

# 軽中重核の電気励起と崩壊測定計画: PANDORA

Atsushi Tamii

*Research Center for Nuclear Physics (RCNP)  
Osaka University, Japan*

日本物理学会シンポジウム

「軽中重核の電弱励起・崩壊と宇宙物理」

オンライン開催, 2020.9.17

# PANDORA Project

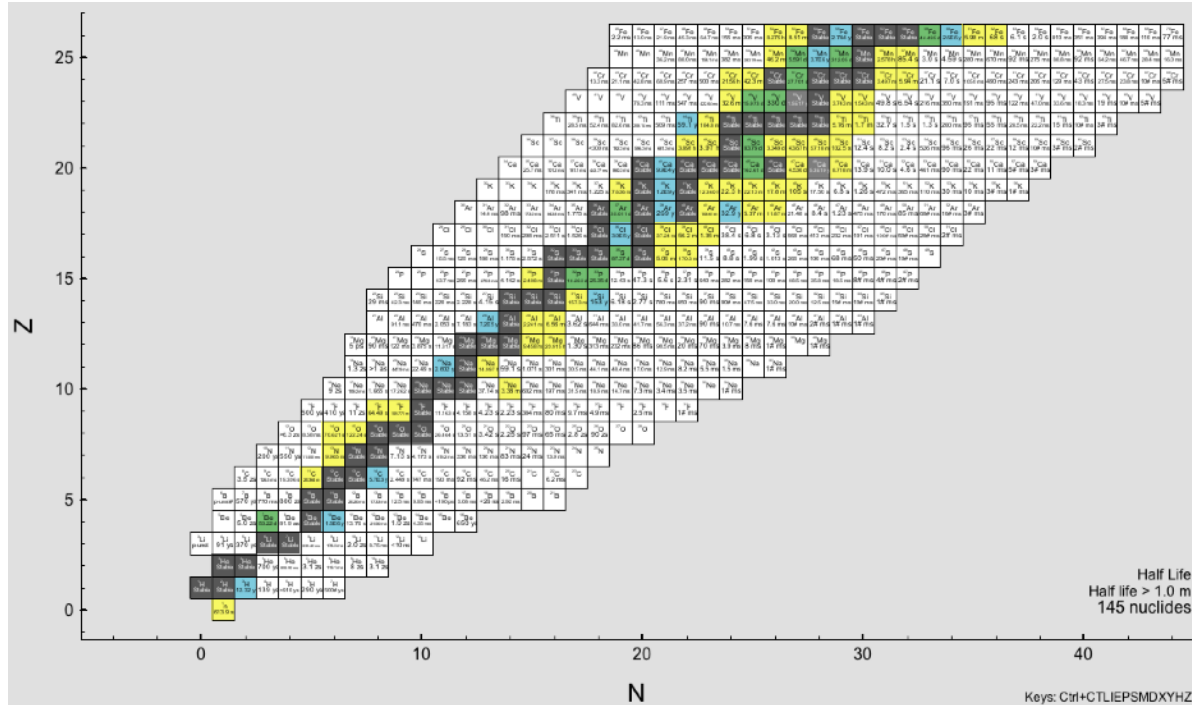
## Photo-Absorption of Nuclei and Decay Observation for Reactions in Astrophysics

光吸収断面積および $n, p, \alpha, \gamma$  崩壊分岐比の系統的測定測定

軽い核から $A \sim 60$ 程度の安定核を対象とする。

理論による系統的記述。

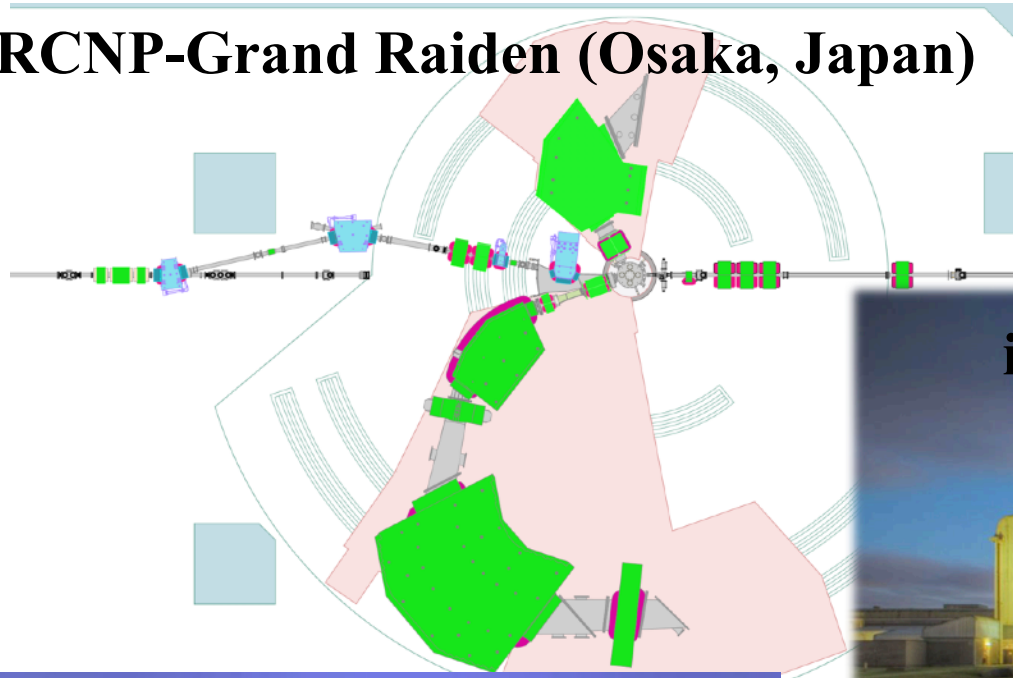
超高エネルギー宇宙線(原子核)の伝搬過程のシミュレーション。



# PANDORA Project

Photo-Absorption of Nuclei and Decay Observation for Reactions in Astrophysics

## RCNP-Grand Raiden (Osaka, Japan)



experiments at three facilities  
with complementary techniques

## iThemba LABS South Africa



## ELI-NP (Romania)



Joint project of nuclear experiment, nuclear  
theory and astrophysical simulation

