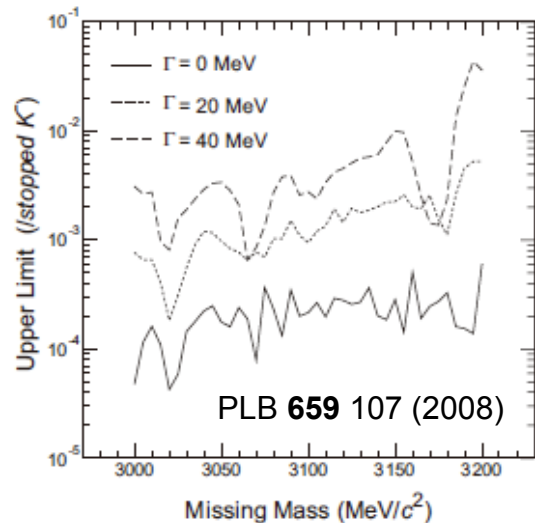
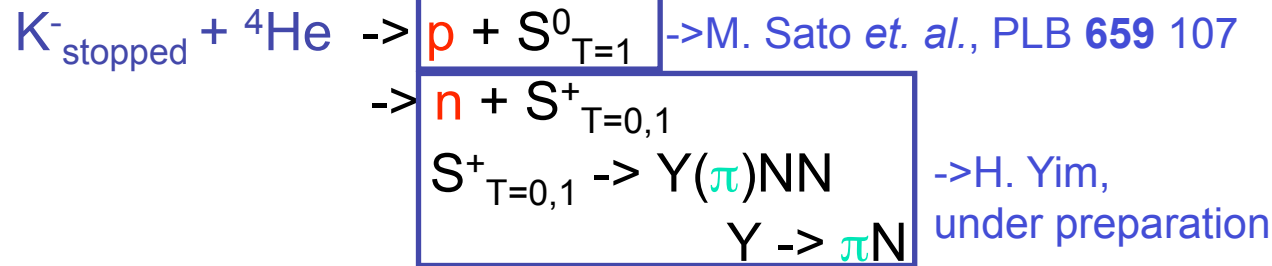
Γ ~ 40 MeV

ミッシングエネルギーはnとdがスペクテータであるという解釈にコンシステント。



KEK E549実験 (インクルーシブ分光)

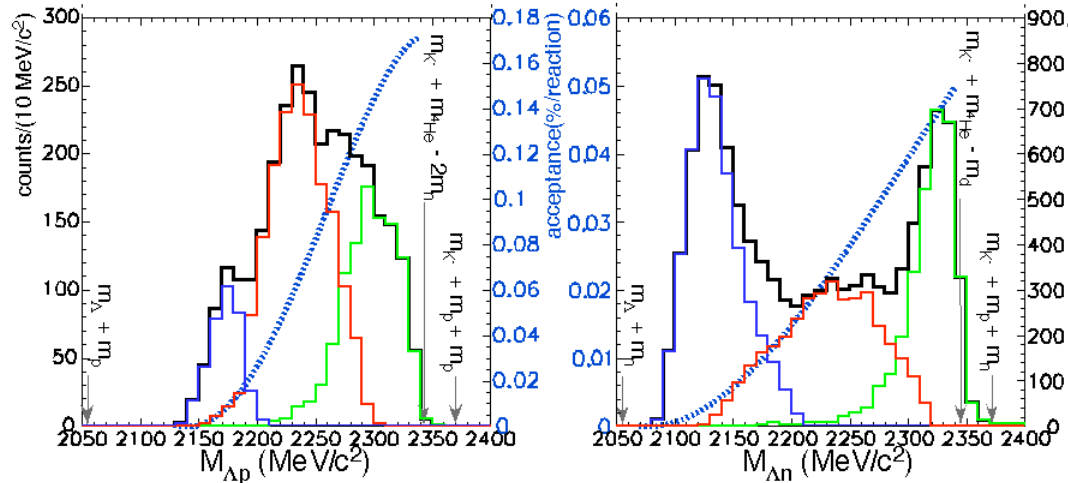
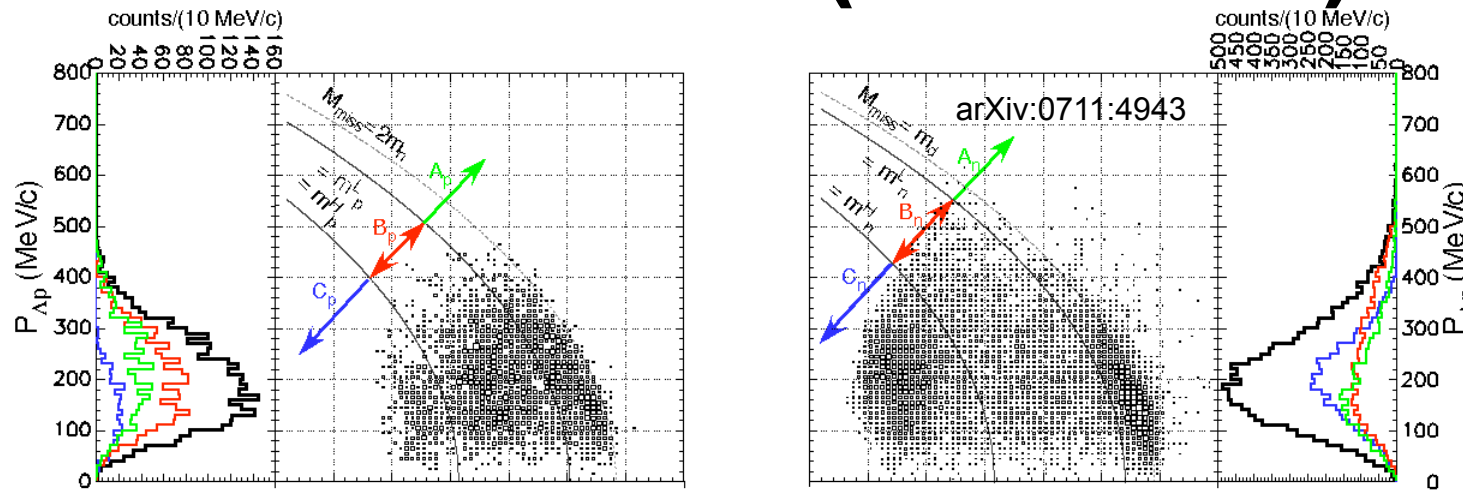
$(K_{\text{bar}}\text{NNN})_{Z=0,T=1} : S^0$ / $(K_{\text{bar}}\text{NNN})_{Z=1,T=0,1} : S^+$ の(半)
インクルーシブなミッシングマス分光



