

# 今日に息づく“森永流”原子核研究

櫻井博儀

森永先生との出会い 2001年5月11日

---

東大物理学教室談話会

座長：藤川先生、講師：森永先生

「Exponentially Growing Solar Energy Kombinat」

当日夕方

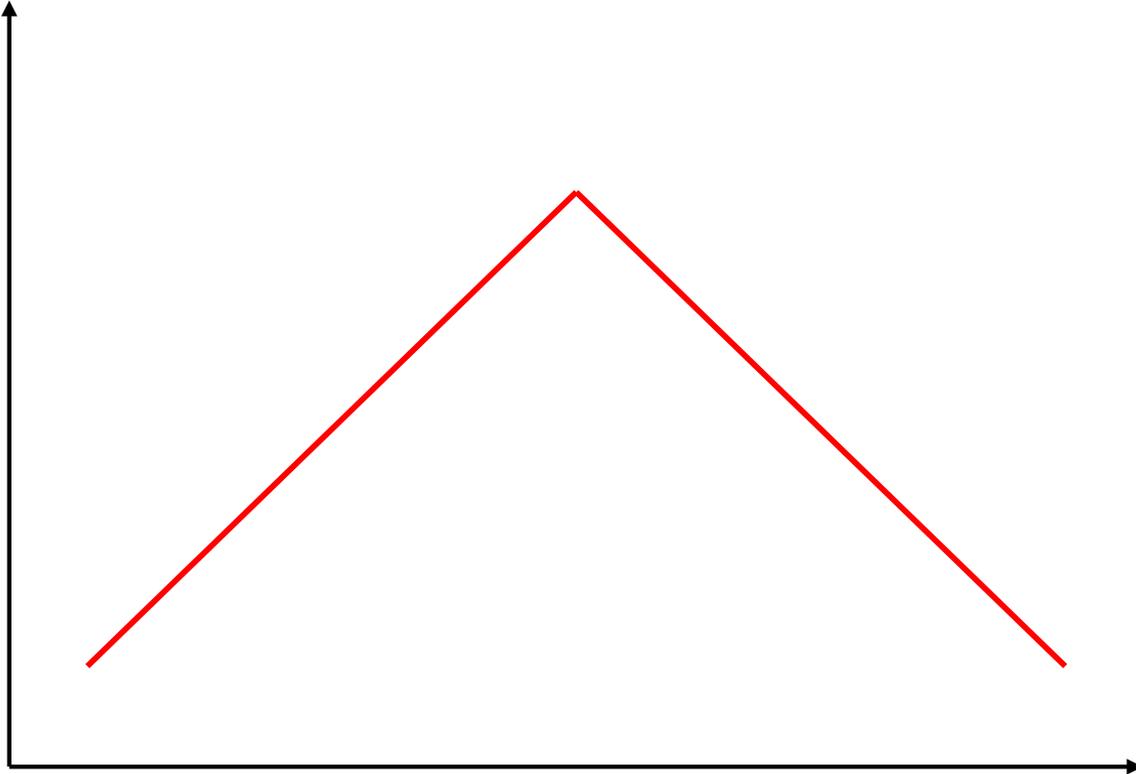
おでん屋「呑喜」での懇親：

森永先生、大塚氏、初田氏、櫻井

2時間程度

# 談話会での印象深いトランスペアレンシー

---



# 「呑喜」で印象に残った話題、いくつか

---

**朝永先生**：海軍研究所で朝永さんからいろいろと教えてもらった。  
このときに得た知識、考え方、特に電磁気学、が非常に生きた。

**ドイツからのオファー**：『ドイツの教授は何やってもよい』と言われてこころ動いた

## **お弟子さんの自慢話**

**できないやつ**：本当にできの悪い人がいる。これはどうしようもない。  
あきらめて、世話するしかない。

**研究費**：研究費が必要なこともあれば、工夫で安く済むこともある。  
東大にいたときに大きな予算をもらった。100円で新たな分光方法を考えた。

**r-processと魔法数34**：（大塚さんが当時発表した新魔法数34の話と  
関連したr-processに関する議論）

**RIBF**：大砲があってよいね～。これからいろいろなことができてよい。

新同位体の生成と発見  
半減期の測定

インビームガンマ分光

E1応答

クラスター

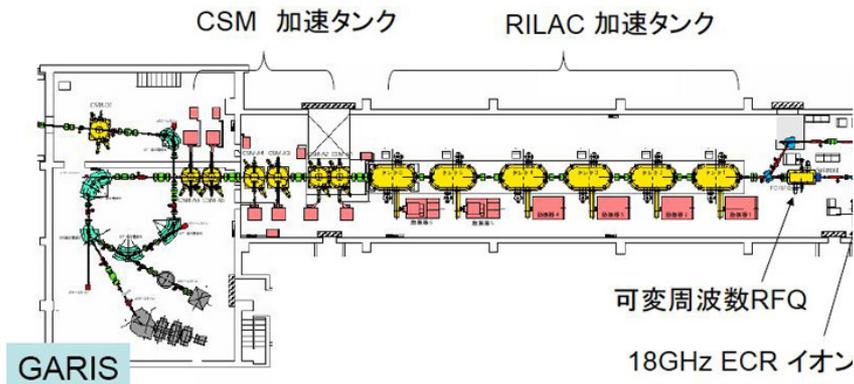
低エネルギー反応

# 超重元素研究

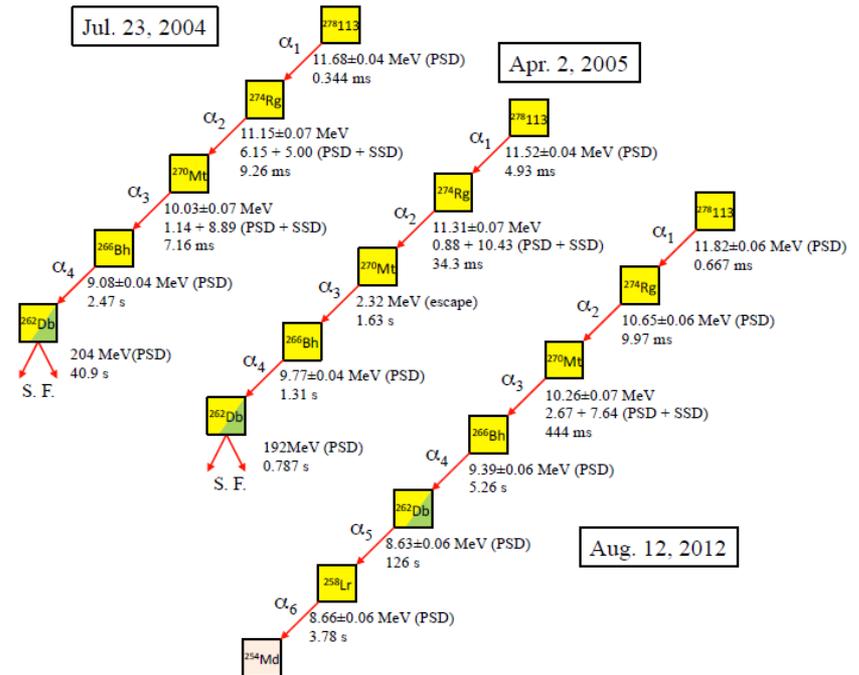
## 113番元素ニホニウム



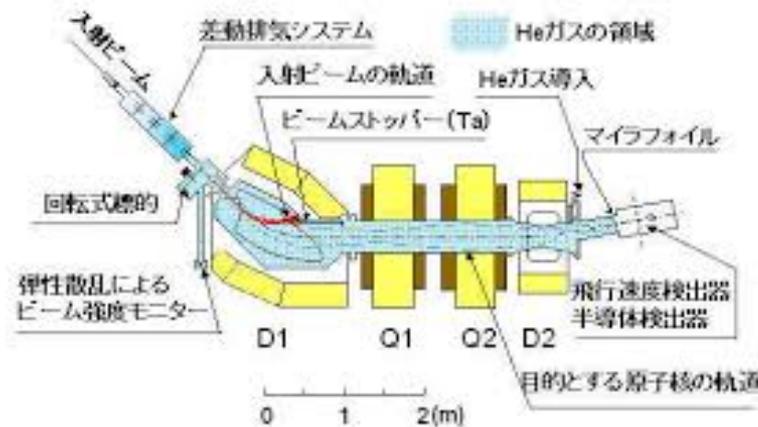
森永 → 野村  
→ 森田



線形加速器RILAC



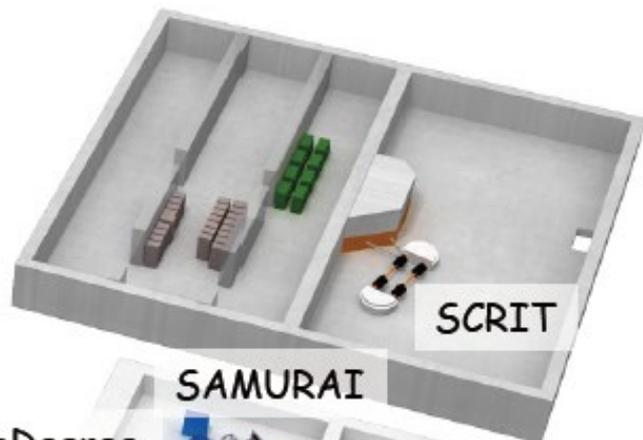
2019年度 RILAC高度化  
GARIS-2, GARIS-3を利用した  
119、120番元素の生成