# PANDORA Project

## Photo-Absorption of Nuclei and Decay Observation for Reactions in Astrophysics

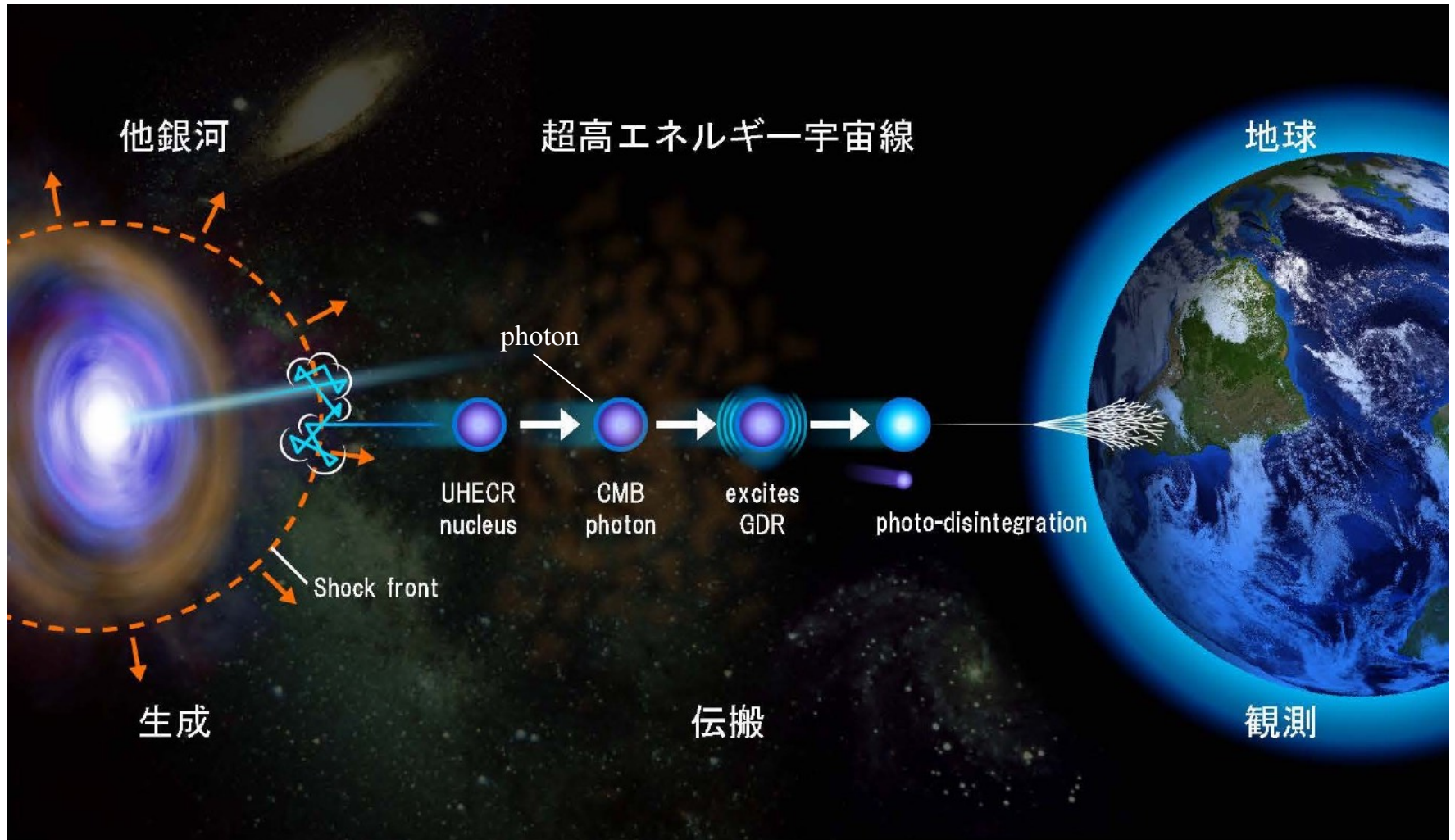
### Motivations: 光核反応の理解

- 超高エネルギー宇宙線(UHECR)の銀河間伝搬の理解
- 核構造
  - 電気双極子励起強度分布: GDR, ピグミー共鳴, 電気分極率
  - 崩壊過程
  - 巨大共鳴の $\gamma$ 崩壊、分散
  - $\alpha$ クラスター構造
- 中性カレントニュートリノ検出に関わる原子核の応答

# PANDORA Project

$A < 60$  核の光核反応の理解が目的

主目的の1つは超高エネルギー宇宙線(原子核)の伝搬過程の定量的記述

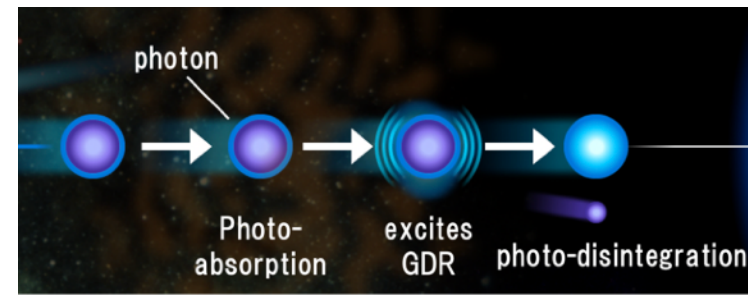


原子核の光反応過程を記述するのは核物理学の仕事である。



# 光核反応

光核反応 = 光吸収による核励起 + 崩壊過程  
として記述



GDR:巨大双極子共鳴

光吸収による核励起  $\simeq$  核の電気双極(E1)励起

$$\sigma_{\text{abs}} = \frac{16\pi^3}{9} \alpha E \frac{dB(E1)}{dE}$$

$\sigma_{\text{abs}}$  : 光吸収断面積

$B(E1)$  : 核の電気双極子(E1)遷移の換算遷移確率

$E$  : 光子のエネルギー = 核の励起エネルギー

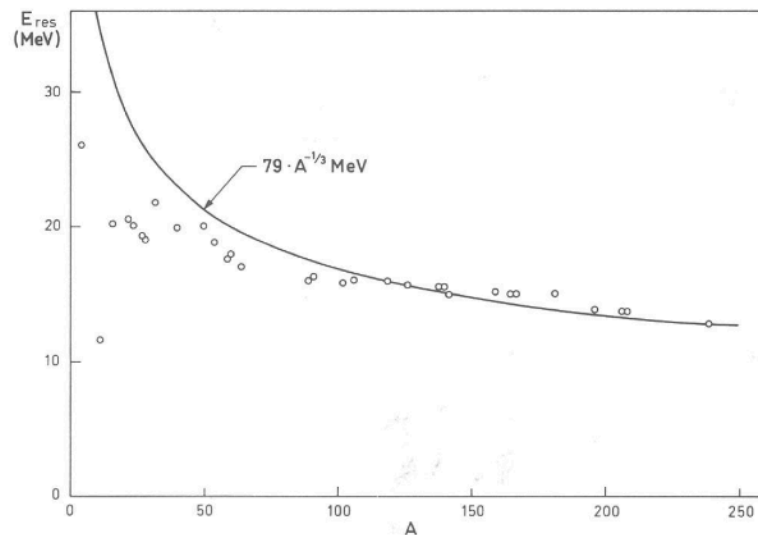
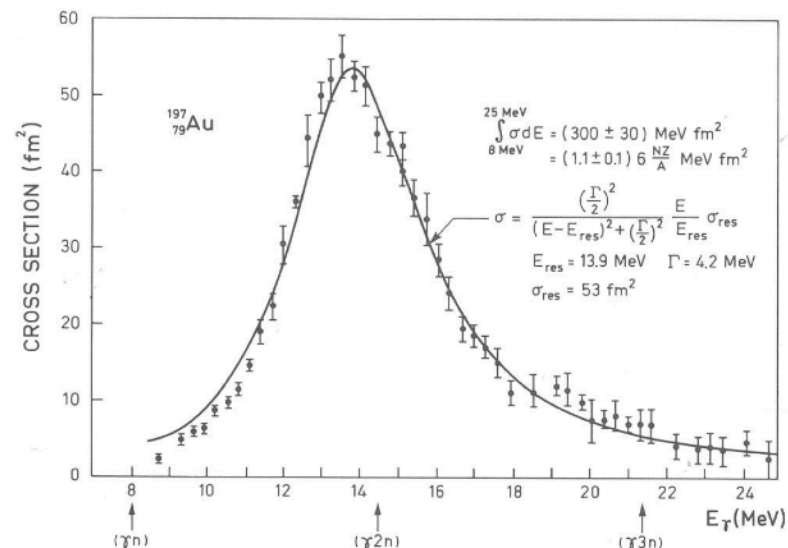
核の光吸収断面積は理解されているか?

