

PENGANTAR FISIKA INTI

Penyelidikan tentang fisika inti berpusat di sekitar dua masalah utama. Pertama, upaya untuk memahami sifat-sifat gaya yang mengikat inti atom. Kedua, upaya untuk menjelaskan kelakuan sistem banyak partikel, seperti inti atom. Kedua masalah ini saling terkait, sifat-sifat sistem banyak partikel sebagian besar dijelaskan melalui gaya yang mengikat partikel bersama-sama.

Buku ini mencakup pembahasan susunan inti, sifat-sifat inti, gaya nuklir, energi ikat inti, radioaktivitas, peluruhan, reaksi inti, fisi dan fusi serta pada setiap pembahasan suatu bab diberikan latihan soal. Penyajian pembahasan yang sederhana dan tanpa menghilangkan konsep-konsep dasar yang ada dalam fisika inti dimaksudkan agar mudah dipahami dan terpenuhinya kebutuhan akan buku-buku sains berbahasa Indonesia.

PENGANTAR FISIKA INTI

Andi Ichsan Mahardika
Muh. Arifuddin Jamal



PT REVKA PETRA MEDIA
Jl. Pucang Anom Timur no.5 Surabaya
Telp. 031-5051711 ; Fax. 031-5016848
e-mail: revkapetra.media@yahoo.com

ISBN 978-602-3362-79-8



9 786021 162798



PENGANTAR FISIKA INTI

Andi Ichsan Mahardika
Muh. Arifuddin Jamal

PRAKATA

Alahamdulillahrabbi'lalamin, segala puji hanya milik Allah Azza wa jalla, Rabb semesta alam. Penulis panjatkan kehadiran-Nya yang telah memberikan limpahan rahmat, karunia dan kekuatan sehingga Buku “*Pengantar Fisika Inti*” ini dapat selesai dengan baik. Salam dan salawat senantiasa penulis haturkan kepada Rasulullah Muhammad Sallallahu ‘Alahi Wassallam sebagai satu-satunya uswa dan qudwah dalam menjalankan aktivitas keseharian di atas permukaan bumi ini, juga kepada keluarga beliau, para sahabatnya, dan orang-orang mukmin yang senantiasa istiqomah meniti jalan hidup ini, hingga akhir zaman dengan Islam sebagai satu-satunya agama yang diridhai Allah Azza wa jala.

Kebutuhan akan buku-buku sains berbahasa Indonesia bagi kalangan mahasiswa dirasakan masih kurang. Menyikapi kondisi tersebut, penulis memberanikan untuk menulis buku ini dengan sederhana agar mudah dipahami dan tanpa menghilangkan konsep-konsep dasar yang ada dalam fisika inti.

Buku ini mencakup pembahasan susunan inti, sifat-sifat inti, gaya-gaya nuklir, energi ikat inti, radioaktivitas, peluruhan, reaksi inti dan fisi dan fusi. Pada setiap akhir pembahasan suatu bab diberikan latihan soal.

Penulis menyadari sedalam-dalamnya bahwa buku ini, terwujud berkat uluran tangan dari insan-insan yang telah digerakkan hatinya oleh

E.	Hubungan antara Jumlah Atom dengan Massa Atom	71
F.	Deret Peluruhan Radioaktif	71
G.	Keseimbangan Radioaktif	76
H.	Soal Latihan	77
BAB VI	PELURUHAN	79
A.	Mekanisme Peluruhan	79
B.	Hukum Kekekalan dalam Peluruhan	83
C.	Energi Peluruhan	86
D.	Soal Latihan	92
BAB VII	REAKSI INTI	93
A.	Reaksi Inti	93
B.	Notasi Reaksi Inti	94
C.	Transmutasi oleh Partikel Penembak	95
D.	Keseimbangan Massa dan Energi dalam Reaksi Inti	97
E.	Penampang Lintang Reaksi Inti	100
F.	Soal Latihan	101
BAB VIII	FISI DAN FUSI NUKLIR	103
A.	Fisi Nuklir	103
B.	Fusi Nuklir	112
C.	Soal Latihan	116
DAFTAR PUTAKA		117
APENDIKS		119

BAB I SUSUNAN INTI

A. Pendahuluan

Penyelidikan tentang fisika inti berpusat di sekitar dua masalah utama. Pertama, upaya untuk memahami sifat-sifat gaya yang mengikat inti. Kedua, upaya untuk menjelaskan kelakuan sistem banyak partikel, seperti inti tersebut. Kedua masalah ini saling terkait, sifat-sifat sistem banyak partikel sebagian besar dijelaskan melalui gaya yang mengikat partikel bersama-sama.

Perkembangan awal fisika inti didahului oleh penemuan Bequerel (1896) terhadap gejala radioaktivitas. Temuan tersebut membuat Bequerel dihargai secara meluas dengan penemuannya. Ini terjadi ketika dia mengamati penghitaman secara tiba-tiba dari suatu plat fotografi yang berdekatan dengan suatu mineral tertentu. Pierre dan Marie Curie (1898) berhasil memisahkan secara kimiawi bahan radioaktif (radium) dari *pitchblende* (bijian uranium). Pemahaman terbaik tentang radioaktivitas diperkaya oleh Rutherford dan rekan-rekan kerjanya. Mereka mengusulkan bahwa radioaktivitas akan menghasilkan suatu perubahan jenis bahan kimia (1903) dan menyelidiki secara mendalam tentang radiasi alam. Ada tiga jenis radiasi yang ditemukan, disebut alfa, beta dan gamma. Mereka juga menunjukkan bahwa radiasi alfa terdiri dari atom-atom helium terionisasi (inti atom helium), hal ini sesuai dengan interpretasi Rutherford tentang percobaan hamburan partikel-alfa dari Geiger dan Marsden (1909). Beberapa hal penting dalam sejarah perkembangan fisika inti ditampilkan dalam Tabel 1.1.

Tabel 1.1. Beberapa hal penting dalam perkembangan fisika inti

➤ Penemuan Radioaktifitas (Becquerel)	1896
➤ Model Atom Rutherford	1911
➤ Penemuan isotop (J.J. Thomson)	1912
➤ Penyebab transmudasi inti (Rutherford)	1919
➤ Penerapan mekanika kuantum pada radioaktivitas :	
- Peluruhan α (Gamow, Gurney dan Condon)	1928
- Peluruhan β (Fermi)	1934
➤ Penemuan neutron (Chadwick)	1932
➤ Hipotesis n-p (Heisenberg)	1932
➤ Penemuan Positron (Anderson)	1932
➤ Peran meson pada gaya inti (Yukawa)	1935
➤ Penemuan μ meson (Anderson & Neddermeyer)	1936
➤ Penemuan π meson (Powell)	1946
➤ Ketidakpastian paritas (ketidakseimbangan) dalam peluruhan beta (Lee & Yong)	1956

Rutherford (1911) telah mendemonstrasikan bahwa eksperimen hamburan dapat dijelaskan hanya dengan menganggap sebuah atom dalam jumlah besar, inti bermuatan positif, diameternya ($\approx 10^{-12}$ cm) jauh lebih kecil dari diameter atom ($\approx 10^{-8}$ cm), dikelilingi oleh elektron.

Seluk beluk tentang inti menjadi lebih jelas setelah neutron ditemukan oleh Chadwick (1932), disusul hipotesis Heisenberg (1932) yang mengatakan bahwa inti terdiri dari proton dan neutron. Pada saat itu juga, dibuat percobaan untuk memahami gaya inti. Secara

eksperimen gaya yang ditemukan itu jauh lebih kuat dari pada gaya yang telah diketahui sebelumnya, seperti gaya listrik atau gaya gravitasi, dan juga memiliki jangkauan yang sangat pendek. Merujuk saran yang dikemukakan oleh Heisenberg bahwa gaya inti disebabkan oleh pertukaran partikel di antara nukleon inti, Yukawa (1935), menunjukkan bahwa partikel perantara cukup berat, lebih berat dibandingkan elektron dan cukup ringan dibandingkan dengan proton, dengan teori ini maka ciri-ciri utama gaya inti dapat dijelaskan. Partikel ini selanjutnya disebut meson, yang kemudian ditemukan dalam radiasi kosmis.

B. Susunan Inti

Sebelum membahas tentang struktur/ susunan inti, kita lihat dulu persamaan dan perbedaannya dengan struktur elektron dalam atom. Elektron-elektron tersusun dalam orbit-orbit, energi di tiap keadaan (*states*) lebih akurat, berlaku hukum-hukum mekanika kuantum. Pada tiap-tiap atom, elektron terdistribusi dalam beberapa *state* (keadaan) sebagaimana prinsip larangan Pauli. Elektron-elektron dapat dieksitasi ke keadaan yang lain atau dilepaskan dari atom. Dari fenomena ini kita dapat menyimpulkan struktur elektron dari atom.

Pada inti ada dua kelompok partikel, proton dan neutron. Proton bermuatan positif dan neutron bermuatan netral. Oleh karena itu inti bermuatan positif karena hanya proton yang memberi sumbangan muatan pada inti. Proton adalah partikel subatomik dengan muatan positif sebesar $1,6 \times 10^{-19}$ Coulomb dan massa $938 \text{ MeV}/c^2$ ($1,6726231 \times 10^{-27}$ kg, atau sekitar 1836 kali massa sebuah elektron).

Suatu atom biasanya terdiri dari sejumlah proton dan neutron yang berada di bagian inti atom, dan sejumlah elektron yang mengelilingi inti tersebut. Dalam atom bermuatan netral, banyaknya proton akan sama dengan jumlah elektronnya. Banyaknya proton di bagian inti biasanya akan menentukan sifat kimia suatu atom. Pada keadaan individual proton tidak dapat meluruh (sangat stabil).

Neutron adalah partikel subatomik yang tidak bermuatan (netral) dan memiliki massa $940 \text{ MeV}/c^2$ ($1,6749 \times 10^{-27} \text{ kg}$, sedikit lebih berat dari proton) dengan spinnya adalah $\frac{1}{2}$. Inti atom dari kebanyakan atom terdiri dari proton dan neutron. Di luar inti atom, neutron tidak stabil dan memiliki waktu paruh sekitar 10 menit, meluruh dengan memancarkan elektron dan antineutrino untuk menjadi proton. Partikel-partikel dalam inti atom adalah neutron dan proton, yang berubah menjadi satu dan lainnya dengan pemancaran dan penyerapan pion. Sebuah neutron diklasifikasikan sebagai baryon dan terdiri dari dua quark bawah dan satu quark atas. Perbedaan utama dari neutron dengan partikel subatomik lainnya adalah mereka tidak bermuatan. James Chadwick pada tahun 1932 melakukan penelitian dengan menembak logam berilium menggunakan sinar alfa. Hasil penelitian menunjukkan bahwa suatu partikel yang tak bermuatan dilepaskan ketika logam berilium ditembak dengan sinar alfa dan partikel ini disebut sebagai neutron.

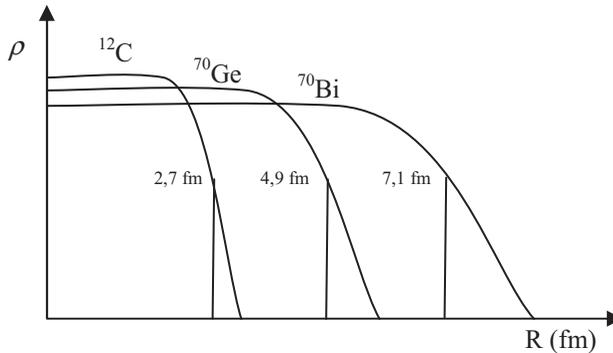
Fakta-fakta menunjukkan bahwa kedua kelompok ini terdistribusi secara terpisah dengan tingkat energi tertentu tunduk pada prinsip larangan Pauli. Inti dapat dalam keadaan dasar dan keadaan tereksitasi,

atau, bila didefinisikan suatu konstan pembanding R_0 , maka:

$$R = R_0 A^{1/3} \quad (2.1)$$

R = jari-jari inti

$R_0 \cong 1,2 \times 10^{-15}$ m atau 1,2 fm (jari-jari inti atom Bohr).



Gambar 2.1. Ketergantungan rapat inti pada jarak radial

Keterangan: ρ = kerapatan inti

R = jari-jari inti

Pada dasarnya tetapan R_0 harus ditentukan dari percobaan, seperti percobaan hamburan partikel-partikel bermuatan dari inti atom guna menarik kesimpulan mengenai jari-jari inti atom dari distribusi partikel yang terhambur. Dari percobaan seperti itu diketahui bahwa nilai R_0 sekitar $1,2 \times 10^{-15}$ m (Nilai R_0 biasanya berada pada rentang $1,0 \times 10^{-15}$ m hingga $1,5 \times 10^{-15}$ m).

Tinjauan jari-jari inti atom dapat digunakan untuk menguji hipotesis inti atom proton-elektron. Jari-jari inti yang biasanya dijumpai sekitar 5×10^{-15} m. Untuk membatasi partikel dalam daerah sekecil itu,

menurut asas ketidakpastian momentum partikel,

$$\Delta p \geq \frac{\hbar}{2\Delta x} \geq \frac{1,054 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}}{2 \times 5 \times 10^{-15} \text{ m}}$$

$$\Delta p \geq 1,1 \times 10^{-20} \text{ kg}\cdot\text{m/s}$$

Jika nilai ini merupakan ketidakpastian dari momentum elektron dalam inti, maka momentumnya p harus berorde besar, paling tidak sama dengan nilai tersebut. Elektron dengan momentum sebesar itu memiliki energi kinetik jauh lebih besar dari energi diam m_0c^2 , sehingga dapat diambil $K = pc$ dengan ketelitian yang cukup. Jadi

$$\begin{aligned} K = pc &\geq (1,1 \times 10^{-20} \text{ kg}\cdot\text{m/s}) \times (3 \times 10^8 \text{ m/s}) \\ &= 3,3 \times 10^{-12} \text{ J} \end{aligned}$$

Karena $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$, energi kinetik elektron dalam satuan MeV harus melebihi 20 MeV supaya elektron menjadi partikel dalam inti. Eksperimen menunjukkan bahwa biarpun untuk elektron yang terkait dengan atom tak stabil (peluruhan beta) tidak pernah memiliki setengah dari energi 20 MeV (sekitar 2 atau 3 MeV), sehingga dapat disimpulkan *tidak terdapat elektron dalam inti atom.*

C. Massa Inti

Sebagian besar massa atom terletak di inti, hal ini dikarenakan massa elektron sangat kecil dibandingkan dengan massa proton ($m_p \approx 2000 m_e$), sehingga massa elektron sering diabaikan dalam pembicaraan massa sebuah atom.

Massa atom ditetapkan *sma* (satuan massa atom) atau *amu* (atom mass unit, disimbolkan u) yang didefinisikan sebagai:

$$1 \text{ atom mass unit } (u) = \frac{1}{12} \text{ massa isotop karbon-12 } ({}^{12}_6\text{C})$$

Jadi massa isotop ${}^{12}_6\text{C}$ tepat sama dengan 12 u , dengan 1 $u = 1,660566 \times 10^{-27}$ kg. Satu proton atau neutron memiliki massa kira-kira 1 u . Elektron memiliki massa hanya sebagian kecil dari 1 u .

$$\text{massa proton} = 1,007276 u$$

$$\text{massa neutron} = 1,008665 u$$

$$\text{massa elektron} = 0,000549 u$$

Telah kita ketahui bahwa energi diam sebuah partikel dinyatakan oleh $E = mc^2$, sehingga kita dapat menyatakan massa atom dalam energi ekuivalen. Ahli-ahli nuklir sering menyatakan satuan massa dalam MeV/c^2 , dengan 1 $u = 1,660566 \times 10^{-27} \text{kg} = 931,50 \text{ MeV}/c^2$. Untuk dapat menalarakan massa inti (proton atau neutron), Tabel 2.1 berikut ini menunjukkan massa beberapa benda/ objek.

Tabel 2.1. Massa beberapa benda

Benda	Massa (Kg)
Semesta yang tampak	$\sim 10^{52}$
Galaksi Bima Sakti	7×10^{41}
Matahari	$1,99 \times 10^{30}$
Bumi	$5,98 \times 10^{24}$
Bulan	$7,36 \times 10^{22}$
Kuda	$\sim 10^3$
Manusia	$\sim 10^2$
Katak	$\sim 10^{-1}$
Nyamuk	$\sim 10^{-5}$
Bakteri	$\sim 10^{-15}$
Atom hidrogen	$1,67 \times 10^{-27}$
Elektron	$9,11 \times 10^{-31}$

Tetapan yang sering dijumpai dalam kajian atom ataupun inti atom adalah c^2 . Dengan menggunakan $E = mc^2$, buktikanlah bahwa $c^2 = 931,5 \text{ MeV/u}$!

Jumlah nukleon dalam inti menentukan besarnya massa suatu inti dan juga menjadi pengelompok jenis-jenis inti. Terdapat tiga jenis inti, ketiga jenis inti tersebut adalah:

1. Isotop adalah inti yang memiliki nomor atom sama tapi nomor massa berbeda.

Contohnya: ${}^1_1\text{H}$, ${}^2_1\text{H}$, ${}^3_1\text{H}$

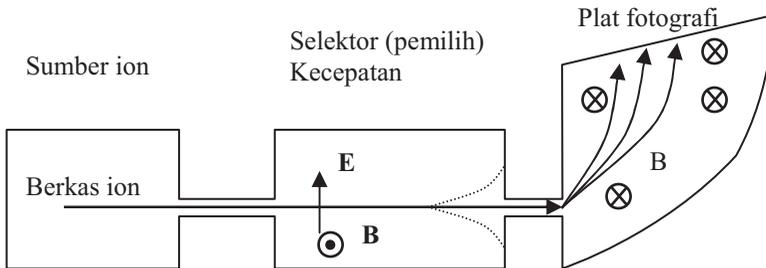
2. Isobar adalah inti yang memiliki nomor massa sama namun berbeda nomor atomnya.

Contohnya: ${}^{14}_6\text{C}$, ${}^{14}_7\text{N}$

3. Isoton adalah inti yang memiliki jumlah neutron yang sama.

Contohnya: ${}^{13}_6\text{C}$, ${}^{14}_7\text{N}$

Massa-massa inti dapat diukur dengan ketelitian tinggi dengan analisis reaksi-reaksi inti atau menggunakan alat pengukur massa inti yang disebut “spektrometer massa” atau “spektrograf massa”.