# RIビームファクトリー



超重元素



ZeroDegree

SAMURAI

Rare RI Ring

RILAC2

AVF

RIPS

CRIB (CNS)

RRC

SRC

SLOWRI

SHARAQ

fRC

KISS

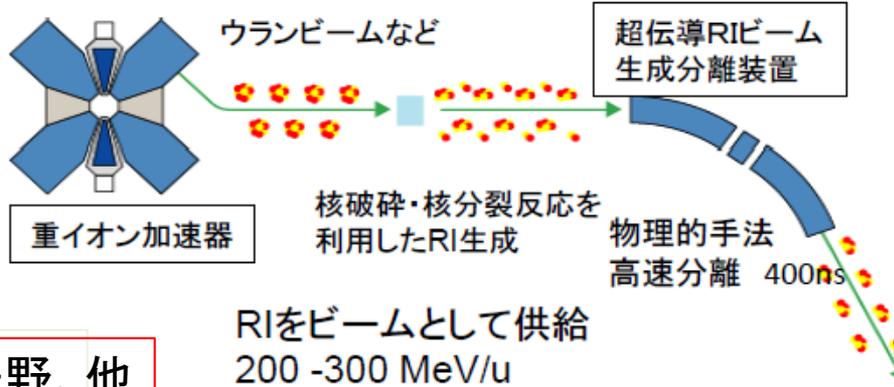
KEK

IRC

BigRIPS

不安定核ビーム

# 大砲：強力な不安定核ビーム



世界初、史上最強  
K2600MeV (8,300tons)  
**超伝導リングサイクロトロン (SRC)**  
水素からウランまでの元素を  
核子当たり350MeV/uまで加速  
ウランを目標エネルギーまで  
加速に成功 2006年12月

矢野、他

RIをビームとして供給  
200 -300 MeV/u

下流の基幹実験装置群を利用し、  
RIビームの2次反応・  
停止によりデータ測定

逆運動学的手法と解析法の蓄積

世界最大口径  
9 Tm (77 m)  
**超伝導RIビーム生成分離装置 (BigRIPS)**  
核分裂片の約50%を収集  
世界最高のRIビーム分解能  
を達成 2007年5月

久保、他

$$Y = I\sigma t\varepsilon$$

Y:不安定核ビームの強度世界最高

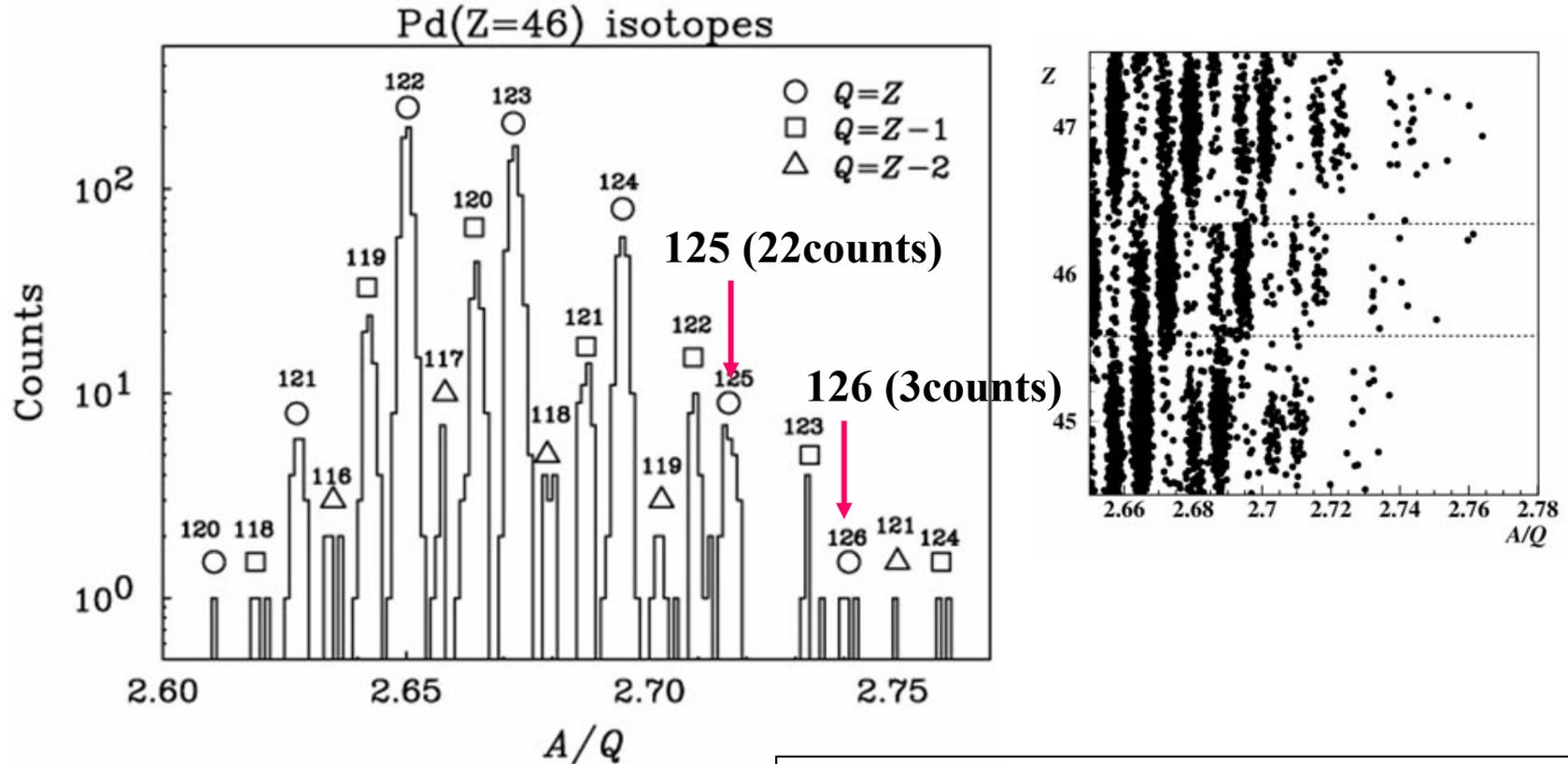
I: SRCのビーム強度世界最高

$\sigma$ :核分裂反応の分裂片の生成断面積大

t:エネルギーが高いため厚い標的

$\varepsilon$ :エネルギーが高いため分裂片の収集効率大

# Identification of new isotopes $^{125,126}\text{Pd}$



Total dose  $3.6 \times 10^{12}$  for 25 hrs  
I  $\sim 0.01$  pA on average

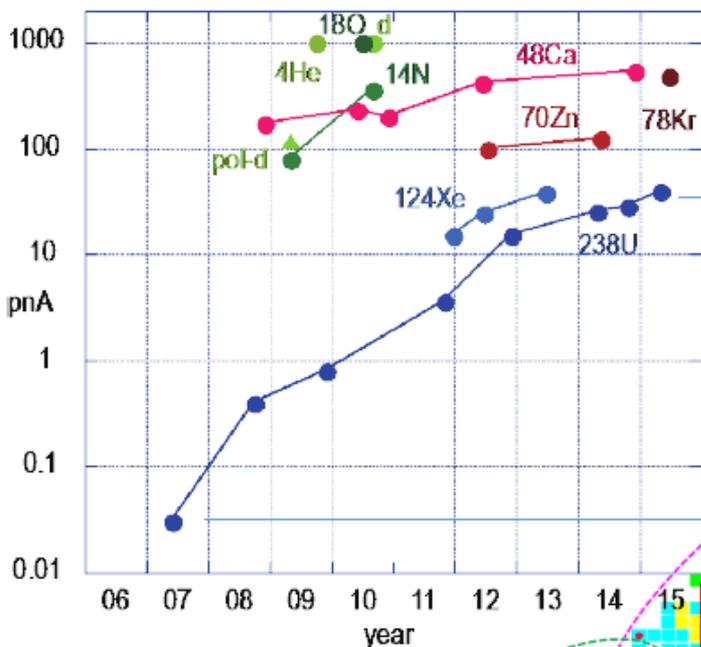
$A/Q$  resolution(r.m.s): 0.041% at  $Z=46$   
Bp resolution (r.m.s): 0.02%  
 $\Delta T$  resolution (r.m.s.): 40 psec

