

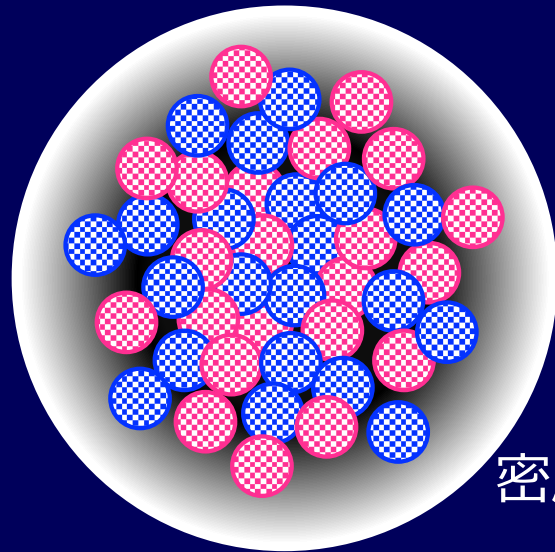
宇宙史研究センター
2022年度 第2回構成員会議・成果報告&交流会
2022/11/28

非対称核物質の理解に向けた 不安定核の反応断面積測定

森口 哲朗
筑波大学

原子核

有限個の核子からできた系



陽子 (m_p) 中性子 (m_n)

核子

$$m_N \sim 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\text{密度 } \rho \sim 0.17 \text{ 個/fm}^3$$

$$(\text{=} \rho_0)$$

$$r \sim 10^{-15} \text{ m } (\propto A^{1/3})$$

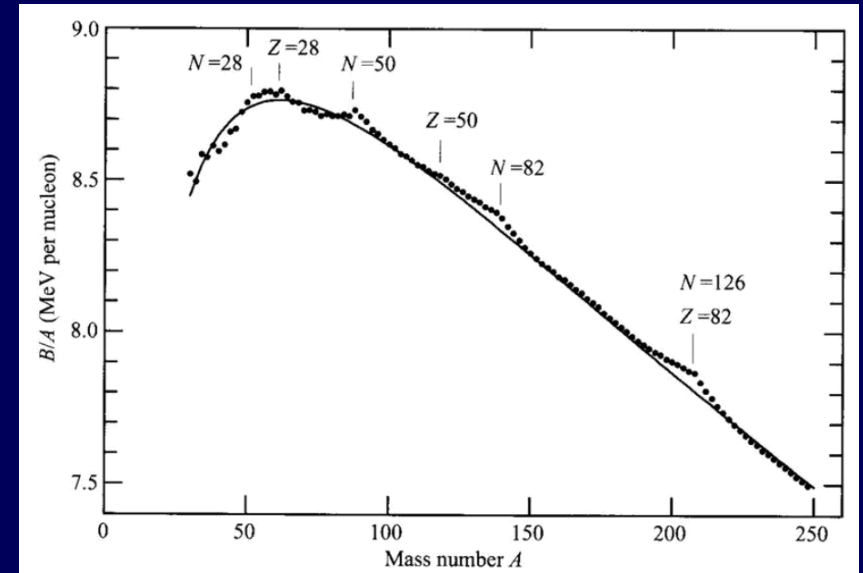
$$Mc^2 = (Zm_p - Nm_n)c^2 - B$$

↑ ワイゼッカー・ベータ質量公式

$$-a_V A + a_S A^{2/3} + a_{sym} \frac{(N - Z)^2}{A} + a_C \frac{Z^2}{A^{1/3}} + \varepsilon(Z, N)$$

体積項 表面項 対称項 クーロン項 2核子系の対相互作用

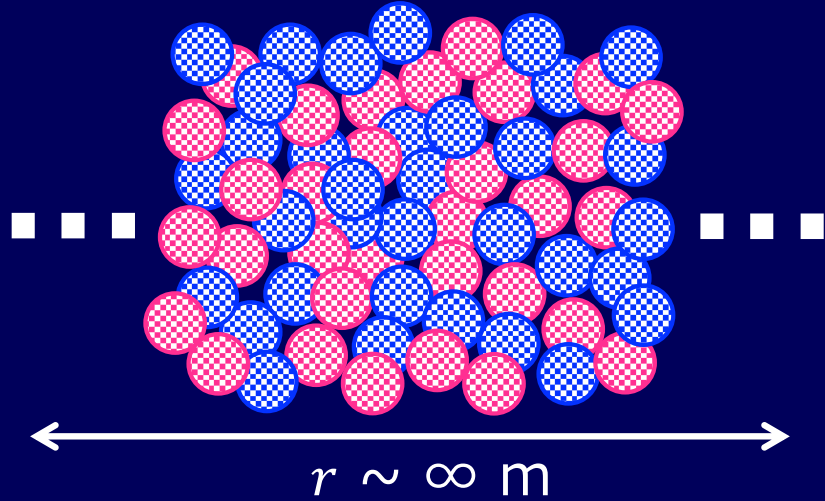
M 原子核の質量
B 束縛エネルギー
Z 陽子数
N 中性子数
A 質量数(Z + N)



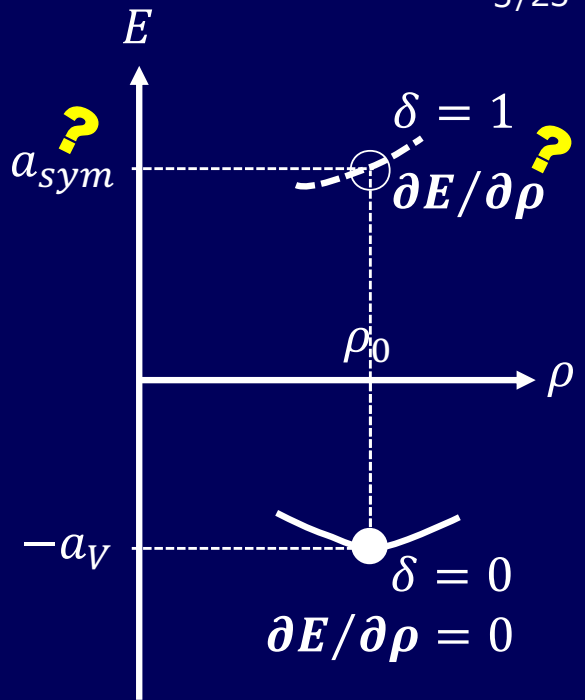
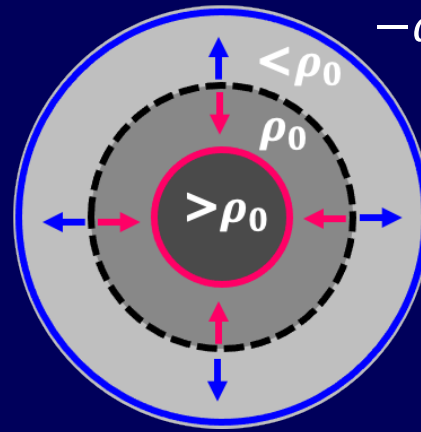
$$B/A \approx 8 \text{ MeV}$$

核物質

無限個の核子からできた系



圧力 $P \propto \partial E / \partial \rho$



$$Mc^2 = (Zm_p - Nm_n)c^2 - B$$

↑ ワイゼッカー・ベータ質量公式

$$-a_v A + a_s A^{2/3} + a_{sym} \frac{(N-Z)^2}{A} + a_c \frac{Z^2}{A^{1/3}} + \varepsilon(Z, N)$$

体積項 表面項 対称項 クーロン項 2核子系の対相互作用

M 原子核の質量
B 束縛エネルギー
Z 陽子数
N 中性子数
A 質量数(Z + N)

$$\Rightarrow E(= -B/A) \approx -a_v + a_{sym} \delta^2 \quad \left(\text{非対称度 } \delta = \frac{N-Z}{A} \right)$$

対称核物質 ($\delta = 0$) : $E = -a_v$

非対称核物質 ($\delta = 1$) : $E = -a_v + a_{sym}$
※中性子のみ

対称核物質の
※実験から、
 $a_v \approx 16 \text{ MeV}$

核物質の状態方程式

(Equation of State, EOS)

$$E(\rho, \delta) = \underbrace{E(\rho, 0)}_{\text{対称核物質}} + \underbrace{S(\rho)\delta^2 + \dots}_{\text{非対称核物質}}$$

