



Fenomena Halo pada Isotop Ca Menggunakan Model *Relativistic Mean Field* (RMF)

Alpi Mahisha Nugraha
Universitas Indraprasta PGRI Jakarta
E-mail: alpi.mahisha@gmail.com

Abstrak

Kata kunci:

Fenomena halo,
Isotop Ca,
Relativistic Mean Field (RMF).

Fenomena halo merupakan salah satu fenomena yang dapat ditemukan di dalam inti atom, fenomena ini merupakan fenomena struktur atau bentuk nuklir akibat adanya ketidak-seragaman massa atau perbedaan distribusi massa yang merupakan fungsi dari jari-jari nuklir tersebut, sehingga nuklir akan terlihat seperti mempunyai ruang kosong dalam nuklir tersebut alih-alih fenomena optik seperti pada fenomena halo matahari meskipun fenomena tersebut berbentuk mirip. Dalam penelitian ini, peneliti menggunakan model *Relativistic Mean Field* (RMF) untuk menghitung properties nuklir seperti energi ikat dan distribusi massa yang kemudian akan dibandingkan dengan hasil eksperimen laboratorium. Isotop Ca merupakan isotop yang sampai saat ini masih mejadi topik pengembangan laboratorium nuklir sehingga analisa properties Isotop Ca menjadi salah satu daya tarik tersendiri karena para peneliti dapat menjadikan nilai eksperimen laboratorium sebagai referensi control pemodelan yang dilakukan. Model RMF menjadi salah satu pemodelan yang cukup *powerfull* dalam menganalisis properties nuklir seperti fenomena halo.

PENDAHULUAN

Fenomena halo merupakan fenomena struktur nuklir yang saat ini masih menjadi topik penelitian menarik untuk diinvestigasi (Tanihata et al., 2013: 215), istilah fenomena halo terinspirasi dari fenomena optik yang terjadi pada matahari ketika matahari memiliki cincin di sekitarnya, dengan ruang kosong di antara matahari dan cincin tersebut. Fenomena halo dalam nuklir merupakan struktur nuklir yang seolah-olah nuklir memiliki ruang kosong pemisah pusat nuklir atau *core* dengan ekor nuklir. Hal ini dikarenakan adanya ketidak-seragaman distribusi massa pada nuklir (B. Jonson, 1994: 151). Fenomena ini terjadi pada nuklir *dripline*, nuklir yang berada diluar garis kestabilan atom baik pada nuklir ringan, sedang ataupun berat (Björn Jonson, 2004: 1).

Fenomena halo merupakan fenomena yang beranalogi dengan keadaan ketidak-stabilan nuklir. Tak sedikit peneliti berpendapat bahwa fenomena halo merupakan lawan dari fenomena *pairing* atau pasangan (Bennaceur et al., 2000: 154). *Pairing* merupakan fenomena nuklir yang berdampak pada energi ikat nuklir dan umumnya bersifat atraktif berbeda dengan halo yang seolah-olah bersifat repulsif. Sehingga fenomena halo sering muncul pada nuklir yang terdeformasi (Zhou et al., 2010: 1). Dalam menganalisis fenomena halo dapat dilakukan dengan beberapa model, seperti pemodelan Skryme-Hartree-Fock-Bougolibov (SHFB) (Y. Zhang et al., 2012: 1) yang menganalisis fenomena halo besar pada isotop Zr dan pemodelan menggunakan pendekatan potensial Saxon-Wood sebagai potensial interaksi yang menjelaskan fenomena halo pada nuklir ringan (Abdullah, 2017) dan masih banyak lainnya.

