

Aplicando modelos de granos de polvo con propiedades meteoríticas al continuo ionizante de algunos núcleos activos de galaxias

Sinhué Amos Refugio Haro-Corzo^{1,*} y Luc Binette²

¹ Instituto de Ciencias Nucleares, Universidad Nacional Autónoma de México,
Apartado Postal 70-543, C.P. 04510, Ciudad de México.

² Instituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México,
Apartado Postal 70-264, C.P. 04510, Ciudad de México.

* haro@nucleares.unam.mx

RESUMEN

En esta investigación, presentamos las diversas curvas de extinción que hemos calculado con base en la teoría Mie para granos de polvo esféricos, con distribuciones de acuerdo a su tamaño (entre 50 y 2500 Å de radio) y con diversos compuestos químicos hallados en meteoritos. De acuerdo con el paradigma que hemos desarrollado, las curvas de extinción con cantidades adecuadas de átomos, al ser aplicadas a un continuo ionizante teórico, deberían de reproducir los espectros observados. De esta forma encontramos una manera exitosa de reproducir, para 11 espectros, tanto el quiebre ultravioleta como el problema de suavidad presentes en el continuo ionizante de algunos núcleos activos de galaxias.

Palabras clave: medio estelar, polvo, extinción, núcleos activos de galaxias, quasares, ultravioleta.

ABSTRACT

In this investigation, we present extinction curves calculated on the basis of Mie theory for spherical dust grains with distribution according to their size (radius between 50 and 2500 Å) and with diverse chemical components found in meteors. According with our paradigm, extinction curves with adequate amounts of atoms, when applied to the theoretical ionizing continuum, must reproduce the observed spectra. We found a successful way to reproduce, for 11 observed spectra, the ultraviolet break and the softness problem, which are present in the ionizing continuum spectra of active galactic nuclei.

Key words: stellar medium, dust, extinction, active galactic nuclei, quasars, ultraviolet.

INTRODUCCIÓN

Observaciones espectroscópicas realizadas con diversos telescopios han encontrado que la distribución espectral de energía ionizante (SED) de los quasares (subgrupo de los núcleos activos de galaxias) presenta los siguientes rasgos en el dominio ultravioleta (UV): emisión de radia-

ción (continuo ionizante) proveniente de la región central y superposición de líneas de emisión y absorción. A su vez, el continuo ionizante presenta un *quiebre UV*, es decir, un cambio abrupto de pendiente alrededor 1100 Å (Haro-Corzo *et al.*, 2007, de aquí en adelante H07) y un *problema de suavidad*, es decir, dispersión entre los índices espectrales observados en el UV lejano (Binette *et al.*, 2008). A la fe-

cha es un tema abierto que exige solución para entender la naturaleza de los hoyos negros supermasivos que existen en los quasares.

A lo largo de nuestra investigación hemos desarrollado el siguiente paradigma que resuelve exitosamente el quiebre UV así como el problema de suavidad: existe una SED teórica universal que emerge del quasar, la cual es absorbida por cantidades apropiadas de (1) gas/polvo intrínseco y (2) el medio intergaláctico y galáctico. Binette *et al.* (2008) propusieron diversos escenarios para explicar el punto (1), por lo que en este trabajo sólo profundizaremos en este mismo punto, es decir, exploraremos la absorción debida a dos pantallas de polvo que están cerca y alrededor del quasar, donde cada pantalla de polvo está formada por un sólo componente químico (silicatos o carbón amorfo o nanodiamantes). Así, cada pantalla tiene una curva de extinción peculiar que relaciona la sección eficaz del material absorbente a cada longitud de onda.

