

飛行分離法による低エネルギー2次ビームと 逆運動学共鳴弾性散乱による核分光

RCNP 研究会 2007 年 2月20日
九大理 寺西 高

RCNP-AVF による重イオンビーム + ENコースを使用した
低エネルギー2次ビーム生成を念頭において、
CNS-RIKEN での低エネルギー2次ビームラインと最近の実験の紹介をする

- 飛行分離法による低エネルギー2次ビーム生成
- 逆運動学共鳴弾性散乱による共鳴探索

核子あたり 5MeV以下での不安定核-陽子共鳴弾性散乱

核子あたり1~10MeV 程度の不安定核ビーム

低エネルギー反応による核分光、天体核物理

直接反応、共鳴反応・散乱

停止したRIの利用 (核分光、原子分光、物性研究)

低エネルギー2次ビーム生成法

ISOL+後段加速器

ビーム核種の制限、後段加速器(場所・予算)が必要

中間エネルギー飛行分離(核子あたり~100 MeV)

入射核破碎反応 + 厚い生成標的 + 分離器 (厚い degrader)

エネルギーの拡がり、エミッタンス増大が激しい (ビーム強度に制限)

遠い不安定核まで生成可能

→
今回の話

低エネルギー飛行分離(核子あたり~10MeV)

低エネルギー反応 + 薄い生成標的 + (小型)分離器

安定線からそれほど遠くへはいけない

ビーム強度に制限(薄い標的)

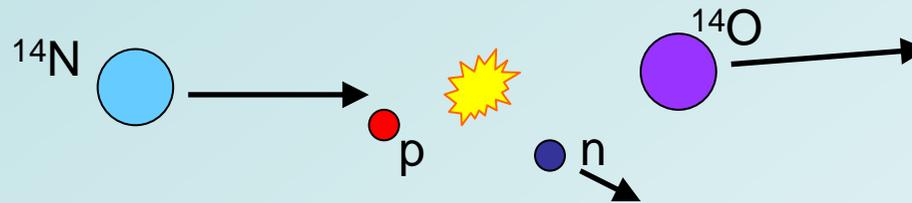
ISOL に比べ技術的に容易

生成後エネルギーを大きく落とす必要がない

低エネルギー飛行分離方式でどのくらいのビーム強度が得られるか

例: ^{14}O ビーム

- 1次ビーム $^{14}\text{N}(6+)$ 強度 500 pA (3×10^{12} 個/秒)
エネルギー 8.4 MeV/u
- 反応 $p(^{14}\text{N}, ^{14}\text{O})n$ (p,n) 反応の逆運動学反応
断面積 8 mb



- 標的 メタンガス (CH_4) (or 水素 H_2 ガス)
1気圧 2 cm (0.3 mg/cm^2)
Havar 膜で封入

2次ビーム ^{14}O の強度 10^6 個/秒
エネルギー 7 MeV/u

(最近はイオン源・加速器・標的の改良により 10^7 程度は可能)

標的の薄さを1次ビームの強さで補償

大強度
CNS/RIKEN
ECR イオン源

低エネルギー
飛行分離では
厚くできない

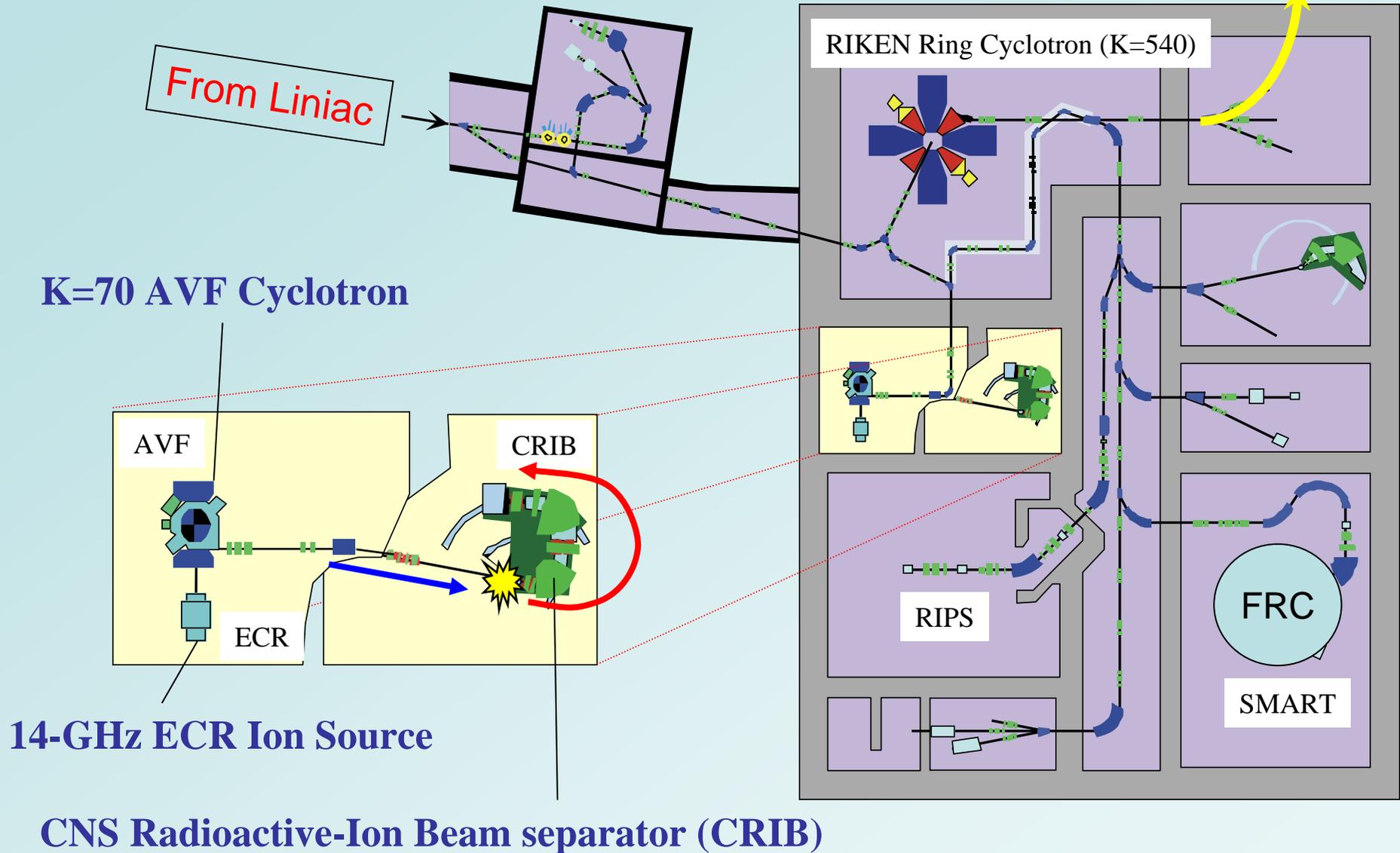
CNS-RIKEN 低エネルギービームライン in RIBF

理研加速器施設内

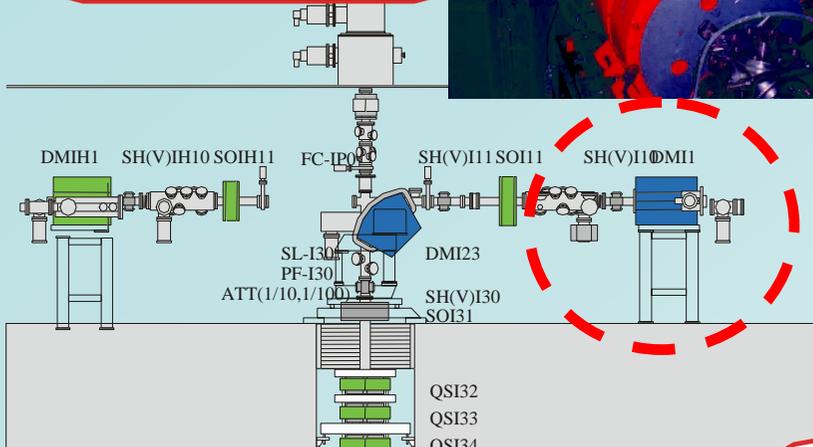
Center for Nuclear Study (CNS), University of Tokyo

