

質量降着を伴う中性子星における 中性子過剰核の核融合反応

萩野浩一（東北大学）
連携研究者：飯田圭（高知大学）



研究の目的

- 中性子星内部で起こる種々の核融合反応の解明
特に、クラスト深部で起こる **中性子過剰核のピクノ核融合反応**



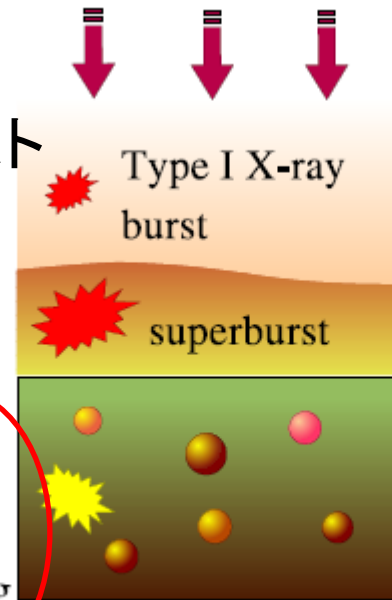
X線光度観測から中性子星内部の情報を引き出す際の
精度のよいインプットを与える

関連分野：D01（理論）、C01（X線）、B02（中性子過剰核）

質量降着を伴う中性子星で起こる原子核反応

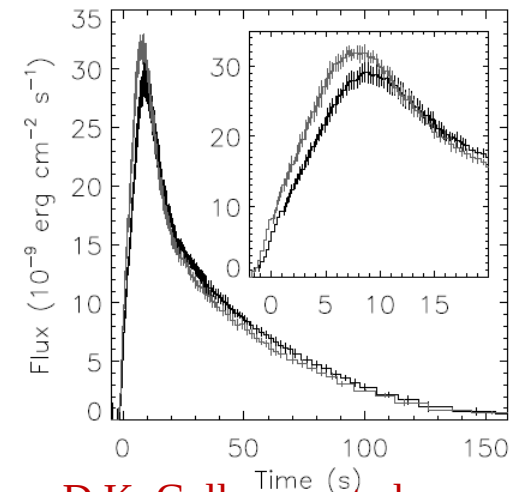


