

アイソスカラー型巨大単極子共鳴測定による
核物質状態方程式の
対称エネルギー項の決定

東北大学CYRIC
伊藤 正俊

Contents

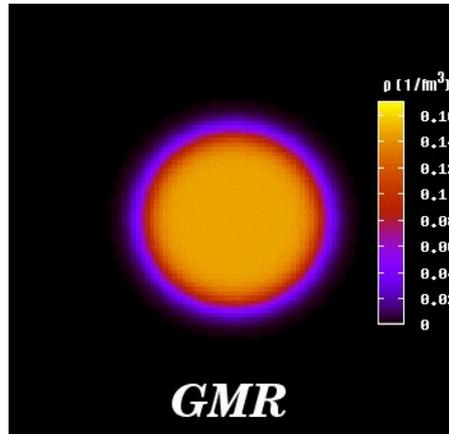
- 研究の背景
 - 圧縮型巨大共鳴と核物質状態方程式
 - 安定核における圧縮率の決定
 - 安定核における対称エネルギー項の決定
- 不安定核を用いた巨大共鳴の測定
 - 実験に対する考察
 - MAYA
- まとめ

圧縮型巨大共鳴

- アイソスカラー型巨大単極子共鳴 (ISGMR)

- Breathing mode

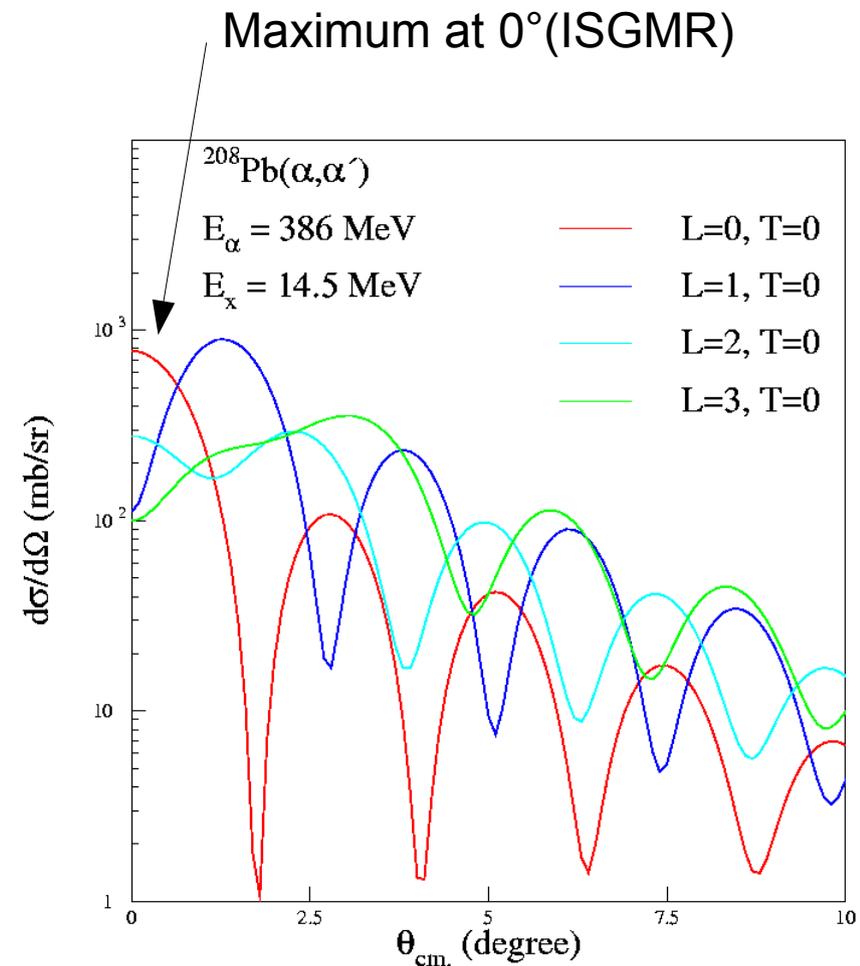
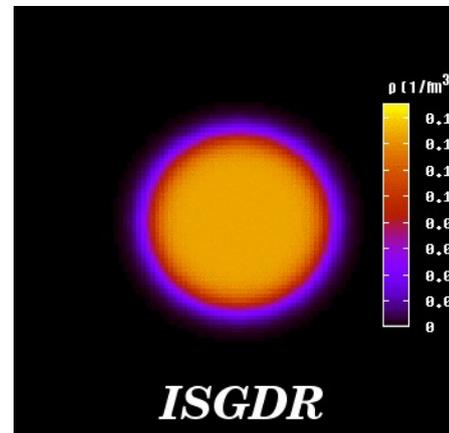
$$O = \sum r_i^2$$



- アイソスカラー型巨大双極子共鳴 (ISGDR)

- Squeezing mode

$$O = \sum r_i^3 Y_1$$



核物質の圧縮率

- 核物質の圧縮率： K_∞

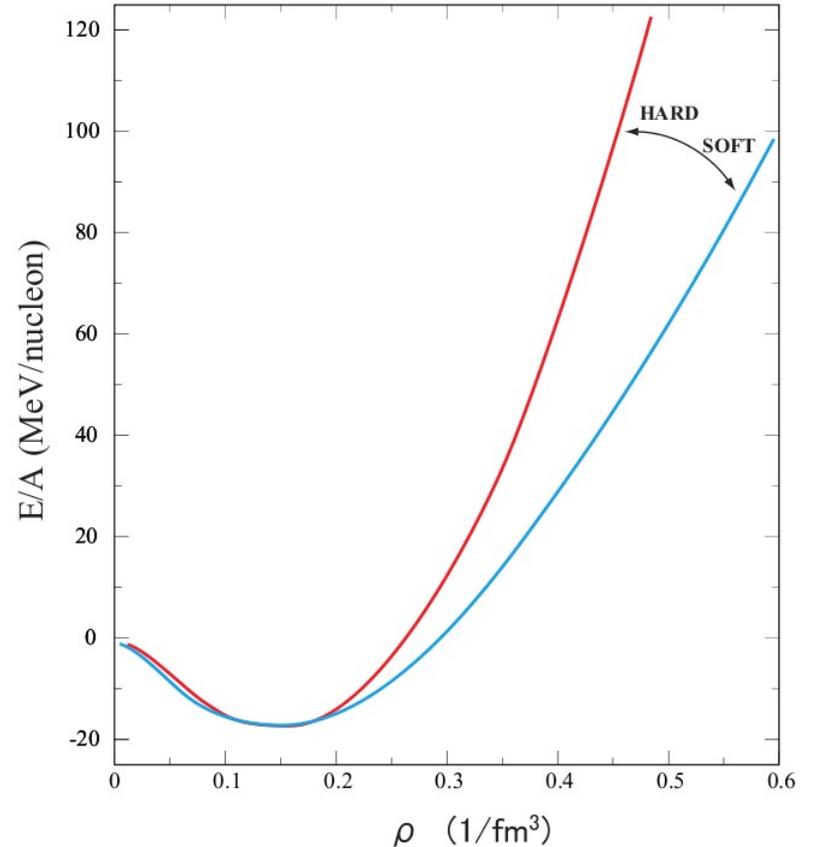
$$K_\infty = 9\rho_0^2 \frac{d^2}{d\rho^2} \left(\frac{E}{A} \right)_{\rho=\rho_0}$$

- Curvature of the EOS
- 有限核の圧縮率 (K_A)

$$E_{ISGMR} = \hbar \sqrt{\frac{K_A}{m \langle r^2 \rangle}}$$

$$E_{ISGDR} = \hbar \sqrt{\frac{7}{3} \frac{K_A + \frac{27}{25} \epsilon_F}{m \langle r^2 \rangle}}$$

核物質の状態方程式



圧縮率の決定

- 初期のISGMRデータのフィッティングから、 K_∞ を求める試み
→ 原子核の変形効果や、軽い核での強度の分散化によって
 K_∞ に対する制限を与えることができなかった

S.Shlomo and D.H. Youngblood, Phys.Rev.C 47, 529(1993)

$$K_A \sim K_{vol}(1 + cA^{-1/3}) + K_\tau \left(\frac{N-Z}{A} \right)^2 + K_{Coul} Z^2 A^{-4/3}$$

$$K_\infty \sim K_{A \rightarrow \infty}$$

- ^{208}Pb などの十分に重い球形核においてISGMRを精密に測定し、
微視的なアプローチによって、 K_∞ と K_A の関係を求めた

$$K_A \approx -3.5 + 0.64 K_\infty$$

J.P.Blaizot et al, Nucl.Phys.A 591, 435(1995)

