

RECOMENDACIÓN UIT-R RA.479-4*

**PROTECCIÓN DE LAS FRECUENCIAS PARA MEDICIONES DE RADIOASTRONOMÍA
EN LA ZONA OCULTA DE LA LUNA**

(Cuestión UIT-R 7/2)

(1974-1978-1982-1990-1995)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que el Anexo 1 contiene una exposición sobre la zona oculta de la luna y directrices preliminares sobre el uso del espectro de frecuencias en dicha zona;
- b) que en 1994 la Resolución B16 de la XXII Asamblea General de la Unión Astronómica Internacional (UAI) (Anexo 2) recomienda que, una vez que se inicien las observaciones radioastronómicas en la cara oculta de la Luna, las transmisiones de radiocomunicaciones en la zona oculta de la Luna estén limitadas a la banda 2-3 GHz pero que se identifique una banda alternativa de por lo menos 1 GHz de ancho para realizar operaciones futuras con coordinación temporal entre sistemas de comunicación lunar y de radioastronomía;
- c) que los descubrimientos de la radioastronomía derivados de observaciones de vehículos espaciales por encima de la atmósfera de la Tierra pondrán de relieve fenómenos astronómicos nuevos e inesperados;
- d) que además de los enlaces de comunicación con visibilidad directa requeridos para las experiencias científicas y de otra índole entre la Tierra y los vehículos espaciales, puede ser necesario establecer enlaces entre estaciones situadas en la cara oculta de la Luna y otras situadas en la superficie terrestre o visibles desde la Tierra;
- e) que en el Artículo 29, números 2632-2635 del Reglamento de Radiocomunicaciones (RR), se reconoce la necesidad de mantener la cara oculta de la Luna como zona de gran potencial para observaciones del servicio de radioastronomía y la investigación espacial pasiva y, en consecuencia, tan libre de emisiones como sea posible;
- f) que tanto los satélites de la Tierra con apogeos altos, como las sondas del espacio lejano y los transmisores emplazados en la Luna o cerca de ésta pueden iluminar la zona oculta de la Luna,

recomienda

- 1 que al planificar la utilización del espectro radioeléctrico tanto en el plano nacional como en el internacional, se tenga en cuenta la necesidad de facilitar las observaciones radioastronómicas en la zona oculta de la Luna;
- 2 que, cuando se tenga en cuenta esa necesidad, se preste especial atención a las bandas de frecuencias en las que es difícil o imposible realizar observaciones desde la superficie de la Tierra;
- 3 que la utilización del espectro de frecuencias en la zona oculta de la Luna se realice de conformidad con las directrices preliminares contenidas en el Anexo 1;
- 4 que se preste especial atención a las emisiones en la zona oculta de la Luna procedentes de plataformas del espacio lejano o de transmisores emplazados en la Luna o cerca de ésta;
- 5 que, en las bandas de frecuencias consideradas para utilización conjunta por las estaciones espaciales activas y pasivas en la zona oculta de la Luna, las observaciones radioastronómicas se protejan contra las interferencias perjudiciales. Con tal fin, las administraciones interesadas pueden mantener las conversaciones pertinentes.

* Esta Recomendación debe señalarse a la atención de las Comisiones de Estudio 1 y 3 de Radiocomunicaciones.

ANEXO 1

**Protección de las observaciones radioastronómicas
en la zona oculta de la Luna****1 Introducción**

El espectro electromagnético en la Tierra está ya tan congestionado que gran parte de su valor potencial para la investigación científica pasiva se ha visto gravemente afectado. Dado el aumento general de las radiocomunicaciones, especialmente por medio de satélites artificiales de la Tierra, vehículos espaciales y sondas del espacio lejano, es importante que la Unión Internacional de Telecomunicaciones coordine las atribuciones de frecuencias con el fin de reducir al mínimo la interferencia causada al servicio de radioastronomía. En particular, teniendo en cuenta que la zona oculta de la Luna es el último lugar accesible que queda para efectuar observaciones radioeléctricas del universo sin interferencias en ninguna parte del espectro, la atribución de frecuencias para su utilización activa por sondas del espacio lejano, satélites de la Luna así como instrumentos científicos y estaciones de investigación situados en la superficie de la Luna tendrá que realizarse de manera que se eviten las interferencias con tales observaciones pasivas.

