Di-neutron相関を考慮した反応断面積の計算に向けて

中重核領域のσ_{tot}、σ_{-n}、σ_{-2n}、σ_{-p}を考える上で

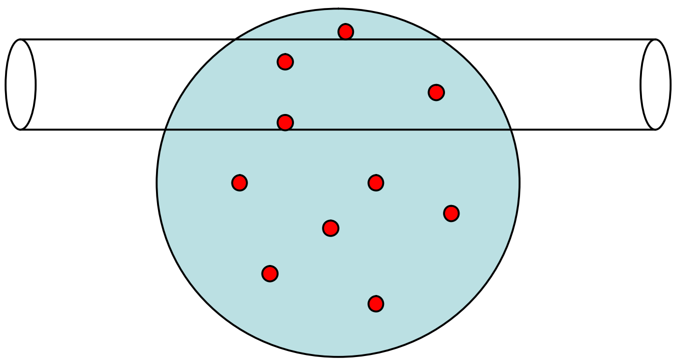
筑波大数理物質科学研究科
計算科学研究センター

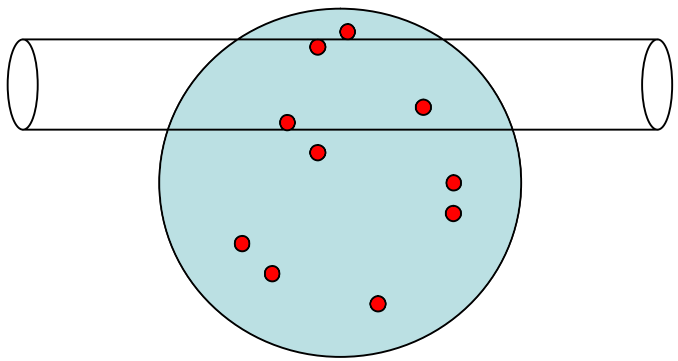
矢花一浩

軽い核の断面積測定と、その解析（グラウバー、アイコナール理論）で見られたこと。

- ドリップラインに近づくと反応断面積が増加する。特にハロー核で。その場合、多くの断面積は中性子分離過程に起因。
- コア＋ハロー構造が良く成り立つとき、$\sigma_{C+2n} = \sigma_{C} + \sigma_{-2n}$
- 中性子分離断面積σ_{-n}は陽子分離断面積σ_{-p}よりも大きい。
- Optical limit 近似は断面積を過大評価する。中性子分離断面積で3割位。

より重い原子核の衝突断面積で何が問題になるだろうか？
今日は、中重核領域のDi-neutron相関に焦点を絞って考えてみる。





核表面でのDi-neutron相関

松尾氏 (新潟大) 、Phys. Rev. C71(2005) 064326-1~24

HFB方程式をまじめに解くと、核表面では強いDi-neutron相関がある。
1個のスピン↑中性子の周りには、半径2fmの中にスピン↓の中性子が
50%の割合で存在する。

