

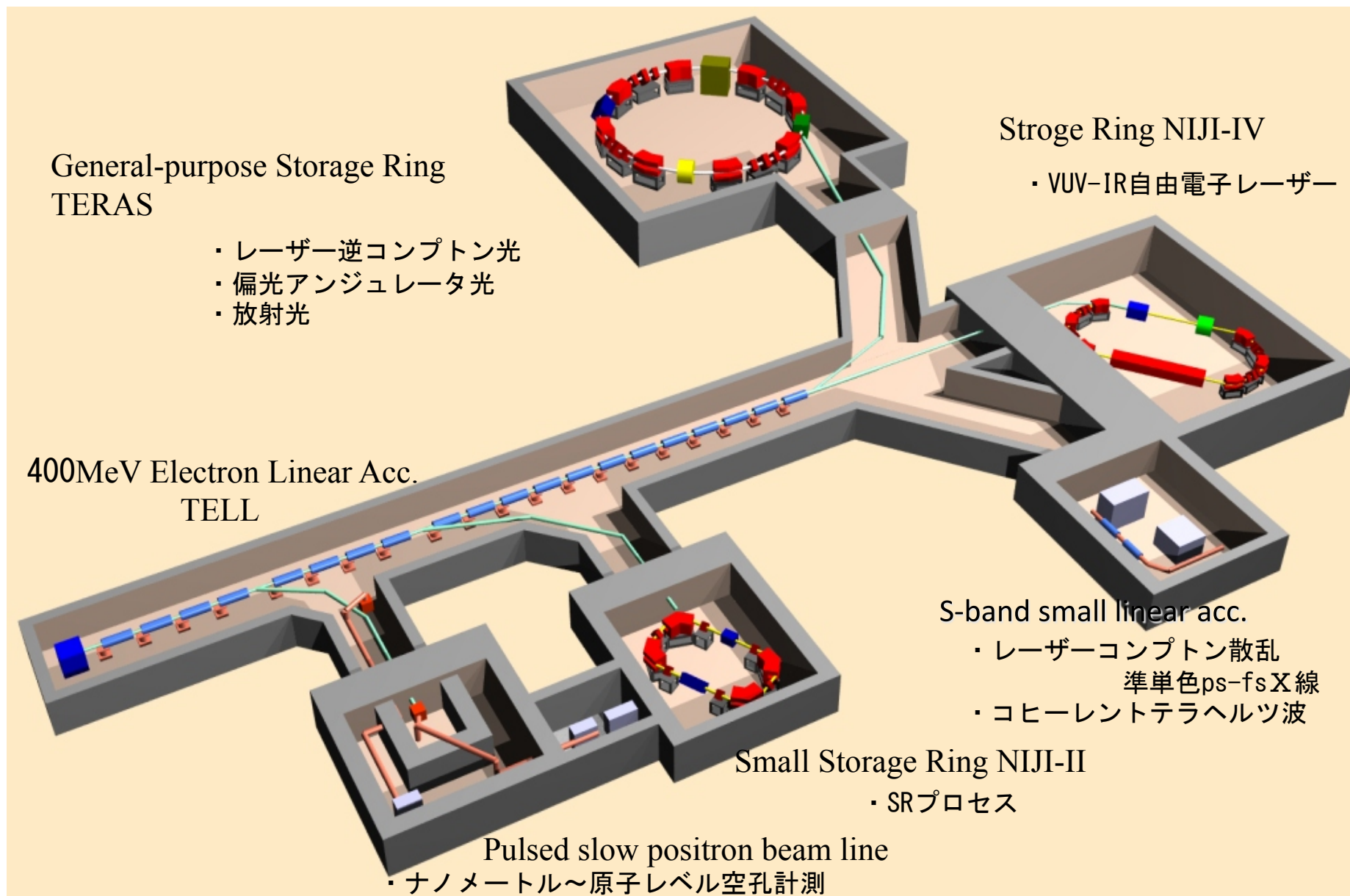
# 光核反応研究の現状と将来

宇都宮弘章(甲南大、東大CNS客員)

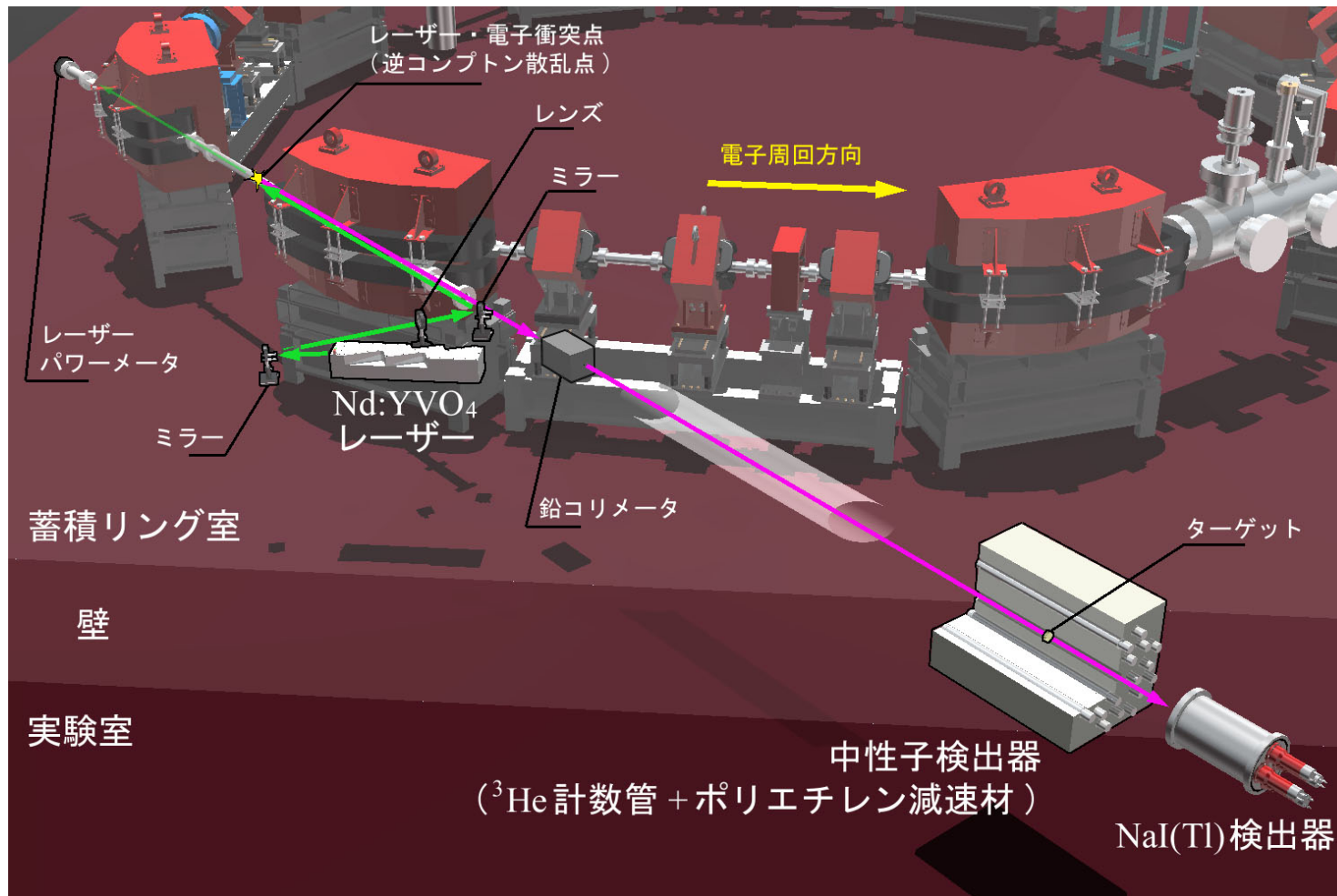
## 内容

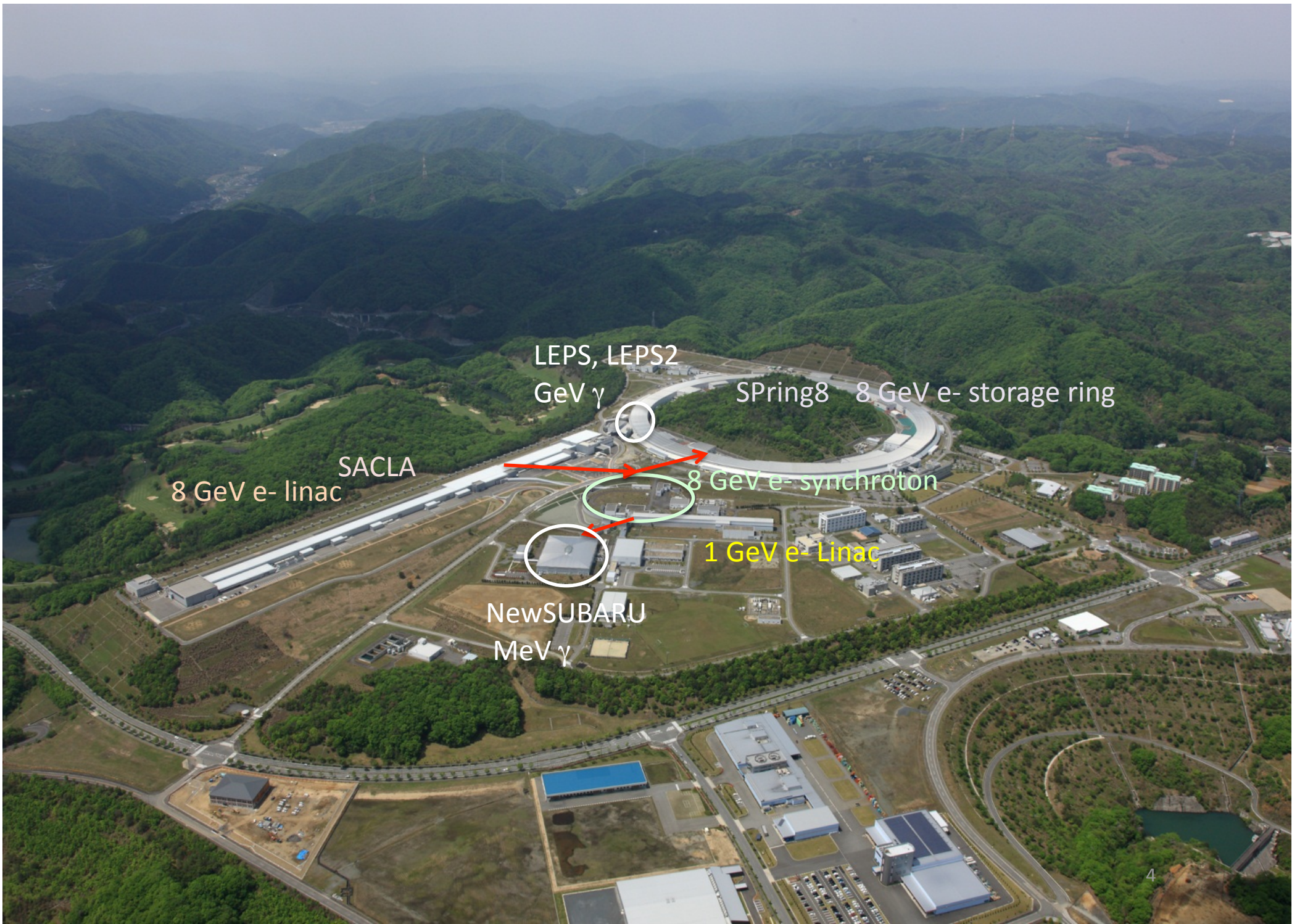
1. ガンマ線を使った研究の現状
  - a. 施設
  - b. 研究動向
  
2. ガンマ線を使った研究の将来
  - a. 日本
  - b. ELI-NP
  
3. まとめ

# AIST Electron Accelerator Facility



AIST : National Institute for **A**dvanced **I**ndustrial **S**cience and **T**echnology  
TERAS (**T**sukuba **E**lectron **R**ing for **A**cceleration and **S**torage)  
closed in April 2012





