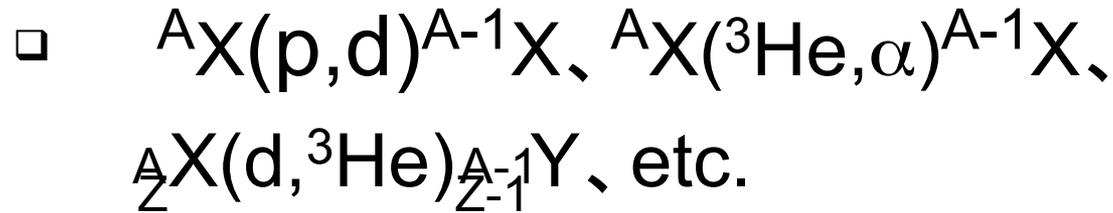


RCNP 研究会
「重イオン蓄積リングの物理」
2010年9月25日

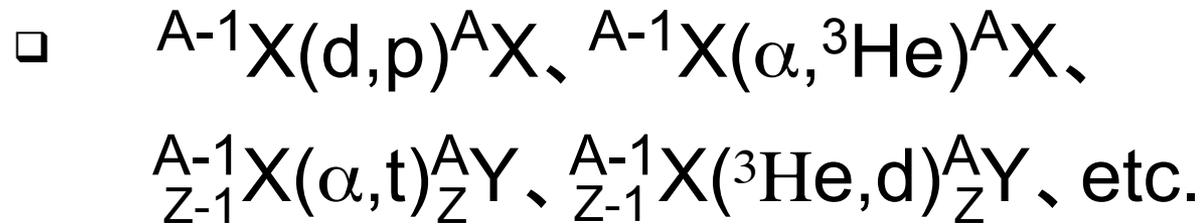
「蓄積リングにおける核子移行反応」

阪大RCNP
ONG Hooi Jin

核子移行反応



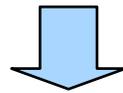
← pickup



← stripping

or

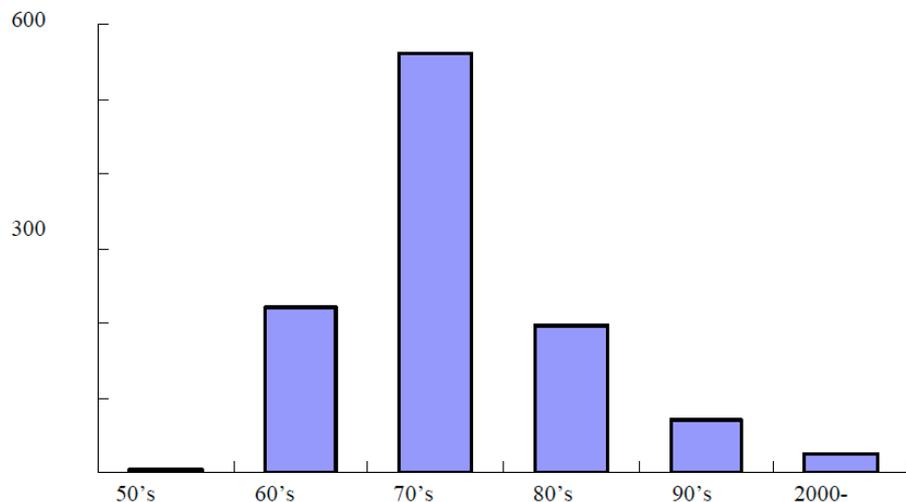
逆運動学反応



一粒子状態の占有確率

原子核構造の理解

(p,d)及び(d,p)反応



M. B. Tsang, conference presentation slide.

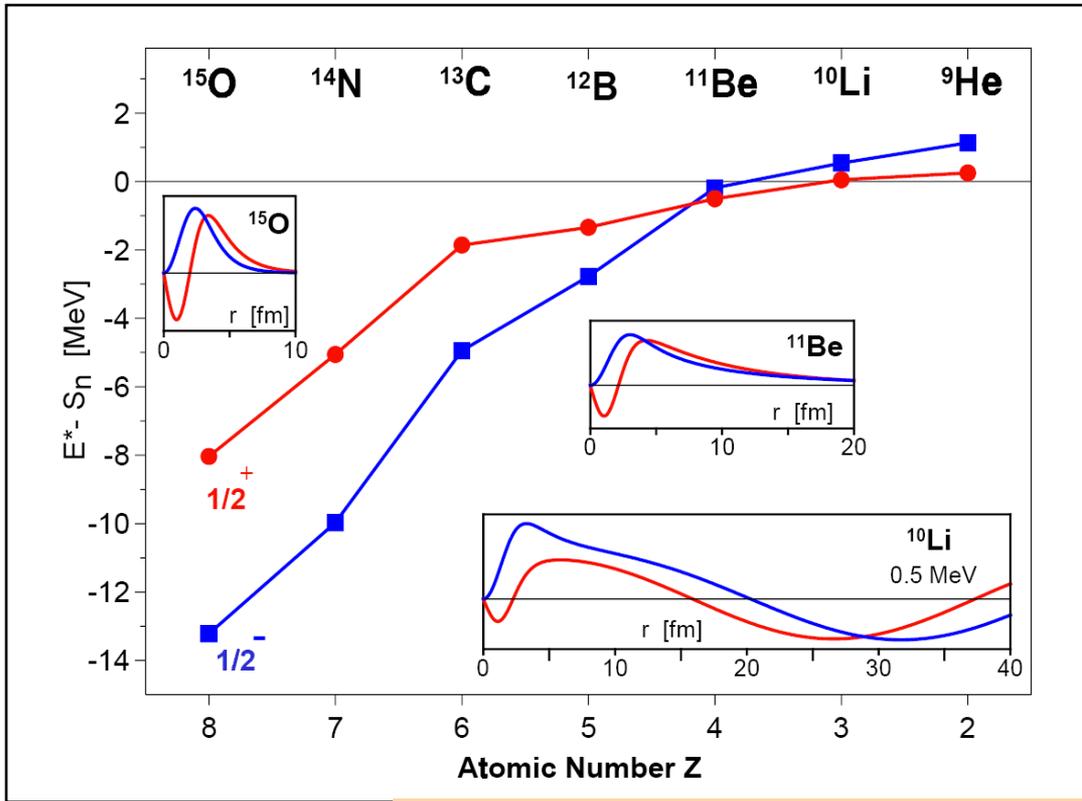
Z=3	Li	6, 7, 8, 9
Z=4	Be	9, 10, 11
Z=5	B	10, 11, 12
Z=6	C	12, 13, 14, 15
Z=7	N	14, 15, 16
Z=8	O	16, 17, 18, 19
Z=9	F	19, 20
Z=10	Ne	21, 22, 23
Z=11	Na	24
Z=12	Mg	24, 25, 26, 27
Z=13	Al	27, 28
