

## EXAMEN TEMÁTICO

### Astronomía Extragaláctica y Cosmología

Enero de 2012

La duración del examen es de 2 horas.

Resuelva 4 de los 5 problemas planteados.

Numere, dentro de un recuadro, cada hoja utilizada usando el número de problema e indicando la página del mismo: por ejemplo, 2-3 significa la página 3 del problema 2.

**\*\* Indique en cada hoja utilizada su nombre y apellido \*\***



# 1. Estructura de Núcleos Activos Galácticos (AGN)

## 1.1. Componentes

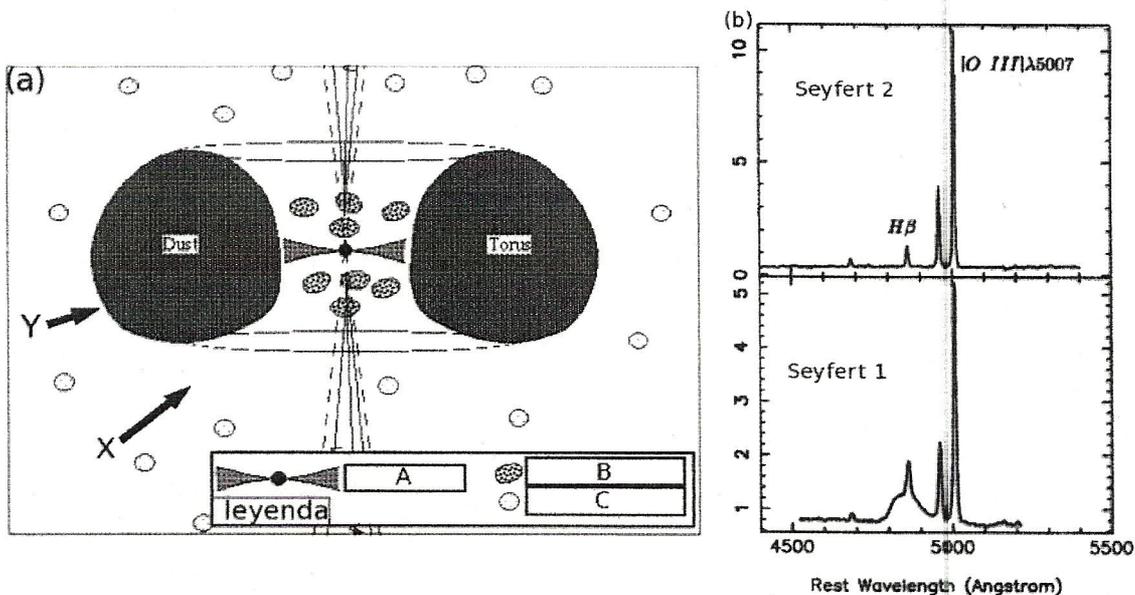


Figura 1: (a) Dibujo conceptual de la estructura del AGN. Las escalas no son, claramente, proporcionales. (b) Espectros típicos de galaxias Seyfert 2 (arriba) y Seyfert 1 (abajo).

- En la figura 1(a) se muestra la estructura central del AGN de manera esquemática. ¿Cuáles de las siguientes componentes de 1)-5) deben estar indicadas en las cajas  ,  &  de la Figura 1(a)?
  - Nubes en la región con líneas anchas (BLR clouds)
  - El agujero negro super masivo y el disco de acreción
  - El bulbo
  - Nubes en la región con líneas delgadas (NLR clouds)
  - Jets relativistas.
- Las preguntas siguientes son solo sobre las componentes  y  del diagrama en la Figura 1(a). Elija una condición física de las opciones (i)-(iii) en cada caso:
  - Componente  : (i) emite líneas permitidas (e.g. Ly $\alpha$ , H $\alpha$ , MgII $\lambda$ 2998), pero no emite líneas prohibidas (e.g. [OIII] $\lambda$  $\lambda$ 4958, 5007, [NII] $\lambda$  $\lambda$ 6548, 6583), (ii) emite líneas prohibidas, pero no emite líneas permitidas, o (iii) emite ambos tipos de líneas, permitidas y prohibidas.