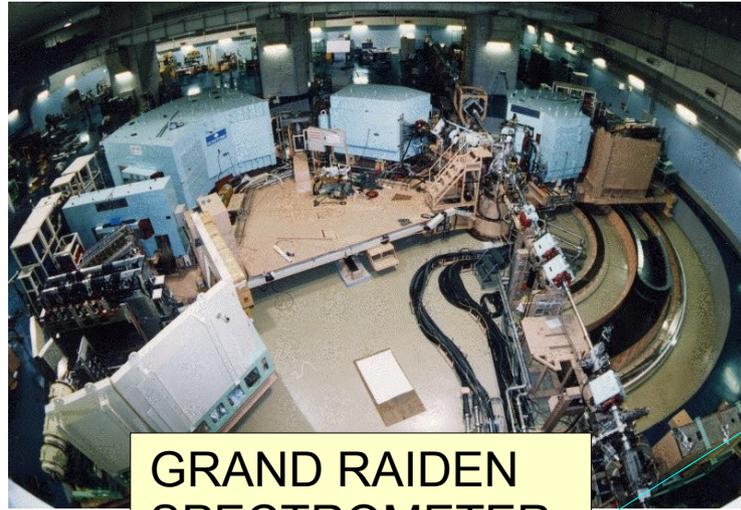
Experimental setup in RCNP

Reaction:
(α , α')

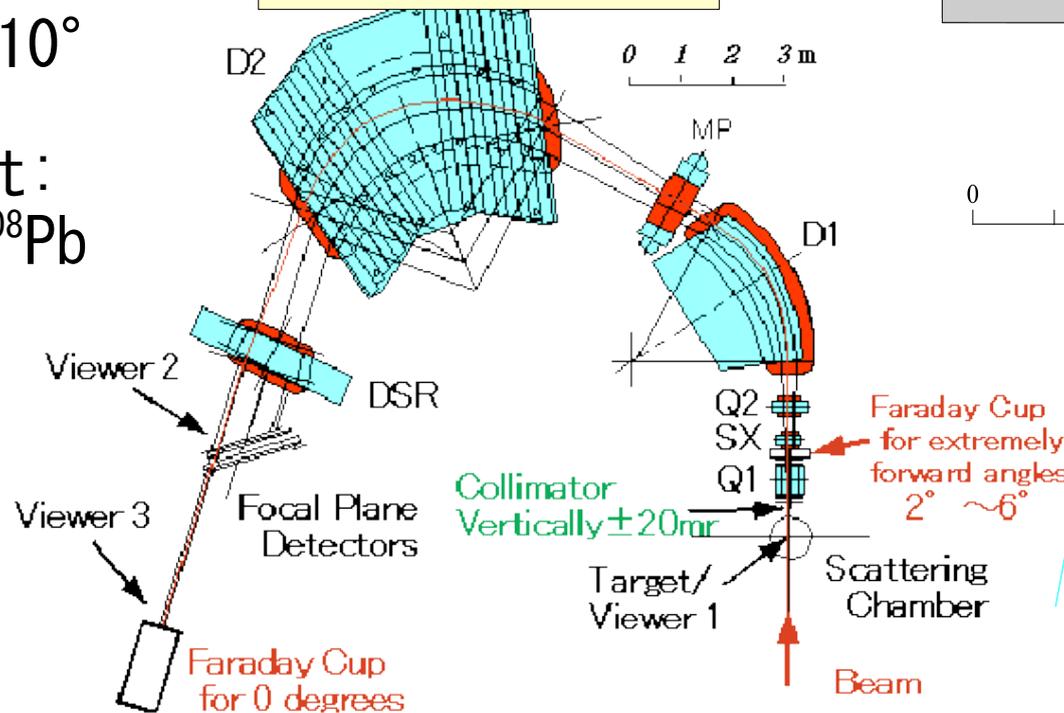
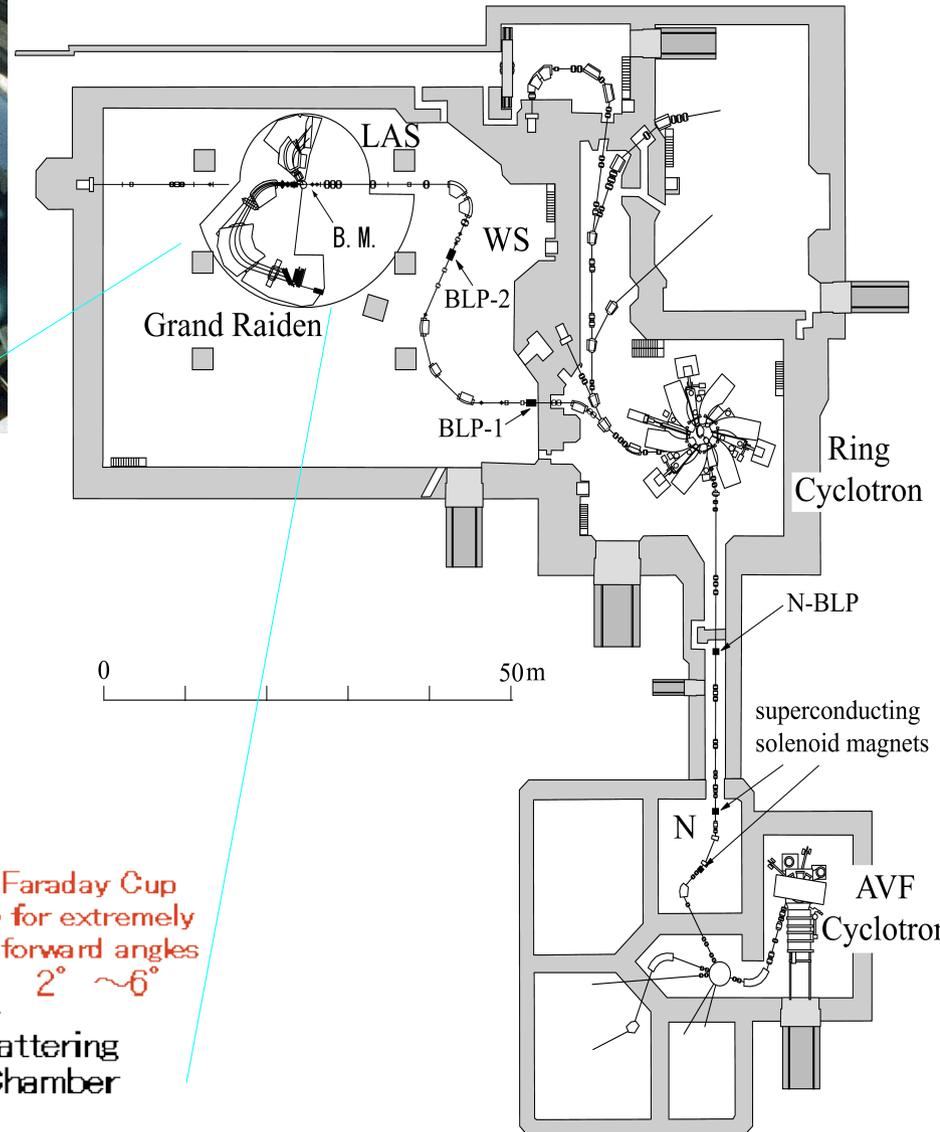
Beam:
400MeV

Angle:
 $0^\circ \sim 10^\circ$

Target:
 $^{12}\text{C} \sim ^{208}\text{Pb}$



GRAND RAIDEN SPECTROMETER



多重極展開法 (Multipole decomposition analysis)

- Multipole decomposition analysis (MDA)

$$\sigma^{exp}(\theta, E_x) = \sum_L a_L(E_x) \sigma_L^{calc}(\theta, E_x)$$

- Single-folded optical potential

$$U(\mathbf{r}) = \int \rho_0(r') V(|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|, \rho_0(r')) dr'$$

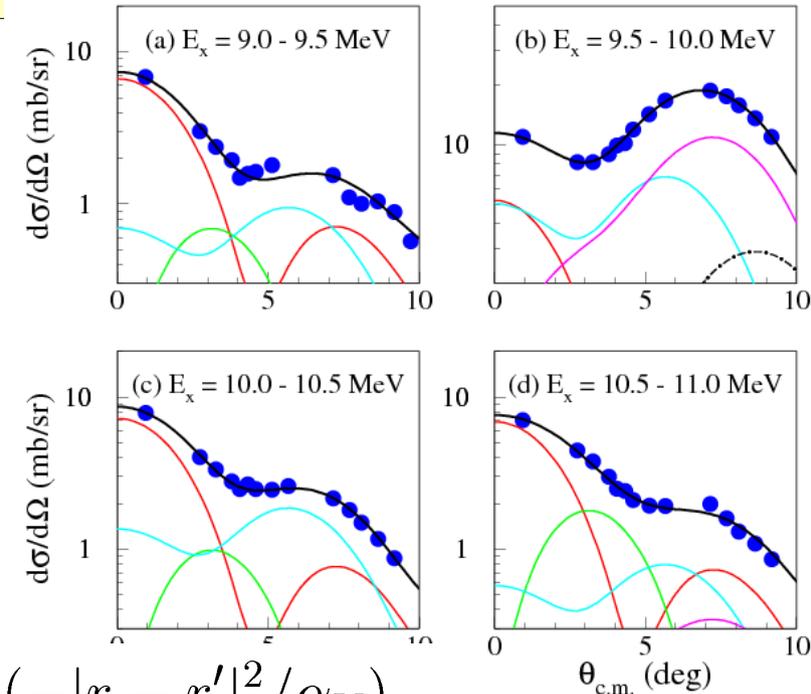
- Density dependent N- α interaction

$$V(|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|, \rho_0(r')) = -V(1 + \beta_V \rho_0(r')^{2/3}) \exp(-|r - r'|^2/\alpha_V) \\ -iW(1 + \beta_W \rho_0(r')^{2/3}) \exp(-|r - r'|^2/\alpha_W)$$

