

状態方程式

A. Tamii

2016.10.27

状態方程式

近年の発展

- Nuclear Incompressibility
 - GMR, ISGDR の系統的測定 (RCNP, Texas A&M)
 - rel と non-rel のモデル計算は一致を見た。
 - SnとPbが合わない問題は残っている(Sn核がsoft)。
 - Isovector property: K_τ (GMR at RCNP)

近年の発展

• Symmetry Energy

• 中性子スキンを測る

- PREX, CREX
- elastic proton scattering
- anti-protonic atom X rays
- coherent π^0 production
- anti-analog GDR, SDR

統計精度の限界。"モデル非依存"による確認を1,2の各種で。

不安定核への展開

skinのdiffusenessへも言及。核力モデルへの依存?

終状態の核力モデルの不定性の評価があまい

高感度・高精度化への期待(aGDR)? 和則の利用(SDR)

• 他の量を測る

- Dipole Polarizability
- Pygmy Dipole Resonance Strength
- IVGDR, IVGQR
- Heavy Ion Collision

^{208}Pb , ^{120}Sn , ^{68}Ni で見解が一致。和則の利用。

EoSやSkinの議論はまだ難しい?

• Systematics

- Mass (FRDM)
- Isobaric Analogue State Energy

反応モデルの不定性の評価が重要

系統性をよく表しているが、Isovector Propertyには感度が低いため不定性は比較的大きくなる。

理論解釈の手法に賛同が得られていない?

• Astrophysical Observations

- Neutron star mass-radius
- Asteroseismology
- Gravitational wave from neutron-star merger

Astrophysicsとの接点として重要であるが、限界まで情報を引き出そうとしているため精度や不定性に関する議論が大

振動モードが正確に決まる?内部構造の詳細に依らない?

近い将来の研究発展に期待

- Symmetry Energy

理論的には

- Nuclear Energy Density Functional (EDF)を用いた計算が、非相対論 (skyrme)、相対論などの枠組みで計算されている

→ どの様な原子核のデータをどの様にフィットするのが良いか、どのデータとどの物理量(状態方程式のパラメータや中性子星の諸量)の相関が強いか、理論の不定性をどの様に評価するか、といった議論が進んでいる。

(information content)

- Chiral EFTによる現実的核力に少数系計算手法の無限系への展開(QMC, AFDMCなど)を適用した計算が発展している。
- 表面 α -cluster形成のsymmetry energy への影響が指摘されている (Type1 他)

今後の展望

- ・中性子スキンの測定を含め、飽和密度付近のパラメータが明らかになることが期待される(既に収束の可能性を見せている?)。安定核におけるより系統的な測定。

- ・飽和密度よりも高密度(および低密度)の情報を引き出す実験が必用。重イオン衝突でよいのか?

少数系計算手法での議論が手引となるか?

テンソル力の密度依存性や三核子間力($T=3/2$ を含め)の情報が鍵の1つとなる。

飽和密度および低密度でのクラスター状態の寄与の研究

- ・中性子過剰核での核の共鳴状態・応答の研究の進展
- ・核のcollectiveな応答の理解の重要性、原子核の応答の和則とそのクエンチングの理解、パイオン凝縮などの寄与
- ・E1による電氣的応答の研究に続いて、M1, spin-M1による磁氣的応答の研究の展開の可能性
- ・状態密度の研究の進展と状態方程式の関連
- ・有限温度の状態密度 (Hot giant dipole resonance、重イオン衝突、etc)
Hot GDR の研究はそれなりにもっともらしく情報を引き出している様に見える

- ・ ※ここではストレンジネスの物理には触れていない

各論

ISGMR, ISGDR

nuclear incompressibility

- From GMR data ^{208}Pb and ^{90}Zr , $K_\infty = 240 \pm 10$ MeV
G. Colò et al., PRC70 (2004) 024307
- Consistent with both ISGMR and ISGDR and with non-relativistic and relativistic calculations.

J. Piekarewicz, PRC76, 031301(R) (2007)

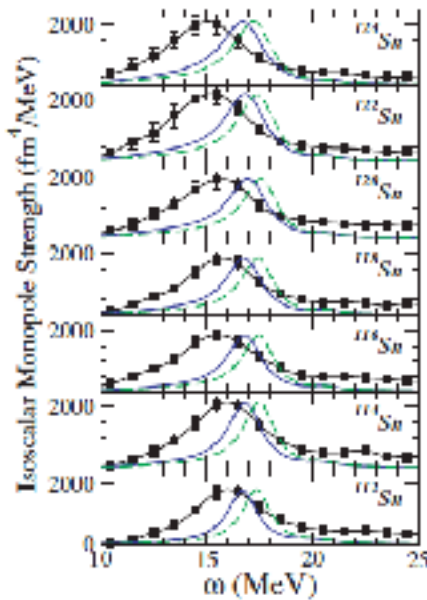
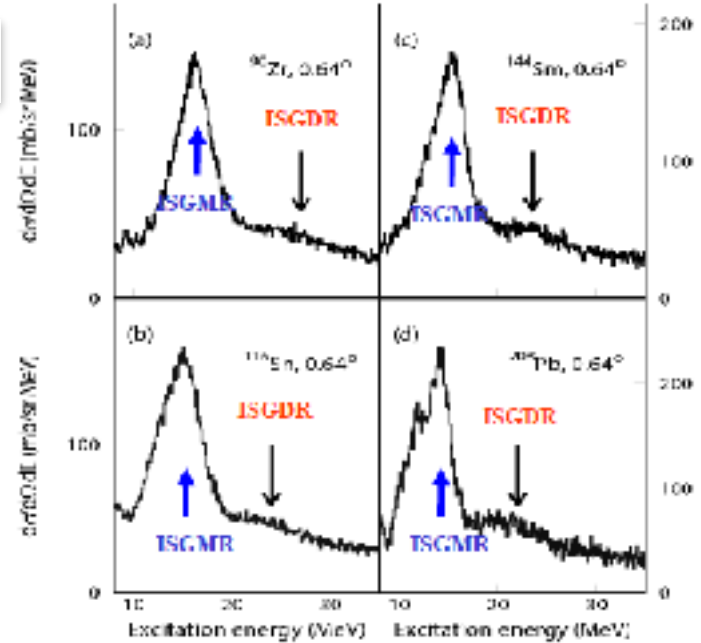


FIG. 2. (Color online) Comparison between the distribution of isoscalar monopole strength in all neutron-even ^{112}Sn - ^{124}Sn isotopes extracted from experiment (black solid squares) and the theoretical predictions of the FSUGold (blue solid line) and NL3 (green dashed line) models.

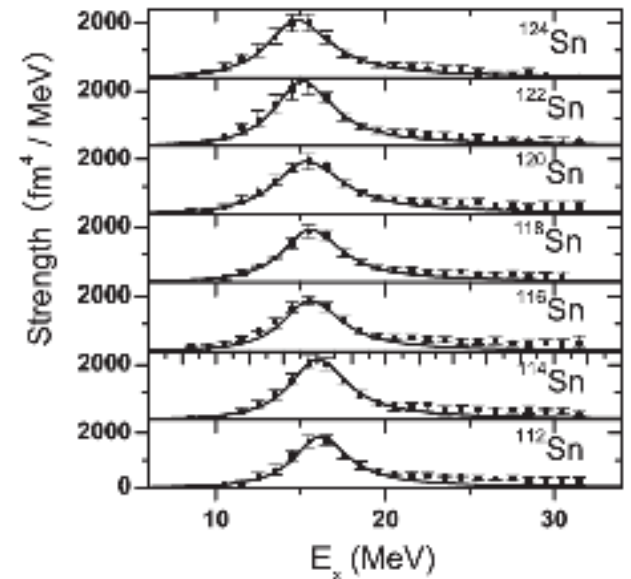
- Softness of Sn: \rightarrow still unresolved
- Also several discrepancies remains between the RCNP and Texas A&M data.