- b) Componente C: (i) emite líneas permitidas, pero no emite líneas prohibidas, (ii) emite líneas prohibidas, pero no emite líneas permitidas, (iii) emite ambos tipos de líneas, permitidas y prohibidas.
- c) La densidad del gas en la componente B es: (i) más (ii) menos, o (iii) aproximadamente la misma que la de la componente C.
3. En la Figura 1(b), se muestran espectros típicos de los dos tipos de galaxias Seyfert. Relacione las líneas de visión X y Y de la Figura 1(a) con Seyfert 1 y Seyfert 2, respectivamente. Explique brevemente sus respuestas.

## 1.2. Estimación de la masa del agujero negro super masivo (Reverberation Mapping)

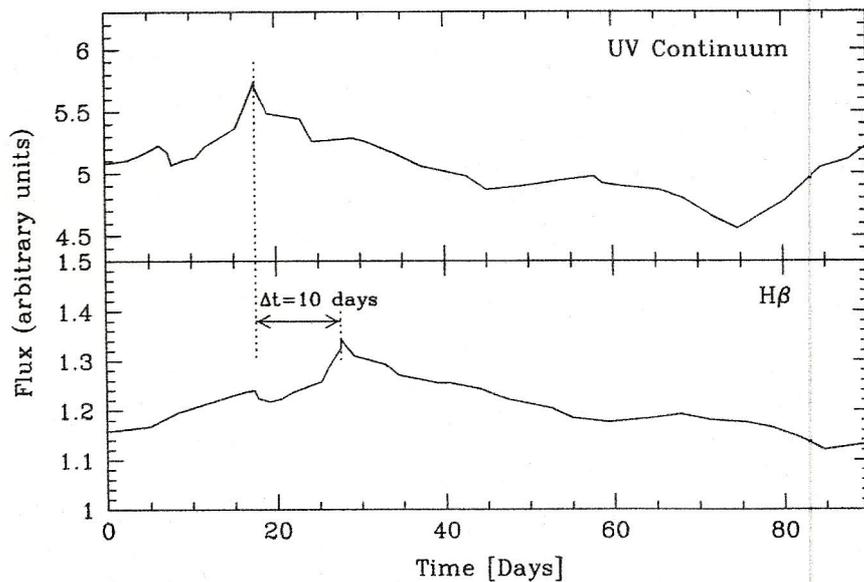


Figura 2: Curvas de luz del continuo ultravioleta (arriba) y de la de  $H\beta$  (abajo) de una Seyfert hipotética

Considere una galaxia de Seyfert hipotética con las características siguientes:

- La distancia a esta galaxia es de 10 Mpc.
- La línea de emisión de  $H\beta$  tiene dos componentes; componente delgado (débil) con un ancho de  $\text{FWHM} = 450 \text{ km s}^{-1}$  ( $\text{FWHM} = \text{full-width at half maximum}$ ) y componente grueso (dominante) con un  $\text{FWHM} = 4500 \text{ km s}^{-1}$ . La línea de emisión de  $[\text{OIII}]\lambda 5007$  tiene un  $\text{FWHM} = 450 \text{ km s}^{-1}$ .
- En la Figura 2, se dibujan las curvas de la luz en el continuo ultravioleta y la línea de  $H\beta$  de nuestra galaxia Seyfert.

Responda las siguientes preguntas:

1. Suponga que la mayoría del continuo en  $UV$  viene de la región cerca del agujero negro super masivo (SMBH) central. ¿Cuál es la distancia *típica* entre la región de  $H\beta$  (componente ancha) y el SMBH central? Use la Figura 2 y provea su respuesta en unidades de [cm]. Ignore factores de orden de la unidad, que dependen de los detalles de geometría de la distribución de las nubes que emiten la línea.
2. Suponiendo que el ancho (FWHM) de la línea representa un movimiento Kepleriano de las nubes que emiten la línea  $H\beta$  alrededor del SMBH central, calcule la masa aproximada del SMBH. De su respuesta en unidades de gramos y en  $M_{\odot}$ .