To IRC/SRC

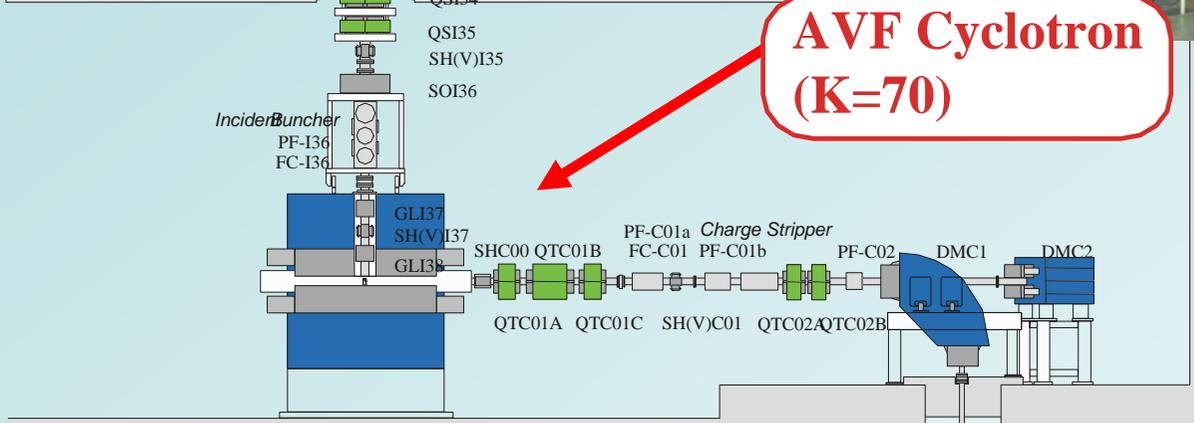
RIKEN Accelerator Research Facility



**14-GHz ECR
Ion Source (CNS)**



**AVF Cyclotron
(K=70)**



CRIB Experimental Room

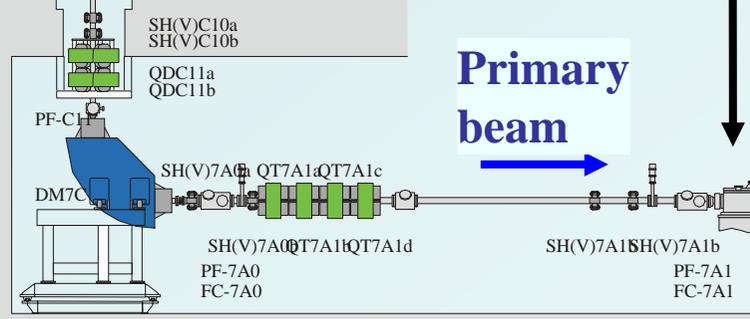
**CRIB Production
Target**

**Primary
beam**

**To
CRIB**

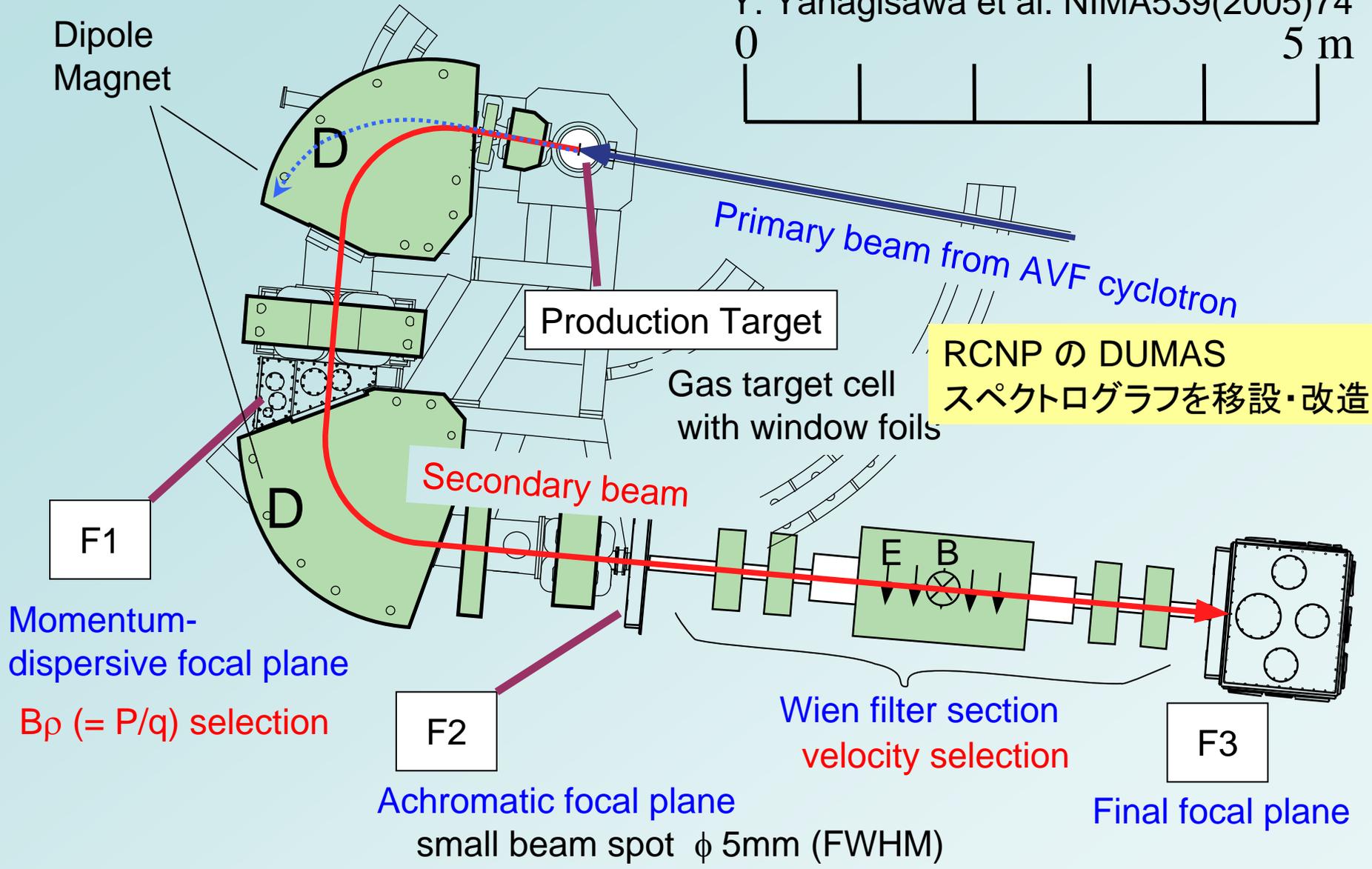
**Secondary
Beam**

**CNS-RIKEN
Low-Energy Beam Line
(Side View)**



CRIB (CNS low-energy Radioactive-Ion Beam) separator 2000~

Y. Yanagisawa et al. NIMA539(2005)74



$P/q = \text{const.} \ \& \ v = \text{const.} \ \rightarrow \ m/q \text{ selection}$

(Z can be separated by energy-loss at degrader)

アクセプタンスの比較

	RCNP ENコース	CNS-RIKEN CRIB	RIKEN RIPS
角度アクセプタンス	H \pm 20 mrad V \pm 14 mrad	H \pm 38 mrad V \pm 38 mrad	H \pm 40 mrad V \pm 40 mrad
運動量 アクセプタンス	\pm 4%	\pm 7.5%	\pm 3%
最大Brho	3.2 Tm	1.28 Tm	5.76 Tm

(p,n) 反応で生成した¹⁴Oビームのエネルギー・角度拡がり

$p(^{14}\text{N}, ^{14}\text{O})n$
 at $E/A(^{14}\text{N}) = 8.4 \text{ MeV}$
 $\Delta\theta (^{14}\text{O}) = \pm 2^\circ$
 $\Delta P/P (^{14}\text{O}) = \pm 3.5\%$