対称核物質 非対称核物質

$$\rho = \rho_n + \rho_p$$

$$\delta = (\rho_n - \rho_p)/\rho$$

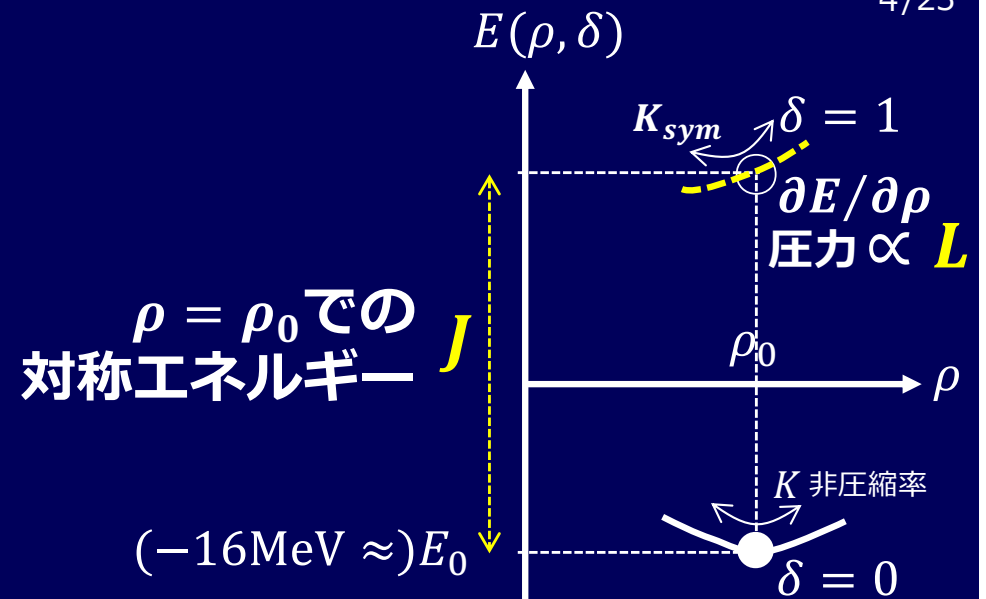
$$x = (\rho - \rho_0)/(3\rho_0)$$

$$E(\rho, 0) = E_0 + \frac{K}{2}x^2 + \dots$$

$$S(\rho) = J + Lx + \frac{K_{sym}}{2}x^2 + \dots$$

非対称核物質の

実験から決めたい

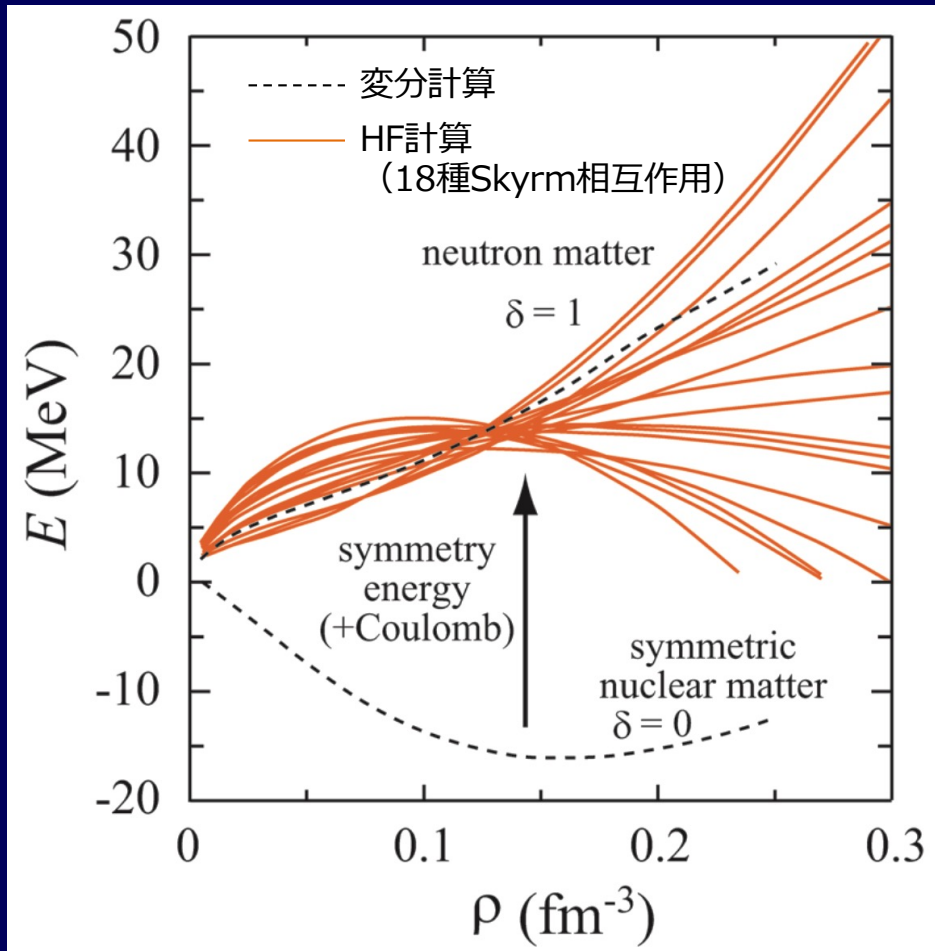


$$P(\rho) = \rho^2 \frac{\partial E(\rho)}{\partial \rho} \text{ より、}$$

$$P(\rho_0) = \rho_0^2 \frac{\partial S(\rho)}{\partial \rho} = \frac{\rho_0}{3} L$$

L は、圧力を表す。

民井淳氏、日本物理学会誌69, No.1 (2014)

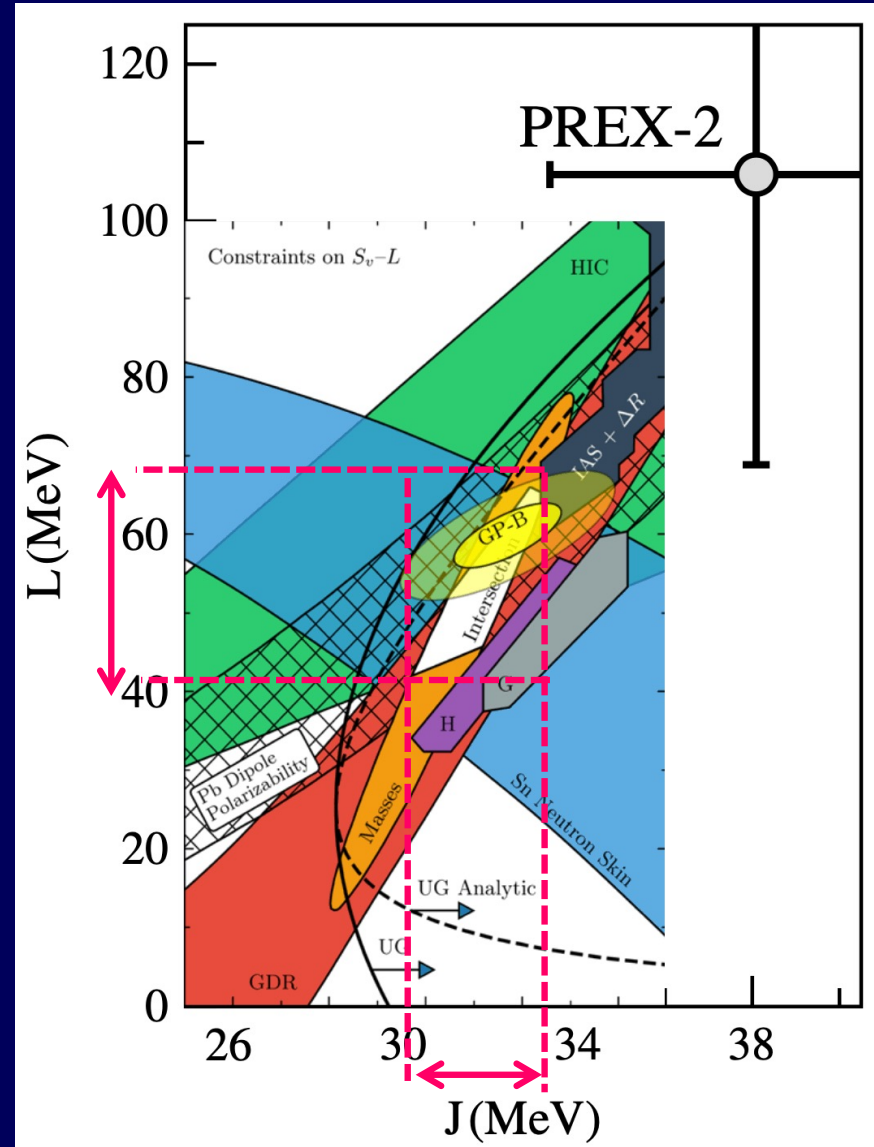


$$E(\rho, \delta) = E(\rho, 0) + S(\rho)\delta^2 + \dots$$

$$S(\rho) = J + Lx + \dots$$

$$x = (\rho - \rho_0)/(3\rho_0)$$

Brendan T. Reed et al., PRL126, 172503 (2021)



$$J \approx 32 \pm 1 (\sim 3\%) \text{ MeV}$$

$$L \approx 55 \pm 15 (\sim 27\%) \text{ MeV}$$

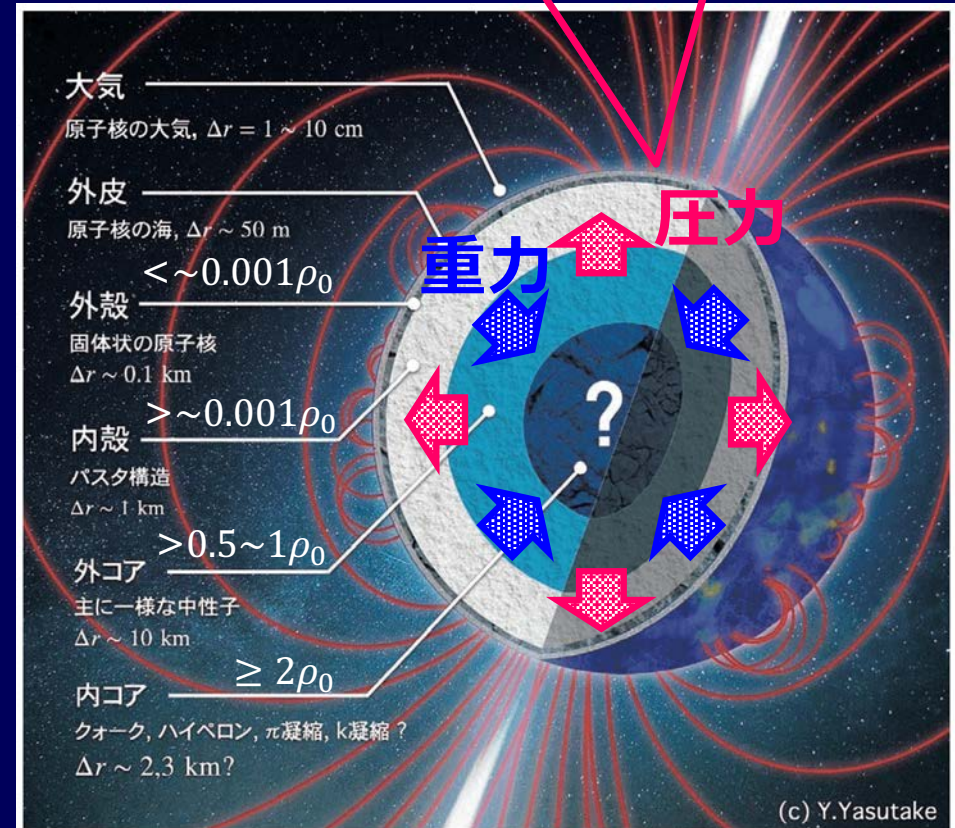
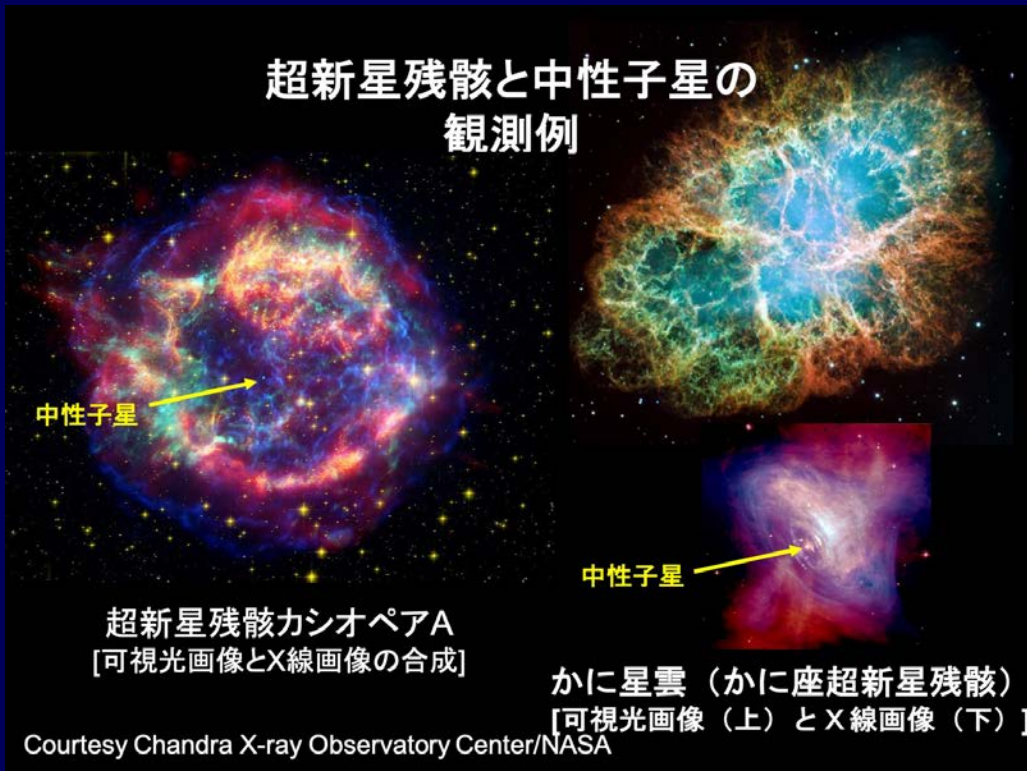
中性子星