Parte de la superficie de la Luna está en todo momento protegida de las señales interferentes generadas en o cerca de la Tierra, pues aquélla presenta casi siempre la misma cara hacia ésta. El periodo de rotación de la Luna alrededor de su eje es igual a su periodo de revolución alrededor de la Tierra, pero como su órbita es ligeramente elíptica e inclinada, algo más de la mitad de su superficie resulta visible para los observadores en la Tierra. Si, además, se mira la Luna desde un satélite de la Tierra en una órbita de 100 000 km de radio, se puede ver otra pequeña fracción. La parte invisible restante de la superficie de la Luna es la que queda a más de 23,2° del limbo medio de la Luna visto desde la Tierra. La zona oculta de la Luna comprende la zona de la superficie lunar y un volumen adyacente de espacio que está protegido contra las interferencias originadas dentro de una distancia de 100 000 km del centro de la Tierra (Artículo 29, número 2632.1 del RR).

2 Directrices preliminares generales para el uso del espectro electromagnético en la zona oculta de la Luna

Se espera que la zona oculta de la Luna esté libre de interferencias de origen terrestre en todo el espectro radioeléctrico, pues representa un emplazamiento sin igual para las observaciones científicas. Previéndose que en dicha zona se efectuarán en breve experiencias radioastronómicas y de otro tipo, es necesario reglamentar el funcionamiento de los servicios radioeléctricos cuyos equipos puedan radiar sobre la misma. Hay que tener en cuenta a este respecto las necesidades de los satélites terrestres, de las sondas del espacio lejano y de los transmisores emplazados en la zona oculta de la luna, sin olvidar, no obstante, que conviene conservar la zona oculta de la Luna como región libre de interferencias radioeléctricas y por lo tanto de extraordinaria importancia para las investigaciones pasivas.

La utilización del espectro radioeléctrico por servicios cuyos equipos estén emplazados en la zona oculta de la Luna o radien hacia ella podría basarse en los siguientes criterios provisionales que habrán de corregirse a medida que se disponga de nueva información.

Todo el espectro radioeléctrico en la zona oculta de la Luna estará disponible para los usuarios pasivos (el servicio de radioastronomía y otros usuarios pasivos definidos en el RR), con las siguientes excepciones:

- bandas de frecuencias actualmente disponibles y atribuidas en el futuro al servicio de investigación espacial y bandas de frecuencias del servicio de operaciones espaciales, del servicio de exploración de los recursos naturales de la Tierra por satélite y del servicio de radiodeterminación por satélite que se necesiten para la investigación espacial;
- bandas de frecuencias actualmente disponibles o atribuidas en el futuro para radiocomunicaciones y para transmisiones de investigación espacial en la zona oculta de la Luna.

Excepto para estas transmisiones esenciales, se pretende mantener la zona oculta de la Luna libre de transmisiones artificiales. Cuando se proyecten estas transmisiones, será conveniente evitar las zonas del espectro de mayor importancia para la astronomía y proporcionar flexibilidad de frecuencias en los sistemas de transmisión.

Los criterios propuestos no imponen limitación alguna a los servicios radioeléctricos terrenales y espaciales existentes o futuros cuyos transmisores funcionen a una distancia inferior a 100 000 km del centro de la Tierra.

En cuanto a los servicios espaciales existentes o futuros en los que los transmisores funcionen a más de 100 000 km de la Tierra y que trabajen de conformidad con el RR, los mismos, sobre la base de los criterios propuestos, deberán coordinar sus actividades con las del servicio de radioastronomía. Es esencial que una conferencia administrativa de la UIT especifique disposiciones, basadas en las características técnicas de los servicios, que rijan la compatibilidad entre el servicio de radioastronomía y otros servicios.