ISGDR



ISGMR

T. Li et al., PRL 99, 162503 (2007)
T. Li et al., PRC81, 034309 (2010)



ISGMR, ISGDR

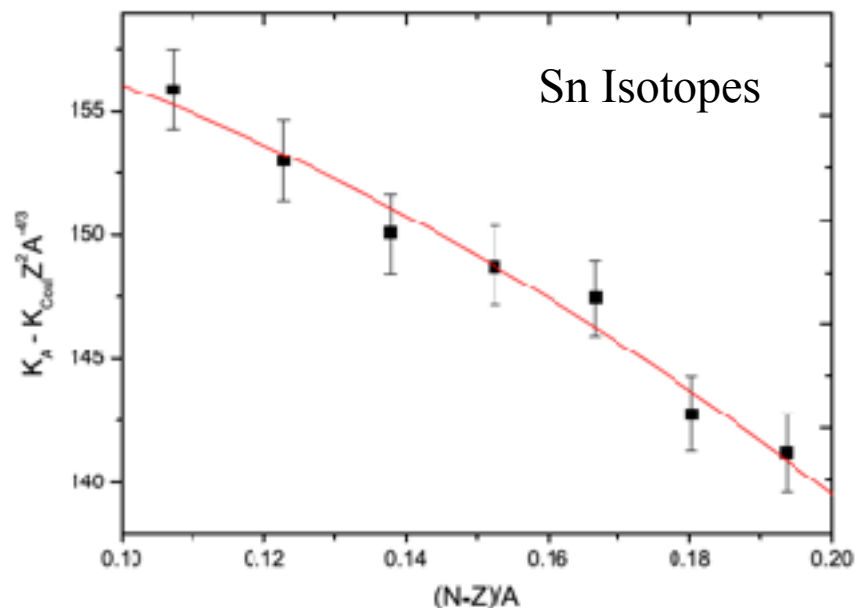
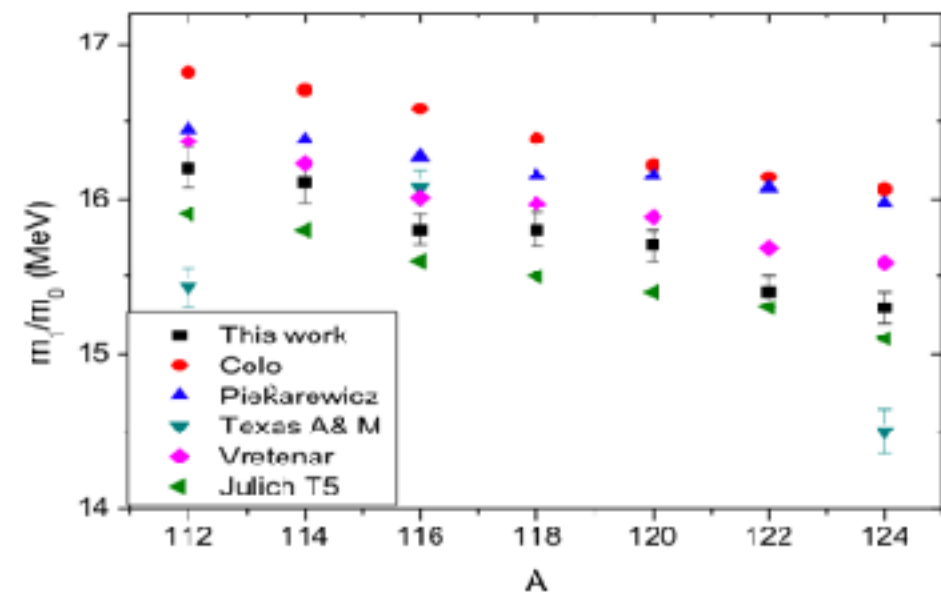
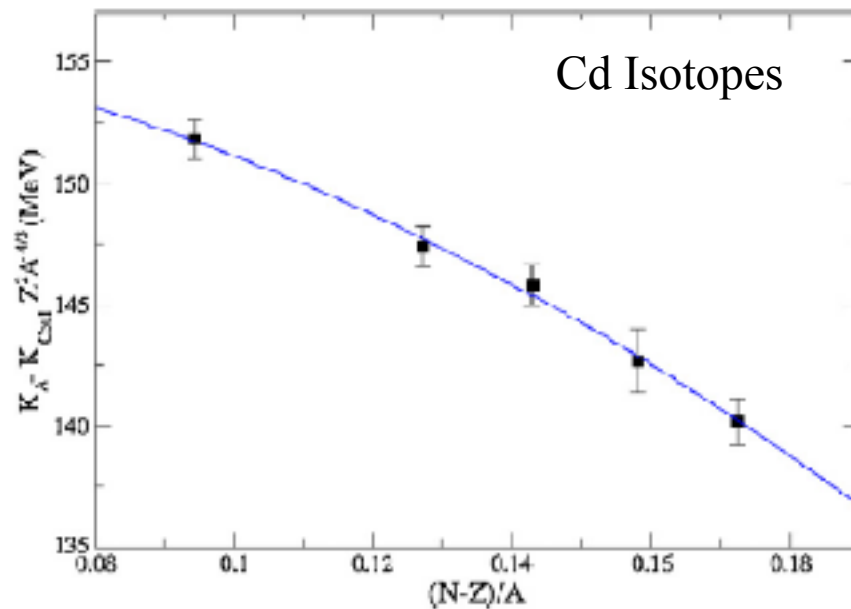
nuclear incompressibility

asymmetry term

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

$$K_\tau = -550 \pm 100 \text{ MeV (Sn)}$$

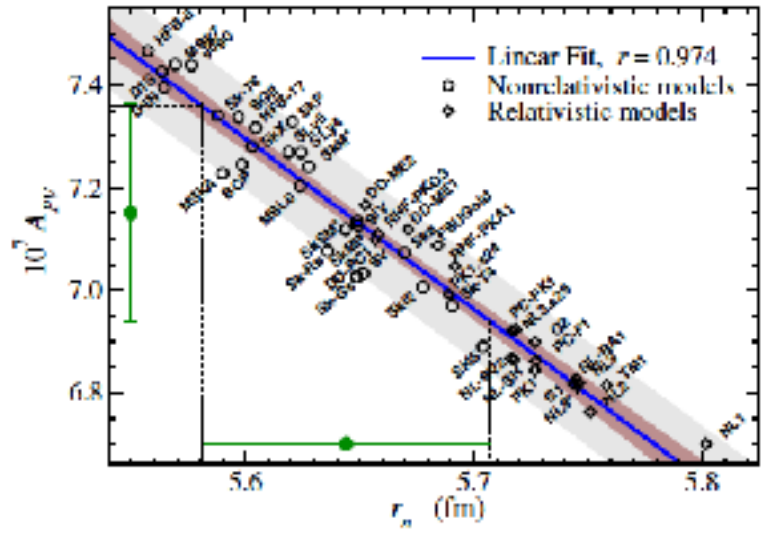
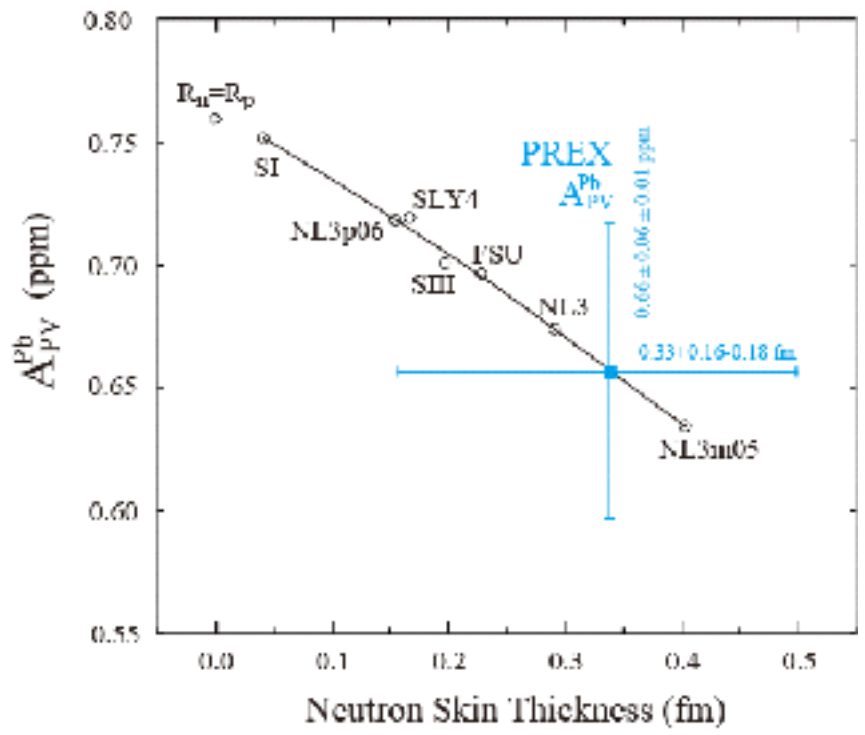
$$K_\tau = -555 \pm 75 \text{ MeV (Cd)}$$



PREX, CREX

parity violating electron scattering at J-Lab

X. Roca-Maza et al., PRL106, 252501 (2011)



S. Abrahamyan *et al.*, PRL108, 112502 (2012);
C.J. Horowitz *et al.*, PRC85, 032501R (2012).

- Extensions to
- PREX-2
 - CREX (^{48}Ca)

$$R_n - R_p = 0.302 \pm 0.175 \text{ (exp)} \pm 0.026 \text{ (model)} \pm 0.005 \text{ (strange) fm}$$