LEPS, LEPS2

GeV  $\gamma$

SPring8 8 GeV e- storage ring

SACLA  
8 GeV e- linac

8 GeV e- synchrotron

1 GeV e- Linac

NewSUBARU  
MeV  $\gamma$

# NewSUBARU (Japan)



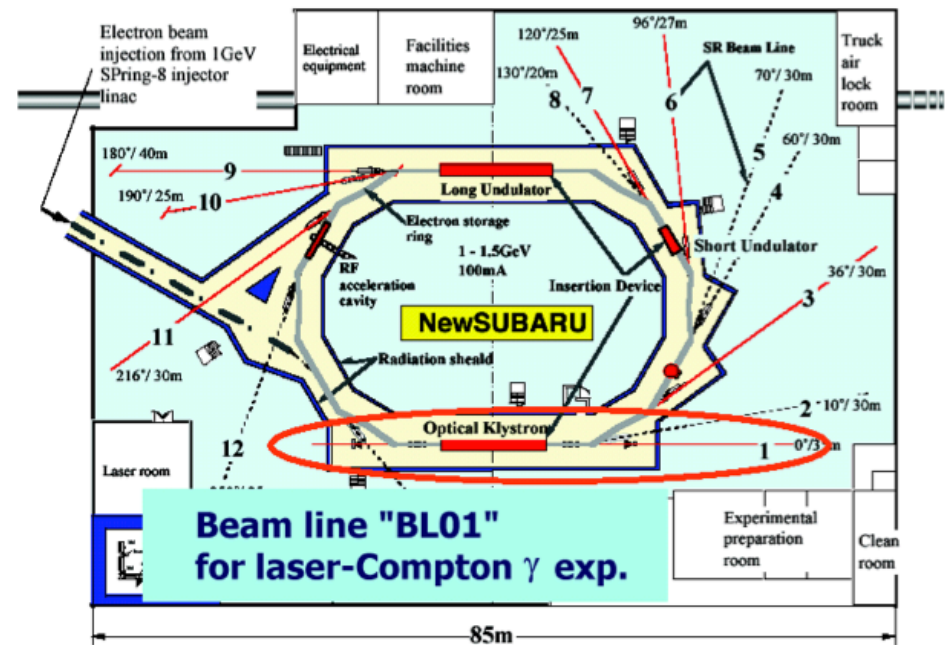
0.55 – 1.5 GeV storage ring

$$E_{\gamma} = 0.5 - 76 \text{ MeV}$$

$$I_{\gamma} = 10^6 - 10^7 \text{ s}^{-1}$$

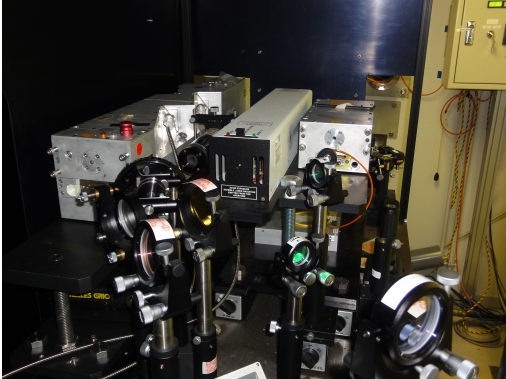
(3 – 6 mm dia.)

$$\Delta E/E > 2\%$$



# Experimental Hutch GACKO (Gamma Collaboration Hutch of Konan University)

Table-top Lasers



# その他の施設

private communications with H. Ohgaki and T. Hayakawa

- SAGA-LS(佐賀県鳥栖市)でCO<sub>2</sub>レーザーでのLCSライン(リング室内)。
- 関西原研(奈良県木津市)マイクロトロンでLCS発生(400 keV)。
- 今年UVSOR(分子科学研究所極端紫外光研究施設、愛知県岡崎)においてファイバーレーザーで、最終的にはFELでのLCSを行う予定(大垣)。
- 原研-KEK ERLでの低エネルギーLCS発生(10 keV) 2015年3月(早川)  
将来 ERLでの大強度LCS源開発を狙う。
- 制動放射は京大(熊取)、大阪府立大(堺市)等数ヶ所。

# 研究の動向

## 反応による分類と関連する物理

### 1. $(\gamma, \text{abs})$ 反応

透過法 原田(JAEA)、ラジオグラフィー&CT 豊川(電総研一産総研)

### 2. $(\gamma, \gamma')$ 反応

NRF(核共鳴蛍光法) 大垣(電総研一産総研、京大)、静岡、早川 E1/M1分離、ピグミー、非破壊検査、核セキュリティ

散乱、屈折 宮本(兵庫県大)、早川 磁気コンプトン散乱、ガンマ線分光器

### 3. $(\gamma, n)$ 反応

重い核の断面積測定

宇都宮(甲南大)、北谷(JAEA) ガンマ線強度関数、元素合成、核データ  
E1/M1分離

軽い核の断面積測定

宇都宮、嶋、藤原(阪大RCNP)、山県(甲南大) 元素合成、パリティ非保存、クラスター放射化法 静岡、早川(JAEA)、江尻 アイソマー、RI生成、非破壊微量分析

### 4. $(\gamma, p)$ , $(\gamma, \alpha)$ , $(\gamma, {}^3\text{He})$ 反応

軽い核の断面積測定

嶋(阪大RCNP)、川畑(京大)、秋宗(甲南大) 元素合成、少数核子、クラスター、

### 5. $\gamma$ 照射

青木(神大)、Bernard(LLR, France) 観測装置、検出器開発

### 6. $(\gamma, e^+)$

堀(大阪府大)  $e^+$ 非破壊検査



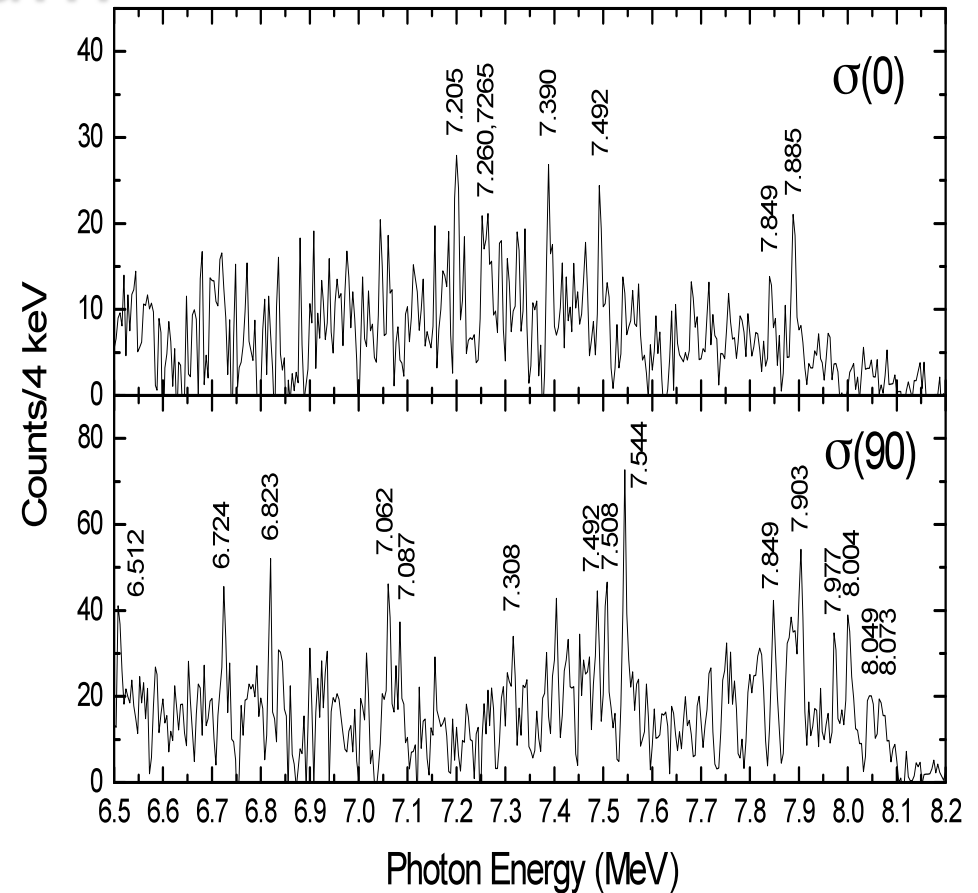
$(\gamma, \gamma')$

# Parity Measurement with Linearly Polarized Photon Beam

$$\text{Asymmetry } A(\theta) = \frac{1}{p} \frac{\sigma(\theta, 0) - \sigma(\theta, 90)}{\sigma(\theta, 0) + \sigma(\theta, 90)}$$

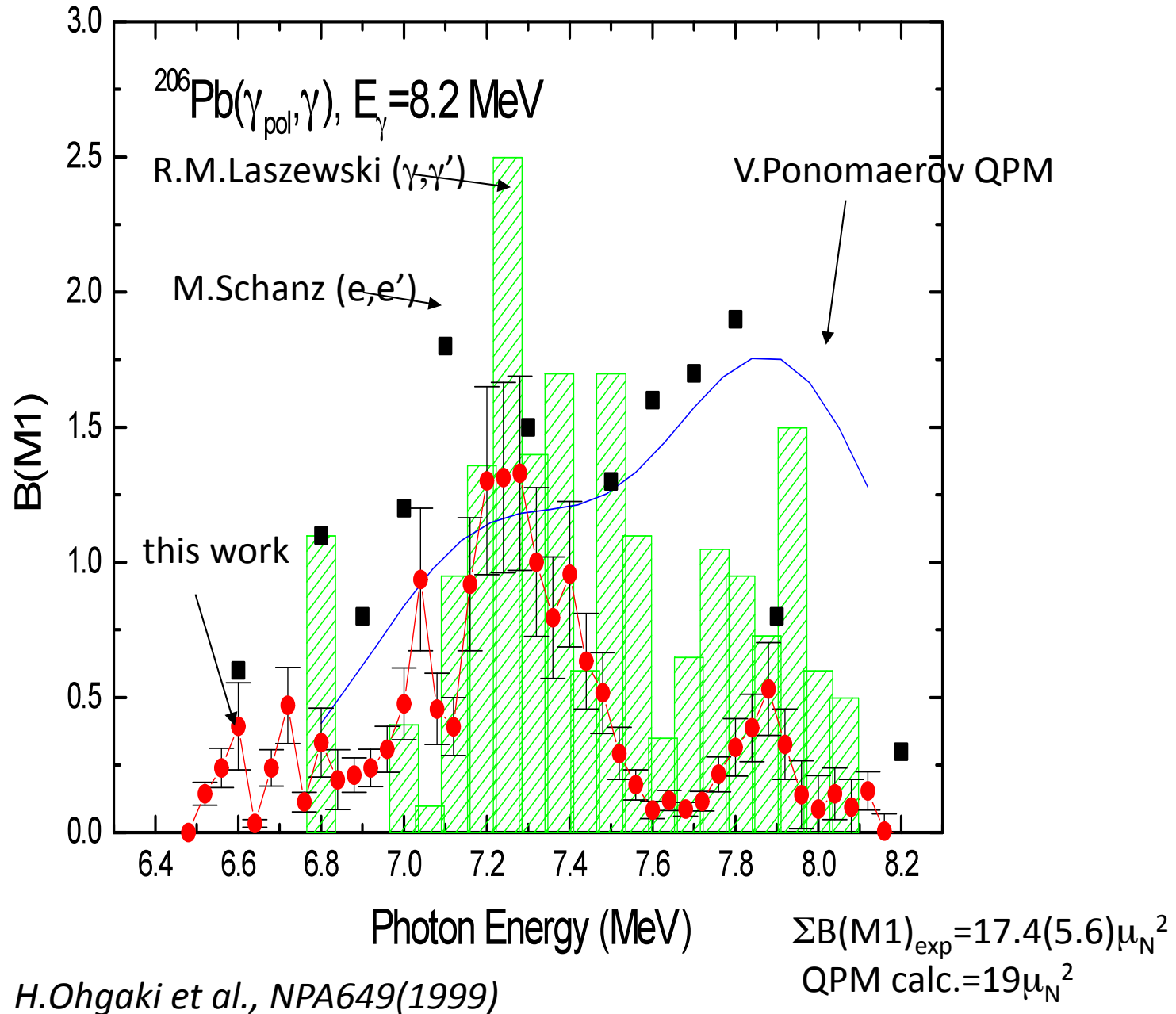
Multipolarity	Spin Sequence	$A(\theta=90^\circ)$ $P=100\%$
E1	$0^+ - 1^- - 0^+$	-1
M1	$0^+ - 1^+ - 0^+$	+1
E2	$0^+ - 2^+ - 0^+$	+1

- ref.: R.D. Heil et. al, Nucl. Phys. 506(1990)p223.



