

Este artículo apareció publicado en el Anuario Astronómico del Observatorio de Madrid para el año 1998. Su apariencia puede haber cambiado al ser reprocesado con pdflatex y nuevos ficheros de estilo.

LA RIQUEZA MOLECULAR DE C/HALE-BOPP

Pere Planesas y Rafael Bachiller

Observatorio Astronómico Nacional (IGN)
Apartado 1143. E-28800 Alcalá de Henares

Introducción

El cometa C/Hale-Bopp ha constituido la mayor atracción astronómica del año 1997, por ser visible con facilidad en el cielo nocturno, compartida por millones de personas en todo el mundo. Los medios de comunicación se hicieron eco de este interés y la red *internet* se convirtió en vehículo de intercambio de imágenes e informaciones entre profesionales, aficionados e interesados en el tema. A su paso por el perihelio, el día 1 de abril, alcanzaba una magnitud cercana a -1 , y se convertía en uno de los grandes cometas de la historia.

Para los astrónomos profesionales el cometa C/Hale-Bopp ha sido una gran fuente de descubrimientos. Ha sido observado a casi todas las longitudes de onda posibles, desde ondas de radio a rayos X, y a él han apuntado los grandes telescopios en órbita, como el Telescopio Espacial *Hubble*, el Telescopio Espacial Infrarrojo *ISO* y el telescopio de rayos X *BeppoSAX*. Las observaciones espectroscópicas realizadas desde el rango radio al ultravioleta han permitido detectar gran cantidad de moléculas en la cabellera de este activo cometa, incluidos indicios de la presencia de forsterita, silicato de magnesio (Mg_2SiO_4) de la serie del olivino.

A continuación vamos a describir la secuencia temporal de descubrimientos de moléculas en la cabellera gaseosa de este cometa y sus principales implicaciones.

1995: Primeras medidas espectroscópicas

El cometa C/Hale-Bopp se reveló, inmediatamente después de su descubrimiento la madrugada del 23 de julio de 1995, como un candidato ideal para el estudio de la composición molecular cometaria y para el estudio de la evolución de ésta en un amplio rango de distancias al Sol. Su gran actividad gaseosa a distancias del orden de 7 Unidades Astronómicas (unos mil millones de kilómetros) permitió la pronta detección del monóxido de carbono, CO, a mediados de agosto de 1995, con el radiotelescopio de 30 m del Instituto hispano-franco-alemán de Radioastronomía Milimétrica (IRAM) situado en Pico Veleta. Esta especie

molecular es muy abundante y se cree que es la principal responsable de la actividad de los cometas a tales distancias del Sol, para las que el agua está helada. Las primeras estimaciones dieron como resultado que la eyección de este gas debido al calentamiento solar del núcleo del cometa tenía lugar al elevado ritmo de casi una tonelada por segundo.

Inmediatamente otros radiotelescopios preparados para ello iniciaron observaciones de la emisión de tal molécula. Los más destacados fueron el ya citado de 30 m de IRAM, el James Clerk Maxwell Telescope [JCMT] de 15 m situado en Mauna Kea (Hawaii) y el de 12 m del National Radio Astronomy Observatory [NRAO] situado en Kitt Peak (Arizona). Observaciones realizadas en los siguientes meses pusieron de manifiesto una importante variabilidad en la eyección de monóxido de carbono. Asimismo mostraron que la longitud de onda de la emisión estaba desplazada en unos mil kilómetros por hora hacia las altas frecuencias (en un símil óptico, diríamos que estaba desplazada hacia el “azul”) respecto del movimiento del cometa, clara indicación de que la emisión se producía por el lado que daba al Sol.