3 Protección de las observaciones de radioastronomía en la zona oculta de la Luna

Para las observaciones de radioastronomía, la zona oculta de la Luna presenta ventajas excepcionales que han sido reconocidas desde hace mucho tiempo. Además de ofrecer lo más parecido a un entorno libre de interferencias, las ventajas de la zona oculta de la Luna para la radioastronomía incluyen la ausencia casi total de atmósfera, lo que permite estudiar regiones del espectro electromagnético que son inaccesibles desde la Tierra. En particular, la ausencia de ionosfera lunar permite estudiar los espectros de fuentes celestes entre aproximadamente 50 kHz y 30 MHz. La ausencia de cantidades apreciables de vapor de agua y oxígeno en la atmósfera lunar permite realizar observaciones de la región de las microondas y las ondas submilimétricas por encima de unos 50 GHz, la cual es total o parcialmente absorbida por la atmósfera terrestre. El interés de los radioastrónomos por la zona oculta de la Luna ha sido reconocido en el Artículo 29 del RR (números 2632-2635).

3.1 Radioastronomía lunar en la gama 30 kHz-30 MHz

En el Capítulo 3 del Manual de Radioastronomía de la UIT se describen las limitaciones ionosféricas de la radioastronomía desde la Tierra por debajo de 30 MHz. Las emisiones radioeléctricas cósmicas han sido observadas con radiotelescopios emplazados en la Tierra a frecuencias tan bajas como 1,5 MHz, pero las observaciones por debajo de 30 MHz sólo son posibles en circunstancias excepcionales, en emplazamientos especiales y durante periodos de tiempo limitados. Las interferencias radioeléctricas terrenales, tanto naturales como artificiales, limitan seriamente la posibilidad de realizar observaciones sensibles de radioastronomía en esta gama de frecuencias en la Tierra o en el espacio cercano. Las interferencias radioeléctricas en la gama de 1 a 30 MHz son generalmente provocadas por transmisiones de comunicaciones y ruido generado en cantidades comparables por la actividad humana (ruido de máquinas y encendido) y por fuentes naturales (principalmente descargas eléctricas). Por debajo de unos 500 kHz, la fuente de ruido predominante es la radiación kilométrica auroral, o sea el ruido radioeléctrico producido muy por encima de la región auroral.

Desde la Tierra es muy difícil observar o es completamente imposible acceder a toda la gama de frecuencias que están por debajo de 30 MHz. Algunos de los objetivos científicos importantes de esta gama son: el fondo atómico galáctico, los espectros de las fuentes de radioemisiones extragalácticas, los púlsares, los fenómenos de dispersión y refracción interestelar y las emisiones radioeléctricas del Sol en estado activo e inactivo, así como de Júpiter. Muchas de estas informaciones sólo pueden ser obtenidas por estos medios. Por lo tanto se debe reservar para la radioastronomía toda la gama que está por debajo de 30 MHz.

3.2 La gama 30-300 MHz

Este segmento del espectro es tan utilizado por los servicios activos en Tierra que se ha vuelto difícil realizar observaciones de radioastronomía. La región contiene varias rayas débiles de recombinación radioeléctrica de orden superior de carbono y nitrógeno. Además, los astrónomos siguen buscando en las galaxias principales la raya espectral del hidrógeno neutro (HI) desplazada hacia el rojo, descendiendo en frecuencias por debajo de 150 MHz. En esta región del espectro también es importante realizar observaciones de los púlsares, cuántares y de las fuentes de espectro agudo. En la zona oculta de la Luna los servicios activos deben evitar totalmente la utilización de la gama situada por debajo de 300 MHz.

3.3 La gama 300 MHz-3 GHz

Algunas de las rayas espectrales más interesantes y más detenidamente estudiadas se encuentran en este segmento del espectro, en el que actualmente las presiones comerciales y la competencia son particularmente fuertes. Las siguientes rayas espectrales tienen un interés muy grande para la astrofísica:

- la transición hiperfina a 327,4 MHz del átomo de deuterio, que es una raya sumamente débil y de gran importancia cosmológica, detectada en 1990 después de muchos intentos infructuosos;
- la raya del hidrógeno neutro a 1 420,4 MHz (HI), descubierta hace casi cuatro decenios, que sigue siendo la raya más intensamente estudiada del espectro radioeléctrico;
- las cuatro rayas del radical OH a 1 612,2, 1 665,4, 1 667,4 y 1 720,5 MHz.