CURVAS DE EXTINCIÓN DEL POLVO

En esta sección explicamos los cálculos realizados para construir los factores de eficiencia de la extinción (Q_{ext}), los cuales son necesarios para formar la sección eficaz. Estos cálculos de Q_{ext} están basados en la teoría Mie (Bohren y Huffman, 1983) para una distribución ($n(a) \propto a^{-\beta}$) de granos esféricos de radio “ a ” entre $a_{min}=50$ y $a_{max}=2500$ Å, índice $\beta = -3.5$ (Whittet, 2003), isotrópicos, homogéneos y con varias composiciones químicas, *i.e.*, con varios índices complejos de refracción ($m=n-ik$) acorde al material (más detalles en Haro-Corzo, 2006).

Para construir la sección eficaz a partir de Q_{ext} se resuelve la siguiente ecuación para la distribución de granos:

$$\sigma_{polvo} = C_{gr} \int_{a_{min}}^{a_{max}} dlna \pi a^{3+\beta} Q_{ext}(a, \lambda, n, k), \quad (1)$$

en donde la constante de normalización C_{gr} y el volumen del grano esférico V_{gr} son calculados con:

$$C_{gr} = \frac{Z_{el} \mu_{gr} m_H}{\rho_{gr} V_{gr}}; \quad V_{gr} = \int_{a_{min}}^{a_{max}} dlna \frac{4}{3} \pi a^{4+\beta} \quad (2)$$

donde Z_{el} es la abundancia numérica del elemento a considerar con respecto al hidrógeno (H), m_H es la masa del átomo de H, ρ_{gr} es la densidad de masa del grano (g cm^{-3}), μ_{gr} el peso molecular promedio del grano. Además, debido a que a pocos quasares se les ha determinado su abundancia química, hemos asumido como primera aproximación abundancias solares.

Una vez con esto, la técnica usada para reproducir el continuo ionizante observado (F_{obs}) y explorar los efectos de las diversas pantallas de polvo es: partir de una SED teórica universal (F_{int}) en forma de joroba y la cual es multiplicada por la transmisión debida al polvo (absorción del polvo en función de su sección eficaz σ_{polvo} [cm^2] y de la densidad columnar equivalente N_H [cm^{-2}], como un parámetro libre),

i.e., $F_{obs} = F_{int} \times \exp(-N_H \sigma_{polvo})$. Con este planteamiento buscamos mejorar el ajuste al continuo en el dominio del UV y además buscar la relación con el espectro en los rayos X para cada quasar. Con base en esto, ahora sólo falta definir la composición química del polvo.

Pantalla de polvo compuesta por nanodiamantes

Con el objetivo de corregir el quiebre UV hemos seguido el trabajo de Binette *et al.* (2005, de aquí en adelante B05), quienes exploraron diversas pantallas de polvo compuestas por diamantes de tamaño nanométrico (10^{-9} m). Los nanodiamantes están compuestos por átomos de carbono colocados en una red cristalina tridimensional y en algunas ocasiones presentan impurezas en la superficie. La abundancia solar del carbono es de 3.6310^{-4} con respecto al hidrógeno y el peso molecular es de 12 para todos los granos.

Nanodiamantes meteoríticos: modelo A

Uno de los ejemplos más estudiados es el meteorito de Allende, el cual aterrizó en la ciudad de Allende en el estado de Chihuahua, México, el 8 Febrero de 1969. En este meteorito fueron encontrados nanodiamantes con impurezas de hidrógeno a lo largo de la superficie. Estos nanodiamantes tienen un tamaño típico de entre 10 y 100 Å de radio, densidad de 2.3 g cm^{-3} y bandas de emisión en el IR, *i.e.*, a 3.43 y 3.53 μm , las cuales fueron identificadas en algunas estrellas (Van Kerckhoven *et al.*, 2002). Hacemos notar que también existen nanodiamantes con impurezas de N en su superficie, los cuales serán explorados en trabajos futuros.

El nanodiamante es el material granular más abundante en meteoritos primitivos (Lewis *et al.*, 1987a, 1987b; Zinner, 1998). La sobreabundancia de los nanodiamantes con respecto a los demás componentes del meteorito sugiere que los granos del medio interestelar fueron acretados directamente en planetesimales, los cuales permanecen relativamente inalterados en los núcleos de los asteroides.