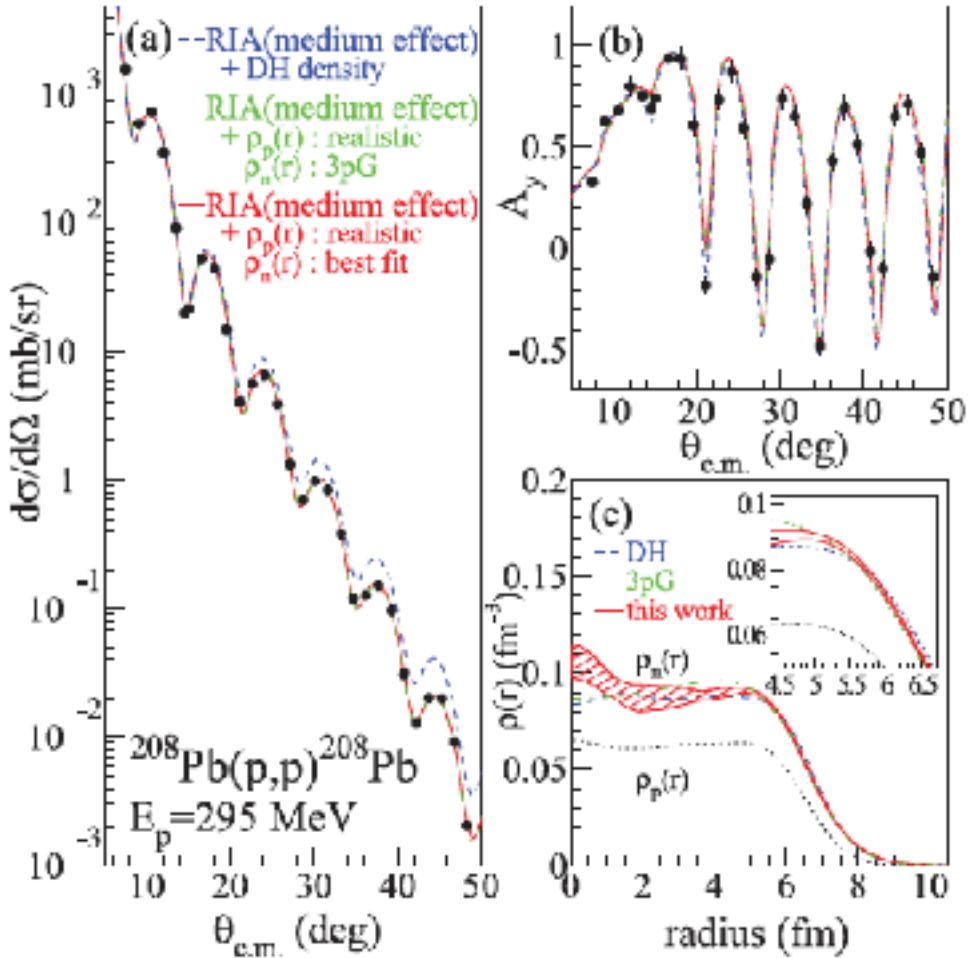
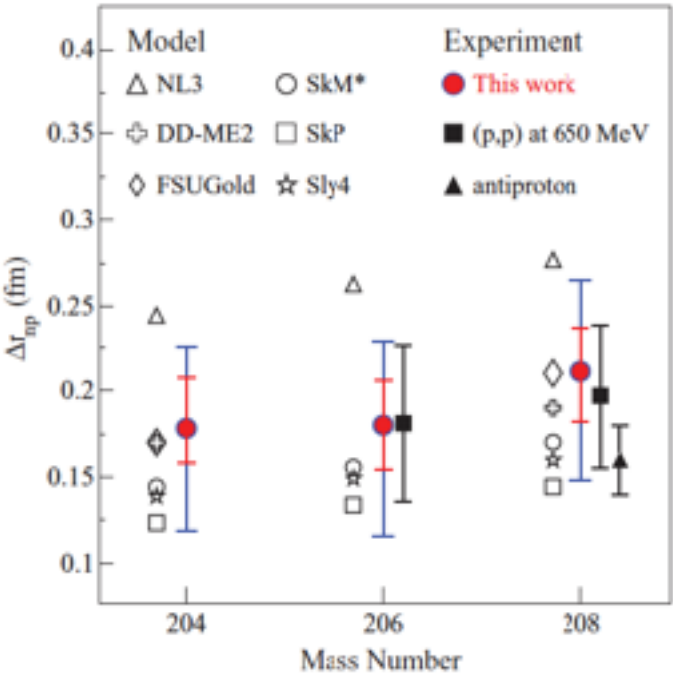
exp: 統計誤差

model: 主に表面のdiffusenessの記述に関するモデル依存性

strange: strangenessの寄与に関する不定性

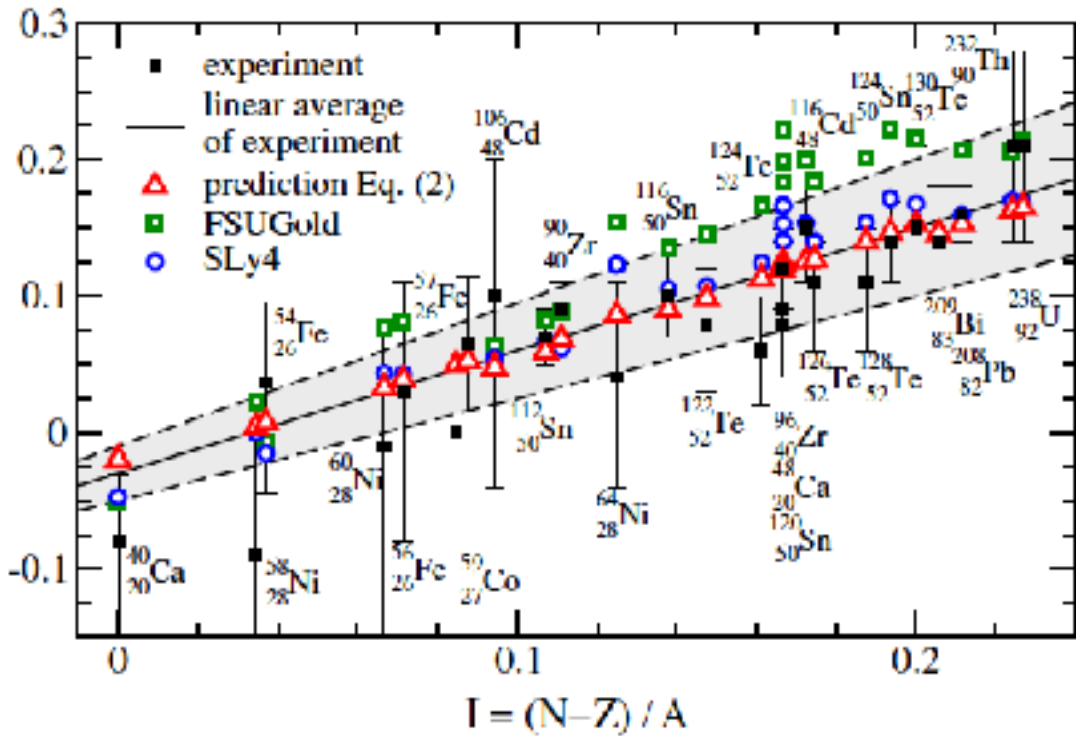
proton elastic scattering

J. Zenihiro et al., PRC 82, 044611 (2010)

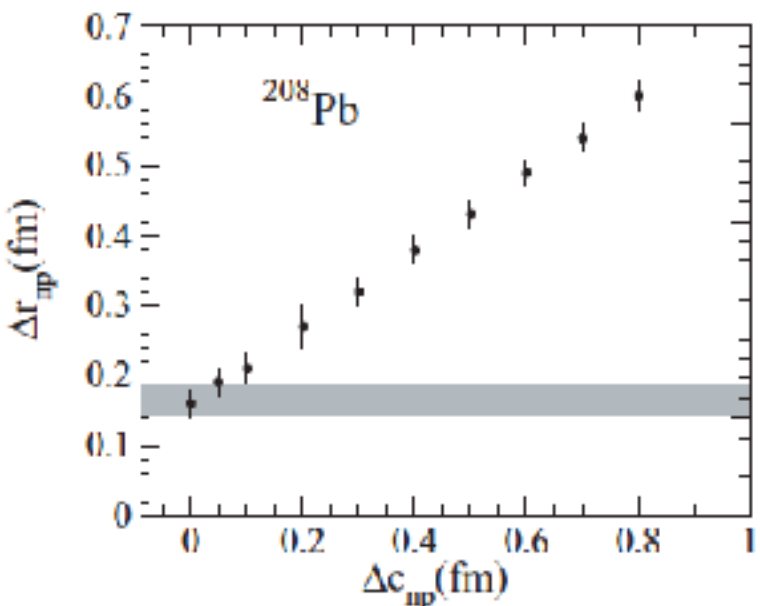


anti-protonic atom X-ray

M. Centelles et al., PRL 102, 122502 (2009)



B. Klos et al., PRC76, 014311 (2007)



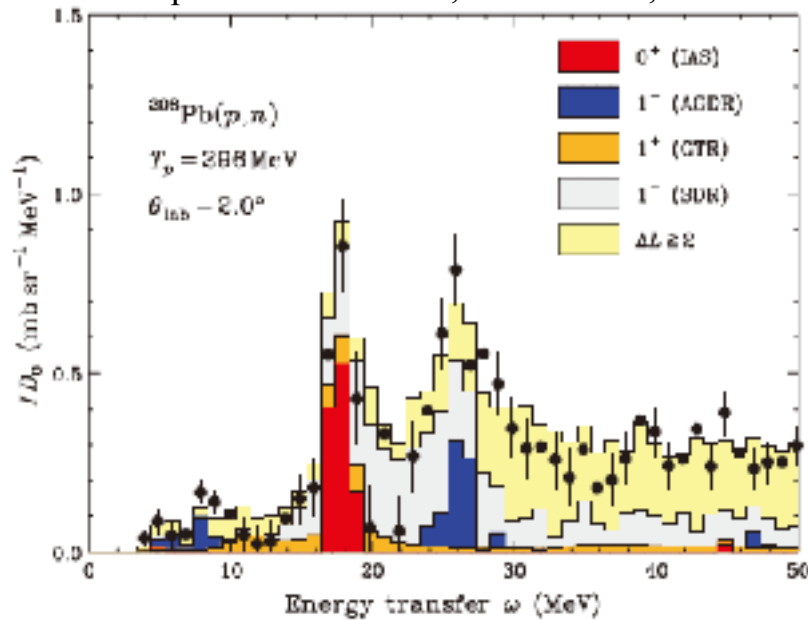
anti-analog GDR

Li-Gang Cao, PRC92, 034308 (2015)