# 核の光吸収断面積は理解されているか？

GDRの発見以来調べられてきた。

しかし

- 系統的理解は $A \approx 90$ の重い核に限られる
- 調べられているのは $(\gamma, xn)$ 反応である。



Mainzの $(\gamma, \text{abs})$ データ (Ahrens et al.)があるが、ごく一部の核に限られている。(Li, Be, C, O, Al, Si,  $^{208}\text{Pb}$ )

# 核の光吸収断面積は理解されているか?

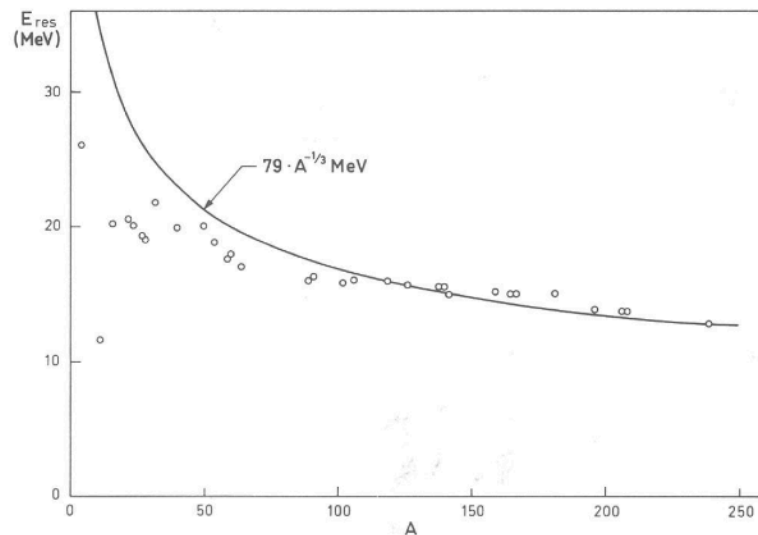
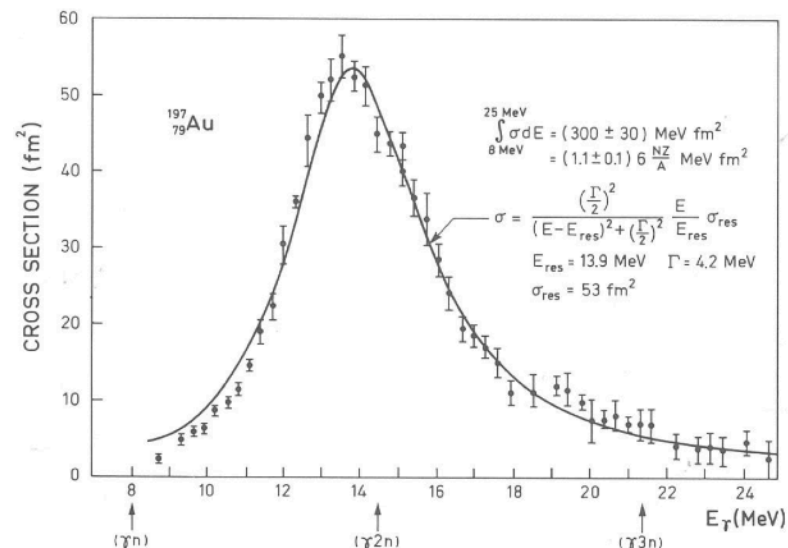
軽中重核では(重い核に比べて)

- 光吸収断面積  $\neq (\gamma, xn)$  反応断面積

陽子・アルファ放出崩壊などが無視できない

- 理論による系統的記述がより複雑

- 殻構造の効果
- 核変形の効果
- $\alpha$  クラスター効果
- np ペアリング
- ...





# 核の光吸収断面積は理解されているか?

軽中重核では(重い核に比べて)

- 光吸収断面積  $\neq$   $(\gamma, xn)$  反応断面積

陽子・アルファ放出崩壊などが無視できない

- 理論による系統的記述がより複雑

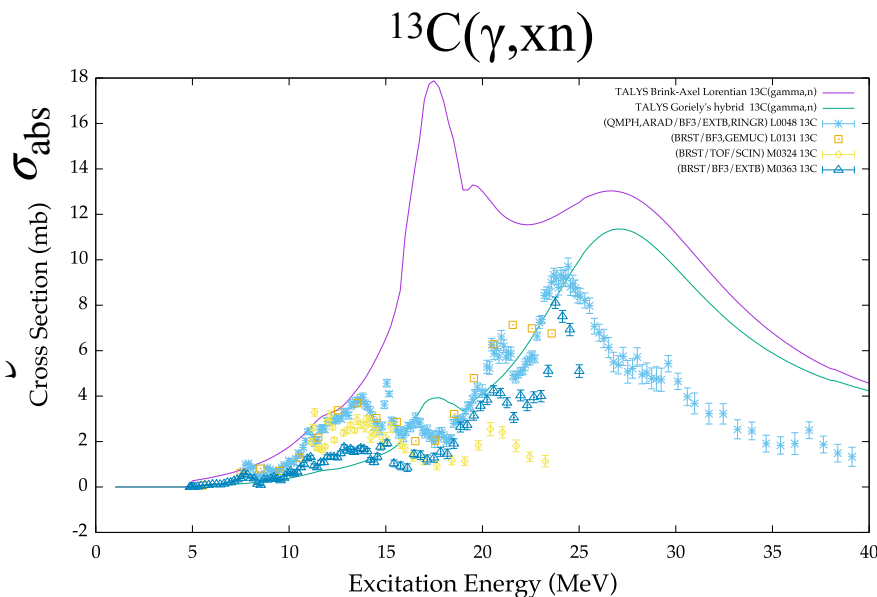
- 殻構造の効果
- 核変形の効果
- $\alpha$  クラスター効果
- npペアリング
- ...

- 崩壊過程: 統計崩壊模型が主体

軽い核でも成り立つのか?

前平衡過程の寄与は?

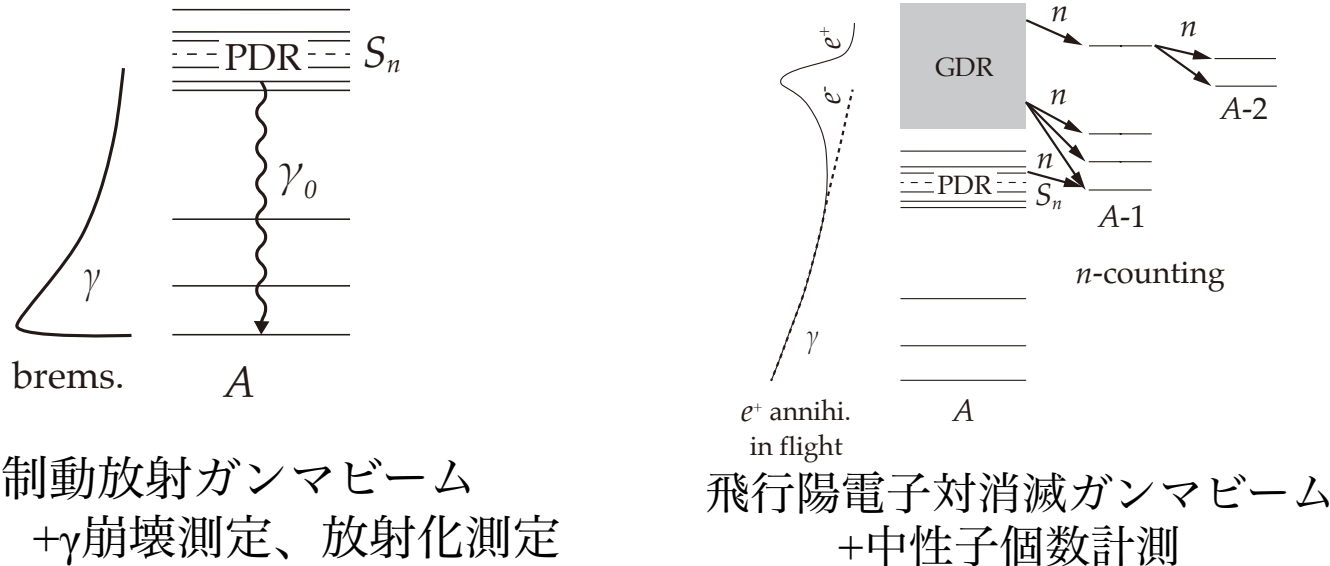
アイソスピン保存則、 $\alpha$  クラスター(崩壊)etc



$^{13}\text{C}(\gamma, xn)$  反応の光吸収断面積の実験データ (EXFOR データベース) とコード TALYS による計算値 (実線  $\times 2$ )  
他の核も似たような状況 & データが少ない。