CRIB ではほぼ
100% 収集可能

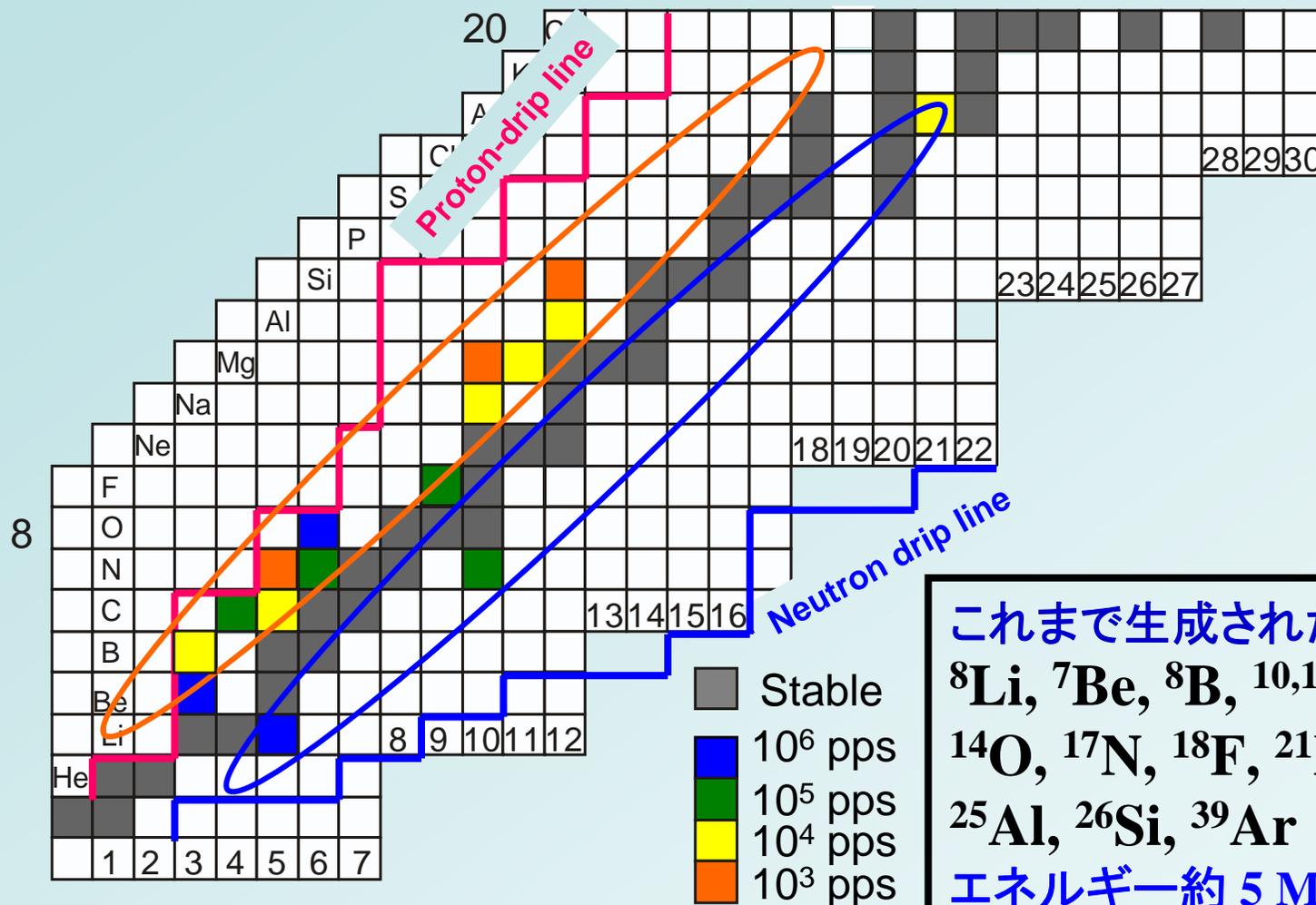
CRIB で生成されたビーム

生成反応

重イオンビーム + 軽イオン標的 (逆運動学)

Proton-rich nuclei: (p,n), (p,d), (d,n), (d,t), (³He,n)....

Neutron-rich nuclei: (d,p), (d,³He).....



RCNP AVF (K=120)を用いた場合

(入射角破碎反応を使う場合はここでは考えない)

RIKEN AVF (K=70)よりエネルギーが高いためCRIBでは利用できない
Q値が深い反応が使用可能

例 $d(^{12}\text{C}, ^{12}\text{N})2n$ $Q = -20.3 \text{ MeV}$ ($E_{\min} = 11.9 \text{ MeV/u}$)

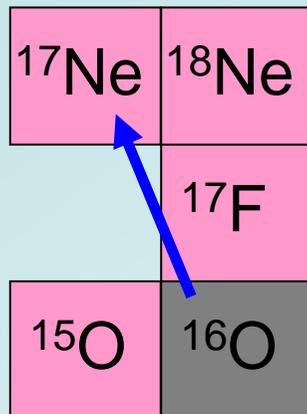
1次ビーム $^{12}\text{C}^{4+}$ $E = 13 \text{ MeV/u}$ ($K=117 \text{ MeV}$)

2次ビーム ^{12}N $E = 10 \text{ MeV/u}$

$^3\text{He}(^{16}\text{O}, ^{17}\text{Ne})2n$ $Q = -22.4 \text{ MeV}$ ($E_{\min} = 8.9 \text{ MeV/u}$)

1次ビーム $^{16}\text{O}^{5+}$ $E = 11 \text{ MeV/u}$ ($K=112 \text{ MeV}$)

2次ビーム ^{17}Ne $E = 8.8 \text{ MeV/u}$



ただし、逆運動学反応のため、生成される2次重イオンは
1次ビームの速度と近い速度をもつので、さらなる低エネルギー化(例えば $E < 5 \text{ MeV/u}$)には厚いdegraderが必要となる

EN での低エネルギー ^{17}Ne beamの可能性

陽子ドリップライン上
2-proton halo? ($^{15}\text{O}+2\text{p}$)
 $^{17}\text{Ne}+\text{p}$ 共鳴散乱のため

- 1次ビーム $^{16}\text{O}^{5+}$ $E/A = 11.0 \text{ MeV}$ 500 pA
- 生成反応 $^3\text{He}(^{16}\text{O}, ^{17}\text{Ne})2\text{n}$ $\sigma \sim 0.2 \text{ mb}$ (データなし)
- 生成標的 ^3He gas 1 atm $\times 10 \text{ cm}$ (1.25 mg/cm^2)
- アクセプタンス(立体角) $\sim 2\%$
- Charge state fraction $\sim 70\%$ for $E/A(^{17}\text{Ne}^{10+}) = 5 \text{ MeV}$
- 2次ビーム $^{17}\text{Ne}^{10+}$

$E/A \sim 5 \text{ MeV}$ (デグレーダー+F2 PPAC後)

$2.4 \times 10^3 \text{ particles/sec}$

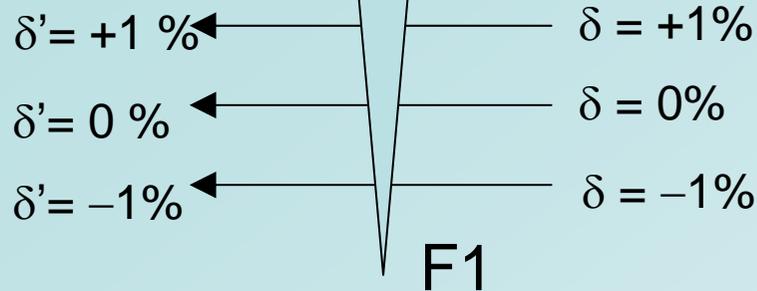
10^4 までなんとかいけば共鳴散乱の実験可能
イオン源の強度と加速効率？

検討中

CRIB (CNS-RIKEN) でも $^{16}\text{O}^{7+}$ の強度が出れば可能 (立体角は4倍)
RIPS+入射核破碎反応 ($^{20}\text{Ne}+^9\text{Be} \rightarrow ^{17}\text{Ne}+\text{X}$)+厚いデグレーダーの可能性も

エネルギー・デグレーダーについて

くさび型 (RIPS など)



低エネルギービーム用のデグレーダーは薄く、くさび型は製作困難 → 平板を用いる

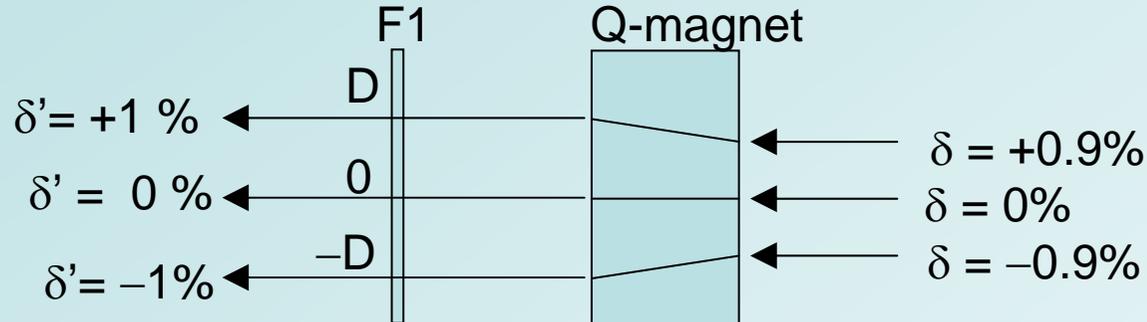
例: ^{14}O $E/A = 5.0 \text{ MeV}$

$R = 12.4 \text{ mg/cm}^2$ (90 μm) for Mylar

$d/R = 0.3 \rightarrow 30 \mu\text{m}$

平板 (ENコース、CRIB)

