

3人の凄い先生



森永晴彦先生： 大学院修士時代(1962-1964)

鋭利、才氣煥発、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)

茫洋、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、江戸宏泰、...
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一ホップ

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一ステップ

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一ジャンプ

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)
- バ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
- ニューマトロン構想 (1973–); 杉本、阪井、平尾、中井など
一挙に未開の地平 (1GeV 領域の重イオン物理) ⇔ 世界一

強く志願
して入所

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・ボーレ、Ge ボーレBoon 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！？

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

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

巨大軌道角運動量の行方

Lefort diagram:

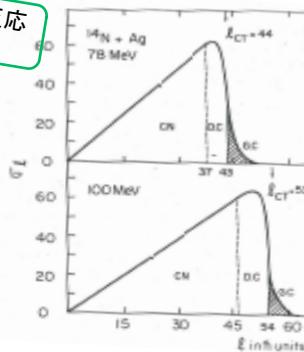
どこまで融合反応に有効か？

最表面部: 疑似弾性散乱
スキン部 ($l \geq l_{crit.}$): 深部非弾性散乱
中心部 ($l \leq l_{crit.}$): 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
⇒ 「線多重重度 (γ -ray multiplicity)測定により決定



「線多重重度測定による複合核の軌道角運動量分布の決定

「線多重重度 (M):

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

${}^{150}\text{Nd} + {}^{16}\text{O}, 77 \text{ MeV}$
16% Ge(Li) + 4x(2'φx2')NaI(Tl)

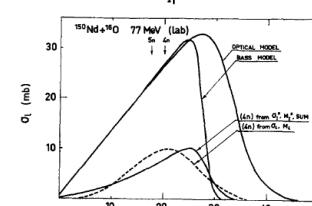
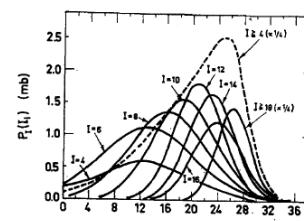
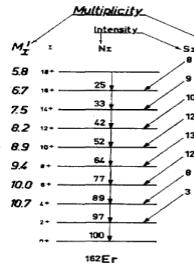
$$N_e/N_s = 1 - (1 - \Omega_2)^{\langle M_I - 1 \rangle} \approx \langle M_I - 1 \rangle \Omega_2.$$

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

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

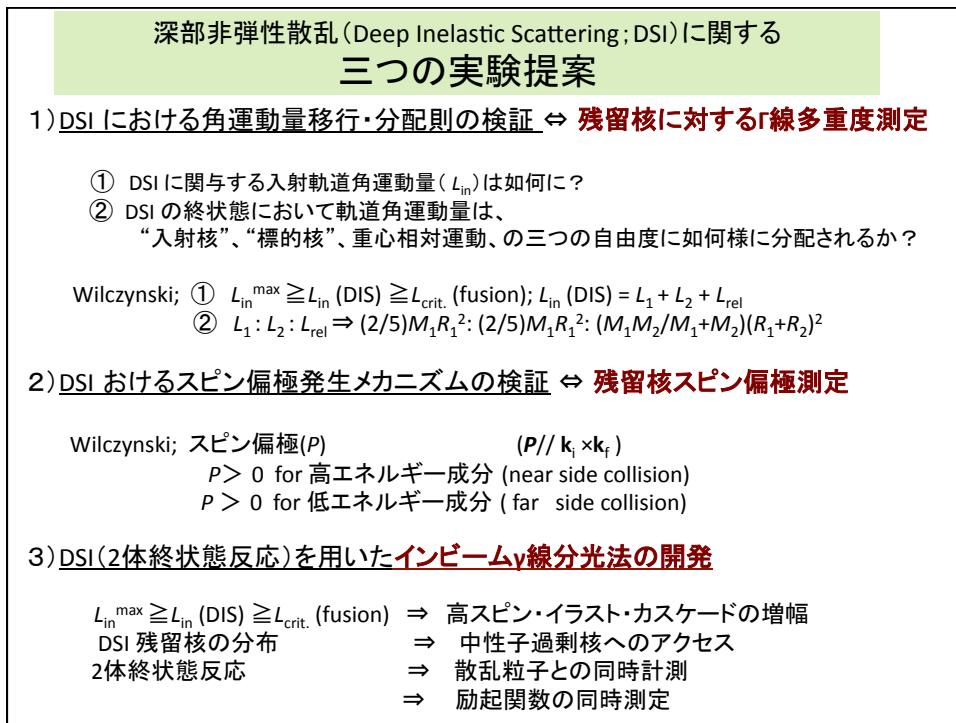
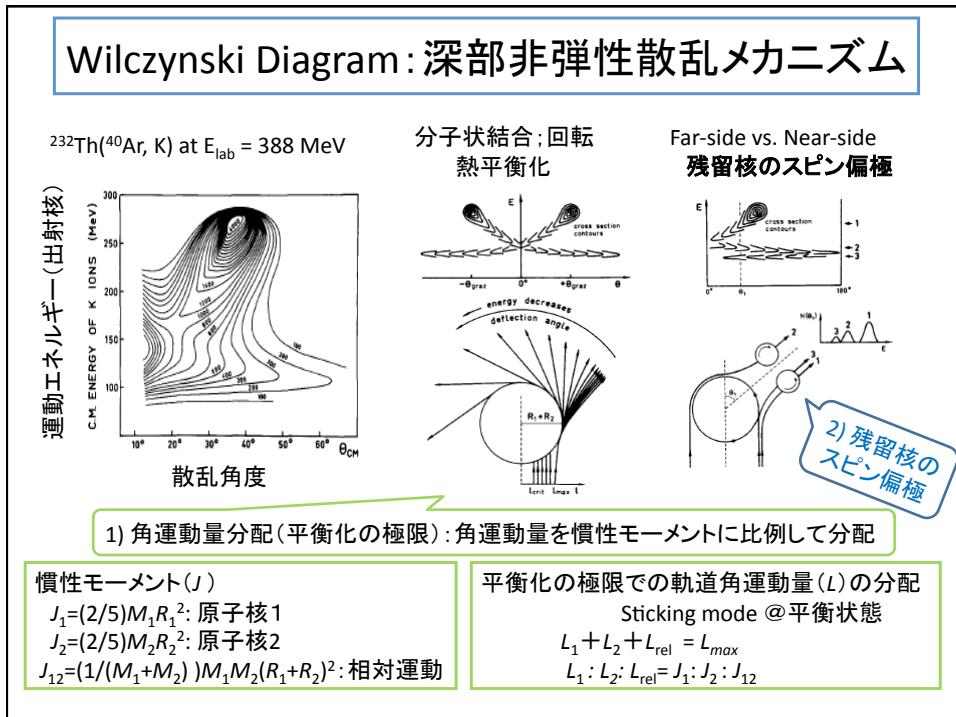
$$\mu_q = \langle (M - \langle M \rangle)^q \rangle,$$

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



・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



実験仲間:サイクロ研入所当時(1975~)

於:理研サイクロトロン研究室(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(ポスドク)一枠 ←上坪さん

第一実験「線多度測定によるDIS研究」の担当

稻村 卓さん:サイクロトロン研究室研究員

サイクロ研の先輩、核研当時の盟友

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

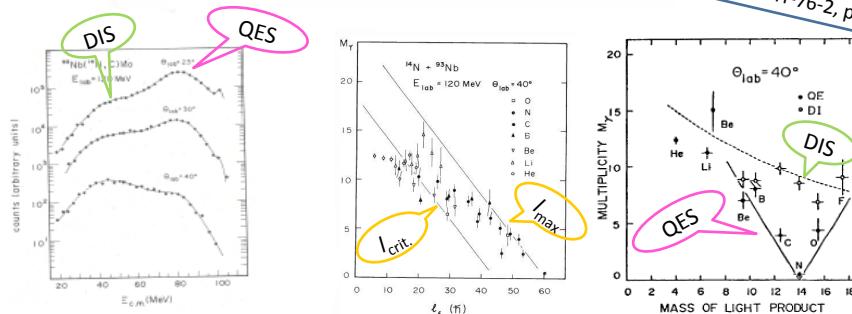
第一実験:深部非弾性散乱における角運動量移行と分配

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, ¹
M. Diamond, R. C. Jared, ¹ I. Y. Lee,
G. Moretto, ¹ O. Newton, ¹ R. Schmitt, and ¹ F. S. Stephens
¹Department 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, ¹S. G. Steadman, ¹F. Videbæk, ¹ and G. Young
¹Laboratory 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 l_{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:

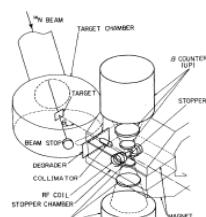
- 1) γ 線円偏光法
散乱粒子との同時計測OK, 偏極分解能劣悪
- 2) β 線非対称法—杉本方式
散乱粒子との同時計測NO, 偏極分解能絶大