Dada la abundancia y dureza de los nanodiamantes, Mutschke *et al.* (2004) pudieron aislarlos del resto del meteorito con disolventes químicos para luego investigar los índices de refracción complejos, lo cual permitió a B05 construir la sección eficaz A1 (ilustrada en la Figura 1) y reproducir por primera vez el quiebre UV.

Nanodiamantes cúbicos: modelo D

Este tipo de nanodiamante no tiene impurezas en la superficie. La densidad de granos es de 3.51 g cm^{-3} (Edwards y Philipp, 1985). La sección eficaz de los nanodiamantes cúbicos fue extrapolada hacia el UV lejano, dado que no encontramos valores de laboratorio de los índices de refracción por debajo de 413 Å.

La curva de extinción utilizada por B05 fue etiquetada como D1, la cual está en el régimen de granos pequeños, *i.e.*, en el intervalo de tamaño entre $a_{min}=3$ y $a_{max}=25$ Å.

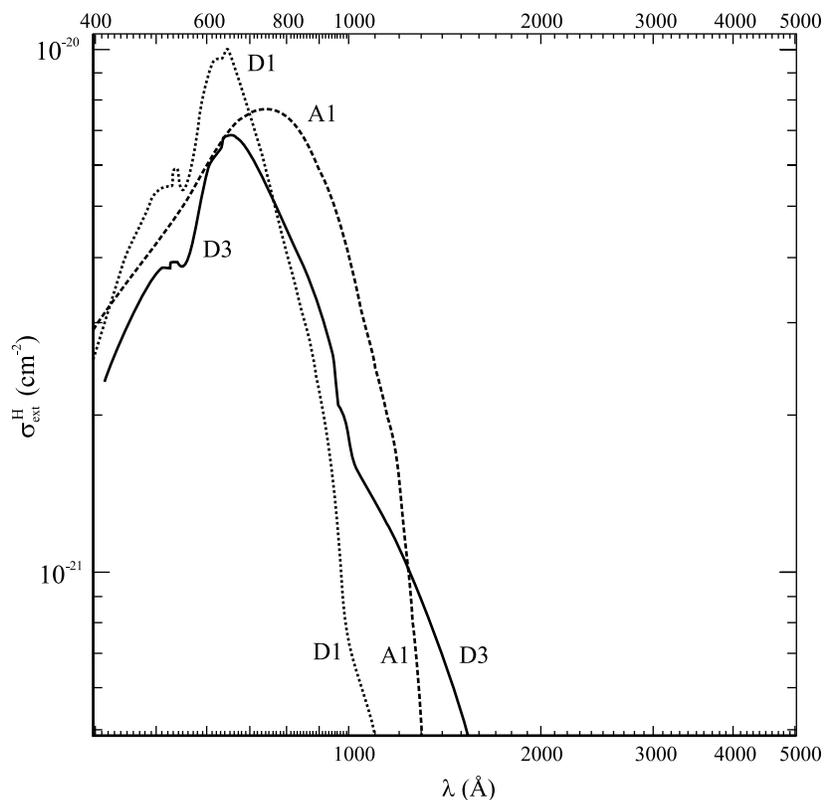


Figura 1. Curvas de extinción o sección eficaz de absorción como función de la longitud de onda para granos de polvo compuestos por nanodiamantes. Aquí ilustramos las tres curvas que hemos utilizado a lo largo de nuestra investigación para reproducir el quiebre UV a partir de la absorción por granos de polvo. Las tres curvas varían de acuerdo a su composición como sigue: nanodiamante meteorítico (A1), nanodiamante cúbico (D1 y D3). En especial, hemos adoptado a la curva D3 (línea continua), que está en el régimen de granos pequeños de entre 3 y 200 Å de radio, como la representante más adecuada para resolver el problema del quiebre UV.