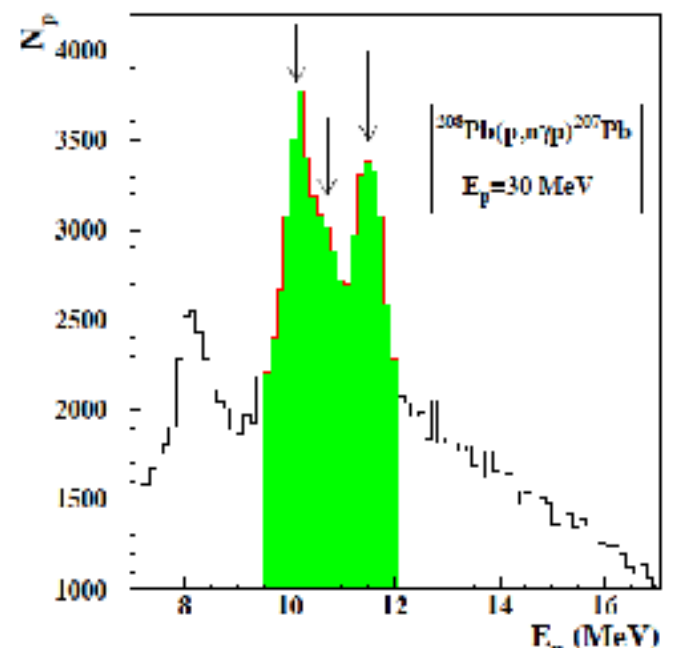
TABLE II. The values of the neutron skin thickness of ^{208}Pb obtained in the present work are compared to other values extracted by means of different experimental methods.

| Method | Ref. | Date | ΔR_{np} (fm) |
|---------------------------|---------|------|----------------------|
| antiproton absorption | [31] | 2001 | 0.180 ± 0.030 |
| (α, α') IVGDR | [69] | 2004 | 0.120 ± 0.070 |
| PDR | [43] | 2010 | 0.194 ± 0.024 |
| (\bar{p}, \bar{p}') | [35] | 2011 | 0.156 ± 0.025 |
| αp | [41] | 2012 | 0.168 ± 0.022 |
| parity violation | [29] | 2012 | 0.330 ± 0.170 |
| AGDR from Exp1 | [57] | 2013 | 0.216 ± 0.048 |
| AGDR from Exp2 | [54] | 2013 | 0.190 ± 0.028 |
| (γ, π^0) | [1] | 2014 | 0.150 ± 0.030 |
| AGDR from Exp1 | present | 2015 | 0.254 ± 0.062 |
| AGDR from Exp2 | present | 2015 | 0.218 ± 0.015 |

Exp1: J. Yasuda et al., PTEP 2013, 063D02

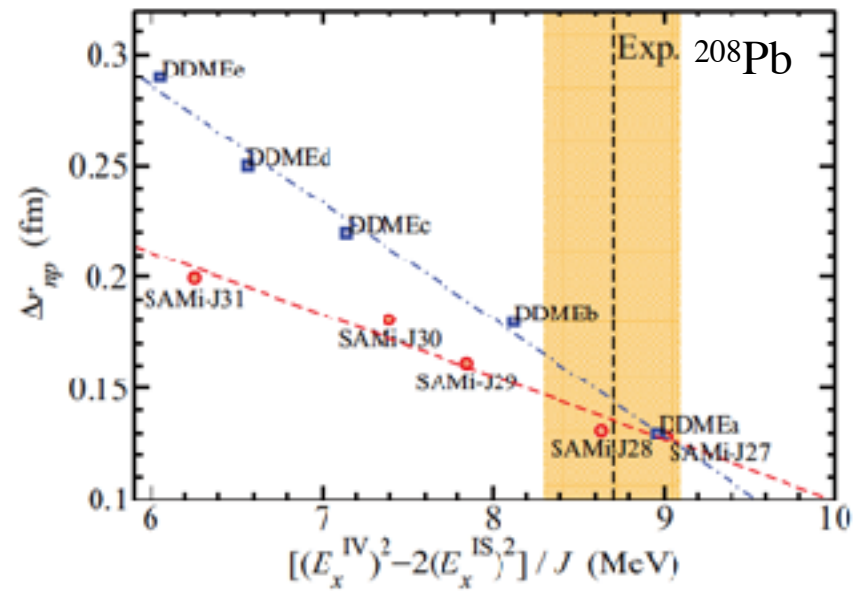


Exp2: A. Krasznahorkay et al., arXiv:1311.1456

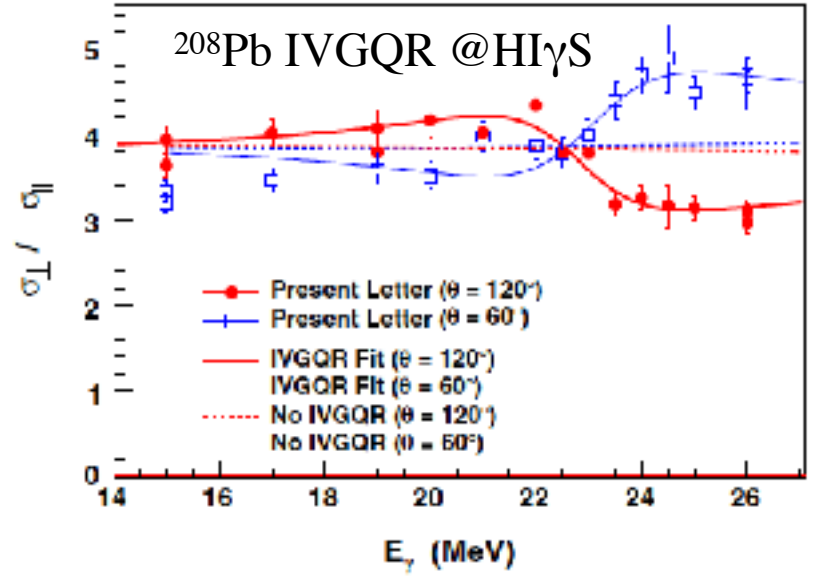


ISGQR-IVGQR

X. Roca-Maza et al., PRC87, 034301 (2013)



S.S. Henshaw et al., PRL 107, 222501 (2011)

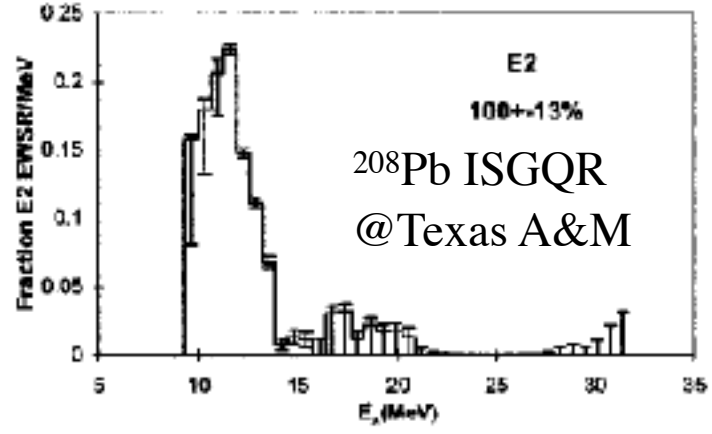


^{208}Pb

$\Delta r_{np} = 0.14 \pm 0.03$ fm for the DDME family
 $\Delta r_{np} = 0.14 \pm 0.02$ fm for the SAMi-J family