X線バースト
rpプロセス



Accreting neutron

中性子過剰核の核融合反応

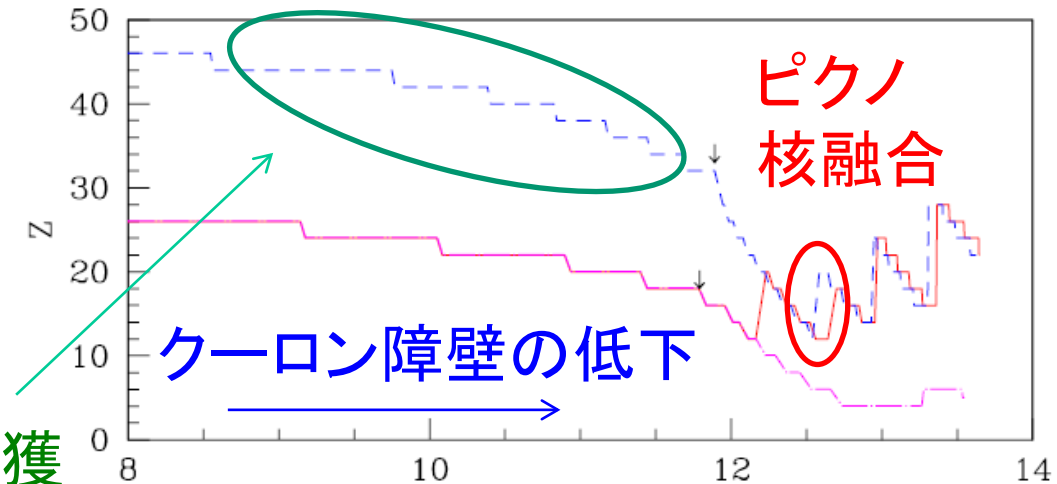
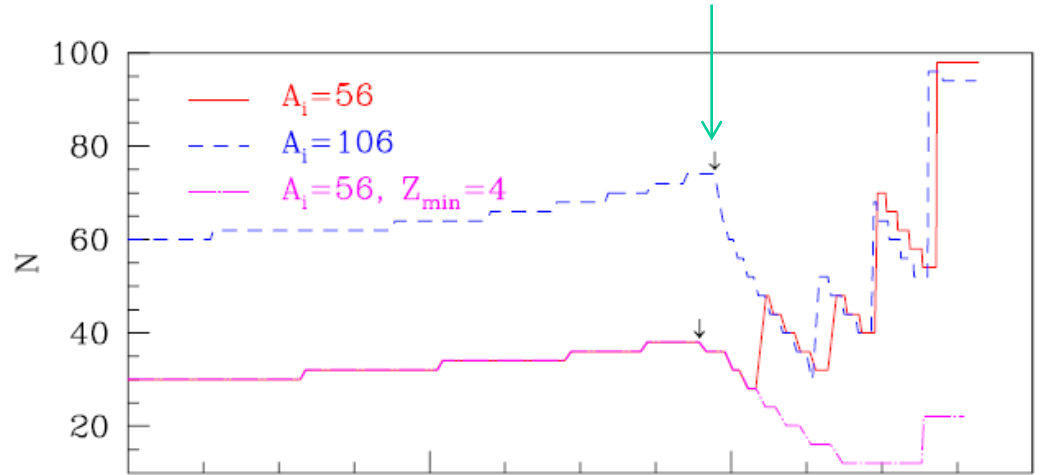
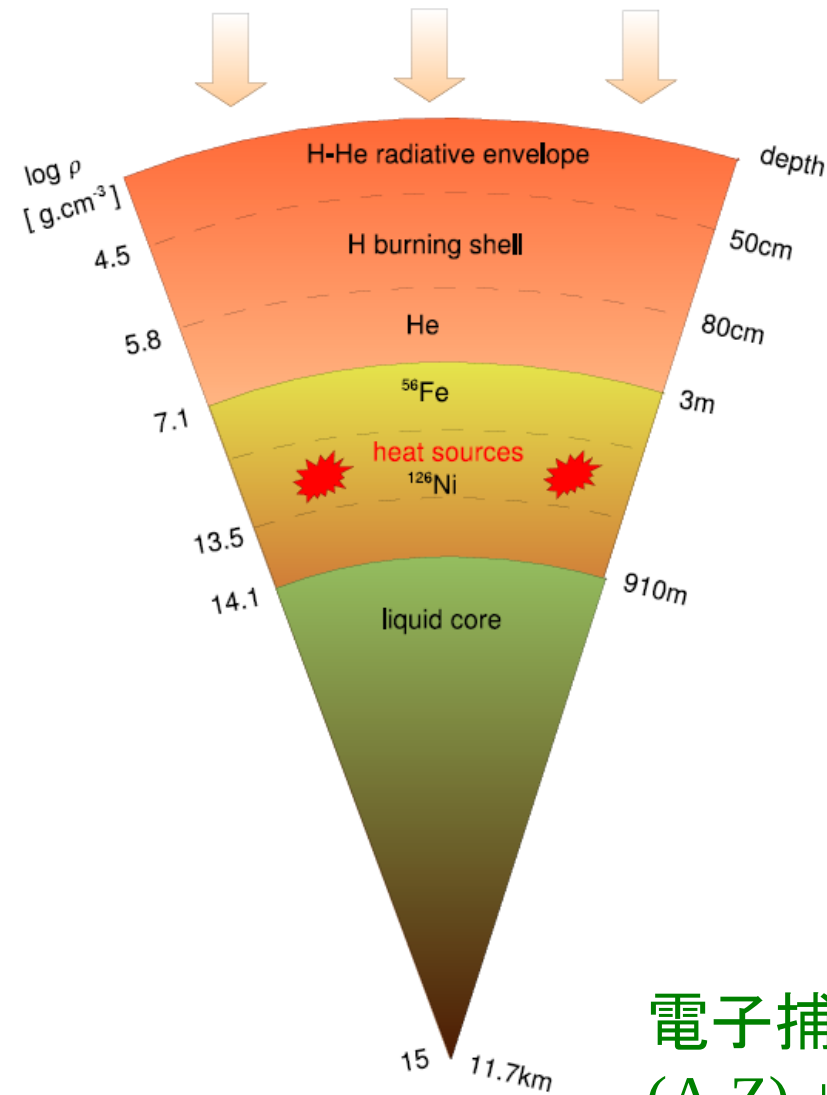


D.K. Galloway et al.,
Astrophys. J. 601('04)466

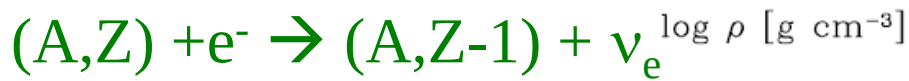
accreted
H/He
ocean
(ashes)
impure
solid crust