## 2. Función de Masa

Considere un brote de formación estelar instantáneo cuya formación estelar sigue una función inicial de masas de Salpeter (e.g. Figura 3):

$$\Phi(M) dM = \phi_0 M^{-\alpha} dM, \quad \text{con } \alpha = 2.35.$$

1. Determine la fracción de estrellas formadas en el rango de  $2M_{\odot}$  a  $3M_{\odot}$  con respecto a aquellas formadas en el rango de  $10M_{\odot}$  a  $11M_{\odot}$ .
2. Las estrellas de secuencia principal siguen la relación masa-luminosidad:

$$\frac{L}{L_{\odot}} = \left( \frac{M}{M_{\odot}} \right)^{\beta},$$

partiendo de esta relación y suponiendo un valor de  $\beta = 4$ , determine ahora la fracción de estrellas formadas en el intervalo de  $2L_{\odot}$  a  $3L_{\odot}$  con respecto a aquellas formadas en el rango de  $10L_{\odot}$  a  $11L_{\odot}$

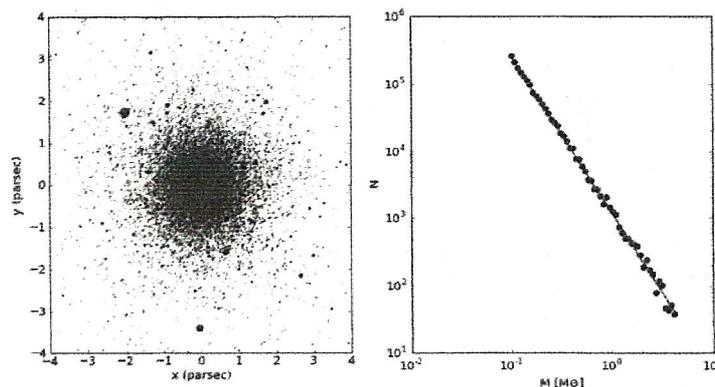


Figura 3: Cúmulo globular y función de Salpeter.

### 3. Ecuaciones de Friedman

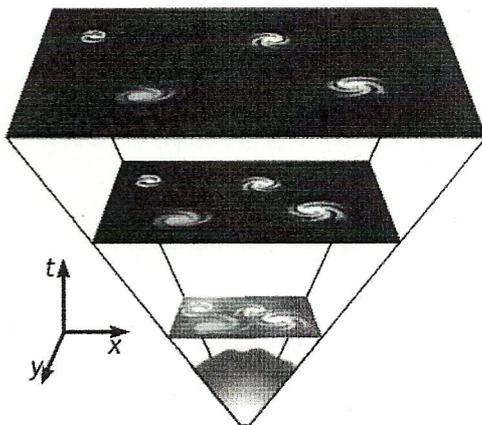
La ecuación de FRW que relaciona el factor de escala,  $a = a(t)$ , con la densidad de energía del universo ( $\varepsilon = \rho c^2$ ) está dada por

$$\frac{\dot{a}^2}{a^2} + \frac{k}{a^2} = \frac{8\pi G}{3}\rho, \quad (1)$$

donde el segundo término del lado izquierdo de la ecuación representa el término de curvatura. Por otro lado,  $\rho$  denota la densidad de energía **total** del universo, dada por la suma de las densidades de energía de la materia, de la radiación, y de aquella asociada al vacío.

Dependiendo de que término domine en la ecuación así será el comportamiento de  $a$  como función del tiempo; por ejemplo, si domina el término de la constante cosmológica el universo se estará expandiendo de manera acelerada.

Este problema consiste en estimar los corrimientos al rojo (*redshifts*),  $z$ , en los cuales un término domina sobre los otros.



