



Pengaruh Elektromagnetik Exchange pada Charge-Radius Isotop Ca

Alpi Mahisha Nugraha¹ dan Nurullaeli¹

¹Program Studi Teknik Informatika, Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer, Universitas Indraprasta PGRI Jakarta

Kata kunci

Charge-Radius,
Elektromagnetik
Exchange, Isotop
Ca

Abstrak

Charge-radius inti atom atau jari-jari muatan pada nuklir yang merupakan distribusi efek coulomb yang disebabkan oleh proton dan hamburan elektron pada inti atom. Besaran ini merupakan salah satu besaran observable yang saat ini masih dihasilkan oleh laboratorium, pada penelitian ini dilakukan perhitungan menggunakan pemodelan Relativistic Mean Field (RMF) dengan tambahan suku Elektromagnetik Exchange yang merupakan fungsi dari jumlah muatan dan distribusi proton pada isotop Ca. Besaran output untuk mengontrol pemodelan adalah energi ikat yang akan dibandingkan dengan hasil percobaan laboratorium IAEA. Dengan akurasi yang cukup baik (diatas 99%) terhadap energi ikat eksperimen menunjukkan bahwa pendekatan ini menjadi salah satu pendekatan yang powerful, namun sayangnya dalam melihat korelasi terhadap charge-radius meskipun dengan akurasi yang baik (diatas 97%), masih tidak memperlihatkan korelasi pengaruh charge-radius terhadap elektromagnetik exchange. Diperlukan analisis yang menyeluruh dari semua suku RMF untuk mendapatkan korelasi yang lebih baik lagi terhadap nilai charge-radius.

Keywords

Charge-radii,
Electromagnetic
Exchange, Ca-
Isotopes.

Abstract

The charge-radii nuclei is distribution of the coulomb effect but respectively isn't distribution of proton due to affected by the scattering of electrons in nuclei and is an observable quantity in laboratory. In this research, we use RMF model in Ca-isotopes with and without electromagnetic exchange form, and be compared with experiment from IAEA. With a fairly good accuracy (above 99%) on the binding energy, it shows that this model is powerful. Unfortunately, at the correlation to charge-radius, even with good enough accuracy (above 97%), it still doesn't show electromagnetic exchange correlation. An analysis of all RMF forms is needed to get a better correlation to the charge-radii nuclei clearly here.

Sejarah Artikel

Diterima :

Disetujui :

Dipublikasi :

© 2021 Jurnal Jejaring Matematika dan Sains. This work is licensed under a [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Corresponding Author:

*Alamat e-mail: alpi.mahisha@gmail.com

PENDAHULUAN

Gaya coulomb merupakan gaya repulsif yang terjadi di inti nuklir, property nuklir yang sangat dipengaruhi oleh faktor ini adalah energi ikat, *charge-radius* dan besaran lainnya. Sampai saat ini kedua besaran ini menjadi besaran output dari eksperimen laboratorium. *Charge-radius* nuklir adalah jari-jari interaksi coulomb yang dipengaruhi oleh jumlah proton dalam nuklir dan hamburan elektron terhadap nya, sehingga *charge-radius* bukan merupakan jari-jari distribusi proton dalam nuklir. Meskipun *charge-radius* juga berpengaruh pada *superfluidity* proton yang terjadi pada nuklir yang kaya dengan proton [1].

Pada interaksi nuklir terdapat banyak faktor interaksi dan partikel pertukarannya, seperti pertukaran partikel meson pada interaksi lemah dan elektromagnetik [2]. Interaksi rata-rata dari partikel tersebut digabungkan menjadi pemodelan *Relativistic Mean Field* (RMF), pemodelan yang digunakan dalam penelitian ini.

Pemodelan yang digunakan dengan menurunkan interaksi berupa persamaan Lagrangian sebagai berikut:

$$\mathcal{L}_{RMF} = \mathcal{L}_N + \mathcal{L}_M + \mathcal{L}_{Lin} + \mathcal{L}_{NI} + \mathcal{L}_T + \mathcal{L}_{nl}^\omega + \mathcal{L}_{nl}^{\rho\omega} + \mathcal{L}_{exc}^{EM}.$$