At 160cm Cyclotron facility of RIKEN (since 1967)

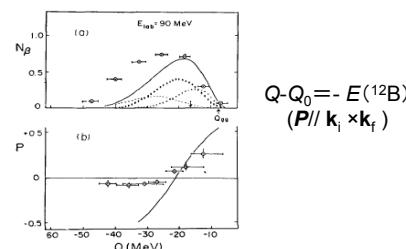
^{100}Mo (^{14}N , ^{12}B) X, $E_{\text{in}} = 90 \text{ MeV}$

^{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

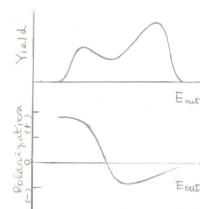
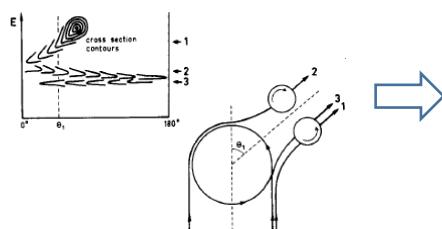


^{12}B のエネルギー分布と
偏極の $E(^{12}\text{B})$ 依存性



スピン偏極の符号は反対だった!?

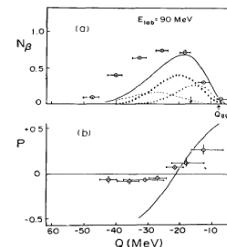
深部非弾性散乱



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

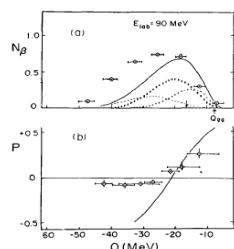
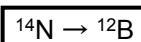
- トルクの向き: 相手核から受ける摩擦力の力積による
力積の向きは進行方向の逆; ‘入射核’も‘標的核’も偏極の向きは同じ
- Near-side \leftrightarrow 高エネルギー成分; Far-side \leftrightarrow 低エネルギー成分

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 !!

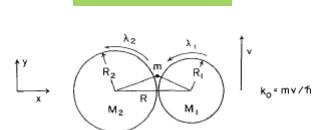


6.5 MeV/u

\longleftrightarrow

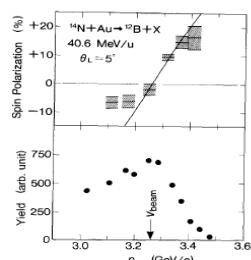
Quasi-elastic scattering

Brink Model



$$\Delta k \equiv k_O - \lambda_1/R_1 - \lambda_2/R_2 \approx 0 \quad \dots (1)$$

$$\Delta L \equiv \lambda_2 - \lambda_1 + \frac{1}{2}k_O(R_1 - R_2) + Q_{\text{eff}}R/\hbar v \approx 0 \quad \dots (2)$$

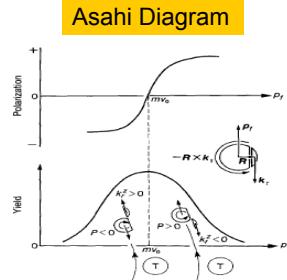


40.6 MeV/u

\longleftrightarrow

Projectile fragmentation

Asahi Diagram



Mechanism for Spin-polarization of Projectile residue --- Asahi Diagram for Projectile fragmentation ---

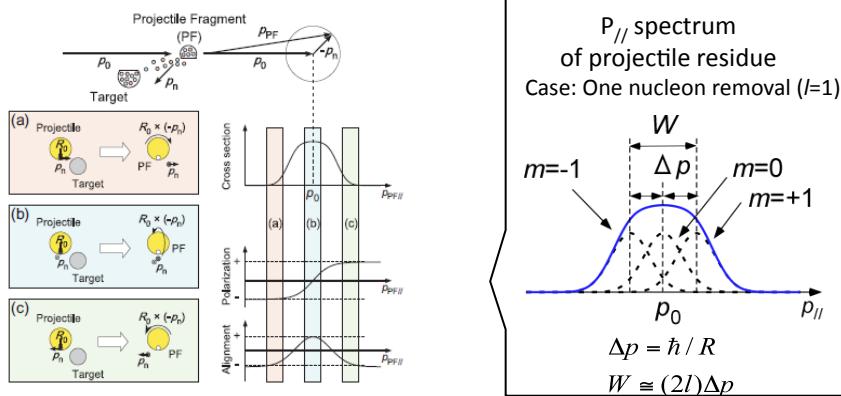
Recoil effect on projectile residue ('PF') :

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

p_n : p_{\parallel} originally carried by the nucleon to be removed :

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

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



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 39, number 3

PHYSICS LETTERS

27 February 1978

SEMICLASSICAL ANALYSIS OF THE SPIN POLARIZATION OF ^{12}B IN THE $^{100}\text{Mo}(^{14}\text{N}, ^{12}\text{B})^{102}\text{Ru}$ 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

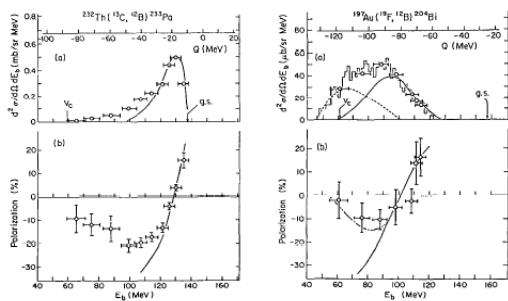
学会発表：リコイル効果による偏極メカニズム
(Brink モデルの援用)

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}Au (^{19}F , ^{12}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:

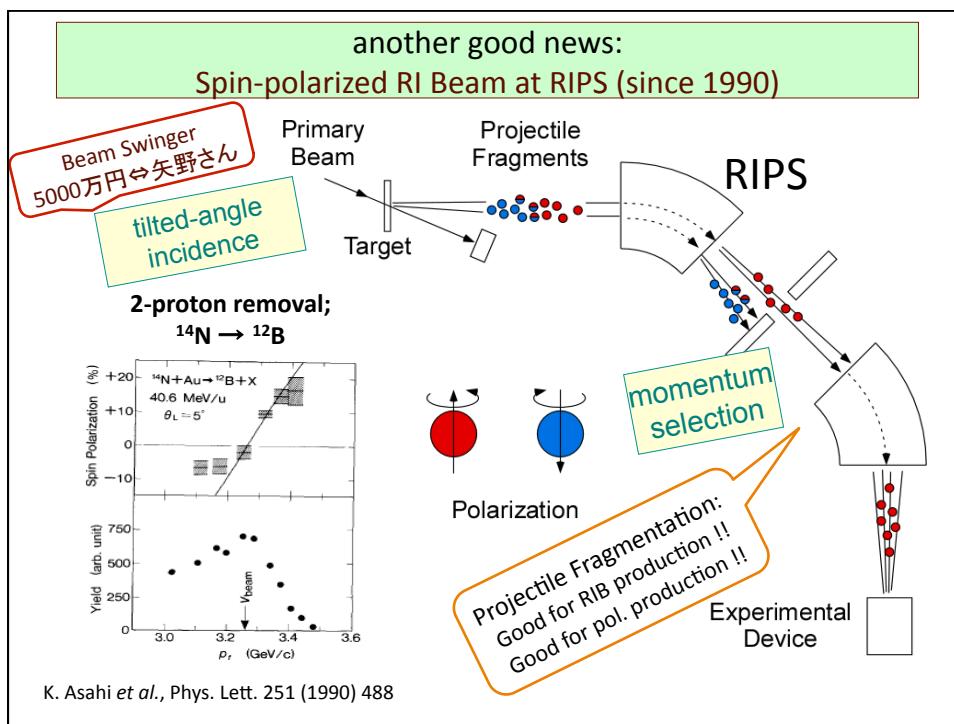
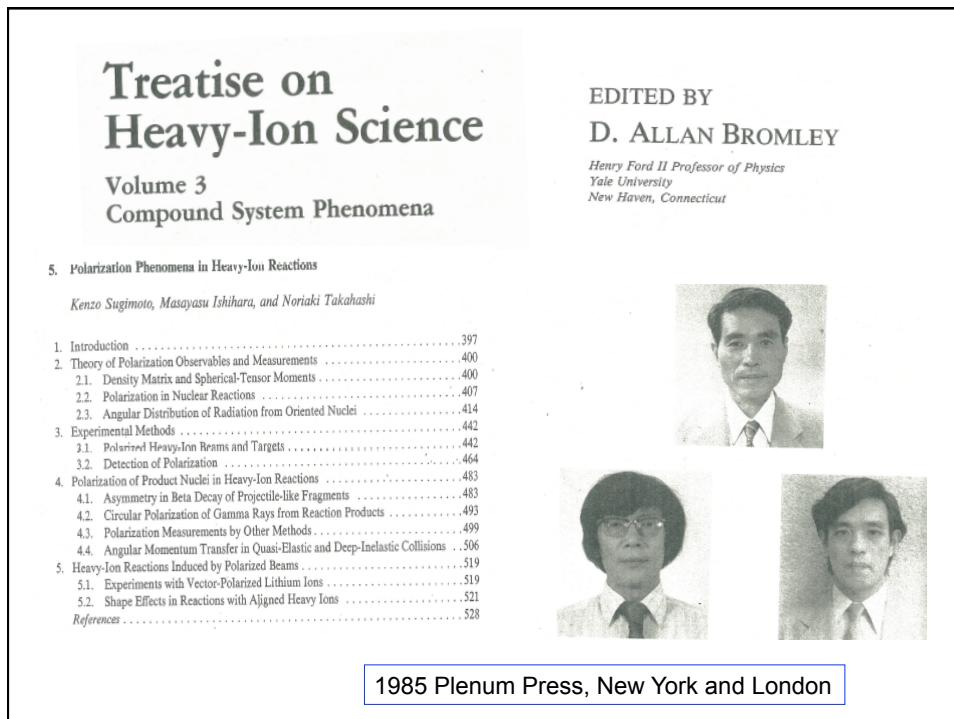
「そろそろ指導者にならんとアカンよ！」