- 理論予測の精度が悪い  
(重い核を中心にパラメータ化されている。)
- 実験データ間の不一致が非常に大きい
- 実験データが少ない。

# なぜ実験データの精度が非常に悪いのか?

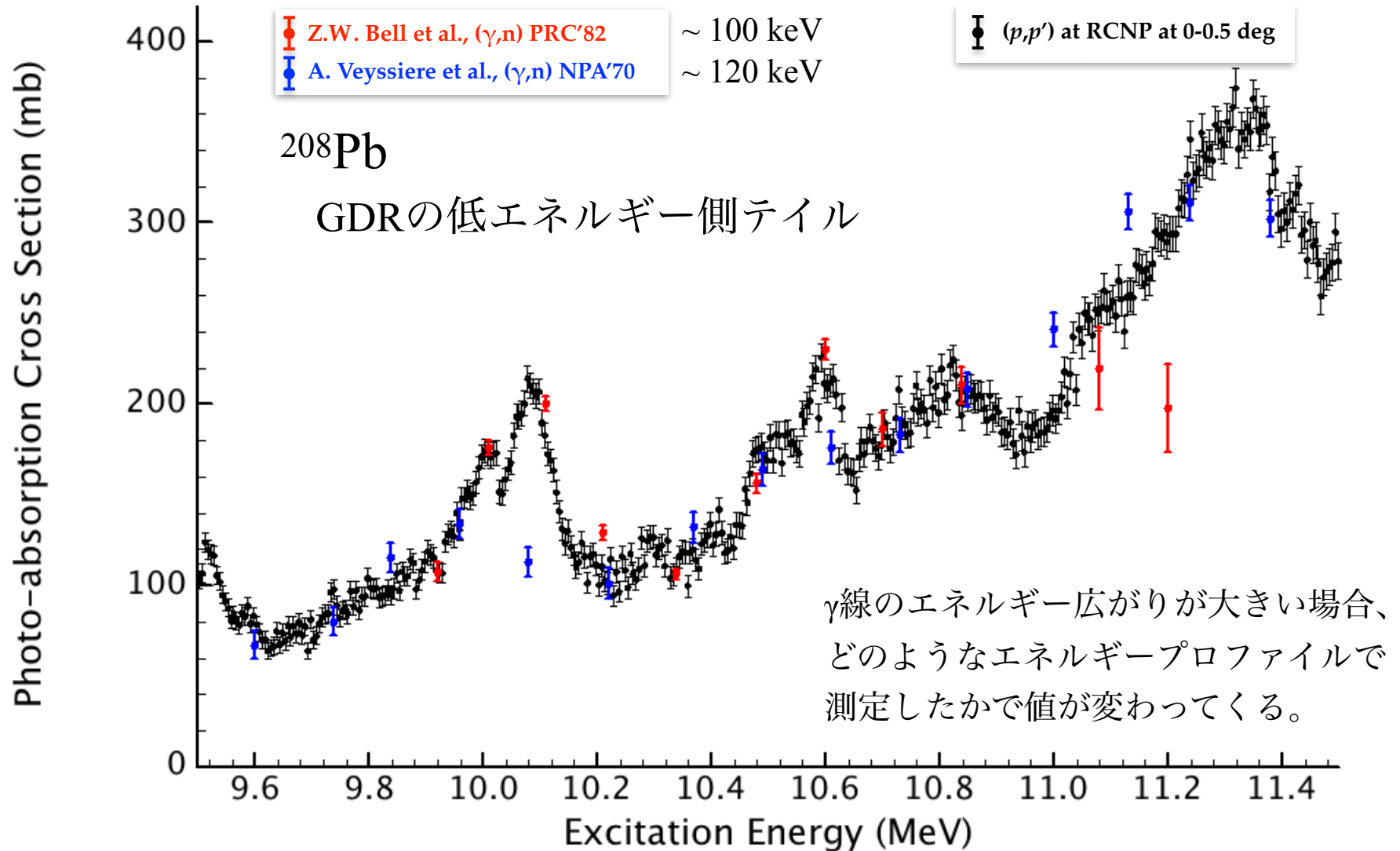


歴史的的手法

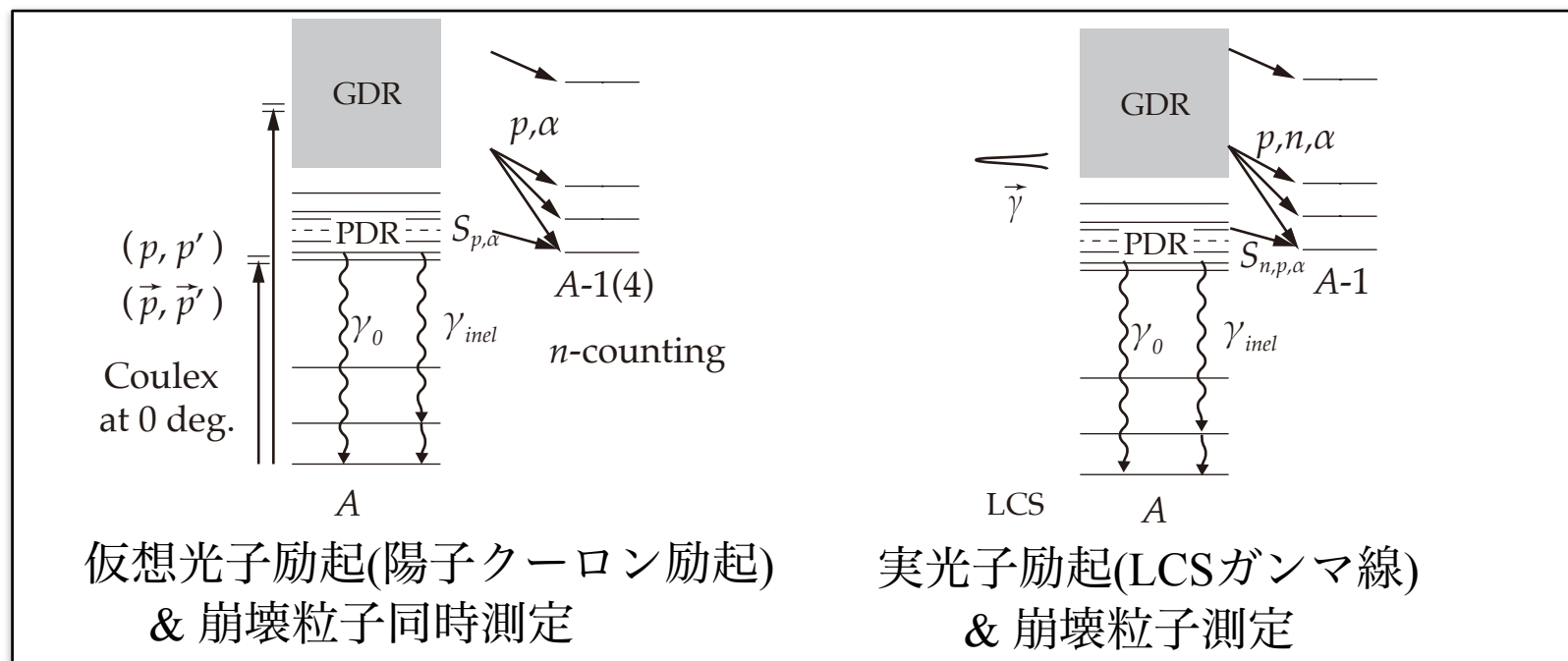
- 制動放射ガンマ線は連続分布である。  
電子ビームエネルギーを変えたデータの差分をとる過程で系統誤差が大きくなりやすい。  
 $\gamma$ 崩壊測定では基底状態への遷移のみ計測
- 飛行陽電子対消滅ガンマ線  
制動放射成分を消すため、 $e^-e^+$ の差を取る必要がある。  
中性子個数計測では、中性子エネルギーに依存しない一様検出効率の達成が重要。
- $\gamma$ ビーム強度が低いため、薄い標的が必要な荷電粒子崩壊測定が難しい。
- エネルギー分解能がよくない  $\approx 500$  keV

