

## 1 物理定数表

### 1.1 基礎定数

真空中の光速 <sup>†</sup>	$c$	$2.997\,924\,58 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ (SI)
単位電荷 <sup>†</sup>	$e = q_e/\sqrt{4\pi\epsilon_0}$	$4.80 \times 10^{-10} \text{ esu}$ (CGS)
	$q_e = e\sqrt{4\pi\epsilon_0}$	$1.602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C}$ (SI)
	$[e^2] = [(q_e/4\pi\epsilon_0)^2]$	$[\text{ML}^3\text{T}^{-2}]$
真空の誘電率	$\epsilon_0 = (1/4\pi c^2) \times 10^7$	$8.85 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$ (SI)
	$1/4\pi\epsilon_0 = c^2 \times 10^{-7}$	$8.99 \times 10^9 \text{ kg m}^3 \text{ s}^{-2} \text{ C}^{-2}$ (SI)
	$q_e^2/4\pi\epsilon_0$	$2.31 \times 10^{-28} \text{ kg m}^3 \text{ s}^{-2}$ (SI)
真空の透磁率	$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$	$1.26 \times 10^{-6} \text{ Hm}^{-1}$ (SI)
プランク定数 <sup>†</sup>	$h$	$6.626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J s} = 4.14 \times 10^{-15} \text{ eV s}$
	$\hbar = h/2\pi$	$1.05 \times 10^{-27} \text{ erg s} = 6.58 \times 10^{-16} \text{ eVs}$
	$[h]$	$[\text{ML}^2\text{T}^{-1}]$
重力定数	$G$	$6.67 \times 10^{-8} \text{ dyn cm}^2 \text{ g}^{-2}$
	$[G]$	$[\text{M}^{-1}\text{L}^3\text{T}^{-2}]$
微細構造定数	$\alpha_e = e^2/\hbar c$ (CGS) = $q_e^2/4\pi\epsilon_0\hbar c$ (SI)	$1/(1.37 \times 10^2) = 7.30 \times 10^{-3}$
重力微細構造定数	$\alpha_g = Gm_p^2/\hbar c$	$5.90 \times 10^{-39}$
アボガドロ数 <sup>†</sup>	$N_A$	$6.022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
ボルツマン定数 <sup>†</sup>	$k$	$1.380\,649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1} = 8.62 \times 10^{-5} \text{ eV K}^{-1}$
ボーア磁子	$\mu_B = e\hbar/2m_e$	$9.27 \times 10^{-21} \text{ gauss cm}^3$

(†: 2019 年からの新 SI 単位系で  $c$ ,  $q_e$ ,  $h$ ,  $N_A$ ,  $k$  は不確かさのない定義値として全桁を表示。それ以外は有効数字 2 桁で表記。)

### 1.2 長さと面積

	cm	pc	light year	AU
cm	1	$3.24 \times 10^{-19}$	$1.06 \times 10^{-18}$	$6.69 \times 10^{-14}$
pc (パーセク)	$3.09 \times 10^{18}$	1	3.26	$2.06 \times 10^5$
light year (光年)	$9.46 \times 10^{17}$	0.307	1	$6.32 \times 10^4$
AU (天文単位)	$1.50 \times 10^{13}$	$4.85 \times 10^{-6}$	$1.58 \times 10^{-5}$	1

