

Struktur Inti dan Model Inti

Dr. Yosaphat Sumardi



PENDAHULUAN

Ekspерimen hamburan Rutherford menunjukkan bahwa atom terdiri dari inti yang dikelilingi oleh elektron-elektron. Dibandingkan dengan ukuran inti, lintasan elektron-elektron berada pada jarak yang sangat besar dari inti. Sebagian besar massa atom terletak dalam intinya.

Model atom Rutherford didasarkan pada mekanika klasik, model atom Bohr didasarkan pada konsep-konsep kuantum permulaan, dan teori kuantum Schrodinger merupakan teori yang secara tepat memerikan struktur atom. Oleh karena itu, mekanika kuantum merupakan model yang seharusnya digunakan untuk memberikan struktur inti.

Dalam modul ini akan dibahas masalah-masalah yang berkaitan inti atom, khususnya tentang struktur inti dan sifat-sifatnya serta model inti, antara lain: terminologi dasar dalam fisika inti, partikel penyusun inti, energi ikat stabilitas inti, model tetes cairan dan model kulit. Pokok-pokok bahasan ini berkaitan erat dengan pokok-pokok bahasan dalam modul-modul sebelumnya, misalnya fisika modern. Oleh karena itu, penguasaan materi pelajaran dalam modul-modul sebelumnya akan membantu Anda dalam mempelajari modul ini.

Pemahaman yang mendasar tentang konsep-konsep tersebut akan memantapkan penguasaan materi bagi guru yang akan mengajarkannya. Pemahaman ini juga akan membantu mahasiswa dalam mempelajari modul-modul berikutnya.

Setelah mempelajari modul ini Anda diharapkan mampu memahami konsep-konsep yang berkaitan dengan inti atom. Secara lebih khusus Anda diharapkan dapat:

1. menjelaskan terminologi konsep dasar dalam fisika inti;
2. menjelaskan partikel-partikel penyusun inti atom;
3. menjelaskan pengertian energi ikat inti;
4. menjelaskan pengertian stabilitas inti;

5. menjelaskan model tetes cairan dan model kulit
6. menyelesaikan soal-soal yang berkaitan dengan inti atom.

Agar tujuan-tujuan tersebut tercapai pelajarilah modul ini secara cermat dan tekun.

KEGIATAN BELAJAR 1**Struktur Inti dan Sifat-sifatnya**

Terdapat banyak kemiripan antara struktur inti dan struktur atom, sehingga kita agak mudah untuk mempelajari sifat-sifat inti. Inti mengikuti hukum-hukum fisika kuantum. Inti juga mempunyai keadaan dasar dan keadaan-keadaan tereksitasi serta memancarkan foton-foton (berupa sinar-sinar gamma) bilamana terjadi transisi antara keadaan-keadaan tereksitasi.

Namun demikian, ada dua perbedaan utama dalam mengkaji sifat-sifat atom dan inti. Dalam fisika atom, elektron-elektron mengalami gaya yang diberikan oleh inti; dalam fisika inti, tidak ada gaya luar semacam itu. Gerak partikel-partikel penyusun inti terjadi karena pengaruh gaya yang diberikan oleh partikel-partikel itu sendiri. Interaksi antara elektron-elektron mempunyai pengaruh kecil terhadap tingkat energi atomik; sebagian besar struktur atom ditentukan oleh interaksi antara elektron dan inti, sehingga pengaruh elektron lain dipandang sebagai gangguan (atau pertubasi) kecil. Dalam fisika inti, interaksi antara partikel-partikel penyusunnya memberikan gaya inti, interaksi antara partikel-partikel penyusunnya memberikan gaya inti, sehingga kita tidak dapat menjelaskan masalah sistem banyak benda ini sebagai pertubasi.

Masalah kedua yang berhubungan dengan fisika inti, kita tidak dapat menuliskan gaya inti dalam bentuk yang sederhana seperti gaya Coulomb dan gaya gravitasi. Tidak ada ungkapan analitis sederhana untuk memberikan gaya interaksi antara partikel-partikel penyusun inti.

Walaupun terdapat beberapa kesukaran tersebut, kita dapat belajar banyak tentang sifat-sifat inti dengan mempelajari interaksi antara inti-inti yang berlainan, peluruhan radioaktif dari inti, dan sifat-sifat partikel penyusunnya.

A. KONSEP-KONSEP DASAR DALAM FISIKA INTI

Jenis inti dilukiskan dengan jumlah total muatan positif dalam inti dan jumlah total satuan massa. Muatan inti neto sama dengan $+Ze$, dengan Z adalah nomor atom dan e adalah besarnya muatan elektron. Partikel dasar yang bermuatan listrik positif dalam inti adalah proton, yang merupakan inti

atom hidrogen. Oleh karena itu, suatu inti dengan nomor atom Z mengandung Z proton dan sebuah atom netral mengandung Z elektron yang bermuatan negatif. Karena massa elektron-elektron itu sangat kecil dibandingkan dengan massa proton, $m_p \approx 2000 m_e$ elektron itu sering kali dapat diabaikan dalam pembicaraan massa sebuah atom. Nomor massa suatu jenis inti, ditunjukkan dengan lambang A , hampir merupakan kelipatan bulat terhadap perbandingan antara massa inti dan satuan massa dasar yang didefinisikan sedemikian rupa sehingga proton mempunyai massa hampir satu satuan. Hampir semua inti mempunyai A yang lebih besar daripada Z . Jadi harus ada komponen pejal lain dalam inti. Sebelum tahun 1932 diyakini bahwa inti mengandung A proton dan $(A - Z)$ elektron inti. Dengan anggapan semacam ini, massa inti kira-kira sama dengan A kali massa proton (dengan massa elektron diabaikan) dan muatan listrik inti sebesar $A(+e) + (A - Z)(-e) = +Ze$. Model ini disebut model proton-elektron.

Ternyata model proton-elektron tersebut menimbulkan beberapa kesukaran. Keberadaan elektron dalam inti tidak memuaskan karena beberapa alasan:

1. Elektron-elektron inti harus terikat dengan proton-proton karena adanya gaya yang kuat, bahkan lebih besar daripada gaya Coulomb. Namun belum terdapat bukti adanya gaya kuat antara proton-proton dan elektron-elektron atomik.
2. Adanya elektron dalam inti tidak sesuai dengan asas ketidakpastian. Eksperimen hamburan Rutherford menunjukkan bahwa ukuran inti kira-kira mempunyai orde $10^{-14} m$. Ketidakpastian posisi sebuah elektron dalam inti adalah $\Delta x \approx 10^{-14} m$ dan ketidakpastian momentumnya adalah

$$\Delta p \cong \frac{h}{\Delta x} = 1.1 \times 10^{-20} \text{ kg } \frac{m}{s}. \text{ Momentum elektron itu setidak-tidaknya}$$

harus sebesar Dp ini dan energi kinetik elektron (dengan mengabaikan energi diam elektron) adalah $K \cong pe = 3.3 \times 10^{-12} \text{ J} = 20 \text{ MeV}$. Menurut bukti eksperimen, energi elektron-elektron yang berkaitan dengan atom-atom tak stabil hanya mempunyai orde beberapa eV. Jadi keberadaan elektron dengan energi 20 MeV tidak dapat dijelaskan dengan observasi.

3. Kesukaran yang lain berkaitan dengan spin intrinsik inti. Berdasarkan pengukuran efek momen magnetik nuklir pada transisi-transisi atomik, diketahui bahwa proton mempunyai spin intrinsik $\frac{1}{2}$, seperti spin

elektron. Sebagai contoh, inti deuterium yang dianggap mempunyai muatan +e, seperti inti hidrogen biasa, tetapi mempunyai massa dua satuan, dua kali massa hidrogen biasa. Model proton-elektron memandang bahwa inti deuterium terdiri atas dua proton dan satu elektron. Masing-masing partikel mempunyai spin $\frac{1}{2}$, sehingga menurut aturan penjumlahan momentum sudut dalam mekanika kuantum akan memberikan spin deuterium $\frac{1}{2}$ atau $\frac{3}{2}$. Berdasarkan pengukuran spin deuterium adalah 1.

4. Inti yang mengandung elektron-elektron tak berpasangan diperkirakan akan mempunyai momen dipol magnetik jauh lebih besar daripada momen dipol magnetik yang teramati. Sebagai contoh, jika sebuah elektron berada di dalam inti deuterium, kita akan memperkirakan bahwa inti itu mempunyai momen dipol magnetik yang kira-kira berukuran dengan momen dipol magnetik sebuah elektron. Namun hasil pengamatan momen dipol magnetik inti deuterium kira-kira $\frac{1}{2000}$ kali momen dipol magnetik elektron.

Kesukaran tersebut dapat diatasi setelah ditemukan neutron pada tahun 1932 oleh James Chadwick. Neutron adalah partikel yang mempunyai massa kira-kira sama dengan masa proton (sebenarnya kira-kira 0,1% lebih besar), tetapi tidak bermuatan listrik. Model ini disebut model proton-neutron. Menurut model itu inti terdiri dari proton-proton dan neutron-neutron, yang disebut nukleon. Secara kuantitatif dinyatakan bahwa inti terdiri dari Z proton dan (A – Z) neutron, yang memberikan muatan total Ze dan massa total secara kasar A. Suatu jenis inti tertentu disebut nuklide, yang dapat dituliskan sebagai

$${}^A_Z X_N \tag{1.1}$$

dengan

- X adalah nuklide, yang menunjukkan jenis inti tertentu
- Z adalah nomor atom, yang menunjukkan jumlah proton
- N adalah nomor neutron, menunjukkan jumlah neutron: sering kali nomor neutron ini tidak dituliskan
- A (= Z + N) adalah nomor massa, menunjukkan jumlah total proton dan neutron atau jumlah nukleon

Sering kali nomor neutron suatu nuklide tidak dituliskan secara eksplisit. Sebagai contoh, inti natrium ${}_{11}^{23}\text{Na}_{12} = {}_{11}^{23}\text{Na}$ mempunyai $Z = 11$ proton, $N = 12$ neutron, dan $A = N + Z = 11 + 12 = 23$ nukleon.

Menurut model proton-proton, deutron ${}^2_1\text{H}$ mempunyai $Z = 1$ proton dan $N = 1$ neutron. Masing-masing nukleon itu mempunyai spin intrinsik $\frac{1}{2}$, sehingga spin total yang mungkin adalah 0 (jika dua spin itu berlawanan arah) atau 1 (jika dua spin itu searah).

Sifat-sifat kimia unsur tertentu tergantung pada nomor atom Z , tidak tergantung pada nomor massa A . Oleh karena itu, ada beberapa inti yang mempunyai nomor atom Z sama tetapi mempunyai nomor massa berbeda yang disebut isotop. Ada juga isotop yang tidak stabil yang dihasilkan dalam reaksi inti; isotop ini disebut isotop radioaktif atau radioisotop. Atom-atom dari beberapa inti ini mempunyai sifat kimia yang sama, tetapi mempunyai perbedaan massa dan sifat-sifat yang tergantung pada massa. Inti-inti ${}_{14}^{28}\text{Si}$, ${}_{14}^{30}\text{Si}$, ${}_{14}^{32}\text{Si}$ dan ${}_{14}^{36}\text{Si}$ adalah isotop-isotop silikon. Inti-inti yang mempunyai jumlah neutron sama disebut isoton. Beberapa isoton antara lain ${}^6_6\text{C}_8$, ${}^7_7\text{N}_8$, dan ${}^8_8\text{O}_8$.

Dalam fisika inti kita menjumpai ukuran panjang dengan orde 10^{-15} m, yang disebut dengan femtometer (fm). Satuan ini biasanya dikenal sebagai satu fermi. Ukuran inti membentang kira-kira 1 fm untuk nukleon tunggal sampai kira-kira 7 fm untuk inti terberat.

Energi inti biasanya diukur dalam mega elektron-volt (MeV), dengan $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$ adalah energi yang diperoleh sebuah elektron bilamana dipercepat melalui beda potensial satu volt. Energi peluruhan β dan γ yang khas berada dalam rentangan 1 MeV dan reaksi inti berenergi rendah terjadi dengan energi-energi kinetik berorde 10 MeV. Energi-energi semacam itu jauh lebih kecil daripada energi diam inti, dan kita dibenarkan menggunakan rumus nonrelativistik untuk energi dan momentum nukleon, tetapi elektron-elektron peluruhan β harus diterangkan secara relativistik.

Satuan massa dalam fisika inti biasanya dinyatakan dalam satuan massa atomik (*atomic mass unit*), u , yaitu $\frac{1}{12}$ dari massa atom netral tak-tereksitasi yang terdiri atas inti ${}^{12}_6\text{C}$ dan enam elektron. Dalam kilogram, satuan massa

atomik adalah $1u = \frac{10^{-3}}{N_A} = \frac{10^{-3}}{6,022045 \times 10^{23}} = 1,660566 \times 10^{-27}$ kg, dengan N_A

adalah bilangan Avogadro. Energi ekuivalen dari satuan massa atomik tersebut dapat dihitung dengan menggunakan rumus kesetaraan massa-energi, $E = mc^2$, sehingga

$$\begin{aligned} 1u &= 1,660566 \times 10^{-27} \times (2,997925 \times 10^8)^2 = 1,4924422 \times 10^{-10} \text{ J} \\ &= 1,4924422 \times 10^{-10} / 1,602189 \times 10^{-19} \\ &= 9,31502 \times 10^8 \text{ eV} = 931,502 \text{ MeV} \end{aligned}$$

B. SIFAT-SIFAT INTI

Kita dapat memerikan suatu inti dengan sejumlah parameter yang relatif kecil: muatan listrik, jari-jari, massa, energi ikat, momentum, paritas, momen dipol dan momen kuadrupol magnet, dan energi keadaan tereksitasi. Ini semua merupakan sifat statik inti yang akan kita bicarakan secara singkat dalam kegiatan belajar ini.

1. Ukuran dan Distribusi Inti

Cara yang biasa digunakan untuk menentukan ukuran dan bentuk suatu benda adalah menyelidiki radiasi yang dihamburkan dari benda itu. Agar benda itu dapat terlihat secara jelas, panjang gelombang radiasi itu harus lebih kecil daripada ukuran benda. Untuk inti yang berdiameter kira-kira 10 fm, kita memerlukan $\lambda \leq 10$ fm yang bersesuaian dengan

$$p \geq 100 \frac{\text{MeV}}{c}. \text{ Berkas elektron dengan energi 100 MeV sampai 1 GeV dapat}$$

dihasilkan dengan aselerator berenergi tinggi dan dapat dianalisis dengan spektrometer yang teliti untuk memilih elektron-elektron yang dihamburkan secara elastis dari inti sasaran (misalnya ${}^{12}_6\text{C}$, ${}^{16}_8\text{O}$, ${}^{208}_{82}\text{Pb}$). Eksperimen semacam itu menghasilkan pula difraksi dengan sejumlah titik minimum.

Hasil eksperimen untuk beberapa inti sasaran menunjukkan bahwa rapat muatan inti hampir sama untuk semua inti. Nukleon-nukleon tidak berkumpul dekat pusat inti, melainkan terdistribusi agar konstan di dekat permukaan. Secara kasar jumlah nukleon persatuan volume adalah konstan:

$$\frac{A}{\frac{4}{3}\pi R^3} \sim \text{konstan}$$

dengan R adalah rata-rata dari jari-jari inti. Jadi $R \propto A^{\frac{1}{3}}$, dan dengan mendefinisikan konstanta perbandingan R_0 diperoleh

$$R = R_0 A^{\frac{1}{3}}, \quad (1.2)$$

Berdasarkan pengukuran-pengukuran hamburan elektron disimpulkan bahwa $R_0 \approx 1,2 \times 10^{-15} \text{ m} = 1,2 \text{ fm}$ (= femtometer) = 1,2 F (= fermi).

Kerapatan inti dapat dihitung dengan pendekatan berikut. Kerapatan inti dapat dituliskan sebagai

$$\rho \cong \frac{\text{masa inti}}{\text{volume inti}}$$

Massa inti kira-kira $m \cong Am_N$, dengan A adalah nomor massa dan m_N adalah massa nukleon. Volume inti adalah

$V = \frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{4}{3} \pi \left(r_0 A^{\frac{1}{3}} \right)^3 = \left(\frac{4}{3} \pi r_0^3 \right) A$. Karena volume nukleon tunggal (jika $A = 1$) adalah $\left(\frac{4}{3} \pi R_0^3 \right) A$, maka volume nukleon sebanding dengan jumlah nukleon A . Oleh karena itu, rapat massa nukleon dapat dituliskan sebagai

$$\rho = \frac{m_N A}{\frac{4}{3} \pi R_0^3 A} = \frac{m_N}{\frac{4}{3} \pi R_0^3} \quad (1.3)$$

Kajian tentang massa semua isotop menunjukkan bahwa A hanya sedikit berbeda dengan massa isotop yang bersangkutan jika dinyatakan dalam u . Oleh karena itu, dapat mendekati massa nukleon $m_N = u$

2. Energi Ikat

Energi massa $m_N c^2$ dari nuklide tertentu adalah energi massa atomnya dikurangi energi massa total dari z elektron dan energi ikat elektron total:

$$m_N c^2 = m_A c^2 - m_e c^2 + \sum_{i=1}^z \beta_i \quad (1.4)$$

dengan B_1 adalah energi ikat elektron ke- i . Dalam atom berat energi-energi ikat elektron berorde 10 – 100 keV, sedangkan energi massa atomnya berorde

$A \times 1000$ MeV; oleh karena itu kita dapat mengabaikan suku terakhir dalam Persamaan (1.4).