結果: 幅の細い($\Gamma < \sim 40 \text{ MeV}/c^2$) 状態には極めて厳しい生成率上限

=> 幅の細い $K_{\text{bar}}\text{NNN}$ 状態は存在しないことを圧倒的統計と分解能で p と n の両方のチャンネルにつききちんと立証したKaon核の "the experiment".

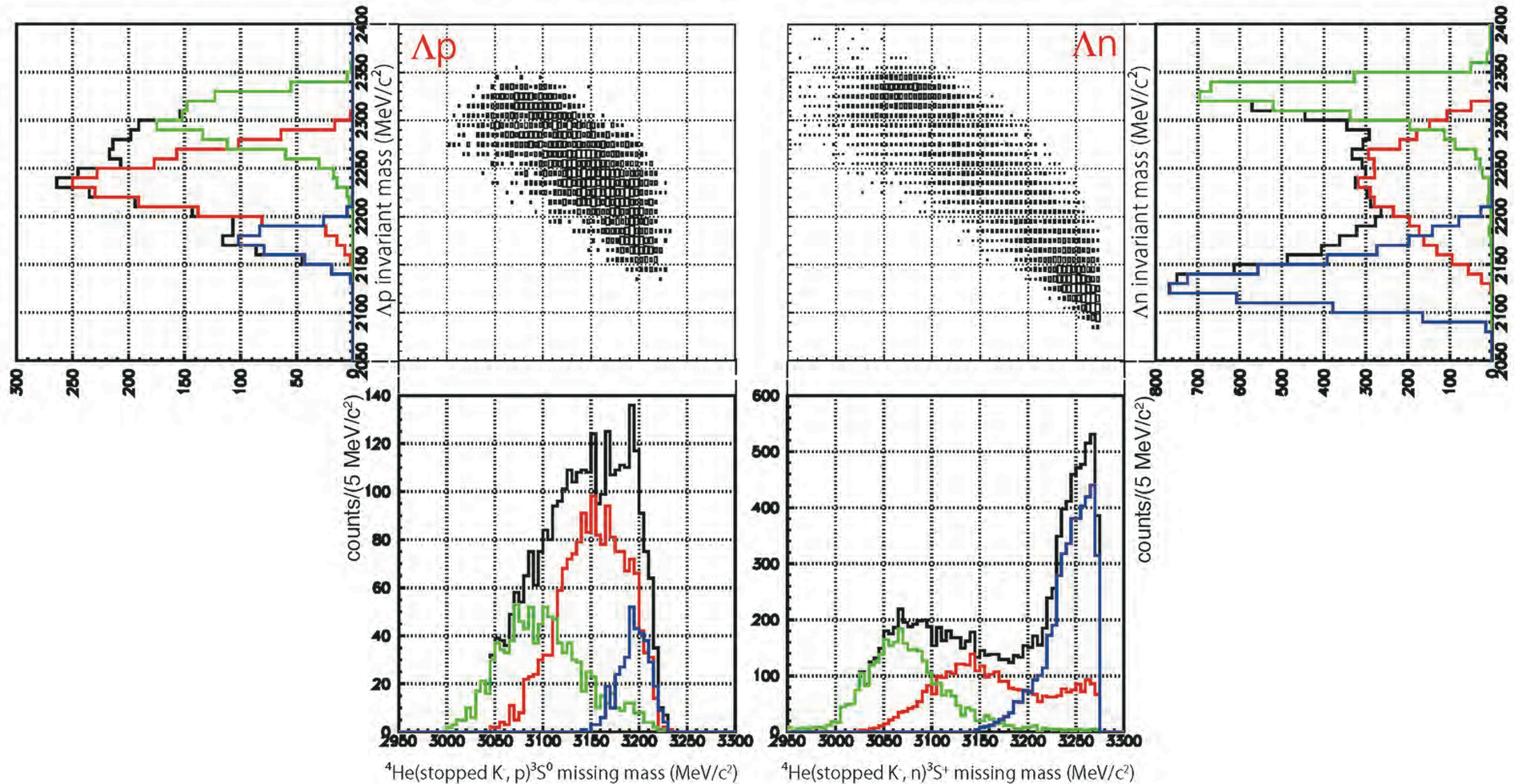
KEK E549実験(ΛN 相関1)