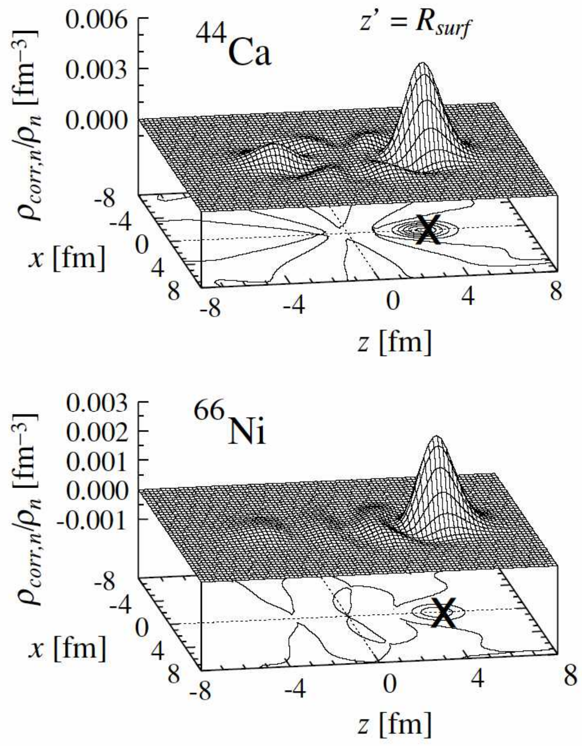


FIG. 5. Same as Fig. 3, but for ^{44}Ca and ^{66}Ni. Reference neutron is fixed at the surface position $z' = R_{\mathrm{surf}}$.

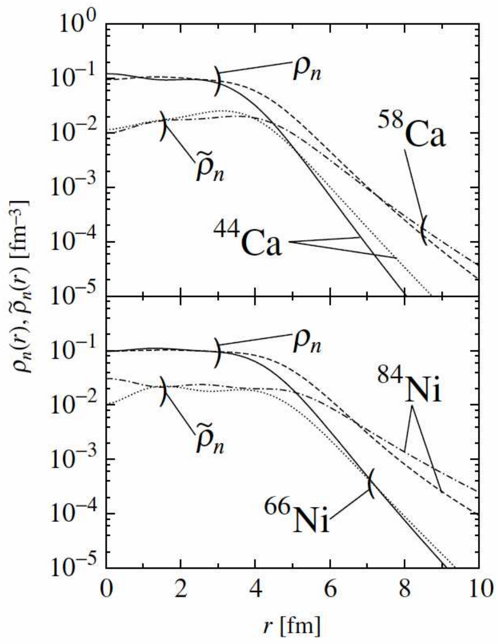


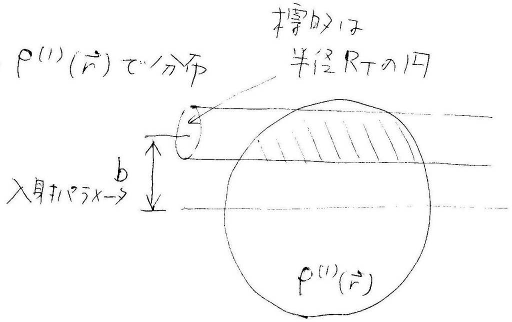
FIG. 6. Density $\rho_n(r)$ and pair density $\tilde{\rho}_n(r)$ of neutrons in ^{44,58}Ca and ^{66,84}Ni. Solid and dashed lines represent $\rho_n(r)$; dotted and dot-dashed lines are for $\tilde{\rho}_n(r)$.

グラウバー（もどき）理論による Di-neutron相関を考慮した 中性子分離断面積の計算

まず、相関のない場合

1個の核子が密度分布 $\rho^{(1)}(\vec{r})$ で分布

$$\int d\vec{r}\, \rho^{(1)}(\vec{r}) = 1.$$



核子が標的と衝突する確率

$$F_1(b) = \int d\vec{r}\, \rho^{(1)}(\vec{r})\, \theta\left(R_T - |\vec{s}-\vec{b}|\right) \qquad \vec{r} = (\vec{s}, z)$$

衝突しない確率

$$F_0(b) = \int d\vec{r}\, \rho^{(1)}(\vec{r})\, \theta\left(|\vec{s}-\vec{b}| - R_T\right)$$

$$F_0(b) + F_1(b) = 1.$$

全反応断面積

$$\sigma_{tot} = \int d\vec{b} \left\{ 1 - \left(F_0^{(p)}(b)\right)^{N_p} \left(F_0^{(n)}(b)\right)^{N_n} \right\}$$

1中性子分離断面積

$$\sigma_{-n} = \int d\vec{b}\ N_n F_1^{(n)}(b) \left(F_0^{(n)}(b)\right)^{N_n-1} \left(F_0^{(p)}(b)\right)^{N_p}$$

