

Tentamen i Modern Fysik (SH1014, även SH1012/SH1013/SH1009) 14.00-19.00, 2022-04-22, KTH, Stockholm

Ansvarig lärare / Examinator: Torbjörn Bäck (073-7650590)

Tillåtna hjälpmedel: miniräknare.

Formelsamling (uppdaterad för denna tentamen) och **Periodiska systemet** är inkluderad i filen med denna tentamenslydelse.

Matematics Handbook Beta är tillåten vid denna tentamen, men ska inte behövas. Knepiga matematiska samband ges antingen i formelbladet eller i problemlydelsen.

Tentamen består av 8 problem som vardera ger maximalt 5 poäng. För godkänt krävs 20 poäng. Betyget baseras på uppnådd poäng. Betygskriterierna är följande:

A:36-40, B:32-35.5, C:28-31.5, D:24-27.5, E:20-23.5, Fx:18-19.5, F:0-17.5

Motivera dina svar tydligt med uträkningar och text (och bilder när det är lämpligt). Skriv tydligt.

Gör dina egna, rimliga, uppskattningar när det behövs. Det ska framgå tydligt från din text vilka antaganden och uppskattningar du gjort.

Lycka Till!

1. År 1930 så var Irène och Frédéric Joliot-Curie mycket nära att upptäcka neutronen, men de misstolkade resultatet av sitt experiment. Den strålning som experimentet genererade var egentligen neutroner, men de tolkade den som ett slags högenergetiska gammafotoner. Denna okända strålning visade sig kunna växelverka med protoner i ett material och ge protonerna hög kinetisk energi som uppmättes till ca 5 MeV. Den föreslagna förklaringen var att fotonerna växelverkade med protonerna med Comptonspridning och på så sätt gav protonerna kinetisk energi.

Gör samma (felaktiga) antagande som Curie/Joliot och föreställ dig högenergetiska gammafotoner som krockar med protoner. Använd relevant formalism för Comptonspridning, men ersätt elektronen med protonen. Beräkna den energi (i MeV), på den inkommande gammafotonen, som krävs för att protonerna ska få en kinetisk energi på 5 MeV i den spridningsvinkel som maximerar protonens hastighet? [5 p]

2. En elektron och en positron färdas tillsammans med hastigheten v sett från labsystemet. De två partiklarna annihileras i flykten och två högenergetiska fotoner skickas ut. Fotonernas energi kan mätas upp i labsystemet.

a) Ta fram ett uttryck för hur fotonernas summerade energi, $E_{\gamma\text{sum}} = E_{\gamma 1} + E_{\gamma 2}$, beror av hastigheten (v/c). [2 p]

b) Antag att de två fotonerna skickas ut rakt framåt, respektive bakåt, i förhållande till hastighetsvektorn. Ta fram ett uttryck för hur energin, E_{γ} , hos gammafotonen som skickas rakt framåt, beror av hastigheten (v/c). [3 p]

3. I ett experiment vid ett stort acceleratorlab så vill fysikern Pi mäta halveringstiden på π^+ -mesonen. Efter strålmålet där mesonerna skapas (ett konstant, men okänt, antal per tid) så färdas de, med en hastighet nära ljusets: $\beta = \frac{v}{c} = 1 - 5 \cdot 10^{-5}$, genom ett rör i vacuum.

Strax efter strålmålet, vid punkten A, så detekteras 25300 mesoner per minut. I punkten B, 240 meter nedströms från A, så detekteras 18370 mesoner per minut.

Hjälp Pi beräkna π^+ -mesonens halveringstid (i dess eget vilosystem). [5 p]

4. En termisk neutron (kinetisk energi 0.025 eV) absorberas av en Pu-239-atomkärna i en forskningsreaktor. Därefter så fissionerar plutoniumkärnan. Det ena fissionsfragmentet är Xe-137. Tre neutroner emitteras från systemet.

a) Vilket är det andra fissionsfragmentet? [2 p]

b) Beräkna den totala frigjorda kinetiska energin (i MeV) för hela systemet [3 p]

