

ภาคผนวก

Some Useful Nuclear Data

I. MISCELLANEOUS PHYSICAL CONSTANTS

Avogadro's number, N_A	=	$6.022045 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Boltzmann constant, k	=	$1.380662 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$
	=	$0.861735 \times 10^{-4} \text{ eV K}^{-1}$
Electron rest mass, m_e	=	$9.109534 \times 10^{-31} \text{ kg}$
	=	0.5110034 MeV
Elementary charge, e	=	$1.6021892 \times 10^{-19} \text{ C}$
Gas constant, R	=	$8.31441 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Neutron rest mass, m_n	=	$1.6749544 \times 10^{-27} \text{ kg}$
	=	939.5731 MeV
Planck's constant, h	=	$6.626176 \times 10^{-34} \text{ J Hz}^{-1}$
Proton rest mass, m_p	=	$1.6726485 \times 10^{-27} \text{ kg}$
	=	938.2796 MeV
Speed of light, c	=	$2.99792458 \times 10^8 \text{ m sec}^{-1}$

II. SOME USEFUL CONVERSION FACTORS

1 eV	=	$1.6021892 \times 10^{-19} \text{ J}$
1 MeV	=	10^6 eV
1 amu	=	$1.6605655 \times 10^{-27} \text{ kg}$
	=	931.5016 MeV
1 W	=	1 joule/sec
1 d	=	86400 sec
1 mean y	=	365.25 d
	=	8766 h
	=	$3.156 \times 10^7 \text{ sec}$

2200 ms⁻¹ Cross-sections and other Physical Properties of Naturally Occurring Elements and Molecules

Atomic No.	Element or compound	Atomic or molecular weight	Density (g/cm ³)	Nuclei per unit volume $\times 10^{-21}$	Microscopic cross-section (b)			Macroscopic cross-section (cm ⁻¹)		
					σ_a	σ_s	σ_t	Σ_a	Σ_s	Σ_t
1	H	1.008	8.9†	5.3†	0.33	38	38	1.7†	0.002	0.002
	H ₂ O	18.016	1	0.0335†	0.66	103	103	0.022	3.45	3.45
	D ₂ O	20.030	1.10	0.0331†	0.001	13.6	13.6	3.3†	0.449	0.449
2	He	4.003	17.8†	2.6†	0.007	0.8	0.807	0.02†	2.1†	2.1†
3	Li	6.940	0.534	0.0463	71	1.4	72.4	3.29	0.065	3.35
4	Be	9.013	1.85	0.1236	0.010	7.0	7.01	124†	0.865	0.865
	BeO	25.02	3.025	0.0728†	0.010	6.8	6.8	73†	0.501	0.501
5	B	10.82	2.45	0.1364	755	4	759	103	0.346	104
6	C	12.011	1.60	0.0803	0.004	4.8	4.8	32†	0.385	0.385
7	N	14.008	0.0013	5.3†	1.88	10	11.9	9.9†	50†	60†
8	O	16.000	0.0014	5.3†	20†	4.2	4.2	0.000	21†	21†
9	F	19.00	0.0017	5.3†	0.001	3.9	3.9	0.01†	20†	20†
10	Ne	20.183	0.0009	2.6†	2.8	2.4	5.2	7.3†	6.2†	13.5†
11	Na	22.991	0.971	0.0254	0.525	4	4.53	0.013	0.102	0.115
12	Mg	24.32	1.74	0.0431	0.069	3.6	3.67	0.003	0.155	0.158
13	Al	26.98	2.699	0.0602	0.241	1.4	1.64	0.015	0.084	0.099
14	Si	28.09	2.42	0.0522	0.16	1.7	1.86	0.008	0.089	0.097
15	P	30.975	1.82	0.0354	0.20	5	5.20	0.007	0.177	0.184
16	S	32.066	2.07	0.0389	0.52	1.1	1.62	0.020	0.043	0.063
17	Cl	35.457	0.0032	5.3†	33.8	16	49.8	0.002	80†	0.003
18	A	39.944	0.0018	2.6†	0.66	1.5	2.16	1.7†	3.9	5.6†
19	K	39.100	0.87	0.0134	2.07	1.5	3.57	0.028	0.020	0.048
20	Ca	40.08	1.55	0.0233	0.44	3.0	3.44	0.010	0.070	0.080
21	Sc	44.96	2.5	0.0335	24	24	48	0.804	0.804	1.61
22	Ti	47.90	4.5	0.0566	5.8	4	9.8	0.328	0.226	0.555