- ☞ back-to-backのハイパロンと核子の同時測定。
- ☞ ハイパロン崩壊起源の核子BGは0(これはインクルーシブ測定と決定的に異なる部分)!!
- ☞ M.M.(ΛN)による反応終状態/残核の運動状態の情報(“軽い標的”の恩恵)。

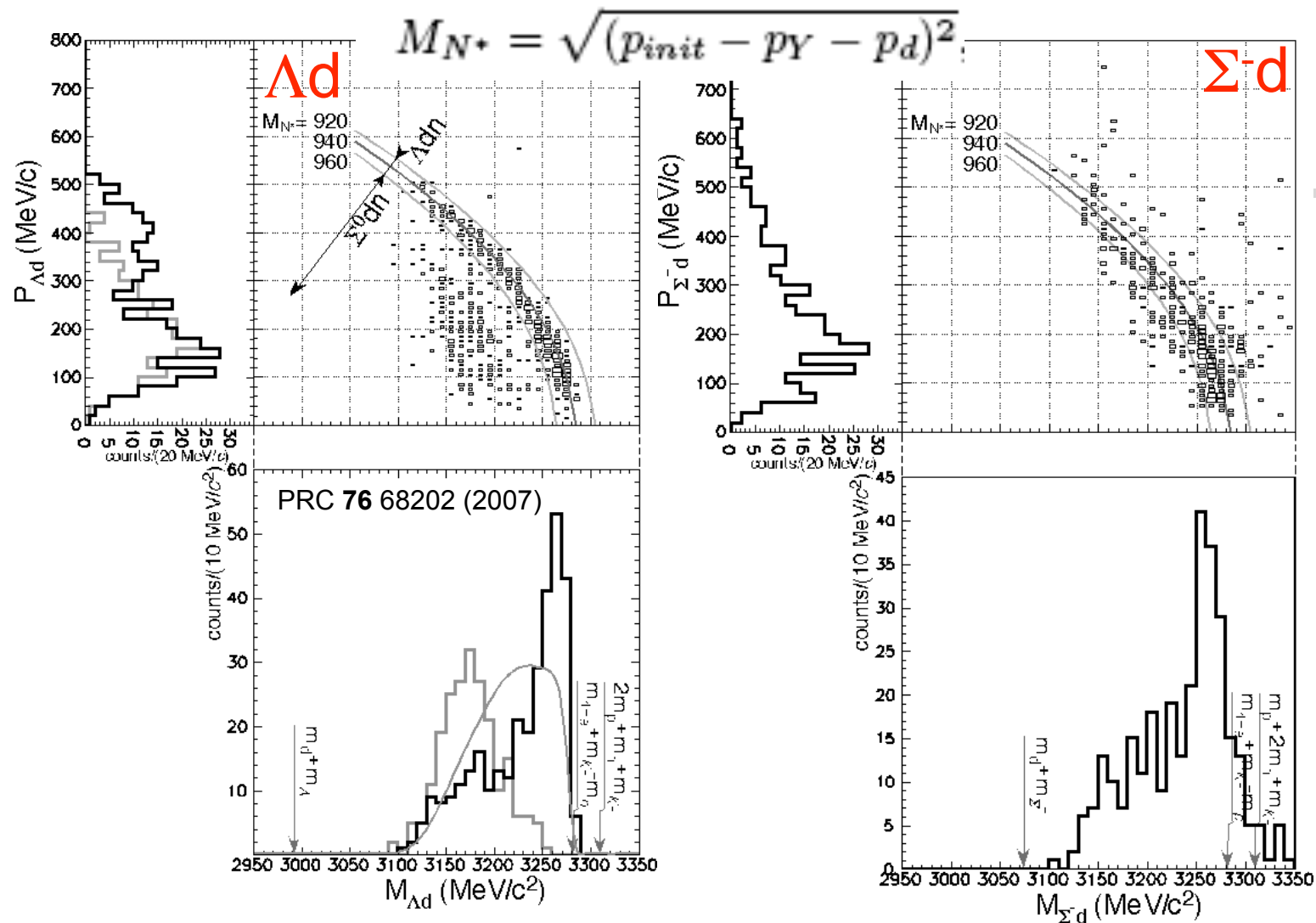
- ✓ “2核子吸収”のspin-アイソspin依存性の決定->K核の崩壊分岐比の理解?
- ✓ FINUDA 実験で言う“K-pp”的成分の異なる標的での $\Lambda p/\Lambda n$ 両方のchannelでの確認。
- ✓ ^4He 標的上での“K-pp”的成分のelastic re-scattering(MORT)解釈の“否定”。