Fenomena halo terdiri dari halo proton dan halo neutron, halo proton dapat dianalisis dengan menggunakan penggunaan penyerapan anti-proton (Kienle, 2004: 191) namun dalam menganalisis halo proton cukup sulit dikarenakan nuklir dengan proton yang banyak akan tidak stabil namun tidak menutup kemungkinan fenomena ini untuk ditelaah lebih lanjut (Cai et al., 2002: 246101). Sedangkan

fenomena halo neutron sampai saat ini sering kali menjadi topik menarik dikarenakan dapat dianalisa pada nuklir ringan, sedang atau pun berat. Pemodelan yang digunakan adalah pemodelan *Relativistic Mean Field* (RMF) atau pemodelan yang mempertimbangkan semua interaksi pertukaran partikel pada nuklir. Pemodelan diturunkan dari interaksi antara lagrangian suku nukleon, meson, faktor linear dan non-linear, tensor, *coupling* interaksi antara meson vektor-isoskalar dengan vektor-isovektor dan *electromagnetic-exchange*. Kemudian penurunan aljabar dari keseluruhan lagrangian tersebut akan diperoleh kerapatan energi sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
E_{RMF} = & \int \sum_{j=1}^A \bar{\psi}_k \gamma_0 \left[-i\vec{\gamma}\vec{\nabla}\gamma_0 + (M\gamma_0 - g_\sigma\phi\gamma_0) + \left(g_\omega V_0 + \frac{1}{2}g_\rho R_0\tau_0 \right) - g_\delta\vec{d}\tau_0\gamma_0 - \right. \\
& \frac{f_\omega}{M} V^0 \bar{\nabla} \frac{1}{2} \gamma_\mu \gamma_\nu \gamma_0 - \frac{f_\rho}{2M^2} R^0 \bar{\nabla} \tau \frac{1}{2} \gamma_\mu \gamma_\nu \gamma_0 + eA_0 \frac{1+\tau_0}{2} \left. \right] \psi_k d^3r - \int d^3r \left\{ -\frac{1}{2}g_0\phi\rho_s + \frac{k_3}{12M} g_\sigma m_\sigma^2 \phi^3 + \right. \\
& \frac{k_4}{24M^2} g_\sigma m_\sigma^2 \phi^4 + \frac{1}{2} g_\omega V_0 \rho_0 - \frac{1}{24} \zeta_0 g_\omega^2 V_0^4 + \frac{1}{4} g_\rho R_0 \rho_{p,0} - \frac{\eta_{2\rho}}{4M^2} g_\omega^2 m_\rho^2 V_0^2 R_0^2 - \frac{5f_\omega}{2M} V_0 \rho_0^T - \\
& \left. \frac{5f_\rho}{4M^2} R_0 \rho_{0,0}^T - \frac{1}{2} g_\delta \rho_{s,0} + \frac{1}{2} eA_0 \rho_{p,0} \right\} + C_{exc}^{EM} \left[\frac{3}{4} e^2 \left(\frac{3}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \rho_p^{\frac{4}{3}} \left[1 - \frac{2}{3M^2} (3\pi^2)^{\frac{2}{3}} \rho_p^{\frac{2}{3}} \right]
\end{aligned} \tag{1}$$

Dengan M adalah massa nukleon; m_σ , m_δ , m_ω , m_ρ masing-masing adalah massa meson skalar-isoskalar (σ), massa meson skalar isovektor (δ), massa meson vektor isoskalar (ω), dan massa vektor isovektor (ρ); ϕ , V_μ , R_μ masing-masing adalah ekspektasi untuk medan meson skalar-isoskalar (σ), medan meson vektor isoskalar (ω), dan medan vektor isovektor (ρ); A_μ adalah medan foton; g_σ , g_δ , g_ω , g_ρ masing-masing adalah konstanta *coupling* untuk masing meson. Suku terakhir pada persamaan Lagrangian adalah suku *Elektromagnetic-Exchange* yang merupakan fungsi dari besar muatan dan distribusi dari proton. Suku ini menggunakan pendekatan *Local Density Approximation* (LDA) dan diharapkan efek yang akan hilang akibat pendekatan ini akan terserap secara efektif ke dalam parameter bebas nya (C^{EM}) (Sulaksono, 2011: 1983).

Pada penelitian ini terfokus pada analisa struktur dari isotop Ca dari ${}^{36}_{20}\text{Ca}$ sampai dengan ${}^{56}_{20}\text{Ca}$, dan melihat fenomena halo yang terjadi pada isotop Ca dengan menggunakan pemodelan RMF. Cukup menarik karena model RMF akan sangat tepat jika digunakan untuk sistem *many-body* dan *spherical* nuklir, sedangkan *fenomena* halo erat kaitannya dengan deformasi nuklir yang merupakan salah satu penyebab ketidak-stabilan nuklir baik pada nuklir ringan, sedang atau pun berat. Pemilihan isotop Ca dikarenakan Calcium (Ca) merupakan isotop yang sampai saat ini hasil penelitian laboratoriumnya tetap di-*publish* sehingga peneliti memiliki control terhadap pemodelan yang digunakan.