$(\gamma, \gamma')$

# M1 distribution in $^{206}\text{Pb}$

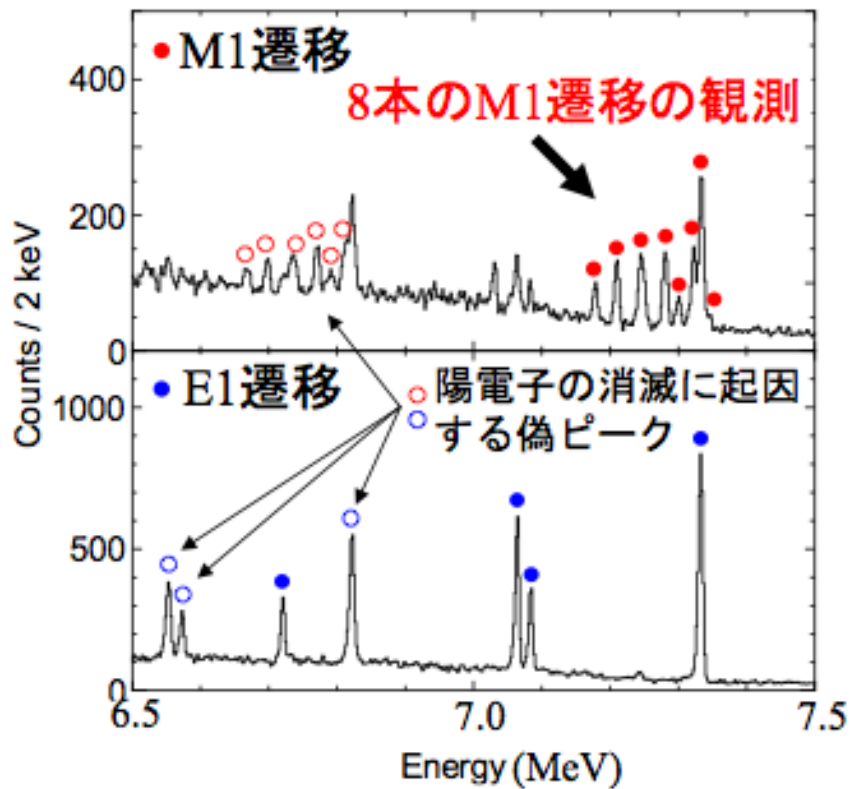


*H. Ohgaki et al., NPA649(1999)*

$(\gamma, \gamma')$

# 測定データ ( $^{208}\text{Pb}$ )

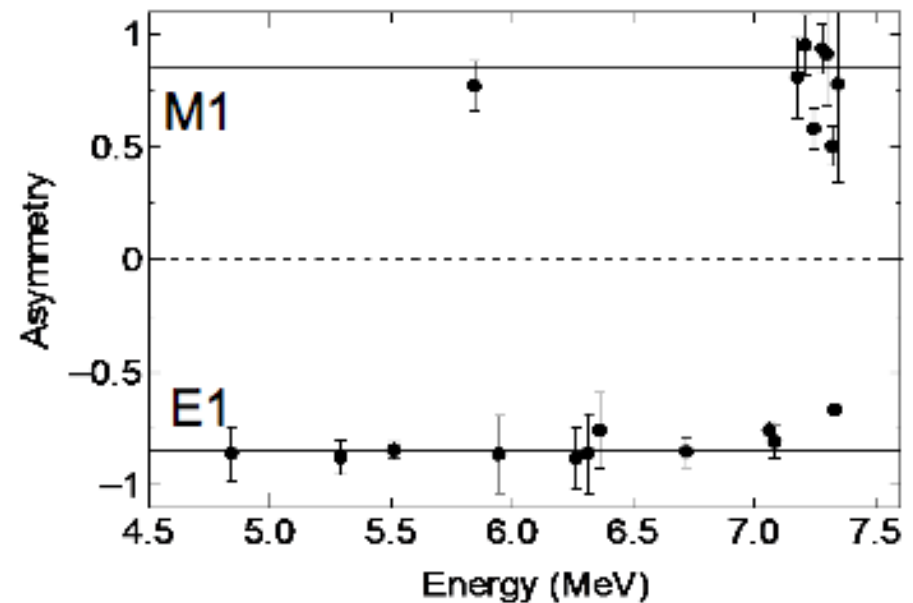
散乱ガンマ線スペクトル



ガンマ線ビームの偏光面に対する  
散乱ガンマ線の非対称度

$q=0.85$  for the present detection system

$$A = \begin{cases} +0.85 & \text{for } M1 \text{ transition} \\ -0.85 & \text{for } E1 \text{ transition} \end{cases}$$

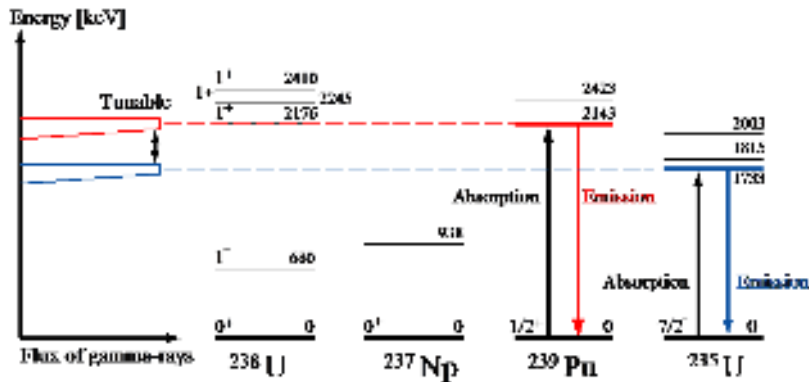


*T. Shizuma et al., PRC78,061303(R),2008*

*T. Shizuma et al., PRC87,024301,2013*

( $\gamma, \gamma'$ )

# 核セキュリティのための アクチノイドの核共鳴蛍光散乱実験



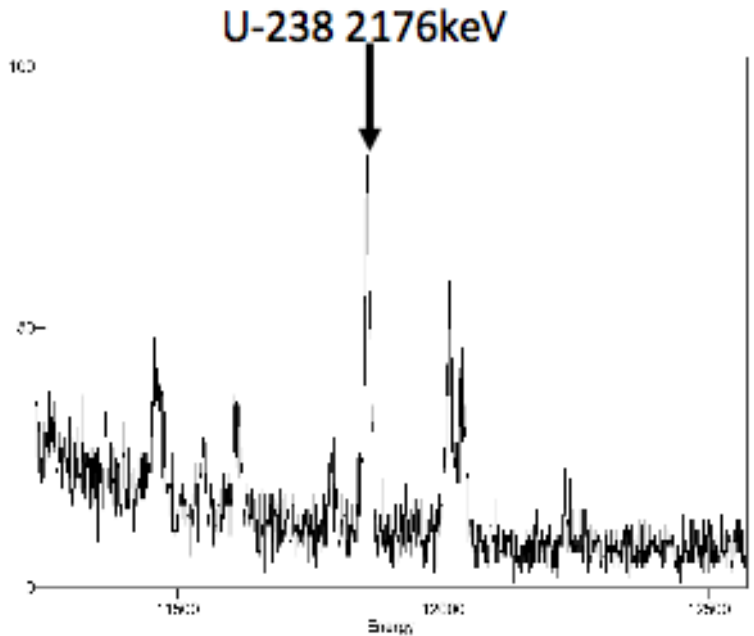
非破壊測定技術として、次世代高輝度のレーザーコンプトン散乱ガンマ線と核共鳴蛍光散乱ガンマ線を用いた手法を提案

Duke大学制御室にて



核物質が取り扱えるDuke大学(米)のレーザーコンプトン散乱ガンマ線でU-235、238、PU-239の核共鳴蛍光散乱

計測した散乱ガンマ線スペクトル



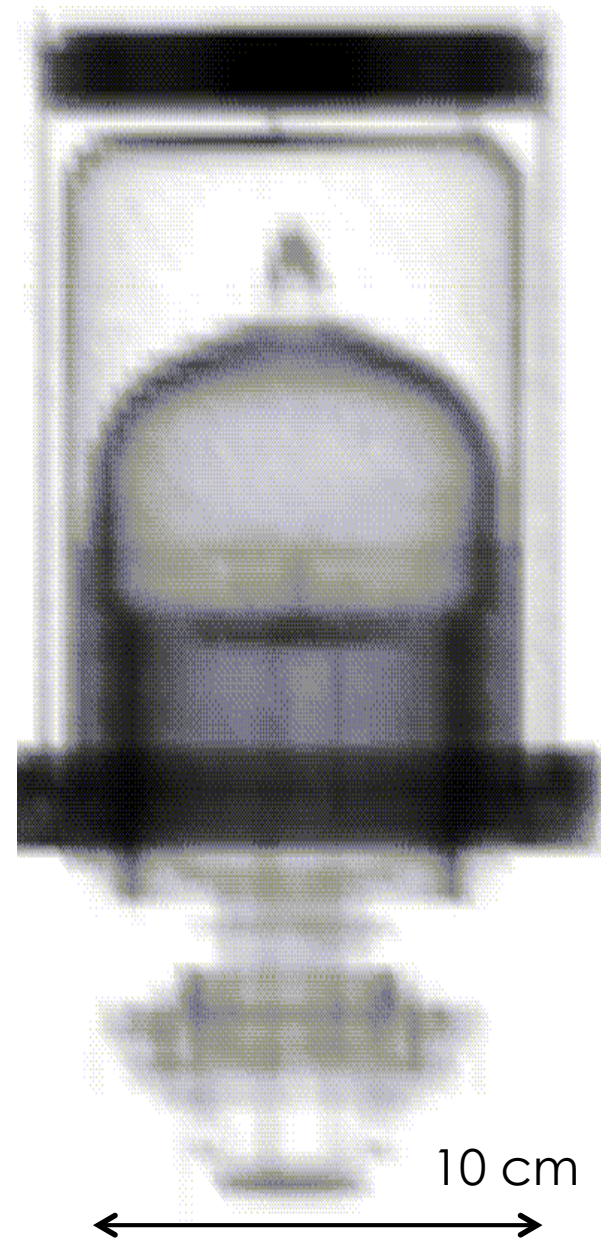
H. Toyokawa et al, IEEE Trans. on NS, vol.49,  
182-187 (2001).

