

IMPPLICANCIAS COSMOLOGICAS DE LA TECTONICA DE PLACAS (*)

J. L. SERSIC

Observatorio Astronómico
Universidad Nacional de Córdoba

Muy frecuentemente, los avances en nuestra comprensión de la naturaleza de las cosas acaban revelándonos que nuestras más enraizadas creencias resultan ser meras convenciones. La idea de relacionar la intensidad de la interacción gravitatoria con el número de partículas en el universo, data de la década del 30 y se debe independientemente a Eddington y Dirac. Dado que el número de partículas decrece a medida que la expansión del universo lleva las partículas más allá del límite de interacción impuesto por la velocidad finita de la luz más rápidamente de lo que otras nuevas son creadas, la intensidad de la constante de interacción decrece. Este hecho es de interés para los geofísicos pues podría permitir la resolución de algunas dificultades que se presentan en la comprensión del mecanismo motriz de la tectónica de placas. Los progresos que las Ciencias de la Tierra pudieren hacer en este sentido, son decisivos para la validación de ciertas teorías cosmológicas.

Very frequently the advances in our comprehension of the nature of things show us that our more deeply rooted beliefs are mere conventions. The idea of relating the intensity of the gravitational interaction with the number of particles in the Universe arised already in the 30's and is due independently to Eddington and Dirac. Since the number of particles diminishes as the expansion of the Universe carries them beyond the interaction limit imposed by the finite light speed, and that happens faster than the replenishment of new particles, the intensity of the interaction constant also diminishes. This fact is of the interest of the geophysicists because it could help to solve some of the difficulties that arise in the comprehension of the driving mechanism of plate tectonics. The advances that the Earth Sciences could make at this respect, are decisive to validate some cosmological theories.

(*) Informe por invitación

INTRODUCCION

Los procesos físicos en el universo están dominados por la interacción de las fuerzas nucleares y gravitacionales - las más fuertes y las más débiles - de la naturaleza. La intensidad de la atracción gravitatoria entre dos partículas elementales es solamente 10^{-39} veces la de su interacción electromagnética. Sin embargo, en sistemas muy masivos y compactos, como los que encontramos en esc la astronómica (las estrellas de neutrones, por ejemplo) los efectos gravitacionales son dominantes. De aquí que resulte notable que una teoría de la gravitación, la Teoría General de la Relatividad, haya hasta el presente sobrevivido pruebas tan exigentes que van desde las condiciones de vacío casi total en el medio interestelar, hasta los objetos muy compactos tales como los pulsars. Ahora, cuando comenzamos a exigir aún más el rango de aplicabilidad de la Teoría hacia entidades tales como los agujeros negros ó las condiciones imperantes en el universo en las etapas de muy alta densidad prevalentes hace unos doce o quince eones, resulta plausible esperar reajustes en sus postulados conducentes a nuevas teorías y leyes universales.

Sin embargo, toda teoría nueva, o modificación de una ya bien establecida, debe satisfacer criterios observacionales y teóricos cada vez más rigurosos. Dentro de este contexto deseamos discutir en lo que sigue, la posibilidad de que - dentro del marco de ciertas teorías cosmológicas - la constante G de la gravitación universal dependa del tiempo y, como tal, no sea realmente constante.

TEORÍA CONFORME DE LA GRAVITACION

Al menos tres teorías, las de Brans y Dicke en 1961, Hoyle y Narlikar en 1972, y Dirac en 1973, requieren que G disminuya en proporción inversa a la escala de tiempo del Universo.

La forma clásica de la Teoría General de la Relatividad requiere la constancia de G y las teorías que postulan - en base a determinadas consideraciones - su variación con el tiempo, conducen a discrepancias con los clásicos experimentos que validan la Teoría General. A esta situación escapa la cosmología de Hoyle y Narlikar - llamada también Teoría Conforme de la Gravitación - , pues en ella se da la misma situación que en la teoría de Einstein en lo que se refiere al avance del perihelio de Mercurio y la desviación de los rayos de luz por parte del Sol.

Las ideas de Hoyle y Narlikar conducen a una postura fuertemente Machiana, ya que conciben la masa de una partícula como resultante de la interacción de ésta con un campo de masa $m(X)$ generado por otras partículas. El campo $m(X)$ para cualquier punto del espacio-tiempo, tiene su origen en partículas situadas principalmente a grandes distancias de X . Los autores introducen una transformación conforme en las ecuaciones que definen las cosmologías explosivas - consecuencias directas de la Teoría General de la Relatividad - , que no es posible realizar con la concepción usual de masa. De esta suerte el estado singular inicial, característica dificultad de los universos explosivos, desaparece y el problema equivalente se reduce a hora a que nuestro universo posee una mitad opuesta que se le conecta sin discontinuidades ni singularidades. Ambas mitades contribuyen - siempre dentro del modelo de estos autores - al campo de masa $m(X)$ y están, por en

de, conectadas físicamente. Es más, la forma apropiada para $m(X)$ parece exigir que ambas mitades del universo estén presentes. La mitad "nueva" desaparece cuando se usa la descripción matemática usual en las cosmologías explosivas.