5. En partikel med massan m befinner sig i en endimensionell potential, $U(x)$. Partikelns vågfunktion beskrivs, för både positiva och negativa x , av:

$$\psi(x) = A x e^{-ax^2/2}.$$

a) Bestäm konstanten A , uttryckt med parametern a , genom normering av vågfunktionen. [2 p]

b) Bestäm både energin E och potentialen $U(x)$. [3 p]

6. För tillståndet $(n, l) = (2, 1)$ i väteatomen, beräkna den *mest sannolika* radien för elektronen, uttryckt i Bohrradien, a_0 . [5 p]

7. a) Vilken/vilka av nedanstående sex elektronkonfigurationer är tillåtna? Motivera för varje icke-giltig konfiguration varför den ska förkastas. Konfigurationen behöver inte motsvara grundtillståndet i respektive atom. [3 p]

Konfiguration 1) $1s^2 2s^2 2p^4 3s^2 3p^1$

Konfiguration 2) $1s^2 2s^2 2p^6 2d^2 3s^2$

Konfiguration 3) $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^1$

Konfiguration 4) $1s^2 2s^2 2p^8 3s^2 3p^1$

Konfiguration 5) $1s^2 2s^3 2p^6 3s^2 3p^1$

Konfiguration 6) $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^1 3d^1$

- b) Betrakta följande två tillstånd i en specifik (neutral) atom:

Tillstånd A: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$

Tillstånd B: $1s^2 2s^2 2p^6 3p^1$

Vilken är grundämnet som atomerna tillhör? [1 p]

Vilket av de två tillstånden ligger högst upp i energi? Motivera/förklara ditt svar noga. [1 p]

8. Vätgasmolekylen, H_2 , kan rotera. Vi tänker oss en snabbt roterande H_2 -molekyl som de-exicteras i flera steg ner till grundtillståndet. Ta hänsyn till vilka rotationsövergångar som är tillåtna och betrakta de tre övergångarna med lägst övergångsenergi (ΔE). Beräkna våglängderna för dessa tre övergångar. Avståndet mellan de två protonerna i molekylen är 0.074 nm. [5 p]

Några formler och konstanter

version 2.8

Modern Fysik SH1014 och SH1012, Tentamen 2022-04-22

Naturkonstanter

Ljusets hastighet i vacuum	c	$2.99792458 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
Elektronens laddning	e	$1.6021766 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
Dielektricitetskonst. i vakuum	ε_0	$8.854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$
Permeabiliteten i vakuum	μ_0	$4\pi 10^{-7} \text{ N/A}^2$
Plancks konstant	h	$6.62618 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} =$ $= 4.13570 \cdot 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$
Boltzmanns konstant	k_B	$1.38065 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$
Avogadros tal	N_A	$6.022045 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
$1/4\pi\varepsilon_0$		$8.98755 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$

Omvandlingsfaktorer och enheter

$1 \text{ eV} = 1.602189 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
$1 \text{ b [barn]} = 10^{-28} \text{ m}^2$
$1 \text{ u} = 931.502 \text{ MeV}/c^2 = 1.660566 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
$1 \text{ Bq} = 1 \text{ sönderfall/s}$
$1 \text{ Ci} = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$
$1 \text{ Å [Ångström]} = 1 \cdot 10^{-10} \text{ m}$
$1 \text{ fm [fermi]} = 1 \cdot 10^{-15} \text{ m}$

Några matematiska formler

Följande integraler kan vara användbara:

$$\begin{aligned}\int_0^\infty e^{-bx^2} dx &= \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{b}} \\ \int_0^\infty x e^{-bx^2} dx &= \frac{1}{2b} \\ \int_0^\infty x^2 e^{-bx^2} dx &= \frac{1}{4b} \sqrt{\frac{\pi}{b}}\end{aligned}$$

Vilomassor

partiklar:

	u [atomär massenhet]	MeV/c ²
Elektron	$5.485803 \cdot 10^{-4}$	0.511003
Proton	1.00727647	938.280
Neutron	1.00866501	939.573
Deutron	2.01355321	1875.628
Alfapartikel	4.00150618	3727.409
π^+		139.570
π^-		139.570
π^0		134.977
μ^+		105.658
μ^-		105.658

atomer:

	u [atomär massenhet]	MeV/c ²
^1H	1.007825	
^2H	2.014101	
^3H	3.016049	
^3He	3.016029	
^4He	4.002603	
^{12}C	12.000000	
^{98}Zr	97.912734	
^{99}Zr	98.916512	
^{100}Zr	99.917761	
^{101}Zr	100.921140	
^{137}Xe	136.911562	
^{138}Xe	137.913954	
^{239}Pu	239.052163	
^{240}Pu	240.053813	