Persamaan yang meliputi interaksi nukleon, meson, interaksi linear dan non-linear, interaksi antar meson dan suku *electromagnetic-exchange* (EM-Exc). Adapun untuk masing-masing interaksi digambarkan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_N &= \sum_{j=1}^A \bar{\psi}_j (i\gamma^\mu \partial_\mu - M), \\ \mathcal{L}_M &= \frac{1}{2} (\partial_\mu \phi \partial^\mu \phi - m_\sigma^2 \phi^2) - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} V_{\mu\nu} V^{\mu\nu} - m_\omega^2 V_\mu V^\mu \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} R_{\mu\nu} R^{\mu\nu} - m_\rho^2 R_\mu R^\mu \right), \\ &\quad + \frac{1}{2} (\partial_\mu \bar{d} \partial^\mu \bar{d} - m_\delta^2 \bar{d}^2) - \frac{1}{2} \partial^\nu A^\mu \partial_\nu A_\mu, \\ \mathcal{L}_{Lin} &= \sum_{j=1}^A \bar{\psi}_j \left(g_\sigma \phi - g_\omega V_\mu \gamma^\mu + \frac{1}{2} g_\rho R_\mu \gamma^\mu \tau + g_\delta \bar{d} \tau - e A^\mu \frac{1+\tau_0}{2} \gamma^\mu \right) \psi_j, \\ \mathcal{L}_{nl} &= - \left(\frac{k_3}{6M} g_\sigma m_\sigma^2 \phi^3 + \frac{k_4}{24M^2} g_\sigma^2 m_\sigma^2 \phi^4 \right), \\ \mathcal{L}_T &= - \sum_{j=1}^A \bar{\psi}_j \left(\frac{f_\omega}{2M} \partial^\nu V^\mu i\gamma_\mu \gamma_\nu + \frac{f_\rho}{4M} \partial^\nu R^\mu \tau i\gamma_\mu \gamma_\nu \right) \psi_j, \\ \mathcal{L}_{nl}^\omega &= \frac{1}{24} g_\omega^2 (V_\mu V^\mu)^2, \\ \mathcal{L}_{nl}^{\rho\omega} &= \frac{\eta_{2\rho}}{4M^2} g_\omega^2 m_\rho^2 V_\mu V^\mu R_\mu R^\mu, \\ \mathcal{L}_{Exc}^{EM} &= C_{exc}^{EM} \left[\frac{3}{4} c^2 \left(\frac{3}{\pi} \right)^2 \right] \rho_p^{A/3} \left[1 - \frac{2}{3M^2} (3\pi^2)^{2/3} \rho_p^{2/3} \right].\end{aligned}$$

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 (EM-Exc) 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}) [3].

Kesuluruhan persamaan di atas diturunkan secara aljabar sehingga akan mendapatkan fungsi kerapatan energi yang akan diiterasi dan dihitung secara numerik untuk mendapatkan besaran-besaran properti nuklir seperti energi ikat dan *charge-radius* pada isotop Ca. Kedua besaran ini, mulanya dapat juga dihasilkan dengan metode pendekatan Various Microscopic [4], yang telah dibandingkan dengan metode lainnya seperti RMF. Namun terdapat beberapa kekurangan sehingga pemodelan ini hanya sesuai di beberapa hal saja.

Pada penelitian akan terfokus pada besaran energi ikat nuklir sebagai *control* pemodelan dan besaran *charge-radius* pada isotop Ca. Sampai saat ini *charge-radius* menjadi salah satu topik menarik untuk ditelaah seperti tidak terduganya besar *charge-radius* dalam isotop Ca yang dihasilkan oleh laboratorium CERN dengan metode spektroskopi laser [5].

Selain itu, terdapat juga perhitungan *charge-radius* dengan menggunakan metode *feed-forward neural network* dengan menginput data set berupa jumlah proton dan neutron pada nuklir yang diterapkan pada banyak isotop [6]. Perkembangan mengenai *charge-radius* cukup pesat karena diiringi dengan hasil laboratorium yang selalu bertambah untuk nuklida tertentu, pemodelan RMF dengan analisis faktor EM-EXC akan menjadi salah satu pendekatan menarik dalam melihat perilaku *charge-radius*.