Al introducir la constante de gravitación, esencialmente una constante de acoplamiento, la masa de una partícula individual es $Gm(X)$. Dado que el campo de masa puede calcularse explícitamente en términos de la escala de tiempo del universo y la densidad de las partículas, es posible estimar el valor de G al relacionar $Gm(X)$ con los valores observados empíricamente. Así hallan esos autores un número que es del orden de la inversa de la raíz cuadrada del número de partículas que generan el campo de masa en la época presente.

En las teorías usuales, esta circunstancia es interpretada como una mera coincidencia pero, si G estuviere realmente vinculada al número de partículas que genera el campo de masa, nos enfrentaríamos con un nuevo modelo cosmológico. En efecto, dado que el número de partículas responsable por la generación del campo de masa depende del tiempo, también debería hacerlo G . Un modelo de universo que implique una dependencia de G con el tiempo requiere creación de materia, aunque no necesariamente de modo uniforme. En efecto, la creación de materia procedería en centros de actividad y el modelo posee entonces propiedades radicalmente nuevas en lo astrofísico.

Las posibilidades de creación localizada por una parte, y la representación del campo de masa $m(X)$ como suma de contribuciones atrasadas (provenientes de nuestra mitad $T > 0$ del universo) y contribuciones adelantadas (provenientes de la "otra" mitad $T < 0$ del universo) por otra, constituyen interesantes propiedades de la teoría que tienen una gran trascendencia sobre nuestra concepción de la masa. En efecto, el campo $m(X)$ posee la satisfactoria propiedad de surgir de la simétrica contribución de potenciales atrasados y adelantados, todos provenientes de un universo "extendido", de mitades opuestas, con sentidos opuestos del tiempo, pero equivalentes en todo otro respecto. Además, la masa de una partícula $Gm(X)$ queda determinada como una función del lugar del universo (X) y del tiempo T , si G dependiese de T . Esto induce a Hoyle y Narlikar a pensar que los corrimientos al rojo anómalos, por ejemplo, son resultado de fluctuaciones locales de aquellos parámetros como consecuencia de las condiciones físicas prevalentes en aquellas regiones con campos gravitacionales fuertes. Dichas regiones estarían caracterizadas por la condición de que sean las partículas locales las que hagan una contribución a la masa total, comparable con la contribución de las partículas del resto del universo. Tales regiones serían capaces de producir sus propias condiciones ambientales, como para inducir variaciones locales de G .

Resulta claro, pues, que esta teoría conduce a una extensión de las ideas de Mach, al concebir la masa como resultante de las contribuciones al campo $m(X)$ de partículas alejadas de X , pero sin dejar de lado la posibilidad de que condiciones particulares induzcan contribuciones importantes provenientes de partículas próximas.

VALIDACION DE LA TEORIA

A primera vista las consecuencias de la variación temporal de G para la cosmología son tan severas que pareciera que una prueba empírica adversa sería fácil de hallar. Sorprende, empero, que esto no sea así. Más aún,

parece haber una considerable evidencia en favor de tal variación. Con el objeto de discutirla, notemos que la teoría conforme de la gravitación formulada por Hoyle y Narlikar prevé dos tipos de variación para la constante gravitacional G . O más bien dos modalidades para dicha variación. En efecto, la primera, que podríamos denominar variación "en media" ó secular, dictada por la distribución en gran escala de la materia a gran distancia y la segunda, de carácter local, originada por la presencia de grandes concentraciones de materia en la vecindad del punto que consideramos. En una región no especial del universo, de características típicas, tales como nuestra vecindad galáctica, es dable esperar que solo sea detectable la variación secular, inducida, por así decirlo, por el resto del universo. Por el contrario, en una región singular, tal como en las vecindades de galaxias elípticas gigantes con núcleos de alta densidad y masa, o de cuasares, la componente "local" de la variación de G es considerable, pudiendo incluso superar en magnitud a la variación secular.

Las consideraciones precedentes sugieren de inmediato la metodología para poner a prueba las consecuencias de la Teoría Conforme de la Gravitación. En efecto, la observación de las estructuras peculiares de las galaxias puede echar luz sobre la variabilidad de la componente local, mientras que las observaciones dinámicas en nuestro entorno - una región de características típicas - debería proveer información sobre la variación secular de G . Consideremos separadamente ambos casos.