assumption: $J(S_0) = 32 \pm 1$ MeV

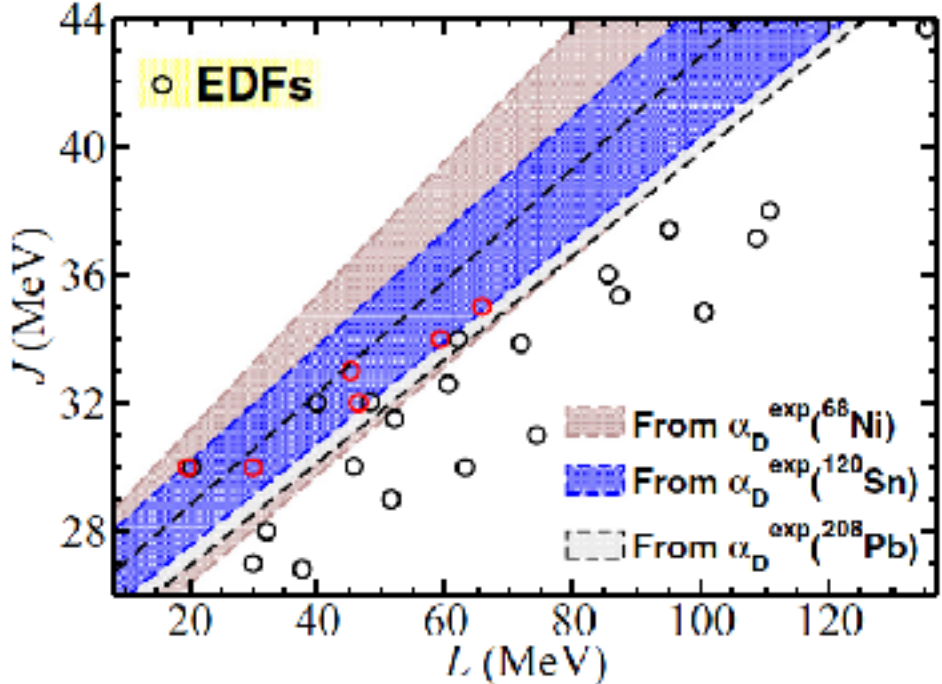
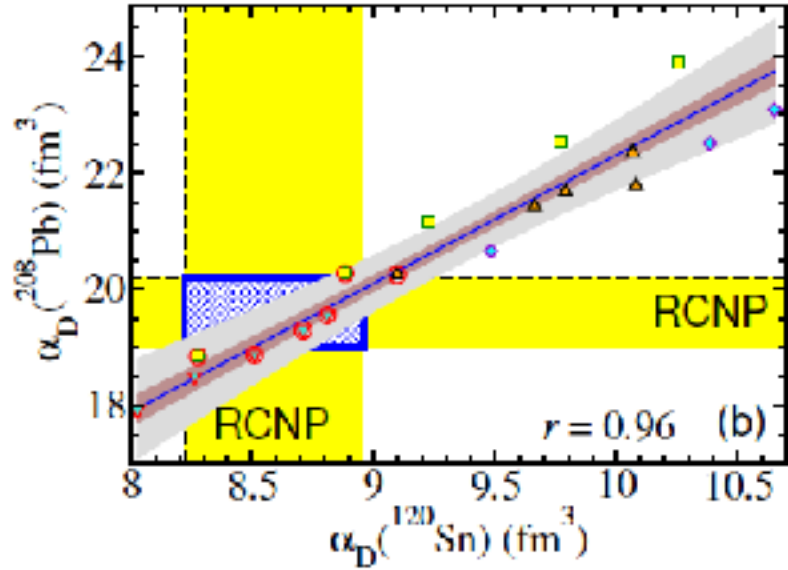
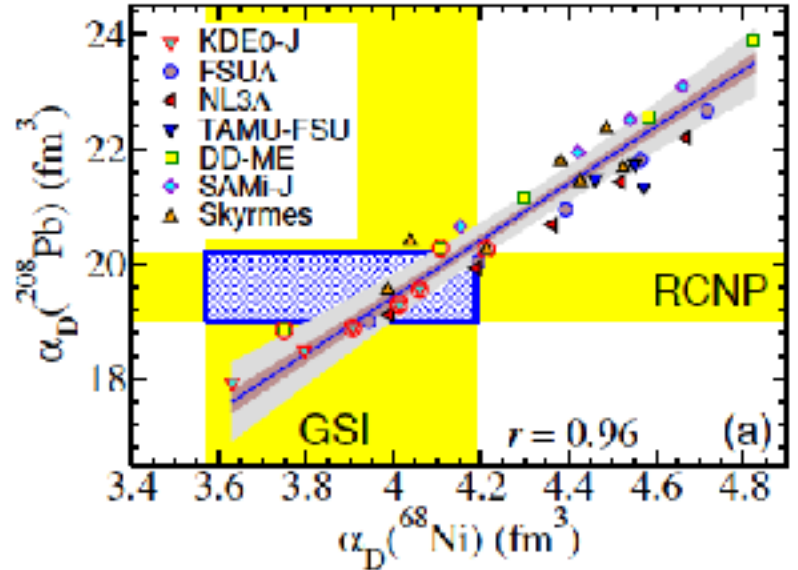
D.H. Youngblood et al., PRC69, 034315 (2004)



解析に仮定?

Electric Dipole Polarizability

X. Roca-Maza et al., PRC92, 064304(2015)



Data

²⁰⁸Pb: AT *et al.*, PRL107, 062502 (2011).

RCNP

¹²⁰Sn: T. Hashimoto *et al.*, PRC92, 031305(R)(2015).

RCNP

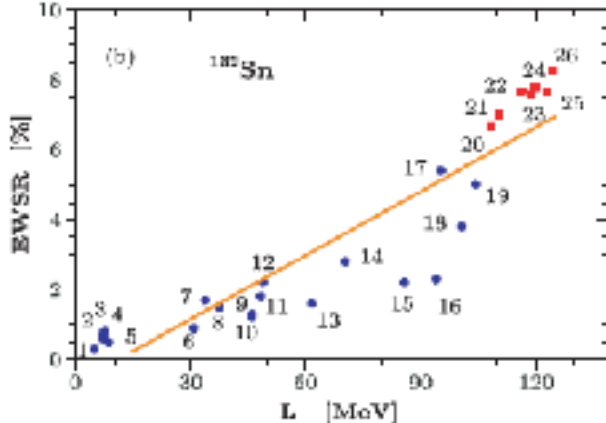
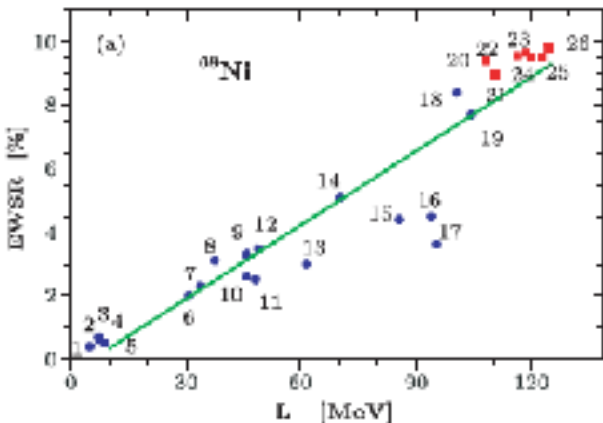
⁶⁸Ni: D.M. Rossi *et al.*, PRL111, 242503 (2013).

GSI

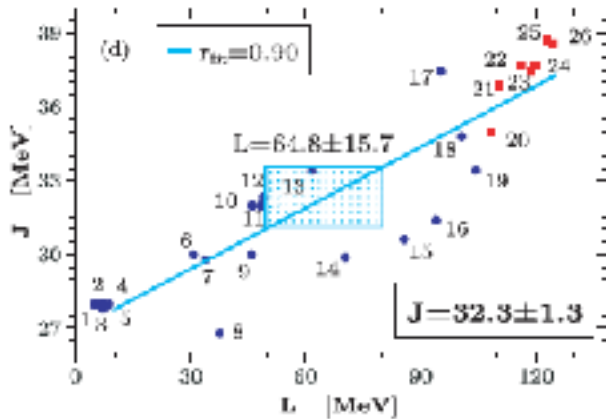
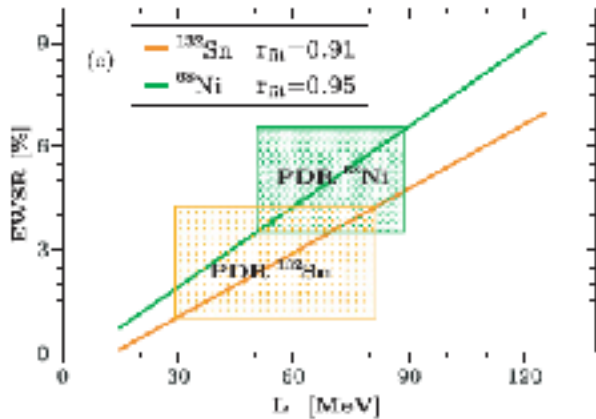
| nucleus | Δr_{np} (a) | Δr_{np} (b) | Δr_{np} (c) |
|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| ⁶⁸ Ni | 0.15–0.19 | 0.18 ± 0.01 | 0.16 ± 0.04 |
| ¹²⁰ Sn | 0.12–0.16 | 0.14 ± 0.02 | 0.12 ± 0.04 |
| ²⁰⁸ Pb | 0.13–0.19 | 0.16 ± 0.02 | 0.16 ± 0.03 |

Pygmy Dipole Resonance

A. Carbone et al., PRC81, 041301(R) (2010)



PDRの強度を実験と理論で比較する時、どの領域を積分すれば良いのかなど、確定的な議論をできない部分がまだ多い。



¹³²Sn Exp.: A. Klimkiewicz et al., PRC 76, 051603(R) (2007).

⁶⁸Ni Exp.: O. Wieland et al., PRL102, 092502 (2009)

→ Rossi et al., PRL111, 242503 (2013)