# エネルギー分解能も重要である

微細構造の存在

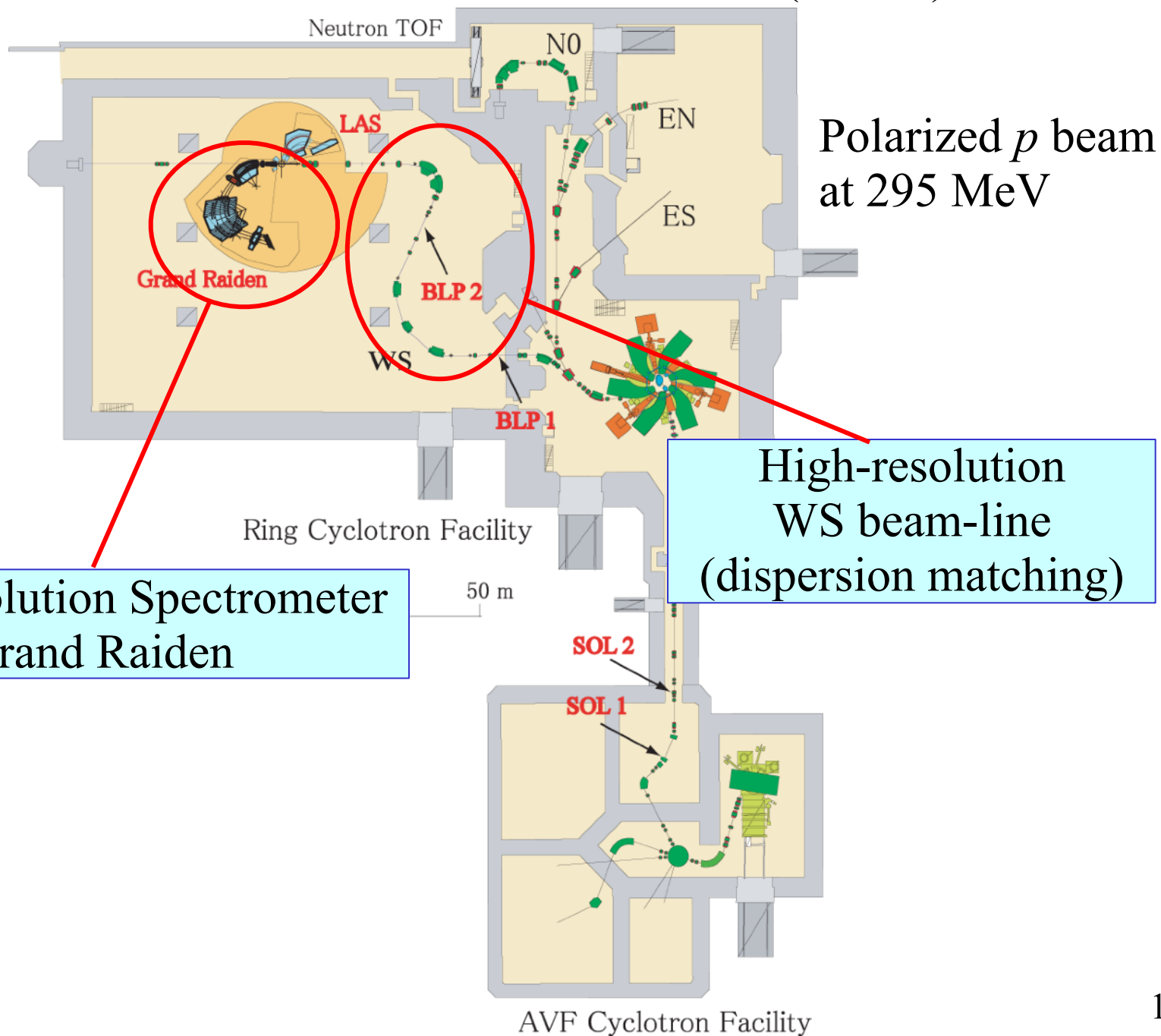


# 近年の新しい実験手法



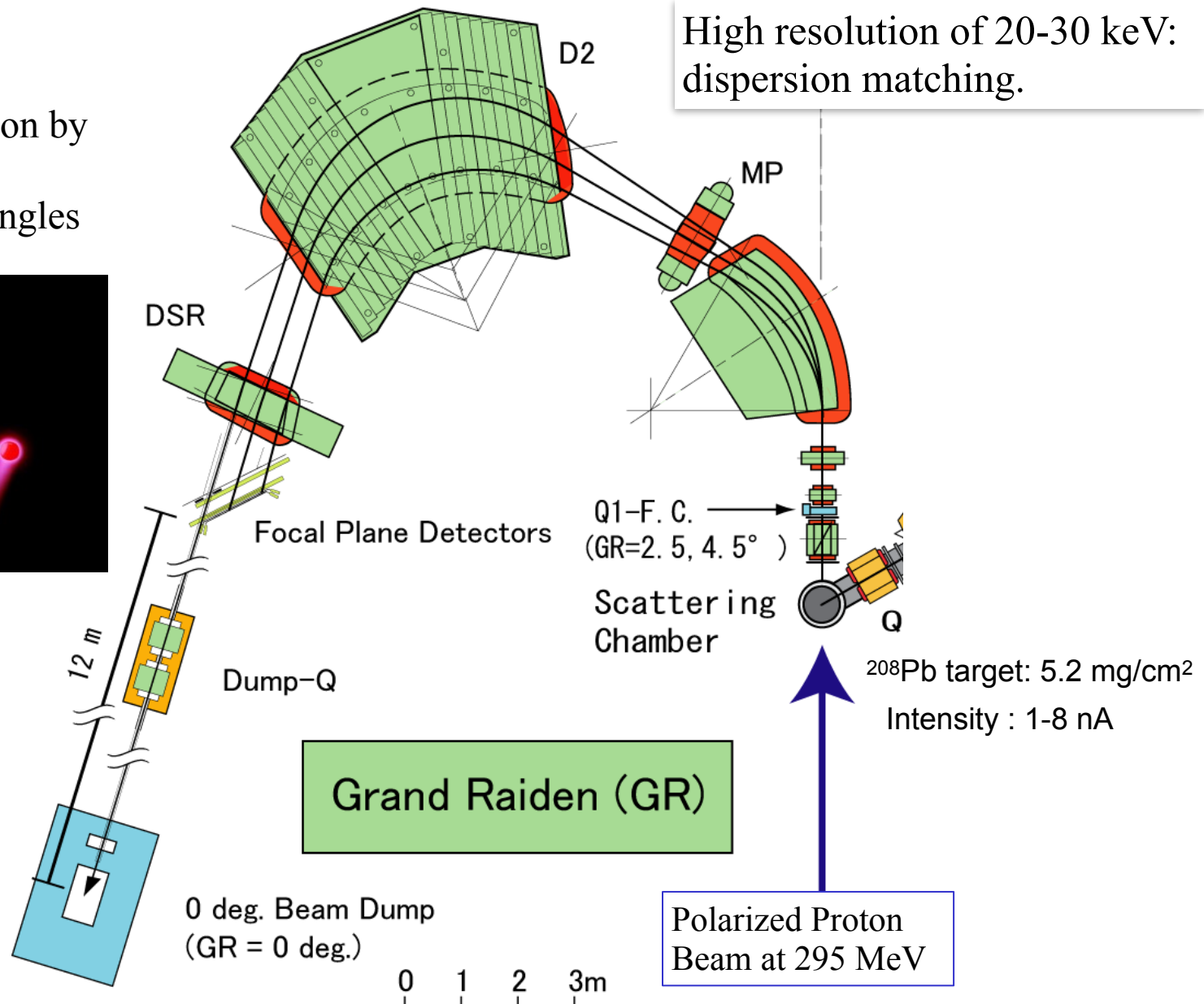
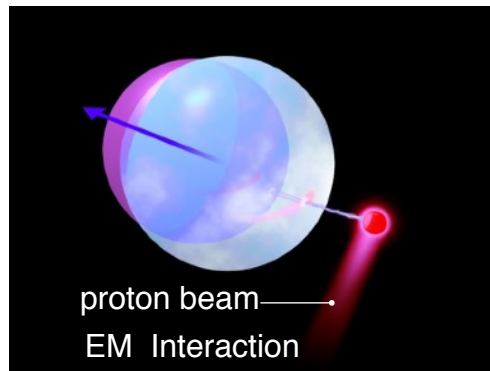
- 仮想光子励起(陽子クーロン励起) at RCNP, iThemba LABS  
 散乱陽子の検出で励起状態をタグできる。全光吸収断面積が測定可能。  
 エネルギー分解能  $\sim 30$  keV  
 崩壊荷電粒子& $\gamma$ の同時計測で、崩壊分岐比を測定できる。  
 散乱断面積が大きく薄い標的で測定可能。同位体濃縮標的・荷電粒子崩壊計測。
- 実光子励起(LCSガンマ線) at ELI-NP  
 高強度ビーム: 同位体濃縮標的・荷電粒子崩壊計測。  
 高エネルギー分解能  $\sim 50$  keV  
 励起強度の絶対値を精度良く決められる