ESTRUCTURAS PECULIARES EN GALAXIAS: Los eventos explosivos que tienen lugar en las regiones centrales de algunas galaxias se relacionan a una concentración muy elevada de masa. Ya que una explosión es esencialmente un drástico reordenamiento de las masas concernidas con emisión de energía, la energía de acoplamiento del núcleo central habrá de cambiar y, consecuentemente, su masa gravitacional efectiva (M). Una partícula de prueba alejada de la región nuclear, aunque dentro de la galaxia, se moverá en consecuencia, en un campo Newtoniano originado en fuentes que cambian con el tiempo.

Por otra parte, las observaciones sugieren que los procesos explosivos en galaxias tienen simetría axial, de suerte que nos interesa estudiar las propiedades globales del movimiento de una partícula de prueba en un campo gravitacional originado en fuentes dependientes del tiempo, pero con simetría axial.

En base a estas premisas desarrollamos en 1969 un modelo para la interpretación de las estructuras peculiares de las galaxias. Cuando la Teoría Conforme de la Gravitación, de Hoyle y Narlikar, fue dada a conocer en 1972, comprendimos que sin proponérselo habíamos desarrollado una herramienta cualitativa para someterla a prueba, ya que es en las densas regiones centrales de esa clase de galaxias donde la componente "local" de la variación de la constante gravitacional es efectiva y nuestro modelo permitía predecir concretamente las consecuencias observables de tales variaciones en las estructuras a gran escala de los mismos.

En efecto, con el fin de desembarazarnos de las dificultades de estudiar la dinámica de una partícula en un campo gravitacional con fuentes dependientes del tiempo, fue menester efectuar una transformación conforme espacio-temporal que, después de imponer algunas condiciones no demasiado restrictivas, conduce a un potencial conservativo en las nuevas variables. Este nuevo potencial posee términos adicionales originados en la eliminación de la variabilidad de las fuentes. Las ecuaciones del movimiento en las nuevas variables proporcionan el movimiento de la partícula de prueba relativo a un substratum que se expande ó contrae en consonancia con la eliminada variabilidad de las fuentes. El problema es, es este punto, for-

malmente similar al de Hill, en el caso restringido de los tres cuerpos. Es posible escribir una ecuación para la energía relativa - generalización de la integral de Jacobi - y definir también las superficies de velocidad cero. Las propiedades topológicas de esas superficies requieren la existencia de puntos singulares a lo largo del eje de simetría (análogos a los puntos colineales de Euler) y también un conjunto denso a lo largo de una circunferencia en un plano perpendicular al eje de simetría (análogos a los puntos Lagrangianos). Esta última es la característica principal de la topología de las superficies de velocidad relativa cero. Aún si relajáramos algunas de las condiciones restrictivas impuestas al comienzo, esta estructura anular conserva sus propiedades topológicas.

Es fácil darse cuenta que la topología de las superficies de velocidad nula se mantienen cuando invertimos la transformación y volvemos al espacio-tiempo físico. Si el polvo, gas o las estrellas en el sistema tienen límites definidos para sus constantes Jacobianas, observaremos una segregación espacial de los mismos, tales como en los casos de radio-galaxias, y otros sistemas extragalácticos, donde se observan estructuras anulares.

El acuerdo cualitativo entre las formas y estructuras predichas y las observadas pareciera dar pie a la interpretación de que es el producto GM el que varía con el tiempo. Sin embargo, algunas dudas surgen al respecto, ya que las investigaciones numéricas de Toomre y Toomre (1976) parecen poder representar algunas estructuras anulares basándose únicamente en efectos de marea en campos gravitacionales con fuentes constantes. La dilucidación de ciertos ejemplos críticos, tales como el de NGC 2685, y un análisis estadístico sobre la frecuencia de estructuras anulares en galaxias en relación con la frecuencia de pasajes muy cercanos y/o casi colisiones aún aguardan ser efectuados.

LA DINAMICA DEL SISTEMA SOLAR: La ocasión de recibir la medalla de oro de la Royal Astronomical Society en 1975, el profesor W.H. McCrea pronunció la correspondiente Halley Lecture a la que tituló "Solar System as Space-Probe". Uno de los párrafos de dicha Conferencia dice textualmente:

"A lo largo de 5 eones el Sistema Solar ha viajado a través de nubes interestelares y de partículas cósmicas. Nos preguntamos qué memorias ha acumulado acerca de ellas. También ha, por supuesto, perpetuamente atravesado campos gravitatorios, magnéticos, y de radiación electromagnética, pero ellos son mucho más débiles que los que lleva consigo, de suerte que probablemente no hayan dejado rastro alguno..."