Gambar. 2.2. Skema spektrograf massa

Sebuah sumber ion menghasilkan seberkas ion dengan distribusi kecepatan termal v . Berkas ion ini dilewatkan pada sebuah selektor kecepatan. Selektor kecepatan hanya melewatkan ion-ion dengan kecepatan tertentu, sedangkan yang lain akan dibelokkan seperti Gambar 2.2. Dalam selektor kecepatan, medan \mathbf{E} menyebabkan gaya $q\mathbf{E}$ yang membelokkan ion ke atas, dan medan \mathbf{B} menimbulkan gaya ke bawah sebesar $qv\mathbf{B}$. Ion yang tak terbelokkan (dapat melewati selektor kecepatan) jika memiliki gaya seimbang, dalam hal ini,

$$q\mathbf{E} = qv\mathbf{B}$$

$$v = \frac{\mathbf{E}}{\mathbf{B}} \quad (2.2)$$

Komponen terakhir adalah pemilih (selektor) momentum. Dalam selektor ini ion akan dibelokkan ke plat fotografi oleh medan magnet uniform (homogen) berdasarkan momentum yang dimilikinya. Besar momentum ini menunjukkan massa dari ion tersebut, sehingga diperoleh dari keseimbangan gaya magnet dan gaya sentripetal,

$$\begin{aligned} \text{Gaya sentripetal,} & \quad \mathbf{F}_s = m \frac{v^2}{r} \\ \text{Gaya magnet,} & \quad \mathbf{F}_B = qv\mathbf{B} \\ \text{Untuk} & \quad \mathbf{F}_s = \mathbf{F}_B \\ & \quad m \frac{v^2}{r} = qv\mathbf{B} \end{aligned}$$

Sehingga diperoleh besarnya momentum,

$$\begin{aligned} mv & = q\mathbf{B}r \\ r & = \frac{mv}{q\mathbf{B}} \end{aligned} \quad (2.3)$$

dengan:

r = radius lintasan yang ditentukan oleh momentum tersebut

dari Persamaan 2.2 dan Persamaan 2.3 diperoleh :

$$m = \frac{qrB^2}{E} \tag{2.4}$$

dengan: m = massa ion (isotop)

D. Spin Inti

Pada pengamatan peristiwa pembentukan garis-garis spektrum (struktur halus dan struktur hiperhalus) disebabkan oleh adanya interaksi antara momentum sudut total \mathbf{L} dengan momen magnetik inti. Karena momen magnetik inti sebanding dengan momentum sudutnya, maka untuk beberapa inti atom harus mempunyai momentum sudut intrinsik yang dikenal dengan spin inti \mathbf{I} .

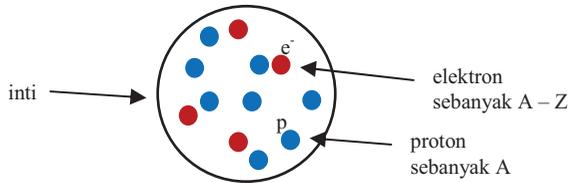
$$\text{Spin Inti} = I \frac{h}{2\pi} = I\hbar$$

dengan: $I = 0, 1, 2, 3,$ untuk A genap

$I = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2},$ untuk A ganjil

Spin proton $\frac{1}{2}\hbar$, sama dengan elektron.

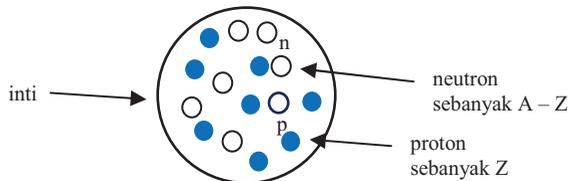
Tinjauan spin inti atom dapat digunakan untuk menguji hipotesis inti atom proton-elektron. Sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya bahwa proton dan elektron merupakan partikel dengan spin $\frac{1}{2}$, ini berarti momentum sudutnya $\frac{1}{2}\hbar$. Jadi inti dengan jumlah proton ditambah jumlah elektron yang genap harus memiliki spin bilangan bulat, sedangkan inti dengan jumlah proton dan elektron yang ganjil harus memiliki spin setengah bilangan bulat.



Gambar 2.3. Model inti atom sampai tahun 1932

Sebagai contoh, nuklida nitrogen dengan $A = 14$ ($^{14}_7\text{N}$) terdiri dari 14 proton dan 7 elektron atau 21 partikel seluruhnya. Proton dan elektron masing-masing berspin $\frac{1}{2}$. Sehingga menurut hipotesis proton-elektron, mestinya ia mempunyai spin pecahan dari \hbar tapi ternyata spin ^{14}N , $I = 1$. Hal ini kontradiksi dengan hasil yang diharapkan. hal ini juga yang menyebabkan *gugurnya hipotesis proton-elektron* tersebut.

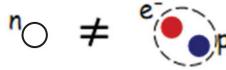
Jika kembali meninjau spin inti dari susunan inti proton dan neutron, maka model sederhana yang dapat diterima sebagai berikut:



Gambar 2.4. Model inti atom yang dapat diterima

Inti atom terdiri dari proton dan neutron. Jumlah proton merupakan nomor atom Z muatan inti sebesar muatan total proton ($+Ze$). Jumlah proton Z dan neutron N merupakan nomor massa ($A = Z + N =$ jumlah nukleon). Dari contoh di atas, misalnya ^{14}N terdiri dari 7 proton ($Z = 7$) dan neutron ($N = 7$).

Neutron berspin $\frac{1}{2}$, maka dengan model ini spin ^{14}N dapat dijelaskan bahwa kombinasi spin 14 partikel berspin $\frac{1}{2}$ dapat menghasilkan bernilai 1.



Gambar 2.5. Neutron tidak berasal dari proton dan elektron
Neutron bukan obyek netral hasil pasangan proton dan elektron. Partikel netral seperti itu tidak mungkin berspin $\frac{1}{2}$, tetapi 0 atau 1.

1. Momen magnet

Sumber kemagnetan inti adalah gerakan orbital proton (partikel bermuatan listrik) dalam inti (ingat, kemagnetan ditimbulkan oleh arus listrik = muatan listrik yang bergerak), sifat magnetik intrinsik nukleon akibat spin.

Untuk momen magnet nukleon (momentum sudut spin), masing-masing untuk proton dan neutron adalah:

$$\text{Proton: } \vec{\mu}_p = g_p \frac{e\hbar}{2M_p c} \vec{S} \text{ (S dalam satuan } \hbar \text{)}$$

$$g_p = \text{faktor gyromagnetik} = 5,59$$

$$\text{Neutron: } \vec{\mu}_n = g_n \frac{e\hbar}{2M_n c} \vec{S} \text{ (S dalam satuan } \hbar \text{)}$$

$$g_n = -3,83$$

Jika g (+), berarti μ sejajar dan searah (paralel) dengan arah S ; jika g (-), hal ini berarti bahwa μ sejajar tetapi berlawanan (anti-paralel)

arah dengan S. Momen magnetik biasa dinyatakan dalam satuan magneton Bohr (momen magnet elektron):

$$\begin{aligned}\mu_B &= \frac{e\hbar}{2m_e c} \\ &= 0,92 \times 10^{-20} \text{erg/gauss} \\ &= 9,27 \times 10^{-24} \text{J/T}\end{aligned}$$

Selanjutnya momen magnet Bohr untuk proton disebut juga momen magnet nuklir (inti) yang besarnya,

$$1 \text{ magneton nuklir} = \mu_N = \frac{e\hbar}{2M_p C} = 5,049 \times 10^{-24} \text{ erg/gauss}$$

$$\mu_N = \text{magneton inti}$$

nilai magneton inti jika dibandingkan dengan momen magnet elektron sekitar 1/1837 dari momen magnet elektron.

Tinjauan momen magnet inti atom dapat digunakan untuk menguji hipotesis inti atom proton-elektron. Dari tinjauan momen magnet proton dan momen magnet elektron, terlihat bahwa momen magnet elektron jauh lebih besar jika dibandingkan dengan momen magnet proton, sehingga momen magnet inti harus berorde sama dengan momen magnet elektron jika berada di inti ($\sim 10^{-20}$ erg/gauss). Namun, momen magnetik inti yang teramati hampir sama dengan momen magnet proton bukan dengan momen magnet elektron, suatu penyimpangan yang tidak dapat dimengerti jika benar elektron sebagai penyusun inti atom. Tinjauan ini juga menggugurkan hipotesis proton-elektron sebagai salah satu partikel penyusun inti atom.

2. Momentum sudut dan paritas inti

Tiap nukleon mempunyai momentum sudut total i , sesuai dengan arahnya, di mana,

$$i = l \pm s$$

dengan: l = momentum sudut orbital

s = momentum sudut spin

untuk inti yang memiliki lebih dari satu partikel, maka momentum sudut totalnya adalah

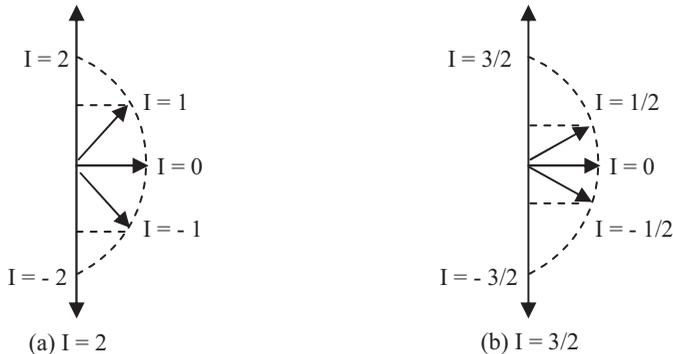
$$\mathbf{I} = \mathbf{L} \pm \mathbf{S}$$

dengan: \mathbf{L} = momentum sudut orbital total

\mathbf{S} = momentum sudut spin total

\mathbf{I} pada dasarnya vektor, ditandai dengan r dan nilai skalar I didefinisikan sebagai komponen maksimum yang mungkin dari \mathbf{I} dalam arah yang dimaksud.

Contoh:



Gambar 2.6. Kuantisasi nilai momentum sudut suatu inti, digambarkan untuk kasus $I = 2$ dan $I = 3/2$

Bersama dengan spin inti, paritas juga digunakan untuk menjelaskan keadaan inti. Paritas dapat dinyatakan bernilai + (genap) atau - (ganjil). Jika mengetahui fungsi gelombang setiap nukleon, penentuan paritas inti diperoleh dengan mengalikan antar paritas setiap nukleon, dengan hasil π apakah + atau -; $\pi = \pi_1\pi_2\dots\pi_4$. Namun hal ini bukanlah hal yang mungkin dilakukan. Sebagaimana dengan spin **I**, paritas π merupakan sifat dari seluruh nukleon pada suatu inti. Paritas disimbolkan + atau - pada pangkat spin inti, seperti \mathbf{I}^π , seperti 0^+ , 2^- , $\frac{1}{2}^+$. Penentuan spin dan paritas inti akan dijelaskan lebih lanjut pada Bab IV.

E. Kestabilan Inti

Salah satu sifat menakutkan dari beberapa inti atom adalah kemampuan mereka untuk bertransformasi sendiri secara spontan dari suatu inti dengan nilai Z dan N tertentu ke inti lainnya. Beberapa inti atom lainnya stabil, dalam arti mereka tidak meluruh ke inti atom yang berbeda. Biasanya, untuk tiap nilai Z (isotop) terdapat satu atau dua inti stabil (lihat tabel sifat-sifat inti atom 'Apendiks A'). Inti lainnya, dengan nilai Z yang sama tidaklah stabil sehingga akan mencapai proses peluruhan hingga mencapai kestabilan inti.

Perbandingan jumlah neutron terhadap jumlah proton dalam inti atom menentukan kestabilan inti. Sebagai contoh: isotop oksigen, misalnya: ${}_8\text{O}^{16}$, ${}_8\text{O}^{15}$, ${}_8\text{O}^{18}$ memiliki jumlah neutron yang berbeda.

$${}_8\text{O}^{16}, \quad \frac{N}{Z} = \frac{8}{8} = 1 \text{ (stabil)}$$

$${}_8\text{O}^{15}, \quad \frac{N}{Z} = \frac{7}{8} = 0,875 \text{ (tidak stabil)}$$

$${}^8\text{O}^{18} \quad \frac{N}{Z} = \frac{10}{8} = 1,25 \text{ (stabil)}$$

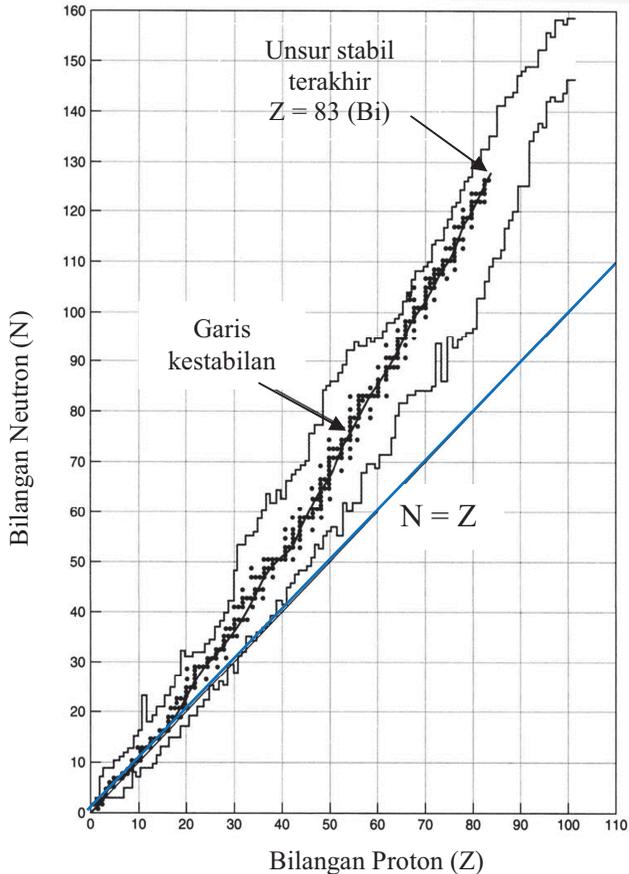
Berikut ini perbedaan umum antara inti stabil dan inti tidak stabil:

Tabel 2.2. Perbedaan inti stabil dan tidak stabil

Inti Stabil	Inti Tidak Stabil
<ul style="list-style-type: none"> • Tidak memancarkan radiasi secara spontan. • Umumnya perbandingan N/Z berada antara 1 – 1,4 	<ul style="list-style-type: none"> • Memancarkan radiasi partikel secara spontan. • Umumnya perbandingan N/Z < 1 atau N/Z > 1,4

Jika inti ringan dengan $\frac{N}{Z} > 1,4$, maka kestabilan inti dapat dicapai dengan mengeluarkan partikel β^- . Sebagai contoh inti atom karbon ${}^{15}_6\text{C}$ mengeluarkan sebuah partikel β^- untuk membentuk inti ${}^{15}_7\text{N}$. Hal ini disebabkan karena terjadi transformasi neutron menjadi proton (memperkecil nilai N/Z). Jika inti ringan dengan $\frac{N}{Z} < 1$, maka kestabilan inti dapat dicapai dengan mengeluarkan partikel β^+ atau penangkapan elektron orbit (ϵ). Sebagai contoh inti atom karbon ${}^{11}_6\text{C}$ mengeluarkan sebuah partikel β^+ ataukah menangkap elektron orbit ϵ untuk membentuk inti ${}^{11}_5\text{B}$. Hal ini disebabkan karena terjadi transformasi proton menjadi neutron (memperbesar nilai N/Z). (lebih lanjut akan dijelaskan pada mekanisme peluruhan β). Perbandingan nilai neutron dan proton dalam menentukan kestabilan inti juga dapat dilihat dari grafik kestabilan inti pada Gambar 2.7.

Jika inti berat dengan $\frac{N}{Z} > 1,6$, maka kestabilan inti dapat dicapai dengan mengeluarkan partikel α , sehingga inti kehilangan 2 proton dan dua neutron. (lebih lanjut akan dijelaskan pada mekanisme peluruhan α).



Gambar 2.7. Kurva yang memperlihatkan banyaknya neutron dan banyak proton untuk inti stabil

F. Soal Latihan

1. Hitunglah muatan inti atom ^{18}O , ^{19}F , ^{18}N , dan ^{78}Kr !
2. Hitunglah jari-jari inti atom dari soal no. 1!
3. Suatu berkas ion dimasukkan ke dalam sumber ion dari spektrograf massa yang diberi kuat medan listrik sebesar 10 N/m dan kuat medan magnet sebesar 5 weber/m². Bila jari-jari yang terbentuk pada plat fotografi adalah 9,0 nm, dan berkas tersebut berasal dari salah satu isotop karbon maka tentukanlah nomor massa isotop tersebut!
4. Tunjukkan bahwa hipotesis proton-elektron gagal menjelaskan spin inti ^{14}N !
5. Selidikit kestabilan inti atom ^{28}Al , ^{29}Si , ^{29}P dan ^{44}Ar !

BAB III GAYA NUKLIR

A. Gaya Nuklir

Pada ilmu fisika dikenal empat macam interaksi (empat gaya fundamental), yakni: interaksi gravitasi, interaksi elektromagnetik, interaksi nuklir, dan interaksi lemah. Gaya tarik menarik antara dua massa dikenal dengan gaya gravitasi. Gaya yang dialami oleh suatu benda muatan listrik dalam medan elektromagnetik di sebut gaya elektromagnetik. Gaya dengan interaksi lemah yang mengatur peluruhan beta disebut gaya lemah (interaksi lemah). Sedangkan gaya yang mengikat neutron dan proton dalam inti disebut gaya nuklir.

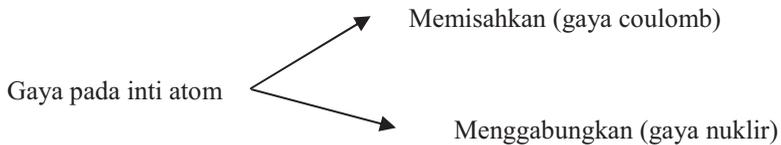
Perbandingan keempat macam gaya tersebut dengan acuan gaya nuklir diperlihatkan pada Tabel 3.1 sebagai berikut:

Tabel 3.1. Perbandingan besar interaksi gaya dalam fisika

Jenis Interaksi	Besar Interaksi Relatif
1. Gravitasi	10^{-39}
2. Elektromagnetik	10^{-2}
3. Nuklir	1
4. Lemah	10^{-13}

Gaya nuklir (gaya inti) atau gaya kuat adalah gaya yang berperan dalam penyatuan nukleon-nukleon dalam inti atom. Gaya ini harus sangat kuat karena proton-proton, yang bersama dengan neutron-neutron menyusun inti atom saling menolak. Sebagai partikel-partikel yang bermuatan sama (positif), proton-proton berusaha saling menjauhkan dari satu sama lain karena pengaruh gaya elektromagnetik di antara

proton-proton tersebut. Namun demikian di dalam inti atom, proton-proton yang saling menolak ini bukan hanya cukup berdekatan tetapi juga terikat bersama dengan kuat. Apapun yang mengikat proton-proton ini menjadi sebuah inti, merupakan gaya yang sangat kuat dibandingkan dengan gaya elektromagnetik yang menentanginya. Oleh sebab itu gaya nuklir ini disebut gaya kuat (*strong force*).