METODE PENELITIAN

Penggunaan model *Relativistic Mean Field* (RMF) digunakan untuk menghitung besaran-besaran propertis dari nuklir seperti energi ikat, radius muatan atau *charge radius*, dan distribusi massa dari nuklir dan selanjutnya akan dilakukan analisis terhadap isotop Ca untuk melihat fenomena halo neutron yang terjadi, adapun metode penelitian yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Persamaan kerapatan energi RMF dioptimasi untuk memperoleh parameter set berupa konstanta *coupling* dari setiap suku pada persamaan (1) yang di *fitting* dan diiterasi pada nuklir-nuklir yang ringan, sedang dan berat untuk mendapatkan parameter set yang bersifat universal.
2. Parameter set tersebut akan digunakan kembali untuk menghitung propertis dari nuklir isotop Ca dari ${}^{36}_{20}\text{Ca}$ sampai dengan ${}^{56}_{20}\text{Ca}$.
3. Hasil perhitungan akan dari pemodelan RMF mengenai besaran propertis dari isotop Ca dibandingkan dengan hasil eksperimen seperti besaran energi ikat dan *charge-radius* yang sampai ini dihasilkan oleh laboratorium. Perbandingan ini dilakukan untuk menjadi control mengenai ketepatan dari model RMF.
4. Analisis lebih lanjut dilakukan untuk melihat fenomena halo neutron pada isotop Ca dengan memplot fungsi distribusi massa nuklir terhadap radius nuklir.

Membandingkan hasil penelitian dengan eksperimen merupakan salah satu hal yang seringkali digunakan peneliti untuk melihat efektifitas dalam menilai pemodelan yang dilakukan. Hal ini menjadi control untuk meninjau apakah penelitian layak untuk dilanjutkan atau tidak.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemodelan *Relativistic Mean Field* (RMF) merupakan salah satu pendekatan yang sering kali digunakan untuk melihat interaksi yang terjadi pada nuklir secara menyeluruh mengingat pemodelan ini mempertimbangkan semua jenis interaksi partikel di dalam nuklir, dalam penelitian ini persamaan (1) dioptimasi sehingga memperoleh parameter set yang sesuai untuk jenis nuklir ringan, sedang maupun berat. Parameter set yang dihasilkan sesuai pada Tabel 1, parameter set ini digunakan untuk menghitung nilai energi ikat dan *charge radius* sebagai control akurasi dari parameter set dan pemodelan yang digunakan. Dapat dilihat pada Tabel 2 bahwa penggunaan model ini mendapatkan hasil yang cukup akurat dengan nilai akurasi diatas 96% untuk energi ikat dengan satuan MeV dan akurasi diatas 97% untuk *charge radius* dengan satuan fm.

Tabel 1. Parameter set yang digunakan

Parameter	Nilai
M	479.7995
g_σ	9.767482
g_ω	13.04226
g_ρ	5.719739
f_ω	-0.28139
f_ρ	0.710644
$\eta_{2\rho}$	0.005
C_{exc}^{EM}	1