A finales del mismo mes de agosto se detectó el radical CN en el espectro óptico con el telescopio británico de 4,2 m W. Herschel en La Palma, siendo su ritmo de producción era de unos 3 kg/s (unas 250 toneladas al día). En abril de 1996 fue detectada la molécula de HCN, a una distancia de 4,7 UA (unos 700 millones de kilómetros). Su ritmo de producción, estimado en tal momento como cinco veces mayor que el del radical CN (éste era de unos 5 kg por segundo), permitió concluir que muy posiblemente HCN sea la molécula “madre” de tal radical. Este era ya un resultado muy importante: dado que CN es un radical muy activo que sólo existe en forma gaseosa y que es responsable de la línea de emisión óptica más brillante en la mayoría de cometas ($\lambda 3887\text{\AA}$). Por su parte, HCN produce la línea más intensa del espectro (radio) submilimétrico ($\nu 354,5\text{ GHz} = \lambda 0,85\text{ mm}$). La detección de HCN y de CN a tan grandes distancias al Sol permite descartar la hipótesis de la producción de CN exclusivamente a partir del polvo liberado en la etapa de sublimación del agua (que se produce mucho más cerca del Sol, a unas 3 UA) sino que todo apunta a la producción de CN a partir de la fotodisociación de HCN tan pronto como esta molécula está presente en fase gaseosa.

1996: Gran número de detecciones

Las observaciones radio realizadas principalmente con los radiotelescopios del IRAM (en Pico Veleta y en Plateau de Bure) y el JCMT (en Mauna Kea) mostraron la aparición de nuevas moléculas al ser liberadas en cantidades suficientes a medida que el cometa se iba acercando al Sol. Se detectaron sucesivamente H₂S (mayo 1996), CS, H₂CO, HCN, CH₃OH (junio) CH₃CN (agosto), HNC, etc. Se encontró también gran variabilidad,

como un aumento muy importante de la producción de H₂S entre mayo y junio.

A una distancia de 4 UA (unos 600 millones de kilómetros) la producción de CO era de unas 4 toneladas por segundo (unas 350 mil toneladas al día). Esta producción era similar a la del agua, según se deducía de medidas de la emisión radio del radical OH (cuya molécula madre es la del agua).

En agosto de 1996, medidas de la emisión del radical OH realizadas en Nançay (Francia) mostraron que su ritmo de producción, por disociación de las moléculas de agua, era de 7 toneladas por segundo. En estos momentos el cometa se encontraba a 3,4 UA (unos 590 millones de km) del Sol, por lo que este ritmo debía aumentar todavía mucho más. Ello resultaba excepcional, si tenemos en cuenta que C/Hale-Bopp se encontraba lejos de llegar a su máximo ritmo de producción de OH y que el *máximo* ritmo de producción de OH por otros grandes cometas no fue mucho mayor: 15 toneladas por segundo para el C/Kohoutek (a 0,7 UA); 37, para el C/West (a 0,45 UA); y 10, para el C/Halley (a 0,7 UA).

Como suele ser habitual, a una distancia heliocéntrica de unas 3 UA la eyección de material pasó de ser dominada por el monóxido de carbono a serlo por el agua. En efecto, las medidas realizadas a finales de setiembre de 1996 mostraban una producción de vapor de agua a razón de 10 toneladas por segundo, de 11 toneladas por segundo para el monóxido de carbono y de 5 para el dióxido de carbono. La razón en número de moléculas era de diez moléculas de agua por cada 6 de monóxido de carbono y por 2 de dióxido de carbono. En conjunto, el cometa estaba perdiendo material en forma de gases a razón de varios millones de toneladas al día. Es de destacar que la producción de agua en este momento, estando todavía a 3 UA del Sol, era ya comparable a la observada en otros cometas (Halley, West, Kohoutek) sólo para distancias inferiores a 1 UA.

Todo ello da idea de la gran producción de gases de este cometa, que ha hecho tan espectacular su observación. Esta gran cantidad de gases eyectados lo ha hecho también espectacular desde el punto de vista químico, al permitir detectar en él un mayor número de moléculas que en cualquier cometa anterior. Además, la gran abundancia de especies hacía presagiar la detección de especies moleculares poco abundantes en los cometas. Incluyendo algunas nunca detectadas antes en un cometa. Y no sólo en radio. También en óptico e infrarrojo se detectaban numerosas moléculas. Por ejemplo, en la primavera de 1996 habían sido ya detectadas moléculas o radicales sencillos como CN (marzo), C₂ y C₃ (abril) a partir de espectros ópticos.