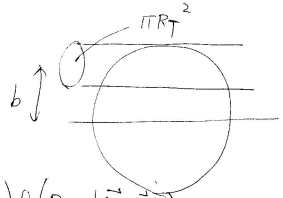
2中性子分離断面積

$$\sigma_{-2n} = \int d\vec{b}\ \frac{N_n(N_n-1)}{2} \left(F_1^{(n)}(b)\right)^2 \left(F_0^{(n)}(b)\right)^{N_n-2} \left(F_0^{(p)}(b)\right)^{N_p}$$

Di-neutron 相関がある場合 : 2体密度分布 $\rho^{(2)}(\vec{r}_1, \vec{r}_2)$

$$\int d\vec{r}_1 d\vec{r}_2 \, \rho^{(2)}(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = 1$$

具体的には $f(r_1) f(r_2) e^{-\beta(\vec{r}_1 - \vec{r}_2)^2}$ の形



3通りの場合

2中性子とも衝突

$$G_2(b) = \int d\vec{r}_1 d\vec{r}_2 \, \rho^{(2)}(\vec{r}_1, \vec{r}_2) \, \theta\left(R_T - |\vec{s}_1 - \vec{b}|\right) \theta\left(R_T - |\vec{s}_2 - \vec{b}|\right)$$

1つのみ衝突

$$G_1(b) = \int d\vec{r}_1 d\vec{r}_2 \, \rho^{(2)}(\vec{r}_1, \vec{r}_2) \, \theta\left(|\vec{s}_1 - \vec{b}| - R_T\right) \theta\left(R_T - |\vec{s}_2 - \vec{b}|\right) \times 2$$

衝突ナシ

$$G_0(b) = \int d\vec{r}_1 d\vec{r}_2 \, \rho^{(2)}(\vec{r}_1, \vec{r}_2) \, \theta\left(|\vec{s}_1 - \vec{b}| - R_T\right) \theta\left(|\vec{s}_2 - \vec{b}| - R_T\right)$$

断面積の式

Total

$$\sigma_{tot} = \int d\vec{b} \left\{ 1 - \left(G_0^{(n)}(b)\right)^{\frac{N_n}{2}} \left(F_0^{(p)}(b)\right)^{N_p} \right\}$$

$$\sigma_{-n} = \int d\vec{b} \left(\frac{N_n}{2}\right) G_1^{(n)}(b) \left(G_0^{(n)}(b)\right)^{\frac{N_n}{2}-1} \left(F_0^{(p)}(b)\right)^{N_p}$$

$$\sigma_{-2n} = \int d\vec{b} \left[\frac{\left(\frac{N_n}{2}\right)\left(\frac{N_n}{2}-1\right)}{2} G_1^{(n)}(b) \left(G_0^{(n)}(b)\right)^{\frac{N_n}{2}-1} + \frac{N_n}{2} G_2^{(n)}(b) \left(G_0^{(n)}(b)\right)^{\frac{N_n}{2}-1} \right] \times \left(F_0^{(p)}(b)\right)^{N_p}$$