Energi ikat B dari suatu inti adalah perbedaan energi massa antara inti ${}^A_Z X_N$ dan unsur penyusunnya Z proton dan N neutron.

$$B = Zm_p + Nm_n - \left[m {}^A_Z X - Zm_e \right] c^2 \quad (1.5)$$

Kita telah menghilangkan cetak-alas (*subscript*) pada m_A yang selalu kita hubungkan dengan massa atomik. Jadi energi ikat inti dapat didefinisikan sebagai energi minimum yang dilepaskan bilamana sejumlah proton dan sejumlah neutron yang bersesuaian bergabung membentuk inti.

Menggabungkan massa Z proton dan massa Z elektron menjadi massa Z atom hidrogen netral, kita dapat menuliskan kembali persamaan (1.5) sebagai

$$B = \left[Zm {}^1_1 H + Nm_N - m {}^A_Z X \right] c^2 \quad (1.6)$$

Karena massa-massa tersebut biasanya dinyatakan dalam satuan massa atomik, kiranya lebih mudah jika kita menggunakan faktor konversi satuan dalam c^2 , dengan $c^2 = 931,50 \frac{\text{MeV}}{u}$. Jadi energi ikat inti sama dengan jumlah

massa unsur-unsur penyusunnya dikurangi dengan massa inti yang terbentuk dan semuanya dikalikan dengan c^2 .

Jika $B > 0$, inti dalam keadaan stabil dan energi harus diberikan dari luar untuk memisahkan menjadi komponen-komponennya. Jika $B < 0$, inti dalam keadaan tidak stabil dan inti ini akan meluruh dengan sendirinya.

Jika Z proton dan N neutron bergabung membentuk inti stabil, sejumlah massa (Δm) akan hilang dalam bentuk energi yang terlepas (biasanya dalam bentuk energi sinar γ). Massa Δm ini disebut defek massa, yang besarnya sama dengan massa Z proton ditambah massa N neutron dikurangi dengan massa inti yang terbentuk.

Sifat penting lainnya adalah energi pisah neutron dan energi pisah proton. Energi pisah neutron S_n adalah jumlah energi yang diperlukan untuk mengeluarkan sebuah neutron dari inti ${}^A_Z X_N$, yang besarnya sama dengan perbedaan energi ikat antara ${}^A_Z X_N$ dan ${}^{A-1}_Z X_{N-1}$

$$\begin{aligned} S_p &= B {}^A_Z X_N - B {}^{A-1}_Z X_{N-1} \\ &= \left[m {}^{A-1}_Z X_{N-1} - m {}^A_Z X_N + m_n \right] c^2 \end{aligned} \quad (1.7)$$

Dengan jalan serupa kita dapat mendefinisikan energi pisah proton S_p sebagai energi yang diperlukan untuk mengeluarkan proton:

$$\begin{aligned}
 S_p &= B \; {}_Z^A X_N - B \; {}_{Z-1}^{A-1} X_N \\
 &= \left[m \; {}_{Z-1}^{A-1} X_N - m \; {}_Z^A X_N + m_n \; {}_1^1 H \right] c^2 \quad (1.8)
 \end{aligned}$$

Massa hidrogen muncul dalam persamaan ini sebagai ganti massa proton, karena kita selalu bekerja dengan massa atomik.

Energi pisah neutron dan energi pisah proton merupakan analogi energi ionisasi dalam fisika atom – keduanya menerangkan tentang energi ikat nukleon terluar (atau nukleon valensi). Seperti halnya energi-energi ionisasi atomik, energi-energi pisah menunjukkan struktur kulit inti yang mirip dengan struktur kulit atom.

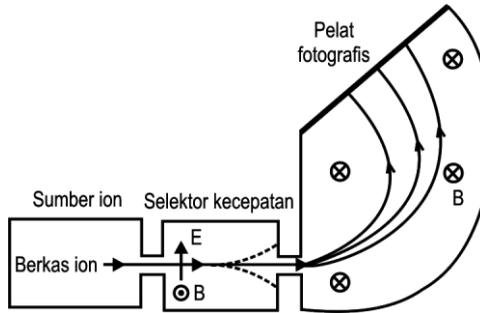
3. Massa dan Kelimpahan Nuklide

Pengukuran massa inti mempunyai peranan penting dalam perkembangan fisika inti. Spektroskopi massa merupakan teknik pertama dalam pengukuran massa inti yang mempunyai ketelitian tinggi. Karena massa inti bertambah secara teratur dengan penambahan satu proton atau neutron, pengukuran massa-massa inti memungkinkan semua isotop stabil dipetakan.

Untuk menentukan massa inti dan kelimpahan (*abundance*) relatif dalam suatu sampel bahan yang mungkin merupakan campuran isotop-isotop yang berlainan, kita harus mempunyai cara untuk memisahkan isotop satu dengan isotop lainnya berdasarkan massanya. Untuk mengukur massa inti dengan ketelitian tinggi diperlukan alat canggih yang dikenal sebagai spektroskop massa. Massa-massa yang dipisahkan bisa difokuskan untuk membuat bayangan pada pelat fotografis; dalam hal ini instrumen itu disebut spektrograf. Apabila massa-massa yang dipisahkan dilewatkan celah pendeteksi dan direkam secara elektronis (misalnya sebagai arus), maka instrumen itu disebut spektrometer. Gambar 1.1 menunjukkan bagan spektrograf massa.

Semua spektroskop massa diawali oleh sumber ion, yang menghasilkan berkas atom atau molekul terionisasi. Sering kali uap dari bahan yang sedang diselidiki ditembak dengan elektron-elektron untuk menghasilkan ion-ion; dalam kasus lain ion-ion dapat dibentuk sebagai hasil lucutan bunga api

antara elektrode-elektrode yang dilapisi dengan bahan tersebut. Ion-ion yang muncul dari sumber mempunyai rentangan kecepatan yang luas, seperti yang diduga untuk distribusi termal dan sudah barang tentu terdiri atas berbagai massa yang berbeda-beda.



Gambar 1.1.
Bagan Spektrograf Massa

Sumber ion menghasilkan berkas dengan distribusi termal kecepatan. Selektor kecepatan hanya melewatkan ion-ion yang dengan kecepatan tertentu, dan pemilihan momentum dilakukan oleh medan magnet seragam yang memungkinkan identifikasi massa secara individual.

Bagian berikutnya adalah selektor kecepatan, terdiri dari medan listrik dan medan magnet yang saling tegak lurus. Dalam Gambar 1.1 medan listrik E akan melakukan gaya qE yang cenderung membelokkan ion-ion ke atas; medan magnet B akan melakukan gaya ke bawah sebesar qvB . Jika kedua gaya itu sama, ion-ion itu akan melewati selektor tanpa pembelokan, sehingga

$$qE = qvB$$

atau

$$v = \frac{E}{B} \tag{1.9}$$

Bagian terakhir adalah selektor momentum, yang pada dasarnya merupakan medan magnet seragam yang akan membelokkan berkas ke dalam lintasan lingkaran dengan jari-jari r yang dapat ditentukan

$$mv = qBr$$

atau

$$r = \frac{mv}{qB} \quad (1.10)$$

Karena q , v , dan B dapat ditentukan secara unik, masing-masing massa m muncul dengan r yang khusus. Sering kali medan magnet selektor kecepatan dan selektor momentum dijadikan satu sehingga

$$m = \frac{qrB^2}{E} \quad (1.11)$$

Untuk menentukan satu bagian dari 10^6 perlu diketahui semua besaran dalam Persamaan (1.11) dengan ketelitian semacam itu, yang tampaknya tidak mungkin dilakukan. Dalam praktik kita dapat mengkalibrasi satu massa khusus, kemudian menentukan semua massa dengan pengukuran relatif. Massa acuan dalam ukuran massa atomik adalah $^{12}_6\text{C}$, yang diambil secara tepat $12.000.000 u$. Untuk menentukan massa atom yang lain, misalnya ^1_1H , kita perlu melakukan pengubahan dalam E dan B , yang memungkinkan kalibrasi tersebut berlaku lagi. Akan lebih baik jika kita mengukur perbedaan kecil antara dua massa yang hampir sama. Sebagai contoh, misalnya kita mengatur peralatan untuk massa 128 dan mengukur perbedaan antara massa molekul C_6H_{20} (tanpa nama) dan C_{10}H_8 (naftalen). Perbedaan ini diukur sebesar $D = 0,9390032 \pm 0,00000012 u$. Dengan mengabaikan koreksi energi ikat molekul terhadap perbedaan itu, kita dapat menuliskan

$$\Delta = m_{\text{C}_9\text{H}_{20}} - m_{\text{C}_{10}\text{H}_8} = 12m_{^1_1\text{H}} - m_{^{12}_6\text{C}}$$

Jadi

$$\begin{aligned} m_{^1_1\text{H}} &= \frac{1}{12} \left[m_{^{12}_6\text{C}} + \Delta \right] \\ &= 1.00000000 + \frac{1}{12} \Delta \\ &= 1,00782503 \pm 0,00000001 u \end{aligned}$$

Dengan ditentukannya nilai yang teliti ini, kita dapat mengatur peralatan untuk massa 28 dan menentukan perbedaan antara C_2H_4 dan N_2 :

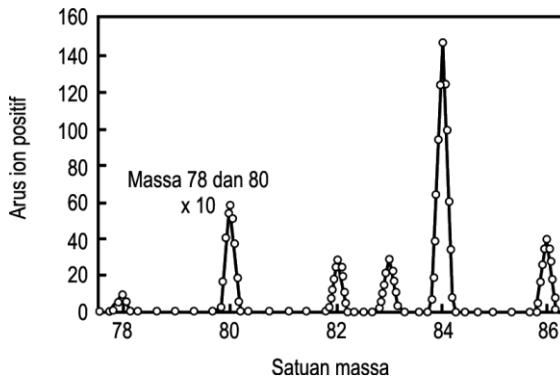
$$\begin{aligned} \Delta &= m \text{ C}_2\text{H}_4 - m \text{ N}_2 = 2m \text{ }^{12}_6\text{C} + 4m \text{ }^1_1\text{H} - 2m \text{ }^{14}_7\text{N} \\ &= 0,025152196 \pm 0,000000030 \text{ u} \end{aligned}$$

dan kita mendapatkan

$$m \text{ }^{14}_7\text{N} = m \text{ }^1_1\text{H} - \frac{1}{2}\Delta = 14,00307396 \pm 0,00000002 \text{ u}$$

Sistem pengukuran perbedaan kecil antara dua massa yang terletak berdekatan ini dikenal sebagai metode kembar (dublet) massa.

Spektrometer massa memungkinkan kita untuk mengukur kelimpahan (*abundance*) relatif berbagai isotop dari suatu unsur. Dengan mengukur arus yang melewati celah keluar (yang menggantikan pelat fotografis dalam Gambar 1.1), selama kita mengamati rentangan massa dengan mengubah E atau B, kita dapat memperoleh hasil seperti dalam Gambar 1.2. Berdasarkan luar relatif puncak-puncaknya kita dapat menentukan kelimpahan isotop-isotop stabil kripton:



Gambar 1.2.
Analisis Spektrum Massa dari Kripton

Ordinat untuk puncak-puncak pada kedudukan massa 78 dan kedudukan massa 80 seharusnya dibagi 10 untuk menunjukkan puncak-puncak sebenarnya dibandingkan dengan puncak-puncak massa lainnya.

${}_{36}^{78}\text{Kr}$	0,356%	${}_{36}^{83}\text{Kr}$	11,5%
${}_{36}^{80}\text{Kr}$	2,27%	${}_{36}^{84}\text{Kr}$	57,0%
${}_{36}^{82}\text{Kr}$	11,6%	${}_{36}^{86}\text{Kr}$	17,3%

Massa-massa yang tidak muncul dalam bagan tersebut ${}_{36}^{79}\text{Kr}$, ${}_{36}^{81}\text{Kr}$, ${}_{36}^{85}\text{Kr}$, ditambah isotop-isotop di bawah ${}_{36}^{78}\text{Kr}$, dan di atas ${}_{36}^{86}\text{Kr}$ adalah radioaktif dan tidak terdapat di dalam kripton alam. Suatu sampel kripton alam yang khas akan terdiri dari campuran enam isotop stabil dengan komposisi relatif seperti di atas. Jika kita menjumlahkan massa enam isotop stabil tersebut dengan kelimpahan sebagai faktor bobot, kita dapat menghitung rata-rata massa atom kripton.

$$m = 0,00356m \, {}_{36}^{79}\text{Kr} + 0,0227m \, {}_{36}^{80}\text{Kr} + \dots$$

$$= 83,8u$$

yang identik dengan massa atom Kr yang diterima umum, seperti yang biasanya diberikan dalam tabel periodik unsur-unsur.

4. Momentum Sudut Inti dan Paritas

Dalam pengertian mekanika kuantum, kita dapat memberi label setiap nukleon dengan bilangan-bilangan kuantum: l (momentum sudut orbit), s (momentum sudut spin intrinsik) dan j (momentum sudut total). Momentum sudut total dari suatu inti yang berisi A nukleon merupakan jumlah vektor dari momentum sudut semua nukleon. Momentum sudut total ini biasanya disebut spin inti (istilah yang mungkin dikacaukan dengan istilah momentum sudut spin intrinsik) dan diberi lambang I . Momentum sudut total inti I ini mempunyai semua sifat vektor momentum sudut dalam mekanika kuantum:

$$I^2 = I(I+1)\hbar^2 \quad (1.12)$$

dan

$$I_z = m\hbar \quad (1.13)$$

dengan m bervariasi dari $-I$ sampai $+I$ dengan langkah 1.

Dalam banyak penerapan yang melibatkan momentum sudut, inti berperilaku seolah-olah merupakan partikel tunggal dengan satu momentum sudut intrinsik I . Sebagai contoh, dalam medan-medan magnet biasa, kita

dapat mengamati efek Zeeman inti karena keadaan I terpisah menjadi $(2I + 1)$ sub-keadaan individual, yaitu $m = -I, -I + 1, \dots, I - 1, I$. Sub-keadaan ini berjarak sama seperti dalam efek Zeeman normal atomik. Jika kita menggunakan medan magnet sangat kuat sehingga gandengan antara nukleon-nukleon terpisah, kita akan melihat j terpisah menjadi $(2j + 1)$ sub-keadaan. Fisika atom juga mempunyai analogi di sini: bilamana kita menggunakan medan magnet yang besar, kita dapat memecahkan gandengan l dan s elektronik serta memisahkan l menjadi $(2l + 1)$ komponen dan s menjadi $(2s + 1)$ komponen. Tanpa adanya medan yang cukup kuat gandengan nukleon-nukleon dapat dihasilkan. Oleh karena itu, kita mengamati perilaku I seolah-olah inti merupakan partikel tunggal yang berputar. Karena penalaran ini, spin (momentum sudut total) I dan bilangan kuantum spin I yang bersesuaian digunakan untuk memberikan keadaan-keadaan inti.

Untuk menghindari kekacauan, kita akan selalu menggunakan I untuk menunjukkan spin inti; kita akan menggunakan j untuk menggambarkan momentum sudut total dari nukleon tunggal. Tentu saja, untuk partikel bervalensi tunggal $I = j$. Dalam kasus lain, kita mungkin perlu menjumpai partikel bervalensi dua dan dalam hal ini $I = j_1 + j_2$. Mungkin juga terjadi partikel ganjil dan teras nukleon sisanya masing-masing menyumbang pada momentum sudut, dengan $I = j_{partikel} + j_{teras}$.