N. Chamel and P. Haensel,
Living Rev. Relativity, 11 ('08) 10.

中性子のこぼれ落ち



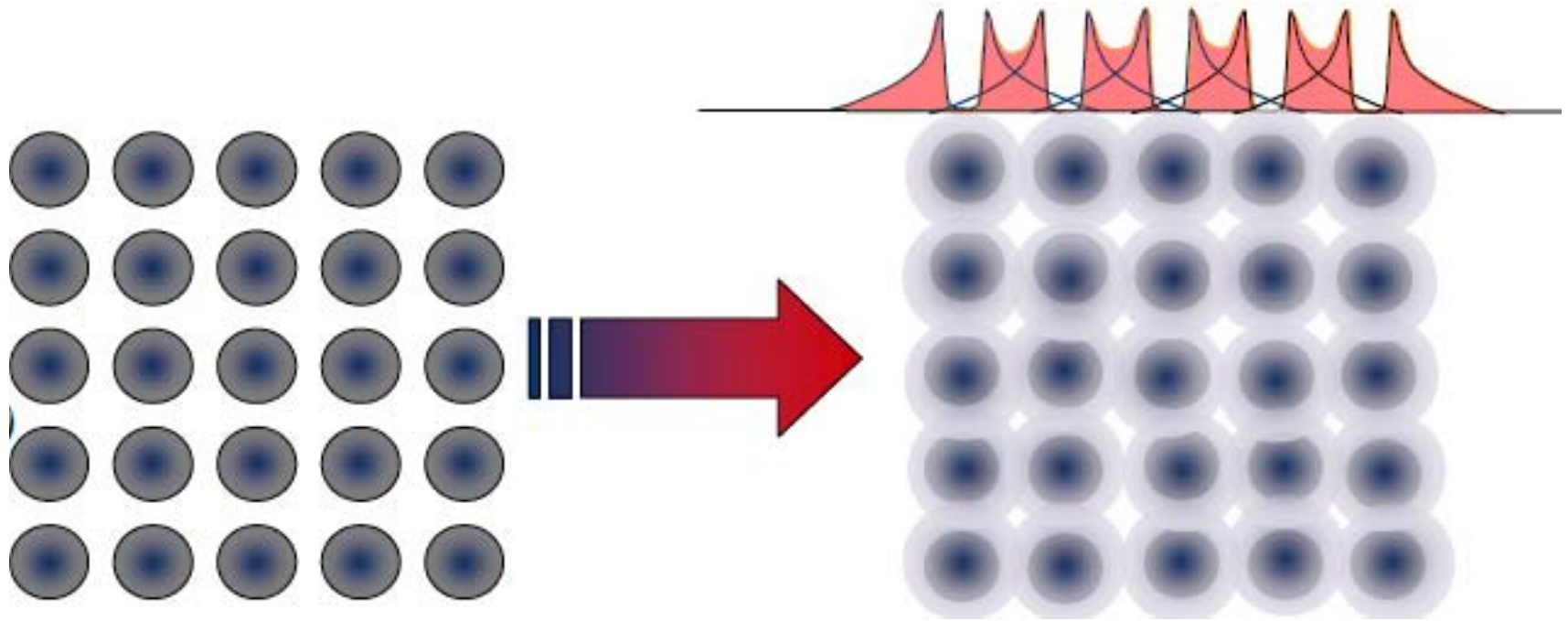
電子捕獲



N. Chamel and P. Haensel, Living Rev. Relativity, 11 ('08) 10.

cf. 早い段階での研究: K. Sato, PTP62('79) 957

ピクノ核融合



Michael Wiescher (Notre Dame)

- 高密度環境下
- 格子振動(ゼロ点振動)による核融合反応

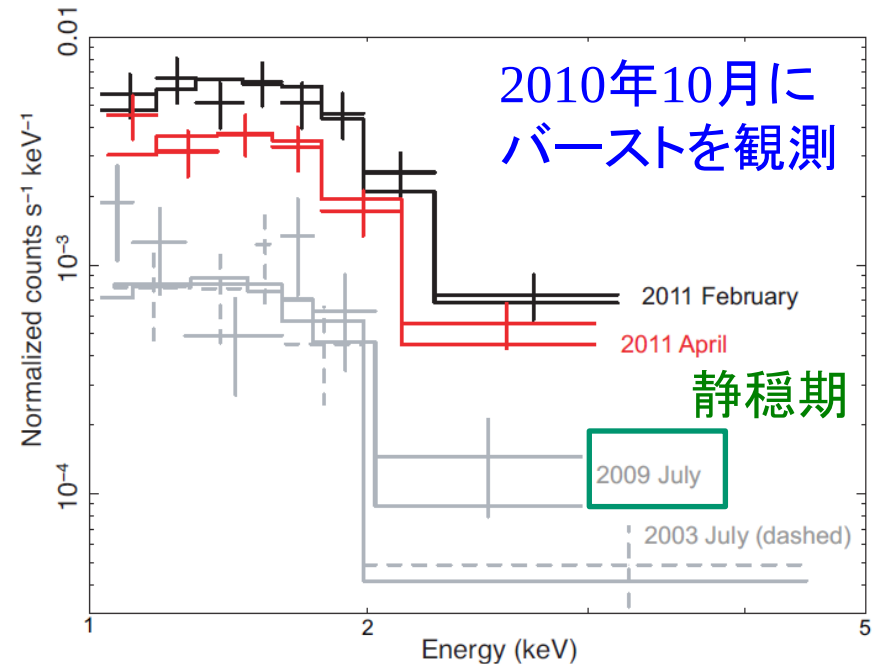
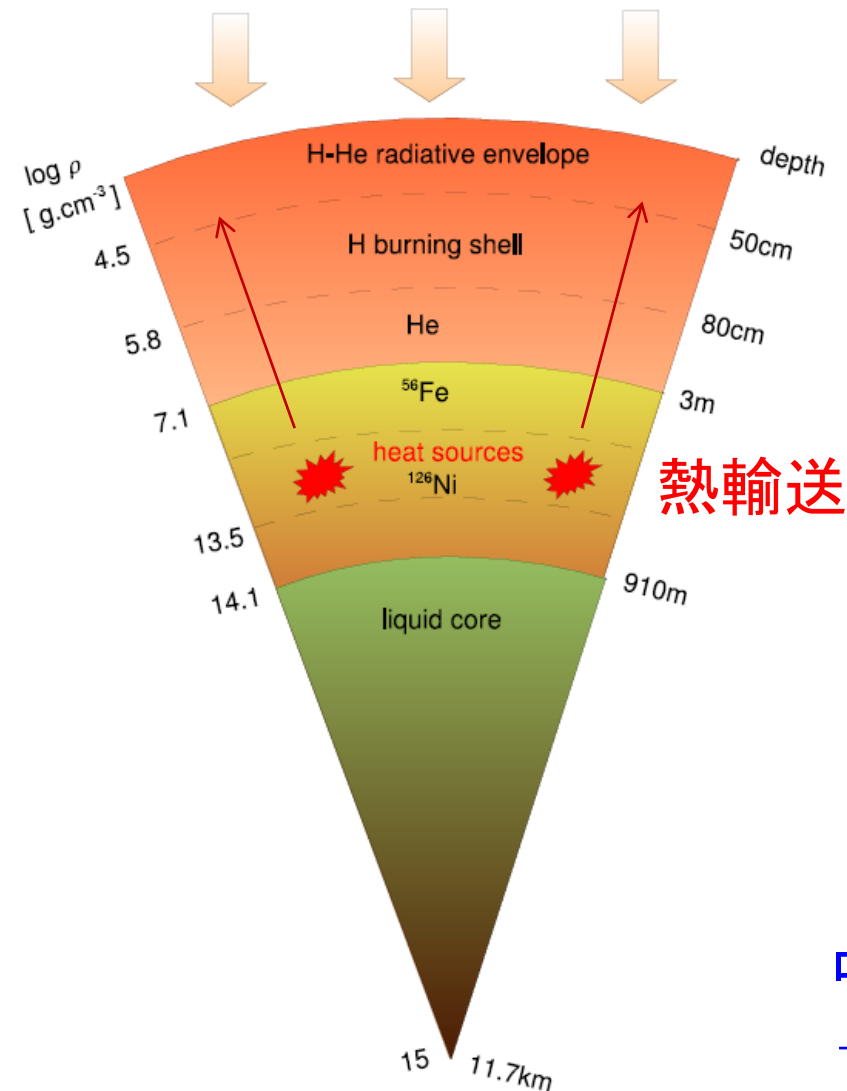
- ✓ E.E. Salpeter and H.M. Van Horn, Astro. Phys. J. 155 ('69) 183
- ✓ S. Schramm and S.E. Koonin, Astro. Phys. J. 365 ('90) 296