El ritmo de emisión de gases no cesaba de aumentar, lo que podía proporcionar la posibilidad de detectar moléculas nunca encontradas en cometas, intentándose la detección, infructuosa, de algunas moléculas orgánicas notablemente complejas.

Hacia finales de 1996 la intensidad de las líneas espectrales de HCN y de CO habían aumentado en un factor 30 respecto de su intensidad al ser descubiertas. El seguimiento de su emisión para un intervalo tan grande de distancias al Sol (de 7 a 1 UA, en el caso del CO) era ya un hito en sí mismo, y permitiría modelar los procesos de producción de gases en los cometas de una manera muy completa.

Se llevaron a cabo observaciones de varias líneas espectrales correspondientes a una misma molécula. Su variación relativa así como la variación de su forma con la distancia del cometa al Sol permitió medir la temperatura cinética del gas, y su velocidad de expansión. Para distancias entre 7 y 1,4 UA se ha encontrado una dependencia de la temperatura absoluta T con la distancia al Sol r de la forma: $T \propto 1/r$; y para la velocidad de expansión V , de la forma: $V \propto 1/\sqrt{r}$. Incluso moléculas raramente detectadas en cometas, como es el caso del amoniaco (NH_3), fueron detectadas sin dificultad en el C/Hale-Bopp. Ello permitió obtener sus abundancias y ritmos de producción con gran precisión.

A finales de 1996, con el cometa ya relativamente cercano al Sol (y a la Tierra) se realizaron cartografías de la emisión de la cabellera con radiointerferómetros, lográndose resoluciones espaciales del orden de los mil km (un pequeño porcentaje del tamaño de la cabellera). En particular, se obtuvieron radiomapas de la emisión de HCN, HNC, CO, H_2CO , CH_3CN , CS y H_2S con el interferómetro del IRAM en el Plateau de Bure. La diferente distribución espacial de estas moléculas permite distinguir entre las posibles fuentes de producción: sublimación directa del núcleo, evaporación en granos de polvo, o fotodisociación a partir de moléculas “madre”.

La emisión infrarroja del C/Hale-Bopp, medida con el espectrómetro para longitudes de onda cortas (alrededor de 20 micras) del satélite ISO, mostraba la presencia predominante en el polvo que emerge del cometa de una forma cristalina del olivino (forsterita). Este tipo de polvo ha sido encontrado también en la nube de polvo que rodea una joven estrella (HD 100546) alrededor de la cual puede estar formándose un sistema planetario y, posiblemente, haya sido detectado alrededor de estrellas viejas, en cuyas envolturas puede estar produciéndose este tipo de polvo.

1997: Se descubren nuevas moléculas

En enero de 1997 se midió el ritmo de producción de etano, C_2H_6 , de 300 kg/s, unas 500 veces menor que el del agua en aquel momento. En febrero se detectaron HNCO y HC_3N , con ritmos de producción de 160 y 70 kg/s respectivamente. Otras moléculas observadas fueron OCS, H_2S y CS, con ritmos de producción respectivos de 600, 1000 y 600 kg/s. En Mauna Kea, se medía la emisión de SO, OCS, CO^+ y CN con el radiotelescopio submilimétrico de 10 m de diámetro de Caltech [CSO].



Figura 1: Interferómetro de 5 antenas de 15 m de IRAM en el Plateau de Bure (Francia).

La previsión de que se detectarían nuevas moléculas, jamás encontradas en cometas, se confirmó por fin en marzo de 1997: las moléculas de dióxido de azufre (SO_2) y ácido fórmico (HCOOH) fueron detectadas con el interferómetro del IRAM. Hay dos hechos a destacar aquí. En primer lugar: la detección de SO_2 , la primera vez que se encontraba en un cometa. En segundo lugar: el que un interferómetro ganara la partida a los radiotelescopios de antena única. Este no fue un caso aislado: también en marzo fue detectado el ión HCO^+ , mediante el radiointerferómetro de siete antenas de BIMA, en California, antes que con radiotelescopios sencillos.

