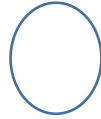


3人の凄^い先生



森永晴彦先生： 大学院修士時代 (1962-1964)

鋭利、才気煥発、自由人

講義は下手。会話がものすごく知的。
世界一流研究者の間近な姿



坂井光夫先生： 核研助手時代 (1964-1971)

芒洋、壮大

直観的な思考。尽きせぬ馬力。愛国心。
日本を背負う気合。

誉れ高い一門：池上栄胤、山崎敏光、江尻宏泰、、、
橋本治、



杉本健三先生： 理研入所以後 (1975 ~)

反骨精神、挑戦精神、関西人
好きもの(物理)。他人懐っこい人柄。

厄年を迎えたとき、先生曰く：

「そろそろ指導者にならんとアカンよ！」 → 主任研究員

杉本先生と理研の重イオン研究

1) 深部非弾性散乱をめぐって

— 160cmサイクロトロン の頃 —

杉本先生：スピン偏極に関する共同実験
理研加速器施設の発展段階—ホップ

2) RIPSとRIビーム物理の伸長

— リングサイクロトロン の頃 —

杉本先生：RIビーム実験の草分け
理研加速器施設の発展段階—ステップ

3) 世界最先端加速器施設の誕生

— RIBF & JPARC の実現 —

杉本先生：ニューマトロン計画の夢の実現
理研加速器施設の発展段階—ジャンプ

1) 深部非弾性散乱をめぐって —160cmサイクロトロン—

杉本先生との‘最初’の出会い (1974-75)

1971-74: ストックホルム研究所、ニールスボーア研究所、オルセー研究所
1975 : 理研入所; サイクロトロン研究室(上坪宏道主任研究員)研究員

鈴木厚人さん

‘重イオン物理研究会’、京大原子炉・熊取(?) (主宰: 平尾先生(?))

深部非弾性散乱に関する三つの実験のプロポーザル:

- 1) 軌道角運動量の分配則 — γ 線多重度の測定—
- 2) 角運動量移行メカニズム — 残留核スピン偏極の測定—
- 3) 深部非弾性散乱による高スピン状態の研究
— 新インビーム γ 線分光法の開拓

杉本先生と
共同実験

結果:

- ・ 1)、2)、3) いずれも大成功
- ・ 特に、2) は杉本先生との共同実験
- ・ 成果の集大成: 国際会議「重イオン反応と前平衡反応過程」
1977年9月、箱根花月園ホテル
上坪さんの感慨: 「理研の大発展の起点」

1970年代の重イオン加速器施設

欧米: 低エネルギー(5-10 MeV/u) 重イオン物理の勃興・隆盛

- ・ タンデムの普及 ⇒ Analog states, (d,p) など
- ・ 中重イオン用加速器施設の台頭 ⇒ 深部非弾性散乱、疑似弾性散乱

Dubna; U300 (サイクロトロン, 1960), Ar など
Orsay; Alice (サイクロトロン, 1970), Kr (with Ein Coulomb barrier of U) など
LBNL; HILAC (リニアック, 1956), Ar など
GSI; UNILAC (リニアック, 1975), U など

日本: 重イオン物理研究の停滞

- ・ タンデム自力建設方針の失敗: 東大、京大、九大
注: 12UD (筑波大, 1975)、20UR (原研東海, 1978)
- ・ パンデ施設が未だ主流: 阪大杉本研、東海原研
- ・ 理研160cmサイクロトロン; 日本で唯一の中重イオン加速器
 ^{14}N - 95 MeV など

強く志願
して入所

- ・ ニューマトロン構想 (1973-); 杉本、阪井、平尾、中井など
— 挙に未開の地平 (1 GeV 領域の重イオン物理) ⇔ 世界 —

新種の反応過程(大質量移行反応) 深部非弾性散乱と疑似弾性散乱

直接反応と融合核反応：古典的反応過程

直接反応：素散乱過程1回； 非弾性散乱、粒子移行反応など

DWBA, 標的核の構造の探針

融合核反応：素散乱過程無限回； 2原子核の結合 → 終状態一体
新原子核の形成

大質量移行反応：中間的反応過程(素散乱過程有限回)

深部非弾性散乱； Deep Inelastic Scattering

衝突核が2分子状に結合して、しばし回転した後、再分離する

核子、エネルギー、角運動量の移行・拡散

⇔ “熱化学反応”：2体原子核系の時間進化



疑似弾性散乱； Quasi Elastic Scattering

入射核の一部(=参加者)が切り取られ、標的核(=傍観者)に移行する
中高エネルギー領域の入射核破碎反応に類似(参加者は自由空間へ)

別称： Breakup-Fusion, Incomplete Fusion など

2人のポーランド人との出会い @Niels Bohr Institute

R. Broda (Krakow): 同研究所時代の共同実験者

特に、 **γ 線多重度実験**の共著者

複合核(高励起状態)の角運動量分布の決定法の確立

NaI・ボール、Ge ボールBoom を触発

M. Ishihara, R. Broda, G. Hagemann, B. Herskind, S. Ogaza,

Int. School of Physics ‘**Enrico Fermi**’, Varenna, 1974

G.B. Hagemann, R. Broda, B. Herskind, M. Ishihara, S. Ogaza,

Nucl. Phys. A245 (1975) 166

J. Wilczynski (Warsaw): 同研究所時代の同室者

特に、深部非弾性散乱(Deep Inelastic Scattering) 研究の火付け役

Wilczynski plot/diagramなどを提唱

深部非弾性散乱研究の世界的熱狂を齎す

J. Wilczynski, Phys. Lett. 47B (1973) 484

巨大軌道角運動量の行方

- 重い原子核同士の衝突 (Nucleus-Nucleus Collision)

⇒ 超重元素の生成！？

⇒ 巨大軌道角運動量: $\hbar l_{\max} = r_0(A_1^{1/3} + A_2^{1/3})\sqrt{2\mu(E-B)}$

例えば、 $l_{\max}=166$ for $^{40}\text{Ar} + ^{238}\text{U}$ $E_{\text{cm}} = 257$ MeV;

巨大軌道角運動量の行方

Lefort diagram:

最表面部; 疑似弾性散乱
スキン部 ($l \geq l_{\text{crit}}$); 深部非弾性散乱
中心部 ($l \leq l_{\text{crit}}$); 融合反応

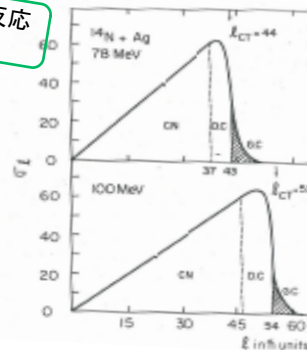
このダイアグラムは本当？

l_{crit} は如何程？



複合核に持ち込まれた軌道角運動量
のスペクトラム
⇒ 「線多重度 (γ-ray multiplicity) 測定
により決定

どこまで融合反応
に有効か？



「線多重度測定による 複合核の軌道角運動量分布の決定

「線多重度(M):

同時にカスケード状に放出されるγ線の本数
 $l(\text{親元のスピン}) \approx 2M$; stretched E2 cascade

$^{150}\text{Nd} + ^{16}\text{O}$, 77 MeV

$^{16}\text{Ge}(\text{Li}) + 4x(2^+\phi x 2^+)\text{NaI}(\text{Ti})$

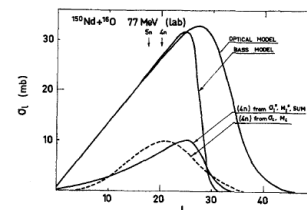
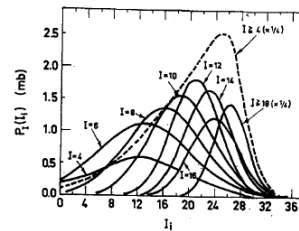
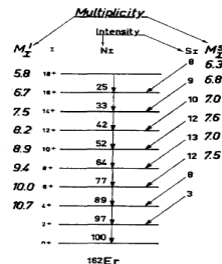
$$N_o/N_s = 1 - (1 - \Omega_2)^{\langle M_I - 1 \rangle} \approx \langle M_I - 1 \rangle \Omega_2.$$

$$\langle M_I \rangle = \langle M_I' \rangle + \frac{1}{2}I.$$

$$P_{Np} = (M-1)(M-2) \dots (M-p)\Omega^p.$$

$$\mu_n = \langle (M - \langle M \rangle)^n \rangle,$$

$^{150}\text{Nd} (^{16}\text{O}, 4 \text{ nV}) \ ^{162}\text{Er}, 77 \text{ MeV (Lab)}$

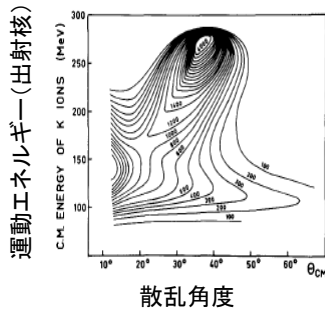


- 複合核(高励起状態)の角運動量分布の決定法の確立

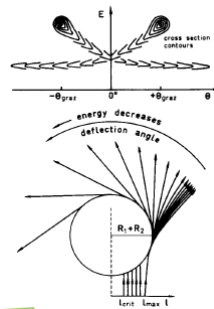
- NaI・ボール、Ge ボールBoom を触発

Wilczynski Diagram: 深部非弾性散乱メカニズム

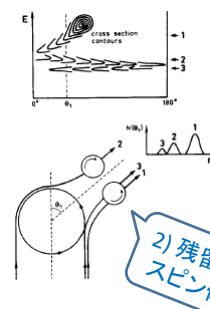
$^{232}\text{Th}(^{40}\text{Ar}, \text{K})$ at $E_{\text{lab}} = 388 \text{ MeV}$



分子状結合; 回転
熱平衡化



Far-side vs. Near-side
残留核のスピン偏極



1) 角運動量分配 (平衡化の極限): 角運動量を慣性モーメントに比例して分配

慣性モーメント (J)

$$J_1 = (2/5)M_1R_1^2: \text{原子核1}$$

$$J_2 = (2/5)M_2R_2^2: \text{原子核2}$$

$$J_{12} = (1/(M_1+M_2))M_1M_2(R_1+R_2)^2: \text{相対運動}$$

平衡化の極限での軌道角運動量 (L) の分配
Sticking mode @ 平衡状態

$$L_1 + L_2 + L_{\text{rel}} = L_{\text{max}}$$

$$L_1 : L_2 : L_{\text{rel}} = J_1 : J_2 : J_{12}$$

深部非弾性散乱 (Deep Inelastic Scattering; DIS) に関する 三つの実験提案

1) DIS における角運動量移行・分配則の検証 ⇔ **残留核に対する「線多重度測定」**

- ① DIS に関与する入射軌道角運動量 (L_{in}) は如何に?
- ② DIS の終状態において軌道角運動量は、
“入射核”、“標的核”、重心相対運動、の三つの自由度に如何様に分配されるか?