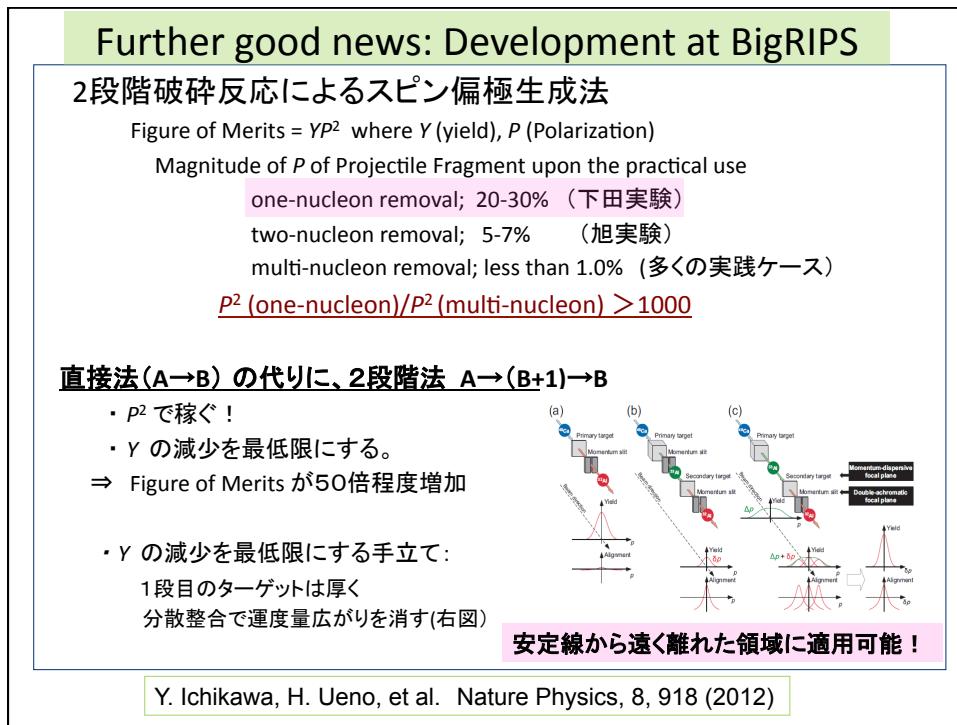
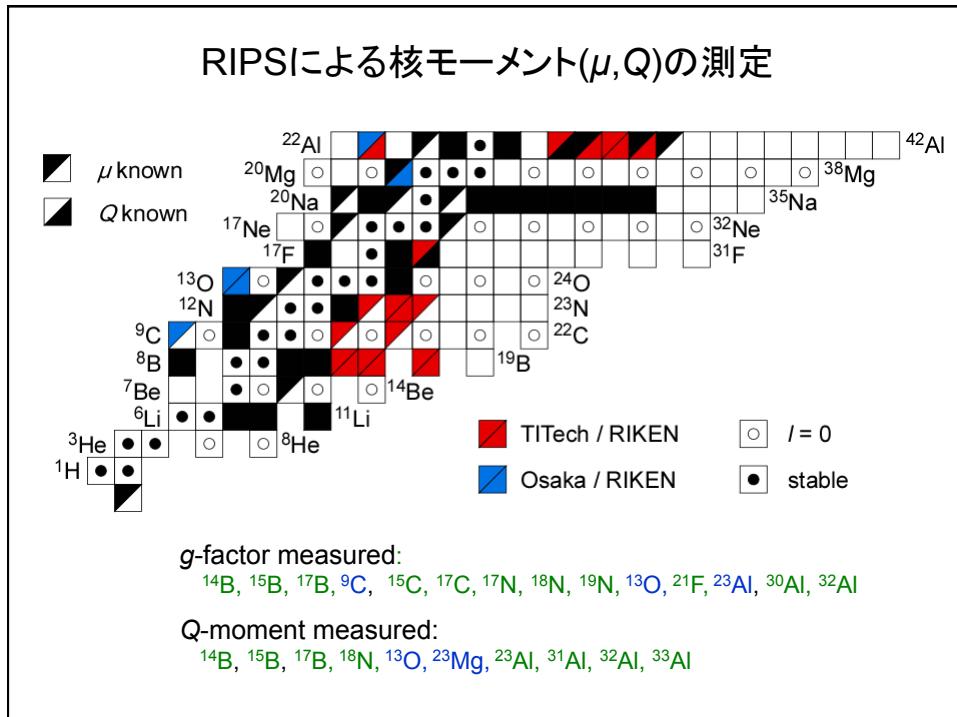
→ 主任研究員 (1984 ~)

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





----- 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

- 理研国際シンポジューム「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. Vandembosh, 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(谷畠さんの命名)
 - ベバラックにおける杉本・谷畠実験の成功が契機
 - 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 \Rightarrow 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 \Rightarrow 第2世代

数b \Rightarrow 数mb - 数10mb

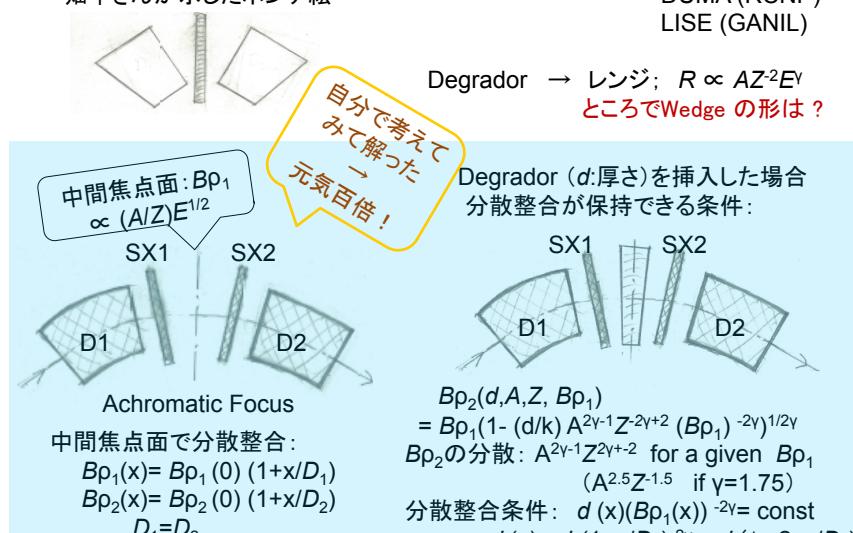
全断面積測定 \Rightarrow 直接反応の観測

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
畠中さんが示したポンチ絵

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



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

二つの幸運

久保敏幸さん：設計・建設担当

徹底した完全主義者

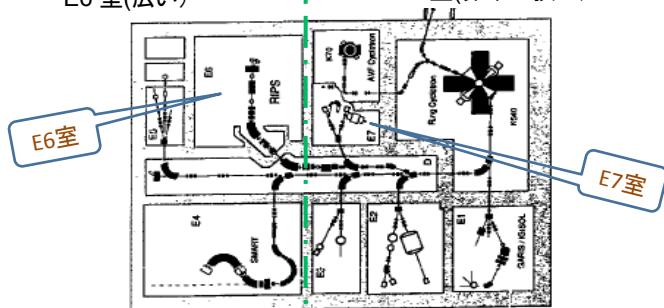
非妥協的に最高性能を求める！

2.5 億円 → 3.5 億円（矢野さんによる救済！）

2期工事(1987-1988) ← 1期工事(1980-1986)