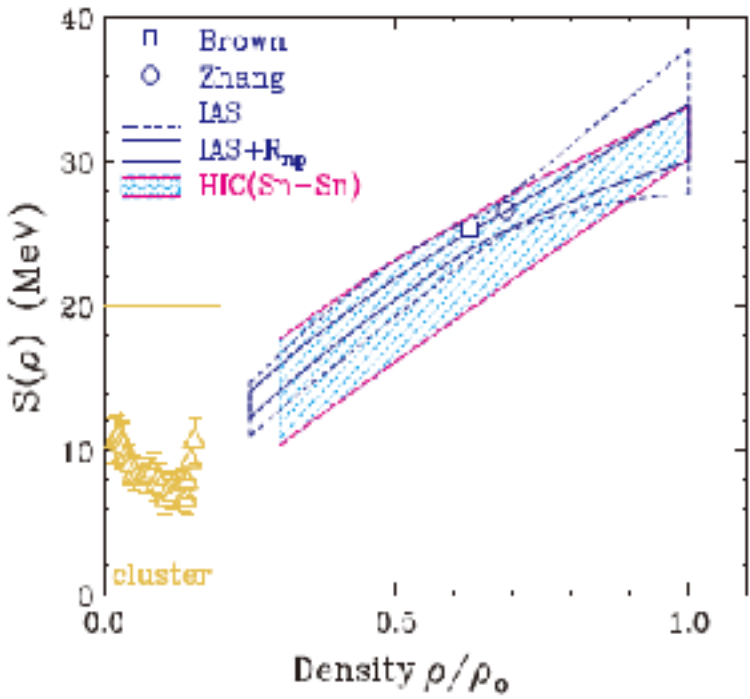
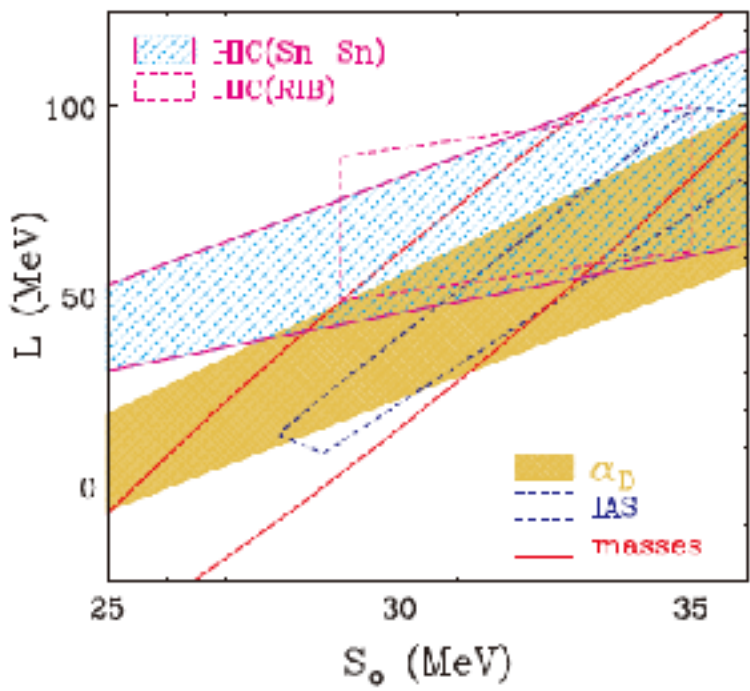
PDR(⁶⁸Ni) 5.0±1.5% EWSR

値に更新あり。結論はどう変わる？

→ 2.8±1.5% EWSR

HIC, IAS, Mass(FRDM)

C.J. Horowitz et al., J. Phys. G41 (2014) 093001



FRDM: P. Moeller et al., PRL 108, 052501 (2012)

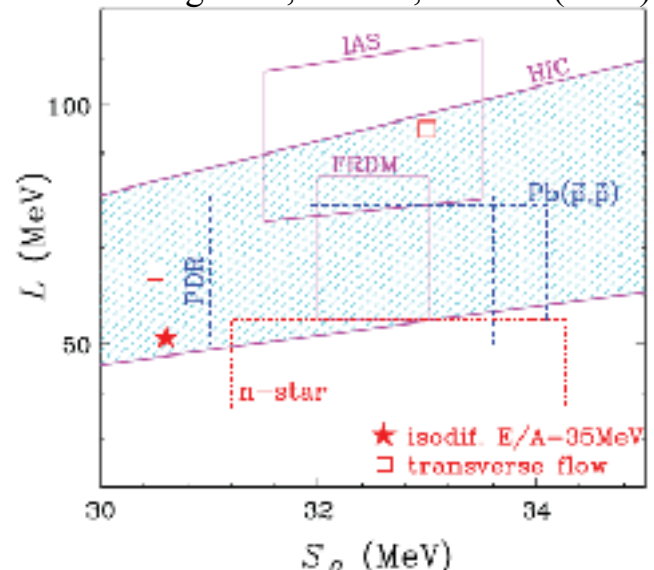
IAS: P. Danielewicz and J. Lee 2013 arXiv:1307.4130

HIC Isospin Difusion: M.B. Tsang et al., PRL102, 122701(2009)

n-star: A.W. Steiner et al., Astro. J. Lett. 765:L5

α_D : A. Tamii et al., EPJA (2014) 50: 28

M.B. Tsang et al., PRC86, 015803 (2012)



IASの解析に関しては疑義も多い。
 HICは反応モデルが確立していると言いがたい。
 FRDMのLは低い値に更新?
 n-star の半径の値は議論が収束していない。

$$\text{Incompressibility:} \quad K_{\infty} = 9 \rho_0^2 \left. \frac{d^2 E}{d\rho_0^2} \right|_{\text{eq}}$$

$$\text{Symmetry energy:} \quad a_{\text{sym}} = \frac{1}{2} \rho_0^2 \left. \frac{d^2 E}{d\rho_1^2} \right|_{\text{eq}}$$

$$\text{Slope of } a_{\text{sym}}: \quad I_s = 3\rho_0 \left. \frac{da_{\text{sym}}}{d\rho_0} \right|_{\text{eq}}$$

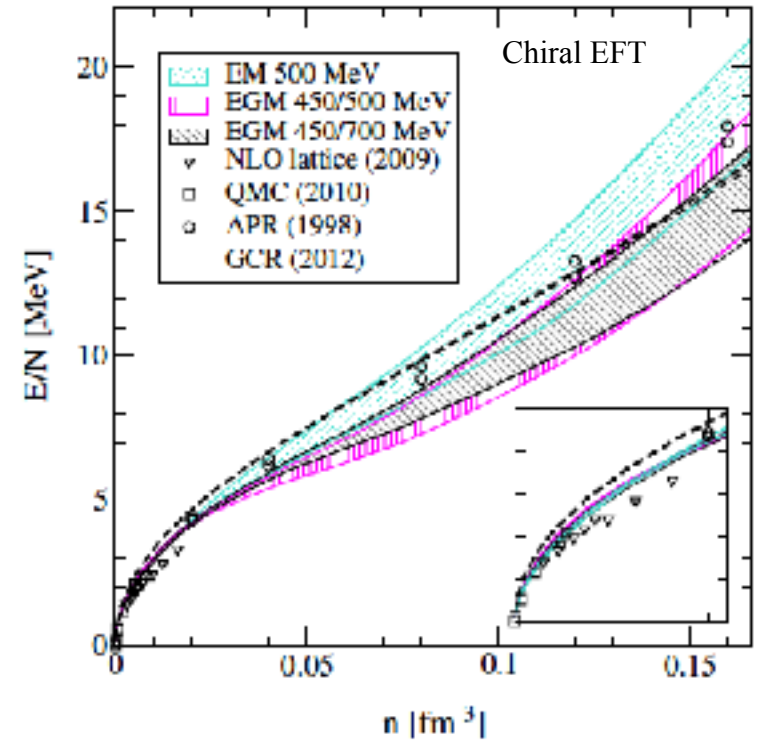
$$\text{Effective mass - SHF:} \quad \frac{\hbar^2}{2m^*} = \frac{\hbar^2}{2m} + \frac{\partial}{\partial \tau_0} \left. \frac{E}{A} \right|_{\text{eq}}$$

$$\text{Effective mass - RMF:} \quad m^* = m + G_{\sigma} \rho_0$$

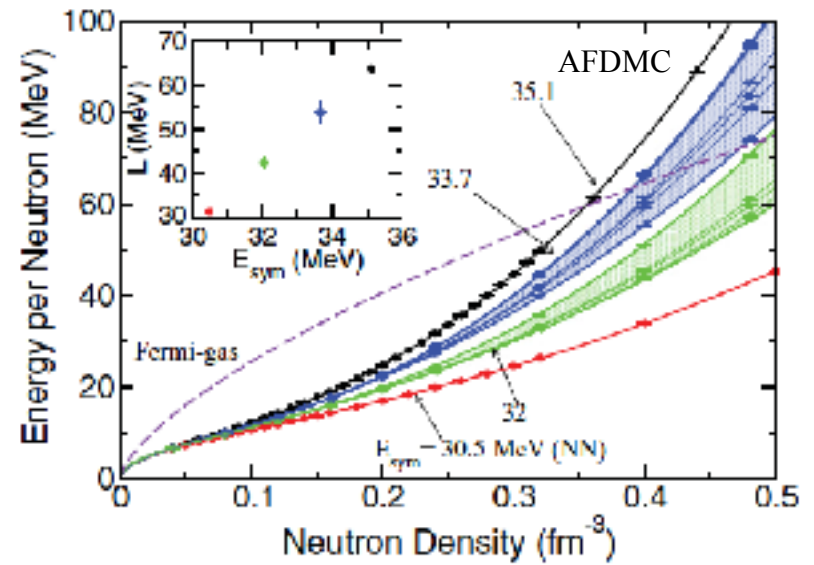
$$\text{TRK enhancement:} \quad \kappa_{\text{TRK}} = \frac{m}{m^*} - 1 + \frac{1}{2} \rho_0 \left. \frac{d}{d\rho_1} \frac{m}{m^*} \right|_{\text{eq}}$$

Theoretical Calculations

- 近年のfew-bodyの手法の無限系への展開は発展を予感させる。
 - Chiral-EFTの採用
 - QMC, AFDMCの理論計算
- 昔のAPR(AV18 + Illinois 3NF)と比較して傾向はあまり変わっていない