(Contd)

Atomic No.	Element or compound	Atomic or molecular weight	Density (g/cm ³)	Nuclei per unit volume $\times 10^{-24}$	Microscopic cross-section (b)			Macroscopic cross-section (cm ⁻¹)		
					σ_a	σ_s	σ_t	Σ_a	Σ_s	Σ_t
23	V	50.95	5.96	0.0704	5	5	10.0	0.352	0.352	0.704
24	Cr	52.01	7.1	0.0822	3.1	3	6.1	0.255	0.247	0.501
25	Mn	54.94	7.2	0.0789	13.2	2.3	15.5	1.04	0.181	1.22
26	Fe	55.85	7.86	0.0848	2.62	11	13.6	0.222	0.933	1.15
27	Co	58.94	8.9	0.0910	38	7	45	3.46	0.637	4.10
28	Ni	58.71	8.90	0.0913	4.6	17.5	22.1	0.420	1.60	2.02
29	Cu	63.54	8.94	0.0848	3.85	7.2	11.05	0.0326	0.611	0.937
30	Zn	65.38	7.14	0.0658	1.10	3.6	4.70	0.072	0.237	0.309
31	Ga	69.72	5.91	0.0511	2.80	4	6.80	0.143	0.204	0.347
32	Ge	72.60	5.36	0.0445	2.45	3	5.45	0.109	0.134	0.243
33	As	74.91	5.73	0.0461	4.3	6	10.3	0.198	0.277	0.475
34	Se	78.96	4.8	0.0366	12.3	11	23.3	0.450	0.403	0.853
35	Br	79.916	3.12	0.0235	6.7	6	12.7	0.157	0.141	0.298
36	Kr	83.80	0.0037	2.6†	31	7.2	38.2	81†	19†	99†
37	Rb	85.48	1.53	0.0108	0.73	12	12.7	0.008	0.130	0.138
38	Sr	87.63	2.54	0.0175	1.21	10	11.2	0.021	0.175	0.195
39	Yt	88.92	5.51	0.0373	1.313	4.3	4.3	0.049	0.112	0.160
40	Zr	91.22	6.4	0.0423	0.185	8	8.2	0.008	0.338	0.347
41	Nb	92.91	8.4	0.0545	1.16	5	6.16	0.063	0.273	0.336
42	Mo	95.95	10.2	0.0640	2.70	7	9.70	0.173	0.448	0.621
43	Tc	98.0	—	—	22	—	—	—	—	—
44	Ru	101.1	12.2	0.0727	2.56	6	8.56	0.186	0.436	0.622
45	Rh	102.91	12.5	0.0732	149	5	154	10.9	0.366	11.3
46	Pd	106.4	12.16	0.0689	8	3.6	11.6	0.551	0.248	0.799
47	Ag	107.88	10.5	0.0586	63	6	69	3.69	0.352	4.04