予算が遅れる
E6 室(広い)

当初、先行器に位置づけ
E7室(非常に狭い)

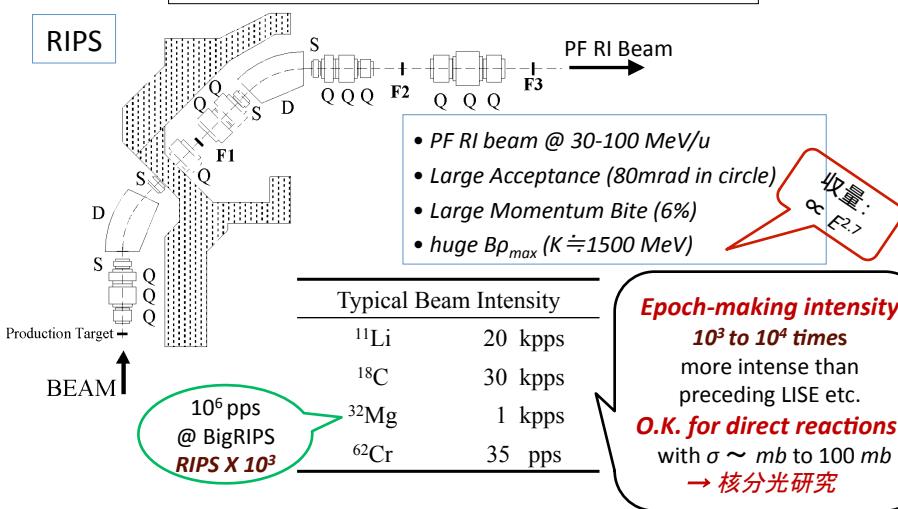


RIPS: 1st facility for 2nd generation RIB

1st -generation RI beam facility(since 1989) RIPS :

Projectile-Fragment (PF) Separator

at RRC: K=540 Cyclotron for Heavy Ion acceleration



RIB施設発展の道程

1) 第1世代施設: 摺籃期(1984-1988)

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

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 @G ANIL(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

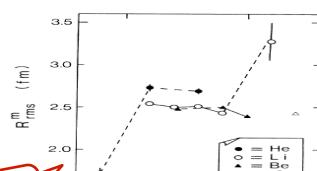
他人のやれない
ことをやる！

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

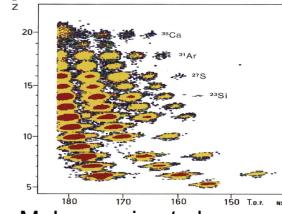


谷畠・
杉本ら

I.Tanihata et al.

PRL55(1985)2676

with LISE @ GANIL



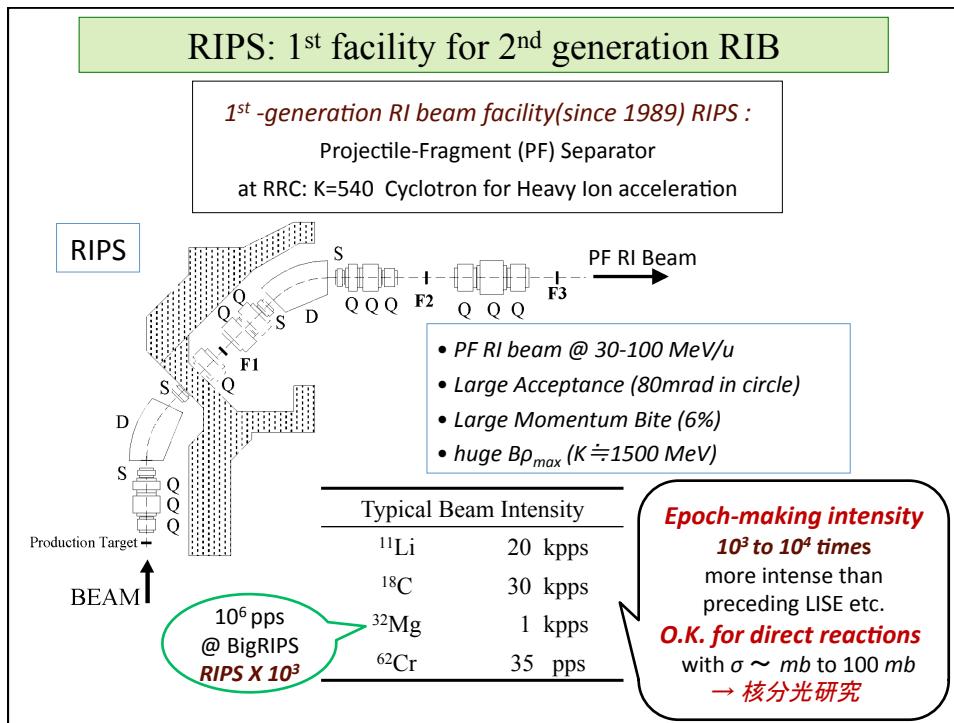
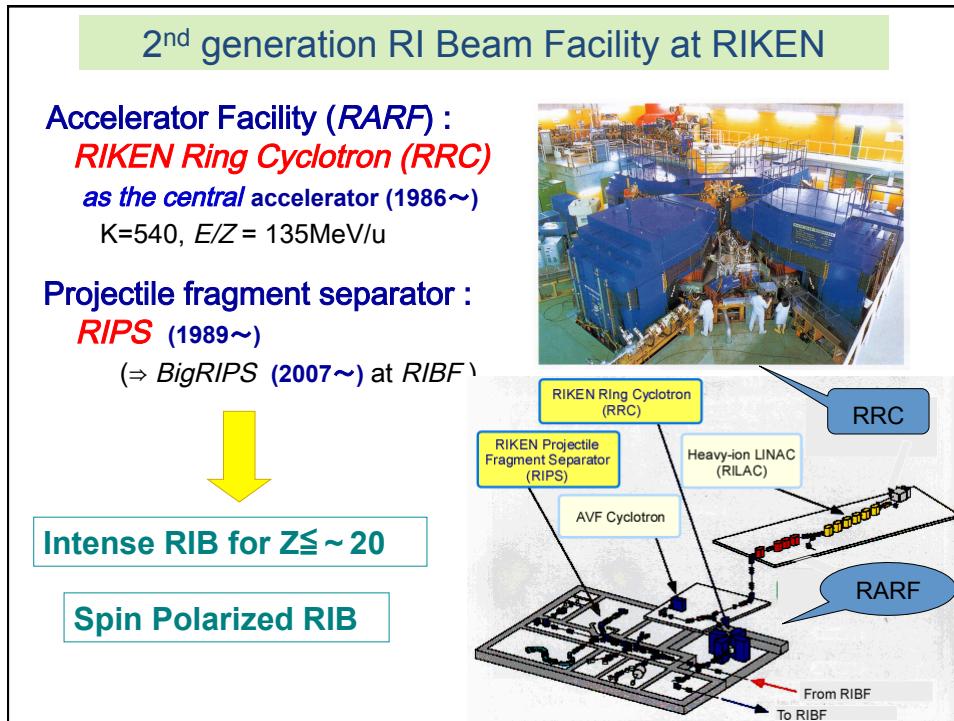
M. Langevin et al.

Phys. Lett. 150B(1985)71

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

Variety of new isotopes synthesized

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



最初の第3世代器 BigRIPS (2007~)

強度、更に
10^{4.5}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 $B=2.4\text{-}2.5$ 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
- $\Delta p/p = \pm 3$ %
- $B_p = 9$ Tm
- $L = 78.2$ m

STQ
Superferric Q triplet

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！ 糸余曲折と意外と幸運

PF方式への偏見
Eアレーナ(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トロン施設 ($\sim 100 \text{ MeV/u}$)

米: MSU($K=500$) 超伝導サイクロトロン施設; 1982年完成
 仏: GANIL($K=400$) 常温サイクロトロン ; 1982年完成
 日: 理研リングサイクロトロン ; 1980年着工(1989年完成; 7年遅れ)
 その他: 南ア、ミラノ(→シシリー)、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トロン加速器施設 ($\sim 1 \text{ GeV/u}$)

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トロン加速器施設

米: BNL-RHIC ; 2001年完成

高温高密度原子核の物性; クオーク・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

- ・ クオ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トロン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、リングサイクロトロン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ロン建設設計画

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：稻村卓、畠中吉治、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)；超重元素探査

全国区

成功：森田浩介ほか、超重元素113の発見(200x)、

SMART；代表者、大沼 甫(東工大)；高分解能荷電粒子分光

全国区

成功：酒井英行ほか、偏極重水素ビーム→3体力の研究

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ビーム物理懐籠期

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：入射核破碎反応からの飛行破片(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アレーナ」の立ち上げ(1986)

