Consideraciones sobre la supuesta emisión de radio de 1934 que llegó a "Ummo" catorce años después

Javier Fraile

Abril 2005

1. Introducción

Este breve artículo está dividido esencialmente en dos partes. En la primera explico —de manera más bien divulgativa— el origen del límite a la máxima sensibilidad alcanzable por un receptor de ondas electromagnéticas. En la segunda discuto la verosimilitud de la afirmación de los autodenominados "ummitas" respecto a la supuesta detección, accidental, de una emisión de radio efectuada desde un buque noruego cerca de la costa de Terranova en 1934.

2. El ruido como límite a la sensibilidad

El problema de detectar señales electromagnéticas (o de cualquier tipo) muy débiles radica esencialmente en el *ruido*. El hecho en sí de que la señal sea de muy baja amplitud no es el *quid* de la cuestión, porque uno siempre puede amplificarla todo lo que le dé la gana. ¿Que hay que amplificarla 10.000 veces?; pues se amplifica. ¿Que hay que amplificarla diez millones de veces?; pues se pone un amplificador de ganancia 10.000.000... (Esto no es exactamente tan fácil como lo describo, pero, en líneas generales, es factible construir amplificadores de ganancias elevadísimas; tan elevadas casi como haga falta. Si nosotros lo podemos hacer, hay que suponer que "ellos" lo podrán hacer mucho mejor...)

El problema, como decía, es el ruido. Uno puede subir el volumen del amplificador de su equipo de música si una casete, por ejemplo, está grabada con un nivel demasiado bajo. Pero, ¿y si está a un nivel *bajísimo*?

Si uno sube el volumen a tope, sin poner nada de música, observará un fuerte ruido de fondo que sale por los altavoces (ruido blanco, más o menos); ese ruido está generado fundamentalmente en los circuitos electrónicos de la primera etapa de amplificación (el "previo"); es el ruido térmico de las resistencias, el ruido de los transistores, etc. Todo este ruido pasa por todas las etapas de amplificación y experimenta la misma ganancia que pongamos a la señal. O sea, que si aumentamos mucho el volumen porque la música está muy "bajita", también aumentamos mucho el ruido blanco que va a llegar a los altavoces. La consecuencia es obvia: El límite para trabajar con señales débiles es el propio nivel de ruido del amplificador. Si una señal es más débil que el ruido a la entrada y la amplificamos fuertemente, *también estaremos amplificando el ruido por el mismo factor*, de manera que a los altavoces va a seguir llegando la misma proporción señal/ruido (el ruido más fuerte que la señal); el ruido siempre enmascarará a la señal. Tal vez lleguemos a reventar los altavoces si insistimos en subir el volumen, pero no conseguiremos aumentar la sensibilidad.

Establecido esto, cabe preguntarse si es posible diseñar amplificadores (en el caso que nos ocupa, receptores de HF) con poquíiiisimo ruido. En tal caso, la sensibilidad sería enorme. Concretamente, cualquier señal de potencia mayor que el ruido del receptor sería detectable. La respuesta es, *grosso modo*, que sí. Sin alcanzar —al menos con nuestra tecnología— el "cero absoluto" de ruido, sí es posible aproximarse "asintóticamente" a él; con recepción heterodina, amplificadores paramétricos, circuitos refrigerados a muy baja temperatura, etc., podemos llegar a tener receptores con poquísimo ruido.

¿Quiere decir esto, entonces, que se puede alcanzar una sensibilidad (casi) infinita?; ¿que se pueden detectar señales infinitesimalmente débiles? No. La razón la explico en el siguiente apartado.

3. Ruido fotónico

Por la naturaleza cuántica de la radiación, la *propia señal es ruidosa* en sí misma. Esto se debe, en última instancia, a que la energía se emite en cantidades *discretas* (fotones), y a que los instantes de emisión de éstos son *aleatorios*; por ejemplo, en el caso de luz coherente como un láser, se puede demostrar que la emisión de fotones sigue una distribución de Poisson. Así pues, incluso aunque el receptor sea ideal y no haya adición indeseada de ruido, la sensibilidad nunca puede ser infinita porque, por razones físicas fundamentales, la naturaleza de cualquier señal generada es intrínsecamente ruidosa. Este ruido se llama *ruido fotónico*[1].

Dicho lo anterior, es obvio que, a la hora de decidir si los "ummitas" pueden haber detectado o no una determinada radiación muy débil procedente de la Tierra, tenemos que suponer que la argumentación ha de girar en torno a los límites impuestos por el ruido de señal, por el ruido fotónico, y debemos abstraernos del ruido de los equipos receptores ummitas, ya que los suponemos "perfectos" (y aunque no lo fueran, ¿cómo podríamos caracterizarlos?...)

Para definir lo que es sensibilidad utilizaremos un criterio bastante grosero, pero que se suele aceptar, a efectos sobre todo comparativos entre receptores diferentes. Se toma como potencia de señal mínima detectable por un receptor, P_m, aquélla que es igual a la del ruido, pues se supone que si la señal es más débil que el ruido, quedará enmascarada por éste, mientras que si es un poquito mayor, ya se puede "detectar"[2].

