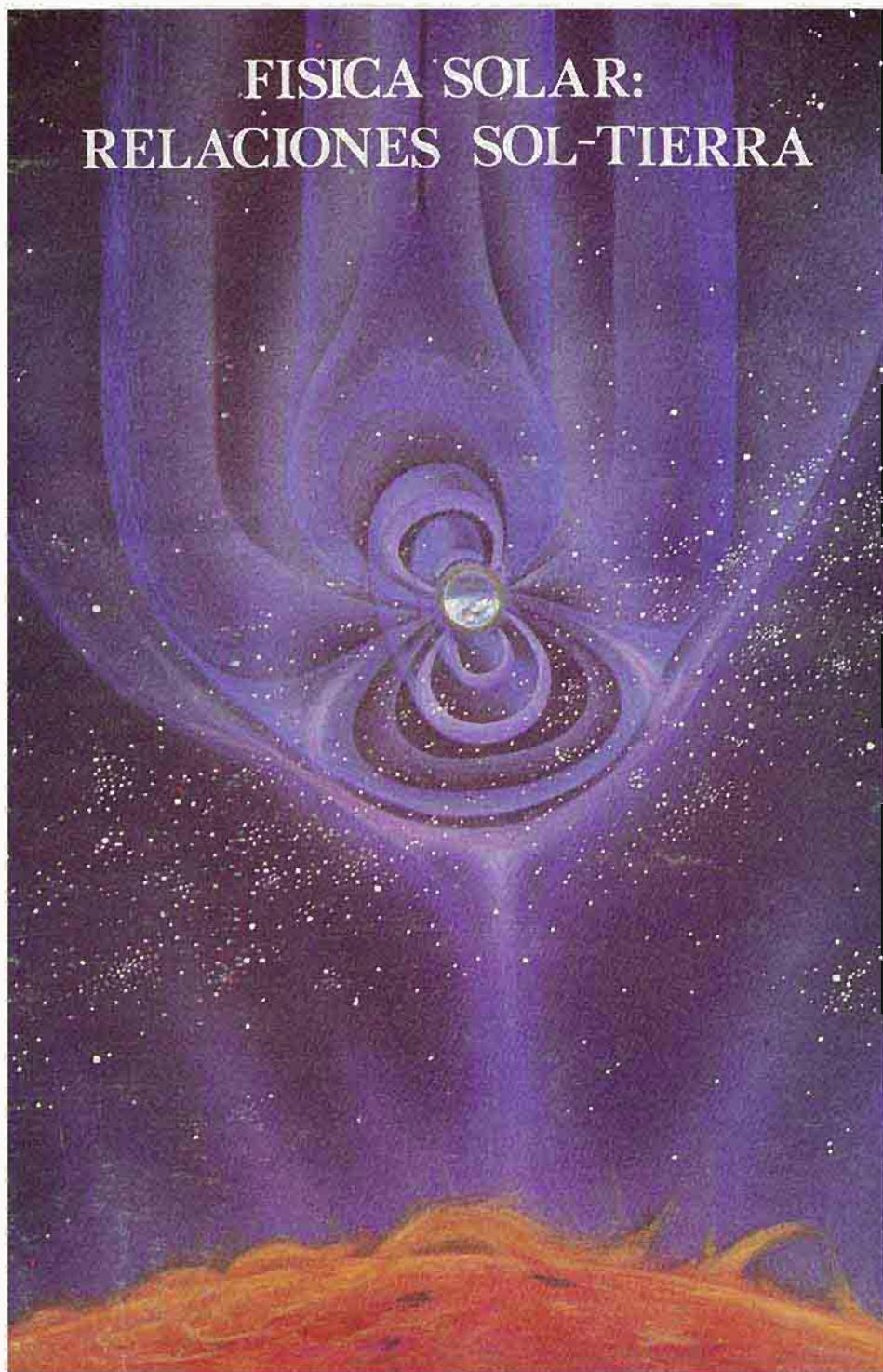


Revista de Ciencias Exactas, Naturales y Aplicadas

elementos

FISICA SOLAR: RELACIONES SOL-TIERRA



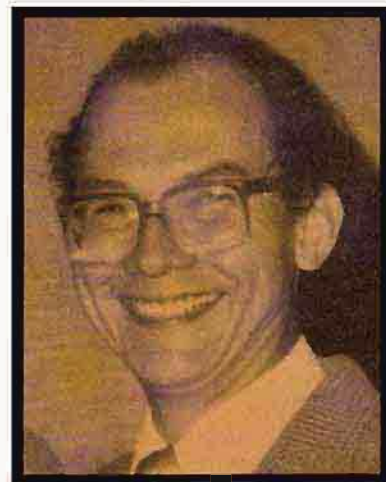
TEORIAS CUANTICAS DE LA GRAVITACION



KLEE: LA PINTURA EN PERPETUO MOVIMIENTO

LA CONCEPTOGRAFIA DE FREGE

EL PROCESO INMUNOLOGICO



JESUS REYES CORONA
(1948-1986)

Revista de Ciencias Exactas, Naturales y Aplicadas elementos

EDITORIAL

ARTICULOS

Teorías cuánticas de la gravitación (las dimensiones ocultas del espacio-tiempo)

Alfonso Martínez de Lizardui

Los hoyos negros, cuerpos celestes ocultos

Nora Eva Bretón Báez

El verdadero héroe: el proceso inmunológico

Ismael Soto López

Física solar, física coronal, las relaciones Sol-Tierra

Jorge Pérez-Peraza

Klee: la pintura en perpetuo movimiento

Sara Lynn Henry

La conceptografía y la lógica formal de Frege

Mauricio Beuchot

PERSONALIDAD CIENTIFICA

Jesús Reyes Corona, *In memoriam*

Mariano Morales

Recordando a Braulio Iriarte Erro

Enrique Chavira, Jorge Pérez-Peraza

OPINION

La dimensión humana del proceso de desarrollo

Abdus Salam

NOTICIAS Y NOVEDADES

- Informe al Buró Político del PCUS sobre Chernobyl.
- Extraversión y neuroticismo en relación con el stress y la excreción de catecolaminas.
- La salud, tarea de la educación.
- Sobre el uso del lenguaje: *Pattern*.
- ¿Existe una quinta fuerza fundamental?
- Caos óptico en sistemas pasivos.
- Computación óptica.

AUTORES Y COLABORADORES

CORRESPONDENCIA

2

REVISTA TRIMESTRAL

No. 9 • Año 2 • Vol. 2

OCTUBRE-DICIEMBRE DE 1986

3

18

24

39

68

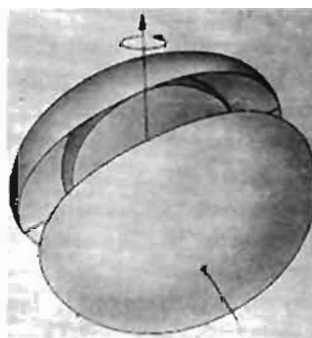
70

76

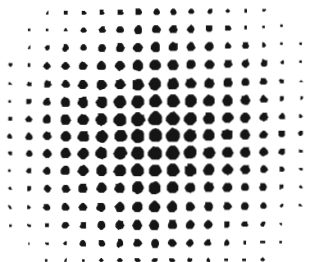
77

79

84



El análisis de la materia en los límites macroscópico y microscópico abarca dos escalas tan impresionantemente distintas que han tenido que ser revisados y puestos al día los propios fundamentos de la física. . . p. 3.



Jesús Reyes Corona hizo un llamado para hacer de *Elementos* una revista que contribuyera a la democratización del saber. . . p. 2, p. 76.



EDITORIAL

Sentir la desaparición de una persona a la cual hemos tratado es una experiencia siempre triste, pero cuando esto sucede en circunstancias inesperadas, incomprensibles y, más aún, cuando la víctima de esta contingencia es un ser que se ha empeñado en la tenacidad y la creatividad del trabajo científico combinado a una capacidad de colaboración, apoyo y amistad para con sus compañeros y alumnos, entonces, la muerte aparece ante nosotros en forma cruel y tajante; es como si la muerte asaltara a la razón y a la vida.

Jesús Reyes, cofundador y miembro del consejo editorial de *Elementos*, no está ya físicamente con nosotros, sin embargo muchas cosas de él, aún antes de su deceso, se han incorporado a nuestro sistema de ideas o nuestra forma de ver el mundo, he ahí al menos uno de los modos por los que un ser puede trascender.

En ocasión de la presentación de esta revista en el auditorio "Albert Einstein" de la Escuela de Fisicomatemáticas de la UAP, Jesús fue uno de los oradores de aquél día, decía entre otras cosas a los estudiantes y profesores ahí reunidos, que la ciencia no puede pensarse como una cosa muerta, ya hecha, tal que los libros de texto puedan contenerla ahí, estática, sino que al contrario, habría que ver a la ciencia como llena de vida, palpitante y que de ahí la necesidad de editar revistas que puedan reflejar este estado de

crecimiento y desarrollo, recalcando que el estudiante no puede y no debe conformarse con sus lecturas de curso, estando consciente Jesús de que la situación actual deja mucho que desear al respecto.

Recuerdo también que cuando *Elementos* celebró su 1er. aniversario, él se encargó de comentar las experiencias del primer año de vida, o mejor, del significado de un primer año de existencia. Hablaba acerca de que nuestra universidad había demostrado a mucha gente y a nosotros mismos, que en México se podía hacer ciencia al mejor nivel mundial, que somos capaces de hacerlo y se está haciendo ya, que ahora esta capacidad quedaba extendida al campo de su difusión, que *Elementos* es la prueba y la muestra, de que también podemos hacer revistas de la mejor calidad.

En estas palabras se encuentra lo valioso de Jesús y de otros colegas suyos, que (a pesar del Estado, de la derecha, de sectores que no quisieron apoyar a la UAP y sí se preocuparon por entorpecer y en lo posible detener su avance en la creación de cuadros investigadores calificados) supieron soportar condiciones adversas y deprimentes para realizar investigación de altura, hasta conformar un grupo serio, de calidad y rigurosidad de investigación física.

Jesús Reyes, con su vida, ha nacido a la historia de nuestra universidad y sigue estando en cada uno de los que lo conocimos.

Jesús Mendoza Alvarez

TEORIAS CUANTICAS DE LA GRAVITACION

(Las dimensiones ocultas del espacio-tiempo)

Alfonso Martínez de Lizardui*

1. Introducción

El impresionante campo de observación que abarca hoy día la ciencia mediante las tecnologías de punta, tanto en radioastronomía como en aceleradores de partículas ha hecho que, en el breve lapso de unas décadas, el análisis de la materia en los límites macroscópico y microscópico abarque dos escalas tan impresionantemente distantes que han tenido que ser revisados y puestos al día los propios fundamentos de la física.

Sin embargo, desde los $2 \cdot 10^5$ años luz (dimensiones características de las grandes galaxias) hasta los 10^{-33} cm (longitud de Planck), la física moderna ha sido capaz de elevar un edificio teórico que hace comprensibles estos fenómenos de escalas tan astronómicamente diferentes de tal forma que, hoy en día, cualquier fenómeno de la naturaleza puede ser descrito en función de cuatro fuerzas fundamentales: las fuerzas nucleares fuerte, débil, electromagnética y gravitatoria.¹

* Departamento de Lógica y Teoría de la Ciencia de la Universidad del País Vasco, San Sebastián.

¹ Estando este artículo en espera de ser publicado, se ha producido un importante hallazgo: la quinta fuerza elemental. Esta quinta fuerza tendría un carácter básicamente gravitatorio. En espera de información más amplia y detallada, consideraremos el desarrollo del trabajo actual sobre la base de cuatro fuerzas fundamentales. En caso de confirmarse el hallazgo de la quinta fuerza, la tesis fundamental aquí desarrollada sólo se vería modificada cuantitativamente, no así cualitativamente.



Las fuerzas nucleares fuerte y débil son de corto alcance y disminuyen rápidamente con la distancia. Son las fuerzas que gobiernan el mundo de los núcleos atómicos y de las partículas elementales. A distancias superiores al diámetro de un núcleo, dichas fuerzas desaparecen prácticamente. El mundo en que actúan este tipo de fuerzas es tan pequeño, que para su descripción se hace necesaria la física cuántica. Es un mundo gobernado por las relaciones de incertidumbre de Heisenberg, un mundo totalmente alejado de la experiencia cotidiana.

El campo que controla la fuerza electromagnética es una zona de transición. En esta zona se dan una gama variada de fenómenos, dentro de los cuales las reacciones químicas adquieren estatuto relevante. Más aún, la fuerza electromagnética parece ser la única capaz de producir cuerpos compuestos suficientemente complejos como para que surja la vida tal como la conocemos en nuestra experiencia cotidiana. Por ello se ha llegado a definir la vida como energía electromagnética organizada. La importancia crucial que adquiere esta fuerza para la comprensión de la naturaleza que nos rodea comienza a perder relevancia a medida que aumentamos la escala espacial y nos dirigimos a las distancias interestelares a intergalácticas.

A escala macroscópica, la única fuerza que se mantiene en todo su esplendor es la fuerza gravitatoria; ella es la que gobierna la estructura del universo astronómico, la formación de los planetas, estrellas, galaxias, cúmulos de galaxias. . . Los fenómenos a esta escala están regidos por las leyes relativistas y, más concretamente, por la relatividad general.

En la mecánica newtoniana se postula que los cuerpos materiales actúan entre sí dentro de un marco preestablecido sobre el cual no pueden ejercer ninguna acción causal. Es decir, el recipiente es inde-

pendiente del contenido. Este recipiente se define para Newton por medio de un espacio y un tiempo absolutos, sin los cuales no puede existir ninguna medida, ni, por tanto, la propia física.

Einstein, en la teoría de la relatividad, eleva ambos conceptos (espacio y tiempo) a la categoría de interdependientes y, posteriormente, concede a dicho sistema de referencia espacio-temporal el estatuto de única realidad física existente; y esta nueva realidad deja de ser un marco inerte, para convertirse en actor de la interpretación relativista de la naturaleza. Así, el continuo espacio-tiempo se define mediante una métrica correspondiente a una variedad riemanniana de cuarto orden (V_4), estando en todo momento definido cualquier punto (suceso) de ella mediante las coordenadas (x, y, z, ict) .

En la relatividad especial (válida en ausencia de campos gravitacionales), la expresión

$$s^2 = (t_1 - t_2)^2 - \{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2\} / c^2 \quad [1]$$

donde

$$(x_1, y_1, z_1, ict_1) \text{ y } (x_2, y_2, z_2, ict_2)$$

son coordenadas de dos sucesos determinados por un mismo observador inercial, es independiente del observador.

Si los acontecimientos son suficientemente próximos, la expresión anterior se podrá expresar mediante

$$ds^2 = dt^2 - \frac{dx^2 + dy^2 + dz^2}{c^2} \quad [2]$$

Este esquema puede ser ampliado observando que, en ausencia de campos gravitatorios, sería posible para un observador animado de un movimiento arbitrario escoger cuatro coordenadas generales $(x^0, x^1,$

$x^2, x^3)$ relacionadas con (t, x, y, z) .

El intervalo en este caso sería

$$ds^2 = \sum_{\mu=0}^3 \sum_{\nu=0}^3 g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu \quad [3]$$

en donde $g_{\mu\nu}$ son diez funciones de las cuatro coordenadas.

La relatividad general afirma que [3] es siempre válida; y que no es posible encontrar coordenadas (t, x, y, z) que reduzcan [3] a [2] para todos los pares de acontecimientos cercanos. Sin embargo, es posible encontrar una pequeña región del espacio-tiempo en que dicha reducción sea posible.

La geometría basada en [3] es la geometría riemanniana citada con anterioridad. En ella, la forma funcional $g_{\mu\nu}$ contiene información sobre la presencia y distribución de los campos gravitatorios, pero también contiene información sobre el sistema de coordenadas elegido.

La relatividad general incorpora pues el axioma de la equivalencia de los sistemas inerciales, pero lo amplía hasta el grado de que cualquier observador (sea cual fuere su estado de movimiento) puede utilizarlo para establecer coordenadas. Por tanto, [2] queda modificado en [3], sin embargo, [1] es inaceptable ya que, se sabe, la geometría euclidiana no es válida para grandes regiones. La expresión [3] nos conduce al concepto de geodésica como la mínima distancia entre dos puntos. Las partículas en ausencia de campos electromagnéticos pero en presencia de campos gravitatorios conformarán la geodésica $ds^2 > 0$ y los rayos luminosos la geodésica $ds = 0$.

El problema de la restricción de g en el espacio fue un motivo de preocupación para Einstein, encontrando que dentro de la geometría riemanniana la expresión más sencilla que podía aparecer en las ecuaciones para el campo gravitacional era el llamado tensor de

Ricci: $R_{\mu\nu}$. En consecuencia, Einstein eligió como ley de la gravitación en el espacio vacío a

$$R_{\mu\nu} = 0 \quad [4]$$

La ley de la gravitación para el espacio lleno de materia en el que sería necesario una ecuación análoga a la de Poisson se consigue con las célebres ecuaciones de campo:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = -\kappa T_{\mu\nu} \quad [5]$$

En este conjunto de diez ecuaciones, el lado izquierdo lo conforma el tensor geométrico. En el lado derecho, el tensor contiene la densidad, cantidad de movimiento, energía y presión de la materia siendo

$$\kappa = \frac{8\pi G}{c^2}$$

En este sentido, la materia sigue siendo parte activa en la teoría de la relatividad generalizada, pero junto al espacio-tiempo, que ha adquirido el mismo estatus ontológico como puede observarse en las ecuaciones de campo einstenianas.

Según ellas, la energía y cantidad de movimiento de la materia queda determinada por la variedad, de tal manera que estas propiedades aparecerán descritas como irregularidades locales del continuo espacio-temporal. La materia vendrá definida por zonas de gran curvatura del continuo no-euclidiano.

Si consideramos el cosmos con una curvatura media en un momento dado, a escala planetaria (es decir, en una porción muy limitada de dicho continuo) dicha curvatura podrá despreciarse, pudiendo prescindirse de ella; con más razón aún, si trabajamos a escala atómica o subatómica.

Sin embargo, si la materia según la relatividad general está asociada a la deformación espacio-temporal del continuo V_4 , la geometría espacio-temporal a nivel atómico tiene también que estar deformada y, por tanto, no puede ser euclídea.

Esta contradicción ha perseguido desde su nacimiento a la teoría de la relatividad y la única solución posible es la de extender la geometrización relativista del macrocosmos al microcosmos. De este punto parten los intentos de construir una teoría de campo unificado desde Einstein hasta Kaluza, pasando por Weyl, Eddington o Schrodinger. Aunque en la época de Einstein la unificación abarcaba sólo los campos electromagnético y gravitatorio, hoy en día, cualquier perspectiva de unificación habrá de tener en cuenta las cuatro fuerzas elementales.

Desde las escalas de longitudes más pequeñas a las más grandes en que hoy trabaja la física experimental, existe una graduación de fuerzas y distancias que inciden fundamentalmente en dichas escalas. La jerarquización de magnitudes proporciona un esquema como el que a continuación se adjunta.

La relatividad especial, la relatividad general y la mecánica cuántica son tres teorías caracterizadas por sendas constantes fundamentales: la velocidad de la luz (c), la constante de la gravitación (G) y la constante de Planck (h). Existe una única manera de construir una longitud y un tiempo mediante estas tres constantes:

$$\text{longitud: } \left(\frac{G h}{c^3}\right)^{1/2} \approx 2 \times 10^{-33} \text{ cm,}$$

$$\text{tiempo: } \left(\frac{G h}{c^5}\right)^{1/2} \approx 9 \times 10^{-42} \text{ seg.}$$

Estas magnitudes son las más pequeñas que con significado físico se utilizan en el mundo científico. Son los cuantos de espacio y de tiempo, denominados longitud y tiempo de Planck.

La física experimental hoy día no puede alcanzar dichas escalas. La longitud de Planck es 100 trillones de veces menor que la del radio del neutrón. Para sondear experimentalmente estas magnitudes, necesitaríamos generadores de partículas de altísimas energías.

Sin embargo, adonde no llega la física experimental, llega la física teórica y es por este camino por donde hoy día se conducen la mayor parte de los esfuerzos en la búsqueda de la teoría del campo unificado.

Existen fuertes intuiciones de que los fenómenos a distancias muy pequeñas por debajo del diámetro del núcleo atómico, estén gobernados por la gravitación. Y el intento de analizar la gravitación a esta escala de Planck nos lleva a tener que utilizar la mecánica cuántica, surgiendo con ello una nueva y potente rama de la física: la gravitación cuántica.

2. La teoría cuántica de campos

De las cuatro fuerzas fundamentales que en la actualidad el físico acepta como origen de todas las interrelaciones y fenómenos que se dan en la naturaleza, la primera en surgir históricamente fue la gra-

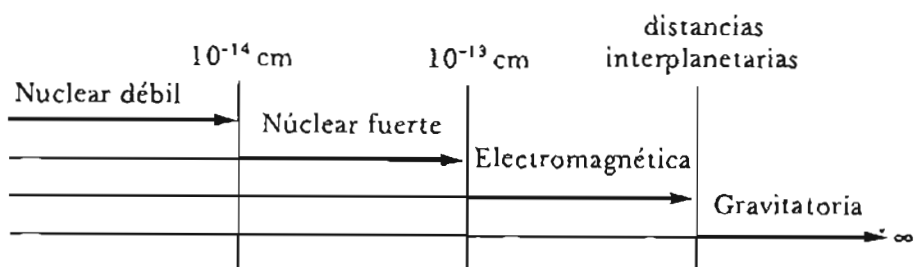


Figura 1: Alcances de las fuerzas fundamentales de la naturaleza. Denominamos alcance a la distancia más allá de la cual la interacción pierde su eficacia operativa.

vitación, de manos de Newton. Esta era la fuerza que regulaba la relación entre partículas materiales. La materia (el corpúsculo material) sería la única realidad existente en un marco espacial y temporal preestablecidos.

En la década de 1850, Maxwell, matematizando el trabajo de Faraday, dará lugar a una teoría física independiente de la gravitación, en la cual electricidad y magnetismo aparecerán como dos aspectos diferentes de un único fenómeno, el campo electromagnético. Si la

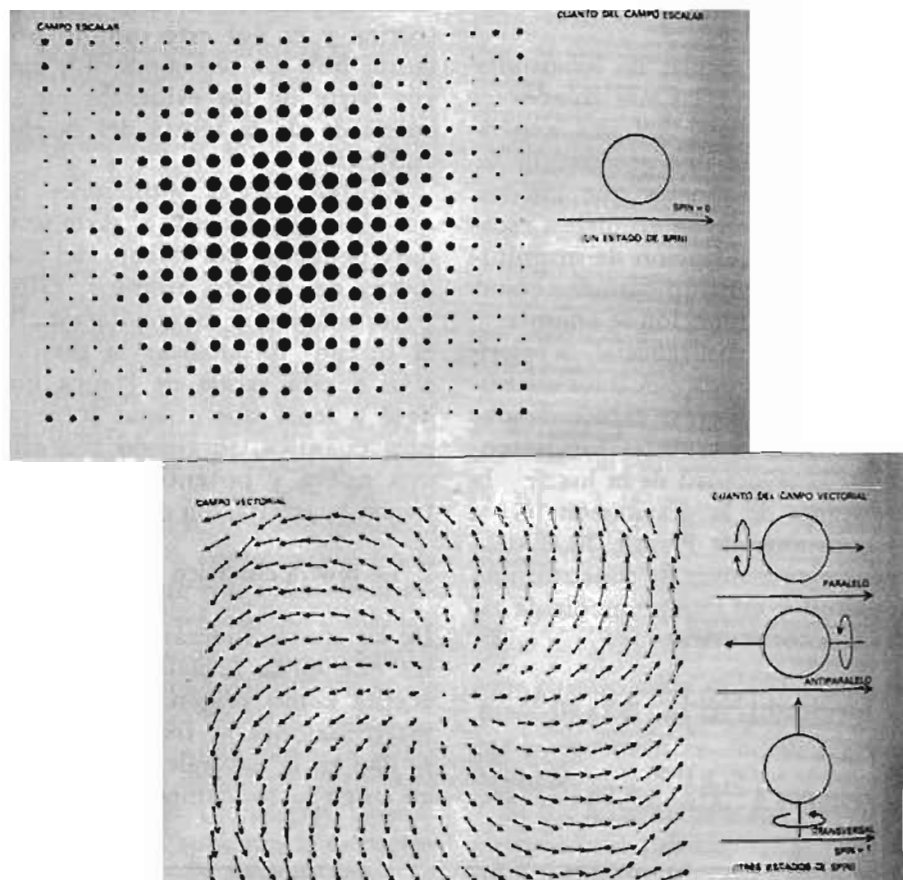
metafísica newtoniana introduce la partícula material en el marco espacio-temporal, la matematización maxwelliana la enriquece con el concepto de campo. A partir de este momento, toda la ciencia se verá inmersa en una dualidad corpuscular-ondulatoria que alcanzará hasta nuestros días y cuyo profundo carácter nos será revelado por la mecánica cuántica.

Einstein pretenderá superar la contradicción corpuscular-ondulatoria en que se debate la nueva visión científica de la naturaleza y

acometerá con ímprobo esfuerzo la teoría de unificación de ambos campos. Será derrotado. Realmente, parece como si la naturaleza en su elementalidad fuera dual y no monista. Sin embargo, la fascinación que sobre los científicos (físicos y matemáticos fundamentalmente) ha ejercido la idea de poder explicar el universo en base a una única fuerza, ha impulsado a nuestra sociedad a los mayores gastos y esfuerzos (plurinacionales inclusive) que jamás haya conocido la historia de la ciencia. Los gigantes aceleradores de partículas son fieles testigos de esta singular empresa.²

El camino realizado en este sentido es realmente muy importante y el primer paso trascendental se dio a finales de los años cuarenta. Por aquellas fechas, la física se apuntó un tanto de vital importancia al aplicar la mecánica cuántica a los campos electromagnéticos. De este matrimonio, surgió la electrodinámica cuántica que, si en algo ha destacado es en su tremenda exactitud así como detallado poder de predicción.

Animados por este éxito, se emprendió con apasionado interés la cuantización de las otras tres fuerzas de la naturaleza. Sin embargo, enseguida cundió el desánimo. Las fuerzas nuclear fuerte y nuclear débil no eran aún correctamente entendidas, la teoría de los quark (cromodinámica cuántica) aún no estaba establecida y la gravitación una vez más se rebeló obstinadamente a la cuantización. Hace 15



El concepto de campo, una cantidad definida en cada punto de una cierta región del espacio y del tiempo, es importante en la construcción de las teorías gauge. Un campo escalar tiene una sola magnitud en cada punto. En este ejemplo la magnitud viene dada por el área de los puntos. Un campo vectorial posee magnitud y dirección; se ilustra dibujando una flecha en cada punto. Un campo escalar representa cantidades como la temperatura o la densidad de un fluido, en tanto que un campo vectorial representa su velocidad. En teorías cuánticas de campos, el influjo de un campo puede incorporarse mediante una partícula virtual. El número de componentes de un campo viene reflejado en el número de orientaciones distintas de la partícula, que a su vez depende de su momento angular de *spin*. Un campo escalar tiene una sola componente (su valor se puede dar con un solo número) y se representa por una partícula de *spin* cero con un único estado de *spin*. Un campo vectorial en el espacio tridimensional tiene tres componentes. (Tomado de la revista *Investigación y Ciencia* núm. 47).

² Entre los aceleradores de partículas más potentes, tenemos actualmente el Fermilab, acelerador de protones que puede llegar a una energía de 1000 GeV. El UNK de la URSS que entrará en funcionamiento hacia 1990 y que puede alcanzar la tremenda energía de 3000 GeV. En estas fechas aproximadamente, se pondrá en marcha el nuevo Fermilab de 5000 GeV. Y, a nivel de diseño, existe el VBA (Very Big Accelerator) acelerador de protones de 20 000 GeV, que exigirá el concurso plurinacional y no tiene fecha fijada para su entrada en funcionamiento; su tamaño será tan descomunal que habrá que construirlo en pleno desierto.

años, pues, la situación era la siguiente: existían 4 teorías diferentes para explicar cada una de las cuatro fuerzas fundamentales actuantes en la naturaleza, y de dichas cuatro teorías, una sólo (la electrodinámica cuántica) funcionaba bien desde el punto de vista del método científico.

En la mente de los investigadores rondaba persistentemente una pregunta: ¿cuáles eran las características estructurales de la teoría del campo electromagnético carentes en los otros tres campos, que permitían que aquél se ajustase con tanta precisión a su descripción cuántica? En caso de poder deslindar estos factores estructurales, podrían ser (debidamente modificados) integrados en los otros tres campos, logrando de esta forma una teoría de campo unificado.

3. Las simetrías gauge

Desde los albores de la civilización, la influencia que sobre el pensamiento y la religión han tenido las formas simétricas es un hecho de sobra conocido. Sin embargo, el concepto de simetría es mucho más profundo, ya que no todo son simetrías formales. Existe un campo apasionante y sin explorar que es el de las simetrías abstractas. Este ha sido el filón de la física moderna, hasta el punto tal, que los físicos creen hoy en día que las fuerzas (las cuatro fuerzas) fundamentales sólo existen en la naturaleza para que ésta pueda mantener un conjunto de simetrías abstractas que serían inherentes a la estructura más íntima de ella.

Esta íntima conexión entre simetría geométrica y física, ya era conocida a través de las leyes de conservación. Recordemos que las leyes de conservación nos indican que algo (un valor, una relación, etc.) permanece invariante en el tiempo. Las simetrías más conocidas tales como las rotaciones y reflexiones son de interés y fáciles de visualizar; sin embargo, en ellas

no se agotan las variedades de simetrías que presenta la naturaleza.

A veces, es posible descubrir nuevos tipos de simetrías al analizar las descripciones matemáticas de un sistema físico. Un caso del mayor interés fue el de las ecuaciones de Maxwell del campo electromagnético. Maxwell observó cómo, en sus ecuaciones del campo, los componentes eléctricos y magnéticos no eran del todo simétricos. Influido por una profunda intuición estética, incluyó un nuevo término con objeto de lograr la simetría deseada. Este nuevo término resultó ser la generación de un campo magnético por un campo eléctrico variable, efecto que pudo ser detectado experimentalmente.

Sin embargo, se necesitaron más de 50 años para poder apreciar todas las implicaciones subyacentes a las simetrías de las ecuaciones de Maxwell. Tras un análisis detallado de éstas por parte de Lorentz y Poincaré, descubrieron con sorpresa que dichas ecuaciones eran simétricas bajo una operación de unión del espacio y el tiempo. Si a las tres dimensiones espaciales les unimos la temporal, formando un espacio-tiempo de cuatro dimensiones, la simetría de Lorentz-Poincaré es una rotación en el espacio-tiempo. Es decir, existe una profunda interrelación entre el electromagnetismo y el espacio-tiempo; dependiendo del movimiento del observador los valores medidos de distancias o tiempos. Elevando este fenómeno, tan opuesto a la experiencia cotidiana, a la categoría de real, Einstein inauguró una nueva era, la era relativista.

Esta pequeña excursión a través de la historia de la ciencia nos permite observar la importancia capital de las simetrías matemáticas cara al descubrimiento de potentes principios de la naturaleza.

Uno de los problemas de mayor calibre con el que se han enfrentado los físicos en sus investigacio-

nes, es el de los valores infinitos que adoptan algunas magnitudes de la física y que aparecen inevitablemente en el desarrollo de sus ecuaciones en la teoría cuántica de campos. Ante esta situación, los teóricos deben elegir entre abandonar el modelo utilizado (lo que equivaldría a comenzar de nuevo de la nada), o encontrar una salida con objeto de superar el obstáculo. El físico, con objeto de poder seguir calculando, lo que hace es "renormalizar" el punto cero de la escala utilizada para medir la cantidad infinita. Mediante este truco matemático, la teoría se libera de los valores infinitos que amenazan con reducir cualquier teoría al absurdo.

La electrodinámica cuántica es una teoría renormalizable. Sin embargo, una vez más, al intentar la renormalización de las otras tres fuerzas de la naturaleza, se observó con extrañeza que éstas no poseían dicha propiedad. Era pues necesario investigar el origen de los éxitos de la electrodinámica cuántica y entresacar de su estructura a todas las demás.

Pronto se comenzó a investigar el problema de la simetría, convencidos de que ése era el terreno en que se debatía la estabilidad o inestabilidad de las teorías. Más concretamente, se comenzó a trabajar con unas simetrías que podrían ser las responsables de las cuatro fuerzas fundamentales: las simetrías "gauge".

Las simetrías de gauge están íntimamente relacionadas con el fenómeno de la renormalización. Las transformaciones de gauge corresponden a "rotaciones" en espacios internos (isospín, color, etc.). Un sistema o una teoría poseerán una simetría gauge si la naturaleza física del sistema es invariante bajo una transformación de este tipo.

Es posible efectuar una misma transformación en toda la región bajo análisis. En dicho caso, estamos ante lo que se llama una trans-

formación global gauge. Si la transformación varía de un lugar a otro, nos encontramos ante transformaciones locales gauge.

Examinemos de nuevo la naturaleza y analicemos ese fenómeno misterioso y controvertido que es la gravitación. La física dentro de un laboratorio que se mueve en línea recta por el espacio sin la acción de fuerzas exteriores es diferente de la física en ese mismo laboratorio moviéndose a través del espacio en una trayectoria curva (acelerada por tanto). Sin embargo, es posible pasar del segundo caso al primero mediante la acción de un campo exterior, más concretamente de un campo gravitatorio. La trayectoria de una nave espacial a lo largo de la órbita de un planeta es igual que la de un laboratorio moviéndose en línea recta a través del espacio vacío, y la razón es simple, los objetos que la trayectoria curva produce sobre la nave son contrarrestados por la gravedad. La gravedad es pues "un

campo compensador" que resta-blece la desviación de un sistema respecto de la línea recta.

En este sentido, con la introducción de un campo gravitatorio suficientemente complejo, sería posible conseguir leyes físicas simétricas incluso para transformaciones locales de estimación. El campo gravitatorio sería pues el modo en que la naturaleza se conduce para mantener una simetría de gauge local, simetría que, en este caso, consistiría en la invariabilidad de las leyes físicas bajo cambios arbitrarios de la trayectoria de un movimiento.

Si analizamos la gravedad desde este punto de vista, podríamos definirla como una *manifestación de una simetría abstracta subyacente en la naturaleza*.

Desde este punto de vista, por tanto, las cuatro fuerzas que rigen los destinos del universo no serían más que el resultado de los campos que se ve obligada a introducir la

naturaleza, con objeto de compensar unas simetrías gauge locales, que se situarían en la estructura más íntima de ésta. Los campos de fuerza serían el modo que tiene la naturaleza de imponer simetrías de gauge locales en el universo.

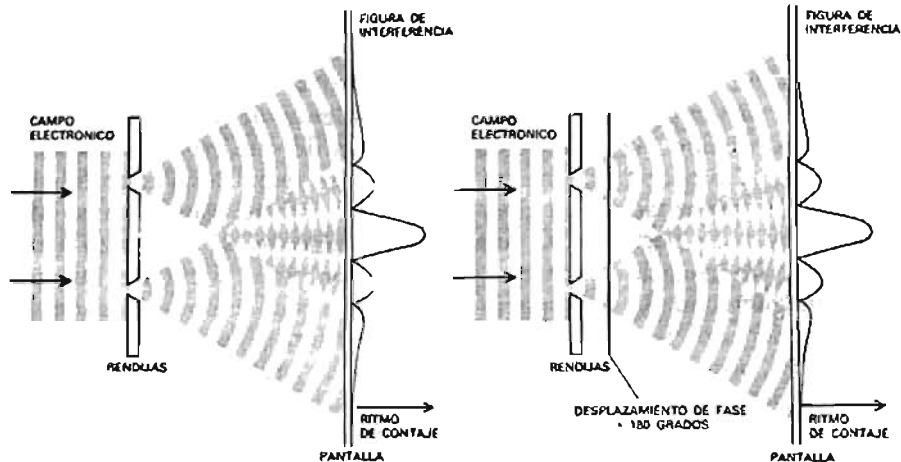
Reexaminando, así, las construcciones físicas más generales, vemos que el campo electromagnético no es más que la manifestación de la simetría gauge más simple acorde con los principios de la relatividad especial. La transformación de gauge en este caso corresponde a cambios en la fase de las funciones de onda de las partículas.

Un problema de gran alcance es el de la constatación de que el problema de la renormalización y el de las simetrías gauges están profundamente interconectados. El aparentemente milagroso funcionamiento de la electrodinámica cuántica y su capacidad de renormalización en definitiva, no se basa más que en la extrema simplicidad de la simetría estructural del campo electromagnético.

4. El descubrimiento de la fuerza electrodébil

Basados en esta línea de investigación, Weinberg y Salam en la década de los 70 se sumergieron en el análisis de dos fuerzas de la naturaleza: la electromagnética y la nuclear débil. El problema se centraba en descubrir una simetría gauge suficientemente compleja para que generara un campo electrodébil (anterior al electromagnético y al débil), demostrando de esta forma que estas dos fuerzas no son de hecho más que aspectos de una única fuerza más elemental.

Para ello, se planteó en primer lugar la descripción de la fuerza débil en términos de un campo gauge. Considerando al electrón y su neutrino, los cuales pertenecen a la familia de los leptones y son sensibles a la fuerza débil, Weinberg y Salam introdujeron la "simetría isotópica del spin" en el



Simetría gauge del electromagnetismo. Se trata de una invariancia con relación a los desplazamientos de fase del campo de materia que representa el electrón. La fase en sí no puede medirse, pero deja sentir su destacada influencia sobre cantidades observables tales como la figura de interferencia que se forma cuando las ondas de un campo electrónico atraviesan un par de rendijas. Los picos de esta figura se encuentran siempre que las ondas están en fase, y los nodos surgen cuando están en oposición de fase. Un desplazamiento de la fase altera totalmente la configuración del campo, pero sin cambiar la figura de interferencia observable. La simetría es exacta, por lo que el desplazamiento de fase no puede detectarse. De ahí que sea pura cuestión convencional la elección de la fase en cualquier descripción teórica del campo. En ausencia de fuerzas (o interacciones) que actúen sobre electrones, sin embargo, la simetría será global: la figura observada será invariante sólo si el mismo desplazamiento de fase se realiza por doquier. (Tomado de la revista *Investigación y Ciencia* núm. 47).

reino de la interacción débil. Con esta simetría de mezcla de identidades, imaginamos la conversión de electrones en neutrinos y viceversa mediante el giro de un mando ficticio. Esta simetría es una simetría global, que, al traspasarla a local, nos hace necesario generar unos campos de fuerza necesarios para compensar el cambio de escala puntuales. Estos campos serían los que nos describen la fuerza débil. El número de campos necesarios para mantenerla es de tres, lo cual nos indicaba ya que la simetría subyacente al campo débil es mucho más compleja que el de la electromagnética. Al describir cuánticamente estos tres campos necesitamos asociarles tres tipos de partículas mensajeras (responsables de las interacciones) una para cada campo. Estas partículas teóricas recibieron los nombres de W^+ , W^- y Z .

Sin embargo, existe un problema intrigante. Los campos gauge son de largo alcance, lo que implica que sus partículas asociadas han de carecer de masa (caso del fotón para el campo electromagnético). Sin embargo, la teoría asigna a las partículas W y Z del campo débil unas masas grandes, desvaneciendo pues la simetría gauge.

La superación de esta dificultad ha sido posible gracias al mecanismo llamado "interrupción espontánea de la simetría". Supongamos, con objeto de representarlo más gráficamente, una superficie en forma de sombrero mexicano y una bola en la copa de dicho sombrero. En esta situación, la configuración del sistema es simétrica, pero inestable (sometida a fuerzas gravitacionales). La bola a la más mínima desviación de su posición de equilibrio resbala y se desliza por la pendiente hasta estabilizar su posición en el ala del sombrero. En esta situación, la simetría se ha transformado en estabilidad. En esta configuración estable, la simetría rotacional subyacente de la fuerza gravitacional sigue existien-

do, pero está oculta, y el estado real del sistema no refleja la simetría de las fuerzas que la controlan.

En el caso de la fuerza débil, la simetría gauge subyace a los campos, pero éstos no pueden existir en un estado que refleje esa simetría, ya que dicho estado es inestable. Es por ello que el campo se hunde en un estado estable que destruye la simetría dotando de masa a las partículas asociadas.

Después de simetrizar el campo débil, el siguiente paso a dar es el de combinar el electromagnetismo y la fuerza débil en una sola teoría: la fuerza electrodébil. Para ello, es necesario una simetría gauge más compleja, que incorpore las dos simetrías inherentes a los campos electromagnético y débil.

Desde este punto de vista, por tanto, en la fuerza electrodébil existirán cuatro campos, el electromagnético y los tres asociados a la fuerza débil. La estructura subyacente a ambas fuerzas es en realidad muy parecida. Ambas son campos gauge. Y las diferencias físicas observadas entre ellas son debidas al efecto de interrupción de simetría. En este sentido, se puede afirmar que la simetría de la fuerza débil no la observamos ya que está oculta tras la interrupción de la simetría.

El análisis de esta teoría unificada fue refrendado con el más clamoroso éxito en dos pasos sucesivos. En 1971, tras un análisis riguroso y exhaustivo mediante ordenador, se examinaron todos los diagramas de interacciones posibles dentro del marco de la teoría y se vio cómo todos los infinitos propios en este tipo de teorías desaparecían. La teoría era pues *renormalizable* igual que la exitosa electrodinámica cuántica y, sin lugar a dudas, el hecho de tamaño éxito hay que buscarlo en el elevado grado de simetría de la teoría. La segunda prueba incontestable llegó en 1983, con la detección experimental de las partículas W y Z en el acelerador de partículas

subatómicas de Ginebra.³ Desde este momento histórico para la ciencia, el número de fuerzas elementales en la naturaleza fue reducido a tres.

5. En busca de la gran unificación: las GTU

Los brillantes resultados dados por las simetrías gauge cara a la unificación de dos fuerzas elementales empuja definitivamente a la física actual a tratar de unificar la fuerza fuerte con la electrodébil en base a la obtención de una potente simetría subyacente a ambos campos. Para ello, se dan dos pasos. El primero de ellos es el de asociar a la fuerza fuerte una estructura de campo gauge. Para esto, se parte de que los hadrones (partículas interactuantes con los campos fuertes) están formados por unidades elementales llamadas quark.

Cada quark posee un equivalente de carga eléctrica que actúa como la fuente del campo. A dicha carga se le da el nombre de "color". El campo electromagnético se genera solamente por una carga, pero el campo del gluón (partícula mensajera que viaja entre los quark) es más complejo y requiere tres cargas de distinto color. Cada quark en definitiva puede presentarse en tres colores arbitrariamente elegidos: rojo, verde y azul.

La simetría gauge local asociada al campo fuerte, sería la invariabilidad del sistema bajo variaciones independientes de color de cada punto del espacio. Al aparecer tres colores, la simetría es más compleja, y esta complejidad se reflejará en el mayor número de campos de fuerza necesarios para mantener la simetría local. Concretamente, se

³ Un equipo internacional del CERN, dirigido por Carlo Rubbia, diseñó los experimentos que en 1983 detectaron los bosones W y la partícula Z . Por su participación en los experimentos, diseño y construcción del colisionador protón-antiprotón, así como del detector, Carlo Rubbia y Simon Van der Meer recibieron el premio Nobel de Física de 1984.

necesitarán 8 nuevos campos de fuerza con sus respectivas partículas asociadas (ocho gluones). Compararemos estas ocho partículas necesarias con las tres (W^+ , W^- , Z) del campo electrodébil o la única (fotón) del campo electromagnético.

En un protón (hadrón) por ejemplo, sus tres quark internos intercambian entre sí continuamente gluones, cambiando por ello sus colores, pero siempre la suma de los tres colores debe ser rojo+azul+verde. Dicho en una forma más gráfica, podríamos decir que la acción de los campos de gluones compensan los cambios internos de color de los quark con objeto de mantener el color blanco (verde+azul+rojo) del hadrón.

Sobre esta base de simetría gauge se ha edificado una importante rama de la física: la *cromodinámica cuántica* (CDC). Desde el punto de vista de la CDC, la fuerza fuerte no es más que la insistencia de la naturaleza por mantener una simetría abstracta.

Con el afianzamiento de la CDC, tanto las fuerzas electromagnética, nuclear débil como nuclear fuerte, poseen una descripción en términos de campo gauge. Más aún, dos de ellas (la electromagnética y la débil) están unificadas mediante una simetría gauge más potente que implica la existencia de 1+3 campos. ¿Es posible en esta situación encontrar una simetría lo suficientemente compleja como para definir en función de ella dichas tres fuerzas?

El problema de encontrar esta gran teoría unificada (GTU) es un problema fundamentalmente matemático, y este problema no es de solución única, de ahí la aparición de un buen número de teorías rivales. En todas ellas, de cualquier forma, intervienen simetrías que implican la mezcla de identidades de un número importante de partículas (5). En la simetría GTU se dan procesos que estaban fuera del alcance de las teorías anteriores.

Para poder llevar a cabo esta unificación, se necesitan *veintidos* (22) *campos unificados* de fuerzas, de los cuales doce son ya conocidos y cuyos cuantos correspondientes son (1 fotón; partículas W^+ , W^- , Z ; 8 gluones) y los nuevos campos con sus correspondientes cuantos, llamados partículas X .

En las teorías GTU se da una conclusión de la mayor importancia y es la de postular la desintegración del protón. El protón ha sido siempre considerado en todas las teorías físicas como una partícula estable y permanente. Las teorías de gran unificación predicen la muerte (desintegración) del protón con lo que indirectamente admiten que toda la materia del cosmos acabará desapareciendo, al basarse la estructura de éste en un elemento inestable. Esta predicción teórica de las GTU si pudiera observarse experimentalmente sería la más importante prueba de la simetría común subyacente a las tres fuerzas. Sin embargo, los problemas tecnológicos que se plantean a la hora de poder investigar predicciones de este tipo son fabulosos. Examinemos la situación con más detenimiento.

A través del principio de incertidumbre de Heisenberg, se pueden relacionar la energía (o su equivalente en masa) y la distancia. Desde este punto de vista, la física de las pequeñas distancias nos obliga a la utilización de fabulosas energías. Más concretamente, a la escala de masa (energía) de las partículas X , tenemos una distancia asociada de 10^{-29} cm; ésta sería el radio de acción de las partículas X en cuya interacción con los quark ocurriría la desintegración del protón.

El mundo de las GTU es millones de millones de veces más pequeño que el mundo de los quark. Los quark han podido ser sondeados con aceleradores de partículas de 3 km de longitud tales como el acelerador lineal de Standford. Para sondear el mundo de las GTU, sería necesario un acelerador mu-

chísimo más potente. Y este límite si para el filósofo no tiene mayor trascendencia, para el físico es de capital importancia, ya que la elaboración de un edificio teórico (por muy lógico que éste sea) sin la correspondiente observación, sería hacer metafísica y no la física que desde los tiempos de Newton se ha caracterizado por la hábil compenetración entre el modelo teórico y la práctica experimental.

La observación de la desintegración del protón a través de un ensayo de laboratorio, no es viable hoy día (ni probablemente lo sea nunca); sin embargo, en la naturaleza tenemos el mayor laboratorio concebible en el que los fenómenos vedados a nosotros por limitaciones tecnológicas en él se dan por doquier. Así, si tenemos en cuenta que la vida media del protón prevista por la GTU más simple es de 10^{31} años (es decir que de 10^{31} protones es de esperar que uno de ellos se desintegre en un año), sería posible esta detección si introduyéramos en un lugar fuera de efectos enmascaradores extraños (rayos cósmicos, neutrinos) una gran masa de materia y observáramos con unos detectores adecuados el efecto Cerenkov consecuencia de la desintegración. Estos experimentos se están realizando en minas y cuevas profundas, a salvo de la lluvia de rayos cósmicos. Los resultados obtenidos hasta ahora son nulos, sin embargo, esto nos anularía sólo las GTU más simples, ya que en otras la vida del protón es mucho más larga. Los experimentos que puedan detectar la desintegración del protón así como los monopolos magnéticos están en el límite del análisis de la física actual. Las limitaciones experimentales son muy fuertes y de alguna forma parecen llevarnos a un túnel cada vez más estrecho del que quizás la física ya no pueda salir. Esta es la razón por la que, a la espera de resultados experimentales más trascendentes, en estos

últimos años ha surgido arrolladora la física teórica, y es en esa línea en la que se esperan los más relevantes avances.

6. La gravedad cuántica: teorías supergravitatorias

Un problema que para nadie ha pasado desapercibido es el de que las GTU pueden llegar a unificar tres campos de la física, pero no los cuatro, ya que la gravedad de nuevo (recordemos los intentos einstenianos para su teoría de campo unificado) se resiste a ser reducida.

Dos son los problemas que se presentan. Por un lado, el desconocimiento de la simetría que pueda unificar las cuatro fuerzas y, por otro, la no existencia aún de una teoría de la gravedad que sea compatible con la mecánica cuántica. En todos los intentos de descripción de la gravedad en términos de intercambio de gravitones (cuantos del campo gravitatorio), surgen los problemas asociados con los infinitos que invalidan la utilidad de la teoría.

Sin embargo, sabemos que la renormalización puede surgir de una simetría más potente que cualquier

otra conocida hasta el momento. La investigación teórica en esta línea se abrió en 1970, cuando los físicos teóricos anunciaron las teorías supergravitatorias. El hecho de que estas teorías de unificación total estén basadas en la simetría más general capaz de involucrar a todas las fuerzas de la naturaleza ha hecho que se las denomine con el adjetivo de *supersimétricas*.

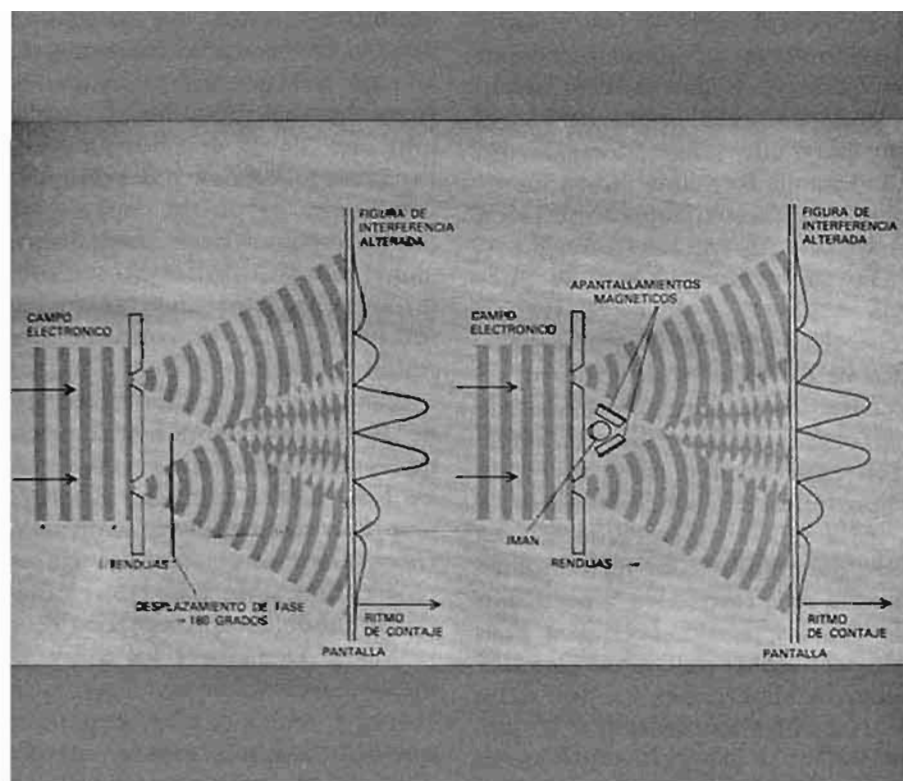
La supergravedad es una generalización de la relatividad general einsteniana; sin embargo, la diferencia esencial que hay entre ellas es que en la supergravedad se da una descripción a nivel cuántico de los fenómenos gravitatorios.