La detección de SO_2 era de gran interés astrofísico. SO_2 parece ser la molécula “madre” de SO, cuya emisión está muy extendida en contraste con la de las moléculas “madre” que salen directamente del núcleo. En particular, la cartografía de la emisión radio de varias moléculas obtenida con interferómetros está permitiendo poner de manifiesto que algunas de ellas se concentran alrededor del núcleo cometario, como es el caso de H_2S . En cambio, no ha sido posible detectar SO mediante interferómetros, aunque sí con radiotelescopios de una sola antena, lo que indica su extensa distribución. Ello apoya la hipótesis de que se trata de una molécula “hija”, que se produce lejos del núcleo del cometa y como producto de la fotodisociación de su molécula “madre”.

A finales del mes de marzo la lista de moléculas detectadas contenía casi treinta moléculas distintas, además de tres variantes isotópicas. Entre ellas se encontraban dos moléculas no detectadas en nubes interestelares: H_2O^+ y C_2H_6 .

Moléculas detectadas en el cometa C/Hale-Bopp
a finales de marzo de 1997

CO, OH, CO⁺, SO, CS, CN, NH, C₂,
H₂O, H₂O⁺, CO₂, HCO⁺, H₂S, SO₂, OCS, HCN, NH₂, C₃,
H₂CO, HNCO, C₂H₂,
CH₃CO, HCOOH, HC₃N, CH₄, C₂H₆

Variedades isotópicas raras:
C³⁴S, HDO, H¹³CN, HC¹⁵N

La variedad de moléculas detectadas en C/Hale-Bopp ha permitido incluso determinar la razón de abundancias entre moléculas isómeras. Una de ellas es HNC, isómero de la más conocida HCN. La molécula de HNC se encuentra en las nubes interestelares frías y ya había sido detectada en un cometa anteriormente, en el C/Hyakutake. La detección de HNC en el C/Hale-Bopp empezó dando resultados sorprendentes. En medidas realizadas a principios de diciembre de 1996 (distancia al Sol de 2,1 UA) con el radiotelescopio JCMT se encontró una razón HNC/HCN \approx 0,05–0,07 similar a la obtenida para el C/Hyakutake a una distancia heliocéntrica bastante menor (1,2 UA), lo que podría explicarse con un origen para HNC en el propio hielo del cometa y no como producto de fotodisociación en la coma; por lo tanto, sería consistente con el origen interestelar de ambas especies. Sin embargo, en febrero de 1997 nuevas observaciones con el 10 m CSO dieron una razón de 0,25 y en marzo, con el 12 m de NRAO, era ya de 0,5. El porqué de este comportamiento es una incógnita.

Las razones de abundancia relativa entre isótopos encontradas en el C/Hale-Bopp son muy similares a las medidas en la Tierra, como puede apreciarse en la tabla siguiente.

Razones de abundancia entre isótopos

isótopos	moléculas	medida	valor terrestre
¹² C / ¹³ C	HCN / H ¹³ CN	70–90	89
¹⁴ N / ¹⁵ N	HCN / HC ¹⁵ N	230–300	269
³² S / ³⁴ S	CS / C ³⁴ S	24–30	23
¹ H / ² H	H ₂ O / HDO	~5000	6400
¹ H / ² H	HCN / DCN	>1000	6400

Post-perihelio: siguen las nuevas detecciones

En abril de 1997 se detectó formamida (NH₂CHO), con una producción de unos 300 kg/s. Se confirmó también la detección, antes tentativa, del agua deuterada (o agua pesada), HDO. Su razón de abundancias con respecto del agua normal es de 0,0002, similar al del agua en la Tierra

y mucho mayor que la que se encuentra en las atmósferas de los planetas exteriores y en el medio interestelar. También se detectó H₃O⁺, en el rango submilimétrico.

En mayo se detectaron el isótopo DCN, con una abundancia unas mil veces menor que HCN, y la molécula de ocho átomos CH₃OCHO, con una abundancia del 3% relativa a la más común CH₃OH, ésta detectada en radio e infrarrojo.

A finales de agosto de 1997, el cometa se encontraba 2,5 UA del Sol, visible desde el hemisferio sur. Medidas de la producción de agua indicaban unas 9 toneladas por segundo, similar a lo medido a la misma distancia pero antes de su paso por el perihelio.