Speciell Relativitetsteori

Lorentztransformationen

Två inertialsystem, S och S' . Vid $t = 0$ och $t' = 0$ befinner sig O och O' i samma punkt. S' rör sig med hastigheten v längst x -axeln relativt S . Lorentztransformationen:

$$\begin{aligned}x' &= \gamma(x - vt) \\y' &= y \\z' &= z \\t' &= \gamma\left(t - \frac{v}{c^2}x\right) \\ \gamma &= \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.\end{aligned}$$

Den inversa Lorentztransformationen:

$$\begin{aligned}x &= \gamma(x' + vt') \\y &= y' \\z &= z' \\t &= \gamma\left(t' + \frac{v}{c^2}x'\right).\end{aligned}$$

Dopplereffekten

Observerad frekvens f på ljuset då det utsänds från en ljuskälla som i sitt system har ljusfrekvensen f_0 då ljuskällan färdas med hastigheten v i vinkeln θ mot observatören. $\theta = 0$ motsvarar att källan rör sig *rakt ifrån* observatören.

$$f = \frac{f_0}{\gamma(1 + \frac{v}{c}\cos\theta)}.$$

Hastighetstransformationer

Transformation av hastigheter mellan S' och S :

$$\begin{aligned}u_x &= \frac{dx}{dt} = \frac{u'_x + v}{1 + \frac{v}{c^2}u'_x} \\u_y &= \frac{dy}{dt} = \frac{u'_y}{\gamma(1 + \frac{v}{c^2}u'_x)} \\u_z &= \frac{dz}{dt} = \frac{u'_z}{\gamma(1 + \frac{v}{c^2}u'_x)}\end{aligned}$$

Samband mellan rörelsemängd och energi

$$E^2 = p^2c^2 + m_0^2c^4$$

Vågor och Partiklar

Plancks strålningslag

$$\begin{aligned}I(\nu, T) &= \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \left[\frac{W}{m^2} \frac{1}{Hz} \frac{1}{sr} \right] \\I(\lambda, T) &= \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/kT} - 1} \left[\frac{W}{m^2} \frac{1}{Hz} \frac{1}{sr} \right]\end{aligned}$$

Wiens förskjutningslag

$$\lambda_{\max} = \frac{2.898 \cdot 10^{-3}}{T}$$

Comptonspridning

Då en inkommande foton med våglängden λ sprids (i vinkeln θ) mot en stillastående elektron så gäller:

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c}(1 - \cos\theta).$$

där λ' är våglängden för den spridda fotonen. För fotonenergierna gäller på motsvarande sätt:

$$\frac{1}{E'} - \frac{1}{E} = \frac{1 - \cos\theta}{m_e c^2}.$$

Kvantmekanik

Den tidsberoende en-dimensionella Schrödingerekvationen:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + U(x)\psi(x) = E\psi(x)$$

Normaliseringsvillkor i en dimension:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\Psi(x)|^2 dx = 1.$$

Oändlig en-dim. lådpotential, lösning

$$E_n = \frac{n^2\pi^2\hbar^2}{2ma^2} = \left[\hbar = \frac{h}{2\pi} \right] = \frac{n^2h^2}{8ma^2} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{a}} \sin\left(\frac{n\pi}{a}x\right).$$

Harmonisk, oscillatorpotential, en-dim.:

Potential: $U(x) = \kappa x^2/2$.

Lösning:

$$E_n = \left(n + \frac{1}{2}\right)\hbar\omega_0 \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots,$$

där $\omega_0 = \sqrt{\kappa/m}$.

Potentialbarriärer

Transmissionssannolikheten och reflektionssannolikheten vid en potentialbarriär beror av energin U_0 , dess längd a och den inkommande partikelns energin E .