( $\gamma$ , abs)



Courtesy of H. Ohgaki

## LCS-Radiograph



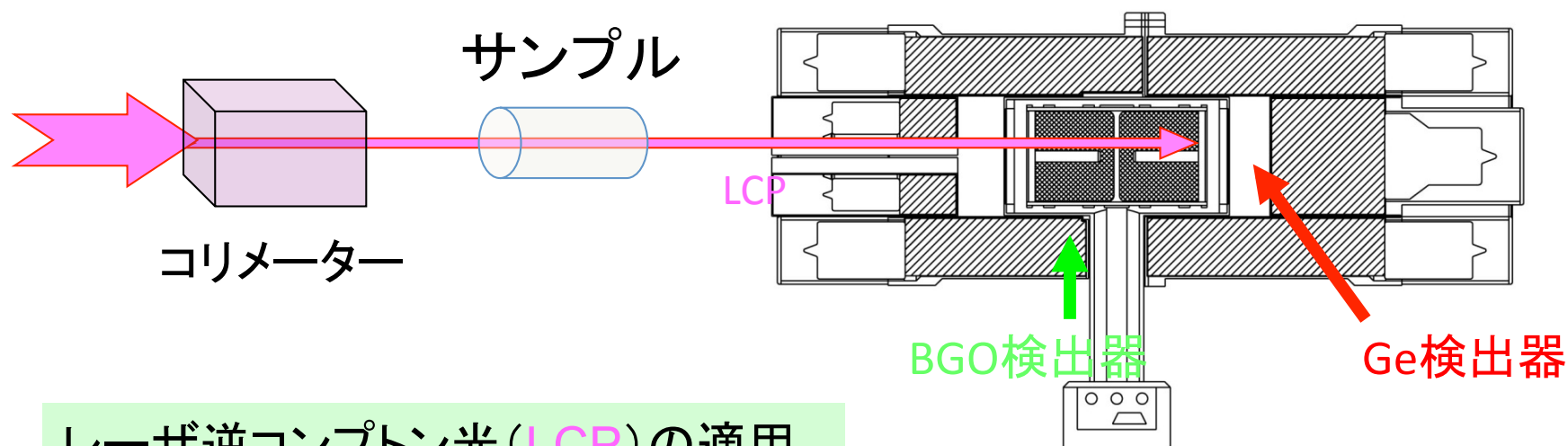
( $\gamma$ , abs)

Courtesy of H. Harada

## 超高分解能光核反応断面積測定手法の開発

準単色ガンマ線ではなく、  
白色光を利用！

Geの複合化技術を応用！



レーザ逆コンプトン光(LCP)の適用

- ・ペンシルビーム形状
- ・エネルギー領域を選択可

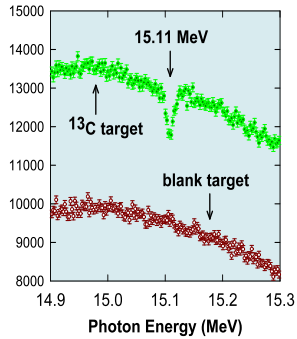
高分解能・高エネルギー光子  
スペクトロメータ(HHS)を開発

新手法の有効性をシミュレーションで確認

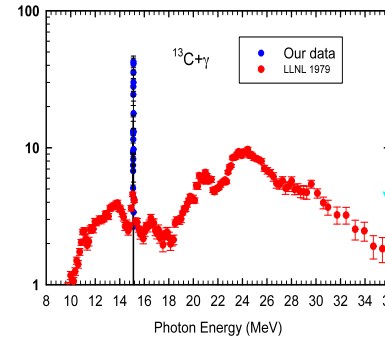
High Energy Resolution Measurement Method of Photonuclear Reaction Cross Section  
H. Harada and Y. Sigetome, *J. Nucl. Sci. Technol.*, 32, 1189-1191 (1995).

( $\gamma$ , abs)

# $^{13}\text{C}(\gamma, \text{abs})$ 反応による超高エネルギー分解能の実証



透過  
スペクトル



ピーク値20倍！

15 keV

LCPスペクトル



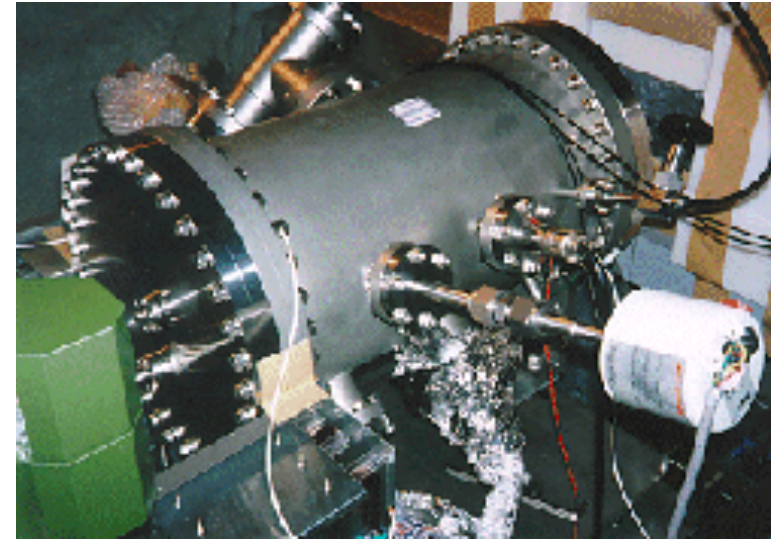
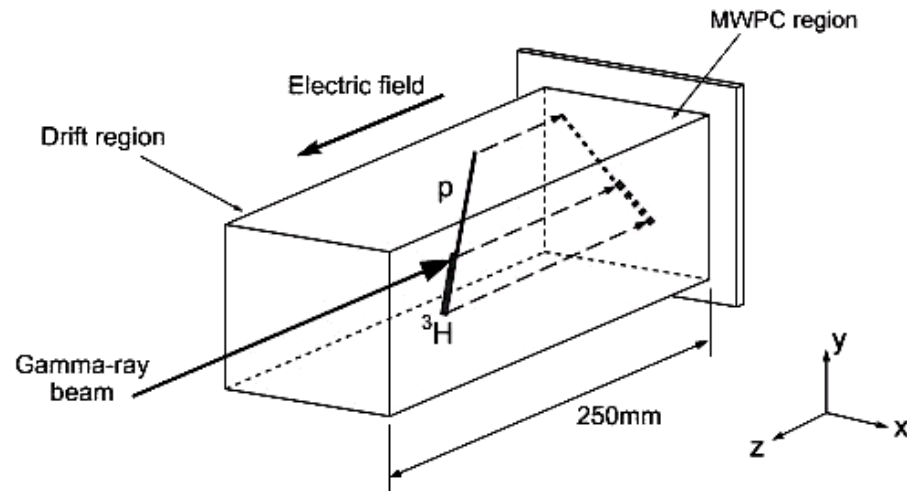
固有幅補正  
エネルギー分解能  
12 keV=0.08%

エネルギー分解能で従来手法のデータを20倍更新

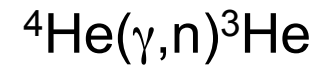
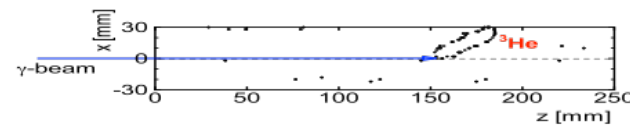
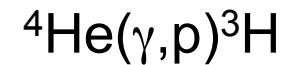
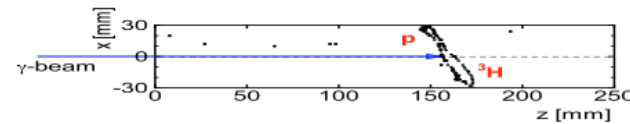
240 keV  $\rightarrow$  12 keV

( $\gamma$ , charged part.)

# Time Projection Chamber as active target

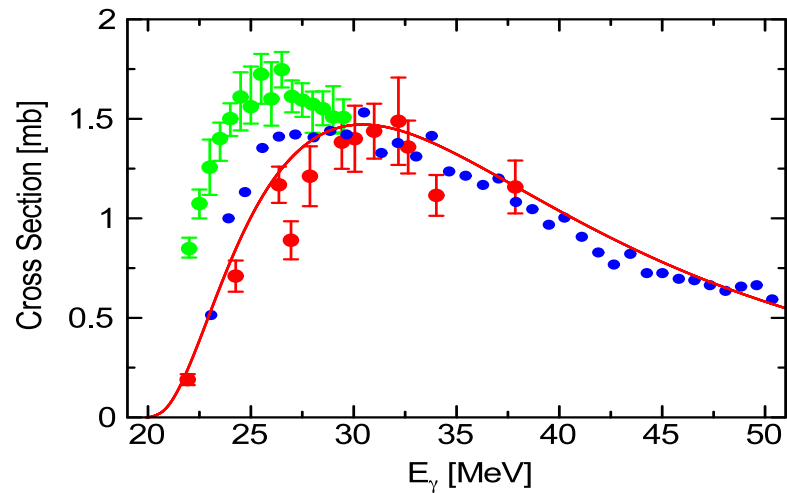


## $^4\text{He}$ photodisintegrations

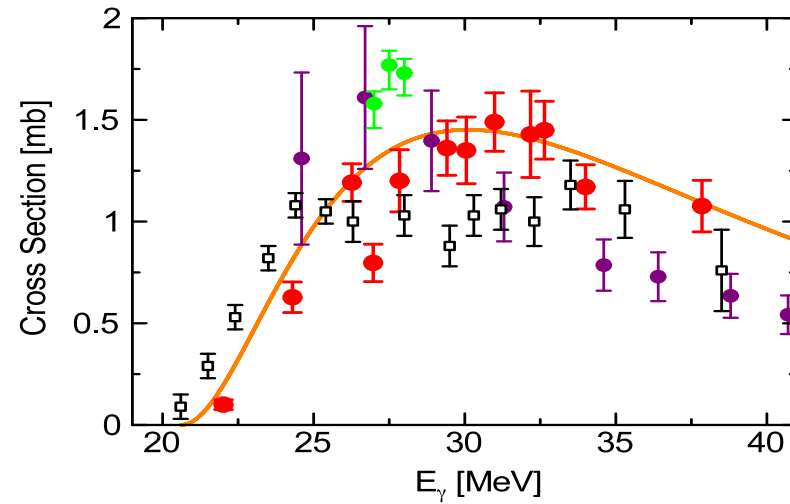




( $\gamma$ , charged part.)