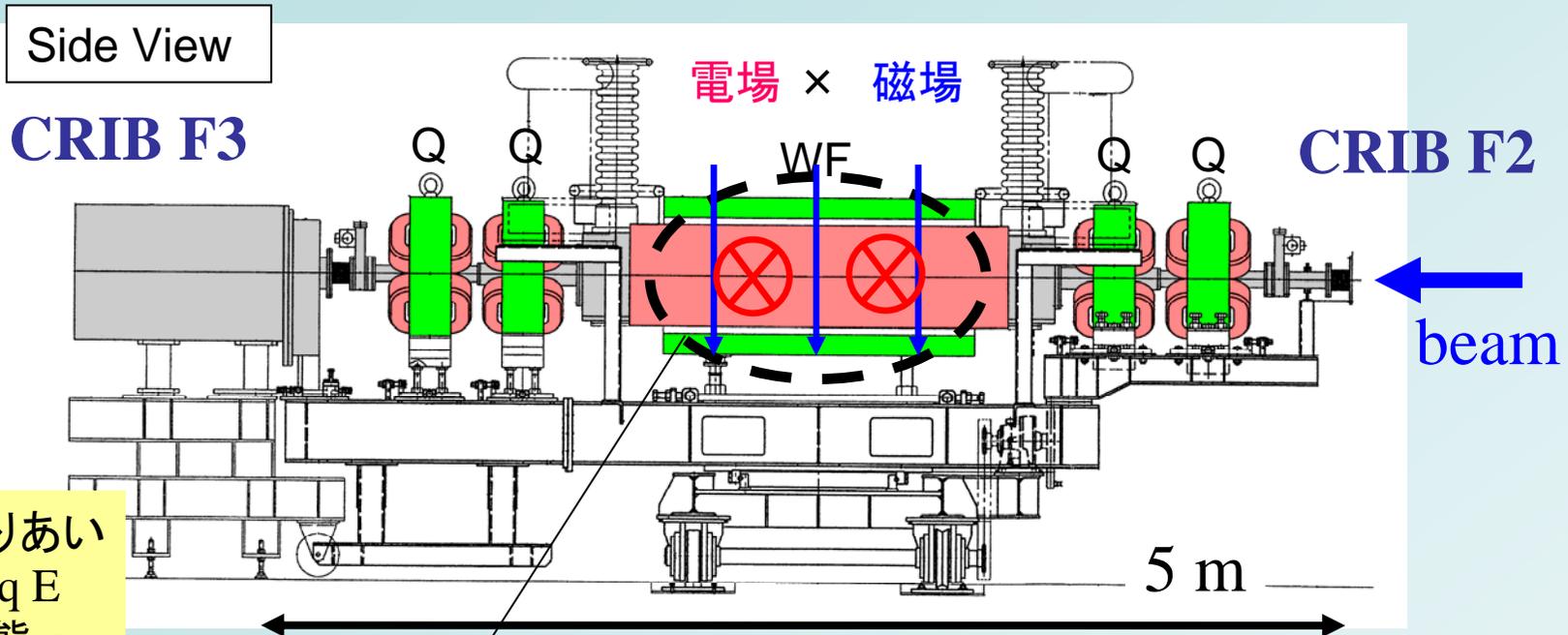
S. Mitsuoka et al., NIM A372 (1996) 489. (下田グループ)



デグレーダー後の分散がデグレーダーがない時と同じになるように、CRIB では直前のQ を使ってデグレーダー前の分散を大き目にしておく。(EN コースではデグレーダー後のQを使う)

低エネルギーではイオンの荷電状態をがデグレーダーでばらけるので、収集効率や粒子分離能力が低下することがあり、デグレーダーは積極的には使いたくない。

Wien Filter Section of CRIB (F2—F3) 速度分離器



力のつりあい
 $q v B = q E$
 荷電状態 q
 によらない。

Total length:	5 m
Length of velocity-separation section:	1.5 m
Max. horizontal electric field:	$E = 50 \text{ kV/cm } (\pm 200 \text{ kV} / 8 \text{ cm})$
Max. vertical magnetic field:	$B = 0.3 \text{ T}$

例: ${}^8\text{B}$ ビーム 生成反応 ${}^6\text{Li}({}^3\text{He}, n){}^8\text{B}$ 主要不純物 ${}^6\text{Li}$ (1次ビーム壁散乱) と ${}^7\text{Be}$

${}^8\text{B}$ Purity: 3 % before Wien Filter → ~ 95% on Target after WF

陽子共鳴弾性散乱



弾性散乱の中に見える共鳴状態を調べる。

低エネルギー不安定核2次ビームに適した実験

断面積が大きく比較的容易な実験

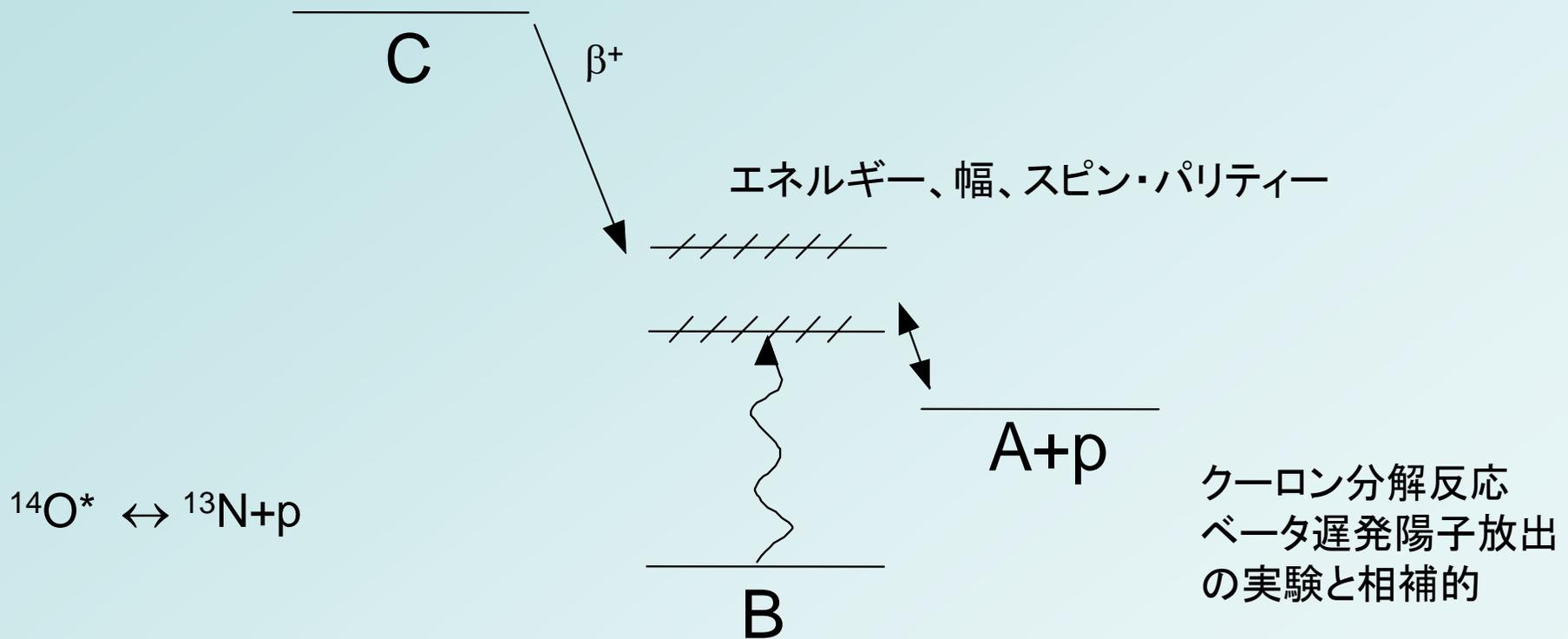
CRIB でこれまでに行った実験 (2002-2006)

陽子過剰側	${}^8\text{B}+p, {}^{11}\text{C}+p, {}^{12}\text{N}+p, {}^{23}\text{Mg}+p, {}^{21}\text{Na}+p, {}^{22}\text{Mg}+p, {}^{25}\text{Al}+p, {}^{13}\text{N}+p, {}^7\text{Be}+p$
中性子過剰側	${}^8\text{Li}+p$

調べたい共鳴状態

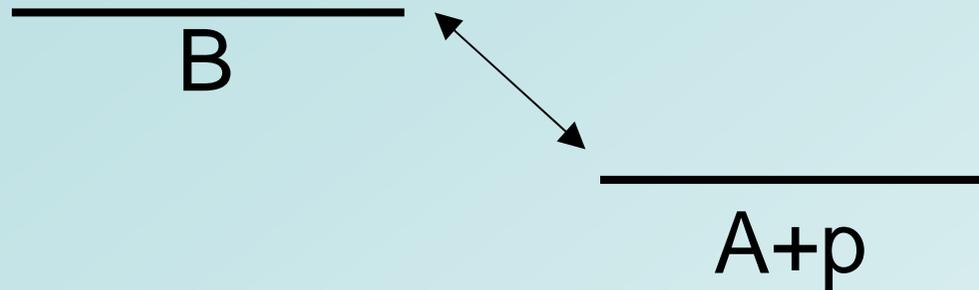
- 陽子過剰核 **B** の励起状態を調べる

A+p 分解スレッシュホールドの少し上にある励起状態(共鳴状態)



天体での(高温)水素燃焼過程 $A(p,\gamma)B$ に関する共鳴状態
不安定核の構造を研究する上での基礎情報

- 陽子ドリップラインの外側の原子核を調べる

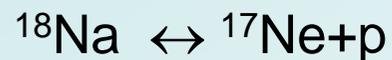
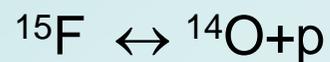