METODE PENELITIAN

Penggunaan model RMF menjadi salah satu pendekatan yang *powerfull* dalam melihat properties nuklir. Besaran seperti distribusi massa, distribusi muatan, energi ikat, dan besaran lainnya menjadi output dari penggunaan pendekatan ini. Metode yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. *Fitting* berupa iterasi pada model RMF terhadap besaran *observable* nuklir dari inti nuklir ringan sampai berat seperti timbal (Pb) untuk mendapatkan parameter set untuk pendekatan penggunaan Elektromagnetic-Exchange (EM-Exc) dan tanpa menggunakannya (Non EM-Exc).
2. Melakukan perhitungan dan analisis besaran charge-radius dan energi ikat dengan parameter set yang sudah di-*fitting* kemudian menganalisis hasil perhitungan dengan membandingkan terhadap hasil eksperimen.

Analisis terhadap *Electromagnetic-exchange* (EM-Exc) merupakan pertimbangan karena interaksi coulomb melibatkan foton atau gelombang elektromagnetik sebagai partikel pembawa gaya nya. Sehingga akan cukup menarik analisi mengenai korelasi antara EM-Exc terhadap besaran *charge-radius*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Charge radius atau jari-jari muatan nuklir dan energi ikat nuklir merupakan besaran properties nuklir yang sampai saat ini menjadi besaran *observable* di laboratorium. Karena hal itulah, cukup banyak penelitian mengenai pengembangan pemodelan nuklir berdasarkan kedua besaran tersebut sebagai parameter *fitting* [7]. Salah satu nuklida yang diteliti adalah unsur kalsium ${}_{20}\text{Ca}$ (Calcium) terutama isotopnya. Salah satu laboratorium yang meneliti besaran ini dan dapat diakses umum adalah International Atomic Energy Agency (IAEA); Nuclear Data Services yang berlokasi di Rusia.

Penggunaan pemodelan *Relativistic Mean Field* (RMF) dengan tambahan suku *Elektromagnetic Exchange* menjadi salah satu pendekatan menarik dalam menghitung *charge-radius* dan energi ikat nuklir yang dibandingkan dengan hasil ekperimen dari IAEA [8], adapun parameter set yang digunakan dalam penelitian ini pada Tabel 1. Parameter set ini diperoleh dengan melakukan iterasi yang bersifat *self consistent* terhadap besaran *observable* di laboratorium.

Tabel 1. Parameter set EM-Exc dan Non EM-Exc

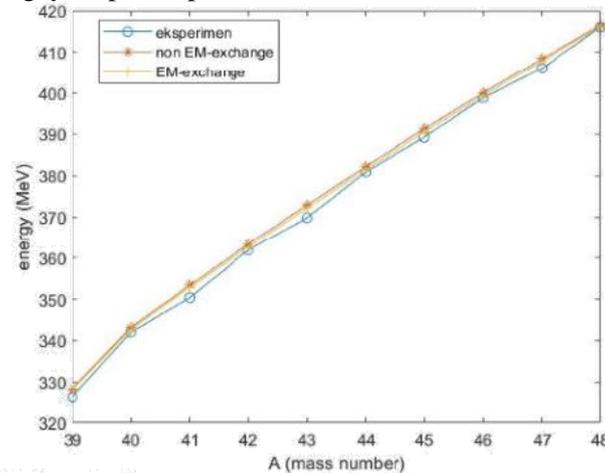
Parameter	EM-Exc	Non EM-Exc
m_σ	479.714	479.389
g_σ	9.768	9.773
g_ω	13.041	13.035
c_1	167.922	164.698
b_3	6.165	6.366
b_2	-7.800	-7.777
g_ρ	4.324	4.648
f_ω	-0.298	-0.319
f_ρ	1.761	0.008
C_{exc}^{EM}	1.00	0.00
$\eta_{2\rho}$	0.00	0.00

Penggunaan EM-Exc ditandai dari nilai C_{exc}^{EM} yang bernilai 1 yang artinya faktor suku *electromagnetic-exchange* ini aktif dan bernilai 0 ketika tidak aktif. Besaran lainnya adalah besaran yang ikut di-*fitting* menyesuaikan (self coupling) terhadap iterasi *self consistent*. Sebagai *control* untuk melihat baiknya pemodelan dengan menggunakan parameter set yang ada adalah dengan membandingkan besaran utama dari nuklir yaitu energi ikat, besaran yang paling penting dalam properti nuklir. Parameter set ini juga telah dapat melihat pengaruh tensor *coupling* dari meson ω dan meson ρ dan EM-Exc pada nuklir inti berat [9].