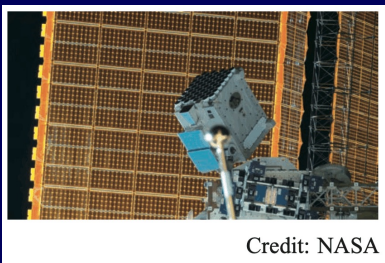
- 太陽質量の8倍以上の星が超新星爆発した時の残骸として生まれた天体



- 質量は太陽質量の1.4~2倍、半径は10~15 km、コアの密度は原子核密度の2倍以上

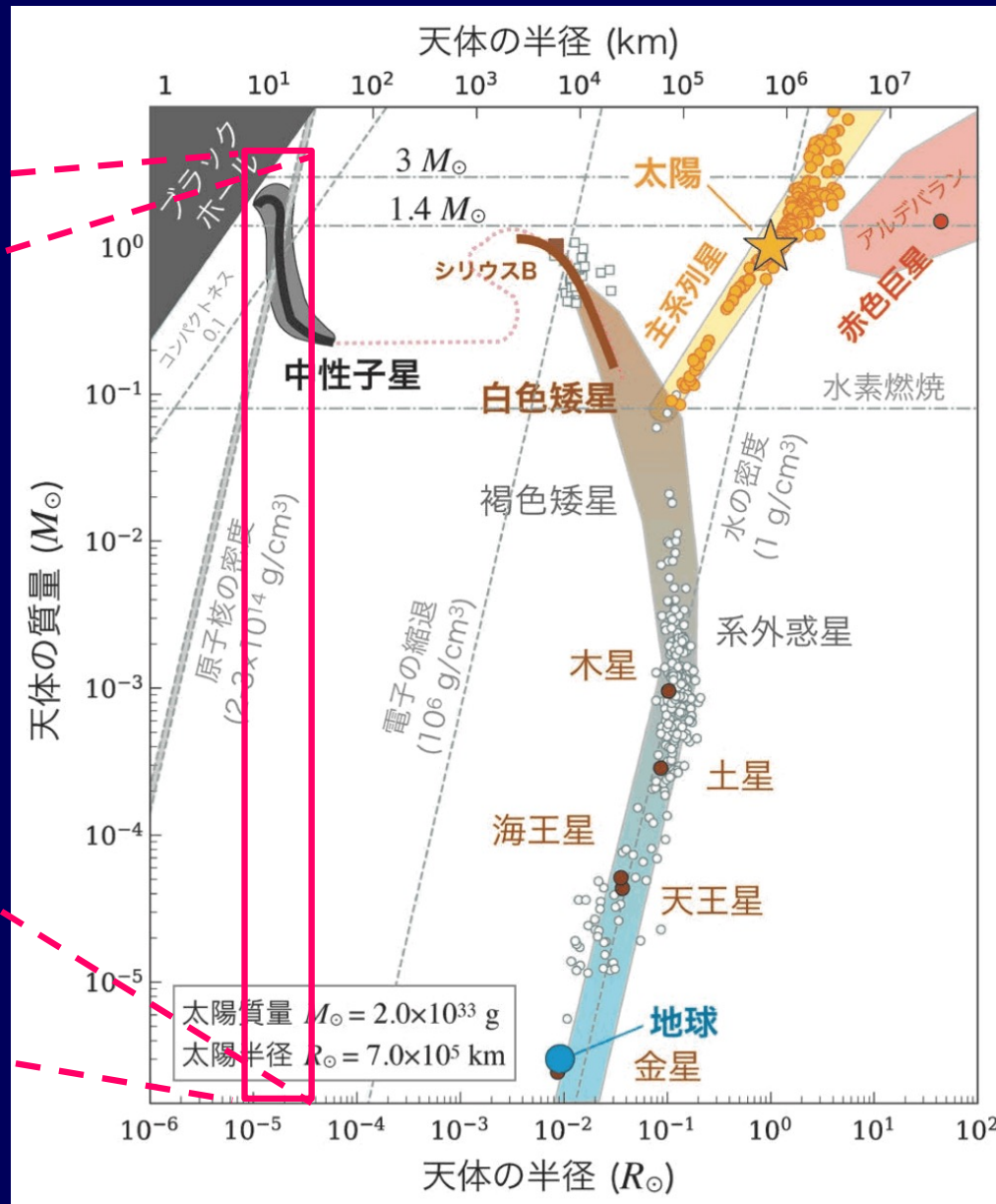
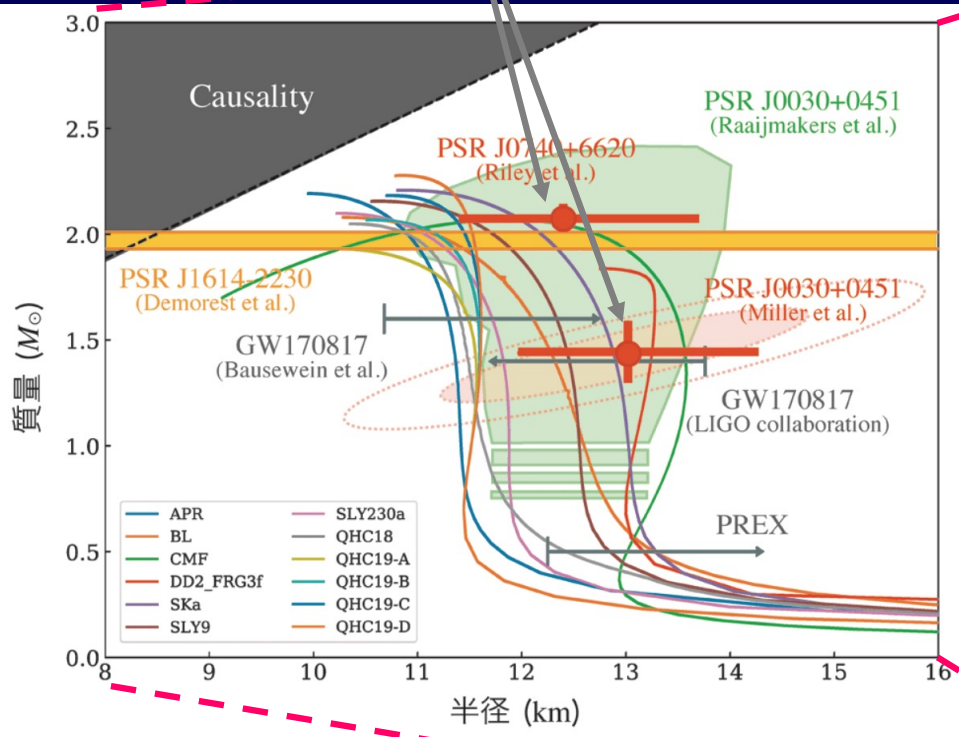
圧力が状態方程式





X線望遠鏡
NICER

Credit: NASA



天体観測 ↓ ↑ 地上実験

核物質の状態方程式

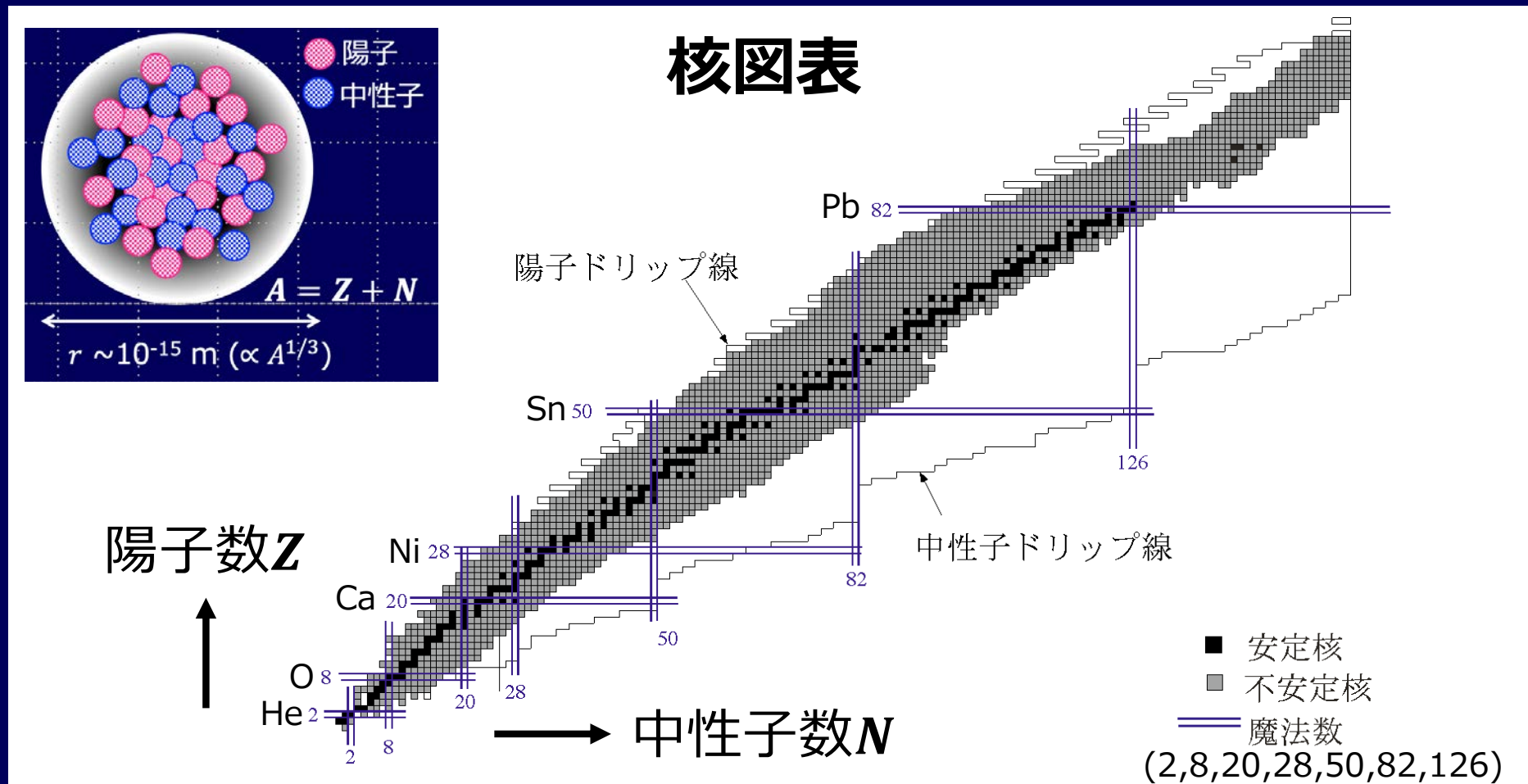
$$E(\rho, \delta) = E(\rho, 0) + S(\rho)\delta^2 + \dots$$

$$S(\rho) = J + Lx + \dots$$

$$x = (\rho - \rho_0)/(3\rho_0)$$

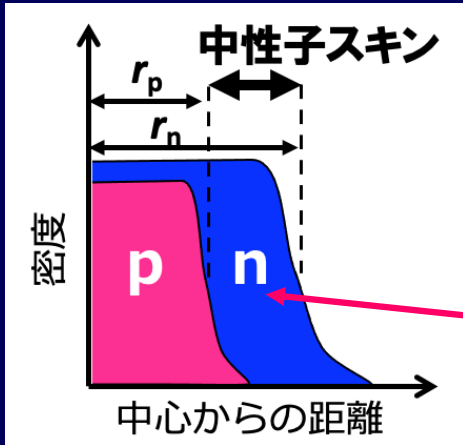
安定核と不安定核

- 理論的に約7000~10000種類あると予想
 - 安定核：天然に存在（～300種）
 - 不安定核：有限の寿命を持ち崩壊（残り全て）
- 多くの不安定核は、実験的にその存在すら確認されていない