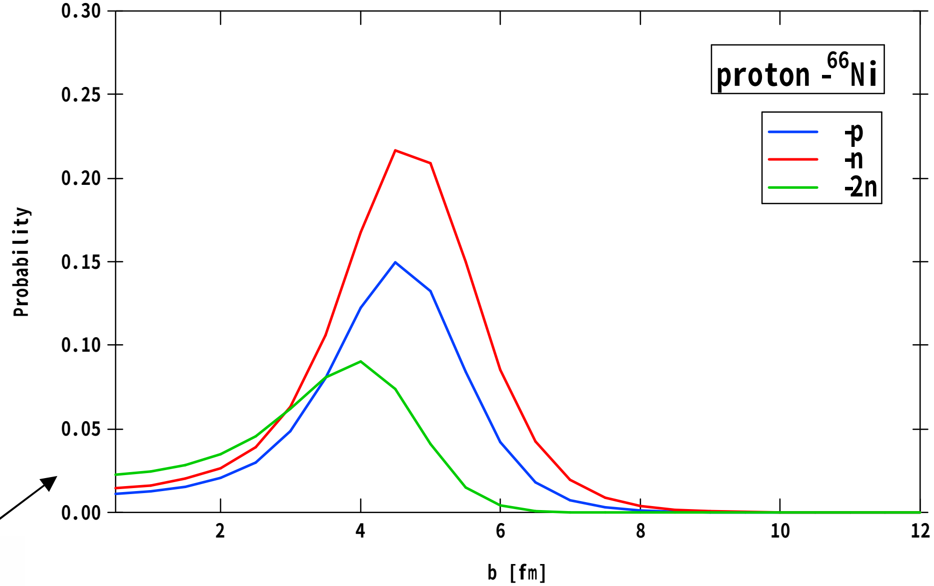
$$\sigma_{-p} = \int d\vec{b} \; N_p F_1^{(p)}(b) \left(F_0^{(p)}(b)\right)^{N_p - 1} \cdot \left(G_0^{(n)}(b)\right)^{\frac{N_n}{2}}$$

^{66}Ni と ^{84}Ni を例にとり、反応確率と反応断面積を計算

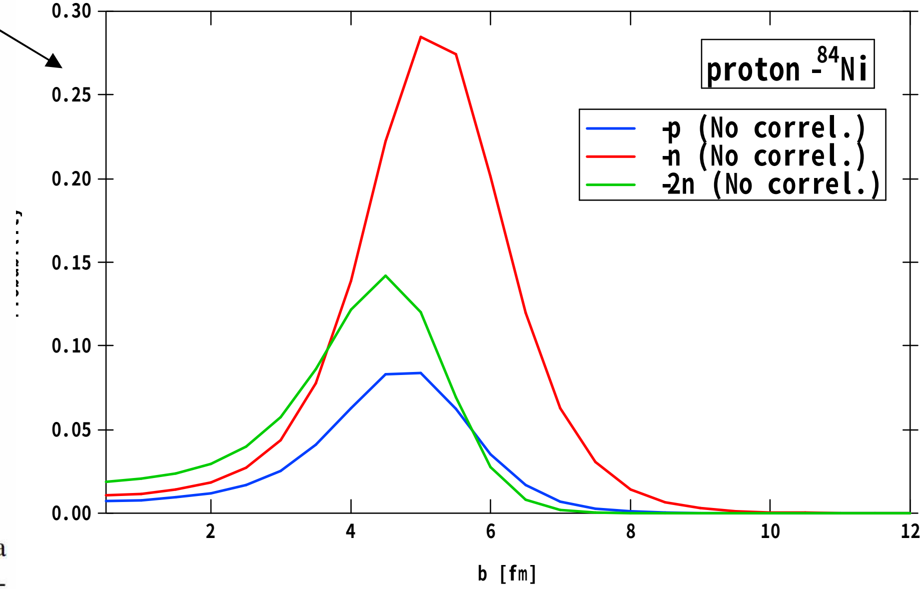
標的として、陽子 (R_T=1fm) と ^{16}O (R_T=3fm) の場合をとる。

$$\rho^{(N)}(r_1, r_2, \cdots, r_N) = \rho^{(1)}(r_1)\rho^{(1)}(r_2)\cdots\rho^{(1)}(r_N)$$