A. Kolomiets *et al.*, Phys. Rev. C 61, 034312(2000)

- Interaction parameters obtained by fitting elastic scattering on ^{12}C

	V (MeV)	α_v (fm ²)	β_v (fm ²)	W (MeV)	α_w (fm ²)	β_w (fm ²)
^{12}C	36.73	3.7	-1.9*	25.90	3.7	-1.9*



* Taken from Satchler and Khoa, Phys. Rev. C55(1997)285

^{90}Zr , ^{116}Sn , ^{208}Pb におけるRCNPでの測定

- Blaizotの関係式から導いた圧縮率

$$K_{\infty} \sim 215 \text{ MeV}$$

$$(E_{\text{GMR}} = 13.5 \pm 0.2 \text{ MeV})$$

$$(E_{\text{GMR}} = 13.96 \pm 0.2 \text{ MeV})$$

D. H. Youngblood et al,
PRC69, 034315 (2004)

M. Uchida et al,
Phys.Rev.C 69, 051301R(2004)

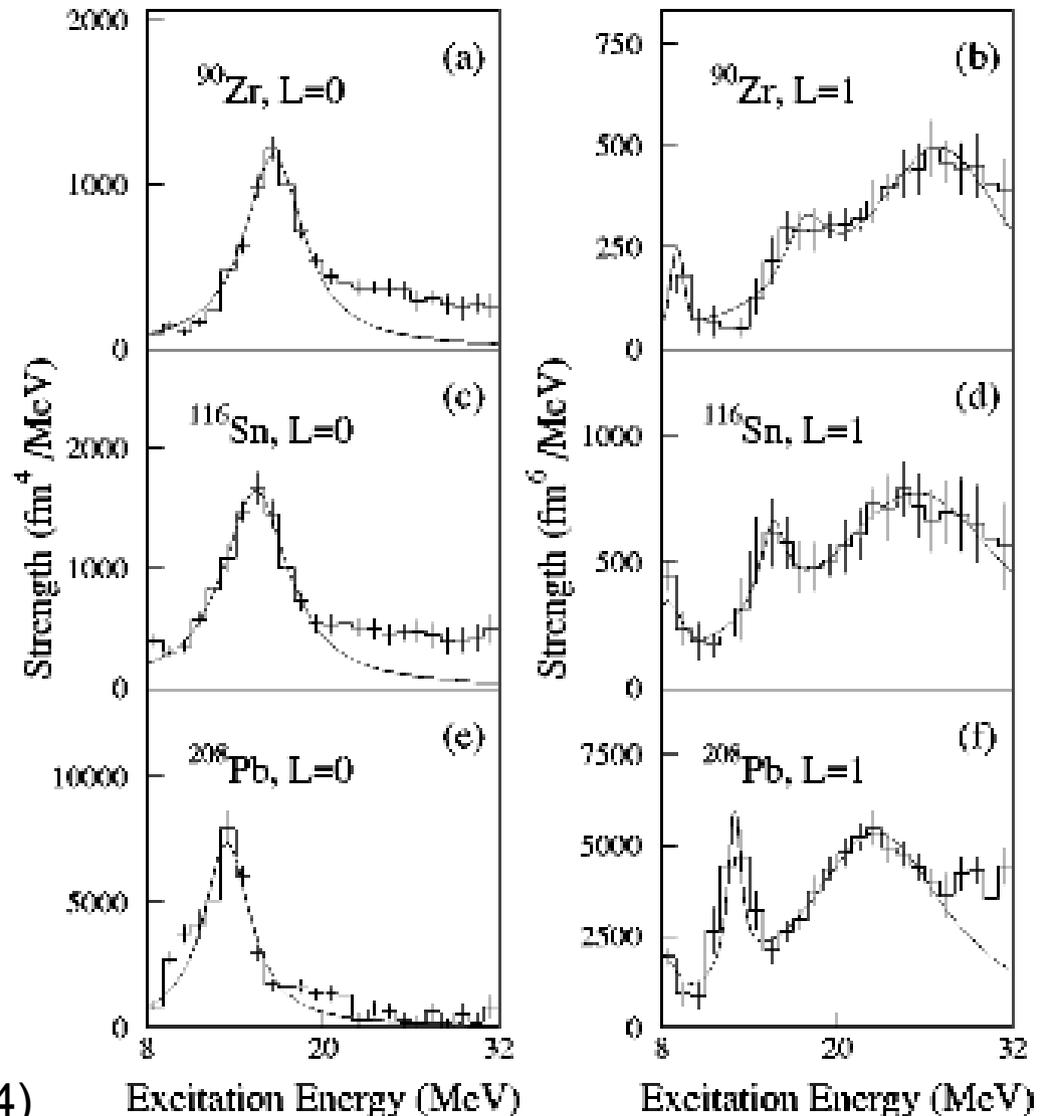


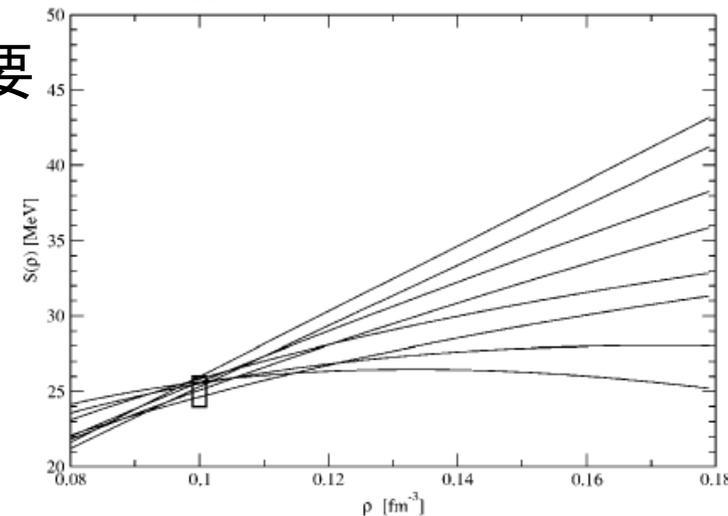
FIG. 3. Experimentally obtained strength distributions of the ISGMR and the ISGDR in ^{90}Zr , ^{116}Sn , and ^{208}Pb . The error bars are

Snアイソトープの測定

- 非相対論的計算 と 相対論的計算 で異なる K_{∞}
- 対称エネルギー項, K_{τ} に対する制限が必要
- K_{τ} の求め方 → 経験式を利用

$$K_A \sim K_{vol}(1 + cA^{-1/3}) + K_{\tau} \left(\frac{N-Z}{A} \right)^2 + K_{Coul} Z^2 A^{-4/3}$$