電子のコンプトン波長	$\lambda_e = h/m_e c$	$2.43 \times 10^{-10} \text{ cm}$	$(\lambda_e/2\pi = 3.84 \times 10^{-11} \text{ cm})$
陽子のコンプトン波長	$\lambda_p = h/m_p c$	$1.32 \times 10^{-13} \text{ cm}$	$(\lambda_p/2\pi = 2.10 \times 10^{-14} \text{ cm})$
古典電子半径	$r_e = e^2/m_e c^2$	$2.82 \times 10^{-13} \text{ cm}$	
ボーア半径	$a_0 = \hbar^2/m_e e^2$	$0.529 \times 10^{-8} \text{ cm}$	$(\pi a_0^2 = 0.880 \times 10^{-16} \text{ cm}^2)$
リュードベリ定数	$R_\infty = 2\pi^2 m_e e^4 / \hbar^3 c$	$1.10 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$	
1 keV の光子の波長	$hc/1\text{keV}$	$12.4 \times 10^{-8} \text{ cm}$	$= 12.4 \text{ \AA}$
ラーモア半径	$r_g = p_\perp / qB$	$3.3 \times 10^2 (\gamma mc^2 / \text{GeV}) (v_\perp / c) (q/e)^{-1} (B/\text{T})^{-1} \text{ cm}$	
地球半径	$R_\oplus$	$6.38 \times 10^8 \text{ cm}$	$(4\pi R_\oplus^2 = 5.11 \times 10^{18} \text{ cm}^2)$
太陽半径	$R_\odot$	$6.96 \times 10^{10} \text{ cm}$	$(4\pi R_\odot^2 = 6.09 \times 10^{22} \text{ cm}^2)$
シュバルツシルト半径	$R_s = 2GM/c^2$	$2.95 \times 10^5 (M/M_\odot) \text{ cm}$	$\sim 3 \text{ km}$
銀河系中心から太陽の距離		$\sim 10 \text{ kpc}$	$(\text{c.f., IAU } 8.5 \text{ kpc})$
銀河系の直径		$\sim 25 \text{ kpc}$	
銀河団の平均直径		$\sim 3 \text{ Mpc}$	
プランク長	$(G\hbar/c^3)^{1/2}$	$1.62 \times 10^{-33} \text{ cm}$	
トムソン散乱断面積	$\sigma_T = 8\pi r_e^2/3$	$6.65 \times 10^{-25} \text{ cm}^2$	
バーン (barn, 反応断面積)	b	$10^{-24} \text{ cm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$	

### 1.3 時間

1 ユリウス年	$365.25 \text{ days (SI day)} = 31,557,600 \text{ s}$
1 日	$24 \text{ h} = 1,440 \text{ min} = 86,400 \text{ s}$
光の伝搬時間	$3.33(r/1 \text{ m}) \text{ ns} = 500(r/1 \text{ AU}) \text{ s}$
ハッブル時間 $1/H_0$	$9.8 \times 10^9 h^{-1} \text{ year} = 3.09 \times 10^{17} h^{-1} \text{ s}$ (宇宙年齢の目安)
宇宙年齢	138 億年 [Planck Collaboration A&A (2016), Table 4]
プランク時間 $(G\hbar/c^5)^{1/2}$	$5.39 \times 10^{-44} \text{ s}$

## 1.4 質量とエネルギー

電子の質量	$m_e$	$9.11 \times 10^{-28}$ g	電子の静止質量エネルギー	$m_e c^2$	0.511 MeV
陽子の質量	$m_p$	$1.67 \times 10^{-24}$ g	陽子の静止質量エネルギー	$m_p c^2$	938 MeV
陽子電子質量比	$m_n/m_e$	$1.84 \times 10^3$	水素の基底状態エネルギー	$m_e c^2 (\alpha_e^2/2)$	13.6 eV
地球質量	$M_\oplus$	$5.98 \times 10^{27}$ g		=1Ry	912 Å
太陽質量	$M_\odot$	$1.99 \times 10^{33}$ g			
銀河系質量	$M_{\text{gal}}$	$\sim 2 \times 10^{11} M_\odot$	$E\lambda = 12.39842$ keV Å		
宇宙の質量	$M_U$	$10^{54}\text{--}10^{56}$ g	$\hbar c = 1.973$ keV Å=197.3 MeV fm		
プランク質量	$(\hbar c/G)^{1/2}$	$2.18 \times 10^{-5}$ g	1 J = $1 \times 10^7$ ergs, 1 cal=4.19 J		