Cf.  $^{124}\text{Pd}$  19 counts,  $^{125}\text{Pd}$ (cand.) 1count at GSI, 1997  
PLB 415, 111 (97); total dose  $\sim 1 \times 10^{12}$

# RI Beam Production at BigRIPS Since 2007

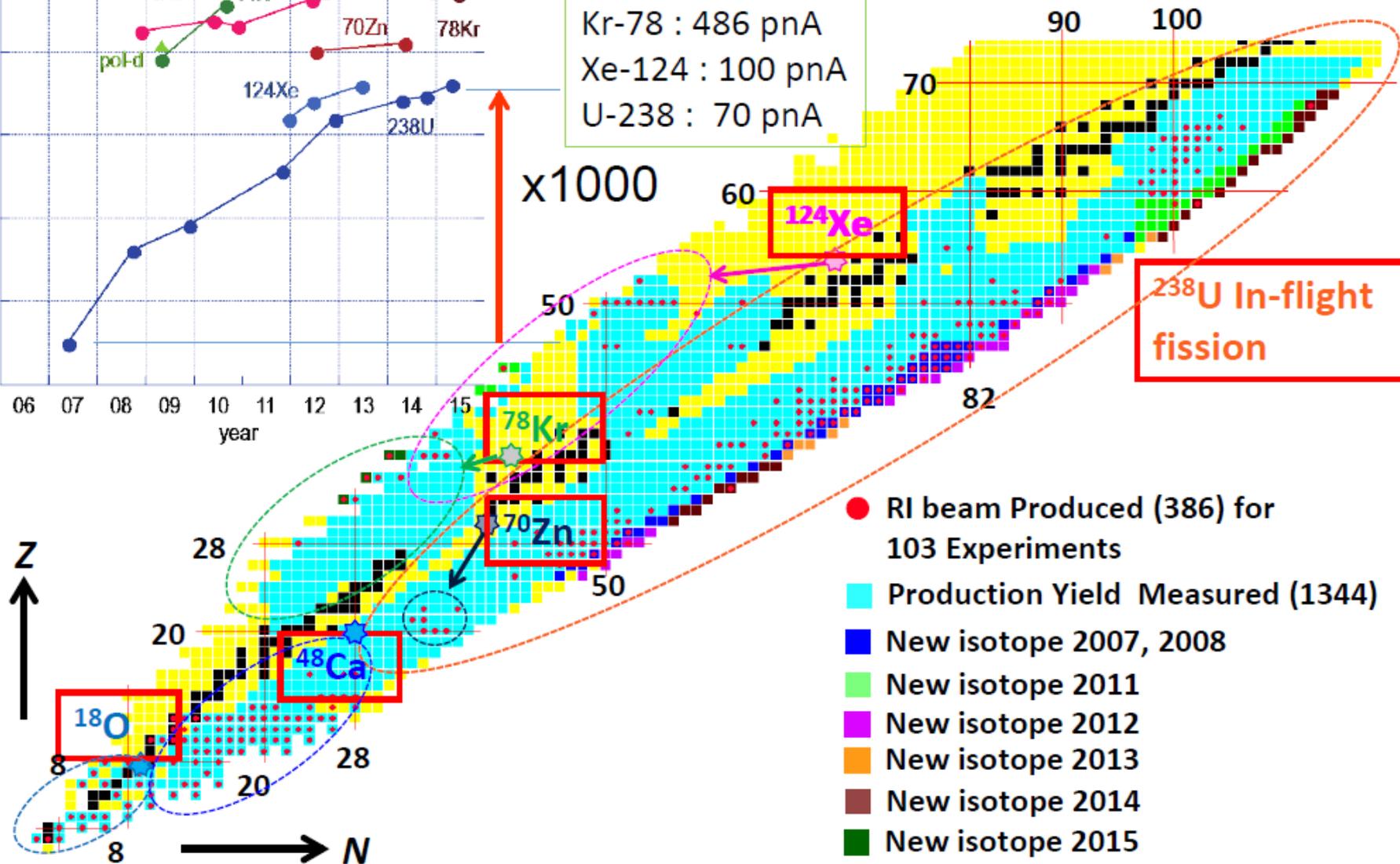
BigRIPS Team

## Primary beam intensity



2017  
 $\text{Ca-48}$  : 750 pA  
 $\text{Zn-70}$  : 250 pA  
 $\text{Kr-78}$  : 486 pA  
 $\text{Xe-124}$  : 100 pA  
 $\text{U-238}$  : 70 pA

x1000



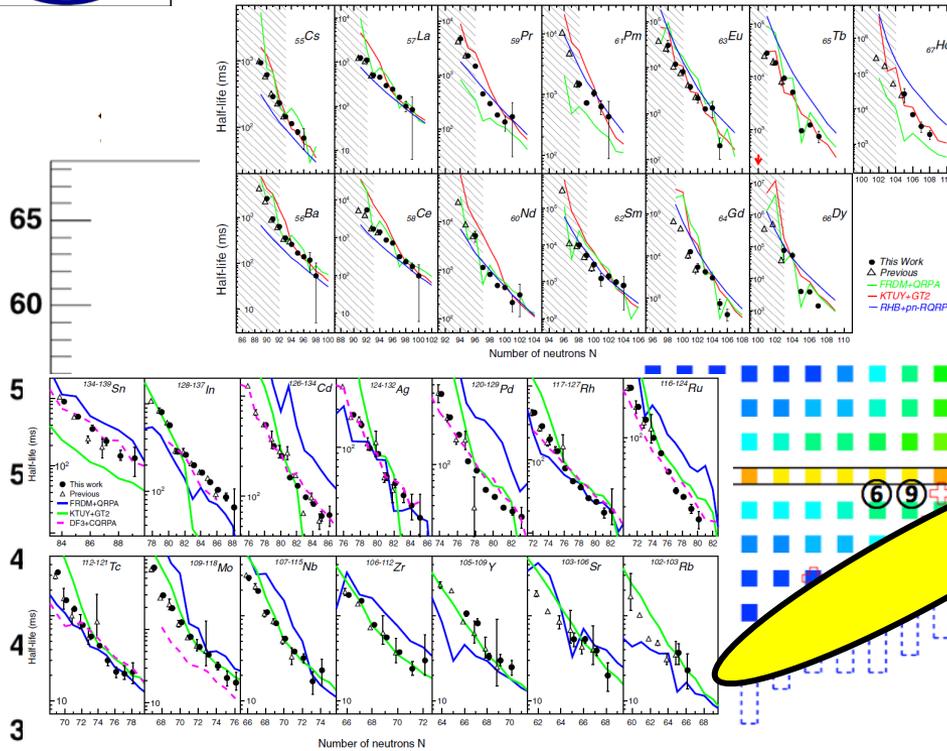
- RI beam Produced (386) for 103 Experiments
- Production Yield Measured (1344)
- New isotope 2007, 2008
- New isotope 2011
- New isotope 2012
- New isotope 2013
- New isotope 2014
- New isotope 2015