La supergravedad es una formulación supersimétrica de la gravitación. La supersimetría formulada a principios de los años 70 en investigaciones independientes llevadas a cabo en Europa, EU, y la Unión Soviética, permite la construcción de una nueva teoría de la gravitación (supergravedad) que unificaría la totalidad de los campos de fuerza existentes en la naturaleza.

Todas las partículas pueden dividirse en dos grupos por lo que a su *spin* se refiere: bosones y fermiones. Los bosones son partículas sin *spin* o con *spin* entero, mientras que los fermiones poseen unidades fraccionarias de *spin* a pesar de lo brutal que para nuestra imaginación pueda suponer el considerar partículas con doble rotación.

El comportamiento comparativo de ambos grupos de partículas es verdaderamente llamativo. Los fermiones rechuyen el contacto con partículas de su propia familia. Este comportamiento fue explicitado mediante el principio de exclusión de Pauli que prohíbe el que dos fermiones compartan el mismo número cuántico.

En contraste con este comportamiento asocial de los fermiones, se encuentra el de los bosones, los cuales no interponen ninguna barrera para la colaboración mutua,



Simetría de gauge local del campo de materia del electrón restablecida al tener en cuenta los campos magnéticos. Si se desplaza la fase de uno de los haces de electrones difractados, pero no la del otro, se altera la figura de interferencia (diagrama de la izquierda). Sin embargo, puede obtenerse el mismo efecto al introducir un pequeño campo magnético perpendicular al haz del electrón y entre las rendijas (diagrama de la derecha). Nótese que el campo magnético induce un desplazamiento de fase aun cuando se coloquen apantallamientos de suerte que el campo no logre penetrar en la región donde las ondas del electrón se propagan e interfieren. Un experimentador que examine las figuras de interferencia no podrá distinguir entre los efectos de un desplazamiento de fase impuesto arbitrariamente sobre el haz del electrón y los efectos de un campo magnético introducido entre las rendijas. Cualquier desplazamiento local en la fase del campo material del electrón puede reproducirse por campos eléctricos y magnéticos; la fase del campo del electrón será arbitraria. La electrodinámica relaciona los campos del electrón con los eléctricos y magnéticos. (Tomado de la revista *Investigación y Ciencia* núm. 47).

pudiendo agruparse en conjuntos tan numerosos que pueden llegar a producir efectos macroscópicos detectables por nuestros aparatos de medición.

Este radical comportamiento de ambas familias de partículas hace que los bosones tiendan a asociarse con las fuerzas y los fermiones con la materia.

El hecho de que la supergravedad tratase sobre la unificación de fermiones y bosones en una única teoría supersimétrica desconcertó en principio a los científicos que trabajaban sobre este asunto y que consideraban a los dos grupos ya mencionados como mundos excluyentes.

Matemáticamente, una operación de supersimetría es algo similar a la extracción de la raíz cuadrada de la simetría de Lorentz-Poincaré. Y físicamente, corresponde a la transformación de un fermión en bosón o viceversa.

La teoría supersimétrica incorpora elementos numéricos que no tienen la propiedad conmutativa; la necesidad de estos números anticonmutantes está relacionada con el principio de exclusión de Pauli, que prohíbe la ocupación de un mismo punto por dos fermiones diferentes.

El origen de la supergravedad se basa en una propiedad sorprendente de la supersimetría, a saber: si aplicamos repetidamente una transformación fermión-bosón, hacemos que una partícula se mueva de un punto a otro del espacio-tiempo. Este desplazamiento de una partícula por medio de una transformación de supersimetría sugiere una relación íntima entre dicha supersimetría y la estructura del espacio-tiempo. Así, si la repetición de una transformación de supersimetría es una transformación de Poincaré y si tenemos en cuenta que la invariancia local de Poincaré es la simetría que origina la relatividad general, podemos esperar que exista asimismo una estrecha conexión entre la supersi-

metría y la gravitación. Esta es la razón que ha impulsado a los físicos teóricos a elaborar teorías supersimétricas.

La construcción de una teoría gauge de supersimetría se basa en que el producto de dos rotaciones supersimétricas es un desplazamiento en el espacio-tiempo. Esto lo podemos traducir físicamente de la siguiente manera: la repetición de una transformación de supersimetría da lugar a la traslación física de una partícula. Para la obtención de una teoría supersimétrica local, habrá que introducir un campo gauge por cada una de las simetrías (rotaciones), mientras que el desplazamiento en el espacio-tiempo es una transformación de Poincaré. Según la transformación de Poincaré, el gravitón sería una partícula gauge adecuada. De esta sencilla forma, la teoría supersimétrica se nos transformaría en una teoría supergravitatoria.

La supergravedad nos da pues una descripción de la relatividad general en lenguaje de teoría cuántica de campos. Esta teoría supergravitatoria implica la aparición de partículas con $spin\ 3/2$. Su detección experimental daría una gran importancia a la supergravedad.

Esta teoría supergravitatoria ha sido generalizada en un conjunto mucho más restrictivo y unificado de teorías, agrupadas todas ellas bajo el nombre de teorías generalizadas de supergravedad. Son ocho teorías entre las cuales $n = 1^4$ pertenece a la supergravedad en su forma original y $n = 8$ parece aceptarse como la teoría más potente. En este modelo $n = 8$ interviene una familia tremendamente numerosa de partículas (70) que comprendería a todas las partículas conocidas y por conocer, proporcionando un marco para la unificación total de la física, marco en el que la naturaleza se encontraría bajo el control de un único ente.

⁴ Los valores de n en las teorías supergravitatorias indican el número de gravitinos de $spin\ 3/2$ que se incluyen en la teoría.

En este marco tendríamos por primera vez en la historia de la ciencia una descripción unificada de la materia y de la fuerza.

El mayor logro de este conjunto de teorías es el de su elevado grado de simetría. Al combinar supersimetría y simetría interna, queda unificado todo el grupo de partículas cuya partícula generadora es el gravitón. Este hecho junto al de la cancelación de infinitos hacen de las teorías de la supergravedad generalizada marcos de interés preferente, ya que es precisamente en este tipo de teorías en las únicas en que todas las partículas pueden transformarse en gravitones. En definitiva, todos los diagramas pueden traducirse al diagrama elemental del gravitón, cuya suma (para los cálculos de las probabilidades de interacción) es finita. Estos infinitos se cancelan merced a una propiedad especial del marco espacio-tiempo tetradimensional. Estos infinitos no se cancelarían si nuestro universo tuviese un número de dimensiones diferente.

La confianza en los resultados de las investigaciones es tan alta que prestigiosos físicos consideran ya a esta teoría supergravitatoria $n = 8$ como la culminación de la física teórica. Hasta hoy día las teorías físicas se han considerado como modelos aproximados de la realidad. Al mejorar los modelos, mejoraba también el encaje entre teoría y realidad. Hay científicos que opinan que la teoría supergravitatoria $n = 8$ no es un modelo sino la realidad misma, ya que modelo y realidad en este caso se encuentran en perfecto acuerdo matemático.

7. La cuantización del espacio-tiempo

Una de las partes más oscuras e impresionantes de la gravedad cuántica es la de los efectos que la cuantización supondría sobre el marco espacio-temporal.

Como se citó anteriormente, toda teoría unificada ha de compatibilizar la mecánica cuántica y la gravitación, es decir, ha de cuantizar el propio campo gravitatorio. Pero, como sabemos por la relatividad general, dicho campo gravitatorio no es más que el producto de una deformación espacio-temporal. En este momento, hemos llegado al nudo de la cuestión: la cuantización de la gravedad exige que el propio marco de los acontecimientos (el continuo espacio-temporal) se transforme en un objeto cuántico. Esto supone que, así como en la teoría cuántica de campos ordinaria, el espacio-tiempo era un fondo estable, en la gravedad cuántica, el fondo espacio-temporal no sólo se verá afectado por las fluctuaciones cuánticas que en él se dan, sino que él mismo será fluctuante.

De esta forma, si estudiamos el comportamiento del marco espacio-temporal a nivel microscópico, podríamos distinguir tres niveles.

En un primer nivel, caracterizado por una distancia de 10^{-12} cm (longitud muy superior a la longitud de Planck) correspondiente a la escala del núcleo atómico, las fluctuaciones cuánticas del campo gravitatorio cuantizado son pequeñas, y podemos considerar a la geometría de fondo como uniforme.

Para un nivel de distancias de 10^{-30} cm (longitudes de onda próximas a la de Planck), entraríamos de lleno en el reino de las GTU (los quark y los leptones pierden su identidad unificándose, y las fuerzas electromagnética, débil y fuerte se identifican); en este nivel aparecen fluctuaciones importantes en la geometría de fondo, ofreciendo ésta una rugosidad apreciable.

A un nivel de 10^{-33} cm (longitud de Planck), la curvatura y la tipología del propio espacio-tiempo sufren violentas fluctuaciones asemejando a un mar embravecido. Este espacio-tiempo cuantizado posee una estructura causal fluctuante e incierta.

En este dominio de las dimensiones de Planck, la distinción real entre pasado y futuro se vuelve incierta. Es de esperar que a estas distancias como la de Planck surjan procesos no permitidos en la relatividad no cuántica, más concretamente, velocidades superiores a la de la luz.

En este contexto, surge la noción de topología fluctuante sugerida por Wheeler, según la cual si extrapolamos los campos débiles a los dominios de Planck, llegaríamos a la conclusión de que las fluctuaciones de la geometría serían tan violentas que se podrían producir agujeros negros en el propio espacio-tiempo, cambiando de esta forma radicalmente su topología. En este marco, se observaría un estado de violencia y de perpetuo desorden con estructuras muy complejas en permanente formación y aniquilamiento.

Según Wheeler, las excitaciones de este turbulento mar se nos harían perceptibles en forma de partículas elementales. Y lo que nos permitiría distinguir unas de otras no sería más que la topología asociada a la excitación. Según Wheeler, para comprender los fenómenos de las partículas elementales, hay que comprender la naturaleza del estado fundamental de la gravitación cuántica. La fenomenología de las partículas elementales quedaría reducida entonces a una química de la geometría.

¿Cuál es el modelo matemático que nos puede representar este caos cuántico? ¿Cómo explicar las transiciones topológicas que en él se dan? A pesar de que existen algunos modelos,⁵ algunos proponen considerar a la geometría espacio-tiempo como una realidad secundaria que sólo tiene utilidad para distancias mucho menores

⁵ Recientemente se ha propuesto un modelo matemático para representar la espuma del espacio-tiempo (S.W. Hawking) y hasta el año de 1984 no ha sido factible un cálculo aproximado de las transiciones de aquél (A. Strominger; *Phys. Rev. Lett.*, 52, 1733 (1984).

que la longitud de Planck. Ante esta última postura, surge una nueva pregunta: ¿de qué naturaleza es la realidad que debería remplazar el continuo espacio-temporal en la gravitación cuántica?

La respuesta a este nuevo interrogante se perfila desde dos frentes. Por un lado, tenemos la supergravedad que, postulando potentes simetrías, pretende llegar a la unificación total de los campos, como ya hemos mencionado anteriormente. Por otro, se ha reavivado el interés en torno a los modelos ya clásicos de Kaluza (1921) y Klein (1926), que han sido reinterpretados desde la perspectiva cuántica.

8. Las teorías de Kaluza-Klein

El viejo sueño de Einstein (la unificación de los campos electromagnético y gravitatorio en base a una descripción geométrica de la naturaleza), fue recogido por el físico polaco Theodor Kaluza, el cual, allá por el año 1921, intuyó la imposibilidad de acomodar la teoría de Maxwell dentro de los moldes de la geometría. Por ello, se propuso la inmensa tarea de ampliar la geometría hasta unos límites tales que encajara el electromagnetismo en ella.

Siguiendo esta vía, Kaluza postuló una dimensión adicional para el espacio, de tal forma que el continuo geométrico subyacente a la naturaleza aparecería constituido por cuatro dimensiones espaciales y una temporal. En este universo pentadimensional, la gravitación se comporta como la suma de la gravedad normal más el campo electromagnético maxwelliano, cuando es observado desde nuestro restringido mundo de cuatro dimensiones. Si pudiéramos ampliar nuestra percepción a cinco dimensiones, observaríamos un único campo de fuerza: el gravitatorio. Para esta teoría, la onda electromagnética no sería más que una ondulación de la quinta dimensión.

Sin embargo, el éxito matemático de Kaluza quedó empañado por una sencilla pero contundente pregunta. Si el universo espacial es tetradiimensional, ¿por qué no es posible captar físicamente la cuarta dimensión? ¿No será la tetradiimensionalidad del espacio un mero artificio matemático sin sentido físico?

En 1926, el físico sueco Oscar Klein intentó comprobar si la estructura pentadimensional del modelo de Kaluza era compatible con la mecánica cuántica. Para ello, formuló una nueva versión de la ecuación de Schrodinger en función de cinco variables. Para Klein, la cuarta dimensión espacial tiene existencia real. Supongamos para ello una línea en la que cada uno de sus puntos está asociado a un pequeño círculo; esta asociación de línea unidimensional con círculo unidimensional nos engendra un cilindro bidimensional. De la misma forma, si suponemos un plano en el que todos sus puntos estén asociados a un círculo, verificaremos que la asociación del plano bidimensional con el círculo unidimensional nos genera un continuo tridimensional.

Siguiendo este mismo razonamiento, podemos considerar que en todo punto del espacio tridimensional existe un pequeño círculo asociado, estando este pequeño círculo enrollado en el espacio propiamente dicho, ya que no está dentro de él; estos bucles lo que hacen en realidad es extender el espacio.

Klein emprendió el cálculo de la circunferencia de estos círculos que, asociados a nuestro universo espacio-temporal, nos generan el mundo de cinco dimensiones. Para ello, partió de los valores de la carga del electrón y de otras partículas, así como de los valores de las fuerzas gravitatorias entre ellas, y llegó a la conclusión de que la longitud de estos círculos sería del orden de 10^{-30} cm.

Esta cifra nos explica claramen-

te por qué no se observa la quinta dimensión. Es una cifra tan tremendamente pequeña, que sería imposible que, no ya un organismo humano, sino ni tan siquiera un simple átomo pudiera moverse en ella.

Hemos de pensar en esta dimensión como algo que se halla confinado dentro del propio átomo. Para detectar una estructura tan sutil deberíamos disponer de un acelerador de partículas con una potencia mucho mayor que la disponible en los aceleradores actuales.

9. La ampliación de las teorías de Kaluza-Klein: el universo de once dimensiones

El modelo clásico de Kaluza-Klein reposó durante años en el cajón de los recuerdos hasta que, de nuevo, suscitó un apasionado interés, pero esta vez dentro de un nuevo y radical contexto: el contexto de las unificaciones GTU y de las teorías supergravitatorias.

La teoría clásica de Kaluza-Klein es reincorporada a la física teórica en el sentido de suponer que la simetría de los campos de fuerza es debida a una estructura geométrica subyacente a la propia naturaleza. Más aún, las simetrías gauge son en realidad simetrías geométricas asociadas a nuevas dimensiones espaciales.

Los fenómenos que tendría que cubrir una teoría Kaluza-Klein revisada comprenderían tres aspectos. Habría de incluir un campo fermiónico que dé cuenta de los fermiones de nuestro universo. Habría de poseer también, al menos un campo bosónico y, por supuesto, el campo gravitacional que sería el causante de la compactación o arrollamiento de las dimensiones ocultas. Una versión de la supergravedad de 11 dimensiones cumpliría todas estas condiciones.

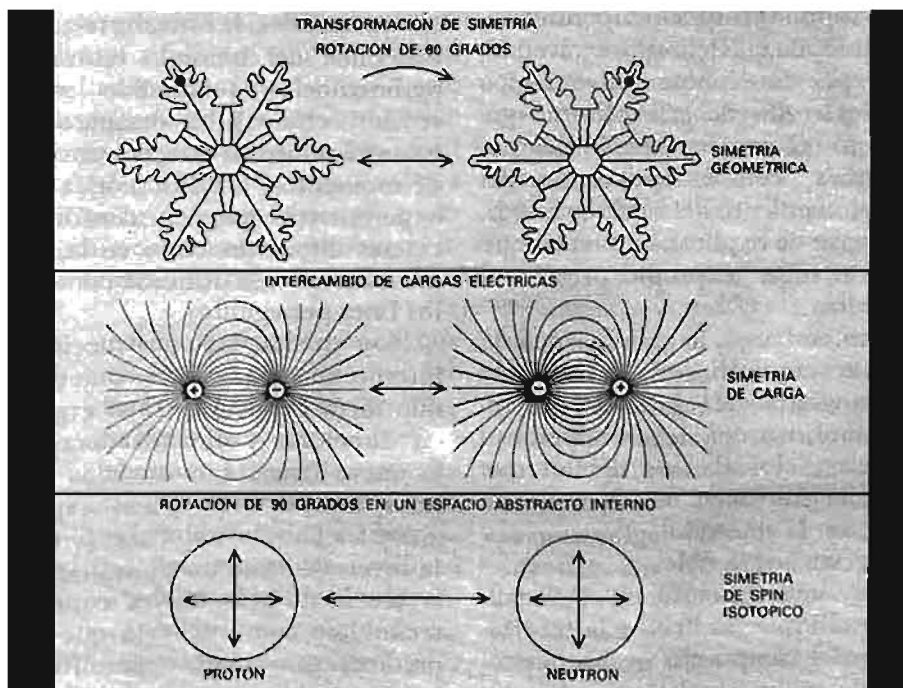
La versión moderna de la teoría Kaluza-Klein postula pues un universo de 11 dimensiones, siete de las cuales estarían enrolladas hasta

tomar unas dimensiones inalcanzables a la observación directa.

Los tipos de topología que pueden corresponder a estas dimensiones compactadas son numerosísimos. Para desarrollar una teoría Kaluza-Klein basada en la supergravedad de 11 dimensiones, deberíamos en primer lugar resolver las ecuaciones de la supergravedad. De entre ellas, muchas corresponderían a un espacio-tiempo tetradiimensional asociado a una forma topológica cerrada de siete dimensiones. Después, analizaríamos el grupo de simetría de cada superficie que corresponde a la solución de las ecuaciones. El grupo de simetría determina la teoría gauge no-abeliana que debe unificarse con la gravedad. Las distintas superficies cerradas poseen distintos tipos de simetrías, y cada una de ellas determina una teoría de gran unificación diferente, para las fuerzas distintas de la gravedad. Posteriormente se analizan las estructuras de ondas estacionarias permitidas por las superficies cerradas, estructuras que determinarán las propiedades de las partículas predichas por la teoría en el espacio-tiempo tetradiimensional ordinario.

De entre todas estas topologías, hay una que desde hace muchos años ha recabado el interés de los matemáticos, debido a sus especiales características: la heptaesfera, el análogo heptadimensional de la esfera. Mediante este modelo, es posible explicar todos los campos y fuerzas que percibimos en el mundo ordinario, quedando de esta forma descritos desde el átomo más elemental hasta la galaxia más compleja.

Esta esfera heptadimensional si se deforma o achata es capaz de explicarnos el ocultamiento e interrupción de las simetrías; es por ello que este modelo resulta ser la topología óptima por lo que respecta a las dimensiones comprimidas invisibles. Por otro lado, correspondería a la configuración



Simetrías de la naturaleza determinantes de las propiedades de las fuerzas en las teorías gauge. Reconocemos la simetría de un copo de nieve cuando observamos que la figura no cambia al dar un giro de 60 grados; se dice entonces que el copo de nieve es invariante bajo tales rotaciones. En física se introducen simetrías no geométricas. La simetría de carga, por ejemplo, es la invariancia de las fuerzas que actúan entre un conjunto de partículas cargadas cuando se invierten las polaridades de todas las cargas. En simetría de *spin* isotópico se basa en la observación de que apenas se registrarían cambios en las interacciones fuertes de la materia si se intercambiaran todos los protones y neutrones. Por tanto el protón y el neutrón son sólo estados alternativos de una única partícula, el nucleón, y las transiciones entre los estados pueden realizarse (o imaginarse) ajustando la orientación de un indicador en un espacio interno. Esta clase de simetrías donde la transformación consiste en una rotación interna o en un desplazamiento de fase, se denominan simetrías gauge. Desde Galileo y Newton, las simetrías y las simetrías aparentes de las leyes de la naturaleza han intervenido en la construcción de las teorías físicas. (Tomado de la revista *Investigación y Ciencia* núm. 47).

más estable (interrupción de la simetría) y por ello también a la de menor energía del espacio-tiempo.

¿Es posible sondear esta heptaesfera? Los cálculos recientes dan para la circunferencia de esta heptaesfera enrollada un valor de 10^{-32} cm. Esta dimensión es muy próxima a la menor distancia que con sentido físico conocemos: la distancia de Planck.

Según el principio de incertidumbre de Heisenberg, la energía equivalente que necesitaríamos para poder penetrar en la heptaesfera de Kaluza-Klein sería de 10^{19} veces la masa del protón. A esta energía podríamos estudiar la estructura

espacio-temporal de once dimensiones, pero para ello necesitaríamos un acelerador de partículas con una potencia enorme.

De cualquier forma, las investigaciones que en estos últimos años se han concentrado en torno a estos modelos, han hecho surgir problemas difícilmente compatibles con el análisis que de la realidad hacemos en el mundo tetradimensional. Concretamente, en todos los mundos de once dimensiones estudiados, se predice la existencia de neutrinos dextrógiros y levógiros por partes iguales. Esto contrasta con la observación, ya que, en ella, todos aparecen como levógiros. Por otro lado,

la extremada pequeñez de las dimensiones compactadas proporciona una enorme curvatura a las dimensiones restantes espacio-temporales, entrando en contradicción con las observaciones astronómicas que dan una curvatura media al universo a gran escala, casi nula. Por otra parte, tenemos el eterno problema de los infinitos que surgen en la teoría cuántica de la gravedad. Los avances más recientes a lo largo de 1985 nos hablan de un universo de 10 dimensiones en el contexto de la teoría de supercuerdas.

Llegados a este punto, convendría recordar que se tardó más de 10 años para la correcta aplicación de las teorías gauge no-abelianas a la unificación de las fuerzas elementales. Esto nos sugiere que, si queremos obtener resultados palpables acerca de la interrelación de la supergravedad con las teorías de Kaluza-Klein, habremos de cultivar la paciencia y esperar a una mayor madurez de los trabajos teóricos, así como de la propia matemática inherente a ellos. El binomio matemática-física teórica se nos hace cada vez más inseparable, y así como la teoría de los números anticonmutantes potenció a la supergravedad al estatus que hoy ocupa, es más que probable que la gravedad cuántica exija de la matemática un nuevo desarrollo que aún está por florecer.

10. Algunas reflexiones en los límites de la física

El nuevo planteamiento de las teorías de Kaluza-Klein en el contexto de la supergravedad son origen de profundos interrogantes acerca del conocimiento, realidad y existencia del propio universo.

En la teoría de Kaluza-Klein las partículas son excitaciones en una geometría de once dimensiones, siendo dicha geometría el origen de lo que hemos dado en llamar realidad. Más aún, la unificación de Kaluza-Klein con la supregra-

vedad, en caso de coronarse con éxito, daría lugar a una superfuerza que sería la llave no sólo de la comprensión, sino también de la manipulación de dicha realidad. Esta superfuerza sería el origen de la existencia. Mediante ella, podríamos manipular la estructura del espacio y del tiempo, podríamos controlar, producir y ordenar a la materia misma, pudiendo llegar incluso a la creación de formas desconocidas de ella. Podríamos quizá llegar a manipular la propia dimensionalidad del espacio-tiempo, creando mundos artificiales de características totalmente nuevas.

La llave de acceso a estas jerarquías de la realidad aún inexploradas es la energía. Como citábamos anteriormente, el principio de indeterminación de Heisenberg nos obliga a tener que disponer de energías cada vez más fabulosas con objeto de poder sondear distancias cada vez menores. Los aceleradores de partículas más potentes hoy en funcionamiento son el Fermilab y el SPS del CERN, que pueden alcanzar energías equivalentes a 500 veces la masa del protón. Existe un proyecto en fase de diseño (el VBA) que podría alcanzar una energía de 20 000 veces la masa del protón. De cualquier forma, la distancia que media entre 10^2 y 10^{14} masas del protón (es decir entre la unificación electrodébil y las GTU) es de tal magnitud que se espera razonablemente que jamás pueda sortearla la raza humana. Y este es un punto de la mayor trascendencia, ya que la validez de teorías no sujetas a experimentación caen fuera del campo de la física introduciéndonos en el de la metafísica.

Parece sin embargo que la física teórica ha encontrado una salida en este otro gran laboratorio que es la naturaleza, la cual comenzó su existencia hace unos 18 000 millones de años en una inimaginable explosión cósmica llamada *big-bang*.

Hoy en día, la teoría de campo

que supone el modelo superunificado de Kaluza-Klein-supregravedad, es capaz de explicar a nivel lógico el desarrollo de la explosión que generó el propio espacio-tiempo. Además, con la aportación del funcionamiento del vacío cuántico, es capaz de explicar las fuerzas que dieron lugar al propio origen del universo.

Sin embargo, la grandiosidad de esta teoría unificada del Todo y la cosmogonía científica de ella resultante, no nos deben impedir el constatar los flancos débiles que en ella subyacen. Un ejemplo de ello es la metodología utilizada para esta nueva física.

La investigación de Faraday-Maxwell que les llevó a la teorización del campo electromagnético, no debemos olvidarlo, poseía un nexo claro de unión entre los hechos físicos y la teorización. Concretamente, Faraday y Maxwell pudieron experimentar en sus laboratorios efectos que les impulsaron a la búsqueda de un campo unificado que los abarcara.

La situación epistemológica de Einstein ya no es la misma cuando intenta unificar el campo electromagnético con el gravitatorio. Einstein no está en posesión de ninguna manifestación empírica que entremezcle los efectos gravitatorios con los electromagnéticos. Einstein está impulsado por otro motor, el motor de la simplicidad, el motor de la estética. No debemos olvidar la amarga lección que nos da la historia de la ciencia a este respecto. Einstein fracasó en el intento. No se puede forzar a la lógica ni a la matemática en el sentido de arropar nuestros presupuestos (estéticos, ontológicos o de cualquier otro tipo) sin que, a la larga, seamos derrotados a pesar de nuestra obstinación.

Desde este punto de vista epistemológico-histórico, convendría (pienso que cada vez con mayor urgencia) analizar cuidadosamente los principios metodológicos de la nueva física. En las investiga-

ciones actuales, la estrecha relación dialéctica del binomio teoría-experimentación (entendido en el sentido clásico) ha desaparecido hasta el punto en que, en cantidad de momentos, la física teórica y la experimental parecen conformar ciencias diferentes tanto en la propia metodología utilizada como en los fines perseguidos.

Hoy en día, las construcciones interpretativas (audaces conjeturas que diría Popper), se han erigido en directoras y dinamizadoras de la nueva física. Los modelos teóricos indican qué líneas experimentales han de trabajarse (y no a la inversa), hasta un punto tal que la teoría no sólo espera a que la tecnología compruebe lo que ella predice, sino que se permite el lujo de edificar construcciones teóricas que jamás podrán ser confirmadas empíricamente (recordemos las GTU o los modelos supergravitatorios). Unos argumentarán que la capacidad de la matemática y de la lógica han abierto unos horizontes, impensables hace escasos años, para el desarrollo y conocimientos científicos. Esto es cierto. Sin embargo, también es cierto que la teoría pura nos ha conducido a un grado de abstracción y alejamiento de la realidad (de la confirmación empírica) tal que no sería extraño que, no muy lejos en el tiempo, la ciencia sufriera una de esas tremendas crisis que han jalonado históricamente su desarrollo.

¿Por qué la naturaleza en su más profunda estructura ha de ser monista y no dual o múltiple? ¿Por qué es estéticamente preferible la interpretación monista? ¿Hasta qué punto la estética puede condicionar y hacerse dominante entre los elementos metafísicos de las construcciones interpretativas?

Por un lado, el alejamiento de la experimentación y, por otro, el carácter fundamental que se da a la simetría en la naturaleza como sujeto activo que, ante cualquier agresión desestabilizadora, respon-

de generando fuerzas elementales, adornan a la física contemporánea con fuertes tintes idealistas. En este sentido, quisiera citar un pasaje escrito recientemente por Paul Davies, profesor de física teórica en Cambridge, pasaje que me parece suficientemente expresivo de lo anteriormente comentado:

... Es intrigante pensar que un físico teórico que no supiera nada de electromagnetismo pero que creyera juiciosamente que la naturaleza está basada en la simetría, podría deducir su existencia (la del electromagnetismo) enteramente de las condiciones de la más simple de las simetrías locales gauge y de la llamada simetría de Lorentz-Poincaré de la relatividad especial. Utilizando solamente las matemáticas y guiado por esas dos poderosas simetrías, el teórico podría ser capaz de reconstruir las ecuaciones de Maxwell sin haber realizado nunca ningún experimento con la electricidad o el magnetismo y sin sospechar siquiera su existencia. . . con este razonamiento puramente abstracto, nuestro teórico se vería abocado a esperar que el electromagnetismo existiera en el mundo real. Podría llegar incluso a elaborar todas las leyes del electromagnetismo, la existencia de las ondas de radio, la posibilidad de la dinamo, etc., que en realidad fueron descubiertas utilizando experimentos prácticos. . .⁶

No quisiera terminar sin citar otro gran problema que surge en los modelos de universo en 11 dimensiones como los anteriormente estudiados. Este problema es el de que, cualquier modelo que unifique

la gravedad tiene que ser un modelo cuantizado. Ello implica que cualquier modelo del universo postulado estará sujeto a toda la problemática epistemológica inherente a la mecánica cuántica: interpretación filosófica de las observables latentes, reducción del paquete de ondas, superposición de estados y universos potenciales, variables ocultas no locales, etc., en definitiva, interpretación de la realidad. Desde este punto de vista es cuando menos inquietante el observar las diversas corrientes que se dan en la interpretación filosófica de la mecánica cuántica. Así, Hugh Everett y Bryce De Witt defenderán la realidad de la onda, considerándola como una descripción auténtica del mundo, y postularán la existencia de mundos coexistentes como secciones de un superespacio en el cual las realidades potenciales se

han truncado en reales, tan reales como nuestra propia existencia. En otra línea, tenemos lo que recientemente se ha dado en llamar 'principio antrópico', que defiende la participación activa del ser pensante en la selección del universo que nos ha tocado vivir y, por tanto, investigar, o la afirmación de Wheeler que, adoptando una versión extrema de dicho principio antrópico, aseverará que el elemento básico que ha de poseer un universo para ser real es el de que se haya dado en él un proceso evolutivo tal que puedan llegar a existir observadores.

Esto no sería más que una pequeña muestra del pronunciado desliz que se está produciendo en ciertos campos de la epistemología de la física, haciendo de ésta una ciencia difícilmente reconocible para una mentalidad científica de principios de siglo.

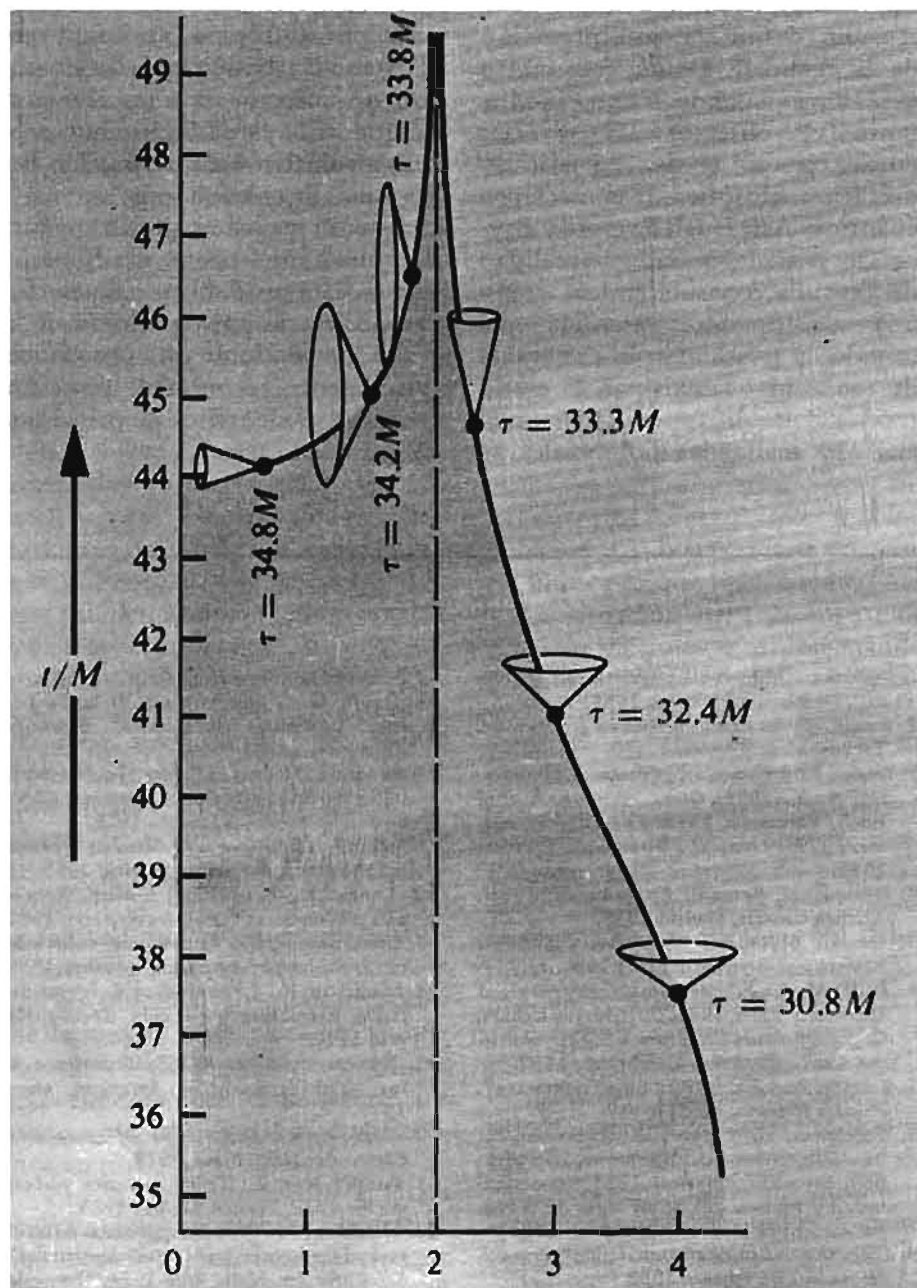
Bibliografía

1. Ashtekar, Abhay: "La gravitación cuántica", *La Recherche*, enero 1985.
2. Bunge, Mario: *Controversias en física*, Edit. Tecnos, Madrid 1983.
3. Davies, Paul: *Superforce*, Simon and Schuster, N. Y. 1984. *Otros mundos*, Antoni Boix, Barcelona 1985. *The edge of infinity*, J. M. Dent and Sons Ltd., London 1985.
4. D'Espagnat, Bernard: *En busca de lo real*, Alianza Univers, Madrid 1983.
5. De Witt Bryce, S.: "Gravedad cuántica", *Scientific American*, febrero 1984.
6. Duff, M. J.: *In quantum gravity*, Oxford University Press, 1981. Duff, M. J. y Usham, C. J.: *Quantum structure of space and time*, University Press, Cambridge, 1982.
7. Ferrara, A. y Fayet, P.: "Supersymmetry", *Physics Reports*, (1981).
8. Freedman, D. y Van Nieuwenhuizen, P.: "Las dimensiones ocultas del espacio-tiempo", *Scientific American* 1985; "Supergravedad y unificación de las leyes de la física", *Scientific American*, mayo 1985.
9. Gale, G.: "El principio antrópico", *Scientific American*, febrero 1982.
10. Georgi, H.: "Teoría unificada de las partículas elementales de las fuerzas", *Scientific American*, junio 1981.
11. Hawking, S.W.: *In general relativity: An Einstein centenary survey*, Cambridge Univ. Press, 1979.
12. Hilger, A.: *Quantum Theory of gravitation: Essays in honor of B. S. De Witt*, 1984.
13. Hooft, G.: "Teorías gauge de las fuerzas entre partículas elementales", *Scientific American*, agosto 1980.
14. Indurain, Francisco José: "Teorías unificadas de las interacciones fundamentales", *Scientific American*, marzo 1978.
15. Jauch, J. M.: *Sobre la realidad de los cuantos*, Alianza Universidad, Madrid 1985.
16. Langacker, P.: "Grand unified theories and proton decay", *Physics Reports*, 1981.
17. Lee Glashow, S.: "Quarks con color y sabor", *Scientific American*, octubre 1985.
18. Margenau, H.: *La naturaleza de la realidad física. Estructura y Fisión*, Tecnos, Madrid 1970.
19. Nambu Yoichiro: "El confinamiento de los quarks", *Scientific American*, enero 1977.
20. Penrose, R.: *Large scale of space-time*, Cambridge Univ. Press, 1973.
21. Popper, Karl R.: *Teoría cuántica y el esma en física*, Tecnos, Madrid 1985.
22. Weinberg, S.: "Teorías unificadas de las interacciones entre partículas elementales", *Scientific American*, julio 1974. "La desintegración del protón", *Scientific American*, agosto 1981. *The first three minutes (A modern view of the universe)*, Basic Books, Inc. Publishers, New York, 1977.
23. Wilson Kenneth, G.: "Problemas físicos con muchas escalas de longitud", *Scientific American*, octubre 1979.

⁶ Paul Davies: *Superforce*, Simon and Schuster, N.Y. 1984.

LOS HOYOS NEGROS CUERPOS CELESTES OCULTOS

Nora Eva Bretón Báez*



elementos núm. 9, año 2, vol. 2. Impreso en México.

Representación gráfica del colapso de una estrella con un radio inicial mayor que $2M$ (en unidades que $G = c = 1$). Los conos de la figura son los llamados "conos de luz". La dirección del movimiento de una partícula debe encontrarse siempre dentro del cono (o sobre él, si su velocidad es la de la luz). Nótese que para $r < 2M$, los conos están dirigidos hacia el interior, por lo que una partícula no puede escapar.

En los años recientes ha estado de moda el hablar de los hoyos negros, bolas negras en el espacio que "tragan" cuanto se ponga a su alcance. Pero ¿de dónde salen estos hoyos?, ¿en dónde y cómo pueden observarse?, ¿cuántos hoyos negros hay?, ¿qué son?

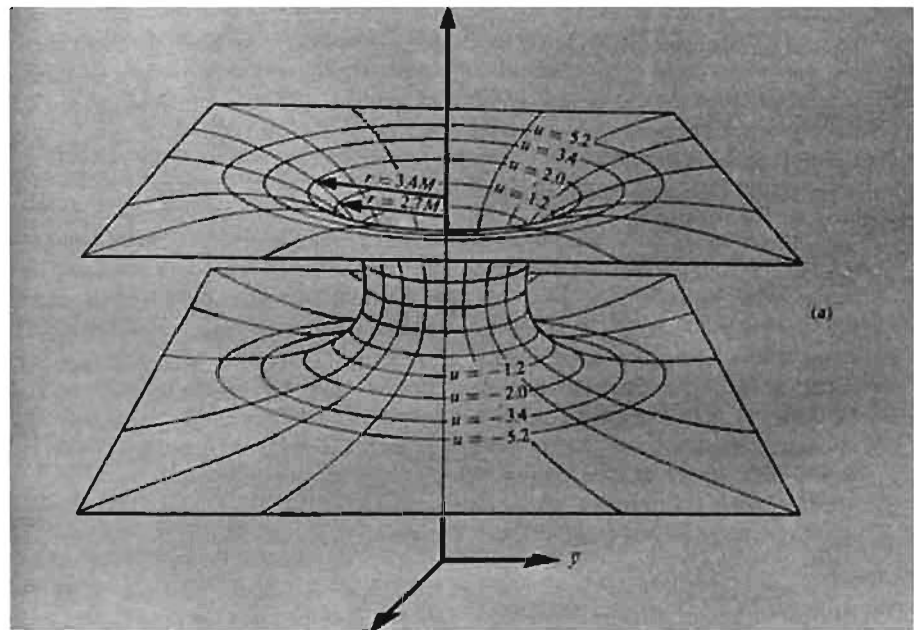
Un hoyo negro puede ser el resultado de una estrella que ha colapsado; esto es, en la "vida" de una estrella llega el momento en que se agota el combustible nuclear y la estrella lentamente empieza a contraerse, presionando y comprimiendo todo el material que la forma. Cuando ya no existe la presión hacia afuera producida por las reacciones nucleares en el interior de la estrella, la estrella pierde su equilibrio y su propia atracción gravitacional hace que toda la estrella se precipite hacia "adentro" de ella misma, llegando a ocupar toda esta masa un volumen muy reducido, con una densidad muy grande, creándose así un objeto con un campo gravitacional enorme. Si este proceso continúa, la estrella cae dentro de lo que se denomina su horizonte, su superficie se vuelve tal que nada puede salir de ella: ninguna información de lo que pasa dentro puede llegar a nosotros; toda la materia que cruza esa superficie jamás puede salir de ella. Ni la luz puede escapar a este grandísimo campo gravitacional, de aquí el nombre de hoyo negro.

Sin embargo, es posible investigar lo que ocurre en un hoyo

* Departamento de Física del Centro de Investigaciones y de Estudios Avanzados del IPN, Apdo. post. 14-740, México, D.F., 07000.

negro analizando, por medio de ecuaciones, cómo es la geometría del espaciotiempo que lo rodea. Como parte de la mecánica clásica, se conoce la llamada teoría newtoniana de la gravitación, según la cual la fuerza de atracción entre dos cuerpos es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa. Esta teoría da una muy buena aproximación para la mayoría de los sistemas astrofísicos (sistemas planetarios, estrellas binarias) aunque no explica algunos fenómenos como la precesión de la órbita de Mercurio. En 1916, Einstein obtuvo una teoría de la gravitación compatible con el principio de que la velocidad de la luz es la máxima velocidad de propagación de cualquier señal y con la unidad del espacio y el tiempo. Esta teoría, llamada teoría general de la relatividad, explica la precesión de la órbita de Mercurio así como otros efectos y coincide con la teoría newtoniana en el límite de campos gravitacionales débiles. De acuerdo a la teoría general de la relatividad, la estructura del espaciotiempo está determinada por la presencia de la materia; esto es, la medida de las longitudes y de los intervalos de tiempo depende de la presencia de la materia, de tal manera que la existencia de un campo gravitacional corresponde a una cierta curvatura del espaciotiempo. Los espacios curvos no se pueden describir con la geometría euclidiana —análoga a la geometría del espacio tridimensional usual, en la cual el "elemento de longitud" viene dado por $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$ —, sino por una geometría, llamada riemanniana, donde el elemento de longitud (que físicamente determina las longitudes y la duración de los intervalos de tiempo) tiene en general una expresión más complicada.

Es un hecho experimental que estas perturbaciones del espaciotiempo son capaces de curvar un rayo de luz que pase cerca de una



El "puente de Schwarzschild" entre dos universos asintóticamente euclidianos.

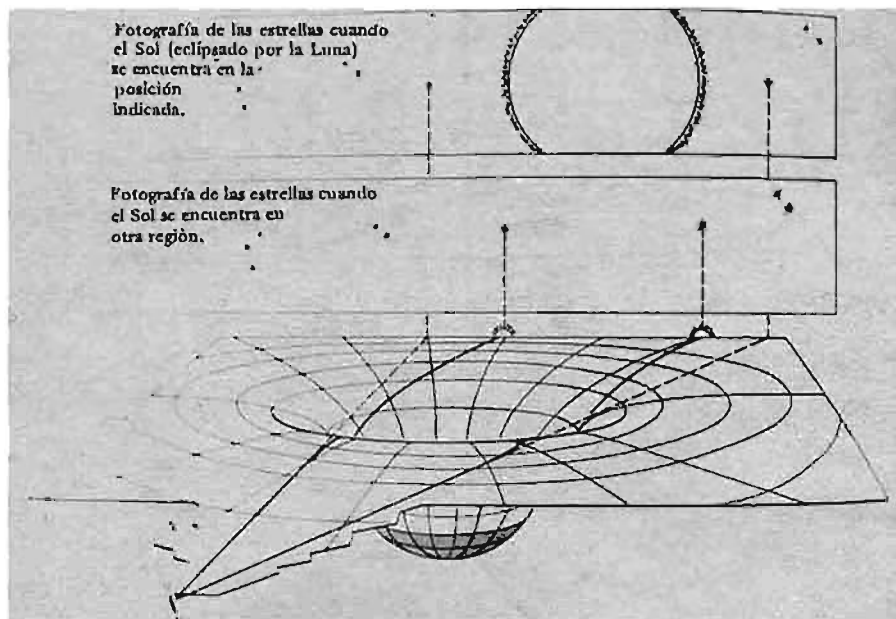
fuente gravitatoria: durante un eclipse de Sol se observan desviaciones de los rayos de luz provenientes de las estrellas situadas "atrás" del Sol. El efecto de deflexión de la luz se observa como un corrimiento en la posición de las estrellas durante el eclipse. Este crecimiento se puede determinar fotografiando las estrellas en la vecindad del Sol durante el eclipse y comparando esta fotografía con otra tomada a las mismas estrellas cuando el Sol se encuentra en otra dirección.

Las ecuaciones de Einstein, que determinan el efecto producido por la materia sobre la geometría del espaciotiempo son un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales altamente no lineales en cuatro variables, muy difíciles de resolver en general. Pero si se trata de espaciotiempos con simetrías, las ecuaciones son solubles. Por ejemplo, en el caso de una estrella completamente esférica y en estado estático, es decir, donde todos los puntos colocados a una misma distancia del centro y para cualquier tiempo son físicamente equivalentes, la solución a las ecuaciones de Einstein es conocida y de hecho fue encontrada por Schwarzschild en

1916 y se conoce como la solución de Schwarzschild. El elemento de longitud de este espaciotiempo está dado, en coordenadas que corresponden a las coordenadas esféricas usuales, por

$$ds^2 = -c^2 \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right) dt^2 + \frac{dr^2}{1 - \frac{2GM}{c^2 r}} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2)$$

donde M es la masa de la estrella, G es la constante de gravitación universal, y c es la velocidad de la luz. A pesar de que ésta es una de las soluciones más sencillas de las ecuaciones de Einstein, de ella se puede obtener mucha información de la física del exterior de una estrella. Además recientemente (c. 1975) se ha demostrado que el exterior de un hoyo negro en estado estático tiene simetría esférica y que depende sólo del parámetro de la masa; por tanto, la geometría exterior de un hoyo negro estático queda descrita por la solución de Schwarzschild. Sí, éste es el elemento de longitud del espacio que rodea a un hoyo negro de masa M en estado estático. Fijémonos en el factor que multiplica a dr^2 . Cuando r toma el valor $2GM/c^2$



Deflexión de la luz por el Sol como consecuencia de la curvatura del espacio cercano al Sol.

este factor se hace infinito. ¿Qué significa esto? Esto puede indicar una singularidad en el espaciotiempo, esto es, un lugar en que el concepto clásico de espaciotiempo como un espacio con métrica riemanniana pierde sentido; esta singularidad puede corresponder a la presencia de una fuente. Pero también puede ser un efecto introducido por las coordenadas que estamos usando. O sea que esta singularidad desaparecería en algún otro sistema de coordenadas. ¿Cuál es el caso? Aquí ocurre que el espaciotiempo no tiene una singularidad en $r = 2GM/c^2$. Existen varios sistemas de coordenadas en los que esta singularidad aparente desaparece y que además nos dan otra información. Por ejemplo, las coordenadas esféricas en que se ha expresado el elemento ds^2 no describen por completo el espacio que rodea a la estrella. Si se hace una extensión analítica de estas coordenadas se puede saber lo que pasa en regiones en que $r < 2GM/c^2$, incluso preguntarse cuál es la geometría de Schwarzschild en ausencia de la estrella. Se esperaría que esta geometría fuese la de una masa puntual M colocada

en $r = 0$, pero no es así. Si no está presente la estrella, esta geometría representa un "agujero" o "puente" que conecta dos universos y si se investiga la dinámica (evolución en el tiempo) de este "puente", resulta que fue creado por la unión de dos singularidades $r = 0$, una de cada universo, el "agujero" "crece" hasta alcanzar una circunferencia de $4\pi GM/c^2$ y después se contrae desapareciendo y dejando a los dos universos desconectados y cada uno con su singularidad $r = 0$.

Otra manera de averiguar si en un punto del espacio existe una singularidad física es calcular las fuerzas sentidas en ese punto por un observador que "cae" libremente. Estas fuerzas se miden por las componentes del tensor de curvatura de Riemann. El cálculo de estas componentes en el sistema de referencia de un observador que cae da por resultado un valor finito en $r = 2GM/c^2$. Por lo tanto, en el radio gravitacional ($r = 2GM/c^2$) la geometría se comporta bien; no se trata de una singularidad del espaciotiempo. Esta superficie $r = 2GM/c^2$ constituye el "horizonte" si se trata de un hoyo negro y se dice que una vez cruzada esta

superficie es imposible salir de ella. ¿Cómo es esto? Con el propósito de investigar qué ocurre en el horizonte y dentro de él, imaginemos que viajamos en una nave espacial y a una distancia grande del horizonte enviamos un explorador, el cual se acercará al hoyo negro y nos enviará información a intervalos de tiempo iguales. Lo que sucederá es que a medida que el explorador se acerca al horizonte, la señal que nos manda tardará cada vez más en llegarnos; entre señal y señal transcurrirá más y más tiempo, aunque el explorador sigue enviando las señales a intervalos de tiempo iguales medidos por su reloj. Así pues, aunque en el tiempo medido por el explorador, éste envía señales a intervalos de tiempo iguales, para un observador alejado, estas señales se hacen cada vez más espaciadas, creciendo tal espaciamiento ilimitadamente cuando el explorador llega a la superficie $r = 2GM/c^2$ (el horizonte). Después de esto no nos llegará ninguna información de lo que ocurre en $r = 2GM/c^2$ y mucho menos de la región $r < 2GM/c^2$.

Lo que pasa en regiones donde $r < 2GM/c^2$ sólo podemos imaginarlo. Dentro del radio gravitacional, en $r = 0$ el viajero encontrará fuerzas gravitacionales infinitas, independientemente de la ruta que se use para llegar allí. $r = 0$ es una singularidad física del espaciotiempo. Para ver que es así basta calcular la curvatura, cantidad invariante, $I = 48G^2M^2/c^4 r^6$, la cual es infinita en $r = 0$.

De acuerdo con lo anterior, si se observa una estrella que colapsa la apariencia que muestra es que a medida que la superficie de la estrella se aproxima al radio gravitacional aparentemente reduce su velocidad de colapso, observándose en la luz proveniente de la estrella un corrimiento al rojo y por consiguiente una reducción de su brillantez, hasta que la estrella se vuelve invisible. A un observador distante le parece que la estrella

le toma un tiempo infinito alcanzar el horizonte y que nunca lo atraviesa. Las singularidades debidas a colapsos gravitacionales están ocultas a la vista del observador distante por el horizonte. Se supone que cualquier singularidad existente está oculta por un horizonte; esta conjetura se conoce como la "hipótesis de la censura cósmica".