世界：TRIUNPF(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—)

研究会報告集

to KEK 12 GeV PS
Compressor/stretcher ring(CSR)
1GeV, 200μs
50Hz
Continuous beam

短寿命核ビームの科学
Controllable beams

— 不安定核物理とその周辺の物理の展望を探る —

Proton beam (1GeV ECR)
Meson facility
Neutron

研究会議話人

(核物理関係)	佐藤 清美	三塙 孝治	鶴野 敏夫
	久保野 茂	下田 正	谷口 勇史
	土岐 博	大井 泰樹	野村 亨
	本林 遼		
(イオンビーム科学関係)	大谷 健介	片山 一郎	郡嶋 三郎
	英須 俊夫	喜田 博	

東京大学原子核研究所

1992年3月

核研での短寿命核ビーム計画 (1992—)

	平成4	5	6	合計
ISOL	33,924	45,238	26,883	106,045
ビーム輸送系			24,205	24,205
重イオン リニアック	308,376	105,791	105,083	319,250
合計	142,300	151,029	156,171	449,5000

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Ex の精度良い決定
($\Delta Ex \leq$ 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: $\beta - \gamma$ 分光

・偏極RII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)

不变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 → "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))

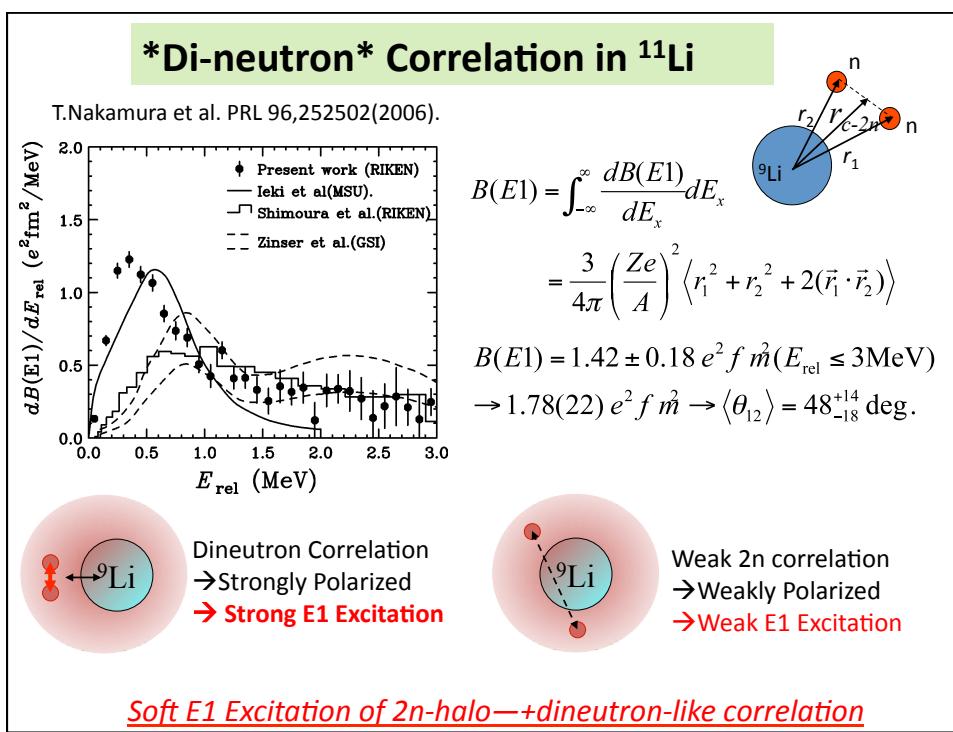
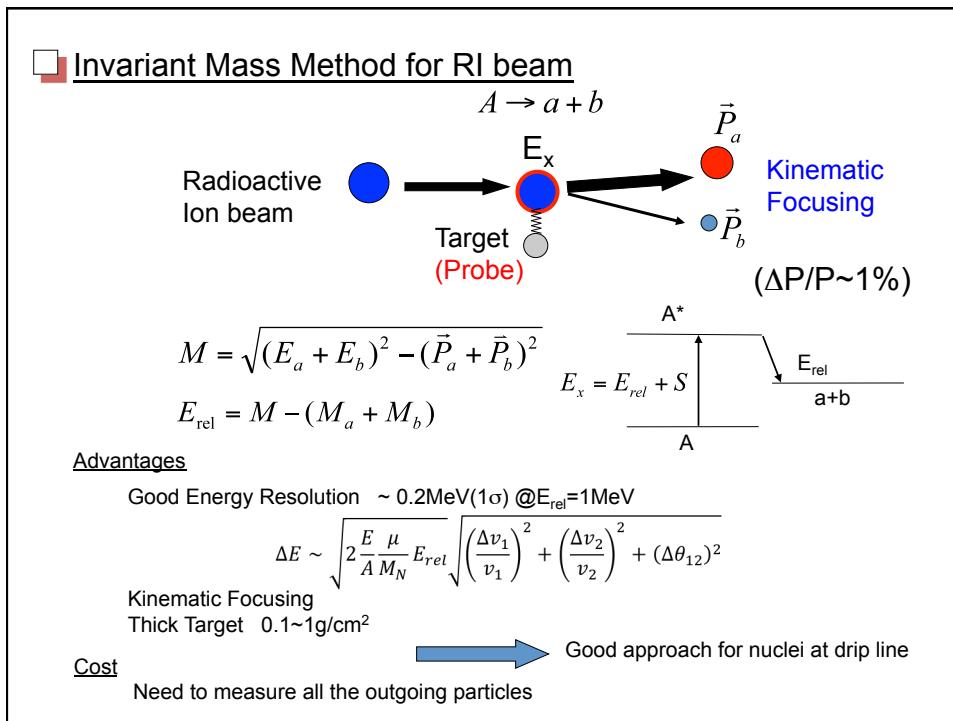
資金: 最初で最後の科研費 → 中性子測定用プラスチック・ホドスコープ

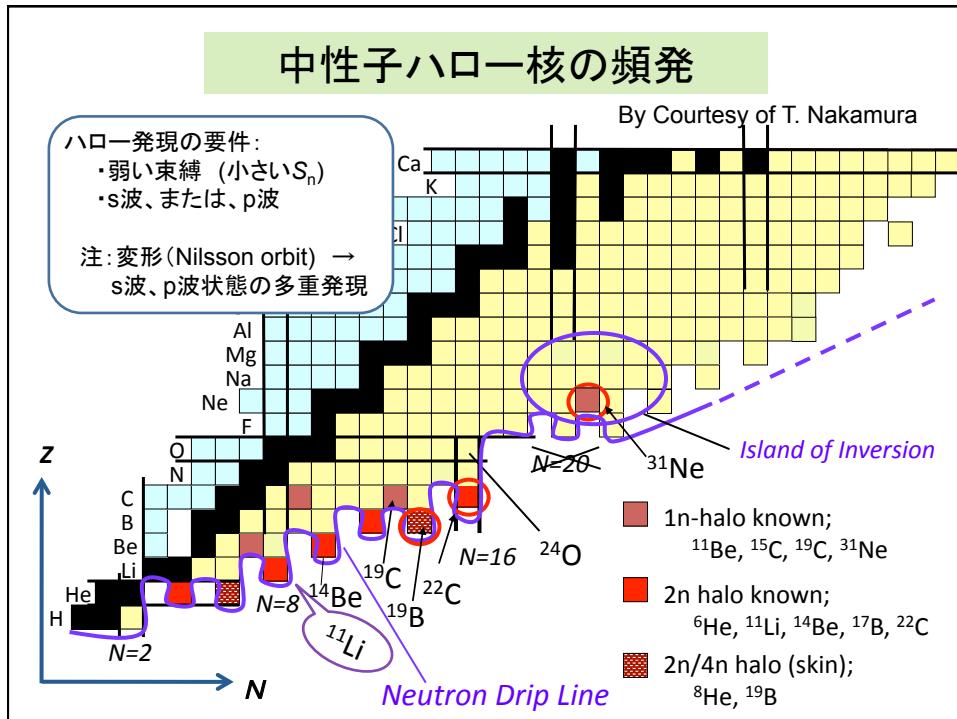
中性子超過剰核; RIB研究のホットコーナー

→ 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)





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 \leftrightarrow 極低エネルギー放射陽子捕獲反応
 \leftrightarrow 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.)