Sumber: peneliti

Tabel 2. Perbandingan hasil eksperimen dan perhitungan RMF

Isotop	Energi ikat eksperimen	Energi ikat RMF (akurasi(%))	<i>Charge-radius</i> eksperimen	<i>Charge-radius</i> RMF (Akurasi(%))
$^{36}_{20}\text{Ca}$	281.3724	279.6870 (99.40)	-	-
$^{38}_{20}\text{Ca}$	313.121634	312.1806 (99.69)	-	-
$^{40}_{20}\text{Ca}$	342.0522	342.1275 (99.98)	3.4776	3.4255 (98.50)
$^{42}_{20}\text{Ca}$	361.89573	361.2112 (99.81)	3.5081	3.4146 (97.33)
$^{44}_{20}\text{Ca}$	380.959788	378.3821 (99.32)	3.5179	3.4078 (96.87)
$^{46}_{20}\text{Ca}$	398.77308	393.8039 (98.75)	3.4953	3.4037 (97.38)
$^{48}_{20}\text{Ca}$	416.016	407.6059 (97.98)	3.4771	3.4015 (97.83)
$^{50}_{20}\text{Ca}$	427.508	415.7628 (97.25)	3.5168	3.4160 (97.13)
$^{52}_{20}\text{Ca}$	438.32558	423.2772 (96.57)	-	-
$^{54}_{20}\text{Ca}$	445.365	428.9278 (96.31)	-	-
$^{56}_{20}\text{Ca}$	449.848	432.8869 (96.23)	-	-

Sumber: data hasil eksperimen (K. Zhang et al., 2022)

Berdasarkan Tabel 2 terdapat beberapa nuklir yang tidak memiliki data eksperimen pada *charge-radius*, hal ini dikarenakan nuklir dalam keadaan tidak stabil. Namun berbeda untuk besaran energi ikat, karena besaran ini menjadi salah satu besaran propertis nuklir yang menjadi output dari eksperimen di laboratorium nuklir manapun. Terlihat bahwa model RMF ini sangat baik dalam menghitung nuklir yang berbentuk *spherical* atau bulat biasanya ditandai dengan jumlah neutron dan proton yang termasuk *magic number* seperti pada nuklir $^{40}_{20}\text{Ca}$. Hasil akurasi berkurang untuk nuklir yang semakin banyak jumlah neutronnya dikarenakan nuklir cenderung menjadi tidak stabil dan tidak berbentuk bulat lagi atau disebut dengan deformasi nuklir.

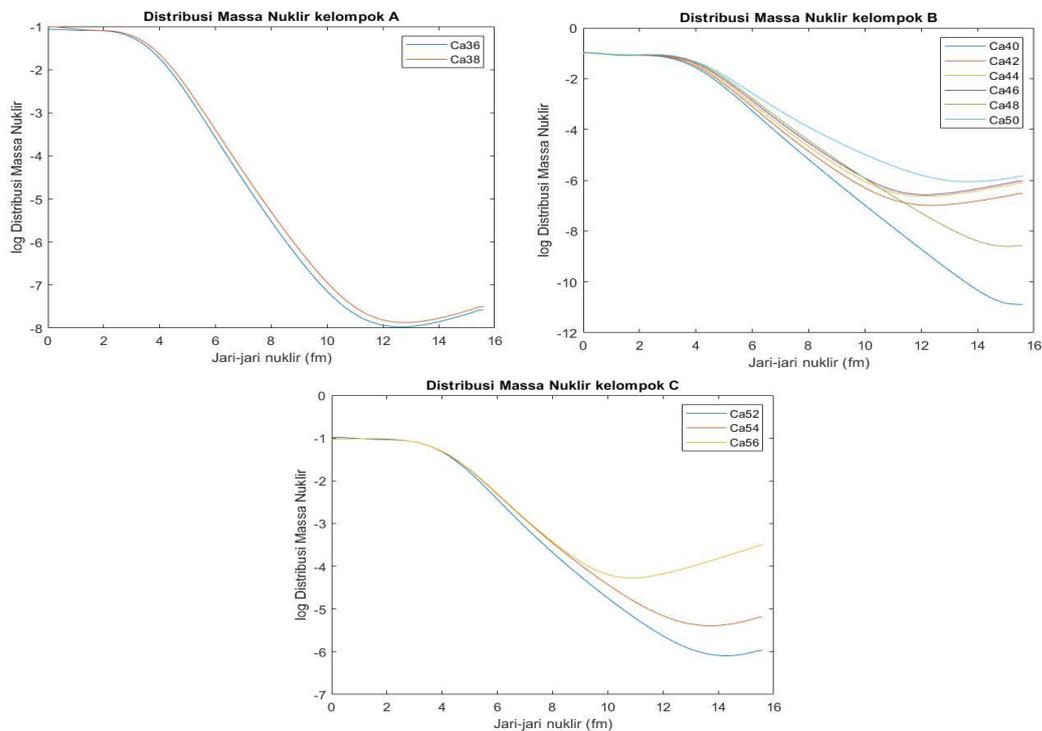
Pembentukan struktur isotop Ca melibatkan fenomena halo neutron, dan untuk melihat fenomena halo tersebut kita dapat melihat dengan menganalisa hasil distribusi massa nuklir terhadap jari-jari nuklir. Dalam memudahkan analisa isotop Ca akan dibagi menjadi tiga bagian kelompok,