パスタ構造(どのくらいの密度でスパゲッティになるか)?

クラスト深部の核融合反応



X線連星の静穏期におけるX線の起源



N. Degenaar, E.F. Brown, R. Wijnands,
Mon. No. R. Astron. Soc. 418 ('11) L152

中性子星内部の情報を反映

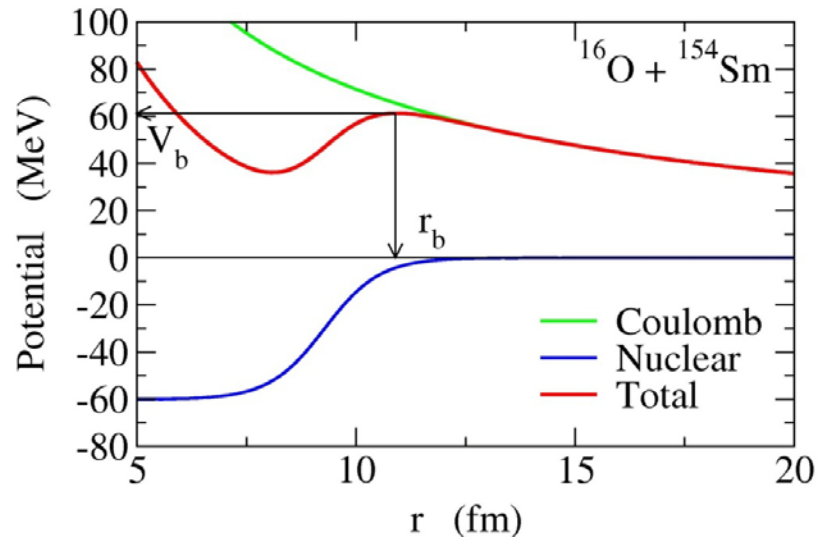
→ X線観測からEOSが決定できる?



核反応率の精度よい見積もりが必要

これまでの核融合反応率の見積もり

ほとんどのものが単純な1次元ポテンシャル模型



$$\sigma_{\text{fus}}(E) = \frac{\pi}{k^2} \sum_l (2l + 1) P_l(E)$$

二重たたみこみポテンシャル

$$V_{DF}(\mathbf{r}) = \int d\mathbf{r}_1 d\mathbf{r}_2 \rho_1(\mathbf{r}_1) \rho_2(\mathbf{r}_2) \times v_{nn}(\mathbf{r} + \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1)$$

例えば、

C.J. Horowitz et al., PRC77('08)045807

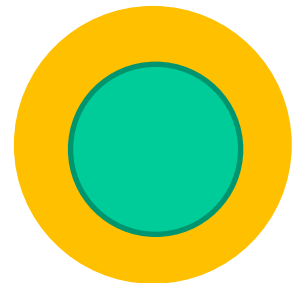
$^{24}\text{O} + ^{24}\text{O}$, $^{28}\text{Ne} + ^{28}\text{Ne}$

A.W. Steiner, PRC85('12)055804

$^{22}\text{C} + ^{22}\text{C}$ など(含: 非対称系)

サンパウロ・ポテンシャル(二重たたみこみポテンシャル)