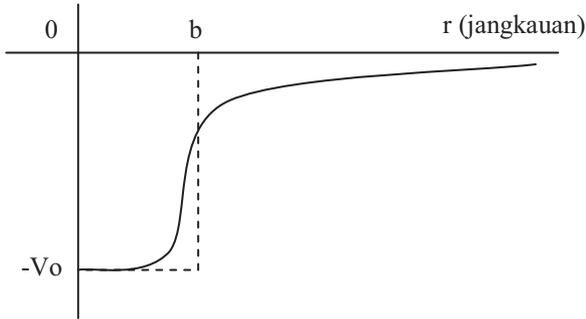
Gambar 3.1. Gaya yang terdapat pada inti atom

Besarnya gaya nuklir seratus kali lebih kuat daripada gaya elektromagnetik. Ini merupakan gaya terkuat yang pernah dikenal. Seperti gaya elektromagnetik, gaya ini menjadi gaya perekat pokok. Gaya elektromagnetik menyatukan atom-atom secara eksternal yang membentuk molekul-molekul, dan internal yang mengikat elektron-elektron tetap dalam orbit-orbitnya di sekeliling inti atom, sedangkan gaya nuklir menyatukan nukleon-nukleon pada inti atom.

B. Sifat-sifat Gaya Nuklir

1. Gaya nuklir berjangkauan pendek berlaku untuk intraksi partikel orde 10^{-15} m atau 1 fm.

Ada dua bukti utama mengenai jangkauan pendek dari gaya nuklir:



Gambar 3.2 Gaya tarik antara sebuah neutron dan sebuah proton sebagai fungsi r . Garis putus-putus mewakili potensial sumur persegi.

$$V(r) = \text{konstan } (-V_0) \quad ; \quad 0 < r < b$$

$$V(r) = 0 \quad ; \quad r > b$$

Berlaku persamaan:

$$b^2|V| = 1,02 \cdot 10^{-24} \text{ MeV cm}^2$$

- a. Berdasarkan kajian mengenai kerapatan inti. Penambahan nukleon pada inti atom tidak mengubah kerapatan inti. Ini menunjukkan bahwa tiap nukleon pada inti atom yang ditambahkan hanya merasakan gaya dari tetangga terdekatnya, dan tidak dari nukleon lain dari inti atom.
- b. Berdasarkan kajian energi ikat rata-rata. Karena energi ikat per rata-rata kurang lebih tetap, maka energi ikat total kurang lebih sebanding dengan A . Suatu gaya berjangkauan panjang (berjangkauan tidak hingga, misalnya seperti gaya elektromagnetik dan gaya gravitasi) memiliki energi ikat yang sebanding dengan A^2 . (Sebagai contoh, tolakan Coulomb total

antara proton dalam inti atom sebanding dengan $Z(Z-1)$, yaitu sekitar Z^2 untuk Z yang besar. Keadaan demikian karena tiap proton merasakan tolakan dari $(Z-1)$ proton lainnya. (penjelasan ini akan digambarkan dalam Bab IV).

2. Gaya nuklir tak bergantung pada muatan listrik. Interaksi antara proton-proton, neutron-neutron, dan neutron-proton adalah sama. Hal ini diperoleh dari hasil analisis hamburan proton-proton dan neutron-proton, saintis menyimpulkan bahwa bagian inti secara esensial sama untuk hamburan tersebut.

Kenyataan juga menunjukkan bahwa:

- a. Energi yang mengikat setiap nukleon secara aproksimasi konstan yang menunjukkan bahwa banyaknya proton yang bermuatan positif dan neutron yang netral tidak berpengaruh pada ikatan inti. Energi tersebut dibagi secara merata untuk tiap nukleon.
 - b. Inti ringan yang tersusun atas sejumlah proton dan neutron dalam jumlah yang sama dapat membentuk inti yang mantap. Sebagaimana dengan inti sedang dan inti berat yang mantap dengan jumlah proton dan neutron berbeda. Menunjukkan bahwa gaya yang mengikat proton-proton, neutron-neutron, dan neutron-proton adalah sama.
3. Gaya nuklir bergantung pada orientasi relatif dari spin nukleon-nukleon yang berinteraksi. Analisis tingkat energi nuklir dari eksperimen hamburan menunjukkan:

- a. Energi dari suatu sistem dua nukleon dengan spin inti yang paralel berbeda dari sistem spin anti paralel.
- b. Sistem neutron-proton merupakan keadaan terikat deuteron, di mana nukleon memiliki spin paralel ($s = 1$) tetapi keadaan demikian terlihat tidak ada jika spinnya anti-paralel ($s = 0$)
4. Gaya nuklir tidak seluruhnya sentral, tergantung dengan orientasi spin relatif terhadap garis yang menghubungkan dua nukleon.
5. Gaya nuklir memiliki suatu kerak repulsif.
 - a. Inti pada jarak yang sangat pendek \ll jangkauan, gaya nuklir menjadi repulsif.
 - b. Bukti yang menunjukkan bahwa terdapat kerak repulsif dalam inti atom adalah tidak runtuhnya nukleon-nukleon dalam inti atom karena gaya inti itu sendiri.

Pernyataan yang tepat untuk E_p interaksi nuklir dua nukleon belum diketahui dengan baik. H. Yukawa (1935) dengan potensial yukawanya mengusulkan.

$$E_p = -E_0 r_0 \frac{e^{-r/r_0}}{r}$$

dengan: E_0 = kekuatan interaksi
 r_0 = jangkauan gaya nuklir

C. Model Gaya Nuklir

Model yang berhasil menjelaskan asal usul gaya yang berjangkauan pendek ini adalah model gaya tukar (*exchange force*). Dalam teori fisika modern, gaya tarik menarik di antara dua partikel

dapat dipandang sebagai pertukaran gaya. Sebagai contoh, tinjaulah dua buah proton yang terpisah pada jarak dengan orde 10^{-8} cm. Mereka akan mengalami gaya Coulomb satu sama lain. Jika sebuah elektron ditempatkan di seberangnya, maka kedua proton akan tarik menarik oleh elektron. Keadaan ini menunjukkan bahwa gaya tarik ini cukup kuat untuk mengatasi gaya tolak dan dapat membentuk molekul $(\text{H}_2)^+$ stabil. Pada contoh ini sifat pertukaran gaya di antara kedua partikel adalah elektron.

Jika sebuah proton ketiga ditempatkan di seberang molekul $(\text{H}_2)^+$ maka sistem akan menjadi tidak stabil. Ini disebabkan oleh prinsip eksklusi Pauli. Pada tingkat energi terendah yakni tingkat 1s, kedua buah proton harus memiliki spin intrinsik anti paralel. Proton ketiga, yang ditempatkan dalam tingkat energi yang sama melanggar prinsip eksklusi Pauli. Jika proton tersebut ditempatkan pada tingkat energi yang lebih tinggi, maka jarak pisah rata-ratanya akan bertambah panjang dan pertukaran gaya yang terjadi sangat lemah. Dengan demikian pertukaran gaya mengalami keadaan saturasi.

Andaikan terdapat sebuah proton dan neutron dalam inti atom. Menurut model gaya tukar, neutron memancarkan sebuah partikel dan sekaligus menariknya dengan suatu gaya tarik yang kuat. Jika partikel tersebut menghampiri proton, ia akan tertarik pula oleh proton dengan suatu gaya tarik yang kuat, yang dapat cukup kuat untuk menyerapnya. Proton kemudian memancarkan pula sebuah partikel yang dapat diserap neutron. Karena proton dan neutron masing-masing menarik partikel

yang dipertukarkan tersebut dengan gaya tarik yang kuat, maka mereka tampak saling menarik melalui gaya kuat.

Yukawa pada tahun 1935 pertama kali mengusulkan adanya beberapa partikel berat yang dalam perkembangannya disebut π meson atau pion, yang sebenarnya dipertukarkan di antara dua nukleon dalam inti yang menyebabkan adanya energi ikat pada jangkauan yang sangat pendek. Meskipun pada mulanya Yukawa mengasumsikan bahwa hanya meson yang bermuatanlah yang dipertukarkan di antara nukleon, selanjutnya meson netral tercakup juga dalam teorinya. Keberadaan π^0 , π^- , π^+ diakui keberadaannya.

Bagaimana mungkin sebuah neutron dengan massa diam $m_n c^2$ memancarkan sebuah partikel dengan massa diam mc^2 dan tetap sebagai neutron, tanpa melanggar hukum kekekalan energi?. Jawabannya diberikan oleh asas ketidakpastian, $\Delta E \Delta t \sim \hbar$. Hanya dapat diketahui bahwa energi adalah kekal jika dapat diukur dengan pasti. Tetapi menurut asas ketidakpastian, kita tidak dapat mengukurnya lebih teliti daripada ketidakpastian ΔE dalam selang waktu Δt . Oleh karena itu, dapat “melanggar” hukum kekekalan energi sebesar ΔE dalam selang waktu $\Delta t = \hbar/\Delta E$ yang cukup singkat. Jumlah energi yang melanggar hukum kekekalan energi dalam model gaya tukar neutron-proton ini adalah mc^2 , yaitu energi diam partikel yang dipertukarkan. Dengan demikian, partikel ini hanya dapat hadir dalam selang waktu (dalam kerangka laboratorium):

$$\Delta t = \frac{\hbar}{mc^2}$$

Jarak terjauh yang dapat dicapai partikel ini dalam selang waktu Δt adalah $x = c \Delta t$, karena ia tidak dapat bergerak lebih cepat dari pada laju cahaya. Oleh karena itu, hubungan antara rentang gaya tukar dan massa partikel yang diperlukan adalah

$$x = c \Delta t = c \left(\frac{\hbar}{mc^2} \right)$$

atau

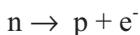
$$mc^2 = c \frac{\hbar}{x}$$

karena diketahui bahwa jangkauan gaya inti adalah sekitar 10^{-15} m, maka kita dapat menaksir energi diam partikel yang dipertukarkan tersebut, yaitu sekitar:

$$mc^2 = 200 \text{ MeV}$$

Partikel yang dipertukarkan ini tidak dapat berupa partikel nyata, karena pemancaran partikel oleh sebuah neutron akan menyebabkan neutron terpental ke belakang (menurut hukum kekekalan momentum), dan penyerapan partikelnya oleh proton akan menyebabkan proton terpental ke belakang. Dengan demikian, partikel ini harus berupa partikel virtual; jika pengamatan terhadap inti atom dengan lebih teliti, kita dapat melihat gaya tarik kuat antara neutron dan proton, tetapi tidak dapat melihat partikel virtual yang dipertukarkan. Jika inti atom ditumbuk cukup kuat dalam suatu reaksi inti, proyektil dapat menumbuk neutron atau proton sedemikian kuatnya sehingga memasok momentum pental, yang memperkenankan partikel virtual itu menjadi partikel nyata dan muncul dalam laboratorium. Apabila percobaan ini dilakukan, dengan menggunakan, misalnya, berkas proton

sebaliknya, sebuah proton menjadi neutron. Permasalahan yang kedua, dapat dijelaskan bahwa peluruhan beta pada hakikatnya merupakan konversi spontan dari neutron menjadi proton dan elektron, masalah tersebut dapat diatasi dengan menganggap bahwa elektron meninggalkan inti segera setelah elektron itu tercipta. Jadi elektron yang dipancarkan dalam peluruhan beta bukanlah elektron orbital. Juga bukan elektron yang semula berada dalam inti atom. Elektron yang hadir “diciptakan” oleh inti atom dari energi yang ada. Berdasarkan penjelasan ini, peluruhan beta yang menyangkut konversi neutron inti menjadi proton adalah:



persamaan reaksi konversi neutron menjadi proton dan elektron di atas tampak dapat menjelaskan hukum kekekalan muatan. Namun memunculkan permasalahan baru yakni tidak memenuhi hukum kekekalan momentum sudut. Telah diketahui bahwa neutron, proton dan elektron memiliki momentum sudut yang diperoleh dari bilangan kuantum spin yakni $\frac{1}{2}$. Karena spin masing-masing partikel adalah $\frac{1}{2}$ maka reaksi tersebut di atas tidak dapat terjadi jika spin (momentum sudutnya) harus kekal.

Untuk mengatasi ketidakkekalan momentum sudut, pada tahun 1930, Wolfgang Pauli mengusulkan bahwa pada peluruhan beta juga terpancar partikel kecil yang tidak bermuatan, massa yang sangat kecil (atau nol) dan berspin $\frac{1}{2}$. Partikel usulan Pauli disebut *neutrino* (berasal dari bahasa Italia yang berarti neutral kecil) dan anti partikelnya disebut antineutrino. Neutrino selanjutnya dilambangkan ν dan antineutrino

dilambangkan $\bar{\nu}$. Sehingga penyimpangan momentum sudut dapat diatasi dan persamaan reaksi untuk peluruhan beta menjadi,



Hipotesis neutrino ternyata berhasil, sehingga persamaan reaksi di atas merupakan *dasar proses peluruhan beta negatif*. Hal yang juga perlu dipahami dari neutrino dan antineutrino, bahwa sekalipun tidak memiliki massa diam dan tidak bermassa, partikel ini bukanlah foton karena neutrino dan antineutrino memiliki spin $\frac{1}{2}$ dan tidak memiliki sifat elektromagnetik sedangkan foton memiliki spin 1 dan merupakan partikel yang bertanggung jawab dalam sifat elektromagnetik.

Setelah dasar persamaan reaksi untuk peluruhan beta negatif jelas, maka besar energi peluruhan beta negatif untuk inti atom dapat ditentukan. Jika sebuah inti atom dengan Z proton dan N neutron meluruh ke inti atom lain dengan Z + 1 proton dan N - 1 neutron,



maka nilai Q untuk peluruhan ini adalah

$$Q_{\beta^{-}} = [m({}^A_ZX) - m({}^A_{Z+1}Y_{N-1}) - m_e] c^2 \quad (6.13)$$

dengan memperhitungkan nilai massa elektron, persamaan akhir untuk energi peluruhan beta negatif adalah,

$$Q_{\beta^{-}} = [M({}^A_ZX) - M({}^A_{Z+1}Y_{N-1})] c^2 \quad (6.14)$$

b. Peluruhan beta positif (β^+)

Persamaan umum peluruhan dengan pemancaran positron,



maka nilai Q untuk peluruhan ini adalah

$$Q_{\beta^+} = [m({}^A_Z X) - m({}^A_{Z-1} Y_{N+1}) - m_e]c^2 \quad (6.15)$$

Sehingga dengan memperhitungkan massa elektron,

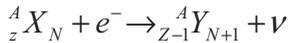
$$Q_{\beta^+} = [M({}^A_Z X) - M({}^A_{Z-1} Y_{N+1}) - 2m_e]c^2 \quad (6.16)$$

(buktikanlah dengan memperhitungkan nilai massa elektron)

ν = partikel neutrino (partikel tidak bermassa)

c. Penangkapan elektron (ϵ)

Persamaan umum peluruhan dengan penangkapan elektron,



maka nilai Q untuk peluruhan ini adalah

$$Q_{\epsilon} = [m({}^A_Z X) + m_e - m({}^A_{Z-1} Y_{N+1})]c^2 \quad (6.17)$$

Sehingga dengan memperhitungkan massa elektron,

$$Q_{\epsilon} = [M({}^A_Z X) - M({}^A_{Z-1} Y_{N+1})]c^2 \quad (6.18)$$

(buktikanlah dengan memperhitungkan nilai massa elektron)

3. Peluruhan gamma (γ)

Q (panas reaksi) yang dihasilkan biasanya digunakan untuk pancaran " γ " dan energi kinetik partikel terpancar dari inti turunan. Inti yang memancarkan α atau β biasanya masih memiliki energi lebih sehingga masih berada pada tingkat tereksitasi. Untuk mencapai tingkat dasar (kestabilan) maka inti turunan ini cenderung melepaskan sebagian energinya. Contoh: ${}_{84}^{210}\text{Po} \rightarrow {}_{84}^{210}\text{Po} + \gamma$

D. Soal Latihan

Carilah nilai Q untuk peluruhan:

1. Peluruhan α untuk (a) Bk-247; (b) Cf-251.
2. Peluruhan β^- untuk Ni-65
3. Peluruhan β^+ untuk C-10

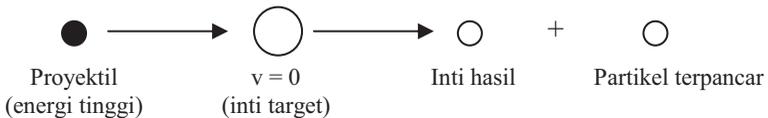
BAB VII REAKSI INTI

A. Reaksi Inti

Pada inti atom unsur radioaktif, inti meluruh menjadi inti lain yang lebih stabil. Peristiwa peluruhan tersebut mengubah inti atom dengan sendirinya tanpa dipengaruhi oleh faktor eksternal atau berlangsung secara alami. Sebenarnya, perubahan inti atom juga dapat dilakukan dengan cara menembakkan partikel-partikel yang mempunyai energi cukup sehingga berlangsung reaksi pada unsur yang ditembak. Reaksi yang terjadi dinamakan reaksi inti. Jadi reaksi inti atau reaksi nuklir adalah proses yang terjadi apabila partikel-partikel nuklir (nukleon atau inti atom) saling mengadakan kontak.

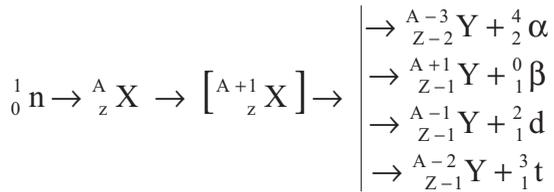
Reaksi inti jika ditinjau dari prosesnya maka dapat dibagi menjadi dua reaksi yaitu reaksi inti yang terjadi secara alamiah contohnya peristiwa peluruhan α , β , dan γ dan reaksi inti buatan yang terjadi karena penembakan inti suatu unsur oleh partikel tertentu seperti proton, α , neutron dan praktikal lainnya.

Perhatikan skema berikut:



Gambar 7.1. Skema reaksi inti

contoh:

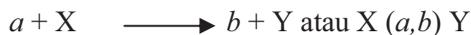


Pada reaksi inti, beberapa hal yang perlu diperhatikan adalah tetap berlakunya hukum kekekalan berikut ini,

1. Hukum kekekalan nomor massa
2. Hukum kekekalan nomor atom
3. Hukum kekekalan momentum
4. Hukum kekekalan energi dan massa

B. Notasi Reaksi Inti

Untuk energi penembakan inti di bawah 100 MeV, reaksi inti biasanya menghasilkan dua partikel hasil. Reaksi inti dinotasikan dengan :



dengan:

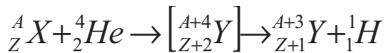
- a : proyektil (partikel penembak)
- b : partikel hasil (partikel terpancar/ ringan)
- X : target (dalam keadaan diam pada sistem laboratorium)
- Y : inti hasil reaksi (partikel berat)

Pada umumnya salah satu hasil reaksi adalah partikel ringan dan lainnya adalah berupa partikel berat. Dalam beberapa kasus b dan Y memiliki massa yang sebanding (reaksi spalasi atau fisi), atau b dan Y identik. Jika b adalah pancaran gamma maka disebut reaksi tangkapan, dengan Y berupa inti majemuk.