kelompok A yaitu isotop Ca yang terdiri dari $^{36}_{20}\text{Ca}$ dan $^{38}_{20}\text{Ca}$ yang merupakan nuklir Ca yang belum mencapai kondisi *spherical*, kelompok B yaitu kelompok nuklir stabil yang ditandai dengan adanya data eksperimen *charge-radius* yang terdiri dari isotop $^{40}_{20}\text{Ca}$ sampai dengan $^{50}_{20}\text{Ca}$. Kemudian kelompok C yang terdiri dari isotop $^{52}_{20}\text{Ca}$, $^{54}_{20}\text{Ca}$, dan $^{56}_{20}\text{Ca}$ yang terlihat memiliki akurasi yang kecil dibandingkan dengan nuklir lainnya dan diduga sudah mengalami deformasi karena tidak stabil.

Umumnya fenomena halo tidak cukup dilihat hanya dengan nilai distribusi massa terhadap jari-jari nuklir, karena halo neutron umumnya terlihat dengan kenaikan besar massa jenis pada ujung nuklir (ekor nuklir). Namun kenaikan massa jenis ini tidak terlalu terlihat dikarenakan kenaikan yang cukup kecil, terlebih lagi jika dibandingkan dengan rasio massa *core* nuklir. Oleh karena itu, agar kenaikan massa jenisnya terlihat digunakan logaritma dari massa jenis nuklir dalam melihat fenomena halo neutron.

Nuklir kelompok A menunjukkan fenomena halo neutron pada radius kurang lebih 14 fm, namun besar halo masih kecil dan masih terlihat kecil. Hal ini dapat terlihat pada Gambar 1. Namun hal serupa terlihat pada kelompok B, kemunculan halo neutron terlihat cukup besar meskipun kelompok B dianggap nuklir stabil karena berada disekitar nuklir *spherical*, namun kemunculan halo neutron terjadi sangat besar pada isotop setelah $^{40}_{20}\text{Ca}$ yang berarti setelah keadaan *spherical*-nya halo neutron semakin besar membuat distribusi massa menjadi terkumpul di ekor nuklir dengan radius kurang lebih 12 fm.

Fenomena semakin membesar pada isotop Ca kelompok C, dikarenakan nuklir dalam keadaan semakin tidak stabil dengan penambahan jumlah neutron yang terus meningkat. Fenomena halo sering kali terlihat pada nuklir sedang seperti Ca, Mg (Hamamoto, 2017), Sn (Rotival & Duguet, 2009) dan nuklir lainnya sebagai salah satu fenomena yang menjawab akan kestabilan nuklir. Penggunaan pemodelan yang berbeda menjadi salah satu pilihan kreatif peneliti dalam melihat fenomena-fenomena nuklir baik yang bersifat struktur nuklir ataupun reaksi nuklir.



Gambar 1. Distribusi massa nuklir terhadap jari-jari nuklir

PENUTUP

Penggunaan model *Relativistic Mean Field* (RMF) menjadi salah satu alat yang *powerfull* dalam menganalisa struktur nuklir, pada perhitungan isotop Ca menggunakan RMF menghasilkan akurasi yang baik yaitu 96% keatas untuk akurasi nilai energi ikat dan 97% untuk akurasi *charge-radius*. Kedua besaran ini merupakan besaran *observable* yang dihasilkan dalam skala laboratorium. Model RMF juga dapat digunakan untuk melihat fenomena halo neutron, fenomena halo neutron pada isotop Ca akan mulai terlihat setelah melewati nuklir ${}_{20}^{40}\text{Ca}$, hal ini dikarenakan nuklir tersebut memiliki jumlah neutron dan proton yang memenuhi *magic number* yakni 20. Sayangnya model RMF tidak cukup bagus dalam menganalisis nuklir terdeformasi jadi semakin banyak halo neutron yang muncul keefektifan model RMF semakin berkurang.