Wilczynski; ① $L_{\text{in}}^{\text{max}} \geq L_{\text{in}}(\text{DIS}) \geq L_{\text{crit.}}(\text{fusion}); L_{\text{in}}(\text{DIS}) = L_1 + L_2 + L_{\text{rel}}$

② $L_1 : L_2 : L_{\text{rel}} \Rightarrow (2/5)M_1R_1^2 : (2/5)M_1R_1^2 : (M_1M_2/(M_1+M_2))(R_1+R_2)^2$

2) DIS におけるスピン偏極発生メカニズムの検証 ⇔ **残留核スピン偏極測定**

Wilczynski; スピン偏極 (P) $(P // \mathbf{k}_i \times \mathbf{k}_f)$

$P > 0$ for 高エネルギー成分 (near side collision)

$P > 0$ for 低エネルギー成分 (far side collision)

3) DIS (2体終状態反応) を用いたインビーム γ 線分光法の開発

$L_{\text{in}}^{\text{max}} \geq L_{\text{in}}(\text{DIS}) \geq L_{\text{crit.}}(\text{fusion}) \Rightarrow$ 高スピン・イラスト・カスケードの増幅

DIS 残留核の分布 \Rightarrow 中性子過剰核へのアクセス

2体終状態反応 \Rightarrow 散乱粒子との同時計測

\Rightarrow 励起関数の同時測定

実験仲間:サイクロ研入所当時(1975～)

於:理研サイクロトン研究室(上坪宏道主任研究員)

第1陣

福田共和 さん:東大物理大学院生

野村亨の指導で博士論文研究:テーマは「重イオン反応の断面積測定」

野村さん Saclay に出向 → 石原Gの推進役

沼尾登志夫 さん:東工大千葉研出身

奨励研究生(ボスドク)一枠 ←上坪さん

第一実験「線多重度測定によるDIS研究」の担当

稲村 卓 さん:サイクロ研究室研究員

サイクロ研の先輩、核研当時から盟友

第3実験「大質量移行反応インビーム分光法の開発」への協力

田中耕一郎 さん:東大物理大学院生

福田さんの紹介で後日参画

第2実験「DSI 残留核のスピンの偏極測定」の担当

第2陣: 京大小林研大学院生

下田 正 さん: Texas A&M でのスピン偏極実験(杉本方式)

家城和夫 さん: 円偏光法によるDSI スピン偏極現象の研究

高田栄一 さん: Texas A&M との研究協力プログラム

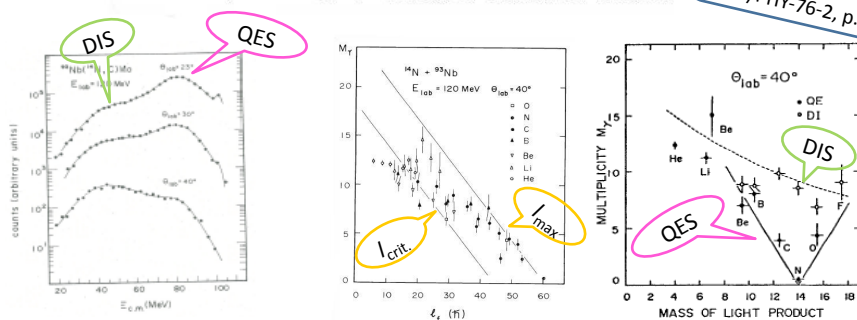
第一実験:深部非弾性散乱における角運動量移行と分配

ANGULAR MOMENTUM TRANSFER OF THE QUASI-ELASTIC AND DEEPLY INELASTIC

PROCESSES IN THE $^{14}\text{N} + ^{93}\text{Nb}$ REACTION AT $E=120$ MeV

M. Ishihara, T. Numao, T. Fukuda, K. Tanaka, T. Inamura

アルゴンヌ Conf.
ANL Report.(1976)
ANL/PHY-76-2, p. 617



Highly praised: 深部非弾性散乱における角運動量移行問題に最初に着目!

1976, 3月: talk at Int. Symp. on Macroscopic Features of Heavy-ion Collisions, ANL
Kamitubo praised "Ishihara is the man of year!"

1976, 8月: M. Lefort (GANILの創始者)によるINP-Orsay への招聘

→ ALICEでの共同実験 → 1980年代のGANILでの共同実験(旭等)

DISの
大家

Bad news: Our paper submitted to PRL in August 1976
 Alas! The paper was not accepted by PRL!

VOLUME 38, NUMBER 7

PHYSICAL REVIEW LETTERS

14 FEBRUARY 1977

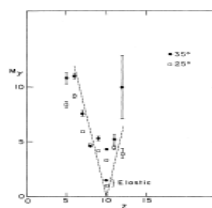
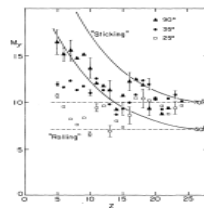
Angular-Momentum Transfer in Deep-Inelastic Processes

P. Glässel,* R. S. Simon,† R. M. Diamond, R. C. Jared, L. Y. Lee,

J. G. Moretto,‡ J. O. Newton,§ R. Schmitt, and F. S. Stephens

Department of Chemistry and Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, Berkeley, California 94720

(Received 29 November 1976)



Reference:

[§]M. Ishihara, T. Numao, T. Fukuda, K. Tanaka, and I. Inamura, in Proceedings of the Symposium on Macroscopic Features of Heavy-Ion Collisions, Argonne, Illinois, 1976, edited by D. G. Kovar, ANL Report No. ANL/PHY-76-2 (to be published), p. 617.

VOLUME 38, NUMBER 7

PHYSICAL REVIEW LETTERS

14 FEBRUARY 1977

Fragment Spin Orientation Following Deep-Inelastic Scattering*

K. Van Bibber, R. Ledoux, S. G. Steadman, F. Videbæk, and G. Young

Laboratory for Nuclear Science, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts 02139

(Received 3 December 1976)

第3実験: 大質量移行反応インビームγ線分光法の開発

インビームγ線分光

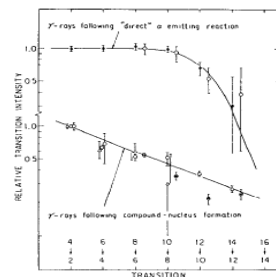
古典方式: 重イオン融合反応 H. Morinaga et al., Nucl. Phys. 46(1963) 21

新方式: 大質量移行反応(深部非弾性散乱、疑似弾性散乱*)

疑似弾性散乱* = {Quasi elastic scattering, Incomplete fusion, Break-up fusion}

Incomplete fusion reaction Induced by 95 MeV ^{14}N

T. Inamura, M. Ishihara, T. Fukuda, T. Shimmed, H. Hiruta, Phys.Lett. 68B, 51 (1977)

Population
from a narrow window of large I_{in} Massive Transfer In-beam G-ray Spectroscopy
In fashion at Texas A&M, KVI etc

Deep inelastic scattering induced by xxxxx

R. Broda et al., Phys. Rev. Lett. 74 (1995) 868

Access to
neutron-rich nuclei

第2実験: ‘深部非弾性散乱’ 残留核のスピンの偏極測定

- スピン偏極測定法: 1) γ 線円偏光法
散乱粒子との同時計測OK, 偏極分解能劣悪
2) β 線非対称法—杉本方式
散乱粒子との同時計測NO, 偏極分解能絶大

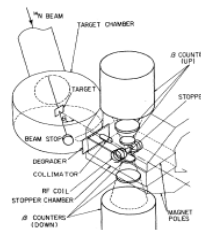
At 160cm Cyclotron facility of RIKEN (since 1967)

^{100}Mo (^{14}N , ^{12}B) X, $E_{\text{in}} = 90 \text{ MeV}$

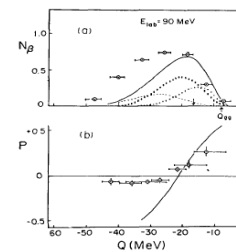
^{12}B emitted towards $\theta = 20^\circ \rightarrow$ implanted into Pt foil

$E(^{12}\text{B})$; エネルギー減衰用挿入 Al Foil の厚さで調整

β 線非対称の観測



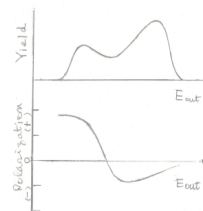
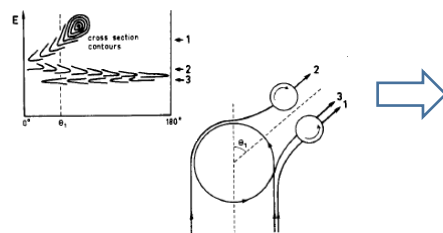
^{12}B のエネルギー分布と
偏極の $E(^{12}\text{B})$ 依存性



$$Q - Q_0 = -E(^{12}\text{B}) \\ (P // k_i \times k_f)$$

スピンの偏極の符号は反対だった!?

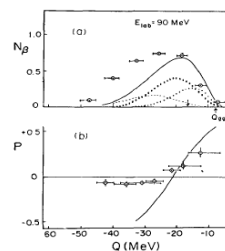
深部非弾性散乱



疑似弾性散乱
Quasi-Elastic Scattering

リコイル効果
Brink Model

@1977年春の学会
シンポ(?)講演大好評!