C. Transmutasi oleh Partikel Penembak

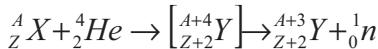
1. Transmutasi alfa-proton. Ada dua hipotesis,
 - a. Inti atom yang ditembak kehilangan proton.
 - b. Penangkapan partikel alfa dan membentuk inti compound.

Secara umum:



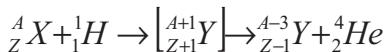
2. Transmutasi alfa-neutron

Secara umum:



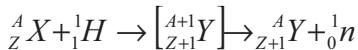
3. Transmutasi proton-alfa

Secara umum:



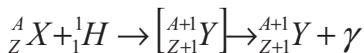
4. Transmutasi proton-neutron

Secara umum:



5. Transmutasi proton-gamma

Secara umum:



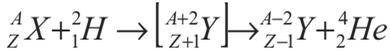
6. Transmutasi proton-deuteron

Secara umum:



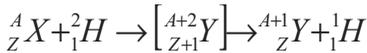
7. Transmutasi deuteron-alfa

Secara umum:



8. Transmutasi deuteron-proton

Secara umum:



9. Transmutasi deuteron-neutron

Secara umum:

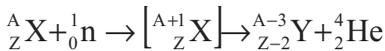


10. Transmutasi neutron

Neutron terbukti menjadi efektif khususnya dalam transmutasi inti. Terutama karena neutron:

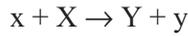
- Tidak bermuatan sehingga tidak menimbulkan gaya tolak menolak dengan muatan muatan positif tetangganya.
- Lebih cepat menembus inti dibanding dengan proton, deuteron dan partikel alfa.

Contoh transmutasi oleh neutron dengan inti alfa.



D. Keseimbangan Massa dan Energi dalam Reaksi Inti

Tinjau reaksi berikut $X(x,y)Y$:



di mana:

x = partikel penembak

X = inti target

Y = inti hasil

y = partikel hasil

Bila inti target mula-mula diam maka energi total reaksi, di mana E merupakan energi kinetik dan mc^2 merupakan energi diam. Sehingga diperoleh hubungan energi sebagai berikut:

$$(E_x + m_x c^2) + m_X c^2 = (E_Y + m_Y c^2) + (E_y + m_y c^2) \quad (7.1)$$

Selisih energi kinetik hasil reaksi dengan energi kinetik partikel penembak disebut energi keseimbangan reaksi atau panas reaksi atau lebih umum “nilai Q ” atau “ Q -value”

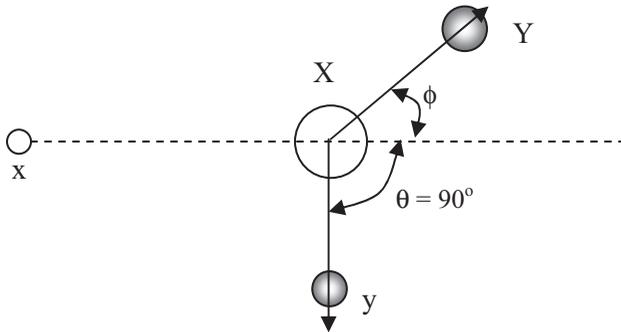
$$Q = E_Y + E_y - E_x \quad (7.2)$$

Substitusi Persamaan 7.1 ke Persamaan 7.2 diperoleh,

$$Q = [m_X + m_x - m_Y - m_y] c^2 \quad (7.3)$$

Jika nilai Q (+) reaksi yang terjadi merupakan reaksi eksoterm/ eksogernik sedangkan jika nilai Q (-) maka reaksi yang terjadi merupakan reaksi endoterm/ endogernik.

Tinjau kasus sederhana (khusus) di mana partikel hasil yang diamati pada sudut 90° terhadap arah partikel penembak,



Gambar 7.2. Skema reaksi inti dengan sudut pancaran tertentu

Kekekalan momentum dalam reaksi inti.

Momentum total pada sumbu-x dan y adalah,

$$m_x v_x = m_Y v_Y \cos \phi \quad (7.4)$$

$$m_y v_y = m_Y v_Y \sin \phi \quad (7.5)$$

di mana,

v_x = kecepatan partikel penembak.

v_y = kecepatan partikel hasil

v_Y = kecepatan inti hasil

ϕ = sudut antara sumbu x dan arah pantulan inti hasil.

Jika Persamaan 7.4 dan Persamaan 7.5 dikuadratkan dan dijumlahkan, maka diperoleh hasil

$$(m_x v_x)^2 + (m_y v_y)^2 = (m_Y v_Y)^2$$

karena $E_x = \frac{1}{2} m_x v_x^2$; $E_y = \frac{1}{2} m_y v_y^2$; $E_Y = \frac{1}{2} m_Y v_Y^2$ dan menghasilkan E_Y adalah,

$$E_Y = \frac{m_x}{m_Y} E_x + \frac{m_y}{m_Y} E_y \quad (7.6)$$

substitusi Persamaan 7.6 ke Persamaan 7.2 sehingga diperoleh:

$$Q = E_y \left(1 + \frac{m_y}{m_Y}\right) - E_x \left(1 - \frac{m_x}{m_Y}\right) \quad (7.7)$$

Nilai Q dapat ditentukan jika E_x dan E_y terukur dan diketahui, secara umum untuk sudut sembarang

$$Q = E_y \left(1 + \frac{m_y}{m_Y}\right) - E_x \left(1 - \frac{m_x}{m_Y}\right) - \frac{2}{m_Y} (E_x E_y m_x m_y)^{\frac{1}{2}} \cos \theta \quad (7.8)$$

untuk reaksi endogernik, diperlukan energi kinetik minimum partikel penembak yang disebut energi ambang (*threshold energy*, E_{th}), yaitu:

$$E_{th} = -Q \frac{m_x + m_x}{m_x} \quad (7.9)$$

dengan tetap mematuhi hukum kekekalan nomor massa dan nomor atom pada proses reaksi inti serta meninjau massa elektron, maka massa inti dapat diganti dengan massa atom sebagaimana yang telah dilakukan untuk memperoleh persamaan energi ikat inti sederhana pada Bab IV. Jadi pada persamaan-persamaan pada Bab ini, massa inti (m_x , m_x , m_y dan m_y) dapat diganti dengan massa atom (M_x , M_x , M_y dan M_y), seperti mengganti massa proton dengan massa atom ^1H dan massa partikel α diganti dengan massa atom ^4He .

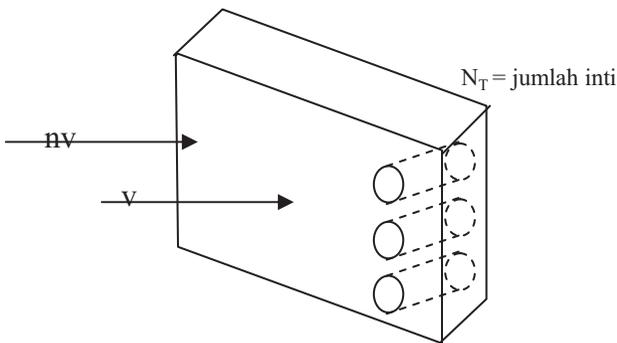
E. Penampang Lintang Reaksi Inti

Penampang lintang (*cross section*) adalah suatu besaran yang dapat diukur secara eksperimental dan dapat dihitung, secara teoritis dan secara eksperimental dapat dibandingkan. Penampang lintang disimbolkan dengan σ .

Konsep penampang lintang dapat lebih mudah divisualisasikan sebagai “daerah tampang lintang” dan “daerah target”. Jika inti dianggap bulat dengan radius R cm dan partikel penembak sebagai proyektil, maka tiap inti diberikan (secara kasar) oleh,

$$\sigma = \pi R^2 \text{ cm} \tag{7.10}$$

$$R = 1,5 A^{1/3} \cdot 10^{-13} \text{ cm.}$$



Gambar 7.3. Penampang lintang reaksi inti secara geometris

$$\text{Kerapatan permukaan inti} = N_T / A$$

Sebuah partikel secara normal melewati lempengan sampel tipis dengan luas A yang berisi N_T inti, mempunyai probabilitas $N_T \sigma / A$

bertumbukan dengan inti yang ada tanpa “overlap”. Penampang lintang dari inti tersebut adalah,

$$\sigma = \frac{\text{tumbukan per cm}^2 \text{ per sekon}}{nvNt} \quad (7.11)$$

F. Soal Latihan

1. Hitunglah energi dari reaksi inti ${}^6\text{Li} (p, \alpha) {}^3\text{He}$; dan reaksi inti ${}^{35}\text{Ce} (\alpha, n) {}^{38}\text{K}$!
2. Jika reaksi pada soal nomor 1 memiliki Q negatif, maka hitunglah energi ambangnya!
3. Lengkapilah reaksi di bawah ini dan hitunglah energi dari reaksi tersebut!
 - a. $(n, p) {}^{17}\text{O}$
 - b. ${}^{14}\text{C} (p, t) \dots$
4. Buatlah dua reaksi inti yang mungkin terjadi di mana inti partikel penembaknya adalah neutron dan inti hasil ${}^{38}\text{K}$!
5. Hitunglah energi dari reaksi inti no 4!

BAB VIII FISI DAN FUSI NUKLIR

A. Fisi Nuklir

Sesaat sebelum perang dunia kedua beberapa kelompok ilmuwan mempelajari hasil reaksi yang diperoleh jika uranium ditembak dengan neutron. Otto Hahn dan Strassman, berhasil mengisolasi suatu senyawa unsur golongan IIA, yang diperoleh dari penembakan uranium dengan neutron. Mereka menemukan jika uranium ditembak dengan neutron akan menghasilkan beberapa unsur menengah yang bersifat radioaktif. Reaksi ini disebut reaksi fisi atau reaksi pembelahan inti.



Gambar 8.1. Definisi dan sifat fisi nuklir

Fisi nuklir merupakan proses pembelahan inti berat menjadi dua atau lebih inti yang lebih ringan dengan melepaskan energi. Reaksi fisi merupakan salah satu reaksi nuklir yang paling praktis, umumnya pembentukan nukleus gabungan ketika nukleus dengan $A > 230$ menyerap neutron datang. Beberapa nukleus gabungan kemudian akan terpecah menjadi dua atau lebih potongan inti bermassa sedang dan neutron-neutron tambahan.

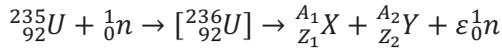
Reaksi pembelahan inti memperlihatkan bahwa setiap pembelahan inti oleh satu neutron menghasilkan dua sampai empat neutron. Setelah satu atom uranium-235 mengalami pembelahan, neutron hasil pembelahan dapat digunakan untuk pembelahan atom uranium-235 yang lain dan seterusnya sehingga dapat menghasilkan reaksi berantai. Agar pembelahan inti dapat menghasilkan reaksi berantai, bahan pembelahan ini harus cukup besar sehingga neutron yang dihasilkan dapat tertahan dalam cuplikan itu. Jika cuplikan terlampaui kecil, neutron akan keluar sehingga tidak terjadi reaksi berantai. Pembelahan inti selalu menghasilkan energi sekitar 200 MeV pada setiap pembelahan inti. Energi yang dihasilkan pada pembelahan 235 gram uranium-235 ekuivalen dengan energi yang dihasilkan pada pembakaran 500 ton batubara. Nilai 200 MeV diperoleh dari,

- a. 170 MeV adalah energi kinetik pecahan fisi
- b. 5 MeV adalah kombinasi energi kinetik neutron-neutron fisi
- c. 15 MeV adalah energi β^- dan sinar γ
- d. 10 MeV adalah energi neutrino atau antineutrino yang dibebaskan dalam peluruhan β^- dari potongan-potongan fisi.

Pada reaktor nuklir, jumlah fisi per satuan waktu dikontrol oleh penyerapan kelebihan neutron sehingga secara rata-rata, satu neutron dari setiap fisi menghasilkan fisi baru. Panas yang dibebaskan akan digunakan untuk membuat uap guna menggerakkan turbin dan membangkitkan tenaga listrik. Jika reaksi tersebut tidak terkontrol sehingga setiap fisi menghasilkan lebih dari satu neutron yang mampu menghasilkan fisi selanjutnya, maka jumlah fisi akan naik secara

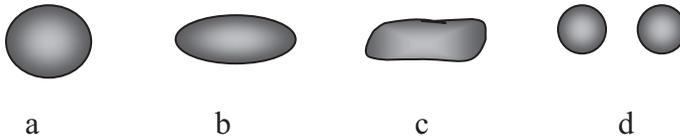
geometris, membuat seluruh energi sumber terlepas dalam interval waktu yang singkat, dan menghasilkan bom nuklir.

Bentuk umum reaksi fisi inti,



dengan $Z_1 + Z_2 = 92$, $A_1 + A_2 + \varepsilon = 236$, dan ε adalah sebuah bilangan bulat. Jumlah ε dari neutron yang dilepaskan dalam proses fisi unsur tertentu akan bergantung pada potongan-potongan akhir yang dihasilkan. Untuk reaksi di atas, rata-rata jumlah neutron yang dilepaskan dalam suatu fisi menurut eksperimen adalah sekitar 2,5; angka yang dihasilkan dari suatu rata-rata yang diambil alih oleh seluruh reaksi.

1. Proses pemisahan inti

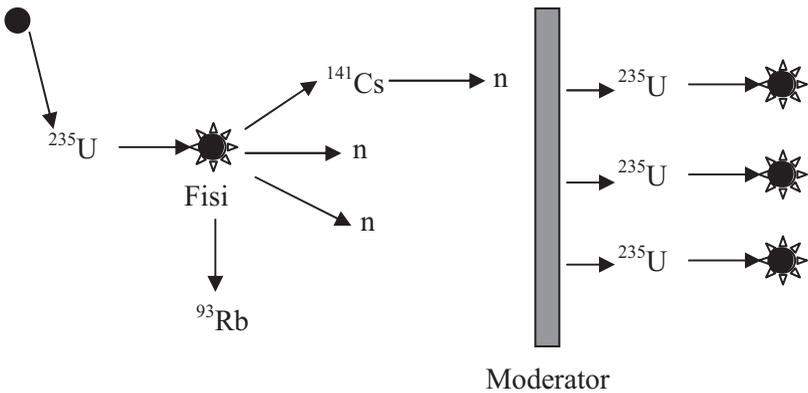


Gambar 8.2. Urutan perubahan bentuk inti pada fisi inti

- Inti diberi energi aktivasi untuk menjadi lonjong
- Terjadi vibrasi kolektif
- Energi eksitasi rendah terjadi “osilasi”
- Energi eksitasi besar inti terdeformasi

Suatu inti berat stabil ibarat setetes air, dengan bentuk keseimbangan agak sedikit melonjong seperti pada Gambar 8.2. Apabila inti itu diganggu, seperti menyerap sebuah neutron atau proton berenergi tinggi, tetesan inti bervibrasi. Bentuk inti berubah dengan cepat berulang kali dari bentuk yang lebih lonjong ke yang agak bundar. Bila inti tertarik ke bentuk yang sangat lonjong, energi tolakan Coulomb tidaklah banyak berubah, tetapi gaya inti melemah karena bertambahnya luas permukaan inti (semua nukleon pada permukaan inti berkurang kekuatannya). Dengan penarikan yang cukup kuat, bagian tengah tetesan inti menjadi hampir putus, hingga inti dengan mudah terbelah menjadi dua bagian oleh tolakan Coulomb, kedua bagian ini saling terdorong jauh sehingga fisi nuklir terjadi. Ukuran kedua pecahan fisi tidaklah tetap. Kemungkinan pecahan yang satu memiliki nomor massa sekitar 90 dan yang lainnya sekitar 140.

2. Digram dalam proses fisi nuklir



Gambar 8.3. Diagram proses pembelahan ^{235}U

Pada suatu proses fisi yang terjadi diperoleh,

- a. Neutron yang dihasilkan dapat melakukan fisi lanjut, dengan hasil pemancaran jumlah neutron yang makin banyak akan diikuti dengan lebih banyak fisi, dan seterusnya.
- b. Ada dua jenis neutron yang dihasilkan yakni neutron langsung dan neutron tunda. Neutron langsung merupakan neutron yang dipancarkan pada saat pemecahan fisi, sedangkan neutron tunda dipancarkan setelah terjadinya kerusakan pecahan-pecahan inti berat.
- c. Neutron yang dihasilkan dapat hilang sehingga diperlukan moderator. Moderator dapat berupa air biasa, air berat dan karbon.
- d. Tidak selalu tiga neutron yang muncul pada suatu proses fisi, secara rata-rata neutron yang dihasilkan $\pm 2,5$.
- e. Energi yang dibebaskan sekitar 200 MeV yang berasal dari 80% energi kinetik pecahan fisi dan 20% dari energi peluruhan.

3. Keistimewaan reaksi fisi nuklir

Beberapa hal yang membuat reaksi fisi nuklir menjadi reaksi inti yang istimewa yaitu:

- a. Sebagian besar energi yang dihasilkan sebagai energi kinetik pecahan fisi. Inti pecahan yang relatif berat ini tidak bergerak jauh dalam teras reaktor, karena saling bertumbukan dengan atom-atom bahan bakar teras reaktor, energi kinetik yang hilang menghasilkan panas, panas ini digunakan untuk mendidihkan

air kemudian menghasilkan uap untuk memutar turbin sampai akhirnya menghasilkan daya listrik.

- b. Jumlah neutron yang dihasilkan lebih dari satu, sehingga dapat menghasilkan fisi berantai.
- c. Satu-satunya reaksi nuklir yang dapat dikendalikan. Pengendalian fisi nuklir di teras reaktor pada prinsipnya adalah mengendalikan jumlah neutron yang dihasilkan agar tidak memicu ledakan nuklir karena jumlah neutron yang berlebih dalam menumbuk inti ^{235}U . Pengendalian dilakukan dengan menyisipkan bahan penyerap neutron ke dalam teras reaktor seperti cadmium yang memiliki penampang serap neutron yang tinggi.