中性子スキン

重い原子核や中性子過剰核の表面に現れる中性子の層



スキン厚： r_n と r_p の差

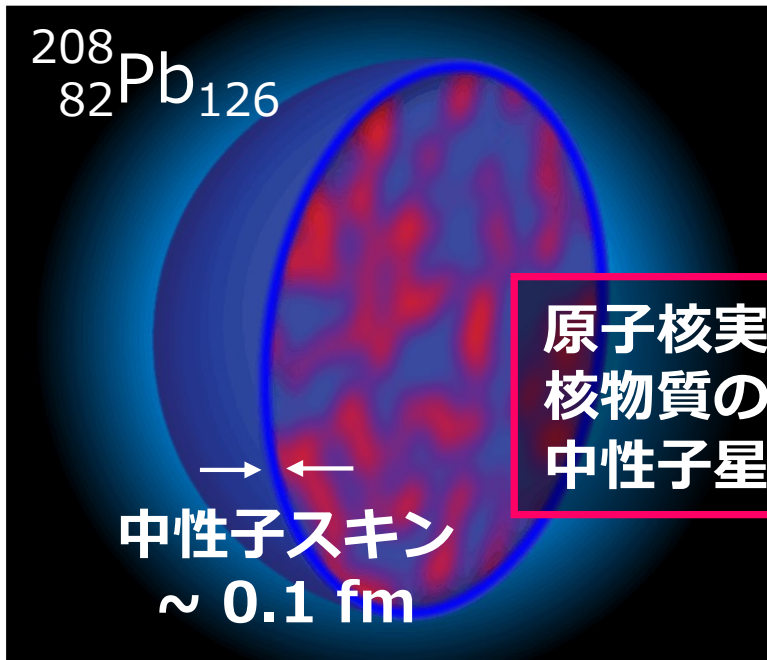
**中性子物質
とみなせる**

平均自乗根半径 $r_{rms} = \frac{\int_0^\infty r^2 \rho(r) r^2 dr}{\int_0^\infty \rho(r) r^2 dr}$

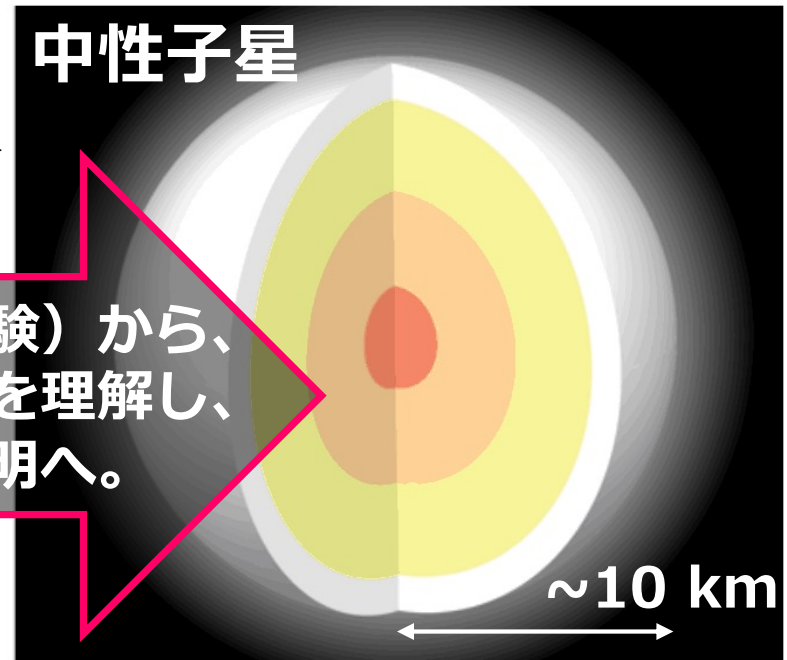
陽子密度分布 $\rho_p(r)$ なら r_p
 中性子密度分布 $\rho_n(r)$ なら r_n

核子密度分布 $\rho_m(r) (= \rho_p(r) + \rho_n(r))$ なら r_m

ミクロな中性子物質



マクロな中性子物質



$\sim 10^{20}$
 $\leftarrow \text{---} \rightarrow$

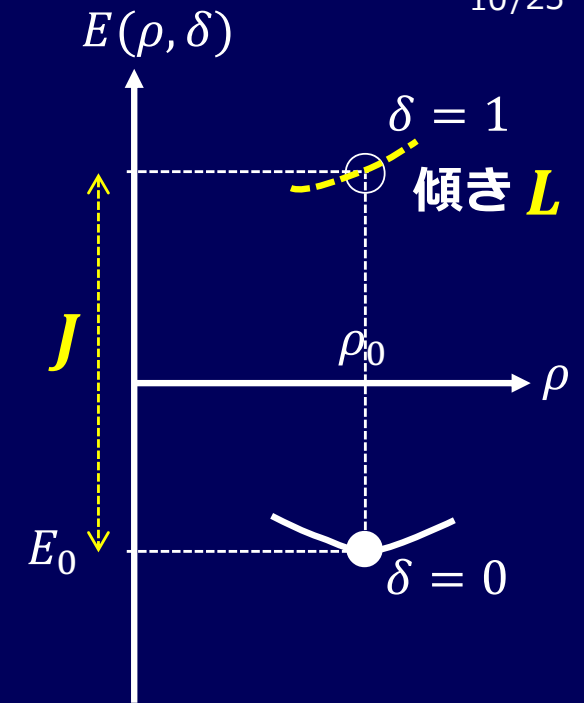
原子核実験（地上実験）から、
 核物質の状態方程式を理解し、
 中性子星の構造の解明へ。

中性子スキンとL

$$E(\rho, \delta) = E(\rho, 0) + S(\rho)\delta^2 + \dots$$

$$S(\rho) = J + Lx + \dots$$

$$x = (\rho - \rho_0)/(3\rho_0)$$

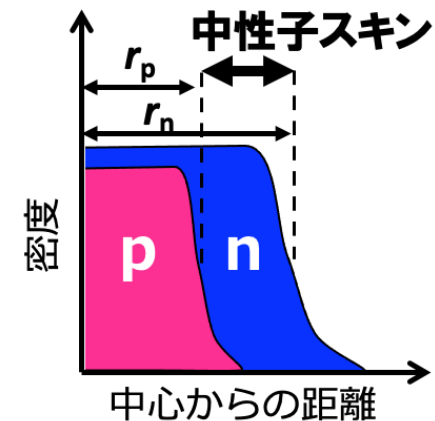


スキン厚 ($\delta R = r_n - r_p$) の測定

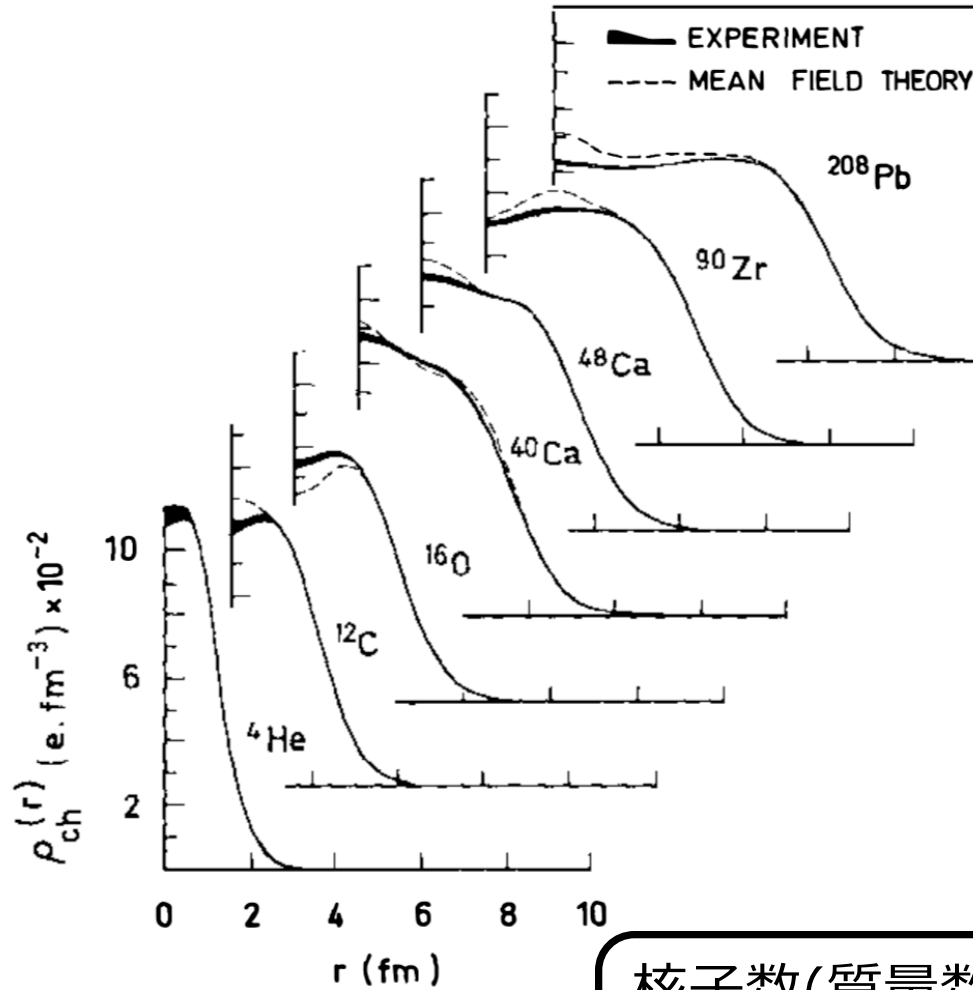
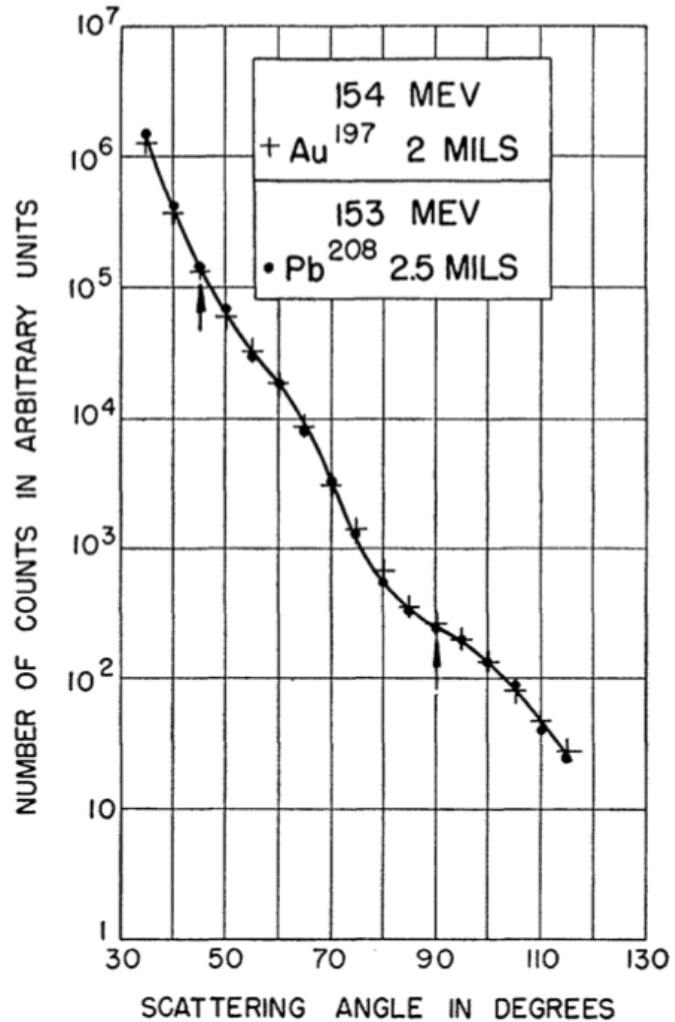
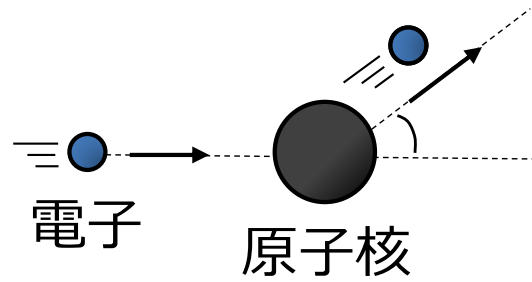
- 直接測定
 - 陽子半径 r_p
 - 中性子半径 r_n
- 間接測定 (共鳴反応)

$$\text{圧力 } P \propto \partial E / \partial \rho \propto L$$

L 大 \Rightarrow スキン厚 大
 L 小 \Rightarrow スキン厚 小



電子散乱実験 ⇒ 原子核の電荷（陽子）分布を知る



核子数(質量数)