$K_A - K_{Coul} Z^2 A^{-4/3}$ has a quadratic relation to K_{τ}



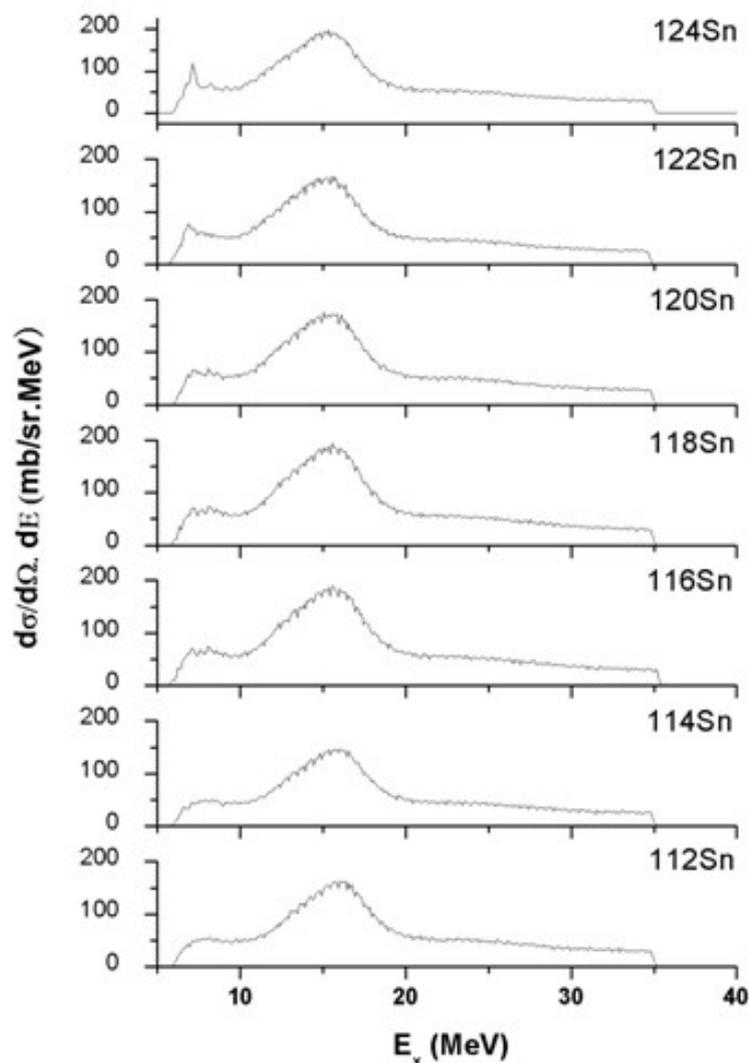
G.Colo et al, PRC70(2004)024307

$K_{coul} \sim -5.2 \text{ MeV}$ (H.Sagawa et al, Phys.Rev.C 76, 034327(2007))

- ISGMRの中心エネルギーを幅広い非対称度 ($N-Z/A$) で測定。
安定核におけるSnアイソトープでは
 $N-Z/A$: 0.107 (^{112}Sn) \sim 0.194 (^{124}Sn)

0度エネルギースペクトルと 巨大単極子共鳴の強度分布

0°エネルギースペクトル



ISGMR強度分布

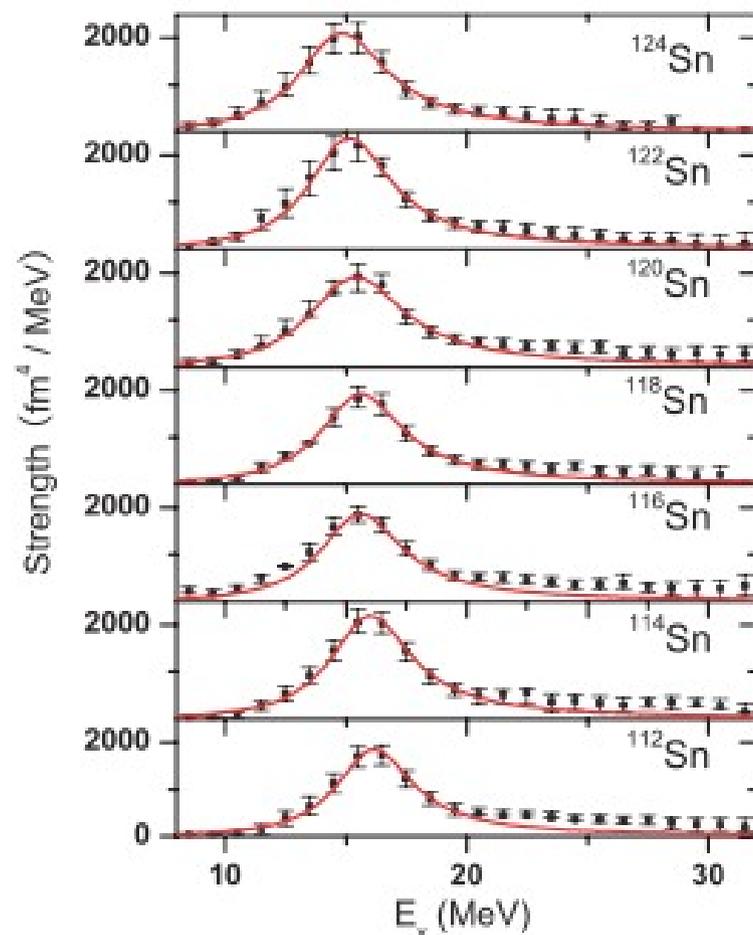


FIG. 9. (Color online) ISGMR strength distributions obtained for the Sn isotopes in the present experiment. Error bars represent the uncertainties from fitting the angular distributions in the MDA procedure. The solid lines show Lorentzian fits to the data.