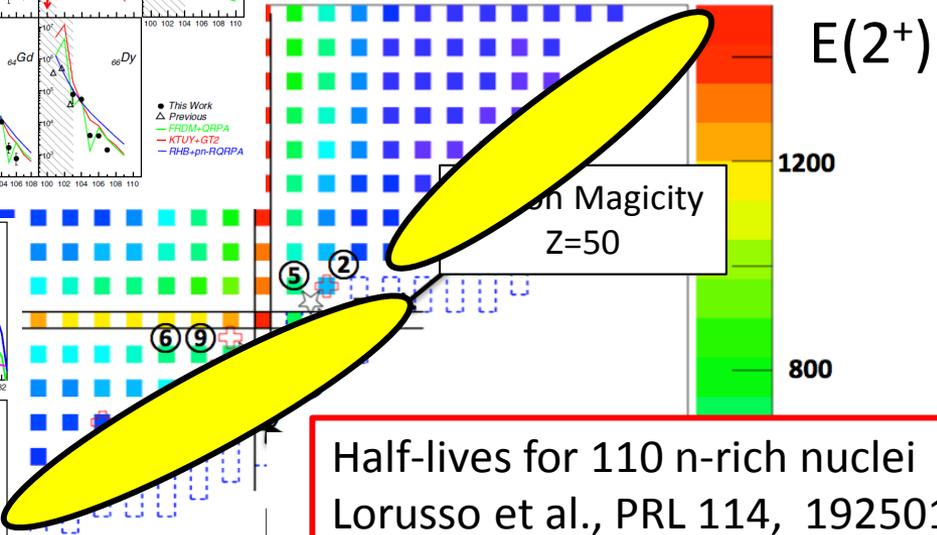
# EURICA Achievements

## Half-lives

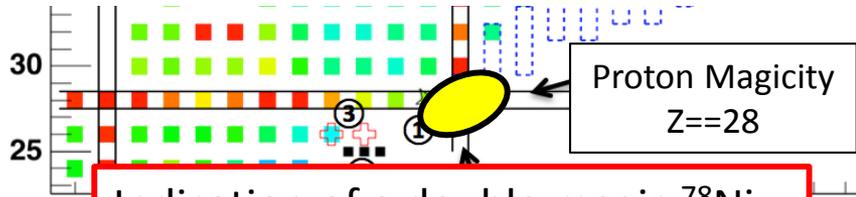
Proton number



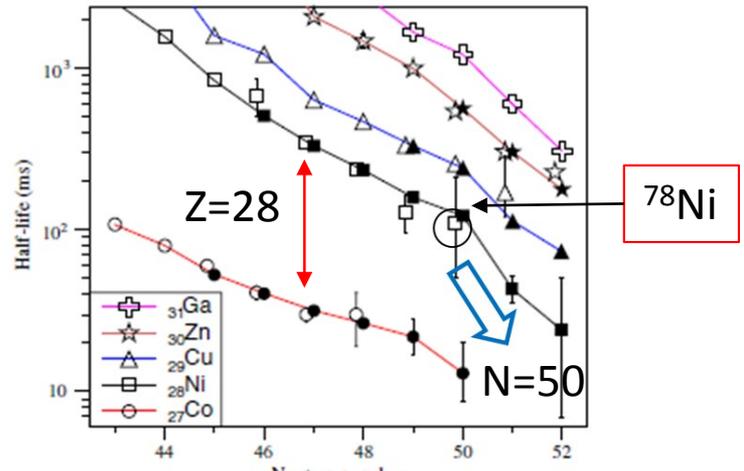
Half-lives for 94 n-rich nuclei  
 Wu et al., PRL 118, 072701 (2017)



Half-lives for 110 n-rich nuclei  
 Lorusso et al., PRL 114, 192501 (2015)

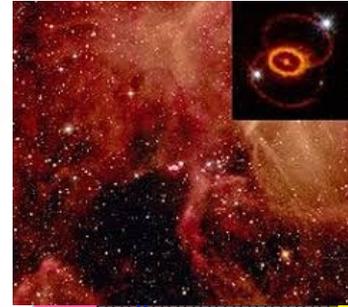
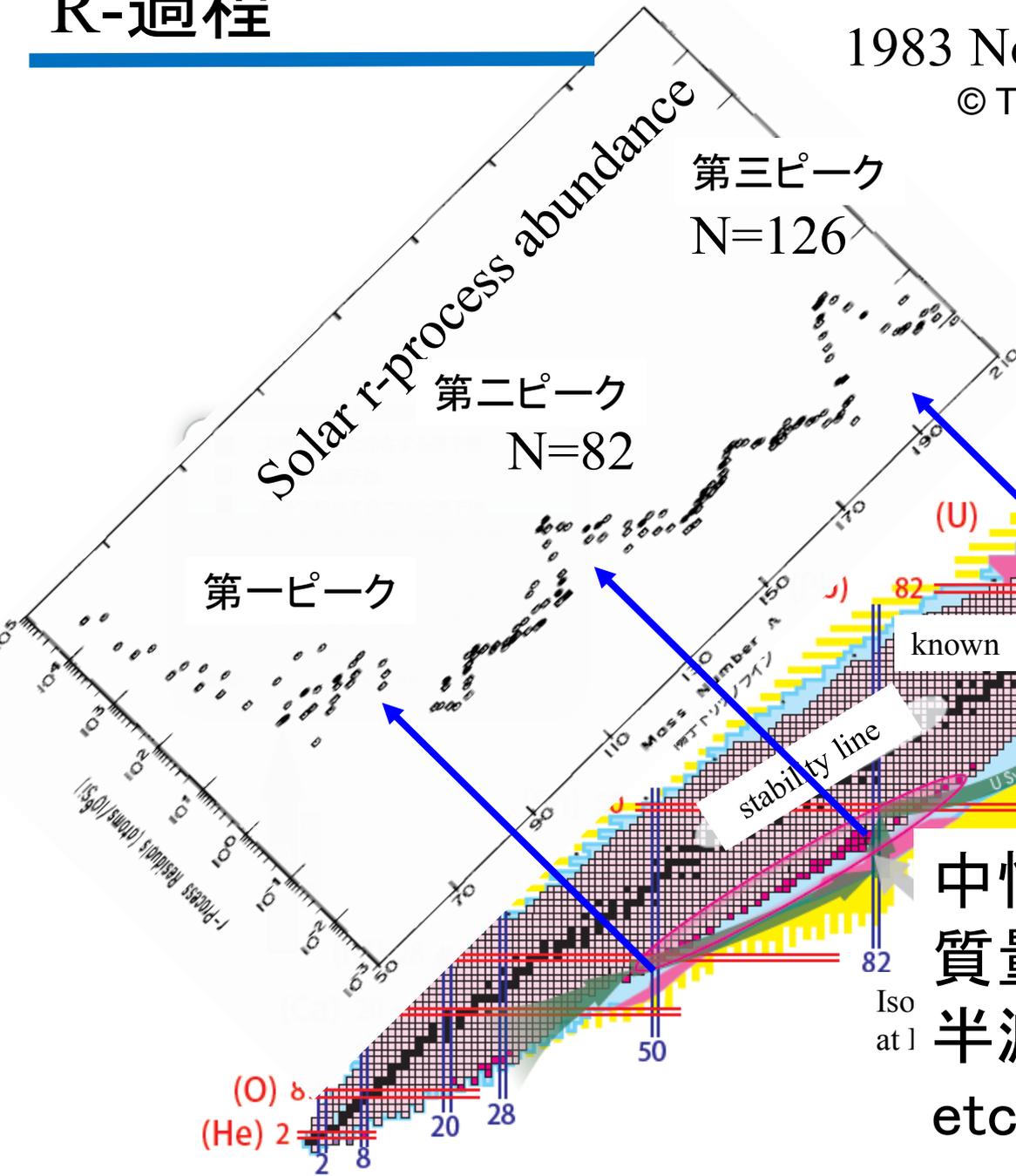


Indication of a double magic  $^{78}\text{Ni}$   
 Xu et al., PRL 113, 032505 (2014)



# R-過程

William A. Fowler  
1983 Nobel Prize Physics  
© The Nobel Foundation

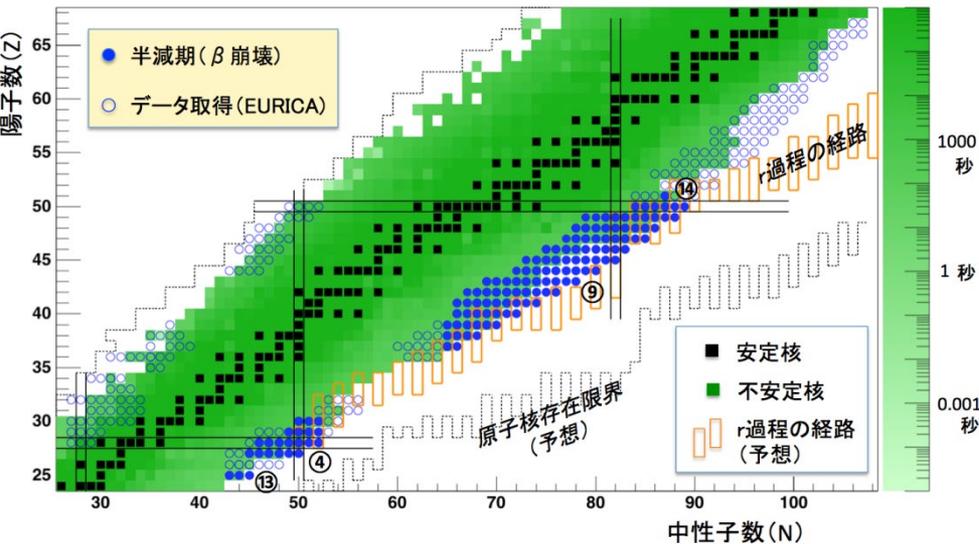


超新星爆発? 中性子星合体?