$\rho^{(1)}(r)$ Woods-Saxon型



Di-neutron相関のない場合



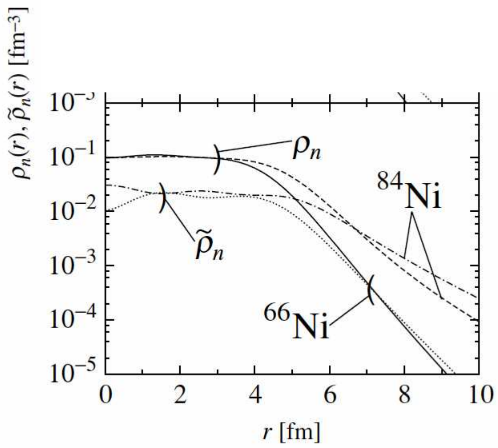
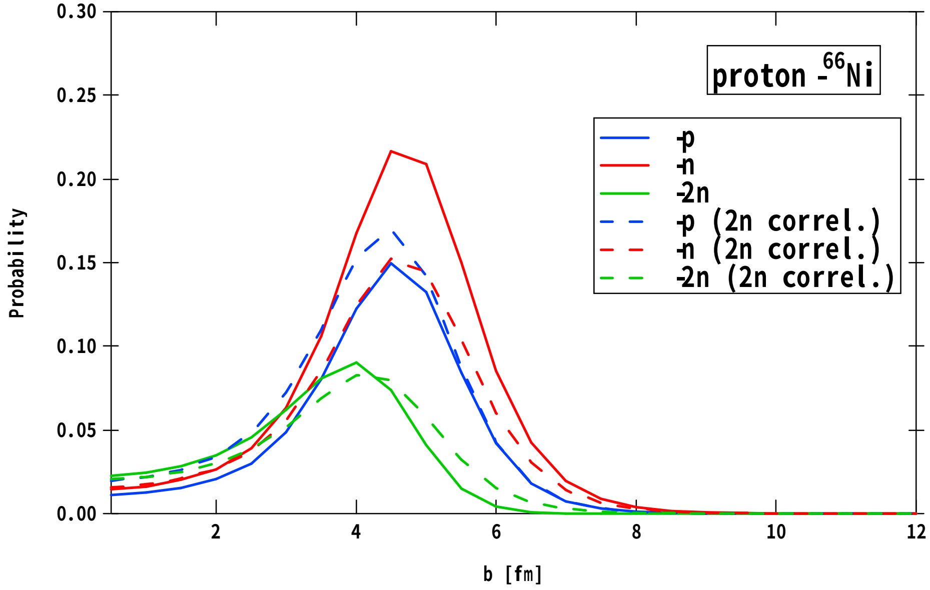


FIG. 6. Density $\rho_n(r)$ and pair density $\tilde{\rho}_n(r)$ of neutrons in ^{44,58}Ca and ^{66,84}Ni. Solid and dashed lines represent $\rho_n(r)$; dotted and dot-dashed lines are for $\tilde{\rho}_n(r)$.

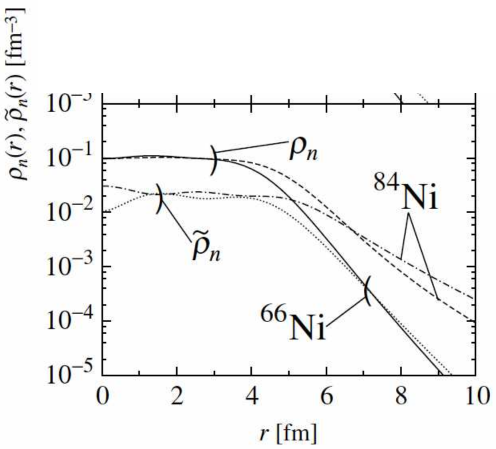
$$\rho^{(N)}(r_1, r_2, \cdots, r_N) = \rho^{(2)}(r_1, r_2)\rho^{(2)}(r_3, r_4)\cdots\rho^{(2)}(r_{N-1}, r_N)$$