	eV	erg	cm <sup>-1</sup>	Hz	K
eV	1	$1.60 \times 10^{-12}$	$8.07 \times 10^3$	$2.42 \times 10^{14}$	$1.16 \times 10^4$
erg	$6.24 \times 10^{11}$	1	$5.03 \times 10^{15}$	$1.51 \times 10^{26}$	$7.24 \times 10^{15}$
cm <sup>-1</sup>	$1.24 \times 10^{-4}$	$1.99 \times 10^{-16}$	1	$3.00 \times 10^{10}$	1.44
Hz	$4.14 \times 10^{-15}$	$6.63 \times 10^{-27}$	$3.34 \times 10^{-11}$	1	$4.80 \times 10^{-11}$
K	$8.62 \times 10^{-5}$	$1.38 \times 10^{-16}$	$6.95 \times 10^{-1}$	$2.08 \times 10^{10}$	1

## 1.5 輻射

黒体放射の輻射密度定数	$a = \pi^2 k^4 / 15 c^3 \hbar^3$	$7.57 \times 10^{-15}$ erg cm <sup>-3</sup> K <sup>-4</sup>
シュテファン-ボルツマン定数	$\sigma_{\text{sb}} = ac/4$	$5.67 \times 10^{-5}$ erg cm <sup>-2</sup> K <sup>-4</sup> s <sup>-1</sup>
黒体放射の最大強度波長	$T\lambda_{\text{max}}$	0.290 cm K
黒体放射の光度	$L_x = 4\pi R^2 \sigma_{\text{sb}} T^4 = 1.045 \times 10^{35} (R/10 \text{ km})^2 (kT/0.3 \text{ keV})^4$	erg s <sup>-1</sup>
太陽光度	$L_\odot$	$3.8 \times 10^{33}$ erg s <sup>-1</sup> = $3.8 \times 10^{26}$ W
絶対輻射等級	$M_{\text{bol}} = 4.75 - 2.5 \log (L/L_\odot)$	
絶対輻射等級 0 等星の輻射		$3.0 \times 10^{35}$ erg s <sup>-1</sup>
輻射等級 0 等星の明るさ		$2.5 \times 10^{-5}$ erg cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
見かけの等級	$m = M + 5 \log (D/\text{pc}) - 5 + \text{空間吸収の大きさ}$	
X線光度	$L_x = 4\pi d^2 F_x = 1.200 \times 10^{32} (d/1 \text{ kpc})^2 (F_x/10^{-12} \text{ erg s cm}^{-2})$	erg s <sup>-1</sup>
エディントン光度	$L_{\text{Edd}} \sim 1.3 \times 10^{38} (M/M_\odot)$	erg s <sup>-1</sup>
スピンドウン光度	$L_{\text{sd}} = 3.94 \times 10^{35} \text{ erg s}^{-1} (P/1 \text{ s})^{-3} (\dot{P}/10^{-11} \text{ s s}^{-1})$	(at $I = 10^{45} \text{ g cm}^2$ )
かに星雲のX線強度	1 Crab	$\sim 2.3 \times 10^{-8}$ erg s cm <sup>-2</sup> (2-10 keV)

## 1.6 磁場

量子電磁力学の臨界磁場	$B_{\text{cr}} = m_e^2 c^3 / \hbar e$	$4.414 \times 10^{13}$ G
パルサーの表面磁場強度	$B_d = (3c^3 I P \dot{P} / 2\pi^2 R_{\text{ns}}^6)^{1/2}$	$1.0 \times 10^{14} (P/1 \text{ s})^{1/2} (\dot{P}/10^{-11} \text{ s s}^{-1})^{1/2}$ G
電子サイクロトロン共鳴	$E_{\text{cyc}} = m_e c^2 (1 + B/B_{\text{cr}})$	11.6 (B/10 <sup>12</sup> G) keV
磁気エネルギー密度	$U_{\text{mag}} = B^2 / 8\pi$ (CGS)	$3.98 \times 10^{-2} (B/1 \text{ G})^2$ erg cm <sup>-3</sup> (1T=10 <sup>4</sup> G)