反応生成核スピン偏極発生メカニズム

スピン偏極の向きの決定要因

- ① トルクの向き
- ② Near-side collision か Far-side collision で偏極の向きは逆

Deep Inelastic Scattering: 二つの原子核が表面で相互に摩擦を起こす

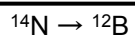
- トルクの向き: 相手核から受ける摩擦力の力積による
力積の向きは進行方向の逆: '入射核'も'標的核'も偏極の向きは同じ
- Near-side ⇔ 高エネルギー成分; Far-side ⇔ 低エネルギー成分

Quasi Elastic Scattering: 入射核の一部 (Participant) が切り取られ標的核に乗り移る
入射核の残部 (Core) は、入射核片として、前方に放出される
Participant が切り取られる際、Core と標的核は傍観者的に振舞う

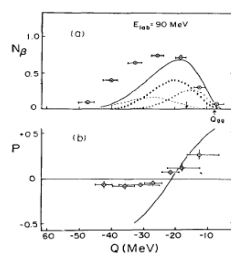
- トルクの向き(入射核片に関して): Participant の核内運動量, $p(\text{participant})$, のリコイル
入射核片は反応表面でリコイル($-p(\text{participant})$) を受ける。
偏極の向きは、 $p(\text{participant})$ がビーム方向か否かで符号が異なる
- 常に Near-side collision 優勢と考えられる。

Projectile Fragmentation: 入射核の一部 (Participant) が切り取られ自由空間に放出
Participant のリコイル効果: 偏極と出射核重心運動量の対応関係もQESに類似

Not Deep Inelastic Scattering but Quasi-elastic scattering !!
Not due to Friction but to **Recoil effect** !!

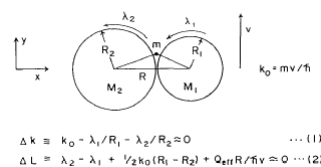


6.5 MeV/u

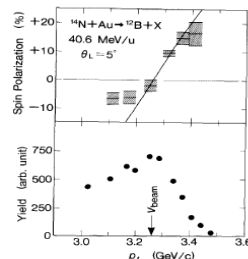


Quasi-elastic scattering

Brink Model

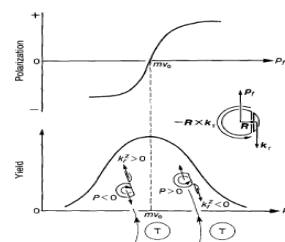


40.6 MeV/u



Projectile fragmentation

Asahi Diagram



Mechanism for Spin-polarization of Projectile residue

---- Asahi Diagram for Projectile fragmentation ----

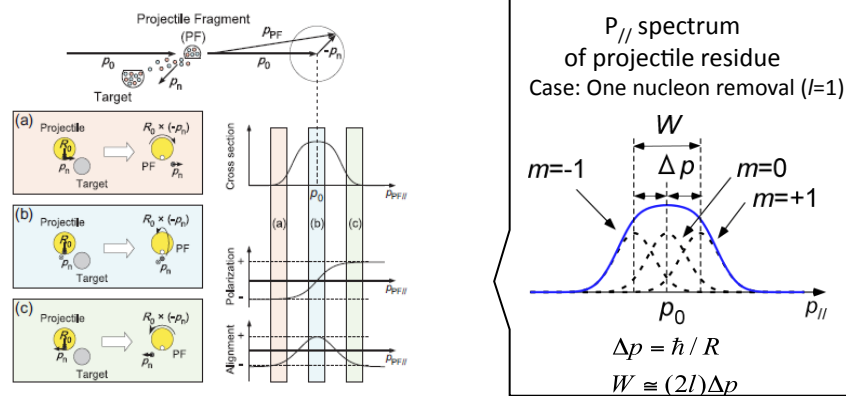
Recoil effect on projectile residue ('PF') :

m_n : original magnetic sub-state of the nucleon to be removed

p_n : $p_{//}$ originally carried by the nucleon to be removed :

$\Leftrightarrow p_n = \hbar m_n / R$ where R : radius of projectile

Recoil on 'PF' : $p_{//} = 'p_0' + (-p_n)$; $m = -m_n$



Asahi *et al.*, Phys. Lett. B **251**, 488 (1990).

Not-too-happy news

VOLUME 39, NUMBER 6

PHYSICAL REVIEW LETTERS

8 AUGUST 1977

Spin Polarization of ^{12}B in the Heavy-Ion Reaction $^{100}\text{Mo}(^{14}\text{N}, ^{12}\text{B})^{102}\text{Ru}$

K. Sugimoto, N. Takahashi, A. Mizobuchi, Y. Nojiri, and T. Minamisono

Laboratory of Nuclear Studies, Faculty of Science, Osaka University, Toyonaka, Osaka, 560 Japan

and

M. Ishihara, K. Tanaka, and H. Kamitsubo

Institute of Physical and Chemical Research, Wako-shi, Saitama, 351 Japan

(Received 16 June 1977)

Alas !
Sugimoto but not Tanaka !

Volume 73B, number 3

PHYSICS LETTERS

27 February 1978

SEMICLASSICAL ANALYSIS OF THE SPIN POLARIZATION OF ^{12}B IN THE $^{100}\text{Mo}(^{14}\text{N}, ^{12}\text{B})$ REACTION

M. ISHIHARA and K. TANAKA

Cyclotron Laboratory, Institute of Physical and Chemical Research, Wako-shi, Saitama, Japan

T. KAMMURI, K. MATSUOKA and M. SANO

Department of Physics, Osaka University, Toyonaka, Osaka, Japan

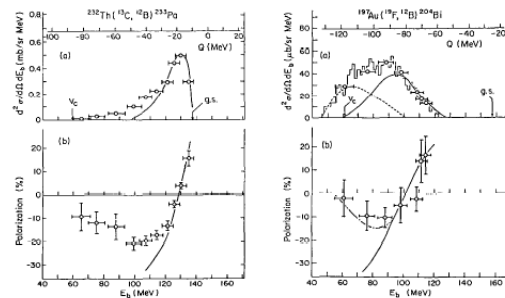
学会発表: リコイル効果による偏極メカニズム
(Brink モデルの援用)

Good News: Collaboration at Texas A&M (1978)

Spin Polarization Experiment with 88-inch Cyclotron at Texas A&M Univ.

by RIKEN: M.Ishihara (石原正泰), T.Shimoda (下田正)

TAMU: K. Nagatani (永谷邦夫) and his company



Prevalence of Direct-Reaction Mechanism in a Deeply Inelastic Reaction, $^{197}\text{Au}(^{19}\text{F}, ^{12}\text{B})$

M.Ishihara, T.Shimoda, H.Frohlich, H.Kamitsubo, K.Nagatani, T.Udagawa, T.Tamura,
Phys.Rev.Lett. 43, 111 (1979)

RIKEN-TAMU 研究協力協定の締結 (1981?)

- 研究協力プログラム(1981-1984); 高田栄一さん等
- 理研-外国研究機関間の研究協力協定の先駆け
IN2P3, INFN, IMP, MSU, GSI,

80年代初頭のお付き合い

— 杉本核研所長(1978/12-1983/3)の頃 —

1) Tilted foil による偏極生成実験:

理研リニアック; 河本進さんなど

2) Bromley の教科書の執筆:

杉本、高橋(憲)、石原

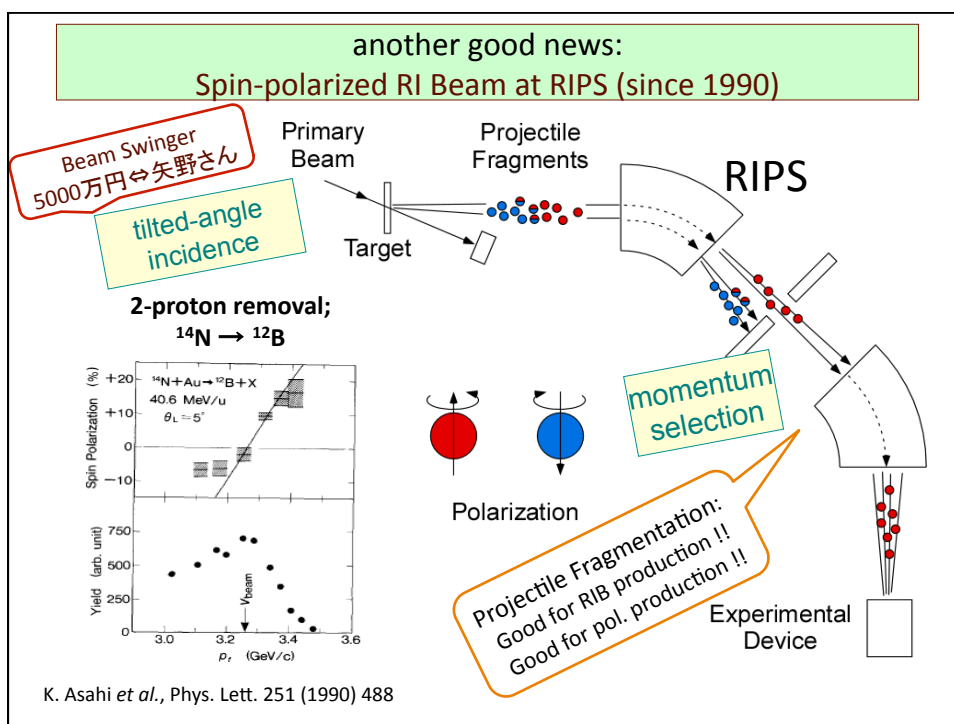
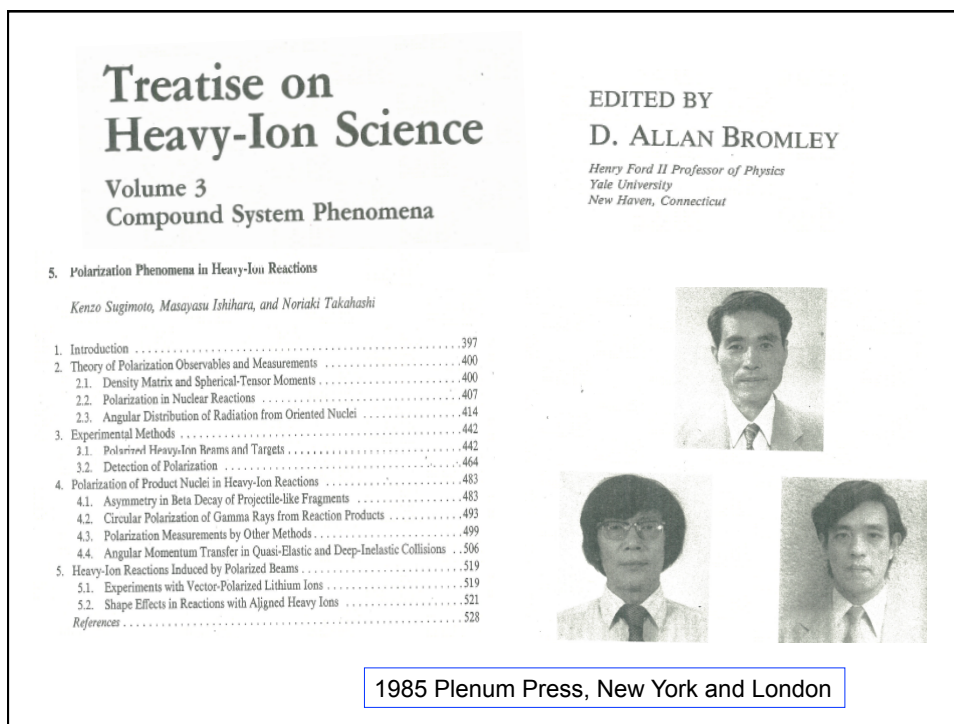
3) 忠告: 厄年を迎えたとき、先生曰く:

「そろそろ指導者にならんとアカンよ!」
→ 主任研究員 (1984 ~)

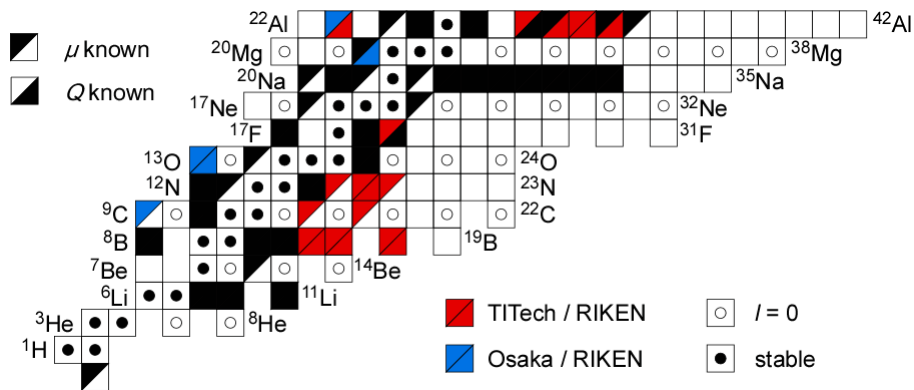
4) 3者合同委員会(1983年冬):

杉本核研所長辞任の引き金

→ ニューマトロン計画の終焉



RIPSによる核モーメント(μ, Q)の測定



g -factor measured:

^{14}B , ^{15}B , ^{17}B , ^9C , ^{15}C , ^{17}C , ^{17}N , ^{18}N , ^{19}N , ^{13}O , ^{21}F , ^{23}Al , ^{30}Al , ^{32}Al

Q -moment measured:

^{14}B , ^{15}B , ^{17}B , ^{18}N , ^{13}O , ^{23}Mg , ^{23}Al , ^{31}Al , ^{32}Al , ^{33}Al

Further good news: Development at BigRIPS

2段階破碎反応によるスピン偏極生成法

Figure of Merits = YP^2 where Y (yield), P (Polarization)

Magnitude of P of Projectile Fragment upon the practical use

one-nucleon removal; 20-30% (下田実験)

two-nucleon removal; 5-7% (旭実験)

multi-nucleon removal; less than 1.0% (多くの実践ケース)

$$P^2(\text{one-nucleon})/P^2(\text{multi-nucleon}) > 1000$$

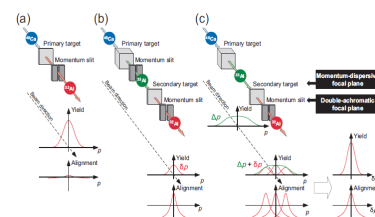
直接法($A \rightarrow B$)の代りに、2段階法 $A \rightarrow (B+1) \rightarrow B$

- P^2 で稼ぐ!
 - Y の減少を最低限にする。
- ⇒ Figure of Merits が50倍程度増加

- Y の減少を最低限にする手立て:

1段目のターゲットは厚く

分散整合で運動量広がり消す(右図)



安定線から遠く離れた領域に適用可能!

Y. Ichikawa, H. Ueno, et al. Nature Physics, 8, 918 (2012)

----- 3段跳びのホップ -----

160cmサイクロトロン重イオン研究の集大成

● 理研国際シンポジウム「重イオン反応と前平衡過程」

1977年9月、箱根花月園ホテル

理研原子核グループに対する国際評価が高まる/定まる！

上坪さんの回顧談：「理研の飛躍はここから始まった」

主な参加者：重イオン研究者多数！

H. Morinaga, J.P. Schiffer, J.O. Newton, S. Yoshida, R.A. Broglia, J. de Boer etc.,

L.G. Moretto, R. Vandenbosh, J. R. Nix, J. P. Wurm, J. Galin, J. Rasmussen etc.

後日談：D. Kovar (ANL) → DOE officer for RHIC

「RHIC SPIN プログラム」、「理研BNLセンター」の設置に協力 (1994-1997)

● 1st Int. Conf. on Nucleus-Nucleus Collision

1982年9月、MSU、East Lansing

招待講演：「Direct reactions with heavy ions」

M.Ishihara, Nucl. Phys., A400,153 (1983)

第2節： RIPSとRIビーム物理の伸長

-----リングサイクロトロンと共に-----

160cmサイクロトロン(ホップ) → リングサイクロトロン(ステップ)

リングサイクロトロン建設計画

第1期工事(1980-1986)：リングサイクロトロン本体など

1986年、ビーム加速に成功

第2期工事(1987-1988)：基幹実験装置など

RIPS: RIKEN Projectile-Fragment Separator

RIB → RIPS(谷畑さんの命名)

・ベバラックにおける杉本・谷畑実験の成功が契機

・リングサイクロトロン施設の4つの基幹装置のうちの一つ

・世界で最初の本格的RIビーム生成装置(第2世代RIB施設)

・強力なビームで「RIビーム核物理」分野を先導的に開拓

RIPSの製作

1987年着工、
1989年完成

RIB ⇒ RIPS (Riken Projectile-fragment Separator)

杉本など; 「他人のやらないことをやれ」

vs.

杉本; 「他人のやってることもやる」、ただし
「量が質を変える」

主張: ビーム強度を飛躍的に高めて(3-4桁)
核分光を可能にする!

核分光成立の為の要件; 多様な核反応をプローブに用いる

第1世代 ⇒ 第2世代

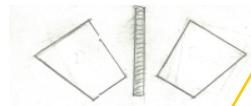
数b ⇒ 数mb - 数10mb

全断面積測定 ⇒ 直接反応の観測

広範な核分光(核構造研究; 天体核物理研究)

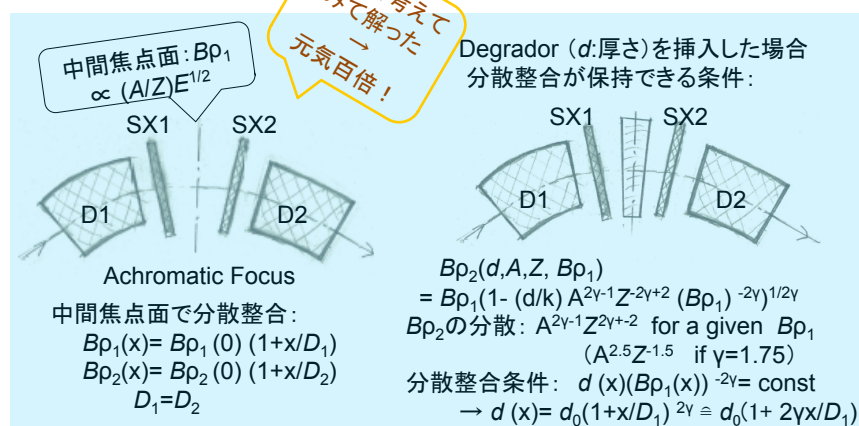
RIPS設計のヒント

1984年暮れ: 国際会議帰りの
畑中さんが示したポンチ絵



二つのD電磁石 → Achromatic Focus
DUMA (RCNP)
LISE (GANIL)

Degrador → レンジ; $R \propto AZ^{-2}E^{\gamma}$
ところでWedgeの形は?



Cf. J.P. Dufour et al., NIM, A248, 267 (1986)

RIB施設発展の道程

1) 第1世代施設: 揺籃期(1984-1988)

- ・ 谷畑・杉本のベバラック実験
- ・ LISE@GANILでの新同位体探索

他人のやらない
ことをやる!

2) 第2世代施設: RIB核物理分野の形成(1989-)

- ・ 本格的RIB生成装置の出現 → ビーム強度の飛躍的増大
- ・ RIPS(1989): 第2世代の先導器
A1200@MSU(1990), FRS@GS I(1991), LISE II @GANIL(199x)
- ・ “RIB核物理”の形成: ← mb-100mbの直接反応が観測可能!
高アイソスピン原子核の核構造研究
宇宙元素生成に関わる天体核物理研究

他人のやれない
ことをやる!