ISGMRエネルギーの非対称度依存性

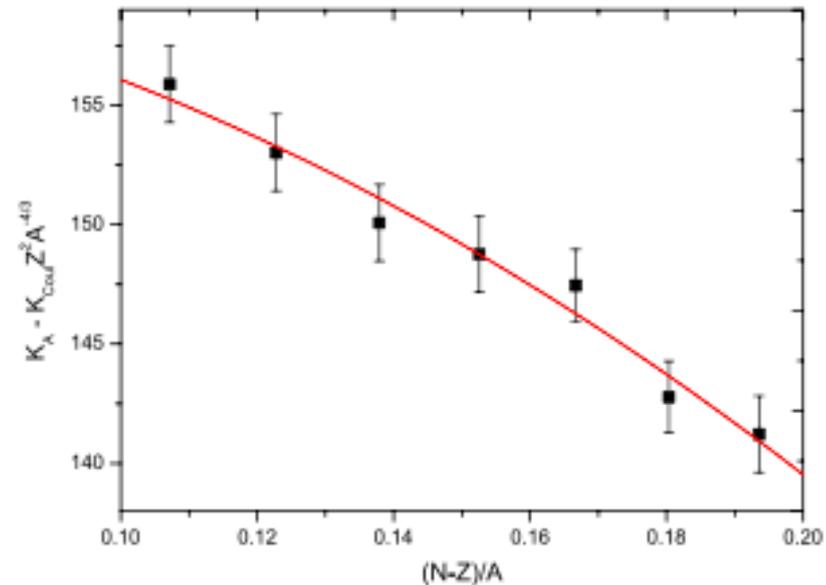


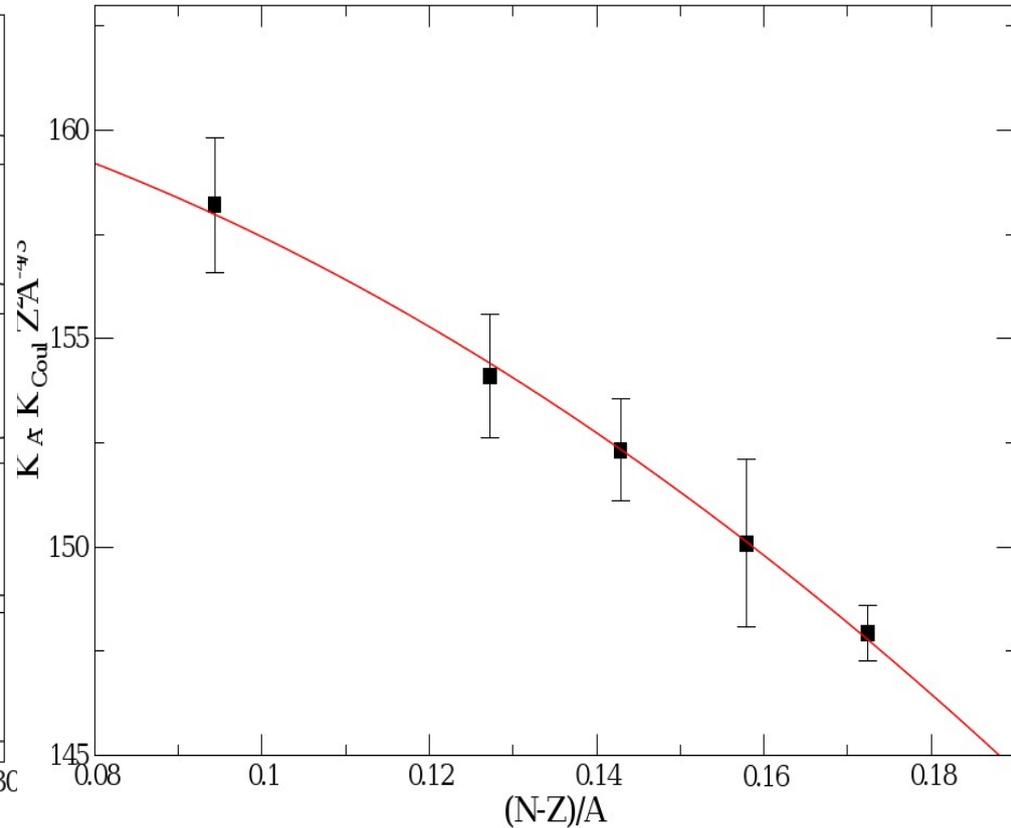
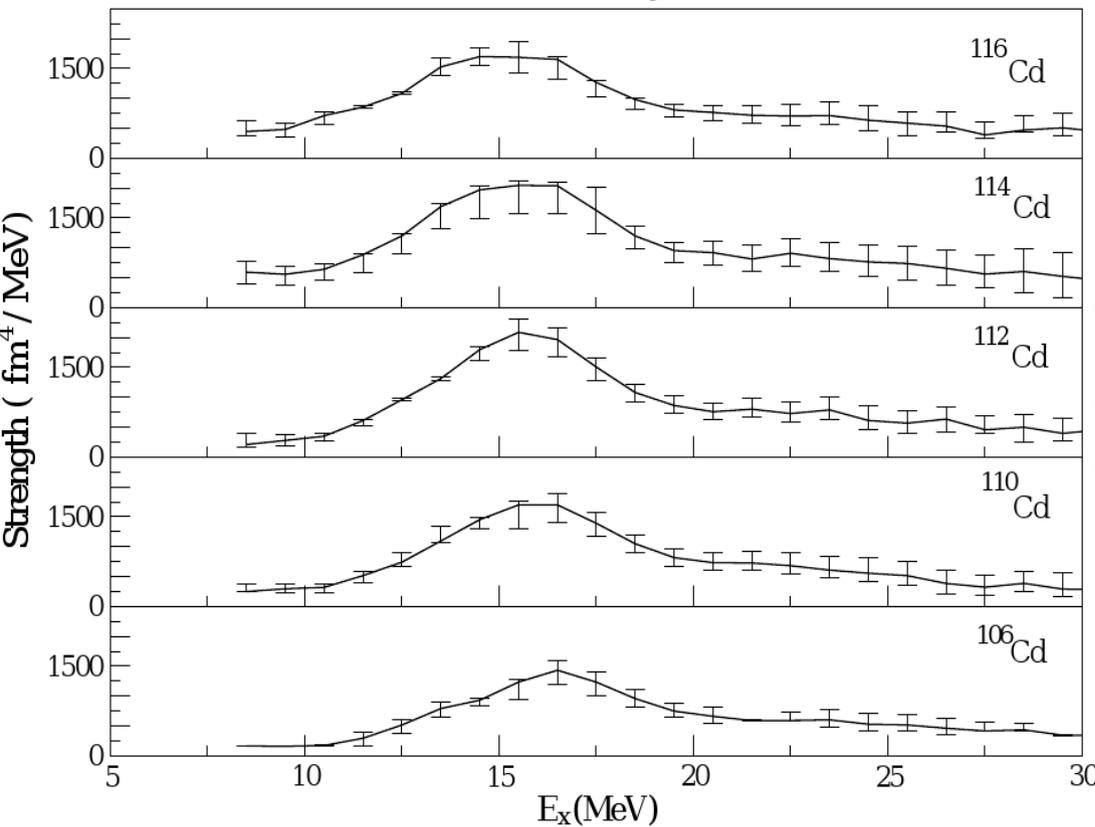
FIG. 4 (color online). Systematics of the difference $K_A - K_{\text{Coul}} Z^2 A^{-4/3}$ in the Sn isotopes as a function of the “asymmetry parameter” $[(N - Z)/A]$; $K_{\text{Coul}} = -5.2$ MeV [33]. The solid line represents a least-squares quadratic fit to the data.

- $K_{\tau} = -550 \pm 100$ MeV T. Li et al, PRL99 162503 (2007)
- 重イオン衝突実験の結果 -370 ± 120 MeVと一致

Cdアイソトープの結果

ISGMR strength

Preliminary result



$$K_T = -480 \pm 100 \text{ MeV}$$

analyzed by D.Patel in Notre Dam University

対称エネルギー項に対する制限

重イオン衝突反応実験からの制限

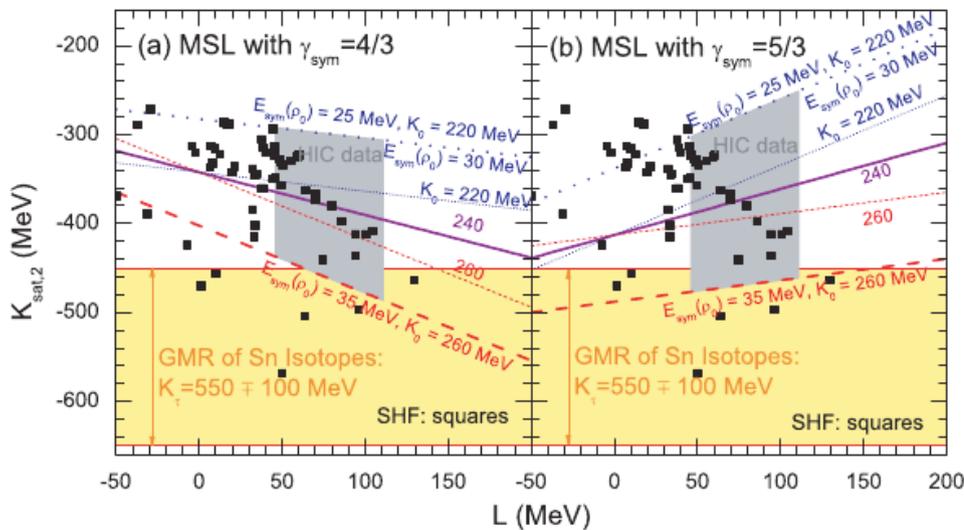


FIG. 12. (Color online) $K_{\text{sat},2}$ as a function of L from the MSL model with (a) $\gamma_{\text{sym}} = 4/3$ and (b) $5/3$ and $m_{\tau,0}^* = 0.8m$ and $m_{\tau,0}^* = 0.7m$ for different values of K_0 and $E_{\text{sym}}(\rho_0)$. The shaded region indicates constraints within the MSL model with $K_0 = 240 \pm 20$ MeV, $E_{\text{sym}}(\rho_0) = 30 \pm 5$ MeV, and $46 \leq L \leq 111$ MeV limited by the heavy-ion collision data. The results from the SHF approach with 63 Skyrme interactions are also included for comparison. In addition, the constraint of $K_{\tau} = -550 \pm 100$ MeV obtained in Refs. [22,23] from measurements of the isotopic dependence of the GMR in even-A Sn isotopes is also indicated.

L.W. Chen et al, PRC80(2009)014322

^{208}Pb の中性子スキンからの制限

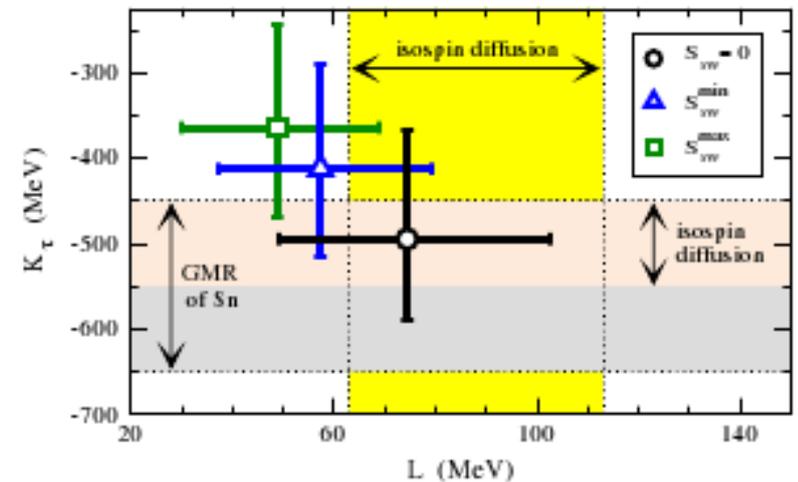


FIG. 3 (color online). Constraints on L and K_{τ} from neutron skins and their dependence on the S_{sw} correction of Eq. (2). The crosses express the L and K_{τ} ranges compatible with the uncertainties in the skin data. The shaded regions depict the constraints on L and K_{τ} from isospin diffusion [6,7] and on K_{τ} as determined in [13] from the GMR of Sn isotopes.

M.Centelles et al, PRL102(2009)122502

MEM effect

- Sn, Zr, Pbを同時に満足する計算がない
- 計算では ^{208}Pb のISGMRエネルギーを過小評価
- Snが柔らかいのではなく ^{208}Pb が硬いのか？

E.Khan, Phys.Rev.C 80, 011307(R)(2009).