Suatu pembatasan penting terhadap nilai-nilai I yang terizinkan berasal dari cara memperhatikan komponen-komponen z yang mungkin dari momentum sudut total untuk masing-masing nukleon. Masing-masing bilangan kuantum sudut total j adalah tengahan $\left(\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots\right)$ dan oleh karenanya komponen-komponen z yang mungkin merupakan tengahan pula $\left(\pm \frac{1}{2}\hbar, \pm \frac{3}{2}\hbar, \pm \frac{5}{2}\hbar, \dots\right)$. Jika kita mempunyai jumlah nukleon genap, maka akan terdapat sejumlah komponen-komponen tengahan yang genap, dengan hasil bahwa komponen z dari I total hanya dapat mempunyai nilai-nilai bulat. Hal ini menunjukkan bahwa I sendiri merupakan bilangan bulat. Jika jumlah nukleon adalah ganjil, komponen z total haruslah tengahan dan demikian juga I total. Oleh karena itu, kita dapat menuliskan aturan berikut:

inti dengan A ganjil : $I =$ tengahan

inti dengan A genap : $I =$ bulat

Nilai-nilai spin inti yang terukur dapat mengungkapkan tentang struktur inti. Sebagai contoh, dari ratusan inti (stabil dan radioaktif) yang diketahui dengan Z -genap dan N -genap, semuanya mempunyai keadaan dasar dengan spin-0. Hal ini merupakan bukti gaya pasangan inti; nukleon-nukleon tergandeng bersama dalam pasangan-pasangan dengan spin-0, menghasilkan I total nol.

Selain spin inti, paritas juga digunakan untuk menunjukkan keadaan-keadaan inti. Paritas dapat mengambil nilai + (genap) atau – (ganjil). Jika kita mengetahui fungsi gelombang setiap nukleon, kita dapat menentukan paritas inti dengan mengalikan paritas-paritas masing-masing nukleon yang berjumlah A , hasilnya adalah paritas π genap atau ganjil: $\pi = \pi_1 \pi_2 \dots \pi_A$. Namun demikian, dalam praktik prosedur semacam itu tidak mungkin, karena kita biasanya tidak dapat menunjukkan fungsi gelombang tertentu dari paritas yang dikenal terhadap setiap nukleon. Seperti halnya spin I , kita menganggap paritas π sebagai sifat “keseluruhan” dari inti. Paritas ini dapat diukur dengan secara langsung dengan menggunakan berbagai teknik peluruhan dan reaksi inti. Paritas ditunjukkan dengan cetak-atas (*superscript*) pada spin inti, sebagai I^π . Sebagai contoh 0^+ , 2^- , $\frac{1^-}{2}$, $\frac{5^+}{2}$. Tidak ada hubungan langsung secara teoritik antara I dan π .

5. Momen Elektromagnetik Inti

Suatu distribusi muatan dan arus listrik menghasilkan medan listrik dan medan magnet yang bervariasi terhadap jarak. Distribusi muatan dan arus biasanya ditunjukkan dengan momen multipol elektromagnetik yang dikaitkan dengan sifat ketergantungan ruang – medan listrik $\frac{1}{r^2}$ berasal dari muatan neto, yang dapat kita tunjukkan sebagai momen ke-nol atau monopoli; medan listrik $\frac{1}{r^3}$ berasal dari momen pertama atau dipol; medan listrik $\frac{1}{r^4}$ berasal dari momen kedua atau kuadropol, dan seterusnya. Momen multipol magnetik berperilaku serupa, kecuali momen monopoli; sejauh kita ketahui monopoli magnetik tidak ada atau sangat jarang, sehingga medan monopoli magnetik tidak memberikan sumbangan. Teori elektromagnetik memberikan resep untuk menghitung berbagai momen multipol listrik dan

magnet; resep yang sama dapat dilakukan dalam inti dengan menggunakan mekanika kuantum, dengan memperlakukan momen multipol dalam bentuk operator dan menghitung nilai-nilai harapnya untuk berbagai keadaan inti. Nilai-nilai harap ini dapat dibandingkan secara langsung dengan nilai-nilai eksperimen yang dilakukan di laboratorium.

Distribusi paling sederhana dari muatan dan arus hanya memberikan medan-medan multipol berorde paling rendah. Distribusi muatan berbentuk bola hanya memberikan medan monopol (Coulomb); semua medan yang berorde lebih tinggi hilang. Simpul (loop) arus bundar hanya memberikan medan dipol magnetik. Alam tidak sembarang dalam pembentukan inti; jika terstruktur yang simetri dan sederhana mungkin (sesuai dengan interaksi inti), maka struktur inti cenderung mempunyai struktur tersebut. Oleh karena itu, kita biasanya hanya mengukur atau menghitung momen multipol orde terendah untuk menyelidiki sifat-sifat elektromagnetik inti.

Pembatasan lain tentang momen multipol berasal dari simetri inti, dan secara langsung berkaitan dengan paritas keadaan inti. Masing-masing momen multipol elektromagnetik mempunyai paritas, yang ditentukan oleh perilaku operator multipol bilamana $r \longrightarrow -r$. Paritas momen listrik adalah $(-1)^L$, dengan L adalah orde momen itu ($L = 0$ untuk monopol, $L = 1$ untuk dipol, $L = 2$ untuk kuadrupol, dan seterusnya); untuk momen magnetik paritasnya adalah $(-1)^{L+1}$. Bilamana kita menghitung nilai harap suatu momen, kita harus menentukan integral yang berbentuk $\int \psi^* O \psi d\tau$, dengan O adalah operator elektromagnetik yang bersesuaian. Paritas dari ψ sendiri tidak penting; karena ψ muncul dua kali dalam integral, apakah $\psi \longrightarrow +\psi$ atau $\psi \longrightarrow -\psi$ tidak mengubah integral. Tetapi, jika O mempunyai paritas ganjil, maka integral merupakan fungsi ganjil dari koordinat dan harus hilang. Jadi semua momen multipol statis berparitas ganjil harus hilang – dipol listrik, kuadrupol magnetik dan oktopol listrik $L = 3$, dan sebagainya.

Momen listrik monopol adalah muatan inti total Ze . Momen berikutnya yang tidak hilang adalah momen dipol magnetik μ . Simpul bundar yang mengalirkan arus i dan melingkupi luasan A mempunyai momen magnet yang besarnya $|\mu| = 1A$; jika arus ini disebabkan oleh muatan e , yang

bergerak dengan laju v dalam lintasan lingkaran berjari-jari r (dengan periode $2\frac{\pi r}{v}$), maka

$$|\mu| = \frac{e}{(2\pi r/v)} \pi r^2 = \frac{evr}{2} = \frac{e}{2m} |L| \quad (1.14)$$

dengan $|L|$ adalah momentum sudut klasik mvr . Dalam mekanika kuantum, kita mendefinisikan secara operasional momen magnetik observabel bersesuaian dengan arah komponen L yang terbesar. Oleh karena itu, kita dapat menggunakan Persamaan (1.14) secara langsung dalam kuantum asalkan kita menggantikan L dengan nilai harapannya berhubungan dengan sumbu yang mempunyai proyeksi maksimum, yaitu $m_l h$ dengan $m_l = +l$.

Jadi

$$\mu = \frac{e\hbar}{2m} l, \quad (1.15)$$

dengan l sekarang adalah bilangan kuantum momentum sudut orbit.

Besaran $\frac{e\hbar}{2m}$ disebut magneton. Untuk gerak atomik kita menggunakan

massa elektron dan memperoleh magneton Bohr $\mu_B = 5,7884 \times 10^{-5} \frac{eV}{T}$.

Dengan membubuhkan massa proton kita mendapatkan magneton inti $\mu_N = 3,1525 \times 10^{-8} \frac{eV}{T}$. Perhatikan bahwa $\mu_N \ll \mu_B$ karena perbedaan massanya; jadi dalam sebagian besar lingkungan magnetisme atomik mempunyai pengaruh yang jauh lebih besar daripada pengaruh magnetisme inti. Interaksi magnetik biasa dari materi (misalnya feromagnetik) ditentukan oleh magnetisme atomik; hanya dalam lingkungan sangat khusus kita dapat mengamati pengaruh magnetisme inti.

Kita dapat menuliskan kembali Persamaan (1.15) dalam bentuk yang lebih bermanfaat

$$\mu = \frac{g_l}{\mu_N} \quad (1.16)$$

dengan g_l adalah faktor g yang dikaitkan dengan momentum sudut orbit L . Untuk proton $g_l = 1$; karena neutron tidak mempunyai muatan listrik, kita

dapat menggunakan Persamaan (1.16) untuk memberikan gerak orbit neutron jika kita membutuhkan $g_i = 0$.

Sejauh ini kita hanya memperhatikan gerak orbit nukleon. Seperti halnya elektron, proton dan neutron juga mempunyai momen magnetik spin (intrinsik), yang tidak ada analoginya dalam klasik, namun demikian kita dapat menuliskan dalam bentuk yang sama seperti Persamaan (1.16):

$$\mu = g_s s \mu_N \quad (1.17)$$

dengan $s = \frac{1}{2}$ untuk proton, neutron, dan elektron. Besaran g_s dikenal sebagai faktor g spin dan dihitung dengan menyelesaikan suatu persamaan mekanika kuantum relativistik. Untuk partikel titik dengan spin $\frac{1}{2}$ seperti elektron, persamaan Dirac memberikan $g_s = 2$, dan pengukuran sangat sesuai dengan nilai itu untuk elektron: $g_s = 2,0023$. Perbedaan antara g_s dan 2 sangat kecil dan dapat dihitung secara teliti dengan menggunakan koreksi orde yang lebih tinggi dari elektrodinamika kuantum. Sebaliknya, untuk nukleon-nukleon bebas, nilai-nilai eksperimen jauh dari nilai harap untuk partikel:

$$\text{proton} : g_s = 5,5856912 \pm 0,0000022$$

$$\text{neutron} : g_s = -3,8260837 \pm 0,0000018$$

(Dalam magneton inti, momen-momen magnetik yang terukur hanya setengah dari faktor g_s .) Tidak hanya nilai proton yang jauh dari nilai harap 2 untuk m partikel titik, tetapi neutron yang tidak bermuatan juga mempunyai momen magnetik tidak nol. Di sini mungkin merupakan bukti pertama bahwa nukleon-nukleon bukanlah partikel titik seperti elektron tetapi mempunyai struktur internal. Struktur internal nukleon-nukleon harus disebabkan oleh partikel-partikel bermuatan yang bergerak, yang menghasilkan arus dan memberikan momen-momen magnetik spin yang teramati. Perlu dicatat bahwa g_s untuk proton lebih besar daripada nilai harapnya sekitar 3,6 sedangkan g_s untuk neutron lebih kecil daripada nilai harapnya (nol). Dahulu perbedaan antara nilai-nilai g_s harap dan terukur ini disebabkan oleh awan meson π yang mengelilingi inti, dengan meson π positif dan meson π netral dalam awan proton. netral, dan meson π negatif dan meson π netral dalam awan neutron. Oleh karena itu, kontribusi awan meson yang sama dan

berlawanan tidak mengherankan. Dalam teori sekarang kita menganggap bahwa nukleon-nukleon tersusun dari tiga kuark; dengan menjumlahkan momen-momen magnet kuark itu akan diperoleh momen-momen magnetik nukleon.

Dalam inti gaya pasangan menyerupai gandengan nukleon-nukleon sehingga momentum sudut orbit dan momentum sudut spinnya masing-masing menjumlahkan menjadi nol. Jadi nukleon-nukleon yang berpasangan tidak menyumbang momen magnetik dan kita hanya memperhatikan beberapa nukleon valensi. Jika tidak demikian, kita mungkin menduga berdasarkan statistik untuk melihat beberapa inti berat dengan momen magnetik sangat besar, mungkin sampai puluhan kali magneton inti. Tetapi, tidak ada inti yang teramati dengan momen dipol magnetik lebih besar dari $6\mu_N$.

Momen berikutnya yang tidak hilang adalah momen kuadrupol listrik. Momen kuadrupol eQ dari muatan titik klasik e berbentuk $e(3z^2 - r^2)$. Jika partikel bergerak dengan simetri bola, maka (secara rata-rata) $z^2 = x^2 = y^2 = \frac{r^2}{3}$ dan momen kuadrupol hilang. Jika partikel bergerak dalam lintasan datar klasik, misalkan dalam bidang xy , maka $z = 0$ dan $Q = -r^2$. Momen kuadrupol dalam mekanika kuantum adalah

$$eQ = e \int \psi^* (3z^2 - r^2) \psi \, dv \quad (1.18)$$

untuk proton tunggal; untuk neutron yang mengorbit, $Q = 0$. Jika $|\psi|^2$ simetri bola maka $Q = 0$. Jika $|\psi|^2$ terkonsentrasi dalam bidang xy $z \cong 0$, maka $Q = -\langle r^2 \rangle$, jika $|\psi|^2$ terkonsentrasi sepanjang sumbu z $z \cong r$, kita mempunyai $Q = 2\langle r^2 \rangle$. Di sini $\langle r^2 \rangle$ adalah jari-jari rerata kuadrat dari lintasan. Jadi gaya pasangan cukup bermanfaat, karena nukleon-nukleon yang berpasangan dan bergerak dalam lintasan simetri bola tidak akan menyumbang pada Q . Oleh karena itu, kita menduga untuk kebanyakan inti, momen kuadrupolnya dapat ditaksir dari nukleon valensi yang dapat dianggap mengorbit dekat permukaan sehingga $r = R_0 A^{\frac{1}{3}}$. Kemudian kita menaksir bahwa $|eQ| \leq eR_0^2 A^{\frac{2}{3}}$, yang membentang dari kira-kira $6 \times 10^{-30} \text{ e.m}^2$ untuk inti ringan sampai $50 \times 10^{-30} \text{ e.m}^2$. Untuk inti berat, satuan 10^{-28} m^2 sering digunakan sebagai satuan luas penampang dalam reaksi inti, dan

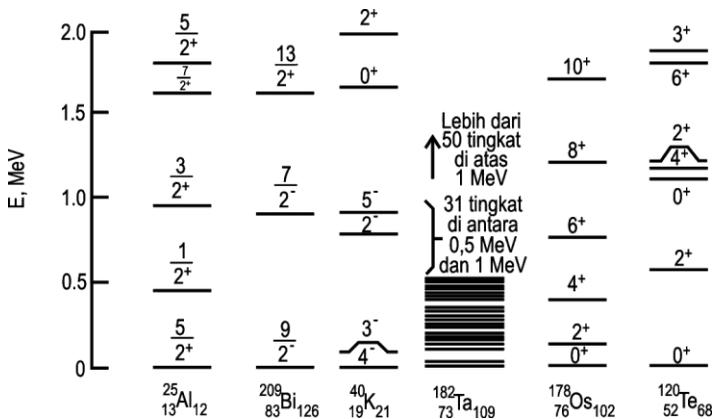
satuan ini dikenal sebagai barn (b). Satuan ini juga digunakan untuk mengukur momen kuadrupol, sehingga rentangan kuadrupol tersebut adalah 0,06 sampai 0,5 e.b.

6. Keadaan Tereksitasi Inti

Seperti kita mempelajari atom dengan mengkaji keadaan-keadaan tereksitasinya, kita mengkaji struktur inti sebagian melalui sifat keadaan-keadaan tereksitasi inti. Seperti halnya keadaan-keadaan tereksitasi atom, keadaan tereksitasi inti tidak stabil dan meluruh dengan cepat ke keadaan dasarnya. Keadaan tereksitasi inti dapat terjadi karena memindahkan nukleon ke keadaan yang lebih tinggi energinya; jadi keadaan tereksitasi inti dapat menyingkapkan sesuatu tentang lintasan-lintasan nukleon secara individual. Kita juga dapat menghasilkan keadaan-keadaan tereksitasi dengan menambahkan energi pada teras nukleon-nukleon yang berpasangan. Energi ini dapat mengambil bentuk rotasi atau getaran kolektif keseluruhan teras, atau memisahkan satu pasangan.

Sebagian sasaran spektroskopi inti adalah mengamati keadaan-keadaan tereksitasi yang mungkin dan mengukur sifat-sifatnya. Teknik-teknik eksperimen yang ada termasuk kajian peluruhan radioaktif dan reaksi inti. Di antara sifat yang dapat diukur adalah energi eksitasi, umur dan ragam peluruhan, spin dan paritas, momen dipol magnetik, dan momen kuadrupol listrik.

Gambar 1.3 menunjukkan beberapa bagan tingkat inti sampel. Bagan ini ada yang sederhana, ada yang rumit, ada yang teratur.



Gambar 1.3.
Beberapa Bagan Tingkat Sampel

Beberapa bagan tingkat sampel yang menunjukkan keadaan-keadaan tereksitasi di bawah 2 MeV. Beberapa inti, seperti ${}_{83}^{209}\text{Bi}$, menunjukkan kesederhanaan, sedangkan inti-inti lainnya, seperti ${}_{73}^{182}\text{Ta}$, menunjukkan kerumitannya. Ada keteraturan yang dihubungkan dengan tingkat-tingkat ${}_{76}^{178}\text{Os}$ yang ditiru dalam semua inti Z-genap, N-genap dalam rentangan $150 \leq A \leq 180$. Struktur yang mirip dengan ${}_{52}^{120}\text{Te}$ pada banyak inti dengan rentangan $50 \leq A \leq 150$.