$\Rightarrow ^{13}\text{N} (\rho, \gamma)^{14}\text{O}, ^8\text{B} (\rho, \gamma)^7\text{Be}$, 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))

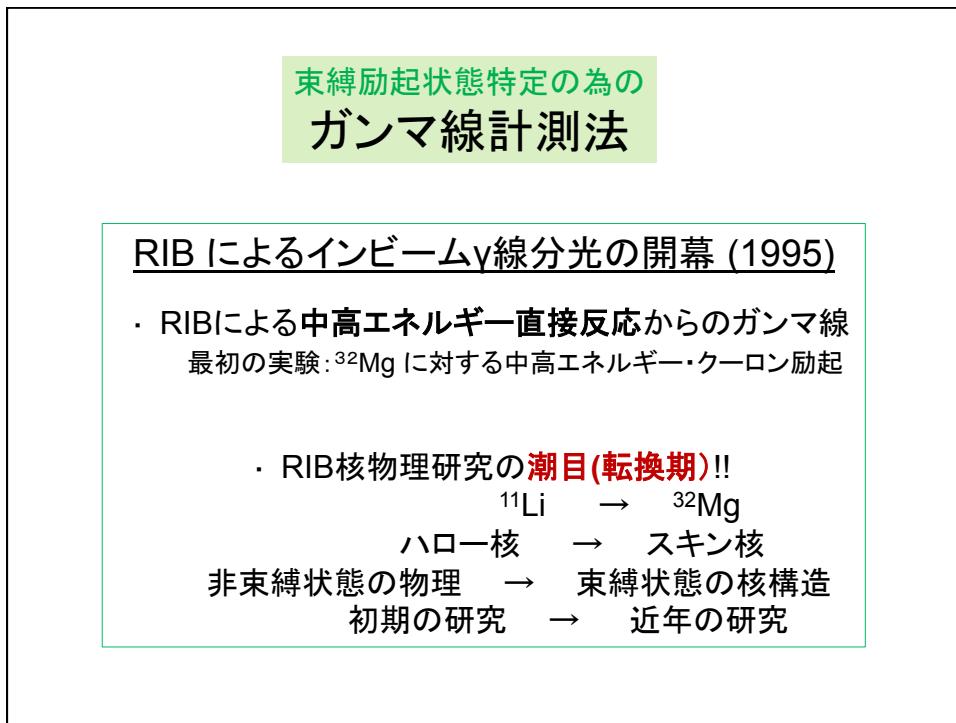
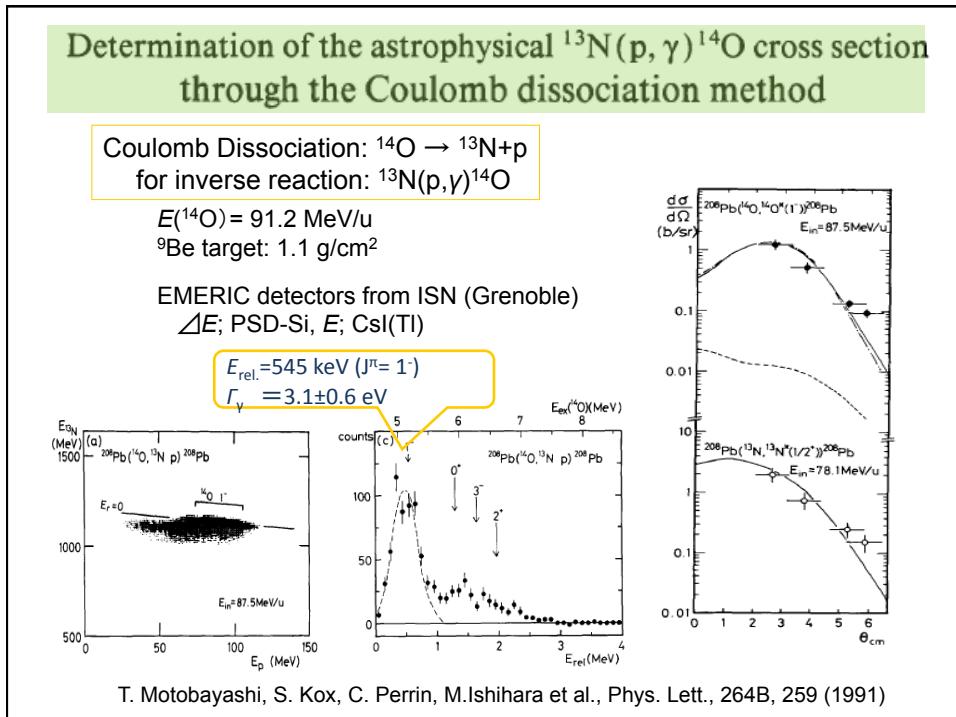
グルノーブル(ISN)・グループの参画; S. Kox, C. Perrin et al.,