← 中性子過剰核の密度の広がりの効果は入るが
動的効果が全く入らない

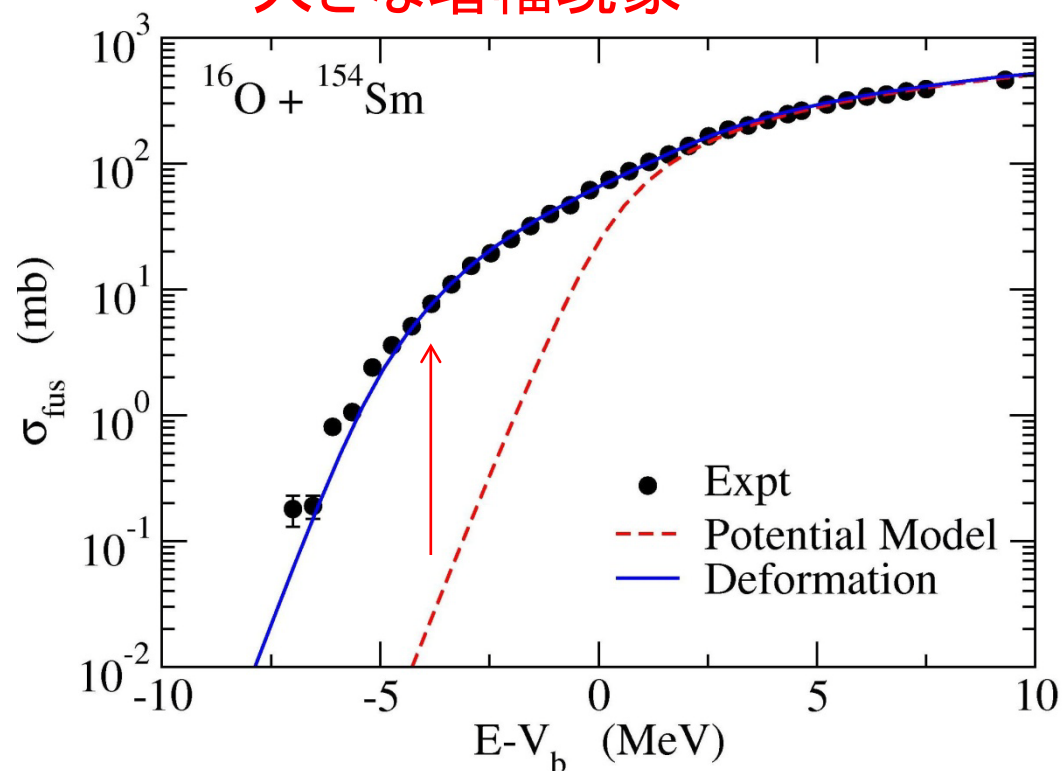


cf. A.S. Umar et al., PRC85('12)055801 は density-constrained HF

考えられる動的効果

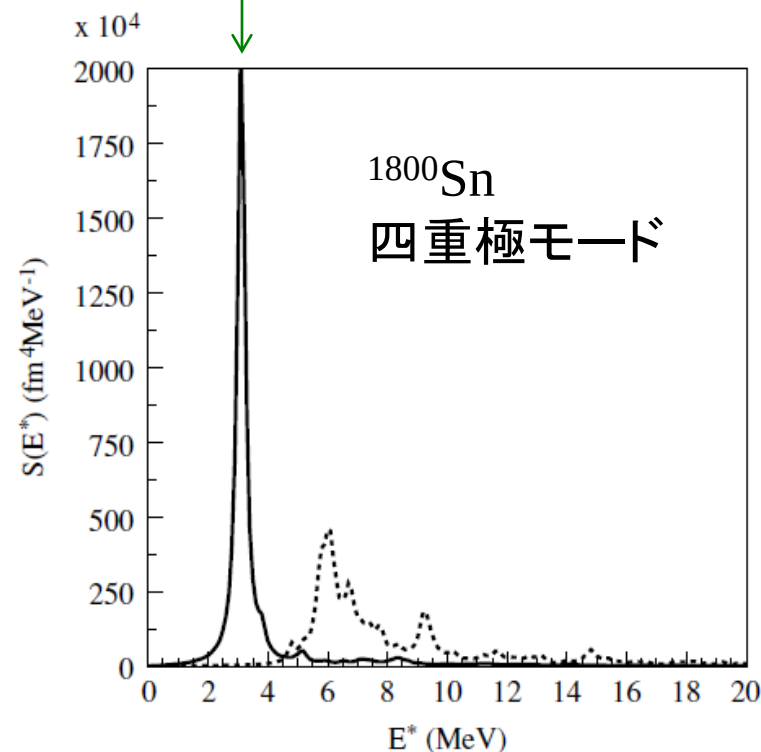
- 原子核の集団励起の効果
- 分解過程
- 多核子移行反応

標的核の回転励起による
大きな増幅現象



K.H. and N. Takigawa, PTP Suppl. 128('12)1061

低エネルギー領域で
非常に大きい集団性
('巨大共鳴'に匹敵)