C. GAYA INTI

Menurut teori proton-proton, inti terdiri atas proton-proton dan neutron-neutron. Karena proton bermuatan listrik positif, maka gaya tolak elektrostatik antara proton-proton cenderung memisahkan nukleon-nukleon itu. Oleh karena itu, agar stabilitas inti terjadi harus ada gaya tarik yang kuat antarnukleon yang disebut gaya inti atau gaya antarnukleon. Gaya-gaya ini diklasifikasikan sebagai interaksi kuat, yang telah dipelajari oleh fisikawan Jepang Hideki Yukawa dalam periode waktu yang cukup lama. Dalam tahun 1935 beliau mengemukakan karakteristik gaya-gaya inti dan mempostulatkan adanya partikel yang sekarang disebut pion. Pion bisa bermuatan (π^+ dan π^-) atau netral (π^0). Massa diam pion bermuatan kira-kira $273m_e$ (273 kali massa diam elektron) dan massa diam pion netral adalah $264m_e$. Pion termasuk dalam kelompok partikel elementer yang disebut meson; istilah pion berasal dari π meson. Pion mempunyai peranan penting dalam menjelaskan gaya inti (atau gaya nuklir).

Menurut teori Yukawa, tiap nukleon terus-menerus memancarkan dan menyerap pion. Jika jarak antara nukleon-nukleon sangat dekat gaya inti saling tolak-menolak dan pada jarak yang agak jauh gaya inti saling tarik-menarik. Misalkan suatu inti hanya terdiri atas sebuah proton dan sebuah neutron. Neutron itu memancarkan pion dan juga mempunyai gaya tarik yang kuat terhadap pion. Proton yang berdekatan juga melakukan gaya yang cukup kuat, mungkin cukup kuat untuk menyerap pion itu. Sementara itu proton ini juga memancarkan pion yang dapat diserap oleh neutron. Jadi, proton dan neutron tersebut masing-masing melakukan gaya kuat ketika terjadi pertukaran partikel (pion), sehingga keduanya tampak melakukan gaya satu sama lain.

Beberapa sifat gaya inti atau gaya antara nukleon-nukleon antara lain:

1. Pada jarak pendek gaya inti lebih kuat daripada gaya Coulomb; gaya inti dapat mengatasi gaya tolak Coulomb antara proton-proton dalam inti.
2. Pada jarak jauh, yang berorde ukuran atom, gaya inti sangat lemah; interaksi antara inti dalam molekul dapat diketahui hanya berdasarkan gaya Coulomb.
3. Beberapa partikel bebas dari gaya inti; sebagai contoh, dari struktur atom tidak ada bukti bahwa elektron-elektron mengalami gaya inti.

Eksperimen yang secara khusus digunakan untuk menyelidiki sifat-sifat gaya inti, diperoleh sifat-sifat lain yang menakjubkan:

1. Gaya antara nukleon-nukleon tidak tergantung pada muatan apakah nukleon-nukleon itu proton atau neutron.
2. Gaya antara nukleon-nukleon tergantung pada spin nukleon, apakah spin itu sejajar atau berlawanan.
3. Gaya antara nukleon-nukleon mempunyai komponen tak-sentral atau tensor. Bagian gaya ini tidak kekal momentum sudut orbitnya; dalam pengaruh gaya sentral momentum sudut orbitnya kekal.

D. DEUTERON

Marilah kita sekarang membicarakan struktur inti yang cukup sederhana, yaitu deutron ${}_1^2H$ yang terdiri atas sebuah proton dan sebuah neutron.

Atom netral ${}_1^2H$ disebut deuterium. Neutron merupakan keadaan nukleon-nukleon terikat yang paling sederhana, sehingga memungkinkan kita untuk menyelidiki interaksi nukleon-nukleon. Bagi ahli fisika nuklir, deutron memegang peranan penting dalam mempelajari struktur inti seperti halnya ahli fisika atom mempelajari struktur atom dengan menyelidiki atom hidrogen.

Energi ikat deutron merupakan besaran yang diukur secara tepat, yang dapat ditentukan dengan tiga macam cara. Dengan spektroskopi, kita dapat menentukan secara langsung massa deutron, kemudian kita menghitung energi ikatnya. Dengan menggunakan metode Hublet massa diperoleh (kita menggunakan lambang D untuk ${}_1^2H$:

$$m C_6H_{12} - m C_6D_6 = (9,289710 \pm 0,000024) \times 10^{-3} u$$

dan

$$m \text{ } ^2_5\text{H}_{12} - m \text{ } ^2_6\text{D}_6 = (84,610626 \pm 0,000090) \times 10^{-3} u$$

Dari perbedaan pertama kita mendapatkan, menggunakan massa $^1_1\text{H} = 0,007825037 u$.

$$m \text{ } ^2_1\text{H} = 2,014101789 \pm 0,000000021 u$$

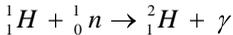
dan dari perbedaan kedua,

$$m \text{ } ^2_1\text{H} = 2,014101789 \pm 0,000000021 u$$

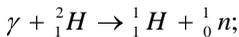
Nilai-nilai ini sangat bersesuaian, dan menggunakan massa ^1_1H terukur serta massa neutron kita dapat memperoleh energi ikat.

$$B = \left[m \text{ } ^1_1\text{H} + m(n) - m \text{ } ^2_1\text{H} \right] c^2 = 2,22463 \pm 0,00004 \text{ MeV}$$

Kita dapat juga menentukan energi ikat ini secara langsung dengan menyatukan sebuah proton dan sebuah neutron sehingga terbentuk ^2_1H dan mengukur energi foton sinar $-\gamma$ yang dipancarkan



Energi ikat yang diperoleh, sama dengan energi foton yang teramati dikurangi koreksi energi pental yang kecil, adalah $2,224589 \pm 0,000002 \text{ MeV}$, yang sangat cocok dengan nilai spektroskopi massa. Metode yang ketiga menggunakan reaksi sebaliknya, yang disebut fotodisosiasi,

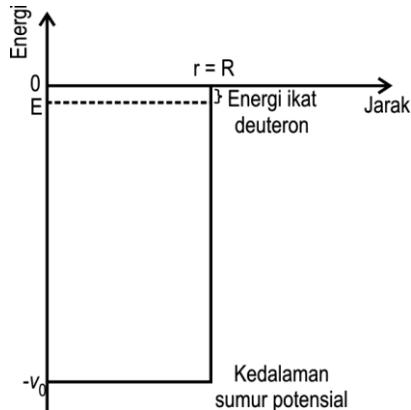


dalam reaksi ini, sinar $-\gamma$ membelah deuteron menjadi hidrogen dan neutron. Energi minimum sinar $-\gamma$ yang dicapai dalam proses ini sama dengan energi ikat (tentu saja dikoreksi dengan energi pental hasil-hasil reaksi). Nilai yang teramati adalah $2,224 \pm 0,002 \text{ MeV}$, yang sangat cocok dengan nilai yang sangat cocok dengan nilai spektroskopi massa.

Nilai rata-rata energi ikat per nukleon kira-kira 8 MeV . Oleh karena itu, deuteron terikat sangat lemah jika dibandingkan inti yang lain. Marilah kita melihat bagaimana kita dapat menganalisis hasil ini untuk mempelajari sifat-sifat deuteron.

Untuk menyederhanakan analisis deuteron, kita akan mengandaikan bahwa potensial nukleon-nukleon dapat digambarkan sebagai sumur persegi tiga dimensi, seperti ditunjukkan dalam Gambar 1.4.

$$\begin{aligned} V(r) &= -V_0 && \text{untuk } r < R \\ &= 0 && \text{untuk } r > R \end{aligned} \tag{1.19}$$



Gambar 1.4.

Gambar 1.4 Potensial sumur persegi sferis merupakan suatu pendekatan terhadap potensial inti. Kedalaman sumur adalah $-V_0$, dengan V_0 kira-kira 35 MeV. Keadaan terikat deuteron, pada energi kira-kira -2 MeV, sangat dekat dengan permukaan atas sumur.

Dalam hal ini r menggambarkan jarak antara proton dan neutron, sehingga R adalah diameter deuteron. Marilah kita perhatikan keadaan deuteron dengan energi paling rendah dengan $l = 0$, seperti halnya keadaan atom hidrogen dengan energi paling rendah. Jika kita mendefinisikan bagian radial dari fungsi gelombang $\psi(r)$ adalah $\frac{u(r)}{r}$. Maka kita dapat menuliskan persamaan Schrödinger dalam bentuk

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 u}{dr^2} + V(r) u(r) = E u(r) \tag{1.20}$$

Solusi dari persamaan ini untuk $r < R$ dapat dituliskan sebagai

$$u(r) = A \sin k_1 r + B \cos k_1 r \tag{1.21}$$

dengan $k_1 = \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2} E + V_0}$, dan untuk $r > R$ adalah

$$u(r) = Ce^{-\frac{k_2}{r}} + De^{\frac{k_2}{r}} \quad (1.22)$$

dengan $k_1 = \sqrt{\frac{-2m}{\hbar^2} E + V_0}$ (Ingat bahwa untuk keadaan terikat $E < 0$). Agar

fungsi gelombang tersebut tetap berhingga untuk $r \longrightarrow \infty$ kita harus mengambil $D = 0$, dan agar fungsi gelombang itu berhingga untuk $r \longrightarrow 0$

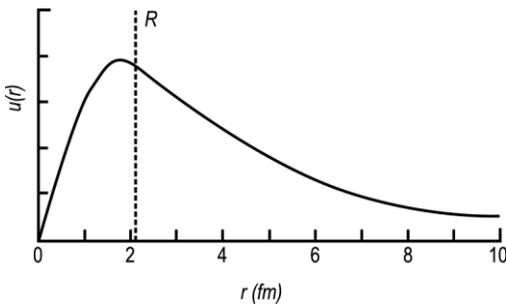
kita harus mengambil $B = 0$. Karena $\psi(r)$ tergantung pada $\frac{u(r)}{r}$, maka $u(r)$

harus mendekati nol untuk $r \longrightarrow 0$. Menerapkan syarat kontinuitas untuk u

dan $\frac{du}{dr}$ pada $r = R$, kita memperoleh

$$k_1 \cot k_1 R = -k_2 \quad (1.23)$$

Persamaan transeden ini menentukan hubungan antara V_0 dan R . Dari eksperimen hamburan elektron diketahui bahwa jari-jari deuteron kira-kira 2,1 fm, yang dapat dipakai sebagai taksiran R . Solusi numerik Persamaan (1.23) menghasilkan $V_0 = 35$ MeV. Nilai ini sebenarnya merupakan taksiran yang agak masuk akal terhadap kekuatan potensial nukleon-nukleon, bahkan dalam inti yang lebih kompleks. Namun demikian, perlu diperhatikan bahwa proton dan neutron mungkin berada pada jarak lebih besar daripada R .



Gambar 1.5.

Fungsi gelombang deuteron untuk $R = 2,1$ fm.

Perhatikan tersambungnyanya fungsi eksponensial dengan fungsi sinus pada $r = R$, sehingga $u(r)$ dan $\frac{du}{dr}$ adalah kontinu. Jika fungsi gelombang itu tidak membelok di dalam $r = R$, tidak akan mungkin tersambung secara halus dengan peluruhan eksponensial dan tidak akan terdapat keadaan terikat.

Kita dapat melihat dalam Gambar 1.4 bahwa deuteron begitu dekat dengan permukaan atas sumur. Jika gaya nukleon-nukleon sedikit lebih lemah, keadaan terikat deuteron tidak akan ada. Karena pembentukan deuterium dari atom hidrogen merupakan langkah pertama dalam siklus fusi proton-proton dalam pembentukan energi matahari dan pembentukan materi stabil dari atom hidrogen purba yang mengisi alam semesta purba, maka terdapat deuteron dalam keadaan terikat.

Fungsi gelombang deuteron ditunjukkan dalam Gambar 1.5. Energi lemah berarti bahwa $\psi(r)$ baru saja mampu membelok dalam sumur agar tersambung kemiringan negatif dari peluruhan eksponensial pada $r = R$.

Sekarang kita perhatikan spin dan paritas deuteron. Momentum sudut total \mathbf{I} deuteron mempunyai tiga komponen: spin neutron \mathbf{S}_n dan spin proton \mathbf{S}_p (masing-masing sama dengan $\frac{1}{2}$), dan momentum sudut orbit \mathbf{L} nukleon-nukleon selama mereka bergerak di sekitar pusat massanya.

$$\mathbf{I} = \mathbf{S}_n + \mathbf{S}_p + \mathbf{L} \tag{1.24}$$

Bilamana kita menyelesaikan persamaan Schrodinger untuk deuteron, kita menganggap $\ell = 0$ dalam analogi dengan keadaan terikat paling rendah (keadaan 1s) dalam atom hidrogen. Spin deuteron yang terukur adalah $I = 1$. Karena spin neutron dan spin proton mungkin sejajar (untuk spin total 1) atau berlawanan (untuk spin total 0), maka ada empat cara bergandeng $\mathbf{S}_n, \mathbf{S}_p$ dan \mathbf{L} agar diperoleh $I = 1$:

1. \mathbf{S}_n dan \mathbf{S}_p sejajar dengan $\ell = 0$,
2. \mathbf{S}_n dan \mathbf{S}_p berlawanan dengan $\ell = 1$,
3. \mathbf{S}_n dan \mathbf{S}_p sejajar dengan $\ell = 1$,
4. \mathbf{S}_n dan \mathbf{S}_p sejajar dengan $\ell = 2$.

Paritas deuteron (genap atau ganjil) menggambarkan perilaku fungsi gelombangnya bilamana $r \longrightarrow -r$. Dengan menyelidiki reaksi-reaksi yang

melibatkan deuteron dan sifat-sifat foton yang dipancarkan selama pembentukan deuteron, kita mengetahui bahwa paritasnya genap. Kita juga mengetahui bahwa paritas yang dihubungkan dengan gerak orbit adalah genap untuk $\ell = 0$ (keadaan s) dan $\ell = 2$ (keadaan d) dan paritas ganjil untuk $\ell = 1$ (keadaan p). Oleh karena itu, kemungkinan kombinasi yang terjadi adalah untuk $\ell = 1$ dan $\ell = 2$. Jadi spin dan paritas deuteron bersesuaian dengan $\ell = 0$, seperti yang diperkirakan; tentu saja kita tidak akan mengabaikan kemungkinan $\ell = 2$.

Kita mengetahui bahwa gerak orbit dan spin memberikan sumbangan terhadap momen dipol magnetik. Jika anggapan kita bahwa $\ell = 0$ adalah benar, maka gerak orbit seharusnya tidak memberikan sumbangan terhadap momen magnetik, dan kita menganggap bahwa momen magnetik total hanya merupakan kombinasi dari momen magnetik neutron dan momen magnetik proton:

$$\begin{aligned}\mu &= \mu_n + \mu_p \\ &= \frac{g_{sn}\mu_N}{\hbar} S_n + \frac{g_{sp}\mu_N}{\hbar} S_p\end{aligned}\quad (1.25)$$

dengan $g_{sn} = -3,826084$ dan $g_{sp} = 5,585691$. Kita dapat mengambil komponen z dari μ sebagai momen magnet yang teramati ketika spinnya mempunyai nilai maksimum $+\frac{1}{2}\hbar$:

$$\begin{aligned}\mu &= \frac{1}{2}\mu_N g_{sn} + g_{sp} \\ &= 0,8789804 \mu_N\end{aligned}$$

Nilai yang teramati adalah $0,8574376 + 0,0000004 \mu_N$, yang cukup baik tetapi kurang tepat dengan nilai terhitung. Perbedaan kecil ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor, misalnya kontribusi meson-meson yang bertukar antara neutron dan proton; dalam pembicaraan di sini kita menganggap bahwa perbedaan itu disebabkan oleh sedikit campuran keadaan $d \ell = 2$ dalam fungsi gelombang deuteron:

$$\psi = a_s \psi_{\ell=0} + a_d \psi_{\ell=2} \quad (1.26)$$

Momen magnetik yang dihitung berdasarkan fungsi gelombang ini adalah

$$\mu = a_s^2 \mu(1=0) + a_d^2 \mu(1=2) \quad (1.27)$$

dengan $\mu_{\ell=0}$ adalah nilai yang terhitung dalam Persamaan (1.25) dan

$\mu_{\ell=2} = \frac{1}{4} (3 - g_{sp} - g_{sn}) \mu_n$ adalah nilai terhitung untuk keadaan d . Nilai yang teramati cocok dengan $a_s^2 = 0,96$ dan a_d^2 jadi, deutron itu adalah 96% $\ell = 0$ dan hanya 4% $\ell = 2$.