EMRIC-detector (ΔE ; 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



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

$^{160}\text{Gd}(\alpha, 4n)^{160}\text{Dy}$

Counts

$E_{\alpha} = 52 \text{ MeV}$

With a single NaI(Tl) crystal

Typical reactions Heavy ion fusion reactions

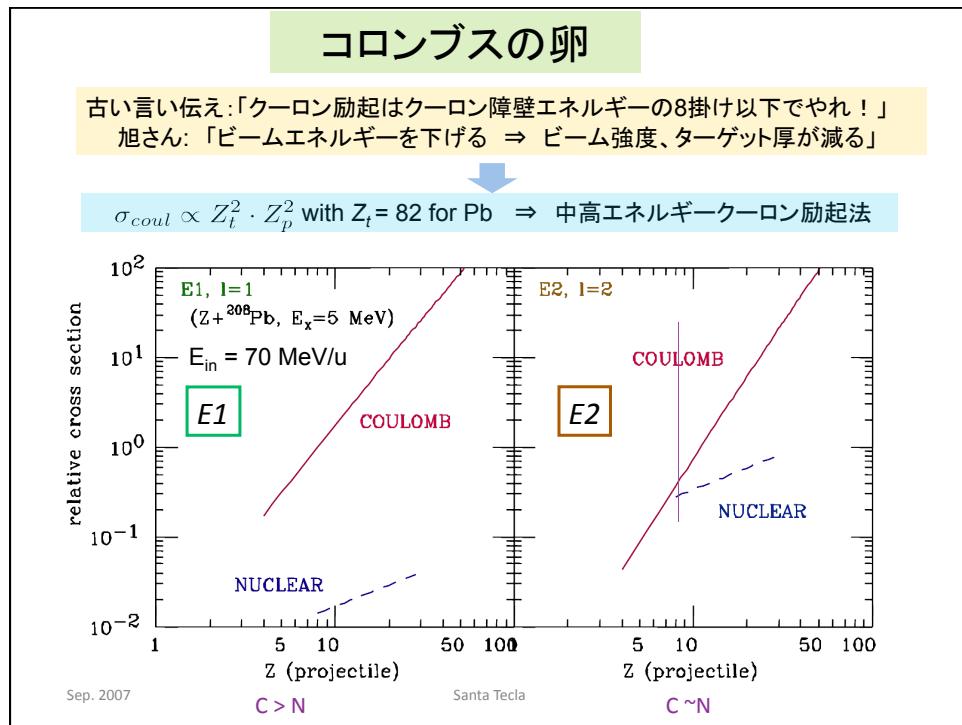
Typical beam Heavy ions at 5-10 MeV/u

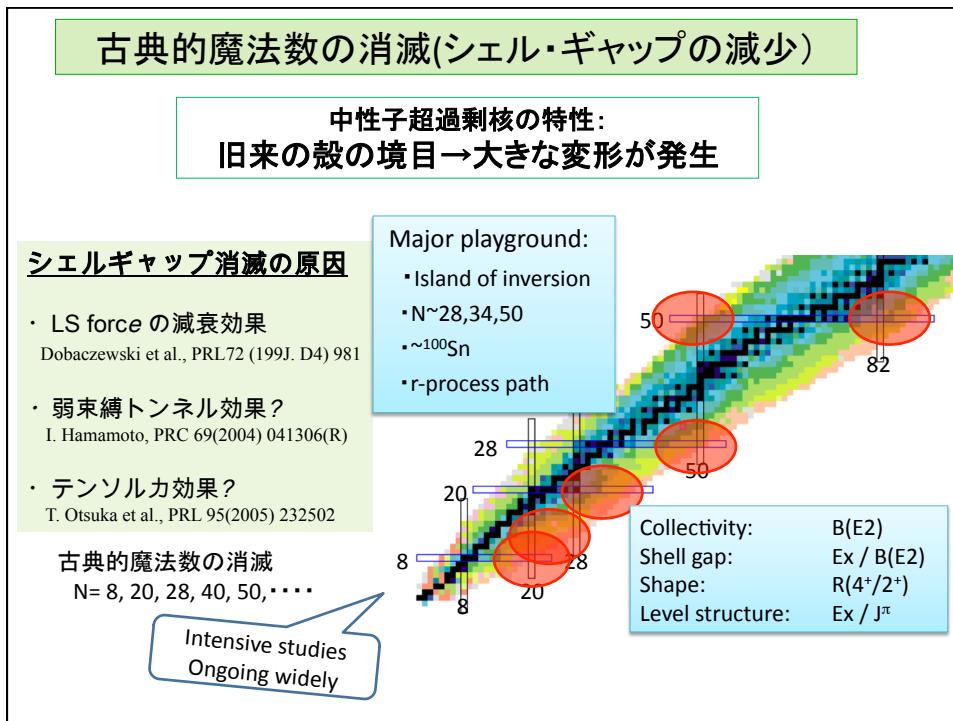
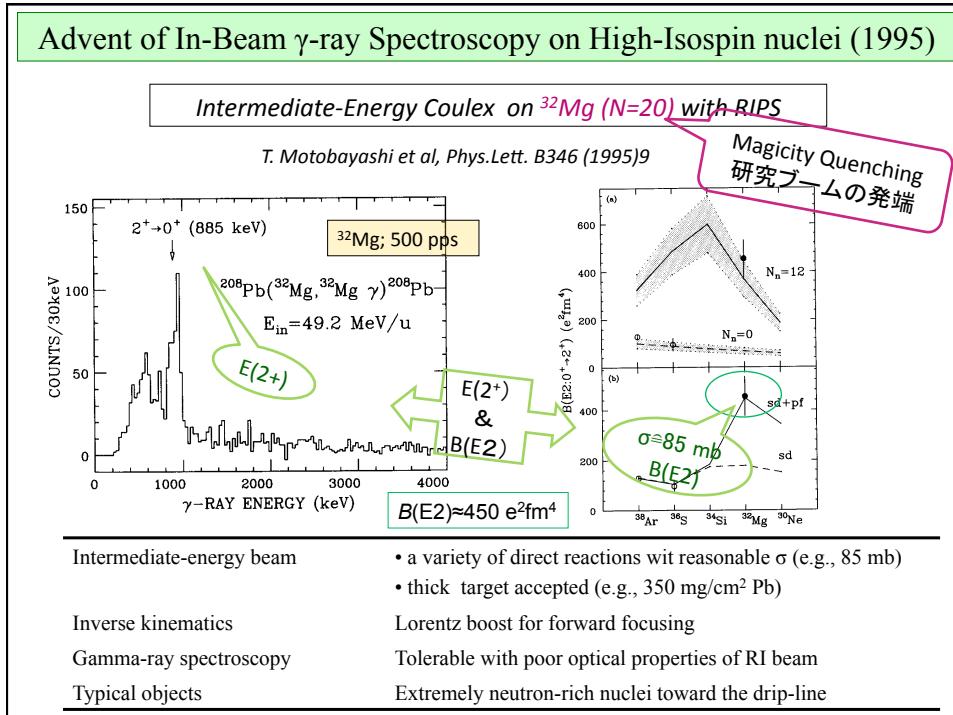
Typical states populated High-spin states up to $\hbar l_{\max} = R \sqrt{2 \mu (E_{in} - V_{coul})}$

Typical objects 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: <ul style="list-style-type: none"> • かなり大きな断面積 • 鋭利で固有な選択則 • 整備された反応理論 特に、Coulex, (p, p') 	good efficiency allowing wide accessibility preference to particular Collective modes preference to particular single particle states dependence on multipolarity cross section (σ) \Leftrightarrow transition probability No need of measurement of angular distributions
<p>1) 中高エネルギークーロン励起; collective states; well established theory; $\sim 100 \text{ mb}$ T. Motobayashi et al., Phys. Lett. B346 (1995) 9 MSU: H. Scheit et al., PRL 77 (1996) 3967</p> <p>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)</p> <p>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</p> <p>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)</p> <p>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)</p>	





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	\sim 30
(p, p')	0.95	45	800	150	1	\sim 30

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

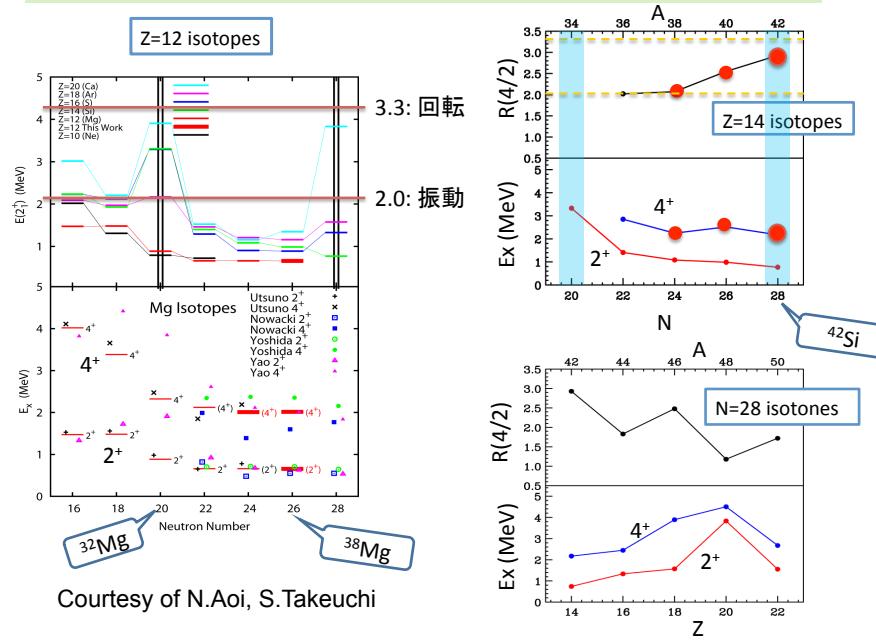
- Observables; fairly rich \Rightarrow useful information on quadrupole collectivity !!

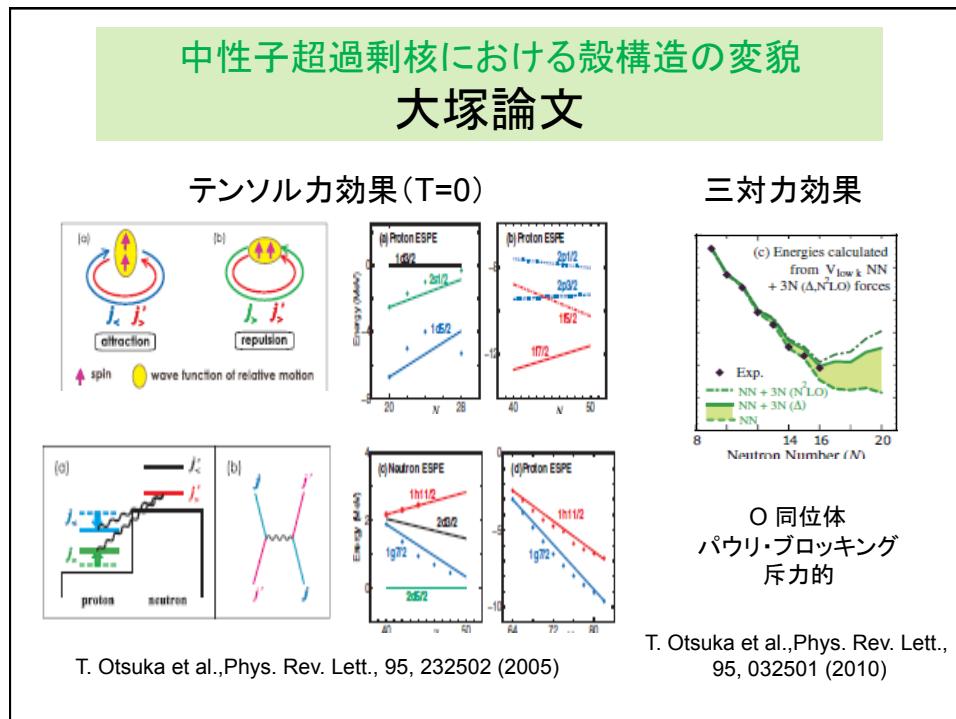
Reaction	Observables		
Coulex	$E(2_1^+)$	$B(E2)$	
(p, p')	$E(2_1^+)$	$\delta_{pp'} = \beta R$	$E(4_1^+) / E(2_1^+)$