## 1.7 宇宙論

ハッブル定数	$H_0$	$100h \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1} = 3.2h \times 10^{-18} \text{ s}^{-1}$ ( $h \sim 0.70$ )
ハッブル距離	$c/H_0$	$3000h^{-1} \text{ Mpc} = 9.26 \times 10^{27} h^{-1} \text{ cm}$
臨界密度	$\rho_c = (3H_0^2) / (8\pi G)$	$1.9 \times 10^{-29} h^2 \text{ g cm}^{-3} = 2.8 \times 10^{11} h^2 M_\odot \text{ Mpc}^{-3}$
宇宙黒体輻射密度	$\rho_{r0} = aT_{r0}^4$	$4.0 \times 10^{-13} [T_{r0}/2.7\text{K}]^4$ erg cm <sup>-3</sup>
宇宙黒体輻射光子数密度	$n_{r0}$	$4.0 \times 10^2 [T_{r0}/2.7\text{K}]^3$ cm <sup>-3</sup>
宇宙論的赤方偏移 (近傍)	$z \sim (H_0/c)d$	$3.3 \times 10^{-4} h (d/\text{Mpc})$ ( $z < 0.05$ )
運動学的赤方偏移	$1+z = \sqrt{(1+\beta)/(1-\beta)}$	$E' = \gamma(1-\beta)E = \{(1-\beta)/(1+\beta)\}^{1/2} E$
重力赤方偏移	$1+z = (1 - R_s/R)^{-1/2}$	

## 1.8 その他

[力] = [MLT <sup>-2</sup> ], [エネルギー] = [ML <sup>2</sup> T <sup>-2</sup> ], [圧力] = [ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup> ]	
1 g cm <sup>-3</sup> = $5.99 \times 10^{23}$ proton cm <sup>-3</sup> = $5.61 \times 10^{32}$ eV cm <sup>-3</sup> = $1.48 \times 10^{40} M_\odot \text{ Mpc}^{-3}$	
1 Jy = $10^{-23}$ erg cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> Hz <sup>-1</sup> = $10^{-26}$ J m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> Hz <sup>-1</sup>	
760 torr = $1.013 \times 10^6$ dyn cm <sup>-2</sup> = 1 atmos = 1.013 bars = $1.013 \times 10^5$ Nm <sup>-2</sup> (Pa)	
1 radian = 57.296 degrees, 1 arcsec = $4.848 \times 10^{-6}$ radians, 1 sr ~ 3282.806 degrees <sup>2</sup>	
天体の赤経と赤緯を ( $\alpha, \delta$ ) として、人工衛星のオイラー角は ( $\alpha, 90^\circ - \delta, 90^\circ - [\text{ロール角}]$ )	

## 2 中性原子や高階電離イオンからの代表的な輝線

Table 1: 中性原子、ヘリウム様イオン、水素様イオンの輝線エネルギーと K 殻束縛エネルギー (単位 eV)