208
82 **Pb** 126

陽子数

中性子数

(原子番号)

$$\text{スキン厚} : \delta R = r_n - r_p$$

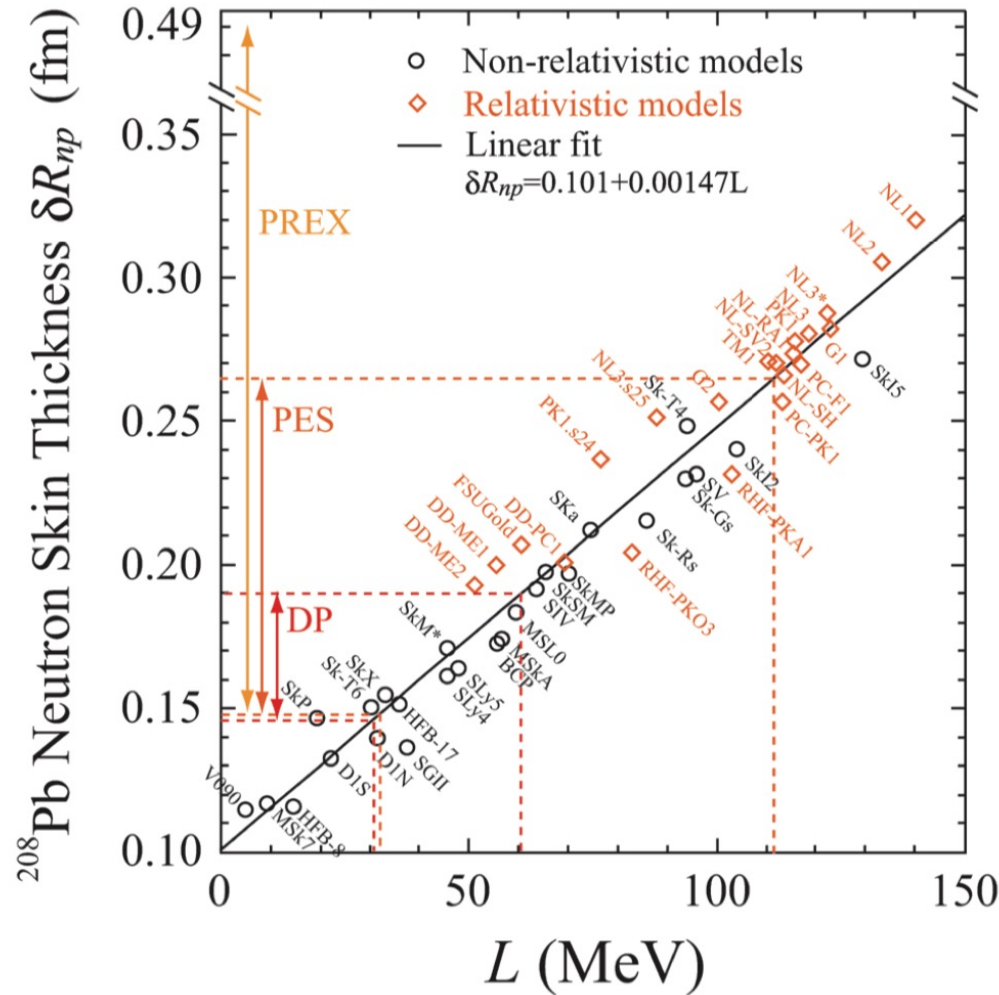


図3 中性子スキン厚 (δR_{np}) と対称エネルギーの傾きパラメータ (L) の相関を種々の相互作用を用いて計算した結果 (四角および丸) とそれを直線フィットしたもの (実線). PREX, DP (双極分極率), PES (陽子弾性散乱) はそれぞれ2.1, 2.2, 2.3節の実験による中性子スキン厚の測定結果.

<直接測定>

陽子分布半径

- 電子散乱 ※通常、安定核のみ

中性子分布半径

- PREX (電子散乱)
電子散乱の弱い相互作用 (パリティ非保存) による非対称度を測定
- PES (陽子弾性散乱)
核力の強い相互作用による弾性散乱の微分断面積を測定

<間接測定>

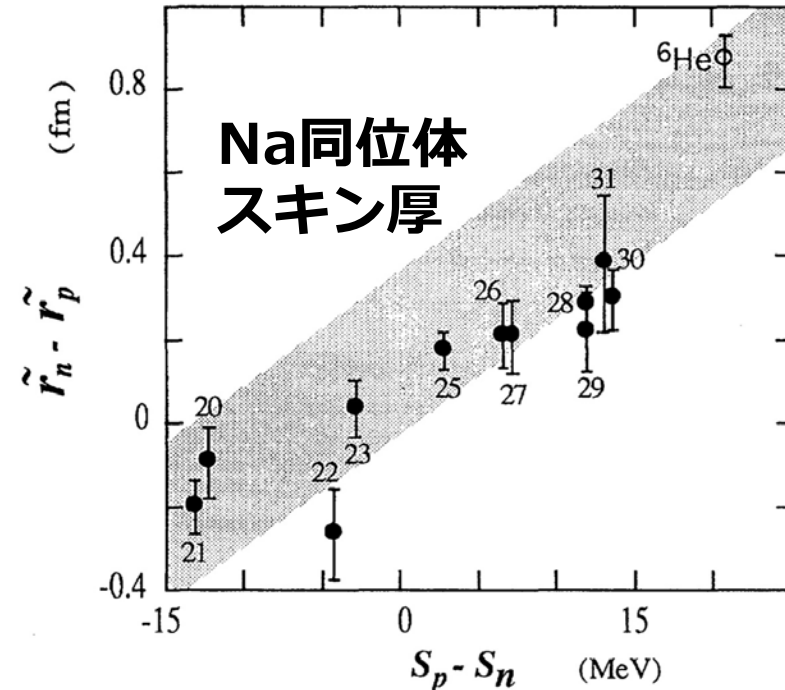
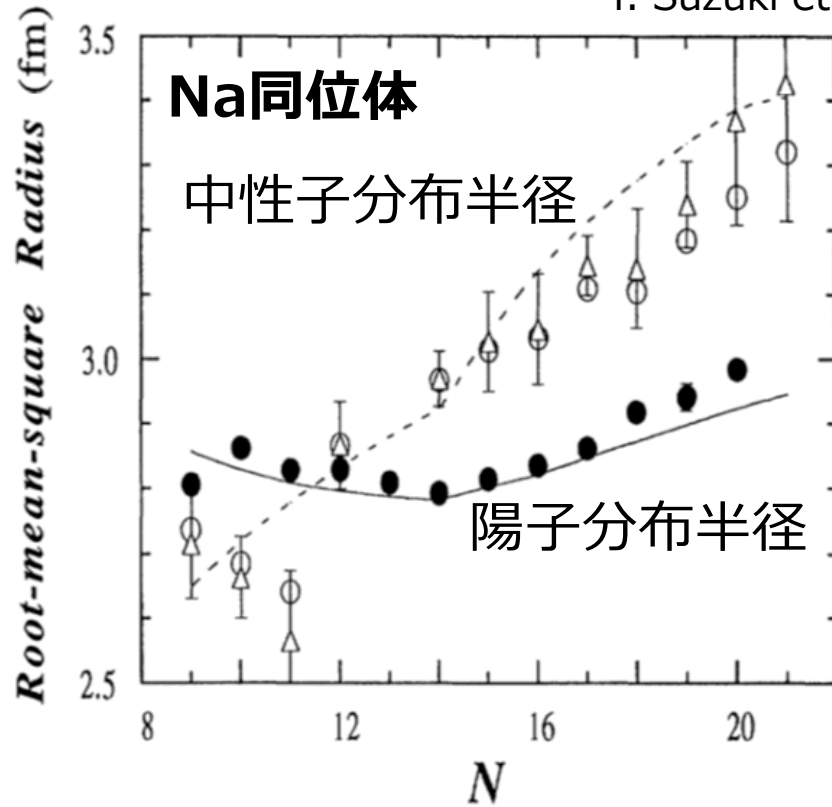
- DP (双極子分極率)

電場中で陽子 (電荷あり) と中性子 (電荷なし) の偏る (分極) 程度が中性子スキン厚と相関

中性子スキンの系統性

Na同位体での陽子過剰核~安定核~中性子過剰核のスキン厚を測定

T. Suzuki et al., PRL75, 3241 (1995)



S_p : 原子核から1個の陽子を剥がすエネルギー
 S_n : 原子核から1個の中性子を剥がすエネルギー

$$r_m^2 = (Z/A)r_p^2 + (N/A)r_n^2$$

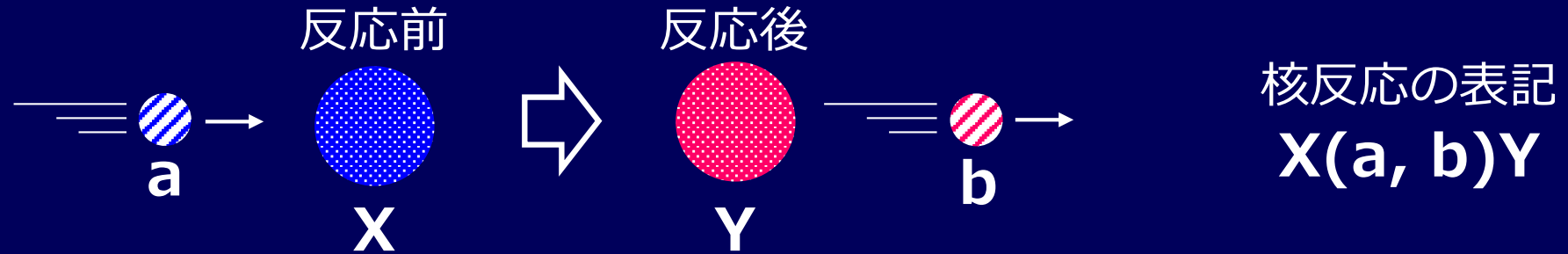
電子散乱、同位体シフト

反応断面積測定

r_m : 核子分布半径
 r_p : 陽子分布半径
 r_n : 中性子分布半径
 Z : 陽子数
 N : 中性子数
 A : 質量数(= $Z + N$)

反応断面積 σ_R

入射核と標的核との核反応の確率

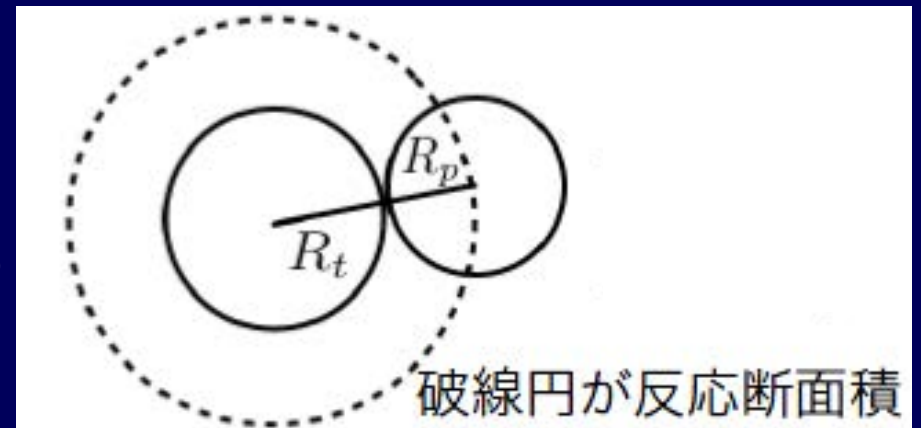


全断面積 = 反応断面積 + 弾性散乱断面積
[$X(a, a)X$]