Z=14	Si	28, 29, 30, 31
Z=15	P	32
Z=16	S	32, 33, 34, 35, 37
Z=17	Cl	35, 36, 37, 38
Z=18	Ar	36, 37, 38, 39, 40, 41
Z=19	K	39, 40, 41, 42
Z=20	Ca	40, 41, 42, 43, 44, 45, 47, 48, 49
Z=21	Sc	45, 46
Z=22	Ti	46, 47, 48, 49, 50, 51
Z=23	V	51
Z=24	Cr	50, 51, 52, 53, 55

不安定核における核子移行反応実験

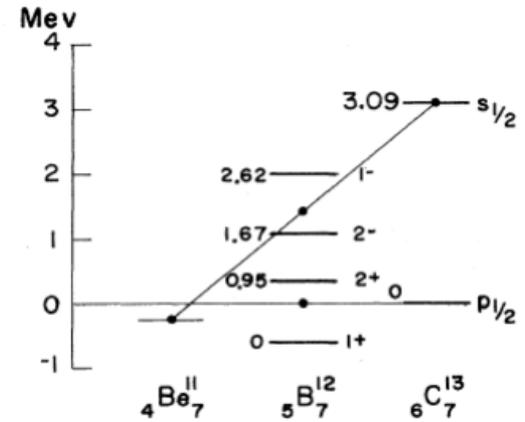
- **MSU** では、主に中重核領域 **Mg**、**Ar**、**Ca** において精力的に行われている
- **GANIL** は軽い不安定核側
- **RIKEN/東大CNS** では、最近¹³**B**、²³**F** など(α, t) を用いた反応

RCNP proposal: Spectroscopy of $^{13,14}\text{B}$ via transfer reactions

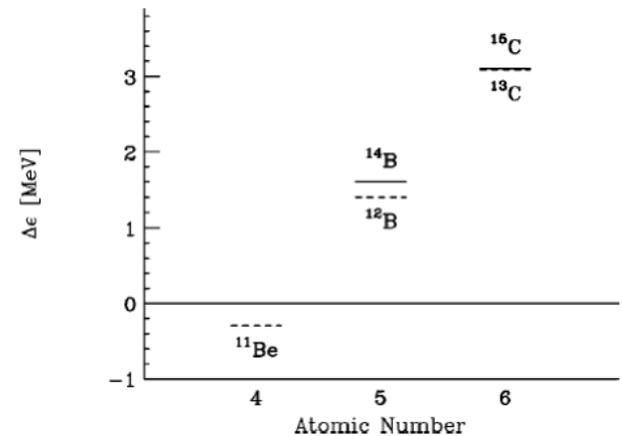
Order of $0p_{1/2}$ and $1s_{1/2}$ in B Isotopes