新元素113番の発見  
2004年7月23日  
森田研究員

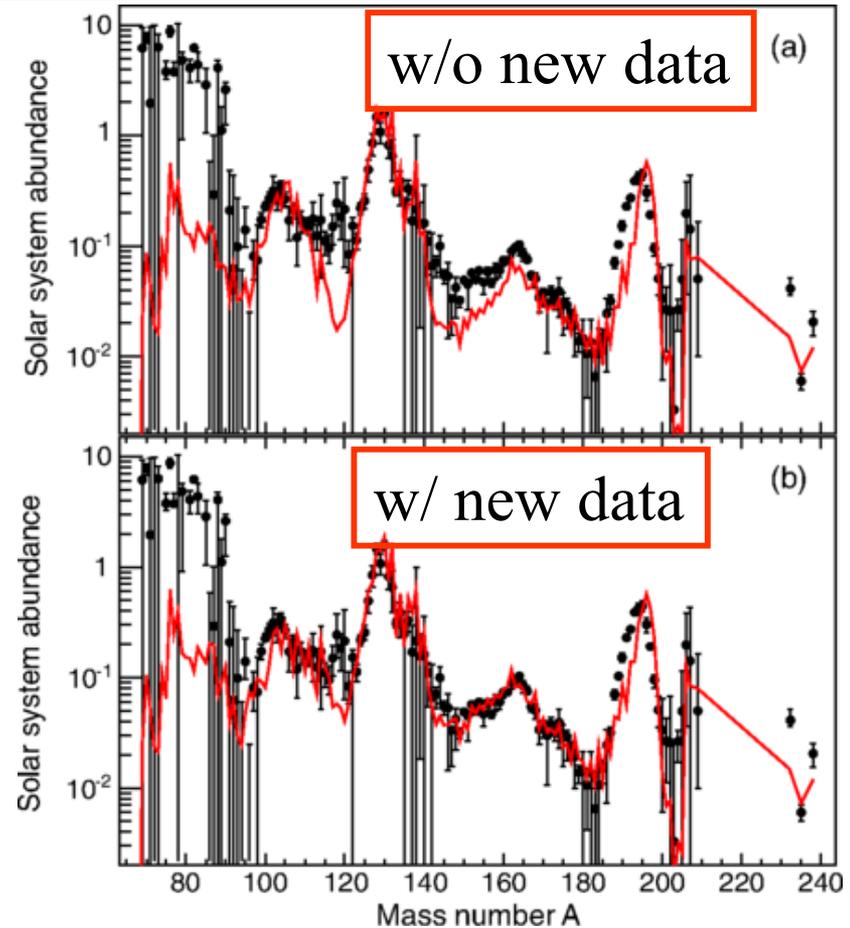
中性子捕獲vsベータ崩壊  
質量→ 経路  
半減期→ フロースピード  
etc ...

# r-過程研究：理論、観測から地上実験の時代へ



大量の半減期データ  
第2ピーク、希土類領域まで  
超新星爆発 + (n, $\gamma$ ) 平衡モデル  
と矛盾なし

質量、中性子放出確率測定へ



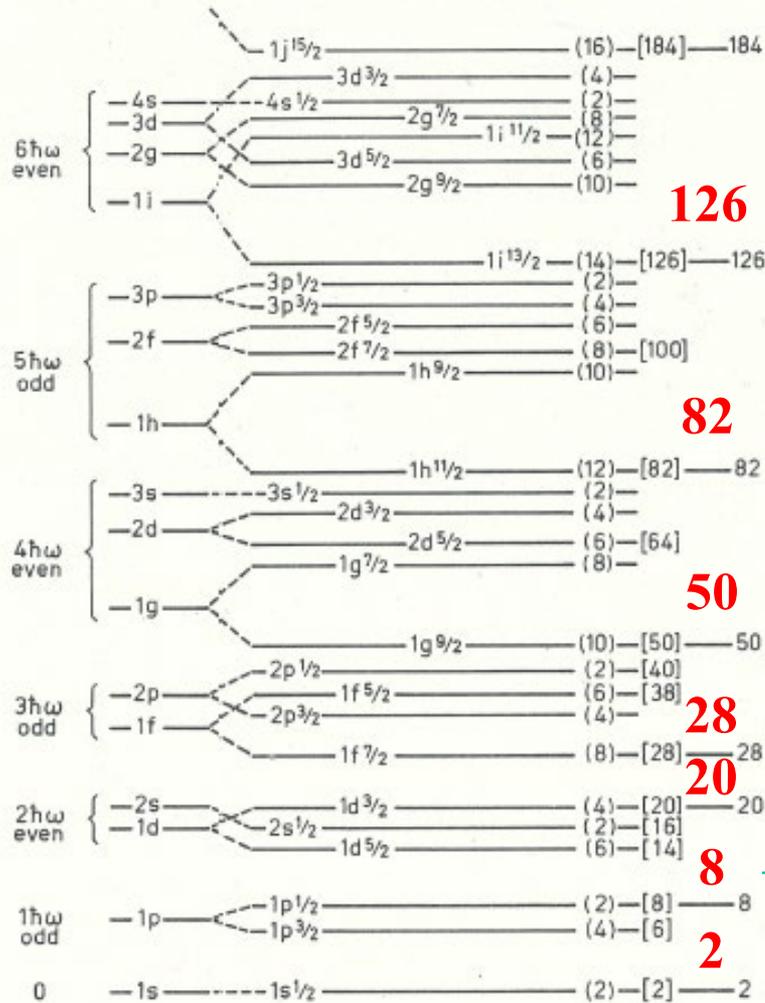
G. Lorusso, S. Nishimura *et al.* PRL. 114, 192501 (2015)

RIBF高度化：第三ピークへ

- S. Nishimura *et al.*, PRL. 106, 052502 (2011)
- Z. Y. Xu, S. Nishimura *et al.*: PRL. 113, 032505 (2014)
- G. Lorusso, S. Nishimura *et al.*: PRL. 114, 192501 (2015)
- G. Benzoni, A.I. Morales, H. Watanabe *et al.*: PRC 92, 044320 (2015)
- P. Lee, C.-B. Moon, C. S. Lee, A. Odahara *et al.*: PLB 751, 107 (2015)

# 魔法数研究

## 安定核領域



## 中性子過剰領域

?

?

?

?

?