Neutron dan proton telanjang tidak mempunyai momen kuadropol listrik, sehingga pengukuran yang menunjukkan momen kuadropol listrik tidak nol harus disebabkan oleh gerak orbit. Jadi fungsi gelombang $\ell = 0$ murni akan mempunyai momen kuadropol yang menghilang. Momen kuadropol yang teramati tidaklah nol, yaitu $Q = 0,00288 \pm 0,00002 b$, cukup kecil dibandingkan dengan inti lainnya.

Bilamana fungsi gelombang campuran dalam Persamaan (1.26) digunakan untuk menentukan Q seperti dalam Persamaan (1.18), maka fungsi gelombang itu akan memberikan dua sumbangan, sumbangan pertama sebanding dengan a_d^2 dan yang lain sebanding dengan $a_s a_d$. Dengan melakukan perhitungan tersebut kita memperoleh

$$Q = \frac{\sqrt{2}}{10} a_s a_d \langle r^2 \rangle_{sd} - \frac{1}{20} a_d^2 \langle r^2 \rangle_{dd} \tag{1.28}$$

dengan $\langle r^2 \rangle_{sd} = \int r^2 R_s(r) R_d(r) r^2 dr$ adalah integral r^2 pada semua fungsi gelombang radial; $\langle r^2 \rangle_{dd}$ didefinisikan serupa. Untuk menghitung Q kita harus mengetahui fungsi gelombang keadaan d , yang tidak dapat diukur secara langsung. Ternyata hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai Q untuk keadaan d dalam campuran hanya beberapa persen, bersesuaian dengan nilai 4% yang disimpulkan dari momen magnetik.

Kecocokan antara campuran keadaan d yang disimpulkan dari μ dan Q seharusnya dianggap sebagai kejadian yang menyenangkan dan tidak dipikirkan terlalu serius. Dalam kasus dipol magnetik, tidak ada alasan untuk berharap bahwa dibenarkan menggunakan momen magnetik nukleon-bebas dalam inti. Sayangnya, nukleon dalam deutron terletak antara nukleon bebas dan nukleon yang terikat kuat dalam inti, dan kita tidak mempunyai petunjuk kuat tentang nilai-nilai perkiraan momen-momen magnetik itu. Interaksi spin-orbit, efek relativistik, dan pertukaran meson mungkin mempunyai pengaruh lebih besar pada μ daripada campuran keadaan d (tetapi mungkin saling meniadakan satu sama lain). Untuk momen kuadropol, pengetahuan yang buruk tentang fungsi gelombang untuk keadaan d membuat campuran

keadaan d yang disimpulkan menjadi tak-pasti. (Kemungkinan lebih sahah memperhatikan perhitungan Q , dengan menggunakan campuran keadaan d yang diketahui, sebagai uji fungsi gelombang keadaan d). Eksperimen-eksperimen yang lain, khususnya eksperimen hamburan yang menggunakan deutron sebagai sasaran, juga memberikan campuran keadaan d dalam rentangan 4%. Jadi kesimpulan-kesimpulan kita dari momen dipol magnetik dan momen kuadropol listrik mungkin benar-benar sahah.

Penting bagi kita untuk memperoleh pengetahuan yang seksama tentang fungsi gelombang keadaan d karena campuran nilai-nilai l dalam deutron merupakan bukti terbaik tentang sifat non-sentral (tensor) dari gaya inti.



LATIHAN

Untuk memperdalam pemahaman Anda mengenai materi di atas, kerjakanlah latihan berikut!

- 1) Hitunglah jari-jari inti ${}^{70}_{32}\text{Ge}$ dan kerapatannya!
- 2) Hitunglah momentum sudut total inti dan komponen-komponen dalam arah sumbu z yang mungkin untuk nuklide ${}^{73}_{32}\text{Ge}$ dalam keadaan dasar yang mempunyai spin inti $\frac{9}{2}$!
- 3) Hitunglah energi ikat ${}^{16}_8\text{O}$, jika diketahui bahwa massa atomnya = 15,994915 u , massa atom $H = 1,007825 u$ dan massa neutron = 1,008665 u !
- 4) Hitunglah energi pisah (E_p) yang diperlukan untuk melepaskan sebuah proton dari ${}^{16}_8\text{O}$ Massa atom: ${}^4_2\text{He} = 4,002604 u$, ${}^9_4\text{Be} = 9,012186 u$; dan ${}^{12}_6\text{C} = 12,000000 u$!
- 5) Hitunglah energi ikat per nukleon untuk nuklide ${}^{238}_{92}\text{U}$. Jika massa atomnya = 238.0050786 u !

Petunjuk Jawaban Latihan

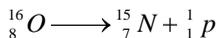
Jika Anda mengalami kesulitan dalam menyelesaikan soal-soal latihan tersebut, perhatikan petunjuk penyelesaian untuk masing-masing soal sebagai berikut.

- Gunakan persamaan (1.2) untuk menghitung jari-jari dan persamaan (1.3) untuk menghitung kerapatannya.
- Dengan menggunakan Persamaan (1.12) besarnya vektor I adalah

$$I = \sqrt{\frac{9}{2}\left(\frac{9}{2} + 1\right)} \hbar = \left(3\sqrt{\frac{11}{2}}\right) \hbar$$

Vektor I dapat mempunyai $2\left(\frac{9}{2}\right) + 1 = 10$ arah yang berbeda-beda dalam ruang, dengan komponen z membentang dari $-\frac{9}{2}\hbar$ sampai $+\frac{9}{2}\hbar$ dengan langkah \hbar . Perhatikan Persamaan (1.13).

- Gunakan Persamaan (1.6) dengan mengambil $Z = 8$ dan $N = 8$ serta memasukkan nilai massa-massa partikel yang diketahui. Sebaiknya Anda menyatakan satuan energi ikat dalam MeV, dengan menggunakan hubungan kesetaraan massa-energi, $1 u = 931,502 \text{ MeV}$.
- Energi pisah adalah energi minimum yang harus diberikan untuk melepaskan nukleon yang terikat paling lemah dari inti. Energi ini merupakan energi ikat dari nukleon yang terikat paling lemah. Jika sebuah proton dilepaskan dari inti ${}^{16}_8\text{O}$, maka tertinggal inti ${}^{15}_7\text{N}$:



Energi pisahnya dapat dihitung dengan Persamaan (1.8).

- Carilah energi ikat ${}^{238}_{92}\text{U}$ seperti pada soal latihan nomor 3, kemudian bagilah hasilnya dengan nomor massanya, $A = 238$.



RANGKUMAN

Menurut model proton-neutron, inti terdiri dari proton-proton dan neutron-neutron, yang disebut nukleon. Jenis inti tertentu dituliskan dalam bentuk



dengan

X, nuklide, menunjukkan jenis inti tertentu.

Z, nomor atom, menunjukkan jumlah proton.

N , nomor neutron, menunjukkan jumlah neutron: sering kali nomor neutron ini tidak dituliskan.

$A = Z + N$, nomor massa, menunjukkan jumlah total proton dan neutron.

Satuan-satuan yang sering digunakan dalam fisika inti antara lain: panjang atau jarak dinyatakan dalam femtometer atau fermi (1 femtometer = 10^{-15} m), energi dinyatakan dalam elektron volt

$1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19}$ joule, massa dinyatakan dalam satuan massa atom

$1 \text{ u} = 1,660566 \times 10^{-27}$ kg. Sesuai dengan kesetaraan massa dan energi

$E_0 = mc^2$, hubungan antara satuan massa dan satuan energi:

$1 \text{ u} = 931,502 \text{ MeV}$. Besaran E_0 ini disebut energi diam atau energi massa.

Beberapa sifat statik inti dapat dirangkum sebagai berikut:

1. Rerata jari-jari inti: $R = R_0 A^{\frac{1}{3}}$

2. Rapat massa nukleon:

$$\rho = \frac{m_N A}{\frac{4}{3} \pi R_0^3 A} = \frac{m_N}{\frac{4}{3} \pi R_0^3}$$

3. Energi ikat B suatu inti adalah perbedaan energi massa antara inti X dan unsur penyusunnya Z proton dan N neutron:

$$B = Zm_p + Nm_p - R_m \quad {}^A_Z X - Zm_e \quad c^2$$

Energi ikat inti dapat juga dihitung dengan persamaan:

$$B = \left[Zm \quad {}^1_1 H + Nm_N - m \quad {}^A_Z X \right] c^2$$

4. Energi pisah neutron adalah jumlah energi yang diperlukan untuk mengeluarkan sebuah neutron dari inti ${}^A_Z X$, yang dapat dihitung dengan persamaan:

$$\begin{aligned} S_n &= B \quad {}^A_Z X_N - B \quad {}^{A-1}_{Z-1} X_{N-1} \\ &= \left[m \quad {}^{A-1}_Z X_{N-1} - m \quad {}^A_Z X_N + m_n \right] c^2 \end{aligned}$$

Energi pisah proton adalah jumlah energi yang diperlukan untuk mengeluarkan sebuah neutron dari inti ${}^A_Z X$ yang dapat dihitung dengan persamaan

$$S_p = B \frac{A}{Z} X_N - B \frac{A-1}{z-1} X_N$$

$$= \left[m \frac{A-1}{z-1} X_N - m \frac{A}{Z} X_N + m_n \frac{1}{1} H \right] c^2$$

5. Massa inti dan kelimpahan relatif nuklide diselidiki dengan spektroskop massa. Spektroskop massa pada dasarnya terdiri dari sumber ion, selektor kecepatan dan selektor momentum. Dalam selektor kecepatan terdapat medan listrik E dan medan magnet B yang diatur agar gaya listrik terhadap ion sama dengan gaya magnetiknya, sehingga kecepatan ionnya menjadi $v = \frac{E}{B}$. Dalam selektor momentum ion dilewatkan medan magnetik seragam sehingga bergerak dalam lintasan dengan jari-jari $r = \frac{mv}{qB}$. Jika medan magnetik selektor kecepatan dan selektor momentum dijadikan satu, maka massa ion $m = \frac{qrB^2}{E}$. Untuk mengukur kelimpahan relatif berbagai isotop dari suatu unsur bisa digunakan spektrometer massa.
6. Untuk menentukan keadaan inti digunakan pengertian spin inti dan paritas inti. Momentum sudut total suatu inti yang berisi A nukleon disebut spin inti. Momentum sudut total ini mempunyai sifat-sifat vektor momentum sudut dalam mekanika kuantum sehingga $I^2 = I(I+1)\hbar^2$ dan komponen-komponen kurangnya $I_z = m\hbar$ $m = -I, -I+1, \dots, I-1, I$. Inti dengan A genap mempunyai I = bulat dan inti dengan A ganjil mempunyai I = tengahan. Paritas inti bisa mempunyai nilai + (genap) atau - (ganjil). Paritas dapat diukur secara langsung dengan menggunakan berbagai teknik peluruhan dan reaksi inti.
7. Untuk menyelidiki elektromagnetik sifat-sifat inti biasanya dihitung atau diukur momen multipol orde terendah (momen monopol listrik dan momen dipol magnetik). Momen monopol listrik inti adalah muatan inti Ze. Momen dipol magnetik μ dapat dinyatakan sebagai $\mu = g_l \mu_N$, dengan g_l adalah faktor g yang berkaitan dengan momentum sudut orbit L (untuk proton $g_l = 1$), l adalah bilangan kuantum momentum sudut orbit, $\mu_N \left(= 3,1525 \times 10^{-8} \frac{eV}{T} \right)$ adalah magneton inti. Momen magnetik spin nukleon dapat dituliskan

sebagai $\mu = g_e s \mu_N$, dengan g_s adalah faktor g spin dan $s = \frac{1}{2}$ untuk proton dan neutron. Masing-masing momen multipol elektromagnetik mempunyai paritas. Paritas momen listriknya $(-1)^L$ dan paritas momen magnetiknya $(-1)^{L+1}$, dengan L adalah orde multipol ($L = 0$ untuk monopol, $L = 2$ untuk dipol, $L = 3$ untuk oktopol, dan sebagainya).

8. Struktur inti banyak diselidiki melalui sifat-sifat keadaan tereksitasnya. Keadaan tereksitasi inti bisa terjadi karena pemindahan, nukleon ke keadaan yang lebih tinggi energinya, atau menambahkan energi pada teras nukleon-nukleon yang berpasangan.

Gaya yang mengikat nukleon-nukleon (proton dan neutron) dalam inti disebut gaya inti atau gaya nuklir. Yukawa mengemukakan beberapa karakteristik gaya-gaya inti sebagai berikut:

1. Gaya-gaya inti hanya efektif pada jangkauan pendek.
2. Gaya-gaya inti lemah pada jarak jauh yang berorde ukuran atom.
3. Gaya-gaya inti tidak tergantung muatan inti.
4. Gaya-gaya inti merupakan gaya yang paling kuat di alam.
5. Gaya-gaya inti termasuk gaya tolak yang mempertahankan nukleon-nukleon pada jarak rata-rata tertentu.
6. Gaya-gaya mempunyai komponen tak-sentral.

Penyelidikan tentang sifat-sifat inti deutron memegang peranan penting dalam mempelajari struktur inti. Energi ikat deutron dapat ditentukan dengan spektroskopi, atau dengan menyatukan sebuah proton dan sebuah neutron. Momentum sudut total deutron terdiri dari tiga komponen, yaitu spin neutron S_n , spin proton S_p , dan momentum sudut orbit L . Momen magnetik total deutron merupakan kombinasi dari momen magnetik neutron dan momen magnetik proton, $\mu = \mu_n + \mu_p$.



TES FORMATIF 1

Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!

- 1) Salah satu isotop yang dihasilkan oleh reaktor nuklir adalah ${}_{94}^{239}\text{Pu}$. Jumlah elektron dalam ion Pu^{2+} adalah
 - A. 92 buah
 - B. 94 buah

- C. 96 buah
D. 145 buah
- 2) Jika semua inti atom dianggap berbentuk bola, maka perbandingan antara diameter ${}^4_2\text{He}$ dan ${}^{108}_{46}\text{Pd}$ kira-kira
- A. 1 : 3
B. 1 : 23
C. 1 : 27
D. 1 : 31
- 3) Sebuah spektroskop massa menggunakan sebuah medan magnet gabungan dalam selektor kecepatan dan selektor momentumnya. Massa ion yang diukur oleh spektroskop itu sebanding dengan
- A. kuat medan listriknya
B. kuadrat jari-jari ion
C. kecepatan ion
D. kuadrat kuat medan magnetiknya
- 4) Jika inti dianggap berbentuk bola maka volume inti berbanding lurus dengan pangkat
- A. sepertiga nomor massanya
B. dua pertiga nomor massanya
C. satu nomor massanya
D. tiga nomor massanya
- 5) Perbandingan kerapatan antara nuklide ${}^4_2\text{He}$ dan nuklide ${}^{32}_{16}\text{S}$ adalah
- A. 1 : 1
B. 1 : 2
C. 1 : 3
D. 1 : 8
- 6) Sebuah elektron yang sedang bergerak mempunyai panjang gelombang de Broglie 0,100 fermi. Jika massa elektron = $9,109 \times 10^{-31}$ kg, muatan elektron $1,602 \times 10^{-19}$ C dan laju cahaya $2,998 \times 10^8 \frac{m}{s}$, maka energi total elektron tersebut kira-kira
- A. 0,511 MeV
B. 0,951 GeV
C. 12,400 GeV
D. 41,411 MeV

- 7) Jika massa atom ${}^4_2\text{He}$, ${}^3_1\text{H}$, dan ${}^1_1\text{H}$ secara berturut-turut sama dengan 4,002603 u , 3,016049 u , dan 1,007825 u , maka energi yang diperlukan untuk memisahkan sebuah proton dari kira-kira
- 19,81 MeV
 - 918,98 MeV
 - 938,79 MeV
 - 3728,43 MeV
- 8) Jika massa nuklide ${}^{12}_6\text{C}$, sama dengan 12,00 u dan laju cahaya sama dengan $3,00 \times 10^8 \frac{m}{s}$, maka energi diam nuklide itu sama dengan
- $1,12 \times 10^4$ MeV
 - $2,50 \times 10^7$ MeV
 - $3,60 \times 10^9$ MeV
 - $1,08 \times 10^{16}$ MeV
- 9) Energi diam proton, neutron dan deuteron secara berturut-turut sama dengan 938,280 MeV, 939,573 MeV dan 1875,628 MeV. Energi minimum sinar gamma yang diperlukan untuk membelah deuteron menjadi proton dan neutron adalah
- 1,293 MeV
 - 2,225 MeV
 - 936,055 MeV
 - 937,348 MeV
- 10) Massa atom hidrogen, neutron dan partikel α secara berturut-turut sama dengan 1,007825 u , 1,008665 u , dan 4,002603 u . Energi ikat partikel α tersebut kira-kira
- $7,074 \frac{\text{MeV}}{\text{nukleon}}$
 - $14,148 \frac{\text{MeV}}{\text{nukleon}}$
 - $21,222 \frac{\text{MeV}}{\text{nukleon}}$
 - $28,296 \frac{\text{MeV}}{\text{nukleon}}$

Cocokkanlah jawaban Anda dengan Kunci Jawaban Tes Formatif 1 yang terdapat di bagian akhir modul ini. Hitunglah jawaban yang benar. Kemudian, gunakan rumus berikut untuk mengetahui tingkat penguasaan Anda terhadap materi Kegiatan Belajar 1.

$$\text{Tingkat penguasaan} = \frac{\text{Jumlah Jawaban yang Benar}}{\text{Jumlah Soal}} \times 100\%$$

Arti tingkat penguasaan: 90 - 100% = baik sekali

80 - 89% = baik

70 - 79% = cukup

< 70% = kurang

Apabila mencapai tingkat penguasaan 80% atau lebih, Anda dapat meneruskan dengan Kegiatan Belajar 2. **Bagus!** Jika masih di bawah 80%, Anda harus mengulangi materi Kegiatan Belajar 1, terutama bagian yang belum dikuasai.