En cambio la curva de extinción D3 tiene un intervalo de tamaño más amplio, es decir, entre $a_{\min}=3$ y $a_{\max}=200$ Å.

En la Figura 1 comparamos las curvas de extinción calculadas para los diferentes tipos de nanodiamantes. Hacemos notar que el pico de la sección eficaz para D1, A1 y D3 ocurre a la longitud 640, 741 y 640 Å respectivamente. Esta particularidad de la sección recta de los nanodiamantes, junto con la abrupta caída de la sección eficaz hacia el rojo de 1000 Å son rasgos únicos de este tipo de polvo, los cuales dejan una clara huella en el espectro UV bajo el paradigma del trabajo presente (ver H07). Así, los modelos con polvo que usan componentes altamente ordenadas (por ejemplo los modelo D) tienden a producir quiebres abruptos y bien localizados, mientras que el polvo dopado con componentes desordenadas (por ejemplo los modelo A) tienden a producir quiebres anchos.

Curva de extinción del tipo SMC

Richards *et al.* (2003) infirieron curvas de extinción similares al tipo Nube Menor de Magallanes (SMC) a partir de los miles de espectros de quasares provenientes del catastro con el Sloan (SDSS). A la fecha, en los congresos internacionales es tema de debate la forma, la inclinación, la metalicidad y los rasgos característicos de la curva de extinción inferida en los objetos extragalácticos con corrimiento al rojo moderado. Esto nos señala que los objetos están

envueltos en medios ambientes distintos y que requieren una investigación más detallada. En el proyecto que hemos estado desarrollando, asumimos que la curva de extinción aplicable a los quasares es del tipo SMC, ya que en general las diversas curvas en el dominio UV son similares, como es mostrado en la Figura 2, donde comparamos la curva de extinción del tipo SMC (línea segmento-punto) con la galáctica (línea continua tenue y etiquetada como ISM). Es notable en la comparación que la curva del tipo SMC tiene una pendiente muy pronunciada en el cercano UV (<1100 Å) y no tiene la joroba de absorción a 2175 Å, que caracteriza a la curva de extinción ISM. Basados en lo anterior y con el objetivo de resolver el problema de suavidad en el intervalo del cercano UV, hemos tratado de reproducir la curva de extinción del tipo SMC con los siguientes tres compuestos.

Silicatos

La primera curva que construimos (línea segmento-punto y etiquetada como PEI) se basó en la curva de Pei (1992), quien empleó granos de polvo compuestos por silicatos para reproducir la curva de extinción deducida por Prevot *et al.* (1984) a partir de los datos de la SMC. Sin embargo, este modelo requiere de 2 a 3 veces más cantidad de silicio disponible en el medio interestelar que la SMC. Además es necesario escalar la curva por un factor de 5.5 para hacerla comparable con la curva del tipo ISM. Así, debido a que las abundancias utilizadas para generar esta