- Duke/HI $\gamma$ S (2012)
- Lund/MAX-Lab (2013)
- RCNP-AIST/LASTI (2014)

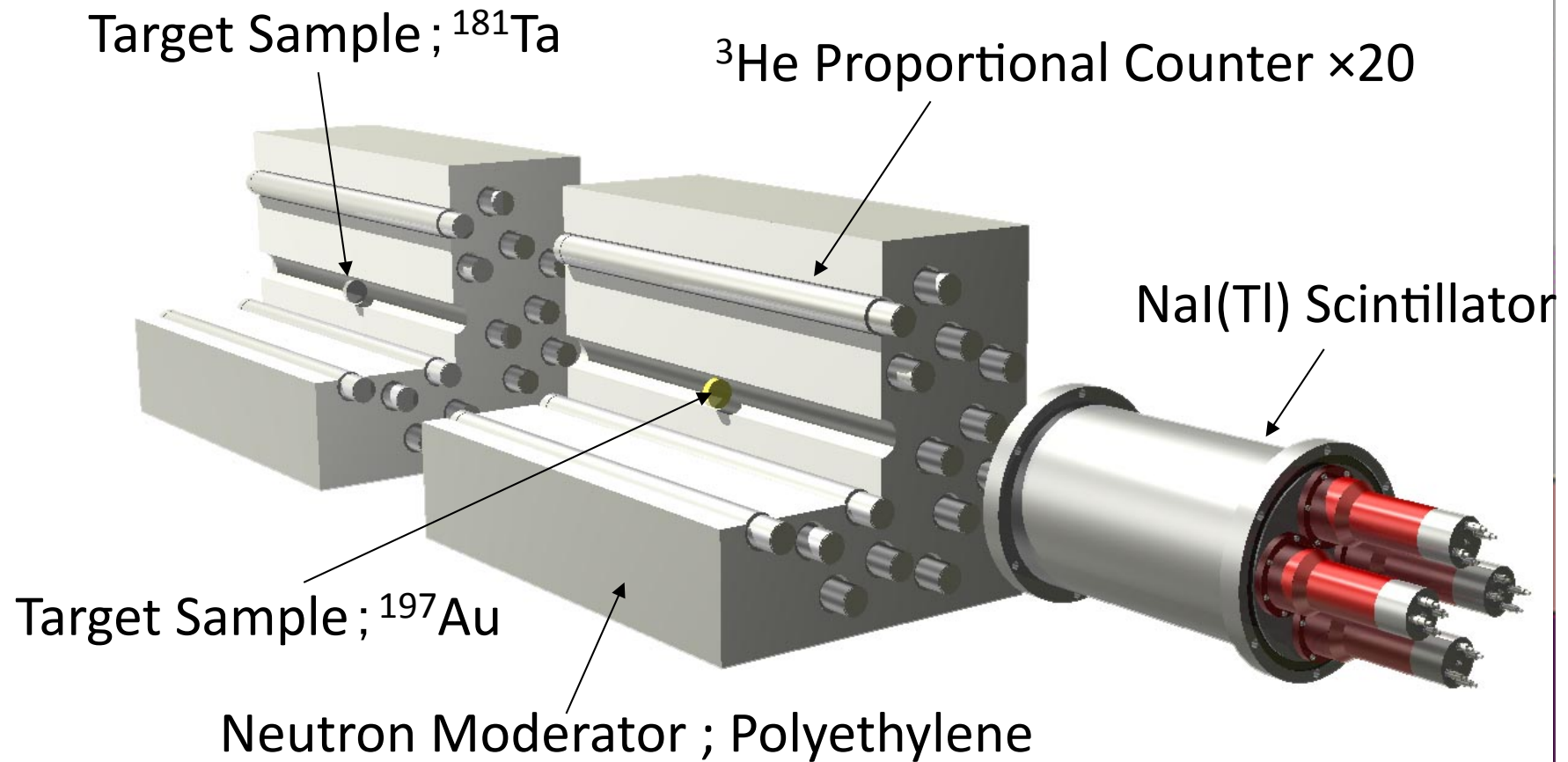


- Berman et al, 1980 (annihilation  $\gamma$ )
- Lund/MAX-Lab 2007 (tagged  $\gamma$ )
- Duke/HI $\gamma$ S 2012 (LCS- $\gamma$ )
- RCNP+AIST, RCNP+NewSUBARU (LCS- $\gamma$ )

(Solid curves --- best fit for our data including energy distribution of LCS- $\gamma$ .)

$(\gamma, n)$

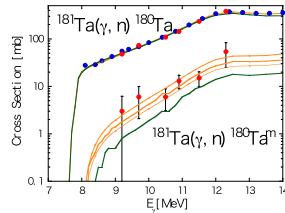
# Experimental Set-up



$(\gamma, n)$

# Experimental results, and comparison with theoretical models

Goko et al. Phys. Rev. Lett. 96, 192501 (2006)



Systematic uncertainties  
10~26%

- Present work (2006)
- IAEA : Lee et al. (1998)

- Combinatorial NLD model
- Statistical NLD model

HF model calculations by S.Goriely (ULB)

( $\gamma, n$ )

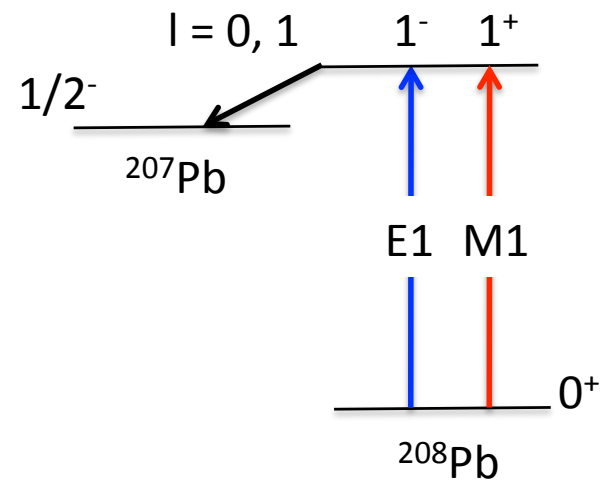
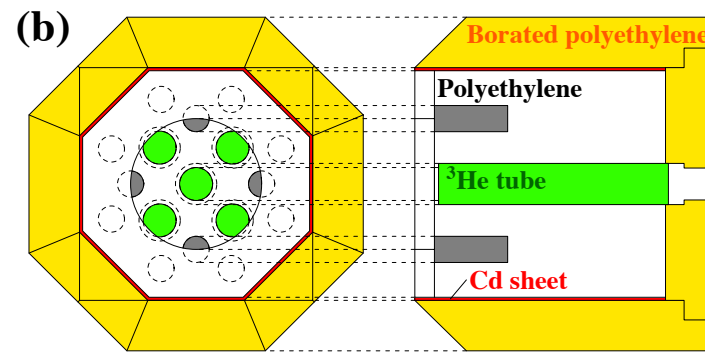
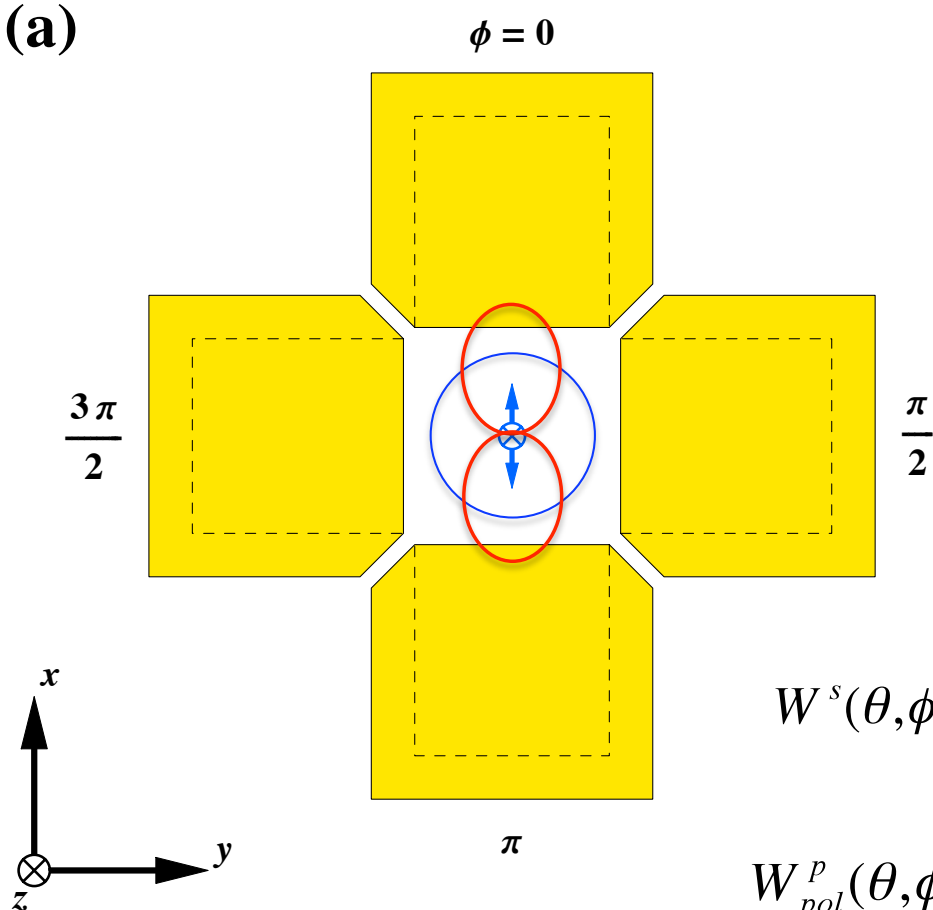
# PDR in $^{207,208}\text{Pb}$ above neutron threshold

T. Kondo *et al.*, *Phy. Rev. C* 86, 014316 (2012)

9587 mg, 98.5%,  $^{208}\text{Pb}$

3482 mg, 99.1%,  $^{207}\text{Pb}$

(a)

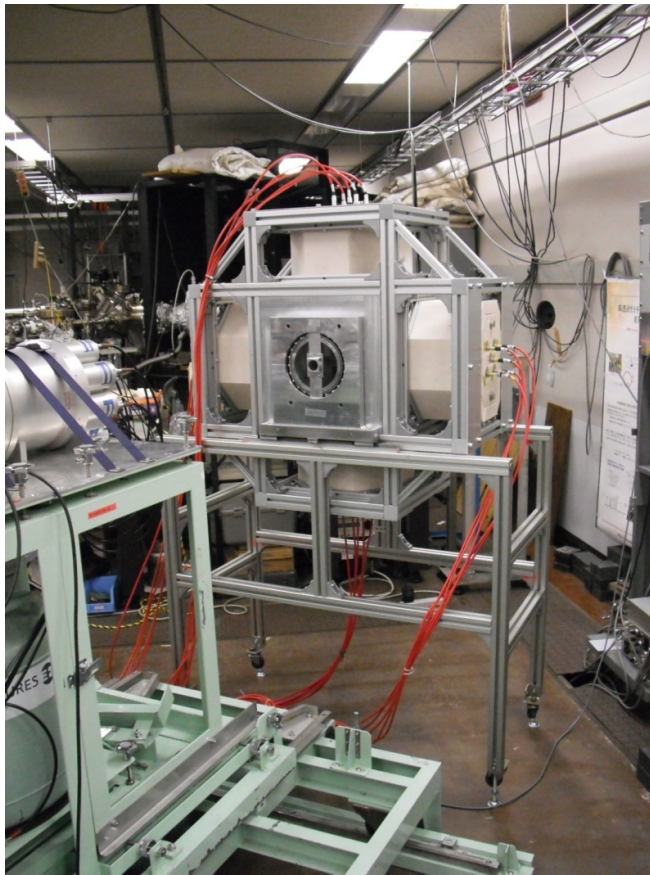


$$W^s(\theta, \phi) = \frac{1}{4\pi}$$

$$W_{pol}^p(\theta, \phi) = \frac{3}{8\pi} [\sin^2 \theta (1 + \cos 2\phi)]$$

$(\gamma, n)$

Neutron anisotropy detector  
for E1 & M1  $(\gamma, n)$  cross section measurements



( $\gamma, n$ )