Remolinos en el espaciotiempo

Existen otros hoyos negros más interesantes que los descritos por la métrica de Schwarzschild que además de poseer una cierta masa se caracterizan por estar rotando y por tener carga eléctrica. La solución de Schwarzschild ya no sirve para estudiar el espaciotiempo de estos hoyos negros, sino que es necesario considerar una solución a las ecuaciones de Einstein que involucre a tres parámetros: la masa M , la carga Q y el momento angular por unidad de masa a . La carga Q del hoyo negro va a crear un campo electromagnético, por lo que la solución de que antes hablamos además de satisfacer las ecuaciones de Einstein debe satisfacer las ecua-

ciones de Maxwell. Además esta solución debe poseer un horizonte. Tal solución se conoce como la geometría de Kerr y Newman junto con el campo electromagnético asociado a ella. Las expresiones de esta métrica y el correspondiente campo electromagnético son un tanto complicadas pero es posible describir sus características cualitativamente. Siempre que se cumpla la desigualdad $M^2 \geq Q^2 + a^2$ (en unidades tales que $G = c = 1$) esta métrica posee un horizonte y, por tanto, describe un hoyo negro. De otra manera, si un cuerpo que colapsa no satisface esta condición, las fuerzas centrífugas o de repulsión electromagnética pararán en algún momento el colapso de esta estrella. El que el hoyo negro esté rotando produce un efecto de arrastre, semejante a un remolino, el cual se hace mayor al acercarse al horizonte del hoyo negro. Antes de alcanzar el horizonte, en una superficie llamada límite estático definida por

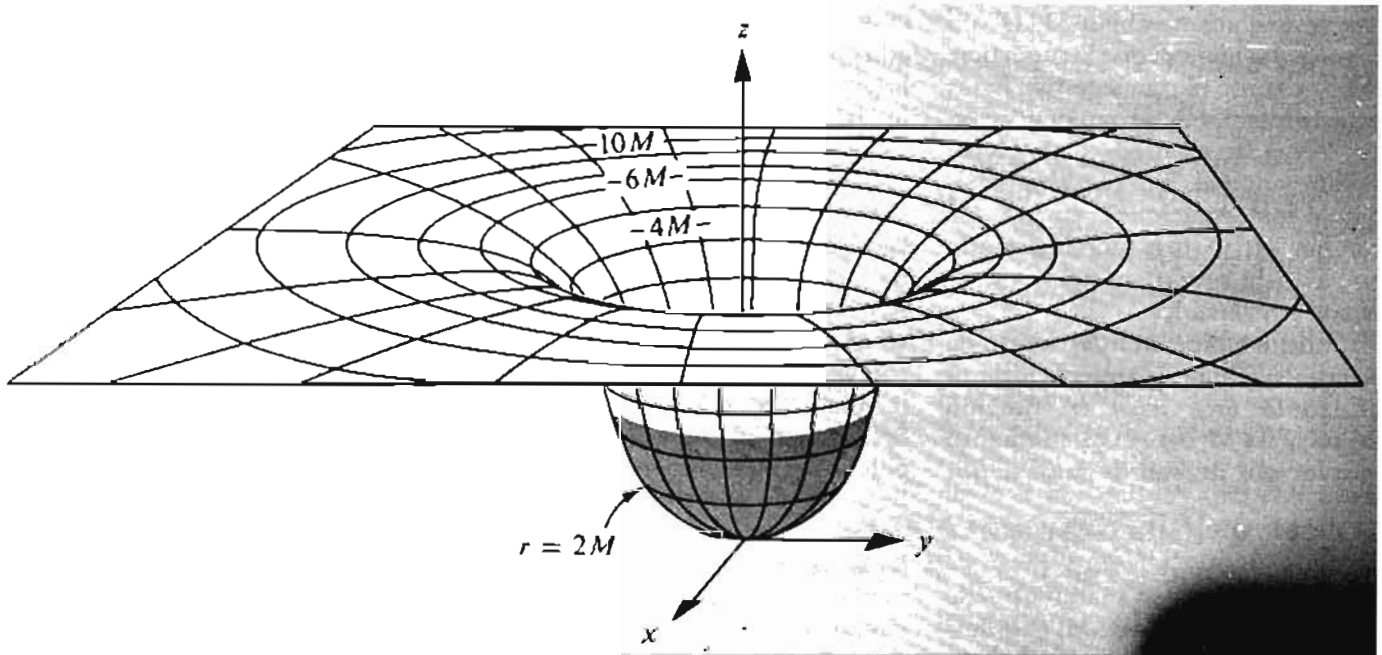
$$r_0 = M + \sqrt{M^2 - Q^2 - a^2 \cos^2 \theta}$$

(usando como coordenadas r, θ, ϕ, t , donde r, θ, ϕ se reducen a

las coordenadas esféricas usuales cuando $a = 0$), ocurre que ningún sistema de referencia (material) puede permanecer en reposo con respecto a las estrellas lejanas, ya que para ello tendría que moverse más rápido que la luz. Todos los observadores con r y θ fijos sobre y dentro de esta superficie deberán orbitar el hoyo negro en la misma dirección que éste rota. El horizonte de estos hoyos negros está localizado en

$$r_H = M + \sqrt{M^2 - Q^2 - a^2}$$

y, como en el horizonte de Schwarzschild, las partículas y fotones que caen dentro de él nunca pueden escapar. Como vemos de sus respectivas expresiones, $r_0 \neq r_H$, excepto cuando $\theta = 0^\circ, 180^\circ$, ésto es, r_0 y r_H son dos superficies que se tocan en dos puntos; a la región limitada por estas superficies (límite estático y horizonte) se le llama ergoesfera. Si el hoyo negro no posee rotación ($a = 0$) entonces el horizonte y el límite estático coinciden y no hay ergoesfera. La ergoesfera tiene mucha importancia en relación a la extracción de energía de un hoyo negro.



Representación gráfica de la geometría alrededor (en blanco) y dentro (en gris) de una estrella de radio $R = 2.66 \text{ GM}/c^2$.

La dinámica de hoyos negros

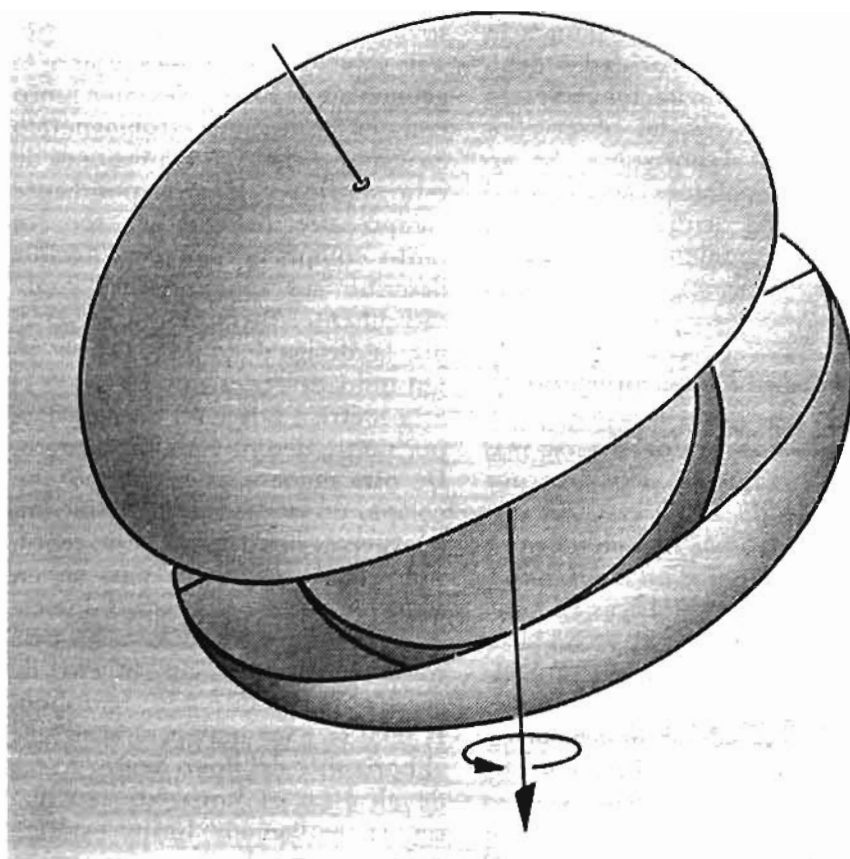
Los procesos que hemos descrito están gobernados por las ecuaciones de la relatividad general, las ecuaciones de Maxwell, etc. De estas leyes de la física se pueden derivar reglas o constricciones para los procesos que ocurren en los hoyos negros. A este conjunto de leyes (cuatro) se le ha llamado "dinámica de hoyos negros". La primera ley es semejante a la primera ley de la termodinámica, se refiere a la conservación de la energía total, del momento total, del momento angular y de la carga.

Cuando dos hoyos negros chocan y se fusionan, el área superficial del horizonte del hoyo negro resultante debe ser mayor que la suma de las superficies de los horizontes de los dos hoyos negros iniciales. O sea que la suma de las superficies de los horizontes de uno o varios hoyos negros involucrados en una colisión o fusión o cualquier otro proceso nunca decrece. Esta es la segunda ley de la dinámica de hoyos negros. Esta ley permite clasificar los procesos que ocurren en un hoyo negro en reversibles e irreversibles. Las transformaciones reversibles cambian M , Q o a pero de tal manera que la superficie del horizonte permanece fija. Estas transformaciones se pueden invertir llevando al hoyo negro a su estado original. En cambio, aquellas transformaciones en que se cambia M , Q o a incrementando con ello la superficie del horizonte son irreversibles.

Consideremos un hoyo negro de Kerr y Newman, la superficie de su horizonte está dada en función de su masa M , carga Q y momento angular por unidad de masa a , por

$$A = 4\pi [(M + \sqrt{M^2 - Q^2 - a^2})^2 + a^2]$$

La interacción con materia puede cambiar los valores de M , Q o de a de varias maneras, de modo que M puede disminuir en un determi-



Representación gráfica del horizonte, la ergoesfera y el límite estático para un hoyo negro con rotación.

nado proceso; esto es, se puede extraer energía de un hoyo negro. Si cualquier cambio en M , en Q o en a provoca que A aumente, ningún proceso futuro hará que el hoyo negro regrese a su estado inicial. La extracción reversible de carga y momento angular a de un hoyo negro (decremento de Q y a con A fija) necesariamente reduce la masa del hoyo negro (extracción de energía); si en algún momento se extraen toda la carga y momento angular del hoyo negro, la masa tomará un valor irreducible que es la masa de un hoyo negro de Schwarzschild de superficie A . El colapso gravitacional de una estrella real con asimetría no se puede describir con estas soluciones sino hasta que el colapso ha finalizado y la estrella llega a un estado estacionario el cual está caracterizado únicamente por su masa, carga y momento angular y por tanto

puede ser descrito por la solución de Kerr y Newman.

Además de los hoyos negros formados por colapsos de estrellas se supone que en el Universo hay hoyos negros menores que se formaron en los primeros tiempos del Universo, debido a fluctuaciones en la densidad. De acuerdo a los modelos aceptados, el Universo surgió de una gran explosión (*big bang*) después de la cual la materia se fue enfriando y condensando por regiones para formar las estrellas y galaxias. Se estima que una buena parte de la masa del disco que es nuestra galaxia fue depositada en estrellas capaces de colapsar en hoyos negros, de modo que la Vía Láctea puede contener del orden de 10^9 hoyos negros.

Pero, ¿dónde y cómo buscar un hoyo negro? Los hoyos negros pueden ser cuerpos "blancos" y resplandecientes pues el gas que

rodea a un hoyo negro es "jalado" hacia adentro del hoyo negro y en este proceso el gas es calentado por compresión adiabática, ondas de choque, turbulencias, viscosidad, etc. de modo que antes de alcanzar el horizonte, el gas puede llegar a calentarse tanto que emita un gran flujo de rayos X y aun puede llegar a emitir rayos gama. Esto hace que en una estrella binaria formada por un hoyo negro y una estrella visible, aunque el hoyo negro sea ópticamente invisible pueda detectarse su presencia por la emisión de rayos X y rayos gama; la luz de la estrella visible muestra corrimientos Doppler debido al movimiento de la estrella alrededor del centro de masas común y su velocidad y periodo dan información de la masa de la componente invisible del sistema binario. Si la masa de esta componente invisible es cuatro masas solares o más, no podrá tratarse de una estrella ordinaria, pues una estrella ordinaria con esa masa debería tener $(4)^3 = 64$ veces la luminosidad del Sol; tampoco puede tratarse de una enana blanca o de una estrella de neutrones, porque cualquiera de éstas, siendo tan pesadas, no podrían mantener su equilibrio y colapsarían en un hoyo negro. En este caso la idea de identificar a la componente invisible del sistema con un hoyo negro es muy atractiva.



Vista "superior" de un hoyo negro rotante mostrando la orientación de los conos de luz.

Los efectos cuánticos

Uno de los resultados recientes más interesantes en la teoría gravitatoria y el cual se supone que puede conducir a consecuencias observables es la predicción de que un hoyo negro crea partículas. En 1975, S. Hawking halló que, incorporando elementos de la mecánica cuántica en la teoría general de la relatividad, los hoyos negros crean partículas por pares, una de estas partículas cae dentro del horizonte y la otra escapa al infinito.

La razón de emisión predicha para un hoyo negro coincide con la emisión térmica de un cuerpo a la temperatura $\kappa/2\pi$, siendo κ la gravedad superficial del hoyo negro. Esta es quizá la razón más fuerte para creer que los hoyos negros pueden crear y emitir partículas. Hay otras bases para considerar que un múltiplo de la gravedad superficial del hoyo negro es análogo a la temperatura. Existe una analogía entre la segunda ley de la termodinámica y la segunda ley de la dinámica de los hoyos negros, según la cual el área del horizonte nunca puede disminuir. También hay analogía con la primera ley de la termodinámica en el resultado de que dos hoyos negros con estados de equilibrio cercanos están relacio-

nados por $dM = \frac{\kappa}{8\pi} dA + \Omega d\alpha$, don-

de M es la masa, Ω es la velocidad angular, α es el momento angular del hoyo negro y A es el área del horizonte. Comparando con la relación termodinámica $dU = TdS + pdV$, donde U es la energía interna, T es la temperatura absoluta, p es la presión y V es el volumen, se ve que si se considera a un múltiplo del área A como análogo de la entropía, entonces un múltiplo de κ será análogo a la temperatura. Por lo que si se acepta que un hoyo negro emite partículas tendremos que aceptar que hay una entropía y una temperatura asociadas con

un hoyo negro. Hawking dice que una posible explicación de esta emisión es el "efecto túnel" de la mecánica cuántica, que hace posible que una partícula "tunelée" hacia afuera del hoyo negro a través del horizonte y escape al infinito. El efecto túnel se observa en los núcleos atómicos y consiste en que para una partícula que se encuentra confinada (en el núcleo) y que clásicamente es imposible que "escape", la mecánica cuántica da una probabilidad distinta de cero para que la partícula salga de dicho confinamiento. La emisión de partículas por un hoyo negro se podría interpretar como la creación espontánea de un par de partículas, una con energía negativa la cual "cae" al hoyo negro y otra partícula con energía positiva que escapa al infinito. Estas partículas que escapan constituirían la emisión térmica antes mencionada.

En lo anterior subyace el problema de encontrar una teoría de la relatividad general que tome en cuenta los aspectos cuánticos de la materia; esto es, cuantizar el campo gravitatorio. Como se sabe, el campo electromagnético se ha cuantizado suponiendo que está formado por un conjunto de osciladores con una energía definida, pero en la relatividad general no es posible definir la energía del campo gravitacional. Esto no quiere decir que la relatividad general no pueda hacerse compatible con la mecánica cuántica, pero hasta hoy éste sigue siendo un problema abierto.

Einstein no atacó este problema pues no miraba con buenos ojos la mecánica cuántica debido a su indeterminismo (principio de incertidumbre), él decía que "Dios no juega a los dados", pero algunas de las últimas versiones cuánticas del campo gravitatorio dan resultados que indican que, en palabras de Hawking, "Dios no sólo juega a los dados sino que a veces tira los dados donde no pueden ser vistos".

El proceso inmunológico: EL VERDADERO HEROE

Ismael Soto López*

Desde el comienzo, al cabo de 3 000 millones de años de continuo batallar y gracias a que la lucha evolutiva comenzó a desarrollarse en nuestros antepasados, y luego en cada uno de nosotros, se ha desarrollado un sistema de protección tan amplio y refinado que gracias a él hemos perdurado y seguimos adelante, pese a pulmonías, meningitis, huesos rotos, quemaduras, accidentes, etc.

Nuestros enemigos en la lucha por la existencia han sido los cataclismos y accidentes, pero los verdaderos enemigos son los miles de microorganismos presentes en el aire, en el agua y en el polvo y que tratan de sobrevivir y reproducirse a costa de nosotros.

A pesar de nuestro natural terror a lo desconocido y nuestra aversión a la muerte así como la angustia de perder a los seres queridos, hay enfermedades tan dolorosas e implacables que no nos parece tan malo el fin cuando éste llega. Tan terrible es la agonía que todos (padres, amigos, familiares y conocidos) sienten alivio cuando sobreviene la muerte y hasta nos preguntamos por qué vinieron al mundo.

Normalmente un niño al nacer y después de los dos meses comienza a tener hasta seis u ocho resfriados al año. Son en general cortos: unos días de catarro, mal humor, algo de diarrea, y luego se repone completamente. Los recién nacidos, están protegidos durante los

* Escuela de Ciencias Químicas, Departamento de Química Inorgánica, Ciudad Universitaria, 72570, Puebla, Pue.



3 primeros meses contra bacterias y virus del aire, el agua y los alimentos, por inmunoglobulinas o anticuerpos formados previamente en el organismo materno y transferidos a ellos durante su desarrollo intrauterino.

Tales anticuerpos eran los vigilantes especiales fabricados por el organismo de la madre para su propia protección y habían entrado en la corriente sanguínea del feto para protegerlo durante el parto y algún tiempo después. Pero, como cualquier otra proteína, estos anticuerpos se desintegran posteriormente, y, si el recién nacido no es capaz de elaborar sus propios anticuerpos, quedará a merced de las infecciones cuando hayan pasado algunos días más.

La deficiencia inmunógena es uno de los males que afecta a recién nacidos aparentemente perfectos, pero que están privados de nuestra herencia química vital. Desde el primer catarro, la tos seca continúa y la fiebre persiste. Lo que los padres suponen pasajero, no lo es. A fin de cuentas el niño ha sido sano antes del resfriado y absolutamente normal desde su nacimiento. Cuando el primer resfriado no desaparece, los padres llevan al pequeño con el médico, quien no halla nada anormal. Sin embargo a los pocos días el niño empeorará. Han llamado al médico nuevamente, y hasta habrán con-



sultado a otros médicos más, amigos, familiares, etc., y saben que los resfriados no se prolongan tanto. Al darse cuenta que algo anda mal, se enfrentan indignados al médico, esperando que la medicina cumpla con sus promesas. Puede que el pediatra, ofendido y desesperado, hospitalice al niño, ya sea para tranquilizar a los padres o porque él mismo ya sospecha algo.

Casi de inmediato se advertirán unas pequeñas manchas en la boca del enfermo que la mamá pudo haber supuesto como restos de cereal o leche cuajada, pero después se ve que es imposible limpiarlas.

Esta vez no es el resfriado, sino un hongo, *Cándida Albicans*, que crece sobre cualquier superficie tibia y húmeda. Los médicos pueden ver frecuentemente a criaturas con esas placas grisáceas en la boca, llamadas aftas. En la mayoría de los casos, aunque persisten, no son serias, y el organismo del niño las va haciendo desaparecer. Si se extendieran, se pueden combatir con medicamentos fungicidas para ayudar al sistema inmunógeno del infante a que actúe. Pero como todos los antibióticos, estos fármacos sólo permiten ganar tiempo. Tienen a los microorganismos en jaque, retardan su desarrollo y quizá hasta maten a unos cuantos pero a final de cuentas es el organismo el que debe de limpiar el campo de batalla, buscar y exterminar hasta el último de los microbios.

La verdad es que todos los medicamentos, las drogas todas y los adelantos de la técnica no hacen más que ayudar al sistema inmunológico del organismo. Nos dan un respiro para preparar la defensa, pero nada más. Los avances en farmacología y tratamiento de las enfermedades nos han traído una engañosa sensación de seguridad, como si ellos mismos fueran toda la solución. Pero cuando existe la deficiencia inmunógena no hay nada que pueda salvar totalmente la situación.

El hongo continúa extendiéndose, los padres del niño observan mientras la medicina falla; ven las aftas bajar de la nariz por la cara de su hijo. Las ven derramarse por el menón y el cuello. Luego comienzan a agrietarse y a sangrar; el rostro redondito y rechoncho se disfigura. El niño, hambriento, pero incapaz de comer se retuerce y llora; la boca ya empieza podrirse.

El hongo desciende por la garganta y el esófago, llega al estómago. El enfermo arroja sangre al toser.

Por entonces el médico ya debe saber qué le pasa al niño, y se lo explicará a los padres. Así el organismo del pequeño después de un combate continuo y desesperado no podrá resistir y sobreviene la muerte.



*

La Inmunología tiene alrededor de 100 años como ciencia, pero los procesos que en ella se estudian son tan antiguos como la naturaleza misma. La forma en que lucha nuestro organismo contra infecciones o enfermedades evolucionó junto con los océanos y continentes de nuestro mundo.

Podemos describir un océano primitivo que existía muchas épocas antes de que se formara el más viejo de los fósiles contenido en las rocas. Este océano probablemente tenía una concentración de sustancias como sodio, potasio, cloruro, calcio o magnesio; actualmente se considera que nuestro cuerpo imita en sus fluidos a éstos mares primigenios. Aún llevamos dentro aquellos mares, y las mismas batallas químicas que se reñían hace millones de años.

Los campos de batalla, que se extendían bajo cientos de kilómetros cuadrados de agua marina se han reducido a unos pocos centímetros cúbicos de sangre; las bahías y caletas serán hoy fluidos de los riñones o pulmones, pero la derrota significa ahora lo mismo que entonces: el fin de la historia y de cualquier posibilidad futura.

Para nosotros, aquel algo que empezó a vivir en una era tan remota fue un ser fragilísimo. Aún la ciencia concibe la vida como un mecanismo delicado en tan sensible equilibrio que hasta el menor accidente puede destruirlo. Sin embargo lo que ocurrió en aquellos antiguos mares ha perdurado. Pasaron una y otra las eras geológicas; se desplazaron grandes masas de tierra; cambió la geografía de los océanos; la atmósfera se impregnó de oxígeno; se elevaron las tempe-



raturas y volvieron a descender y volvieron a subir varias veces; pero con toda su aparente fragilidad, la vida ha persistido y ha prosperado. Cubrió la tierra y el espacio aéreo; palpita en lo más profundo de los océanos y trepa hasta las montañas más altas.

El inicio de la vida está envuelto todavía en el misterio. Quizá tardemos aún en descubrir cómo fue el origen; pero quizá el mayor secreto no sea el comienzo sino su increíble tenacidad. Esta persistencia y supervivencia del principio vital, su crecimiento y dominio son cualidades tan grandes como su nacimiento, y de ellos comenzamos a saber ya algo.



Los procesos que originaron la vida y que continúan manteniéndola comenzaron cuando la tierra recién formada se enfrió lo suficiente para que se condensara el agua contenida durante mucho tiempo como vapor. Entonces enormes aguaceros y tormentas eléctricas empezaron a inundar el globo, humeante aún y a lavar la atmósfera una y otra vez sin cesar, quitándole billones de toneladas de compuestos químicos que se habían formado en ella, precipitándolos en los nuevos océanos.

Luego vino una era de grandes batallas de supervivencia de los más aptos. No de seres vivos (no había ninguno aún), sino de moléculas de sustancias de complejidad creciente que acabarían formando

parte de los posteriores seres vivos. Fueron a parar a los océanos miles de azúcares diferentes, cientos de alcoholes, aldehídos distintos y formaron algo que se ha dado en llamar "caldo primitivo". Las moléculas que sobrevivieron en este líquido lo consiguieron gracias a la estabilidad de formación, al número y tipo de átomos que las constituían y a las afinidades químicas que unían a esos átomos. Estas luchas por la supervivencia fueron tan implacables como cualquiera que se haya tenido desde entonces; sólo los más estables y aptos triunfaron. Por esta razón, los procesos químicos que ocurren en nuestro organismo

son los mejores compuestos que la naturaleza fue capaz de formar, como los compuestos de las rutas metabólicas, los azúcares y las grasas que almacenan energía, los aminoácidos que construyen las proteínas, los fosfatos que forman membranas celulares, etcétera.

Tenemos pues, dentro de nosotros a los triunfadores de una batalla constante por la supervivencia que ha durado 3 000 millones de años.

Pero para vivir se tenía que proteger, se tenía que defender todo lo que se había ya ganado.

El primer ejemplo de ésta relación debe ser la formación de membranas. Con tal adelanto, surgió una manera clara de separar algo exterior de lo interior.

Las moléculas y enzimas que habían evolucionado en el mar abierto se cerraron. De pronto los antiguos mares se mantuvieron mediante el aparente recurso sencillo de separar minúsculas porciones de agua de mar y guardarlas dentro de las membranas, los contenidos quedaron aislados, de una vez por todas, de las cambiantes concentraciones de sales, de la creciente cantidad de minerales y del grado de acidez o alcalinidad, así como del lodo arrastrado de los continentes.

Pasarían los periodos glaciales, cambiaría el contenido de los mares, hasta el aire cambiaría, y todavía los mares prímigenios, dentro de las membranas, seguirían manteniéndose constantes, permitiendo a la vida desarrollarse en un medio al cual sus partes ya estaban bien adaptadas.

Una vez que la química de la vida quedó firmemente protegida, comenzó la evolución: el desarrollo de los seres vivos. Surgieron las necesidades de alimento y mantenimiento. Prosperaría la célula capaz de utilizar mejor las fuentes de energía, y al hacerlo dominaría a otras menos eficientes. Hasta que la última y única fuente alimenticia lo suficientemente rica y nutritiva para sustentar la vida estaba dentro de las mismas células, y por lo tanto la evolución tomó un giro violento. Especies enteras devoraron a las que estuvieron cerca, luego a su vez también fueron comidas. Los organismos que sobrevivieron debieron el triunfo no sólo a la diferencia en su metabolismo de mayor capacidad de aprovechar los alimentos disponibles, sino también a su agresividad y a sus defensas corporales. Los más rápidos se salvaron mientras morían los más lentos; continuaron existiendo los que no se podían despedazar por ser demasiado viscosos; y los que se defendían con sustancias que para otros eran venenos. Así, las batallas se iniciaron en el mar primi-

genio, cuando las primeras células se volvieron contra sus semejantes, y jamás han cesado. Por más que nos jactemos de dominio y grandeza, por los frágiles éxitos humanos, la verdadera pelea se ha llevado siempre con adversarios microscópicos, nunca de más de algunas micras de diámetro.



*

Si observamos a nuestro alrededor y examinamos las enfermedades de otros seres vivos, comprenderemos mejor la importancia de las fuerzas que requerimos para sobrevivir. Por ejemplo las bacterias, los hongos y los virus atacan a las plantas lo mismo que a los animales y el hombre. Pero las enfermedades de los vegetales son, por lo general, procesos localizados. La falta de una circulación, propiamente dicha, impide que el contagio se extienda rápidamente de un lugar a otro.

Los seres humanos no tenemos esa ventaja. La sangre del organismo circula una vez completa cada 13 segundos. Así en una hora, pasan por el cerebro y los riñones alrededor de 60 litros, y vuelven al corazón a la misma velocidad.

Esos enormes volúmenes nos permiten hacer gran ejercicio por que hacen llegar las suficientes cantidades de oxígeno y azúcares a los brazos y piernas para que nuestros músculos continúen moviéndose aun después de haber transcurrido horas de extenuante actividad.

Pero todo tiene un precio, y tanta energía y agilidad la podemos pagar muy cara. Alguna bacteria que entrara por la herida de un dedo llega al cerebro en un poco más de cuatro segundos; un neumococo de los pulmones puede alcanzar los huesos de los brazos en sólo tres segundos.

Para asegurar una protección adecuada, cuando se posee un sistema circulatorio como el nuestro, los elementos son tantos y tan abrumadores, que aturde el sólo pensar en ellos. Sin embargo, es de asombrarse, pero contamos con esa protección. Todo esto es el resumen de incontables milenios de refinadas reacciones químicas: es por un grupo de protectores químicos y de destructores de microbios y toxinas, tan rápidos e implacables, que podemos sobrevivir, aun con nuestro tamaño, nuestro sistema circulatorio y todos nuestros errores, vicios, excesos y desaciertos.



En seres sencillos como la lombriz de tierra encontramos una circulación primitiva, y en ella una clase de célula aún más primitiva. Con el microscopio podemos verla moverse lentamente por el cuerpo de la lombriz buscando sin cesar desechos de las células e ingiriéndolas. Estas primitivas células actúan como un sistema interno de recolección de basura. Pero también cumplen otra función: atacan todo ser extraño o bacteria que encuentran y persisten en su empeño hasta que alguno de los adversarios muere.

Los descendientes de estas células primitivas que nosotros hemos heredado, se llaman glóbulos blancos, leucocitos o granulocitos. Elie Metchnikoff fue el primero en observarlos y describirlos cuando trabajaba en el laboratorio de Luis Pasteur.



Tras evolucionar millones de años junto con nosotros, los granulocitos se han vuelto más agresivos y móviles, han adquirido todo un arsenal de sus propios venenos e inhibidores químicos antibacterianos. Ahora pueden destruir bacterias con mayor rapidez, y además avanzan hacia los microbios en vez de esperar a que estos se acerquen: "pueden presentar" dónde y en qué lugar se encuentra el enemigo para hacerle frente. Disponemos de varios miles de millones de ellos.

Estos glóbulos blancos, así como una variedad más especializada, los macrófagos, se producen en la médula de los huesos; allí maduran y luego entran al torrente sanguíneo, dispuestos a la pelea. Algunos "patrullan" los vasos, pero el resto está disponible para el caso de un ataque.

Un individuo humano que pese unos 70 kilos tendrá alrededor de 126 000 millones de granulocitos y macrófagos. El organismo puede ponerlos a todos en circulación mediante una orden, y en ocasiones todos son necesarios.

En un experimento sencillo se puede visualizar la actitud de dichas células: Si tomamos una jeringa y extraemos del brazo 10 centímetros cúbicos de sangre, separamos los granulocitos y los ponemos en un recipiente pequeño lleno de solución salina, se moverán sin rumbo fijo; bajo el microscopio se observan como pequeñas amibas, navegan tranquilas. Pero si se agrega una sola bacteria, una sola, al líquido, la escena cambia; los granulocitos como liebres puestas en sobreaviso, detienen de pronto su movimiento, pareciera que se vuelven más cautelosos y vacilantes y pareciera que adquieren cierto nerviosismo, van y vienen, como si adivinaran algo; de pronto, en forma casi inexplicable, uno tras otro, avanzan en forma lenta pero segura en dirección a la bacteria.

En el cuerpo, este movimiento lleva a los granulocitos de los vasos al sitio de la infección. Es la preparación de un asalto que efectuará un ejército de 126 000 millones de soldados. Este sonar interno es tan eficaz que unos minutos después de empezar una infección, los primeros granulocitos se encuentran en el sitio de la infección atacando a las bacterias, la batalla es tan fuerte y gastan tanta energía que sólo pelearán muy poco tiempo. Pero ya para entonces llegan sus hermanos mayores, los macrófagos (literalmente

su nombre significa: grandes devoradores), parecidos a los granulocitos pero con mayor cantidad de enzimas mortales, más resistencia, membranas más gruesas y mecanismos internos de más capacidad y tamaño. Cuando los macrófagos se establecen en la zona infectada y se hacen cargo del ataque, los granulocitos se retiran y los dejan luchar solos. En realidad estos son hechos que causan admiración.

Se podría tomar una gota de pus y, con ayuda del microscopio se verá a estos glóbulos blancos apoderarse de las bacterias y sujetarlas vaciando en ellas sus gránulos llenos de enzimas destructoras. Los microbios se retuercen, poco a poco dejan de moverse, y finalmente comienzan a desintegrarse.



Cuando ha pasado la infección, se podrían observar algunos de estos glóbulos blancos maltrechos y cansados, de nuevo en la circulación con trozos de membranas celulares de sus enemigos, ahora sus víctimas, dentro de ellos, para continuar su patrullaje y dispuestos para la próxima batalla.

En el sistema inmunológico del organismo, los granulocitos y macrófagos de la circulación sanguínea son sólo una parte de todo este gran sistema.

En realidad, si ellos, los glóbulos

blancos, fueran toda nuestra protección, no podríamos sobrevivir mucho tiempo; sabemos que los niños con deficiencia inmunológica tienen todos los granulocitos que necesitan, y sin embargo, mueren en unos meses a consecuencia de las infecciones.

Los granulocitos, actuando solos, no son lo suficientemente rápidos; ya que cuando se trata de una infección, unos cuantos minutos son demasiado tiempo. La bacteria, una vez que atraviesa la piel y llega a la circulación irá ya rumbo a los pulmones y al cerebro antes que el primer granulocito le diera alcance. Necesitamos algo más, y lo tenemos: la segunda parte de nuestro sistema de defensa está formada por unas proteínas especializadas conocidas como inmunoglobulinas o anticuerpos.

Apenas en un tiempo relativamente reciente se han estudiado a estos anticuerpos y se sabe que como proteínas que son, poseen la capacidad de envolver estrechamente a casi toda sustancia extraña al organismo.

Hasta ahora ignoramos cuándo una célula utilizó por primera vez sus proteínas para que se unieran a la superficie de otra diferente. Podría ser en el momento en que existieron los primeros vertebrados, en el periodo paleozóico, de la clase Agnatha (en griego significa "sin mandíbula") que ya tenían vértebras y armazón interno, pero que carecían de mandíbulas. El representante moderno es la lamprea, que en lugar de mandíbulas, tiene una serie de ventosas colocadas en hilera en una boca redonda. Puede adherirse a algún pez, roer su piel y devorar su interior. En algún momento alguna proteína cambió su estructura y comenzó a adherirse a todas las partículas extrañas que entraban a estos animales. Así el granulocito antiguo consiguió ayuda. Las lampreas y los ciclostomos han persistido todavía sin cambios en casi 400 millones de años. Podemos llevarlos



al laboratorio y descubrir en ellos el inicio de nuestro sistema de defensa inmunológico. Se sabe que si se les injertara un pedazo de piel de un individuo de otra especie a uno de estos peces, rechazará el injerto igual que nosotros lo hacemos; pero mientras nosotros lo hacemos en unas horas, en ellos el proceso lleva semanas o meses.

Nuestro organismo, a diferencia que los peces ciclostomos, no sólo fabrica una clase de anticuerpos, sino cinco. De estos cinco tipos de inmunoglobulinas (Ig), tres son las más importantes: la IgA, la IgG, y la IgM.

La piel constituye una barrera de gran efectividad contra las infecciones, de hecho, mientras no se lesiona la piel, es difícil que se produzca una infección. Pero otras capas protectoras no son tan impenetrables, como las membranas mucosas de los labios, la suave conjuntiva de los ojos, el interior de la nariz, la mucosa de la boca, garganta y el estómago. Para evitar la entrada de microorganismos por estas superficies tibias, húmedas y además abiertas, el organismo perfeccionado por la evolución, las recubre con IgA. Las inmunoglobulinas "A" atacan cualquier microbio y le cierran el paso para que no entre a la corriente sanguínea o a zonas más profundas.

Pero es posible cortar la piel y atravesar las membranas y escapar del ataque del anticuerpo A. De los miles de estreptococos capaces de atacar la garganta muchos pueden entrar a la circulación, esto es en realidad muy común, por lo tanto la evolución ha impulsado al organismo a fabricar otro anticuerpo el IgG y otros más como el IgM. Ambos están presentes en la sangre.

Hay células de nuestro organismo que fabrican anticuerpos en respuesta a ciertas señales que los microbios tienen en su superficie, por las cuales éstas células saben que se trata de "extraños". Las señales son parte de la estructura o configuración de las moléculas de las membranas de los invasores, o la composición de sustancias tóxicas. La disposición de esas moléculas es distinta de la que presentan las membranas de nuestras células y las sustancias que fabrica nuestro organismo para su propio aprovechamiento. A estas señales o marcas se les da el nombre de "antígenos" y los anticuerpos se producen para oponerse a los antígenos de la superficie de un cuerpo extraño o de las toxinas presentes. Llama la atención el que las células productoras de anticuerpos no sólo reconocen lo que les pertenece, sino que también lo que les es extraño o lo que no es suyo.



*

Nuestro organismo nunca agrade, está condenado sólo a reaccionar, debe tener ya dentro de sí a los microbios o venenos para comenzar a fabricar los anticuerpos apropiados. Esta es la gran debilidad de todo el sistema de anticuerpos. Así el cuerpo está siempre en desventaja; siempre atrasado al principio, debe reunir sus fuerzas y perseguir a un invasor que ya ha entrado en él. Y el hecho de que sobrevivimos es una prueba de la eficacia del contrataque lanzado por nuestras defensas inmunitarias.

Esencialmente, la acción de los anticuerpos es relativamente sencilla. Una vez que el invasor atraviesa las defensas exteriores del organismo, los anticuerpos que han sido fabricados para combatirlos se unen a los antígenos que están en su superficie. Cada anticuerpo se acomoda en un antígeno, aferrándose a la bacteria o el virus; es increíblemente pequeño, no mayor de una centésima de una bacteria, pero se adhiere al antígeno como el musgo a la corteza del árbol, y eso es lo que basta.

Si la sustancia extraña es venenosa, el anticuerpo puede neutralizarla uniéndose al antígeno y entonces la toxina circula inofensi-

va. Si se trata de un microbio, ocurre algo diferente: los anticuerpos no dañan ellos mismos a los microbios, pero, una vez adheridos a sus membranas, desatan una serie de acontecimientos físicos que terminan con la muerte de los gérmenes patógenos. En formas aparentemente inocentes a la catástrofe que han causado, permanecen en la superficie microbiana y observan en silencio, al parecer, un poco indiferentes, la gran revuelta que se desencadena en torno a ellos.



*

Un tercer elemento hace su aparición, quizá el más importante de nuestro sistema inmunitario: un grupo de proteínas fabricadas en el hígado que entran en la circulación en grandes cantidades. A estas en conjunto se les ha dado un extraño nombre de "Complemento", y se designan con las letras C^1 , C^2 , C^3 , . . . hasta llegar al C^9 que es el componente final.

Hemos mencionado ya la increíble tenacidad de la vida como una poderosa fuerza de la naturaleza. Ahora, si tratáramos de exterminar a todas las cucarachas de la cocina, a todos los mosquitos del jardín o el moho de una alacena comprobaríamos qué difícil es destruir al cien por ciento de cualquier grupo de seres vivos. Sin embargo, eso es precisamente lo que exigimos al organismo. Para realizar tan ex-

traordinaria hazaña aprovecha una característica vital, tan fundamental que sin ella no habría vida: la necesidad que tiene la célula de mantener su interior separado del exterior, con diferente concentración y composición dentro y fuera de ella.

A medida que la evolución fue progresando, el medio interno de las células se fue concentrando más que el líquido que las rodea. En algún momento la concentración de materiales dentro de estas células debió ser tan denso que el agua comenzó a entrar en ellas fluyendo, como siempre lo hace, del medio menos concentrado al que tiene mayor concentración de materia disuelta (fenómeno conocido por el nombre de ósmosis). Las células se hincharon, y sus estructuras internas recién desarrolladas empezaron a separarse, a flotar alejándose unas de otras. Durante millones de años así fue el comportamiento de estas entidades; esto siguió así hasta que una o más células, esforzándose en superar a las vecinas, perfeccionaron en sus proteínas que forman a las membranas a una de estas estructuras para que bombeara químicamente a determinadas sales para bajar y controlar la concentración de sustancias disueltas en el interior y así, en consecuencia, desechar el exceso de líquido que pudiera haber entrado. Esta ventaja producida por la evolución fue tan grande, que gradualmente las células que no se protegieron con una costra rígida o pared celular, comenzaron a formar una bomba o sistema de bombeo similar en sus membranas exteriores ya que les era indispensable para sobrevivir aun en diferentes medios exteriores.

Actualmente, esta situación inicial de la creciente concentración de materia dentro de las células no solo perdura sino que en ocasiones es aún más crítica. Cada célula moderna es tan avanzada y refinada, posee tantas estructuras



especializadas, que siempre el interior está más denso que cualquier líquido extracelular. Tan grande es la diferencia de concentración que, si la bomba de la membrana falla o si muere la célula, el líquido penetra en ella; entonces se hincha y, como un globo sobrellenado, estalla. Lo mismo si ocurre un accidente, un golpe, la superficie celular se perfora o rompe. Así, para cualquier célula, la igualdad de concentración en el interior con la del exterior significa la muerte.

Fue este hecho físico, la diferencia de concentración de materia en el interior y el exterior de todas las células, el que aprovechó nuestro organismo para protegerse. La naturaleza sólo debía crear el arma apropiada, y quien la tuviera quedaría perfectamente armado.

Las proteínas del sistema complemento son realmente esta arma, y la tenemos dentro, para recibir la orden a detonar cuando sea necesario; siempre preparada.

Una vez activado el sistema complemento, lo mismo que cualquier arma o explosivo, es tan ciego como potente, y si se enciende la mecha, podría perforar cualquier célula, amiga o enemiga; ya sea una bacteria o la pared de los riñones, del corazón, o los vasos sanguíneos. Como a toda arma es necesario saberla gobernar para que cumpla con su cometido. La naturaleza, para asegurarse de que actuara donde debía, dio un nuevo paso evolutivo, lo cual consiguió con ayuda de los anticuerpos.

En la actualidad no sabemos exactamente como ocurre, pero parece ser que el anticuerpo cambia de forma cuando se une físicamente con el antígeno en la superficie de un microorganismo. Esta modificación morfológica forma una zona especial en alguna parte determinada del anticuerpo, y el nuevo sitio activa al C^1 , el primero de los complementos de la circulación. Lo único que hace éste es combinarse con el anticuerpo que ya está en la superficie del microbio. Con este acoplamiento también hay un cambio de forma. Se abre un nuevo sitio de unión, y el segundo componente C^2 , que circula con la sangre, se fija en este sentido. El proceso continúa, los demás componentes se van uniendo también. Ninguno puede ser activado, aún, hasta que el componente anterior lo haya sido a su vez. Por último al activarse la novena proteína del sistema "complemento", se abre violentamente un orificio en la membrana celular de la bacteria. Todo esto, debe suceder en décimas de segundo, mucho antes de que el microbio pueda dividirse, o escapar.



*

Haciendo un pequeño resumen, antes de continuar: las diferentes partes del sistema inmunógeno se fueron descubriendo aisladas e independientemente, junto con su procedencia: los leucocitos y macrófagos se forman en la médula de

los huesos; las células plasmáticas fabrican los anticuerpos; el complemento y otra sustancia llamada properdina, se producen en el hígado. Entonces, si todos estos elementos provienen de partes tan diferentes ¿cómo es, entonces, que están relacionados (como en realidad lo están)?

La respuesta a la pregunta fue dada con el descubrimiento del sistema linfático, formado por los ganglios linfáticos. Los ganglios linfáticos están distribuidos por el cuerpo, muy cerca de todos los miembros y de toda la superficie corporal, alojando un "sistema inmunógeno" compuesto por dos colonias de células de la linfa, llamados linfocitos. Ellos ejercen el control principal, y su desarrollo y aventura de ir y venir desde su lugar de origen en los ganglios linfáticos es un hecho, en verdad sorprendente, de la naturaleza.

Si pudiéramos extraer un poco de sangre de una vena del brazo y marcar radiactivamente los linfocitos y los volvieramos a inyectar, éstos comenzarían a ascender por el brazo, entrarían en la vena cava superior (el gran conducto por el

que pasa toda la sangre de la mitad superior del cuerpo) y de allí irían al corazón, bombeados por este órgano. Todavía dentro de él, dando tumbos, pasan por sus válvulas y, como barriles arrojados a una cascada, caen a la turbulenta corriente de la aorta, pasando así a las arterias medianas y, des-

pués, lentamente llegarán a los capilares de los tejidos. Ya en los tejidos, los linfocitos, salen, de algún modo, de los vasos sanguíneos y entran en los órganos; pasan entre las células de los riñones, del hígado, de los músculos de las manos y de los dedos, de la grasa del abdomen o de las piernas. . . Después penetran a los vasos linfáticos más próximos y regresan al ganglio más cercano, lo atraviesan, dejando ahí a otros linfocitos que ya estaban allí y no circulan, y así siguen nuevamente a las venas para volver al corazón.

Si marcáramos todos los linfocitos del organismo y tomáramos una radiografía del cuerpo entero, los veríamos brillar a través de la piel en cualquier parte, pues todo el cuerpo estaría lleno de pequeños puntos cintilantes.

¿Cuál es la razón de esta ruta con viajes redondos interminables siempre hacia los ganglios linfáticos y, después, hacia, prácticamente, todos los puntos del cuerpo?

Nuevamente, la respuesta es la existencia de dos clases de linfocitos maduros. Unos se llaman Linfocitos T, y los otros Linfocitos B. En el ganglio linfático parece haber dos zonas, cada una alojando a cada clase de linfocitos de tipo B o T.

Si nos cortamos un dedo de la mano y penetran bacterias ya conocidas a través de la piel, se aferran a ellas los anticuerpos ya formados en algún ataque previo. Pero si se trata de una bacteria que nunca antes había estado dentro del cuerpo, en muy poco tiempo (en minutos y a veces en segundos) uno de los linfocitos circulantes toca al microorganismo y toma una impresión de la superficie del atacante y, actuando como mensajero, lleva rápidamente la información al ganglio linfático más próximo.

El ganglio linfático a manera de una caseta de supercarretera, recibe al "linfocito mensajero", que pasa a través del ganglio y va a la zona

de linfocitos B o de células T, confiado en su propia decisión para protegernos. Si toca a la célula B, la convierte inmediatamente en una Célula Plasmática.

Las células plasmáticas son grandes fábricas de proteínas, elaboran anticuerpos exactamente adaptados al antígeno de la información que trajo el linfocito circulante. En su paso por el ganglio linfático, el linfocito mensajero puede tocar, por separado, a miles de células B, estimulándolas a formar células plasmáticas que luego producirán miles de millones de anticuerpos específicos. Los anticuerpos, puestos en libertad se lanzarán a la zona afectada por la infección para realizar el contraataque.

Si los linfocitos mensajeros se dirigen a la zona de células T del ganglio en vez de hacerlo a la B, al tocar una célula T la transforma de célula inactiva en los llamados "Linfocitos Asesinos".



Al formarse los linfocitos asesinos, salen a la circulación sanguínea y atacan, no a los microbios, sino a la célula infectada sin ayuda de granulocitos, anticuerpos o complementos.

Conforme se iba comprendiendo el comportamiento de nuestro sistema inmunológico, comenzó a surgir, al principio, una vaga sospecha que poco a poco se fue confirmando: *todo nuestro gran*

sistema defensivo puede invertirse, de modo que se vuelva contra el mismo cuerpo. Hoy parece ser que algunas de las enfermedades más desconcertantes y graves son en realidad causadas por el sistema inmunógeno, que actúa como si se hubiera vuelto loco y nos ataca como si fuéramos sus emenigos.



*

Para curar una enfermedad y no sólo tratarla, es necesario ayudar al organismo a que sane él mismo.

Realmente el cuerpo es el verdadero héroe, no la ciencia, ni los antibióticos ni las máquinas o los nuevos dispositivos. Es el organismo y no el pulmón de acero, el que cura enfermedades tan terribles como la poliomielitis, al fabricar anticuerpos contra la vacuna administrada oralmente. La penicilina y la estreptomycinina podrán matar una buena parte de las bacterias de una herida infectada, pero es el organismo el que debe buscar y destruir hasta el último microbio patógeno.

También es el organismo el que debe encontrar la última célula cancerosa oculta que se libró de la radiación o de la quimioterapia, y exterminarla para que el enfermo pueda seguir viviendo.

La membrana celular que rodea a toda la célula, incluso las de nuestro cuerpo, es comparable a la caja de plástico del teléfono o cubierta

dura que protege los delicados circuitos internos. Algún día el mecanismo del teléfono puede hacer corto circuito, pero la caja sigue intacta.

En la naturaleza ocurre lo mismo. Se puede matar a una célula o destruir a una bacteria, haciendo que sus membranas perduren. Cuando las células mueren, la membrana exterior, puede verse al microscopio, parece una figura espectral que flota sin nada adentro.

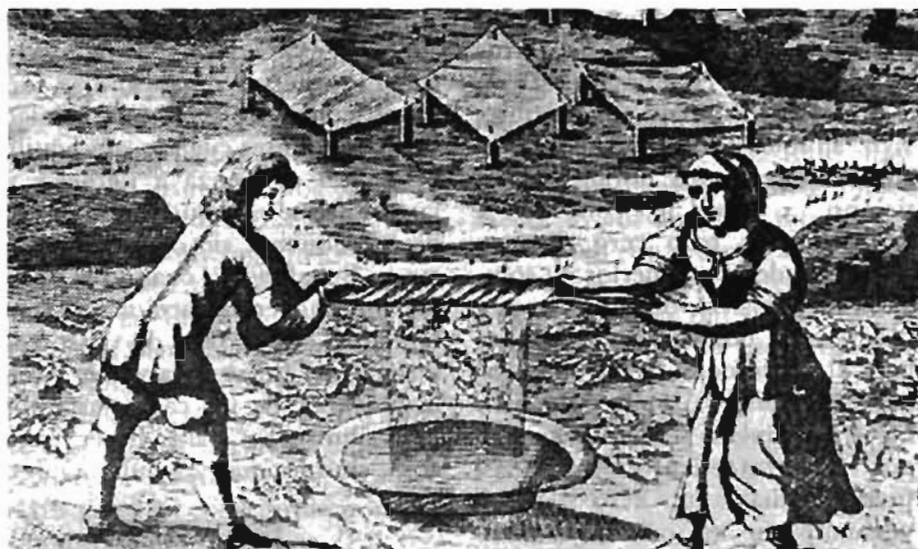
Si se inyectan capas celulares huecas de microbios muertos, el sistema inmunógeno del organismo las reconoce por lo que antes fueron y activa a todos sus mecanismos, como si estos restos extraños fueran todavía un ser vivo y muy peligroso.

El cuerpo responde sólo al contacto de las superficies, pero no tiene tiempo de averiguar si son parte de algo vivo o muerto; no puede arriesgarse esperando. A esto se debe que la inmunización dé resultados positivos: es el principio de la vacunación.

Cuando alguien se vacuna contra la viruela, la rubeola, las paperas, el tifo, la tifoidea o la tosferina, los microbios muertos o atenuados se inyectan directamente en el organismo. Aunque el microbio esté muerto, sus membranas celulares se conservan intactas estructuralmente, y el organismo responde a la inyección como si los microorganismos todavía fueran peligrosos. Fabrica anticuerpos, utiliza el complemento, estimula los linfocitos T y B, y lanza los glóbulos blancos contra un riesgo que no existe.

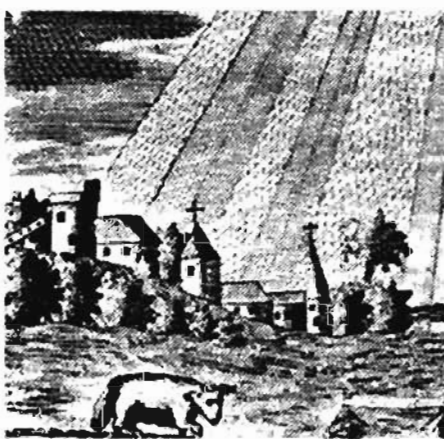
Al poco tiempo el pequeño número de microbios inofensivos queda destruido y eliminado, y el sistema inmunógeno descansa. Pero una vez estimulado, queda siempre en vigilancia.

Continúan circulando anticuerpos con características específicas para atacar a los organismos ya reconocidos, mientras que los lin-



focitos estimulados, provocados para reaccionar contra el microbio que se empleó en la inmunización, patrulla los vasos y aguardan al siguiente ataque en que se presenta la misma extraña membrana. Tal vez, la próxima ocasión atacarán en gran número microbios vivos que tratarán de producir la enfermedad.

Para entonces el cuerpo ya está en situación ventajosa. Por la inmunización previa podrá reconocer y luego destruir a los invasores antes de que logren establecerse.



*

Las pestes bacterianas fueron vencidas una por una, pero las enfermedades virales continuaron. Pasteur ya había utilizado métodos de vacunación como el de la rabia; Jenner, contra la viruela. Sin em-

bargo la poliomielitis seguía dejando niños paralíticos; la rubeola convertía a otros en seres deformes o afectados mentalmente; la fiebre amarilla arrasaba a comunidades.