Atomic No.	Element or compound	Atomic or molecular weight	Density (g/cm ³)	Nuclei per unit volume $\times 10^{-21}$	Microscopic cross-section (b)			Macroscopic cross-section (cm ⁻¹)		
					σ_a	σ_s	σ_t	Σ_a	Σ_s	Σ_t
48	Cd	112.41	8.65	0.0464	2450	7	2457	114	0.325	114
49	In	114.82	7.28	0.0382	191	2.2	193	7.30	0.084	7.37
50	Sn	118.70	6.5	0.0330		4	4.6	0.021	0.132	0.152
51	Sb	121.76	6.69	0.0331	5.7	4.3	10.0	0.189	0.142	0.331
52	Te	127.61	6.24	0.0295	4.7	5	9.7	0.139	0.148	0.286
53	I	126.91	4.93	0.0234	7.0	3.6	10.6	0.164	0.084	0.248
54	Xe	131.30	0.0059	2.7†	35	4.3	39.3	95†	12†	0.001
55	Cs	132.91	1.873	0.0085	28	20	48	0.238	0.170	0.408
56	Ba	137.36	3.5	0.0154	1.2	8	9.2	0.018	0.123	0.142
57	La	138.92	6.19	0.0268	8.9	15	24	0.239	0.403	0.642
58	Ce	140.13	6.78	0.0292	0.73	9	9.7	0.021	0.263	0.283
59	Pr	140.92	6.78	0.0290	11.3	4	15.3	0.328	0.116	0.444
60	Nd	144.27	6.95	0.0290	46	16	62	1.33	0.464	1.79
61	Pm	145.0	—	—	60	—	—	—	—	—
62	Sm	150.35	7.7	0.0309	5600	5	5605	173	0.155	173
	Sm ₂ O ₃	348.70	7.43	0.0128*	16,500	22.6	16,500	211	0.289	211
63	Eu	152.0	5.22	0.0207	4300	8	4308	89.0	0.166	89.2
	Eu ₂ O ₃	352.00	7.42	0.0127*	8740	30.2	8770	111	0.383	111
64	Gd	167.26	7.95	0.0305	46,000	—	—	1403	—	—
65	Tb	158.93	8.33	0.0316	46	—	—	1.45	—	—
66	Dy	162.51	8.56	0.0317	930	100	1050	30.1	3.17	33.3
	Dy ₂ O ₃	372.92	7.81	0.0126*	2200	214	2414	27.7	2.7	30.4
67	Ho	164.94	8.76	0.0320	65	—	—	2.08	—	—
68	Er	167.27	9.16	0.0330	173	15	188	5.71	0.495	6.20
69	Tm	168.94	9.35	0.0333	127	7	134	4.23	0.233	4.46
70	Yb	173.04	7.01	0.0244	37	12	49	0.903	0.293	1.20
71	Lu	174.99	9.74	0.0335	112	—	—	3.75	—	—
72	Hf	178.5	13.3	0.0449	105	8	113	4.71	0.0359	5.07
73	Ta	180.95	16.6	0.0553	21	5	26	1.16	0.277	1.44
74	W	183.86	19.3	0.0632	19.2	5	24.2	1.21	0.316	1.53
75	Re	186.22	20.53	0.0664	86	14	100	5.71	0.930	6.64

(Contd.)

Atomic No.	Element or compound	Atomic or molecular weight	Density (g/cm ³)	Nuclei per unit volume $\times 10^{-21}$	Microscopic cross-section (b)			Macroscopic cross-section (cm ⁻¹)		
					σ_a	σ_t	Σ_a	Σ_t	Σ_s	Σ_r
76	Os	190.2	22.48	0.0712	15.3	11	26.3	1.09	0.783	1.87
77	Ir	192.2	22.42	0.0703	440	—	—	30.9	—	—
78	Pt	195.09	21.37	0.0660	8.8	10	18.8	0.581	0.660	1.24
79	Au	197.0	19.32	0.0591	98.8	9.3	107.3	5.79	0.550	6.34
80	Hg	200.61	13.55	0.0407	380	20	400	15.5	0.814	16.3
81	Tl	204.49	11.85	0.0349	3.4	14	17.4	0.119	0.489	0.607
82	Pb	207.21	11.35	0.0330	0.170	11	11.2	0.006	0.363	0.369
83	Bi	209.0	9.747	0.0281	0.034	9	9	0.001	0.253	0.256
84	Po	210.0	9.24	0.0265	—	—	—	—	—	—
85	At	211.0	—	—	—	—	—	—	—	—
86	Rn	222.0	0.0097	2.6†	0.7	—	—	—	—	—
87	Fr	223.0	—	—	—	—	—	—	—	—
88	Ra	226.05	5	0.0133	20	—	—	0.266	—	—
89	Ac	227.0	—	—	510	—	—	—	—	—
90	Th	232.05	11.3	0.0293	7.56	12.6	20.2	0.222	0.369	0.592
91	Pa	231.0	15.4	0.0402	200	—	—	8.04	—	—
92	U	238.07	18.9	0.04783	7.68	8.3	16.0	0.367	0.397	0.075
	UO ₂	270.07	10	0.0223‡	7.6	16.7	24.3	0.169	0.372	0.542
93	Np	237.0	—	—	170	—	—	—	—	—
94	Pu	239.0	19.74	0.0498	1026	9.6	1036	51.1	0.478	51.6
95	Am	242.0	—	—	8,000	—	—	—	—	—