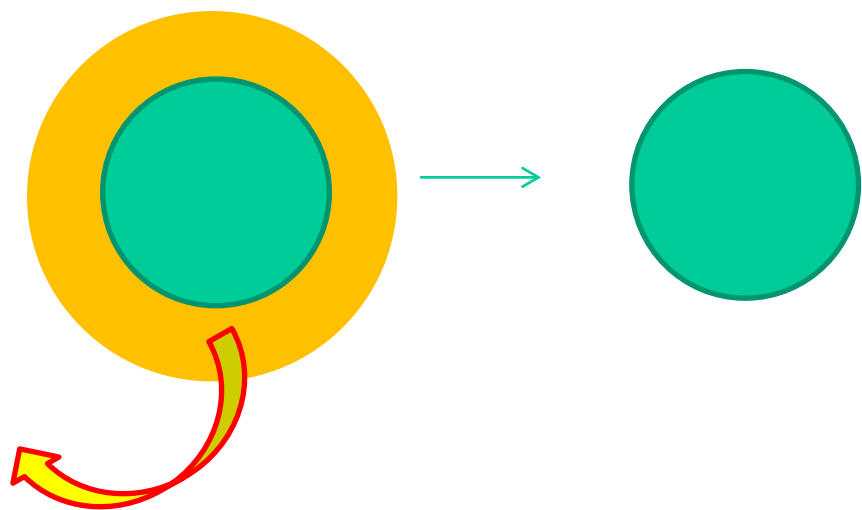


E. Khan et al.,
PRC71('05)042801(R)

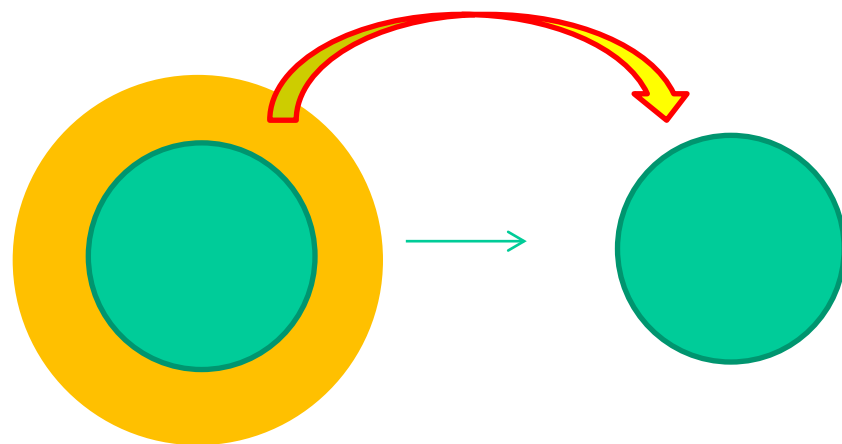
考えられる動的効果

- 原子核の集団励起の効果
- 中性子過剰核の余剰中性子(中性子スキン)の効果

✓ 分解効果



✓ 多核子移行反応

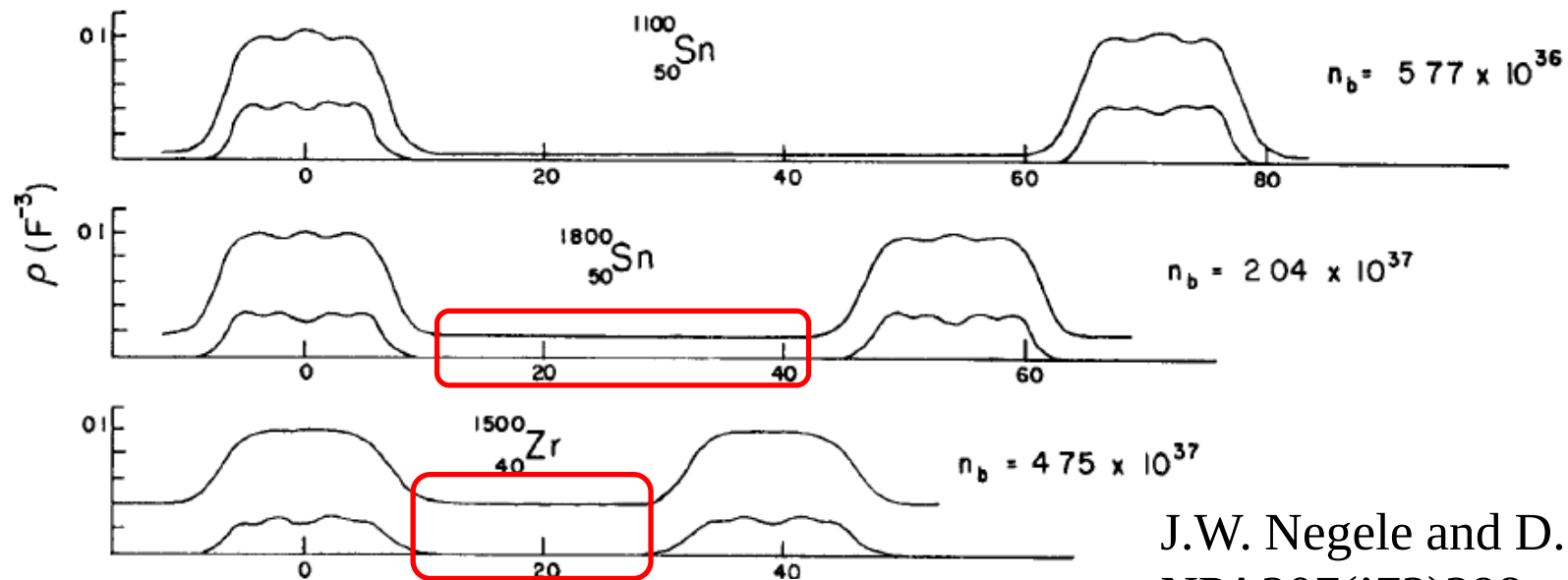
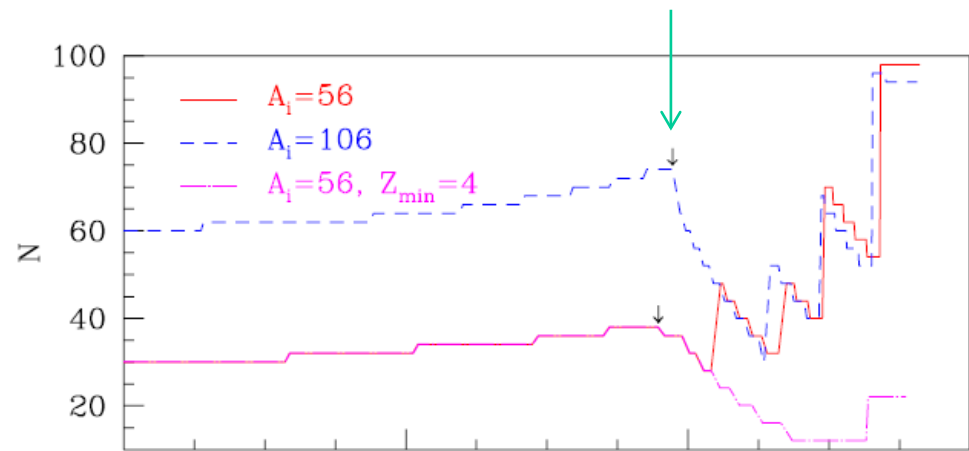