Dapat dilihat akurasi perhitungan energi ikat pada Tabel 2. Baik penggunaan EM-Exc dan Non EM-Exc akurasi yang diperoleh berkisar 99% yang mengartikan pemodelan RMF cukup baik dalam menghitung

energi ikat. Namun penggunaan EM-Exc secara rata-rata paling mendekati nilai energi ikat eksperimen. Karena karakternya yang mengkoreksi local density membuat hasil perhitungan lebih baik.

Perilaku energi ikat dari isotop Ca dapat dilihat dari Gambar 1. Pada umumnya semakin besar nilai A energi ikat akan membesar juga, baik kurva EM-Exc maupun non EM-Exc menempel pada kurva eksperimen dengan akurasi yang cukup baik. Tidak ada pengaruh yang besar terhadap peningkatan jumlah ganjil-genap neutron pada isotop Ca ini, hal ini dikarenakan proton yang berjumlah 20 yang mana itu cukup relatif sedikit untuk memiliki gaya repulsi pada nuklir.



Gambar 1. Hubungan Energi ikat dengan Nomor Massa

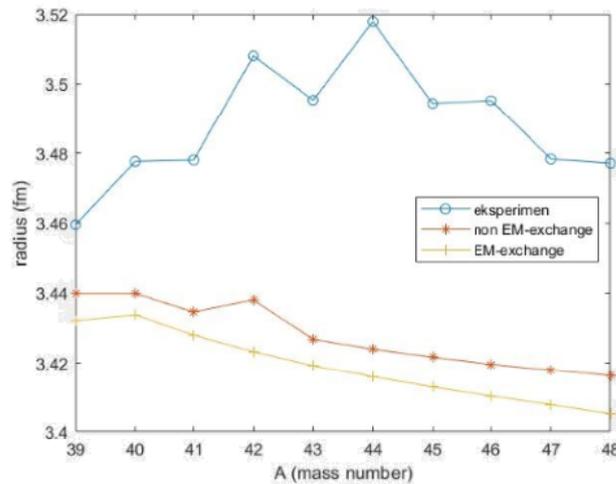
Tabel 2. Akurasi hasil perhitungan energi ikat nuklir (MeV)

Nomor Massa (A)	Eksperimen	Non EM-Exc (akurasi %)	EM-Exc (akurasi %)
39	326,42	328,38 (99,40)	328,15 (99,47)
40	342,05	343,20 (99,66)	342,79 (99,78)
41	350,42	353,43 (99,14)	352,85 (99,31)
42	361,90	363,34 (99,60)	362,63 (99,80)
43	369,83	372,94 (99,16)	372,17 (99,37)
44	380,96	382,25 (99,66)	381,46 (99,87)
45	389,27	391,27 (99,49)	390,51 (99,68)
46	398,77	399,98 (99,70)	399,31 (99,87)
47	406,05	408,38 (99,43)	407,83 (99,56)
48	416,00	416,45 (99,89)	416,08 (99,98)

Sedangkan untuk akurasi dari *charge-radius* dengan pengaruh faktor *Elektromagnetic Exchange* (EM-Exc) atau pun tanpa dipengaruhi *Elektromagnetic Exchange* (Non EM-Exc) dari isotop $^{20}\text{Ca}^{39}$ sampai $^{20}\text{Ca}^{48}$ dapat dilihat dari Tabel 3 dan perilaku dari *charge-radius* dapat terlihat pada Gambar 2.

Terlihat dalam Tabel 3 bahwa akurasi terhadap *charge-radius* cukup bagus diatas 97% baik untuk penggunaan EM-Exc atau pun nonEM-Exc. Namun hasil yang mengejutkan adalah akurasi dari nonEM-Exc lebih baik daripada penggunaan EM-Exc, meskipun tidak terlalu signifikan perbedaannya. Hal ini

mungkin terjadi karena penggunaan EM-Exc membuat lokasi distribusi muatan lebih terpusat ke dalam inti nuklir.