相互作用断面積 + 非弾性散乱断面積
[$X(a, b)Y$] [$X(a, a')X'$]

$$\sigma_R = \pi(R_p + R_t)^2$$

反応断面積 σ_R は、入射核の半径(R_p)と標的核の半径(R_t)に関係する。



反応断面積測定の実験原理

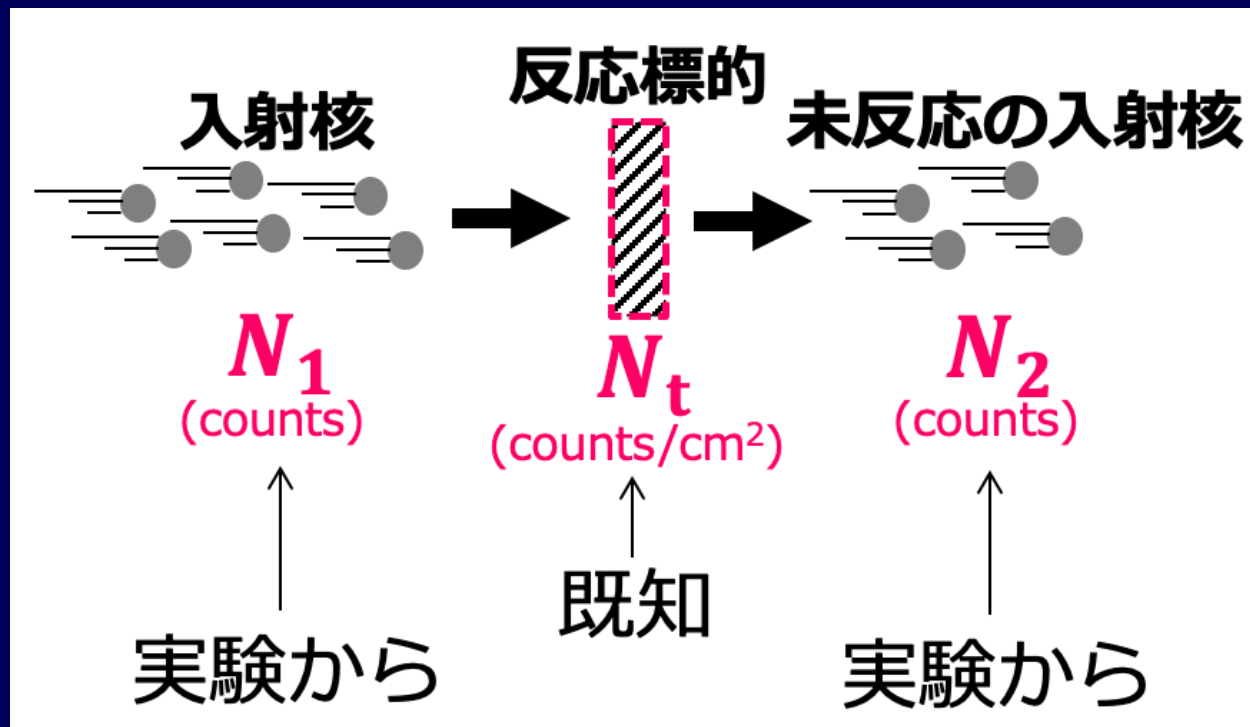
<トランスミッション法>

$$\sigma_R = -\frac{1}{N_t} \ln \left(\frac{N_2}{N_1} \right)$$

N_1 : 反応標的への入射粒子数

N_2 : 反応標的での未反応粒子数

N_t : 反応標的の単位面積当たりの粒子数



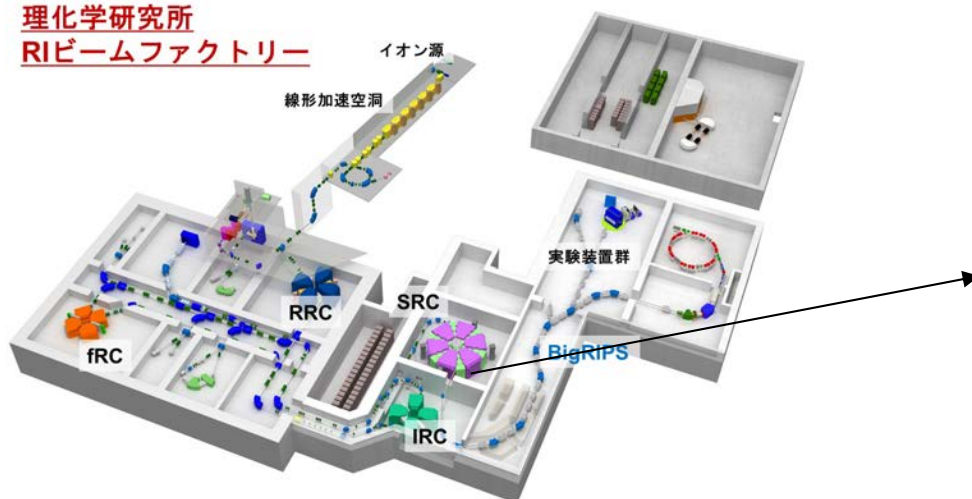
ビームとして取り出せれば、不安定核の種類によらず測定可能

不安定核の実験

不安定核は天然には存在しない

⇒ 加速器を用いて、人工的に生成する必要がある

理化学研究所
RIビームファクトリー

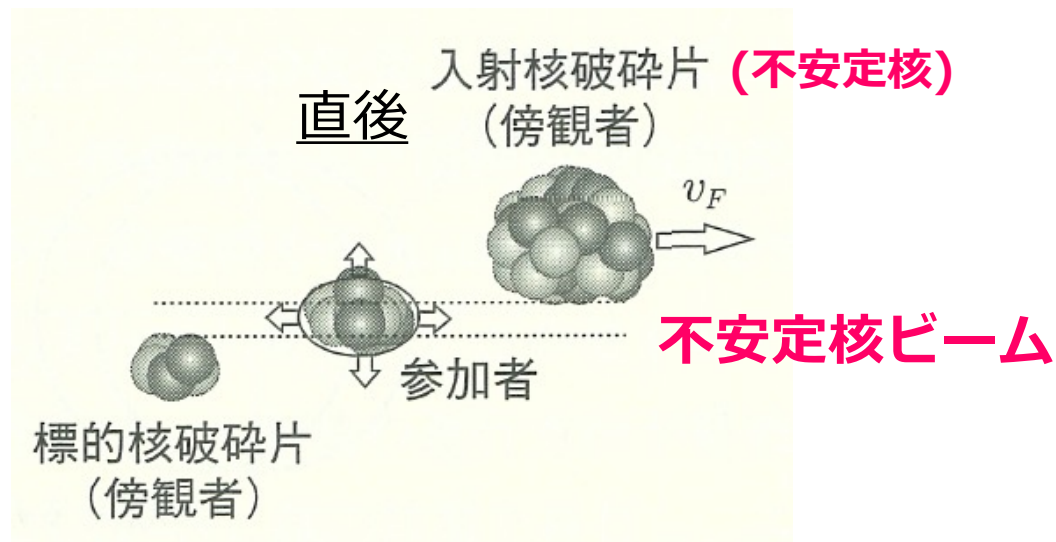
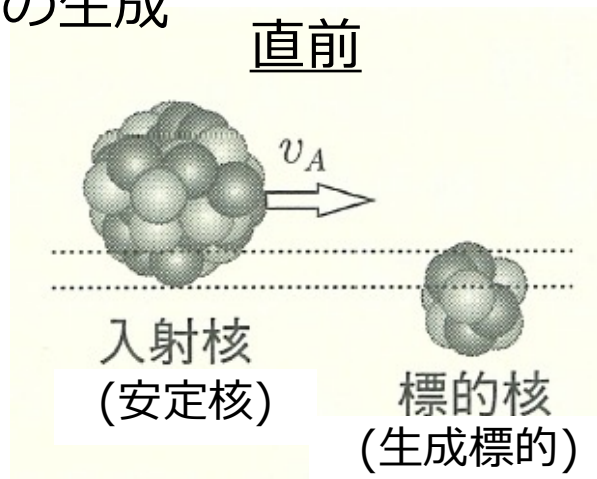


超電導リングサイクロトロン(SRC)



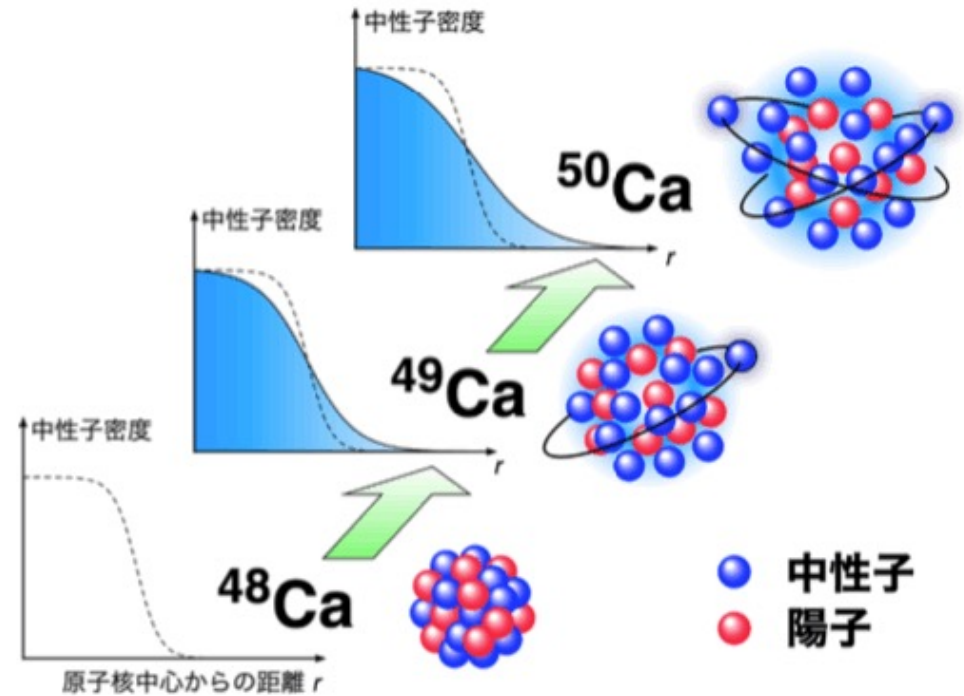
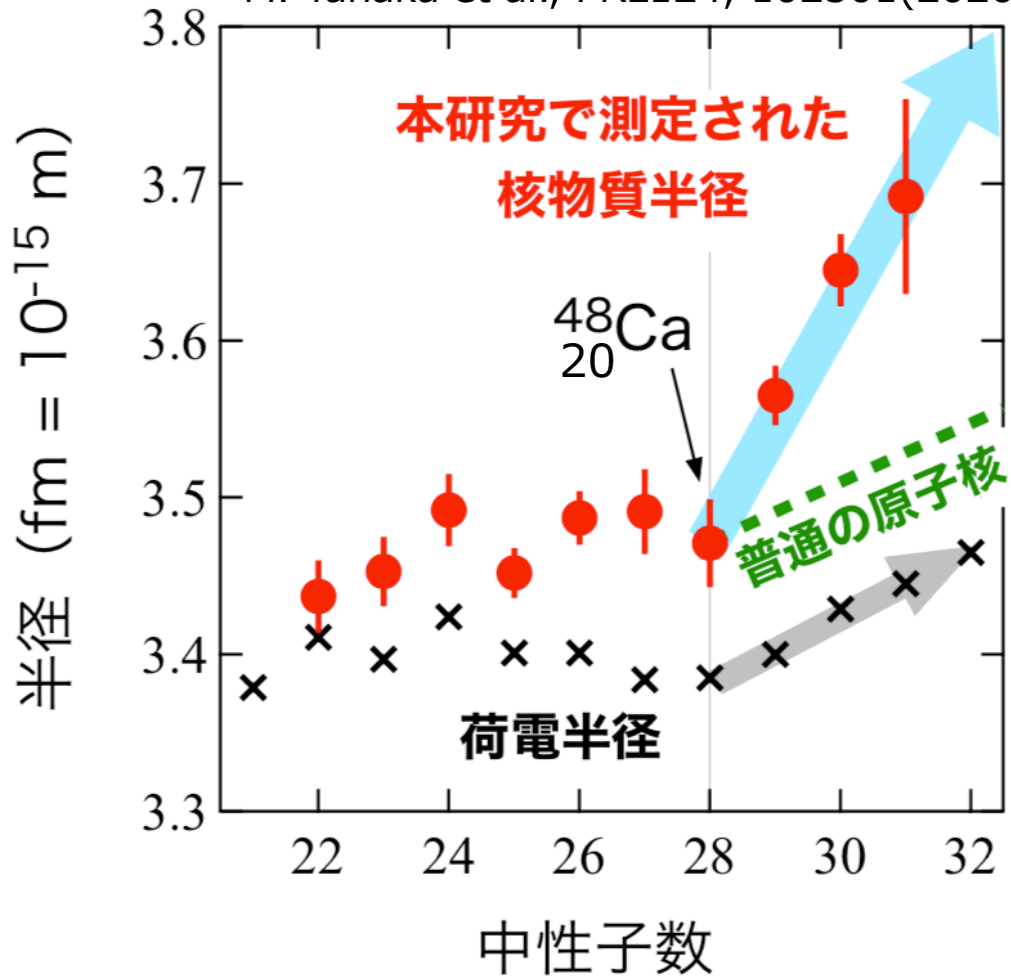
入射核破碎反応