Es precisamente sobre esta última frase sobre la que queremos iniciar nuestra discusión. Si a lo largo de cinco eones - la tercera parte de la escala de tiempo del universo - la constante gravitacional G hubiere sufrido una variación secular como resultado de la evolución a gran escala de la materia en el Universo, esto se habría reflejado en la dinámica del Sistema Solar y consecuentemente, el Profesor McCrea habría tenido un ítem más en su fascinante conferencia.

En efecto, consideremos primero la evidencia directa relacionada con los movimientos de los planetas y la Luna. Una consecuencia inmediata del decrecimiento de la constante gravitacional es una lenta expansión adiabática de **todas** las órbitas del sistema solar en torno a sus primarios. Vinti ha demostrado en 1974 que en el caso del movimiento de dos cuerpos con G variando inversamente con el tiempo, y después de promediar sobre una revolución completa, se tiene

$$\frac{1}{2} \frac{\dot{n}}{n} = - \frac{\dot{a}}{a} = \frac{\dot{P}}{2P} - \frac{\dot{G}}{G} \quad (1)$$

donde el punto indica derivación respecto del tiempo, a es el semieje mayor de la órbita, n el movimiento angular medio y P el período de revolución.

Ha sido Fred Hoyle quien en 1972 demostró como puede distinguirse la influencia de la variación de G en el movimiento de la Luna en torno a la Tierra, de cambios similares debidos a otras causas, tales como la fricción originada por las mareas.

Dado que la expresión precedente vale tanto para la órbita de la Tierra en torno al Sol, cuanto para la de la Luna en torno a la Tierra, se deduce que una escala de tiempo astronómica basada en el movimiento observado del Sol en torno a la Tierra, tal como el llamado Tiempo de Efemérides, sufrirá un retardo en la misma proporción \dot{G}/G . Por el contrario, cuando medimos la aceleración de la longitud media de la Luna utilizando el Tiempo Atómico (supuestamente uniforme), obtendremos la aceleración total debida a todas las causas. En cambio, cuando medimos la misma aceleración utilizando el Tiempo de Efemérides, toda contribución proveniente de \dot{G}/G quedaría excluida, ya que sería absorbida por la escala de tiempo. La diferencia entre los dos valores de la aceleración indicaría entonces la parte debida exclusivamente a una constante gravitacional decreciente.

La evidencia observacional más reciente según los lineamientos esbozados más arriba, se debe a T.C. van Flandern, del Observatorio Naval de Washington, quien halla un decrecimiento de G de una parte en 10^{10} por año, y que resumimos a continuación.

Han habido cinco determinaciones de la aceleración de la longitud media de la Luna en base al Tiempo de Efemérides. La primera se debe a Spencer-Jones y data de 1939. El analizó las observaciones del Sol, la Luna, Mercurio y Venus realizadas en los tres últimos siglos, sus resultados fueron convertidos al equivalente de Tiempo de Efemérides por Clemens en 1948, y el error medio fue estimado por Morrison en 1972. Se obtuvo así una aceleración negativa de $(-22'' \pm 7'')/\text{cen}^2$ por encima de la aceleración dinámica indicada por el lento decrecer de la excentricidad de la órbita de la Tierra en torno al Sol. La segunda determinación se debe a Murray en 1957, quien analizó observaciones antiguas y obtuvo $(-42'' \pm 6'')/\text{cen}^2$. La tercera determinación es la de Newton en 1969, quien también analizó observaciones antiguas, principalmente eclipses pero en dos épocas diferentes, y obtuvo estimas independientes de $(-41,6'' \pm 4,3'')/\text{cen}^2$ y $(-42,2'' \pm 6,1'')/\text{cen}^2$. La cuarta determinación fue hecha por Oesterwinter y Cohen en 1972, quienes discutieron las observaciones meridianas del Sol, la Luna y los planetas desde 1913 para obtener $(-38'' \pm 8'')/\text{cen}^2$. La quinta determinación es el reciente resultado de Müller y Stephenson de 1974, quienes utilizaron muchos más datos antiguos de eclipses que Newton o Murray, y usaron métodos numéricos mejorados para arribar a un valor de $(-37,5'' \pm 5,0'')/\text{cen}^2$.

De esas cinco determinaciones el más sospechoso es el valor de Spencer-Jones que, según lo comenta Morrison, está fuertemente influenciado por las observaciones de tránsitos de Mercurio en el siglo XVII. Si se omite esta primera determinación debido a la alta probabilidad de errores sistemáticos y si se supone con van Flandern, que los resultados de Müller y Stephenson, perfeccionan grandemente todos los otros basados en observaciones antiguas, el promedio de las últimas dos determinaciones da

$$\dot{n} \frac{ET}{L} = (-38'' \pm 4'')/\text{cen}^2 \quad (2)$$

para la aceleración de la longitud media de la Luna utilizando Tiempo de Efemérides.