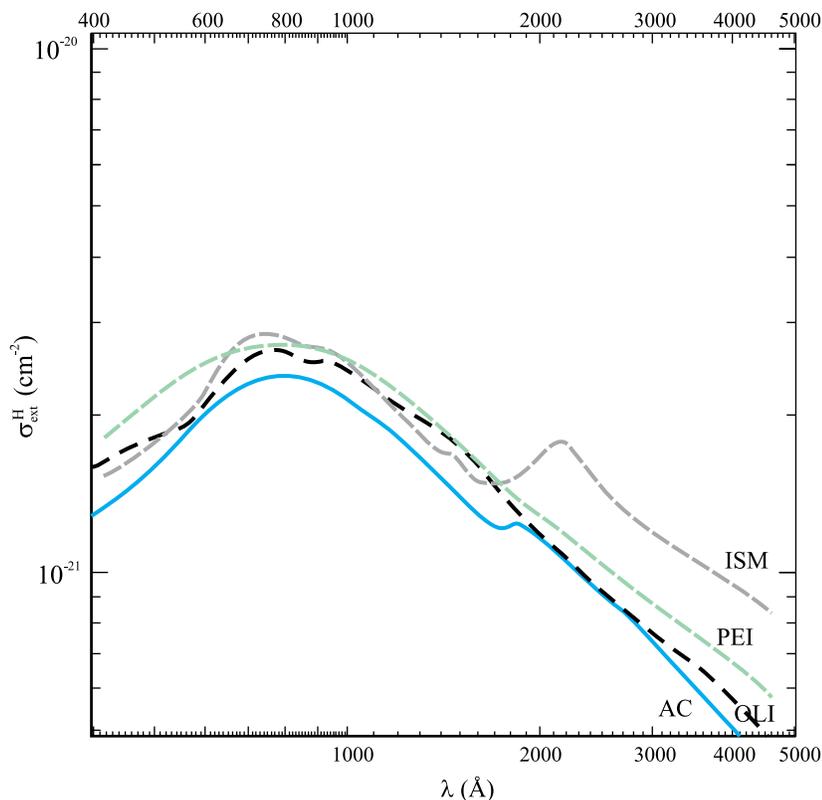


Figura 2. Curvas de extinción como función de la longitud de onda para diferentes compuestos de granos de polvo. Por comparación hemos superpuesto la curva de extinción del tipo medio interestelar galáctica (línea discontinua-tenue y etiquetada como ISM). El rasgo característico de esta curva es el máximo (joroba en absorción ancha y simétrica) que está a 2175 Å y que es atribuida a la presencia de grafito. Las curvas de extinción del tipo SMC utilizadas para resolver el problema de suavidad en los cuasares están ilustradas como sigue: La curva de extinción calculada por Pei (1992) empleando granos de polvo compuestos por silicatos (línea discontinua y etiquetada como “PEI”) está escalada por un factor 5.5 para facilitar la comparación con el resto de las curvas. La curva que representa a los granos de polvo con propiedades del olivino ($MgFeSiO_4$) está ilustrada como una línea segmentada, etiquetada como “OLI” y escalada por un factor de 2. La curva que ilustra la absorción que presentan los granos de polvo compuestos por carbono amorfo está ilustrada como una línea sólida y etiquetada como “AC”. Esta última curva no necesita ser escalada y además presenta un rasgo peculiar alrededor de 1700 Å, así esta es la curva adoptada para representar la extinción del tipo SMC.

curva de extinción no son físicamente compatibles con las observadas, descartamos este tipo de granos de polvo.

Silicatos de Mg y Fe

En la segunda curva asumimos que el polvo está formado por silicatos del tipo olivino ($MgFeSiO_4$). Los átomos de Mg y de Fe son aproximadamente igualmente abundantes en el medio interestelar. Ambos residen principalmente en el polvo interestelar y en los meteoros (Draine, 2003). Es entonces razonable considerar granos de polvo compuestos por $MgFeSiO_4$, aunque es posible que, por ejemplo, el Fe se presente en fases con otra composición química. La densidad del olivino es de 500 g cm^{-3} , los índices complejos de refracción fueron extraídos de Draine (2003) y las abundancias solares son (en escala de 10^{-5}): 3.8 para el Mg, 4.68 para el Fe, 3.5 para el Si y 86.1 para el O. Así, el peso molecular del grano es de 172.19 g. La curva de extinción del olivino está ilustrada en la Figura 2 (línea segmentada-larga y etiquetada como OLI), la cual presenta un factor 2 de normalización por debajo de los datos.