También, sobre un receptor incide inevitablemente radiación indeseada proveniente del "entorno". Me explico. Salvo en el caso de una temperatura de cero absoluto, las cargas eléctricas de los átomos de cualquier objeto se están moviendo por agitación térmica. Las cargas aceleradas radian ondas electromagnéticas. Por tanto, por cualquier "campo de visión" "entran" ondas electromagnéticas generadas por el mero hecho de que el entorno no está a 0 K. La distribución espectral de esta radiación es bien conocida cuando se puede idealizar el entorno como un sistema en equilibrio a una única temperatura: es la distribución del cuerpo negro. La energía total (integrada sobre todas las frecuencias) depende, por supuesto, de la temperatura. En este caso

[1] Para entender la naturaleza de este ruido, pensemos en una fuente *muy* débil. Por ejemplo, una luz coherente de longitud de onda $\lambda = 0,63\ \mu$m (rojo) que tiene una potencia de $\sim 4 \times 10^{-23}$ vatios. Eso equivale a una emisión de unos *10 fotones por día* (!) Pero ése es un valor *medio* estadístico; el número de fotones realmente emitidos fluctúa de acuerdo con la distribución de Poisson. Si nos ponemos a contar fotones en periodos de 24 horas, llegaremos sin duda, tras muchas cuentas, al valor medio de 10 fotones; pero, individualmente, un día puede que cosntemos 8 fotones, y otro día 13... Y otro día, *ninguno*. Si nos fijamos sólo en ese último día diríamos, erróneamente, que la fuente está apagada. Si nos fijamos en el día de los 13 fotones, concluiríamos que la fuente emite un 30 % más de potencia de la que realmente emite... Esto es el origen del ruido fotónico.

Naturalmente, siempre podemos esperar un tiempo infinito y medir la potencia correcta... ¿Siempre? No; sólo si la propia potencia de la fuente *es constante*, no varía. En el caso de la señal morse, no podemos esperar a contar fotones durante más tiempo de lo que dura el símbolo más corto (punto), que debe de ser del orden de $\sim 1/5$ de segundo o algo así. (Si esperamos más tiempo, ya estamos mezclando el punto con el punto o raya siguiente...) Así pues, si la potencia recibida es muy débil, la incertidumbre, el ruido, puede llegar a ser enorme. Y eso viene en la propia naturaleza de la señal.

[2] Esto es una generalización demasiado simple. A veces, según la aplicación, es necesaria una potencia de señal bastante superior a la del ruido.

ideal del cuerpo negro es proporcional a T^4 (ley de Stephan-Boltzman).

Naturalmente, el cosmos no es un cuerpo negro porque no es un sistema cerrado en equilibrio. Sin embargo, curiosamente, las fórmulas del cuerpo negro funcionan bastante bien sin más que cambiar la temperatura según el "trozo de cielo" al que se mira.

Cuando los ummitas apuntaban con sus antenas a nuestro sistema solar, captaban, además de la supuesta emisión morse, toda la "radiación de fondo" de naturaleza térmica (*background radiation* en inglés) proveniente de la zona de nuestro sistema solar que explorasen radioeléctricamente. En principio, uno pensaría que esa radiación es de una potencia constante —y así es— y, por tanto, se traduce en el sistema receptor en un mero "voltaje" continuo (en nuestras antenas) que no tiene por qué afectar en nada ni interferir con la señal que se intenta detectar. El problema es que esa radiación de fondo es, como toda radiación, también de naturaleza cuántica, y su valor "constante" es sólo un promedio sobre el que, en realidad, fluctúa la potencia emitida (exactamente lo que sucede con la misma señal). Esas fluctuaciones temporales aleatorias sí que se pueden mezclar con las variaciones temporales de la propia fuente-señal que queremos recibir, dando lugar así a una contribución adicional de ruido.

Una de las estrategias para minimizar el efecto de la radiación de fondo es "cegar", en la medida de lo posible, la antena receptora (o fotodetector, según la tecnología empleada) a dicha radiación. Por ejemplo, si queremos captar la radiación de una lejana estrella en el infrarrojo medio, lo que hacemos es "apuntar" el detector exactamente hacia esa estrella, y blindarlo con una pantalla (en forma de una especie de cucurucho) que impida que llegue radiación desde cualquier otra dirección. Ello reduce la visión del detector a un pequeñísimo ángulo sólido cuya normal es el eje que une el detector y la estrella. Sólo molestará entonces la fracción de la radiación de fondo que se cuele por ese ángulo sólido (que debería ser lo más pequeño posible; estrictamente, cuasi-diferencial, lo mínimo para que pase la radiación de la estrella). Naturalmente, el blindaje del detector (la pantalla metálica opaca en forma de cucurucho) tiene que estar refrigerado a temperatura criogénica (¡a ser posible, a 0 K!), porque si no habríamos hecho el idiota: las propias paredes calientes del blindaje radiarían hacia el detector y tendríamos exactamente el mismo problema. Es más, los propios fotodetectores en sí suelen estar refrigerados (para esos rangos de longitud de onda).

Si uno piensa en una situación ideal en que la radiación de fondo pudiera bloquearse totalmente, el único ruido sería entonces el ya comentado ruido fotónico de la propia señal. Ése sí que sería siempre inamovible[3]. De cualquier

[3] A no ser que la radiación esté preparada en una clase de estado cuántico exótico que se

modo, el ruido de la radiación fondo *no* puede suprimirse tampoco al 100 %, como observaremos enseguida.

Otro tipo de receptor "perfecto" que nos podría llevar al mencionado límite fotónico de sensibilidad es el *receptor coherente ideal.* En este receptor la debilísima señal captada se mezcla con una onda de gran amplitud de la misma frecuencia que la señal (receptor homodino) o de una muy cercana (receptor heterodino). Esta frecuencia se genera en el propio receptor mediante el llamado "oscilador local"; en el caso de radiofrecuencia es un oscilador electrónico, y en el caso de un recptor óptico o de infrarrojo es un láser. Es condición *sine qua non* que este oscilador sea de una gran potencia —idealmente infinita.

La potencia mínima detectable resulta, entonces[4],

$$P_m = h\nu \left(1 + \frac{2}{\exp\left(h\nu/k_B T\right) - 1}\right) \Delta f. \tag{1}$$

En (1) k_B es la constante de Boltzman, h es la constante de Plank, ν es la frecuencia de la radiación, T es la temperatura absoluta del "trozo de cielo" a donde apunta la antena, y Δf es el ancho de banda de modulación. En el siguiente apartado explicaré este último concepto.