Todas las determinaciones, excepto la de Spencer-Jones, se encuentran dentro de sus propios errores medios de este valor adoptado.

La discusión de los datos de ocultaciones lunares utilizando Tiempos Atómicos para determinar la aceleración de la longitud media de la Luna fue realizada por van Flandern en 1970, quien obtuvo el valor de $(-52'' \pm 16'')$ /cen², por Morrison en 1973, quien halla $(-42'' \pm 6'')$ /cen² y nuevamente por van Flandern en 1975. En esta última discusión se usaron efemérides lunares integradas numéricamente en vez de la teoría analítica de Brown-Eckert, y se incluyeron además nuevas observaciones.

La observación de ocultaciones en el último análisis de van Flandern cubre el período 1955-1974, durante el cual se dispuso, naturalmente, de Tiempo Atómico. Solo fueron usados los contactos determinados fotoeléctricamente (casi 2000 observaciones) para evitar errores provenientes de insuficiente información sobre el tiempo de reacción de los observadores en caso de observaciones visuales. La solución completa contenía 21 incógnitas, y la aceleración total se halló ser de $(-65'' \pm 10'')$ /cen². El error dado es formal pero el autor sometió sus resultados a tests estadísticos y sugiere un nivel de confianza más realista que el error formal, lo que conduce a

$$\dot{n}_L^{AT} = (-65'' \pm 18'')$$
 (3)

para el valor de la aceleración de la longitud media de la Luna utilizando el Tiempo Atómico.

La diferencia de valores de la aceleración lunar determinados por Tiempo Atómico (3) y con Tiempo de Efemérides (2) conduce a la aceleración presumiblemente debida a un cambio de la constante de gravitación, esto es $(-27'' \pm 19'')$ /cen². Si llamamos a este resultado \dot{n}_L^G , y consideramos el movimiento medio lunar $n_L = 17.33 \times 10^8$ /cen obtenemos

$$\frac{\dot{n}_L^G}{n_L} = (-1.6 \pm 1.0) \times 10^{-8} / \text{cen} = (-0.16 \pm 0.1) \text{ eon}^{-1}$$
 (4)

Finalmente de la ecuación (1) tenemos que $\frac{\dot{G}}{G} = \frac{1}{2} (\dot{n}^G / n)$ de donde

$$\frac{\dot{G}}{G} = (-8 \pm 5) \times 10^{-2} \text{ eon}^{-1}$$

El uso de datos antiguos no depende de mediciones exactas sino sobre precisa información documentaria. En general todos los investigadores que han trabajado en este campo - Fotheringham, De Sitter, Spencer-Jones, Murray, Newton, van Flandern, encuentran valores de $(\dot{n}/n)_{\text{luna}}$ que son grandes comparados con el término de mareas generalmente usado, es decir que apuntan hacia un valor no nulo para \dot{G} .

Si ponemos $\omega(t)$ para la velocidad angular de la Tierra y si tomamos los valores de Müller y Stephenson, resulta que $(\dot{\omega}/\omega)^{ET} = (-0.29 \pm 0.03) \text{ con}^{-1}$ si usamos el Tiempo de Efemérides. Este valor se descompone en una parte debida a la acción de mareas del Sol y la Luna $(-0.44 \pm 0.05) \text{ eon}^{-1}$ y otra, de origen desconocido de $(+0.15 \pm 0.06) \text{ eon}^{-1}$. Cuando se utiliza el

Tiempo Atómico, sin embargo, los valores basados en el Tiempo de Efemérides deben corregirse en (\dot{n}_L/\dot{n}_L) . Entonces el resultado de Müller y Stephenson cambia de -0.29 con^{-1} a -0.45 con^{-1} en excelente acuerdo con la parte friccional de -0.44 con^{-1} debida a las mareas y no resta ahora ningún término de origen desconocido de carácter no-disipativo en la rotación de la Tierra.

El valor hallado para \dot{G}/G por van Flandern satisface la cota $\dot{G}/G \leq 40 \text{ con}^{-1}$ impuesta por Shapiro y otros (1971) en base al análisis de las experiencias con radar entre la Tierra y Mercurio.