- “Constrained Hartree-Fock method” (CHFB) では二重閉核である ^{208}Pb のISGMRエネルギーは他のアイソトープに比べて高い
- 質量公式に現れるような “Mutual enhanced magicity (MEM) effect” がISGMRエネルギーにも現れているのではないか？

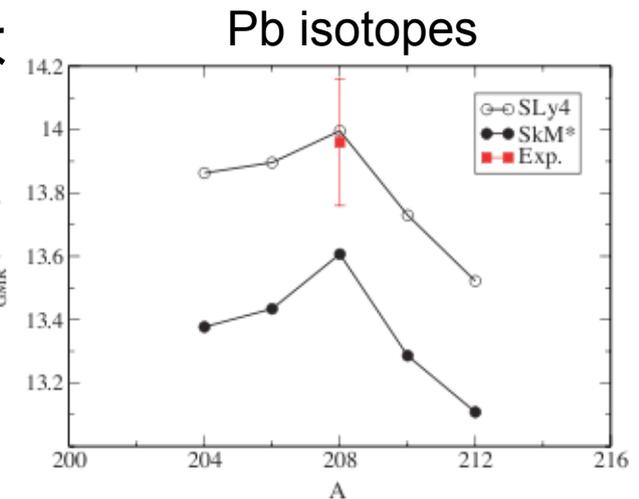
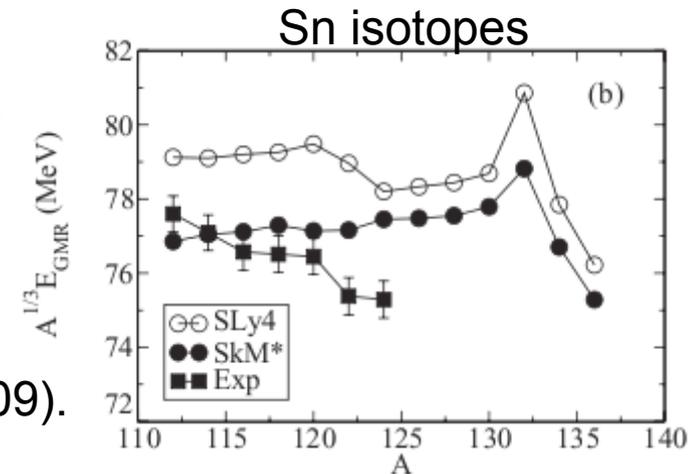


FIG. 1. (Color online) Excitation energies of GMR in $^{204-212}\text{Pb}$ isotopes calculated with the CHFB method and the SLy4 and SkM* interactions. The experimental data are taken from Ref. [19].

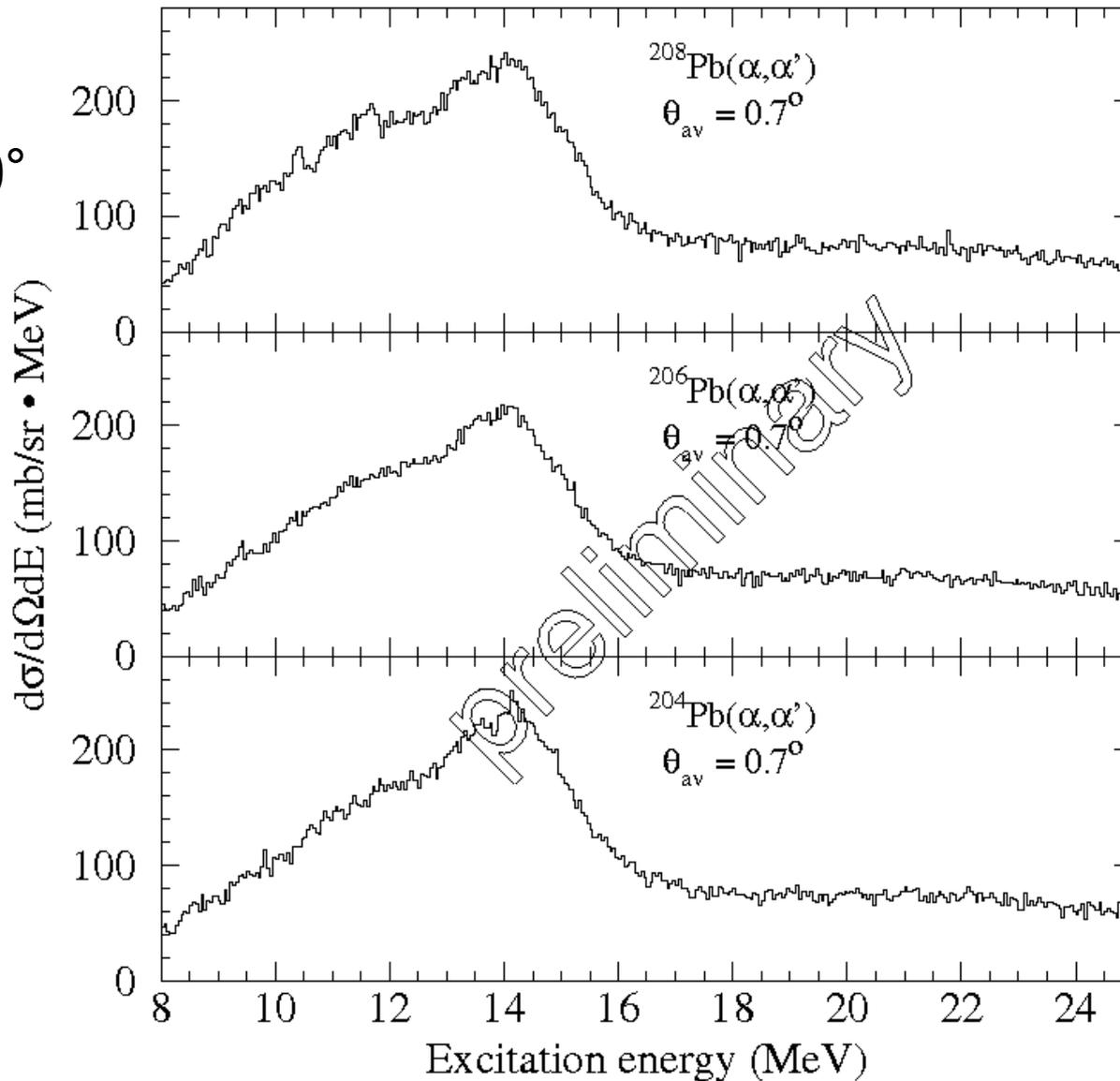
E.Khan, Phys.Rev.C 80, 057302(2009).