KEK E549実験(ΛN 相関2)



- ✓ "KbarNN"的成分は同時に"KbarNNN"的成分(3140 MeV/c²)でもある!!
- ✓ 少なくとも" Λp "側に関しては"KbarNN"解釈が相当困難である。
- ✓ "非MORT的FSI(非弾性散乱)の可能性? ->(残核が小さいので)反応断面積的に説明困難(定量的計算を要するが)。完全を期するには ΣN チャンネルの測定が必要。

KEK E549実験(Yd相関)



$\Delta d(l=0)$ と $\Sigma^- d(l=1)$ の両方にFINUDAと同様のピーク。残核(p/n)の運動量は共に Fermi運動とconsistent => K-の3核子吸収過程の発見。FINUDAの Δd on ${}^6\text{Li}$ も同様の解釈が適当。

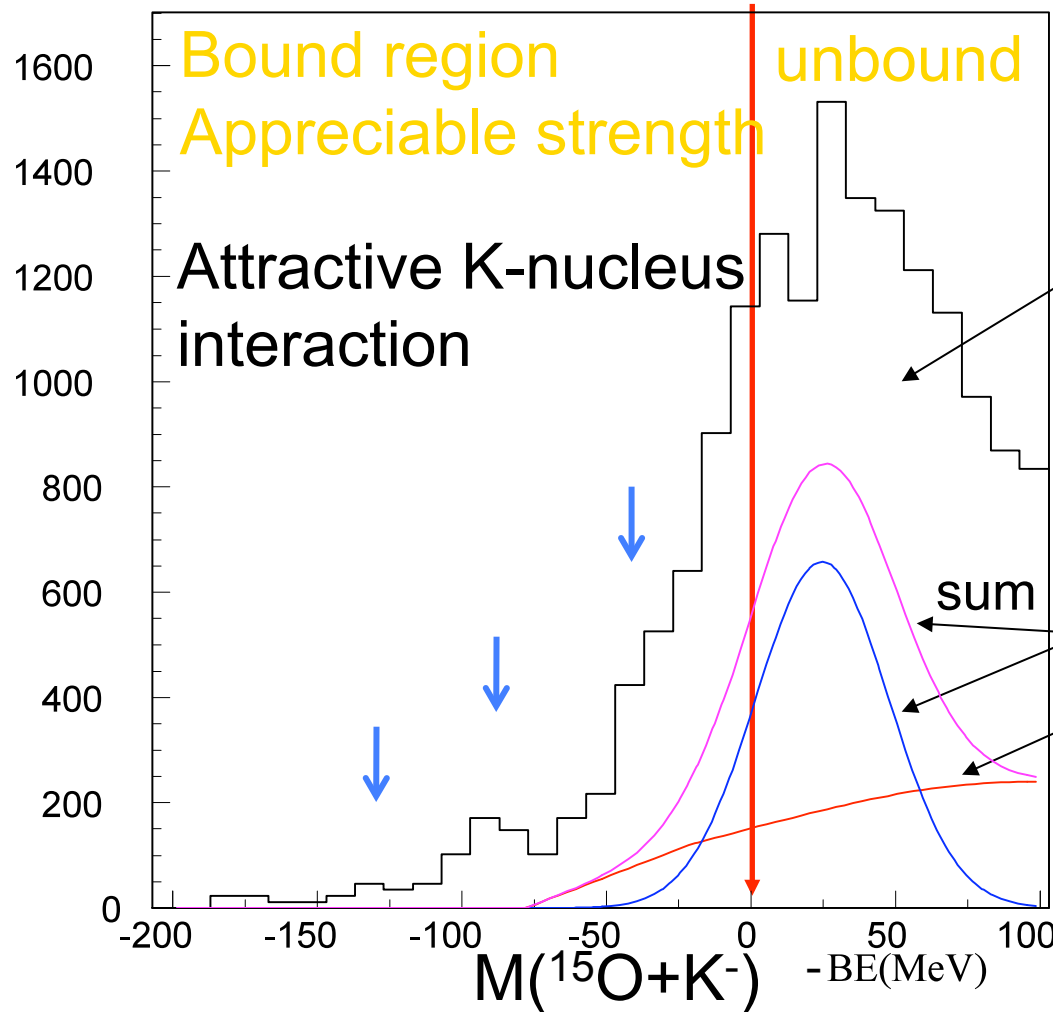


In-flight K-による実験の特徴

- * 一般にAGSやJ-PARCのような大強度のK-ビームが必要。
- * エネルギーが高いため分解能を出しにくい。反応のparticipantは常に前方に飛ぶことから運動学的に落ちるBG成分もあり、生成し得るK核に不定性は無い。
- * BG過程とK核シグナルの断面積比としてはa prioriに静止K-より優位であるとは限らない。