- Compare los términos de curvatura y de radiación, y encuentre el corrimiento al rojo  $z_c$ , en función de  $\Omega_r$  y  $\Omega$ , en el cual estos términos son iguales.
- De manera similar que en (a), compare ahora los términos de curvatura y materia y encuentre el corrimiento al rojo  $z_f$ , en función de  $\Omega_m$  y  $\Omega$ , en el cual estos términos toman el mismo valor. Desprecie los términos asociados al vacío y a la radiación; esto es, suponga que  $\Omega = \Omega_m$  y encuentre el valor numérico de  $z_f$  para  $\Omega_m = 0,3$ .
- Para un universo plano  $k = 0$ , compare el término de la constante cosmológica con el de la materia y encuentre el corrimiento al rojo  $z_l$ , en función de  $\Omega_v$  y  $\Omega_m$ , arriba del cual el término de la materia domina sobre el de la constante cosmológica,  $\Omega_v = \rho_v/\rho_c$ , donde  $\rho_v$  es la densidad de energía asociada al vacío. Suponga que  $\Omega_v = 0,7$  y  $\Omega_m = 0,3$  y encuentre el valor de  $z_l$ . ¿Cómo evoluciona el universo; esto es, cómo cambia  $a$  con el tiempo, para  $z > z_l$ ? Sugerencia: desprecie los términos de radiación y materia en la ecuación (1) e integre.

## 4. Equilibrio Térmico en el Universo Temprano

En este problema se aborda una cuestión sobre el establecimiento de un equilibrio térmico en el universo temprano. En particular, se calcula la temperatura  $T$  a la cual la materia relativista esta en equilibrio térmico con las interacciones electromagnéticas; e.g. aniquilación de pares  $e^\pm$  y dispersión de Compton (Figura 4).

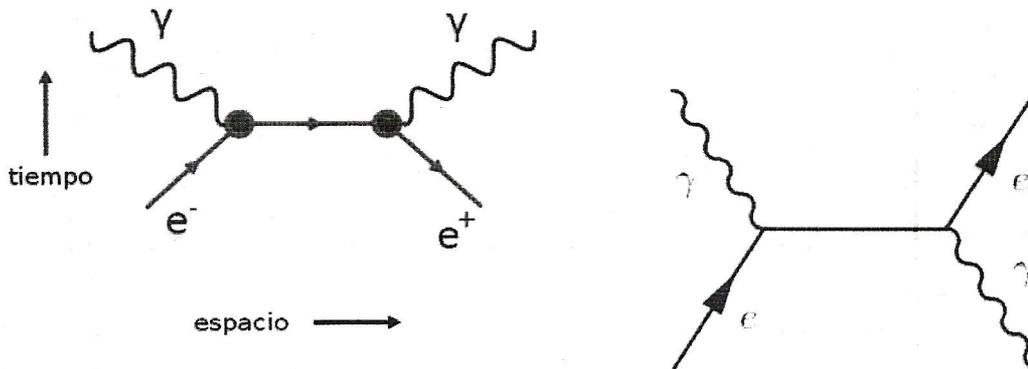


Figura 4: (Izquierda) Diagrama del proceso de aniquilación de pares y (derecha) de dispersión de Compton.

Hechos conocidos para el universo temprano son que la densidad de energía  $\rho \propto 1/a^4$  (siendo  $a$  el factor de escala del universo) y por tanto  $a \propto 1/T$ . También que  $a(t) \propto t^{1/2}$  y por tanto que  $T \propto 1/\sqrt{t}$ . La última relación se puede escribir numéricamente como  $T_k = 1.5 \times 10^{10}/\sqrt{t_s}$ ; donde  $T_k$  es la temperatura en grados Kelvin y  $t_s$  el tiempo en segundos [ $1 \text{ Mev} \approx 10^{10} \text{ K}$ ].