No se podía hacer gran cosa, y tal como lo había logrado Pasteur con la rabia, trataban de fabricar vacunas con microbios muertos, exterminados con sustancias químicas o con calor. Pero esto no resultaba. Las inoculaciones prendían de inmediato, tan bien que producían la enfermedad mortal.

Cuando se lograron aislar los virus infecciosos, aun así, no se pudieron matar. Los ácidos, el calor o los venenos que destruían a las bacterias o los hongos no parecían afectar a éstos. Incluso, después de hervirlos o tratarlos con fenol seguían produciendo la enfermedad si se inyectaban como vacunas.

¿Qué son los virus? Extraídos del organismo y observados al microscopio, permanecen absolutamente inertes. Y sin embargo son evidentemente infecciosos, capaces de multiplicarse y de causar enfermedad si los volvemos a inyectar. Durante décadas se ha discutido si los virus son organismos vivos o muertos. Hoy hemos comprendido que son un estado intermedio. Fuera del cuerpo el virus no vive; es sólo una pequeña estructura cristalina. No consume

oxígeno, no se divide, no crece ni se mueve. Por ejemplo, el virus de la hepatitis cuando no está en el organismo humano puede sobrevivir aunque lo caliente hasta 60 grados centígrados durante algún tiempo, o que lo congelen a varios grados bajo cero. Resiste ácidos, podemos ponerlos en soluciones corrosivas de amoníaco y fenol, y, al colocarlo nuevamente bajo el microscopio electrónico, se quedará quieto, inalterado, sin mostrar ningún efecto causado por el tratamiento, como si fuera un diamante. Pero si lo inyectamos en un organismo vivo todavía logra causar la hepatitis.

Surge una nueva área de investigación cuando se descubre que los virus prosperaban en un huevo de gallina fertilizado; y cuando otros investigadores lograron hacer crecer un tejido animal fuera del organismo en varios medios de cultivo y así cultivar, también, a los virus sobre estos medios. Con estos grandes adelantos, a los virus se les ataca en cierto periodo en que demuestran actividad de vida, y así se mata, o inactiva, o se cultiva durante varias generaciones hasta que se le atenúa o se le hace perder su actividad infecciosa.

Fue vencida la poliomielitis, el sarampión, la rubeola y las paperas, y pronto la varicela.

Pero todos los esfuerzos, la sabiduría, el trabajo de investigadores entre los que se puede enlistar a Pasteur, Jenner, Goodpasture, Enders, Salk, Sabin, Weller o Robbins, no pudieron quitar de la tierra las esporas del tétanos, ni los virus de la poliomielitis o el sarampión. Sus descubrimientos no evitan que la rubeola trate de infectar a mujeres embarazadas, ni que la difteria ataque la garganta de los niños, ni que el agua esté libre de la poliomielitis. Cada una de estas enfermedades está todavía en el aire que nos rodea, en el agua que bebemos y en los alimentos, en espera del momento apropiado para atacar.

*

Cuando nuestro organismo se torna en contra de sí mismo, es algo desconcertante; cuando ese equilibrio vital comienza a perderse y las células se enloquecen, al punto de reproducirse sin objeto, sin oficio ni beneficio, o cuando el sistema inmunógeno reacciona violentamente en contra de nosotros mismos, el fin se deja venir, y, en la mayoría de los casos, estamos imposibilitados para hacer gran cosa, sino esperar y ayudar a nues-

tro cuerpo a que reaccione en la mejor forma posible.

El concepto de enfermedad autoinmune —como se llama— resulta en la actualidad un término imprescindible. Sabemos, por ejemplo, que la fiebre reumática es uno de estos grandes males. Comienza con una infección en la garganta causada por bacterias conocidas como estreptococos.

La fiebre reumática, afecta a las articulaciones y a las válvulas del corazón, produce erupciones en la piel, es resultado de una reacción



Departamento de Matemáticas del CINVESTAV

• Una planta de investigadores activa, enriquecida con profesores mexicanos.
• Un ambiente estimulante para los estudiantes que ha permitido la formación de un buen número de Maestrías y Doctorados en Ciencias.
• Una biblioteca especializada, en constante crecimiento.
• Un microcomputador IBM-PC y acceso a otras computadoras del Centro.

Profesores y áreas de investigación

- J. Adem topología algebraica
- E. Aronson topología algebraica
- L. Aubrey topología algebraica
- O. Bello variable compleja
- S. Oller topología algebraica
- L. Garza variable compleja
- S. Hahn-Goldberg ecuaciones diferenciales parciales
- D. Hernández-Lemus procesos estocásticos
- E. Itzhak topología algebraica
- G. Pastor topología algebraica
- M. Porter variable compleja
- E. Ramírez de Arellano varias variables complejas
- J. J. Rivera análisis
- G. Rodríguez variable compleja
- M. Tena geometría algebraica
- C. Vargas análisis numérico
- J. J. Vargas álgebra
- J. J. Vargas álgebra C*
- A. Vojtechovsky álgebra lineal

maestría y doctorado en matemáticas

Requisitos de admisión

- Para la Maestría se requieren tener licenciatura equivalente a una licenciatura en Matemáticas después de haber cursado las asignaturas de: Álgebra, Geometría, Cálculo y Estadística.
- Para el Doctorado se requieren tener la Maestría o equivalente en matemáticas o una licenciatura en matemáticas.
- La admisión se determina por medio de exámenes de ingreso.

Becas

- Se otorgan becas a los estudiantes que se inscriban en la Maestría o Doctorado.

Calendario

- Los programas se desarrollan por semestres: primer semestre (septiembre a junio) segundo semestre (septiembre a mayo).

Información:
Departamento de Matemáticas, CINVESTAV-IPN
Carretera Anteroad. 1500, San José del Valle,
México, D.F.
C.P. 07000
Teléfono: 5623 1111, 5623 1112, 5623 1113, 5623 1114



Centro de Investigación
y de Estudios Avanzados del IPN

inmunógena dirigida contra los estreptococos de la faringe. Por alguna razón, las células T y B producidas contra la infección, confunden los músculos del corazón y las articulaciones del individuo con los invasores, y los atacan tan violentamente como a las bacterias.

Los investigadores creen que existe alguna semejanza antigénica (tal vez alguna lejana herencia evolutiva) entre los músculos del corazón y los estreptococos. Por eso los anticuerpos producidos contra las superficies microbianas se confunden y, atacando las membranas celulares de su propio organismo, dañan las articulaciones y el corazón, y después de causar parálisis, el individuo llega a la muerte.



*

Con la evolución surge el desarrollo de los seres vivos que comenzaron a mantener su continuidad y su diversidad hacia las generaciones futuras. Con la continuidad —la situación es llamativa, por el hecho de que se produjeron leyes que gobiernan generación tras generación, milenio tras milenio—, el que las células se reproduzcan a sí mismas exactamente y de la misma manera. Todo el archivo evolutivo de las células, fue “almacenado” en forma de sustancias químicas en una porción, que

por su importancia fue llamado “núcleo celular”. El núcleo celular está constituido por sustancias que contienen un código químico que gobierna las características de las células futuras. Estos factores son denominados actualmente “genes”, término que significa generar. Existen genes que determinan el color de las flores, o los que controlan las facciones características de los miembros de una familia.

Los genes están agrupados dentro de las estructuras conocidas como cromosomas.

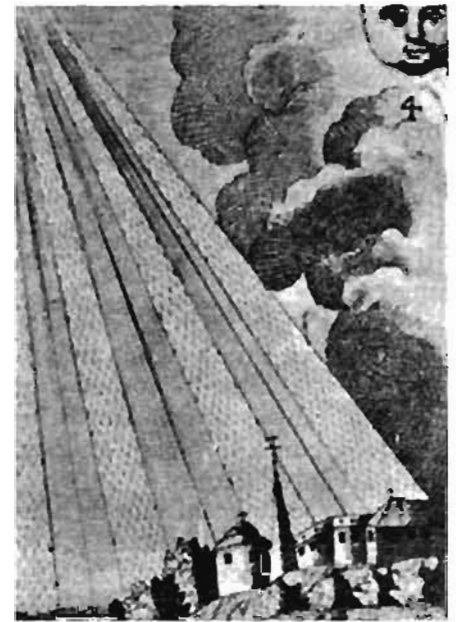
Un gen está constituido por dos componentes principales. Tal vez la mitad de él sea de naturaleza protéica, pero la otra mitad no lo es. Esta porción es ácida, conocida como Ácidos Nucléicos. Según como estén ordenadas las partes constitutivas del ácido nucleico será el “mensaje” que estará almacenado en dicha estructura y que dará las características genéticas de los individuos.

A medida que el peligro de las enfermedades infecciosas disminuye, aumenta la incidencia de otros tipos de enfermedades. Mucha gente, que hace un siglo hubiera muerto joven de tuberculosis o difteria, de pulmonía o tifus, hoy vive el tiempo suficiente para morir de dolencias cardíacas o de cáncer. De hecho, el cáncer ha sucedido a la peste o la viruela como plaga que azota al hombre. Es como la espada que pende sobre nosotros, dispuesta a caer sobre cualquiera sin previo aviso.

En realidad el cáncer constituye un grupo de muchas enfermedades (se conocen alrededor de trescientos tipos) que afectan de distintas formas a diversas partes del organismo. Pero la perturbación esencial consiste siempre en lo mismo: desorganización y crecimiento incontrolado de los tejidos afectados.

Los trastornos mentales, comúnmente conocidos como “locura” pueden ser causados por diversos factores, que van desde el hambre y la desnutrición,

hasta la tensión nerviosa constante, pasando por lesiones físicas, morales, acción de sustancias químicas, problemas sentimentales, etcétera. Así las células que constituyen un organismo pueden verse afectadas por diversos factores que les causen una “locura celular”, que traigan como consecuencia el crecimiento incontrolado de la población celular de un tejido.



El tamaño de un órgano y el número de células que contiene normalmente se conservan con valores más o menos constantes y óptimos gracias a los mecanismos de control que regulan la actividad de reproducción celular. Los factores químicos tienen los papeles más importantes en este panorama. El control general total depende del sistema compuesto por los factores de crecimiento e inhibición a nivel celular. Así, por ejemplo, células muy especializadas liberan factores inhibidores del crecimiento en número de células; a estas sustancias se les ha llamado Chalonas (del griego *Chalan*, hacer lento); ellas controlan el tamaño de algunos tejidos. Dentro de las células los ácidos nucleicos son, quizá, otro eslabón de la cadena de químicos que actúan sobre el control de la reproducción celular.

Los mecanismos de control están ajustados para permitir la reparación de muchos tejidos cuando se lesionan: la proliferación y restitución continua de las células de los tejidos que sufren un desgaste natural, como las células de la piel o la mucosa intestinal. Así como también la llamada "hiperplasia" de tejidos, o sea, el crecimiento de tejidos en respuesta a un aumento de las necesidades funcionales, como el caso de los músculos de un atleta.

El nombre cáncer (del latín, que significa "cangrejo") procede del hecho de que Hipócrates y Galeno suponían que la enfermedad hacía estragos a través de las venas enfermas, como las patas de un cangrejo.

"Tumor" (del latín "crecimiento") no es en forma alguna sinónimo de crecimiento canceroso; responde tanto a crecimientos inofensivos, como verrugas y lunares, como al cáncer mismo.

Cuando los mecanismos de control se vuelven deficientes y hay proliferación excesiva de células, que continúa en forma indefinida sin relación con el crecimiento o reparación normal de los tejidos, se tiene una "neoplasia" (significa, "nuevo crecimiento"), que origina una masa de tejido anormal o "neoplasma", también llamado tumor.

Suelen existir algunas formas de crecimiento anormalmente rápido que no se consideran como tumores neoplásicos. Son como consecuencia o respuestas a estímulos irritantes crónicos claramente definidos. Por ejemplo: la irritación prolongada o la infección crónica de las vías urinarias o respiratorias, o del estómago, pueden causar proliferación del tejido escamoso en forma excesiva. Estas proliferaciones desaparecen cuando se elimina la fuente de irritación crónica. Los crecimientos excesivos de tejidos, atribuidos claramente a una deficiencia metabólica o a una enfermedad hormonal



no se consideran neoplasia. Por ejemplo, la hipoxia o falta de oxígeno en el aire, aumenta considerablemente el ritmo de reproducción de glóbulos rojos de la sangre.

Los tumores se clasifican en dos tipos principales: benignos y malignos. Los tumores benignos proliferan localmente y están compuestos de células diferenciadas semejantes a las del tejido de donde provienen.

El borde del tumor es muy preciso. La presión sobre los tejidos vecinos suele hacer que reaccionen formando una cápsula fibrosa alrededor del tumor. Si lo observáramos al microscopio veríamos a muy pocas células dividiéndose. Un ejemplo típico de tumor benigno es el llamado, fibroma uterino, que forma una masa redonda en la pared del útero; puede permanecer ahí durante años sin causar efectos verdaderamente perjudiciales. Si se descubre, se puede eliminar fácilmente mediante cirugía. En algunas ocasiones pueden causar efectos mecánicos como obstrucciones o presiones viscerales o nerviosas.

Los tumores malignos no son capsulados, y sus bordes no son bien definidos: hay proyecciones de células del tumor que se extienden desde el "cuerpo" central a los tejidos vecinos como las patas de un cangrejo. Las células están menos bien diferenciadas que las que les dieron origen y muestran una gran actividad reproductiva. Se diseminan e invaden tejidos vecinos. Si llegan a invadir vasos sanguíneos o linfáticos, las células son transportadas rápidamente a otras partes del cuerpo, pudiendo proliferar y formar tumores secundarios; o sea, fundar en otras regiones otros nuevos tumores. A este proceso se le conoce como "metástasis".





*

Mientras los linfocitos T pueden mantener a raya el crecimiento celular, el organismo puede defenderse, usando toda su fuerza inmunógena, evitando la temible metástasis. Incluso podemos ayudar a ganar tiempo, atacando al tumor con radiación y así matar a un buen tanto de células "locas", o extirparlas para que el número de células a controlar sea menor; pero siempre quien debe hacer el trabajo es el propio organismo. Tiene que reaccionar para evitar la proliferación de células que acaban de reproducirse y ya están nuevamente en división para generar a otras células que aunque todavía no maduran, ya están produciendo a otras más, que todavía no toman una forma o consistencia definida y continúan con la generación de otras y otras "células" más...

El cuerpo ha puesto a todo su sistema defensivo en acción, pero, obviamente, si se ha desarrollado un tumor, la respuesta inmune ha resultado inadecuada para combatirlo. Esto es evidente cuando se han usado sustancias llamadas Inmunosupresoras que (se aplican cuando hay necesidad de algún trasplante de órganos, o cuando hay un defecto hereditario de la

capacidad inmune) se acompañan de un índice mayor de tumores; y la frecuencia más alta de enfermedades neoplásicas en personas de edad avanzada puede deberse, en parte, a una insuficiencia gradual de la capacidad inmune. Se ha observado que el número de tumores malignos en garganta o abdomen es mayor en individuos a los que les fueron extirpadas las amígdalas o el apéndice. En estas operaciones se extirpó tejido linfóide. Por otra parte, se ha comprobado que la frecuencia de tumores es menor del promedio en personas que sufren algunos trastornos alérgicos crónicos, por ejemplo, asma alérgica, posiblemente porque entonces los mecanismos inmunes son estimulados continuamente.



*

Los minerales, vitaminas, enzimas y hormonas, son sustancias que, diseminadas por el organismo, deciden de forma tan poderosa la vida o la muerte de los tejidos del individuo. Son como un conmutador general que despierta una ciudad a la actividad, o como la

válvula reguladora que controla la maquinaria. Todas ellas, se encuentran en nuestro cuerpo en cantidades pequeñísimas, y se mantienen interrelacionadas de una manera tan exacta que el control entre ellas es finísimo. Cualquier aspecto que desequilibre esta relación, provoca un gran desequilibrio general en todo el organismo. Así, se pueden enlistar gran cantidad de factores que desencadenan la formación de tumores malignos, que van desde agentes físicos: luz ultravioleta, rayos X, o radiactividad; agentes químicos: humo de cigarro, gases derivados del petróleo, hollín, asbesto, metales, fertilizantes, etc.; o mecanismos hormonales: cuando hay trastornos glandulares, uso de anticonceptivos hormonales, obstrucción en el desarrollo de las glándulas, etc. Así, como consecuencia, todo esto, junto con las lesiones en el sistema inmunógeno, traen un desequilibrio generalizado en el finísimo mecanismo de la vida.

El cáncer es quizá la enfermedad más diseminada. Afecta a plantas y a todas las especies animales; a diferencia de las enfermedades que dependen de la acción directa de agentes exteriores como bacterias, venenos y lesiones. Es una enfermedad celular, en la cual una nueva raza de células alteradas se desarrolla como consecuencia de algún desequilibrio a nivel intracelular. Esta raza celular prolifera rápida, constantemente, y transmite su capacidad de multiplicación a sus descendientes, perpetuando de ese modo el estado anormal; incluso se diseminan e invaden otros tejidos y hasta órganos vitales. Si el tumor invade vasos sanguíneos o linfáticos, las células malignas son transportadas rápidamente, prácticamente a todo el organismo, con información genética de "locura celular". Invaden todo, llegando, incluso, a bloquear los mismos ganglios linfáticos donde reside la defensa; y con ello, como cuando el cuartel general es invadido y

los dirigentes son hechos prisioneros, la resistencia se ve anulada. Las células cancerosas crecen, invaden y destruyen el tejido normal hasta que finalmente acaban con la integridad del organismo y originan la muerte.



*

Durante los últimos años ha habido un gran avance en el conocimiento sobre reproducción celular y, por lo tanto, hay progresos fundamentales en el tratamiento de las enfermedades de tipo canceroso.

En el tratamiento del cáncer se han utilizado métodos que van desde la cirugía e irradiación para casos de tumores localizados, como ataque por sustancias químicas (quimioterapia) para tumores que hayan formado metástasis. Pero hasta ahora, estos métodos utilizados, principalmente la quimioterapia, producen resultados paliativos más que curativos, para cánceres generalizados.

Muchos de los medicamentos anticancerosos más potentes actúan en fases específicas del ciclo celular y por ello sólo son activos contra las células que se encuentran en proceso de división. Según esto, las células más susceptibles al trata-

miento químico son aquellas con un ritmo de reproducción alto, o sea, en etapa de división celular. Del mismo modo, los tejidos normales que proliferan rápidamente como la médula ósea, el pelo y el epitelio del intestino, están sujetos a daños por parte de estas potentes drogas. Así, los pacientes que son tratados con medicamentos anticancerosos se ven disminuidos en la producción de sus propias células sanguíneas al ser afectada la médula de los huesos, hay pérdida del pelo, y la absorción de los

nutrientes en el intestino es deficiente. Como resultado de un tratamiento quimioterápico, una persona ya atacada por el cáncer comienza a verse aún más demacrada por la desnutrición y la anemia; la falta de pelo, el vómito y el malestar general hacen que se convierta en un ser debilitado, inseguro, casi un fenómeno deforme ante los ojos de los que lo rodean. Su muerte ha sido sólo aplazada. Se puede decir que su vida "útil" ha sido prolongada gracias al tratamiento dado.

**CENTRO DE INVESTIGACION
Y DE ESTUDIOS AVANZADOS
DEL IPN**



MAESTRIA EN CIENCIAS AREA MATEMATICA EDUCATIVA

OBJETIVO
Formar especialistas cuyo trabajo esté relacionado a la investigación sobre los problemas de la enseñanza—aprendizaje de las Matemáticas.

La Maestría se ofrece en cinco áreas de investigación partiendo de un tronco común. El plan de estudios puede esquematizarse como sigue:

Tronco Básico

↓

Tronco Propedéutico

Áreas de Investigación

- Nivel Superior
- Nivel Medio Superior
- Niveles Básico y Medio Básico
- Nuevos Métodos de Enseñanza
- Teórico

REQUISITOS:
Aprobar el examen de admisión y:

- tener el 100% de los créditos de la licenciatura en Matemáticas o áreas afines, o
- tener el 100% de los créditos de Normal Superior en Matemáticas, o
- tener el 75% de los créditos de la licenciatura en Matemáticas o áreas afines y un año de experiencia docente en Matemáticas, o
- tener el 50% de los créditos de la licenciatura en Matemáticas o áreas afines y dos años de experiencia docente en Matemáticas.

Las solicitudes para el examen de admisión se reciben durante los meses de enero y julio para el primero y segundo semestres del año, respectivamente.

El examen de admisión se realiza durante la primera quincena de febrero para el primer semestre del año y durante la primera quincena de agosto para el segundo semestre del año.

DIRECCION
Escuela de Matemáticas
Carretera 270, Col. México
06200 México, D.F.
Teléfono 543 0710 y 543 0713

FISICA SOLAR, FISICA CORONAL, LAS RELACIONES SOL-TIERRA

Jorge Pérez-Peraza*

Física Coronal – Eclipses Solares – Física de la Atmósfera

*Todos los hombres han nacido bajo la estrella Sol
viviendo de su calor, bañados en su luz;
y son las estaciones las que gobiernan la Tierra,
humilde esclavo de un astro jamás igualado,
que nos da el día y sus mil beneficios,
engendra la vida y nutre a la naturaleza;
como la Tierra que sigue los caminos que le ha impuesto,
Júpiter y Saturno, y Marte, Venus, Mercurio
están sometidos a sus leyes postrados a sus rodillas. . .*

“Tercer Epístola sobre la filosofía de Newton”
Jean D. De l’Isle (1672-1719)

Concerniente a los eclipses solares han sido escritos un cierto número de artículos muy ilustrativos, en idioma castellano, principalmente en relación al eclipse total de 1970 y el eclipse anular de 1984. La mayoría de estas publicaciones se orientan a explicar la dinámica misma del fenómeno de ocultación, coordenadas geográficas, fechas y horarios de la trayectoria de la umbra sobre la superficie de nuestro planeta; a describir todos esos aspectos tan espectaculares asociados al fenómeno (anillo de diamantes, perlas de Bailey, contactos, etc.) así como las consecuencias psicológicas sobre algunos sectores de la población, conocimientos que en general ya se manejan desde la remota antigüedad. Sin embargo, escasamente se han abordado las razones por las que actualmente los científicos, particularmente los físicos solares, otorgan una importancia fundamental al estudio de los eclipses solares totales.

Anteriormente a la era espacial, muchos logros científicos en física solar, geofísica, astrofísica, aeronomía y meteorología fueron alcanzados en asociación a eclipses solares totales. Por ejemplo, el descubrimiento del elemento helio en la atmósfera solar, en el eclipse del 18 de agosto de 1868, en la India.

* Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica; Tonantzintla, Puebla.



Figura 2. La luz solar que se asoma a través de los valles y cima del borde de la Luna produce esos pequeños puntos brillantes conocidos como Perlas de Bailey (eclipse de noviembre 12, 1966).

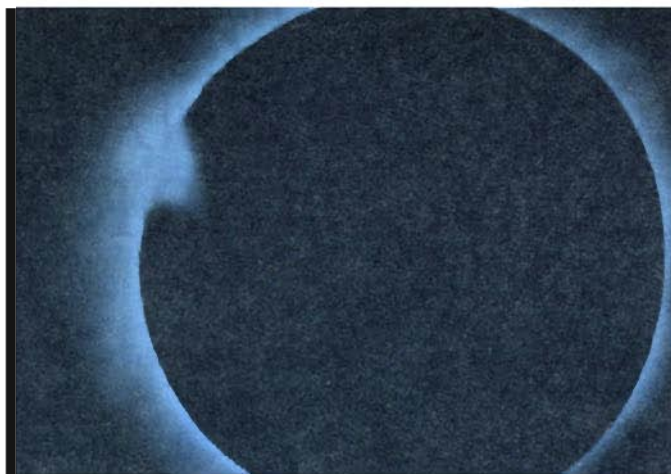


Figura 1. Efecto de Anillo de Diamante al inicio de la totalidad del eclipse de junio 30, 1973.

Ahí mismo, en el eclipse del 12 de diciembre de 1871, el astrofísico francés Janssen descubrió las líneas de Fraunhofer del sodio en la corona; y años después, el 22 de enero de 1898, Evershad obtuvo el primer espectro ultravioleta de la cromosfera y de las prominencias. Otros resultados relevantes en ocasión de eclipses totales han sido: la corroboración, cada vez con medidas más refinadas, de la teoría especial de la relatividad de Einstein; el descartar la presencia de un supuesto planeta entre Mercurio y el Sol; el medir la tasa de desaceleración de la rotación axial de la Tierra y la aceleración secular de la Luna; la separación de los 3 componentes de la corona, capas K, E, y F (Fig. 8 en *ICyT* núm. 92, 1984), etcétera.

En realidad, los logros más importantes alcanzados con los eclipses residen en que la mayor parte de nuestro conocimiento acerca de la estructura de las diferentes capas de la atmósfera solar superior y la fenomenología que tiene ahí lugar, provienen de la información recolectada durante los eclipses; cuyo total no excede a un lapso de media hora de recolección de información: algunos segundos en un evento, otros segundos más en otro evento. . . en el curso de un siglo, aproximadamente.

Surge entonces la pregunta ¿cuál es en el presente el interés científico de los eclipses solares, para el físico solar, cuando estamos viviendo la nueva era espacial, si en realidad la combinación de técnicas radio-astronómicas de alta resolución con experimentos en naves espaciales, como el Skylab, transportando coronógrafos, han sido extremadamente útiles para la observación continua, sinóptica, de los detalles cotidianos de la corona solar? Al efecto, para el amateur, la observación de los anillos de diamantes (Fig. 1), las perlas de Bailey (Fig. 2), las sombras volantes, los diferentes contactos, serán siempre un espectáculo fascinante. Para algunos científicos el interés reside en las reacciones biológicas de plantas y animales,

para otros más en experimentos repetitivos para refinar resultados ya conocidos; pero, para el verdadero trabajo de frontera ¿qué interés tiene si el físico solar puede producir eclipses solares a voluntad con los coronógrafos? La respuesta a estas preguntas es que existe una ventaja neta de los eclipses naturales sobre los artificiales: con el bloqueo artificial de la luz solar, producido con un coronógrafo, el brillo del cielo alrededor del limbo puede disminuir sólo a una millonésima de la brillantez del disco aproximadamente, tal que en el mejor de los casos solamente la brillante corona interna, hasta 1 radio solar, puede ser observada; en tanto que cuando la Luna bloquea la luz solar, la brillantez del cielo cerca del limbo cae a niveles tan bajos como una billonésima del disco solar, o incluso niveles menores, y uno puede entonces observar los tenues detalles de las estructuras coronales hasta una extensión de 4 a 5 radios solares.

Dado que misiones espaciales, como la futura "Sonda Estelar" (Starprobe, Fig. 3), que penetran la atmósfera solar a distancias del orden de (3-10) radios solares para tomar datos *in situ*, no son acontecimientos



Figura 3. La "sonda (solar) estelar" concebida para estudiar las regiones inexploradas de la atmósfera solar donde el viento solar se vuelve supersónico (3 a 60 radios solares). Esta concepción artística pretende ilustrar el perihelio de la nave a aproximadamente 2.1 millones de km de la superficie solar.

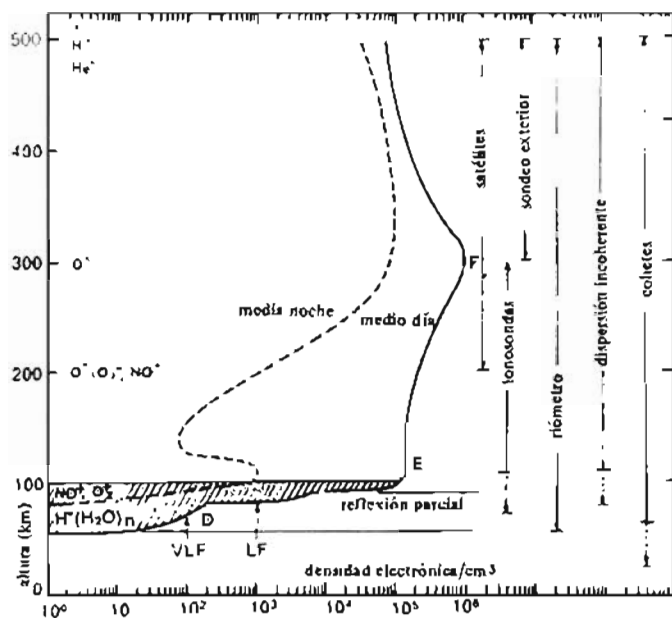


Figura 4. La ionosfera terrestre, consistente de electrones e iones se extiende sobre la mayor parte del medio ambiente espacial cercano a nuestro planeta. La mayor parte de esta extensa región está sujeta a varios grados de cambios durante un eclipse solar. En particular en la región F y en la parte superior de la ionosfera los efectos son más drásticos. Algunas técnicas experimentales para estudiar la ionosfera son indicadas en el lado derecho del diagrama.

que puedan ser financiados con mucha frecuencia y por muchos países, y en tanto que los eclipses solares totales ocurren con una frecuencia promedio de 72 por siglo, entonces, los eclipses siguen siendo la fuente primaria de datos para investigaciones cuantitativas, que involucren estudios fotométricos del continuo, intensidad y perfiles de las *líneas espectrales de emisión* —que son esenciales para estudiar variaciones espaciales de temperatura y densidad electrónica, estructuras de campo magnético, polarización, etcétera.

Es interesante recordar que la *luz visible* está constituida de un continuo de colores, tales como violeta, índigo, azul, verde, amarillo, anaranjado y rojo; este continuo es llamado comúnmente *luz blanca*, y de hecho el color blanco que toma la corona proviene de la luz visible, fotosférica, que ha sido dispersada por los electrones libres en la corona, sin cambiar su color (la dispersión deflecha los fotones pero no modifica su longitud de onda). Superpuesto a este continuo hay cientos de líneas oscuras, las llamadas *Líneas de Fraunhofer*. Cada línea representa la rúbrica del estado atómico de un cierto elemento presente en la atmósfera solar y proporciona información acerca de su estado de ionización. La intensidad y ancho de estas líneas revelan la temperatura y densidad de los elementos. La posición y polarización de las líneas dan información acerca de las in-

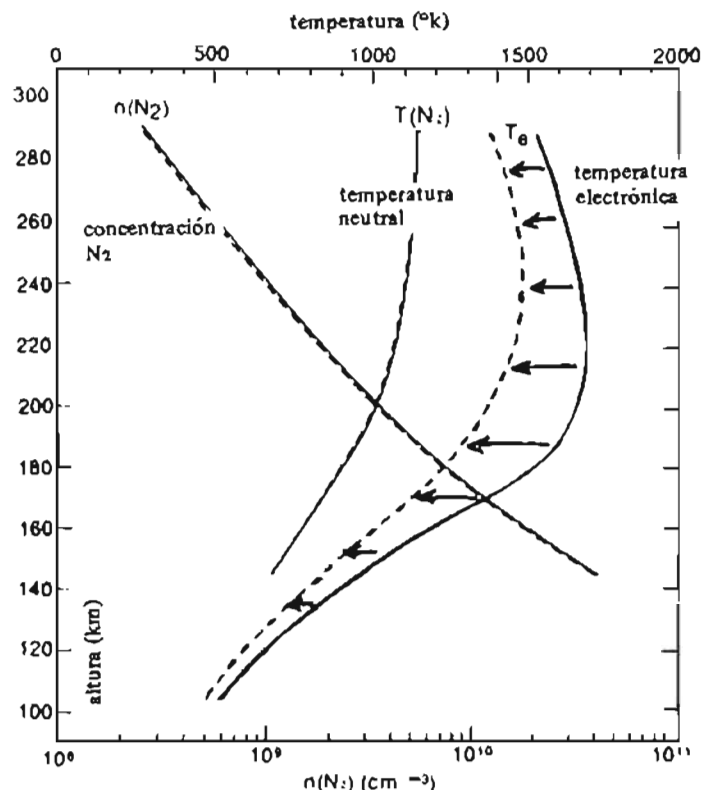


Figura 5. Medidas de densidades y temperaturas mediante cohetes durante el eclipse de 1970. Las curvas sólidas y las punteadas representan mediciones para 45% y 84% de oscuridad. No se observaron cambios en la densidad y en la temperatura del N_2 atómico; pero sí un considerable decrecimiento en la densidad electrónica.

tensidades de campo magnético y movimientos de masa. Sin embargo, puesto que las observaciones coronales durante un eclipse están severamente restringidas en tiempo, no se obtiene información acerca de los cambios dinámicos que tienen lugar; no obstante, debido a las elevadas temperaturas, la corona es como un laboratorio de física de plasmas, donde una gran cantidad de información, referente a las interacciones de partículas de muy alta energía con la materia y los campos magnéticos, puede ser inferida durante los efímeros lapsos de observación de un eclipse. En concreto, para estudios de la cromosfera y corona en un perímetro inferior a 5 radios solares, la mejor opción siguen siendo los eclipses solares naturales.

En lo concerniente a los estudios sobre los efectos de los eclipses solares en la atmósfera terrestre, éstos están básicamente dirigidos hacia el entendimiento de la variación en la absorción de la radiación (UV y rayos-X principalmente) y de la química local, a medida que la luz del sol se oscurece gradualmente.

La atmósfera se extiende varios miles de kilómetros en el espacio. A *grosso modo* la región ionizada de la atmósfera, la *ionosfera*, se extiende por arriba

	FOTONES		PARTICULAS	
	Visible	ultravioleta, rayos X	baja energía (viento solar)	alta energía (rayos cósmicos solares)
tiempo de recorrido	8 mn	8 mn	~ 2 días	$\Sigma v / c \sim 3.5$ horas
potencia media (W m^{-2})	1 400	~ 1	~ 10^{-3}	no existe valor medio (sólo fenómenos eruptivos) dinámica del orden de $10^4 - 10^5$
variación a lo largo de un ciclo solar	< 1 %	0.3 — 500	~ 1 — 10	
efectos en la atmósfera	calentamiento de la atmósfera	calentamiento de la alta atmósfera modificación del contenido en ozono	calentamiento por transferencia de las zonas aurales	cambio de composición iónica
efectos en la ionosfera	—	ionización en todas las alturas	ionización en las zonas aurales	ionización a baja altura principalmente en los casquetes polares
efectos en la magnetosfera	—	—	creación de la magnetosfera auroras boreales	cinchas internas de radiación
consecuencias prácticas	equilibrio térmico de la Tierra	• modificación de la composición de la atmósfera media (clima?) • frenado de los satélites • perturbaciones de las comunicaciones por radio a larga distancia	• modificación de la circulación atmosférica (?) • perturbación de las comunicaciones por radio a larga distancia • corrientes inducidas en el suelo y daños producidos en las líneas de alta tensión, de teléfono, en oleoductos, etc • carga de los satélites	• modificación de la química de la atmósfera media (clima?) • interrupción de las comunicaciones por radio en los casquetes polares • daños producidos en la electrónica de los satélites

Quadro 1. Emisiones electromagnéticas y corpusculares del Sol y sus efectos sobre el medio ambiente (acorde a R. Gendrin).

de 60 km, en tanto que por abajo de esta altitud se encuentra la atmósfera no ionizada, aunque cierta cantidad de iones positivos y negativos ($\leq 10^3/\text{cm}^3$) están presentes. Además, durante todo tipo de disturbio de origen solar, un gran número de electrones son generados en estas capas interiores, de tal suerte que, de manera global, la atmósfera entera puede considerarse como una mezcla de electrones, iones y partículas neutras, en proporciones que varían acordes a las diferentes altitudes (Fig. 4). Muchas de estas partículas neutras son el resultado de reacciones químicas complejas: los electrones, iones y muchas de esas moléculas son primariamente producidas por la interacción de la radiación solar con la atmósfera.

El principal interés durante los eclipses solares es el de monitorear la manera en que reaccionan las diferentes capas de la atmósfera superior, conforme se oscurece el Sol, así como el entender la naturaleza de la radiación responsable de la conformación de las diferentes capas ionosféricas. Se hizo evidente, desde el eclipse del 31 de agosto de 1932, que los eclipses tienen siempre un efecto más marcado sobre las capas D y E de la ionosfera. Así también se ha hecho patente un fenómeno inesperado: la “función eclipse” (el cociente del flujo solar instantáneo, a una longitud de onda dada, con respecto a su valor no-eclipsado) no varía como se esperaba, de tomar el valor de la unidad en el primero y cuarto contacto y

cero en el segundo y tercer contacto. En otros términos, aun cuando el disco visible está completamente cubierto, una (10-15)% de la radiación ionizante está presente, indicando que parte de esa radiación ionizante proviene de fuera del disco solar. Así, también, la ionización irregular y sus efectos sobre las capas D y E durante la fase parcial del eclipse indican que la radiación ionizante no proviene de manera uniforme del disco solar, y que existen dominios de frecuencias en que esas radiaciones se concentran.

Durante una campaña de sondeos por cohetes llevada a cabo en tres eclipses —el 20 de mayo de 1966 (Grecia), 12 de noviembre de 1966 (Brasil) y 7 de marzo de 1970 (Islas Galápagos)— se puso en evidencia que la concentración electrónica decrecía drásticamente a todas altitudes, en tanto que el decrecimiento de la concentración de iones positivos no era tan marcada. Las capas superiores de la atmósfera fueron estudiadas mediante señales de muy alta frecuencia por satélites geostacionarios: como las radio-ondas atraviesan toda la ionosfera, los efectos observados son integrales. Se observa que la relajación electrónica toma unos cuantos minutos después del eclipse, a la altura de 80 km, mientras que en la capa F, a una altura de 300 km, se prolonga un par de horas. La temperatura electrónica sufre también un decrecimiento correspondiente, en tanto que la densidad y temperatura molecular de la atmósfera no

sufre cambios perceptibles en el lapso de un eclipse (Fig. 5). Otro efecto interesante a estudiar consiste en que la umbra solar viaja a velocidad supersónica a través de la atmósfera baja, a razón de 1600 km/h en el ecuador, hasta 3 020 km/h en latitudes superiores. Esto debe causar que el gas atómico atmosférico emita ondas de gravedad internas, a manera de formar una onda-arqueada cerca de la umbra. Tales ondas han sido aparentemente detectadas en los eclipses recientes, aunque existe aún una gran controversia al respecto.

Una gran parte de los experimentos atmosféricos durante los eclipses están dirigidos a profundizar en el conocimiento de los procesos químicos que involucran el ozono en la estratosfera, que es la capa de la atmósfera de la Tierra en que el ozono alcanza su mayor concentración. Se pretende estudiar los procesos que determinan posibles cambios en la concentración del ozono y otros constituyentes menores, lo que ocurre con cierta frecuencia, como ocurrió durante la *fulguración solar* de agosto de 1972, ya que ello permite entender algunas intercorrelaciones climáticas y estudiar los incrementos de radiación ul-

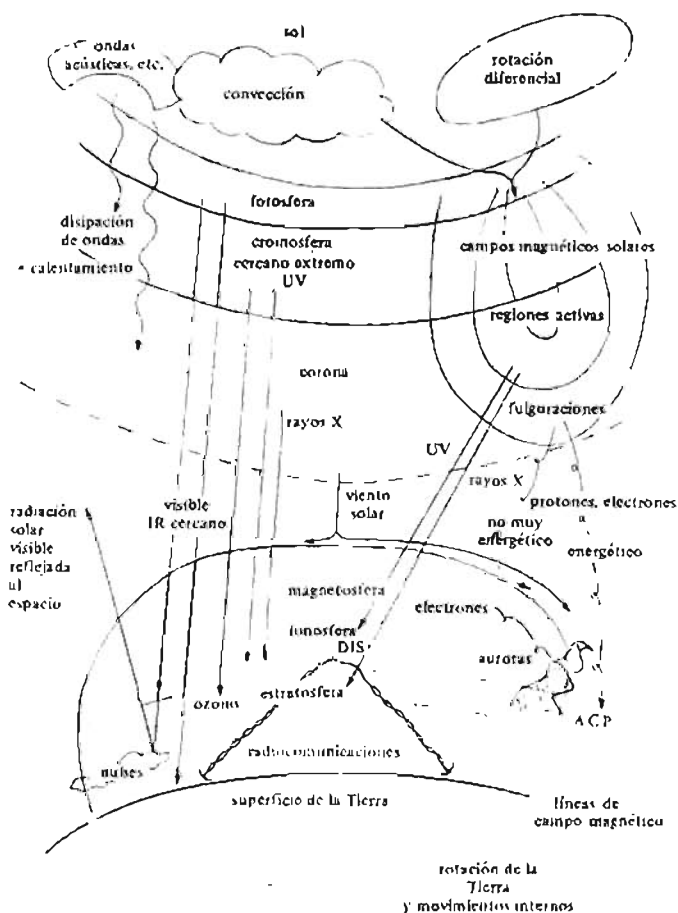


Figura 7. Balance dinámico global de las relaciones Sol-Tierra. (De acuerdo con R.S. Kandel).

travioleta, alrededor de 3 000 Å, para inferir efectos relacionados con los riesgos de cáncer en la piel. Otros experimentos conciernen al entendimiento del circuito eléctrico global atmosférico, que depende sensiblemente de la concentración iónica estratosférica; se estudia como cambia esa concentración iónica en el curso de un eclipse. En fin, estas medidas, aunque de carácter efímero, son de gran utilidad como elementos de información, dentro del marco de los modelos que intentan describir la dinámica de la físico-química de la atmósfera y sus intercorrelaciones con la magnetosfera y el clima terrestre.

Es evidente que lo descrito en relación a la incidencia del estudio de los eclipses solares en la física coronal y en la física de la atmósfera terrestre es únicamente de carácter ilustrativo, y que en realidad hay muchísimos más problemas de la física solar y la física de nuestra atmósfera en que los eclipses proporcionan una ayuda excepcional. La idea esencial de esto es exponer un muestreo característico, aunque reducido, del interés de los científicos en organizar expediciones, a veces muy costosas, con fines obviamente muy diferentes a la observación del aspecto espectacular del fenómeno, tan conocido y estimado por los amateurs de la astronomía.

Física de relaciones Sol-Tierra

*Me pides mucho amar sin ser amado
Me pides mucho tal vez
Decía sonriendo a la bella ventana
El dulce sol de mayo
Quieres que día a día
Los largos y ardientes rayos de mi amor
Te iluminen como una caricia*

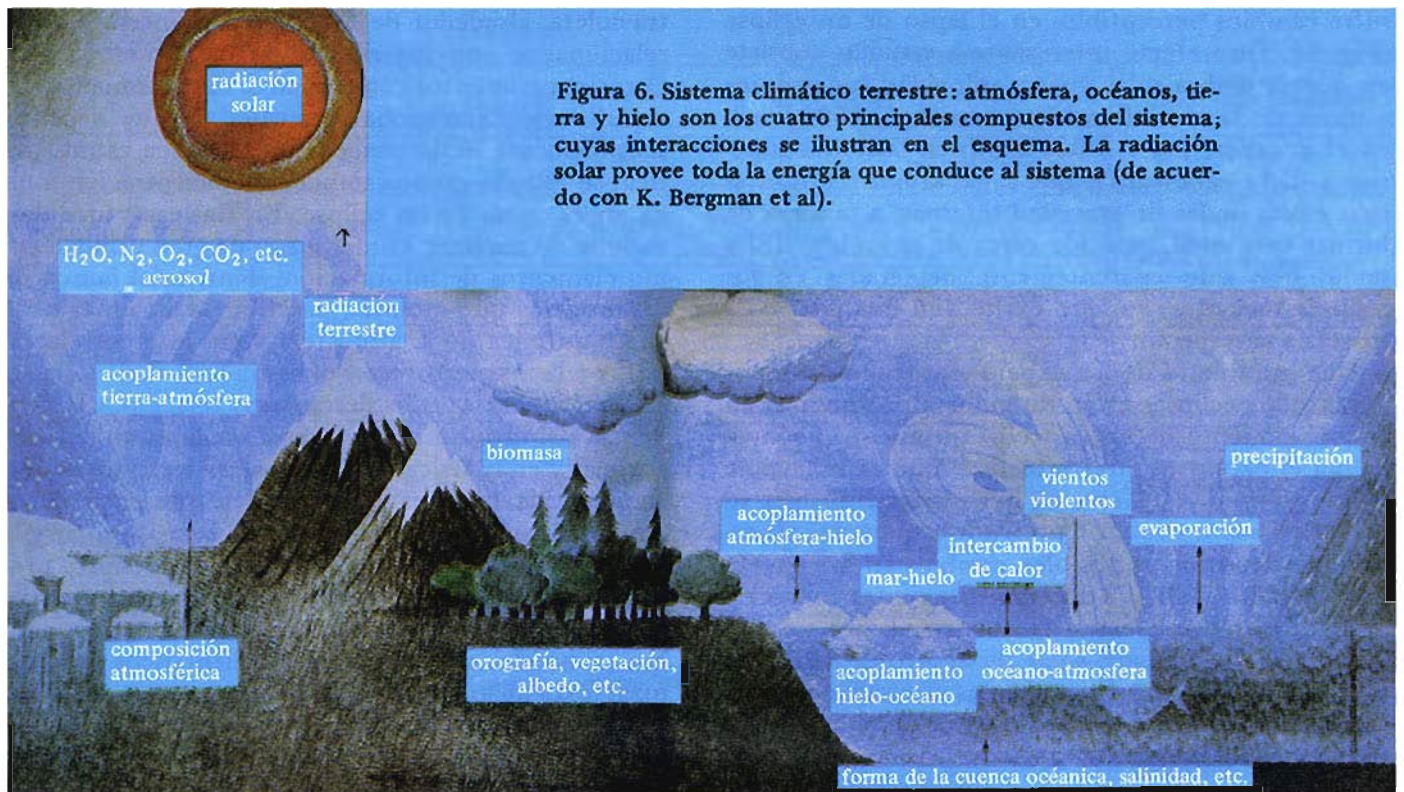
Y tú, tú ¿qué me das?

*Escucha Sol —mi amo— dice la ventana
Yo no soy bella más que para ti
Yo existo por tu luz
Aparte la oscuridad de mi recámara
No poseo nada de nada.
Penétrame y enseguida
Me torno bella y clara*

*Así hablaban el Sol y la sombría ventana
Súbitamente la noche se hizo
Desapareció él
Y ella muere a su vez en un oscuro sueño*

*Poemas a Lou
Guillaume Apollinaire (1880-1918)*

Primero, debe señalarse que estas relaciones son de carácter netamente unilaterales: el Sol ejerce una influencia sobre la Tierra y el sistema solar, sin que hasta ahora se haya puesto en evidencia la acción inversa. La acción del Sol sobre nuestro medio ambiente suele estudiarse en tres categorías: 1) Los



fenómenos que dependen de las fuerzas de gravitación, que determinan el movimiento de la Tierra y demás cuerpos del sistema solar alrededor del Sol, y cuyo estudio constituye parte de la *mecánica celeste*. 2) Los fenómenos que dependen de la radiación electromagnética, de carácter cuasiconstante que emite el Sol desde su núcleo a través del radiador fotosférico. La casi totalidad (99%) de esa po-

tencia se emite en el dominio del visible y del infrarrojo cercano ($\sim 2\,900\text{--}8\,000$) Å. La atmósfera terrestre es transparente al visible y al escaso flujo de radio-ondas (1 cm-30 m), de . . . considerablemente opaca al infrarrojo, así como a las emisiones cromosféricas y coronales en UV y rayos X características de la corona ardiente ($\sim 10^6$ °K). Este flujo estacionario de fotones designado como la *constante solar*,

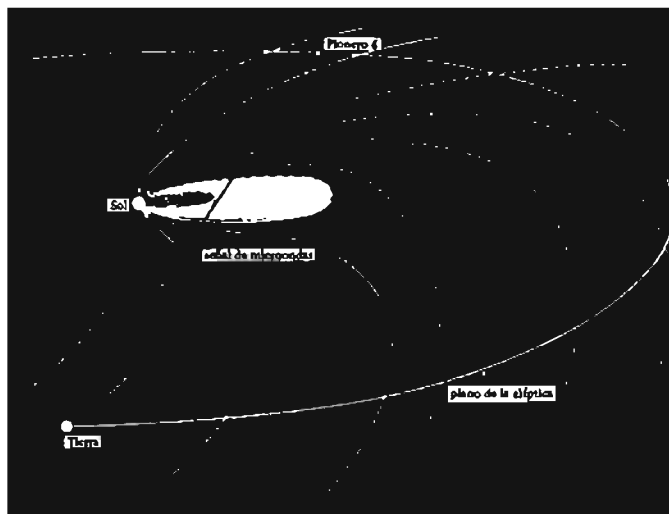
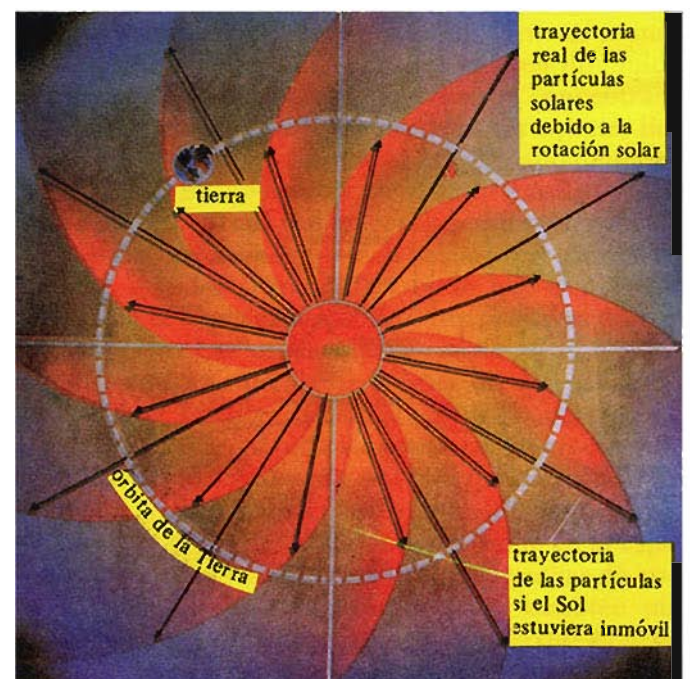


Figura 8. a) Esquematización de las líneas de campo magnético interplanetario. b) Corte transversal del campo magnético interplanetario. Las partículas cargadas presentes en el medio interplanetario se desplazan siguiendo trayectorias helicoidales a lo largo de esas líneas.