Nombre de las moléculas detectadas en el cometa C/Hale-Bopp

H ₂ O	agua	HDO	agua pesada
H ₂ O ⁺	agua ionizada	H ₃ O ⁺	ión oxonio
OH	radical hidroxilo	CO ₂	dióxido de carbono
CO	monóxido de carbono	CO ⁺	ión monóxido de carbono
C ₂	carbono diatómico	C ₃	carbono triatómico
SO	monóxido de azufre	SO ₂	dióxido de azufre
H ₂ S	sulfuro de hidrógeno	HCO ⁺	
CS	sulfuro de carbono	OCS	sulfuro de carbonilo
H ₂ CO	formaldehido	H ₂ CS	tioformaldehido
CH ₃ OH	alcohol metílico	HCOOH	ácido fórmico
HCN	ácido cianhídrico	HC ₃ N	cianoacetileno
HNC	isocianuro de hidrógeno	CH ₃ CN	cianuro de metilo
CN	radical nitrilo	HNCO	ácido isocianico
NH	radical imida	NH ₂	radical amido
NH ₃	amoníaco	NH ₂ CHO	formamida
C ₂ H ₂	acetileno	C ₂ H ₆	etano
CH ₄	metano	CH ₃ OCHO	formiato de metilo

Conclusiones preliminares

La observación directa de moléculas “madre” no ha sido posible hasta muy recientemente, con la posibilidad de realizar observaciones en los rangos submilimétrico e infrarrojo. Actualmente se tiene la posibilidad de medir no sólo su presencia, sino también sus movimientos, distribución y variabilidad con la distancia al Sol.

El conocimiento de la razón de abundancias de moléculas isómeras y de la razón de abundancias entre variedades isotópicas de una misma molécula es extremadamente útil para aumentar nuestro conocimiento del origen y evolución de los cometas. Estos, supuestamente formados al mismo tiempo que el sistema solar a partir de un nube interestelar fría

compuesta de moléculas, deben presentar unas razones de abundancias similares a las encontradas en nubes moleculares interestelares. Cualquier desviación encontrada será relevante en el estudio de su origen. Así, por ejemplo, la diversidad de razones $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ encontradas en distintos granos de polvo en el cometa Halley mostró que tales granos debían tener distintas procedencias.

Como hemos visto, el conocimiento detallado de la riqueza en especies moleculares de los cometas contribuye a conocer mejor la composición de su núcleo, de los procesos que tienen lugar durante su acercamiento al Sol, y también del origen de la materia de la que están compuestos.

Moléculas detectadas en el cometa (1995 O1) C/Hale-Bopp
clasificadas según su composición

<i>Moléculas con Hidrógeno y Carbono</i>			
C_2	C_3		
CH_4	C_2H_2	C_2H_6	
<i>Moléculas con Hidrógeno, Carbono y Oxígeno</i>			
CO	CO^+	CO_2	HCO^+
OH	H_2O	H_2O^+	H_3O^+
H_2CO	CH_3OH	HCOOH	CH_3OCHO
<i>Moléculas con Hidrógeno, Carbono y Nitrógeno</i>			
CN	HCN	HC_3N	HNC
NH	NH_2	NH_3	CH_3CN
<i>Moléculas con Hidrógeno, Nitrógeno, Carbono y Oxígeno</i>			
HNCO	NH_2CHO		
<i>Moléculas con Azufre</i>			
SO	SO_2	H_2S	
OCS	CS	H_2CS	
<i>Sustituciones isotópicas</i>			
HDO	DCN	H^{13}CN	HC^{15}N
C^{34}S			

Moléculas detectadas en el cometa (1995 O1) C/Hale-Bopp
clasificadas según su número de átomos

<i>Moléculas diatómicas:</i>	
C_2 , CN , CO , CO^+ , NH , OH , SO , CS	
<i>Moléculas triatómicas:</i>	
C_3 , HCN , HCO^+ , H_2O , H_2S , HNC , OCS , SO_2 , CO_2 , NH_2 , H_2O^+	
<i>Moléculas de cuatro átomos:</i>	
C_2H_2 , HNCO , H_2CO , H_2CS , H_3O^+ , NH_3	
<i>Moléculas de cinco átomos:</i>	
CH_4 , HC_3N , HCOOH	
<i>Moléculas de seis o más átomos:</i>	
CH_3CN , CH_3OH , NH_2CHO , HCOOCH_3 , C_2H_6	