N=16

喪失

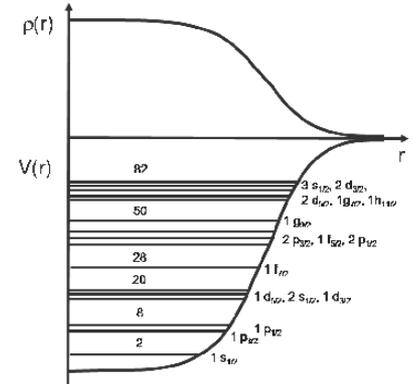
喪失



Mayer & Jensen

Nobel Prize 1963

一体ポテンシャル  
大きなLS力

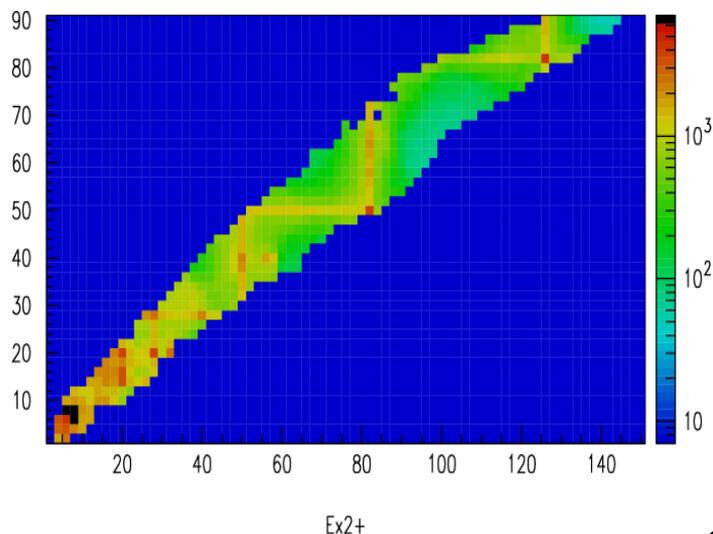


弱束縛性  
ポテンシャル形状  
有効相互作用の変化  
(テンソル力)  
対相互作用の変化  
多体力効果

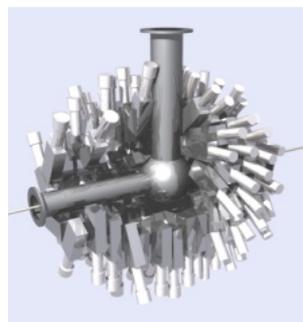
...

# インビームガンマ分光による魔法数研究

## 偶偶核の第一励起準位のエネルギー測定



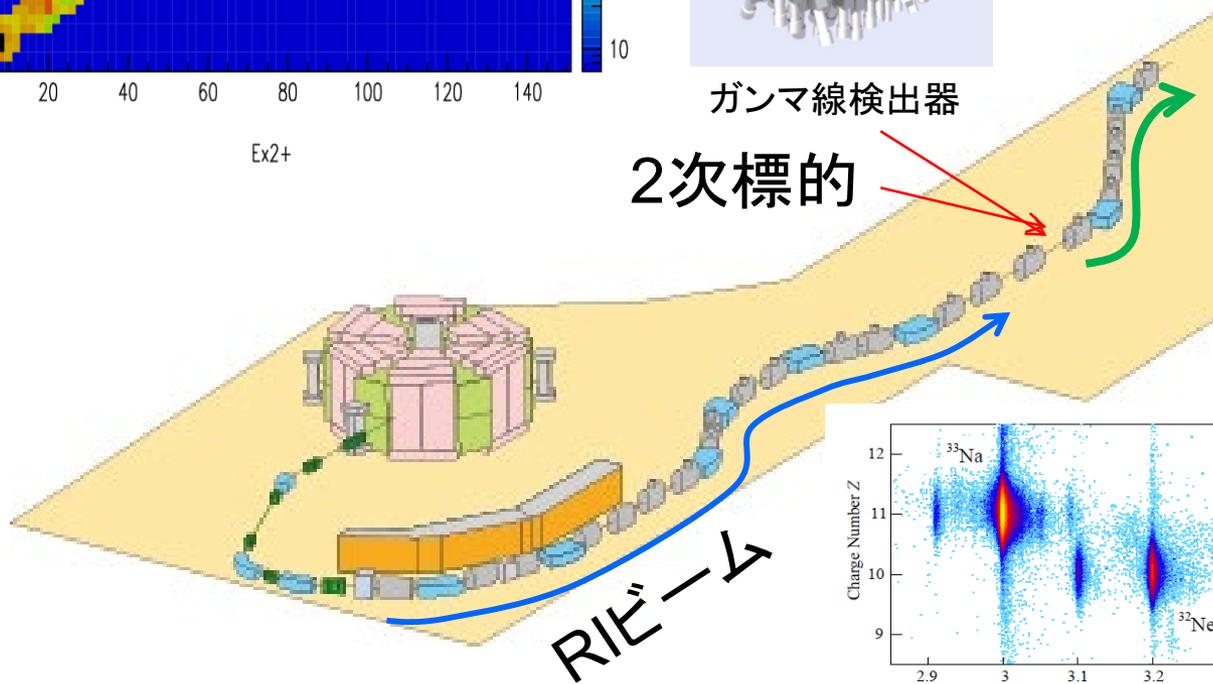
### インビームガンマ分光



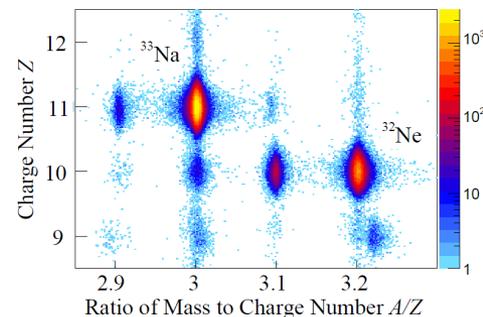
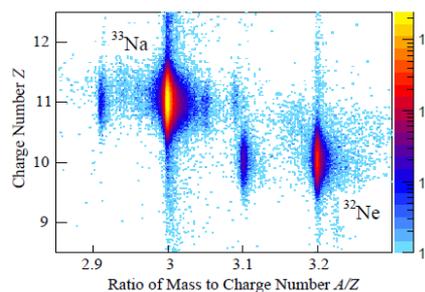
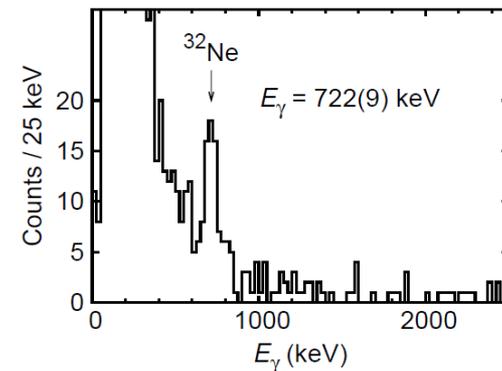
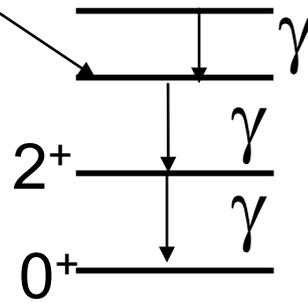
2次標的に照射し  
励起準位を反応で作り  
脱励起ガンマ線を測る

ガンマ線検出器

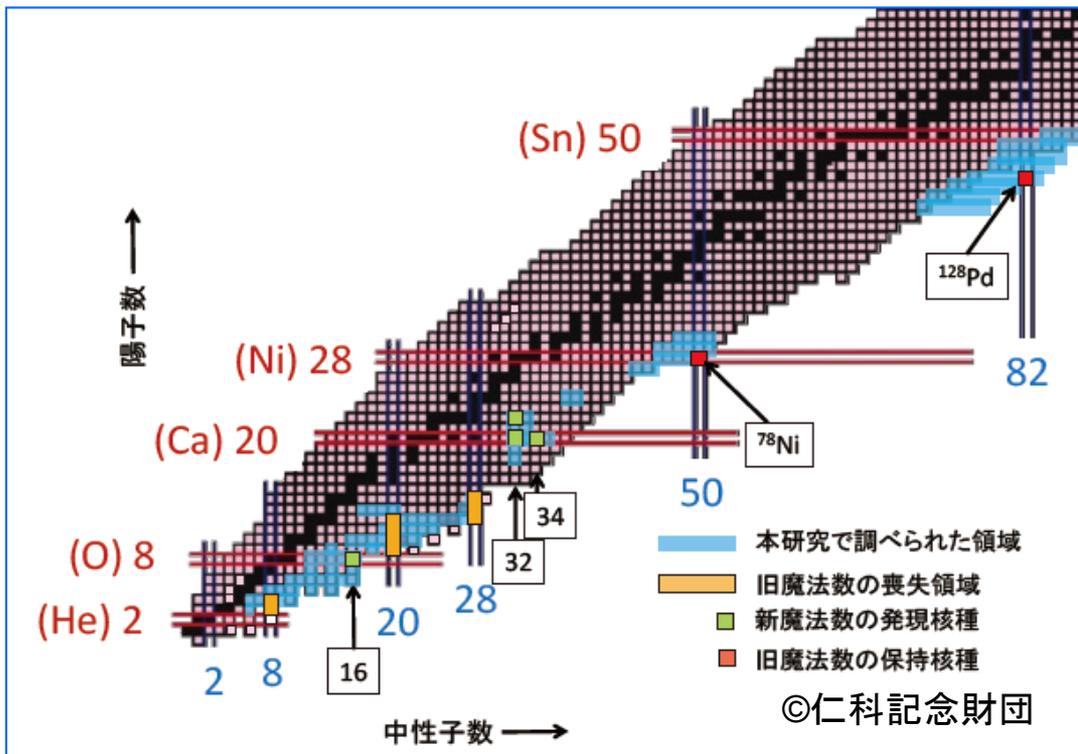
2次標的



反応



# 魔法数研究



## 新魔法数N=34の発見

### N=20-28

- <sup>32</sup>Ne: Doornenbal, PRL 103, 032501 (2009)
- <sup>36,38</sup>Mg: Doornenbal, PRL111, 212502 (2013)
- <sup>42</sup>Si: Takeuchi PRL109, 182501 (2012)
- <sup>40</sup>Mg: Crawford, PRL 122, 052501 (2019)