Las secciones rectas de colisión de dichos procesos electromagnéticos van como  $\sigma \propto \alpha^2$ , donde  $\alpha$  es llamada la constante de estructura fina cuyo valor en CGS es  $\alpha \approx 1/137$ . La tasa de colisiones o interacciones entre tales procesos se encuentra que va como  $\Gamma \sim \alpha^2$

1. Muestre que la "constante" de Hubble la podemos escribir, en función de la temperatura  $T$ , como  $H(T) \propto T^2$ . En particular la podemos escribir como  $H(T) = T^2/M_{Pl}$ , siendo  $M_{Pl} \sim 10^{19} \text{ GeV}$  la llamada masa de Planck.
2. Muestre que para temperaturas  $T \ll 10^{14} \text{ GeV}$  el universo está esencialmente en equilibrio con fenómenos electromagnéticos, y que esto corresponde un tiempo de  $t \sim 10^{-6}$  segundos después del Big Bang.

## 5. Distancias Cosmológicas & Lentes Gravitacionales

En la Figura 5 se muestra el fenómeno de lente gravitacional producido por la distribución de masa de Abell 383, así como un diagrama del mismo donde se han indicado diferentes cantidades.

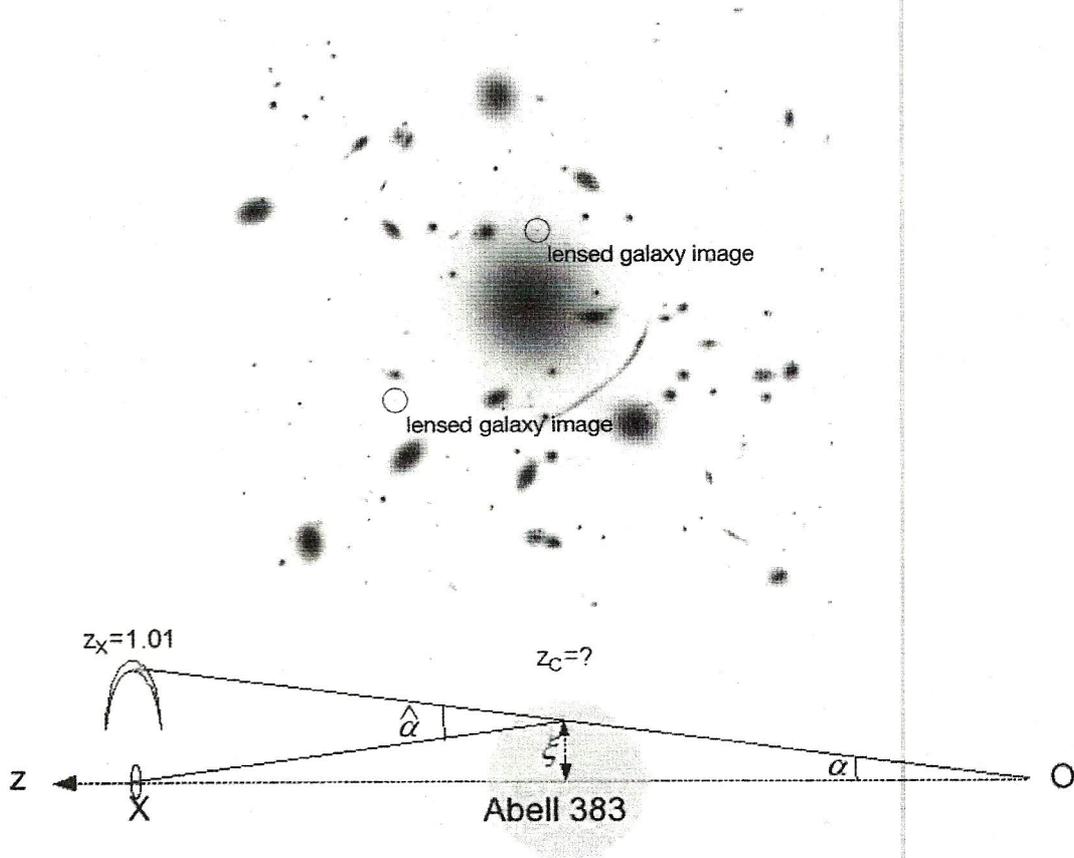


Figura 5: Lente gravitacional asociado al cúmulo de galaxias Abell 383, y variables asociadas a dicho proceso.