Obsérvese que aparece la temperatura del fondo (*"background"*) en (1). Eso sólo puede ser porque hay una contribución del ruido de la radiación de fondo. Aunque he dicho que éste se minimiza apantallando el detector (o antena), es obvio que al menos hay que dejar un "agujerito" para que se reciba la señal que se quiere detectar. Por ese "agujerito" se cuela inevitablemente una contribución de la radiación de fondo. (Más técnicamente, diríamos que el receptor capta "el *modo*" de la radiación de fondo que coincide con el de la señal). Esa contribución mínima aparece en (1) y su magnitud depende de la temperatura. Concretamente, si la frecuencia de la radiación es tal que $h\nu >> k_B T$, se tiene

$$P_m \simeq h\nu\Delta f, \tag{2}$$

y en este caso el efecto de la radiación de fondo es despreciable; P_m es el

denomina "estado comprimido". La radiación de este tipo tiene *menos ruido fotónico* que el impuesto por la mencionada distribución de Poisson. De hecho, idealmente puede hacerse tender a cero. (!) Por ejemplo, los interferómetros ópticos que se han concebido para la detección de ondas gravitatorias han de utilizar *luz comprimida*, pues la luz coherente de un láser normal no es suficiente para la sensibilidad requerida.

En cualquier caso, y entre otras cosas, es obvio que la radiación de HF emitida desde el buque noruego era una onda de lo más normalita..., así que es ocioso hacer más consideraciones a este respecto.

[4] En el Apéndice se esboza parte de la deducción de (1).

límite de sensibilidad ideal correspondiente al ruido fotónico de la propia señal recibida. Este límite es típico del espectro visible e infrarrojo cercano. Pero si $h\nu << k_B T$,

$$P_m \simeq 2k_B T \Delta f, \tag{3}$$

y el resultado (3) refleja que el límite de sensibilidad está impuesto por el ruido fotónico, no de la señal, sino de la radiación de fondo que inevitablemente se "cuela" en el receptor. Esto sucede típicamente en RF, microondas e infrarrojo lejano. Si no se cumple ninguno de los dos casos extremos, hay que utilizar (1), pues ambas contribuciones pueden tener magnitudes comparables.

Obsérvese que en el resultado (1) no aparece *ninguna* característica del receptor ni de la antena. Es un resultado universal, puesto que refleja simplemente el *ruido de la propia radiación*; si el receptor —sea de la tecnología que sea— es *ideal*, se limita a reproducir el ruido de la radiación tal cual es sin incrementarlo. No obstante, hay que hacer unas matizaciones sobre la "idealidad" de la recepción. A esto dedico el siguiente apartado.

4. Consideraciones prácticas sobre el receptor

En primer lugar, voy a explicar qué es el *ancho de banda* Δf. Si lo que en última instancia quieres recibir es, por ejemplo, un canal (analógico) de televisión, eso ocupa 5 MHz, luego necesitas un ancho de banda en el receptor de al menos 5 MHz. Puede ser de más, pero es contraproducente porque ello permitiría que se colase más potencia de ruido. El el caso de la señal morse, el ancho de banda es pequeñísimo. La transmisión de signos morse generados manualmente a razón de... ¿3, 4... por segundo, en promedio?, genera una señal electromagnética cuya envolvente tiene forma de un tren de pulsos, más o menos rectangulares, de duraciones variables, pero no más cortos que 0,2 ó 0,3 segundos... El ancho de banda relevante de semejante señal se puede estimar, *grosso modo*, en no más de 5–10 Hz. Entonces, habría que poner, por ejemplo, $\Delta f = 10$ Hz en (1), que es una cifra *francamente pequeña*.

Ahora bien, surge aquí una duda. Como se supone que los ummitas no sabían *a priori* que iban a recibir una "señal telegráfica de bajísima velocidad", ¿por qué iban a estarla "esperando" ajustando su receptor a un ancho de banda tan ridículo, tan *primitivamente* bajo...? En realidad, esto sería fácilmente solventable. Pueden haber dispuesto un ancho de banda Δf muchísimo mayor que lo necesario (para este caso) durante la toma de datos, y luego, aplicar —matemáticamente hablando— diversos tipos de filtrado, con distintos anchos de banda, a la señal registrada. En otras palabras, la minimización del ruido a base de poner un Δf muy pequeño se puede hacer *después* de medir, estudiando y procesando la información almacenada.

Sin embargo, hay otros parámetros que deben ser establecidos forzosamente *antes* de medir. Por ejemplo, para poder llegar a la fórmula (1) hay que suponer que el "área eficaz" de la antena es *mucho mayor* que el cuadrado de la longitud de onda de la radiación que se quiere detectar[5]. Esto, en frecuencias de HF, implicaría áreas eficaces del orden de 1 Km cuadrado. Naturalmente, ahora sí que estoy derivando necesariamente hacia tecnologías "terrestres". Si yo estuviese *esperando* recibir una señal de HF muy débil procedente de una determinada dirección (que conozco), prepararía la antena o el *array* de antenas de la forma que considerase adecuada. Pero, ¿y si no lo sé con anticipación? No puedo hacer hipótesis sobre los equipos que los ummitas tenían para recibir señales EM, y sobre el tipo de señales que andaban buscando. Por otro lado, probablemente sus sistemas de "antenas" hagan uso de conceptos incluso desconocidos por nosotros. En cualquier caso, al margen de las antenas, (1) es el límite absoluto de sensibilidad por mor de las propiedades fundamentales de la radiación, como ya he dicho, así que me atendré a él.

5. Transmisión de la señal

Pasemos ahora a la transmisión de la señal de la Tierra a Ummo (ejem...) Supuestamente, la frecuencia empleada fue 413 MHz. Llamemos P a la potencia emitida (que ignoramos). Las antenas de HF son muy poco directivas[6]. Y es de suponer que aquélla tan antigua no estaba precisamente optimizada. Por simplicidad, tomaré, por ahora, una antena que radia isótropamente en todo el hemisferio (2π estereoradianes). Es decir, la potencia radiada por unidad de ángulo sólido en cualquier dirección es

$$P_\Omega = \frac{P}{2\pi} \qquad \text{(W/sr)}. \tag{4}$$

[5] El área eficaz de una antena parabólica es aproximadamente el 50 % de la superficie real de su apertura. Otros tipos de antenas (por ejemplo, filiformes) no tienen una relación tan evidente con la noción de superficie. Sin embargo, el concepto de área eficaz se aplica a todas las antenas; viene a describir qué superficie del frente de onda está, a efectos de recolección de energía, "interceptando" la antena. Es algo parecido al concepto de *cross section* de Física.