基底状態が共鳴状態の原子核 (非束縛核)

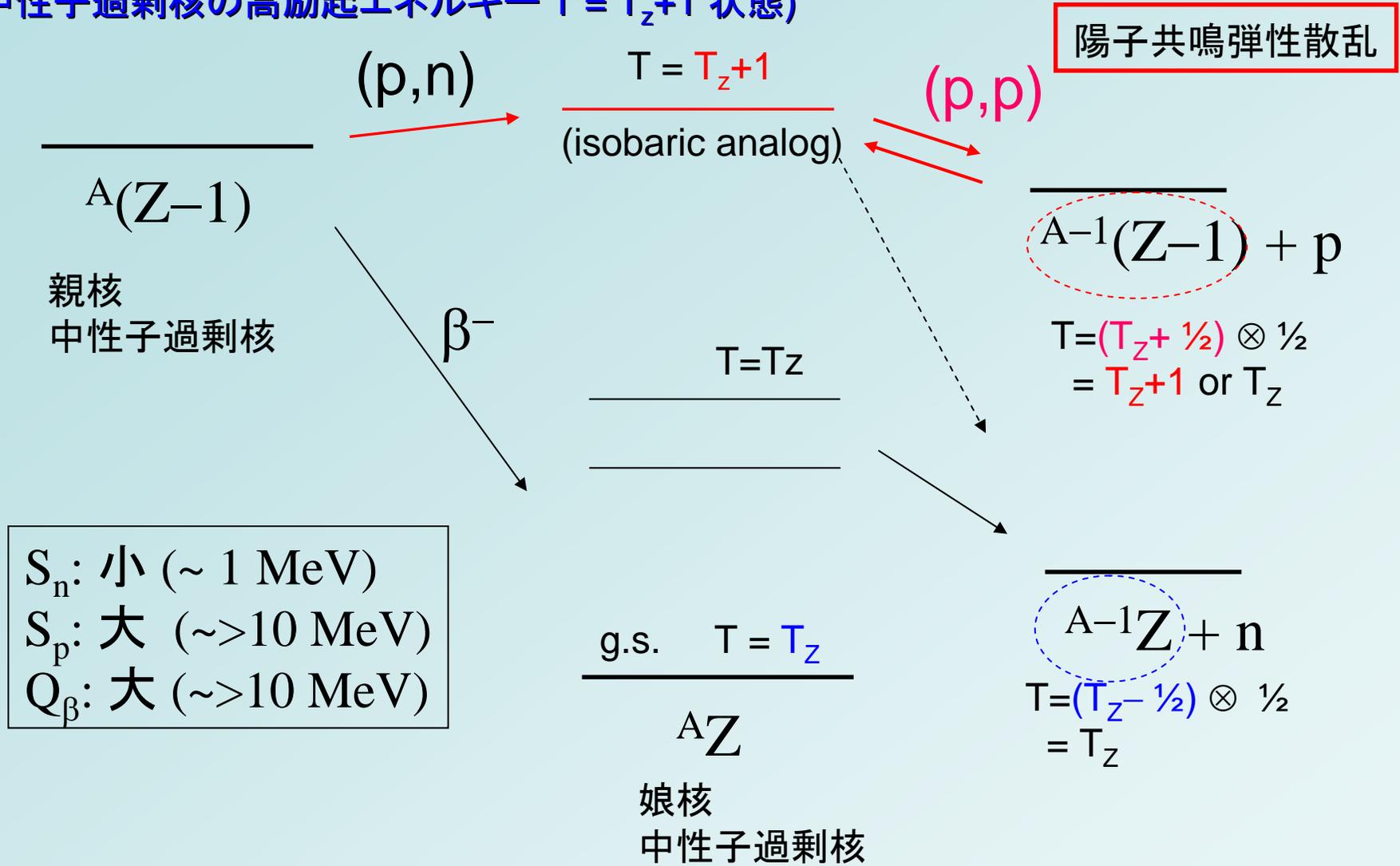
未観測のもの、エネルギー(質量)がよくわかってないもの、
励起状態の情報が少ないもの

束縛エネルギー(<0) \rightarrow 質量公式 \rightarrow 原子核の存在範囲

ミラー核(中性子過剰核)のレベルと比較 \rightarrow 荷電対称性?



・中性子過剰核のIASを調べる
 (中性子過剰核の高励起エネルギー $T = T_z + 1$ 状態)



S_n : 小 (~ 1 MeV)
 S_p : 大 ($\sim > 10$ MeV)
 Q_β : 大 ($\sim > 10$ MeV)

エネルギー
 → クーロンエネルギー差(核半径)
 → Thomas-Ehrman shift

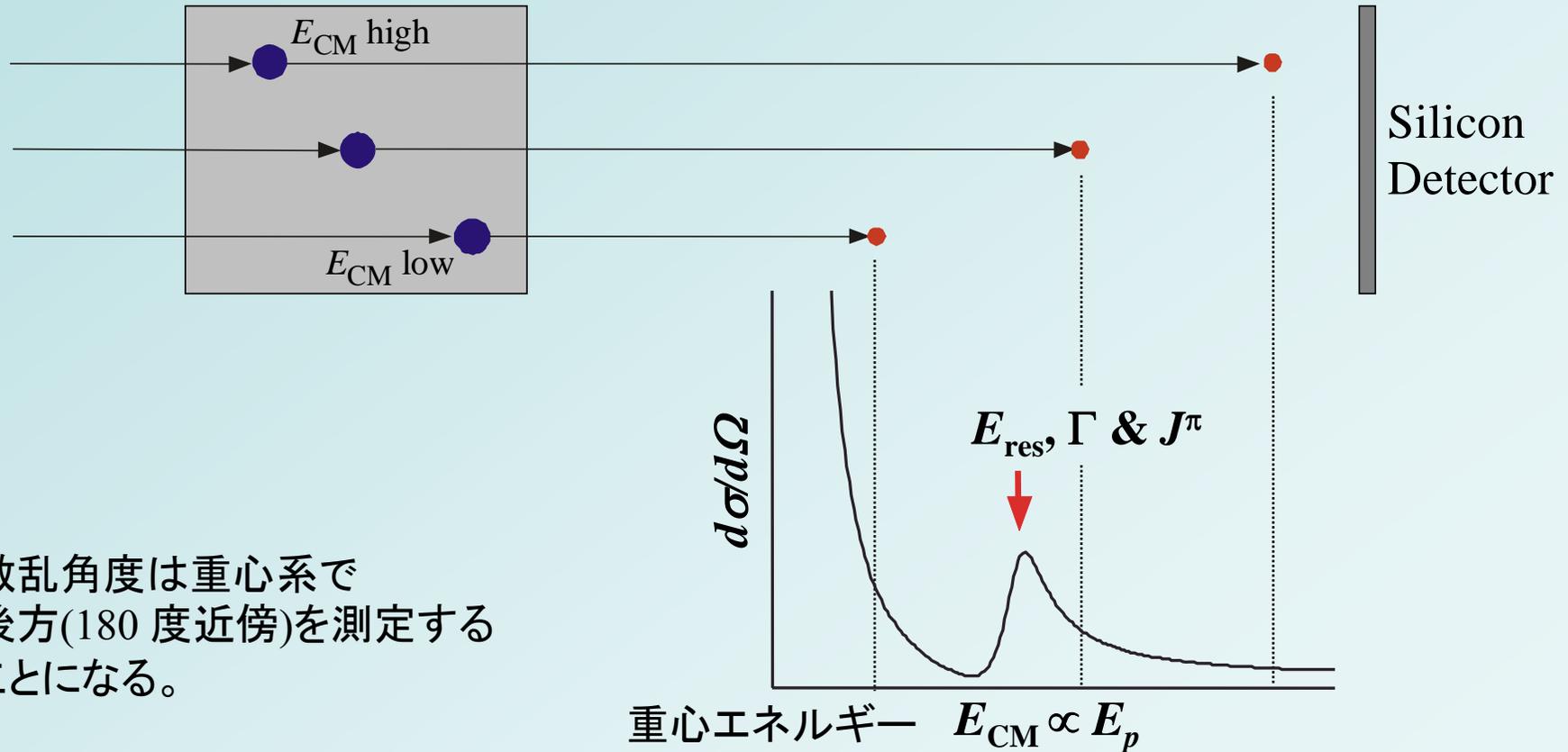
崩壊巾
 → Single-particle s-factor

共鳴弾性散乱の測定方法 (不安定核ビーム)

不安定核は標的にできないので CRIB のビームを陽子標的にあてる。
反跳陽子を検出し断面積を測る。

加速器のエネルギーを変えずに標的中の
ビーム・エネルギーロスを利用する (厚い標的法)