スキン部分にある
多核子の移行

* ただし、両者の効果とも、実験室での実験においてさえも
まだ完全に理解されていない

中性子の海の効果

- 分解過程の抑制
- 核間ポテンシャルへの影響?

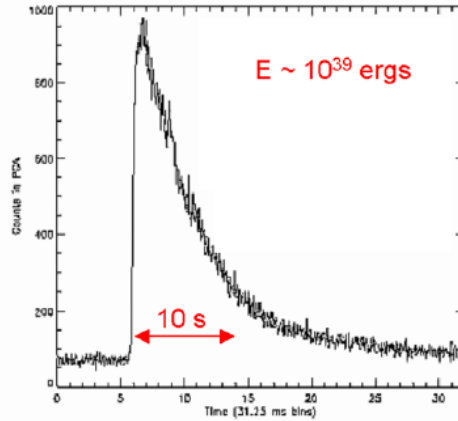


J.W. Negele and D. Vautherin,
NPA207('73)298

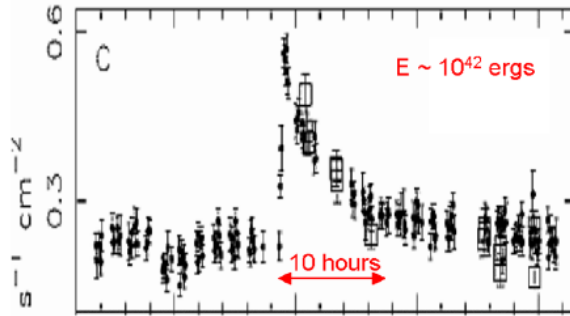
$$V(r) \sim \int dr_1 dr_2 \rho_1(r_1) \rho_2(r_2) v_{nn}(r + r_2 - r_1)$$

X線スーパー・バースト

“normal”
Type I burst

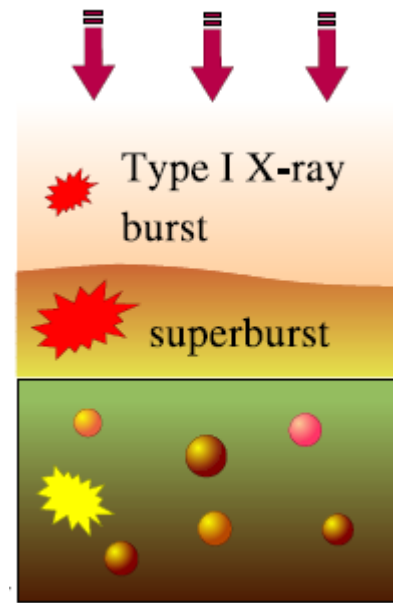


superburst

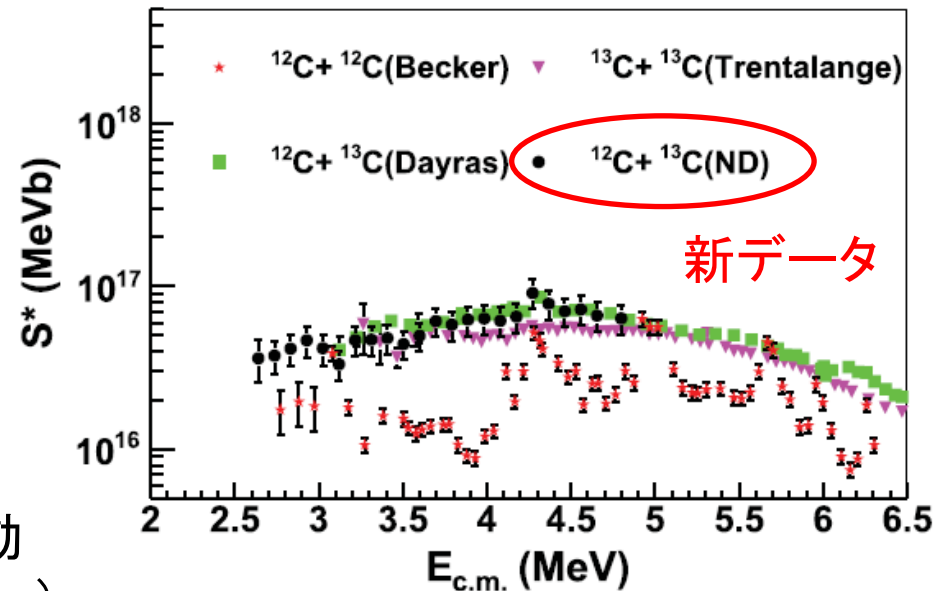


KS 1731-260 (Kuulkers et al. 2002)