4. Kekurangan fisi nuklir

Berapa kekurangan yang dimiliki reaksi fisi nuklir yang harus diatasi dalam pengambilan energinya adalah sebagai berikut:

- a. Satu-satunya inti yang secara alamiah baik untuk reaksi fisi adalah ^{235}U , tetapi dari batuan uranium di alam jumlahnya hanya 0,7% isotop ^{235}U sedangkan sisanya adalah ^{238}U jumlahnya 99,3%. Sedangkan ^{238}U tidak fisionable. Solusinya membuat reaktor pembiak yang digunakan untuk menghasilkan inti sebagai bahan bakar, seperti menghasilkan ^{239}Pu yang tidak terdapat di alam tetapi dapat dibuat pada reaktor pembiak.
- b. Neutron yang dihasilkan bergerak cepat dengan energi kinetik sekitar beberapa MeV. Neutron dengan energi yang terlampaui tinggi memiliki probabilitas yang rendah untuk merangsang

proses terjadinya fisi baru. Oleh karena itu, solusinya adalah dengan memberi moderator untuk memperlambat/ mengurangi energi kinetik neutron karena berbenturan dengan atom-atom moderator. Moderator yang efektif adalah moderator dengan massa yang relatif mendekati massa neutron; moderator yang umumnya dipakai adalah air biasa, air berat dan karbon.

- c. Neutron dapat hilang; neutron hilang dapat disebabkan karena lolos dari permukaan reaktor, diserap moderator, dan diserap ^{238}U . Pelolosan dari permukaan reaktor dapat diminimumkan dengan membuat teras reaktor sebesar mungkin sehingga nisbah permukaan terhadap volume kecil, sedangkan penyerapan oleh moderator dapat ditiadakan dengan menggunakan moderator air berat, karena penampang penyerapan neutron air berat adalah nol.
- d. Energi yang dihasilkan menghasilkan panas yang berlebih yang dapat merusak teras reaktor sehingga memerlukan pendingin.

5. Sistem untuk mengambil energi fisi dari teras reaktor

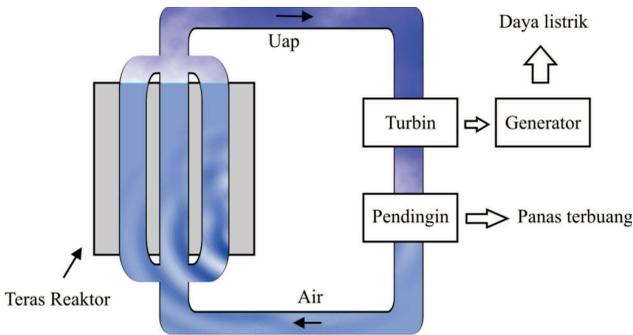
Sebagian besar energi yang dibebaskan dalam fisi diperoleh dari inti-inti pecahan fisi, dan inti yang agak berat tersebut bertumbukan dengan unsur bahan bakar reaktor, melepaskan energi kinetiknya. Energi yang hilang tersebut berubah menjadi panas dalam unsur bahan bakar dan harus diambil untuk berperan sebagai sumber daya, seperti untuk menggerakkan generator listrik. (Panas ini harus pula dihilangkan demi alasan keamanan, karena begitu banyak panas yang dihasilkan sehingga dapat meleburkan teras reaktor dan menimbulkan bencana;

karena alasan ini, usaha dilakukan untuk merancang pendingin darurat guna mencegah teras melebur seandainya panas tidak hilang secara benar).

Dewasa ini ada sekurang-kurangnya tiga sistem yang telah digunakan untuk mengambil energi fisi dari teras reaktor.

a. Reaktor Air-Didih

Air dialirkan mengelilingi teras reaktor. Panas teras mengubah air jadi uap, yang kemudian digunakan untuk membangkitkan tenaga listrik.

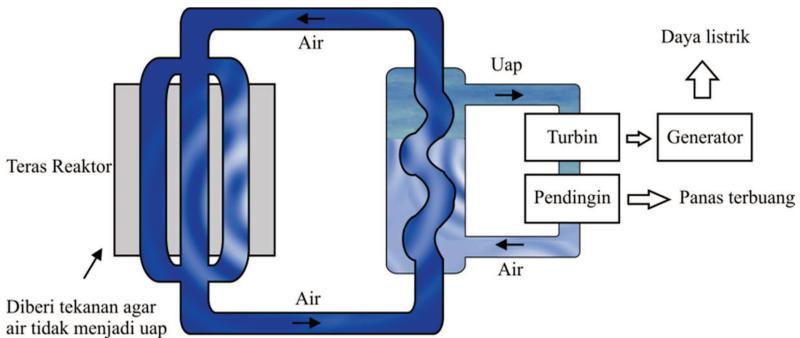


Gambar 8.4. Skema reaktor air didih

Kelemahannya, jika pipa pada teras reaktor bocor maka dapat menyebabkan air menjadi radioaktif, sehingga kebocoran pipa dekat turbin dapat menimbulkan bencana karena tersebarnya bahan radioaktif.

b. Reaktor Air-Didih

Panas diambil melalui proses dua tahap. Air yang dialirkan mengelilingi teras diberi tekanan agar tidak menjadi uap. Air ini kemudian memanasi sistem air kedua yang melepaskan uapnya ke turbin. Karena tidak pernah memasuki teras, uap ini tidak bersifat radioaktif. Jadi, dengan sistem ini tidak ada bahan radioaktif yang tersebar di sekitar turbin.



Gambar 8.5. Skema reaktor air tekan

Kelemahannya, kapasitas panas air yang kecil sehingga tidak efisien pengambilan panas pada teras reaktor.

c. Reaktor logam cair

Skema reaktor logam cair sama dengan skema reaktor air tekan. Namun, air pada pipa pertama diganti dengan Na cair. Na cair digunakan karena titik didihnya berada di atas titik didih operasi, sehingga tidak memerlukan tekanan besar untuk mempertahankannya dalam wujud cair dan Na cair lebih baik mengambil panas dari teras reaktor jika dibandingkan dengan air yang diberi tekanan.

B. Fusi Nuklir

Fusi nuklir merupakan penggabungan dua inti ringan menjadi inti yang lebih berat dengan melepaskan energi. Energi yang dibebaskan pada proses fusi berasal dari kelebihan energi ikat inti lebih berat dibandingkan dengan energi ikat kedua inti ringan.

Fusi nuklir kebalikan dari fisi nuklir, penyatuan dua inti ringan menjadi inti yang lebih berat dan menggunakan energi pengikat yang dilepaskan. Namun, untuk mencapai hal ini secara terkendali sangat tidak mudah. Ini karena inti bermuatan listrik positif dan bertolakan satu sama lain dengan kuat jika dipaksa bersatu. Karena itu, sebuah gaya yang cukup kuat diperlukan untuk mengatasi gaya repulsif di antara mereka agar fusi terjadi. Energi kinetik yang dibutuhkan ini setara dengan temperatur sekitar 20-30 juta °C. Temperatur ini luar biasa tinggi sehingga tidak ada satu pun benda padat untuk menampung partikel-partikel yang akan terlibat dalam reaksi fusi ini tahan terhadapnya. Jadi, tidak ada satu mekanisme pun di dunia yang dapat merealisasikan fusi kecuali panas dari bom atom. Proses ini membutuhkan energi yang besar untuk menggabungkan inti nuklir, bahkan elemen yang paling ringan, hidrogen. Tetapi fusi inti atom yang ringan, yang membentuk inti atom yang lebih berat dan neutron bebas, akan menghasilkan energi yang lebih besar lagi dari energi yang dibutuhkan untuk menggabungkan mereka.

Reaksi fusi terjadi di matahari sepanjang waktu. Panas dan sinar yang datang dari matahari adalah hasil fusi antara hidrogen dan helium, dan energi dilepaskan sebagai ganti materi yang hilang selama

perubahan ini. Setiap detik, matahari mengubah 564 juta ton hidrogen menjadi 560 juta ton helium. 4 juta ton sisa materi diubah menjadi energi. Kejadian luar biasa ini menghasilkan tenaga matahari yang sangat vital bagi kehidupan di Bumi, dan telah berjalan selama jutaan tahun tanpa jeda.

Contoh reaksi fusi sebagai berikut,



Nilai Q yang dihasilkan dari reaksi fusi di atas adalah 4,0 MeV, atau reaksi ini membebaskan sekitar 1 MeV tiap nukleonnya, kurang lebih sama dengan reaksi fisi. Reaksi ini dapat dilakukan di laboratorium dengan mempercepat seberkas deuteron menuju sasaran deuterium.

Suatu reaksi fusi nuklir dapat terjadi jika mengatasi gaya tolak Coulomb kedua partikel yang ingin digabungkan supaya dapat terjadi reaksi. Besarnya tolakan Coulomb dapat ditaksir dengan menghitung gaya tolak elektrostatik kedua permukaan partikel bersentuhan. Misalkan pada reaksi fusi di atas, jari-jari sebuah deuteron sekitar 1,5 fm, dan energi potensial elektrostatik dari dua muatan yang berjarak pisah 3 fm adalah kurang lebih 0,5 MeV. Sehingga dengan mempercepat deuteron dengan energi kinetik sekitar 0,5 MeV dapat mengatasi tolakan Coulomb dan memicu reaksi yang membebaskan energi sebanyak 4,5 MeV (energi kinetik datang sebesar 0,5 MeV ditambah nilai Q = 4,5 MeV).

Pendekatan lain yang dapat digunakan untuk melepaskan energi fusi nuklir adalah pemanasan gas deutron. Pemanasan gas deutron hingga mencapai suhu yang cukup tinggi sehingga tiap atom deuterium memiliki sekitar 0,25 MeV energi kinetik termal (fusi termonuklir). Maka dalam tumbukan antara kedua atom deuterium panas ini, energi kinetik sebesar 0,5 MeV cukup untuk mengatasi gaya tolakan Coulomb. Jika kita dapat mengambil energi fusi dari deuterium (D_2O) diperoleh energi sebesar $5 \times 10^{12} J$. Meskipun air biasa mengandung sekitar 0,015 persen D_2O , energi fusi dari deuterium dalam satu liter air biasa setara dengan energi kimia yang diperoleh dari pembakaran 300 liter bensin.

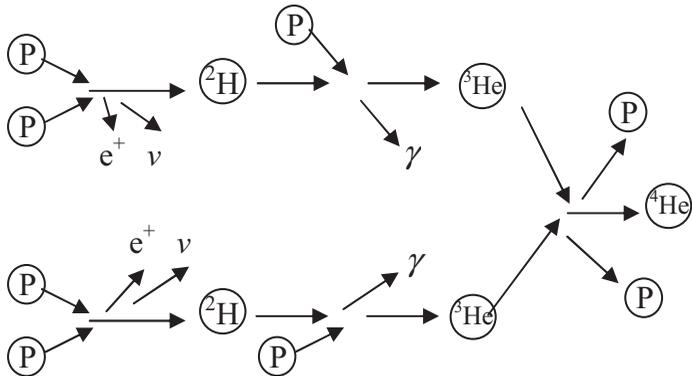
Kesulitan pendekatan ini adalah dalam pemanasan deuterium hingga mencapai suhu yang memadai. Dari pernyataan $3/2kT$ bagi energi kinetik termal sebuah molekul gas, dapat dihitung bahwa 0,25 MeV berkaitan dengan suhu $10^9 K$. Sulit dibayangkan kondisi macam apakah yang memungkinkan suhu setinggi itu dapat tercapai. Namun reaksi fusi nuklir memberikan peran yang penting dalam mendukung semua kehidupan di Bumi, karena menghasilkan energi yang membuat matahari bersinar.

Suhu yang berorde $10^9 K$ terdapat pada reaksi nuklir di bintang-bintang. Suatu bintang memancarkan energinya merupakan suatu akibat dari proses fusi nuklir. Fusi nuklir yang terjadi pada matahari dikenal dengan daur proton-proton (daur p-p), sedangkan umumnya untuk bintang-bintang lain menggunakan daur karbon-karbon (daur c-c). Skema daur proton-proton pada matahari diperlihatkan pada Gambar 8.6 sedangkan skema daur karbon-karbon diperlihatkan pada gambar 8.7.

Perhitungan energi yang dilepaskan dari reaksi fusi baik untuk daur p-p maupun daur c-c, menggunakan persamaan energi reaksi inti sebagaimana yang telah dijelaskan pada Bab VII. Hal yang perlu diperhatikan adalah mencermati dan menguraikan seluruh reaksi yang terjadi pada setiap daur yang ada atau dengan menganalisis reaksi netto suatu daur.

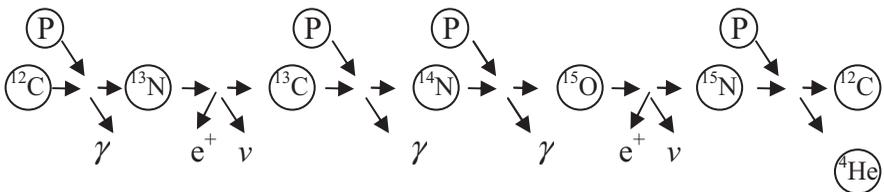
Skema daur proton-proton dan daur karbon-karbon dapat dilihat pada gambar di bawah ini.

1. Proses fusi daur proton-proton (daur p-p)



Gambar 8.6. Skema fusi daur proton-proton

2. Proses fusi daur karbon-karbon (daur c-c)



Gambar 8.7. Skema fusi daur karbon-karbon

Apabila helium telah habis terpakai, suhu yang lebih tinggi akan memungkinkan terjadinya fusi karbon membentuk unsur yang lebih berat seperti ^{24}Mg . Proses seperti ini akan terus berlangsung hingga mencapai ^{56}Fe . Setelah inti ^{56}Fe (lihat Gambar 4.1) terbentuk seluruhnya, maka tak ada lagi energi yang dibebaskan oleh proses fusi.

C. Soal Latihan

1. Hitunglah energi fusi dari daur p-p pada Gambar 8.6!
2. Hitunglah energi fusi dari daur p-p pada Gambar 8.7!

DAFTAR PUSTAKA

- Beiser, A. 1987. *Concepts of Modern Physics*. (trans: The Houw Liong, 1990). Jakarta: Erlanga.
- Gautreau, Ronald dan William Savin. 2006. *Fisika Modern Edisi Kedua Schaum's Outlines*. Penerbit Erlangga: Jakarta.
- Kaplan, I. 1962. *Nuclear Physics, 2d ed.* Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Reading Mass.
- Krane, K.S. 1988. *Introduction to Nuclear Physics*. New York: John Wiley and Sons, Inc.
- Krane, K. 2011. *Fisika Modern*. Jakarta: UI Press.
- Wiyatmo, Yusman. 2006. *Fisika Nuklir dalam Telaah Semi-klasik dan Kuantum*. Yogyakarta: Pustaka Pelajar.

APENDIKS A

Tabel Sifat-sifat Inti Atom

Tabel di bawah menunjukkan beberapa sifat isotop yang terpilih. Untuk setiap unsur hanya isotop yang stabil dan memiliki umur hidup yang panjang didaftarkan dalam tabel ini. Massa keadaan dasar dan spin-paritas juga ditunjukkan untuk seluruh isotop. Ketidakpastian paritas diberikan dalam tanda kurung. Kelimpahan digunakan untuk isotop stabil, dan untuk isotop radioaktif ditunjukkan dengan waktu paruh dan mekanisme peluruhannya ditunjukkan dengan (ϵ – penangkapan elektron, kemungkinan lainnya adalah pemancaran positron; β^- – peluruhan beta negatif; α – peluruhan alfa; f – fisi spontan).

	Z	A	Massa Atom (u)	I^π	Kelimpahan atau umur paruh
H	1	1	1,007825	$\frac{1}{2}^+$	99,985%
		2	2,014102	1^+	0,015%
		3	3,016049	$\frac{1}{2}^+$	12,3 y (β^-)
He	2	3	3,016029	$\frac{1}{2}^+$	$1,38 \times 10^{-4}$ %
		4	4,002603	0^+	99,99986%
Li	3	6	6,015121	1^+	7,5%
		7	7,016003	$3/2^-$	92,5%
		8	8,022486	2^+	0,84 s (β^-)
Be	4	7	7,016928	$3/2^-$	53,3 d (ϵ)
		8	8,005305	0^+	0,07 fs (α)
		9	9,012182	$3/2^-$	100%
		10	10,013534	0^+	1,6 My (β^-)
		11	11,021658	$\frac{1}{2}^+$	13,8 s (β^-)
B	5	8	8,024606	2^+	0,77 s (ϵ)
		9	9,013329	$3/2^-$	0,85 as (α)
		10	10,012937	3^+	19,8%
		11	11,009305	$3/2^-$	80,2%
		12	12,014353	1^+	20,4 ms (β^-)
		13	13,017780	$3/2^-$	17,4 ms (β^-)
C	6	9	9,031039	$3/2^-$	0,13 s (ϵ)
		10	10,016856	0^+	19,2 s (ϵ)
		11	11,011433	$3/2^-$	20,4 m (ϵ)
		12	12,000000	0^+	98,89%
		13	13,003355	$\frac{1}{2}^-$	1,11%
		14	14,003242	0^+	5730 y (β^-)
		15	15,010599	$\frac{1}{2}^+$	2,45 s (β^-)
N	7	12	12,018613	1^+	11 ms (ϵ)

Z	A	Massa Atom (u)	I^π	Kelimpahan atau umur paruh	
		13	13,005739	$\frac{1}{2}^-$	9,96 m (ε)
		14	14,003074	1^+	99,63 %
		15	15,000109	$\frac{1}{2}^-$	0,366%
		16	16,006100	2^-	7,13 s (β^-)
		17	17,008450	$\frac{1}{2}^-$	4,17 s (β^-)
		18	18,014081	1^-	0,63 s (β^-)
O	8	14	14,008595	0^+	71 s (ε)
		15	15,003065	$\frac{1}{2}^-$	122 s (ε)
		16	15,994915	0^+	99,76%
		17	16,999131	$5/2^+$	0,038%
		18	17,999160	0^+	0,204%
		19	19,003577	$5/2^+$	26,9 s (β^-)
		20	20,004076	0^+	13,5 s (β^-)
F	9	17	17,002095	$5/2^+$	64,5 s (ε)
		18	18,000937	1^+	110 m (ε)
		19	18,998403	$\frac{1}{2}^+$	100%
		20	19,999981	2^+	11 s (β^-)
		21	20,999948	$5/2^+$	4,3 s (β^-)
		22	22,003030	$(3,4)^+$	4,2 s (β^-)
		23	23,003600	$(3/2, 5/2)^+$	2,2 s (β^-)
Ne	10	17	17,017690	$\frac{1}{2}^-$	0,11 s (ε)
		18	18,005710	0^+	1,7 s (ε)
		19	19,001880	$\frac{1}{2}^+$	17,3 s (ε)
		20	19,992436	0^+	90,51%
		21	20,993843	$3/2^+$	0,27%
		22	21,991383	0^+	9,22%
		23	22,994465	$5/2^+$	37,6 s (β^-)
		24	23,993613	0^+	3,4 m (β^-)
		25	24,997690	$(\frac{1}{2}, 3/2)^+$	0,60 s (β^-)
Na	11	20	20,007344	2^+	0,45 s (ε)
		21	20,997651	$3/2^+$	22,5 s (ε)
		22	21,994434	3^+	2,60 y (ε)
		23	22,989768	$3/2^+$	100%
		24	23,990961	4^+	15,0 h (β^-)
		25	24,989953	$5/2^+$	60 s (β^-)
		26	25,992586	3^+	1,1 s (β^-)
		27	26,993940	$5/2^+$	0,30 s (β^-)
Mg	12	21	21,011716	$(3/2, 5/2)^+$	0,123 s (ε)
		22	21,999574	0^+	3,86 s (ε)
		23	22,994124	$3/2^+$	11,3 s (ε)