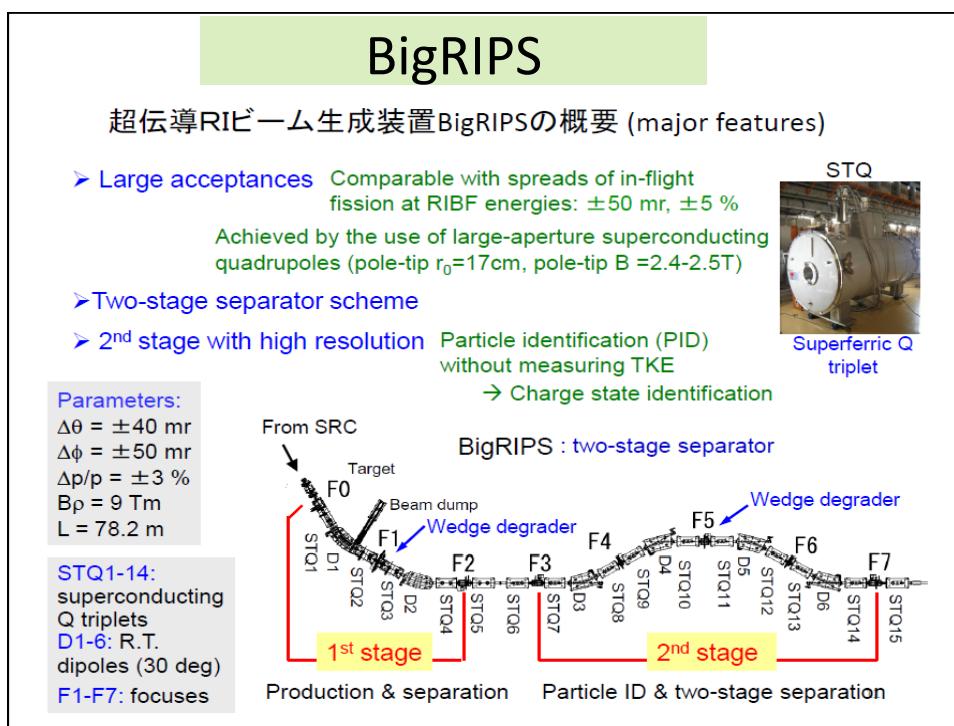
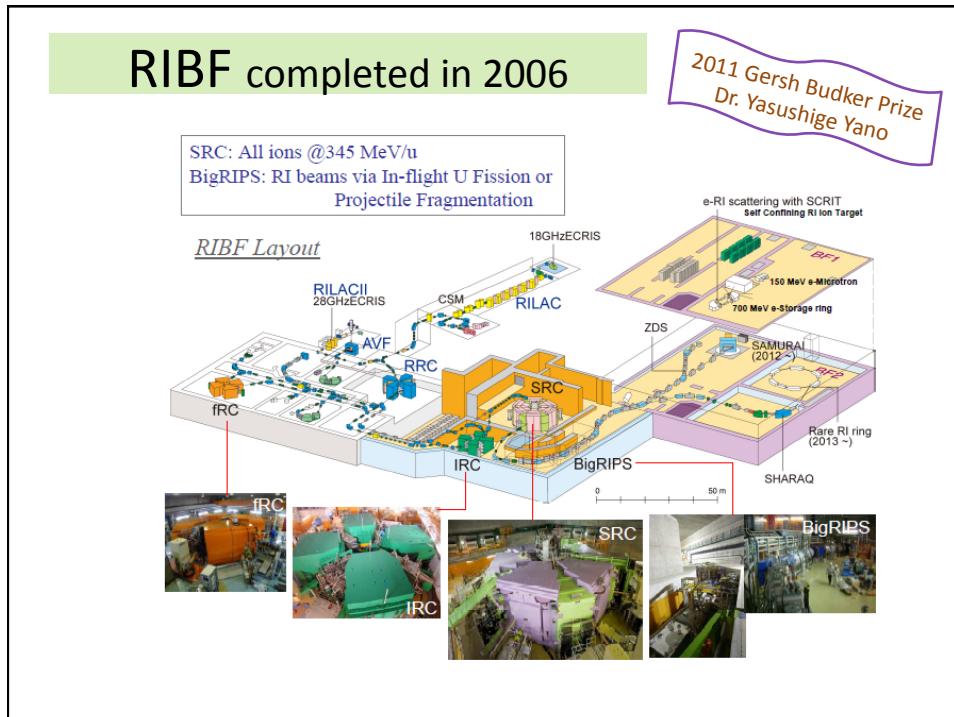
- $\{B(E2), \delta_{pp'}\} \Leftrightarrow \{M_p, M_n\}$; Separate determination of M_p and M_n
where, $M_{p(n)}(E2)$: E2 matrix element for proton (neutron)
 - $E(4_1^+)/E(2_1^+)$: a measure of degree of deformation

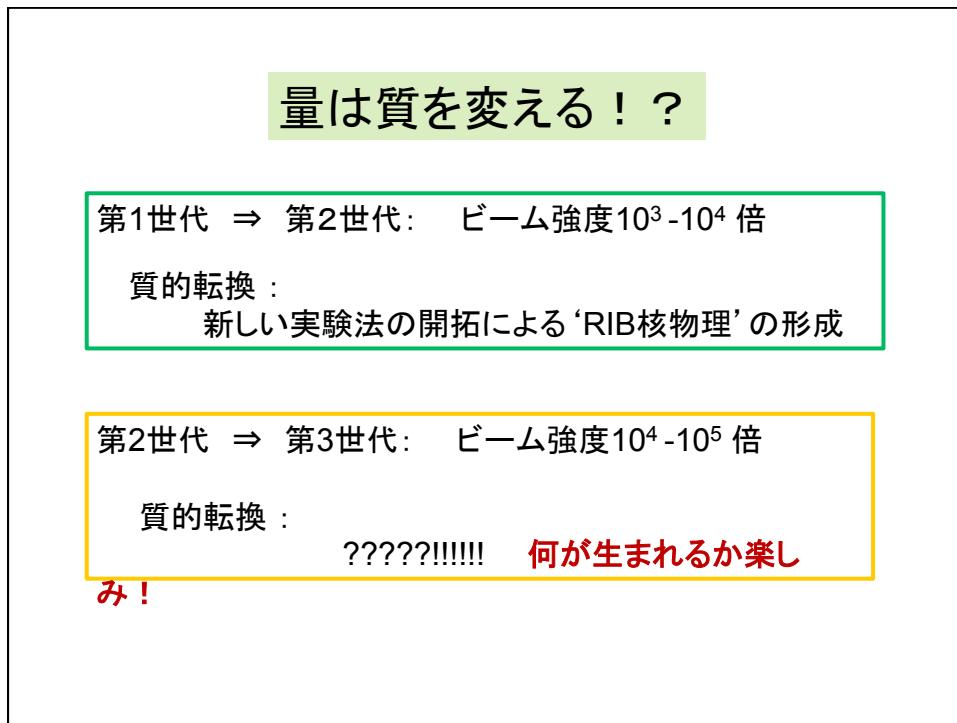
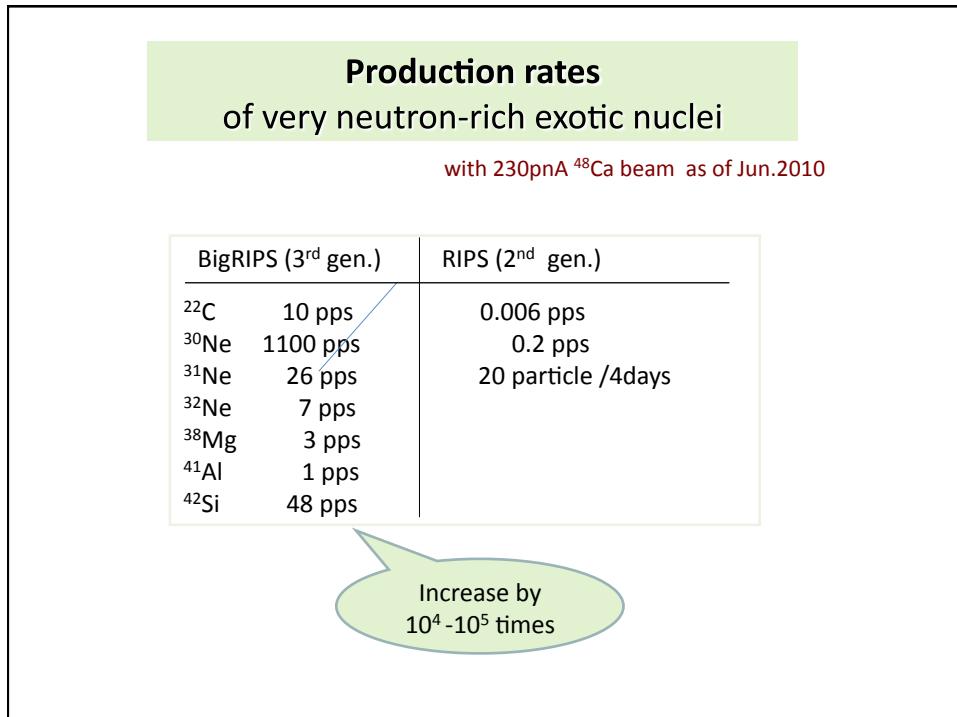
Indispensable to explore shell-evolution across isospin asymmetric isotopes !!

E2 collectivity of extremely neutron-rich nuclei









杉本先生の年賀状(-2007)



有難うございました。