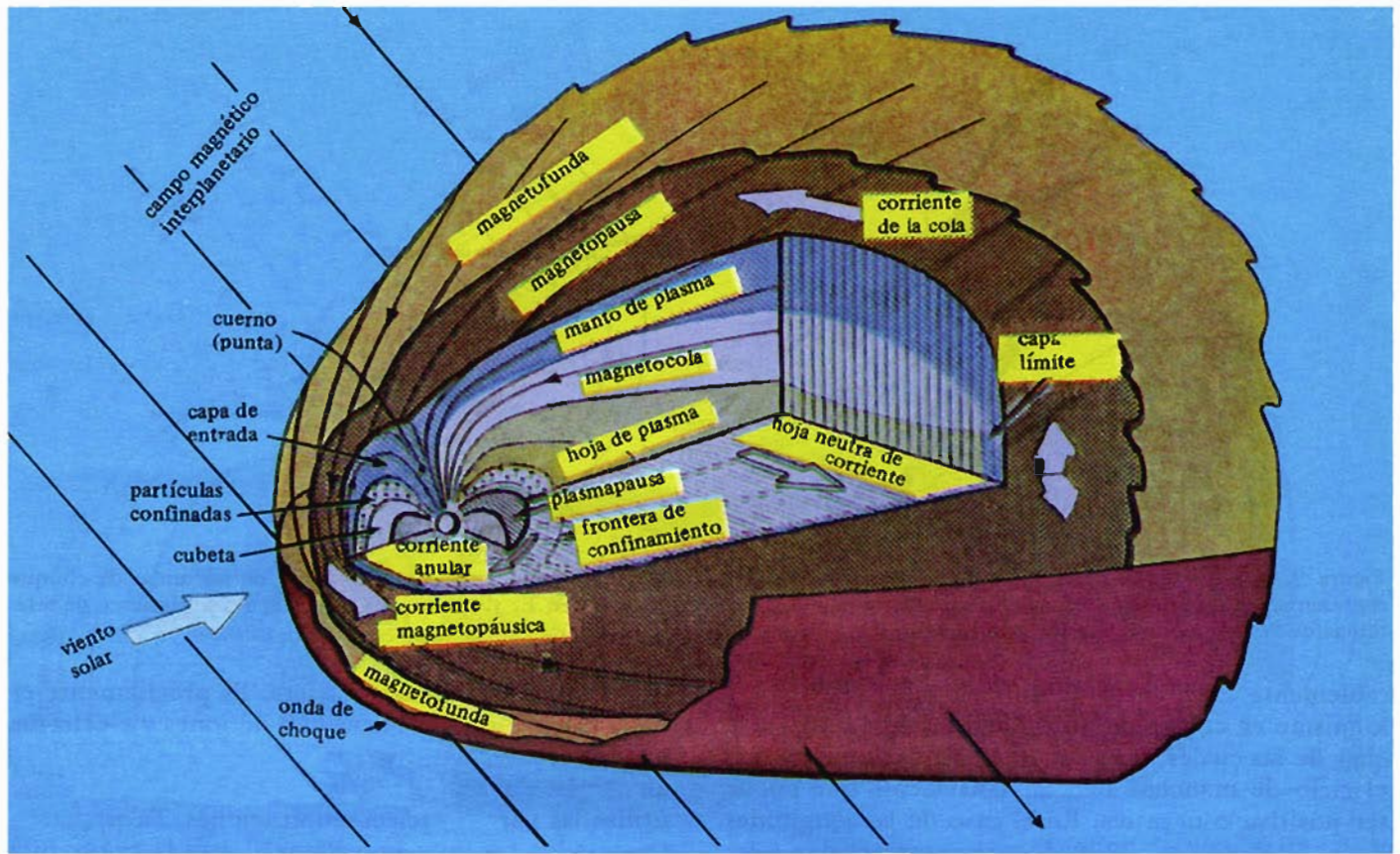


Figura 11. Estructura fina de la magnetosfera terrestre (de acuerdo con W. Heikkilä).

es el que determina el equilibrio térmico del sistema *atmósfera-tierra-océanos-hielo* (Fig. 6) y consecuentemente el equilibrio biológico de nuestro planeta, constituyéndose en dominio de estudio de varias disciplinas geofísicas y biológicas, particularmente aeronomía, meteorología, climatología y oceanografía. 3) Los fenómenos que dependen de la radiación electromagnética y corpuscular solar de carácter *variable*, que constituyen el dominio de la *física-solar terrestre* (STP, por sus siglas anglosajonas), y cuyo campo reside en el estudio de los procesos físicos que gobiernan las fuentes que los originan, su propagación a través del espacio interplanetario y los procesos fisicoquímicos que gobiernan su interacción con la Tierra y otros objetos del sistema solar; es decir, el sistema circulatorio que involucra flujos de fotones, plasma, campos magnéticos, ondas y partículas energéticas, y sus respectivas transferencias de masa, momento y energía, por un circuito que comprende desde la fotosfera hasta la superficie terrestre (cuadro 1). Aunque sólo una minúscula fracción del orden de 10^{12} watts, del total de radiación de 10^{18} watts que inciden sobre la Tierra, proviene en esa forma de emisiones variables de interés para la física-solar-terrestre, tiene, sin embargo, un efecto significativo sobre el delicado balance dinámico-global del medio ambiente terrestre (Fig. 7). Desde este marco de

referencia, la influencia solar se manifiesta en dos formas a) *la componente lentamente variable* asociada al desarrollo de *centros de actividad*, aludidos en los artículos precedentes (ICyT núms. 92 y 93) y b) *componente variable transitoria* asociada a la ocurrencia de perturbaciones impulsivas en la atmósfera solar (fulguraciones y prominencias principalmente), así como la presencia de estructuras magnéticas abiertas (hoyos coronales, que generan torrentes de alta velocidad del viento solar). Los efectos de estas componentes se manifiestan, principalmente por incrementos en radiación X y UV, presencia esporádica de partículas energéticas y ondas de choque en el flujo continuo de la corona en expansión, y perturbaciones esporádicas de este viento solar (y consecuentemente del campo magnético asociado a éste), que modifican directamente el estado de equilibrio ("no perturbado") de la *magnetosfera* (campo magnético terrestre) y las diferentes capas de la atmósfera terrestre e, indirectamente, a través de disturbios introducidos en el estado no perturbado del espacio interplanetario. Todos estos fenómenos están asociados a los fenómenos del sol activo, a excepción de la componente transitoria de los chorros rápidos del viento solar, que puede manifestarse en periodos no-perturbados del llamado Sol quieto.

Si bien la radiación solar visible no varía conside-

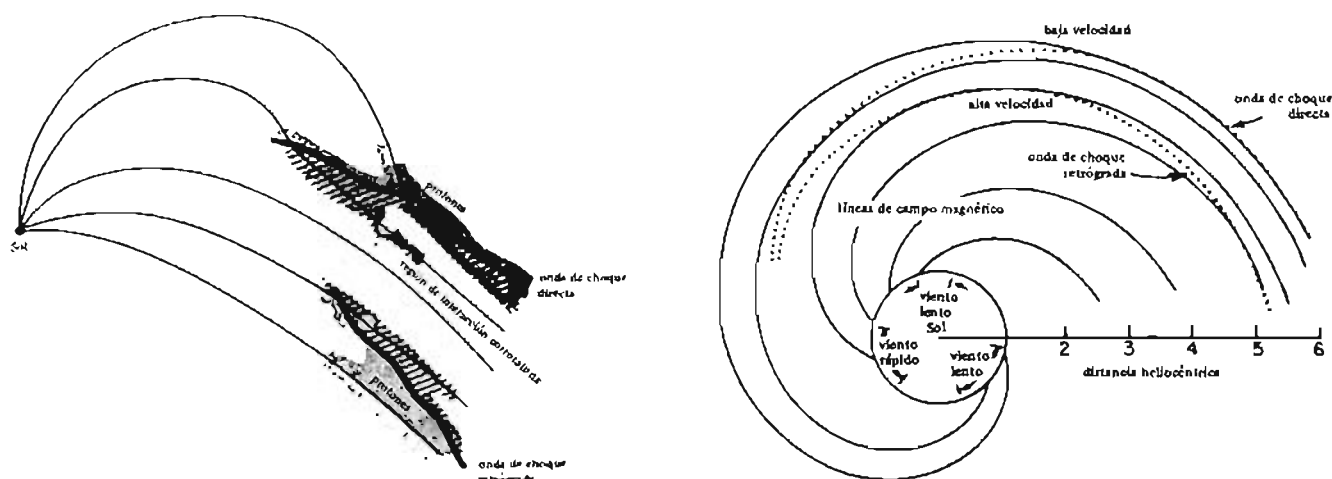


Figura 9. a) Esquema de una región de interacción corrotatoria (RIC): las regiones oscuras alrededor de las ondas de choque representan la distribución espacial de protones energéticos (de acuerdo con E. J. Smith), b) RIC vista desde el marco de referencia que corrota con el Sol (de acuerdo con L.A. Fisk).

rablemente en el curso de un ciclo solar, esto no es lo mismo en el caso de otras longitudes de onda, muchas de las cuales muestran una correlación neta con el ciclo de manchas solares: correlación que puede ser positiva o negativa. En el caso de las longitudes de onda corta ($\lambda < 2000 \text{ \AA}$) que corresponden a las radiaciones más penetrantes (UV y rayos-X) y que causan los efectos más importantes de fotoionización, la correlación es positiva: la variación parece incrementarse proporcionalmente a la energía de la radiación. Por ejemplo en UV y EUV ($\lambda < 600 \text{ \AA}$) la variación sobre el ciclo solar, incluyendo fulguraciones, permanece dentro de un factor de dos: el flujo de rayos-X, entre 10 y 100 $\text{\AA}$, varía en dos órdenes de magnitud, en tanto que la variación de los rayos-X entre 2 y 8 $\text{\AA}$ supera un factor de 500. En primer lugar, toda variación de flujo UV solar repercute sensiblemente en la temperatura y densidad de la atmósfera superior terrestre (200 a 800 km de altitud) como consecuencia de la absorción de esta radiación en altitudes menores y su rápida conducción de calor hacia arriba. De hecho, el subsecuente aumento de presión que resulta de tales calentamientos ($P \propto T$) es la causa del *incremento de frenado* de los satélites en órbita baja, particularmente de la espectacular caída del *Skylab*, en 1979, como resultado de un incremento de la actividad solar, más rápido e importante de lo previsto. Por otro lado, la variación UV es también la causante de la fotodisociación y de la fotoionización de las moléculas y átomos entre 60 y 300 km de altura, y, de ahí, la existencia de la ionosfera terrestre. En particular, la línea Lyman- α del hidrógeno (1216 $\text{\AA}$) y Lyman- α del helio neutro y el ionizado (584 y 304 $\text{\AA}$) son los responsables de la producción de electrones libres en las

capas más bajas de la ionosfera. Es precisamente en estas capas, donde la densidad de iones y electrones es aún relativamente elevada, en que tiene lugar la absorción de las ondas radioeléctricas decamétricas utilizadas para las telecomunicaciones. Tales aumentos pueden ser muy importantes cuando se produce una fulguración solar: los rayos-X penetran aún más profundamente que los rayos UV, las fotodisociaciones que originan tienen consecuencias importantes con respecto al equilibrio fotoquímico de la estratosfera y, por lo tanto, con respecto a las posibilidades de absorción o de remisión de las radiaciones luminosas que proceden del albedo terrestre. El equilibrio radiativo del planeta se ve así alterado.

El viento solar conforma la estructura misma del espacio interplanetario; en efecto, de acuerdo a la teoría magnetohidrodinámica (MHD), ya que el medio interplanetario es de *conductividad eléctrica* "infinita" (muy elevada) implica que el campo magnético está "congelado"* a la materia coronal, la cual adquiere del Sol suficiente calor para expandirse más de 100 U.A., hasta donde su presión se hace del orden de la presión interestelar ($\sim 10^{-12} \text{ dinas/cm}^2$), gracias a la elevada *conductividad térmica* del plasma. El campo magnético arrastrado en el plasma se conforma en espirales debido a la rotación del Sol (Fig. 8), tal que al nivel de la órbita terrestre, el ángulo de la espiral respecto a la dirección del Sol es de 45° . El campo magnético presenta una estructura sectorial que se orienta en un sector hacia la dirección solar y en el contiguo en la dirección antisolar, separándose por una lámina de corriente neutra, en la

* Se designa así al movimiento conjunto de convección de plasma y campo magnético.

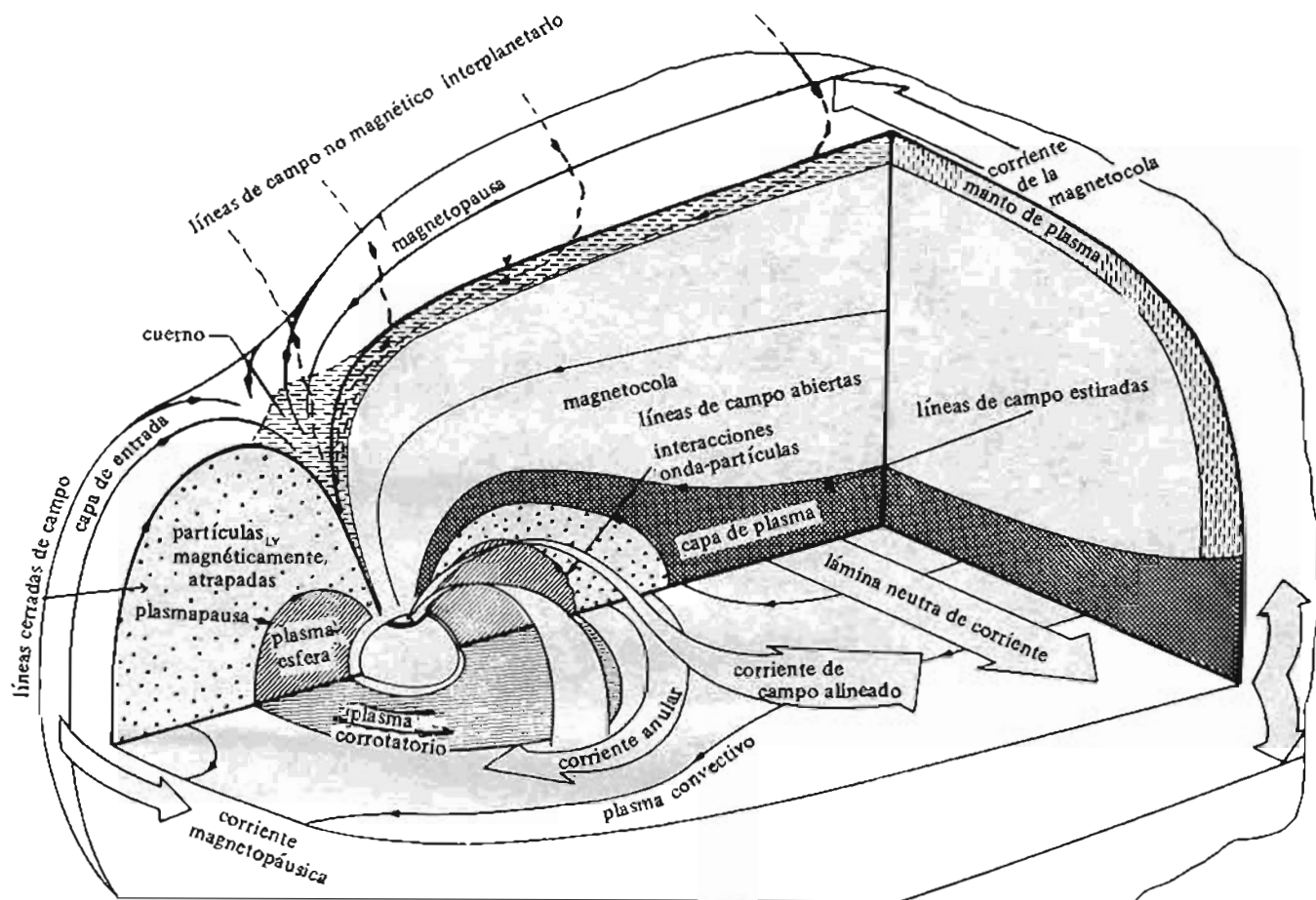


Figura 12. Esquemática global de las principales regiones de campo magnético prevalentes en la magnetosfera.

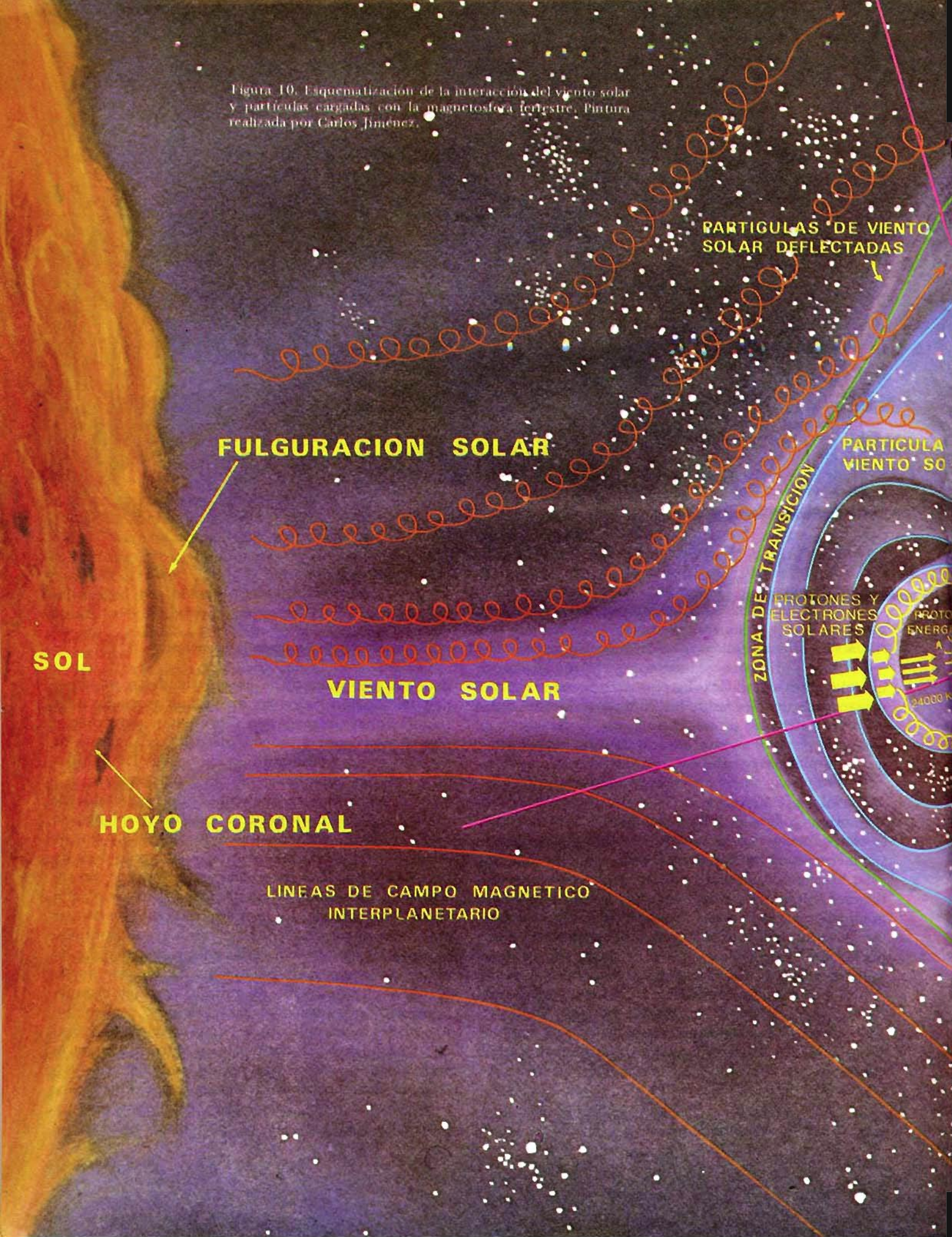
que el campo se nulifica. Estos cuatro sectores representan cada uno 7 días de los 28 de rotación del Sol, y las teorías sobre su origen son aún de carácter hipotético, probablemente hasta que no se tengan medidas de plasmas y campos magnéticos muy alejados de la eclíptica; entretanto, sigue siendo uno de los misterios no resueltos de la física-solar-terrestre.

El origen solar del campo magnético interplanetario se confirma con la recurrencia de 27 días que se observa en el campo correspondiente al periodo de rotación solar.** La intensidad de campo magnético decae relativamente lenta con la distancia r al Sol ($\sim 1/r^2$). Las medidas experimentales *in situ* del medio interplanetario muestran que los parámetros del viento solar que prevalecen al nivel de la órbita terrestre son *en promedio*: flujo de partículas = 3×10^8 /cm² seg; velocidad = 450 km/seg; densidad = 5 protones/cm³; temperatura = 2×10^5 ° K; campo magnético = 5γ ($1\gamma = 10^{-5}$ gauss). La estructura espiral y los sectores de campo, no constituyen más que la estructura a gran escala del viento solar ($1.5 - 150$) $\times 10^8$ km. En reali-

dad, un gran número de irregularidades se superponen, tales como las ondas de choque asociadas a las fulguraciones solares, que representan perturbaciones de una masa promedio de 10^{16} gr, energía de 5×10^{31} ergios y dimensiones del orden $(1.5 - 150) \times 10^6$ km. Irregularidades de mediana escala $(1.5 - 150) \times 10^4$ km, y de pequeña escala comparables al radio de giro de protones en el campo interplanetario $(1.5 - 150) \times 10^2$ km, han sido observadas por las sondas interplanetarias, acordes a las previsiones de la teoría MHD. Estas pequeñas estructuras de dimensiones de cientos de kilómetros, moviéndose a velocidad promedio de 450 km/seg, cubren a las sondas espaciales por un lapso de 1 a varios segundos; tiempo en el cual se toman varias decenas de medidas de los diferentes parámetros físicos. Desde este punto de vista, el espacio interplanetario representa un laboratorio irremplazable para el estudio de fenómenos magnetohidrodinámicos, de gran impacto a nivel de experimentos en laboratorios terrestres, para la generación y confinamiento de energía; por otro lado, el viento solar no es ciertamente el único viento estelar existente, lo que despierta un interés muy particular a los astrofísicos, principalmente en rela-

** Recordando lo mencionado en JCYT núm. 92, la rotación solar es de carácter diferencial, es decir, varía según la latitud.

Figura 10. Esquemmatización de la interacción del viento solar y partículas cargadas con la magnetosfera terrestre. Pintura realizada por Carlos Jiménez.



FULGURACION SOLAR

PARTICULAS DE VIENTO SOLAR DEFLECTADAS

PARTICULA VIENTO SOLAR

SOL

HOYO CORONAL

VIENTO SOLAR

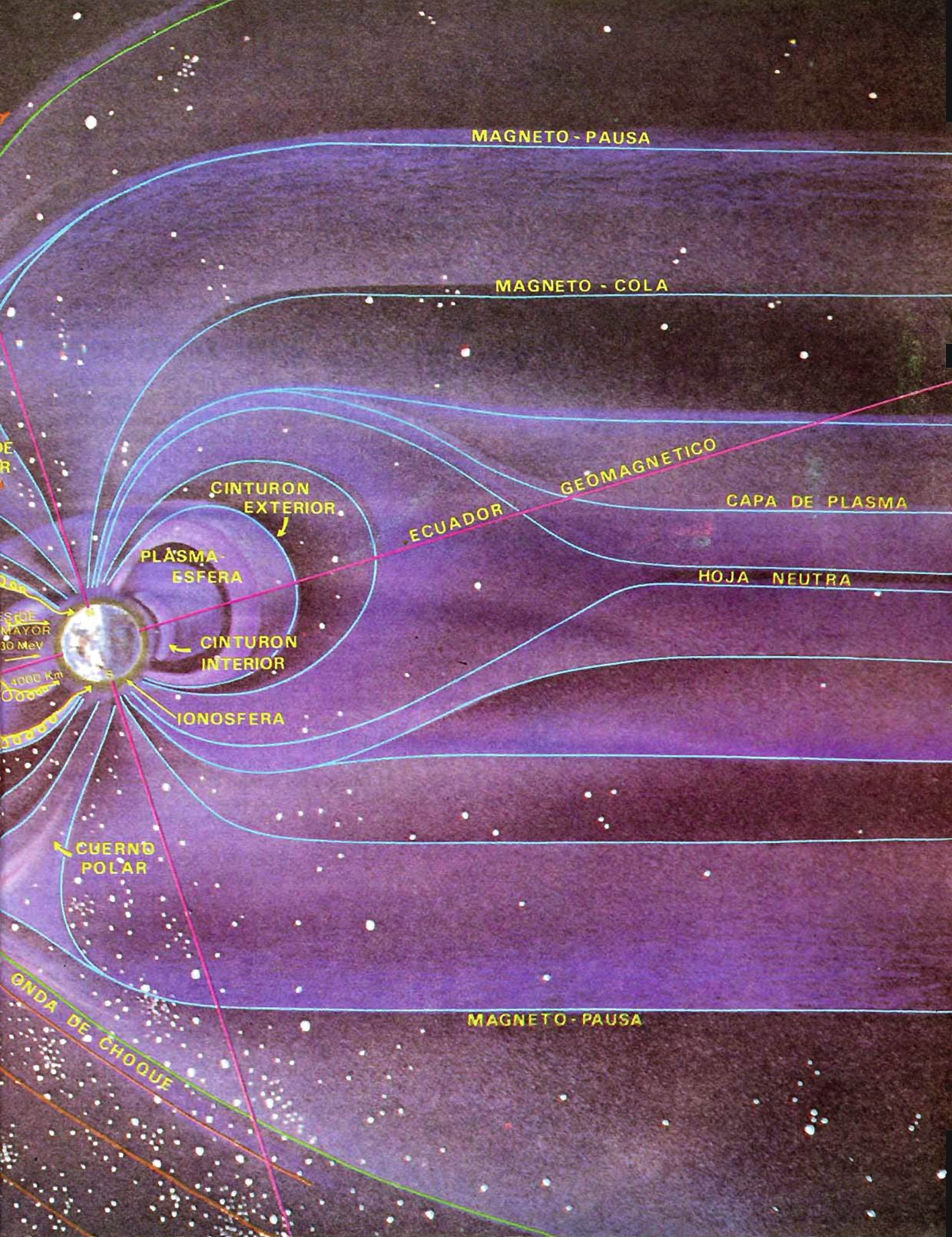
ZONA DE TRANSICION

PROTONES Y ELECTRONES SOLARES

PROTONES Y ELECTRONES SOLARES

LINEAS DE CAMPO MAGNETICO INTERPLANETARIO

24000 K



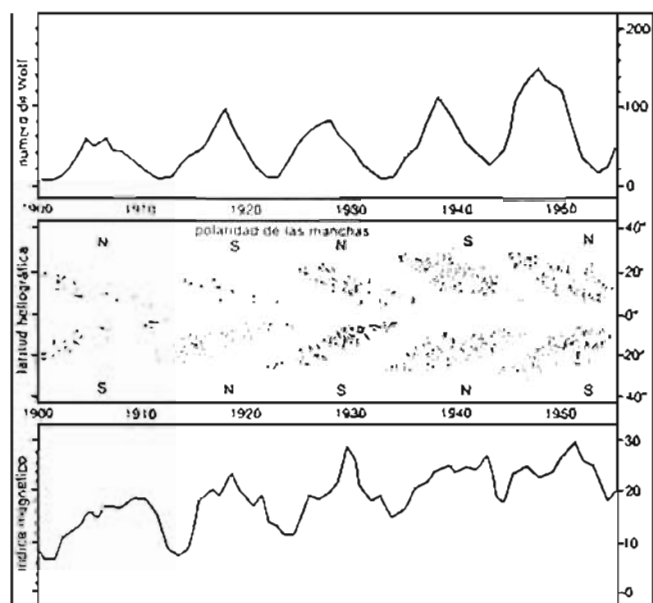


Figura 14. En el cuadro superior se ilustra el número de manchas (número de Wolf) durante las seis primeras décadas del siglo XX. En el cuadro intermedio se presenta el "diagrama mariposa" que ilustra la emigración de las manchas en el curso de un ciclo solar, desde las latitudes heliográficas medias hacia el ecuador solar. En el cuadro inferior se ilustra la actividad magnética terrestre (representada por el índice A_a) que está directamente asociada a la actividad solar, pero con un cierto retraso.

ción a la pérdida de momento angular de algunas estrellas a causa de sus vientos estelares. También la teoría hidrodinámica clásica prevee la existencia de una onda de choque en el frente de expansión del viento solar, asociada a la transición entre la velocidad supersónica y la subsónica (relativo a la velocidad hidromagnética de Alfvén), en donde se pueden acelerar partículas rápidas capaces de remontar en contracorriente al viento solar. Estas ondas se hacen más abruptas a medida de que aumenta su distancia del Sol, tal como ocurre con las olas oceánicas al acercarse a una playa. Se ha observado recientemente que estas ondas, más allá de la órbita de Marte, dan origen a un gran número de partículas de energía moderada (1-50) MeV, abriéndose la posibilidad de que una fracción sustancial de partículas de esas energías detectadas en la Tierra, tengan ese origen. Dado que la velocidad del sonido en el viento solar y la temperatura decrecen progresivamente con la distancia del Sol, ocurre que la presión crece muy rápidamente, de manera que se forman dos ondas de choque, la *directa* y la *retrograda*, a cada lado de la región de alta presión, propagándose en sentidos opuestos, aunque de todas formas alejándose ambas del Sol (Fig. 9). Observaciones recientes indican que los electrones de origen joviano, acelerados entre 1 y 10 MeV, son inhibidos a propagarse a través del vien-

to solar por estos pares de ondas, que forman una barrera muy eficiente. El estudio de la producción, confinamiento y propagación de partículas energéticas en el espacio interplanetario, está directamente asociado a las diferentes ondas y perturbaciones del viento solar, y constituye solamente uno de los campos de investigación de la física-solar-terrestre, que inegablemente ha enriquecido nuestro conocimiento de la física de plasmas a escala de laboratorio.

El campo geomagnético

La interacción del viento solar con un obstáculo tal como los planetas es un fenómeno de importancia fundamental. Tres tipos de interacciones se manifiestan en el sistema solar:

1. El caso de los planetas que poseen un campo magnético (como la Tierra, Mercurio y Júpiter); en estas situaciones, cuando la presión del campo magnético planetario (proporcional al cuadrado de su amplitud) es igual a la presión cinética del viento solar, éste último no puede continuar adelante, y se ve obligado a contornar el obstáculo, a lo largo de una superficie denominada como *magnetopausa*. Debido al régimen supersónico del viento solar relativo a la magnetopausa, se crea entre ellos una onda de choque en forma de arco en el lado-día, en tanto que del lado-noche se forma una cauda similar a la de los cometas, la *magnetocola*, cuya extensión en el caso terrestre es del orden de 500 radios terrestres ($R_T = 6370$ km). La distancia geocéntrica a la nariz de la *onda-arco* y de la *magnetopausa* es respectivamente de $15 R_T$ a $10 R_T$ en promedio. Las dimensiones de las cavidades que se forman de la interacción del campo magnético planetario con el viento solar dependen de la densidad y de la velocidad del fluido, y se les designan como *magnetosferas planetarias*, en las que la energía del campo es mayor que las de las poblaciones de partículas presentes, tal que los movimientos de estas últimas son gobernados por el campo magnético.

2. Cuando los planetas no tienen campo magnético, pero poseen una envoltura atmosférica (Venus y Marte); el viento solar comprime directamente la atmósfera en el lado frontal, conformando así una superficie de equilibrio, llamada *anemopausa* (ionopausa si la atmósfera está ionizada). De la misma manera que las magnetopausas, las ionopausas se constituyen en verdaderos obstáculos del viento solar extendiéndose con una cauda en forma de *anemocola* (ionocola) del lado antisolar, y se forma una onda-arco del lado-día.

3. Los objetos que no poseen atmósfera ni campo magnético (la Luna, por ejemplo); ahí el viento solar no se detiene más que por el efecto de la misma superficie.

Regresando a la *magnetosfera terrestre* (Fig. 10), ésta constituye entonces la región determinada por las líneas de campo magnético terrestre, a través de las cuales se transmiten tensiones, se guían ondas, partículas cargadas y corrientes eléctricas, se confinan plasmas y se conectan físicamente la atmósfera terrestre con el viento solar. Tres principales poblaciones de partículas pueblan la magnetosfera: 1) electrones e iones de la ionosfera superior; 2) plasma capturado del viento solar incidente; 3) partículas de alta energía capturadas en los anillos de radiación de Van Allen. La magnetosfera funciona como una *máquina* que convierte la energía cinética del viento solar en energía magnética, mediante la acción de un dinamo magnetohidrodinámico. Parte de esa energía convertida es inyectada dentro del sistema de corrientes de la magnetocola —que consiste de dos *selenoides*— y, otra parte, se gasta proporcionando potencia al movimiento convectivo de gran escala del plasma magnetosférico, como un *motor*. El campo eléctrico asociado a ese movimiento convectivo se comunica hacia abajo, a la ionosfera por un sistema de corrientes alineadas, tal que la interacción friccional que se suscita a consecuencia de la convección hacia la ionosfera en la componente neutra existente, provoca un calentamiento de tipo Joule. Por otro lado, los electrones, que se conducen por las corrientes alineadas por las líneas de campo, son acelerados a lo largo de ellas, causando las *auroras polares* al interactuar con la atmósfera superior. Antes del descubrimiento del viento solar y la exploración de la magnetosfera a finales de la década de los cincuenta, la concepción del campo geomagnético era la de un simple campo dipolar. Actualmente, se tiene un conocimiento bastante detallado en la magnetosfera (Fig. 11).

Cabe destacar algunas de las capas constitutivas del campo geomagnético: entre la *magnetosfera* y la *onda-arco* existe una región de transición de plasma subsónico comprimido, llamada *magnetofunda*, que actúa como un medio elástico, transmitiendo la presión cinética del viento solar al campo geomagnético. Esta región está separada de la magnetosfera por la estrecha magnetopausa aludida previamente. Tres distintas capas de plasma están presentes: 1) la *capa límite*, que es la capa dinámica que controla el proceso de penetración del viento solar a la magnetosfera constituida, a su vez, por el *manto de plasma*, la *capa de entrada* y los *cuernos polares* (o fisuras); 2) la *lámina* (hoja) *de plasma*, que es el recipiente de plasma caliente capturado del viento solar, en la región de líneas estiradas de la magnetocola; 3) la *plasmaesfera*, que es el recipiente de plasma frío de origen ionosférico en la región de líneas de campo cerradas en las latitudes bajas y medianas, y que co-rotan con la Tierra. Así también existen tres principales regiones con diferentes topologías de líneas de cam-

po magnético: 1) las regiones de líneas de campo cerradas que emergen en forma de dipolo en latitudes medias y bajas, y que encierran a la *plasmaesfera*; 2) las líneas de campo abiertas que emergen de latitudes geomagnéticas altas, formando los dos lóbulos principales de la magnetocola, y cuya intersección con la Tierra define los *casquetes polares*; 3) regiones de líneas de campo cerradas en la dirección antisolar, que se elongan considerablemente en la magnetocola (Fig. 12). En la vecindad del eje Sol-Tierra, el campo magnético cambia bruscamente de sentido, sin cambiar de dirección, lo que define una región de campo magnético nulo, llamada la *capa* (hoja) *neutra*.

Una fracción de los iones y electrones de la *plasmaesfera* tienen suficiente energía para vencer la barrera gravitacional y escaparse a lo largo de las líneas abiertas de los casquetes polares ionosféricos, “evaporándose” hacia los lóbulos de la cola, en lo que se designa como el *viento polar*. La llamada *zona auroral* ocupa una banda de latitudes entre 65° y 70° y se extiende en longitud alrededor de todo el planeta: las regiones aurorales localizadas en el campo dipolar de la Tierra, en dirección ecuatorial son los anillos estables de radiación de Van Allen, en tanto que fuera de esta región, en la dirección polar, se localizan los casquetes polares que están magnéticamente conectados con la magnetocola. Entonces, la zona auroral delimita, de hecho, la región en que la influencia del viento solar es reemplazada por el control que toma el campo dipolar, por lo cual es poco sorprendente que cuando el Sol da un “empujoncito extra” (chorros de alta velocidad que emergen de los hoyos coronales), sus efectos se muestran activamente en la zona auroral. La variabilidad de esta zona auroral es una de las disciplinas estudiadas con más énfasis. En lo concerniente al tercer tipo de población de partículas (atrapadas en los anillos de Van Allen), el Sol eyecta esporádicamente partículas energéticas entre 1 a 200 MeV (muy ocasionalmente entre 200 y 15 000 MeV) que al interactuar nuclearmente con la atmósfera terrestre producen neutrones, los cuales a su vez se desintegran posteriormente en nuevos protones y electrones. Algunas de esas partículas sometidas a la fuerza de Laplace se verán atrapadas en el campo dipolar terrestre, formando los ya aludidos *cinturones de radiación de Van Allen* (Fig. 13): el cinturón interno con protones de más de ~ 30 MeV de energía, centrado aproximadamente a una altura geocéntrica de $1.5 R_L$ (4 000 km de altura sobre la superficie ecuatorial), y un anillo externo con protones de baja energía y principalmente electrones de energía alrededor de 1 MeV, centrado a una altura de 24 000 km (cerca de $5 R_L$ de altura geocéntrica). En corte transversal, éstos semejan dos cuernos, en tanto que en volumen, semejan dos man-

gueras toroidales que dejan descubiertas las zonas polares (Fig. 10). En el seno de estos anillos las partículas oscilan rápidamente de norte a sur y viceversa, en un tiempo de seis segundos aproximadamente, con un movimiento horizontal de deriva hacia el oeste los protones y hacia el este los electrones. Estos cinturones juegan entonces un papel benéfico confinando partículas cargadas, eyectadas por las fulguraciones, cuyo poder de penetración es muy elevado, pudiendo causar daños tanto a la instrumentación como a la tripulación de vehículos espaciales, razón por la cual se tiene interés de circular por abajo de ellos, o fuera de su jurisdicción.

En lo concerniente a los rayos cósmicos y a las partículas energéticas solares, la magnetosfera juega un papel de filtraje y de guía: por un lado deflece en su trayectoria las partículas menos energéticas, filtrando solamente aquellas cuya energía es superior a un valor umbral impuesto por el campo magnético y que depende de la latitud, y por otro lado, guía las partículas a lo largo de las líneas de campo.

Influencia solar sobre el medio ambiente terrestre

Hemos visto entonces que existe un intercambio de plasma entre el viento solar, la magnetosfera y la ionosfera terrestre, al igual que un intercambio de corrientes eléctricas, de manera que se establece glo-

balmente un balance dinámico fisicoquímico muy delicado; es decir, en realidad nunca se establece un estado de equilibrio, ya que existen incesantes perturbaciones en el viento solar que inciden sobre la frontera magnetosférica: el campo magnético interplanetario actúa como la llave moduladora de fenómenos magnetosféricos, en el sentido de regulador de la transferencia de energía, de momento y de partículas del viento solar a la magnetosfera. De esta manera, el viento solar se constituye en la principal fuerza electromotriz externa generadora de procesos magnetosféricos. Bajo ciertas circunstancias, el campo magnético interplanetario puede actuar como "disparador" de las inestabilidades más fundamentales de la magnetosfera, las llamadas *subtormentas geomagnéticas* que a su vez se acompañan de *tormentas ionosféricas*.

Es conveniente mencionar que no es privilegio de nuestra estrella el presentar una actividad magnética, también nuestro planeta es poseedor de esa actividad magnética, con la diferencia de que no toda ella es intrínseca, sino inducida externamente como se acaba de mencionar. Esta actividad se manifiesta por fluctuaciones de la intensidad y/o de la dirección del campo magnético terrestre, que aparecen en forma simultánea en toda la superficie del globo pero con diferentes amplitudes. Estas variaciones son de dos tipos, *regulares* y *esporádicas*: las regulares presentan ciertas periodicidades tales como *oncenales*, de *variación lenta* o *seculares*, y de *variación a corto término* tales como *diurnas*, de *temporada*, *lunares* y de *recurrencia de 27 días*. En tanto que las esporádicas se asocian a la actividad solar, o flujos de alta velocidad del viento solar, que producen las mencionadas subtormentas geomagnéticas; en cambio, las variaciones

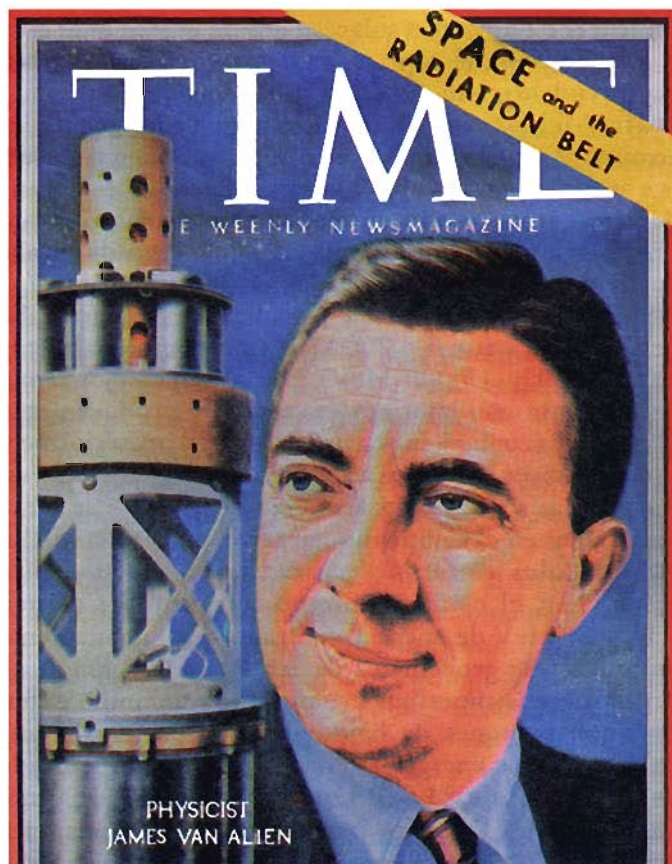


Figura 13. a) James Van Allen, astrofísico estadounidense que comprobó experimentalmente la existencia de los anillos de partículas cargadas que rodean la atmósfera terrestre. b) Carl McIlwain, James Van Allen y George Ludwig en la Universidad de Iowa en 1958.

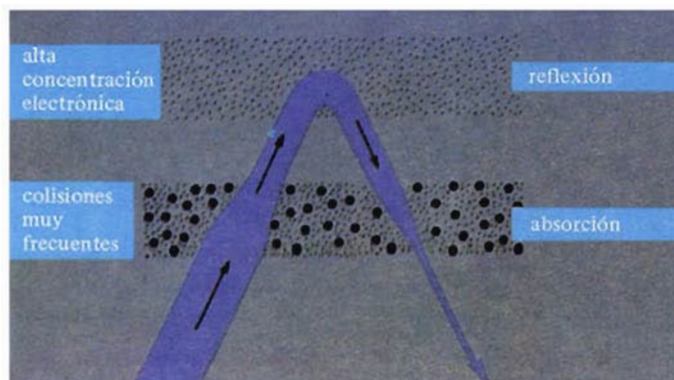
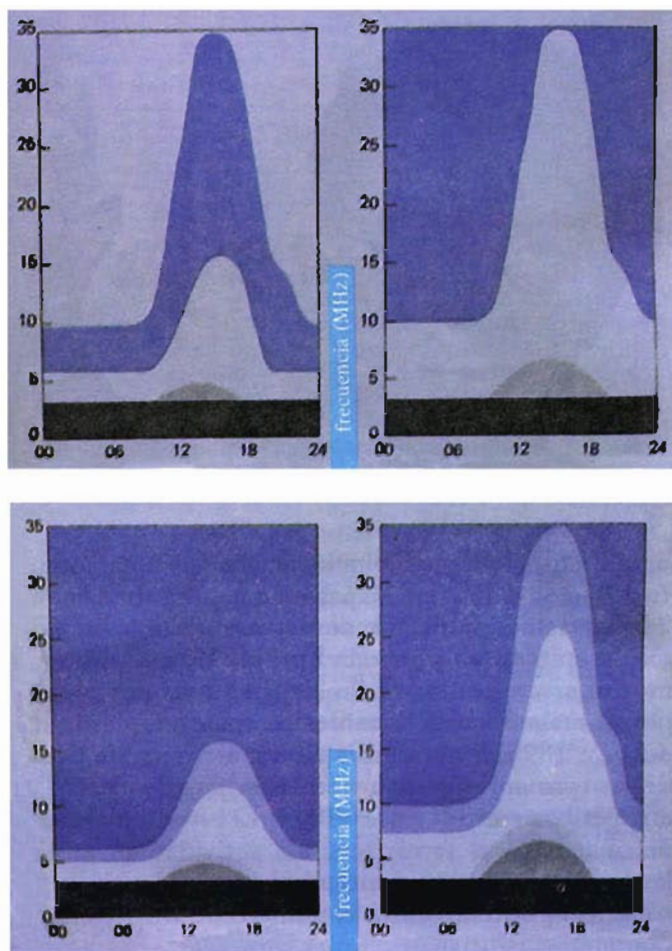


Figura 16. a) Si la concentración de electrones es muy elevada a gran altitud las ondas de radio son reflejadas, en tanto que si la concentración elevada ocurre a baja altitud esas ondas son absorbidas. Para radiación de frecuencia muy elevada no hay suficientes electrones para que se efectúe la reflexión, en tanto que para frecuencias bajas la absorción es muy fuerte. b) Se ilustra la alteración del rango de frecuencias utilizables para las comunicaciones entre Londres y Halifax (Canadá) durante un mínimo solar (diciembre de 1954) y el máximo solar siguiente (diciembre de 1958). Las zonas blancas indican las frecuencias utilizables, las zonas azules y grises indican frecuencias limitadas por reflexión y absorción respectivamente. Las frecuencias inferiores a los MHz , no fueron accesibles por haber sido reflejadas por la capa E de nuestra atmósfera. c) Durante una tormenta ionosférica la frecuencia límite para la reflexión decrece en tanto que la frecuencia límite para la absorción crece. Los diagramas muestran cómo esas modificaciones reducen la banda de frecuencia disponibles para las comunicaciones, y se pone en evidencia cómo los efectos de una tormenta magnética son más severos en el mínimo de actividad solar (de acuerdo con J. A. Ratcliffe).

regulares se deben a corrientes inducidas en la ionosfera por los desplazamientos de ésta en el campo magnético, en un efecto similar al del principio del dínamo: mientras mayor es el grado de ionización, más elevada la conductividad del plasma y más intensas las corrientes inducidas, de tal suerte que las variaciones de ionización, como por ejemplo las provocadas por variaciones de luminosidad solar en el curso del día, inducen variaciones de corrientes y consecuentemente del campo magnético.

La actividad magnética terrestre se mide por diversos indicadores, de los cuales los más populares son los índices K_p y A_p , cuyo margen de variación es de cero a nueve, el índice 0 corresponde a "calma" magnética, y el índice 9 a las tormentas geomagnéticas más intensas. Los índices magnéticos terrestres presentan correlaciones muy marcadas con la actividad solar oncenal y con la rotación solar de 27 días, pero con un cierto desfaseamiento (retardo en tiempo), (Fig. 14). Las variaciones esporádicas son consecuencia de eventos particulares en el Sol: emanaciones de plasma de los centros activos, fulguraciones y flujos reforzados de alta velocidad del plasma coronal, que en última instancia se traducen en perturbaciones del viento solar y su campo magnético inter-



planetario "congelado". Estos disturbios del viento solar son la fuente de las perturbaciones geomagnéticas observadas al interior de la cavidad magnetosférica, en forma de subtormentas geomagnéticas, tormentas ionosféricas, auroras polares e intensas corrientes transmitidas al suelo terrestre. En efecto, la energía cinética disponible en el viento solar puede variar de ~ 0.1 ergios/cm² -seg (para una densidad de 5 protones/cm³ y una velocidad de 300 km/seg) hasta ~ 10 ergios/cm² -seg (para una densidad de 10 protones/cm³ y una velocidad de 1 000 km/seg). Consecuentemente, la energía total incidente sobre la magnetosfera, considerada como un blanco de 40 R_E de diámetro (sin contar la cola lejana), puede variar de 5×10^{19} a 5×10^{21} ergios/seg. Por otro lado, la energía disipada en una subtormenta geomagnética es del orden de 10^{18} , 10^{19} ergios/seg, lo que confirma que la energía disponible en el viento solar es ampliamente suficiente para producir ese fenómeno.

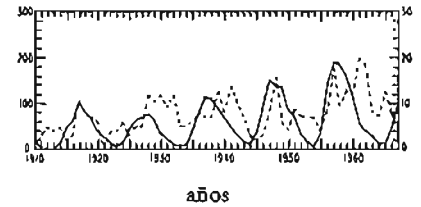
La estrecha correlación entre las emisiones solares esporádicas y sus efectos terrestres, en las tormentas magnéticas y auroras polares, se hizo evidente desde finales del siglo pasado y primeras décadas del presente: ya en 1860 el físico británico R.C. Carrington



Chapman



Chapman



Curiosamente la producción científica de Chapman (más de 450 artículos, línea punteada) sigue, como las auroras, la tendencia del ciclo de actividad solar (línea continua).

había observado la coincidencia entre una intensa fulguración solar y la aparición, aproximadamente 24 horas más tarde, de numerosas auroras boreales que se extendían por toda Europa. Hoy en día sabemos que van acompañadas de fluctuaciones de campo geomagnético detectables en casi todas las latitudes. En 1896, Birkeland atribuyó el origen de ellas y de las tormentas geomagnéticas, a jets de electrones energéticos emitidos por el Sol. El estudio detallado del magnetismo terrestre y esa actividad auroral en las regiones de latitud alta, puso en evidencia la correlación existente entre el número de Wolf y ciertos fenómenos geofísicos, con el subsecuente incremento en la frecuencia de las auroras boreales cuando se producen los periodos de máxima actividad solar (Fig. 3b, *Elementos* núm. 6, enero-marzo de 1986), fenómenos que no podrían explicarse simplemente en base a la radiación electromagnética del Sol.

El estudio de la actividad magnética terrestre y su correlación con la actividad solar asocia nombres tales como Schuster, Linderman, Chapman, Ferraro, Alfvén (Fig. 15), Störmer, Martyn y otros, quienes antes del descubrimiento de los rayos cósmicos solares

en 1942, emitieron hipótesis relativas a que el Sol no era únicamente fuente de luz sino también de partículas cargadas eléctricamente, desarrollando modelos físicomatemáticos al respecto, que aun cuando se han tenido que modificar ligeramente, los conceptos fundamentales de algunos han permanecido válidos, en la medida de que para entonces no se conocían aún los hoyos coronales y el viento solar reforzado que sabemos ahora que contribuyen sustancialmente a la actividad geomagnética. Las perturbaciones transitorias introducidas por el Sol en nuestro medio ambiente pueden clasificarse *grosso modo* de la manera siguiente:

1. *Perturbaciones ionosféricas repentinas* (o de inicio brusco), cuyo efecto es el incremento brutal del número de electrones de la capa D de nuestra atmósfera, causado por los flujos de rayos-X de las diversas manifestaciones de la actividad solar y observables del lado-día de la Tierra únicamente. Esto entraña un aumento de absorción por un lapso de 15 minutos a dos horas, lapso en el cual las comunicaciones de radio se debilitan e incluso pueden llegar a interrumpirse debido al descenso de la capa D por



Birkeland



Schuster



Störmer



Lindemann

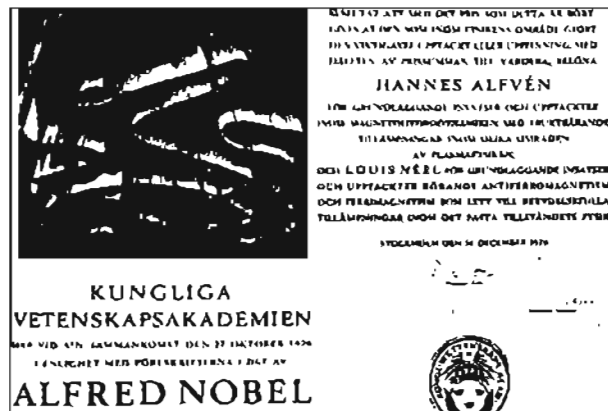


Figura 15. Hannes Alfvén, considerado como el pionero de la magnetohidrodinámica solar y ganador del Premio Nobel por la diversidad de aportaciones a la astrofísica de plasmas, física espacial y disciplinas afines.



HANNES ALFVÉN
Nobelpriset i fysik 1970
År 1970 utdelades Nobelpriset i fysik till Hannes Alfvén för hans bidrag till magnetohydrodynamik och fysik i plasma.

Source: Nobel Foundation, Stockholm, Sweden.

una distancia hasta de 15 kilómetros; en general, los efectos dependen de la frecuencia de la onda reflejada.

2. *Tormentas ionosféricas*, debidas a corrientes de partículas cargadas desviadas por el campo magnético terrestre hacia la zona de auroras polares, tanto del lado noche como del lado día. Se acompañan de un incremento de la población de electrones de la capa D y disminución en la capa F; lo que provoca una situación compleja pues en la capa D aumenta la frecuencia de onda correspondiente al límite de absorción, en tanto que en la capa F disminuye; cosa que se combina con variaciones del límite de reflexión, dando lugar a una reducción de las frecuencias utilizables (Fig. 16). El enlace de radio entre Londres y Montreal es muy susceptible a este tipo de perturbaciones, en tanto que entre Londres y Nueva York estando más alejados de la zona auroral, sus comunicaciones son menos afectadas por estos "apagones aurorales". Tienen una tendencia a la recurrencia con 27 días de periodo, lo que ubica su origen en perturbaciones provenientes de centros activos del Sol o de hoyos coronales. Las tormentas son más

frecuentes cerca del máximo de actividad pero más perturbadoras en el mínimo de actividad.