# 実験手法: 核物理研究センター(RCNP)

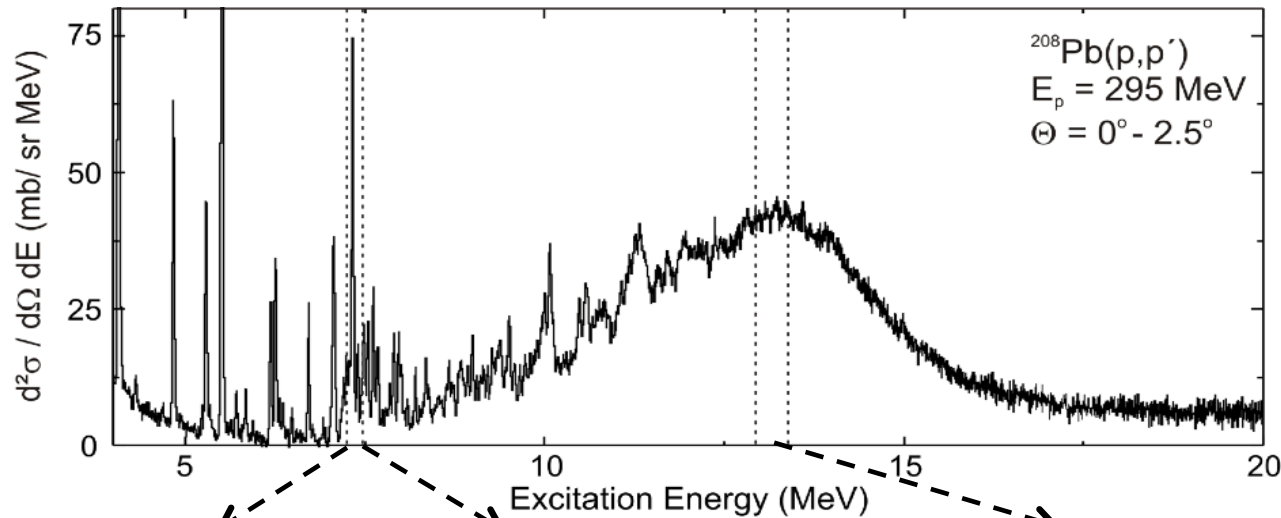


# High-Resolution Spectrometer Grand Raiden in 0-deg mode

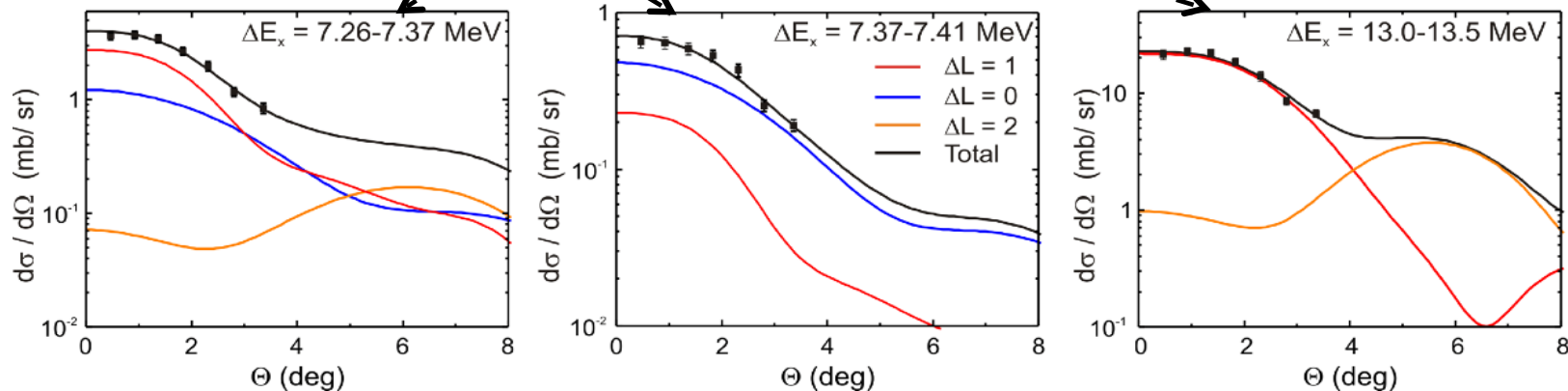
Coulomb excitation by  
proton scattering  
at very forward angles



# 陽子散乱断面積からのE1成分の抽出



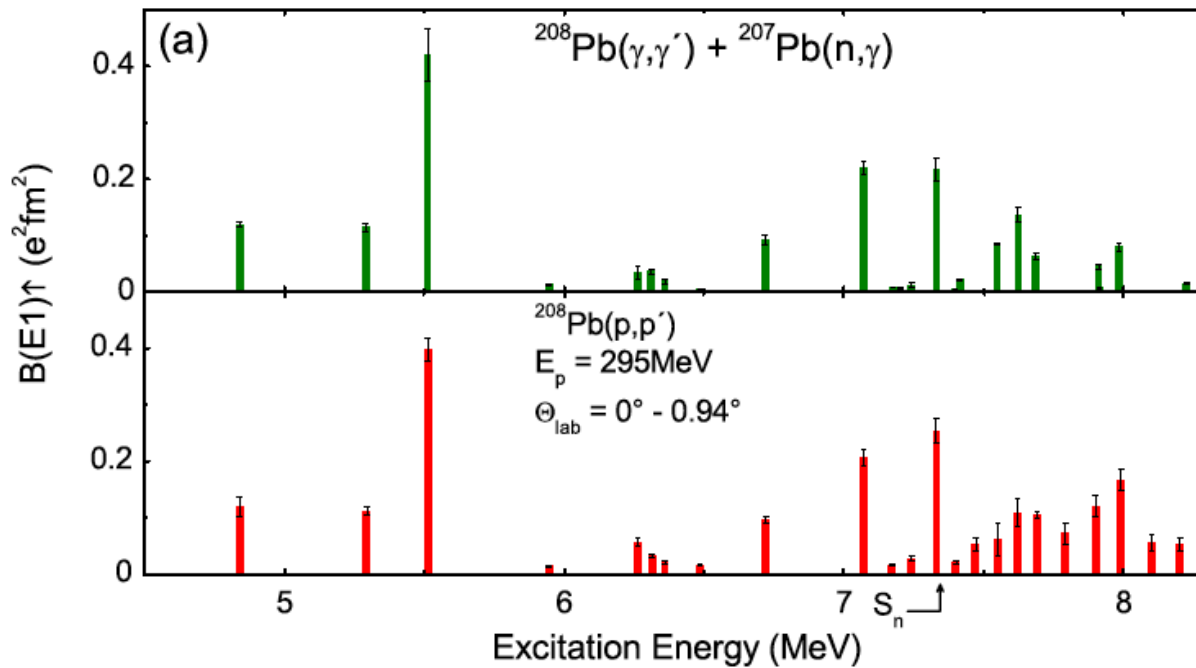
$E_p = 392 \text{ MeV}$ で  
 $E_x \sim 32 \text{ MeV}$ まで  
 測定可能