3) 第3世代施設: RIB核物理の拡張(2007-)

- ・ ファクトリーの出現; 加速器施設全体をRIB利用に特化
- ・ ビーム強度、RIB核種の飛躍的増大
- ・ BigRIPS(2007): 第3世代の先導器

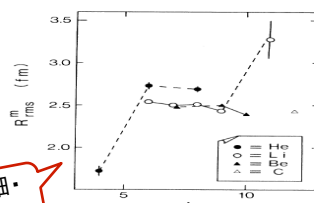
他人のやれない
ことをやる!

日本が各世代を先導! 目出度し!!

Historical development of the In-flight RIB Facility -1st generation (1984 -1988) -

A couple of enlightening pioneering experiments:

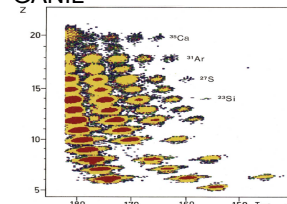
with Bevalac @ LBL



I. Tanihata et al.
PRL55(1985)2676

σ_t : total interaction cross section
Large $\sigma_t \Leftrightarrow$ Halo nucleus of ^{11}Li

with LISE @
GANIL



M. Langevin et al.
Phys. Lett. 150B(1985)71

Variety of new isotopes synthesized

Yet, scope of the experiment limited
due to weak beam intensity

2nd generation RI Beam Facility at RIKEN

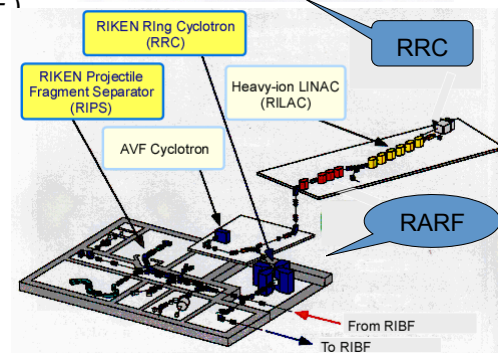
Accelerator Facility (RARF) :
RIKEN Ring Cyclotron (RRC)
 as the central accelerator (1986~)
 $K=540$, $E/Z = 135\text{MeV/u}$

Projectile fragment separator :
RIPS (1989~)
 (\Rightarrow BigRIPS (2007~) at RIBF)



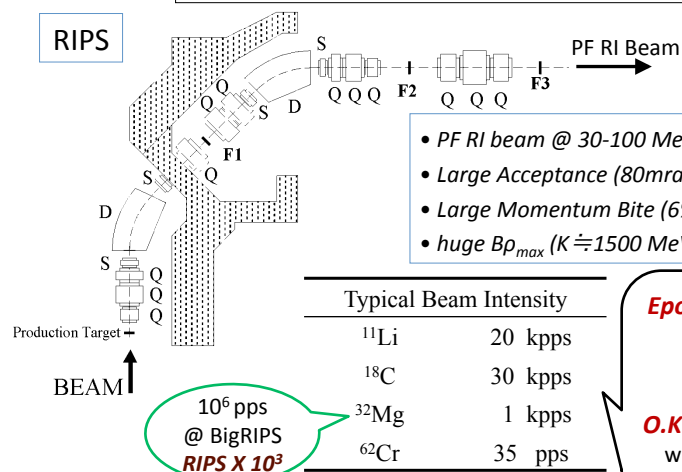
Intense RIB for $Z \leq \sim 20$

Spin Polarized RIB



RIPS: 1st facility for 2nd generation RIB

1st-generation RI beam facility (since 1989) RIPS :
 Projectile-Fragment (PF) Separator
 at RRC: $K=540$ Cyclotron for Heavy Ion acceleration



- PF RI beam @ 30-100 MeV/u
- Large Acceptance (80mrad in circle)
- Large Momentum Bite (6%)
- huge $B\rho_{\text{max}}$ ($K \doteq 1500\text{ MeV}$)

Epoch-making intensity

10^3 to 10^4 times
 more intense than
 preceding LISE etc.

O.K. for direct reactions
 with $\sigma \sim \text{mb}$ to 100 mb
 \rightarrow 核分光研究

最初の第3世代器 BigRIPS (2007~)

強度、更に
10⁴⁻⁵倍

超伝導RIビーム生成装置BigRIPSの概要 (major features)

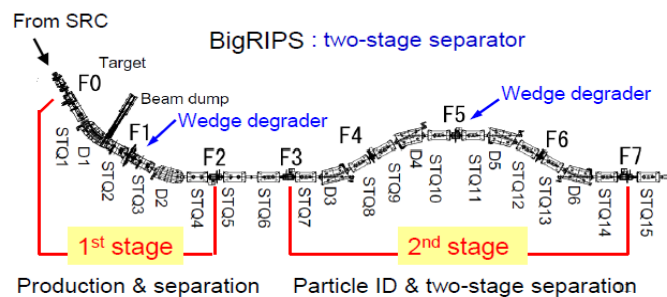
- Large acceptances Comparable with spreads of in-flight fission at RIBF energies: ± 50 mr, ± 5 %
Achieved by the use of large-aperture superconducting quadrupoles (pole-tip $r_0=17$ cm, pole-tip $B=2.4$ - 2.5 T)
- Two-stage separator scheme
- 2nd stage with high resolution Particle identification (PID) without measuring TKE
→ Charge state identification



Parameters:

$\Delta\theta = \pm 40$ mr
 $\Delta\phi = \pm 50$ mr
 $\Delta p/p = \pm 3$ %
 $B\rho = 9$ Tm
 $L = 78.2$ m

STQ1-14:
superconducting
Q triplets
 D1-6: R.T.
dipoles (30 deg)
 F1-F7: focuses



RIPSの歴史を振り返ってみる！ 紆余曲折と意外と幸運

PF方式への偏見
 Eアーレーナ(ISOL方式)への熱狂
 孤独からの出発

豹変:
 RIPSの性能
 新しい分光法の開拓

PF方式施設の大繁栄

RIPS(1989)@RIKEN, A1200@MSU(1990),
 FRS@GSI(1991), LISE II @GANIL(199x)

1980年代初期の重イオン加速器施設の趨勢

● 中重エネルギーサイクロtron施設 (~100 MeV/u)

米: MSU(K=500) 超伝導サイクロtron施設; 1982年完成
 仏: GANIL(K=400) 常温サイクロtron ; 1982年完成
 日: 理研リングサイクロtron ; 1980年着工 (1989年完成; 7年遅れ)
 その他: 南ア、ミラノ(→シシリ)、KVIなどで計画中

高温高密度原子核の物性; 液相・気相 相転移

● 高エネルギーシンクロtron加速器施設 (~1 GeV/u)

米: Bevalac ; 1971年提案、1974年(?) 完成
 日: ニューマトロン ; 1973年発想、1976年提案
 独: GSI-SIS 18 ; 1990年完成

高温高密度原子核の物性; xxxx

● 超高エネルギーシンクロtron加速器施設

米: BNL-RHIC ; 2001年完成

高温高密度原子核の物性; クォーク・グルーオン・プラズマ

時代背景

QCDに根差した原子核研究の台頭

- ・ クォーク次元での原子核研究
- ・ PANIC の開幕
- ・ 指導的研究者層の雪崩のような転向
- ・ ニューマトロン計画 vs. 大型ハドロン計画

理研リングサイクロtronに対する過大な懸念

- ・ 偏見と中傷

「理研の人たちは素人。大型加速器が作れるのか?！」

「今更、リングサイクロtronで魅力的な研究が出来るのか?！」

古典的核研究
リング3番器

- ・ 二つの利点を活かして踏ん張る!:

- ① 加速器性能; 先行する MSU, GANIL に比べエネルギー、強度で勝る
- ② 研究課題; 先行する MSU, GANIL では高温・高密度原子核研究に集

中 加速器性能の長所を生かして、異なる研究課題で勝負せよ!

理研リングサイクロトン建設計画

一期工事(1980-1986) ファーストビーム(1986)
 二期工事(1987-1988) ビーム利用の開始(1989)
 代表者、上坪宏道、
 加速器グループ: 矢野安重、後藤彰、加瀬昌之、藤沢高志、元永昭七など
 施設インフラ・ビームライン: 稲村卓、畑中吉治、市原卓など

主要実験計画の設定(1984): 編成責任者(石原放射線研主任研究員)

vs. 世界の動向: 高温高密度原子核に集中! ⇒「異分野を狙え!」
 八木浩介核物理委員長⇒宮島龍興理事長;「外部研究者にも開放して!」

GARIS-IGISOL: 代表者、野村 享(核研); 超重元素探索

成功: 森田浩介ほか、超重元素113の発見(200x)、

全国区

SMART ; 代表者、大沼 甫(東工大); 高分解能荷電粒子分光

成功: 酒井英行ほか、偏極重水素ビーム→3体力の研究

全国区

ASHURA ; 代表者、李 相茂(筑波大); 高温高压原子核

失敗: 後発性→競争力不足→中絶

RIB(→RIPS) ; 代表者、石原正泰(理研); RIビーム物理

理研: 久保、
旭、石原

触発: Bevalac 実験(谷畑、杉本他) — RIビーム物理揺籃期

成功: RIビーム物理分野の形成@RIPS — RIビーム物理第2世代

RIビーム物理分野の拡張@RIBF — RIビーム物理第3世代

RIB計画の展望 PF-RIB方式 対 ISOL-RIB方式

- PF-RIB方式: 入射核破砕反応からの飛行破砕片(PF)をビームとして利用

短所: ビーム・エネルギーの広がり~数10MeV

vs. 通常実験のエネルギー分解能~数10keV-数100 keV

事前評価: 低評価

特殊実験にはOK、一般には無理

「通常実験にはNO」⇔「PF-RIBはビームと呼ぶな!」

- ISOL-RIB方式: 静止標的中にRIを生成し、取り出し、イオン化を経て再加速

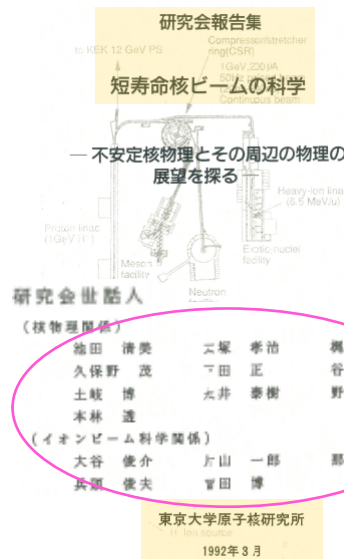
長所: 通常ビームに準ずるビーム・エネルギーの広がり~数10 keV

事前評価: 好評価、RIB生成の王道

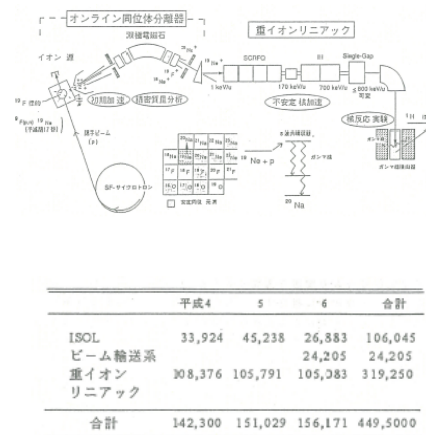
日本: 大型ハドロン計画「Eアーナ」の立ち上げ(1986)