### N=32, 34

- <sup>54</sup>Ca: Steppenbeck, Nature 502, 207 (2013)
- <sup>50</sup>Ar: Steppenbeck, PRL 114, 252501 (2015)
- <sup>52</sup>Ar: Liu, PRL 122, 072502 (2019)

### N=50

- <sup>78</sup>Ni: Xu, PRL 113, 032505 (2014)
- <sup>78</sup>Ni: Taniuchi, Nature 569, 53-58 (2019)

### N=82, Z=50

- <sup>126</sup>Pd: Wang, PRC 88 054318 (2013)
- <sup>136</sup>Sn: Wang, PTEP 023D02 (2014)

魔法数N=20、28の喪失

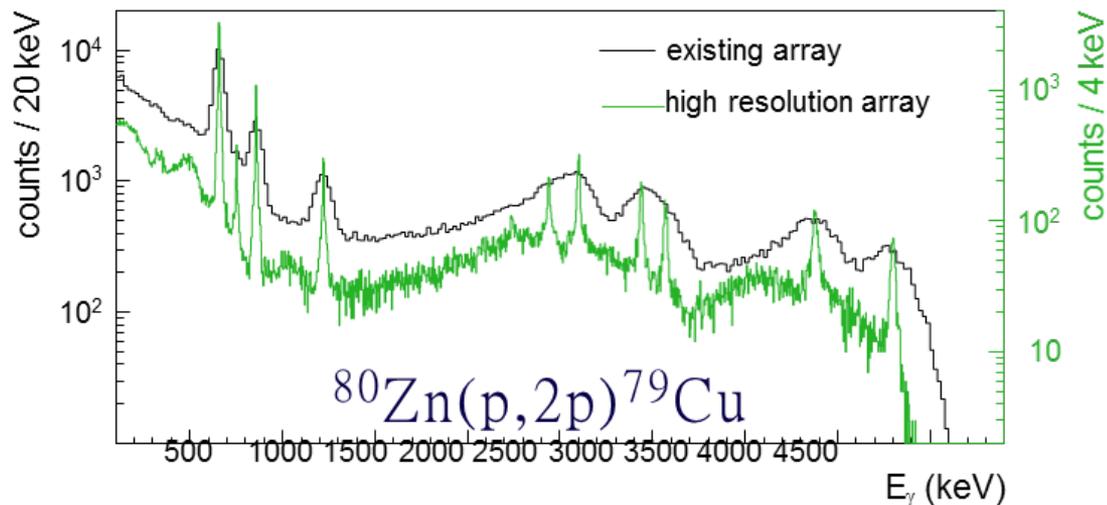
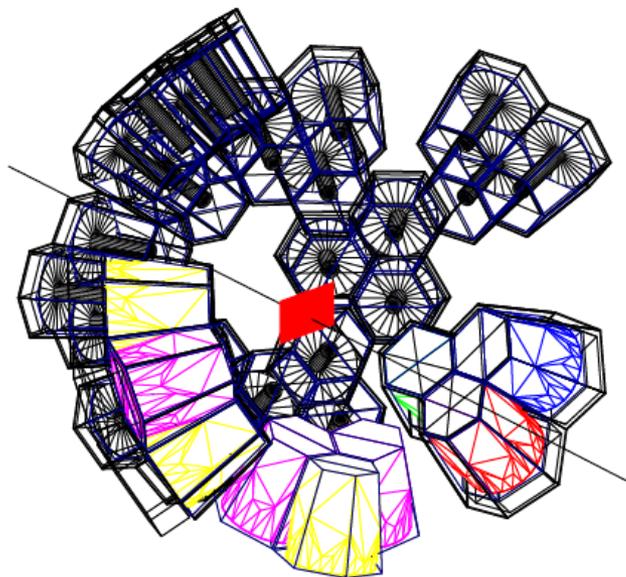
新魔法数N=34

<sup>78</sup>Ni (Z=28, N=50) の二重魔法性

Z>46でのN=82の魔法性の健在性

N=126の健在性、新魔法数58、90... ?

ゲルマニウム検出器を利用した高エネルギー分解能測定  
NaI検出器から位置感応型ゲルマニウム検出器へ  
偶偶核から偶奇核、奇奇核へ

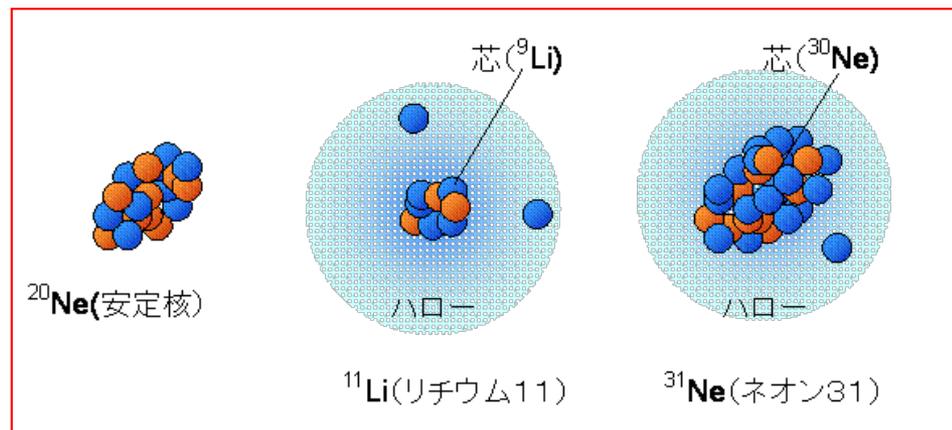
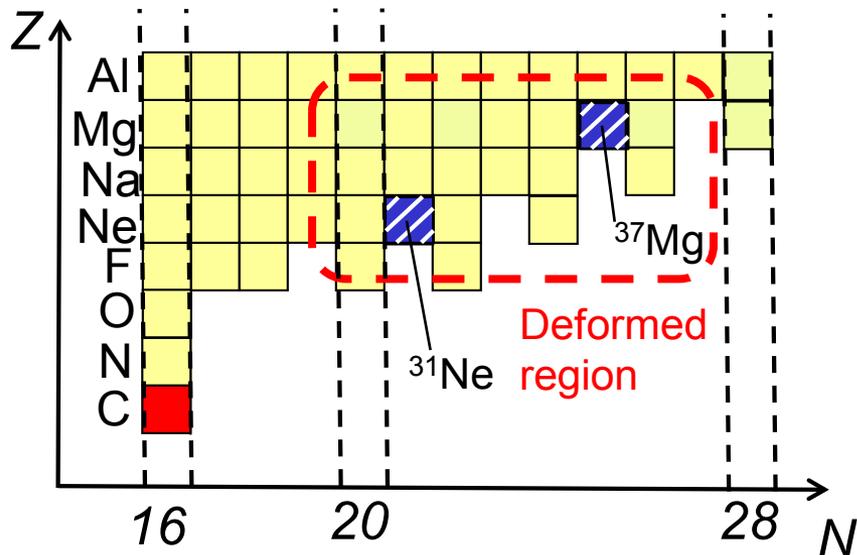


GRETINA Quad (RCNP)  
MINIBALL (EU)  
GRETINA Triple (LBNL)  
DAGATA (KTH)

青井

2020春データ取得予定

# 変形ハロ一核 $^{31}\text{Ne}$ , $^{37}\text{Mg}$ の発見



ハロ一核でのE1応答の増大:クーロン分解反応

T.Nakamura et al., Phys.Rev.Lett.103,262501 (2009).