## E1 cross sections for $^{208,207}\text{Pb}$

HFB+QRPA E1 strength plus  
**pygmy E1 resonance**  
in Lorentzian shape

$$E_0 = 7.5 \text{ MeV}, \Gamma = 0.4 \text{ MeV}$$

$$\sigma_0 \approx 20 \text{ mb for } ^{208}\text{Pb}$$

$$\sigma_0 \approx 15 \text{ mb for } ^{207}\text{Pb}$$

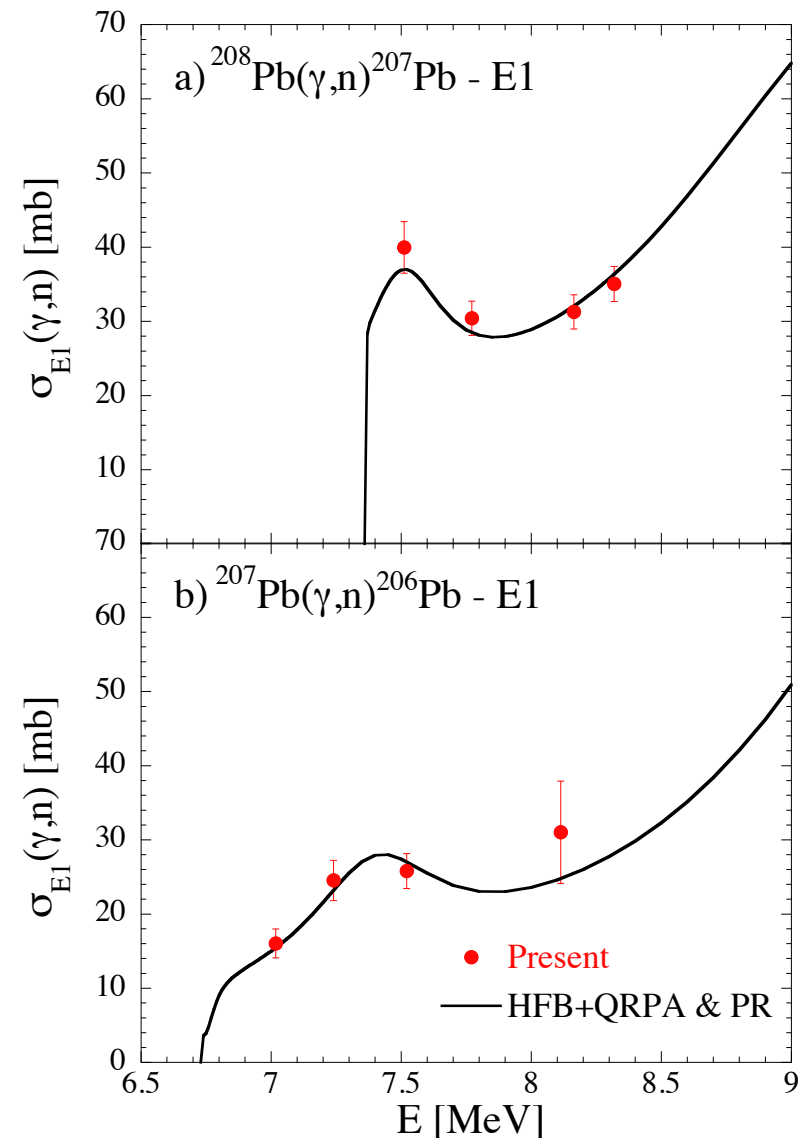
TRK sum rule

0.42% for  $^{208}\text{Pb}$

0.32% for  $^{207}\text{Pb}$

$$\begin{aligned} ^{208}\text{Pb} \quad B(E1) \uparrow &= 0.82 \pm 0.09 e^2 \cdot f \hat{m}^2 \\ E &= 7.51 - 8.32 \text{ MeV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} ^{207}\text{Pb} \quad B(E1) \uparrow &= 0.88 \pm 0.17 e^2 \cdot f \hat{m}^2 \\ E &= 7.02 - 8.32 \text{ MeV} \end{aligned}$$



$(\gamma, n)$

# $\gamma$ -ray Strength Function Method

H. Utsunomiya et al., Phys. Rev. C 80, 055806 (2009)

Indirect determination of  $(n, \gamma)$  cross sections for unstable nuclei  
based on a unified understanding of  $(\gamma, n)$  and  $(n, \gamma)$  reactions  
through the  $\gamma$ -ray strength function

The best understanding of the  $\gamma$  SF with PDR and M1 resonance  
is obtained by integrating

- $(\gamma, n)$  data
- $(\gamma, \gamma')$  NRF data
- Particle- $\gamma$  coin. data , Oslo Method
- Existing  $(n, \gamma)$  data

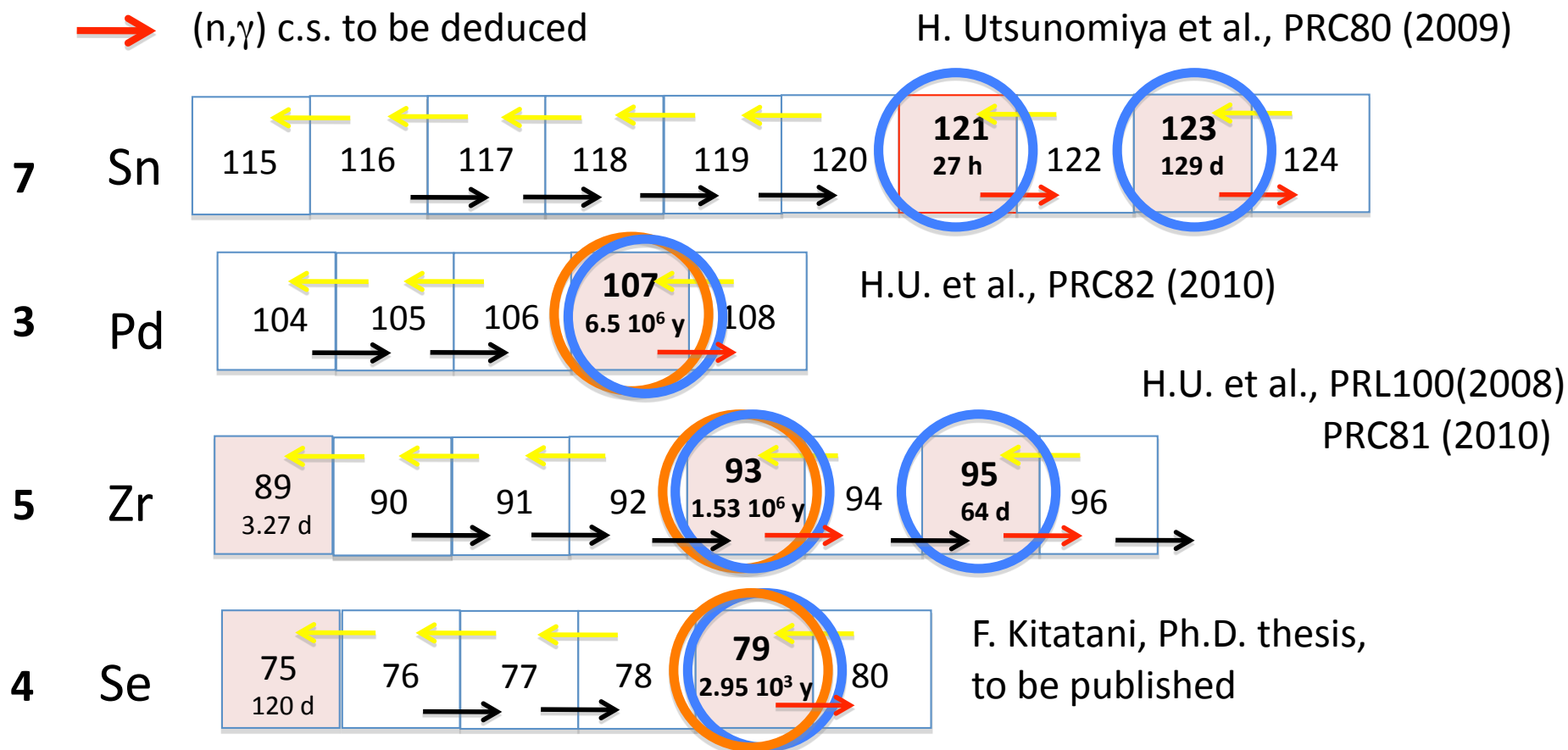
$(\gamma, n)$

# Applications

- ← Present  $(\gamma, n)$  measurements
- Existing  $(n, \gamma)$  data
- $(n, \gamma)$  c.s. to be deduced

○ LLFP (long lived fission products) nuclear waste

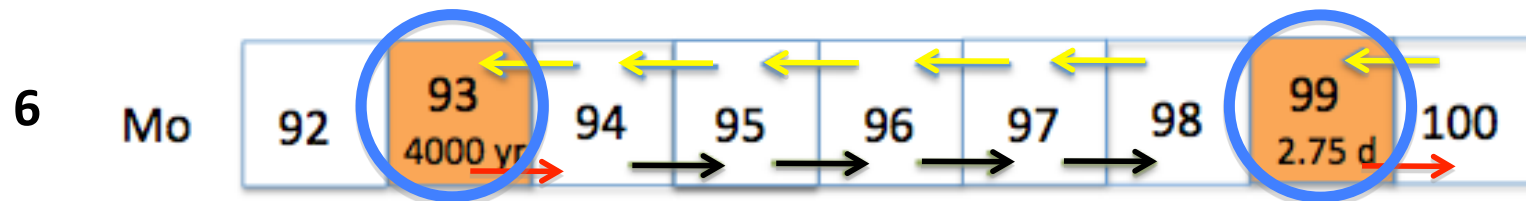
○ Astrophysical significance



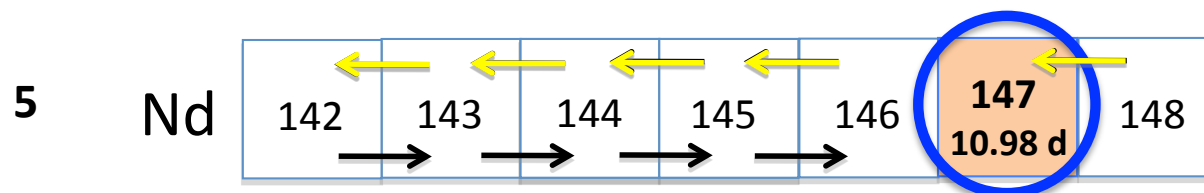


( $\gamma, n$ )

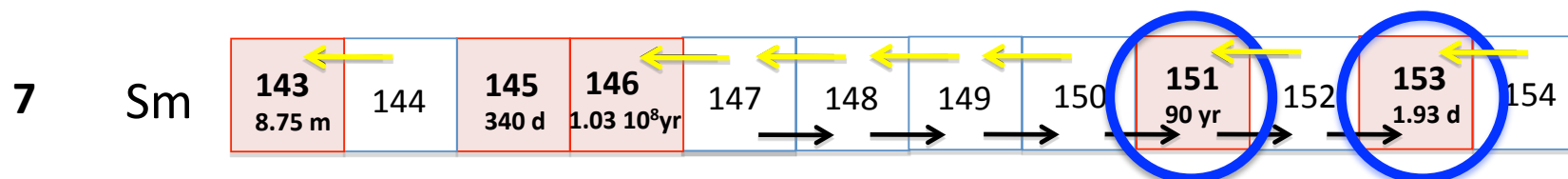
H.U. et al., PRC88 (2013)



In collaboration with Univ. Oslo etc.



In collaboration with ELI-NP etc.