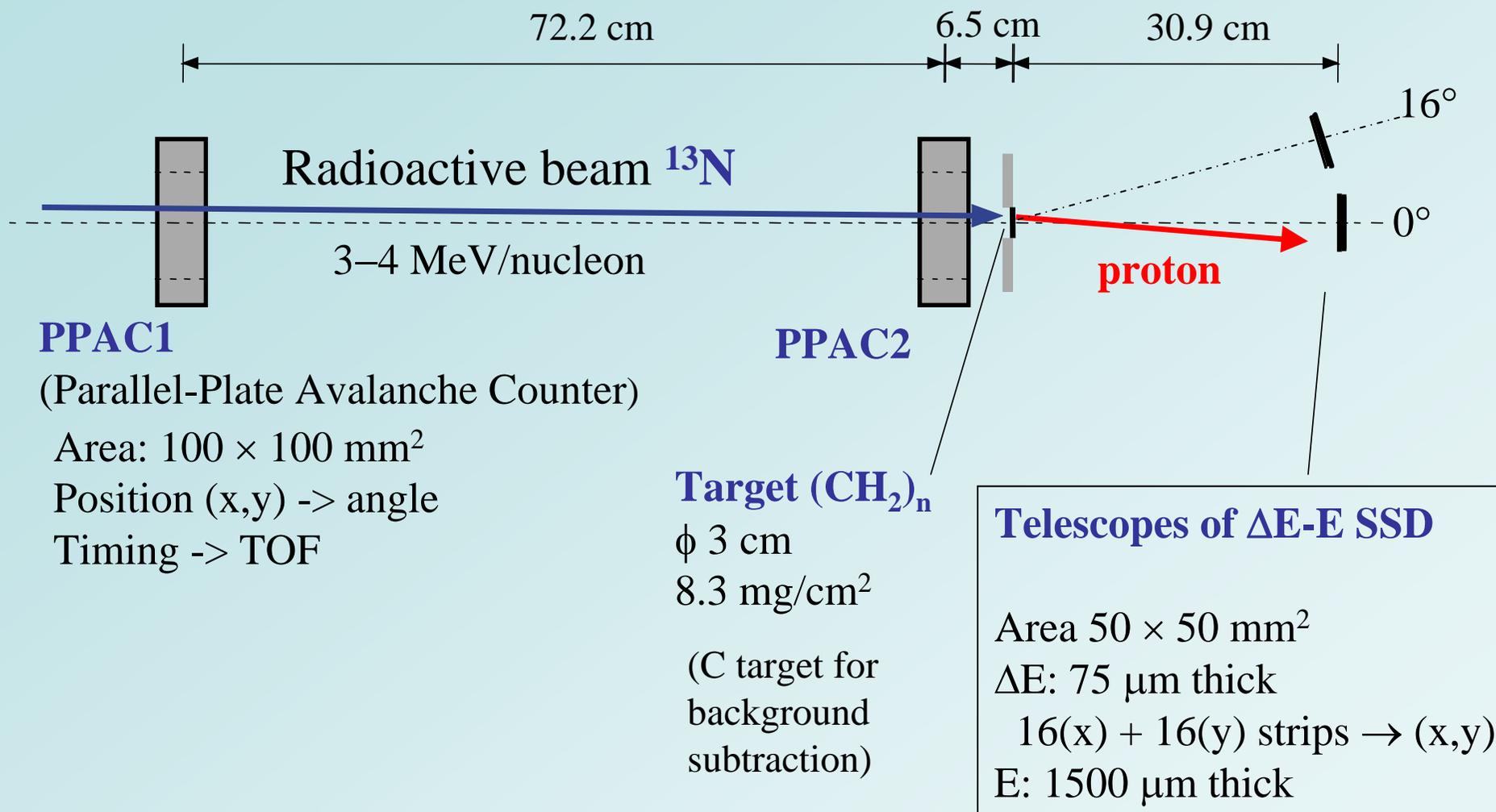
2次ビーム 陽子標的(ポリエチレン)



散乱角度は重心系で
後方(180度近傍)を測定する
ことになる。

Setup for $^{13}\text{N}+p$

at CRIB F2



The beam stops in the target.
Recoil protons go out from the target.

重心エネルギー E_{CM} の再構成

$$E_{CM} = \frac{1}{4 \cos^2 \theta_p} \frac{A+1}{A} E_p$$

A : 入射角の質量数

E_p : 陽子エネルギー (LAB)

シリコン検出器

分解能 100 keV (FWHM)

θ_p : 陽子散乱角 (LAB)

PPAC とシリコン検出器 (double-sided strips)

分解能 0.5 度 (FWHM)

E_{CM} は E_p & θ_p からイベントごとに変換される
(標的中のエネルギー・ロスも考慮)

E_p 分解能 100 keV

→ E_{CM} 分解能 30 keV (FWHM) $\theta_p = 0$ において

高分解能スペクトログラフなみ

(陽子の標的中でのストラグリングの影響は小さい)