世界: TRIUMF(カナダ)、Louvain la neuf(ベルギー)など

大型ハドロン・Eアレーナ計画 (1986ー)



核研での短寿命核ビーム計画 (1992ー)



RIPS (PF-RI方式) 成功の秘訣

PF方式RIBの長所

- ・ 簡便
- ・ 元素、寿命に依らない
- ・ 中高エネルギー
Lorentz boost
厚い標的

PR方式RIBの欠陥

- ・ エネルギーの広がり
～数10MeV

ISOL 方式RIBの短所

- ・ 複雑: 生成・抽出・イオン化・加速
- ・ 元素ごとに異なる処方
- ・ 寿命 $T_{1/2} > 1$ 秒
- ・ 低エネルギー (通常)
大立体角検出器が必要
薄い標的

ISOL 方式の長所

- ・ エネルギー分解能、

核分光の要請: 励起状態の E_x の精度良い決定

($\Delta E_x \leq$ 数10keV – 数100keV)

PF方式RIBで克服可能か?

実は、処方は簡単! ⇒ PF-RIBの大繁栄!

直ちに世界に波及: RIKEN(1989) → MSU(1990), GSI(1991)

三つの処方箋

I. 非束縛状態の分光: 不変質量法

- ・ クーロン分解分光法:
 - ① 核構造研究; ソフトE1励起に依るハロー核分光(中村など)
 - ② 天体核物理; 逆反応による放射捕獲反応の断面積測定(本林など)

II. 束縛励起状態の分光: ガンマ線測定

- ・ RIBインビーム γ 線分光法 (In-beam γ -ray spectroscopy with RIB)
 - 核構造研究; 核構造研究の主戦場; 多様な直接反応の利用
 - 高エネルギークーロン励起(本林、青井など)
 - 陽子非弾性散乱(岩崎など)
 - ノックアウト反応(桜井など)、粒子移行反応(下浦など)

III. 静止原子核の分光: β - γ 分光

- ・ 偏極RIに依る分光法:
 - 核構造研究; 核モーメントの測定(旭、上野など)
- ・ β -崩壊後続分光法:
 - 天体核物理; 寿命、質量の決定(桜井、西村など)

不変質量法による二つの実験 -1-

① クーロン分解によるソフトE1励起の研究: 中性子放出

ハロー核研究の切り札 (~ 100 mb)

ハロー核の特性 ("di-neutron" の形成)
新ハロー核の探査

動機: 小林俊雄さんのベバラック実験 \rightarrow "ソフトE1 巨大共鳴"

T. Kobayashi, I. Tanihata, K. Sugimoto et al., Phys. Lett. 232B, 51 (1989)

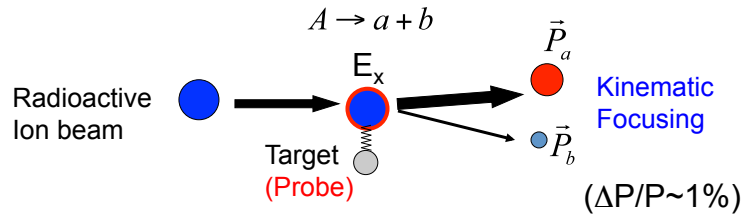
主人公: 中村隆司さん(初期の指導者: 下浦亨さん(東大理助手))

資金: 最初で最後の科研費 \rightarrow 中性子測定用プラスチック・ホドスコープ
中性子超過剰核; RIB研究のホットコーナー
 \rightarrow 中性子分光が決め手

最初の論文

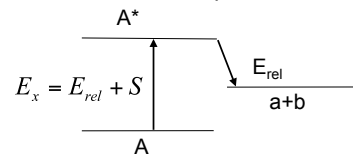
T. Nakamura, S. Shimoura, M. Ishihara et al., Phys. Lett., 331B, 296 (1994)

Invariant Mass Method for RI beam



$$M = \sqrt{(E_a + E_b)^2 - (\vec{P}_a + \vec{P}_b)^2}$$

$$E_{\text{rel}} = M - (M_a + M_b)$$



Advantages

Good Energy Resolution $\sim 0.2 \text{ MeV}(1\sigma) @ E_{\text{rel}} = 1 \text{ MeV}$

$$\Delta E \sim \sqrt{2 \frac{E}{A} \frac{\mu}{M_N} E_{\text{rel}} \left[\left(\frac{\Delta v_1}{v_1} \right)^2 + \left(\frac{\Delta v_2}{v_2} \right)^2 + (\Delta \theta_{12})^2 \right]}$$

Kinematic Focusing

Thick Target $0.1 \sim 1 \text{ g/cm}^2$

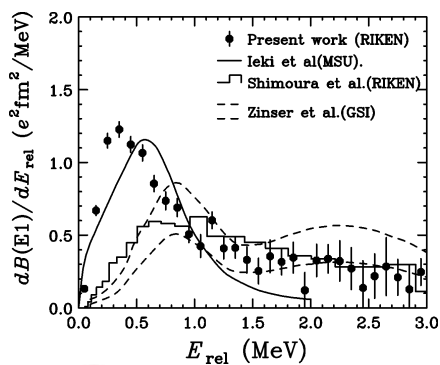
Cost

Need to measure all the outgoing particles

Good approach for nuclei at drip line

Di-neutron Correlation in ^{11}Li

T. Nakamura et al. PRL 96, 252502 (2006).

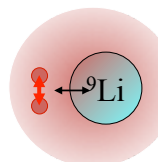
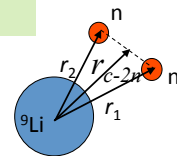


$$B(E1) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dB(E1)}{dE_x} dE_x$$

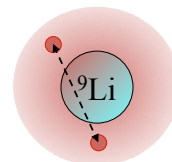
$$= \frac{3}{4\pi} \left(\frac{Ze}{A} \right)^2 \langle r_1^2 + r_2^2 + 2(\vec{r}_1 \cdot \vec{r}_2) \rangle$$

$$B(E1) = 1.42 \pm 0.18 e^2 f^2 m^2 (E_{\text{rel}} \leq 3 \text{ MeV})$$

$$\rightarrow 1.78(22) e^2 f^2 m^2 \rightarrow \langle \theta_{12} \rangle = 48_{-18}^{+14} \text{ deg.}$$

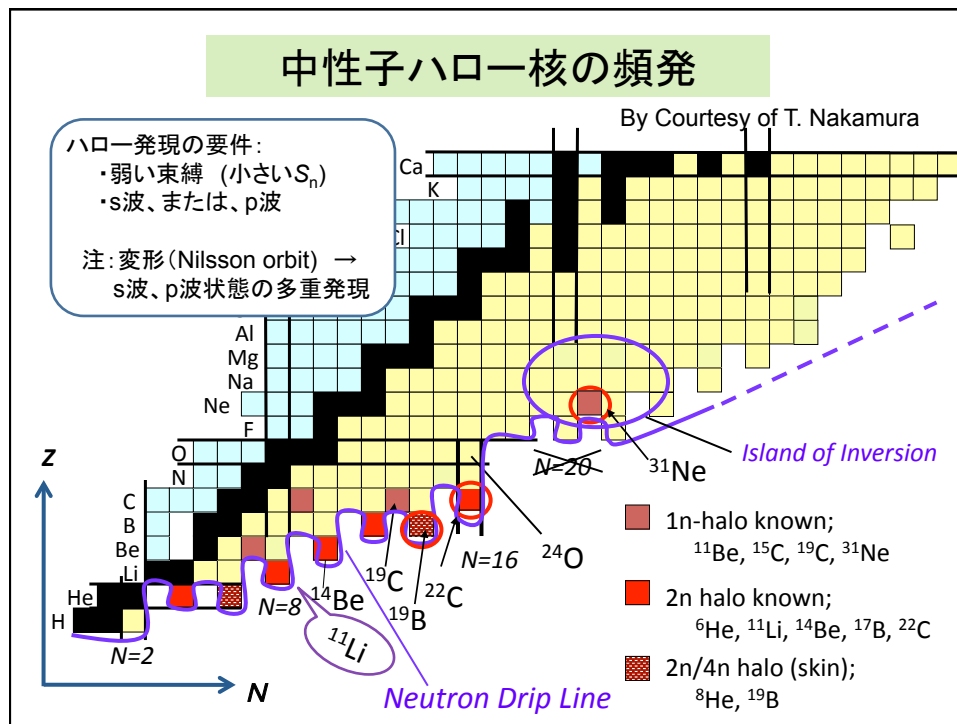


Dineutron Correlation
→ Strongly Polarized
→ Strong E1 Excitation



Weak 2n correlation
→ Weakly Polarized
→ Weak E1 Excitation

Soft E1 Excitation of 2n-halo—+dineutron-like correlation



不変質量法による二つの実験 -2-

② クーロン分解によるE1共鳴状態の励起断面積: 陽子放出 不安定核による天体核反応断面積観測の先駆け!