TABLA I

Determinaciones de la aceleración secular de la longitud media de la luna.

| Autor | Año | \dot{n}_L^{TE} (con^{-2}) | Método |
|--------------------------|--------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Spencer-Jones Clemens | 1939 1948 | $-22'' \pm 7''$ | Obs. Sol, Luna, Mercurio, Venus, en los 3 últimos siglos. |
| Murray | 1957 | -42 ± 6 | Observaciones antiguas |
| Newton | 1969 | -41.6 ± 4.3 -42.2 ± 6.1 | Eclipses antiguos en dos épocas distintas. |
| Oesterwinter Cohen | 1972 | $-38. \pm 8$ | Obs. meridianas del Sol, Luna y planetas desde 1913 |
| Müller y Stephenson | 1974 | -37.5 ± 5.0 | Antiguos eclipses |
| | | \dot{n}_L^{TA} (con^{-2}) | |
| Van Flandern | 1970 | $-52'' \pm 16''$ | Ocultaciones lunares |
| Morrison | 1975 | -42 ± 6 | " " |
| Van Flandern | 1975 | -65 ± 18 | " " |

CONSECUENCIAS EN NUESTRO ENTORNO INMEDIATO

¿Cuáles son las implicaciones del cambio secular en la constante gravitacional? Las estrellas deberían haber sido en el pasado más brillantes de lo que suponemos con las teorías convencionales. Hoyle estima que en la época del origen del Sistema Solar - hace unos 4.5 cones - el Sol debe haber sido más brillante de lo que es en el presente en un factor tres aproximadamente. G habría sido entonces mayor de lo que es ahora en un factor 4/3.

La intensidad de la radiación solar que entonces llegaba a la Tierra podría haber sido más grande que este factor tres, debido a que la Tierra

estaba más cerca del Sol, lo que conduce a estimar un incremento de la constante Solar en un factor cinco sobre el valor actual. Esto tuvo lugar en la época del origen de la Tierra. La evidencia fósil más antigua de la existencia de vida se remonta a aproximadamente tres eones y la constante solar habría sido unas tres veces mayor que la actual.

Hoyle estuvo en un comienzo inclinado a suponer que las condiciones en la Tierra en esa época podrían haber sido demasiado cálidas para el desarrollo de la vida, y por consiguiente vió en esta dificultad un escollo insalvable para la teoría. El sostenía que por más espesa que fuera la capa de nubes terrestre, algo de luz podría penetrar hasta el suelo, lo que a su vez daría lugar a un flujo de radiación infrarroja hacia afuera. La opacidad de una atmósfera de vapores calientes es muy elevada en el infrarrojo, lo cual generaría un efecto invernadero, elevando así la temperatura del suelo.

Sin embargo, dicho autor puso en duda sus propios argumentos, particularmente aquel de que la energía solar que llega al nivel del mar podría ser reemitida como radiación infrarroja. Ahora sostiene que efectivamente, habrá un flujo de energía, pero de vapor latente, no de radiación. El agua es evaporada al nivel del mar, el vapor sube a gran altura en la atmósfera, se condensa, y el calor latente de condensación es radiado finalmente al espacio. Aún en la Tierra contemporánea este proceso es vastamente operativo en los océanos tropicales (un hecho bien conocido entre los climatólogos) y, si la constante solar aumentase, esas áreas se expandirían abarcando eventualmente las regiones templadas de los océanos. Hoyle sostiene que la temperatura al nivel del mar podría simplemente ajustarse a sí misma para dar suficiente evaporación de modo que la Tierra como un todo mantenga la temperatura media de una esfera negra, que en tal época llegaría a unos 370°K , un valor próximo al punto de ebullición del agua a presión normal.

CONSECUENCIAS PALEOBIOLOGICAS: Hoyle observa entonces que las bacterias son las más antiguas formas de vida conocidas, pero también las formas de vida más resistentes a las altas temperaturas. En sus estudios de las fuentes calientes de Yellowstone, Brock ha encontrado bacterias vivas hasta los 95°C . Aún esta alta temperatura no es necesariamente un límite biológico - es simplemente la más alta temperatura física a la cual puede existir una cantidad limitada de agua líquida a la altura de Yellowstone.

Cuando la constante solar hubo declinado paulatinamente hacia el valor actual, la temperatura media de la Tierra debió haber caído desde el centenar de grados hasta el valor medio contemporáneo de 10°C . Según Brock, existe una temperatura umbral característica para la aparición de formas de vida más y más complejas, que se da en la Tabla siguiente:

TABLA II

| Organismos | Límite superior ($^{\circ}\text{C}$) |
|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| Animales, incl, protozoos | 45 - 51 |
| Microorganismos eucarióticos (ciertos hongos, algas, etc) | 56 - 60 |
| Procariotas fotosintéticos (algas azul-verdosas) | 73 - 75 |
| Procariotas no-fotosintéticos (bacterias) | 90 |