Moléculas detectadas en el cometa (1995 O1) C/Hale-Bopp
clasificadas según su detección

<i>Moléculas detectadas en radio:</i>	
OH , H_3O^+ , CO , CO^+ , HCO^+ , H_2S , SO , SO_2 , OCS , CS , H_2CS , CH_3OH , H_2CO , HCOOH , HCN , CH_3CN , HNC , HC_3N , HNCO , CN , NH_3 , NH_2CHO , CH_3OCHO , así como las sustituciones isotópicas: HDO , DCN , H^{13}CN , HC^{15}N , C^{34}S	
<i>Moléculas detectadas en infrarrojo:</i>	
H_2O , OH , CO , CO_2 , CH_3OH , HCN , OCS , CH_4 , C_2H_2 , C_2H_6 ,	
<i>Moléculas detectadas en el visible:</i>	
H_2O^+ , CO^+ , CN , NH_2 , NH , C_2 , C_3	
<i>Moléculas detectadas en ultravioleta:</i>	
OH , CO , CS	

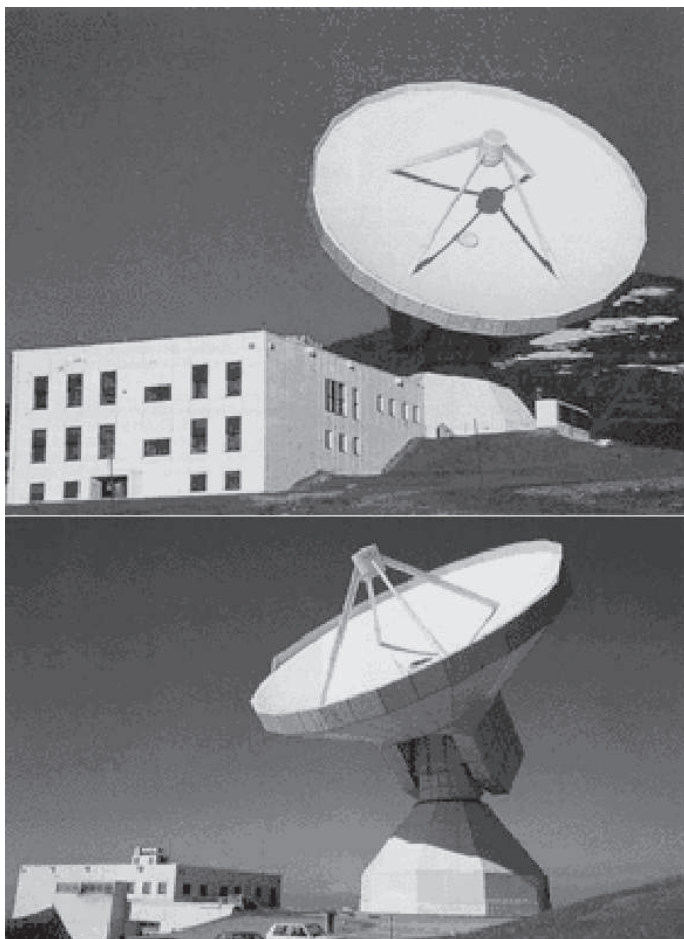


Figura 2: Vistas frontal y lateral del radiotelescopio de 30 m de diámetro del Instituto de Radioastronomía Milimétrica (IRAM), institución europea financiada por el Max-Planck Gesellschaft alemán, el Centre National de la Recherche Scientifique francés y el Instituto Geográfico Nacional español. Este instrumento se dedica mayormente a la realización de observaciones espectroscópicas, a longitudes de onda entre 0,8 y 4 mm, siendo el más potente del mundo en este rango. De las más de treinta moléculas detectadas en el cometa C/Hale-Bopp, la mitad han sido observadas con este instrumento, siendo, en muchos casos, el primer radiotelescopio con el que han sido detectadas en tal cometa.