[6] 413 MHz *no* es HF. Aquí hay problema al que volveré enseguida.

Ésta es una simplificación más bien burda, pero no tiene sentido perder el tiempo "afinando" en este aspecto, dada la cantidad de aproximaciones y suposiciones adicionales que tendremos que hacer. Por ejemplo, dependiendo del formato de *modulación* usado en el transmisor, la potencia emitida realmente útil a efectos de detección no es, en realidad, P, sino una fracción de la misma. *Supongo* que el formato empleado sería el llamado "doble banda lateral", en cuyo caso la fracción sería $1/2$ [o, de manera equivalente, hay que poner $2\Delta f$ en lugar de Δf en (1)]. Pero el caso es que ignoramos este detalle y otros muchos. Otro ejemplo: ¿Toda la potencia radiada escapó por la ionosfera? Lo dudo; la ionosfera no es un espejo perfecto "binario" —*funciona* o no *funciona*—; seguramente una fracción de la potencia fue reflejada.

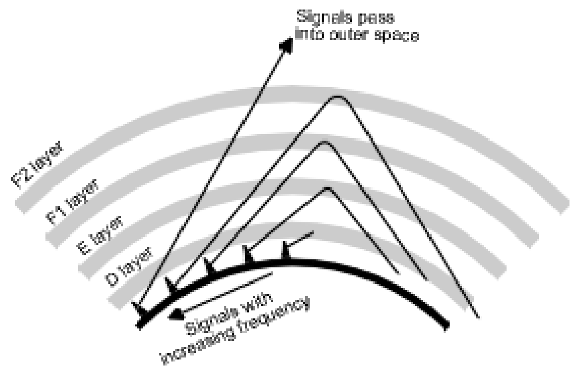

Figura 1: Reflexión en las distintas subcapas de la ionosfera.

Dada la incertidumbre que tenemos sobre diversos parámetros —empezando por supuesto por el propio valor de P—, no tenemos más remedio que ignorarlos, quedándonos simplemente con un valor "representativo" de cada uno.

Entonces, una antena de "área eficaz" A colocada en UMMO subtiende un ángulo sólido, con vértice en la Tierra (ver figura 2),

$$\Omega_{\mathrm{rec}} = \frac{A}{r^2},$$

donde r es la distancia de la Tierra a Ummo. Por tanto, la potencia total recibida sería

$$P_{\mathrm{rec}} = P_\Omega \, \Omega_{\mathrm{rec}} = \frac{AP}{2\pi r^2}, \tag{5}$$

y ésta ha de ser mayor que (1) para ser "detectable". Lo que quiere decir que

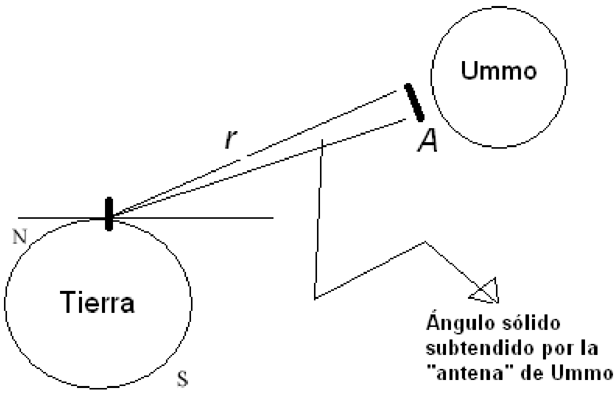

Figura 2: Sólo una pequeñísima fracción de la potencia emitida por el barco pudo llegar a Ummo. La onda electromagnética a tal distancia tendría un frente de onda muy aproximadamente plano.

$$P > \frac{2\pi r^2}{A} P_{\text{mín}}. \qquad (6)$$

Hagamos unas estimaciones.

Para empezar: ¿cuál es la temperatura T? Es más: ¿Hay *una* temperatura T? Sin duda, no. La temperatura media del Universo es del orden de 3–4 K; la temperatura del Sol es de 5770 K; la temperatura de la superficie de la Tierra es de unos 300 K... ¿Cuál es entonces la temperatura T que demanda la fórmula (1)?

En realidad, la fórmula (1) es tan sencilla porque asume que el receptor se encuentra totalmente "rodeado" por un entorno a temperatura uniforme T. Imaginemos un horno de cocina, bien aislado del exterior, que lleva un buen rato encendido y ha alcanzado una temperatura constante, homogénea dentro de su receptáculo (ha alcanzado "equilibrio térmico"). Si es así, el horno es un genuino "cuerpo negro". Desde cualquier posición *dentro* del horno se verá siempre la misma temperatura, ya sea al lado de una de las paredes o en el medio de la cavidad... La radiación térmica en tales condiciones es totalmente isótropa. La densidad de energía térmica es la misma en cualquier punto y las ondas electromagnéticas proceden por igual de todas direcciones... El ruido de la radiación térmica es el mismo en todas partes y sólo depende de la temperatura T, que es un parámetro unívoco... dentro del horno. Sólo en estas condiciones es válida la fórmula (1) —y todas las del Apéndice.