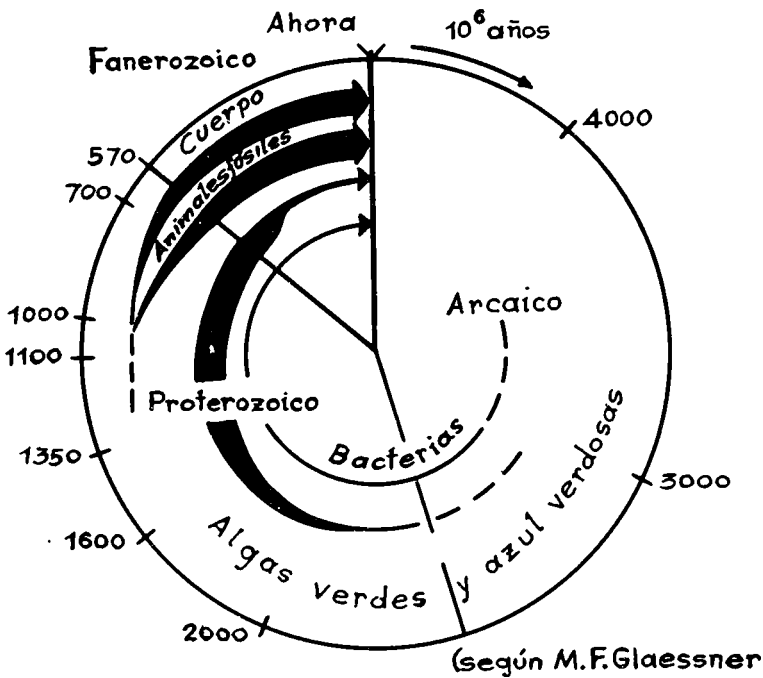


Figura 1

Si la hipótesis de una constante de gravitación G decreciente con el tiempo fuere correcta, deberíamos esperar una correlación entre esas temperaturas límites y las máximas edades de los fósiles de esas formas vivientes: las bacterias serían las más antiguas, luego las algas azul-verdosas, etc. y esto coincide con hechos bien conocidos a los paleobiólogos (Figura 1).

CONSECUENCIAS GEOLOGICAS: Durante la última década ha tenido lugar una revolución en las Ciencias de la Tierra. Su impacto es comparable a lo que ocurrió en el campo de la física durante el siglo 19. El concepto unificador es el de la Tectónica de Placas, el cual permite describir la estructura de la Tierra y la geodinámica en términos de un número pequeño de placas rígidas que cubren la superficie del planeta, moviéndose las unas respecto de las otras. Las placas divergen en los dorsales oceánicos, de donde surge materia desde las profundidades para llenar los intersticios; convergen en cambio a lo largo de los márgenes continentales y los arcos insulares - regiones de actividad sísmica - donde una o más placas se sumergen y consumen en el manto.

Uno de los más importantes problemas en nuestra comprensión de la dinámica de las placas es el mecanismo motriz. Las hipótesis más aceptadas favorecen un modelo en el cual las placas son arrastradas por la convección del manto, aunque también se argumenta que el hundimiento gravitacional de bloques densos y fríos podría arrastrar las placas tras ellos.

¿Cuál sería entonces la interpretación de estos procesos dentro del marco conceptual que venimos desarrollando?. El continuado debilitamiento

de la atracción gravitatoria podría producir la liberación gradual de las tensiones en el interior de la Tierra. Ello podría proporcionar el mecanismo motriz para la tectónica de placas, particularmente si como parece hasta el presente los cálculos de Jeffreys que demuestran la necesidad de fuerzas extraordinariamente grandes para producirla, no han podido ser desvirtuados.

Analicemos este punto un poco más en detalle. Hoyle y Narlikar argumentan que el comportamiento previsto para G en su teoría conforme de la gravitación y aparentemente observado por van Flandern, se tornan esenciales para una interpretación de la evidencia geofísica. Supongamos que la corteza exterior de nuestro planeta tenga una resistencia infinita. En tal caso la Tierra no podría expandirse pero, al disminuir G , el interior va siendo liberado de la compresión gravitacional y una presión se acumularía en la base de la corteza. La condición de contorno de que el volumen del planeta debería ser constante conduciría a la larga a que dicha presión subcortical se volvería comparable a los valores interiores. Pero la corteza real de modo alguno posee tal rigidez como para soportar fuerzas tan enormes.