BNL-AGS E930実験

T. Kishimoto, Slide for PANIC08



$^{16}\text{O}(\text{K}^-, n)$
missing mass
@ $P_{\text{K}} \sim 0.93 \text{ GeV}/c$
water target

$p(\text{K}^-, n)\text{K}^0$
Hyperon production

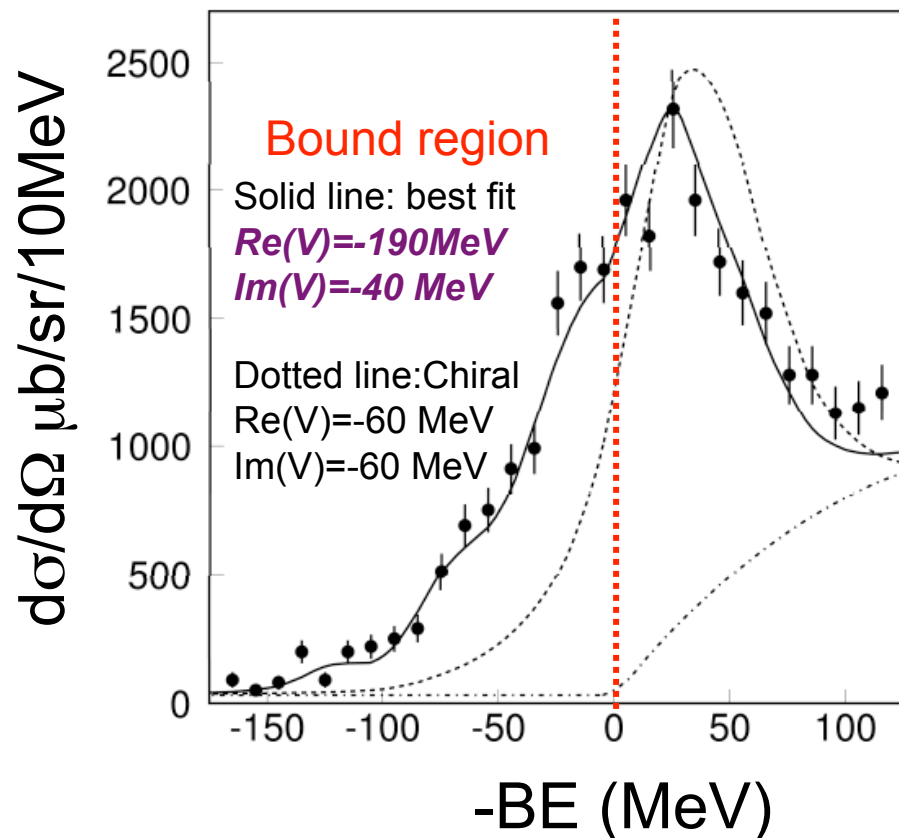
Potential depth $\sim 200 \text{ MeV}$
Cross sections: consistent

KEK E548実験(1)

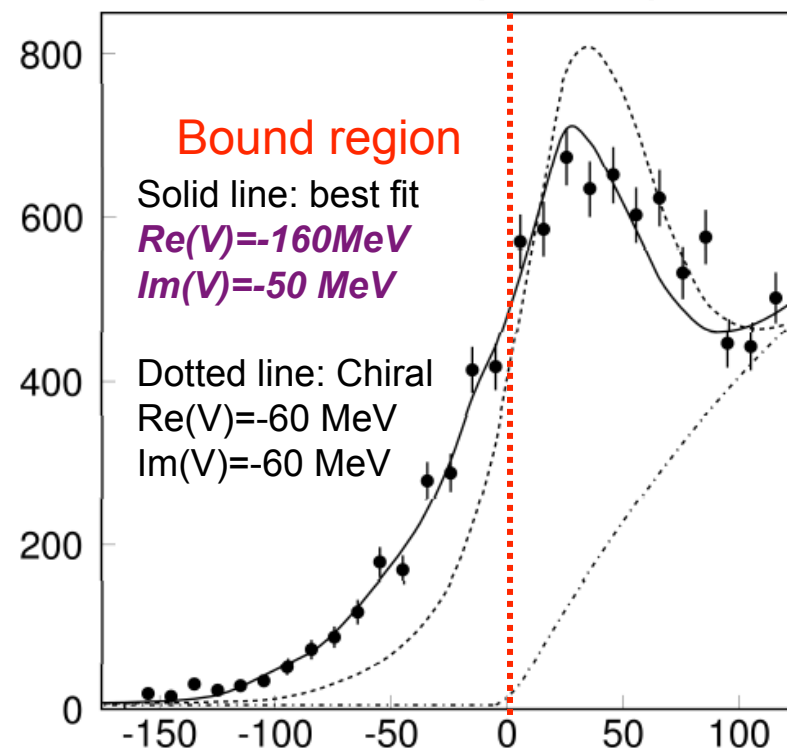
: $^{12}\text{C}(\text{K}^-, \text{N}) @ P_K = 1.0 \text{ GeV}/c$