Z	A	Massa Atom (u)	I^{π}	Kelimpahan atau umur paruh	
		24	23,985042	0 ⁺	78,99%
		25	24,985837	5/2 ⁺	10,00%
		26	25,982594	0 ⁺	11,01%
		27	26,984341	½ ⁺	9,46 m (β ⁻)
		28	27,983877	0 ⁺	21,0 h (β ⁻)
		29	28,988480	3/2 ⁺	1,4 s (β ⁻)
Al	13	24	23,999941	4 ⁺	2,07 s (ε)
		25	24,990429	5/2 ⁺	7,18 s (ε)
		26	25,986892	5 ⁺	0,72 My (ε)
		27	26,981539	5/2 ⁺	100%
		28	27,981910	3 ⁺	2,24 m (β ⁻)
		29	28,980446	5/2 ⁺	6,6 m (β ⁻)
		30	29,982940	3 ⁺	3,7 s (β ⁻)
Si	14	26	25,992330	0 ⁺	2,21 s (ε)
		27	26,986704	5/2 ⁺	4,13 s (ε)
		28	27,976927	0 ⁺	92,23%
		29	28,976495	½ ⁺	4,67%
		30	29,973770	0 ⁺	3,10%
		31	30,975362	3/2 ⁺	2,62 h (β ⁻)
		32	31,974148	0 ⁺	105 y (β ⁻)
		33	32,997920	3/2 ⁺	6,2 s (β ⁻)
P	15	29	28,981803	½ ⁺	4,1 s(ε)
		30	29,978307	1 ⁺	2,50 m (ε)
		31	30,973762	½ ⁺	100%
		32	31,973907	1 ⁺	14,3 d(β ⁻)
		33	32,971725	½ ⁺	25,3 d (β ⁻)
		34	33,973636	1 ⁺	12,4 s (β ⁻)
S	16	30	29,984903	0 ⁺	1,2 s (ε)
		31	30,979554	½ ⁺	2,6 s (ε)
		32	31,972071	0 ⁺	95,02%
		33	32,971458	3/2 ⁺	0,75%
		34	33,967867	0 ⁺	4,21%
		35	34,969032	3/2 ⁺	87,4 d (β ⁻)
		36	35,967081	0 ⁺	0,017%
		37	36,971126	7/2 ⁻	5,0 m (β ⁻)
		38	37,971162	0 ⁺	170 m (β ⁻)
Cl	17	33	32,977452	3/2 ⁺	2,51 s (ε)
		34	33,973763	0 ⁺	1,53 s (ε)
		35	34,968853	3/2 ⁺	75,77%
		36	35,968307	2 ⁺	0,30 My (β ⁻)

Z	A	Massa Atom (u)	I^π	Kelimpahan atau umur paruh	
		37	36,965903	3/2 ⁺	24,23%
		38	37,968011	2 ⁻	37,3 m (β^-)
		39	38,968005	3/2 ⁺	56 m (β^-)
		40	39,970440	2 ⁻	1,35 m (β^-)
		41	40,970590	($\frac{1}{2}$. 3/2) ⁺	31 s (β^-)
Ar	18	34	33,980269	0 ⁺	0,844 s (ϵ)
		35	34,975256	3/2 ⁺	1,78 s (ϵ)
		36	35,967546	0 ⁺	0,337%
		37	36,966776	3/2 ⁺	35,0 d (ϵ)
		38	37,962732	0 ⁺	0,063%
		39	38,964314	7/2 ⁻	269 y (β^-)
		40	39,962384	0 ⁺	99,60%
		41	40,964501	7/2 ⁻	1,83 h (β^-)
		42	41,963050	0 ⁺	33 y (β^-)
		43	42,965670		5,4 m (β^-)
		44	43,965365	0 ⁺	11,9 m (β^-)
K	19	37	36,973377	3/2 ⁺	1,23 s (ϵ)
		38	37,969080	3 ⁺	7,61 m (ϵ)
		39	38,963707	3/2 ⁺	93,26%
		40	39,963999	4 ⁻	1,28 Gy (β^-)
		41	40,961825	3/2 ⁺	6,73%
		42	41,962402	2 ⁻	12,4 h (β^-)
		43	42,960717	3/2 ⁻	22,3 h (β^-)
		44	43,961560	2 ⁻	22,1 m (β^-)
		45	44,960696	3/2 ⁺	17 m (β^-)
		46	45,961976	(2 ⁻)	115 s (β^-)
		47	46,961677	$\frac{1}{2}$ ⁺	17,5 s (β^-)
Ca	20	38	37,976318	0 ⁺	0,44 s (ϵ)
		39	38,970718	3/2 ⁺	0,86 s (ϵ)
		40	39,962591	0 ⁺	96,94%
		41	40,962278	7/2 ⁻	0,10 My (ϵ)
		42	41,958618	0 ⁺	0,647%
		43	42,958766	7/2 ⁻	0,135 %
		44	43,955481	0 ⁺	2,09%
		45	44,956185	7/2 ⁻	165 d (β^-)
		46	45,953689	0 ⁺	0,0035%
		47	46,954543	7/2 ⁻	4,54 d (β^-)
		48	47,952533	0 ⁺	0,187%
		49	48,955672	3/2 ⁻	8,72 m (β^-)
		50	49,957519	0 ⁺	14 s (β^-)

	Z	A	Massa Atom (u)	I^{π}	Kelimpahan atau umur paruh
Sc	21	42	41,965514	0^+	0,68 s (ϵ)
		43	42,961150	$7/2^-$	3,89 h (ϵ)
		44	43,959404	2^+	3,93 h (ϵ)
		45	44,955910	$7/2^-$	100%
		46	45,955170	4^+	83,8 d (β^-)
		47	46,952409	$7/2^-$	3,35 d (β^-)
		48	47,952235	6^+	43,7 h (β^-)
		49	48,950022	$7/2^-$	57,0 m (β^-)
		50	49,952186	5^+	1,71 m (β^-)
		Ti	22	43	42,968523
44	43,959690			0^+	54 y (ϵ)
45	44,958124			$7/2^-$	3,09 h (ϵ)
46	45,952629			0^+	8,2%
47	46,951764			$5/2^-$	7,4%
48	47,947947			0^+	73,7%
49	48,947871			$7/2^-$	5,4%
50	49,944792			0^+	5,2%
51	50,946616			$3/2^-$	5,80 m (β^-)
52	51,946898			0^+	1,7 m (β^-)
53	52,949730			$(3/2)^-$	33 s (β^-)
V	23	46	45,960198	0^+	0,42 s (ϵ)
		47	46,954906	$3/2^-$	32,6 m (ϵ)
		48	47,952257	4^+	16,0 d (ϵ)
		49	48,948517	$7/2^-$	330 d (ϵ)
		50	49,947161	6^+	0,250%
		51	50,943962	$7/2^-$	99,750%
		52	51,944778	3^+	3,76 m (β^-)
		53	52,944340	$7/2^-$	1,6 m (β^-)
		54	53,946442	$(3.4.5)^+$	50 s (β^-)
		Cr	24	46	45,968360
47	46,962905			$3/2^-$	0,51 s (ϵ)
48	47,954033			0^+	21,6 h (ϵ)
49	48,951338			$5/2^-$	41,9 m (ϵ)
50	49,946046			0^+	4,35%
51	50,944768			$7/2^-$	27,7 d (ϵ)
52	51,940510			0^+	83,79%
53	52,940651			$3/2^-$	9,50%
54	53,938882			0^+	2,36%
55	54,940842			$3/2^-$	3,50 m (β^-)
56	55,940643				5,9 m (β^-)

	Z	A	Massa Atom (u)	I^{π}	Kelimpahan atau umur paruh		
Mn	25	50	49,954240	0^+	0,28 s (ϵ)		
		51	50,948213	$5/2^-$	46,2 m (ϵ)		
		52	51,945568	6^+	5,59 d (ϵ)		
		53	52,941291	$7/2^-$	3,7 My (ϵ)		
		54	53,940361	3^+	312 d (ϵ)		
		55	54,938047	$5/2^-$	100%		
		56	55,938907	3^+	2,58 h (β^-)		
		57	56,938285	$5/2^-$	1,6 m (β^-)		
Fe	26	58	57,940060	3^+	65 s (β^-)		
		51	50,956825	$(5/2)^-$	0,25 s (ϵ)		
		52	51,948114	0^+	8,27 h (ϵ)		
		53	52,945310	$7/2^-$	8,51 m (ϵ)		
		54	53,939613	0^+	5,8%		
		55	54,938296	$3/2^-$	2,7 y (ϵ)		
		56	55,934939	0^+	91,8%		
		57	56,935396	$1/2^-$	2,15%		
		58	57,933277	0^+	0,29%		
		59	58,934877	$3/2^-$	44,6 d (β^-)		
		60	59,934078	0^+	1,5 My (β^-)		
Co	27	61	60,936748	$(3/2, 5/2)^-$	6,0 m (β^-)		
		62	61,936773	0^+	68 s (β^-)		
		54	53,948460	0^+	0,19 s (ϵ)		
		55	54,942001	$7/2^-$	17,5 h (ϵ)		
		56	55,939841	4^+	78,8 d (ϵ)		
		57	56,936294	$7/2^-$	271 d (ϵ)		
		58	57,935755	2^+	70,8 d (ϵ)		
		59	58,933198	$7/2^-$	100%		
		60	59,933820	5^+	5,27 y (β^-)		
		61	60,932478	$7/2^-$	1,65 h (β^-)		
		62	61,934060	2^+	1,5 m (β^-)		
		63	62,933614	$(7/2)^-$	27,5 s (β^-)		
		Ni	28	55	54,951336	$7/2^-$	0,19 s (ϵ)
				56	55,942134	0^+	6,10 d (ϵ)
57	56,939799			$3/2^-$	36,0 h (ϵ)		
58	57,935346			0^+	68,3%		
59	58,934349			$3/2^-$	0,075 My (ϵ)		
60	59,930788			0^+	26,1%		
61	60,931058			$3/2^-$	1,13%		
62	61,928346			0^+	3,59%		
63	62,929670			$1/2^-$	100 y (β^-)		

	Z	A	Massa Atom (u)	I^{π}	Kelimpahan atau umur paruh
		64	63,927968	0^+	0,91%
		65	64,930086	$5/2^-$	2,52 h (β^-)
		66	65,929116	0^+	54,8 h (β^-)
		67	66,931570	?	21 s (β^-)
Cu	29	59	58,939503	$3/2^-$	82 s (ϵ)
		60	59,937366	2^+	23,4 m (ϵ)
		61	60,933461	$3/2^-$	3,41 h (ϵ)
		62	61,932586	1^+	9,73 m (ϵ)
		63	62,929599	$3/2^-$	69,2%
		64	63,292766	1^+	12,7 h (ϵ)
		65	64,927793	$3/2^-$	30,8%
		66	65,928872	1^+	5,10 m (β^-)
		67	66,927747	$3/2^-$	61,9 h (β^-)
		68	67,929620	1^+	31 s (β^-)
Zn	30	61	60,939514	$3/2^-$	89 s (ϵ)
		62	61,934332	0^+	9,2 h (ϵ)
		63	62,933214	$3/2^-$	38,1 m (ϵ)
		64	63,929145	0^+	48,6%
		65	64,929243	$5/2^-$	244 d (ϵ)
		66	65,926035	0^+	27,90%
		67	66,927129	$5/2^-$	4,10%
		68	67,924846	0^+	18,8%
		69	68,926552	$1/2^-$	56 m (β^-)
		70	69,925325	0^+	0,62%
		71	70,927727	$1/2^-$	2,4 m (β^-)
		72	71,926856	0^+	46,5 h (β^-)
		73	72,929780	$(3/2)^-$	24 s (β^-)
Ga	31	64	63,936836	0^+	2,6 m (ϵ)
		65	64,932738	$3/2^-$	15,2 m (ϵ)
		66	65,931590	0^+	9,4 h (ϵ)
		67	66,928204	$3/2^-$	78,3 h (ϵ)
		68	67,927982	1^+	68,1 m (ϵ)
		69	68,925580	$3/2^-$	60,1%
		70	69,926028	1^+	21,1 m (β^-)
		71	70,924701	$3/2^-$	39,9%
		72	71,926365	3^-	14,1 h (β^-)
		73	72,925169	$3/2^-$	4,87 h (β^-)
		74	73,926940	$(4)^-$	8,1 m (β^-)
		75	74,926499	$3/2^-$	2,1 m (β^-)
Ge	32	66	65,933847	0^+	2,3 h (ϵ)

Z	A	Massa Atom (u)	I^π	Kelimpahan atau umur paruh
		67,932737	$(\frac{1}{2})^-$	19,0 m (ϵ)
		67,928096	0^+	271 d (ϵ)
		68,927969	$5/2^-$	39,0 h (ϵ)
		69,924250	0^+	20,5%
		70,924954	$\frac{1}{2}^-$	11,2 d (ϵ)
		71,922079	0^+	27,4%
		72,923463	$9/2^+$	7,8%
		73,921177	0^+	36,5%
		74,922858	$\frac{1}{2}^-$	82,8 m (β^-)
		75,921402	0^+	7,8%
		76,923548	$7/2^+$	11,3 h (β^-)
		77,922853	0^+	1,45 h (β^-)
		78,925360	$(\frac{1}{2})^-$	19 s (β^-)
As	33	70,930929	4^+	53 m (ϵ)
		71,927114	$5/2^-$	61 h (ϵ)
		72,926755	2^-	26,0 h (ϵ)
		73,923827	$3/2^-$	80,3 d (ϵ)
		74,923928	2^-	17,8 d (ϵ)
		75,921594	$3/2^-$	100%
		76,922393	2^-	26,3 h (β^-)
		77,920646	$3/2^-$	38,8 h (β^-)
		77,921830	(2^-)	91 m (β^-)
		78,920946	$3/2^-$	9,0 m (β^-)
Se	34	71,932270	$5/2^-$	4,7 m (ϵ)
		71,927110	0^+	8,4 d (ϵ)
		72,926768	$9/2^+$	7,1 h (ϵ)
		73,922475	0^+	0,87%
		74,922522	$5/2^+$	119,8 d (ϵ)
		75,919212	0^+	9,0%
		76,919913	$\frac{1}{2}^-$	7,6%
		77,917308	0^+	23,5%
		78,918498	$7/2^+$	< 0.065 My (β^-)
		79,91652	0^+	49,8%
		80,917991	$(\frac{1}{2})^-$	18,5 m (β^-)
		81,916698	0^+	9,2%
		82,919117	$(9/2)^+$	22,5 m (β^-)
		83,918463	0^+	3,3 m (β^-)
Br	35	76,924528	1^-	16,1 h (ϵ)
		77,921378	$3/2^-$	57,0 h (ϵ)
		78,921144	1^+	6,46 m (ϵ)

Z	A	Massa Atom (u)	I^{π}	Kelimpahan atau umur paruh	
		79	78,918336	$3/2^{-}$	50,69%
		80	79,918528	1^{+}	17,6 m (β^{-})
		81	80,916289	$3/2^{-}$	49,31%
		82	81,916802	5^{-}	35,3 h (β^{-})
		83	82,915179	$(3/2)^{-}$	2,39 h (β^{-})
		84	83,916503	2^{-}	31,8 m (β^{-})
		85	84,915612	$(3/2)^{-}$	2,9 m (β^{-})
Kr	36	75	74,931029	?	4,3 m (ϵ)
		76	75,925959	0^{+}	14,8 h (ϵ)
		77	76,924610	$5/2^{+}$	75 m (ϵ)
		78	77,920396	0^{+}	0,356%
		79	78,920084	$1/2^{-}$	35,0 h (ϵ)
		80	79,916380	0^{+}	2,27%
		81	80,916590	$7/2^{+}$	0,21 My (ϵ)
		82	81,913482	0^{+}	11,6%
		83	82,914135	$9/2^{+}$	11,5%
		84	83,911507	0^{+}	57,0%
		85	84,912531	$9/2^{+}$	10,7 y (β^{-})
		86	85,910616	0^{+}	17,3%
		87	86,913360	$5/2^{+}$	76 m (β^{-})
		88	87,914453	0^{+}	2,84 h (β^{-})
		89	88,917640	$(5/2)^{+}$	3,18 m (β^{-})
Rb	37	82	81,918195	1^{+}	1,25 m (ϵ)
		83	82,915144	$5/2^{-}$	86,2 d (ϵ)
		84	83,914390	2^{-}	32,9 d (ϵ)
		85	84,911794	$5/2^{-}$	72,17%
		86	85,911172	2^{-}	18,8 d (β^{-})
		87	86,909187	$3/2^{-}$	27,83%
		88	87,911326	2^{-}	17,8 m (β^{-})
		89	88,912278	$(3/2)^{-}$	15,2 m (β^{-})
		90	89,914811	$(1)^{-}$	153 s (β^{-})
Sr	38	81	80,923270	$(1/2)^{-}$	22 m (ϵ)
		82	81,918414	0^{+}	25,0 d (ϵ)
		83	82,917566	$7/2^{+}$	32,4 d (ϵ)
		84	83,913430	0^{+}	0,56%
		85	84,912937	$9/2^{+}$	64,8 d (ϵ)
		86	85,909267	0^{+}	9,8%
		87	86,908884	$9/2^{+}$	7,0%
		88	87,905619	0^{+}	82,6%
		89	88,907450	$5/2^{+}$	50,5 d (β^{-})