3. *Absorción ionosférica de los casquetes polares* ("Apagones polares"); se asocian a las fulguraciones solares, con un retardo de 2 a 4 horas, comenzando entonces bruscamente la absorción, la cual se incrementa en el curso de algunas horas. Este efecto de incremento de ionización en la baja ionosfera y la subsecuente absorción de ondas perdura alrededor de una semana, mucho después de que terminó la fulguración, lo que indica que existen regiones en la atmósfera solar de almacenamiento de partículas muy rápidas con liberación gradual, o alternatively, que se inducen efectos magnéticos capaces de acelerar partículas hacia los casquetes polares, durante el tiempo que duren esos efectos de perturbación local.

4. *Absorciones aurorales*, que ocurren al mismo tiempo que las subtormentas geomagnéticas (es decir 2 días después de una fulguración, cuando las subtormentas son provocadas por ese agente, y no decenas de minutos después de la fulguración como en el caso de la absorción polar); además, se limitan a la zona auroral y no cubren todo el casquete polar. Afectan principalmente la baja ionosfera y coinciden con las auroras visibles de mayor magnitud. Su origen se atribuye a partículas aceleradas por condiciones creadas cerca de la Tierra por la subtormenta geomagnética precursora.

5. *Auroras polares* (boreales o australes), fenómenos luminosos que han sido registrados por al menos 2 milenios y estudiados cuidadosamente por 300 años (Fig. 17). Para los antiguos habitantes de las altas latitudes, las auroras eran la *diosa del alba*, por su luminosidad, a veces comparable a la de la Luna, en plena noche. Las auroras toman formas muy diversas, aunque muy frecuentemente en forma de arco, semejante a la configuración del campo magnético. Son muy escasas en los meros polos, y se distri-



Ferraro

buyen generalmente en un anillo que se inicia a 5° de los polos magnéticos, lo que hace suponer que el fenómeno depende del campo geomagnético; las latitudes de mayor probabilidad son 23° en el norte, *auroras boreales* y 18° en el hemisferio sur, *auroras australes*; cada aurora boreal es acompañada de una austral. De colores variados, generalmente se presentan verdes o azul-verde, con bordes rosas o rojos: oxígeno excitado emitiendo en el verde ($5577 \text{ \AA}$) y el rojo ($6300 \text{ \AA}$), aunque se encuentran rayas y bandas de emisión del N_2 , N , O_2 y H . Las auroras son debidas a la excitación de esas moléculas y átomos a altitudes que van de ~ 100 a $1\,000 \text{ km}$, aunque el plasma no sólo se excita sino que también se produce una ionización notable, hasta densidades mil veces superiores a las que prevalecen en la baja ionosfera, durante la duración de la aurora. Puesto que se trata de un fenómeno esencialmente nocturno, el agente excitante e ionizante no puede ser la luz electromagnética, sino que se trata de partículas cargadas, guiadas por las líneas del campo geomagnético. La frecuencia de auroras sigue el ciclo oncenal de actividad magnética solar aunque con cierto retardo en los picos (Fig. 18). Las más brillantes están directamente ligadas a las fulguraciones solares, apareciendo simultáneamente a la subtormenta geomagnética en los dos hemisferios. Sin embargo, las partículas energéticas solares no son ciertamente la causa directa, pues llegan mucho antes que el inicio de la subtormenta y no tendrían razón alguna para concentrarse sólo en las

zonas aurorales. Se puede pensar también en las nubes de plasma emitidas por centros activos y fulguraciones, que sí están directamente asociadas a la subtormenta, épero en ese caso, por qué esa localización en zonas restringidas en latitud? Se puede también pensar que las partículas pertenecen al viento solar, sin embargo su débil energía, $\leq 1 \text{ KeV}$, no les permite filtrarse fácilmente a través de la pantalla del campo magnético; no obstante, una fracción de las partículas llega a penetrar por la magnetocola, con una dificultad menor, cuanto mayor es el nivel de la actividad solar. Lo que sucede es que el movimiento de reflujo hacia la Tierra va acompañado de una ganancia de energía hasta $\sim 10 \text{ KeV}$, como resultado de campos eléctricos o variaciones de campos magnéticos asociados a reacoplamientos de líneas de campo magnético, causados por las perturbaciones de la subtormenta —lo que acelera también partículas locales. Las observaciones indican una localización de estos fenómenos aproximadamente a $7 R_E$, distancia a la cual las partículas se precipitan a lo largo de las líneas de fuerza del campo magnético, provocando las auroras polares (Fig. 19).

Las consecuencias de estos fenómenos son muy variadas, de las cuales las más espectaculares se localizan a nivel del suelo: la precipitación de partículas entraña corrientes de gran intensidad, de varios millones de amperios, muy variables, que pueden crear por inducción en la corteza resistiva de la Tierra campos eléctricos hasta de 5 volts/km y producir daños en los sistemas conductores tales como oleoductos (Fig. 20), cables telefónicos o líneas de conducción de energía eléctrica. Por ejemplo, como Canadá y el norte de Estados Unidos están muy cerca de la zona auroral, y la red de líneas de alta tensión es muy vasta y densa, sucede a menudo que los campos eléctricos telúricos acabados de mencionar hacen circular corrientes de cerca de un ciento de amperios a nivel del "neutro" de los transformadores. Las alternancias se tornan entonces disimétricas, y así una pérdida de rendimiento y consecuentemente de la tensión, hasta en un 50%, sometiéndose además el transformador a un calentamiento temporal: los dispositivos de control automático y manual desconectan entonces la central de la red, precisamente cuando la potencia generada por las otras centrales es inferior. La demanda de potencia de las centrales que aún están conectadas, aumenta por encima de los límites razonables y se provoca una desconexión en cadena. Es así entonces que las subtormentas geomagnéticas y auroras asociadas, están al origen de los apagones espectaculares ocurridos en Nueva York en mayo de 1969 y agosto de 1972, entre otros.

Otras consecuencias conciernen al incremento de la densidad electrónica en la ionosfera a consecuencia de la precipitación de partículas, con la subse-

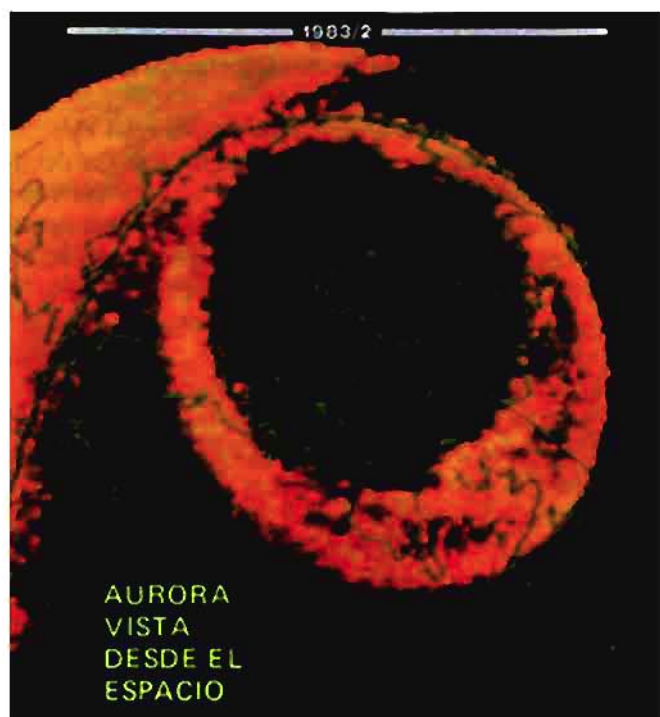


Figura 19. Aurora polar vista desde el espacio por el satélite Explorador Dinámico I en luz ultravioleta, a $25\,000 \text{ km}$ arriba del polo norte.



Figura 17. Auroras polares (boreales o australes) debido a la excitación atómica y molecular que se produce por partículas cargadas energéticas que interactúan con la atmósfera terrestre.

cuenta perturbación de las comunicaciones radioeléctricas: las corrientes asociadas, circulando a 100 km de altura forman el *electrojet auroral*, que por el efecto Joule resultante contribuyen al calentamiento de la atmósfera superior, además de la energía depositada directamente por las partículas precipitadas, precisamente en regiones donde no llega la luz del Sol ordinariamente. Por otro lado, las interacciones de esas partículas con especies neutras producen una modificación de la circulación en esa zona atmosférica, lo que afecta los fenómenos de transporte de materia y energía en alturas menores, justamente donde se determinan los procesos meteorológicos. Parece existir una cierta correlación entre la circulación troposférica y las características del viento solar "reforzado" (que origina precisamente la actividad magnética auroral o polar). Otra implicación a nivel de la atmósfera, consiste en que la inyección de partículas energéticas produce un fenómeno de carga en los vehículos espaciales que pueden inducir efectos de ruidos electrostáticos capaces de deteriorar sus partes electrónicas o de telecomando.

6. *Modulación de los rayos cósmicos* en el viento solar. En las fulguraciones solares se eyecta plasma

magnetizado hacia el espacio interplanetario con una velocidad del doble de la del viento solar quieto, alcanzando la Tierra dos días después de haber atravesado el tortuoso camino, con múltiples deflexiones con el campo interplanetario. Esto causa un incremento sustancial de la densidad de energía del viento solar. Sin embargo, nuestro planeta no se encuentra necesariamente dentro del trayecto de esa nube de

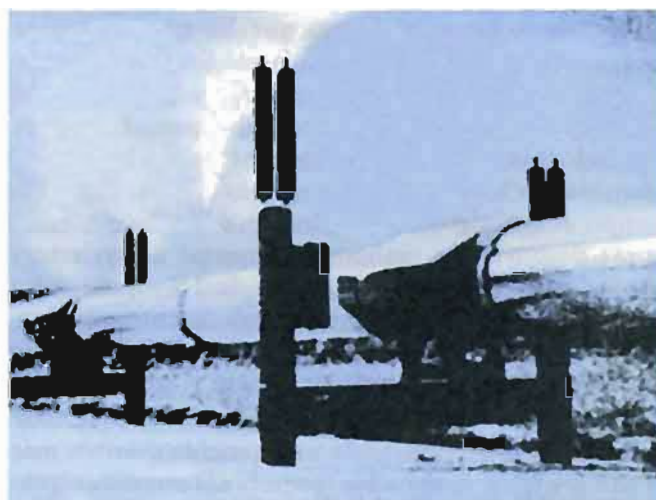


Figura 20. La ocurrencia de auroras entraña a menudo la generación a nivel del suelo de intensas corrientes eléctricas (varios millones de amperios) y campos eléctricos de varios volts/km que pueden producir serios daños en instalaciones tales como oleoductos, líneas eléctricas, telefónicas, etcétera.

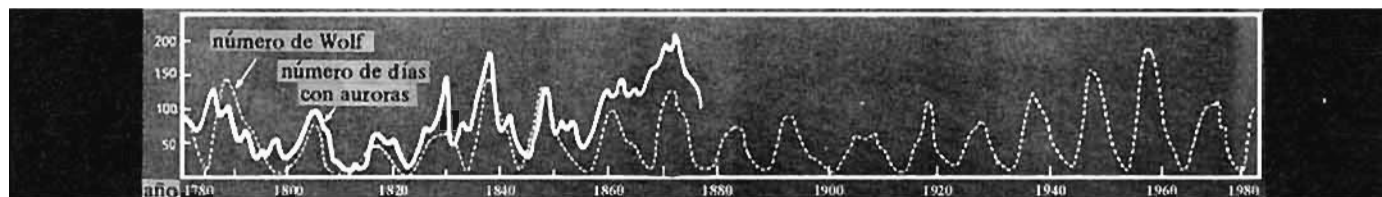


Figura 18. La frecuencia con auroras sigue el ciclo oncenal de actividad solar con cierto retraso.

plasma magnetizado: todo depende de su extensión lateral y la localización de su fuente en relación a los tubos magnéticos de Arquímedes que conectan al Sol y la Tierra (Fig. 21). Se produce así una modulación de los rayos cósmicos galácticos similar a la que se produce acorde al ciclo oncenal de actividad, sólo que a corto término. Se observa después de algunas decenas de horas de la fulguración una disminución de aproximadamente 20% de flujo galáctico de rayos cósmicos, que dura varios días para recuperar el nivel normal del fondo galáctico. Este fenómeno es conocido como "efecto Forbush" y se atribuye al bloqueo magnético efectuado por el reforzamiento de campo magnético del viento solar, proveniente de la nube de plasma magnetizado, al pasar en la vecindad de la órbita terrestre. Las partículas son desviadas y deceleradas, de tal suerte que se reduce el número que puede sobrepasar esa barrera y llegar a nuestra vecindad.

7. *Tormentas magnéticas*, se distinguen dos tipos de tormentas magnéticas, las llamadas a) *tormentas recurrentes* y b) *tormentas esporádicas*. Así también cada una de ellas se subdivide en dos tipos, de *inicio brusco* y de *inicio progresivo*. Las del tipo *recurrente* parecen estar asociadas a los torrentes de muy alta velocidad del viento solar que se asocian a los hoyos coronales, y a regiones activas que perduran varias rotaciones solares; en tanto que las *esporádicas* se asocian a las fulguraciones solares. En general, ocurre que el plasma rápido eyectado por la fulguración o el reforzamiento del viento solar por chorros de alta velocidad, al llegar a la magnetosfera la comprimen, dando lugar así a un incremento importante de campo magnético, conmensurable en la Tierra. Unas horas después, sin embargo, el campo se invierte y cae en intensidad con un valor de 1% de su valor normal, el cual se recupera posteriormente muy lentamente. El mínimo valor de intensidad de campo ocurre medio día después del inicio y tarda en recuperarse de 2 a 3 días. En realidad las tormentas magnéticas son la secuencia de una serie de eventos más fundamentales designados como *subtormentas geomagnéticas*, que constituyen formalmente la analogía más cercana con el fenómeno de mayor impacto sobre el sistema solar: las *Fulguraciones Solares*; de hecho puede ser que ambos sean la manifestación de una misma inestabilidad básica universal, que tam-

bien puede tener lugar en otros fenómenos explosivos, como explosiones de galaxia, ráfagas (fulguraciones) estelares, en supernovas, etc. Las subtormentas son, entonces, fenómenos explosivos (de 10-20 min de duración) en los que la energía magnética acumulada es convertida en energía cinética del plasma, por el proceso de reacoplamiento y reconexión de líneas de campo, en el que un intenso campo eléctrico localizado se genera acelerando partículas y plasma a lo largo de una línea neutra que se forma en la región de reconexión del campo magnético interplanetario con el campo de la magnetosfera, cuando a consecuencia de la compresión se juntan líneas de polaridad opuesta. Dicha compresión crea entonces un plasma y configuración magnética altamente inestables, tal que al relajarse a un estado más estable, se produce el fenómeno explosivo de la subtormenta, en el que se generan verdaderos cinturones de anillos de corrientes eléctricas muy intensas, que provocan precisamente la disminución de campo magnético, y cuya correspondiente energía se transforma en cinética. Algunas de las partículas aceleradas, muchas de las cuales al origen provenían del reflujo del viento solar a través de la magnetocola, adquieren su membresía para ingresar a los anillos de radiación de Van Allen, dentro de la *plasmoesfera*, en donde se establecen interacciones ondas-partículas que se utilizan desde la Tierra como sensores de percepción remota de la evolución de las configuraciones magnetosféricas. Es evidente que todas las implicaciones descritas en relación a las tormentas ionosféricas y a las auroras, en lo concerniente a disturbios ionosféricos y terrestres, son en el fondo consecuencias del fenómeno de las subtormentas; en particular, los cambios de densidad inducidos en la atmósfera superior pueden alterar sustancialmente la estabilidad orbital de los vehículos espaciales de perigeo-corto. Parece, incluso, que los procesos magnetosféricos pueden afectar a la propia rotación terrestre.

Las fulguraciones (llamadas) solares

Como la sede de la mayor parte de los fenómenos variables de carácter transitorio que estudia la física solar-terrestre son las fulguraciones solares (ver ICyT, núm. 93), vale la pena retrazar brevemente la evolución de estos fenómenos, que ultimadamente constituyen el espectáculo más extraordinario y más ener-

gético del sistema solar, y que generalmente no se pueden observar en luz blanca visible, sino que más del 90% se observan en la parte roja del espectro luminoso (en la línea $H\alpha$, por ejemplo).

El primero en reportar una fulguración fue el astrónomo británico Richard Carrington, el 10. de julio de 1859, que coincidió en ser una de las escasas fulguraciones observables en luz blanca. Las fulguraciones están siempre asociadas a las manchas magnéticas de la superficie solar. Las manchas aparecen cada vez que hay una variación local del campo magnético sobre la fotosfera y en la corona del Sol. En primer lugar, se nota la aparición de una zona compacta, tal que si la intensidad de campo magnético es débil se tendrá una *playa facular*, en tanto que si es elevada, se tendrá enseguida una mancha. Si es una playa, se verá más clara que la superficie promedio del Sol, e irá progresivamente elongándose en el sentido este-oeste. Dos días más tarde aparecen puntitos negros sobre esa playa, dos de los cuales aumentan de superficie para constituirse en manchas: una de ellas, adelante en el sentido de la rotación se convertirá en la mancha "cabeza", y, la otra, atrás, en mancha "cola", con polaridades magnéticas opuestas. Las dos manchas se separan lentamente rodeándose de manchas más pequeñas. Una decena de días después del nacimiento de ese centro activo termina su crecimiento, y es entonces que sobreviene una fulguración, si es que la fulguración tiene ahí lugar: en realidad si el grupo de manchas está perfectamente constituido, con sus manchas cabeza y cola en su respectivo lugar, probablemente no sucede nada; pero si la una y la otra se embrollan entre sí, o si dos grupos bipolares se superponen apareciendo puntos brillantes entre regiones de polaridad opues-

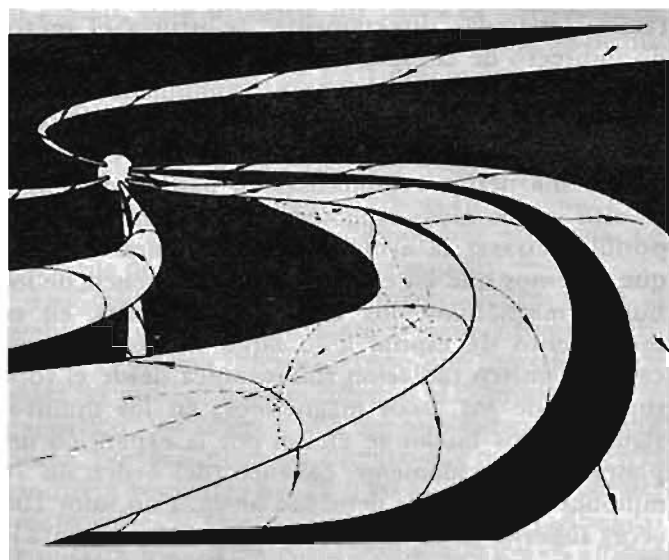


Figura 21. Esquemática de los "tubos" de campo magnético (tubos de Arquímedes) en que se concentran las líneas de campo magnético interplanetario.

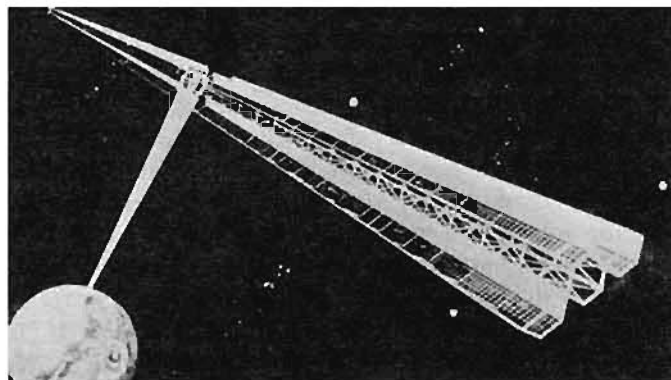


Figura 27. Concepción artística del ambicioso proyecto (SPS), Satélite de Potencia Solar.

ta, se genera, entonces, una inestabilidad magnética que, muy probablemente va a producir una o varias fulguraciones. El fenómeno evoluciona en varios minutos, los puntos brillantes se reúnen formando surcos luminosos. En esas condiciones, se presenta la ruptura de un filamento en la vecindad de una de las manchas, lo que indica un cambio de configuración magnética. Los *filamentos*, hemos dicho en *ICyT*, núm. 92, son la proyección sobre la superficie solar de arcos de gas ionizado, que cuando se observan sobre el borde del disco, dibujan magníficas *protuberancias* luminosas. En luz roja $H\alpha$, se ve aparecer un enorme punto muy luminoso que alcanza su brillantez máxima en pocos minutos, para extenderse a continuación formando una especie de manchón de múltiples ramificaciones. Se eyecta, entonces, en proyección que sigue las líneas de campo, material solar del filamento, que se eleva como jet para volver a caer una parte en forma fraccionada. Una pequeña fracción del disco solar (menor o igual que 5 mil millones de km^2 ; 2 500 veces la República Mexicana) se observa literalmente en flamas (Fig. 22). La región tardará cierto tiempo (menos de 3 horas) para recobrar su aspecto normal. Se libera en unos minutos una cantidad brutal de energía ($\sim 10^{31}$ ergios), que traducida en términos de potencia $\sim 10^{19}$ Kw/h (equivalente a 100 millones de años del consumo eléctrico actual de México, suficiente para cubrir los requerimientos energéticos de la humanidad en los próximos 100 mil años); en otros términos, equivalente a una explosión de 25 mil millones de megatones (como marco de referencia se puede indicar que la bomba atómica de Hiroshima correspondió solamente a 0.02 megatones). Físicamente se produce *in situ* la eyección de plasma (materia compuesta de protones, electrones e iones pesados de muy alta temperatura). Tal deflagración provoca: la creación de una onda de choque que se propaga en la corona solar a más de 1 200 km/seg, destrucción del campo magnético local y aceleración de partículas locales (protones, electrones y

núcleos pesados) a energía cinética del orden de (1 a 15 000) MeV/núcleos para los núcleos y (0.01 a 10) MeV los electrones, calentamiento del material circundante y emisiones electromagnéticas en todo el espectro (rayos- γ hasta radio ondas). El destino de esas partículas aceleradas dependerá de la altitud en que son inyectadas en la atmósfera solar y de la configuración magnética en el lugar de inyección: si es muy abajo se frenarán por la densidad relativamente elevada, termalizándose rápidamente. Por lo contrario, más arriba en la corona, pueden encontrar líneas abiertas de campo magnético, lo que les permitirá escaparse hacia el espacio interplanetario, previo desplazamiento azimutal hasta encontrar esas líneas. Durante su pasaje a través de la corona, las partículas provocan excitaciones del plasma local, lo que induce sobressaltos en las emisiones de radio del Sol, lo mismo que intraccionando con los campos magnéticos (efecto sincrotrón); éstos en general se designan como *estallidos de radio*, los que despliegan una clasificación muy amplia. En general, se caracterizan por una fuerte deriva en frecuencia hacia las bajas frecuencias (a razón de 20 MHz/seg) a medida de que los haces de partículas atraviesan regiones de densidad y campo magnéticos más débiles. De tal suerte que los radiotelescopios registran primero ondas métricas, luego decamétricas, hectométricas y kilométricas, en el curso de unas cuantas decenas de segundos. Desde el punto de vista de la radiación-X liberada, las fulguraciones se clasifican en 3 clases: comunes = C, moderadas = M e intensas = X, cada una en la escala de 1 a 12 (es decir, la X-12, siendo la más intensa, es 12 veces más intensa que la X-1, la cual a su vez libera 10 veces más radiación que la M-1 y 100 veces más que las de clase C-1). Otras clasificacio-

ciones conciernen al área ocupada, o a otros tipos de emisiones de partículas o fotones.

El hecho de que las fulguraciones ocurren cerca de manchas en fase de crecimiento, en donde los campos magnéticos de formación reciente emergen en forma de bucles a la superficie solar, ha conducido a que, entre la gran cantidad de diferentes tipos de modelos que se proponen para el origen e interpretación del fenómeno, dos principales corrientes sean las que se mantengan permanentemente en el primer "rank" de popularidad: a) Al emerger los bucles magnéticos, éstos tienden a expandirse por la acción del plasma coronal en expansión, e interactuar con los campos de formación anterior, tal que cuando bucles contiguos de diferente polaridad se juntan entre sí, se suscita una aniquilación de líneas de campo formándose una *hoja neutra* entre ellos, con la subsecuente reconexión y reorganización de líneas de campo. Esa hoja neutra es la sede de inestabilidades (llamadas de "desgarre" y "efectos de constricción") que inducen intensos campos eléctricos acelerando partículas a las energías observadas, y propiciando la eyección de masa. b) El segundo tipo de modelo, los "tokomaks", por analogía con los reactores de fusión a nivel de laboratorio, propone la sede de inestabilidades en el interior mismo de los bucles toroidales, en vez de las láminas neutras. En el presente, es aún difícil discernir cuál de los dos tipos de modelo es el adecuado, pues ciertos tipos de observaciones favorecen a uno, y otras observaciones al otro.

Para entender mejor los detalles del proceso conviene disponer de la evolución temporal y espacial de la temperatura en el curso del fenómeno; como no existen termómetros sensibles a temperaturas de (1 a 100) millones de $^{\circ}\text{K}$ y, además, no es aún factible realizar medidas directamente, se utiliza el método indirecto de la espectroscopía. En particular con la espectroscopía de rayos-X, combinada con las observaciones en otras longitudes de onda (UV y radio-ondas principalmente), y con las cartas de campo magnético establecidas en base al desdoblamiento de las rayas espectrales (efecto Zeeman), es posible retrazar la evolución del fenómeno. Es así que sabemos que en el curso de la emergencia de los bucles magnéticos, los electrones termales, en su movimiento de espiral a lo largo de las líneas de campo, emiten radiación sincrotrónica desde el tope superior de los arcos magnéticos; en los minutos siguientes los bucles se elevan por la expansión del plasma extremadamente caliente (del orden de 70 millones de $^{\circ}\text{K}$), y la densidad alcanza un valor 100 veces superior al de la prefulguración. Se calienta la cromosfera que emite radiación inmediatamente, lo que entraña entonces una expansión explosiva del plasma a través de la corona a velocidades tan altas

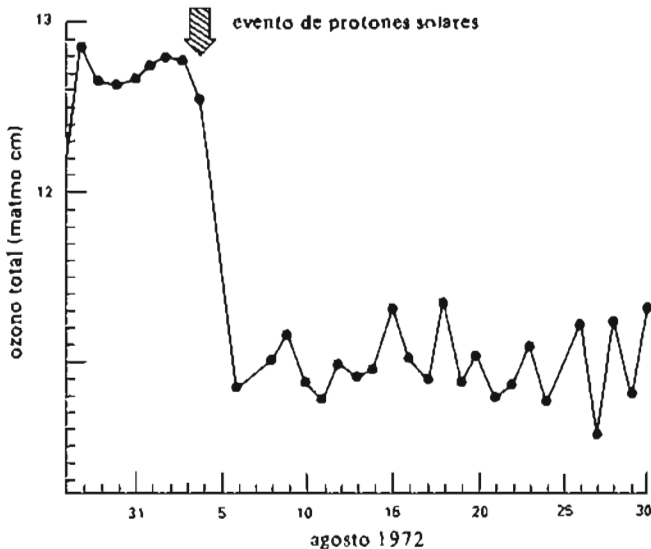


Figura 23. Reducción del ozono por efecto de las partículas solares sobre la atmósfera en las altas altitudes. (De acuerdo con D. Heath).

como 1 500 km/seg, habiéndose generado electrones energéticos y protones de energía alrededor de 100 KeV. Las ondas de choque generadas en esa explosión así como la gran onda de choque que acompaña a las eyecciones del plasma coronal, aceleran las partículas que penetran el campo magnético de la corona con un ángulo de $\sim 3^\circ$ con respecto a la orientación de ese campo, tal que los protones alcanzan en esta segunda etapa de aceleración energías del orden de cientos y miles de MeV, en tanto que los electrones pueden alcanzar energías de algunas decenas de MeV. Las partículas aceleradas, incidiendo sobre la cromosfera, dan lugar a emisiones intensas en rayos-X y UV, en tanto que los electrones generan principalmente los estallidos previamente mencionados en radio-emisiones, durante su confinamiento en regiones cerradas de campo, o durante su escape de regiones abiertas de campo magnético. Algunos minutos después, al enfriarse el plasma se emite principalmente en UV e inclusive en luz blanca.

Sin embargo, todavía quedan muchos enigmas por resolver, uno de los cuales es el ¿por qué parte de esos protones y electrones acelerados atraviesan la atmósfera agrupados en haces coherentes de partículas sin difundirse erráticamente? Esto preocupa particularmente a los especialistas, pues cuando se descubre el por qué de esa propiedad, desafortunadamente, la tecnología de las armas de "haces de partículas", muy en boga en la actualidad, habra progresado seriamente. A pesar de la enorme cantidad de trabajos cuantitativos, teóricos y observacionales realizados para descifrar los detalles del proceso mismo de aceleración de partículas termales hasta energías supratermales e incluso relativistas, esto se presenta aún elusivo a ser totalmente comprendido; en efecto, para producir los haces de partículas de energías observadas se necesitarían diferencias de potencial en el dominio de 1 a 1 000 millones de volts, que no se encuentran en la atmósfera solar, y que además, de existir permanentemente, provocarían que los electrones, que son más ligeros, se desplazaran inmediatamente provocando cortos circuitos entre las zonas susceptibles de acelerar protones. La búsqueda de otras soluciones se impone.

Las repercusiones de las fulguraciones sobre el medio terrestre, la atmósfera y campo geomagnético, vía el plasma interplanetario, son inmediatas: de todas las radiaciones emitidas en el dominio electromagnético, los rayos-X son los que tienen el mayor efecto, por la ionización intensa que producen en la atmósfera terrestre. En 20 ó 30 minutos después del evento solar, la electrización de las capas rarificadas de nuestra atmósfera entre 200 y 400 km de altitud aumenta enormemente. Los espejos de ondas de radio que constituyen las llamadas capas de *Heaviside* se trastornan totalmente. Las ondas cortas que se

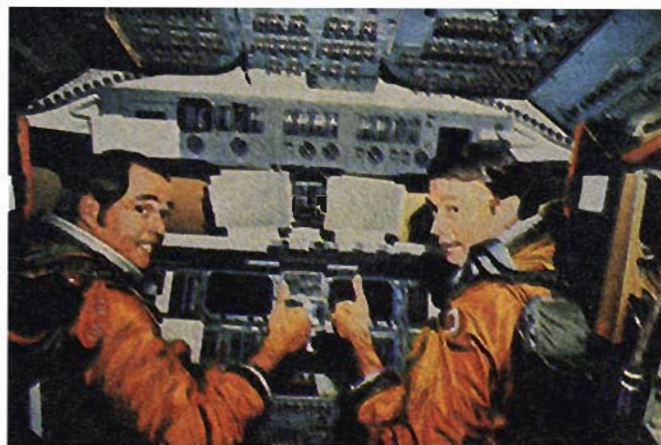


Figura 24. Young y Crippen, astronautas del Columbia en abril de 1981.

propagan botando entre las capas sucesivas, agujeran súbitamente los espejos y se pierden en el espacio. Por el contrario, ciertas ondas, como las de la televisión, se van a encontrar ahora con una zona que se convirtió en reflexiva para ellas, de manera que las emisiones se verán nebulosas por imágenes fantasmas provenientes de miles de kilómetros. Por otro lado, la onda de choque y las nubes de plasma, atravesando el medio ultrarrarificado del viento solar a una velocidad 2 a 3 veces superior a la de él, alcanzan la Tierra 1 a 3 días después, con una velocidad promedio del orden de 1 000 km/seg, modificando la configuración magnética existente entre nuestro campo magnético y el viento solar. Las partículas cargadas confinadas en los anillos de Van Allen, alteran sus trayectorias, propiciando su penetración hacia los polos, donde producen cierto tipo de fenómenos luminosos y las auroras polares. Las tormentas magnéticas e ionosféricas hacen lujo de presencia. En cuanto a las partículas aceleradas, lo que sucede es que siendo las fulguraciones fenómenos localizados, las emisiones resultan relativamente direccionales, en el sentido de que las partículas son canalizadas por el campo magnético interplanetario (figuras 8 y 21); la Tierra, estando lejos de encontrarse siempre en el eje Sol-Tierra adecuado, no recibe generalmente más que bocanadas muy diluidas de lo que fue emitido. Las partículas cuya llegada a la Tierra puede ocurrir en tan sólo 8 minutos o en varias decenas de minutos, pueden durar varias horas e incluso días, añadiéndose temporalmente al flujo de rayos cósmicos galácticos. Afortunadamente existe el efecto protector de la atmósfera y de la magnetosfera terrestre; lo que no es por ejemplo el caso de la Luna, que preocupa altamente a los especialistas en programar viajes del hombre hacia ese satélite. Evidentemente, sin ese efecto de escudo de la atmósfera la vida en la Tierra no habría podido desarrollarse. En cuanto a la mag-



Figura 22. Fulguración solar típica. La altura del marco es de 220 000 km. Se inserta la Tierra a la misma escala (acorde a R. Giovanelli).

netosfera: algunas partículas de cierta energía y direcciones específicas de llegada a ella son desviadas lejos de la Tierra, en tanto que otras penetran siguiendo las líneas de fuerza encurvadas hacia las altas latitudes. Estas al ser absorbidas en las altas latitudes producen nuevos efectos de ionización de las capas reflectoras, afectando también las ondas cortas de radio en esas regiones (Suecia y Canadá muy particularmente). Esa "lluvia polar" dura a veces varios días, el tiempo que toma en que todo el espacio situado entre el Sol y la Tierra, se encuentre "lavado" de esos jets corpusculares. Los protones que alcanzan a llegar hasta altitudes de 60 ó 40 km producen los mismos efectos que los rayos-X mencionados: ionización en las capas bajas de la ionosfera y disociación de moléculas. En el primer caso se produce la formación de capas ionosféricas absorbentes, que tienen por efecto el impedir toda comunicación radioeléctrica en los casquetes polares durante varios días (lo que hemos dicho se denomina "apagón" polar). En el segundo caso, ocurre la formación del óxido de nitrógeno reductor que, por reacción con el ozono, disminuye la concentración de

ta de un -20% (como en el caso de la serie de eventos del mes de agosto de 1972), y con una duración que puede prolongarse por cerca de un mes (Fig. 23). Se estima que la tasa de producción de óxido de nitrógeno pudiera incrementarse en un factor de 7, si el campo magnético terrestre llegara a anularse, lo que conduciría a una disminución de la cantidad de ozono en la alta atmósfera, muy perjudicial para el mantenimiento o el desarrollo de las actuales formas de vida sobre el planeta (ver *Elementos* núm. 6, 1985). En efecto, la capa de ozono situada aproximadamente

entre 25 y 50 km, constituye una pantalla protectora extremadamente eficaz contra la penetración de los rayos-X hasta el nivel del suelo. Ahora bien, la anulación del campo magnético terrestre se produce en cada una de las inversiones, con un promedio de cada 100 mil años. Obviamente la ausencia del campo geomagnético en coincidencia con las fulguraciones puede provocar modificaciones en los sistemas ecológicos de nuestro planeta, tales como mutación y extinción de especies orgánicas, razón por la cual se especula acerca de que el origen de la tendencia de ciertas especies a evolucionar escalonadamente y no en curvas, pueda estar asociado a la ocurrencia de periodos de muy intensa actividad solar en coincidencia con los periodos de depresión e inversión del campo geomagnético en el pasado; como una hipótesis alternativa a aquella en la que la desaparición de algunas especies, en particular los dinosaurios, puede estar asociada con la incidencia esporádica de material extraterrestre, como restos cometarios, que al interaccionar con la Tierra produjeron una explosión y subsecuente levantamiento de polvo que se tradujo en una especie de "inviernos nucleares" por periodos mayores a los 6 meses. Dicho sea de paso, la próxima inversión de campo geomagnético está prevista para antes del año 3000.

Los protones que penetran hasta altitudes de 20 a 30 kilómetros crean también una débil ionización que modifica la conductividad eléctrica por encima de las nubes, y que favorece tormentas atmosféricas y precipitaciones en forma de lluvia: he aquí una de las posibles influencias directas importantes de la actividad solar sobre nuestro clima, que tanto tras-

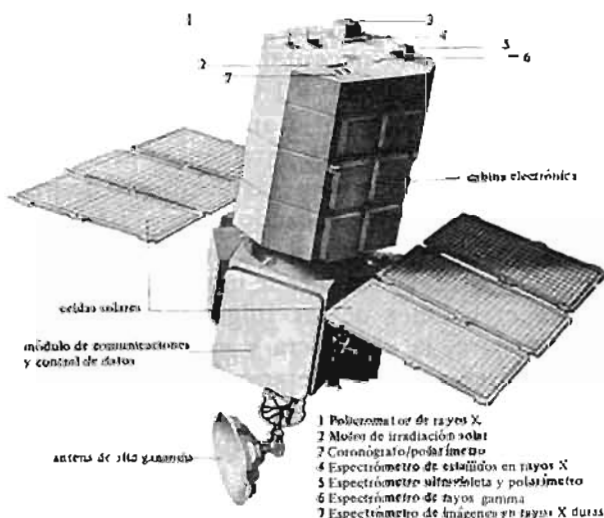


Figura 29. Satélite de la Misión del Máximo Solar, en la que se recolectó la información más moderna y abundante en lo concerniente a los diversos fenómenos asociados a la actividad solar, y a partir de la cual se comienza a entender un poco mejor los procesos de generación de partículas solares.

tornó la meteorología a finales de julio y en agosto de 1972 en Europa y América del Norte, al menos. Aunque aparentemente muy pocas partículas penetran más abajo de 40 km, no se puede negar que las perturbaciones en las capas superiores influyan sobre las capas inferiores, en donde se localiza la sede de los fenómenos meteorológicos propiamente dichos. Al efecto, durante *un verano del 72* se desarrolló una actividad anormal en el Sol, con fulguraciones violentas "fuera de estación", excepcionales por su fecha de ocurrencia y por su carácter. Por su fecha de ocurrencia ya que es poco usual que eso ocurra en la fase de declinación de un ciclo (núm. 20), en el cual de hecho, el máximo precedente de 1968-1969, fue de débil intensidad comparada a los máximos anteriores, principalmente el de 1957-58. Fue precisamente lo calmado de ese máximo lo que permitió los desembarcos sobre la Luna de 1969-1972; sin embargo, a pesar de esa relativa calma, en el curso del evento del 7/VIII/72, la dosis de radiación que incidiría en las paredes de un vehículo espacial, fue equivalente a los 1 080 rad, muy por encima de la dosis letal de 400 rad. De acuerdo al boletín emitido por el *Solar Forecaster* (vigilante solar) de la National Oceanic and Atmospheric (NOA) de Boulder, Colorado, tal evento en la fase decreciente del ciclo, es "como si nevara en Atlanta, Georgia en el mes de julio" (como si lloviera en Acapulco en el mes de diciembre). Fulguración excepcional por su carácter, ya que el caso precedente data de 1959, poco después también del pico de actividad, ocasión en que un mismo centro de actividad produjo varias fulguraciones sucesivas de efectos acumulativos. Durante el periodo 2 a 8 de agosto de 1972, el tránsito telefónico por cables coaxiales fue alcanzado por los efectos de superficie, ejemplo adicional de que no sólo la propagación ionosférica de radio ondas es afectada.

La fulguración de abril, 1981

El 10 de abril de 1981, una fulguración de las más intensas que se hayan registrado tuvo lugar 43 horas antes del lanzamiento de la nave tripulada *Columbia*: si ésta hubiese sido lanzada como estaba previsto originalmente el día 10 a las 12 hrs. T.U., la fulguración habría coincidido con la cuarta órbita de los astronautas Young y Crippen (Fig. 24), quienes habrían recibido una dosis de radiación tal, que sin duda les habría impedido volver al espacio por el resto de sus vidas; afortunadamente para los astronautas, una avería en la computadora obligó a diferir en 48 horas el primer vuelo de ese navío espacial. El 12 de abril los efectos de la fulguración se hacían aún sentir pero los protones más energéticos que conducían energías hasta de 500 MeV habían ya alcanzado la Tierra y habían sido absorbidos en gran

parte por los cinturones de radiación de Van Allen. Estos anillos de radiación juegan un papel benéfico, confinando parte del excedente de partículas cargadas que invaden nuestro medio ambiente a causa de las fulguraciones solares. Los astronautas del *Columbia* se beneficiaron entonces de esa protección, puesto que circularon por debajo. No obstante, esa protección se vuelve de carácter muy parcial para las fulguraciones particularmente intensas en protones, como ocurrió el 10 de abril en la ocasión del vuelo inaugural del *Columbia*. Los protones acelerados a energías superiores a los 10 MeV, particularmente, lograron pasar a través de las "mallas" de esa red protectora. El conteo de ellos indicó flujos hasta del orden de 300 protones/cm² seg después del filtrado por los cinturones de Van Allen. Tal flujo habría obligado a anular cualquier excursión fuera de la nave, si ésta hubiese salido normalmente, pues las escafandras no habrían constituido ninguna protección biológica adecuada. El flujo de protones de alta energía emitido en ese evento del 10 de abril de 1981, era tal que de ser recibida por los astronautas fuera de la nave con su simple escafandra, habrían perecido en un lapso no muy prolongado, pues la dosis excedía ampliamente la dosis letal. Una exposición de solamente una hora habría sido suficiente para provocar náuseas y vómitos. Los peligros están aún latentes para los astronautas que trabajan a bordo de transbordadores y estaciones (militares, por ejemplo) en órbita polar, ahí donde la protección de los anillos de Van Allen es prácticamente nula. En efecto, esa órbita, inclinada 90° respecto al ecuador terrestre, es la única que permite sobrevolar la casi totalidad del planeta (de ahí que se conciba fácilmente el interés primordial que representa para los militares), a pesar de los inconvenientes que ofrece en lo relativo a seguridad radiológica de los tripulantes. De ahí también, que ese evento del 10 de abril haya sido particularmente analizado por científicos, para conocer su desarrollo y comprender de manera más profunda las causas y los efectos.

Se sabe ahora que los sucesos se desarrollaron de la manera siguiente: el 2 de abril apareció una mancha aislada similar a las que aparecen regularmente sobre la superficie solar, que se insertan dentro de un conjunto más vasto, del tipo de los denominados *centros activos*. Hasta el 7 de abril, la mancha no cambió de forma; a partir de esa fecha una especie de erupción brotó en forma de mancha brillante, contigua a la mancha solar. El 8 de abril, 16 pequeñas manchas adicionales aparecieron alrededor de la original, y cinco nuevas erupciones brillantes se produjeron en la región. El 9 de abril se contaba ya con 29 manchas solares, y se sucedía la catorceava erupción brillante de la región. No había sin embargo ninguna razón aún para temer la ocurrencia de un

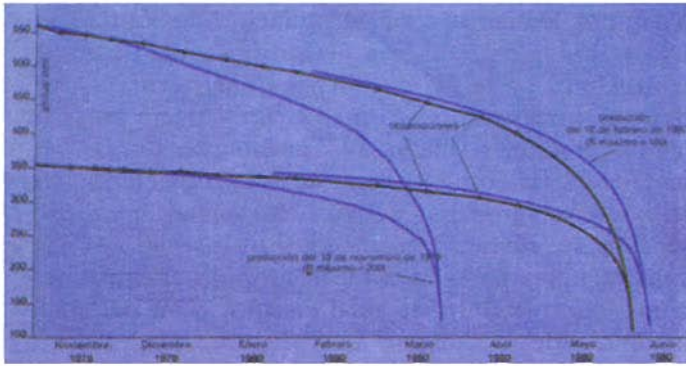


Figura 25. Ejemplificación del fenómeno de frenado de un satélite en la atmósfera terrestre con el satélite MAGSAT. Las curvas azules ilustran las predicciones para el frenado y las curvas negras lo ocurrido realmente durante el vuelo (acorde a R. Gendrin).

fenómeno más violento. Los magnetogramas, que según hemos descrito en *ICyT*, núm. 92, constituyen fotografías que permiten visualizar en el disco solar las zonas fuertemente magnetizadas, en forma de manchas blancas y negras (polaridades positivas y negativas respectivamente), mostraban claramente una estructura magnética más compleja que las ordinarias; sin embargo, no era para conmocionarse, pues no había algo verdaderamente excepcional. De repente, el 10 de abril en la mañana, la mancha inicial de polaridad negativa se rodeó de un rosario de manchitas alternativamente positivas y negativas. A unas pocas horas del lanzamiento previsto para el *Columbia*, se concibió entonces la presencia de un grupo de manchas poco usual, y que algo iba a ocurrir: 7 erupciones brillantes a manera de ráfaga dieron la señal del inicio de la gran fulguración, que como marcejada sumergía a las 16:45 T.U. toda una región del disco solar, que en su máximo de extensión alcanzó a cubrir 2 mil millones de km^2 (o sea mil veces la superficie de México). El desplazamiento brutal de plasma solar producido por esa fulguración provocó una onda de choque que se propagó rápidamente por la corona, acompañada de grandes masas de plasma, que alcanzaron, 58 horas más tarde, la magnetosfera terrestre, provocando inmediatamente una *tormenta magnética* sumamente violenta, que dio lugar a una irrupción brusca de electrones en el campo magnético (las agujas imanadas se trastornaron de inmediato). Canalizadas por las líneas de fuerza del campo geomagnético, las partículas interactuaron notablemente con los átomos de la atmósfera alta, excitándolos, con la aparición subsecuente de magníficas auroras boreales. Una de ellas, particularmente intensa, se contempló en Canadá y EU; pero algo más inhabitual fueron las sobretensiones de la red eléctrica de alta tensión (medio millón de volts) que se manifestaron entre Dultun y Winnipeg. En Quebec, un transformador recién instalado

se quemó completamente. Los electrones que alcanzaron altitudes menores desorganizaron parcial y localmente la ionosfera entre 80 y 250 km de altitud, la que actúa como espejo reflector de ciertas ondas de radio: la gama de ondas cortas utilizadas generalmente para comunicaciones profesionales, la armada, la marina, la policía, etc. La tarde misma del 12 de abril, fueron señaladas perturbaciones radiotelefónicas en las frecuencias de la policía, particularmente en Topeka y Kansas. Sin embargo, las comunicaciones con el navío espacial no fueron interrumpidas, aunque estuvo sujeto como tantos otros satélites artificiales, que circulan a menos de 3 000 km de altitud, a un incremento de la densidad atmosférica. La temperatura en la exosfera, más allá de 600 km de altura, saltó bruscamente de 1 200 a 2 200°K, siendo el salto más brusco registrado en los 15 años precedentes. El calentamiento provocado en la atmósfera por las radiaciones corpusculares y electromagnéticas emitidas por el Sol, provocaron alto grado de agitación térmica de las moléculas atmosféricas que se repartieron a altitudes donde generalmente su densidad es muy débil. A los 200 km de altura en que circulaba el *Columbia*, la densidad de duplicó de $8 \times 10^{-13} \text{ gr/cm}^3$ a $1.7 \times 10^{-12} \text{ gr/cm}^3$ en el curso de unas cuantas horas.

El frenado atmosférico de la nave (Fig. 25) se encontró acrecentado proporcionalmente. Consecuen-

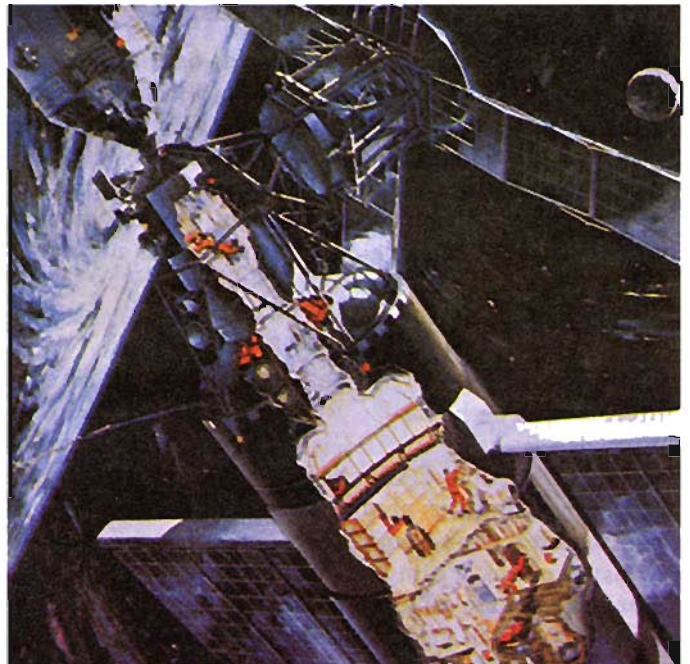
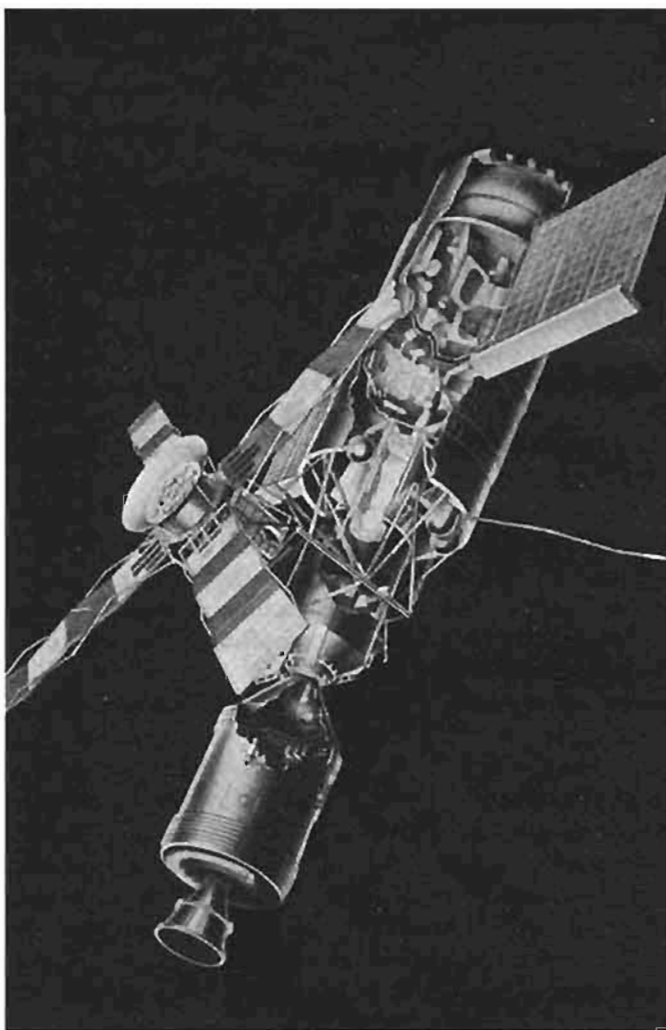


Figura 26. El Skylab, transportó ocho instrumentos para observación solar en el curso de cuatro diferentes misiones, tres de ellas tripuladas. De mayo 14 de 1973 a febrero 8 de 1974 obtuvo una cantidad tal de datos solares que enriqueció ampliamente el conocimiento de nuestra estrella. Probablemente los descubrimientos más modernos sobre el Sol provienen de estas expediciones en el Skylab.

temente, Young y Crippen tuvieron que poner en acción antes de lo previsto los motores-cohetes de maniobra, con objeto de mantener a *Columbia* en su órbita inicial, para evitar una caída prematura como sucedió en el *Skylab* (Fig. 26) en julio de 1979, a raíz de un incremento inesperado de la densidad atmosférica promedio.