Carbono amorfo AC

Este es un arreglo no cristalino de los átomos de carbono, que forman anillos unidos aleatoriamente, por lo que entre estos anillos existen huecos llamados poros. Los índices de refracción complejos así como la densidad del carbono ($\rho=1.85 \text{ g cm}^{-3}$) fueron extraídos de la tab. 1 (columna 2 y 4) de Rouleau y Martin (1991). El peso mo-

lecular que adoptamos es $\mu_{gr}=12$, la abundancia solar es $Z_c=3.63 \times 10^{-4}$ con respecto al hidrógeno y asumimos que todo el carbono está oculto dentro de los granos de polvo. El intervalo óptimo del tamaño de los granos es entre $a_{min}=50 \text{ Å}$ y $a_{max}=1400 \text{ Å}$ con una resolución de 0.01 Å . Afinamos el tamaño de los granos hasta que se reprodujera la forma de la curva de extinción del tipo SMC. La curva de extinción resultante está mostrada en la Figura 2 en línea continua y etiquetada como AC.

Asumimos que la curva AC es la curva de extinción más atractiva para representar la extinción del tipo SMC, debido al hecho de que no requiere renormalización y además por presentar un rasgo alrededor de 1700 Å que es observado en algunos espectros de cuasares.

DISCUSIÓN

En los cuasares, el continuo ionizante observado presenta un cambio de pendiente abrupto alrededor de 1100 Å y además una pendiente suave en el cercano UV, estos espectros no podían ser ajustados simultáneamente con los modelos que reproducen tanto el continuo como las líneas de emisión. En esta investigación encontramos que de las cinco posibles pantallas exploradas bajo el paradigma de una SED intrínseca universal proveniente de la máquina central del cuasar, las pantallas intrínsecas de absorción compuestas por granos de polvo de nanodiamante cúbico

y carbono amorfo son favorables para explicar satisfactoriamente (ver ajustes en H07) el quiebre UV y el problema de suavidad. También encontramos que, en promedio, la masa de polvo necesaria para formar estas pantallas es de 0.003 masas solares (B05), suponiendo que la pantalla de polvo está a 1 pc del quasar.

El procedimiento seguido para la exploración de cada quasar fue primero corregir el espectro por el quiebre UV con la curva D3 y posteriormente corregir el problema de suavidad con la curva AC. Lo anterior debido a que la curva D3 absorbe principalmente en la región del UV lejano y muy poco en el cercano UV. Aunque la curva D3 (nanodiamantes cúbicos) es una simplificación del caso planteado por B05, quien utilizó nanodiamantes meteoríticos así como cúbicos, la justificación para utilizar nanodiamantes está inspirada en que los nanodiamantes meteoríticos además de presentar un quiebre agudo en su curva de extinción, también tienen bandas de emisión en la región del IR. Es necesario continuar con esta exploración y en caso dado detectar la respectiva emisión en la región del IR para los cuasares analizados por H07. Recientemente Diego *et al.* (2007) descartaron la contribución del polvo compuesto por nanodiamante meteorítico en el quasar 3C 298 al comparar la predicción de la emisión IR de nuestro paradigma con los datos del telescopio espacial Spitzer. Otra línea de investigación es averiguar si los mecanismos que permitieron la formación de nanodiamantes en el sistema solar pudieron darse en los cuasares. Por último, consideramos que las alternativas señaladas por Binette *et al.* (2008), donde algunas no consideran nanodiamantes, serán valiosas para ser exploradas en trabajos posteriores.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está financiado por la beca Postdoctoral CONACyT de S.A.R.H.C. El apoyo para L.B. proviene del proyecto J50296 de CONACyT. Agradecemos la asistencia de Alfredo Díaz y de Abraham Roldan.

REFERENCIAS

- Binette, L., Magris, C.G., Krongold, Y., Morisset, C., Haro-Corzo, S., de Diego, J.A., Mutschke, H., Andersen, A.C., 2005, Nanodiamond dust and the far-ultraviolet Quasar break: *Astrophysical Journal*, 631, 661-677.
- Binette, L., Haro-Corzo, S., Krongold, Y., Andersen, A.C., 2008, The nature of the far-UV break in the energy distribution of Quasars, *in* The Nuclear Region, Host Galaxy and Environment of Active Galaxies, Symposium Proceedings, Huatulco, México, Abril 18- 20, 2007: *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica, Conference Series*, 32(B07), 115-119.