Gambar 2. Hubungan *charge-radius* dengan Nomor Massa

Tabel 3. Akurasi hasil perhitungan *charge-radius* (fm)

Nomor Massa (A)	Eksperimen	Non EM-Exc (akurasi %)	EM-Exc (akurasi %)
39	3,4595	3,4399 (99,43)	3,4321 (99,21)
40	3,4776	3,4399 (98,92)	3,4338 (98,74)
41	3,4780	3,4346 (98,75)	3,4280 (98,56)
42	3,5081	3,4380 (98,00)	3,4232 (97,58)
43	3,4954	3,4268 (98,04)	3,4192 (97,82)
44	3,5179	3,4239 (97,33)	3,4158 (97,10)
45	3,4944	3,4216 (97,92)	3,4129 (97,67)
46	3,4953	3,4196 (97,83)	3,4103 (97,57)
47	3,4783	3,4179 (98,26)	3,4078 (97,97)
48	3,4771	3,4161 (98,25)	3,4052 (97,93)

Berdasarkan Gambar 2 terlihat perilaku perubahan *charge-radius* dipengaruhi oleh nomor massa, hal ini sudah diprediksi oleh penelitian sebelumnya mengenai adanya pengaruh ganjil-genap jumlah nukleon

KESIMPULAN

Relativistic Mean Field (RMF) dengan faktor *Elektromagnetic-exchange* (EM-Exc) menjadi salah satu alternatif analisis untuk melihat *charge-radius* dan energi ikat nuklir. *Charge-radius* yang merupakan distribusi lokasi rata-rata pengaruh potensial coulomb yang dipengaruhi oleh jumlah proton dan hamburan elektron terhadap nuklir tidak terlalu dipengaruhi oleh suku EM-Exc meskipun akurasi diatas 97%. Namun

perilaku Charge radius baik penggunaan EM-Exc atau pun non EM-Exc memiliki karakter yang sama di setiap Isotop Ca.

Berdasarkan hasil perhitungan, tentu saja untuk melihat korelasi faktor-faktor RMF terhadap *charge radius* diperlukan analisis keseluruhan terhadap semua suku, sehingga akurasi dengan hasil perhitungan akan jauh lebih baik.

REFERENSI

- [1] [1] A. J. Miller *et al.*, “Proton superfluidity and charge radii in proton-rich calcium isotopes,” *Nat. Phys.*, vol. 15, no. 5, pp. 432–436, 2019, doi: 10.1038/s41567-019-0416-9.
- [2] [2] M. Chemtob and M. Rho, “Meson exchange currents in nuclear weak and electromagnetic interactions,” *Nucl. Physics, Sect. A*, vol. 163, no. 1, pp. 1–55, 1971, doi: 10.1016/0375-9474(71)90520-3.
- [3] [3] A. Sulaksono, “Electromagnetic and isovector terms in standard relativistic mean field model,” *Int. J. Mod. Phys. E*, vol. 20, no. 9, pp. 1983–2010, 2011, doi: 10.1142/S0218301311019775.
- [4] [4] Z. Patyk *et al.*, “Masses and Radii of Sphrecal Nuclei Calculated in Various Microscopic Approaches,” *Gesellschaft fur Schwerionenforsch. mbH*, 1997.
- [5] [5] R. F. Garcia Ruiz *et al.*, “Unexpectedly large charge radii of neutron-rich calcium isotopes,” *Nat. Phys.*, vol. 12, no. 6, pp. 594–598, 2016, doi: 10.1038/nphys3645.
- [6] [6] D. Wu, C. L. Bai, H. Sagawa, and H. Q. Zhang, “Calculation of nuclear charge radii with a trained feed-forward neural network,” *Phys. Rev. C*, vol. 102, no. 5, pp. 1–7, 2020, doi: 10.1103/PhysRevC.102.054323.
- [7] [7] T. Bayram, S. Akkoyun, S. O. Kara, and A. Sinan, “New parameters for nuclear charge radius formulas,” *Acta Phys. Pol. B*, vol. 44, no. 8, pp. 1791–1799, 2013, doi: 10.5506/APhysPolB.44.1791.
- [8] [8] I. Angeli and K. P. Marinova, “Table of experimental nuclear ground state charge radii: An update,” *At. Data Nucl. Data Tables*, vol. 99, no. 1, pp. 69–95, 2013, doi: 10.1016/j.adt.2011.12.006.
- [9] [9] N. Liliani, A. M. Nugraha, J. P. Diningrum, and A. Sulaksono, “Impacts of the tensor couplings of ω and ρ mesons and Coulomb-exchange terms on superheavy nuclei and their relation to the symmetry energy,” *Phys. Rev. C*, vol. 93, no. 5, 2016, doi: 10.1103/PhysRevC.93.054322.
- [10] [10] I. Talmi, “On the odd-even effect in the charge radii of isotopes,” *Nucl. Physics, Sect. A*, vol. 423, no. 2, pp. 189–196, 1984, doi: 10.1016/0375-9474(84)90587-6.