Model RMF ini tidak memasukkan atau menimbang kontribusi dari fenomena *pairing* atau pasangan sebagai anti dari fenomena halo, oleh karena itu diperlukan suku *pairing* atau koreksi pairing dalam pemodelan RMF agar analisa yang dihasilkan menjadi lebih akurat untuk melihat struktur nuklir.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, A. N. (2017). Nuclear structure investigation of some neutron-rich halo nuclei. *International Journal of Modern Physics E*, 26(7). <https://doi.org/10.1142/S0218301317500483>
- Bennaceur, K., Dobaczewski, J., & Ploszajczak, M. (2000). Pairing anti-halo effect. *Physics Letters, Section B: Nuclear, Elementary Particle and High-Energy Physics*, 496(3–4), 154–160. [https://doi.org/10.1016/S0370-2693\(00\)01292-2](https://doi.org/10.1016/S0370-2693(00)01292-2)
- Cai, X. Z., Zhang, H. Y., Shen, W. Q., Shen, W. Q., Shen, W. Q., Ren, Z. Z., Feng, J., Fang, D. Q., Zhu, Z. Y., Jiang, W. Z., Ma, Y. G., Ma, Y. G., Zhong, C., Zhan, W. L., Guo, Z. Y., Xiao, G. Q., Wang, J. S., Zhu, Y. T., Wang, J. C., ... Chen, Z. Q. (2002). Existence of a proton halo in ${}^{23}\text{Al}$ and its significance. *Physical Review C - Nuclear Physics*, 65(2), 246101–246105. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.65.024610>
- Hamamoto, I. (2017). Examining possible neutron-halo nuclei heavier than Mg 37. *Physical Review C*, 95(4), 1–6. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.95.044325>
- Jonson, B. (1994). Halo nuclei. *Nuclear Physics, Section A*, 574(1–2), 151–166. [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(94\)90043-4](https://doi.org/10.1016/0375-9474(94)90043-4)
- Jonson, Björn. (2004). Light dripline nuclei. *Physics Reports*, 389(1), 1–59. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2003.07.004>
- Kienle, P. (2004). Medium energy antiproton absorption, a tool to study neutron halo nuclei. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 214(SUPPL.), 191–195. [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(03\)01776-2](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(03)01776-2)
- Rotival, V., & Duguet, T. (2009). New analysis method of the halo phenomenon in finite many-fermion systems: First applications to medium-mass atomic nuclei. *Physical Review C - Nuclear Physics*, 79(5). <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.79.054308>
- Sulaksono, A. (2011). Electromagnetic and isovector terms in standard relativistic mean field model. *International Journal of Modern Physics E*, 20(9), 1983–2010. <https://doi.org/10.1142/S0218301311019775>
- Tanihata, I., Savajols, H., & Kanungo, R. (2013). Recent experimental progress in nuclear halo structure studies. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 68(1), 215–313. <https://doi.org/10.1016/j.pnpnp.2012.07.001>
- Zhang, K., Cheoun, M. K., Choi, Y. B., Chong, P. S., Dong, J., Dong, Z., Du, X., Geng, L., Ha, E., He, X. T., Heo, C., Ho, M. C., In, E. J., Kim, S., Kim, Y., Lee, C. H., Lee, J., Li, H., Li, Z., ... Zhou, S. G. (2022). Nuclear mass table in deformed relativistic Hartree–Bogoliubov theory in continuum, I: Even–even nuclei. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 144(February), 101488. <https://doi.org/10.1016/j.adt.2022.101488>
- Zhang, Y., Matsuo, M., & Meng, J. (2012). Pair correlation of giant halo nuclei in continuum Skyrme–Hartree–Fock–Bogoliubov theory. *Physical Review C - Nuclear Physics*, 86(5), 1–12. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.86.054318>
- Zhou, S. G., Meng, J., Ring, P., & Zhao, E. G. (2010). Neutron halo in deformed nuclei. *Physical Review C - Nuclear Physics*, 82(1), 1–5. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.82.011301>