slide: J. Zand

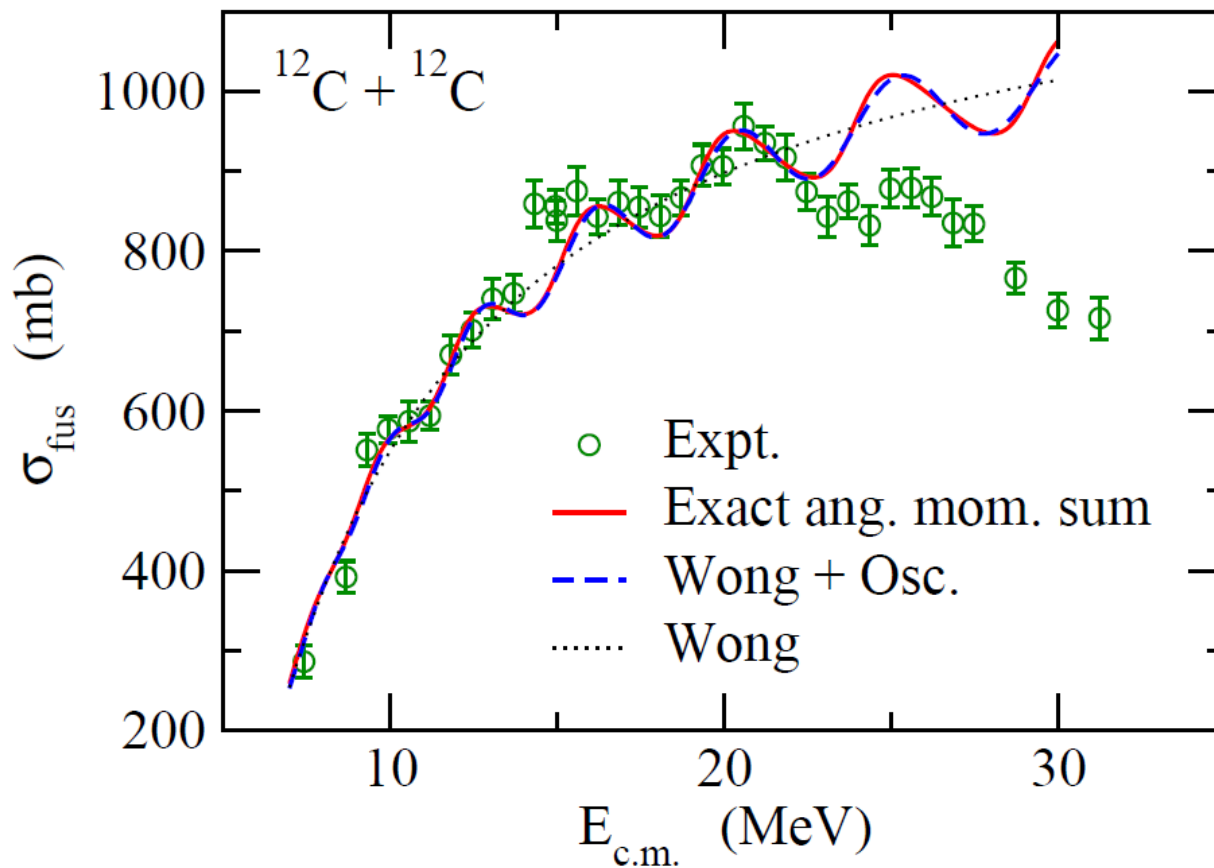


アウタークラスト深部
 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$



M. Notani et al., PRC85('12)014607

cf. C+C 系における核融合断面積の振動
(クーロン障壁より高い入射エネルギー)
→ N. Rowley and K.H., in preparation



$$\sigma_{\text{fus}}(E) = \frac{\pi}{k^2} \sum_l \left(1 + (-1)^l \right) (2l + 1) P_l(E)$$

他にも $^{13}\text{C} + ^{13}\text{C}$ (フェルミオン系)、 $^{12}\text{C} + ^{13}\text{C}$ (elastic transfer) など

N. Rowley and K.H., in preparation

まとめ:

質量降着を伴う中性子星における中性子過剰核の核融合反応

研究の目的

中性子星内部で起こる種々の核融合反応の解明

特に、クラスト深部で起こる**中性子過剰核のピクノ核融合反応**

➤ 動的効果

- ✓ 散乱核の集団励起
- ✓ 分解過程
- ✓ 多核子移行過程

➤ 中性子の海の効果



X線光度観測から中性子星内部の情報を引き出す際の
精度のよいインプットを与える

関連課題: $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 核融合反応 (← X線スーパーバースト)