主な天体核反応 ⇔ 極低エネルギー放射陽子捕獲反応

⇔ クーロン分解は逆反応

G. Baur, C. A. Bertulani, Nucle. Phys. A458, 188 (1986)

高エネルギー逆反応により、極低エネルギー反応の断面積決定

効率が約1000倍(?)上がる! (due to phase factor, thick target etc.)

⇒ $^{13}\text{N} (p, \gamma) ^{14}\text{O}$, $^8\text{B} (p, \gamma) ^7\text{Be}$, など

主人公: 本林透さん (在仏中にASHURAグループからリクルート)

RIKEN-IN2P3 協力協定 (chair; Lonjekoo (ISN) and M. Ishihara (RIKEN))

ゲルノーブル (ISN)・グループの参画; S. Kox, C. Perrin et al.,

EMRIC-detector ($\angle E$; PSD-Si, E; CsI(Tl))

最初の論文

T. Motobayashi, S. Kox, C. Perrin, M. Ishihara et al., Phys. Lett., 264B, 259 (1991)

世界で最初の
RIB天体核実験

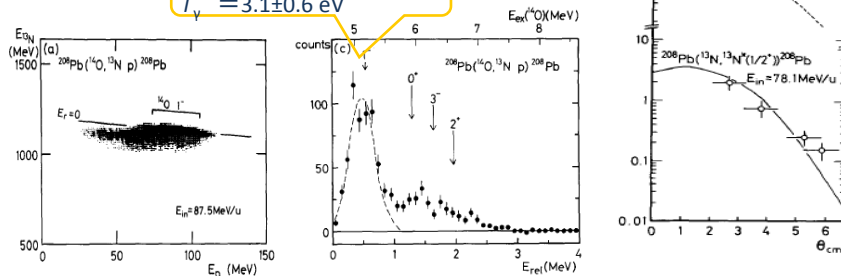
Determination of the astrophysical $^{13}\text{N}(p, \gamma)^{14}\text{O}$ cross section through the Coulomb dissociation method

Coulomb Dissociation: $^{14}\text{O} \rightarrow ^{13}\text{N}+p$
for inverse reaction: $^{13}\text{N}(p, \gamma)^{14}\text{O}$

$E(^{14}\text{O}) = 91.2 \text{ MeV/u}$
 ^9Be target: 1.1 g/cm^2

EMERIC detectors from ISN (Grenoble)
 ΔE ; PSD-Si, E ; CsI(Tl)

$E_{\text{rel}} = 545 \text{ keV } (J^\pi = 1^-)$
 $\Gamma_\gamma = 3.1 \pm 0.6 \text{ eV}$



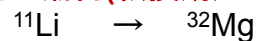
T. Motobayashi, S. Kox, C. Perrin, M. Ishihara et al., Phys. Lett., 264B, 259 (1991)

束縛励起状態特定の為の ガンマ線計測法

RIB によるインビーム γ 線分光の開幕 (1995)

- ・ RIBによる中高エネルギー直接反応からのガンマ線
最初の実験: ^{32}Mg に対する中高エネルギー・クーロン励起

- ・ RIB核物理研究の潮目(転換期)!!



ハロー核 \rightarrow スキン核

非束縛状態の物理 \rightarrow 束縛状態の核構造

初期の研究 \rightarrow 近年の研究

前史: 阪大
中井、平尾等

束縛励起状態の特定: ガンマ線測定

インビーム・ガンマ線分光の発展史

古典 (1963-) : **重イオン融合反応** **高スピン状態**
H. Morinaga et al, Nuclear Physics 46(1963)

補填 (1976 -): **大質量移行反応** **高スピン状態**
T. Inamura, M. Ishihara, T. Fukuda, T. Shimoda, H. Hiruta, Phys.Lett. 68B, 51 (1977)
R. Broda et al., Phys. Rev. Lett. 74 (1995) 868

近年 (1995-): **RIB直接反応** **高アイソスピン原子核**
M. Ishihara, Nucl. Phys., A583 (1995) 747
T. Motobayashi, Phys.Lett. B346 (1995) 9

◎ハイパー核インビーム・ガンマ線分光
 田村裕和さんなど

いずれも日本人研究者が先導！ 目出度し！！

Classical In-beam Γ -ray Spectroscopy

H. Morinaga et al, Nuclear Physics 46(1963)21.

GAMMA RAYS FOLLOWING (α, xn) REACTIONS
 H. MORINAGA¹ and P.C. GUGELOT
Instituut voor Kernfysisch Onderzoek, Amsterdam, Netherlands
 Received 14 January 1963

1962年に進学

large angular momentum deposited:
to be dissipated by γ -cascade
through yrast states

$^{160}\text{Gd}(\alpha, 4n)^{160}\text{Dy}$
 Gd^{160}
 $E_{\alpha} = 52 \text{ MeV}$

With a single NaI(Tl) crystal

Typical reactions

Typical beam

Typical states populated

Typical objects

Heavy ion fusion reactions

Heavy ions at 5-10 MeV/u

High-spin states up to $\hbar l_{\text{max}} = R\sqrt{2\mu(E_{\text{in}} - V_{\text{coul.}})}$

Rapidly rotating nuclei

中高エネルギー直接反応による RIB インビーム・ガンマ線分光 (1995~)

メリット:

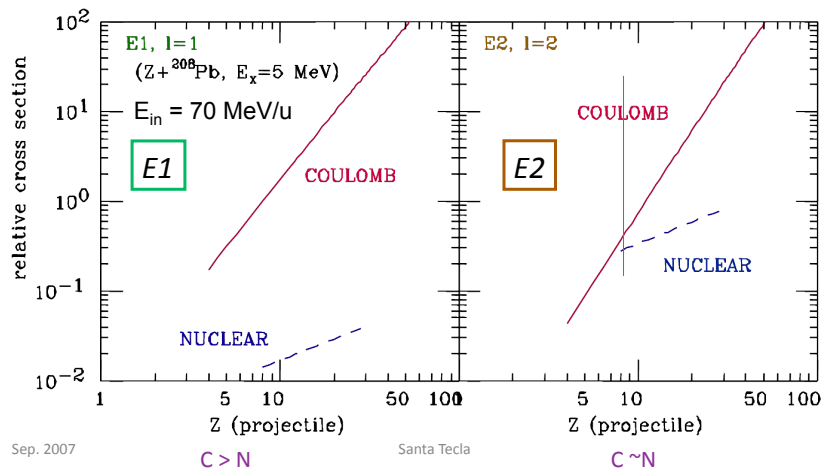
- **かなり大きな断面積** good efficiency allowing wide accessibility
- **鋭利で固有な選択則** preference to particular Collective modes
 preference to particular single particle states
 dependence on multipolarity
- **整備された反応理論** cross section (σ) \Leftrightarrow transition probability
 特に、Coulex, (p, p') No need of measurement of angular distributions

- 1) 中高エネルギークーロン励起; **collective states**; **well established theory**; ~ 100 mb
 T. Motobayashi et al., Phys. Lett. B346 (1995) 9
 MSU: *H. Scheit et al., PRL 77 (1996) 3967*
- 2) 陽子非弾性散乱 (p, p'); **collective states**; **known global potential**; **a few 10 mb**
 H. Iwasaki et al., Phys. Lett. B481 (2000) 7 (on ^{12}Be)
- 3) 1核子ノックアウト反応(リコイル運動量分布の同時測定); **g.s. s.p. config.**; **some 10 mb**
 A. Navin et al. Phys. Rev. Lett. 81(1998) 5089
- 4) 2核子ノックアウト反応; **hole states**; **a few mb**
 K. Yoneda et al., Phys. Lett. B 499 (2001)
- 5) 核子ストリッピング反応; **particle states**; **a few mb**
 S. Michimasa, S. Shimoura et al., Phys. Lett. B638, 146 (2006)

コロンブスの卵

古い言い伝え:「クーロン励起はクーロン障壁エネルギーの8掛け以下でやれ！」
 旭さん:「ビームエネルギーを下げる \Rightarrow ビーム強度、ターゲット厚が減る」

$\sigma_{\text{coul}} \propto Z_t^2 \cdot Z_p^2$ with $Z_t = 82$ for Pb \Rightarrow 中高エネルギークーロン励起法

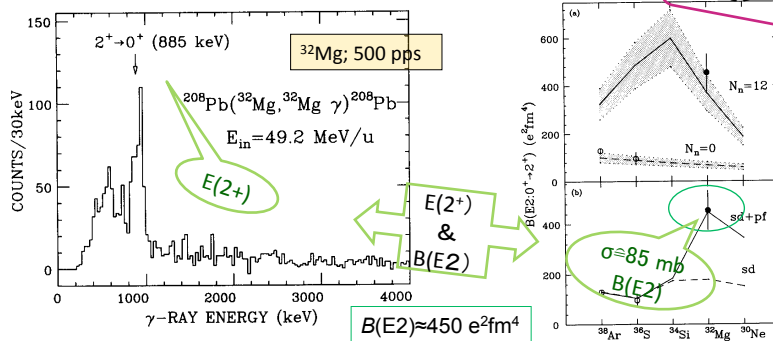


Advent of In-Beam γ -ray Spectroscopy on High-Isospin nuclei (1995)

Intermediate-Energy Coulex on ^{32}Mg ($N=20$) with RIPS

T. Motobayashi et al, Phys.Lett. B346 (1995)9

Magicity Quenching
研究ブームの発端



Intermediate-energy beam

- a variety of direct reactions with reasonable σ (e.g., 85 mb)
- thick target accepted (e.g., 350 mg/cm² Pb)

Inverse kinematics

Lorentz boost for forward focusing

Gamma-ray spectroscopy

Tolerable with poor optical properties of RI beam

Typical objects

Extremely neutron-rich nuclei toward the drip-line

古典的魔法数の消滅(シェル・ギャップの減少)