Neutral atom		$\rho$ (g cm <sup>-3</sup> )	Fluorescence						
Element	Z		K $\alpha_1$	K $\alpha_2$	K $\beta_1$	L $\alpha_1$	L $\alpha_2$	L $\beta_1$	K-edge
C	6	1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>2</sup>	277.						284.2
N	7	1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>3</sup>	392.4						409.9
O	8	1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>4</sup>	524.9						543.1
Ne	10	1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>6</sup>	848.6	848.6					870.2
Na	11	[Ne]3s <sup>1</sup>	1,040.9	1,040.9	1,071.1				1,070.8
Mg	12	[Ne]3s <sup>2</sup>	1,253.6	1,253.6	1,302.2				1,303.0
Al	13	[Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>1</sup>	1,486.7	1,486.2	1,557.4				1,559.6
Si	14	[Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>2</sup>	1,739.9	1,739.3	1,835.9				1,839.
S	16	[Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>4</sup>	2,307.8	2,306.6	2,464.0				2,472.
Ar	18	[Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>6</sup>	2,957.7	2,955.6	3,190.5				3,205.9
Ca	20	[Ar]4s <sup>2</sup>	3,691.6	3,688.0	4,012.7	341.3	341.3	344.9	4,038.5
Fe	26	[Ar]3d <sup>6</sup> 4s <sup>2</sup>	6,403.8	6,390.8	7,057.9	705.0	705.0	718.5	7,112.
Ni	28	[Ar]3d <sup>8</sup> 4s <sup>2</sup>	7,478.1	7,460.8	8,264.6	851.5	851.5	868.8	8,333.

Ion	He-like					H-like				
	F or z	I1 or y	I2 or x	R or w	K-edge	Ly $\alpha_2$	Ly $\alpha_1$	Ly $\beta_2$	Ly $\beta_1$	K-edge
C	298.9	304.4	304.4	307.9	392.0	367.4	367.5	435.5	435.5	489.9
N	419.8	426.3	426.3	430.7	552.0	500.2	500.3	592.9	592.9	667.0
O	560.9	568.5	568.6	573.9	739.3	653.4	653.6	774.5	774.6	871.4
Ne	905.0	914.8	915.0	922.0	1,195.8	1,021.5	1,021.9	1,210.8	1,210.9	1,362.1
Na	1,107.8	1,118.7	1,119.0	1,126.8	1,465.1	1,236.3	1,236.9	1,465.4	1,465.6	1,648.7
Mg	1,331.1	1,343.1	1,343.5	1,352.2	1,761.8	1,471.6	1,472.6	1,744.5	1,744.8	1,962.6
Al	1,574.9	1,588.1	1,588.7	1,598.2	2,085.9	1,727.6	1,728.9	2,048.0	2,048.4	2,304.1
Si	1,839.4	1,853.7	1,854.6	1,864.9	2,437.6	2,004.3	2,006.0	2,376.1	2,376.6	2,673.1
S	2,430.3	2,447.1	2,448.7	2,460.6	3,223.7	2,619.7	2,622.7	3,105.8	3,106.7	3,494.1
Ar	3,104.1	3,123.5	3,126.2	3,139.5	4,120.6	3,318.1	3,322.9	3,934.2	3,935.7	4,426.2
Ca	3,861.1	3,883.3	3,887.7	3,902.2	5,128.8	4,100.1	4,107.5	4,861.9	4,864.1	5,469.8
Fe	6,636.6	6,667.5	6,682.3	6,700.4	8,828.1	6,951.9	6,973.1	8,246.3	8,252.6	9,277.6
Ni	7,731.6	7,765.7	7,786.4	7,805.5	10,288.8	8,073.1	8,101.7	9,577.5	9,586.0	10,775.3