Om $E > U_0$ så har vi:

$$R = \frac{\sin^2 \left[\sqrt{2m(E - U_0)}(a/\hbar) \right]}{\sin^2 \left[\sqrt{2m(E - U_0)}(a/\hbar) \right] + 4 \frac{E}{U_0} \left(\frac{E}{U_0} - 1 \right)} \quad (1)$$

$$T = \frac{4 \frac{E}{U_0} \left(\frac{E}{U_0} - 1 \right)}{\sin^2 \left[\sqrt{2m(E - U_0)}(a/\hbar) \right] + 4 \frac{E}{U_0} \left(\frac{E}{U_0} - 1 \right)} \quad (2)$$

Om $E < U_0$ så har vi:

$$R = \frac{\sinh^2 \left[\sqrt{2m(U_0 - E)}(a/\hbar) \right]}{\sinh^2 \left[\sqrt{2m(U_0 - E)}(a/\hbar) \right] + 4 \frac{E}{U_0} \left(1 - \frac{E}{U_0} \right)}$$
$$T = \frac{4 \frac{E}{U_0} \left(1 - \frac{E}{U_0} \right)}{\sinh^2 \left[\sqrt{2m(U_0 - E)}(a/\hbar) \right] + 4 \frac{E}{U_0} \left(1 - \frac{E}{U_0} \right)}$$

Tunnling genom bred potential:

$$T \approx 16 \frac{E}{U_0} (1 - E/U_0) e^{-2a\sqrt{2m(U_0 - E)}/\hbar} \quad ; \text{ om } a \gg \frac{1}{\alpha},$$

$$\text{där } \alpha = \sqrt{\frac{2m(U_0 - E)}{\hbar^2}}.$$

Operatorer

Exempel på operatorer (en-dim):

$$\hat{p} = -i\hbar \frac{d}{dx}$$
$$\hat{x} = x$$
$$\hat{H} = \frac{\hat{p}^2}{2m} + U(x) = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} + U(x).$$

Den tidsberoende Schrödingerekvationen i operatorform:

$$\hat{H}\psi(x) = E\psi(x)$$

Väntevärde och osäkerhet

Väntevärdet $\bar{Q}$ för observabeln Q :

$$\bar{Q} = \int_{-\infty}^{\infty} \Psi^*(x, t) \hat{Q} \Psi(x, t) dx.$$

Osäkerheten ΔQ för en observabel Q skrivs nu:

$$\Delta Q = \sqrt{(\overline{Q^2}) - (\bar{Q})^2}$$

Väteatomen

Coulombpotential från punktkälla/proton:

$$V(\vec{r}) = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r},$$

kvanttal i lösningen för väteatomen

- huvudkvanttal, $n = 1, 2, 3, \dots$
- bankvanttal, $l = 0, 1, 2, \dots, n - 1$
- magnetiskt kvanttal, $m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$
- spinnmagnetiskt kvanttal, $m_s = \pm \frac{1}{2}$

Vätelika atomer - energier

$$E_n = \frac{-m_e e^4 Z^2}{2(4\pi\epsilon_0)^2 \hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2} = \frac{-Z^2 \cdot 13.6 \text{ [eV]}}{n^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots,$$

där Z är antalet protoner i atomkärnan ($Z = 1$ för väte).

Väteatomen - vågfunktioner

Vinkeldel

$$\Phi(\phi) = e^{im_l\phi}, \quad m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

$$\Theta(\theta) = P_l^{m_l}(\cos\theta) \quad l = 0, 1, 2, \dots,$$
$$m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l.$$

l, m_l	$\Theta(\theta)_{l, m_l} \cdot \Phi_{m_l}(\phi) = Y_l^{m_l}$
$0, 0$	$\sqrt{\frac{1}{4\pi}}$
$1, 0$	$\sqrt{\frac{3}{4\pi}} \cos\theta$
$1, \pm 1$	$\sqrt{\frac{3}{8\pi}} \sin\theta e^{\pm i\phi}$

Radiell del

n, l	$R_{nl}(r)$
$1, 0$	$\frac{1}{a_0^{3/2}} 2e^{-r/a_0}$
$2, 0$	$\frac{2}{(2a_0)^{3/2}} \left(1 - \frac{r}{2a_0} \right) e^{-r/2a_0}$
$2, 1$	$\frac{1}{(2a_0)^{3/2}} \frac{r}{\sqrt{3} \cdot a_0} e^{-r/2a_0}$

Bohrradien a_0 skrivs:

$$a_0 = \frac{(4\pi\epsilon_0)\hbar^2}{me^2}$$

Med insatta naturkonstanter får vi $a_0 = 0.0529 \cdot 10^{-9} \text{ m}$.