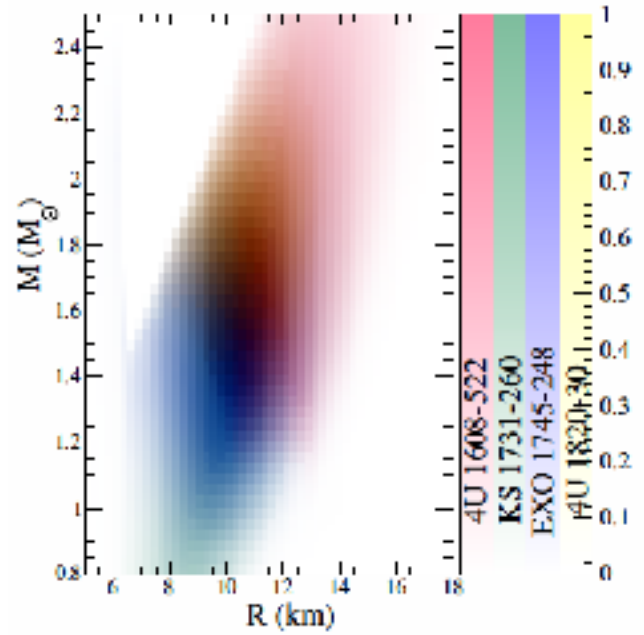


S. Gandolfi et al., PRC85, 032801(R) (2012)

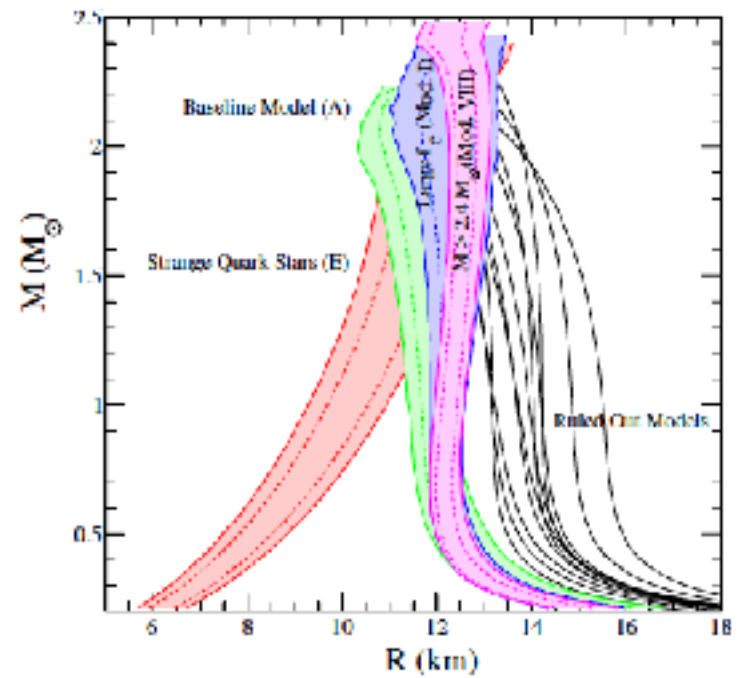


Astrophysical Observations

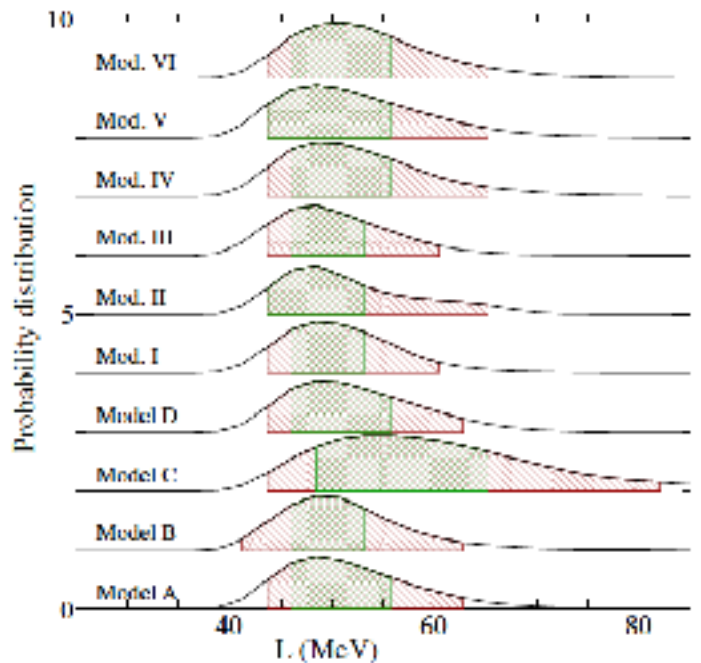
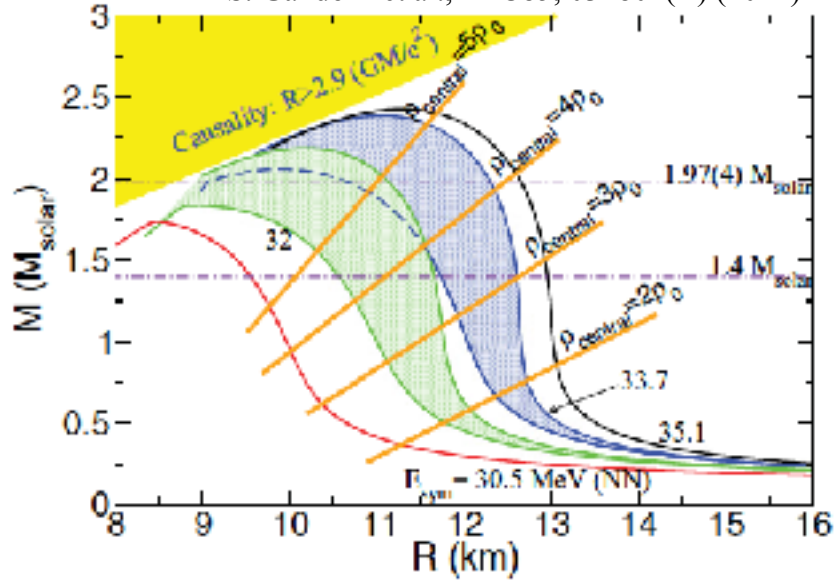
S. Gandolfi et al., EPJA (2014) 50: 10



A.W. Steiner et al., Astro. J. Lett. 765:L5



S. Gandolfi et al., PRC85, 032801(R) (2012)



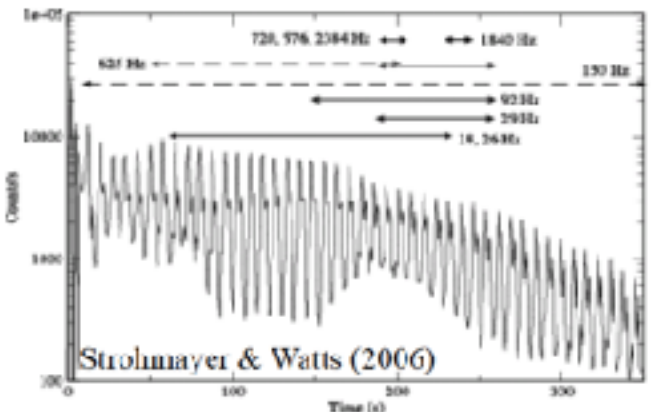
Astrophysical Observations

H. Sotani et al., PRL108, 201101 (2012)

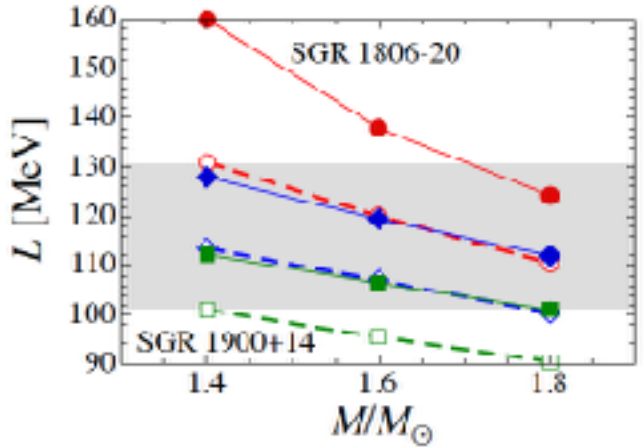
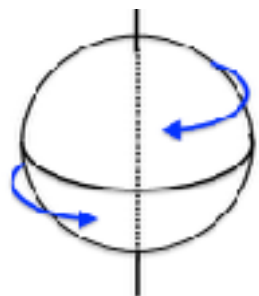
asteroseismology

- SGR 0526-66 (5th/3/1979) : 43 Hz
- SGR 1900+14 (27th/8/1998) : 28, 54, 84, 155 Hz
- SGR 1806-20 (27th/12/2004) : 18, 26, 30, 92.5, 150, 626.5, 1837 Hz
(Barat+ 1983, Israel+ 05, Strohmayer & Watts 05, Watts & Strohmayer 06)