Ahora bien, la situación descrita en el párrafo precedente no es comparable, en absoluto, con la del sistema Tierra-Ummo. Es obvio que es este caso no hay isotropía, no hay equilibrio térmico...; no se puede considerar a Ummo "inmerso" en una gigantesca cavidad en equilibrio en la que la temperatura vista siempre es $T = 300$ K (la de la Tierra). La Tierra no sería, para Ummo, un "fondo", un entorno térmico homogéneo. Por el contrario, la Tierra, a una distancia tan lejana como 14 años luz, se ve como una fuente de radiación térmica *puntual*. La energía media radiada *y, sobre todo, sus fluctuaciones* (que son las que dan origen al ruido térmico) se podrían calcular como las correspondientes a un cuerpo a temperatura de $T = 300$ K (aproximadamente) y con la superficie radiante de la Tierra. Pero, por supuesto, la intensidad electromagnética transmitida (en vatios por metro cuadrado) iría atenuándose con la distancia —más o menos como la de una onda esférica—. Por consiguiente, a la energía del ruido térmico procedente de la superficie de la Tierra que llegase, hipotéticamente, a Ummo, le ocurriría exactamente lo mismo que a la propia *señal* emitida por el barco de Terranova: sería de un valor *extraordinariamente pequeño*.

Luego no es aceptable usar las archiconocidas fórmulas del ruido térmico del cuerpo negro en una situación que es, a todas luces, muy diferente de la de la cavidad en equilibrio.

¿Podemos calcular, entonces, la auténtica contribución del ruido térmico de la Tierra en las circunstancias descritas? Supongo que sí, pero tengo un problema: no conozco la fórmula y no he conseguido encontrarla en ninguna parte. Quiero pensar que, si le dedicase un tiempo, podría deducirla yo mismo. Pero no lo voy a hacer porque no tengo mucho tiempo libre en el momento de escribir estas líneas y porque creo que no hace falta. Utilizaré una simplificación muy drástica: Ignoraré el ruido térmico producido por la Tierra. *Sospecho* que su magnitud (en el receptor en Ummo) sería sensiblemente inferior a la potencia recibida de la señal morse. No puedo verificarlo sin hacer los cálculos, claro, pero en realidad da igual: como veremos enseguida, la conclusión general de este artículo sería esencialmente la misma[7].

Consideraré que, mirando hacia la Tierra, Ummo "ve" la *temperatura media del Universo*, que es del orden de $T = 3$ K. Esto es lo "mejor" que podemos conseguir en cuanto al ruido térmico...: no podemos ignorar esos 3 K, porque $T \approx 3$ K es la temperatura efectiva que *siempre*, como mínimo, "verá" cualquier antena, desde cualquier lugar del Universo y apunte hacia donde apunte[8]. Dado que el modelo de Universo como una gigantesca "cavidad" en (cuasi-) equilibrio térmico a $\sim$3 K sí es bastante razonable, la fórmula (1) es entonces directamente aplicable poniendo en ella $T = 3$ K.

[7] Si el Sol estuviera también dentro del campo de visión de la antena ummita, habría que sumar su contribución al ruido térmico. Por el mismo motivo que apunto en el texto, ignoro igualmente esta posible fuente de ruido.

[8] Salvo, quizás, hacia las Nebulosas Toroidales...

Repito: Estoy ignorando el ruido térmico adicional generado por la propia Tierra (y tal vez por el Sol); pero ello no va a afectar a las conclusiones.

Empero, antes de proseguir, hay otro problema a tener en cuenta: la eventualidad de que UMMO, el Sol y la Tierra estuvieran *alineados* en el momento de la transmision: el Sol taparía completamente a la Tierra y en tal caso la transmisión hubiera sido imposible. Sin embargo, según Manuel R., en ningún momento se pudo haber producir un alineamiento de estos tres cuerpos. Vista desde UMMO, la Tierra describe una elipse alrededor de Sol cuyo semieje menor es de un 20 % del tamaño del semieje mayor. Por otra parte, el día de la emisión la Tierra estaría a una distancia aparente de Sol, vista desde UMMO, de un 70 % del semieje mayor; ver la figura 3.