$(\gamma, n)$

## Mo isotopes

$(\gamma, n)$  data

H. Utsunomiya et al., PRC 88 (2013)

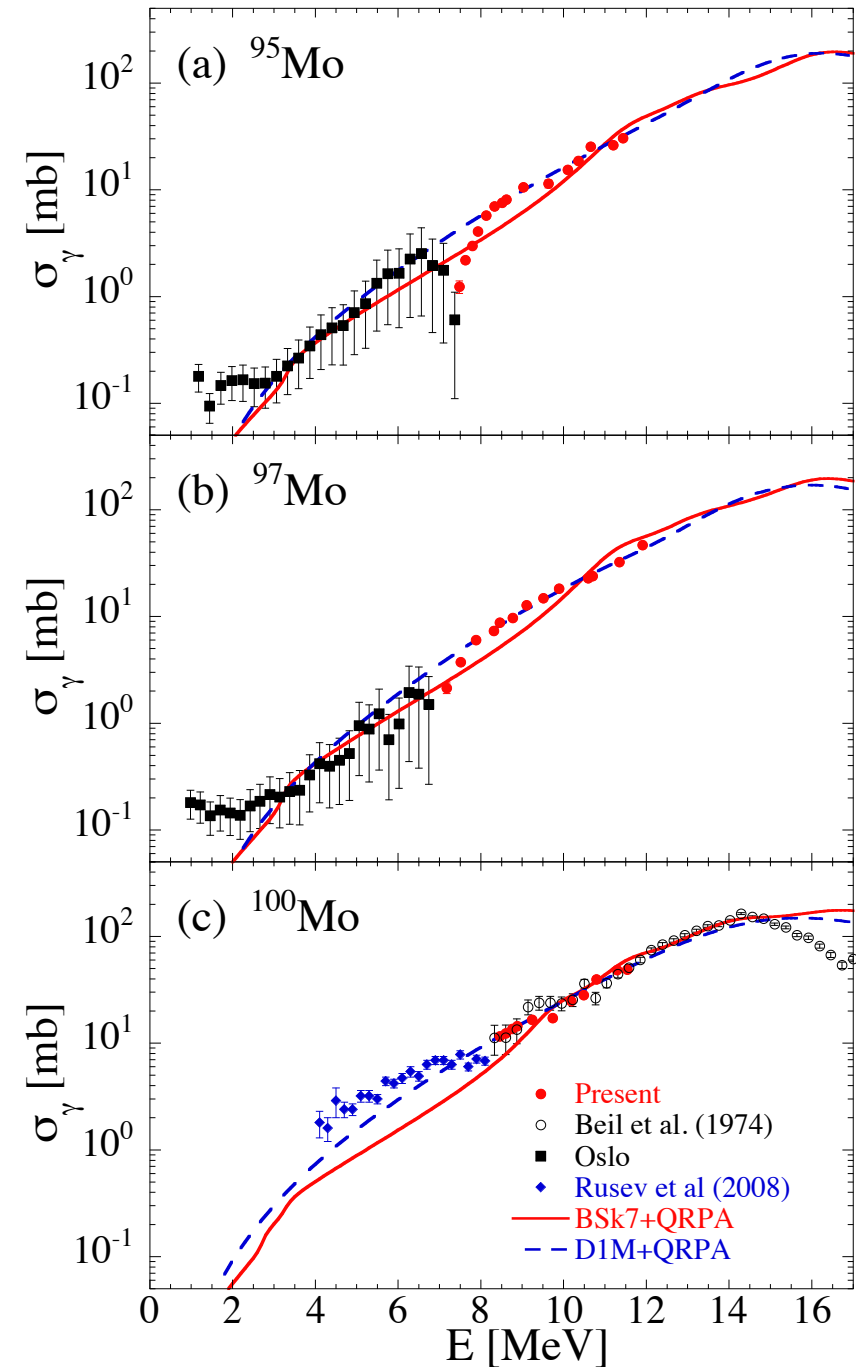
Oslo data

$(3\text{He}, \alpha\gamma)$ ,  $(3\text{He}, 3\text{He}'\gamma)$

M. Guttormsen et al., PRC71 (2005)

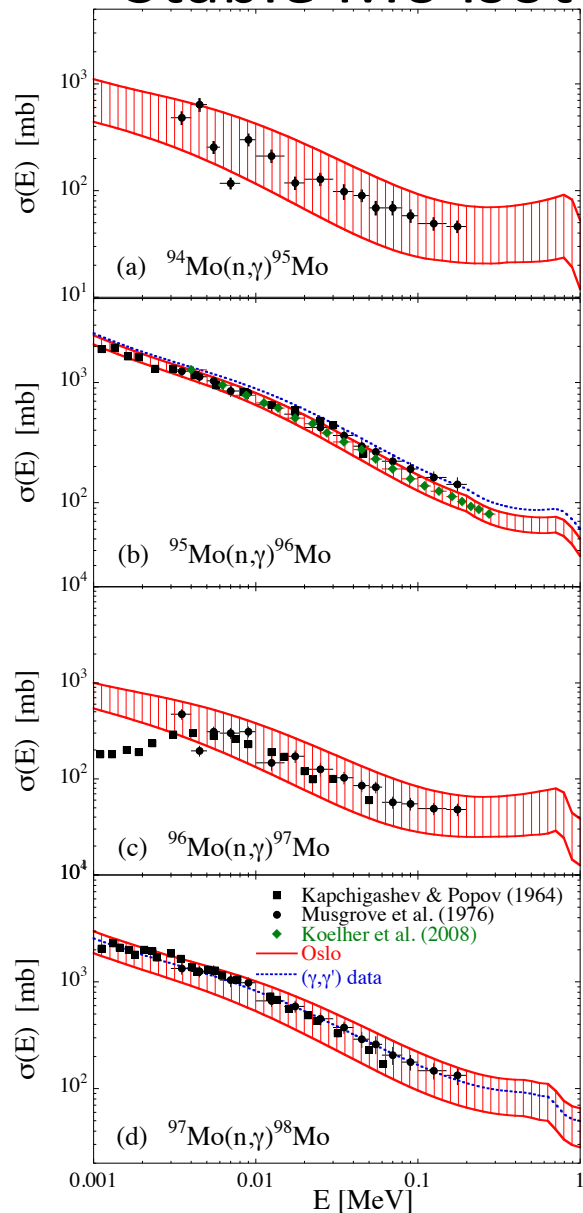
$(\gamma, \gamma')$  data

G. Rusev et al., PRC77 (2008)



$(\gamma, n)$

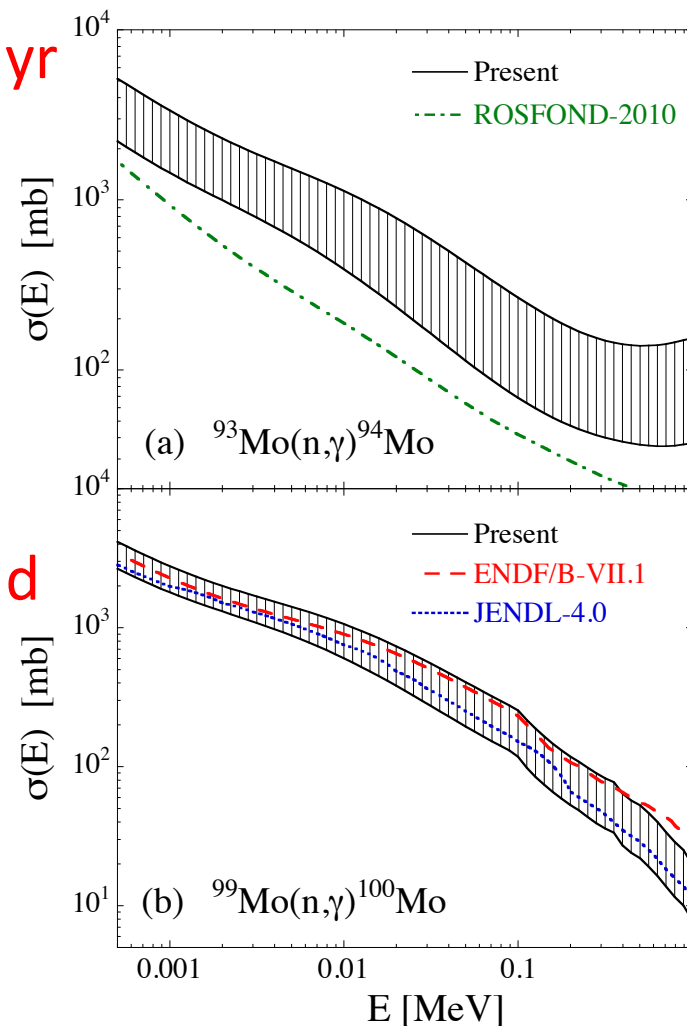
# $(n, \gamma)$ CS for Stable Mo isotopes



$^{93}\text{Mo}$   
 $T_{1/2} = 4000 \text{ yr}$

$^{99}\text{Mo}$   
 $T_{1/2} = 2.75 \text{ d}$

# $(n, \gamma)$ CS for Unstable Mo isotopes



$(\gamma, n)$

## Nucleosynthesis of light nuclei

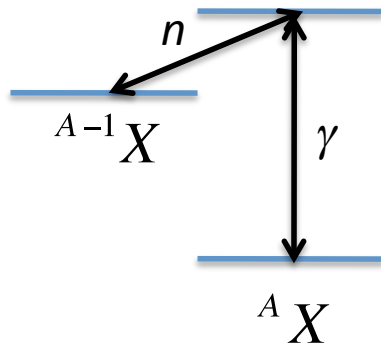
Reciprocity Theorem  $A + a \rightarrow B + b + Q$   
 $B + b \rightarrow A + a - Q$     Q value

$$\frac{\sigma(b \rightarrow a)}{(2I_A + 1)(2i_a + 1)p_a^2} = \frac{\sigma(a \rightarrow b)}{(2I_B + 1)(2i_b + 1)p_b^2}$$

### Neutron Channel

$$a=n, b=\gamma \quad p_\gamma = \hbar k = \frac{E_\gamma}{c} \quad p_n^2 = 2\mu E_n \quad 2j_b + 1 \rightarrow 2$$

Equivalency between  $(n, \gamma)$  and  $(\gamma, n)$



### Applications

Big Bang Nucleosynthesis

$p(n, \gamma)D$  vs  $D(\gamma, n)p$

K.Y. Hara et al., PRD 68, 072001 (2003)

Supernova Nucleosynthesis

$\alpha \alpha \rightleftharpoons {}^8\text{Be}(n, \gamma) {}^9\text{Be}$  vs  ${}^9\text{Be}(\gamma, n) {}^8\text{Be}$