†Value has been multiplied by 10⁵.

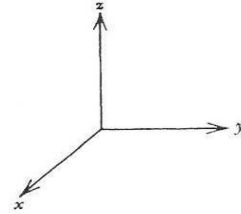
‡Molecules/cm³.

Some Useful Mathematical Formulas

(1) Representation of Laplacian ∇^2 in Various Coordinate Systems:

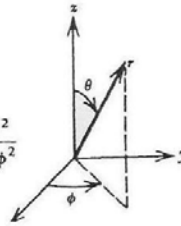
(a) Cartesian:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$



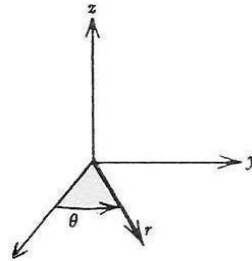
(b) Spherical:

$$\nabla^2 = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} r^2 \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2}$$



(c) Cylindrical:

$$\nabla^2 = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$



(2) Gauss' Divergence Theorem :

$$\int_V d^3r \nabla \cdot \mathbf{A} = \int_S dS \hat{\mathbf{e}}_s \cdot \mathbf{A}$$

where $\hat{\mathbf{e}}_s$ is the unit vector normal to the surface element dS .

คำตอบแบบฝึกหัดข้อค

บทที่ 1

1. $1.409 \times 10^{-11} \text{ m}$
3. $\lambda = h/(2\pi p) \approx hc/(2\pi T) \approx 25 \text{ fm} \approx 2.5 \times 10^{-12} \text{ cm}$
5. $E_p = kT/2 = 0.0134 \text{ eV}$, $\bar{E} = 3 E_p = 0.0402 \text{ eV}$
7. 17.588 MeV
9. $B.E. = [m_n + M(^{12}\text{C}) - M(^{13}\text{C})]c^2 = 4.95 \text{ MeV}$
11. ก. β^+ - decay ข. β^- - decay)
13. ก. β^+ - decay ทั้งคู่ ข. β^- - decay ทั้งคู่
15. แนวคิด พลังงานยึดเหนี่ยวของนิวตรอนตัวสุดท้ายที่ประกอบกันเป็นนิวเคลียสของธาตุ ${}_Z^AX$ หรือ (A, Z) มีค่า $B/A = [M(A-1, Z) + m_n - M(A, Z)]c^2$ กรณีโปรตอนตัวสุดท้ายหาค่าในทำนองเดียวกัน

บทที่ 2

1. $\Sigma_s(U) = N(^{235}\text{U})\sigma_s(^{235}\text{U}) + N(^{238}\text{U})\sigma_s(^{238}\text{U}) = 0.661 \text{ cm}^{-1}$
3. 9.9×10^{20} อะตอม
5. ก. $M(\text{O}) = (1/100)[\%(^{16}\text{O}) M(^{16}\text{O}) + \%(^{17}\text{O}) M(^{17}\text{O}) + \%(^{18}\text{O}) M(^{18}\text{O})]$
 $= 15.99938$
 ข. 31.99876
7. 0.0528 b
9. $\Sigma_a = 0.367 \text{ cm}^{-1}$
11. $\bar{x} = 1/\Sigma_t = 2.6 \text{ cm}$
13. ก. $\Sigma_t I NA x = 5.2 \times 10^5 \text{ interactions/s}$ ข. $5.2 \times 10^5 / 5 \times 10^7$
 ค. $\Sigma_t = 0.21 \text{ cm}^{-1}$ ง. $1.05 \times 10^8 \text{ collisions/(cm}^3 \text{ s)}$
15. $\sigma_f / (\sigma_\gamma + \sigma_f) = 85.5 \%$
17. ก. 269.139
 ข. 88.1%
 ค. 9.25 g/cm^3
 ง. 2.78 g/cm^3