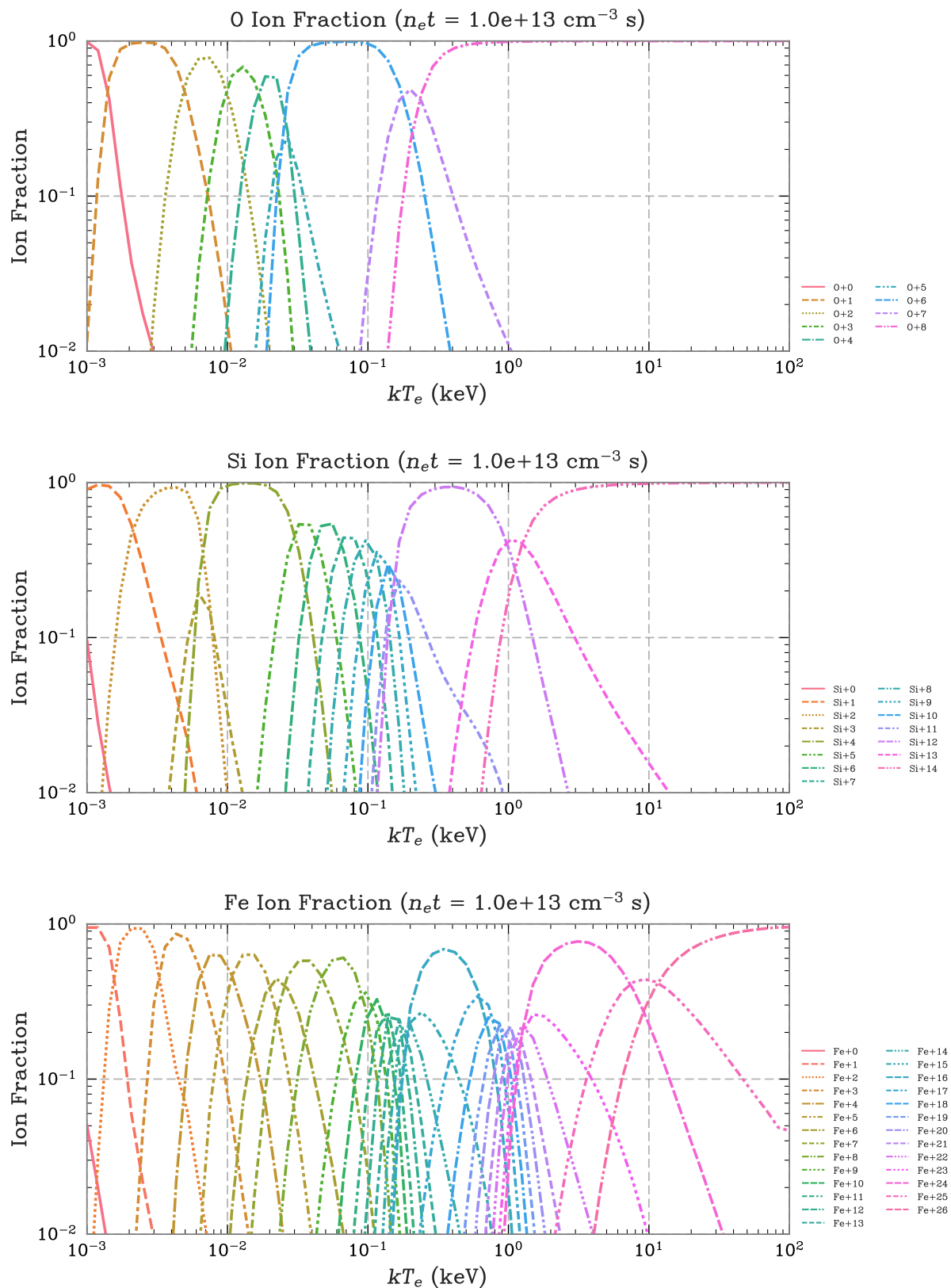
X-ray Data Booklet (<http://xdb.lbl.gov>) are used for line and K-edge (ionization) energies of neutral elements, NIST Atomic Spectra Database version 5.6 (<https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database>) for K-edge (ionization) energies of He-like and H-like ions, and AtomDB v3.0.9 <http://www.atomdb.org> for emission line energies of He-like and H-like ions. The energies are shown to one place of decimal without rounding values. Note: Inner shell lines are denoted by K $\alpha$  ( $n=1$  to 2), K $\beta$  ( $n=1$  to 3) for Li-like or higher ions, but called Ly $\alpha$  and Ly $\beta$  for He-like and H-like ions.