P. G. Hansen and J. A. Tostevin,
Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 53, 219(2003)



I. Talmi and I. Unna, PRL 4, 469(1960)

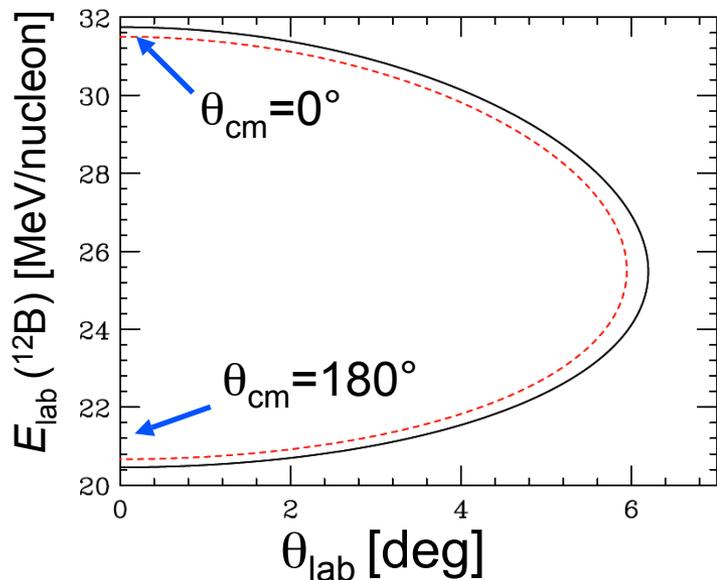
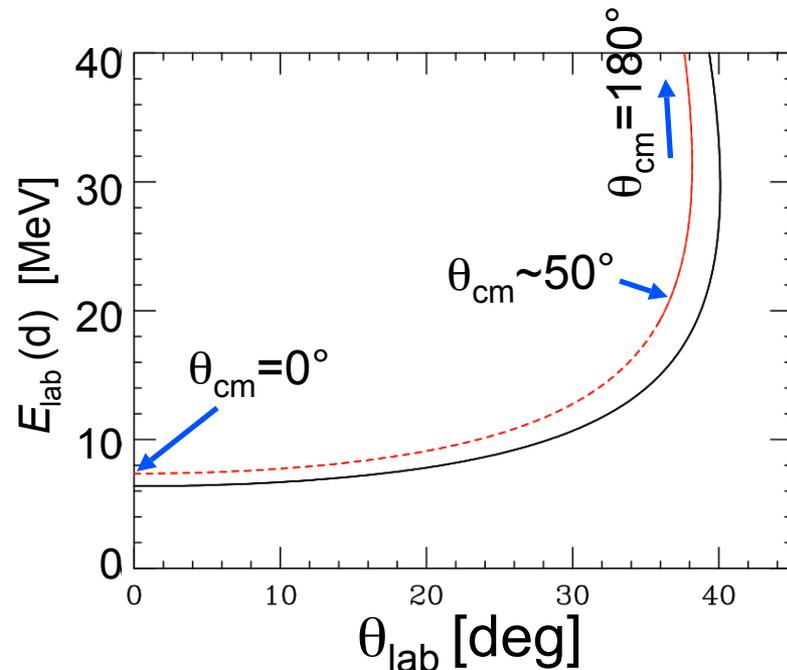
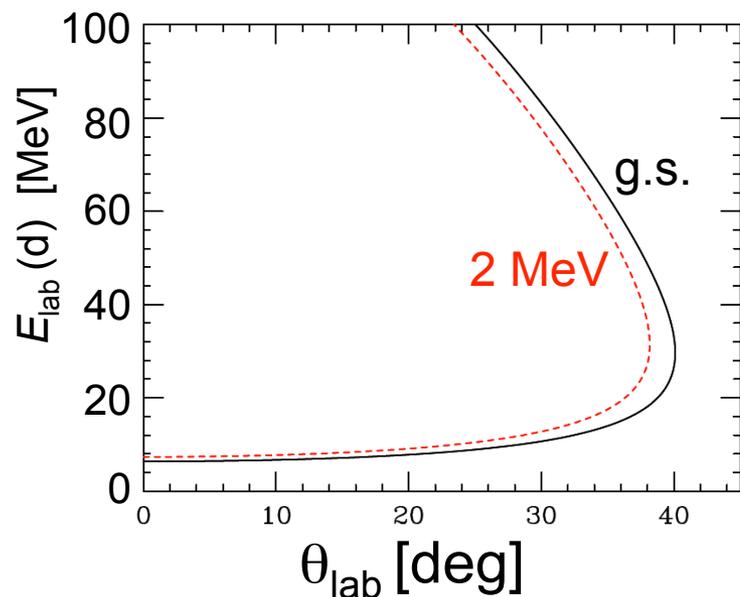