KEGIATAN BELAJAR 2

Model Inti

Untuk mempelajari struktur dan sifat inti sering dilakukan pendekatan sebagai berikut. Kita memilih suatu teori yang sangat disederhanakan, namun teori itu mudah dikerjakan secara matematis dan kaya akan wawasan fisika. Jika teori itu berhasil dalam menerangkan beberapa sifat inti, maka kita dapat meningkatkannya dengan menambahkan sifat-sifat tambahan. Melalui kegiatan semacam itu kita membentuk model inti, suatu pandangan yang disederhanakan tentang struktur inti yang mengandung sifat-sifat dasar fisika inti. Model yang berhasil harus memenuhi dua kriteria: (1) model itu harus menerangkan secara nalar sifat-sifat inti yang telah diukur sebelumnya, dan (2) model itu harus meramalkan sifat-sifat tambahan yang dapat diukur dalam eksperimen-eksperimen baru.

Karena tidak ada satu teori lengkap yang dapat menjelaskan semua sifat inti, beberapa model inti telah dikembangkan untuk memberikan sifat-sifat khusus inti. Dalam Kegiatan Belajar 1 kita telah membahas model proton-elektron dan model proton-neutron. Dalam pokok bahasan ini kita akan membahas dua model lainnya, yaitu model tetes cairan dan model kulit.

A. MODEL TETES CAIRAN

Pertama-tama marilah kita bicarakan model tetes cairan. Dalam cairan, energi ikat antara dua atom dalam suatu molekul tidak tergantung pada atom-atom lain dalam molekul yang sama. Keadaan semacam ini mirip dengan efek jenuh dalam gaya-gaya inti.

Pada tahun 1935 C.V. Weizacker, fisikawan Jerman, mengemukakan rumus semi-empiris tentang energi ikat inti. Jika sebuah inti mempunyai nomor massa Z , nomor atom A , dan nomor neutron N , maka energi ikat dalam inti ini dapat dituliskan sebagai

$$E_i = aA - bA^{\frac{2}{3}} - \frac{cZ(Z-1)}{A^{\frac{1}{3}}} - \frac{d(N-Z)^2}{A} \pm \frac{\delta}{A^{\frac{3}{4}}} \text{ MeV} \quad (1.29)$$

dengan koefisien-koefisien tersebut mempunyai nilai:

$$a = 15,8 \quad b = 17,8 \quad c = 0,71 \quad d = 23,7 \text{ dan}$$

Konstanta δ dipilih menurut tabel berikut.

Z	N	A	d
genap	genap	genap	34
genap	ganjil	ganjil	0
ganjil	genap	ganjil	0
ganjil	ganjil	genap	34

(1.30)

Suku pertama, E_v , merupakan efek volume. Makin besar jumlah total nukleon A , makin sukar untuk melepaskan proton dan neutron dari inti. Energi ikat berbanding lurus dengan jumlah total nukleon; hal ini mirip dengan jumlah energi kalor (atau kalor penguapan) yang diperlukan untuk menguapkan cairan berbanding lurus dengan massa cairan. Misalkan energi ikat antara dua nukleon adalah U , maka energi ikat yang bekerja pada masing-masing nukleon adalah $\frac{1}{2} U$. Jika tiap nukleon dianggap berbentuk bola, maka tiap nukleon mempunyai tetangga terdekat yang bersentuhan dengannya sebanyak 12 nukleon sehingga energi ikat masing-masing nukleon, $= \frac{1}{2} U \times 12 = 6U$. Apabila dalam inti terdapat A nukleon, maka energi ikat total

$$E_v = 6 UA = aA \tag{1.31}$$

Suku kedua, E_s , merupakan efek permukaan, yang mirip dengan tegangan permukaan pada cairan. Sejumlah nukleon pada permukaan inti tidak sepenuhnya mempunyai tetangga terdekat 12 nukleon. Jika jari-jari inti adalah $R = R_0 A^{\frac{1}{3}}$, maka luas permukaan inti

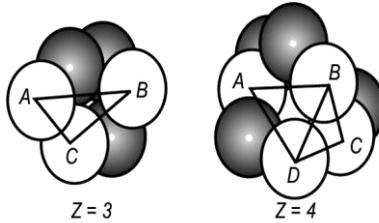
$$L = 4\pi R^2 = 4\pi R_0^2 A^{\frac{2}{3}} \tag{1.32}$$

dengan $R_0 = 1,4 \times 10^{-15} m$

Oleh karena itu, jumlah nukleon yang interaksinya kurang dari maksimum berbanding lurus dengan $A^{\frac{2}{3}}$, cenderung mereduksi energi ikat total dengan

$$E_s = -b A^{\frac{2}{3}} \tag{1.33}$$

Efek lain yang ikut mengurangi energi ikat adalah energi (tolak) elektrostatik Coulomb, E_c . Karena jumlah proton adalah Z , maka kombinasi interaksi antara proton-proton adalah $\frac{[Z Z - 1]}{2}$ seperti ditunjukkan dalam Gambar 1.6.



Kombinasi yang mungkin:

$$\frac{3 \times 3 - 1}{2} = 3 \left\{ \begin{array}{l} A \leftrightarrow B \\ A \leftrightarrow C \\ B \leftrightarrow C \end{array} \right\} \quad \frac{4 \times 4 - 1}{2} = 6 \left\{ \begin{array}{l} A \leftrightarrow B \\ A \leftrightarrow C \\ A \leftrightarrow D \\ B \leftrightarrow C \\ B \leftrightarrow D \\ C \leftrightarrow D \end{array} \right\}$$

Gambar 1.6.

Jumlah kombinasi interaksi yang mungkin antara partikel-partikel dalam inti

Energi potensial sepasang proton yang berjarak r dapat dituliskan sebagai.

$$V = \frac{-e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \tag{1.34}$$

Untuk $\frac{[Z Z - 1]}{2}$ pasang proton yang rata-rata berjarak r , energi elektrostatik Coulomb.

$$E_c = \frac{[Z(Z-1)]}{2} V = \frac{[Z(Z-1)]e^2}{8\pi\epsilon_0} \frac{1}{r} \tag{1.35}$$

Jika proton-proton terdistribusi secara homogen dalam inti yang berjari-jari R , maka

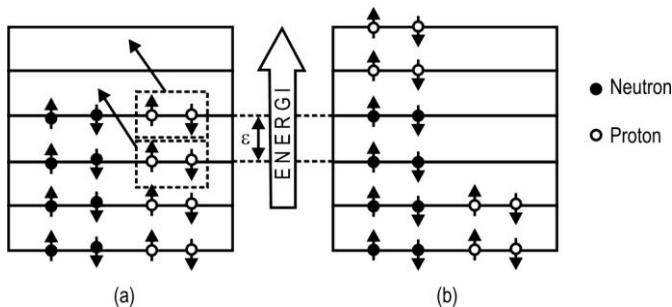
$$\frac{1}{r} \sim \frac{1}{R} = \frac{1}{R_0 A^{\frac{1}{3}}} \tag{1.36}$$

sehingga

$$E_c = \frac{c [Z(Z-1)]}{A^{\frac{1}{3}}} \tag{1.37}$$

merupakan suku ketiga yang mengurangi energi ikat.

Suku keempat terjadi karena jumlah proton dan jumlah neutron dalam inti tidak simetri ($N < Z$ atau $N > Z$). Stabilitas inti maksimum terjadi jika $N = Z$. Suatu penyimpangan dari keadaan ini menimbulkan asimetri $N - Z = A - 2Z$, yang akan menghasilkan penurunan stabilitas.



Gambar 1.7. Energi Asimetri Mengurangi Energi Ikat Inti dalam Model Tetes Cairan

Misalkan dalam sebuah inti stabil terdapat 16 nukleon ($A = 16$), terdiri atas 8 proton ($Z = 8$) dan 8 neutron ($N = 8$) seperti dalam Gambar 1.7(a). Jika jumlah neutron dalam inti lebih banyak daripada jumlah proton, maka tingkat energi yang lebih tinggi harus terisi. Kita menganggap bahwa tingkat-tingkat energi proton dan neutron yang paling atas berjarak sama, ϵ , dan menurut

asas larangan masing-masing tingkat itu hanya berisi dua partikel. Agar terjadi kelebihan neutron, misalnya $N - Z = 8$ dengan $A (= 16)$ tidak berubah, $\frac{1}{2} (N - Z) = 4$ proton harus diganti dengan neutron, seperti ditunjukkan dalam Gambar 1.7(b). Neutron yang baru harus menempati energi yang lebih tinggi $\frac{4\varepsilon}{2} = 2\varepsilon$. Secara umum, $\frac{1}{2} (N - Z)$ proton tersebut harus digeser, masing-masing energinya harus ditambah dengan $\frac{1}{2}(N-Z)\frac{\varepsilon}{2}$, dan kerja total yang harus dilakukan.

$$\begin{aligned} \Delta E &= \text{jumlah neutron baru} \times \frac{\text{pertambahan energi}}{\text{neutron baru}} \\ &= \frac{1}{2} (N - Z) \times \frac{1}{2} (N - Z) \frac{\varepsilon}{2} = \frac{\varepsilon}{8} (N - Z)^2 \end{aligned} \quad (1.38)$$

Rumus yang sama juga berlaku jika $Z > N$ karena $(N - Z)^2$ selalu positif. Karena $N = A - Z$, maka $(N - Z)^2 = (A - 2Z)^2$ sehingga

$$\Delta E = \frac{\varepsilon}{8} (A - 2Z)^2 \quad (1.39)$$

Makin besar jumlah nukleon dalam inti, makin kecil jarak selang energi ε . Karena ε sebanding dengan $\frac{1}{A}$, maka energi asimetri yang terjadi karena perbedaan antara N dan Z adalah

$$E_{\alpha} = -\Delta E = -d \left(\frac{A - 2Z}{A} \right)^2 \quad (1.40)$$

Tanda negatif menunjukkan bahwa energi asimetri ini mereduksi energi ikat.

Suku terakhir berasal dari kecenderungan terjadinya pasangan proton dan pasangan neutron, sehingga inti genap-genap merupakan inti paling stabil dan mempunyai energi ikat lebih tinggi daripada energi ikat yang diperkirakan. Sebaliknya, inti ganjil-ganjil mempunyai proton tak-berpasangan dan neutron tak-berpasangan dan mempunyai energi ikat rendah. Energi pasangan E_p adalah positif untuk inti genap-genap, 0 untuk

inti ganjil-genap atau genap-ganjil, dan negatif untuk inti ganjil-ganjil, dan tampaknya berubah terhadap A menurut A.

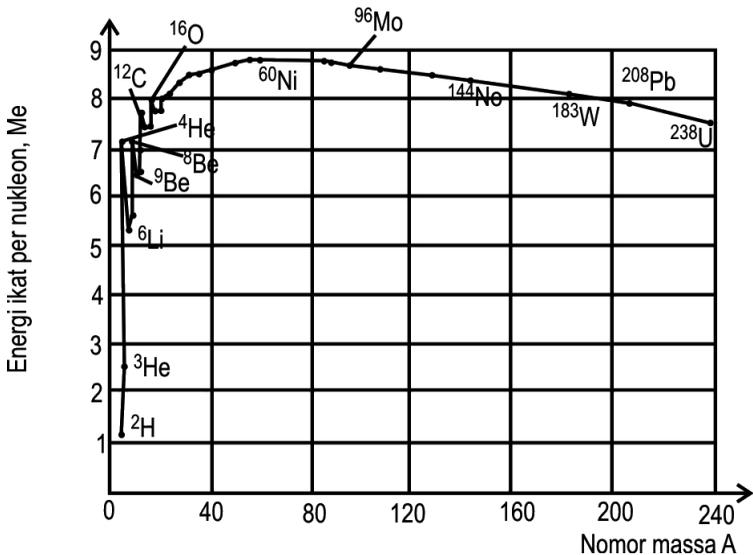
Oleh karena itu, energi pasangan

$$E_p = \pm,0 \frac{\delta}{A^{\frac{3}{4}}} \tag{1.41}$$

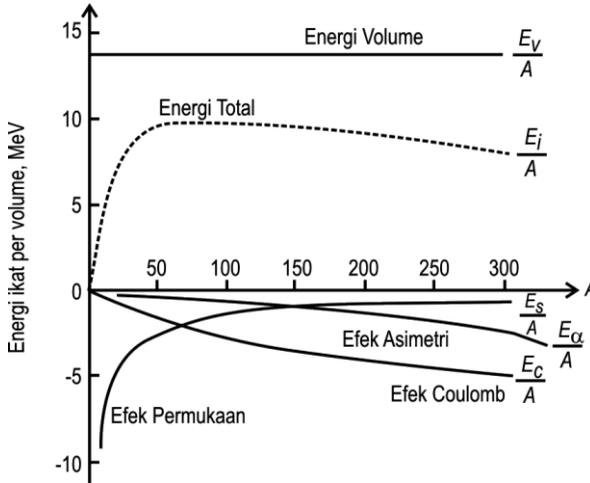
Oleh karena itu energi ikat per nukleon dapat dituliskan sebagai

$$\frac{E_t}{A} = a - \frac{b}{A^{\frac{1}{3}}} - \frac{cZ(Z-1)}{A^{\frac{4}{3}}} - \frac{d(N-Z)^2}{A^2} \pm \frac{\delta}{A^{\frac{7}{4}}} \text{ Mev} \tag{1.42}$$

Gambar 1.8 menunjukkan grafik yang menunjukkan hubungan antara energi ikat per nukleon dan nomor massa.



Gambar 1.8.
Energi Ikat Rata-rata Per Nukleon untuk Nuklide Stabil



Gambar 1.9.
Kontribusi Terhadap Energi Ikatan Per Nukleon

Kurva dalam Gambar 1.8 relatif halus dengan kekecualian beberapa ketakteraturan, seperti ${}^4_2\text{He}$, ${}^{12}_6\text{C}$, ${}^{16}_8\text{O}$. Kurva tersebut naik secara tajam untuk nilai A rendah, tetapi untuk nilai $A \geq 30$ energi ikatan mendekati $8 \frac{\text{MeV}}{\text{nukleon}}$. Kontribusi berbagai efek dalam rumus empiris Weizacker

disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 1.9.

Model tetes cairan berhasil menjelaskan beberapa gejala nuklir sebagai berikut:

1. Disintegrasi. Pelepasan partikel dari inti dianggap mirip dengan penguapan molekul cairan dari tetes cairan. Kenaikan temperatur menyebabkan penguapan makin cepat; demikian pula, kenaikan gerak nukleon-nukleon dalam inti akan menyebabkan kebolehhadjan disintegrasi yang lebih tinggi.
2. Dalam inti stabil, nukleon-nukleon bergerak pelan dengan energi kinetik sangat kecil. Penembakan partikel berenergi tinggi ke dalam inti akan menaikkan energi kinetik nukleon-nukleonnya. Selama nukleon-nukleon bergerak di dalam inti, beberapa nukleon tertentu mempunyai peluang untuk menumbuk nukleon-nukleon lainnya dan memberikan kecepatan cukup tinggi ke arah luar sehingga peluang nukleon-nukleon untuk

menembus rintangan potensial dan melepaskan diri dari inti menjadi makin besar.

3. Pembelahan inti (atau fisi). Bohr dan Wheeler adalah ilmuwan yang pertama kali menjelaskan proses fisi dalam model tetes cairan. Menurut penjelasan mereka, fisi terjadi karena osilasi yang dihasilkan oleh neutron-neutron yang bergesekan. Dalam tetes cairan gaya yang bekerja antara molekul-molekul penyusunnya diimbangi oleh gaya tegangan permukaan. Bentuk bola tetes cairan disebabkan oleh tegangan permukaan. Tetes-tetes cairan yang sangat besar tidak mungkin terjadi karena gaya tegangan permukaan cukup lemah dan terdapat ukuran tetes maksimum yang terjadi dalam bentuk stabil secara permanen. Selama ukuran ini didekati, tetes cairan itu mulai melakukan osilasi tegangan permukaan dengan sedikit pancingan dari luar, kemudian menimbulkan gangguan terhadap tetes cairan yang akhirnya terpecah menjadi dua (atau lebih) tetes cairan yang lebih kecil.