N.Kobayashi et al., PRC 86, 054604 (2012)

T.Nakamura,et al., Phys.Rev.Lett.112,142501 (2014).

N.Kobayashi et al., Phys. Rev. Lett. 112, 242501 (2014)

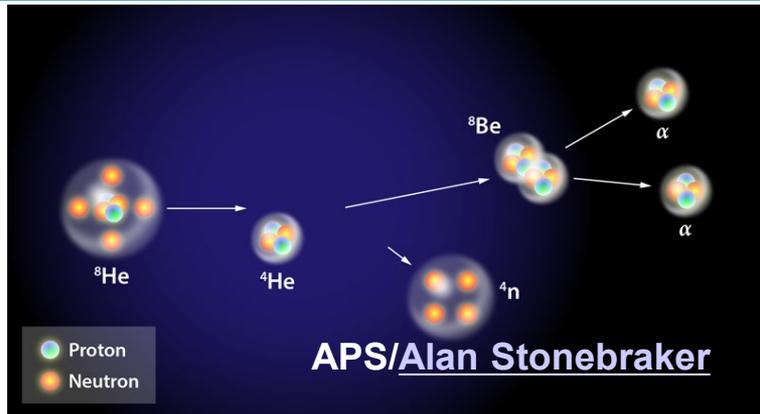
中村

*Total Interaction Cross Section at BigRIPS*

M. Takechi et al., Phys. Lett. B 707, 357 (2012)

M. Takechi et al., Phys. Rev. C 90, 061305(R) (2014)

# テトラ中性子(原子番号=0, 質量数=4)



K. Kisamori, S. Shimoura *et al.*

Phys. Rev. Lett. 116, 052501

下浦

Featured in Physics, Editors' suggestion

SHARAQ spectrometer(CNS, UT)



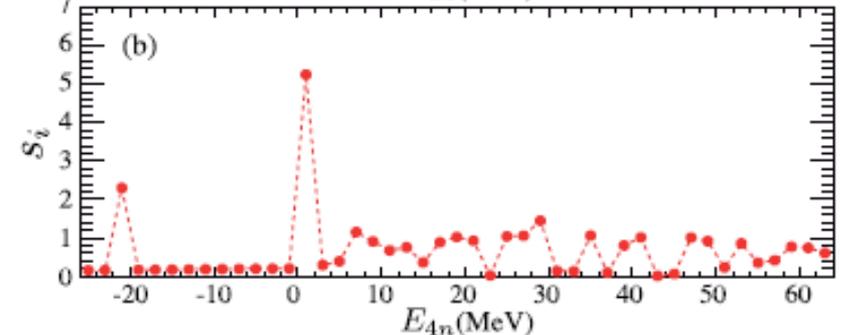
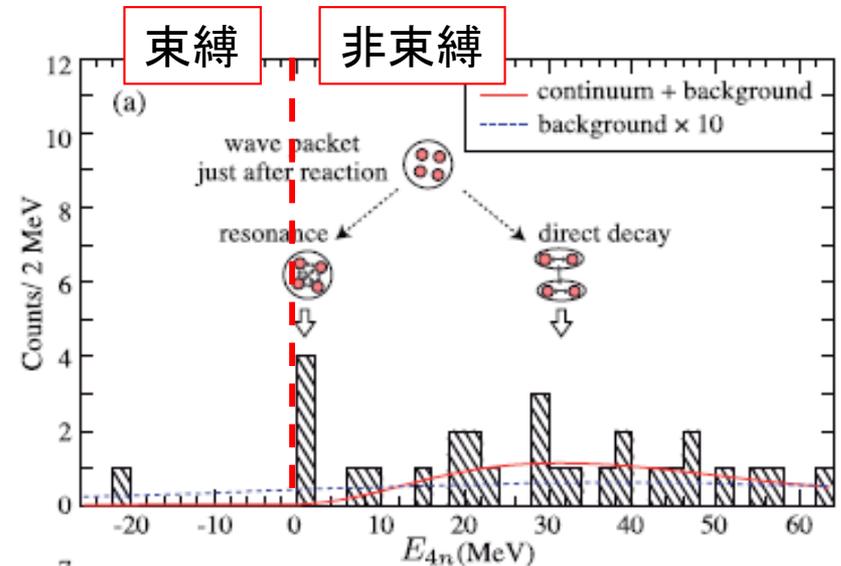
少数系の核物理がより重要に

T=1/2散乱状態 d+p 弾性散乱

K. Sekiguchi et al., Phys.Rev. C 83, 061001(2011)

K. Sekiguchi et al., Phys. Rev. C89, 064007 (2014)

三体力研究:酒井、関口

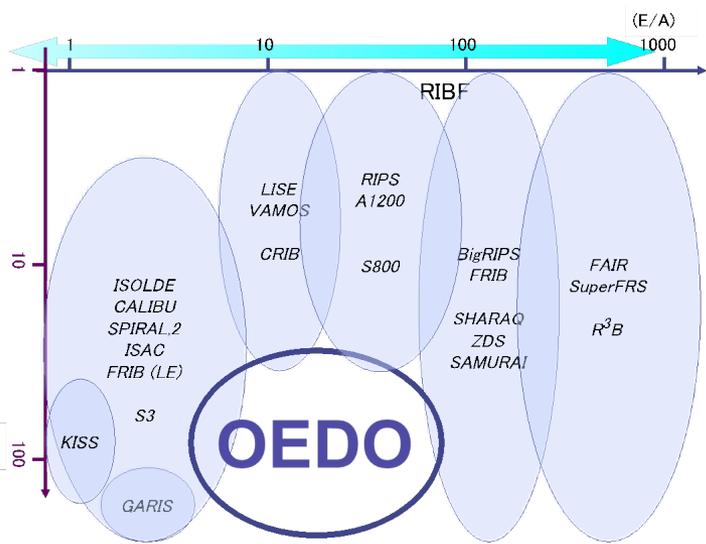


強いT=3/2三体力?、T=2四体力?  
クラスター状態? 3n+n、2n+2n?

# RIビームの効率良い低エネルギー化（下浦、他）

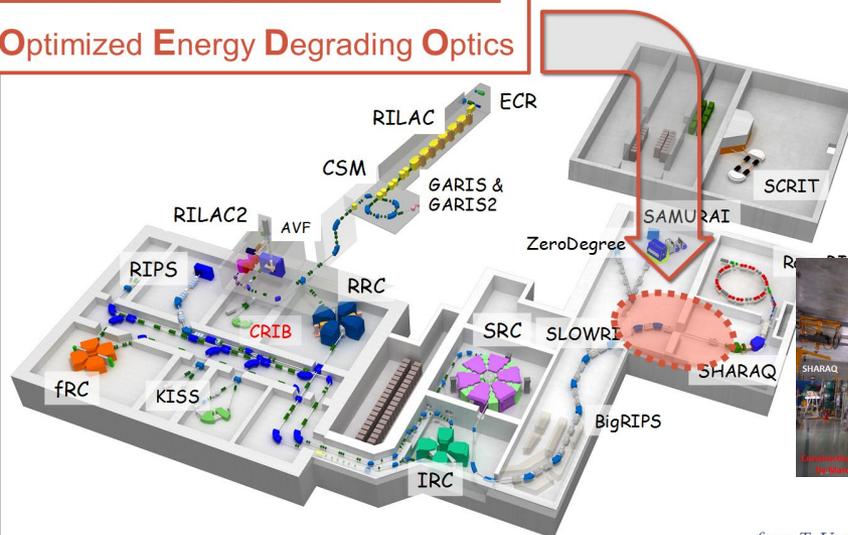
- Nucleon transfer reactions (10A – 50A MeV)
- Pair transfer / Cluster transfer (10A – 20A MeV)
- Deep inelastic collisions (incomplete fusion) (5A – 30A MeV)
- Fusion reaction (~ 5A MeV)
- Coulomb excitation reactions for low-energy gamma rays (~ 50A MeV)

Wimmer, (t,p)



## OEDO Beam-line

Optimized Energy Degrading Optics



from T. Uesaka

# 最後に

---

「大砲」を基盤にした、核図表の拡大  
大量の新データ取得

新しい「手法、研究対象、領域」の開拓

豊穡な原子核の現象

次なる飛躍