Pbアイソトープの結果

$E_{\alpha} \sim 400 \text{ MeV}$

$\text{Pb}(\alpha, \alpha')$ at 0°

$\delta : 0.196 \sim 0.212$



Experiment
in May 2010

不安定核における巨大単極子共鳴の測定

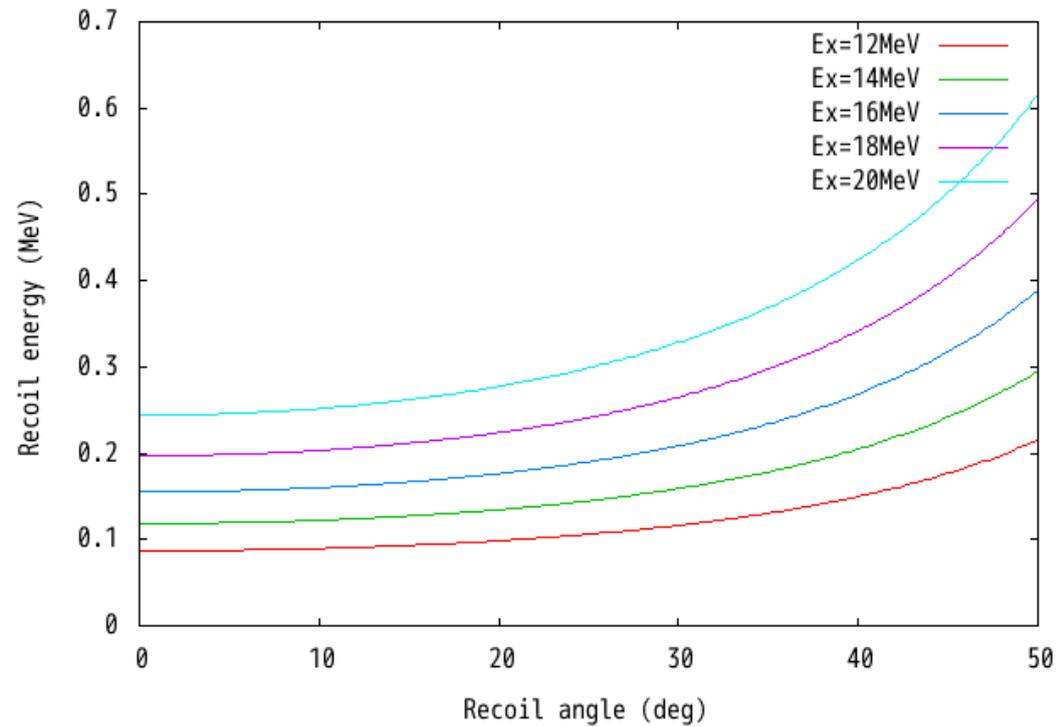
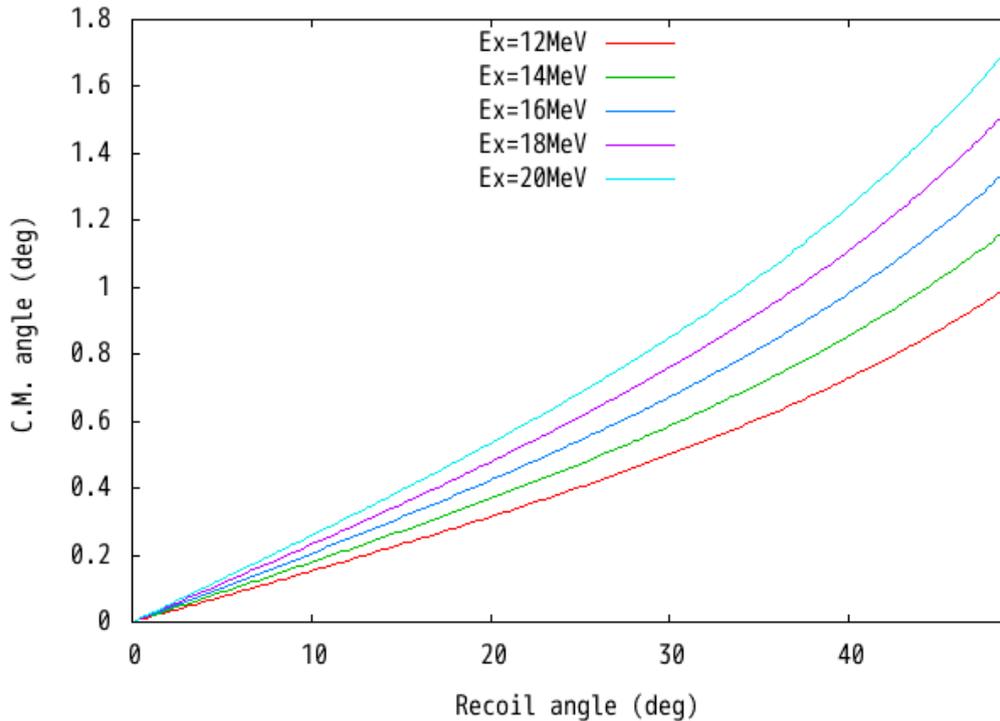
- より非対称度 ($\delta = (N-Z)/A$) の大きい領域 (0.242 for ^{132}Sn)
- 不変質量法
 - 崩壊粒子をすべて測定
 ^{14}O ... H. Baba et al, Nucl. Phys. A788 (2007)
 - 重い核では、中性子崩壊しきい値エネルギーが小
- 反跳粒子測定
 - アクティブターゲット
MAYA (d, d') at GANIL
C. Monrozeau et al, Phys. Rev. Lett. 100 (2008) 042501
 - 他のターゲット (He gasjet, ^6Li ...)
 - 重い核かつ蓄積リングではこちらの方が有利？

$^{132}\text{Sn} + \text{He gas jet}$ ターゲット

100 MeV/u の場合

$^{132}\text{Sn} + \alpha$ kinematics

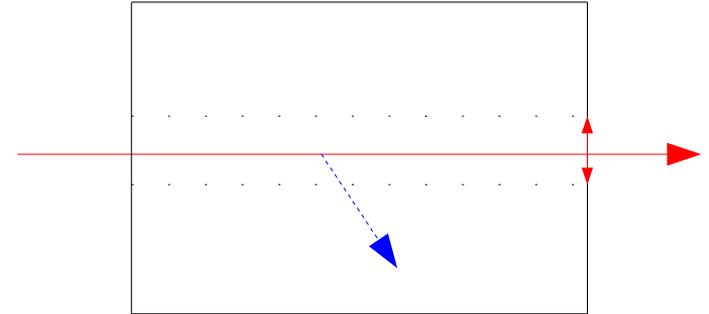
$^{132}\text{Sn} + \alpha$ kinematics



- (α, α') 0度測定と同程度だとすると、 $\theta_{\text{recoil}} < 40^\circ$
- 反跳エネルギー $E_{\text{recoil}} \sim 200 \text{ keV}$
- エネルギー分解能 $< 30 \text{ keV}$ ($\Delta E_x \sim 1 \text{ MeV}$)

He active target

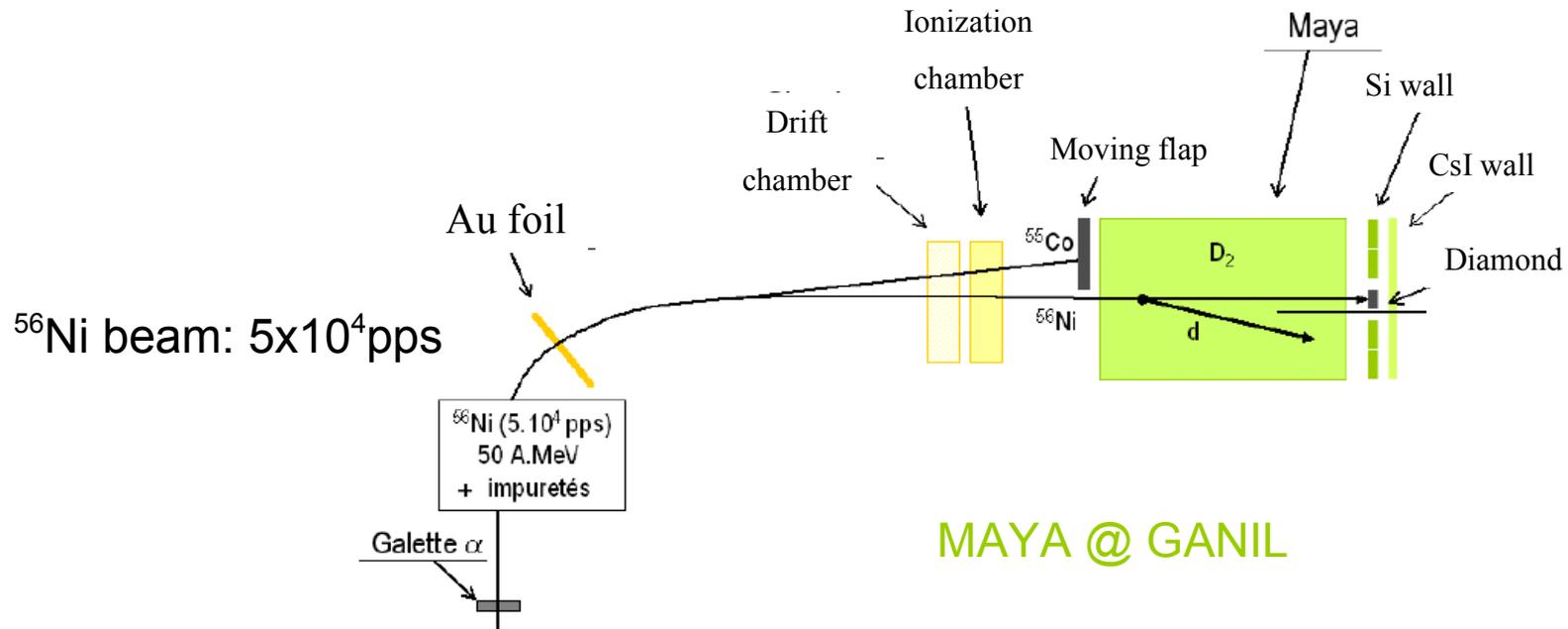
- GEM TPCなど
 - ビーム領域は不感領域にする
 - 蓄積リングだとビームサイズを小さくできる
- HeのP-10 gas (1atm) 中のrange
 - 100keV ... 1.3mm
 - 200keV ... 2.1mm
- He gas中のrange
 - 100keV ... 7mm
 - 200keV ... 10.6mm



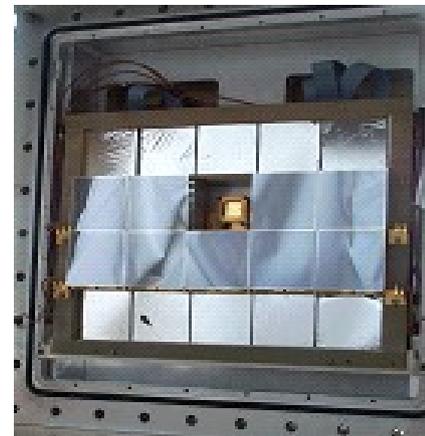
Yield Estimation

- 不安定核: 10^7 counts/turn \times 10^6 turn = 10^{13}
- α : 10^{13} p/cm²
- 断面積 \sim 100 mb/sr, 立体角 \sim 1 msr
- Yield = 10^{-2} cps