1. En la Figura 6, se grafican diversas distancias cosmológicas en el universo calculadas con  $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ,  $\Omega_m = 0.3$  y  $\Omega_\Lambda = 0.7$ . Cada una de las curvas A–D corresponde una de las siguientes: la distancia luminosa (*luminosity distance*)  $D_L(z)$ , la distancia de diámetro angular (*angular diameter distance*)  $D_A(z)$ , la distancia de diámetro angular de  $z_X = 1.01$  vista desde  $z$  ( $D_A(z, z_X)$ ), o la distancia radial comóvil (*comoving radial distance*)  $\chi(z)$ . ¿Cuál distancia corresponde a cada curva?
2. Considere el cúmulo de Abell 383, con corrimiento al rojo (*redshift*) de  $z = z_c$ . Éste tiene el arco más brillante, generado por la lente gravitacional, que corresponde a una galaxia (llamada X) que está localizada a  $z = z_X = 1.01$  y el cual está localizado a

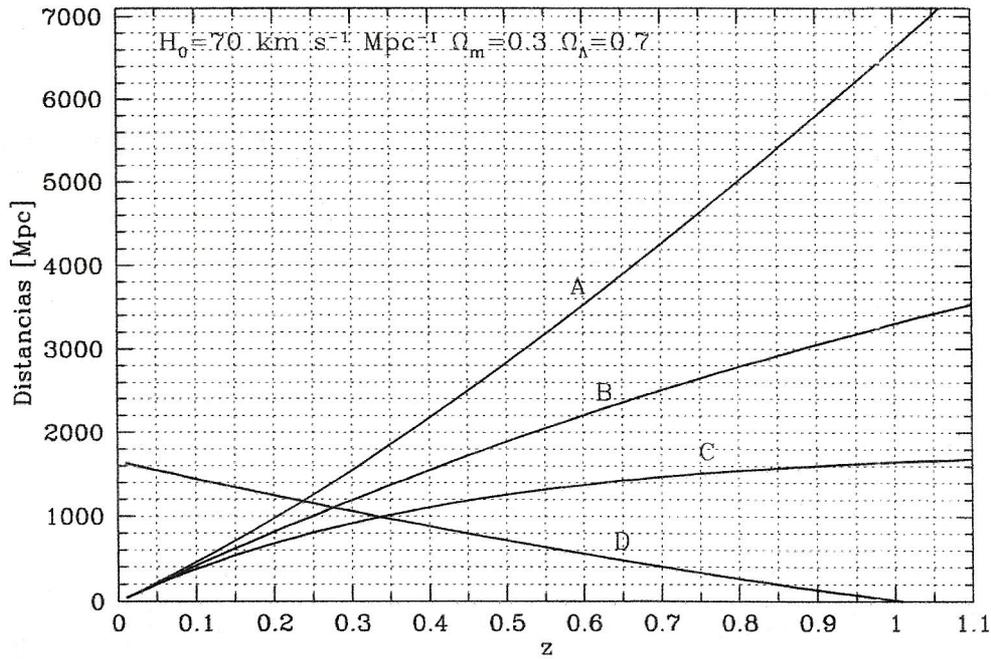


Figura 6: Diversas distancias cosmológicas, angular  $D_A(z)$ , luminosa  $D_L(z)$ , "co-moving"  $\chi(z)$ , y  $D_A(z, z_x)$  ( $z_x = 1.01$ ).

un ángulo de  $\alpha = 17''$  del centro del cúmulo. Encuentre la distancia ( $\xi$ ) entre la línea de visión al arco y el centro de Abell 383, y el ángulo de deflexión ( $\hat{\alpha}$ ); use  $\alpha$  y las distancias cosmológicas pertinentes, y vea la Figura 5. Suponga que la galaxia  $X$  está, sin el efecto del lente, muy cerca de la línea de visión al centro de Abell 383.