Kvantiserad rörelsemängd

$$\begin{aligned} |L| &= \hbar\sqrt{l(l+1)} & l &= 0, 1, 2, \dots, n-1 \\ L_z &= m_l\hbar & m_l &= 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l \\ |S| &= \hbar\sqrt{s(s+1)} & s &= \frac{1}{2} \text{ (elektron)} \\ S_z &= m_s\hbar & m_s &= \pm \frac{1}{2} \end{aligned}$$

Magnetiskt dipolmoment

Magnetisk dipolmoment från banrörelse:

$$\bar{\mu}_L = -\frac{e}{2m_e}\bar{L}.$$

$$\mu_z = -\frac{e}{2m_e}L_z$$

Magnetisk dipolmoment från spinn:

$$\bar{\mu}_S = -g_s\frac{e}{2m_e}\bar{S}$$

Totalt magnetisk dipolmoment:

$$\bar{\mu} = \bar{\mu}_L + \bar{\mu}_S = -\frac{e}{2m}(\bar{L} + g_s\bar{S})$$

Potentiell energi för en magnetisk dipol, μ , i ett yttre magnetiskt fält, $\bar{B} = B_z$:

$$U = -\bar{\mu} \cdot \bar{B} = -\mu_z B$$

Spin-bankoppling

Magnetfältet som elektronen upplever från banrörelsen:

$$\bar{B}_L = \frac{\mu_0 e}{4\pi m_e r^3} \bar{L}, \quad (3)$$

Energiskift, ΔU :

$$\Delta U = \bar{\mu}_s \cdot \bar{B}_L = \frac{\mu_0 e^2}{4\pi m_e^2 r^3} (\bar{S} \cdot \bar{L}) \quad (4)$$

Spektroskopisk notation

s för $l = 0$
p för $l = 1$
d för $l = 2$
f för $l = 3$
g för $l = 4$
h för $l = 5$.

Molekylfysik

Effektiv massa:

$$\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$$

Rotationsenergier:

$$E_{\text{rot}} = \frac{L^2}{2I} = \frac{\hbar^2}{2I} J(J+1) \quad J = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Vibrationsenergier:

$$E_{\text{vib}} = (V + \frac{1}{2})h\nu_0 \quad V = 0, 1, 2, 3, \dots,$$

där $\nu_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{k/\mu}$.

Fasta tillståndets fysik

Fermi-Dirac-fördelningen:

$$N(\mathcal{E}) = \frac{1}{e^{(\mathcal{E}-\mathcal{E}_F)/k_B T} + 1}$$

Effektiv massa:

$$m_{\text{eff}} = \hbar^2 \left(\frac{d^2 \mathcal{E}}{dk^2} \right)^{-1}$$

Partikelfysik

Standardmodellen i tabellform:

Fermioner					Bosoner
Kvarkar	u upp	c charm	t topp	γ foton	
	d ner	s sär	b botten	g gluon	
Leptoner	ν_e elektron- neutrino	ν_μ myon- neutrino	ν_τ tau- neutrino	Z_0 Z-boson	
	e elektron	μ myon	τ taun	$W^\pm$ W-boson	