不安定核の生成



Ca同位体の核半径

M. Tanaka et al., PRL124, 102501(2020)



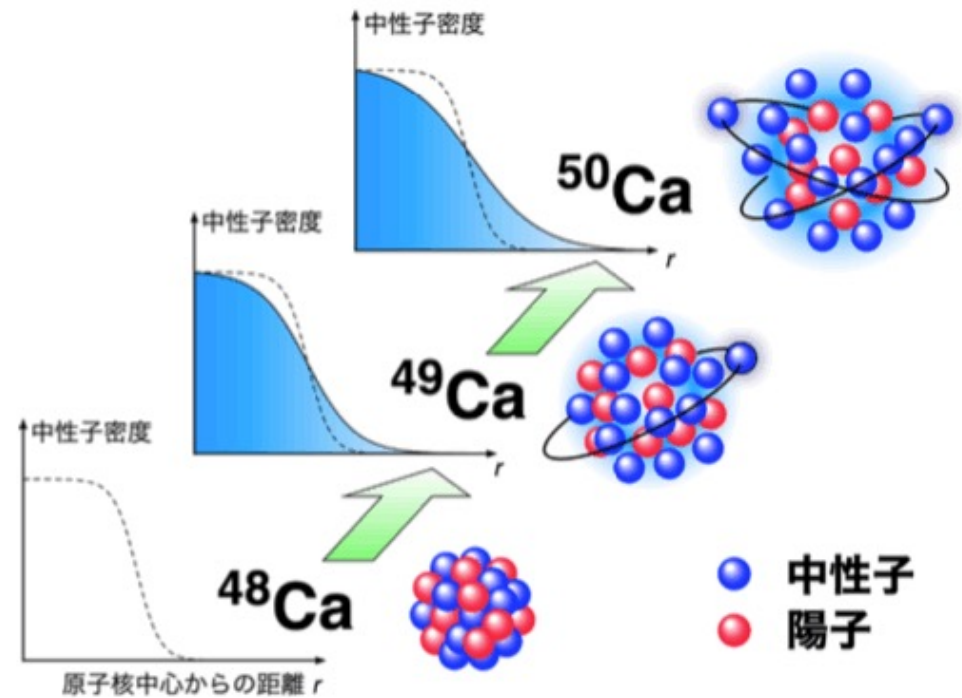
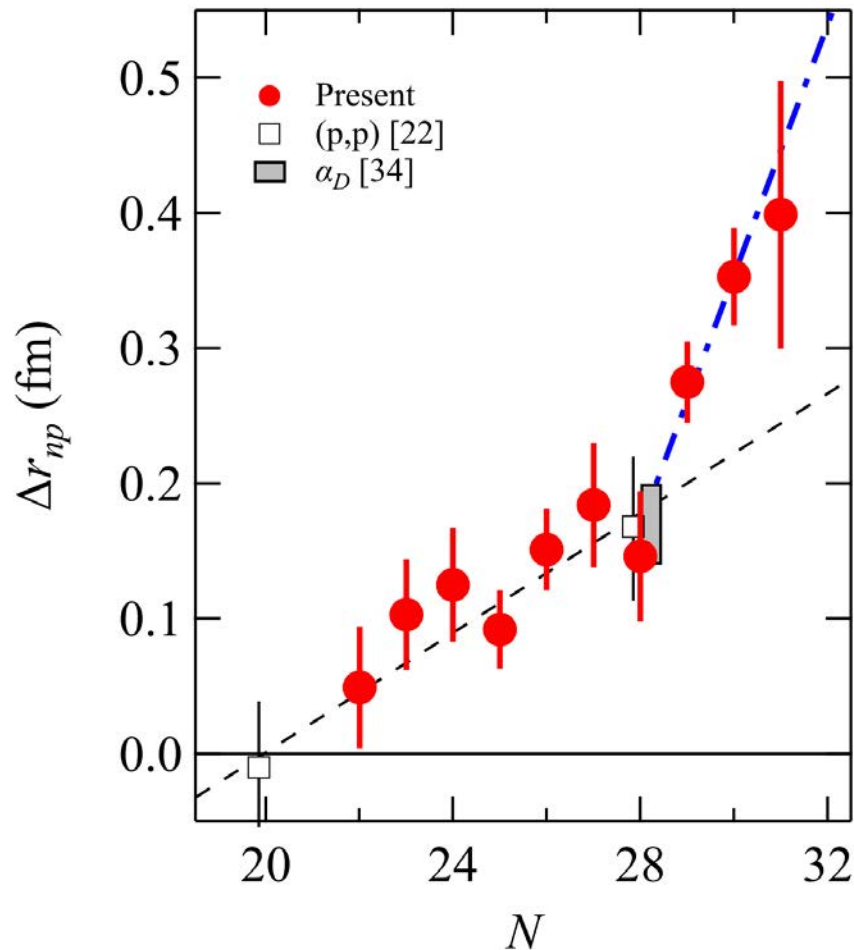
極めて硬いはずの⁴⁸Caに中性子をつけ加える(^{49,50,51}Ca)



ふやけたように中性子の分布が膨れる

Ca同位体の核半径

M. Tanaka et al., PRL124, 102501(2020)



極めて硬いはずの ^{48}Ca に中性子をつけ加える($^{49,50,51}\text{Ca}$)

ふやけたように中性子の分布が膨れる

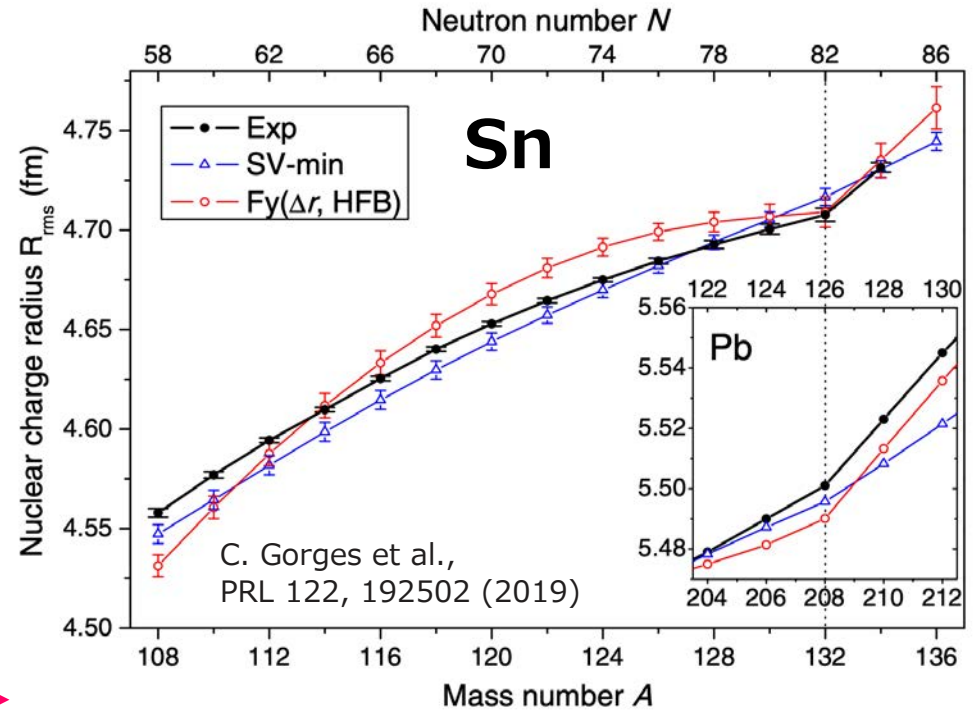
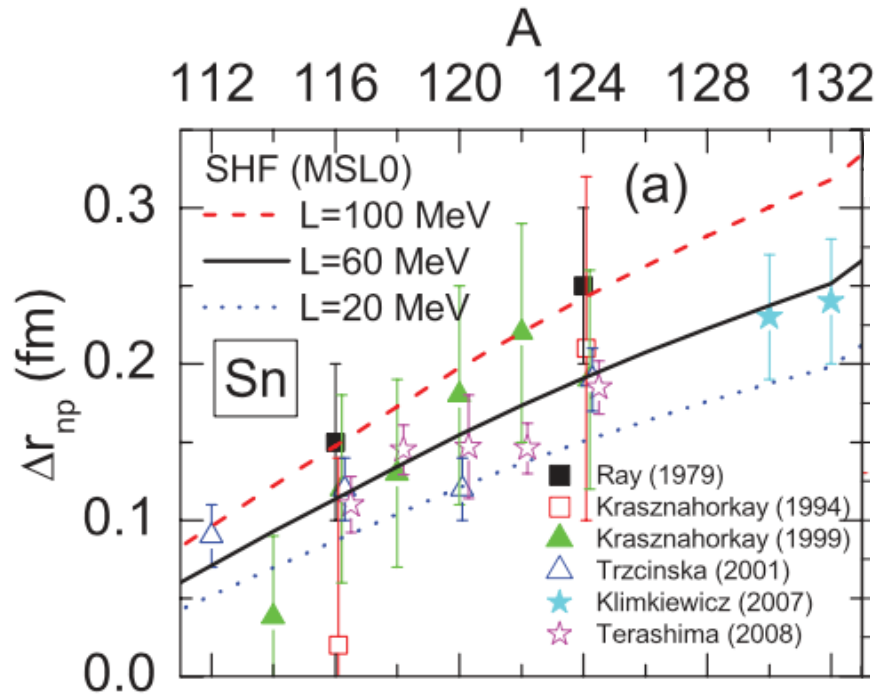
中性子スキンが発達

重い中性子過剰核のスキン厚測定へ

$$\delta = \frac{N-Z}{A} \rightarrow \text{大} : L \text{に高感度} \Rightarrow$$

- より中性子過剰へ
- 重い核のスキン厚ほど核物質に近い環境

L.W. Chen et al., PRC82, 024321(2010)



- ^{134}Sn までの r_p は実験的に既知
 - $^{115-137}\text{Sn}$ の σ_R (r_m)を測定予定@理研RIBF
- $\delta = 0.13 - 0.27$