B. MODEL KULIT

Model tetes cairan tidak dapat memberikan secara memadai tentang keadaan energi tereksitasi inti yang telah diketahui keberadaannya. Oleh karena itu, perlu dikembangkan model inti lainnya, misalnya model kulit.

Teori atom yang didasarkan pada model kulit telah memberikan penjelasan luar biasa tentang struktur atom yang sangat rumit. Oleh karena itu, fisika inti mencoba menggunakan teori serupa untuk menjelaskan masalah struktur inti, dengan harapan memperoleh keberhasilan yang mirip dalam menjelaskan sifat-sifat inti. Dalam model kulit atom, kita mengisi kulit-kulit atom dengan elektron-elektron menurut urutan energi yang makin bertambah, sesuai dengan persyaratan asas Pauli. Bilamana kita melakukannya, kita akan mendapatkan suatu teras yang lambat dengan kulit-kulit terisi dan sejumlah elektron valensi; kemudian model itu menganggap bahwa sifat-sifat atom terutama ditentukan oleh elektron-elektron valensi. Jika kita membandingkan beberapa sifat sistem atom yang terukur dengan ramalan model tersebut, kita mendapatkan kesesuaian yang luar biasa.

Bilamana kita mencoba untuk membawa model ini ke dalam dunia inti, kita segera menjumpai beberapa kesukaran. Dalam kasus atom, potensial diberikan oleh medan Coulomb dari inti; sub-kulit (atau 'orbit') ditentukan

oleh penyebab luar. Kita dapat menyelesaikan persamaan Schrodinger untuk potensial ini dan menghitung energi-energi sub-kulit tempat elektron-elektron dapat diletakkan. Dalam inti tidak ada penyebab luar semacam itu; nukleon bergerak dalam suatu potensial yang diciptakannya sendiri.

Aspek lain yang menarik dari teori kulit atom adalah adanya orbit-orbit ruang. Sering kali sangat berguna bagi kita untuk memberikan sifat-sifat atom dalam orbit-orbit ruang. Elektron-elektron dapat bergerak dalam orbit-orbit semacam itu relatif bebas dari tumbukan dengan elektron-elektron lainnya. Nukleon-nukleon mempunyai diameter relatif besar dibandingkan dengan ukuran inti. Bagaimana kita dapat menganggap bahwa nukleon-nukleon sedang bergerak dalam orbit-orbit yang ditetapkan secara baik bilamana nukleon tunggal dapat melakukan banyak tumbukan selama mengorbit?

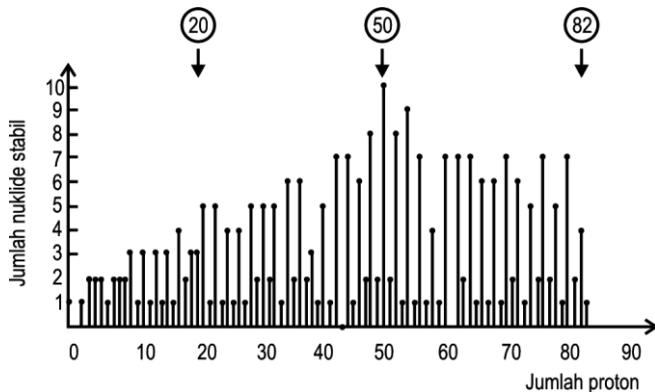
Secara eksperimen dapat ditunjukkan bahwa banyak sifat-sifat nuklir yang berubah-ubah secara periodik dengan cara yang sangat mirip dengan sifat-sifat atomik menurut tabel periodik unsur. Misalnya, inti paling stabil terjadi bilamana jumlah proton (Z) atau jumlah neutron ($N = A - Z$) sama dengan salah satu bilangan berikut.

2, 8, 20, 50, 82, 126, ...

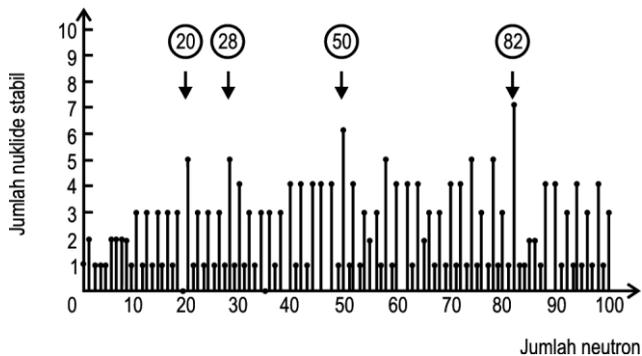
yang disebut bilangan ajaib. Inti dengan jumlah proton atau jumlah neutron sama dengan bilangan ajaib berlimpah daripada inti lain yang mempunyai nomor massa hampir sama; hal ini menunjukkan bahwa inti tersebut mempunyai struktur yang lebih stabil.

Bilangan-bilangan ajaib dapat dijelaskan dengan model kulit, yang mengemukakan bahwa proton-proton dan neutron-neutron membentuk kulit-kulit tertutup mirip dengan kulit-kulit elektron.

Jika kurva energi ikat per nukleon dalam Gambar 1.8 diperbesar, kurva itu akan menunjukkan bahwa “puncak-puncak” yang menunjukkan energi ikat per nukleon mempunyai nilai lebih tinggi daripada nuklide-nuklide sekitarnya. Puncak-puncak ini terjadi pada nuklide-nuklide ${}^4_2\text{He}$ dan ${}^{16}_8\text{O}$. dengan puncak-puncak yang lain pada ${}^{88}_{38}\text{Sr}$, ${}^{120}_{60}\text{Sn}$, ${}^{140}_{58}\text{Ce}$, dan ${}^{206}_{82}\text{Pb}$.



Gambar 1.10.
Jumlah Nuklide Stabil tiap Unsur sebagai Fungsi dari Jumlah proton



Gambar 1.11.
Jumlah Nuklide Stabil tiap Unsur sebagai Fungsi dari Jumlah Neutron

Bilangan-bilangan ajaib juga muncul jika jumlah nuklide stabil dibandingkan dengan jumlah proton atau jumlah neutron seperti terlihat dalam Gambar 1.10 dan Gambar 1.11. Dalam dua gambar itu ditunjukkan bahwa jumlah nuklide lebih besar pada jumlah proton dan jumlah neutron 20, 50, dan 82. Perhatikan bahwa isoton dalam Gambar 1.11 mempunyai puncak pada $N = 28$. Bilangan ini disebut bilangan semi-ajaib.

Keberkalaan sifat-sifat kimia yang disusun dalam tabel unsur Mendeleef dapat dijelaskan dengan mengandaikan bahwa elektron-elektron terdistribusi dalam sejumlah kulit dan subkulit. Pada tahun 1932 J.H. Bartlett

mengemukakan bahwa struktur kulit dalam inti dapat menjelaskan stabilitas nuklir. Beliau mengamati bahwa pola susunan isotop-isotop yang lazim terjadi mengalami perubahan pada ${}^{16}_8\text{O}$ dan pada ${}^{36}_{18}\text{A}$. Antara ${}^4_2\text{He}$ dan ${}^{16}_8\text{O}$, semua inti stabil terbentuk menurut bagan ${}^4_2\text{He} + n + p + n \dots$ dan dari ${}^{16}_8\text{O}$ sampai ${}^{36}_{18}\text{A}$ polanya adalah ${}^{16}_8\text{O} + n + n + p + p + \dots$. Kemudian dikemukakan adanya kemungkinan untuk menempatkan dua neutron dan dua proton dalam kulit $s(l=0)$ dengan momentum sudut orbital nol, tanpa melanggar asas larangan Pauli. Kulit berikutnya, kulit $p(l=1)$ dengan momentum sudut sama dengan 1, mempunyai ruang untuk enam proton dan enam neutron. Bilamana kulit s dan kulit p terisi penuh, nuklide ${}^{16}_8\text{O}$ terbentuk. Kulit berikutnya adalah kulit $d(l=2)$, dengan momentum sudut total sama dengan 2. Kulit ini mempunyai ruang untuk sepuluh proton dan sepuluh neutron. Nuklide ${}^{36}_{18}\text{A}$ terbentuk jika kulit s , kulit p , dan kulit d terisi penuh. Secara umum, jumlah proton dan neutron dalam suatu kulit ditentukan oleh $2(2l+1)$, dengan $l=0, 1, 2, \dots$

Menurut model kulit, momentum sudut total inti (disebut spin nuklir) ditentukan oleh

$$\begin{aligned} \text{momentum sudut total (spin nuklir)} = & \sum \left[\begin{array}{l} \text{momentum sudut} \\ \text{intrinsik proton} \left(\frac{1}{2} \hbar \right) \end{array} \right] \\ & + \sum \left[\begin{array}{l} \text{momentum sudut} \\ \text{intrinsik neutron} \left(\frac{1}{2} \hbar \right) \end{array} \right] \\ & + \sum \left[\begin{array}{l} \text{momentum sudut orbital nukleon-} \\ \text{nukleon yang berasal dari gerakan-} \\ \text{gerakannya dalam inti } (m\hbar) \end{array} \right] \end{aligned}$$

Suku ketiga memberikan sumbangan $m\hbar$, dengan $m = 0, 1, 2, \dots$. Tiga kontribusi terhadap momentum sudut total inti tersebut dapat menjelaskan nuklide-nuklide stabil yang muncul di alam, seperti dirangkum dalam Tabel 1.1.

Tabel 1.1.
Momentum Sudut Total (atau Spin Nuklir) untuk Nuklide-nuklide Stabil

Z	N	Spin nuklir
genap	genap	0
genap	ganjil	$\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \frac{7}{2}$ dan sebagainya
ganjil	genap	$\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \frac{7}{2}$, dan sebagainya
ganjil	ganjil	1, 2, 3

Menurut asas larangan Pauli, tidak ada dua proton atau dua neutron yang dapat mempunyai himpunan bilangan kuantum yang sama. Proton-proton akan mengisi tingkat-tingkat energi proton yang ada dalam pasangan spin-spin yang berlawanan dan demikian pula untuk neutron. Bilamana proton-proton dan neutron-neutron mengisi kulit-kulit tertutup, momentum sudut totalnya adalah nol dan spin nuklirnya juga nol. Misalnya ${}_{28}^{60}\text{Ni}_{32}$ mempunyai spin nuklir nol.

Kasus Z genap dan N ganjil atau Z ganjil dan N genap akan mempunyai proton atau neutron yang tidak berpasangan dengan nukleon lainnya. Nukleon dengan spin $\frac{1}{2}\hbar$ akan bergabung dengan momentum sudut orbital $m\hbar$. Karena m adalah bilangan bulat, spin nuklir resultannya adalah $m\hbar \pm \frac{1}{2}\hbar = \frac{1}{2}\hbar, \frac{3}{2}\hbar, \dots$. Dua contohnya adalah ${}_{27}^{63}\text{Co}_{36}$ dan ${}_{30}^{67}\text{Zn}_{37}$, yang mempunyai spin secara berturut-turut $\frac{3}{2}\hbar$ dan $\frac{5}{2}\hbar$. Nuklide ganjil-ganjil mempunyai sebuah proton tak-berpasangan dan sebuah neutron tak-berpasangan, sehingga spin nuklir totalnya adalah $\hbar, 2\hbar, 3\hbar, \dots$. Nuklide ${}^2_1\text{H}_1$ mempunyai $1\hbar$ dan nuklide ${}^{10}_5\text{B}_5$ mempunyai spin nuklir $3\hbar$.

Versi lain tentang model kulit dikemukakan oleh Maria Meyer dan J. Hans Jensen pada tahun 1949. Mereka menyadari bahwa interaksi spin-orbit yang kuat akan menimbulkan pemisahan tingkat energi menjadi beberapa subtingkat energi. Untuk inti yang sangat ringan, momentum sudut spin masing-masing nukleon terkopel menjadi momentum sudut spin total dan momentum sudut orbital masing-masing nukleon terkopel secara terpisah

membentuk momentum sudut orbital total. Kemudian momentum sudut spin total ini terkopel dengan momentum sudut orbital total dan membentuk sudut total. Setelah melewati daerah transisi, untuk inti yang lebih berat mula-mula terjadi kopling antara momentum sudut spin dan momentum sudut orbital masing-masing nukleon dengan membentuk momentum sudut total masing-masing nukleon. Kemudian terjadi kopling antara momentum-momentum sudut total tiap nukleon menjadi momentum sudut total inti. Sebagian besar inti mengikuti pola kopling ini.

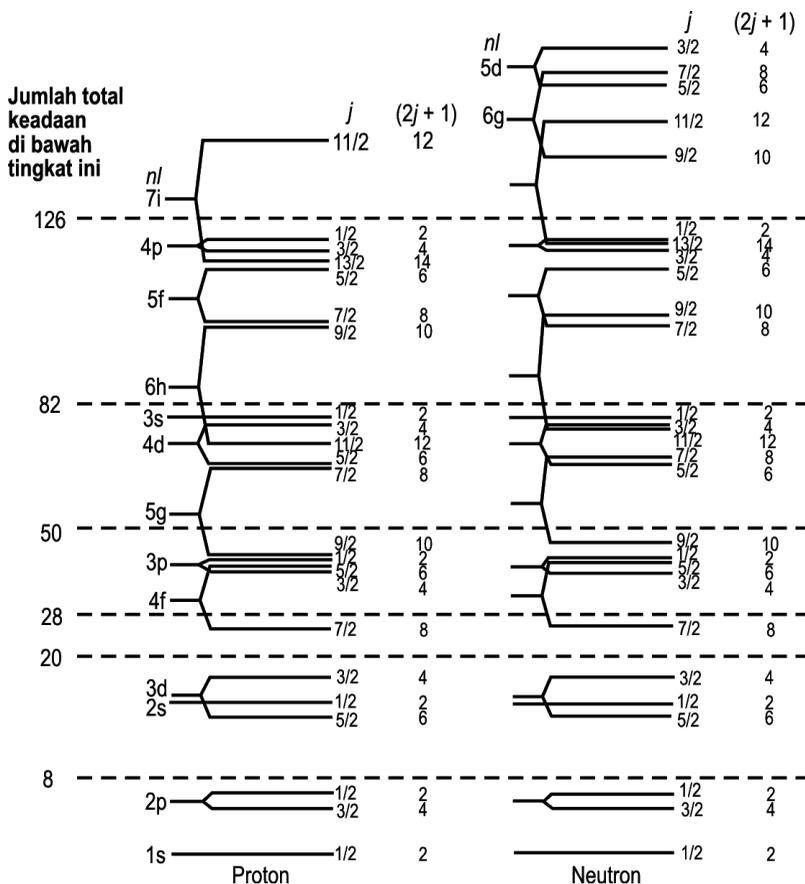
Tingkat-tingkat proton agak berbeda dengan tingkat-tingkat energi neutron, khususnya untuk Z besar, karena adanya energi tolak Coulomb antara proton-proton. Proton dan neutron termasuk fermion yang mengikuti asas larangan Pauli. Untuk suatu tingkat energi, asas ini membatasi jumlah maksimum proton atau neutron sebesar $2j+1$ (dengan $j = l \pm \frac{1}{2} =$ bilangan

kuantum total). Misalnya tingkat energi proton dengan $j = \frac{3}{2}$ dapat terisi sampai $2 \left(\frac{3}{2} \right) + 1 = 4$ proton (bersesuaian dengan $m_j = -\frac{3}{2}, -\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}, +\frac{3}{2}$

Gambar 1.12 menunjukkan bagan tingkat energi menurut prediksi model kulit.

Dalam suatu tingkat yang mempunyai jumlah proton atau neutron genap, proton-proton atau neutron-neutron akan berpasangan dan saling menghilangkan momentum sudutnya dalam keadaan dasar. Oleh karena itu, $i = 0$ untuk inti genap-genap. Jika jumlah proton atau neutron ganjil, satu proton atau satu neutron tidak berpasangan dan nilai j untuk nukleon ganjil terakhir yang tidak berpasangan ini merupakan nilai i untuk inti secara keseluruhan. Inti ganjil-ganjil mempunyai momentum sudut total yang diakibatkan oleh penjumlahan vektor yang rumit dari momentum-momentum sudut proton ganjil terakhir dan neutron ganjil terakhir.