Table 2: An incomplete list of astrophysically important X-ray spectral features (keV)

Energy		Energy		Energy		Energy	
Ne VII	0.127	O VII	0.574	Fe XX	0.996	Fe I K $\alpha_1$	6.404
Si XI	0.283	O VIII	0.654	Ne X	1.022	Fe XXV	6.64
C I K edge	0.284	O VII	0.666	Mg I K edge	1.305	Fe XXV	6.68
Si XII	0.303	O VII	0.698	Mg XI	1.340	Fe XXV	6.70
C V	0.308	Fe I LIII edge	0.707	Mg XI	1.352	Fe XXVI	6.93
N I K edge	0.402	Fe I LII edge	0.721	Si K edge	1.839	Fe I K $\beta$	7.058
N VI	0.431	Fe XVII	0.826	Si XIII	1.86	Fe I Kedge	7.111
N VII	0.500	Ne I K edge	0.867	S I K edge	2.472		
O I K edge	0.532	Ne IX	0.915	Ar I K edge	3.203		
O VII	0.569	Ne IX	0.922	Fe I K $\alpha_2$	6.391		



## 5 衝突電離プラズマのイオン比率



Calculated via pyatomdb (<https://atomdb.readthedocs.io>) with a Google Colaboratory code (<https://x.gd/oyOCN>)  
 see also Smith et al. "ASTRO-H White Paper - New Spectral Features", 2014 (<https://arxiv.org/abs/1412.1172>)

## 6 天文学の便利な TIPS

### 6.1 覚えておきたい数値

(距離)

$$\text{pc} \approx 3 \times 10^{18} \text{ cm}$$

$$\text{AU} \approx 500 \text{ light-seconds}$$

$$R_{\text{earth}} \approx R_{\text{jupiter}}/10 \approx R_{\odot}/100$$

$$2GM_{\odot}/c^2 \approx 3 \text{ km}$$

(質量とエネルギー)

$$m_{\text{p}} \sim m_{\text{n}} \sim 940 \text{ MeV} \approx 1 \text{ GeV}$$

$$m_{\text{e}} \approx 0.511 \text{ MeV}/c^2 \approx m_{\text{p}}/2000$$

$$\hbar c \approx 2000 \text{ eV } \text{\AA}$$

$$\alpha = e^2/(\hbar c) \text{ [ガウス単位系]} \approx 1/137 \text{ } (\hbar c \text{ と微細構造定数 } \alpha \text{ から基本パラメータを導出できる})$$

$$1 \text{ \AA} \rightarrow 12.4 \text{ keV}$$

$$1 \text{ eV} \approx 1.6 \times 10^{-12} \text{ erg} \rightarrow 1,200 \text{ nm} \rightarrow 240 \text{ THz} \rightarrow 10^4 \text{ K}$$

(天文学では依然として CGS 単位系に揃えると便利なことも多い)

$$\text{ボルツマン定数 } k \sim 1.38 \times 10^{-16} \text{ erg/K}$$

$$\text{ステファン-ボルツマン定数 } \sigma \sim 1.03 \times 10^{24} \text{ erg/s/cm}^2/\text{keV}^4$$

$$\text{典型的な星間密度} \approx 1 \text{ Hydrogen atom/cm}^3$$

$$\text{距離 } d \text{ までの水素柱密度 (hydrogen column density) } N_{\text{H}} \approx 3 \times 10^{21} (d/\text{kpc}) \text{ cm}^{-2}$$

### 6.2 便利な近似

桁で議論する封筒の裏の精度である [確認が必要, 2022-04-21]

$$\text{year} \approx 3.15 \times 10^7 \text{ seconds} \approx \pi \cdot 10^7 \text{ seconds}$$

$$\text{km/s} \approx \text{pc/Myr}$$

$$G \approx 40 \text{ AU}^3/(M_{\text{sun}} \text{ year}^2)$$

$$1'' \approx 5 \text{ } \mu\text{rad}$$

$$\text{sphere} \approx 60^6/(100\pi) \text{ arcmin}^2$$