La meteorología solar. Aquí cabe mencionar que el año de 1982 fue un año excepcional, ya que a pesar de haber transcurrido tres años desde el máximo de actividad solar (1979) del ciclo núm. 21 iniciado en 1976, sin embargo tuvo lugar un incremento en la frecuencia de fulguraciones y tormentas geomagnéticas respecto a lo que es común en ese periodo del ciclo. Entre los eventos más notables de 1982 hubo dos fulguraciones tipo X-12 y una tipo X-7. Del hecho de que la menos intensa (X-7) produjo la tormenta magnética más intensa de la última década (provocando distorsión del campo geomagnético, interrupciones de las comunicaciones de largo alcance, interferencia en las actividades en radio y una intensa aurora boreal que se extendió por varias latitudes) ha llevado a pensar a algunos investigadores que la



intercorrelación entre manchas solares y la actividad geomagnética no es tan simple y directa como se cree convencionalmente. Al efecto un decrecimiento del número de manchas ha sido observado desde 1979 y se espera que continúe hasta el mínimo de actividad solar de 1987: se cree generalmente que las fulguraciones y tormentas geomagnéticas evolucionan acorde a la evolución de las manchas solares y en consecuencia se esperaría que ambas decrecieran después del máximo de actividad solar, por lo que no se entiende aún bien a qué se debe ese incremento desarrollado en 1982, y ¿por qué aunque el número de tormentas geomagnéticas decreció después del máximo, sin embargo la intensidad promedio de ellas tendió a incrementarse, alcanzando el pico tres años después, en 1982? Aunque las tormentas ocurren durante todo el ciclo de actividad solar, sin embargo esta concentración reciente de actividad geomagnética y de fulguraciones tipo-X ha particularmente inquietado el interés de los científicos, ya que se producen "fuera de estación" desorientaciones en la emigración de las aves, incrementos en la corrosión de las tuberías de gas y petróleo, sobretensiones en líneas de potencia eléctrica, posible exposición a sobredosis de radiación solar de tripulantes de naves espaciales y de vuelos polares, etc., que normalmente se espera en periodos de máximo de actividad solar, es decir en el incremento y no en el decremento de la curva del ciclo solar.

Recientemente una secuencia prolongada de fulguraciones tuvo lugar en el lapso del 4 al 7 de febrero de 1986, dando lugar a una *tormenta magnética* el 8 de febrero que junto con la del 12-13 de julio de 1982 han sido las más intensas de las dos últimas décadas. Estos eventos solares dieron la oportunidad de probar la efectividad de las estaciones de datos interactivos a través del Sistema de Despliegue y Adquisición de Datos del Laboratorio Ambiental Espacial (SELDADS II) puesto en funcionamiento por el Centro de Servicios Ambientales Espaciales (SESC) de la Administración Atmosférica y Oceánica Nacional (NOAA) de los EU, para proporcionar alertas de las manifestaciones más tempranas de ese tipo de actividad solar, mediante satélites y estaciones terrestres. Muchos de los satélites en órbita terrestre e interplanetaria midieron los efectos de tal actividad solar: por ejemplo, el satélite Giotto de la Agencia Espacial Europea (ESA) en su ruta hacia la "cita" con el cometa Halley registró el pasaje de una onda de choque interplanetaria a 0.72 unidades astronómicas del Sol y 53° al oeste de la Tierra, el 8 de febrero. El satélite astronómico orbital polar MARECS I de la ESA experimentó una saturación en su sensor de rayos-X durante el periodo de las fulguraciones (4-7 de febrero). Dos satélites geoestacionarios de los Laboratorios Nacionales de los Alamos, Nuevo México, EU,

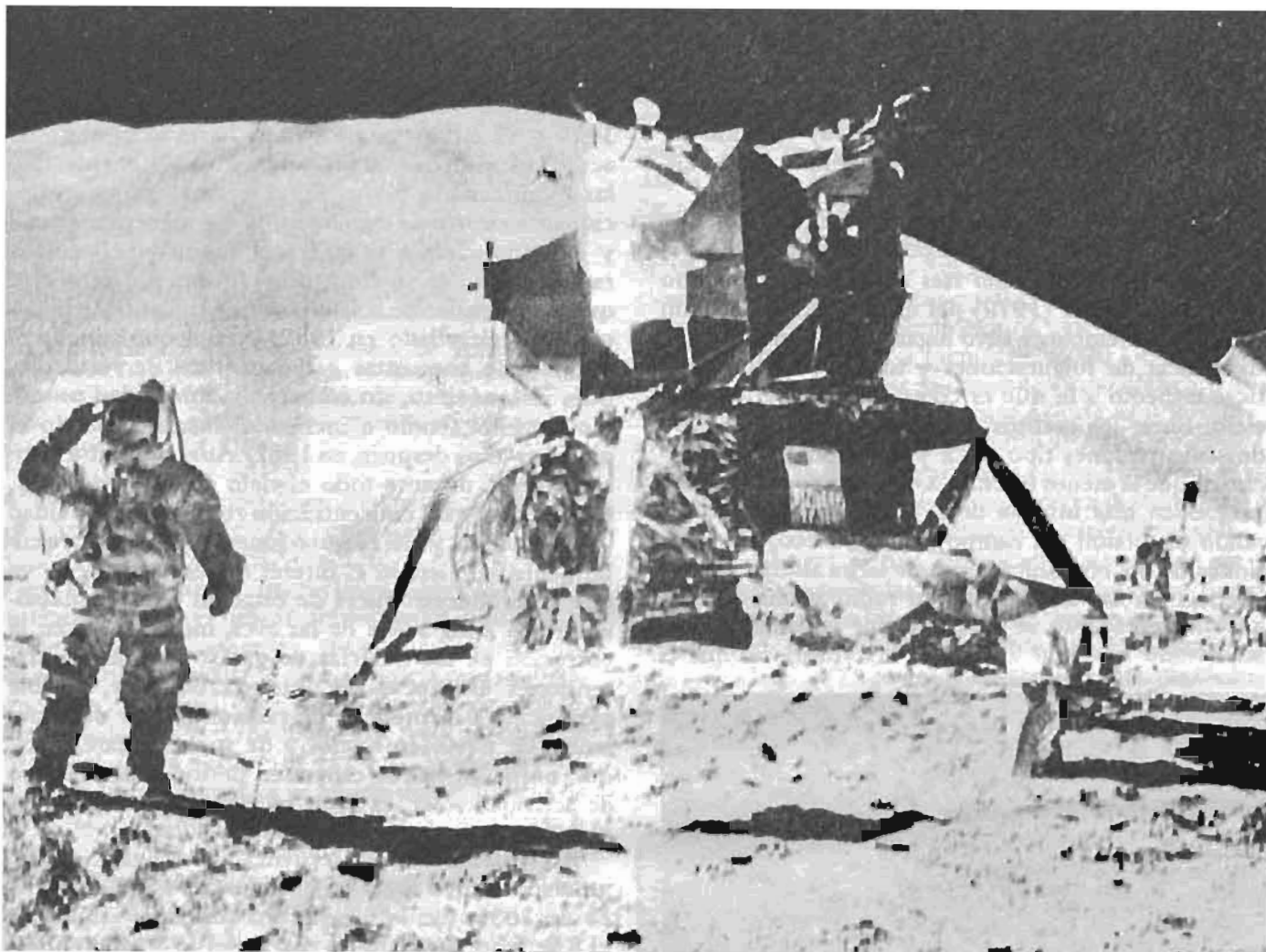


Figura 28. La nave Apolo en la superficie lunar.

registraron grandes incrementos de plasma energético simultáneamente a los registros del MARECS. Algunos satélites geosincrónicos de comunicaciones, satélites de navegación y vehículos espaciales de baja altitud experimentaron diversas anomalías e incluso serias desviaciones de sus órbitas. En varias localidades de la Tierra se reportaron diversas interrupciones en las radio-comunicaciones de enlace de alta frecuencia, y varios circuitos de las estaciones de microondas y telefónicas fueron dañados. Los magnetogramas de Canadá y EU muestran cambios magnéticos impresionantemente grandes. En College, Alaska se registraron las variaciones magnéticas más drásticas, jamás habidas en esa región. Los índices magnéticos Ap y Kp están entre los mayores registrados en los últimos 20 años. En Canadá existe un interés muy particular de carácter legal y científico asociado a los posibles efectos de los drásticos cambios de campo magnético del 8 de febrero, debido a una colisión frontal que ocurrió entre un tren de carga y uno de pasajeros; se pretende elucidar si *potenciales in-*

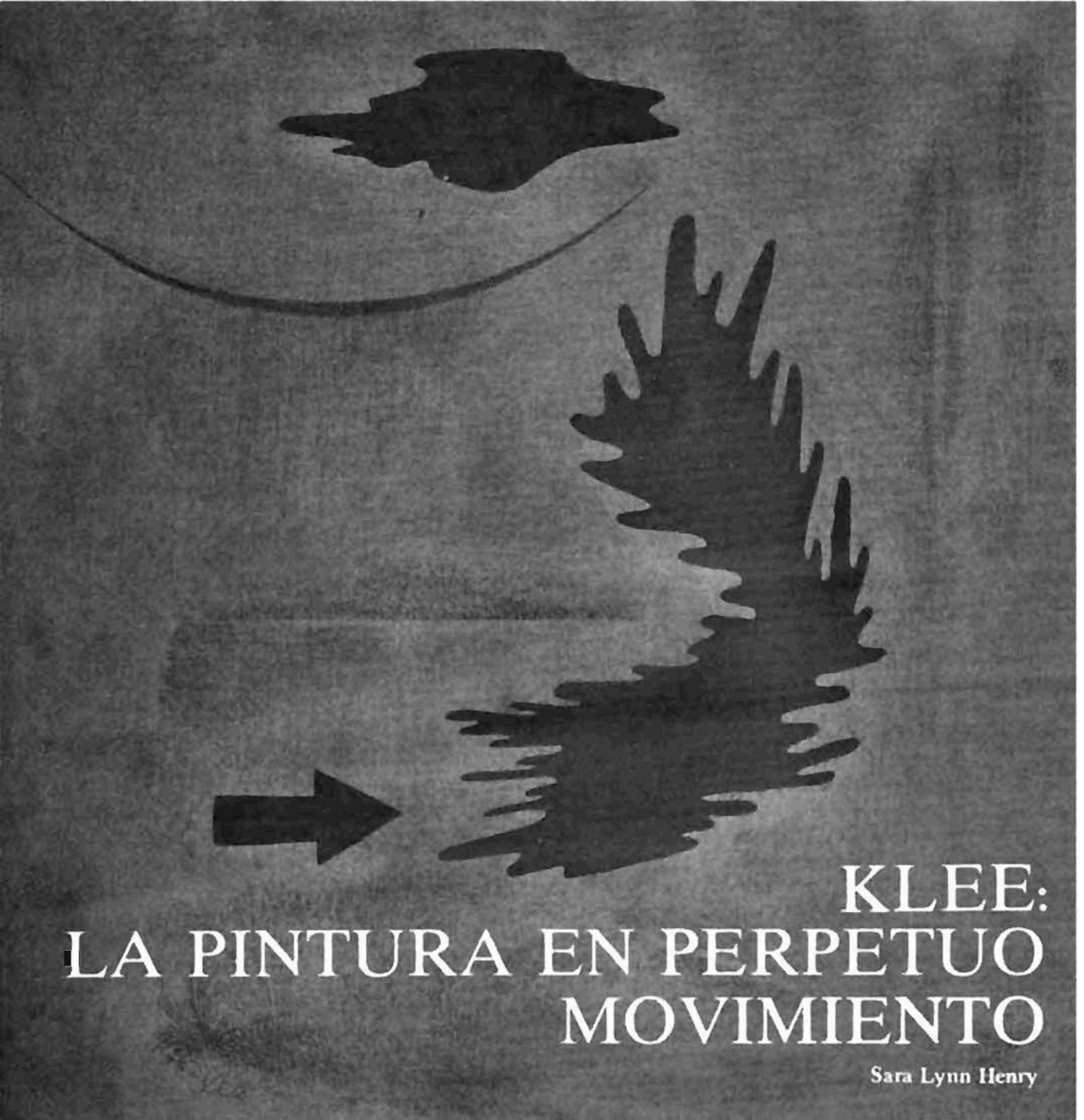
ducidos por las mencionadas variaciones magnéticas pudieron haber afectado un dispositivo de microondas que supuestamente controlaba el frenado del tren de carga.

Es por todo ello (particularmente por los frenados atmosféricos de las naves) y en base a los fenómenos esporádicos de las fulguraciones solares que se está desarrollando una nueva disciplina, *la meteorología solar*, que permita prever con suficiente anticipación la ocurrencia de esos eventos, así como alteraciones inducidas por el viento solar y nubes de plasma eyectada de centros activos, sobre los relativamente estables cinturones de radiación de Van Allen. En efecto, las partículas que pueblan esos anillos tienen un gran poder de penetración y pueden causar daños importantes en los sistemas electrónicos transportados, por no mencionar los peligros a los que se ven sometidos los seres humanos en los vuelos tripulados. Es verdad que se podrán tomar precauciones contra los efectos dañinos, protegiendo las partes sensibles con blindajes adecuados. Sin embargo, no es factible por

ahora blindar las celdas solares, las que están sujetas a degradaciones no despreciables por su exposición a los flujos intensos de estas partículas. Ciertamente, no todas las oleadas de protones tienen la intensidad de las que se produjeron el 23 de febrero de 1956, agosto de 1972 o abril de 1981. Y también es cierto que es posible disponer de un cierto margen de potencia en satélites geoestacionarios por periodos no mayores de cinco años, en caso de peligro para las celdas solares; sin embargo, no sucede lo mismo en proyectos en los que entran en juego periodos de vida mucho más largos, como podría ser el caso del *Solar Power Satellite* (SPS) (Satélite de Potencia Solar) (Fig. 27). En tal proyecto se intentaba enviar al espacio cerca de 100 km² de paneles solares, cuya energía almacenada sería radiada en forma de microondas y recolectada al nivel del suelo. Sin embargo, la rentabilidad de una operación de tal índole no está asegurada, a menos de poder garantizar al sistema un periodo de vida superior a los treinta años; pero, ¿quién puede prever hoy en día, con un alto margen de seguridad, el número y la intensidad de las oleadas de partículas energéticas que ocurrirán dentro de los próximos treinta años? En el caso específico de los vuelos *Apolo* (Fig. 28), la NASA puso en marcha en los años sesenta una red de alerta a las fulguraciones solares para el estudio de los riesgos representados, en aquella ocasión, por las duchas de partículas solares, siendo hoy en día aún el sistema más completo de alerta que funciona. En realidad para el *Apolo*, los riesgos eran limitados, en razón de la duración relativamente corta de los mismos (ocho días a lo máximo). Las cosas serán muy diferentes en la era de la ocupación continua del espacio, pues el efecto de radiaciones sobre el organismo es acumulativo: no es más peligroso el recibir de una sola vez la dosis de radiaciones ionizantes admitidas para el ciclo entero de la vida de un ser humano de aproximadamente 70 años, vecina a las 1 000 rads (equivalente a 300 mil radiografías), que el recibir 200 rads por año durante 5 años, lo que entrañaría la jubilación anticipada de un astronauta en vuelo durante ese lapso. Es por ello que los especialistas se preocupan por prever con certitud esas fulguraciones, a fin de evitar una sobredosis de radiación en instalaciones tales como las macroceldas solares del SPS, o en los astronautas que en el futuro se encuentren en puestos fijos en el espacio exterior. Desafortunadamente, estas previsiones son actualmente imprecisas y aleatorias, pues reposan esencialmente sobre correlaciones estadísticas que han sido establecidas entre la morfología de ciertos grupos de manchas y la ocurrencia de las fulguraciones. Al presente, la mejor documentación de que disponen los físicos solares para penetrar en el secreto de las fulguraciones, ha sido obtenida gracias al telescopio

solar embarcado en la estación *Skylab* en 1973 y a la *Misión del Máximo de Actividad Solar* (SMM) (Fig. 29), puesto en órbita en el *Satélite Automático Especializado* (SAS) en febrero de 1980, misión en la cual participaron 400 físicos solares y plasmólogos de 17 países. Ese satélite llamado también *Solar Max*, quedó inutilizable, siendo recuperado posteriormente por el telemanipulador de la nave espacial. A raíz de esta campaña se sabe en particular que los procesos de aceleración de partículas en el Sol necesitan un ángulo de $\sim 3^\circ$ entre el frente de onda de la onda de choque de la fulguración y el campo magnético prevaleciente; el problema ahí, es que los campos magnéticos de la atmósfera solar tienen una estructura extremadamente tortuosa. Se necesitaría toda una red de pequeños telescopios en órbita proveyendo, en tiempo real, imágenes de los campos magnéticos de la cromosfera, corona y fotosfera, de tal suerte que ligeras derivas de intensidad de esos campos serían evidenciadas en media hora, en lugar de todo un día como sucede actualmente. El desarrollo anormal de algunas características magnéticas podrían señalarse inmediatamente.

En fin, los físicos solares conocen actualmente con cierto margen de precisión lo que sucede en la superficie solar, resta a los especialistas de otras disciplinas establecer las correlaciones adecuadas. El objetivo de esta nueva *meteorología solar* es entonces de carácter dual, comprender el origen de las fulguraciones y poner a punto un método de previsión. Las principales inquietudes de los responsables de programas espaciales son entonces, no solamente disminuir el riesgo de irradiación para los ocupantes de navíos y estaciones espaciales, sino también prever la pérdida de altitud de los vehículos por frenado atmosférico causado por cambios bruscos de densidad y temperatura, trastornos en la estabilidad de los anillos de Van Allen y trastorno a instrumentos sensibles tales como las celdas solares. . . *En las décadas que vienen, vamos a presenciar una ocupación permanente del espacio por el hombre y sus vehículos espaciales, dinámica en la que ineludiblemente se verán obligados a participar, en mayor o menor grado, los llamados países en vías de desarrollo, aun aquéllos que no han resuelto sus necesidades más primordiales, con tal de que dispongan de un cierto potencial de especialistas. Una vez involucrados en el conocimiento de la Ciencia y la Tecnología, al igual que de la Cultura, se establece un proceso cuya evolución, aunque no se fomenta, no puede tampoco inhibirse (pues es de carácter irreversible), a riesgo de provocar la emigración del conocimiento, con la subsecuente dependencia tecnológica, como ya se ve en algunos de nuestros países obligados a adquirir en otros de mayor desarrollo tecnológico, satélites artificiales de múltiples utilidades socioeconómicas.*



LA PINTURA EN PERPETUO MOVIMIENTO

KLEE:

Sara Lynn Henry

El tema de muchas lecturas que Paul Klee ofreció mientras daba clase en la Bauhaus (la escuela de arte de Weimar, Alemania que dio la bienvenida y exploró alrededor de los descubrimientos científicos) hablaba acerca de los elementos de la forma pictórica: línea, color, estructura, ritmo. Durante el curso de estas lecciones, todas concebidas en los años veinte, el artista sueco hacía referencia a las ciencias naturales, dibujando desde la biología, física y meteorología, una riqueza de diagramas y

conceptos. Fenómenos tan diversos como agua, viento y clima; el ciclo de las estaciones, el lento ritmo del campo geológico y los abstractos propios de la gravitación y el movimiento, vinieron a ocupar un lugar muy significativo en su trabajo.

Siendo un artista moderno, no fue relacionado con la apariencia superficial de estos fenómenos sino con el proceso que animaba a dichos fenómenos; proceso que en las pinturas de Klee asumían

un significado liberal como en su obra "Mixed Weather" de 1929, acerca del ciclo del agua.

A pesar del permanente interés del hombre, los patrones del tiempo fueron estudiados empíricamente hasta el año de 1800, cuando tormentas, huracanes y truenos fueron comprendidos, el tipo de nubes definido y las distintas temperaturas y niveles de presión computados. Aunque esto no sucedió sino hasta los años veinte cuando la ciencia reconoce totalmente que la atmósfera es un sistema de fluido gigantesco.

En "Mixed Weather", Klee describe la fuerza de éste fenómeno que mueve a la Tierra. Una flecha negra presiona el vapor rojo hacia la derecha y hacia arriba, donde se espesa dentro de una nube oscura. Detrás y arriba de la nube, un delicado sol resplandece y, abajo, una banda en forma de hoz desprende hacia abajo pequeñísimas pinceladas de lluvia, apenas discernibles; plomiso paisaje. La flecha es prestada de diagramas científicos en los cuales se utiliza para mostrar la dirección y magnitud de una fuerza.

Como una aplicación, aquí, realza la vida dinámica de la pintura a base de marcar la presencia y curso de la evaporación. La elevación de calor a la región más fría donde se condensa el agua y se inicia un nuevo ciclo.

Es claro, la manera que Klee eligió para presentar este tema revela que estaba interesado en algo más lejano que crear ilustraciones abstractas de mecanismos hidrológicos. El vapor rojo es la creación de una forma similar a la de la flecha negra y la nube oscura. A base de tensar la ascendente lucha del vapor en contra de la acción del Sol, Klee ha hecho de esta imagen una drama antropomórfico, una proyección de las características humanas en función de un fenómeno natural. Esta creación pictórica demuestra la igualdad de implicaciones con la fuerza astronómica. Insertos en una atmósfera libre de gravitación los elementos de la pintura son iluminados por dos soles, uno arriba y otro abajo, evocando la apertura del afuera o espacio planetario.

Los ciclos terrestres del agua han sido traspasados a un realismo universal en el cual su candencia sugiere un círculo sin principio ni fin, un proceso continuo que ocurre en todo lugar y durante todo el tiempo. "Mixed Weather" de Klee viene a ser una meditación en el proceso cíclico que anima a la naturaleza en todos sus niveles, desde el curso de las gotas de la lluvia hasta el transcurso de los planetas.

* Departamento de arte de la Universidad Drew, Nueva Jersey. Tomado de *The Sciences*, mayo-junio de 1986. Traducido por Verónica González L.



PROGRAMA NOVIEMBRE '86

XII ANIVERSARIO

DOMINGO 23 DE NOVIEMBRE

Ballet Folklórico Magisterial
Dir. Roberto Campos C. 11:00 Hrs.
Orquesta Típica del Gob. del Edo.
Dir. Refugio Tecanhuey 12:00 Hrs.
Teatro: "CAZADORES DE CUENTOS"
Dir. Felipe Galván 13:00 Hrs.
Rondalla: INDEPENDIENTE DE LA V.W.
14:00 Hrs.
Banda de la XXV Zona Militar
15:00 Hrs.
Ballet del Instituto Mexicano Madero
Dir. Juan Carlos López 16:00 Hrs.
MARCELO (Mimo) 17:00 Hrs.
Rondalla: RONDA NOCTURNA 79
Dir. David Temoltzin 18:00 Hrs.
CORO DEL B.I.N.E., Dir. Jorge Altieri
19:00 Hrs.
Cine Clásicas: "EL BELLO ANTONIO"
17:00 y 19:30 Hrs.



CINE

MUESTRA: CINE BRASILEÑO

"EL BANDIDO DE LA LUZ ROJA"
Dir. Rogelio Scanzerla, días 6 y 8
"TODAS LAS MUJERES DEL MUNDO"
Dir. Domingos de Oliveira, Días 13 y 15
"LA COMPADECIDA", Sábado 22 único día
Dir. George Jonas, 18:00 y 20:30 Hrs.
"MARCELO ZONA SUR"
Dir. Xavier de Oliveira, días 27 y 29



EXPOSICIONES

Segunda Quincena
Del 19 al 30 de noviembre

- * RAFAEL LEONOR (Pintura)
- * RAUL SERRANO CAMPILLO
(Pintura)
- * COLECTIVA DE ARTISTAS UNIDOS
Y PINTORES POBLANOS
- * SANDRA ARRIETA (Fotografía)

LA CONCEPTOGRAFIA Y LA LOGICA FORMAL DE FREGE

Mauricio Beuchot*

El nuevo impulso a la lógica

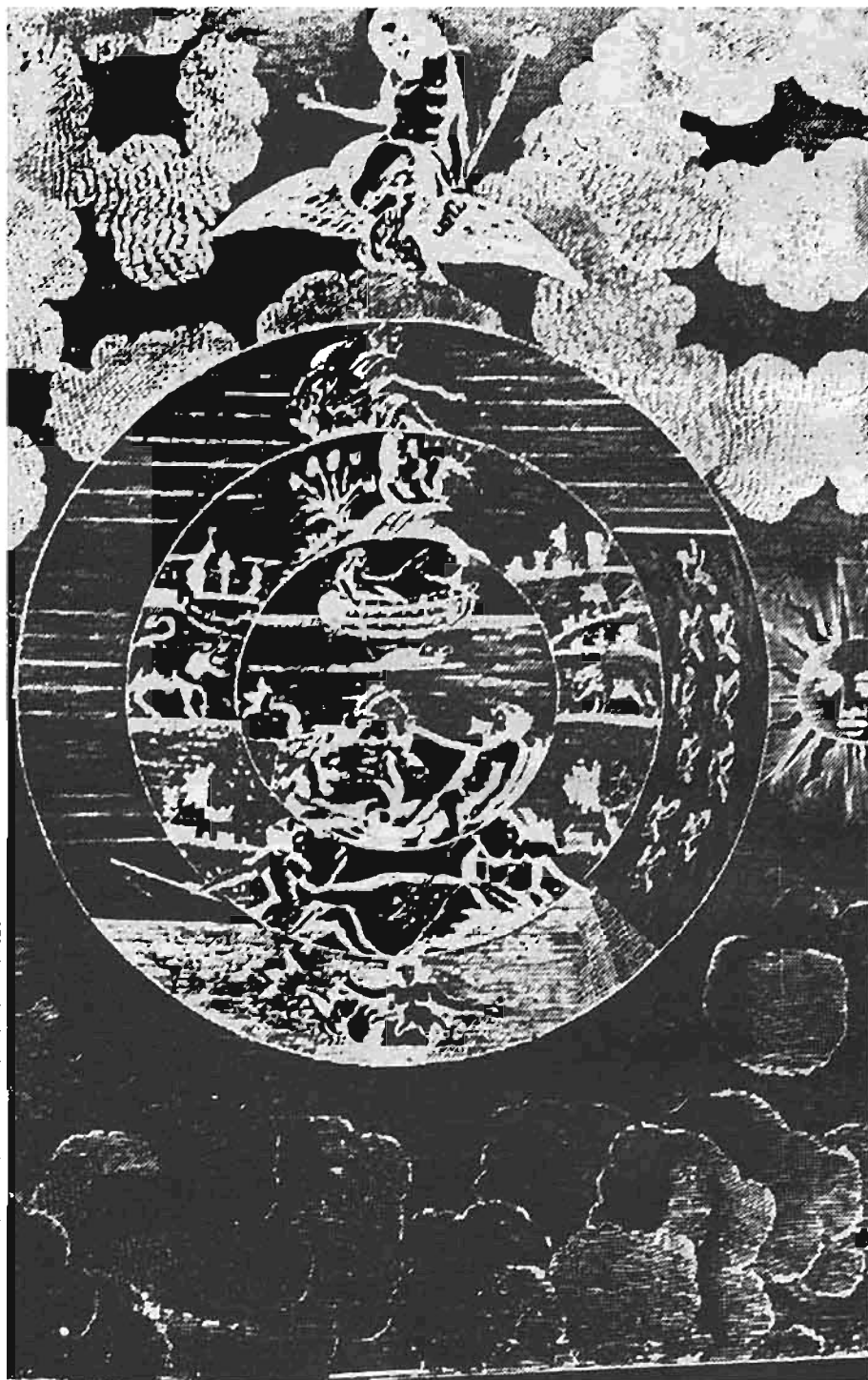
Gottlob Frege conoce la obra de George Boole,** pero continúa el camino de la lógica matemática de una manera distinta y con mayor amplitud. El mismo Frege aclara que, a diferencia de Boole, su lógica no es sólo un cálculo, sino todo un lenguaje universal (de caracteres o de símbolos).¹ Además, no hace depender la lógica del modelo matemático, no analiza la lógica desde la matemática (a saber, no hace un "análisis matemático de la lógica", como Boole), sino que procede a la inversa: pretende basar toda la matemática en la lógica.² Asimismo, se distingue de Boole en que no sólo pretende

* Instituto de Investigaciones Filosóficas, UNAM, Ciudad Universitaria, 04000. México, D.F.

** Ver *Elementos*, núm. 1, "El álgebra lógica de George Boole", pp. 48-52.

¹ Frege debió conocer la obra de Boole cuando escribió su primer y revolucionario texto sobre lógica matemática, a saber, el *Begriffsschrift* (traducible ese título como *Conceptografía* o como *Escritura conceptual*), publicado en 1879, ya que sólo un año después, en 1880, desarrolla un largo artículo sobre Boole, titulado "Booles rechnende Logik und die Begriffsschrift", en G. Frege, *Schriften zur Logik - Aus dem Nachlass*, Berlin, Akademie Verlag, 1973, pp. 172-226. Sobre la distinción con Boole, cfr. J. Van Heijenoort, "Logic as Calculus and Logic as Language", en *Synthese*, núm. 17 (1967), pp. 324-5.

² Véase la introducción de J. Van Heijenoort a su traducción del *Begriffsschrift* en *Frege and Gödel. Two fundamental texts in mathematical logic*, Cambridge, Mass., Harvard University Press, 1980 (2nd. print.), pp. 1-2. Para una amplia presentación de esta obra de Frege, cfr. E. Chávart, "En el centenario de *Begriffsschrift*", en *Escritos filosóficos*, núm. 28 (1979).



hacer un simbolismo que dé cuenta de los conceptos ya tenidos, con los cuales se calcula, sino que permita y explique la formación de nuevos conceptos, como pone de relieve Hans Sluga: “[la lógica de Frege tenía que ser] también un método de formación de conceptos que pudiera generar conceptos científicamente fructíferos con conexiones completamente nuevas”.³ A dicho simbolismo Frege le da el nombre de “conceptografía” o “escritura conceptual” (*Begriffsschrift*: tal es el título de su libro publicado en Halle, 1879). Y es todo un lenguaje, es un lenguaje perfecto; así, la lógica para Frege es una *lingua characterica*, y no sólo un *calculus ratiocinator*, como lo era para Boole —los dos términos son de Leibniz—; y ese lenguaje perfecto tiene como universo de discurso todas las cosas, que pueden ahora ser tratadas científicamente gracias al nuevo simbolismo.

Evitando el psicologismo en la lógica —es decir, las cuestiones relativas al origen y formación de nuestros pensamientos—, le interesa el modo como nuestros juicios se fundamentan unos en otros.⁴ Tal es el campo de la lógica pura, que investiga la argumentación o prueba tomando como fundamento las leyes del pensar. Y las verdades que requieren prueba son de dos tipos: unas exigen el recurso a la experiencia y otras sólo el recurso a la prueba puramente lógica. Pues bien, Frege trabajará sobre estas últimas, ya que le interesa la matemática, y las verdades matemáticas pertenecen a esa clase. Más aún, le interesa reducir la matemática a la lógica (o fundamentarla



en ella), en lo cual consiste el logicismo: las operaciones matemáticas son reductibles a las operaciones lógicas.⁵

La superación del lenguaje ordinario

Pero al examinar pruebas matemáticas (y lógicas) se topó Frege con la dificultad de expresarlas en un lenguaje adecuado. Por ello ideó esa escritura conceptual que evitara lagunas en las inferencias y detectara proposiciones que se hubieran introducido por inadvertencia. De las cadenas de inferencia sólo le interesará el contenido conceptual.⁶ Y, ya que únicamente atenderá a lo conceptual de las proposiciones, su escritura es una escritura conceptual, una conceptografía. Si se encuentra parecido con la matemática —dice el propio Frege— es sólo relativo y en cuanto a las ideas fundamentales de la matemática misma, pues su conceptografía no procede como las matemáticas ya en lo particular, no se apega tanto a la matemática como el álgebra de Boole.

Por lo demás, la conceptografía es como un microscopio para observar con mayor lucidez el lenguaje ordinario: ayuda a detectar lo que éste oculta. Es una ayuda para fines científicos. Y es una investigación sobre el método en general, tal como quiso hacerlo Francis Bacon. Se coloca además en la línea de Leibniz y su idea de una característica universal —más que del *calculus ratiocinator*, como hemos dicho—, la cual era un método de simbolización de conceptos y que el autor de la *Monadología* nunca llegó a concluir y a hacer efectivo. Más aún, Frege no pretende —a diferencia de Leibniz— un cálculo aplicable sin más a todas las cosas y a todos los casos, sino uno que encuentre cabal aplicación en las ciencias formales, principalmente en la aritmética,⁷ pues de ella había partido su investigación. Pero deja abiertos otros campos de aplicación: “El paso a la teoría del movimiento puro, y aun a la mecánica y a la física, podrían seguirse de aquí. En los últimos campos, donde junto a la necesidad racional se hace valer la necesidad natural, es donde primero es de prever un mayor desarrollo del modo de simbolización de acuerdo con el progreso del conocimiento. Pero, por eso, no es necesario esperar hasta que parezca excluida la posibilidad de tales transformaciones.”⁸

Es muy clara la intensión que tiene Frege de superar las diferencias del lenguaje ordinario y alcanzar un lenguaje perfecto para los fines del científico; puede muy bien decirse que tiene un afán de análisis lingüístico reconstruccionista —al menos en esta etapa del *Begriffsschrift*— y no un afán meramente descriptivista del mismo lenguaje ordinario: hay que desenmascarar los engaños producidos por el lenguaje cotidiano, que oscurece y disfraza las auténticas relaciones

³ H. Sluga, “Logical calculus and logical language”, en prensa.

⁴ G. Frege, *Conceptografía. Los fundamentos de la aritmética. Otros escritos filosóficos*, trad. cast. de Hugo Padilla, México, UNAM, 1972, p. 7. La hemos cotejado con la edición alemana de I. Angelelli, Hildesheim: Georg Olms, 1964 y con la trad. inglesa de J. Van Heijenoort, *Frege and Gödel*, . . . , ya citada.

⁵ P. Benacerraf, “Frege: the last logicist”, en *Midwest Studies in Philosophy*, núm. 6 (1981), pp. 17-35.

⁶ G. Frege, *Conceptografía*, ed. cit., p. 8.

⁷ *Ibid.*, p. 9.

⁸ *Ibid.*, p. 10.

conceptuales que se dan en lo científico y lo filosófico. Por eso, la conceptografía, ya que supera esas deficiencias del lenguaje ordinario, puede reconstruir —a partir de él— los pensamientos, de modo tal que se convierta en un instrumento valioso para el filósofo. Por lo menos llevará la argumentación a una gran pureza inferencial, consecencial o lógica formal. Y es precisamente a los lógicos a quienes se dirige Frege ofreciéndoles una aportación, si no se fijan sólo en lo extraña que parecerá a pri-

mera vista esa innovación. Frege salvará a la lógica de la gramática ordinaria, que ha entorpecido la expresión de lo científico. “En especial —dice a este propósito—, creo que la sustitución de los conceptos de *sujeto* y *predicado* por los de [signo de] *argumento* y [nombre de] *función*, se acreditará con el tiempo. Es fácil ver cómo la aprehensión de un contenido como función de un argumento surte el efecto de una aprehensión formadora de conceptos. Más aún, la demostración de la conexión en-

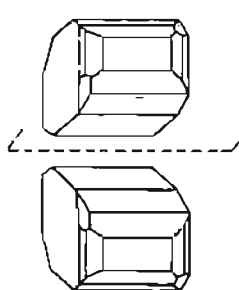
tre los significados de las palabras *si*, *y*, *no*, *o*, *existe*, *algunos*, *todos*, etc., merece atención.”⁹

La reconstrucción del lenguaje

Frege introduce sus símbolos distinguiendo dos clases fundamentales: lo que denominamos *variables* y *constantes*. Las primeras pueden representar algo que sea distinto en diversas ocasiones, mientras que las segundas tienen completamente determinado su sentido. Las primeras serán letras, las segundas serán símbolos especiales.¹⁰

El juicio se expresa con el símbolo “┐” a su izquierda; éste indicará que es algo aseverado o un teorema. Tal símbolo consta de dos partes: una barra horizontal y una vertical. Cuando sólo se antepone a una fórmula la sola barra horizontal (que es la barra de contenido), indica que es una mera combinación de ideas a modo de representación, pero no de juicio; para ello le falta la barra vertical (que es la barra de aseveración o del juicio propiamente dicho). La barra de contenido indica que hay un contenido judicable, y la barra de aseveración completa el que sea un juicio.

Frege excluye del juicio la distinción sujeto-predicado (en lugar de ella dejará la de argumento-función). Una razón es que de un juicio en el que se transformen, conviertan o intercambien sujeto y predicado, se puede seguir obteniendo las mismas conclusiones —con lo cual se ve que tal distinción no tiene mucho que hacer—. Frege da el siguiente ejemplo: se sigue lo mismo de “en Platea derrotaron los griegos a los persas” y “en Platea fueron derrotados los persas por los griegos”. Precisamente el contenido enjuiciable es lo que ambos tienen en común. Otra

Barbara Gordillo Marín Panorama general de la estereoquímica  pág. 5	sumario  Paralela: Imagen molecular de una molécula Ilustración: Norberto Gómez Avila	Relación de proyectos que el Centro mantiene vigentes y cuentan con financiamiento adicional externo 1985 pág. 27
Enoch Jarama Aspectos del análisis conformacional en el Departamento de Química del CINVESTAV pág. 21	AVANCE Y PERSPECTIVAS  Paralela: Imagen molecular de una molécula Ilustración: Norberto Gómez Avila	libros  pág. 44
noticias del centro  pág. 28	Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN Cinvestav Dr. Héctor O. Nava Jaimes, Director Lic. Dr. Enrique Campesino Romeo Lic. Asistente Carlos Chimal Lic. Laura García Renari Lic. Agustín Estrada	capítulo abierto Abdus Salam La dimensión humana del proceso de desarrollo  pág. 62

⁹ Ibidem. Véase también M. Beuchot, *Elementos de semiótica*, México, UNAM, 1979, pp. 17-51.

¹⁰ G. Frege, *Conceptografía*, ed. cit., p. 13.

razón es que se puede hacer que todos los juicios sean un sujeto cuyo único predicado sea “es el caso”, “es un hecho” o “es verdad” (es decir, el símbolo “ $\vdash$ ”); por ejemplo “Arquímedes pereció en la toma de Siracusa” puede transformarse en “la muerte violenta de Arquímedes en la toma de Siracusa es un hecho”.¹¹

Frege pasa a la clasificación de los juicios (o, más correctamente, de los contenidos enjuiciables). Dice que la distinción entre juicios categóricos e hipotéticos es meramente gramatical, y que lógicamente son lo mismo. La prueba que aduce Frege para esto —nos dice él mismo— es su libro entero. El sólo se abocará a los categóricos. También quita toda importancia a la distinción entre juicios apodícticos (o modales) y asertóricos, dado que no toca el contenido conceptual del juicio. Por ello, trabajará sólo con asertóricos.¹² Los juicios asertóricos categóricos, en seguida, reciben de Frege la división clásica según su cantidad: universal y particular;¹³ y añade un poco después de cualidad (afirmativa y negativa), obteniendo finalmente el cuadrado tradicional de las oposiciones.¹⁴

La constitución del sistema

De entre las nociones y símbolos primitivos que establece para su cálculo, Frege trata la condicionalidad y otras conectivas, la negación, la igualdad o equivalencia (de contenido enjuiciable), la idea de función y la generalidad (o cantidad universal del juicio).

¹¹ J.A. Robles, “La generalidad múltiple y la cuantificación en la lógica de Frege”, en *Episteme*, núm. 4 (1980), pp. 37-42.

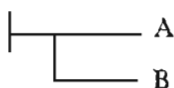
¹² G.E. Rosado Haddock cuestiona esa fusión alegando que Frege no la justifica lo suficiente. Especialmente pone en tela de juicio la exclusión de la distinción entre lo asertórico y lo modal (por descuidar implicaciones ontológicas). G.E. Rosado Haddock, *Exposición crítica de la filosofía de Gottlob Frege*, República Dominicana, 1985, p. 26.

¹³ G. Frege, *Conceptografía*, ed. cit., p. 16.

¹⁴ *Ibid.*, p. 36.



Al tratar de la proposición condicional, Frege la define como implicación material (sólo prohíbe el paso de lo afirmado —como verdadero— a lo negado —como falso—). No hace falta una relación causal entre los contenidos, y el símbolo de la condicional es



donde la proposición A es el antecedente y la B es el consecuente: “si A, entonces B”.¹⁵ De modo que el símbolo es la *barra de condición* que une las dos horizontales de A y B.

Añade Frege observaciones sobre la numeración de juicios en una inferencia, para tener control de todos ellos. La inferencia debe ser controlada y rigurosa. Y como regla única de inferencia Frege adopta el *modus ponens*, que tiene su aplicación en las proposiciones condicionales o implicaciones. Nos dice de las reglas inferenciales o modos de inferir: “Con Aristóteles, podemos enumerar en lógica una serie completa de modos de inferencia; yo sólo me sirvo de éste —al menos, en todos los casos en que de más de un solo juicio se deriva uno nuevo.”¹⁶ Los demás modos o reglas de inferencia se pueden

reducir —para Frege— al *modus ponens*. Por eso sólo acepta éste. Y hace notar que no trata la inferencia de modo psicologista (en cuanto a la formación de ésta en la mente), sino de modo logicista y formalista (en cuanto a las reglas de inferencia).

Pasa a estudiar la negación, que es importantísima en lógica. Su símbolo es una pequeña barra vertical perpendicular a la barra de contenido en su parte inferior, así: $\neg A$. La barra de negación indica que el contenido enjuiciable no tiene lugar. Mediante la negación, Frege define la disyunción o proposición disyuntiva, en sentido inclusivo, o sea, usando “o” en el sentido de que en “A o B” no se excluye la coexistencia de ambos juicios. También toma en cuenta la disyunción exclusiva: “o A o B”, en la que se excluye la coexistencia de ambas. Pero aclara que tomará la disyunción en sentido inclusivo, como ya lo hemos señalado.

Un peldaño posterior es su definición del conectivo “y”, o la conjunción. Frege define la conjunción mediante la condicional y la negación, aunque dice que la misma condicional podría expresarse, a la inversa, mediante la conjunción y la negación. Pero él prefiere expresar (o definir) la conjunción en términos de negación y condicional,¹⁷ como la negación

¹⁵ *Ibid.*, p. 17.

¹⁶ *Ibid.*, p. 21.

¹⁷ *Ibid.*, p. 25.

de que del antecedente B se siga el consecuente no-A, o sea que puede llegarse incluso a expresarla como "ni-ni-A-, ni-ni-B es un hecho". Por lo demás, Frege aclara que a la "y" se reducen otras partículas, como "pero". Así pues, los conectivos "ni. . . ni. . .", "y", "o", "si. . . entonces. . ." relacionan contenidos enjuiciables.¹⁸

Otro conectivo importante es la igualdad o equivalencia de contenido. Frege, en esta época de su pensamiento que tomamos en cuenta —cuando escribe el *Begriffsschrift*— aclara que la igualdad se da entre nombres, y no entre contenidos enjuiciables sin más. Lo presenta en ese entonces diciendo que, si se da la circunstancia de que dos nombres tengan el mismo contenido conceptual, tal circunstancia se expresa con el signo de igualdad.¹⁹ Sin embargo, posteriormente cambia su idea de la igualdad, se da no sólo entre nombres de objetos, sino entre objetos. Esta es la conexión lógica que más problemas trajo a Frege: no se trata de una mera igualdad entre símbolos tomados materialmente, o tomados en la materialidad de su expresión, o en cuanto meros símbolos, pues entonces sería verdad que " $a = a$ ", pero no lo podría ser que " $a = b$ ", lo cual, sin embargo, muy bien puede ocurrir y de hecho muchas veces ocurre. Es una identidad de referencia (*Bedeutung*); lo cual obliga a Frege a distinguir entre el uso y la mención de una expresión: cuando la usamos, nos estamos refiriendo a aquello que normalmente tiene como referente —el objeto que designa—; en cambio, cuando la men-

cionamos, nos estamos refiriendo a ella misma en cuanto expresión material. (Es la distinción entre lo que hasta Alfred Tarski se llamará meta-lenguaje y lo que se llamará lenguaje-objeto.)



Este conectivo de igualdad o identidad —Frege dice que lo toma en ambos sentidos— también lo obligará posteriormente, en el mencionado artículo de 1892 "Ueber Sinn und Bedeutung", a distinguir entre sentido y referencia de una expresión,²⁰ dado que dos expresiones pueden ser idénticas en referencia a pesar de ser diversas en sentido, como "el Lucero Matutino" y "el Lucero Vespertino", pues ambas expresiones se refieren al planeta Venus, pero de un modo o con un sentido diferente. En efecto, el sentido es distinto porque, aun cuando designan lo mismo, lo hacen infomando, evocando o asociando cosas distintas. Esta circunstancia es expresada así por Frege: "el mismo contenido se puede determinar plenamente de diferentes modos; pero que en un caso particular se ve realmente *lo mismo* por medio de *dos maneras de determinarlo*, es el contenido

de un juicio. Antes de hacer éste, se deben asignar dos nombres distintos correspondientes a ambos modos de determinación, a lo determinado por ellos. Para su expresión, el juicio requiere, empero, un símbolo de la igualdad de contenido que conecte estos dos nombres. De aquí resulta que los nombres distintos para el mismo contenido no siempre son meramente una ociosa cuestión de forma, sino que atañen a la naturaleza del asunto cuando se conectan con diferentes modos de determinación. En este caso, el juicio que tiene por objeto la igualdad de contenido es sintético en sentido kantiano."²¹ El símbolo es: " $\vdash (A \equiv B)$ " y expresa que B puede sustituir *salva veritate* —como decía Leibniz— en cualquier caso a A. La razón de que pueda B ponerse en lugar de A es que ambos tienen el mismo contenido conceptual, como ya se dijo.

Función, argumento y cuantificación

Trata entonces Frege de la compaginación de los componentes del juicio; para él, en lugar de sujeto y predicado, se debe hablar de signo de argumento y nombre de función. El signo de argumento es lo sustituible, puede remplazar a diversos contenidos conceptuales; la expresión funcional es la parte constante del enunciado que expresa el juicio. Lo establece así: "si en una expresión cuyo contenido no necesita ser enjuiciable, aparece un símbolo simple o compuesto en uno o más lugares, y si lo pensamos como remplaceable en todos o en algunos de estos lugares por algo distinto, pero siempre por lo mismo, entonces a la parte de la expresión que aparece sin cambio la llamamos función y a la parte remplaceable, su argumento".²²

¹⁸ *Ibid.*, p. 26.

¹⁹ *Ibidem*. Cuando Frege escribe su artículo de 1892, *Ueber Sinn und Bedeutung*, comienza el texto señalando su error. Justamente es el problema de la igualdad el que le hará plantear en ese escrito la distinción —capital en la semiótica— entre sentido y referencia. G. Frege, "Sobre el sentido y la denotación", en T.M. Simpson (ed.), *Semántica filosófica: problemas y discusiones*, Buenos Aires: Siglo XXI, 1973, p. 3.

²⁰ Sobre estos temas, véase Ch. Thiel, *Sentido y referencia en la lógica de Gottlob Frege*, Madrid, Tecnos, 1972; M. Dummett, *Frege philosophy of language*, London, Duckworth, 1973; H. Sluga, *Gottlob Frege*, London, 1980.

²¹ G. Frege, *Conceptografía*, ed. cit., p. 27.

²² *Ibid.*, pp. 28-29.



Precisamente el argumento o el objeto, y la función, serán después las piezas fundamentales de la ontología fregeana.²³

El que una parte de la expresión sea argumental y la otra funcional depende del punto de vista: en “Pedro golpeó a Malco” el argumento puede ser “Pedro” y la función puede ser “golpeó a Malco” o el argumento puede ser “Malco” y la función puede ser “fue golpeado por Pedro”. Además, la función puede tener uno o más argumentos. Frege representa a la función monoargumental así: “ $\Phi(A)$ ” y la biargumental, por ejemplo, así: “ $\Psi(A, B)$ ”. Añade otras observaciones complicadas sobre el orden y la jerarquía de las funciones, y pasa a la cuantificación, tanto la de variables individuales como la de funciones, es decir, tanto la cuantificación simple como la cuantificación múltiple.²⁴ Principalmente, expone la cuantificación general o universal (sustitucional), que simboliza como

“ $\forall ()$ ”.

Por lo demás, Frege es consciente de que puede estructurar su sistema lógico como una construcción axiomática, pero que habría varias maneras de hacerlo. No importa tanto aquí justificar la elección de Frege, cuanto destacar que tenía una idea —aunque no del todo clara— de tal axiomática. Lo declara así: “Es patente que no es lo mismo conocer meramente las leyes que conocer también cómo se compadecen unas con otras. De esta manera, se obtiene un pequeño número de leyes de las cuales, si se aceptan las contenidas en las reglas, se incluye el contenido de todas, aunque no desarrollado. También es una ventaja del modo deductivo de presentación el que enseñe a conocer ese núcleo. Puesto que de la inabarcable cantidad de leyes formulables no se pueden enumerar todas, entoces no se alcanzará la totalidad, como no sea buscando aquellas que, por su fuerza, contengan en sí a todas.”²⁵

Finalmente, cabe destacar las aclaraciones que Frege tuvo el cui-

dato de hacer para complementar su exposición teórica de la conceptografía. El mismo año de aparición del *Begriffsschrift* publica un artículo sobre diversas aplicaciones de su escritura conceptual,²⁶ cuyos elementos principales hemos mencionado al comentar el prólogo de la *Conceptografía*. Asimismo, en 1882 publica otro artículo en el que desarrolla algunos argumentos en los cuales quiere probar que se justifica para la ciencia una escritura conceptual de este tipo. El principal argumento es la superación de las ambigüedades²⁷ del lenguaje ordinario, ya en la línea de lo que después se llamará “filosofía analítica”.²⁸ Y el año siguiente, en 1883, publica otro artículo en el que habla del objeto y finalidad de su conceptografía, mostrando cuidadosamente las diferencias de ésta con respecto al álgebra de Boole, de la cual él se ha distanciado. Como hemos visto, Frege dice —valiéndose de expresiones leibnizianas— que Boole sólo ha llegado a elaborar un *calculus ratiocinator* (o un cálculo de raciocinio, de la inferencia o deducción), mientras que él ha llegado a crear una *lingua characterica* o *characteristica universalis*, es decir, un lenguaje (o escritura) conceptual más amplio, del que el cálculo deductivo es sólo una parte.²⁹ Se trata de la lógica como lenguaje perfecto, que es la idea que Bertrand Russell tomará de Frege.

²⁶ *Idem*, “Anwendungen der Begriffsschrift”, en *Idem*, *Begriffsschrift und andere Aufsätze*, ed. I. Angelelli, Hildesheim: G. Olms, 1964, pp. 89-93.

²⁷ *Idem*, “Sobre la justificación científica de una conceptografía”, en la trad. ya citada de H. Padilla, pp. 209-214.

²⁸ M. Dummett, “Can analytical philosophy be systematic, and ought it to be?”, en *Idem*, *Truth and other enigmas*, London: Duckworth, 1978, pp. 437 ss.; M.D. Resnik, “Frege and analytical philosophy: facts and speculations”, en *Midwest Studies in Philosophy*, núm. 6 (1981), pp. 83-103.

²⁹ G. Frege, “Sur le but de l'idéographie”, en *Idem*, *Écrits logiques et philosophiques*, introd. y trad. C. Imbert, Paris, Eds. du Seuil, 1971, pp. 70-79.

²³ M. Beuchot, “El problema de los universales en Gottlob Frege”, en *Crítica*, UNAM, IX/26 (1977), pp. 65-89, también recogido en *Idem*, *El problema de los universales*, México, UNAM, 1981.

²⁴ J.A. Robles, artículo citado.

²⁵ G. Frege, *Conceptografía*, ed. cit., p. 37.

JESUS REYES CORONA, IN MEMORIAM



Foto del consejo editor de la revista *Elementos*, tomada en la conmemoración de su primer aniversario. De izquierda a derecha aparecen: Gerardo Torres del Castillo, María de la Paz Elizalde, Luis Rivera Terrazas, Ruth Ocampo, Alfonso Vélaz Pliego (rector), Jesús Mendoza Álvarez, Jesús Reyes Corona y Mariano Morales.

Cuantos azares hubieron de conjuntarse para hacer realidad este doloroso hecho, cuantos imponderables. Es a veces la muerte una suma de absurdos, de horrores.