MAYA experiment

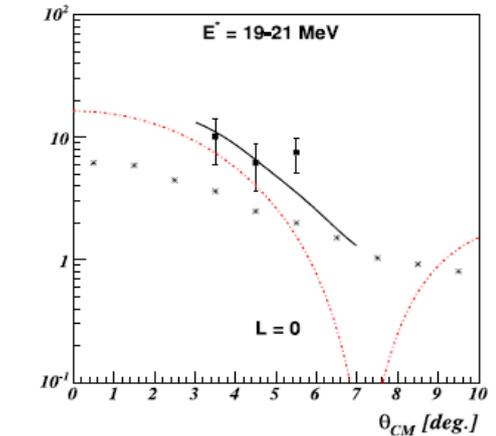
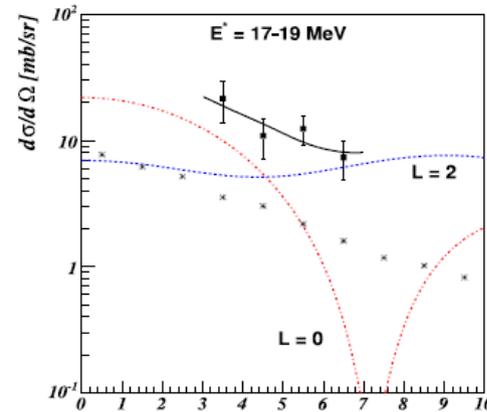
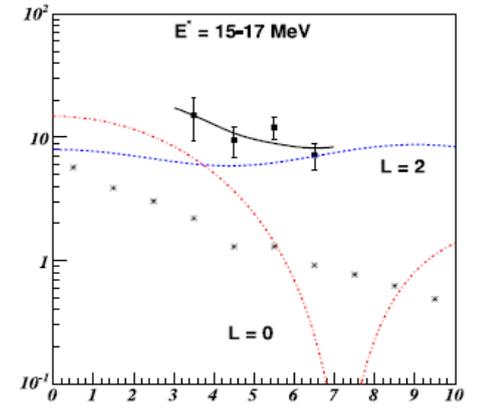
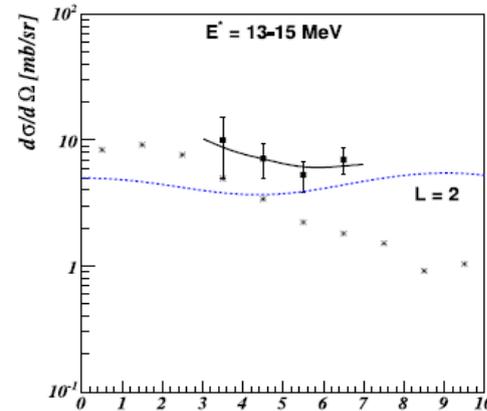
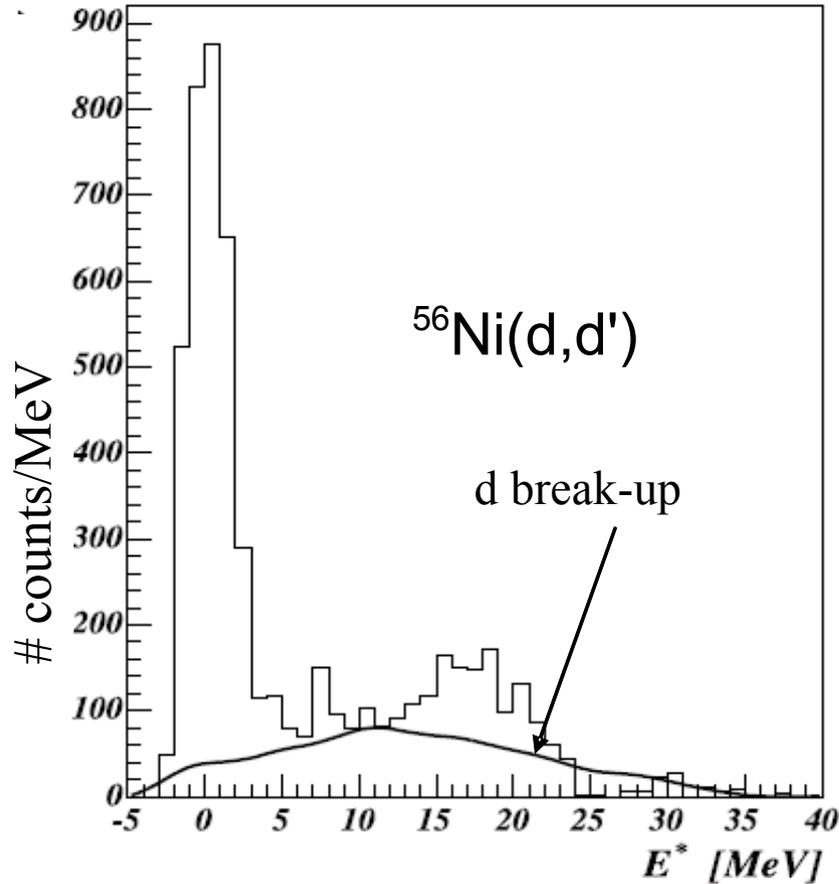


MAYA @ GANIL



^{56}Ni の結果

測定時間: 15時間



C. Monrozeau *et al.*, Phys. Rev. Lett. 100, 042501

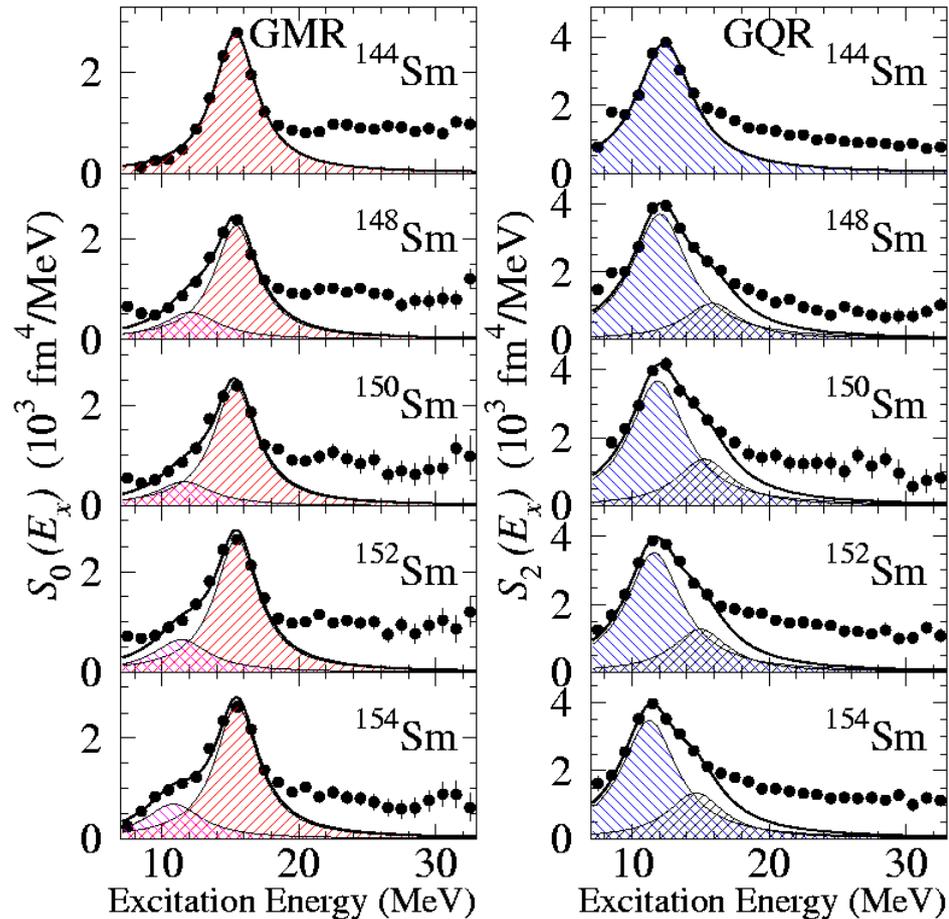
MAYA @ GANIL

MDA	m_1/m_0 [MeV]	rms [MeV]	% EWSR
L=0	19.3	2.3	136 ± 27
L=2	16.2	1.7	76 ± 13

その他

- 対称エネルギー項以外に面白いことはないか？
 - 巨大共鳴を測定することによって原子核の変形度を測定する

$^{x}\text{Sm}(\alpha, \alpha')$ の例



まとめ

- 安定核における巨大単極子共鳴の測定により、圧縮率に関する制限を与えた
- 対称エネルギー項に対してもある程度の制限を与えることに成功
- 非対称比 ($N-Z/A$) の範囲を広げることで、より厳しい制限を与えることが可能
- 重イオン蓄積リングにおいては、逆運動学により反跳粒子を測定する
- MAYAのようなアクティブターゲットが有効
- 変形核の探索にも使える？