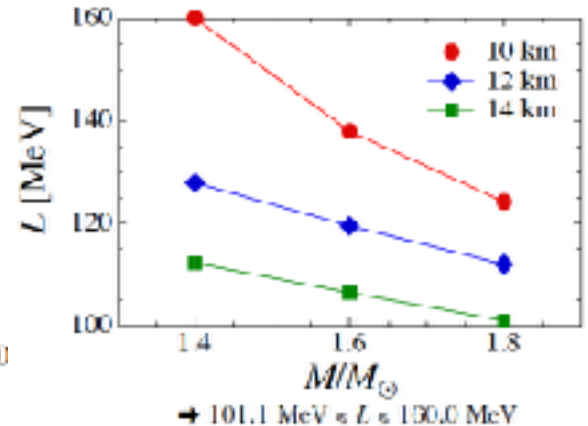
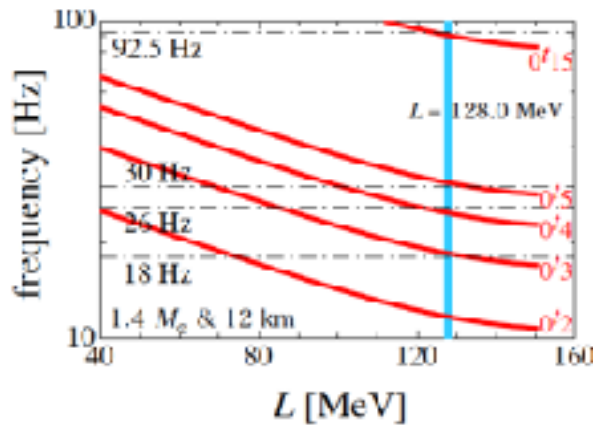
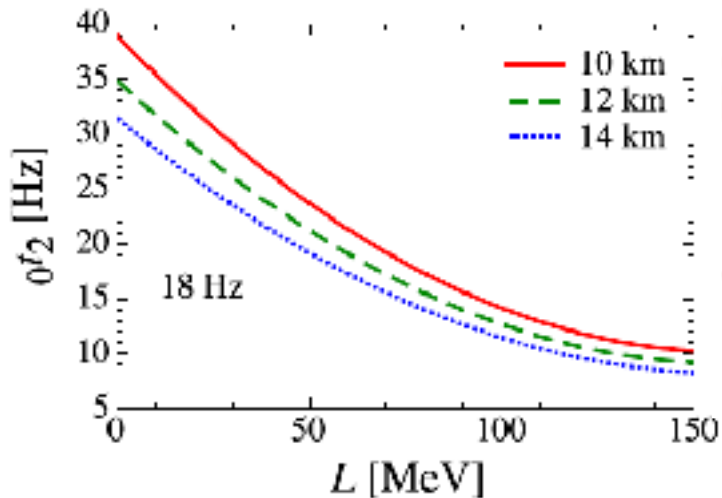
モードの対応が正確につくものだろうか？
内部構造などの詳細によらずにLが決まるのだろうか？



torsional oscillations



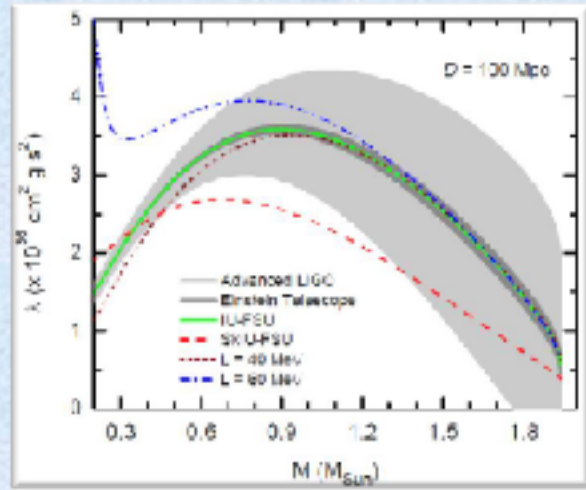
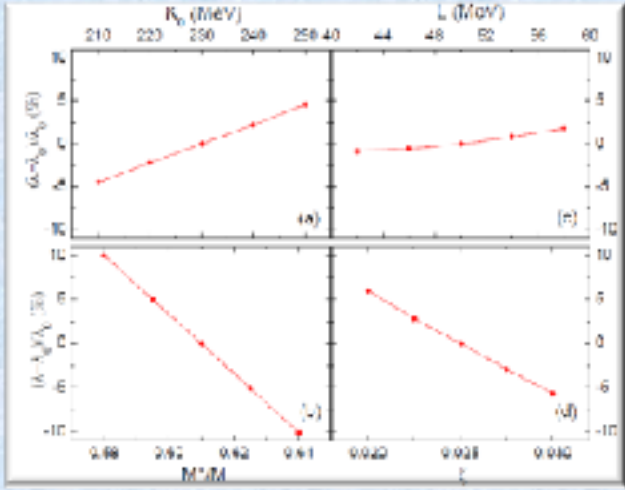
→ 101.1 MeV L 131.0 MeV



→ 101.1 MeV L 130.0 MeV

Gravitational Waves

Gravitational Wave Signals: Tidal Love number and Tidal Polarizability



| EOS | L | R | k_2 | λ | $\Delta\lambda/\lambda$ |
|------------|------|-------|--------|-----------|-------------------------|
| IU-FSU | 47.2 | 12.49 | 0.0930 | 2.828 | — |
| IU-FSU-min | 40.0 | 12.20 | 0.1054 | 2.841 | + 0.46 % |
| IU-FSU-max | 60.0 | 13.07 | 0.0761 | 2.906 | + 2.76 % |
| SkIU-FSU | 47.2 | 11.71 | 0.0753 | 1.657 | -41.41 % |



Tidal polarizability

At low frequency, tidal corrections to the GW waveforms phase depends on single parameter: Love number. Fattoyev et al., Phys. Rev. C, 087, 015806 (2013)

Tidal polarizability is measurable at a 10% level (even up to merger, Damour and Nagar, 2012)

Spin Susceptibility

Magnetic dipole ($M1$) operator

$$O(M1) = g_l^{IS} l + \underline{g_s^{IS} \sigma} + g_l^{IV} l \cdot \tau + \underline{g_s^{IV} \sigma \cdot \tau}$$

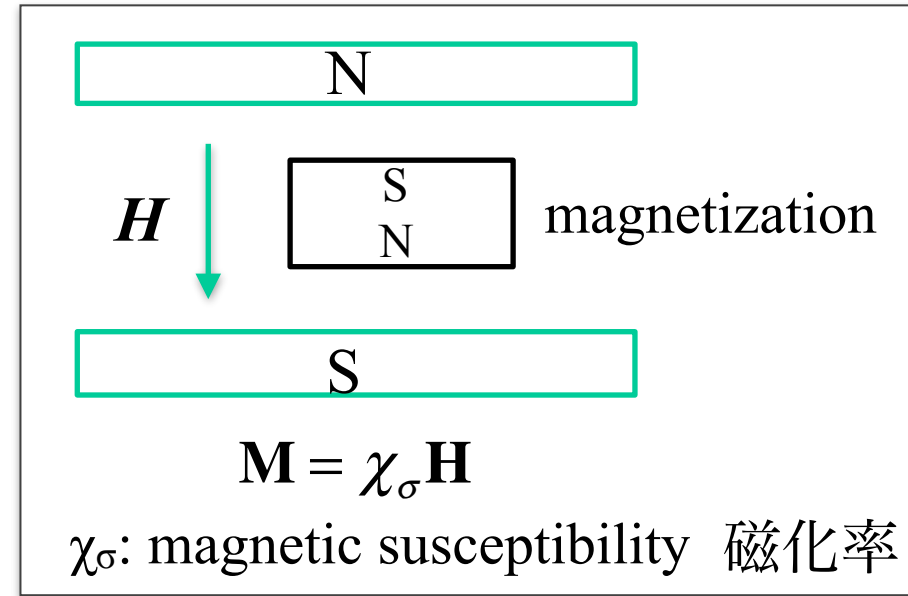
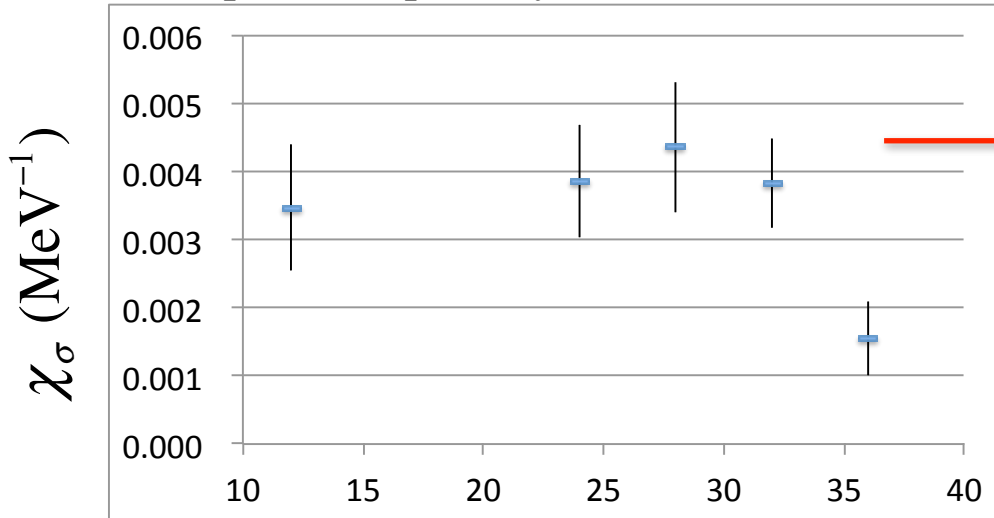
spin terms (σ): paramagnetism 常磁性

orbital terms (l): diamagnetism 反磁性

Inversely energy-weighted sum rule
of the spin-M1 \rightarrow **Spin Susceptibility**

$$\chi_\sigma^{spin} = \frac{8}{3N} \sum_f \frac{1}{\omega} \left| \langle f | \sum_i \sigma_i | 0 \rangle \right|^2$$

spin-susceptibility of $N=Z$ nuclei



$0.0044(7) \text{ MeV}^{-1}$ at $\rho=0.16 \text{ fm}^{-3}$

Neutron matter calc. by AFDMC model

G. Shen et al., PRC87, 025802 (2013)

- magnetic response of nuclear matter (e.g. in a magnetar)
- ν -emissivity
- ν -transportation