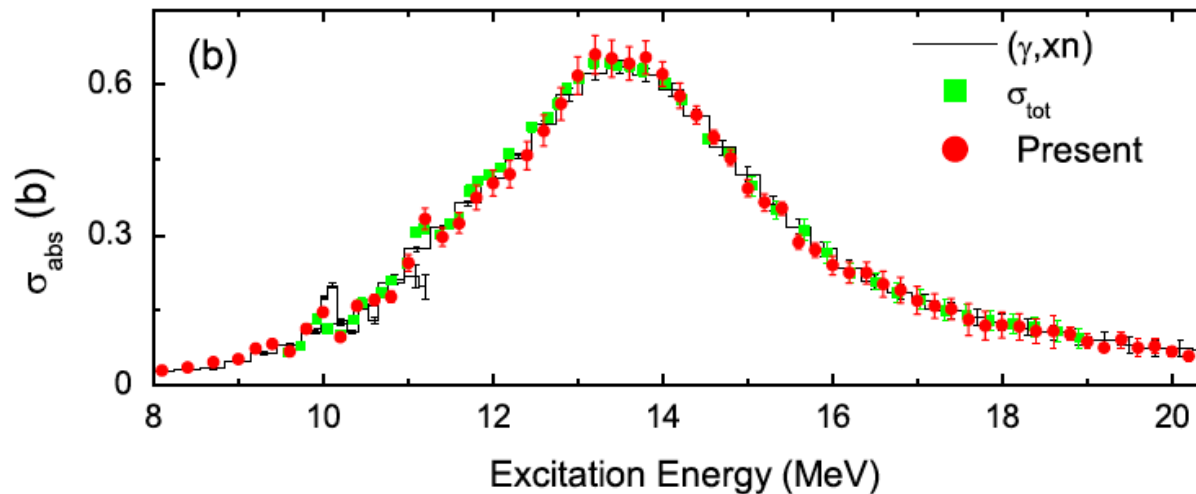
- E1成分の分離が必要: 角分布解析(MDA) or 偏極移行量解析  
 MDAと絶対値較正の信頼性はELI-NPデータとの比較を通して検証する
- E1のみでなく、spin-M1, SDRなどのNCニュートリノ応答に関わるデータも同時に測定。



# 実光子ビームデータとの比較( $^{208}\text{Pb}$ )



low-lying  
discrete states



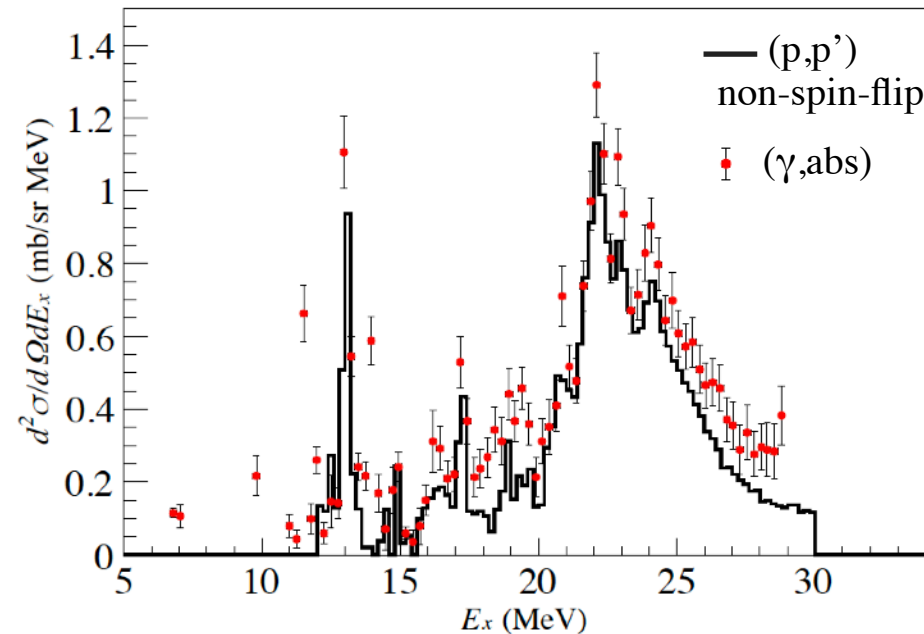
GDR region

# 実光子ビームデータ & (p,n) との比較( $^{16}\text{O}$ )

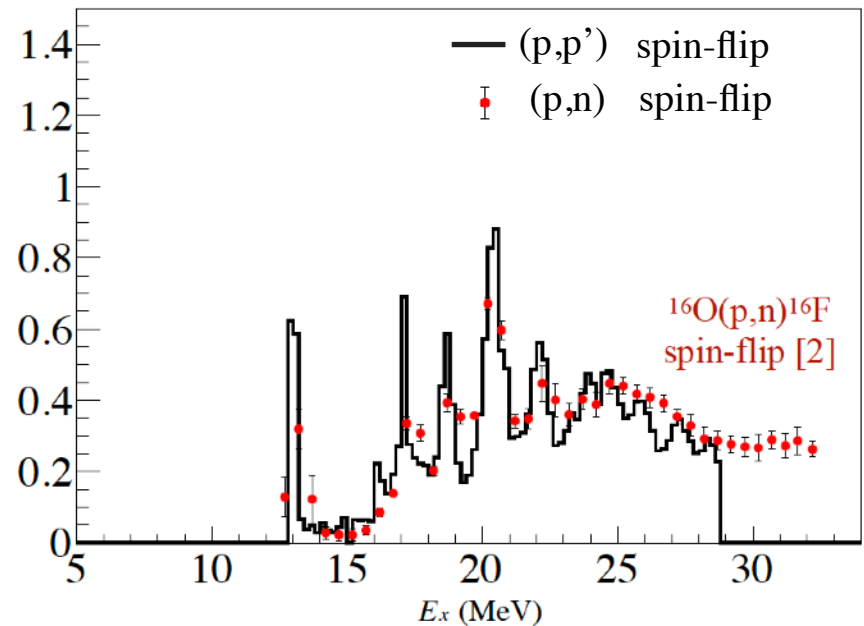
- non-spin-flipの $0^\circ$ 散乱断面積は Isovector-E1 励起が支配的
- spin-flipの $0^\circ$ 散乱断面積は Isovector 励起が支配的

(MDA解析は今後)

T. Sudo et al., RCNP-E398 Preliminary  
+ T. Kawabata et al, PRC65 064316(2002)



[1] Ahrens et al., ( $\gamma$ ,abs)を陽子クーロン励起断面積に換算



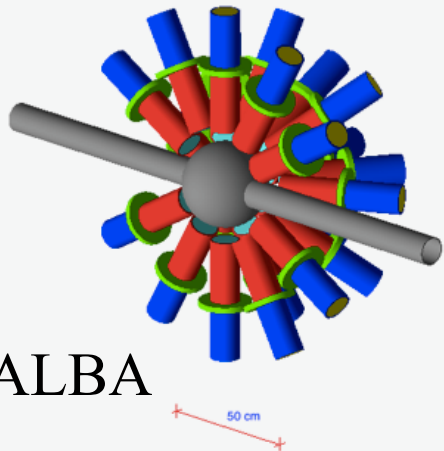
[2] T.Wakasa et. al. PRC84, 014614(2011)

# iThemba LABS

RCNPと同様の実験手法 ( $E_p=200$  MeV)