T. Kishimoto, Slide for PANIC08

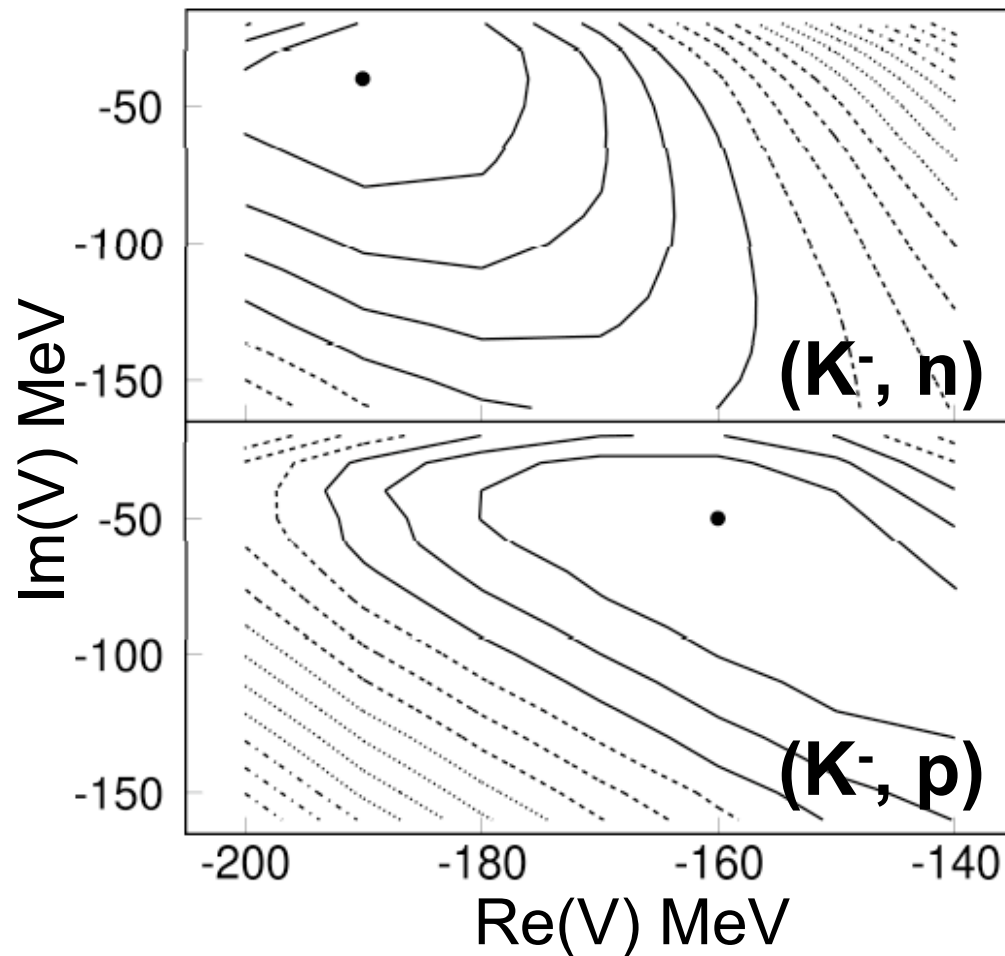
MM $^{12}\text{C}(\text{K}^-, \text{n})$



MM $^{12}\text{C}(\text{K}^-, \text{p})$



KEK E548実験(2)



T. Kishimoto, Slide for PANIC08

$\text{Re}(V) = -190$ MeV

$\text{Im}(V) = -40$ MeV

$\text{Re}(V) = -160$ MeV

$\text{Im}(V) = -50$ MeV

深くabsorptionが弱いpotential
nとpの深さの違いはpopulateされる
K核中の $I=0$ のKNペアの数からして
reasonableである。



ここまでで理解されたこと(1)

*(半)インクルーシブ測定(ミッシングマス法) -> 幅が広い場合静止Kは非常に厳しく(全てのBGを同時に被り、シグナルとBGを分離する方法は原理的に存在せず)、K核生成シグナルは必ず前に飛ぶ事を利用出来るin-flight法が(実験面での予算やテクニカルな困難を別とすれば)圧倒的に優位。

*エクスクルーシブ測定/ハイパロンタグ(不変質量法/ミッシングマス法)
->終状態が絞られることからBG過程が限られるためスペクトルの解釈が容易である一方K核のスペクトルは終状態によるバイアスを受ける。バイアスを考慮に入れた計算との比較を要する一方で幅の拾い状態を”実験的”に同定するためにはインクルーシブ測定よりもはるかに強力。