N. Aoi et al, PRC 66, 014301(2002)

逆運動学での核子移行反応

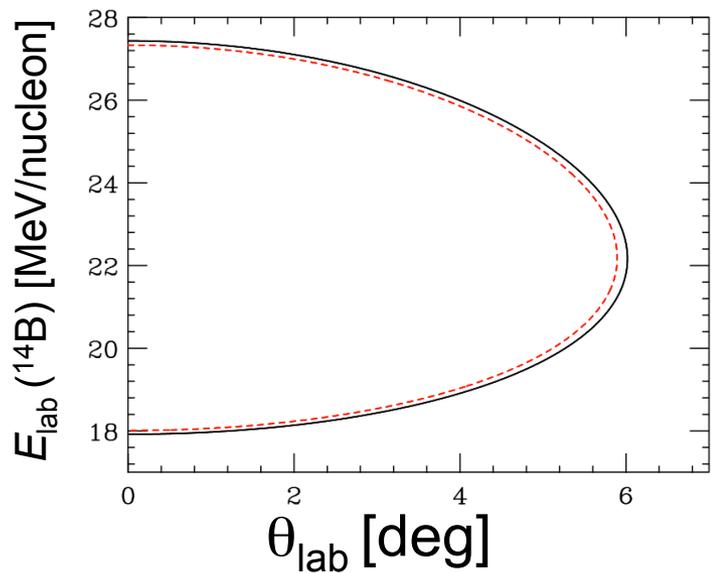
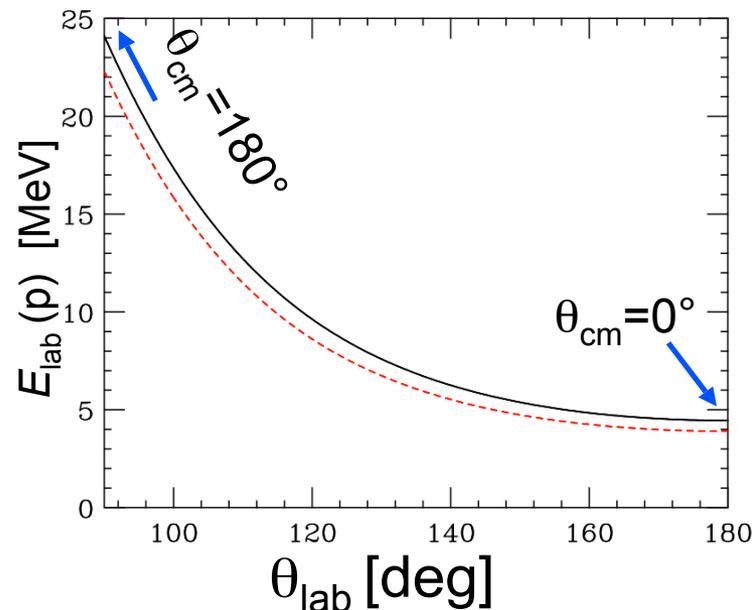
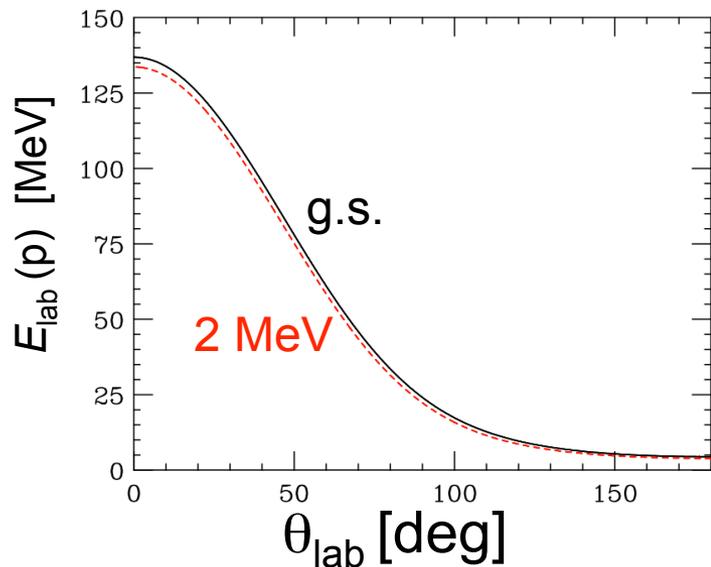
- 反跳粒子あるいは重イオンのどちらかを測定する
 - Breakup、非弾性散乱及び標的不純物によるバックグラウンドが生じる
- γ 線+重イオンの測定(終状態が束縛状態の場合):
 - 光学ポテンシャルの問題が残る
- 反跳粒子+重イオンの測定:
 - バックグラウンドの除去
 - 弾性散乱も同時に測定 \Rightarrow 光学ポテンシャル問題をクリア
 - 非束縛状態も測定できる
- 反跳粒子+重イオン+ γ 線の測定
 - ベストだが、セットアップが大変