Los segmentos del espectro radioeléctrico que contienen estas rayas y sus extensiones limitadas hacia el rojo y el azul están atribuidas a la radioastronomía en la Tierra. A pesar de que son muy utilizadas, estas bandas presentan serios problemas para las observaciones astronómicas tanto porque no están adecuadamente protegidas de las interferencias espaciales dentro de banda o fuera de banda o porque la banda atribuida a la radioastronomía es mucho más angosta que la gama de desplazamiento hacia el rojo que le interesa. Por ejemplo, las observaciones de las rayas HI desplazadas hacia el rojo brindan informaciones sobre la formación de las galaxias y los comienzos del universo, temas sobre los cuales se han realizado y se siguen realizando intensos esfuerzos de investigación. Un ejemplo es el descubrimiento de la raya a 1420,4 MHz desplazada hacia el rojo a 323 MHz. También se ha pronosticado la existencia de los megamáseres OH desplazados hacia el rojo, que pueden ser observados en frecuencias tan bajas como 500 MHz o inferiores. Para el siglo venidero se piensa que los astrónomos estarán muy interesados en los objetos muy desplazados hacia el rojo que emiten en las rayas HI u OH. Dada la probabilidad de que la zona oculta de la Luna esté prácticamente libre de interferencias, es probable que aumente significativamente el interés por las observaciones de estos objetos apenas perceptibles una vez que esté disponible un observatorio lunar.

Las observaciones del continuum en la gama de 300 MHz a 3 GHz se realizan en las bandas de 1,4 GHz (1,400-1,427 GHz), 1,6 GHz (1,66-1,67 GHz) y 2,7 GHz (2,69-2,7 GHz). La banda 2,29-2,3 GHz del espacio lejano se utiliza también para realizar observaciones de interferometría con línea de base muy larga (VLBI).

Debido a la gran importancia que tienen las observaciones HI y OH desplazadas hacia el rojo para la astrofísica deberá reservarse la gama 300 MHz-2 GHz para las observaciones de radioastronomía.

3.4 La gama 3-20 GHz

Esta región del espectro es cada vez más utilizada por los servicios a bordo de aeronaves y los servicios por satélite, lo que dificulta cada vez más la observación de varias rayas importantes para la astrofísica. Algunas rayas importantes han sido descubiertas hace poco tiempo, por ejemplo la del metanol a 6,7 GHz, que está en el medio de las bandas atribuidas a los servicios por satélite.

En esta región del espectro se han detectado las siguientes rayas importantes para la astrofísica, la mayoría de las cuales no están adecuadamente protegidas;

- las rayas de la metiladina (CH) a 3 263,8, 3 335,5 y 3 349,2 MHz, observadas en nuestra galaxia y en galaxias externas;
- las rayas del formaldehído (H₂CO) a 4829,7 MHz y 14,49 GHz, también observadas en nuestra galaxia y en galaxias externas;
- las rayas del metanol (CH₃OH) a 6,7 GHz y 12,2 GHz. Estas rayas máser fuertes, descubiertas en 1987, han sido observadas en nuestra galaxia y en las Nubes de Magallanes, pero no han sido reconocidas en el RR;
- la raya de la ciclopropenilidena (C₃H₂) a 18,3 GHz, observada en nuestra galaxia y en las Nubes de Magallanes, pero no reconocida en el RR.

También se realizan observaciones del continuum en varias bandas de esta gama del espectro con radiotelescopios situados en la Tierra. Las bandas utilizadas por los radioastrónomos se encuentran cerca de las siguientes bandas atribuidas a los servicios pasivos: 4,99-5,0, 10,68-10,7 y 15,35-15,4 GHz. Los radioastrónomos también utilizan la banda 8,40-8,50 GHz del espacio lejano.

3.5 La gama 20-300 GHz

Tal como se expresa en el Capítulo 3 del Manual de Radioastronomía de la UIT y en la Recomendación UIT-R RA.676, la atenuación por gases atmosféricos neutros es cada vez más importante en esta gama. La atenuación por la humedad atmosférica comienza a aumentar fuertemente por encima de 10 GHz y alcanza el máximo a 22,235 GHz. Las emisiones también son muy atenuadas por rayas importantes del oxígeno en la cercanía de 60 y 120 GHz y por rayas del agua alrededor de 183 GHz. En las ventanas atmosféricas situadas entre las rayas de absorción, la dificultad de las observaciones astronómicas aumenta al aumentar la frecuencia. Esto es debido al aumento de la atenuación procedente de los flancos de las rayas de absorción, así como al aumento de las fluctuaciones de fase que dificultan o imposibilitan realizar observaciones con gran resolución angular, incluso en sitios altos y secos. Por lo tanto, la ausencia de atmósfera y las condiciones extremadamente secas hacen que el lado oculto de la Luna sea ideal para realizar observaciones astronómicas en esta gama de frecuencias.