中性子超過剰核の特性:
旧来の殻の境目→大きな変形が発生

シェルギャップ消滅の原因

- LS force の減衰効果
Dobaczewski et al., PRL72 (1994) D4) 981
- 弱束縛トンネル効果?
I. Hamamoto, PRC 69(2004) 041306(R)
- テンソル力効果?
T. Otsuka et al., PRL 95(2005) 232502

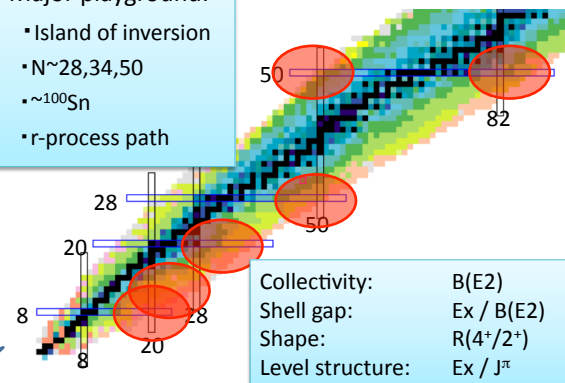
古典的魔法数の消滅

$N = 8, 20, 28, 40, 50, \dots$

Intensive studies
Ongoing widely

Major playground:

- Island of inversion
- $N \sim 28, 34, 50$
- $\sim 100\text{Sn}$
- r-process path



Coulex vs. (p, p') ; useful reactions for collective states

- Gamma-ray counting rate; **very high !**

Rate for the 2^+ excitation in ^{32}Mg

Reaction	Rate [Hz]	σ [mb]	I_{beam} [pps]	Target [mg/cm ²]	A_{tgt}	E_γ [%]
Coulex	0.09	275	800	350	208	~ 30
(p, p')	0.95	45	800	150	1	~ 30

Even the beam intensity of 1 particle/sec will count!!

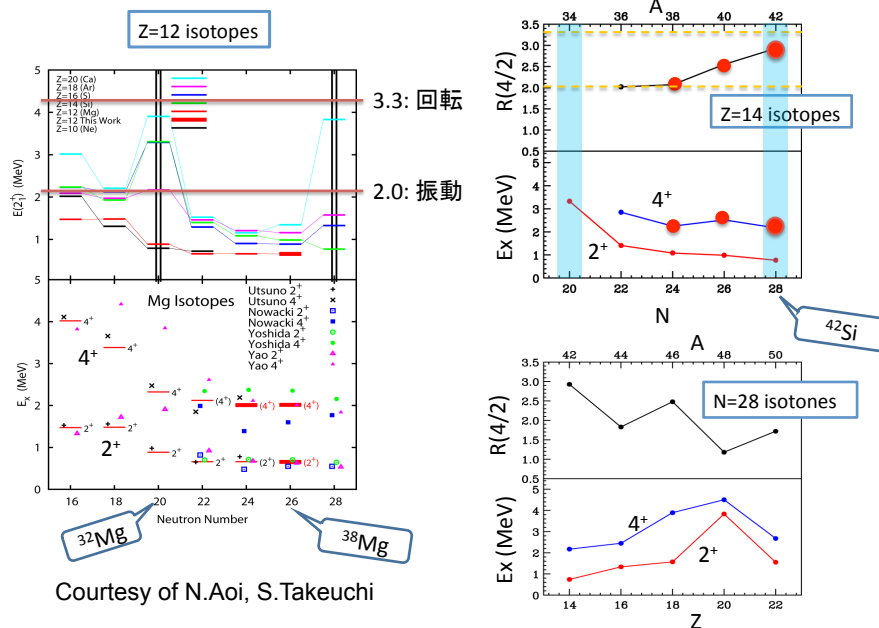
- Observables; **fairly rich \Rightarrow useful information on quadrupole collectivity !!**

Reaction	Observables		
Coulex	$E(2_1^+)$	$B(E2)$	
(p, p')	$E(2_1^+)$	$\delta_{pp'} = \beta R$	$E(4_1^+)/E(2_1^+)$

- $\{B(E2), \delta_{pp'}\} \Leftrightarrow \{M_p, M_n\}$; Separate determination of M_p and M_n
where, $M_{p(n)}(E2)$: E2 matrix element for proton (neutron)
- $E(4_1^+)/E(2_1^+)$: a measure of degree of deformation

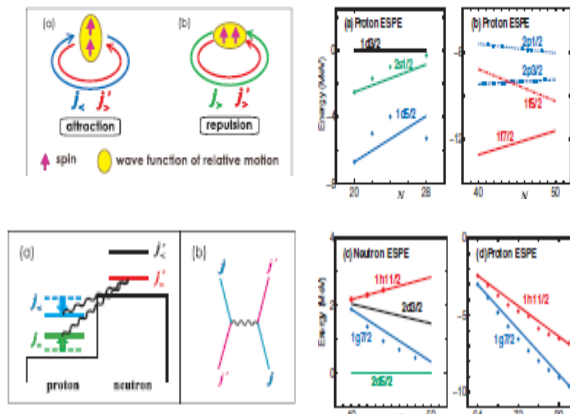
Indispensable to explore shell-evolution across isospin asymmetric isotopes !!

E2 collectivity of extremely neutron-rich nuclei



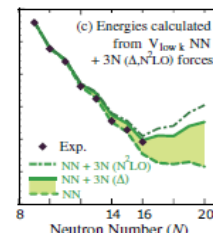
中性子超過剰核における殻構造の変貌 大塚論文

テンソル力効果 (T=0)



T. Otsuka et al., Phys. Rev. Lett., 95, 232502 (2005)

三対力効果



○ 同位体
パウリ・ブロッッキング
斥力的

T. Otsuka et al., Phys. Rev. Lett., 95, 032501 (2010)

RIBF構想の芽生え(1987)

加速器の利用は、加速器から発生する高速粒子線自身を利用してきた時代から、電子加速器におけるシンクロトロン放射線や中性子線など、粒子線を利用する時代へと大きく移行しつつある。重イオン加速器における利用度の高い2次粒子線が不安定同位元素(RI)ビームであることはいうまでもない。高範囲のエネルギーをカバーする良質・大強度の“RIビーム工場”ともいべき施設の実現は、反応させる入射核と標的核およびそれらのエネルギーの組合せを飛躍的に拡大するので

Our Dream: Realization of
World's leading “RI Beam Factory”

ような方向に発展する夢をわれわれは描いている。

[矢野安重, 石原正泰]

Y. Yano, M. Ishihara



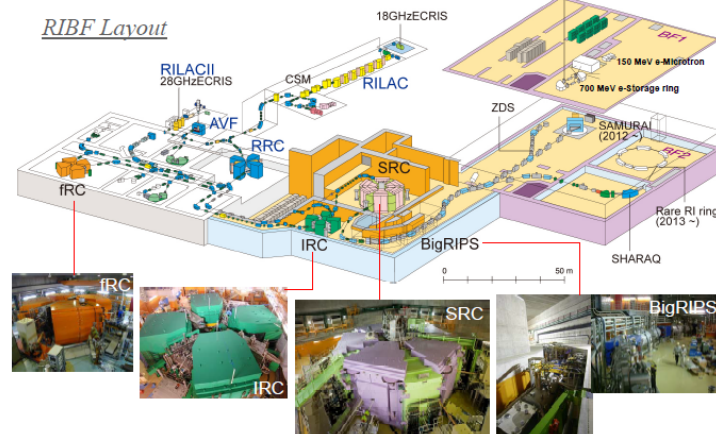
エアレーナ
(1986)

RIBF completed in 2006

2011 Gersh Budker Prize
Dr. Yasushige Yano

SRC: All ions @345 MeV/u
BigRIPS: RI beams via In-flight U Fission or
Projectile Fragmentation

RIBF Layout



BigRIPS

超伝導RIビーム生成装置BigRIPSの概要 (major features)

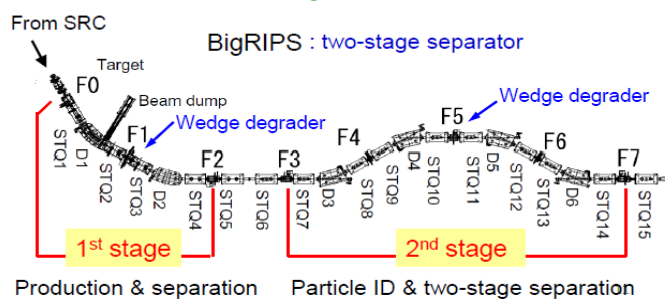
- Large acceptances Comparable with spreads of in-flight fission at RIBF energies: ± 50 mr, ± 5 %
Achieved by the use of large-aperture superconducting quadrupoles (pole-tip $r_0=17$ cm, pole-tip B =2.4-2.5T)
- Two-stage separator scheme
- 2nd stage with high resolution Particle identification (PID) without measuring TKE
→ Charge state identification



Parameters:

$\Delta\theta = \pm 40$ mr
 $\Delta\phi = \pm 50$ mr
 $\Delta p/p = \pm 3$ %
 $B_p = 9$ Tm
 $L = 78.2$ m

STQ1-14:
superconducting
Q triplets
D1-6: R.T.
dipoles (30 deg)
F1-F7: focuses



Production rates of very neutron-rich exotic nuclei

with 230pnA ^{48}Ca beam as of Jun.2010

BigRIPS (3 rd gen.)		RIPS (2 nd gen.)
^{22}C	10 pps	0.006 pps
^{30}Ne	1100 pps	0.2 pps
^{31}Ne	26 pps	20 particle /4days
^{32}Ne	7 pps	
^{38}Mg	3 pps	
^{41}Al	1 pps	
^{42}Si	48 pps	

Increase by
 10^4 - 10^5 times

量は質を変える！？

第1世代 ⇒ 第2世代: ビーム強度 10^3 - 10^4 倍

質的転換:

新しい実験法の開拓による‘RIB核物理’の形成

第2世代 ⇒ 第3世代: ビーム強度 10^4 - 10^5 倍

質的転換:

?????!!!!!! **何が生まれるか楽し**

み！

杉本先生の年賀状(-2007)



有難うございました。