The Periodic Table of Elements

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Hydrogen 1 H 1.00794(7)	element name atomic number Symbol (mean) atomic weight																Helium 2 He 4.002602(2)
Lithium 3 Li 6.941(2)																	Neon 10 Ne 20.1797(6)
Sodium 11 Na 22.98976928(4)																	Argon 18 Ar 39.948(1)
Potassium 19 K 39.0983(1)	Scandium 21 Sc 44.955912(6)	Calcium 20 Ca 40.078(4)	Titanium 22 Ti 47.867(1)	Vanadium 23 V 50.9415(1)	Chromium 24 Cr 51.9961(6)	Manganese 25 Mn 54.938045(5)	Iron 26 Fe 55.845(2)	Cobalt 27 Co 58.933195(5)	Nickel 28 Ni 58.6934(4)	Copper 29 Cu 63.546(3)	Zinc 30 Zn 65.38(2)	Gallium 31 Ga 69.723(1)	Germanium 32 Ge 72.64(1)	Arsenic 33 As 74.92160(2)	Selenium 34 Se 78.96(3)	Bromine 35 Br 79.904(1)	Krypton 36 Kr 83.798(2)
Rubidium 37 Rb 85.4678(3)	Yttrium 39 Y 88.90585(2)	Strontium 38 Sr 87.62(1)	Zirconium 40 Zr 91.224(2)	Niobium 41 Nb 92.90638(2)	Molybdenum 42 Mo 95.96(2)	Technetium 43 Tc [98]	Ruthenium 44 Ru 101.07(2)	Rhodium 45 Rh 102.90550(2)	Palladium 46 Pd 106.42(1)	Silver 47 Ag 107.8682(2)	Cadmium 48 Cd 112.411(8)	Indium 49 In 114.818(3)	Tin 50 Sn 118.710(7)	Antimony 51 Sb 121.760(1)	Tellurium 52 Te 127.60(3)	Iodine 53 I 126.90447(3)	Xenon 54 Xe 131.293(6)
Caesium 55 Cs 132.9054519(4)	Lutetium 71 Lu 174.9668(1)	Barium 56 Ba 137.327(7)	Hafnium 72 Hf 178.49(2)	Tantalum 73 Ta 180.9479(1)	Tungsten 74 W 183.84(1)	Rhenium 75 Re 186.207(1)	Osmium 76 Os 190.23(3)	Iridium 77 Ir 192.217(3)	Platinum 78 Pt 195.084(9)	Gold 79 Au 196.966569(4)	Mercury 80 Hg 200.59(2)	Thallium 81 Tl 204.3833(2)	Lead 82 Pb 207.2(1)	Bismuth 83 Bi 208.98040(1)	Polonium 84 Po [208]	Astatine 85 At [209]	Radon 86 Rn [222]
Francium 87 Fr [223]	Lawrencium 103 Lr [260]	Radium 88 Ra [226]	Rutherfordium 104 Rf [261]	Dubnium 105 Db [262]	Seaborgium 106 Sg [263]	Bohrium 107 Bh [262]	Hassium 108 Hs [265]	Meitnerium 109 Mt [266]	Darmstadtium 110 Ds [269]	Roentgenium 111 Rg [272]	Ununbium 112 Uub [285]	Ununtrium 113 Uut [284]	Ununquadium 114 Uuq [289]	Ununpentium 115 Uup [288]	Ununhexium 116 Uuh [292]	Ununseptium 117 Uus [293]	Ununoctium 118 Uuo [294]

Lanthanum 57 La 138.90547(7)	Cerium 58 Ce 140.116(1)	Praseodymium 59 Pr 140.90765(2)	Neodymium 60 Nd 144.242(3)	Promethium 61 Pm [146]	Samarium 62 Sm 150.36(2)	Europium 63 Eu 151.964(1)	Gadolinium 64 Gd 157.25(3)	Terbium 65 Tb 158.92535(2)	Dysprosium 66 Dy 162.500(1)	Holmium 67 Ho 164.93032(2)	Erbium 68 Er 167.259(3)	Thulium 69 Tm 168.93421(2)	Ytterbium 70 Yb 173.054(5)
Actinium 89 Ac [227]	Thorium 90 Th 232.03806(2)	Protactinium 91 Pa 231.03588(2)	Uranium 92 U 238.02891(3)	Neptunium 93 Np [237]	Plutonium 94 Pu [244]	Americium 95 Am [243]	Curium 96 Cm [247]	Berkelium 97 Bk [247]	Californium 98 Cf [251]	Einsteinium 99 Es [252]	Fermium 100 Fm [257]	Mendelevium 101 Md [258]	Nobelium 102 No [259]