La radioastronomía molecular nació en 1963, cuando se detectaron las rayas espectrales del radical OH. Desde ese entonces se han descubierto miles de rayas espectrales de más de 80 moléculas y en la actualidad se siguen descubriendo rayas moleculares. En la Recomendación UIT-R RA.314 se incluyen aproximadamente 30 rayas moleculares en la gama de 20-300 GHz que son consideradas de capital importancia para la radioastronomía. Sin embargo se han podido obtener informaciones de muchas otras rayas que no están catalogadas como de gran importancia para la astrofísica. Las informaciones astronómicas provenientes de las observaciones de las rayas moleculares han provocado una revolución en nuestras ideas sobre la composición química y la dinámica del medio interestelar lo mismo que sobre la formación y la evolución de las estrellas. En los últimos años el aumento de la sensibilidad de los telescopios de ondas milimétricas y de los receptores de bajo ruido ha permitido observar muchas rayas moleculares en las galaxias externas, lo mismo que en la nuestra, y ha brindado una importante contribución a la comprensión de la evolución y estructura galácticas. Las emisiones de rayas moleculares e infrarrojas lejanas están muy estrechamente correlacionadas y los recientes datos de satélite en el infrarrojo lejano sugieren la existencia de grandes cantidades de galaxias que emiten rayas moleculares. Las detecciones recientemente efectuadas de las rayas CO a 115 GHz desplazadas hacia el rojo a frecuencias tan bajas como 36 GHz, indican que las rayas moleculares que están por encima de 30 GHz pueden permitir que los radioastrónomos exploren aspectos importantes de una amplia fracción del universo.

4 Conclusiones

La principal consideración para la utilización de la zona oculta de la Luna es evitar la interferencia radioeléctrica generada en la Tierra y su cercanía. El extremo de bajas frecuencias del espectro hasta unos cuantos gigahercios es la gama en la cual la radioastronomía sufre más severamente las interferencias. Tal como se mencionó en el § 2.3, el desplazamiento hacia el rojo de la fundamentalmente importante raya HI del hidrógeno neutro amplía la gama en la cual se le puede observar desde 1,42 GHz hasta un nivel tan bajo como 323 MHz. En la gama 1-2 GHz se encuentran las importantes rayas espectrales OH, algunas de las cuales están en bandas compartidas. Incluso en las bandas exclusivas de radioastronomía, las observaciones sufren la interferencia de emisiones fuera de banda en esta gama, cuya utilización está desarrollándose rápidamente. También son importantes las observaciones por debajo de 300 MHz, aunque muy difíciles de realizar desde la mayoría de los emplazamientos en la Tierra. *Por lo tanto, un primer requisito debe ser que todas las frecuencias que se encuentran por debajo de 2 GHz en la zona oculta de la Luna sean accesibles para radioastronomía.* Para las transmisiones activas que son absolutamente indispensables para las operaciones espaciales, se necesitan bandas sustitutivas que permitan un acceso total.

En general, las frecuencias más convenientes para los radioastrónomos a efectos de transmisiones en la Luna deberían ser las más altas, es decir, la gama que está por encima de 25 GHz. Las observaciones VLBI producirán velocidades de datos muy altas, cuya transmisión hacia la Tierra requerirá a su vez grandes anchuras de banda, que posiblemente excedan los 2 GHz. Estos requisitos podrán cumplirse solamente en frecuencias que estén por encima de 25 GHz. Sin embargo debe observarse que el número de las rayas moleculares aumenta con la frecuencia y que, al igual que la raya del hidrógeno, muchas de éstas pueden ser desplazadas por efecto Doppler en amplias gamas de frecuencias (por ejemplo la raya CO a 115 GHz). Además, las regiones espectrales que no pueden ser observadas desde la atmósfera terrena porque coinciden con los valores de cresta de las bandas de absorción molecular (por ejemplo las rayas de absorción del vapor de agua o del oxígeno) deben ser reservadas para las observaciones de radioastronomía. Por lo tanto, tal como se destaca más adelante, deberá examinarse la elección de las frecuencias de transmisión.