Paritas keadaan nuklir dinyatakan sebagai $(-1)^\ell$, dengan ℓ adalah bilangan kuantum (momentum sudut) orbital dari nukleon ganjil terakhir yang tak-berpasangan. (Ingat kembali bahwa s, p, d, f, g, h, \dots bersesuaian dengan $\ell = 0, 1, 2, 3, 4, 5, \dots$). Inti genap-genap mempunyai paritas $+$ untuk keadaan dasarnya.



Gambar 1.12. Tingkat-tingkat Energi untuk Proton dan Neutron menurut Model Kulit. Tiap Tingkat Mengandung 0 sampai $2j + 1$ Proton atau Neutron

Model kulit dapat menerangkan beberapa gejala nuklir di samping bilangan ajaib, antara lain:

1. Kelimpahan inti. Karena tiap subtingkat hanya dapat diisi oleh dua partikel dengan spin yang berlawanan, maka inti dengan Z genap dan N genap cenderung lebih melimpah.
2. Momentum sudut inti. Model kulit dapat meramalkan besarnya momentum sudut inti. Dalam inti genap-genap semua proton dan neutron berpasang-pasangan, sehingga momentum sudut spinnya saling

meniadakan dan momentum sudut orbitalnya juga saling meniadakan. Oleh karena itu, inti genap-genap memiliki momentum sudut total nol dan hal ini sesuai dengan eksperimen. Dalam inti genap-ganjil dan ganjil-genap akan mempunyai satu proton atau satu neutron yang tidak berpasangan, sehingga momentum sudut spinnya (merupakan bilangan tengahan) bergabung dengan momentum sudut orbital (merupakan bilangan bulat), sehingga momentum sudut totalnya mengandung bilangan tengahan. Inti ganjil-ganjil memiliki neutron ekstra dan proton ekstra dengan spin masing-masing bilangan tengahan, sehingga momentum sudut totalnya merupakan bilangan bulat dan hal ini juga sesuai dengan eksperimen.



LATIHAN

Untuk memperdalam pemahaman Anda mengenai materi di atas, kerjakanlah latihan berikut!

- 1) Hitunglah perbandingan luas permukaan inti antara ${}^1_1\text{H}$ dan ${}^8_4\text{Be}$!
- 2) Hitunglah perbandingan energi efek permukaan untuk nuklide ${}^4_2\text{He}$ dan nuklide ${}^{239}_{92}\text{Pu}$!
- 3) Hitunglah perbandingan energi efek volume untuk nuklide ${}^{16}_8\text{O}$ dan nuklide ${}^{239}_{94}\text{Pu}$!
- 4) Hitunglah perbandingan energi efek Coulomb untuk nuklide ${}^4_2\text{He}$ dan nuklide ${}^{32}_{16}\text{S}$!
- 5) Carilah spin dan paritas nuklide ${}^{43}_{20}\text{Ca}$ dalam keadaan dasar menurut model kulit!

Petunjuk Jawaban Latihan

- 1) Gunakan persamaan $L = 4\pi R_0^2 A^{\frac{2}{3}}$ untuk menyelesaikan soal ini.
- 2) Gunakan persamaan $E_s = -bA^{\frac{2}{3}}$ untuk menyelesaikan soal ini.
- 3) Gunakan persamaan $E_v = -aA$ untuk menyelesaikan soal ini.

- 4) Gunakan persamaan $E_c = \frac{c[Z Z - 1]}{A^{\frac{1}{3}}}$ untuk menyelesaikan soal ini.
- 5) Nuklide ${}_{20}^{43}\text{Ca}$ mempunyai 20 proton dan 23 neutron. Dengan memperhatikan Gambar 1.12 terlihat bahwa nukleon ganjil terakhir yang tak-berpasangan adalah neutron ke-23 dalam keadaan $4f$ dengan $j = \frac{7}{2}$. Oleh karena itu, spin nuklirnya adalah $\frac{7}{2}$. Untuk keadaan f , $\ell = 3$. Karena $(-1)^\ell = (-1)^3 = -1$, maka paritasnya $-$ (negatif).



RANGKUMAN

Ada beberapa model inti yang telah dikembangkan para ilmuwan, antara lain model proton-elektron, model proton-neutron, model tetes cairan dan model kulit.

Pada tahun 1935 C.V. Weizacker, fisikawan Jerman, mengemukakan rumus semi-empiris tentang energi ikat inti dalam model tetes cairan sebagai berikut:

$$E_i = aA - bA^{\frac{2}{3}} - \frac{cZ(Z - 1)}{A^{\frac{1}{3}}} - \frac{d(N - Z)^2}{A} \pm \frac{\delta}{A^{\frac{3}{4}}}$$

Model tetes cairan berhasil menjelaskan beberapa gejala nuklir, antara lain desintegrasi dan pembelahan inti (atau fisi).

Bilangan-bilangan ajaib dapat dijelaskan dengan model kulit yang menyatakan bahwa proton-proton dan neutron-neutron membentuk kulit-kulit tertutup mirip dengan kulit-kulit elektron. Model ini dapat menjelaskan beberapa gejala nuklir, antara lain bilangan ajaib, kelimpahan inti dan momentum sudut inti.



TES FORMATIF 2

Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!

- 1) Jika nomor massa nuklide A delapan kali nomor massa nuklide B, maka luas permukaan inti nuklide A ... kali luas permukaan inti nuklide B.
- A. 2
B. 4

- C. 8
D. 16
- 2) Energi efek volume dalam model tetes cairan sebanding dengan pangkat ... dari nomor massa nuklide yang bersangkutan.
- A. $\frac{1}{3}$
B. $\frac{2}{3}$
C. 1
D. $\frac{3}{2}$
- 3) Nuklide ${}^{144}_{55}\text{Cs}$ termasuk inti
- A. genap-ganjil
B. ganjil-genap
C. genap-genap
D. ganjil-ganjil
- 4) Menurut model tetes cairan, gaya yang paling berperan dalam pembelahan inti adalah gaya
- A. nuklir
B. gravitasi
C. Coulomb
D. permukaan
- 5) Menurut model tetes cairan, perbandingan energi Coulomb per nukleon untuk ${}^{200}_{82}\text{Pb}$ dan ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ adalah
- A. 1,80
B. 2,78
C. 6,62
D. 32,59
- 6) Menurut model kulit, tingkat $5f_{\frac{7}{2}}$ mempunyai kapasitas maksimum
- A. 5 nukleon
B. 7 nukleon
C. 8 nukleon
D. 10 nukleon

- 7) Menurut model kulit, momentum sudut total inti terdiri dari momentum sudut intrinsik neutron, momentum sudut intrinsik proton, dan momentum sudut orbit nukleon-nukleon dalam inti. Besarnya momentum sudut orbit nukleon yang mungkin adalah
- A. $\frac{1}{2}\hbar$
 - B. $\frac{3}{2}\hbar$
 - C. $\frac{5}{2}\hbar$
 - D. $\frac{7}{2}\hbar$
- 8) Momentum sudut total inti pada nuklide stabil dengan Z genap dan N genap adalah
- A. 0
 - B. $\frac{1}{2}$
 - C. 1
 - D. $\frac{3}{2}$
- 9) Sinar γ dengan energi 6,5 MeV meluruhkan sebuah tritium menjadi sebuah neutron dan sebuah deutron. Energi-energi diam (m_0c^2) untuk neutron, deutron dan tritium secara berturut-turut sama dengan 939,573 MeV, 1875,628 MeV, 2809,456 MeV. Jika deutron yang dihasilkan mempunyai energi kinetik 60 keV, maka neutron yang dihasilkan mempunyai energi kinetik
- A. 0,695 MeV
 - B. 0,755 MeV
 - C. 5,745 MeV
 - D. 6,440 MeV

Cocokkanlah jawaban Anda dengan Kunci Jawaban Tes Formatif 2 yang terdapat di bagian akhir modul ini. Hitunglah jawaban yang benar. Kemudian, gunakan rumus berikut untuk mengetahui tingkat penguasaan Anda terhadap materi Kegiatan Belajar 2.

$$\text{Tingkat penguasaan} = \frac{\text{Jumlah Jawaban yang Benar}}{\text{Jumlah Soal}} \times 100\%$$

Arti tingkat penguasaan: 90 - 100% = baik sekali
80 - 89% = baik
70 - 79% = cukup
< 70% = kurang

Apabila mencapai tingkat penguasaan 80% atau lebih, Anda dapat meneruskan dengan modul selanjutnya. **Bagus!** Jika masih di bawah 80%, Anda harus mengulangi materi Kegiatan Belajar 2, terutama bagian yang belum dikuasai.

Kunci Jawaban Tes Formatif

Tes Formatif 1

1) A. Dalam keadaan netral jumlah proton dalam isotop ${}^{239}_{94}\text{Pu}$ sama dengan jumlah elektron, yaitu 94 buah. Agar terbentuk ion Pu^{2+} harus ada 2 buah elektron yang hilang, maka jumlah elektronnya tinggal 92 buah.

2) A. Jika inti dianggap berbentuk bola, maka diameter inti dapat dihitung dengan rumus

$$d = 2R_o A^{\frac{1}{3}}$$

Perbandingan diameter inti ${}^4_2\text{He}$ dan inti ${}^{108}_{46}\text{Pd}$ dapat dihitung sebagai berikut:

$$\frac{d_{\text{He}}}{d_{\text{Pu}}} = \frac{2R_o A_{\text{He}}^{\frac{1}{3}}}{2R_o A_{\text{Pd}}^{\frac{1}{3}}} = \left(\frac{4}{108}\right)^{\frac{1}{3}} = \frac{1}{3}$$

3) D. Menurut Persamaan (1.11).

4) C. Volume inti dapat dinyatakan sebagai

$$V = \left(\frac{4}{3}\right)\pi R^3 = \left(\frac{4}{3}\right)\pi R_o A^{\frac{1}{3} \cdot 3} = \left(\frac{4}{3}\right)\pi R_o A$$

Berarti volume inti sebanding dengan (pangkat satu) nomor massanya.

5) A. Kerapatan nuklir dapat dihitung dengan pendekatan sebagai berikut.

$$\rho = \frac{\text{massa inti}}{\text{volume inti}} = \frac{Au}{\left(\frac{4}{3}\right)\pi R^3} = \frac{Au}{\left(\frac{4}{3}\right)\pi R_o^3 A} = \frac{u}{\left(\frac{4}{3}\right)\pi R_o^3}$$

Karena nilai u dan R_o adalah sama untuk dua nuklida tersebut.

6) C. Menurut de Broglie, momentum elektron yang sedang bergerak dapat dihitung sebagai berikut:

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{6,626 \times 10^{-34}}{10^{-16}} = 6,626 \times 10^{-18} \text{ kg } \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Energi elektron tersebut dapat dihitung sebagai berikut:

$$E = \sqrt{p^2 c^2 + mc^2}^2$$

Dengan memasukkan nilai p yang sudah dihitung dan mengambil nilai $c = 2,998 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ serta menghitung energi

$$\begin{aligned} \text{massa } mc^2 &= 9,109 \times 10^{-31} \text{ kg} \left(2,998 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 = 8,187 \times 10^{-14} \text{ J} = \\ & \frac{8,187 \times 10^{-14} \text{ eV}}{1,602 \times 10^{-19}} = 5,11 \times 10^5 \text{ eV} = 0,511 \text{ MeV}, \text{ kita memperoleh } E \\ & = 12,400 \text{ GeV}. \end{aligned}$$

- 7) A. Proses pemisahan proton dari helium dapat dituliskan dalam bentuk persamaan



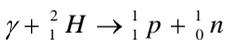
Besarnya energi pisah dapat dihitung dengan rumus

$$\begin{aligned} E_p &= (m_T + m_H - m_{He}) \times 931,502 \frac{\text{MeV}}{u} \\ &= (3,016049 + 1,007825 - 4,002603) u \times 931,502 \frac{\text{MeV}}{u} \\ &= 19,81 \text{ MeV} \end{aligned}$$

- 8) A. Energi diam ${}^{12}_6\text{C}$ dapat dihitung sebagai berikut.

$$E_o = mc^2 = 12,00 u \times 931,502 \frac{\text{MeV}}{u} = 1,12 \times 10^4 \text{ MeV}$$

- 9) B. Proses yang terjadi dapat dituliskan dalam bentuk



Energi minimum sinar γ dapat dihitung sebagai berikut

$$\begin{aligned} E_\gamma &= E_p + E_n - E_u \\ E_\gamma &= (938,280 + 938,573 - 1875,628) \text{ MeV} = 2,225 \text{ MeV} \end{aligned}$$

- 10) A. Partikel α mempunyai $Z = 2$ dan $N = 2$, sehingga energi ikatnya dapat dihitung sebagai berikut.

$$E_i = (Zm_H - Nm_n - m_\alpha)u \times 931,502 \frac{MeV}{u}$$

$$\begin{aligned} E_i &= (2 \times 1,007825 + 2 \times 1,008665 - 4,002603) MeV \\ &= 28,296 MeV \end{aligned}$$

$$\text{Sedangkan energi per nukleonnya} = 28,296 \frac{MeV}{4} = 7,074 MeV .$$

Tes Formatif 2

- 1) B. Luas permukaan nuklide A dapat dinyatakan sebagai $L_A = 4\pi R_0^2 A_B^{\frac{2}{3}} = 4\pi R_0^2 8A_B^{\frac{2}{3}}$, dan luas permukaan nuklide B sebagai $L_B = 4\pi R_0^2 A_B^{\frac{2}{3}}$, maka $L_A : L_B = A_A^{\frac{2}{3}} : A_B^{\frac{2}{3}} = (8A_B)^{\frac{2}{3}} : A_B^{\frac{2}{3}} = 4 : 1$.
- 2) C. Menurut persamaan $E_v = -aA$.
- 3) D. Nuklide ${}^{144}_{55}C_s$ mempunyai 55 proton dan $(144 - 55) = 79$ neutron, sehingga termasuk inti ganjil-ganjil.
- 4) C. Gaya nuklir, gaya gravitasi dan gaya permukaan cenderung menyatukan nukleon-nukleon dalam inti. Sedangkan gaya Coulomb merupakan gaya tolak yang cenderung memisahkan nukleon-nukleon dalam inti.
- 5) A. Menurut model tetes cairan, komponen energi Coulomb per nukleon dapat dituliskan sebagai:

$$E_c = \frac{cZ(Z-1)}{A^{\frac{1}{3}}} : A = \frac{cZ(Z-1)}{A^{\frac{4}{3}}}$$

Oleh karena itu, perbandingan energi Coulomb per nukleon antara

$${}^{206}_{82}Pb \text{ dan } {}^{56}_{26}Fe \text{ adalah } \frac{E_c Pb}{E_c Fe} = \frac{\frac{82(82-1)}{206^{\frac{4}{3}}}}{\frac{26(26-1)}{56^{\frac{4}{3}}}} = 1,80 .$$

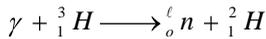
6) C. Tingkat $5f_{\frac{7}{2}}$ mempunyai nilai $j = \frac{7}{2}$. Kapasitas maksimum tingkat

$$\text{tersebut adalah } 2j+1 = 2\left(\frac{7}{2}\right)+1 = 7+1 = 8.$$

7) A. Dengan mengacu Persamaan (1.16).

8) A. Dengan memperhatikan Tabel 1.1.

9) A. Proses peluruhan yang terjadi dapat dituliskan sebagai



atau



Menurut hukum kekekalan energi, kita dapat menuliskan

$$h\nu + m_T c^2 = m_n c^2 + m_D c^2 + K_p + K_D$$

atau

$$K_D = h\nu + m_T c^2 - m_n c^2 + m_D c^2 + K_n$$

Dengan memasukkan data yang diketahui diperoleh:

$$\begin{aligned} K_p &= (6,5 + 2809,456) \text{ MeV} - (939,573 + 1875,628 + 0,060) \text{ MeV} \\ &= 0,695 \text{ MeV} \end{aligned}$$

Daftar Pustaka

- Acosta, V., Cowan, C.L. & Graham, B.J. (1973). *Essentials of Modern Physics*. New York: Harper & Row Publisher, Inc.
- Cohen, B.L., (1971). *Concepts of Nuclear Physics*. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company, Ltd.
- Enge, H.A. (1966). *Introduction to Nuclear Physics*. Reading Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company.
- Krane, K.S. (1988). *Introductory to Nuclear Physics*. New York: John Wiley & Son, Inc.
- Meyerhof, W.E. (1967). *Elements of Nuclear Physics*. New York: McGraw-Hill International Editions.
- Sandin, T.R. (1989). *Essentials of Modern Physics*. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company.
- Theraja, B.L., (1982). *Modern Physics*. New Delhi: S. Chand & Company Ltd.
- Tsoufanidis, N. (1983). *Measurement and Detection Radiation*. New York: Hemisphere Publishing Corporation.
- Wehr, M.R., Richard, J.A. & Adair, T.W. (1989). *Physics of The Atom*. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company.