逆運動学(p,d)反応:(例) ^{13}B 30A MeV



反応断面積が大きい重心系前方
方向の測定が重要

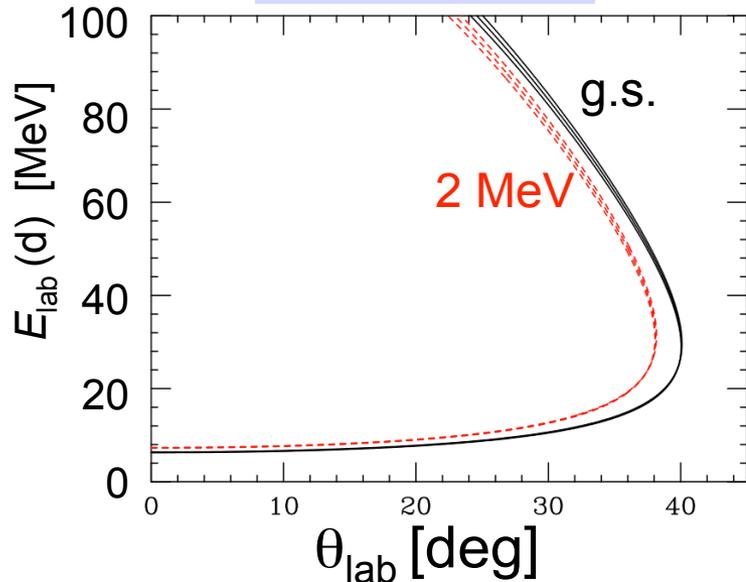
逆運動学(d,p)反応:(例) ^{13}B 30A MeV



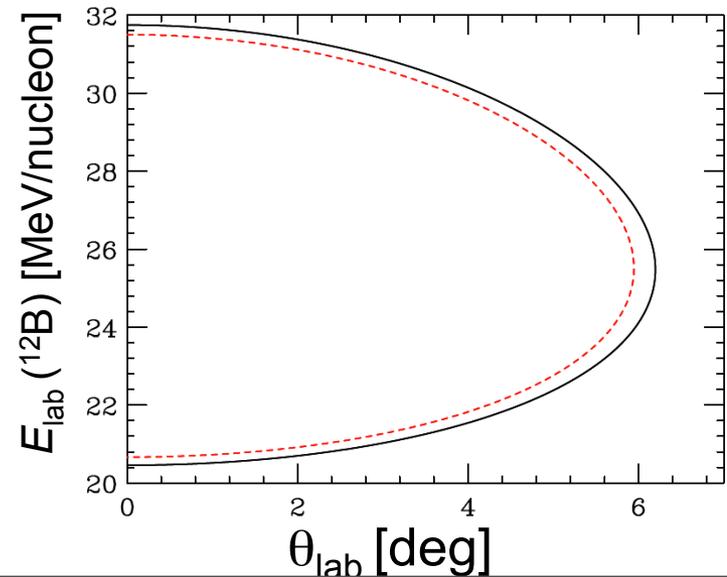
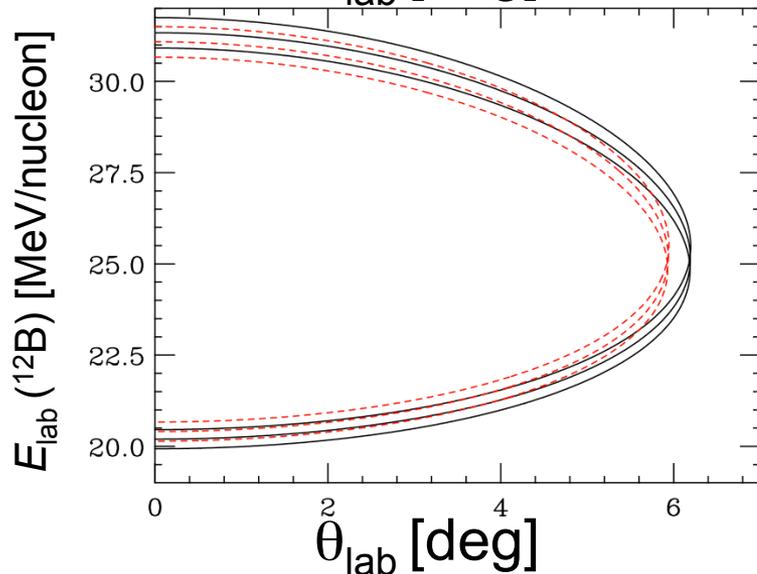
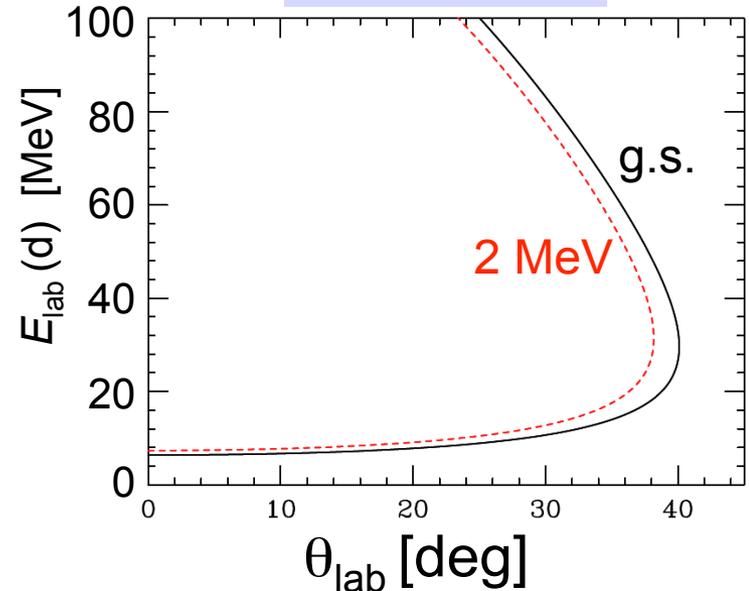
角度分解能は (p,d)ほど厳しくない