ここまでで理解されたこと(2)

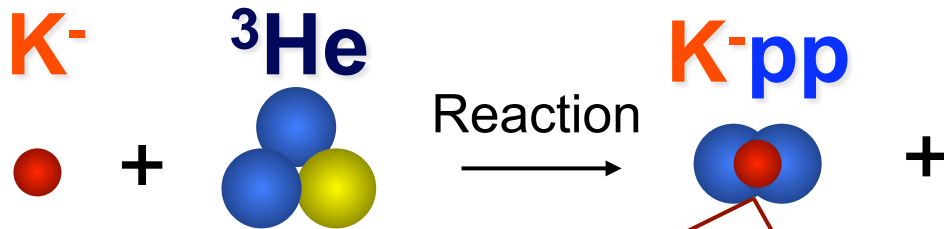
*標的: ${}^4\text{He}$ さえ”重”くsubcomponentが多いため、またエクスクルーシブ測定を行うためにもFSIの影響を低減するためにもやはり”軽い”標的が望ましい。(K-,N)ならA=3。

*反応: 静止K-では異なるK核の強度がoverlapしかねないがin-flightではスペクトル強度の解釈は特に重い標的ではよりスムーズであろう。

* 研究スタンス: 一足飛びにK核ではなくて、BG過程を正しく理解することより始めるべき。K核は全ての既知のBG成分を引き去った余りのスペクトル強度としてしか同定され得ないであろう。そのための基礎データ(ハイパロン生成、多核子吸収、ハイパロン分岐、 $\Lambda(1405)$ の問題等)の収集や計算が実は重要。言うまでもないがBG過程や分岐比もKbar-原子核相互作用の情報を持っている。

J-PARC E15実験(1)

M. Iio, Slide for PANIC08



Missing mass spectroscopy

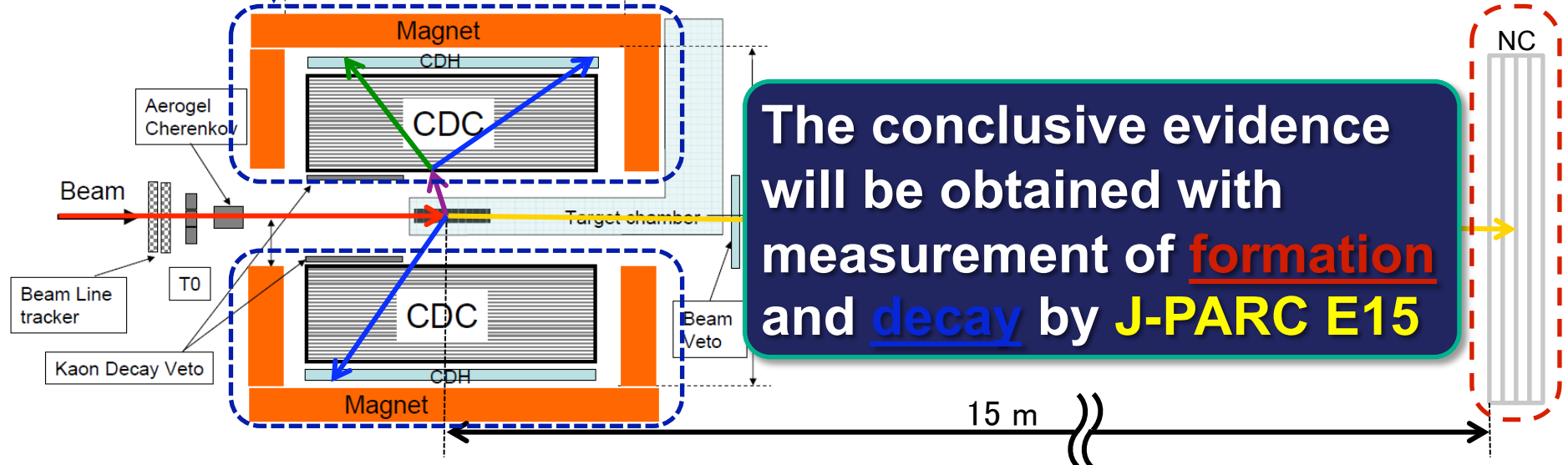
n K^-pp search with TOF measurement of neutron