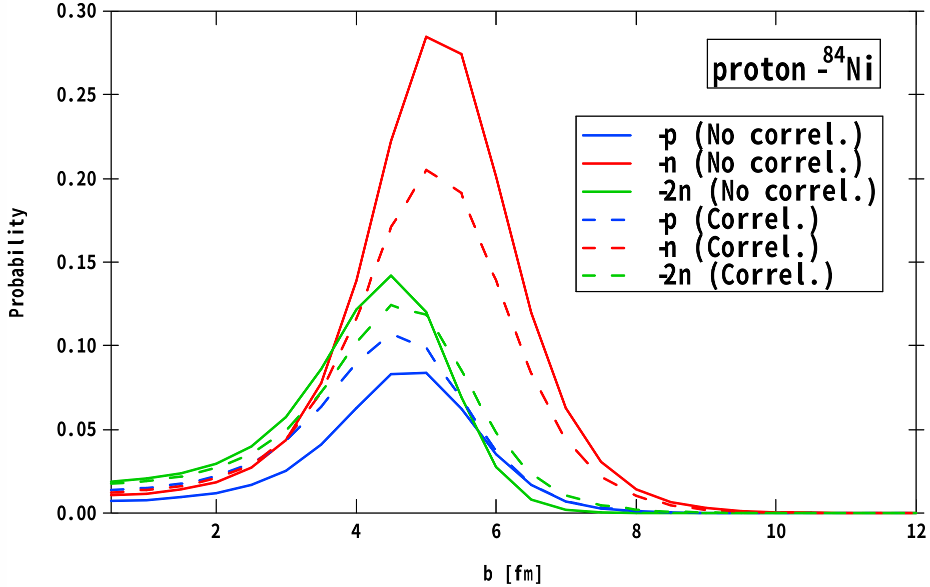
$$\rho^{(2)}(r_1, r_2) = f(r_1) f(r_2) e^{-\beta(r_1 - r_2)^2}$$