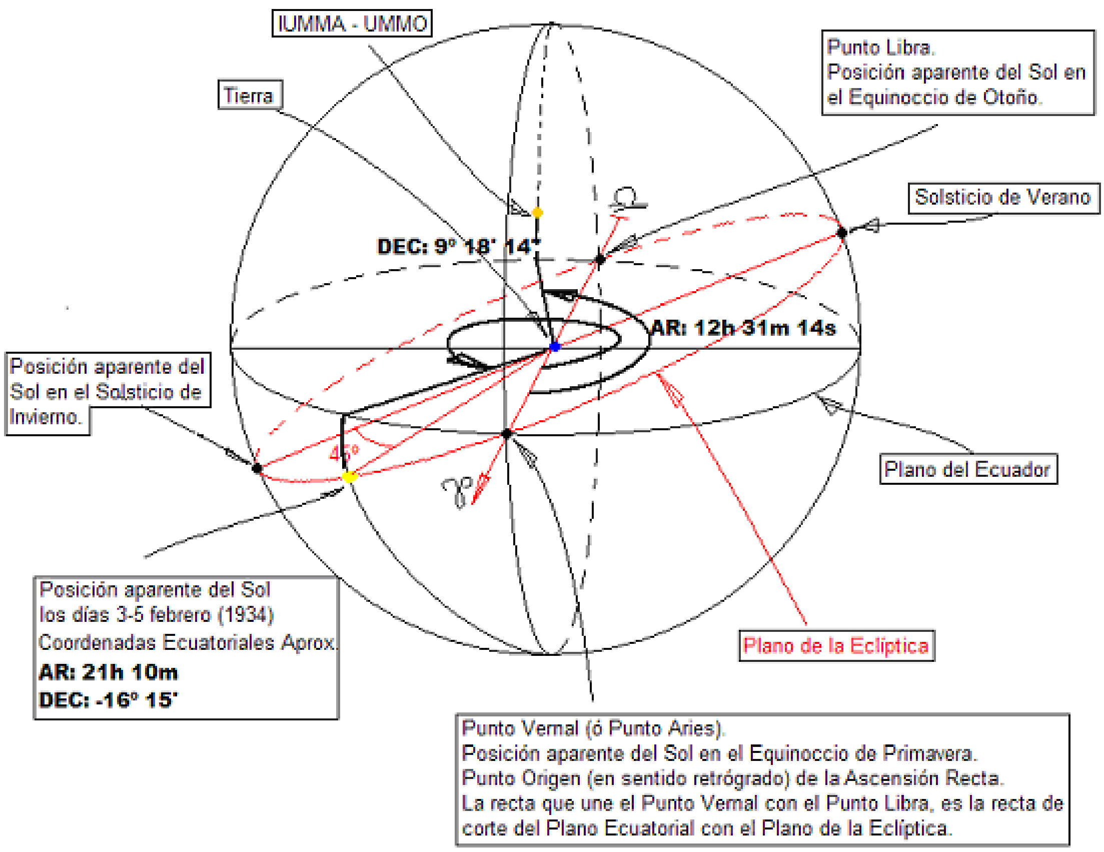

Figura 3: Posiciones de UMMO, la Tierra y el Sol los días 3–5 de febrero de 1934. (Manuel R.)

Tras este preámbulo, podemos ya hacer uso de la expresión (1). Para[9] $\nu \simeq 40$ MHz, y tomando $\Delta f = 5$ Hz,

$$\frac{h\nu}{k_B T} = \frac{(6,6 \times 10^{-34}) \times (40 \times 10^6)}{(1,38 \times 10^{-23}) \times 3} = 6,38 \times 10^{-4}.$$

Por tanto, nos encontramos en la situación en la que domina claramente el ruido de fondo, y podemos utilizar la expresión (3). Incluso aunque aumentásemos en dos órdenes de magnitud la frecuencia ν (ver Nota 9), la aproximación seguiría siendo válida. Y más aún si ν fuese *menor*.

Entonces,

$$P_{\text{mín}} = k_B T \Delta f = (1,38 \times 10^{-23}) \times 3 \times 5 = 2 \times 10^{-22} \text{ vatios.} \qquad (7)$$

Así pues, (7) es la mínima potencia que los ummitas "podrían" detectar... De (6), teniendo en cuenta que

$$r = 14 \text{ años-luz } = (14 \times 365 \times 24 \times 3600) \times 300000 = 1,32 \times 10^{14} \text{ Km},$$

se obtiene (tomamos $A = 1$ Km^2)

$$P > \frac{2\pi r^2}{A} P_{\text{mín}} = \frac{2 \times \pi \times (1,32 \times 10^{14})^2}{1} \times 2 \times 10^{-22} \text{ vatios}$$
$$\simeq 22 \text{ megavatios (!!!)} \qquad (8)$$

6. Discusión

El resultado (8) es disparatado. El barco noruego no pudo haber radiado *megavatios* en 1934... La potencia de una emisora en HF de un barco llega, hoy en día, a $\sim$1 KW como mucho.

---

[9] Hay un problema con la frecuencia. En la carta ummita en la que se narran estos hechos se menciona una frecuencia de unos 413,44 MHz; pero la reflexión ionosférica no es factible a frecuencias tan altas. Además, se indica que los *científicos ummitas* descartaron que la radiación recibida proveniera del "ruido de la radiación de fondo de la galaxia, sobre la longitud de onda de 21 cm, del hidrógeno". Pero la longitud de onda correspondiente a 413,44 MHz es $\lambda = c/\nu = 3 \times 10^8/(413,44 \times 10^6) = 72$ cm, bastante alejada de 21 cm. ¿Cómo podría haber lugar a confusión alguna con la emisión del hidrógeno a 21 cm?

Por otro lado, tal vez en aquel estadio inicial de la investigación, en que se desconocían muchos aspectos de la transmisión ionosférica, los noruegos usaron rangos de frecuencias altas sin conocimiento exacto de los resultados esperables.

Voy a tomar $\nu = 40$ MHz ($\lambda = 7,2$ m), que al menos está más cerca de las máximas frecuencias útiles para reflexión ionosférica —que no son superiores a ~ 10 MHz.

¿Se puede modificar el resultado (8)? Hasta cierto punto.

Si ponemos $\Delta f = 1$ Hz en vez de 5, aumentamos P_m en un factor de 5... Que no es gran cosa tampoco.

¿Y si asignamos una cierta directividad a la antena? Podríamos conjeturar (¡siendo optimistas!) que la antena en cuestión tuviera una directividad de $\sim$ 5 dB, como mucho, lo que supone un incremento de $\sim$ 3 veces en la potencia recibida.

Procedamos de la siguiente manera manera: Calculemos el área efectiva A que habría de tener la antena ideal ummita para detectar la emisión en las siguientes condiciones: $P = 1$ KW; ganancia directiva: 3 (5 dB) —lo que equivale a sustituir $P \to 3P$ en la fórmula (8)—, $\Delta f = 5$ Hz, y $T = 3$ K. Despejando A de (8), obtenemos

$$A > \frac{2\pi r^2}{3P} P_{\text{mín}} = \frac{2 \times \pi \times (1,32 \times 10^{14})^2}{3 \times 10^3} 2 \times 10^{-22} \simeq 7300 \text{ Km}^2. \qquad (9)$$

El resultado (9) muestra que los ummitas deberían haber dispuesto de una superficie de antena recolectora de energía equivalente a un cuadrado de unos 85 Km de lado (!) para detectar la señal emitida desde Terranova. Ello, además, suponiendo características *perfectas* en el diseño de la misma y de todo el resto del sistema receptor...

Cualquier variación en la magnitud de los parámetros empleados en el cálculo afectaría al resultado (9) de una manera muy sencilla: Si, por ejemplo, la potencia radiada fue de 500 W en lugar de 1 KW, hay que multiplicar el área A por 2... Si el efecto de la radiación térmica de la Tierra y/o el Sol no es despreciable, de suerte que "equivale", por ejemplo, a introducir una temperatura de ruido (ficticia) de 30 K en la fórmula (7), en lugar de los 3 K del fondo cósmico[10], hay que multiplicar el área A por 10; etcétera.