- Obtenga  $z_c$  de manera aproximada. Para resolver lo anterior: (a) puede suponer que la distribución de la masa en Abell 383 es axisimétrica alrededor de la línea de visión al centro del cúmulo, (b) que la masa interior de una "columna" de radio proyectado de  $17''$  del centro de Abell 383 es de  $3 \times 10^{13} M_\odot$  y (c) utilizar las curvas en la Figura 6.

## Constantes

Symbol	Meaning	Value
$c$	Speed of light in vacuum	$2.997924562(11) \times 10^{10} \text{ cm s}^{-1}$
$h = 2\pi\hbar$	Planck's constant	$6.626196(50) \times 10^{-27} \text{ erg s}$
$\hbar = h/2\pi$	Rationalized Planck's constant	$1.0545919(80) \times 10^{-27} \text{ erg s}$
$k$	Boltzmann's constant	$1.380622(59) \times 10^{-16} \text{ erg } \text{K}^{-1}$
$e$	Elementary charge of an electron	$4.803250(21) \times 10^{-10} \text{ esu}$
$m$	Electron rest mass	$9.109558(54) \times 10^{-28} \text{ g}$
$G$	Gravitational constant	$6.6732(31) \times 10^{-8} \text{ dyn cm}^2 \text{ g}^{-2}$
$N_A$	Avogadro's number	$6.022169(40) \times 10^{23} \text{ mole}^{-1}$
a. m. u. = $u$	Atomic mass unit	$1.660531(11) \times 10^{-24} \text{ g}$
$\alpha$	Fine-structure constant	$7.297351(11) \times 10^{-3}$
$e/m$	Electron charge to mass ratio	$5.272759(16) \times 10^{17} \text{ esu g}^{-1}$
$R_\infty$	Rydberg constant	$1.09737312(11) \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$
$a_0$	Bohr radius	$5.2917715(81) \times 10^{-9} \text{ cm}$
$h/(mc)$	Compton wavelength	$2.4263096(74) \times 10^{-10} \text{ cm}$
$r_0 = e^2/(mc^2)$	Classical electron radius	$2.817939(13) \times 10^{-13} \text{ cm}$
$R$	Gas constant	$8.31434(35) \times 10^7 \text{ erg } \text{K}^{-1} \text{ mole}^{-1}$
$\sigma$	Stefan-Boltzmann constant	$5.66961(96) \times 10^{-5} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ K}^{-4}$
$\sigma_T$	Thomson cross section	$6.652453(62) \times 10^{-25} \text{ cm}^2$
a. u.	Astronomical unit	$1.49597892(1) \times 10^{13} \text{ cm}$
pc	Parsec	$3.0856(1) \times 10^{18} \text{ cm}$
l.y.	One light year	$9.4605 \times 10^{17} \text{ cm} = 6.324 \times 10^4 \text{ a. u.}$
$M_\odot$	Solar mass	$1.989(2) \times 10^{33} \text{ g}$
$R_\odot$	Solar radius	$6.9598(7) \times 10^{10} \text{ cm}$

Symbol	Meaning	Value
$L_\odot$	Solar luminosity	$3.826(8) \times 10^{33} \text{ erg s}^{-1}$
1 e. V.	One electron volt	
	associated wavelength	$12,396.3 \times 10^{-8} \text{ cm}$
	associated wavenumber	$8067.1 \text{ cm}^{-1}$
	associated frequency	$2.41838 \times 10^{14} \text{ Hz}$
	associated energy	$1.60184 \times 10^{-12} \text{ erg}$
	associated temperature	$11,605.9 \text{ }^\circ\text{K}$