$$\rho\ (r) = N\int dr_2 \rho^{(2)}(r, r_2)$$



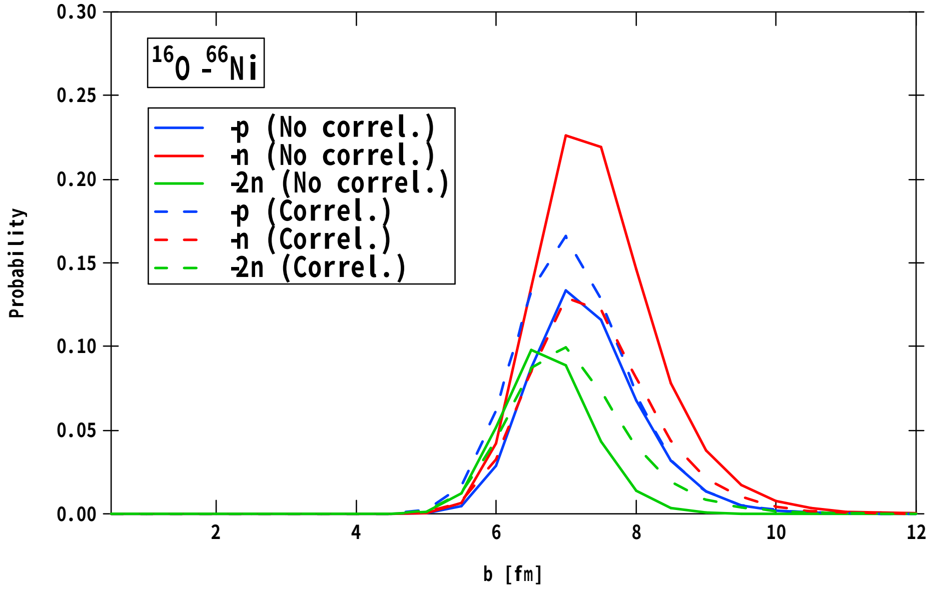
実線：Di-neutron相関なし
破線：Di-neutron相関あり



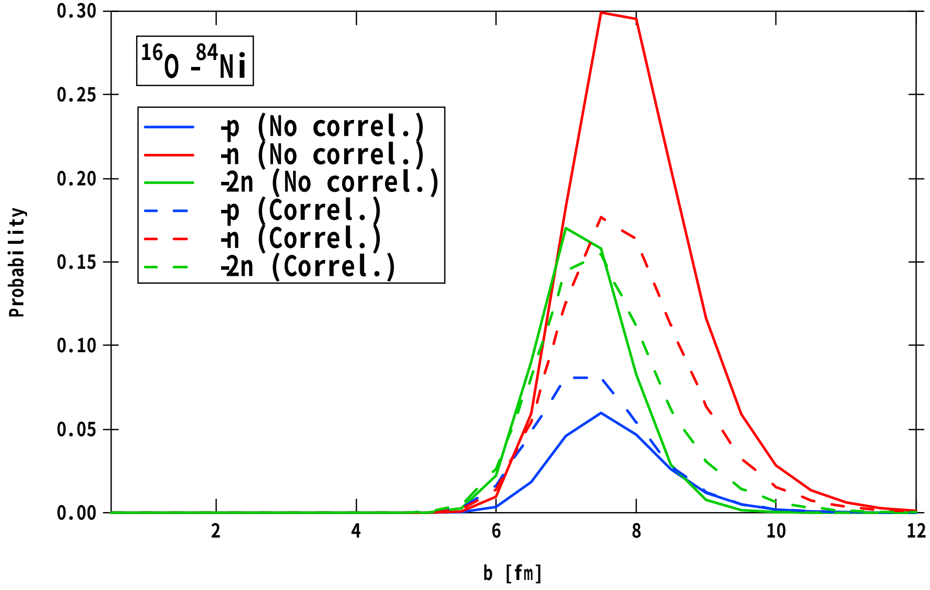


$$\rho^{(N)}(r_1, r_2, \cdots, r_N) = \rho^{(1)}(r_1)\rho^{(1)}(r_2)\cdots\rho^{(1)}(r_N)$$

$\rho^{(1)}(r)$ Woods-Saxon型



^{16}O 標的の場合



上段：相関なし
中段：相関あり
下段：混合

Cross section

Target	^{66}Ni proton	^{66}Ni ^{16}O		^{84}Ni proton	^{84}Ni ^{16}O
Total cross section	1608 1544 1577	3590 3468 3532	Total cross section	1932 1834 1885	4129 3934 4039
-p	209 245 226	225 283 251	-p	132 167 148	107 155 127
-n	335 245 293	432 251 351	-n	497 368 438	643 383 532
-2n	110 123 113	133 175 144	-2n	191 202 192	258 304 264

反応断面積、陽子分離断面積、中性子分離断面積と核構造の関連

中性子スキン⇒陽子分離断面積の減少

σ_{-p}/σ_{-n}などからスキンの厚さを計れないか？

2中性子相関 (di-neutron相関) と断面積

σ_{-n}は減少、σ_{-p}は増加

σ_{-2n}の増加は (期待したほど) 大したことはなさそう。

σ_{-2n}/σ_{-n}から2中性子相関の情報を得るのはマージナルか。

プログラムライブラリの整備をどう進めていくか？
・実験で必要な（あると便利な）道具の需要
・理論側で使いやすく提供する枠組み（マンパワー）

例えば
・3体ハロー計算と、その密度を用いたグラウバー計算

$$E\psi\left(\vec{r}_1,\vec{r}_2\right)=\left(-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla_{r_1}{}^2-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla_{r_2}{}^2+V_{nC}\left(r_1\right)+V_{nC}\left(r_2\right)+V_{nn}\left(\left|\vec{r}_1-\vec{r}_2\right|\right)\right)\psi\left(\vec{r}_1,\vec{r}_2\right)$$

V_{nC}, V_{nn} はWoods-Saxon型