H. Utsunomiya et al. PRC 63, 018801 (2001)

K. Sumiyoshi et al. NPA709, 467 (2002)

# 次世代大強度単色ガンマ線発生技術の原理実証

○JAEA/KEK共同プロジェクト

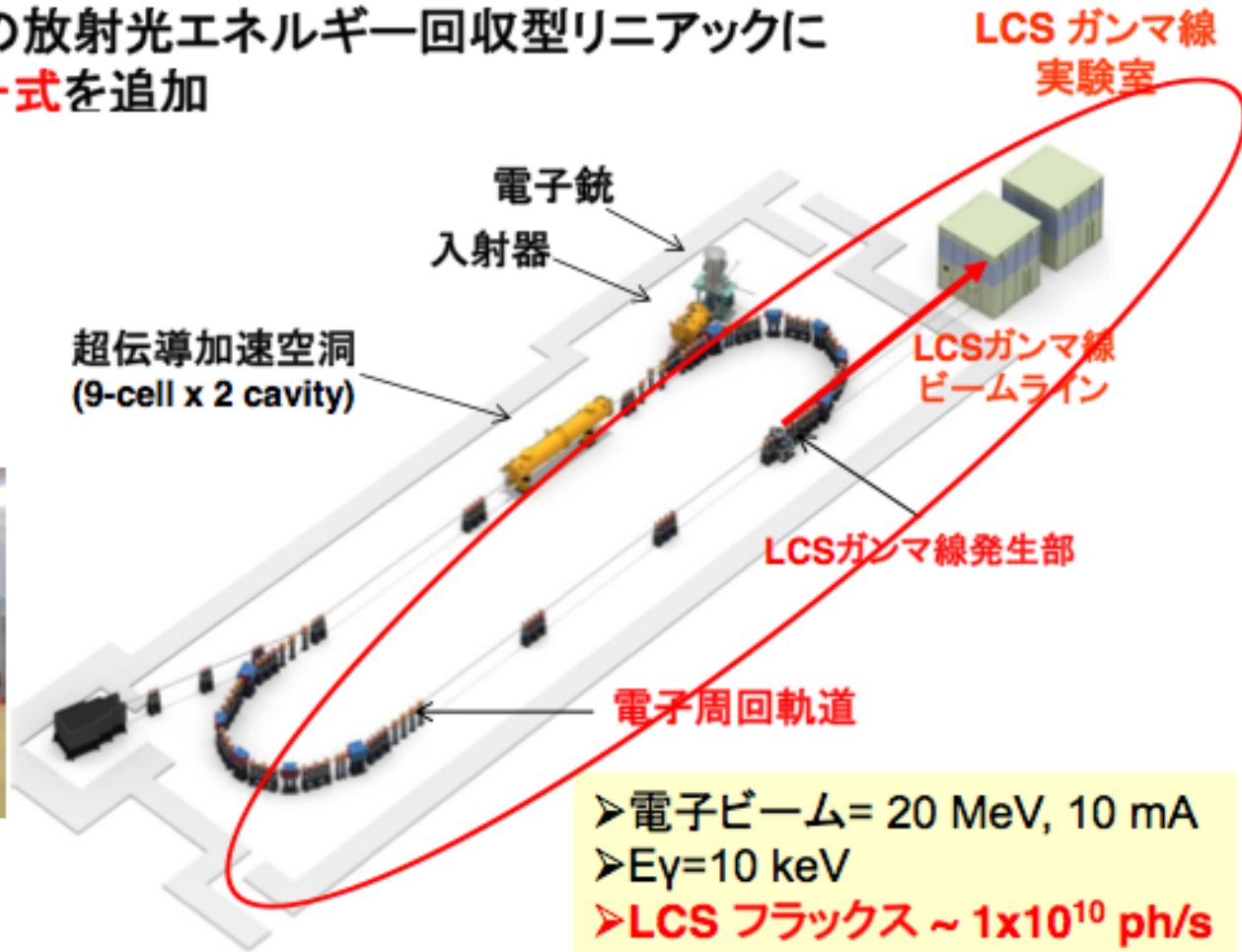
KEKの次世代の放射光エネルギー回収型リニアックに  
LCSガンマ線源一式を追加



ERL開発棟(KEK)  
旧東カウンターホール



電子銃、入射器



- 電子ビーム= 20 MeV, 10 mA
- $E_\gamma=10$  keV
- LCS フラックス  $\sim 1 \times 10^{10}$  ph/s

2015年3月にLCS $\gamma$ 線生成試験を予定

次世代 ( $1 \times 10^{13}$  ph/s) の高輝度LCS $\gamma$ 線装置が建設可能に

# ELI-NP (Europe)

(Extreme Light Infrastructure- Nuclear Physics)

Magurele-Bucharest, Romania

Approved by the European Commission in 2012

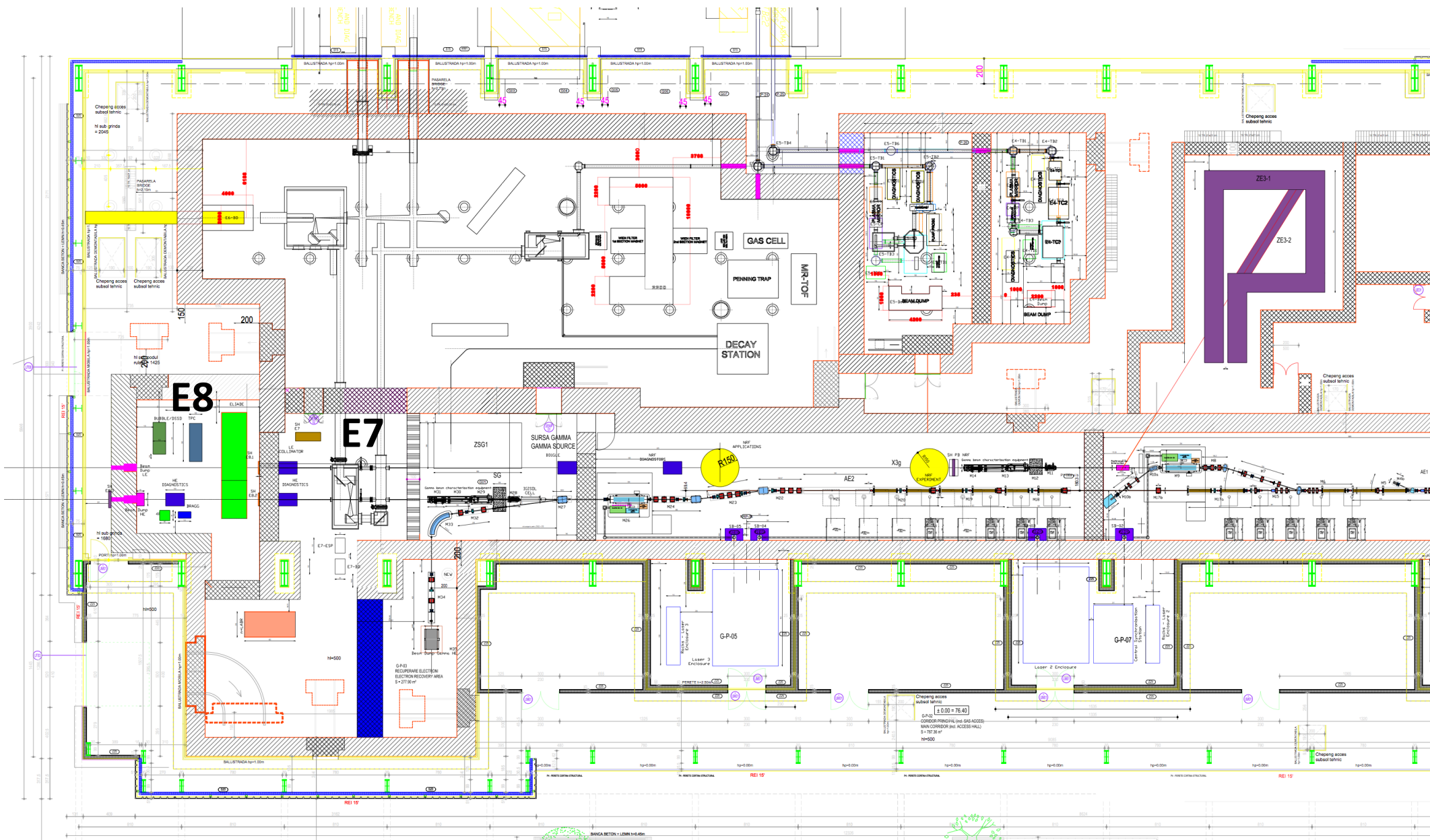
First Experiments in 2018

$$E_{\gamma} = 0.2 - 19 \text{ MeV}$$

$$I_{\gamma} \geq 10^{11} \text{ (s}^{-1} \text{ mm}^{-2} \text{ mrad}^{-2} \text{ 0.1\%}^{-1}\text{)}$$

$$\Delta E/E \leq 0.5\%$$





## 4 Working Groups for Physics at ELI-NP

1. Nuclear Resonance Fluorescence and Applications
2. Gammas Above Neutron Threshold
3. Photofission
4. Charged Particles,  $^{16}\text{O}(\gamma, \alpha)^{12}\text{C}$



# International Collaboration K.O.B.e<sup>-</sup> NewSUBARU-GACKO January & July, 2013

( $\gamma$ ,n) CS

15 nuclei

Sm-154

Sm-152

Sm-150

Sm-149

Sm-148

Sm-147

Sm-144

Nd-148

Nd-146

Nd-145

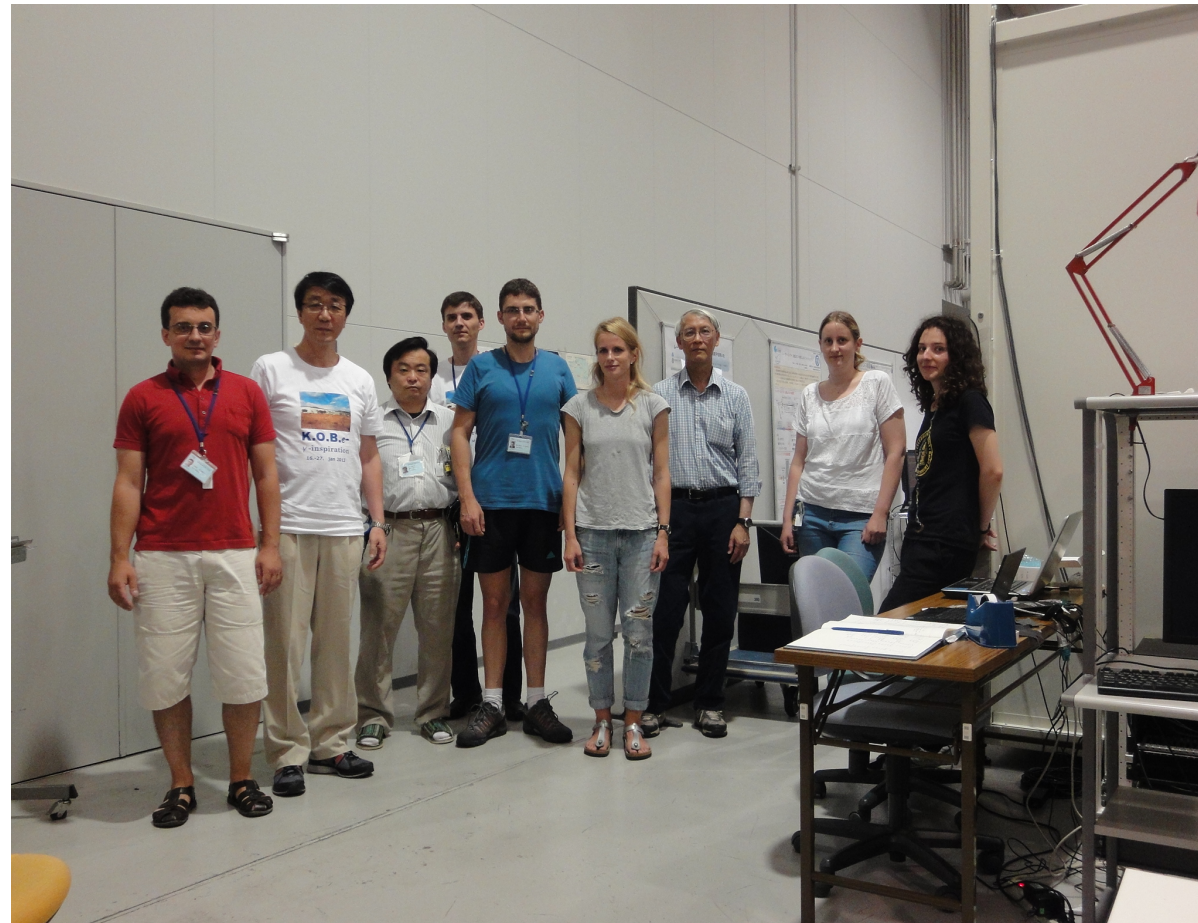
Nd-144

Nd-143

Dy-162

Dy-163

Ge-74



# まとめ

$(\gamma, \gamma')$ ,  $(\gamma, xn)$ ,  $(\gamma, \text{fission})$ ,  $(\gamma, \text{charged particles})$ は主要な研究分野を形成する。

EUの研究インフラELI-NPが建設されている。新たな光核反応研究の幕開けが期待される。

## 日本の現状

ガンマ線利用のコミュニティが小さい。

日本のガンマ線ビーム施設は分散型で、専用の大型施設はない。

## 将来の方向

日本の研究施設と研究スタイル:分散型か集中型か。

ELI-NP型のレーザーとガンマ線を利用する物理分野の形成が可能か。