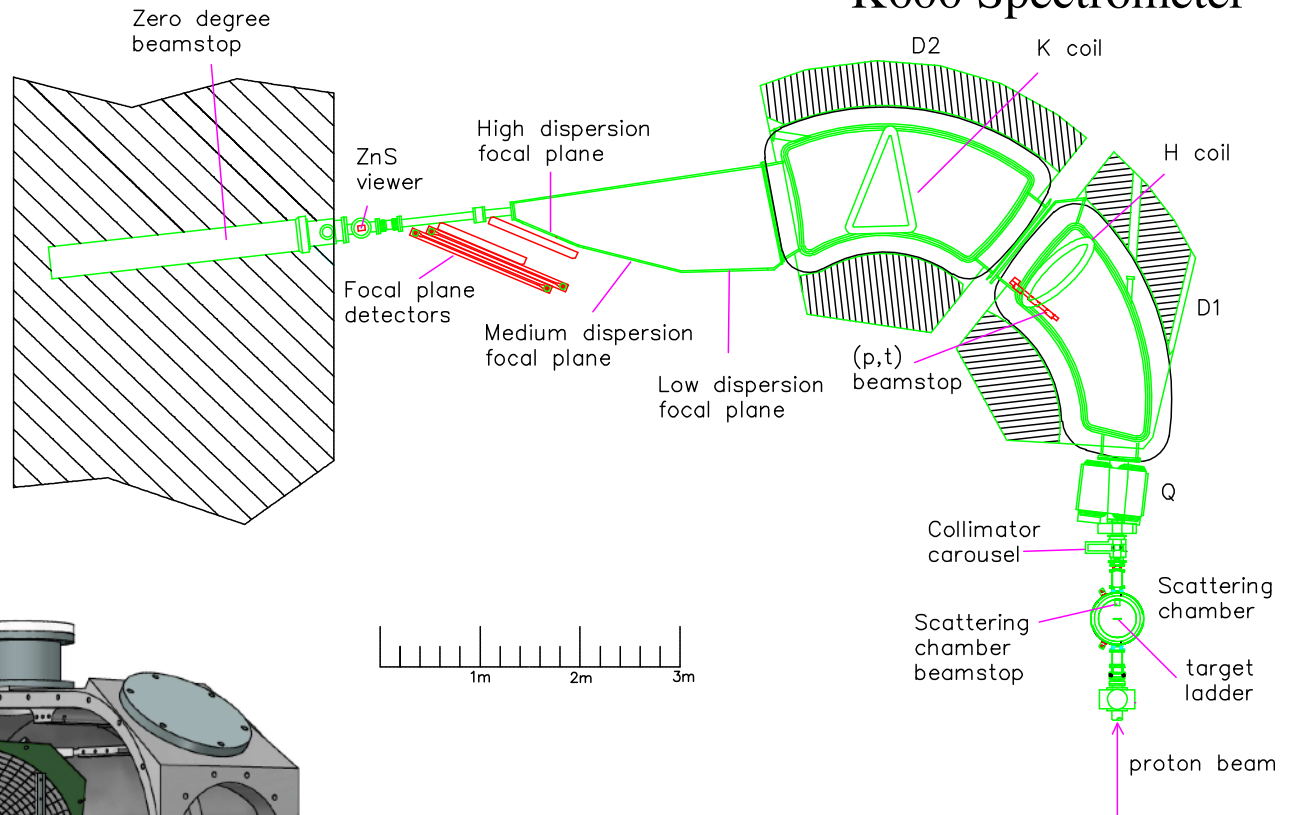
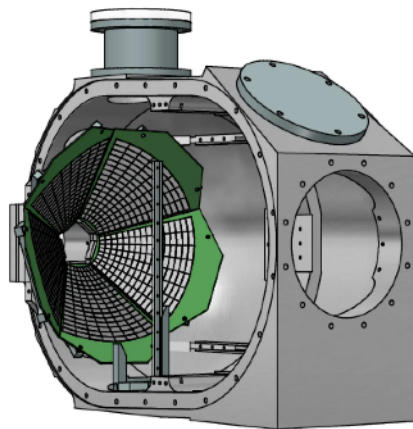
大型の $\gamma$ &荷電粒子同時計測検出器を開発

Large Volume  
LaBr<sub>3</sub> array



CAKE

decay charge particle  
detector array



# PANDORA Project: Organization

## Nuclear Experiments

RCNP

*Osaka Univ.*

**A. Tamii, N. Kobayashi, T. Sudo, Z. Yang, T. Furuno, M. Murata, A. Inoue, H. Mori**  
*ELI-NP*

ELI-NP

**P.-A. Söderström, D. Balabanski, L. Capponi, A. Dhal, T. Petruse, D. Nichita, Y. Xu**  
*iThemba LABS, Univ. Witwatersland, Stellenbosh Univ.*

iThemba LABS

**L. Pellegri, R. Neveling, F.D. Smit, J.A.C. Bekker, S. Binda, H. Jivan, T. Khumal, M. Wiedeking, K.C.W. Ki, P. Adsley, L.M. Donaldson, E. Sideras-Haddado, K.L. Malatji, S. Jongile, A. Netshiya**

TU-Darmstadt

P. von Neumann-Cosel, N. Pietralla, J. Isaak, J. Kleemann, M. Spall

U. Milano/INFN

A. Bracco, F. Camera, F. Crespi, O. Wieland

## Nuclear Theory

AMD

**M. Kimura, Y. Taniguchi, H. Motoki**   [Antisymmetrized Molecular Dynamics](#)

NRFT

**E. Litvinova, P. Ring, H. Wibowo**   [Nuclear Relativistic Field Theory](#)

RPA/DFT

**T. Inakura**

TALYS

**S. Goriely, E. Khan**

## UHECR Theory

Propagation  
and production

**D. Allard, B. Baret, I. Deloncle, J. Kiener, E. Parizot, V. Tatischeff**

**S. Nagataki, E. Kido, J. Oliver, H. Haoning**

**NC Neutrino Detection**   **Y. Koshio, M. Sakuda, M.S. Reen,**

# スケジュール(実験)

Virtual Photon Exp.

**RCNP** 2022-

Total strength distribution up 32 MeV

$\gamma$ -decay

multipole decomp. analysis (ang. dep. and polarization transfer)

**iThemba LABS** 2021-

Beam time approved for the first cases:  $^{12}\text{C}$ ,  $^{27}\text{Al}$

Total strength distribution up 24 MeV

$\sigma_{\text{abs}}$  and  $p, \alpha, \gamma$  decays

$p, \alpha, \gamma$ -decays

multipole decomp. analysis (ang. dep.)

Real Photon Exp.

LoI submitted

**ELI-NP** 2023-

absolute c.s.

model independent separation of E1 and M1

$n, p, \alpha, \gamma$ -decays up to 20 MeV

Good systematic data

Consistency among three facilities

Reference target:  $^{27}\text{Al}$ .

# 標的核

Measurements on 10-20 nuclei in 5-10 years  
with theoretical model developments

5-10% 精度

Candidate target nuclides

- $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$ , and  $^{27}\text{Al}$

first cases, alpha decay, reference target

- $^6\text{Li}$ ,  $^7\text{Li}$ ,  $^9\text{Be}$

light nuclei

- $(^{20}\text{Ne})$ ,  $^{24}\text{Mg}$ ,  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{32}\text{S}$ ,  $(^{36}\text{Ar})$ ,  $^{40}\text{Ca}$

N=Z nuclei,  $\alpha$ -cluster effect, deformation

- $^{26}\text{Mg}$ ,  $^{48}\text{Ca}$ ,  $^{56}\text{Fe}$

N>Z nuclei

- $^{13}\text{C}$ ,  $^{14}\text{N}$ ,  $^{51}\text{V}$

odd and odd-odd nuclei

- $(\gamma, \text{xn})$  on  $^{18}\text{O}$ ,  $^{48}\text{Ca}$ ,  $^{64}\text{Ni}$

Sensitivity test and selection of important nuclei are under discussions.

# Summary

- PANDORA is a joint project combining complementary experimental facilities of real and virtual photon scatterings, nuclear theories and astrophysical simulations. Measurements will start in 2021.
- Systematic measurements on photo-absorption cross sections and  $n, p, \alpha$  and  $\gamma$  decays from light to  $A \sim 60$  nuclei are planned.
- Development of theoretical models is planned by AMD, RPA and RNFT.
- We appreciate your suggestions and support from the community.