Invariant mass reconstruction

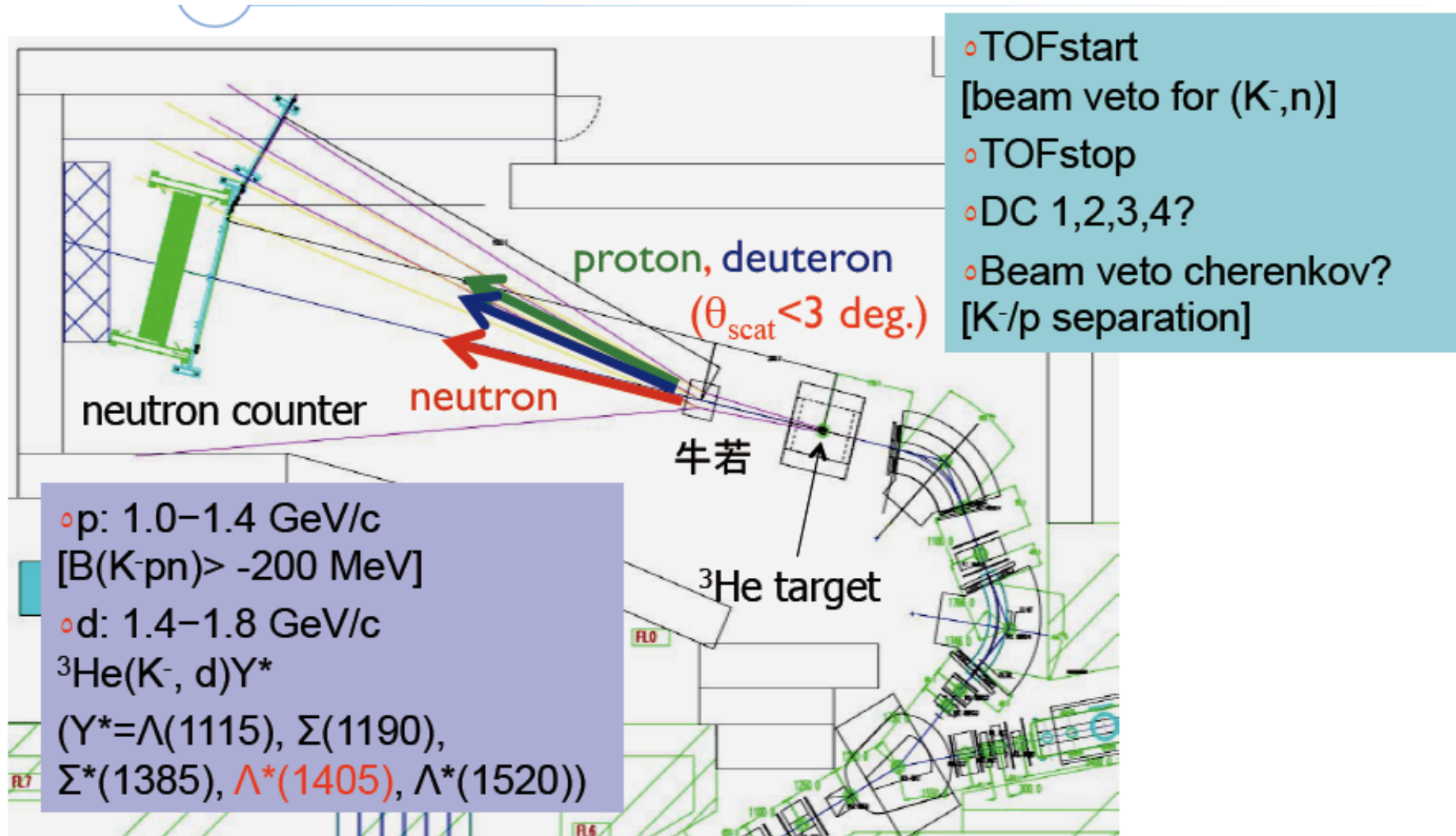
K^-pp search with decay particles measurement

1.2 m



J-PARC E15実験(2)

H. Fujioka, Slide for Tokutei Workshop 2008



★(K^-, n)と(K^-, p)の比較に依るアイソスピン依存性の研究

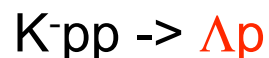
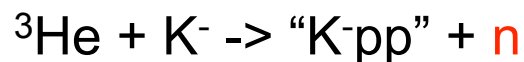
★ $^3\text{He}(\text{K}^-, \text{d})\Lambda(1405)$ 反応の研究



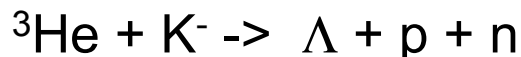
E15で出来る事/出来ない事

✓軽い標的に対してin-flight法を用いていることから、populateするKaon核がuniqueであることとFSIが小さいことは⁴He標的のE549に比べても大きな強み。

✓一方



の測定においてIM(Lp)=MM(n)が保証するのは高々反応の”終状態”が $\Lambda p n$ であること、即ち



=> 多核子吸収起源のBGの議論から逃れる事は出来ないことはE549等とほぼ同様。

✓E549による2核子吸収過程の定量的議論により、 Λp 崩壊を仮定するのは危険。一方で Σ を見るには苦しい実験setup。



まとめ

Kaon核の”実験による同定”に関するキーワード

1. inclusive VS exclusive => exclusive。最低限ハイパロンタグ (出来れば Λ と Σ 両方)。
2. 重い標的VS 軽い標的 => 軽い標的。
3. 静止 K^- VS in-flight K^- => in-flight K^- 。特に重い核では顕著。
4. 異なるアイソスピンチャンネルでの比較。

J-PARC E15は究極では無いがこれまでで最善の実験となるであろう。