El sistema de recepción coherente descrito no exige la refrigeración de la superficie detectora. La directividad del sistema coherente viene impuesta por el propio proceso de mezcla con el oscilador local —al contrario que los sistemas de "recepción directa", que alcanzan prácticamente el mismo límite (3) sin oscilador local, pero a costa de estrictas condiciones de blindaje directivo[11]—. Como se menciona en el Apéndice, la directividad del sistema

[10] Por razones físicas obvias, jamás la temperatura de ruido efectiva T podría llegar, en el peor de los casos, a $\sim$ 300 K (ó a $\sim$ 5000 K si el Sol se encontrase en el campo de visión). Intuitivamente, además, estimo que la repercusión de la Tierra y/o el Sol sobre el ruido térmico habría de ser *muy inferior* a tales límites.

[11] En "nuestro planeta", actualmente, es inviable realizar receptores *cuasi-ideales* a frecuencias de HF —que usan antenas— mediante técnicas de detección directa. Se recurre universalmente a los receptores coherentes. A frecuencias mucho más altas (alrededor del

coherente se reduce más o menos a un cono de ángulo sólido del orden de λ^2/A. En nuestro caso, $\lambda \approx 10$ metros y, con la gigantesca área efectiva (9), $\lambda^2/A \approx 1,\ 37 \times 10^{-8}$ sr. ¡¡Realmente directivo!!

¿Es posible encontrar algún "alivio" a la situación en que nos deja este formidable resultado? El comportamiento de la ionosfera y de sus diversas capas es bastante complejo. Cabe la posibilidad de que una feliz combinación de reflexiones y refracciones en la misma hubiera contribuído a focalizar la energía radiada por la antena del barco en la dirección de UMMO. De esta manera, una gran parte de la potencia P (en lugar de $P_\Omega\,\Omega_{\rm rec} = (P/2\pi)\Omega_{\rm rec}$) podía haber sido captada... Pero esto es pura especulación, y muy aventurada.

Es de suponer, por otro lado, que el sistema receptor no constará de *una* antena, sino realmente de un enorme y complejo array de antenas o elementos sensores que alcancen, conjuntamente, un área efectiva enorme. Y este sistema probablemente debería encontrarse en órbita, *flotando* fuera del planeta... El desafío técnico que constituye diseño y construcción de semejante sistema causa vértigo... Ignoro si, mediante técnicas similares a las del rádar de apertura sintética —que involucrarían el uso de múltiples sensores en rápido movimiento—, es factible generar más fácilmente áreas efectivas de antena de estos tamaños descomunales...

¿Y si la antena transmisora utilizada por el barco noruego hubiera sido una *antena de UHF*, porque *realmente* la emisión fue realizada a la frecuencia 413,44 MHz? Al contrario que las antenas de HF, una antena Yagi-Uda de UHF tiene una ganancia directiva[12] muy alta del orden de hasta ~ 30 dB. La anchura del lóbulo de emisión se puede estimar por la fórmula aproximada

$$g \approx \frac{4\pi}{\Delta\theta\Delta\varphi},$$

donde g es la ganancia en unidades naturales (para 30 dB[13], $g = 1000$), $\Delta\theta$

infrarrojo lejano), sí es factible emplear detección directa y acercarse a la sensibilidad límite apantallando direccionalmente los detectores.

La detección directa también exige *ausencia total de ruido electrónico* para llegar al límite ideal, mientras que la detección coherente no, pues, con $P_L \to \infty$, el efecto del ruido electrónico desaparece [ver (13)].

[12] La *"ganancia"* de la antena en una determinada dirección se define como el cociente entre la potencia radiada en esa dirección, y la que radiaría —con la misma alimentación— si emitiera isótropamente en todas las direcciones del espacio.

[13] Tomaré este valor para realizar la estimación numérica, aunque 30 dB es una ganancia

es la anchura en elevación y $\Delta\varphi$ es la anchura en acimut (ambas en radianes). Suponiendo $\Delta\theta \approx \Delta\varphi$, obtenemos

$$\Delta\theta \approx \Delta\varphi \approx 0,112 \text{ rad} \simeq 6,5^0.$$

Esto equivale a un ángulo sólido

$$\Omega \approx 2\pi(1 - \cos 0,112) \simeq 0,04 \text{ sr}.$$

Suponiendo que toda la potencia emitida se distribuye "homogéneamente" en Ω, hay que sustituir (4) por

$$P_\Omega \approx \frac{P}{0,04} \qquad \text{(W/sr)}. \tag{10}$$

Así pues, ahora tenemos

$$P_{\text{rec}} = P_\Omega\, \Omega_{\text{rec}} = \frac{AP}{0,04 \times r^2},$$

en lugar de (5). Por consiguiente, en lugar de (6) obtenemos

$$P > \frac{0,04 \times r^2}{A} P_{\text{mín}},$$

de donde

$$A > \frac{0,04 \times r^2}{P} P_{\text{mín}},$$

[en lugar de (9)].

Si, como señala Norman Molhant en *www.ummo-sciences.org*, suponemos una potencia acoplada desde el transmisor a la antena, $P \approx 100$ W, el área efectiva necesaria en la antena receptora resulta:

$$A > \frac{0,04 \times (1,32 \times 10^{14})^2}{100} 2 \times 10^{-22} \simeq 1400 \text{ Km}^2, \tag{11}$$

valor algo menor que el de (9), pero que ciertamente no reduce significativamente las dificultades técnicas (equivale a un cuadrado de ~ 37 Km de lado).

A la vista de todo lo dicho, mi conclusión personal la resumo así: Desde el paradigma de nuestra Física, y desde el estado de nuestra Tecnología,

realmente alta para este tipo de antenas, incluso hoy en día.

parece *muy difícil* (**no** absolutamente imposible) que los ummitas hubieran podido captar una señal como la que presumiblemente emitió el supuesto barco noruego. Vislumbrar hipotéticos avances técnicos futuros que pudieran hacer factible semejante proeza no está prohibido...