CRIB における最近の実験例

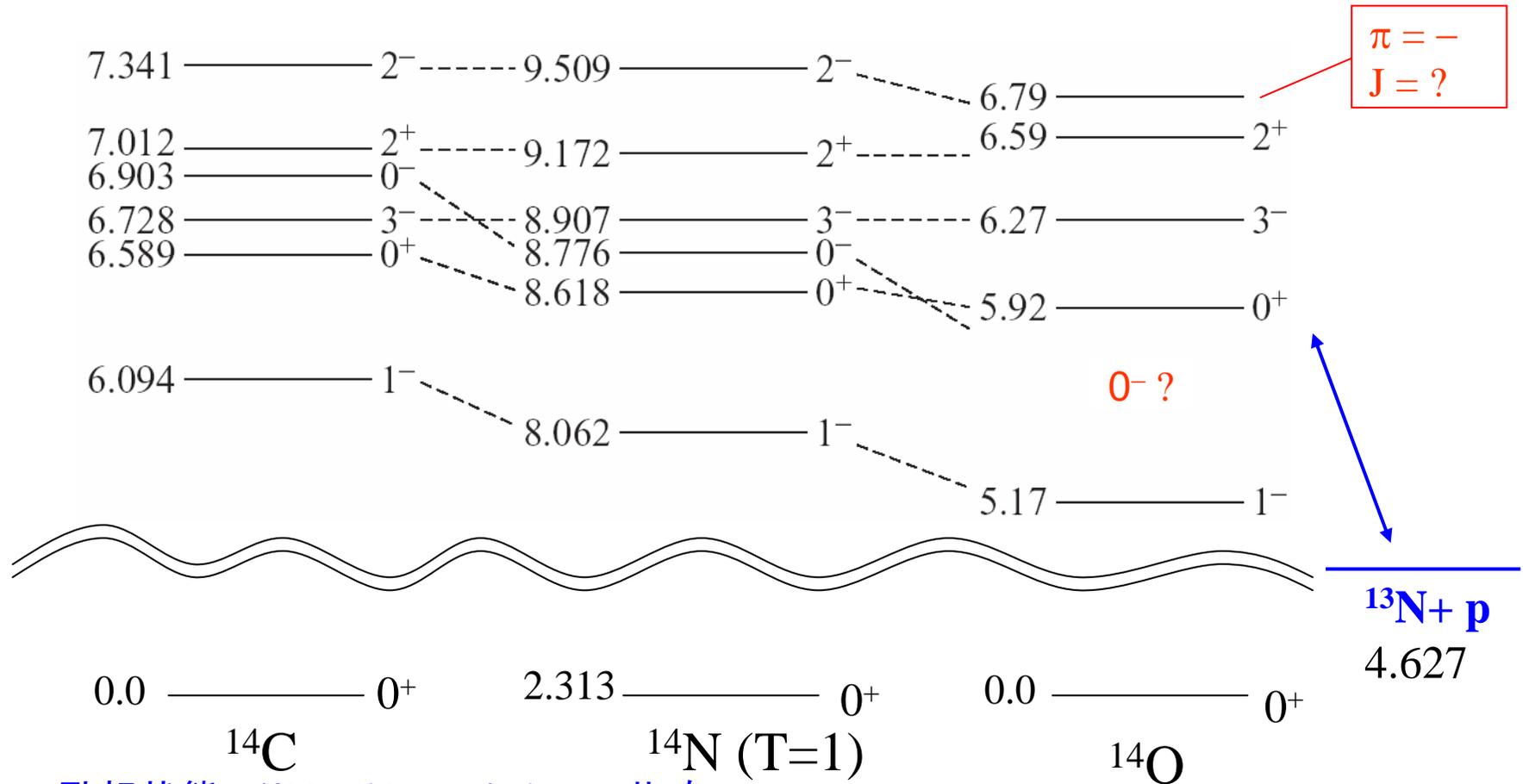
$^{13}\text{N}+p$

陽子過剰側

$^8\text{Li}+p$

中性子過剰側

T=1 triplets in A=14 nuclei



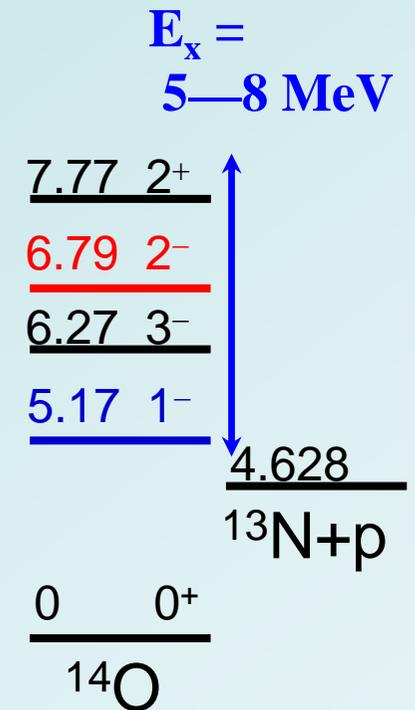
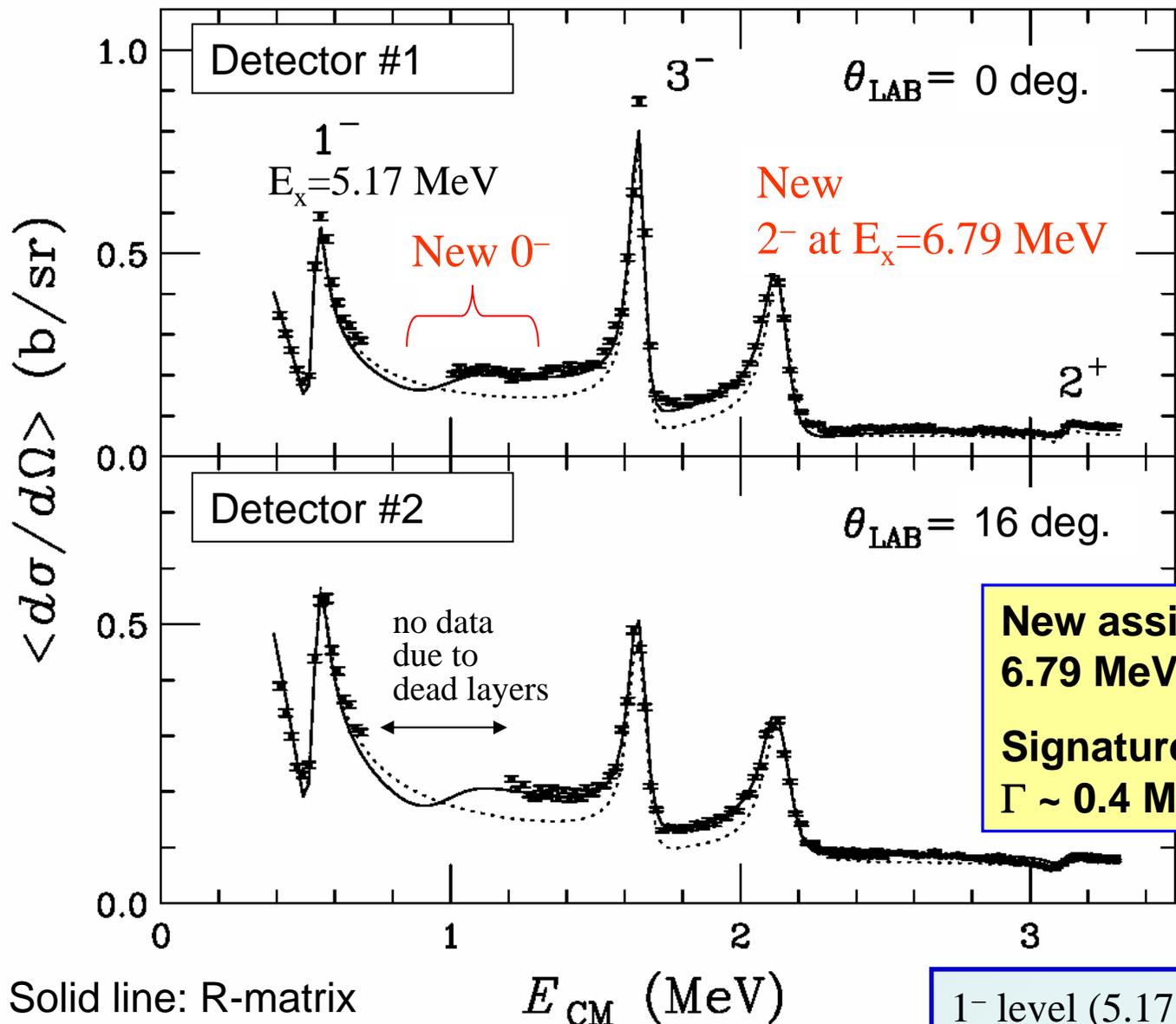
^{14}O の励起状態 $^{13}\text{N}_{\text{g.s.}} (J^\pi = 1/2^-) + p$ 共鳴

6.8 MeV の J 決まっていない。

0^- (s-wave共鳴)が見つからない。(2s1/2 軌道、Thomas-Ehrman shift)

巾の高精度測定 → 1 粒子 s factor

$^{13}\text{N}+p$ result (^{14}O resonances)



New assignment: 2^- at $E_x = 6.79$ MeV

Signature of 0^- ($E_x \sim 5.71$ MeV, $\Gamma \sim 0.4$ MeV)

Solid line: R-matrix

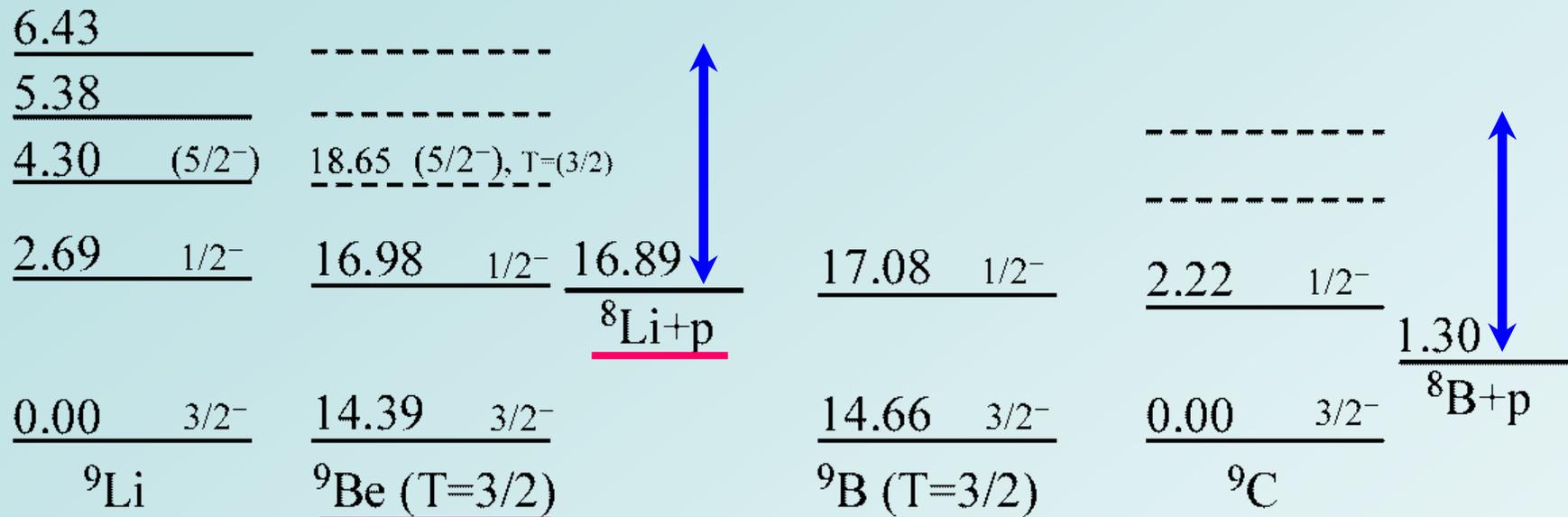
E_{CM} (MeV)

分解能 ~ 20 keV (FWHM) (GrandRaidenなみ!)