จ. $N(^{235}\text{U}) = (2.78 \times 0.6022 \times 10^{24} / 235.0439) \text{ atoms/cm}^3$

19. $R = 6.2 \times 10^{-13} \text{ cm}$

บทที่ 3

1. ก. 2.88 t (metric tons) ข. 2 t = 12.6 barrels

3. $\sim 3 \times 10^6$ เท่าของถ่านหิน 1 g

5. 3.2 kg

7. 25.9 %

9. 187.3 MeV

1. $0.273 \times 10^{13} \text{ l/(cm}^3 \text{ s)}$, $0.149 \times 10^{13} \text{ l/(cm}^3 \text{ s)}$

บทที่ 4

1. $3 \times 10^9 \text{ K}$

3. ดูหัวข้อ 4.2.1

5. เพื่อให้ได้คำตอบในข้อ ค. ให้เขียนสมการการอนุรักษ์โมเมนตัมในทิศตั้งฉากกับทิศทางเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ของนิวตรอน

7. จากสมการ (4.9) และ (4.10) ว่าเป็น $\mathbf{v}_c = \mathbf{v}_L - \mathbf{v}_{cm}$ และ $\mathbf{V}_c = \mathbf{V}_L - \mathbf{V}_{cm}$

แล้วดำเนินการต่อเหมือนเดิม

9. กรณี เบอริลเลียม $\xi = 0.2066$ และ 0.2069

กรณี น้ำหนัก $\xi = 0.0967$ และ 0.0967

11. ดูที่มาของสมการ (4.30) หัวข้อ 4.2.2

13. 30 ครั้ง

บทที่ 5

1. 28,700 MWd/t

3. 3.02 %

5. 21.6 Ci/g

7. 2.2 y

9. $A(t=0) = \lambda N_0 \approx 3.7 \times 10^{10} \text{ dps} = 1 \text{ Ci}$

11. 5170 ปี

13. ก. $255,000 / (1075 \times 365)$ ข. $[365 - (28 + 45 + 18)] / 365$

บทที่ 6

1. ก. ให้ $dN(E)/dE = 0$ แล้วหาค่า E_p
 ข. $\bar{E} = (1/N) \int_0^\infty EN(E)dE$
3. 4.27×10^{13} neutrons/(cm³ s)
5. $D \approx 1.032$ cm
7. หาค่า $(\cos \theta_L)_{ave} = 2/(3A)$ และใช้ค่าภาคตัดขวางจากตาราง
9. แนวคิด เนื่องจากความเข้มข้นของกรตบอริกมีค่าต่ำทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient) ของสารผสมมีค่าเท่ากับของน้ำบริสุทธิ์
11. ก. $J(r) = -D r^\Lambda (S/4\pi)(1/r^2 + 1/rL) e^{-r/L}$
 ข. $4\pi r^2 J(r) = S(1 + r/L) e^{-r/L}$
13. 0.207 , 0.704 , 88 ครั้ง , 0.40 cm

บทที่ 7

1. ชั่วโมงที่ 24 และใช้เวลา 2.3×10^{-7} s
3. 656 J
5. ก. $C = 0.254 + 0.640$
 ข. $1,000 N_A / 235$ อะตอม เมื่อ N_A คือเลขอะโวกาโดร์
 ค. จะเกิด $^{239}\text{Pu} = (C \times 1,000 N_A / 235)$ อะตอม
 หรือเกิด $^{239}\text{Pu} = (C \times 1,000 \times 239 / 235) \times 1 \text{ kg}$
7. ก. $R = 55.9$ cm , $H = 101.7$ cm ข. $m_F = 14.5$ kg
9. ก. $R = 268$ cm ข. $R_o = 322$ cm