原子核内の陽子分布と中性子分布を分けたい

荷電変換断面積

σ_{cc} : Charge changing cross section

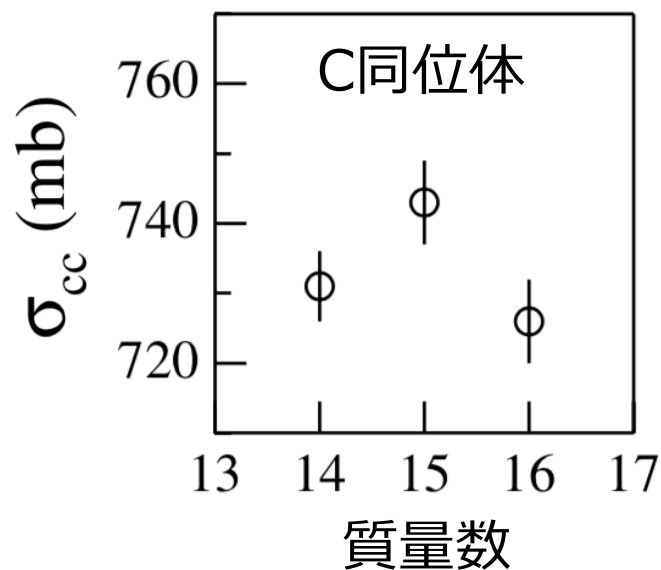
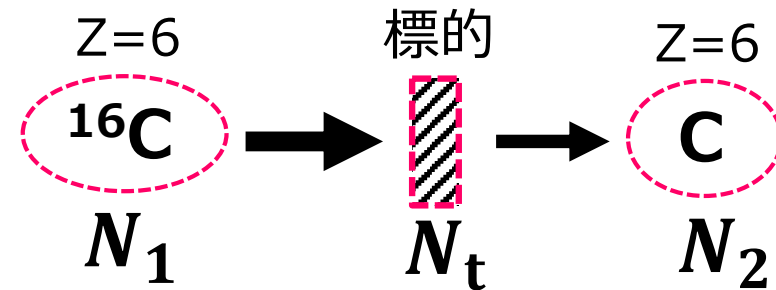
原子核反応の内、原子番号（陽子数）が変化する反応確率



原子核内の陽子分布に感度あり

$$\sigma_{cc} = -\frac{1}{N_t} \ln \left(\frac{N_2}{N_1} \right)$$

N_1 : 入射粒子数 N_t : 標的の厚さ
 N_2 : 原子番号が変化しない粒子数



| Nuclide | \tilde{r}_p (fm) | \tilde{r}_m (fm) |
|-----------------|------------------------|----------------------|
| ^{12}C | 2.320 ± 0.007 [14] | 2.31 ± 0.02 [22] |
| ^{13}C | 2.315 ± 0.008 [14] | 2.28 ± 0.04 [22] |
| ^{14}C | 2.364 ± 0.011 [14] | 2.30 ± 0.07 [22] |
| ^{15}C | 2.33 ± 0.11 | 2.48 ± 0.03 [22] |
| ^{16}C | 2.25 ± 0.11 | 2.70 ± 0.03 [22] |

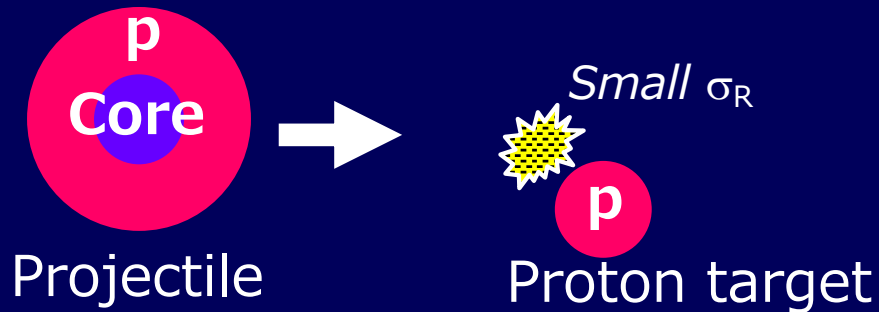
T. Yamaguchi et al., PRL107, 032502 (2011)

陽子標的を使った σ_R 測定

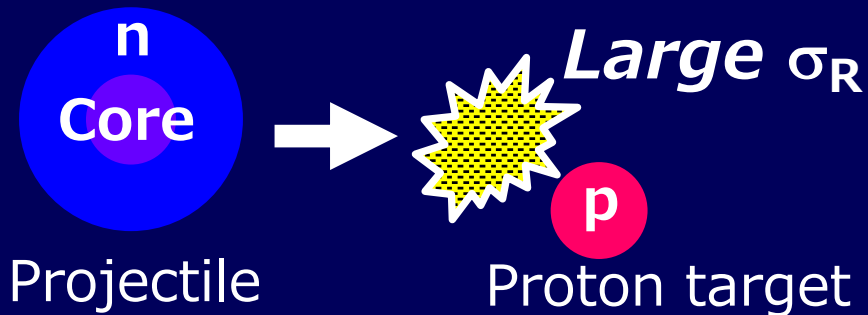
陽子標的と反応は、核子核子全断面積 σ_{NN} のアイソスピン非対称性から、原子核内の陽子と中性子の分布に異なる感度を与える

⇒ **陽子密度分布と中性子密度分布の分離**

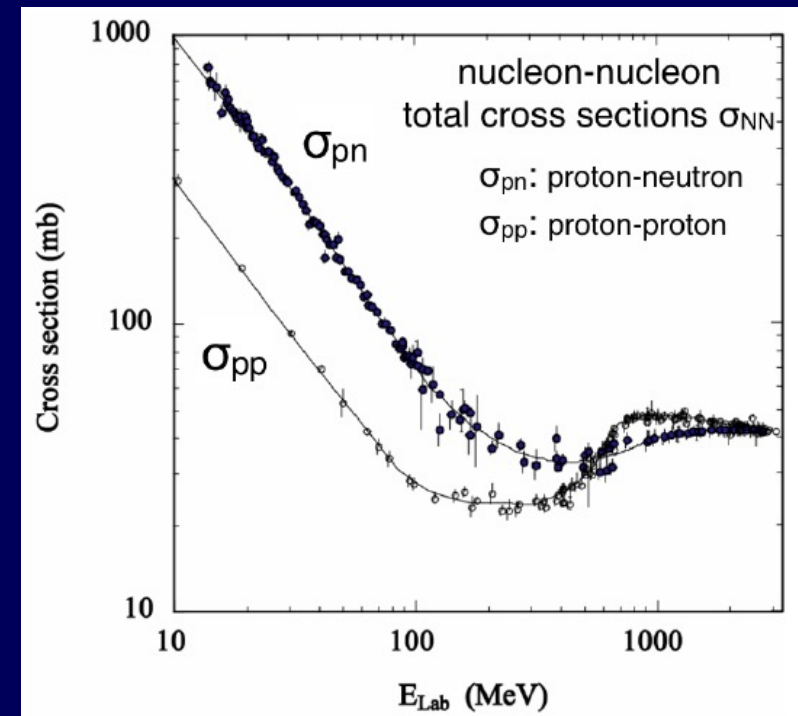
Surface: **Proton**



Surface: **Neutron**



核子核子全断面積



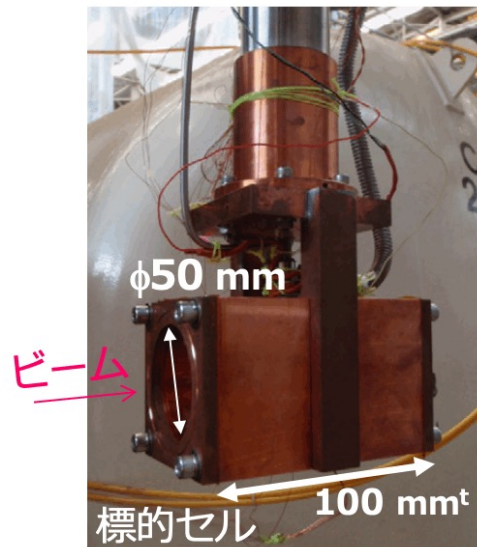
陽子標的を使った σ_R 測定

陽子標的と反応は、核子核子全断面積 σ_{NN} のアイソスピン非対称性から、原子核内の陽子と中性子の分布に異なる感度を与える

⇒ **陽子密度分布と中性子密度分布の分離**

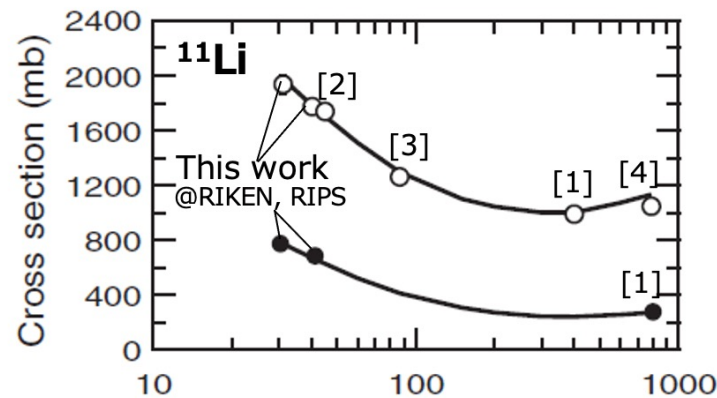
厚い固体水素標的の開発

T. Moriguchi et al., NIMA 624(2010)27



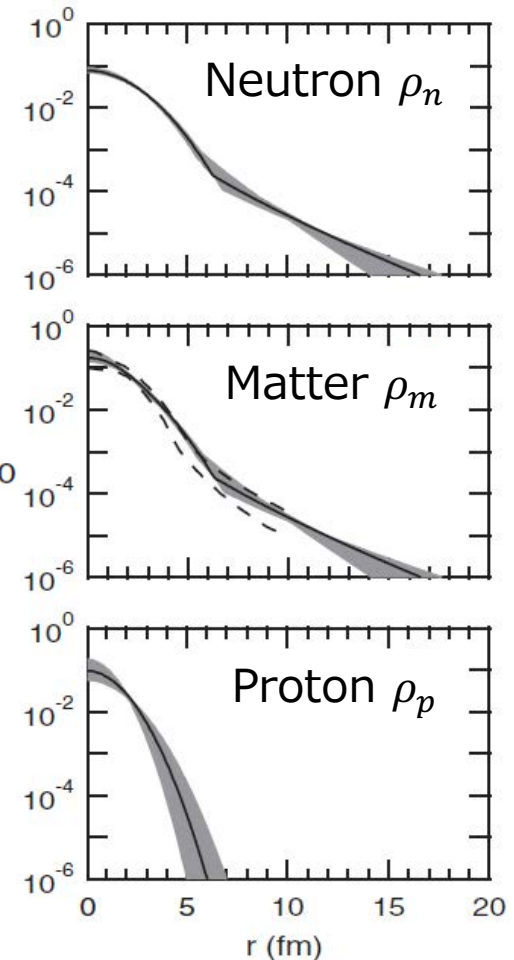
^{11}Li の σ_R 測定と密度の導出

T. Moriguchi et al., PRC88, 024610 (2013).



- Carbon target
- Proton target

- [1] I.Tanihata et al., PLB, 287, 307 (1992).
- [2] N.Inabe et al., RIKEN APR, 24, 9 (1991).
- [3] B.Blank et al., NPA, 555, 408 (1993).
- [4] I.Tanihata et al., PLB, 206, 592 (1988).



まとめ

- 中性子星の構造解明にとって非対称核物質、特に、中性子物質の状態方程式の理解が重要
- 状態方程式に含まれる対称エネルギーのパラメータには不定性が大きい
- 中性子スキンは地上に存在するミクロな中性子物質
- 中性子スキンの導出にとって反応断面積測定は有効
- Sn同位体などの重い中性子過剰核のスキン厚測定が進行中
- 原子核内の陽子分布と中性子分布の分離手法の開発が進行中