- Bohren, C.F., Huffman, D.R., 1983, *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*: New York, Wiley, 530 pp.
- de Diego, J.A., Binette, L., Ogle, P., Andersen, A.C., Haro-Corzo, S., Wold, M., 2007, Quasar 3C 298: a test-case for meteoritic nanodiamond 3.5 μm emission: *Astronomy and Astrophysics*, 467(1), L7-L10.
- Draine, B.T., 2003, Scattering by interstellar dust grains. II. X-Rays: *Astrophysical Journal*, 598, 1026-1037.
- Edwards, D., Philipp, H.R., 1985, Dust grains, *in* Palik, E.D. (ed.), *Handbook of Optical Constants of Solids*: Orlando, Academic Press, 665-668.
- Haro-Corzo, S.A.R., 2006, Investigación de la distribución espectral de energía de los núcleos activos de galaxias desde los rayos ultravioleta hasta los rayos X (en línea), Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Astronomía, tesis doctoral, 216 pp., <<http://bidi.unam.mx>>, acceso libre.
- Haro-Corzo, S.A.R., Binette, L., Krongold, Y., Benitez, E., Humphrey, A., Nicastro, F., Rodríguez-Martínez, M., 2007, Energy distribution of individual quasars from far-ultraviolet to X-rays. I. Intrinsic ultraviolet hardness and dust opacities: *Astrophysical Journal*, 662, 145-165.
- Lewis, R.S., Bright, D., Steel, E., 1987a, Presolar diamonds (C8) in carbonaceous chondrites: Size distribution: *Meteoritics*, 22, 445-448.
- Lewis, R.S., Ming, T., Wacker, J.F., Steel, E., 1987b, Interstellar diamonds in meteorites, *in* Abstracts of papers submitted to the Eighteenth Lunar and Planetary Science Conference: *Lunar and Planetary Science*, 18, 550-551.
- Mutschke, H., Andersen, A.C., Jäger, C., Henning, T., Braatz, A., 2004, Optical data of meteoritic nano-diamonds from far-ultraviolet to far-infrared wavelengths: *Astronomy and Astrophysics*, 423, 983-993.
- Pei, Y.C., 1992, Interstellar dust from the Milky Way to the Magellanic Clouds: *Astrophysical Journal*, 395(1), 130-139.
- Prevot, M.L., Lequeux, J., Prevot, L., Maurice, E., Rocca-Volmerange, B., 1984, The typical interstellar extinction in the Small Magellanic Cloud: *Astronomy and Astrophysics*, 132(2), 389-392.
- Richards, G.T., Hall, T., Vanden Berk, D.E., Strauss, M.A., Schneider, D.P., Weinstein, M.A., Reichard, T.A., York, D.G., Knapp, G. R., Fan, X., Ivezić, Ž., Brinkmann, J., Budavári, T., Csabai, I., 2003, Red and reddened quasars in the Sloan Digital Sky Survey: *Astronomy Journal*, 126(3), 1131-1147.
- Rouleau, F., Martin, P.G., 1991, Shape and clustering effects on the optical properties of amorphous carbon: *Astrophysical Journal*, 377, 526-540.
- Van Kerckhoven, C., Tielens, A.G.G.M., Waelkens, C., 2002, Nanodiamonds around HD 97048 and Elias 1: *Astronomy and Astrophysics*, 384(2), 568-584.
- Whittet, D., 2003, *Dust in the galactic environment*: Bristol, UK, Philadelphia: EUA, Institute of Physics Publishing, Series in Astronomy and Astrophysics, 390 pp.
- Zinner, E., 1998, Stellar nucleosynthesis and the isotopic composition of presolar grains from primitive meteorites: *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 26, 147-188.

Manuscrito recibido: Octubre 12, 2007

Manuscrito corregido recibido: Enero 20, 2009

Manuscrito aceptado: Diciembre 10, 2009