Z	A	Massa Atom (u)	I^{π}	Kelimpahan atau umur paruh			
Y	39	90	89,907738	0^+	28,8 y (β^-)		
		91	90,910187	$(5/2)^+$	9,5 h (β^-)		
		92	91,910944	0^+	2,7 h (β^-)		
		93	92,913987	$(7/2)^+$	7,4 m (β^-)		
		84	83,920310	(5^-)	39 m (ϵ)		
		85	84,916437	$(1/2)^-$	2,7 h (ϵ)		
		86	85,914893	4^-	14,7 h (ϵ)		
		87	86,910882	$1/2^-$	80,3 h (ϵ)		
		88	87,909508	4^-	106,6 d (ϵ)		
		89	88,905849	$1/2^-$	100%		
		90	89,907152	2^-	64,1 h (β^-)		
		91	90,907303	$1/2^-$	58,5 d (β^-)		
		92	91,908917	2^-	3,54 h (β^-)		
		93	92,909571	$1/2^-$	10,2 h (β^-)		
94	93,911597	2^-	18,7 m (β^-)				
Zr	40	87	86,914817	$(9/2)^+$	1,6 h (ϵ)		
		88	87,910225	0^+	83,4 d (ϵ)		
		89	88,908890	$9/2^+$	78,4 h (ϵ)		
		90	89,904703	0^+	51,5%		
		91	90,905644	$5/2^+$	11,2%		
		92	91,905039	0^+	17,1%		
		93	92,906474	$5/2^+$	1,5 My (β^-)		
		94	93,906315	0^+	17,4%		
		95	94,908042	$5/2^+$	64,0 d (β^-)		
		96	95,908275	0^+	2,80%		
		97	96,910950	$1/2^+$	16,9 h (β^-)		
		98	97,912735	0^+	31 s (β^-)		
		Nb	41	89	88,913449	$(1/2)^-$	2,0 h (ϵ)
				90	89,911263	8^+	14,6 h (ϵ)
91	90,906991			$(9/2)^+$	700 y (ϵ)		
92	91,907192			$(7)^+$	35 My (ϵ)		
93	92,906377			$9/2^+$	100%		
94	93,907281			6^+	0,020 My (β^-)		
95	94,906835			$9/2^+$	35,0 d (β^-)		
96	95,908100			6^+	23,4 h (β^-)		
97	96,908097			$9/2^+$	72 m (β^-)		
Mo	42	90	89,913933	0^+	5,67 h (ϵ)		
		91	90,911755	$9/2^+$	15,5 m (ϵ)		
		92	91,906808	0^+	14,8%		
		93	92,906813	$5/2^+$	3500 y (ϵ)		

Z	A	Massa Atom (u)	I^{π}	Kelimpahan atau umur paruh	
		94	93,905085	0^+	9,3%
		95	94,905841	$5/2^+$	15,9%
		96	95,904679	0^+	16,7%
		97	96,906021	$5/2^+$	9,6%
		98	97,905407	0^+	24,1%
		99	98,907711	$1/2^+$	66,0 h (β^-)
		100	99,907477	0^+	9,6%
		101	100,910345	$1/2^+$	14,6 m (β^-)
Tc	43	94	93,909654	7^+	293 m (ϵ)
		95	94,907657	$9/2^+$	20,0 h (ϵ)
		96	95,907870	7^+	4,3 d (ϵ)
		97	96,906364	$9/2^+$	2,6 My (ϵ)
		98	97,907215	$(6)^+$	4,2 My (β^-)
		99	98,906254	$9/2^+$	0,214 My (β^-)
		100	99,907657	1^+	15,8 s (β^-)
Ru	44	94	93,911361	0^+	52 m (ϵ)
		95	94,910414	$5/2^+$	1,65 h (ϵ)
		96	95,907599	0^+	5,5%
		97	96,907556	$5/2^+$	2,88 d (ϵ)
		98	97,905287	0^+	1,86%
		99	98,905939	$5/2^+$	12,7%
		100	99,904219	0^+	12,6%
		101	100,905582	$5/2^+$	17,0%
		102	101,904348	0^+	31,6%
		103	102,906323	$3/2^+$	39,4 d (β^-)
		104	103,905424	0^+	18,7%
		105	104,907744	$3/2^+$	4,44 h (β^-)
		106	105,907321	0^+	372 d (β^-)
		107	106,910130	$(5/2^+)$	3,8 m (β^-)
Rh	45	98	97,910716	$(2)^+$	8,7 m (ϵ)
		99	98,908192	$(1/2^-)$	16,1 d (ϵ)
		100	99,908116	1^-	20,8 h (ϵ)
		101	100,906159	$1/2^-$	3,3 y (ϵ)
		102	101,906814	6^+	2,9 y (ϵ)
		103	102,905500	$1/2^-$	100%
		104	103,906651	1^+	42,3 s (β^-)
		105	104,905686	$7/2^+$	35,4 h (β^-)
		106	105,907279	1^+	29,8s (β^-)
Pd	46	99	98,911763	$(5/2^+)$	21,4 m (ϵ)
		100	99,908527	0^+	3,6 d (ϵ)

Z	A	Massa Atom (u)	I^{π}	Kelimpahan atau umur paruh	
		101	100,908287	5/2 ⁺	8,5 h (ε)
		102	101,905634	0 ⁺	1,0%
		103	102,906114	5/2 ⁺	17,0 d (ε)
		104	103,904029	0 ⁺	11,0%
		105	104,905079	5/2 ⁺	22,2%
		106	105,903478	0 ⁺	27,3%
		107	106,905127	5/2 ⁺	6,5 My (β ⁻)
		108	107,903895	0 ⁺	26,7%
		109	108,905954	5/2 ⁺	13,4 h (β ⁻)
		110	109,905167	0 ⁺	11,8%
		111	110,907660	5/2 ⁺	23 m (β ⁻)
		112	111,907323	0 ⁺	21,0 h (β ⁻)
Ag	47	103	102,908980	7/2 ⁺	65,7 m (ε)
		104	103,908623	5 ⁺	69,2 m (ε)
		105	104,906520	1/2 ⁻	41,3 d (ε)
		106	105,906662	1 ⁺	24,0 m (ε)
		107	106,905092	1/2 ⁻	51,83%
		108	107,905952	1 ⁺	2,4 m (β ⁻)
		109	108,904756	1/2 ⁻	48,17%
		110	109,906111	1 ⁺	24,4 s (β ⁻)
		111	110,905295	1/2 ⁻	7,45 d (β ⁻)
		112	111,907010	2 ⁻	3,14 h (β ⁻)
Cd	48	104	103,909851	0 ⁺	58 m (ε)
		105	104,909459	5/2 ⁺	56,0 m (ε)
		106	105,906461	0 ⁺	1,25%
		107	106,906613	5/2 ⁺	6,50h (ε)
		108	107,904176	0 ⁺	0,89%
		109	108,904953	5/2 ⁺	463 d (ε)
		110	109,903005	0 ⁺	12,5%
		111	110,904182	1/2 ⁺	12,8%
		112	111,902757	0 ⁺	24,1%
		113	112,904400	1/2 ⁺	12,2%
		114	113,903357	0 ⁺	28,7%
		115	114,905430	1/2 ⁺	53,4 h (β ⁻)
		116	115,904755	0 ⁺	7,5%
		117	116,907228	1/2 ⁺	2,4 h (β ⁻)
		118	117,911700	0 ⁺	50,3 m (β ⁻)
In	49	110	109,907230	2 ⁺	69,1 m (ε)
		111	110,905109	9/2 ⁺	2,83 d (ε)
		112	111,905536	1 ⁺	14,4 m (ε)

Z	A	Massa Atom (u)	I^{π}	Kelimpahan atau umur paruh	
		113	112,904061	9/2 ⁺	4,3%
		114	113,904916	1 ⁺	71,9 s (β^-)
		115	114,903882	9/2 ⁺	95,7%
		116	115,905264	1 ⁺	14,1 s (β^-)
		117	116,904517	9/2 ⁺	43,8 m (β^-)
Sn	50	109	108,911294	7/2 ⁺	18,0 m (ϵ)
		110	109,907858	0 ⁺	4,1 h (ϵ)
		111	110,907741	7/2 ⁺	35 m (ϵ)
		112	111,904826	0 ⁺	1,01%
		113	112,905176	1/2 ⁺	115,1 d (ϵ)
		114	113,902784	0 ⁺	0,67%
		115	114,903348	1/2 ⁺	0,38%
		116	115,901747	0 ⁺	14,6%
		117	116,902956	1/2 ⁺	7,75%
		118	117,901609	0 ⁺	24,3%
		119	118,903311	1/2 ⁺	8,6%
		120	119,902199	0 ⁺	32,4%
		121	120,904239	3/2 ⁺	27,1 h (β^-)
		122	121,903440	0 ⁺	4,56%
		123	122,905722	11/2 ⁻	129 d (β^-)
		124	123,905274	0 ⁺	5,64%
		125	124,907785	11/2 ⁻	9,62 d (β^-)
		126	125,907654	0 ⁺	0,1 My (β^-)
		127	126,910355	(11/2 ⁻)	2,1 h (β^-)
Sb	51	118	117,905534	1 ⁺	3,6 m (ϵ)
		119	118,903948	5/2 ⁺	38,0 h (ϵ)
		120	119,905077	1 ⁺	15,8 m (ϵ)
		121	120,903821	5/2 ⁺	57,3%
		122	121,905179	2 ⁻	2,70 d (β^-)
		123	122,904216	7/2 ⁺	42,7%
		124	123,905938	3 ⁻	60,2 d (β^-)
		125	124,905252	7/2 ⁺	2,7 y (β^-)
		126	125,907250	8 ⁻	12,4 d (β^-)
		127	126,906919	7/2 ⁺	3,85 d (β^-)
Te	52	117	116,908630	1/2 ⁺	62 m (ϵ)
		118	117,905908	0 ⁺	6,00 d (ϵ)
		119	118,906411	1/2 ⁺	16,0 h (ϵ)
		120	119,904048	0 ⁺	0,091%
		121	120,904947	1/2 ⁺	16,8 d (ϵ)
		122	121,903050	0 ⁺	2,5%

Z	A	Massa Atom (u)	I^{π}	Kelimpahan atau umur paruh			
		123	122,904271	$\frac{1}{2}^+$	0,89%		
		124	123,902818	0^+	4,6%		
		125	124,904429	$\frac{1}{2}^+$	7,0%		
		126	125,903310	0^+	18,7%		
		127	126,905221	$3/2^+$	9,4 h (β^-)		
		128	127,904463	0^+	31,7%		
		129	128,906594	$3/2^+$	69 m (β^-)		
		130	129,906229	0^+	34,5%		
		131	130,908528	$3/2^+$	25,0 m (β^-)		
		132	131,908517	0^+	78,2 h (β^-)		
		133	132,910910	$(3/2^+)$	12,5 m (β^-)		
		I	53	123	122,905594	$5/2^+$	13,2 h (ϵ)
				124	123,906207	2^-	4,18 d (ϵ)
125	124,904620			$5/2^+$	60,2 d (ϵ)		
126	125,905624			2^-	13,0 d (ϵ)		
127	126,904473			$5/2^+$	100%		
128	127,905810			1^+	25,0 m (β^-)		
129	128,904986			$7/2^+$	16 My (β^-)		
130	129,906713			5^+	12,4 h (β^-)		
131	130,906114			$7/2^+$	8,04 d (β^-)		
132	131,907987			4^+	2,30 h (β^-)		
Xe	54			121	120,911450	$(5/2^+)$	40,1 m (ϵ)
				122	121,908170	0^+	20,1 h (ϵ)
		123	122,908469	$(\frac{1}{2}^+)$	2,08 h (ϵ)		
		124	123,905894	0^+	0,096%		
		125	124,906397	$(\frac{1}{2}^+)$	17 h (ϵ)		
		126	125,904281	0^+	0,090%		
		127	126,905182	$(\frac{1}{2}^+)$	36,4 d (ϵ)		
		128	127,903531	0^+	1,92%		
		129	128,904780	$\frac{1}{2}^+$	26,4%		
		130	129,903509	0^+	4,1%		
		131	130,905072	$3/2^+$	21,2%		
		132	131,904144	0^+	26,9%		
		133	132,905888	$3/2^+$	5,25 d (β^-)		
		134	133,905395	0^+	10,4%		
		135	134,907130	$3/2^+$	9,1 h (β^-)		
		136	135,907214	0^+	8,9%		
		137	136,911557	$7/2^-$	3,82 m (β^-)		
Cs	55	130	129,906753	1^+	29,2 m (ϵ)		
		131	130,905444	$5/2^+$	9,69 d (ϵ)		

Z	A	Massa Atom (u)	I^{π}	Kelimpahan atau umur paruh	
		132	131,906431	2^{-}	6,47 d (ϵ)
		133	132,905429	$7/2^{+}$	100%
		134	133,906696	4^{+}	2,06 y (β^{-})
		135	134,905885	$7/2^{+}$	3 My (β^{-})
		136	135,907289	5^{+}	13,1 d (β^{-})
		137	136,907073	$7/2^{+}$	30,2 y (β^{-})
		138	137,911004	3^{-}	32,2 m (β^{-})
Ba	56	127	126,911130	$(\frac{1}{2}^{+})$	12,7 m (ϵ)
		128	127,908237	0^{+}	2,43 d (ϵ)
		129	128,908642	$\frac{1}{2}^{+}$	2,2 h (ϵ)
		130	129,906282	0^{+}	0,106%
		131	130,906902	$\frac{1}{2}^{+}$	12,0 d (ϵ)
		132	131,905042	0^{+}	0,101%
		133	132,905988	$\frac{1}{2}^{+}$	10,7 y (ϵ)
		134	133,904486	0^{+}	2,42%
		135	134,905665	$3/2^{+}$	6,59%
		136	135,904553	0^{+}	7,85%
		137	136,905812	$3/2^{+}$	11,2%
		138	137,905232	0^{+}	71,7%
		139	138,908826	$7/2^{-}$	82,9 m (β^{-})
		140	139,910581	0^{+}	12,7 d (β^{-})
		141	140,914363	$3/2^{-}$	18,3 m (β^{-})
La	57	135	134,906953	$5/2^{+}$	19,5 h (ϵ)
		136	135,907630	1^{+}	9,87 m (ϵ)
		137	136,906460	$7/2^{+}$	0,06 My (ϵ)
		138	137,907105	5^{+}	0,089%
		139	138,906347	$7/2^{+}$	99,911%
		140	139,909471	3^{-}	40,3 h (β^{-})
		141	140,910896	$7/2^{+}$	3,90 h (β^{-})
		142	141,914090	2^{-}	91,1 m (β^{-})
Ce	58	133	132,911360	$\frac{1}{2}^{+}$	5,4 h (ϵ)
		134	133,908890	0^{+}	76 h (ϵ)
		135	134,909117	$\frac{1}{2}^{+}$	17,6 h (ϵ)
		136	135,907140	0^{+}	0,190%
		137	136,907780	$3/2^{+}$	9,0 h (ϵ)
		138	137,905985	0^{+}	0,254%
		139	138,906631	$3/2^{+}$	137,2 d (ϵ)
		140	139,905433	0^{+}	88,5%
		141	140,908271	$7/2^{-}$	32,5 d (β^{-})
		142	141,909241	0^{+}	11,1%

Z	A	Massa Atom (u)	I^{π}	Kelimpahan atau umur paruh	
Pr	59	143	142,912383	$3/2^-$	33,0 h (β^-)
		144	143,913643	0^+	284 d (β^-)
		145	144,917230	$5/2^+$	2,98 m (β^-)
		138	137,910748	1^+	1,45 m (ϵ)
		139	138,908917	$5/2^+$	4,4 h (ϵ)
		140	139,909071	1^+	3,39 m (ϵ)
		141	140,907647	$5/2^+$	100%
		142	141,910039	2^-	19,2 h (β^-)
		143	142,910814	$7/2^+$	13,6 d (β^-)
		144	143,913301	0^-	17,3 m (β^-)
Nd	60	139	138,911920	$3/2^+$	29,7 m (ϵ)
		140	139,909306	0^+	3,37 d (ϵ)
		141	140,909594	$3/2^+$	2,5 h (ϵ)
		142	141,907719	0^+	27,2%
		143	142,909810	$7/2^-$	12,2%
		144	143,910083	0^+	23,8%
		145	144,912570	$7/2^-$	8,3%
		146	145,913113	0^+	17,2%
		147	146,916097	$5/2^-$	11,0 d (β^-)
		148	147,916889	0^+	5,7%
		149	148,920145	$5/2^-$	1,73 h (β^-)
		150	149,920887	0^+	5,6%
		151	150,923825	$(3/2^+)$	12,4 m (β^-)
		152	151,924680	0^+	11,4 m (β^-)
		Pm	61	142	141,912970
143	142,910930			$5/2^+$	265 d (ϵ)
144	143,912588			5^-	349 d (ϵ)
145	144,912743			$5/2^+$	17,7 y (ϵ)
146	145,914708			3^-	5,5 y (ϵ)
147	146,915135			$7/2^+$	2,62 y (β^-)
148	147,917473			1^-	5,37 d (β^-)
149	148,918332			$7/2^+$	53,1 h (β^-)
150	149,920981			(1^-)	2,68 h (β^-)
Sm	62			142	141,915206
		143	142,914626	$3/2^+$	8,83 m (ϵ)
		144	143,911998	0^+	3,1%
		145	144,913409	$7/2^-$	340 d (ϵ)
		146	145,913053	0^+	103 My (α)
		147	146,914894	$7/2^-$	15,1%
		148	147,914819	0^+	11,3%

Z	A	Massa Atom (u)	I^{π}	Kelimpahan atau umur paruh	
		149	148,917180	$7/2^{-}$	13,9%
		150	149,917273	0^{+}	7,4%
		151	150,919929	$5/2^{-}$	90 y (β^{-})
		152	151,919728	0^{+}	26,6%
		153	152,922094	$3/2^{+}$	46,8 h (β^{-})
		154	153,922205	0^{+}	22,6%
		155	154,924636	$3/2^{-}$	22,4 m (β^{-})
Eu	63	148	147,918125	5^{-}	54,5 d (ϵ)
		149	148,917926	$5/2^{+}$	93,1 d (ϵ)
		150	149,919702	0^{-}	36 y (ϵ)
		151	150,919847	$5/2^{+}$	47,9%
		152	151,921742	3^{-}	13 y (ϵ)
		153	152,921225	$5/2^{+}$	52,1%
		154	153,922975	3^{-}	8,5 y (β^{-})
		155	154,922889	$5/2^{+}$	4,9 y (β^{-})
		156	155,924752	0^{+}	15 d (β^{-})
		157	156,925418	$5/2^{+}$	15 h (β^{-})
Gd	64	149	148,919344	$7/2^{-}$	9,4 d (ϵ)
		150	149,918662	0^{+}	1,8 My (α)
		151	150,920346	$7/2^{-}$	120 d (ϵ)
		152	151,919786	0^{+}	0,20%
		153	152,921745	$3/2^{-}$	242 d (ϵ)
		154	153,920861	0^{+}	2,1%
		155	154,922618	$3/2^{-}$	14,8%
		156	155,922118	0^{+}	20,6%
		157	156,923956	$3/2^{-}$	15,7%
		158	157,924099	0^{+}	24,8%
		159	158,926384	$3/2^{-}$	18,6 h (β^{-})
		160	159,927049	0^{+}	21,8%
		161	160,929664	$5/2^{-}$	3,7 m (β^{-})
Tb	65	156	155,924742	3^{-}	5,34 d (ϵ)
		157	156,924023	$3/2^{+}$	150 y (ϵ)
		158	157,925411	3^{-}	150 y (ϵ)
		159	158,925342	$3/2^{+}$	100%
		160	159,927163	3^{-}	72,1 d (β^{-})
		161	160,927566	$3/2^{+}$	6,90 d (β^{-})
		162	161,929510	1^{-}	7,76 m (β^{-})
Dy	66	153	152,925769	$7/2^{-}$	6,4 h (ϵ)
		154	153,924429	0^{+}	3 My (α)
		155	154,925747	$3/2^{-}$	10,0 h (ϵ)