逆運動学(p,d)反応:厚い標的

10 mg/cm²



10 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$



エネルギー分解能

重イオンを測定する場合

J. S. Winfield *et al*, NIMA 396, 147(1997)

Table 2

Major contributions in keV to the resolution of the excitation energy spectra of single neutron stripping and pickup reactions in inverse kinematics, where the heavy ion is detected in a spectrometer. The detection angle corresponds to 10°_{cm} . The last column is an approximate estimate as a sum in quadrature of the net effect of five non-Gaussian contributions. Other symbols are explained in the text

Reaction	E_i/A (MeV)	θ_{lab}	Origin of contribution					Σ_{quad}
			$\Delta\theta$	Δp	E_{stragg}	$\Theta_{1,2}$	dE/dx	
p($^{12}\text{Be}, ^{11}\text{Be}$)d	30	1.07°	172	147	101	74	23	259
p($^{12}\text{Be}, ^{11}\text{Be}$)d	15	1.06°	84	71	99	74	37	169
p($^{77}\text{Kr}, ^{76}\text{Kr}$)d	30	0.16°	1404	811	808	723	56	1952
p($^{77}\text{Kr}, ^{76}\text{Kr}$)d	10	0.10°	334	143	502	570	268	883
d($^{76}\text{Kr}, ^{77}\text{Kr}$)p	10	0.21°	1140	614	2177	1859	1321	3408

反跳粒子を測定する場合

Table 3

Major contributions in keV to the resolution of the excitation energy spectra of single neutron pickup and stripping reactions in inverse kinematics, where the light particle is detected in a silicon detector. Symbols as described in text and Table 2

Reaction	E_i/A (MeV)	θ_{lab}	Origin of contribution					Σ_{quad}
			$\Delta\theta$	ΔE_f	ΔE_i	$\Theta_{1/2}$	dE/dx	
p($^{12}\text{Be}, \text{d}$) ^{11}Be	30	19.0°	136	74	114	96	649	685
p($^{12}\text{Be}, \text{d}$) ^{11}Be	15	17.8°	66	72	55	89	984	995
p($^{77}\text{Kr}, \text{d}$) ^{76}Kr	30	15.0°	124	55	64	63	186	249
p($^{77}\text{Kr}, \text{d}$) ^{76}Kr	10	6.0°	26	24	23	19	775	777
d($^{76}\text{Kr}, \text{p}$) ^{77}Kr	10	155.3°	52	93	37	60	1309	1316