Es muy importante que se protejan de manera adecuada las frecuencias de la mayoría de las rayas importantes. Además, la búsqueda de rayas importantes para la astrofísica continuará, y se deben proteger en la Luna las bandas que contengan rayas interesantes. El potencial para el descubrimiento de este tipo de rayas está indicado por el hecho de que la raya a 6,7 GHz de la molécula de metanol, el segundo másér más fuerte que se haya detectado, fue descubierta sólo en 1991. Además, es muy conveniente proteger anchuras de bandas un tanto superiores a lo que es posible en el caso de las atribuciones en la Tierra. Los sistemas desarrollados y utilizados para la transmisión de datos o para otros objetivos activos en la zona oculta de la Luna deben permitir una redundancia de frecuencias suficiente para garantizar que si se produce un nuevo descubrimiento en la banda utilizada por ellos, las operaciones podrán ser transferidas a una banda diferente para permitir la investigación pasiva.

Las frecuencias de las observaciones del continuum en la Luna incluirán las de las bandas de radioastronomía atribuidas en la Tierra, a efectos de comparación directa con las medidas terrenales y de interferometría de línea de base muy larga con las estaciones terrenales. Por lo tanto en la Luna deben protegerse rigurosamente las atribuciones primarias y secundarias a la radioastronomía. Sin embargo, en muchas de estas atribuciones las anchuras de banda son demasiado pequeñas para que tengan utilidad técnica en los receptores modernos diseñados para una sensibilidad máxima, y es importante evitar este tipo de restricciones en la Luna.

ANEXO 2

**Resolución B16 sobre las bandas que han de utilizarse para las
radiocomunicaciones en el entorno lunar de conformidad
con lo propuesto por las Comisiones 40 y 50**

La XXII Asamblea General de la UAI,

considerando

- a) que se prevé la necesidad de sistemas de radiocomunicación entre la Luna y la Tierra, en la superficie de la Luna y en el entorno cercano de la Luna para apoyar las actividades de investigación espacial, incluidas las observaciones de radioastronomía;
- b) que se necesitarán radiocomunicaciones en la zona oculta de la Luna tal como se define en el Artículo 29 del RR;
- c) que con el uso de algunas bandas de radiofrecuencias se pueden concertar los requisitos para estas radiocomunicaciones al mismo tiempo que se brinda protección para la radioastronomía tal como se expresa en el Artículo 29 del RR, sección VI;
- d) que en la zona oculta de la Luna es necesario preservar tanto espectro como sea posible libre de emisiones;
- e) que, al asignar frecuencias para las transmisiones necesarias, es importante evitar las bandas:
 - de gran importancia para la astronomía,
 - difíciles de observar desde la Tierra debido a la interferencia o la absorción en la atmósfera o en la ionósfera,
 - importantes para la interferometría entre la Tierra y la Luna;
- f) que las bandas mencionadas en e) incluyen:
 - todas las frecuencias por debajo de 2 GHz;
 - las frecuencias de las rayas espectrales más importantes (lista UAI) con una anchura de banda que abarque los desplazamientos esenciales hacia el rojo y el azul;
 - las atribuciones a la radioastronomía utilizadas en la Tierra para efectuar observaciones del continuum con una anchura de banda mayor para mejorar la sensibilidad,

recomienda

- 1 que se atribuyan dos bandas alternativas para los servicios activos necesarios en la zona oculta de la Luna para conservar el acceso por los servicios pasivos a la totalidad del espectro con coordinación temporal;
 - 2 que las radiocomunicaciones en la zona oculta de la Luna están limitadas a la banda 2 000-3 000 MHz;
 - 3 que se identifique la banda de frecuencias alternativas de por lo menos 1 GHz de anchura para permitir operaciones futuras con coordinación temporal entre la radioastronomía y los sistemas de comunicación lunar.
-