1^- level (5.17 MeV)の E_x & Γ は天体 $^{13}\text{N}(p,\gamma)^{14}\text{O}$ 反応率に重要

${}^8\text{Li}+p$ 実験 (2005年12月)

T=3/2 levels in A=9 nuclei



A=9, T=3/2 準位は基底状態と第1励起状態しか J^π がわかっていない
(negative parity (p-shell) 状態のみ)

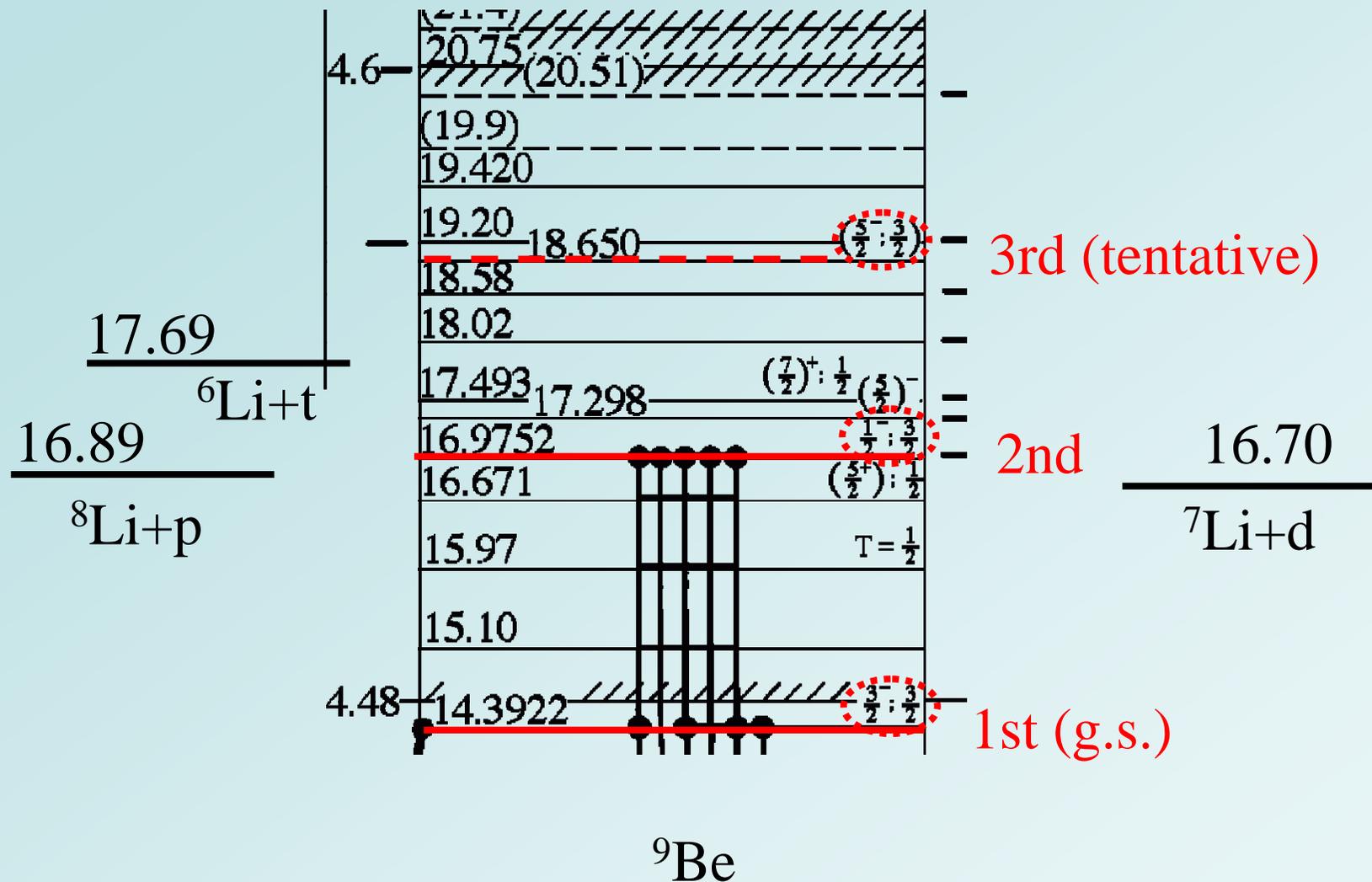
${}^9\text{Li}$ およびアナログ状態の構造

J^π and Γ positive parity state? (s or d)

アイソバリック多重項のエネルギー系統性 (Thomas-Ehrman shift)

${}^8\text{Li}+p$: 陽子共鳴弾性散乱の中性子過剰核への適用

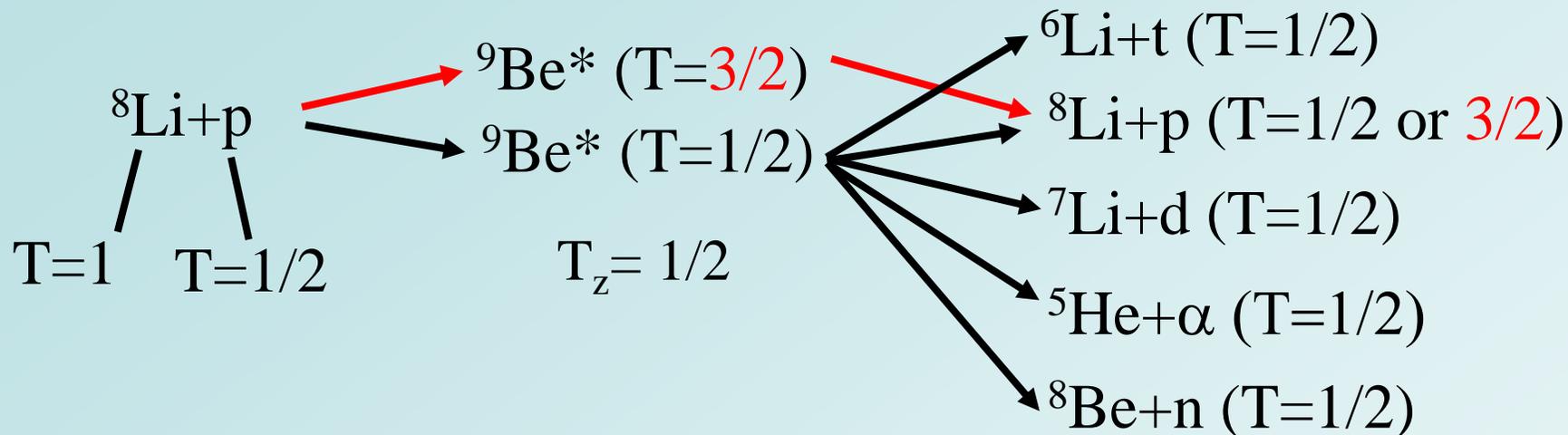
世界的にも例がまだ少ない



陽子スレッシュヨルドエネルギーが高い →

高励起エネルギー領域の探索 → 高アイソスピン $T = T_z + 1$ 状態の探索

Isospin selection rule



${}^8\text{Li}+p$ 弾性散乱は $T=3/2$ 状態に sensitive

$T=1/2$ と $3/2$ を区別するため、
実験では弾性散乱以外に (p,t), (p,d), & (p, α) 反応チャンネルも同時にみる。

結果

- Primary beam ${}^7\text{Li}^{3+}$ $E/A = 6.5 \text{ MeV}$ 300 p nA
 - Production reaction $\text{d}({}^7\text{Li}, {}^8\text{Li})\text{p}$ $\sigma \sim 100 \text{ mb}$
 - Production target $\text{D}_2 \text{ gas}$ $1 \text{ atom} \times 8 \text{ cm}$ (1.33 mg/cm^2)
 - Secondary beam ${}^8\text{Li}^{3+}$ $2 \times 10^5 \text{ particles/sec}$
- Energy before the secondary target $E/A = 5.0 \text{ MeV}$

実験メンバー ($^{11}\text{C}+p$, $^{12}\text{N}+p$, $^{23}\text{Mg}+p$, $^{13}\text{N}+p$, $^8\text{Li}+p$ in 2001—2005)

東大CNS	久保野茂、山口英斉、J.J. He、齊藤明登、藤川、G. Amadio、野谷将広、新倉、下浦享
立教大	馬場秀忠、福地知則、梶野
理研	西村俊二、西村美月、柳沢善行、道正新一郎、山口充孝、黒川明子
九大	寺西高、若林泰生、森川恒安、竹田英光、銚岩奈穂、郷農靖之
阪大	小田原厚子
KEK	石山博垣、渡辺裕、宮武宇也、田中雅彦
理科大	橋本尚志、石川智子
山形大	加藤静吾、佐藤啓之、川村知行
ATOMKI (Hungary)	Zs. Fulop, D. Sohler
Chung-Ang Univ. (Korea)	J.Y. Moon, J.H. Lee, Y.K. Kwon, J.C. Kim, C.S. Lee
Sao Paulo (Brazil)	V. Guimaraes, R.F. Lihithenthaler
CIAE (China)	Z.H. Lee, G. Lian
IPE (Vietnam)	L.H. Khiem

最後に

以前は現実的ではなかった低エネルギー飛行分離法
イオン源・加速器技術の発展により現実的になった。< $\sim 10^7$ pps

重イオンビーム強度 $I > 100$ pA + 断面積 $\sigma > 0.1$ mb 程度の反応

実験

陽子共鳴弾性散乱実験 10^4 pps 以上で可能

陽子以外 α や d などの計画も進行中

移行反応

(d,p), (d,n).....

RCNP AVF + EN の良い点

ビームの質、安定性

低バックグラウンド(中性子、 γ)環境

中性子や γ のコインシデンス測定