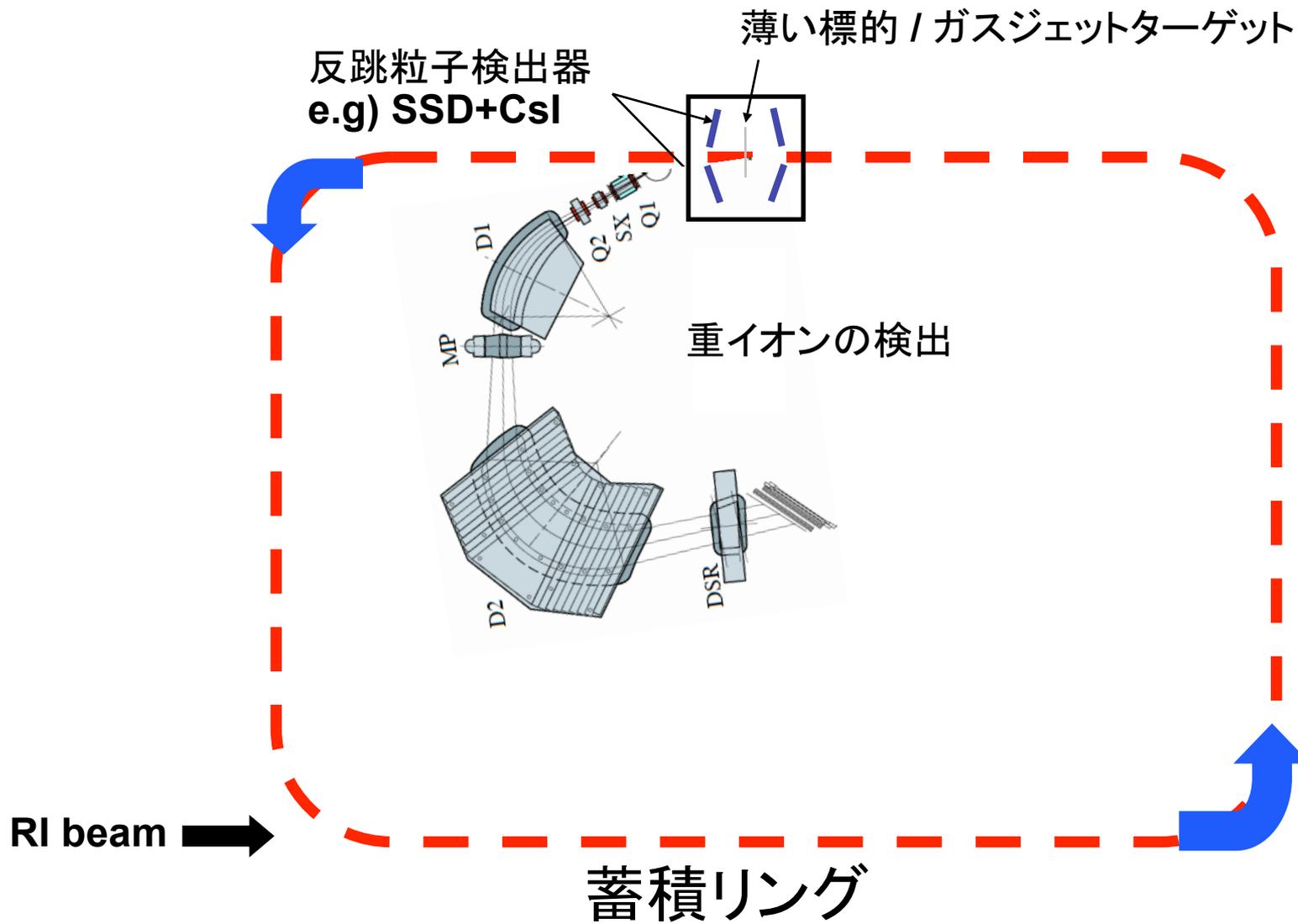
使い捨て vs リサイクル

- 水素標的(CH₂)_nを考える
- 検出器及びacceptanceは同じだとする
- 蓄積リングでの周回数 $\sim 10^6 \text{ s}^{-1}$

$$\text{Yield} \sim I [\text{s}^{-1}] \times \sigma [\text{mb}] \times t [\text{mg}/\text{cm}^2]$$