En una situación realista la corteza estará bajo tensión y debería inevitablemente fragmentarse para adecuarse a la tasa de crecimiento de la superficie, que se estima en unos 20 millones de km cuadrados por eon. El material que surge desde el manto para llenar los espacios dejados por la corteza fragmentada es materia fluida en sentido ordinario, ya que la parte subcortical del manto está sujeta a intenso calentamiento radioactivo y por lo tanto existe material magnético en cantidades considerables. Dicho fluido puede transmitir la presión desde abajo hacia las capas subcorticales, de suerte que surjan gradientes horizontales de presión. La condición necesaria para que aparezcan dichos gradientes con suficiente intensidad, es que el fluido esté a densidad más baja que las rocas subyacentes. Para fluidos que surgen desde una profundidad de 300 km estima Hoyle que basta solo una diferencia de densidad del uno por ciento para dar origen a presiones del orden de 10^9 dinas/cm² cerca de la superficie, lo que puede ser suficiente para desplazar horizontalmente parte de la corteza.

Llegamos aquí a un escape para las objeciones de Jeffreys a la deriva continental. Según este autor, los supuestos que hiciera sobre la viscosidad del material cortical son muy conservadores, y, aún así, halla que las fuerzas necesarias para desplazar las placas deberían ser tan grandes como para conducirnos a una contradicción con los hechos observados. Hoyle sostiene que la única manera de reconciliar los datos con los cálculos de Jeffreys es admitir que las fuerzas en juego son realmente mucho más grandes de lo que se pensaba y que hasta tanto no se halle una manera de explicarlas dentro del marco de las teorías convencionales, solo el mecanismo basado en última instancia en la lenta disminución secular de la constante de gravitación, parece una salida a este dilema y, si la explicación convencional no existiera, la Teoría Conforme de la Gravitación recibiría un poderoso soporte de parte de las Ciencias de la Tierra.

B I B L I O G R A F I A

- BRANS, C. y DICKE, R.H., 1961, *Mach's principle and a relativistic theory of gravitation*, *Phys. Rev.*, Vol. 124, p. 925.
- CLEMENCE, G.M., 1948, *A.J.*, Vol. 53, p. 169.
- DIRAC, P.A.M., 1973, *Long range forces and broken symetrics*, *Proc. R. Soc. Lond.*, A333, p. 403.
- GRIBBIN, J., 1975, *Status report on the inner planets*, *Nature*, Vol. 254, p. 657.
- HOYLE, F., 1972, *Q.J.R. Astr. Soc.*, Vol. 13, p. 328.
- HOYLE, F., y NARLIKAR, J.V., 1971, *On the nature of mass*, *Nature*, Vol. 233, p. 41.
- HOYLE, F., y NARLIKAR, J.V., 1972, *Cosmological models in a conformally invariant gravitational theory - II a new model*, *M.N.R.A.S.*, Vol. 155, p. 323.
- MORRISON, L., 1972, *The Moon*, Vol. 5, p. 253.
- MORRISON, L., 1973, *Rotation of the earth from AD 1663-1972 and the constancy of G*, *Nature*, Vol. 241, p. 519.
- MULLER, P.M., y STEPHENSON, F.R., 1974, *In growth rhythms and history of the Earth's rotation*, eds. G.D. Rosenberg and S.K. Runcorn, *John Wiley Sons*, London.
- NEWTON, R.P., 1969, *Secular accelerations of the earth and moon*, *Science*, Vol. 166, p. 825.
- OESTERWINTER, C., y COHEN, C.J. 1972, *Celest. Mech.*, Vol. 5, p. 317.
- SERSIC, J.L., 1972, *Periodic Orbits, Stability and Resonances*, p.314, *E.G. Giacaglia*
- SERSIC, J.J., 1972, *Transient annular structures in exploring galaxies*, *IAU Symp. N^o 44*, p. 313.
- SERSIC, J.L., 1973, *On the structure of peculiar galaxies*, *B.A.C.*, 24, N^o 3, p. 150.
- SERSIC, J.L. 1976, *La exploración de Marte*, Ed. Labor, Barcelona.
- SHAPIRO, I.L., SMITH, W.B., ASH, M.E., INGALLS, R.P. and PETTERGILL, G.H., 1971, *Gravitational constant experimental bound on its time variation*, *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 26, p. 27.
- SPENCER-JONES, H., 1932, *M.N.R.A.S.*, Vol. 99, p. 541.
- TOOMRE, A., 1976, *Ap. J. Suppl. in press.*
- TOOMRE y TOOMRE, 1976, *Ap. J. Suppl. in press.*
- VAN FLANDERN, T.C., 1970, *A.J.*, Vol. 75, p. 657.
- VAN FLANDERN, T.C., 1975, *A determination of the rate of change of G*, *M.N.R.A.S.*, Vol. 170, p. 333.
- VINTI, J.P., 1974, *Classical solution of the two-body problem if the gravitational constant diminishes inversely with the age of the universe*, *M.N.R.A.S.*, Vol. 169, p. 417.