Z	A	Massa Atom (u)	I^{π}	Kelimpahan atau umur paruh	
		156	155,924277	0^+	0,057%
		157	156,925460	$3/2^-$	8,1 h (ϵ)
		158	157,924403	0^+	0,100%
		159	158,925735	$3/2^-$	144,4 d (ϵ)
		160	159,925193	0^+	2,3%
		161	160,926930	$5/2^+$	19,9%
		162	161,926795	0^+	25,5%
		163	162,928728	$5/2^-$	24,9%
		164	163,929171	0^+	28,1%
		165	164,931700	$7/2^+$	2,33 h (β^-)
		166	165,932803	0^+	81,6 h (β^-)
Ho	67	162	161,929092	1^+	15 m (ϵ)
		163	162,928731	$(7/2)^-$	33 y (ϵ)
		164	163,930285	1^+	29,0 m (ϵ)
		165	164,930319	$7/2^-$	100%
		166	165,932281	0^-	26,8 h (β^-)
		167	166,933127	$(7/2)^-$	3,1 h (β^-)
Er	68	160	159,929080	0^+	28,6 h (ϵ)
		161	160,929996	$3/2^-$	3,24 h (ϵ)
		162	161,928775	0^+	0,14%
		163	162,930030	$5/2^-$	75,1 m (ϵ)
		164	163,929198	0^+	1,56%
		165	164,930723	$5/2^-$	10,4 h (ϵ)
		166	165,930290	0^+	33,4%
		167	166,932046	$7/2^+$	22,9%
		168	167,932368	0^+	27,1%
		169	168,934588	$1/2^-$	9,40 d (β^-)
		170	169,935461	0^+	14,9%
		171	170,938027	$5/2^-$	7,52 h (β^-)
		172	171,939353	0^+	49,3 h (β^-)
Tm	69	166	165,933561	2^+	7,70 h (ϵ)
		167	166,932848	$1/2^+$	9,25 d (ϵ)
		168	167,934170	3^+	93,1 d (ϵ)
		169	168,934212	$1/2^+$	100%
		170	169,935798	1^-	128,6 d (β^-)
		171	170,936427	$1/2^+$	1,92 y (β^-)
		172	171,938397	2^-	63,6 h (β^-)
Yb	70	166	165,933875	0^+	56,7 h (ϵ)
		167	166,934946	$5/2^-$	17,5 m (ϵ)
		168	167,933894	0^+	0,135%

Z	A	Massa Atom (u)	I^π	Kelimpahan atau umur paruh	
		169	168,935186	$7/2^+$	32,0 d (ϵ)
		170	169,934759	0^+	3,1%
		171	170,936323	$1/2^-$	14,4%
		172	171,936378	0^+	21,9%
		173	172,938208	$5/2^-$	16,2%
		174	173,938859	0^+	31,6%
		175	174,941273	$7/2^-$	4,19 d (β^-)
		176	175,942564	0^+	12,6%
		177	176,945253	$9/2^+$	1,9 h (β^-)
		178	177,946639	0^+	74 m (β^-)
Lu	71	172	171,939085	(4^-)	6,70 d (ϵ)
		173	172,938929	$7/2^+$	1,37 y (ϵ)
		174	173,940336	1^-	3,3 y (ϵ)
		175	174,940770	$7/2^+$	97,39%
		176	175,942679	7^-	2,61%
		177	176,943752	$7/2^+$	6,71 d (β^-)
		178	177,945963	1^+	28,4 m (β^-)
Hf	72	171	170,940490	($7/2^+$)	12,1 h (ϵ)
		172	171,939460	0^+	1,87 y (ϵ)
		173	172,940650	$1/2^-$	24,0 h (ϵ)
		174	173,940044	0^+	0,16%
		175	174,941507	$5/2^-$	70 d (ϵ)
		176	175,941406	0^+	5,2%
		177	176,943217	$7/2^-$	18,6%
		178	177,943696	0^+	27,1%
		179	178,945812	$9/2^+$	13,7%
		180	179,946546	0^+	35,2%
		181	180,949096	$1/2^-$	42,4 d (β^-)
		182	181,950550	0^+	9 my (β^-)
		183	182,953530	($3/2^-$)	64 m (β^-)
Ta	73	178	177,945750	1^+	9,31 m (ϵ)
		179	178,945930	($7/2^+$)	665 d (ϵ)
		180	179,947462	1^+	0,0123%
		181	180,947992	$7/2^+$	99,9877%
		182	181,950149	3^-	115 d (β^-)
		183	182,951369	$7/2^+$	5,1 d (β^-)
W	74	178	177,945840	0^+	21,5 d (ϵ)
		179	178,947067	($7/2^-$)	38 m (ϵ)
		180	179,946701	0^+	0,13%
		181	180,948192	$9/2^+$	121 d (ϵ)

Z	A	Massa Atom (u)	I^{π}	Kelimpahan atau umur paruh	
		182	181,948202	0^+	26,3%
		183	182,950220	$1/2^-$	14,3%
		184	183,950928	0^+	30,7%
		185	184,953416	$3/2^-$	75,1 d (β^-)
		186	185,954357	0^+	28,6%
		187	186,957153	$3/2^-$	23,9 h (β^-)
		188	187,958480	0^+	69,4 d (β^-)
Re	75	182	181,951210	2^+	12,7 h (ϵ)
		183	182,950817	$(5/2)^+$	71 d (ϵ)
		184	183,952530	3^-	38 d (ϵ)
		185	184,952951	$5/2^+$	37,40%
		186	185,954984	1^-	90,6 h (β^-)
		187	186,955744	$5/2^+$	62,60%
		188	187,958106	1^-	16,9 h (β^-)
		189	188,959219	$(5/2)^+$	24,3 h (β^-)
Os	76	182	181,952120	0^+	21,5 h (ϵ)
		183	182,953290	$(9/2)^+$	13,0 h (ϵ)
		184	183,952488	0^+	0,018%
		185	184,954041	$1/2^-$	93,6 d (ϵ)
		186	185,953830	0^+	1,6%
		187	186,955741	$1/2^-$	1,6%
		188	187,955830	0^+	13,3%
		189	188,958137	$3/2^-$	16,1%
		190	189,958436	0^+	26,4%
		191	190,960920	$9/2^-$	15,4 d (β^-)
		192	191,961467	0^+	41,0%
		193	192,964138	$3/2^-$	30,6 h (β^-)
		194	193,965173	0^+	6,0 y (β^-)
Ir	77	188	187,958830	(2^-)	41,5 h (ϵ)
		189	188,958712	$3/2^+$	13,1 d (ϵ)
		190	189,960580	(4^+)	11,8 d (ϵ)
		191	190,960584	$3/2^+$	37,3%
		192	191,962580	4^-	74,2 d (β^-)
		193	192,962917	$3/2^+$	62,7%
		194	193,965069	1^-	19,2 h (β^-)
		195	194,965966	$(3/2^+)$	2,8 h (β^-)
Pt	78	187	186,960470	$3/2^-$	2,35 h (ϵ)
		188	187,959386	0^+	10,2 d (ϵ)
		189	188,960817	$3/2^-$	10,9 h (ϵ)
		190	189,959917	0^+	0,013%
		191	190,961665	$3/2^-$	2,9 d (ϵ)

Z	A	Massa Atom (u)	I^π	Kelimpahan atau umur paruh	
		192	191,961019	0^+	0,78%
		193	192,962977	$(1/2^-)$	50 y (ϵ)
		194	193,962655	0^+	32,9%
		195	194,964766	$1/2^-$	33,8%
		196	195,964926	0^+	25,3%
		197	196,967315	$1/2^-$	18,3 h (β^-)
		198	197,967869	0^+	7,2%
		199	198,970552	$(5/2^-)$	30,8 m (β^-)
		200	199,971417	0^+	12,5 h (β^-)
Au	79	194	193,965348	1^-	39,5 h (ϵ)
		195	194,965013	$3/2^+$	186 d (ϵ)
		196	195,966544	2^-	6,18 d (ϵ)
		197	196,966543	$3/2^+$	100%
		198	197,968217	2^-	2,696 d (β^-)
		199	198,968740	$3/2^+$	3,14 d (β^-)
		200	199,970670	1^-	48,4 m (β^-)
Hg	80	193	192,966560	$3/2^-$	3,8 h (ϵ)
		194	193,965391	0^+	520 y (ϵ)
		195	194,966640	$1/2^-$	9,5 h (ϵ)
		196	195,965807	0^+	0,15%
		197	196,967187	$1/2^-$	64,1 h (ϵ)
		198	197,966743	0^+	10,0%
		199	198,968254	$1/2^-$	16,8%
		200	199,968300	0^+	23,1%
		201	200,970277	$3/2^-$	13,2%
		202	201,970617	0^+	29,8%
		203	202,972848	$5/2^-$	46,6 d (β^-)
		204	203,973467	0^+	6,9%
		205	204,976047	$1/2^-$	5,2 m (β^-)
Tl	81	200	199,970934	2^-	26,1 h (ϵ)
		201	200,970794	$1/2^+$	73 h (ϵ)
		202	201,972085	2^-	12,2 d (ϵ)
		203	202,972320	$1/2^+$	29,5%
		204	203,973839	2^-	3,77 y (β^-)
		205	204,974401	$1/2^+$	70,5%
		206	205,976084	0^-	4,20 m (β^-)
Pb	82	201	200,972830	$5/2^-$	9,3 h (ϵ)
		202	201,972134	0^+	0,05 My (ϵ)
		203	202,973365	$5/2^-$	51,9 h (ϵ)
		204	203,973020	0^+	1,42%
		205	204,974458	$5/2^-$	15 My (ϵ)

Z	A	Massa Atom (u)	I^{π}	Kelimpahan atau umur paruh	
		206	205,974440	0^+	24,1%
		207	206,975872	$1/2^-$	22,1%
		208	207,976627	0^+	52,3%
		209	208,981065	$9/2^+$	3,25 h (β^-)
		210	209,984163	0^+	22,3 y (β^-)
		211	210,988735	$(9/2^+)$	36,1 m (β^-)
		212	211,991871	0^+	10,6 h (β^-)
Bi	83	206	205,978478	6^+	6,24 d (ϵ)
		207	206,978446	$9/2^-$	32 y (ϵ)
		208	207,979717	(5^+)	0,368 My (ϵ)
		209	208,980374	$9/2^-$	100%
		210	209,984095	1^-	5,01 d (β^-)
		211	210,987255	$9/2^-$	2,15 m (α)
		212	211,991255	1^-	60,6 m (β^-)
Po	84	206	205,980456	0^+	8,8 d (ϵ)
		207	206,981570	$5/2^-$	5,8 h (ϵ)
		208	207,981222	0^+	2,90 y (α)
		209	208,982404	$1/2^-$	102 y (α)
		210	209,982848	0^+	138,4 d (α)
		211	210,986627	$9/2^+$	0,52 s (α)
At	85	208	207,986510	6^+	1,63 h (ϵ)
		209	208,986149	$9/2^-$	5,4 h (ϵ)
		210	209,987126	5^+	8,3 h (ϵ)
		211	210,987469	$9/2^-$	7,21 h (ϵ)
		212	211,990725	(1^-)	0,31 s (α)
		213	212,992911	$9/2^-$	0,11 μ s (α)
Rn	86	207	206,990690	$5/2^-$	9,3 m (ϵ)
		210	209,989669	0^+	2,4 h (α)
		211	210,990576	$1/2^-$	14,6 h (ϵ)
		212	211,990697	0^+	24 m (α)
		218	218,005580	0^+	35 ms (α)
		222	222,017571	0^+	3,82 d (α)
Fr	87	209	208,995870	$9/2^-$	50 s (α)
		212	211,966130	5^+	20 m (ϵ)
		215	215,000310	$9/2^-$	0,12 μ s (α)
		220	220,012293	1	27,4 s (α)
		223	223,019733	$(3/2)$	21,8 m (β^-)
Ra	88	222	222,015353	0^+	38 s (α)
		223	223,018501	$1/2^+$	11,4 d (α)
		224	224,020186	0^+	3,66 d (α)
		225	225,023604	$(3/2)^+$	14,8 d (β^-)

	Z	A	Massa Atom (u)	I^π	Kelimpahan atau umur paruh
Ac	89	226	226,025403	0^+	1602 y (α)
		227	227,029171	$(3/2^+)$	42 m (β^-)
		224	224,021685	(0^-)	2,9 h (ϵ)
		225	225,023205	$(3/2^-)$	10,0 d (α)
		226	226,026084	(1^-)	29 h (β^-)
		227	227,027750	$3/2^-$	21,77 y (β^-)
Th	90	228	228,031015	(3^+)	6,1 h (β^-)
		228	228,028715	0^+	1,91 y (α)
		229	229,031755	$5/2^+$	7300 y (α)
		230	230,033128	0^+	75.400 y (α)
		231	231,036299	$5/2^+$	25,52 h (β^-)
		232	232,038051	0^+	100%
Pa	91	233	233,041577	$(1/2^+)$	22,3 m (β^-)
		229	229,032073	$(5/2^+)$	1,4 d (ϵ)
		230	230,034527	(2^-)	17,7 d (ϵ)
		231	231,035880	$3/2^-$	32.800 y (α)
		232	232,038565	(2^-)	1,31 d (β^-)
		233	233,040243	$3/2^-$	27,0 d (β^-)
U	92	233	233,039628	$5/2^+$	0,1592 My (α)
		234	234,040947	0^+	0,245 My (α)
		235	235,043924	$7/2^-$	0,720%
		236	236,045563	0^+	23,42 My (α)
		237	237,048725	$1/2^+$	6,75 d (β^-)
		238	238,050785	0^+	99,275%
		239	239,054290	$5/2^+$	23,5 m (β^-)
		236	236,046550	(6^-)	0,11 My (ϵ)
Np	93	237	237,048168	$5/2^+$	2,14 My (α)
		238	238,050941	2^+	2,117 d (β^-)
		239	239,052933	$5/2^+$	2,36 d (β^-)
		237	237,048401	$7/2^-$	45,3 d (ϵ)
Pu	94	238	238,049555	0^+	87,74 y (α)
		239	239,052158	$1/2^+$	24.100 y (α)
		240	240,053808	0^+	6570 y (α)
		241	241,056846	$5/2^+$	14,4 y (β^-)
		242	242,058737	0^+	0,376 My (α)
		243	243,061998	$7/2^+$	4,96 h (β^-)
		240	240,055278	(3^-)	50,9 h (ϵ)
Am	95	241	241,056824	$5/2^-$	433 y (α)
		242	242,059542	1^-	16,0 h (β^-)
		243	243,061375	$5/2^-$	7370 y (α)
		244	244,064279	(6^-)	10,1 h (β^-)

	Z	A	Massa Atom (u)	I^{π}	Kelimpahan atau umur paruh
Cm	96	246	246,067218	0^+	4700 y (α)
		247	247,070347	$9/2^-$	16 My (α)
		248	248,072343	0^+	0,34 My (α)
		249	249,075948	$1/2^+$	64 m (β^-)
Bk	97	246	246,068720	2^-	1,8 d (ϵ)
		247	247,070300	$(3/2^-)$	1380 y (α)
Cf	98	251	251,079580	$1/2^+$	898 y (α)
		252	252,081621	0^+	2,64 y (α)
Es	99	252	252,082944	$(4^+,5^-)$	472 d (α)
		253	253,084818	$7/2^+$	20,5 d (α)
Fm	100	256	256,091767	0^+	2,63 h (f)
		257	257,095099	$(9/2^+)$	100 d (α)
Md	101	257	257,095580	$(7/2^-)$	5,2 h (ϵ)
		258	258,098570	(8^-)	55 d (α)
No	102	258	258,098150	(0^+)	1,2 ms (f)
		259	259,100931	$(9/2^+)$	60 m (α)
Lr	103	260	260,105320		180 s (α)
Rf	104	261	261,108690		65 s (α)
Ha	105	261	261,111820		1,8 s (α)
		262	262,113760		34 s (f)
	106	263	263,118220		0,8 s (f)
	107	262	262,122930		115 ms (α)

APENDIKS B

Konversi Nilai

Massa alfa	$= 4,001506 u$	$= 6,645 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Massa neutron	$= 1,008665 u$	$= 1,675 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Massa proton	$= 1,007276 u$	$= 1,673 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Massa elektron	$= 5,48503 \times 10^{-4} u$	$= 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$
Massa deutron	$= 2,013553 u$	$= 3,44 \times 10^{-27} \text{ kg}$
1 eV	$= 1,602189 \times 10^{-19} \text{ J}$	
1 amu (u)	$= 931,5 \text{ MeV}/c^2$	
	$= 1,660566 \times 10^{-27} \text{ kg}$	
Kecepatan cahaya (c)	$= 2,99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$	

Tentang Penulis



Andi Ichsan Mahardika. Lahir tanggal 31 Maret 1985 di Ujung Pandang, Sulawesi Selatan. Tamat Sarjana Pendidikan Fisika di Jurusan Fisika FMIPA Universitas Negeri Makassar tahun 2007 dan Meraih Gelar Magister Pendidikan Fisika di Program Pascasarjana Universitas Negeri Makassar tahun 2011.

Saat ini penulis aktif sebagai dosen di Program Studi Pendidikan Fisika FKIP Universitas Lambung Mangkurat Banjarmasin. Bidang Fisika yang ditekuni adalah Fisika Inti, Termodinamika, Alat-alat Ukur Listrik serta Gelombang dan Optika. Pada bidang Pendidikan Fisika, penulis menekuni dan meneliti penalaran, pemecahan masalah dan multi inteligensi siswa dalam pembelajaran fisika.



Muhammad Arifuddin Jamal. Lahir tanggal 1 Oktober 1962 di Kuduk, Kabupaten Selayar, Sulawesi Selatan. Tamat Sarjana Pendidikan Fisika di Jurusan Fisika FMIPA IKIP Ujung Pandang (sekarang Universitas Negeri Makassar) tahun 1987 dan Meraih Gelar Magister Pendidikan Sains Konsentrasi Pendidikan Fisika di Program Pascasarjana Universitas Negeri Surabaya tahun 2009.

Saat ini aktif sebagai dosen di Program Studi Pendidikan Fisika FKIP Universitas Lambung Mangkurat Banjarmasin. Bidang Fisika yang ditekuni adalah Fisika Dasar, dan Fisika Modern.