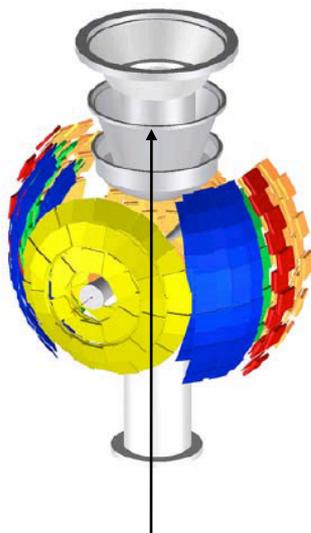
	蓄積リング	従来のビームライン
ビーム強度	0.01 cps	100 cps
標的厚	o(0.01 mg/cm ²)	o(1 mg/cm ²)
<i>E_x</i> 分解能	<300 keV	~300 keV

実験装置のレイアウト案



FAIR-NESRのEXL

EXL Silicon Particle Array (ESPA)



ガスジェットターゲット

Reaction	Energy [MeV/nucleon] E* [MeV]	Θ_{lab} [deg]	Θ_{cm} [deg]	E_{lab} [MeV]	Resolution required for $\Delta E^*=300$ keV		Resolution expected for proposed setup		Θ_{lab} of projectile [deg]
					$\Delta\Theta_{lab}$ [mrad]	ΔE_{lab} [keV]	$\Delta\Theta_{lab}$ [mrad]	ΔE^* [keV]	
$^{132}\text{Sn}(p,p)$	740	89-80	1.1-11	0.4-39	8.0-0.7	360-330	1.5	80-550	0.01-0.08
	0	80-75	11-17	39-90	0.7-0.6	330-390	1.5-1.2	550-820	0.08-0.13
	0	75-65	17-29	90-260	0.6-0.3	390-420	1.2-0.8	820-1500	0.13-0.21
$^{18}\text{C}(\alpha,\alpha)$	400	89-80	1.6-16	1-87	28-0.4	2400-360	1.5-2.5	150-1200	1.6-2.7
	0	80-75	16-24	87-196	0.4-0.3	360-390	2.5-1.5	1200-1700	2.7-4.0
	0	75-65	24-40	196-546	0.3-0.2	390	1.5-0.7	1700-2500	4.0-6.7
$^{18}\text{C}(p,p')$	400	74-55	a) 10-3 b) 13-51	14-1 21-304	2.1-9.0 3.0-0.5	100-30 700-540	1.5 1.5-0.8	130-220 260-630	0.53-0.13 0.64-2.3
	25	55-30	a) 3-1	1.1-0.5	9.0-26	30-12	1.5-1.7	220-550	0.13-0.05
	15	80-75	a) 1.5-0.9 b) 13-21	1.2-0.5 91-234	3.5-4.5 0.4-0.2	60-18 510-450	1.5 2.5-1.2	200-270 1250-2100	0.03-0.02 0.03-0.4
$^{196}\text{Pb}(\alpha,\alpha')$	400	80-75	a) 0.9-0.3 b) 21-53	0.5-0.1 234-1430	4.5-52 0.2-0.1	18-15 450-600	1.5-1.6 1.2-0.5	270-700 2100-4000	0.02-0.01 0.04-0.9
	15	75-55	a) 0.9-0.6 b) 13-21	0.3-0.15 75-184	6.5-10 0.5-0.3	30-12 450	1.5 1.3-0.8	250-490 850-990	0.013-0.009 0.2-0.3
	0	75-55	a) 0.6-0.2 b) 21-52	0.15-0.03 184-1080	10-78 0.3-0.1	12-9 450	1.5 0.8-0.5	490-1200 990-1000	0.009-0.003 0.3-0.7
$^{12}\text{Be}(^3\text{He},t)$	400	120-91	0.5-5	0.09-5.1	0.2-1.8	6-150	8	1700-270	0.1-0.9
	0	89-80	6-18	9-77	1.4-0.5	210-330	1.5-1.3	330-990	1.2-3.3
	0	80-75	18-25	77-156	0.5-0.3	330-360	1.3-0.8	990-1400	3.3-4.7
	0	75-55	25-50	156-702	0.3-0.2	360-420	0.8-0.4	1400-3000	4.7-10
$^{22}\text{C}(p,d)$	15	40-10	a) 25-4 b) 74-156	6-2.4 32-77	22-100 7-18	430-120 980-660	1.5 1.5-1.3	40-60 80-150	1.6-0.3 1.7-3.7
	0	170-120	3-22	2.7-6	150-18	90-160	15-8	100-250	0.03-0.23
$^{132}\text{Sn}(d,p)$	15	120-90	22-45	6-15	18-10	160-290	8	250-430	0.23-0.44
	0	120-90	22-45	6-15	18-10	160-290	8	250-430	0.23-0.44

まとめ

Dripline 近傍の不安定核の反応実験を行う
ためには、primaryビームの強度を上げる努力
だけでは、かなり厳しい

蓄積リングに期待すべき(?)