Agradecimientos.- *El autor agradece a J. L. Rodríguez por su asesoramiento sobre diversos aspectos de la tecnología de antenas, así como a Manuel R. y V. Solé por la revisión de este manuscrito y las fructíferas discusiones subsiguientes.*

7. Apéndice

La expresión (1) se obtiene a partir de unos cálculos muy genéricos que se pueden encontrar, por ejemplo, en la siguiente referencia: T. P. MacLean and E. H. Putley: *"The performance of ideal receivers of optical, infra-red and radio-frequency radiation"*. Royal Radar Establishment Journal, 52-5,1965. (UK). Voy a resumir la parte final de los mismos con el fin de aclarar (espero) el significado y el ámbito de aplicación de (1); las fórmulas "demasiado sencillas" se suelen usar con tanto entusiasmo que frecuentemente se usan mal al olvidar sus limitaciones y su ámbito de aplicación.

La relación señal-ruido a la salida del receptor coherente es:

$$\frac{S}{N} = \frac{\overbrace{P_s P_L}^{\substack{\text{Potencia de señal amplificada} \\ \text{por el oscilador local}}}}{\underbrace{h\nu(P_L + P_s)\Delta f}_{\substack{\text{Ruido cuántico} \\ \text{de la señal y del} \\ \text{oscilador local}}} + \underbrace{\nu^2 \frac{4(k_B T)^3}{c^2 h} \eta \Delta f \int_{\text{hem}} A f(\theta, \phi) d\Omega \int_{x_1}^{x_2} \frac{e^x x^2}{(e^x - 1)^2} dx}_{\substack{\text{Ruido cuántico de la radiación} \\ \text{de fondo en todo el rango espectral} \\ [\nu_1, \nu_2] \text{ al que es sensible la} \\ \text{antena (no amplificado por el} \\ \text{oscilador local)}}} + \cdots + \underbrace{P_L P_{B,\text{amp}} \Delta f}_{\substack{\text{Ruido cuántico de la} \\ \text{radiación de fondo} \\ \text{amplificado por} \\ \text{el oscilador local}}} + \underbrace{N_{\text{el}}}_{\substack{\text{Ruido de la} \\ \text{circuitería} \\ \text{electrónica}}}}, \tag{12}$$

donde P_s es la potencia de la señal recibida (muy débil), P_L es la potencia del oscilador local, A es el área efectiva de la antena, $f(\theta, \phi)$ es su característica de directividad angular (se supone que es máxima en la dirección de "apuntamiento", $f(\theta = 0, \phi = 0) = 1$), $P_{B,\text{amp}}$ es la parte potencia (media) de radiación de fondo *que se mezcla con el oscilador local y es amplificada*, y $x = h\nu/k_B T$. La integral $\int_{\text{hem}} A f(\theta, \phi) d\Omega$ se extiende a todo el hemisferio (ángulo sólido 2π).

Si la potencia P_L del oscilador local es realmente grande, la expresión anterior se simplifica a (dividiendo por $P_L \to \infty$)

$$\frac{S}{N} = \frac{P_s}{h\nu\Delta f + P_{B,\text{amp}}\Delta f}. \tag{13}$$

Igualando la relación (S/N) a 1, se obtiene la potencia mínima detectable $P_s = P_m$:

$$P_m = h\nu\Delta f + P_{B,\text{amp}}\Delta f. \tag{14}$$

Para calcular $P_{B,\text{amp}}$ hace falta conocer las características directivas de la antena empleada. Concretamente, la potencia aportada a la antena por un cono diferencial de ángulo sólido $d\Omega$ orientado en la dirección θ, ϕ, y en un pequeño[14] ancho de banda Δf alrededor de ν, es:

$$dP_B = \frac{4\nu^2}{c^2} A f(\theta,\phi) d\Omega \frac{h\nu}{e^{h\nu/k_B T} - 1}\Delta f. \tag{15}$$

Ahora bien, sólo la radiación proveniente de un ángulo sólido $\Omega_R \simeq \lambda^2/A$ alrededor del eje $(\theta = 0, \phi = 0)$ se mezcla adecuadamente con el oscilador local y es amplificada por el mismo. Por ejemplo, para $\nu \approx 40$ MHz, $\lambda = c/\nu \approx 10$ metros, y con un área A de 1 Km^2, se tiene $\Omega_R \approx 0,1$ sr. Por simplicidad, se suele tomar entonces

$$f(\theta,\phi) \simeq \begin{cases} 1 & \text{para } \Omega \text{ dentro de } \Omega_R \\ 0 & \text{para } \Omega \text{ fuera de } \Omega_R, \end{cases} \tag{16}$$

de manera que

$$\begin{aligned} P_{B,\text{amp}} &\simeq \left(\frac{2\nu^2}{c^2}\frac{h\nu}{e^{h\nu/k_B T} - 1}\Delta f\right)\int_{\Omega<\Omega_R} A d\Omega = \left(\frac{2\nu^2}{c^2}\frac{h\nu}{e^{h\nu/k_B T} - 1}\Delta f\right)\underbrace{A\Omega_R}_{\lambda^2} \\ &= \frac{2\nu^2}{c^2}\beta\frac{h\nu}{e^{h\nu/k_B T} - 1}\Delta f, \end{aligned}$$

donde también se ha dividido (15) por 2 porque sólo la mitad de la potencia de la radiación de fondo es realmente detectada (estadísticamente, la otra mitad tendrá una polarización de campo eléctrico ortogonal a la del oscilador local y será rechazada).

Así, finalmente, se obtiene

$$P_m = h\nu\Delta f + \frac{2h\nu}{e^{h\nu/k_B T} - 1}\Delta f,$$

que es la fórmula (1).

[14] "Pequeño" quiere decir que $\int_\nu^{\nu+\Delta f} F(\nu)d\nu \simeq F(\nu)\Delta f$.