Hace aproximadamente un año celebramos, junto con la aparición del cuarto número de *Elementos*, su primer aniversario. Fue una reunión pequeña, breve. Sólo hubo una alocución, un casi brindis, en el cual, más que destacarse los mínimos aciertos de la revista, se habló del compromiso de establecer

un medio de comunicación para nuestra comunidad científica; de un órgano que contribuyera a la divulgación de la ciencia, a la democratización del saber; y que, además, fuera un defensor, un propulsor de la Universidad, dando a conocer sus adelantos, los adelantos que en ella alcanzan las investigaciones científicas.

El llamado lo hizo Jesús Reyes Corona.

Permanente y entusiasta colaborador de *Elementos* desde su funda-

ción, Jesús Reyes Corona, siempre tomó muy en serio la responsabilidad de transmitir la ciencia, de formar nuevos científicos, tanto en sus publicaciones como en su actividad docente. Al decir de Rafael Baquero, con quien colaboró estrechamente: con auténtica fobia frente a resultados mediocres. Doctorado en el Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, hizo estudios posdoctorales en la Universidad de Iowa, en los Esta-

dos Unidos. Desde 1975 ingresó a la Universidad Autónoma de Puebla, primero como catedrático de la Escuela de Ciencias Fisicomatemáticas, después, como fundador del Departamento de Física del Instituto de Ciencias, fungiendo siempre como investigador y docente. Participó también en la fundación del Doctorado en Física de la UAP, primero en la provincia mexicana.

La veintena de artículos que publicó en revistas especializadas (como *Solid State Physics* y *Physics Today*) dando prueba de sus trabajos de investigación, fueron recogidos en citas por otros investigadores; alcanzando, alguno de ellos, más de un centenar de menciones.

Premio Nacional de Física 1984 otorgado por el CONACYT-Puebla, de-

PERSONALIDAD CIENTIFICA

signado Investigador Nacional, asesor del CONACYT, a los 38 años de edad fue arrancado de la vida por esa fatídica conjunción de azares que piloteó la muerte haciendo estrellarse una avioneta en la cola del avión en que viajaba. Lamentable, triste azar. Y para la Universidad Autónoma de Puebla, para su Escuela de Fisicomatemáticas, para el Departamento de Estado Sólido, para toda la comunidad científica, para su familia, en primer término, y para *Elementos*, irreparable pérdida.

Puebla, Pue.
septiembre de 1986
Mariano Morales

RECORDANDO A BRAULIO IRIARTE ERRO



Las respectivas anécdotas del transcurso de su vida como investigador astronómico en las buenas y malas, reflejan la personalidad de Braulio Iriarte Erro: como la de haber convencido a H. Johnson a que trajera y probara su equipo diseñado para observar en el rango infrarrojo en 0.8 y 1.2 micrones de Telescopio de 110 cm, por primera vez, en Tonantzintla, México.

Sus estancias temporales en EU le permitieron conocer a personalidades de la astronomía y la astrofísica como al Premio Nobel Chandrasekhar. También a los doctores W. A. Hiltener y H. L. Johnson quienes con sus equipos fotoeléctricos, indujeron a Iriarte a las observaciones de DY Pegaso, de las cuales determinó su curva de luz; las débiles Wolf-Rayet señaladas en las placas espectroscópicas de la

Cámara Schmidt de Tonantzintla; las estrellas de tipo temprano entre una zona de longitud galáctica (Vía Láctea), para ampliar el conocimiento de la estructura galáctica.

Con estos programas, en principio, demostró una habilidad para el manejo de instrumentos astronómicos, llegando al punto de que le haya sido cedido tiempo de observación en el telescopio de 2.10 m de MacDonal, Texas, EU. Ahí continuó trabajando en investigaciones con Hiltener y Johnson sobre cúmulos galácticos, determinando sus diagramas de color, logrando datos para complementar en este aspecto algunos diagramas de Hertzsprung-Russell.

Ya desde sus inicios como astrónomo, Braulio Iriarte manifestó sus inquietudes e idealismo, marcados desde sus primeros avances como miembro del Observatorio Astrofísico Nacional de Tonantzintla (SEP), en el año de 1950; y como participante en la estación de observación, también en Tonantzintla, del Observatorio Astronómico Nacional, UNAM, en 1952, por invitación del doctor Guillermo Haro y en alguna forma inducido por el entusiasmo a la astronomía, en el ejemplo del profesor Luis E. Erro, su tío.

Sus primeros trabajos en el *Boletín* de los Observatorios de Tonantzintla y Tacubaya le fueron reconocidos, permitiéndole ir a otros institutos astronómicos de EU como investigador asociado invitado: al observatorio de Yerkes de la Universidad de Chicago, observatorio de Lowell, al Laboratorio Lunar y Planetario de la Universidad de Arizona, y al observatorio de MacDonal de la Universidad de Texas.

En Tonantzintla, Puebla, fungió como coordinador administrativo de Astrofísica, secretario académico, y director general interino del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, todo esto entre 1974 y 1984.

En 1958 la fotometría fotoeléctrica avanzaba con sistemas electrónicos más refinados permitiéndole, junto con Hiltener, medir la polarización en galaxias azules, estrellas OB, en variables T Tauri; además le permitió la colaboración en la técnica fotográfica de tres colores en Tonantzintla.

Continuando con la fotometría fotoeléctrica en el sistema UVV (ultravioleta, azul, amarillo o visual), trabajó en la medición de estrellas azules débiles en el Polo Norte Galáctico —ubicadas en To-

Recordando a:

BRAULIO IRIARTE ERRO

nantzintla—, y cúmulos galácticos para entender un poco más acerca de la evolución estelar y de la estructura galáctica.

Braulio Iriarte y otros compañeros como Chavira trabajaron en observaciones para asesoría a otros investigadores y para tratar de establecer nuevos proyectos, como el de observar diferentes tipos de estrellas miembros del cúmulo de

las Hyades, programa establecido para realizarlo con un sistema de detección denominado CCD, en los días de su deceso: 13 de agosto de 1986.

De 36 años es difícil recordar y describir con detalle una serie de trabajos (algunos de ellos no se publicaron), que han sido básicos por su técnica y eficiencia en el manejo de instrumentos ópticos, electrónicos, fotométricos, espectrográficos . . . como también para incrementar la sensibilidad en placas fotográficas para obtener la magnitud azul, amarilla, roja e infrarroja en sus límites. Pero en todo esto contribuyó. Y la lista es muy grande. Incluye la espectroscopía de estrellas de tipo temprano, la fotometría fotoeléctrica sobre las Cefeidas, las fantásticas y fatigantes observaciones del Sol como estrella variable* detectando la variabilidad en Urano y Neptuno; además del trabajo que tenía que invertir en el equipo, esos años, para calibrarlo y obtener su máxima eficiencia.

También contribuyó a las técnicas que ampliaron la observación fotoeléctrica en JKL; con este sistema se detecta la energía emitida por diferentes tipos estelares, galaxias, etc.; sin dejar fuera de sus programas fotométricos a las estrellas ráfaga brillantes y débiles encontradas por G. Haro.

El entusiasmo y dificultades en su trabajo quedó demostrado en los últimos años, en las últimas semanas, como lo podemos constatar los que trabajamos con él.

Descanse en paz un colaborador, un fundador, del Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica.

Tonantzintla, Cholula, Pue.,
18 de agosto de 1986.

Enrique Chavira,
Jorge Pérez-Peraza

κρίσις

No.2



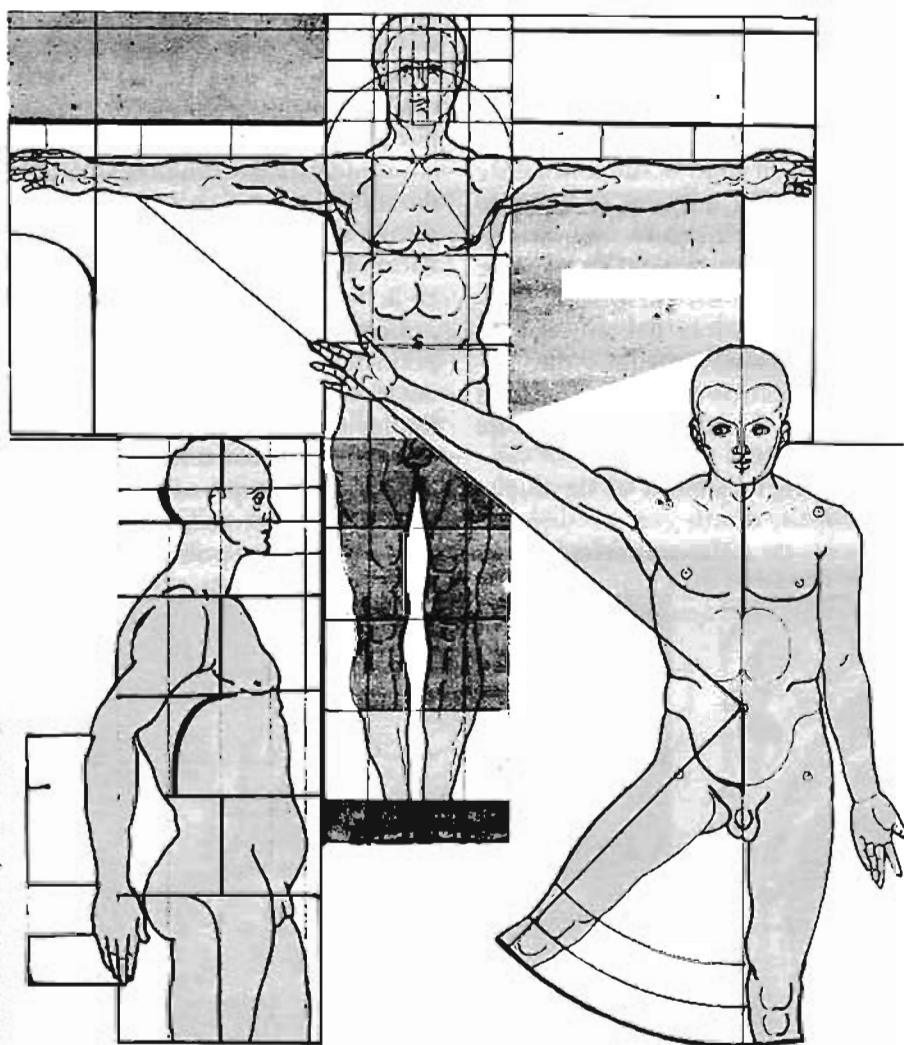
INTERNATIONAL CIRCLE FOR RESEARCH IN PHILOSOPHY

* *Lowell Observatory Bull.*, núm. 96, 1959.

LA DIMENSION HUMANA DEL PROCESO DE DESARROLLO*

OPINION

Abdus Salam**



Deseo extender mi agradecimiento al Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) por invitarme a participar en esta mesa redonda sobre la dimensión humana del proceso de desarrollo. Tomaré como axiomática la tesis de que un desarrollo duradero no puede ocurrir sin recursos humanos altamente motivados y entrenados. El propósito de mi participación es tratar de hacer hincapié en la actividad de una comunidad muchas veces ignorada: la de los científicos. De hecho, tan enormemente ignorada que no figuraron en la primera versión del programa para esta reunión. Los tecnólogos sí figuraron, mas no así los científicos. Casi declino dicha invitación antes de que se aceptara a la ciencia para el desarrollo como un punto a tratar en la reunión.

Mi experiencia en manejar ciencia relacionada con el desarrollo proviene de dirigir un centro internacional de las Naciones Unidas para la física de alto nivel, localizado en Trieste. Desde su fundación, este Centro ha tenido el privilegio de recibir del orden de 25 000 visitas de físicos teóricos y experimentales, casi 13 000 de ellos que trabajan en instituciones de investigación y universidades de países en vías de desarrollo.

Puesto que estoy hablando en Turquía, me gustaría comparar la situación de este país con la del cercano Egipto y la del mío pro-

* Este artículo apareció publicado en la revista *Avance y Perspectiva* núms. 24-25, 2a. época Centro de Investigación y de Estudios Avanzados-IPN. Traducción de M.A. Pérez Angón.

** Director del Centro Internacional de Física Teórica de Trieste, Italia.

pio, Paquistán. Estos tres países no son tan pequeños; tienen niveles de población similares a los de Francia y Japón, y de cinco a diez veces mayores que el de Suecia. Durante los últimos 15 años, hemos recibido en Trieste 325 visitas de físicos de Turquía, 375 de Paquistán y alrededor de 600 de Egipto.

Quisiera hablar con franqueza, como un amigo: espero no ser mal entendido. Permítanme empezar recordando el año de 1799: en contra de la oposición del Ulema —y aun de una porción del sector militar— el sultán Salim III introdujo en Turquía materias como álgebra, trigonometría, mecánica, balística y metalurgia. Además, importó profesores franceses y suecos para enseñar estas disciplinas. Su propósito era competir con los avances europeos en la construcción de armamento. Como no hubo el respectivo énfasis en la investigación de estas materias, Turquía nunca pudo mantenerse a la par con los nuevos avances realizados en otras partes del mundo. El resultado era predecible: Turquía no tuvo éxito. Entonces, como ahora, la tecnología no florecerá si no es apoyada por la ciencia.

Como segundo ejemplo, consideremos la situación de Egipto en

OPINION

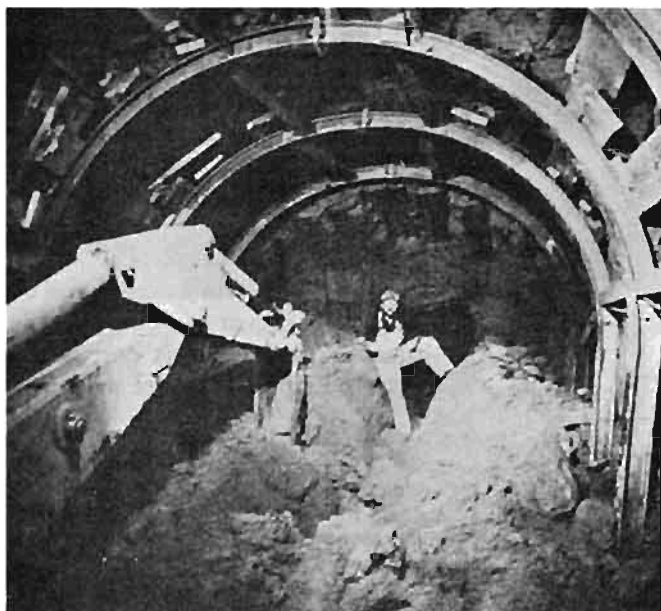
los tiempos de Mohamed Alí, treinta años después del episodio con Salim III que acabo de referir. Mohamed Alí inició un programa para entrenar a su gente en las artes de la búsqueda y prospección de oro y carbón en Egipto. Este intento no tuvo éxito, pero ello no lo desanimó, ni tampoco a sus sucesores, para seguir entrenando a los egipcios a largo plazo en geología y las ciencias de la tierra relacionadas. Sin embargo, desde entonces, y hasta nuestros días, no existe un solo instituto de investigación en desertificación de alto nivel en todo el subcontinente de África del norte y el Cercano Oriente (excluyendo a Israel). Cuando organizamos en Trieste recientemente un curso sobre física y matemáticas del proceso de desertificación, tuvimos que importar maestros de Dinamarca, con su experiencia en los desiertos de Groenlandia!

Mi tercer ejemplo es de nuevo de Egipto, donde, se me dijo, 30 millones de dólares fueron investi-

dos en establecer una fábrica de válvulas termoiónicas. Esta fábrica fue construida en el mismo año en el que los transistores fueron perfeccionados y empezaron a invadir los mercados mundiales. La recomendación para establecer esta fábrica fue hecha naturalmente por oficiales egipcios que no estaban bien informados de cómo la ciencia estaba avanzando, y quienes presumiblemente nunca consultaron a físicos competentes de su propio país.

¿Por qué despreciamos la ciencia para el desarrollo? Antes que nada, se tiene el problema de la aspiración nacional. Permítaseme decirlo sin ambages. Países del tamaño de Turquía, Egipto o Paquistán no tienen comunidades científicas empeñadas en el proceso de desarrollo porque no deseamos ese tipo de comunidades. Sufrimos de una falta de ambición para adquirir ciencia, de un sentimiento de inferioridad hacia ella, bordeando algunas veces en la hostilidad.

Con respecto a la aspiración, permítanme ilustrar lo que quiero decir con el ejemplo de Japón a finales del siglo pasado, cuando la nueva constitución Meiji fue promulgada. El emperador Mutsuhito hizo cinco promesas; en una de ellas estableció una política nacional



hacia la ciencia: "El conocimiento será buscado y adquirido de cualquier fuente con todos los medios a nuestra disposición, para la grandeza y seguridad del Japón." ¿Y qué se quería decir por "conocimiento"? Escuchemos al físico japonés Hantaro Nagaoka, quien se estaba especializando en magnetismo, una disciplina a la cual los japoneses han contribuido desde entonces en forma destacada, tanto teórica como experimentalmente. Escribiéndole a su maestro Tanakadate en 1880 desde Glasgow, Inglaterra, a donde había sido enviado por el gobierno imperial, se expresaba de la siguiente manera: "Debemos trabajar activamente con los ojos bien abiertos, los sentidos dispuestos, el entendimiento ágil, infatigablemente y sin parar un solo momento. . . No existe ninguna razón por la cual los europeos deban predominar en todo. Como usted dice. . . debemos derrotar a esa gente *yattya bottaya* (pomposa) en ciencia en el curso de 10 ó 20 años."

De nuestra experiencia en Trieste, podemos percibir que sólo cinco países en vías de desarrollo aprecian a la ciencia, independientemente de sus dificultades hacia el desarrollo. Ellos son Argentina y Brasil, en Latinoamérica, y China, Corea e India, en Asia. Excluyendo a estos cinco países, el Tercer Mun-

OPINION

do ha tomado a la ciencia —en contraste con la tecnología— únicamente como una actividad marginal. Y esto a pesar de que se ha dado cuenta de que en la ciencia y tecnología radica su mayor esperanza de progreso económico. Desgraciadamente, esta actitud también prevalece entre las agencias para el desarrollo de las naciones ricas y entre las agencias de las Naciones Unidas, incluyendo el PNUD.

Suponiendo que están ustedes de acuerdo conmigo en que la ciencia juega un papel importante para el desarrollo, ¿por qué insisto en que la ciencia en países en vías de desarrollo ha sido considerada como un actividad marginal? Por las siguientes dos razones:

Primera: los administradores de la ciencia, las grandes comisiones prestigiadas (aun la Comisión Brandt), así como las instituciones de fomento científico y tecnológico hablan muy uniformemente de los problemas de transferencia de tecnología a los países en vías de desarrollo, como si esto fuera

todo lo que estuviera involucrado. Es muy difícil de creer, pero es cierto que la palabra "ciencia" no figura en el reporte de la Comisión Brandt. Muy pocos en los países en desarrollo hacen hincapié en que *para lograr una efectividad a largo plazo, la transferencia de tecnología debe estar siempre acompañada de una transferencia de ciencia*; de que la ciencia de hoy es la tecnología de mañana y de que la ciencia debe tener un apoyo amplio para poder ser efectiva en sus aplicaciones. Yo iría aún más lejos, para decir: si fuéramos maquiavélicos, deberíamos buscar motivos siniestros entre aquéllos que intentan vendernos la idea de la transferencia de tecnología sin la transferencia de ciencia. No hay nada que nos haya dañado tanto en el Tercer Mundo como el lema reciente de que "sólo en los países ricos se da la ciencia importante". Desgraciadamente, este lema ha sido repetido en nuestros países en forma inconsistente para justificar la supresión del crecimiento de *toda* la ciencia.

Segunda: la transferencia de ciencia es efectuada por y para las comunidades de científicos. Estas comunidades necesitan crecer en recursos humanos e infraestructura hasta un tamaño crítico. Dicho crecimiento necesita de medidas sabias con ingredientes cardinales: compromisos a largo plazo, apoyo sostenido, autogobierno de la comunidad científica y amplios contactos internacionales. Además, en nuestros países, *a los científicos más destacados debería permitírseles jugar un papel al mismo nivel que los planificadores profesionales, los economistas y los tecnólogos*. Muy pocos países en desarrollo han impulsado este tipo de medidas y muy pocas agencias para el desarrollo han tomado como propio el deber de impulsar y ayudar a construir la infraestructura científica.

¿Por qué la transferencia de ciencia? ¿De cuál infraestructura científica estoy hablando y por

CIENCIAS

REVISTA DE DIFUSION

No. 9

1986

10

El por qué de la computación en Matemáticas

Un campo rico en comentarios, intereses, problemas y juegos de intelecto.

ELISA VISO GUROVICH

24

La Guerra de las Galaxias

CARLOS BUNGE

...to save a planet
graced by life...

Carl Sagan

38

La importancia de la evolución
Herbívoros y plantas
¿cómo interactúan?

KEN OYAMA

FRANCISCO ESPINOZA

47

En busca de las raíces de nuestra educación

Historia de la Facultad
de Ciencias (VII)

1968: un año crucial para la Universidad
En esta promesa entrevista, Salvador
Martínez Delgado nos habla de los
autores ilustres de este libro

54

La cuestión de Lysenko

"La teoría materialista del desarrollo de la naturaleza viviente es inseparable del reconocimiento de la necesidad de la herencia de caracteres adquiridos."

ISMAEL LEDESMA

BREVES

6 Reportaje

□ Arqueología y
Mössbauer

8 Nota

□ Las historias naturales
de los maguayos

22 Del Herbario

qué? En primer término, necesitamos la enseñanza de la ciencia a todos los niveles y, principalmente, a los niveles más altos, al menos para beneficio de los ingenieros y tecnólogos. Esto requiere de maestros estimulantes —y nadie puede llegar a ser un maestro estimulante de la ciencia si no ha experimentado y creado un mínimo de ciencia viva durante algún periodo de su carrera— requiere también de laboratorios de enseñanza bien equipados y, para la presente era de una ciencia tan cambiante, del

OPINION

suministro de las revistas y libros más recientes. Este es el mínimo de infraestructura científica con el que cualquier país de cualquier tamaño debe contar.

En segundo término, debe esperarse que las agencias gubernamentales y las industrias nacientes

pregunten a las comunidades científicas cuáles tecnologías deben ser importadas en forma selectiva. Todavía más, para una minoría de países en desarrollo, los científicos nativos deben ayudar a sus colegas aplicados en su trabajo de investigación. En cualquier sociedad, los problemas de su agricultura, de sus plagas y enfermedades, y de sus suministros de materiales, deben ser resueltos localmente. Se necesita sostener una planta científica de primera categoría para llevar a cabo investigación aplicada en estas áreas. La tarea de las ciencias aplicadas en un país en desarrollo se hace mucho más difícil por la sencilla razón de que no se tienen disponibles en la oficina vecina, o en el otro extremo de la línea telefónica, a los hombres que pueden decir qué principios básicos son necesarios saber sobre el propio problema de investigación aplicada.

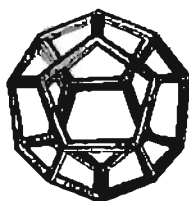
Ya hablé antes sobre la indiferencia hacia la ciencia. Consultando recientemente a mis colegas turcos, me comentaron que ella provenía algunas veces de la comunidad misma de ingenieros, una comunidad que en Turquía disfruta de reputación y prestigio. Por muchas razones, esto me sorprendió. Antes que nada, mi experiencia es que en Pakistán la falta de aprecio del posible papel de los científicos surge de la poca visión de los planificadores y economistas, pero no de los ingenieros. (Incidentalmente, el mismo comentario me hicieron los científicos brasileños).

En segundo lugar, ese comentario me sorprendió debido a que en la historia de los recientes avances fundamentales de la física, los ingenieros han ocupado un lugar muy destacado. Por ejemplo, Y. Nishina, el hombre que introdujo la física de alto nivel al Japón y que fuera maestro de dos ganadores del Premio Nobel de Física, H. Yukawa y S. Tomonaga, fue un ingeniero electricista de profesión; Paul A. M. Dirac, uno de los crea-

THEORIA

REVISTA DE TEORIA, HISTORIA Y FUNDAMENTOS DE LA CIENCIA

SEGUNDA EPOCA



δ Θεός ἀποθηκεύει

Colaboran en este número:

Maria ALBISU (UPV, San Sebastián) - Arantxa AZPIROZ (UPV, San Sebastián) - Mauricio BEUCHOT (UNAM, MÉXICO) - Fernando BRONCANO (Salamanca) - Wenceslao CASTANARES (Madrid) - Constante de CASTRO AGUIRRE (Caracas) - Jesus IZQUIERRO (UPV, San Sebastián) - Federico GRAFE (Sarriko, Bilbao) - Jean-Marie GRIZE (Neuchâtel, SUIZA) - J. M. LARRAZÁBAL (UPV, San Sebastián) - Alfonso MTZ. DE LIZARDUY (UPV, San Sebastián) - León OLIVE (UNAM, MÉXICO) - Julian PACHO (UPV, San Sebastián) - Lorenzo PLÑA GONZALO (León) - Andres RIVADULLA (UCM, Madrid) - Alicia SANCHEZ-MAZAS (Ginebra, SUIZA) - Miguel SANCHEZ-MAZAS (UPV, San Sebastián) - Juan URRUTIA (Sarriko, Bilbao) - Nicamir PRSUA LEZARUN (UPV, San Sebastián) - Luis VEGA RENON (Madrid) - Julian VELARDE (Osnabrück) - Jerzy WRÓBLEWSKI (Lodz, POLONIA)

Edita: CENTRO DE ANALISIS LOGICA E INFORMÁTICA JURIDICA
DEPARTAMENTO DE LÓGICA Y TEORÍA DE LA CIENCIA,
FACULTAD DE FILOSOFÍA Y CIENCIAS, UNIVERSIDAD DEL PAÍS VASCO

AÑO I SAN SEBASTIÁN, Junio-Septiembre de 1986 NÚMERO 3
ISSN 0495 - 4548

dores de la mecánica cuántica y quien, en mi opinión, es la más grande figura de la física del siglo XX, tuvo asimismo entrenamiento como ingeniero electricista. Eugene Wigner, que obtuvo también el Premio Nobel de Física, empezó su carrera como ingeniero químico.

Para reforzar mis puntos de vista, permítanme recordar que en 1961 asistí a la celebración del centenario de la fundación del Instituto Tecnológico de Massachusetts, que es quizá la escuela tecnológica más importante de los Estados Unidos de Norteamérica. Para mi sorpresa, fueron los ingenieros de esta escuela los que desearon aumentar el mínimo de ciencia incluido en su *currícula*.

Existe otro aspecto de la apatía hacia la ciencia, del cual no podemos ciertamente beneficiarnos. Este se refiere al abandono de la ciencia, como se puede demostrar fácilmente con números. En todo el mundo árabe existen alrededor de 1 500 científicos que realmente están involucrados en crear ciencia. De éstos, 55% provienen de un solo país, Egipto. A su vez, de este 55%, un cuarto son físicos, es decir, alrededor de 150 individuos. Dentro del promedio normal, el dos por ciento debe ser muy bueno. Durante la parte más productiva de

OPINION

su vida, a este dos por ciento le gustaría ir a donde su trabajo florezca y sea apreciado. ¿Podrían culparlos ustedes por ésto? Cifras parecidas se tienen en Turquía y Paquistán. Mediante una extrapolación de las normas internacionales —que prevalecen en Israel y Japón, por ejemplo—, uno esperaría encontrar alrededor de 6 000 científicos en Turquía. Realmente, creo que tanto Turquía como Egipto o Paquistán no irían a la bancarrota si produjeran, digamos, 1 000 físicos y los apoyaran y conservar en instituciones apropiadas —de las cuales hablaré más adelante.

Pero antes de esto, quisiera referirme a la situación en la vecina Grecia. Hasta hace poco, Grecia era considerada un país en desarrollo de acuerdo con la definición del PNUD, pero ahora está situada en la categoría de país desarrollado. Grecia solicitó recientemente su membresía al Centro de Investigaciones Nucleares de Ginebra, Suiza, que es la organización europea más grande y prestigiada para la inves-

tigación en física de partículas elementales. Grecia obtuvo dicha membresía y la tiene asegurada con tan sólo un presupuesto anual de un cuarto de millón de dólares. Con esto demostró su aspiración para entrar en las "grandes ligas" en la ciencia y es posible apreciar como resultado la madurez que los físicos griegos han adquirido y su transformación año tras año. Cómo se reflejará esta madurez en el proceso de desarrollo, dependerá por supuesto de las medidas que tome Grecia para ocupar a estos físicos. Mientras tanto, los físicos griegos estarán ahí.

Deseo ahora regresar a Turquía y a las instituciones que pueden ser creadas y que necesitarán de físicos turcos. Del contacto personal que he tenido con ellos, sé que los físicos turcos son algunos de los más imaginativos de todo el mundo en desarrollo. Se involucran en forma consciente en problemas difíciles de física, y ésto es algo que yo respeto. Hace poco visité este país cuando tuve el honor de ser recibido por el presidente Kenan Evren. Le sugerí en ese entonces que lo que Turquía necesitaba en sus planes y prioridades nacionales era algo análogo a los laboratorios Bell Telephone que tienen los Estados Unidos de América en el área de las comunicaciones. Estos laboratorios han producido seis premios Nobel que han contribuido al desarrollo de la física básica, además de incluir en su lista de inventos a los transistores y otros desarrollos tecnológicos. Estimo que el análogo de estos laboratorios para Turquía, Egipto o Paquistán costaría 40 millones de dólares para construirlos y alrededor de 4 millones de dólares anuales para mantenerlos en operación. Considero que pueden crearse con el nivel más alto de calidad y que es posible encontrar a los que los crearían en Turquía. ¿Habría una esperanza de que este proyecto y otros similares en ciencia fueran una realidad en el mundo en vías de desarrollo?



Aspecto de la ceremonia de la entrega del Premio Nobel en Estocolmo el 10 de diciembre de 1984. Del lado izquierdo se encuentran Carlo Rubbia y Simon Vander Meer, quienes obtuvieron el premio de física 1984 por su descubrimiento de las partículas W y Z. En la segunda fila se encuentran los Premio Nobel 1979 quienes predijeron teóricamente dichas partículas. A la izquierda de Abdus Salam están Sheldon Glashow y Steven Weinberg.

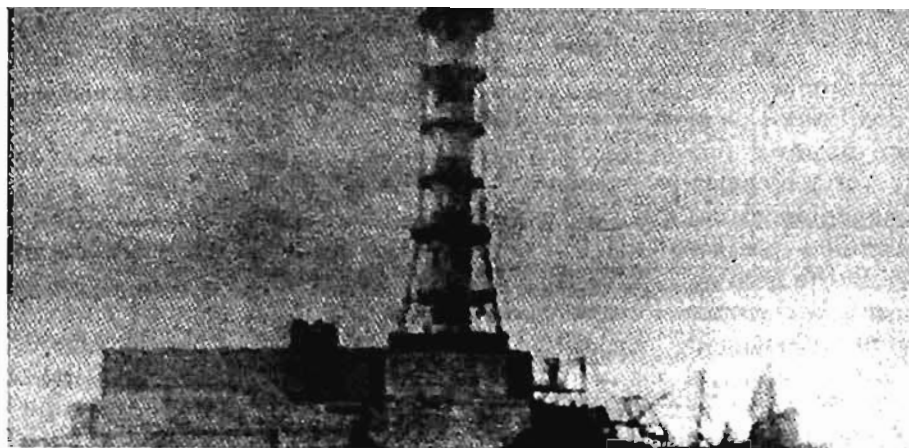
NOTICIAS Y NOVEDADES

INFORME AL BURO POLITICO DEL PCUS SOBRE CHERNOBYL*

El Buró Político del PCUS en una reunión especial discutió el informe rendido por la Comisión Estatal sobre los resultados de las investigaciones realizadas respecto a las causas que provocaron las averías de la Central de Electricidad en Chernobyl el 26 de abril de 1986, y las medidas que se han tomado para liquidar sus consecuencias y garantizar la seguridad en el uso de la energía atómica.

Se estableció que la avería tuvo lugar debido a una serie de violaciones en las reglas de explotación de los reactores, cometidas por los trabajadores de esta Central Atómica de Electricidad (CAE). Durante el proceso de reparación del cuarto bloque energético se realizaron, en tiempos nocturnos, experimentos relacionados a investigaciones de los regímenes de trabajo de los turbogeneradores. Los directivos y especialistas de la CAE no se prepararon debidamente para el experimento y no concordaron con las organizaciones correspondientes, no obstante estando obligados a hacerlo. Por fin, durante la realización misma de los trabajos no se aseguró el debido control y no se tomaron las medidas necesarias de seguridad.

El Ministerio de Energética y Electrificación de la URSS y la



La planta Chernobyl. Imagen de la televisión soviética

Comisión Estatal de Energía Atómica permitieron la falta de control de la situación en la estación de Chernobyl, no tomaron medidas efectivas para garantizar las exigencias de seguridad, permitieron la inadmisibilidad de las violaciones de la disciplina y de las reglas de explotación de esta estación.

La irresponsabilidad, negligencia y la indisciplina condujeron a consecuencias demasiado graves; como resultado de la avería murieron 28 personas y se causó un gran daño a la salud de otras personas.

El politburó expresa su más profundo pésame y pesar a los parientes de los muertos, señalando que el Estado presta a sus familias una ayuda multilateral; se ha organizado un gran trabajo de profilaxis y han sido sometidos a examen médico cientos de miles de personas. El diagnóstico ha permitido esclarecer que actualmente 203 personas sufren de radioactividad, de ellas 23 han pasado el curso de tratamiento en condiciones hospitalarias.

La destrucción del reactor condujo a que un territorio cercano a mil kilómetros cuadrados se contaminara radioactivamente, razón por la cual se desbarataron los cultivos agrícolas, se detuvieron las labores en las empresas, construcciones y otras organizaciones. Sólo las pérdidas directas causadas por la avería son cercanas a 3 500 millones de dólares. Se ha dificultado el abasto de energía en la economía.

El politburó tomó en consideración que la Procuraduría de la URSS presentó querellas judiciales contra las personas culpables de la avería en la CAE en Chernobyl y lleva a cabo una investigación cuyos materiales serán entregados, una vez que ésta termine, a los tribunales.

Han sido destituidos de sus puestos por los graves errores cometidos y por los defectos en el trabajo que condujeron a las graves consecuencias de la avería: Kulov, presidente de la Comisión Estatal de Energía Atómica; Shasharin, viceministro

* Traducción de Carlos Bascuñán S., Departamento de Química del ICUAP.

de Energética y Electrificación de la URSS; Meshkov, primer viceministro del Ministerio de Maquinaria Mediana; Emelianov, vicedirector del Instituto de Investigación Científica y Construcción. Al mismo tiempo deberán responder con todo el rigor ante el Partido. Ha sido expulsado de las filas del Partido el exdirector de la CAE de Chernobyl: Briukhanov.

Se ha hecho patente que el ministro de Energética y Electrificación de la URSS, Mayorov, merece la destitución de su puesto por los serios defectos en la dirección de la CAE de Chernobyl. Pero teniendo en cuenta que ocupa este puesto no hace mucho tiempo, el politburó le ha amonestado severamente y le ha advertido que si no saca las conclusiones correspondientes de lo acontecido, será castigado en forma más severa.

Se le ha encargado al Comité de Control Partidario del CC del PCUS, al Comité Central del Partido Comunista de Ucrania, y al Comité Urbano del Partido en Moscú examinar que responsabilidades les atañen a otros directivos.

En la reunión se subrayó que la implantación de grandes y energéticas medidas enfiladas a aliminar las consecuencias de la avería a corto plazo ha permitido cambiar, en forma radical, la situación en la estación eléctrica y los lugares adyacentes. Para la población evacuada de la zona de la CAE de Chernobyl se construyen casas, centros culturales y de servicio público; se le indemnizan los daños causados. Se llevan a cabo las dili-

gencias necesarias para ubicar a las personas en sus trabajos.

El estado del reactor dañado es controlado con gran seguridad y no representa ya peligro alguno. Se llevan a cabo acciones ingenieriles muy difíciles para conservar el bloque energético averiado.

En un amplio frente se realiza la limpieza de la superficie de la Central Atómica de Electricidad de los residuos radioactivos, se desactivan los territorios adyacentes, los edificios y construcciones, las maquinarias. Se han llevado a cabo grandes volúmenes de trabajo a fin de limpiar y enterrar los suelos contaminados, se han tratado los lugares con composiciones químicas especiales, logrando como resultado que el nivel de radiación en las regiones en que era más alto que la norma, disminuyera y que ahora sólo en Chernobyl y lugares aledaños supere aún los límites permisibles.

Para la conservación de las aguas se crea un sistema de construcciones que asegure una defensa eficaz de la cuenca atómica.



El politburó hizo resaltar que los *ukases* (decretos) del CC del PCUS y del Consejo de Ministros de la URSS, respecto a las medidas inmediatas para liquidar las consecuencias de la avería de la CAE de Chernobyl, han sido comprendidos profundamente por el pueblo soviético. Esto se ha expresado en el deseo de los colectivos de trabajo y en el de cada soviético, por hacer su aporte en la solución de las tareas planteadas. Miles de voluntarios hicieron saber su deseo de participación directamente en los trabajos de restauración.

Los soviéticos aportaron al fondo de liquidación de las consecuencias de la avería más de 700 millones de dólares. Los trabajadores de muchos colectivos han trabajado gratuitamente sus turnos de trabajo.

El politburó del CC del PCUS valora altamente la abnegación y el heroísmo laboral manifestados por los obreros, especialistas, científicos, militares, personal médico, trabajadores de la esfera de los servicios. . . durante los trabajos de liquidación de la avería y superación de sus consecuencias. Se adoptó la resolución de presentar a los camaradas que más se hayan distinguido para ser condecorados con órdenes y medallas de la URSS.

Se subrayó que la avería en la CAE de Chernobyl es una lección seria, de la cual los ministros y departamentos administrativos, las organizaciones científicas, de construcción y proyección, los órganos de economía, y del partido deben sacar conclusiones de las más completas.

El politburó del CC del PCUS ha exigido a los ministerios y departamentos de administración elaborar y llevar a cabo en los tiempos más breves, medidas para mantener la seguridad de explotación de las Estaciones Atómicas de Electricidad en activo, fortalecer la disciplina tecnológica en todos los niveles, elevar las exigencias para que se observen rigurosamente los reglamentos de trabajo de los reactores y otro tipo de maquinarias. Se prevé llevar a cabo la preparación y atestación (certificación testimonial) del personal de servicio; ampliar los centros lectivos y de entrenamiento especiales. A los órganos de la Comisión de Vigilancia Estatal se les ha encargado controlar el trabajo de todas las Estaciones Atómicas de Electricidad.

Una elevada organización, precisión y exactitud en el trabajo, además de profundos conocimientos, deben ser la ley de la vida de cada colectivo de trabajo en la energía atómica.

Especial atención han puesto la Comisión Gubernamental, los ministerios y departamentos de administración de los órganos estatales y del partido de Ucrania y Bielorrusia en concluir en los plazos establecidos todos los trabajos respecto a la conservación del bloque energético dañado, incluyendo su entierro en forma segura. Se ha propuesto tomar bajo un control constante y permanente la ejecución de las tareas de suministro de máquinas, medios de desactivación y materiales necesarios para liqui-

dar las consecuencias de la avería en la CAE de Chernobyl. Una de las tareas de primordial importancia es otorgar casas y dar servicios a la población evacuada. Sólo para los habitantes rurales es necesario construir casas habitaciones con una superficie total de cerca de 700 mil metros cuadrados.

A fin de elevar el nivel de dirigencia y responsabilidad en el desarrollo de la energía atómica y de mejorar la explotación de las Centrales Atómicas de Electricidad se ha creado el Ministerio de Energía Atómica de la URSS.

A los partidos comunistas de las repúblicas de la URSS, y a los comités distritales y regionales del partido se les ha encargado elevar el nivel de dirigencia en las Centrales Atómicas de Electricidad: educar a los obreros, a los cuadros ingenieriles, técnicos y de dirigencia en un espíritu de elevada responsabilidad, fortaleciendo insistentemente la disciplina y el orden en los colectivos de trabajo, prestando atención de primerísima importancia a los problemas relacionados al funcionamiento seguro de estas empresas. Para fortalecer la influencia del partido en la solución de estas tareas se ha reconocido como oportuno introducir en las organizaciones del partido en las Centrales Atómicas de Electricidad el cargo de secretarios de organización partidaria del CC del PCUS.

La URSS agradece profundamente a los Estados Socialistas que manifestaron su solidaridad hacia el pueblo soviético con motivo de la avería en la CAE de Chernobyl y

está muy reconocida de muchos otros países, de sus ciudadanos por el apoyo moral y la ayuda práctica.

En la reunión se subrayó la necesidad de una amplia colaboración internacional y de esfuerzos conjuntos para garantizar la seguridad nuclear. La URSS propone a los demás países lograr todos juntos que las probabilidades de averías en el trabajo de las maquinarias nucleares sea llevada a cero. Un importante significado, al respecto, tiene la sección especial de la Conferencia General de MAGATE fijada para septiembre. Nuestro país está listo a participar constructivamente en su trabajo y considera de actualidad la tarea de crear, en forma conjunta por científicos de diferentes países, un reactor de nueva generación. Al mismo tiempo es necesario acelerar la colaboración en el dominio de una síntesis term nuclear dirigida, la cual pudiera convertirse en una fuente inagotable de energía.

Otro de los problemas de seguridad de los centros de energía nuclear está relacionado con impedir su destrucción premeditada, como resultado de acciones bélicas o actos terroristas. Es necesario elaborar un sistema seguro de medidas para evitar el terrorismo nuclear en cualesquiera de sus manifestaciones.

La seguridad nuclear en nuestro planeta es inconcebible sin el cese de la preparación material de la guerra atómica, de la total liquidación de los medios de su gestación. La URSS está totalmente decidida

a lograr, a pesar de la encarnizada resistencia del complejo militar-industrial de Occidente, la plasmación del programa propuesto de liberar al mundo del peligro de las armas, ya antes de que termine el presente siglo. Desde el momento de su presentación, el 15 de enero de 1986, en todas las conversaciones sobre limitación de armas nucleares y desarme, nuestro país ha aportado propuestas concretas que permiten lograr acuerdos reales.

Deben significar *un punto de viraje en la causa por garantizar una seguridad internacional: el sofrenamiento de la carrera de los armamentos nucleares, el paso a medidas reales para reducir las armas nucleares y el cese de sus pruebas*. La opinión pública mundial espera de la administración norteamericana una respuesta positiva respecto a la moratoria unilateral de la URSS de las explosiones nucleares. *Una limitación verdadera de los armamentos sería el mejor aporte en la causa por fortalecer la paz y la seguridad nuclear.*

El politburó del CC del PCUS ha expresado su firme seguridad en que los ministerios y los departamentos administrativos, los órganos soviéticos locales del partido, los dirigentes de las empresas y organizaciones adoptarán las medidas necesarias para superar lo más rápido posible las consecuencias de la avería de la CAE de Chernobyl, para garantizar una seguridad tangible en el trabajo de la CAE, y el ulterior desarrollo de la energética soviética en interés de la economía, en interés de los trabajadores.

EXTRAVERSION Y NEUROTICISMO EN RELACION AL STRESS Y LA EXCRECION DE CATECOLAMINAS

Luis A. Urgellés Lorié*

Introducción

Las constantes tensiones a que está sometido el hombre actual lo llevan a un desequilibrio biológico contra el cual reacciona su organismo. Selye (1975)¹ ha indicado: "Pese a que los desequilibrios posibles presentan una variada gama, los sistemas de nuestro organismo reaccionan en todos los casos de manera idéntica. . ." De esta forma el proceso de adaptación funciona cuando estos sistemas están normales.

Se ha indicado que el factor Extraversión-Introversión depende de características individuales y del medio ambiente.^{2,3} También se reportan características diferentes del electroencefalograma entre los introvertidos y los extrovertidos,⁴ demostrándose una correlación entre estos factores, el Neuroticismo y las características del Sistema Nervioso Central.^{5,6}

Urgellés y otros (1982)⁷ encontraron en un grupo de jóvenes universitarios, diferenciados en introvertidos y extrovertidos, que estos últimos tenían una mayor amplitud del Contingente de Variación Negativa (CNV).

* Instituto Nacional de Oncología y Radiología, Ciudad de La Habana, Cuba.

Con estos antecedentes podemos decir que todo hombre sano tiene un mecanismo de respuesta ante una variación en su medio ambiente; pero esta respuesta puede estar influenciada en algunos casos por el hecho de que el sujeto sea extrovertido o introvertido.

Nuestro interés es demostrar respuestas diferentes en un grupo de sujetos sanos divididos en extrovertidos e introvertidos, sometidos a una actividad que provoca stress.



Material y método

Seis sujetos (3 mujeres y 3 hombres), con edades entre 30 y 50 años y con 10 años o más de experiencia fueron objeto de nuestro estudio. Todos eran locutores de televisión y se les aplicó el Test

EPI (Forma A)² para obtener el Factor E (Extroversion-Introversión), así como medir el nivel de ansiedad por el Factor N (Neuroticismo-Estabilidad).

Se les mantuvo 24 horas de reposo, hospitalizados. En estas condiciones se les recogió orina de 24 horas para obtener los valores de adrenalina (A) y noradrenalina (NA).⁸

Además se eliminaron del estudio los casos con Diabetes, Hipertensión arterial, así como se les restringió el café y otros factores que pudieran alterar los valores de estos metabolitos.

Posteriormente se llevaron a su puesto de trabajo y al finalizar éste se les recogió nuevamente orina para obtener los valores de A y NA.

Resultados y comentarios

De los casos estudiados, cuatro fueron clasificados como introvertidos y el resto como extrovertidos.

Al estudiar el Factor N encontramos que todos los casos presentaban una N baja ($\bar{x} = 5,3$) lo cual demuestra que la ansiedad no influyó en el resultado obtenido. En otros trabajos se ha correlacionado este factor con otras actividades, demostrándose bajo rendimiento a medida que aumenta el valor de N.^{9,10} En nuestros casos pensamos que este factor no está influenciando en el rendimiento de su labor, además de que todos tienen diez o más años de experiencia.

Por otro lado, al obtener los valores de E observamos un incremento de A y NA después de la actividad, destacándose lo siguiente: En el grupo introvertido la A se incrementó en un 10.82% del valor de reposo, mientras que la NA se incrementó en un 257.95%. Por el contrario en el grupo extrovertido la A se incrementó en un 121% y la NA en sólo un 7.41%.

Esto nos demuestra una diferencia entre los dos grupos estudiados, donde en introvertidos el mayor incremento se recoge en la NA, mientras que en extrovertidos se recoge en la A.

BIBLIOGRAFIA

¹ H. Selye, *Tensión sin angustia*, Editorial Guadarrama, Madrid, 1975. En: *Correo de la UNESCO*, oct. 1975. pp. 5-9.

² H. J. Eysenck, *Experiments with drugs*, Pergamon Press, London, 1963.

³ H. J. Eysenck, "The biological basis of personality", Springfield, I 11, Charles C. Thomas, 1967.

⁴ A.B. Gottlob, "The relationship between brain potentials and personality", *J. exp. psychol.*, 1938, núm. 22, pp. 67-74.

⁵ J. Frigon, "Extraversion, neuroticism and strength of the nervous system", *Br. J. Psychol.*, 1976, (67); núm. 4; pp. 467-474.

⁶ M. Concannon, "The relationship between introversion-extraversion somatotype and nervous system properties", *Dissertation Abstracts International*, 1980; (66); núm. 41 (5-B) 1963.

⁷ L.A. Urgellés Lloré, et al, "Contingente de variación negativa y extraversión-introversión", III Jornada Nacional de Ciencias Neurológicas, Cuba, 1982.

⁸ R. Ramírez, DMT, 1982, "Comunicación personal".

⁹ L.A. Urgellés Lloré, et al, "Neuroticismo y su relación con un tipo de actividad laboral", *Rev. Cub. Hig. y Epidem.* núm. 21 (1), 1983, pp. 20-27.

¹⁰ L.A. Urgellés Lloré, "Extraversión y neuroticismo en jugadores de ajedrez", 1984, revista *Elementos*, núm. 4, México, 1985.

LA SALUD, TAREA DE LA EDUCACION

María Torres Ponce

La carrera de avances técnicos y científicos dentro de la medicina ha requerido del desarrollo de personal dedicado a la asistencia y cuidado de los enfermos en un nivel más calificado.

A partir de esta necesidad la UAP ha impulsado la creación de una Escuela de Enfermería con un nivel curricular de licenciatura, que se ubicará en Zacapoaxtla, Puebla, con el fin de desconcentrar sus actividades de investigación y enseñanza universitaria que conformará, junto a otras actividades extensionales, la Unidad Regional Teziutlán. La creación de la Escuela de Enfermería con nivel de licenciatura no es un proyecto aislado y, para la realización del mismo, se ha llevado a cabo un es-



tudio socioeconómico en base a investigaciones documentales y de campo.

La investigación documental se apoyó en el Plan Nacional de Salud, en datos estadísticos de la Secretaría de Salud, en el Diagnóstico Social de la Profesión de Enfermería en México y otros.

Por su parte, los datos de campo se obtuvieron directamente con las comunidades de la región. De los resultados se desprende que la población es relativamente joven y corresponde a grupos no productivos. Evidentemente dicha población es menor en la zona rural, que en la urbana, las condiciones de vida son predominantemente insalubres por la falta de servicios sanitarios básicos, malos hábitos de higiene, falta de educación sexual y desnutrición avanzada.

En cuanto a la morbilidad, la zona presenta fuerte incidencia de padecimientos debido a la influencia del medio ambiente y la insalubridad, como: la influenza, la neumonía, la gastroenteritis y la escaviosis (parásito que se desarrolla en los espacios interdgitales ocasionado por la humedad). En el estado de Puebla la patología infecciosa se demuestra en enfermedades respiratorias altas (nariz, laringe), enteritis (entero-intestino), amibiasis y neumonías.

Con base en los resultados obtenidos y con la colaboración de las profesoras Hilda Rosado García y Yolanda Vera Chávez maestras de la Escuela de Enfermería en Puebla, se establecieron los objetivos del plan de estudios para la escuela



la de Zacapoaxtla respondiendo a las necesidades y problemas de salud de la población en esa región.

De aquí que la propuesta se orienta a la preparación de profesionales de enfermería capaces de enfrentar y participar conjuntamente con el equipo de salud (trabajadores sociales, químicos, psicólogos, médicos y personal de enfermería) ante el proceso salud-enfermedad, desarrollando un plan terapéutico encaminado a sanar al paciente. La importancia que este plan le da a la capacitación de las enfermeras en el uso de nuevas técnicas de atención médica, se debe a su relación directa con las actividades específicas que se desarrollan dentro y fuera de una uni-

dad hospitalaria, como la aplicación de oxígeno, la colocación de sondas, la aplicación de medicamentos por diferentes vías, el control de los signos vitales (temperatura, pulso, respiración, presión arterial), la instrumentación en cirugía, etc., actividades que obligan a un acercamiento con el paciente para detectar padecimientos de otras necesidades o problemas físicos. Así como a los constantes avances que la tecnología aplicada a la medicina presenta periódicamente.

El otro aspecto de la capacitación contempla su participación en trabajos de medicina preventiva, dentro de los que se tocan factores como: orientación a las familias

sobre las condiciones de higiene personal, así como en los alimentos, saneamiento ambiental y posibilidad de construir drenajes; capacitación para recoger y almacenar agua en sus casas, manejo de la basura, manejo de los alimentos, construcción de letrinas para evitar contaminación, planificación de la familia, consulta prenatal y aplicación de vacunas. Sin embargo la población rural continúa recurriendo al curandero o a la partera por falta de información, de disposición, o porque en algunas regiones no existen clínicas médicas o se encuentran muy retiradas.

Atención particular reciben los programas de educación basándose en los problemas de salud en la población. En este caso se recurre al método Proceso Atención Enfermedad (PAE) que es la planeación de cuidados al paciente, detección del problema o padecimiento y estado emocional. Se realiza una historia natural de los padecimientos (influencia del medio ambiente, cambios celulares, la sintomatización general), y se especifican sus complicaciones. Con estos datos se elabora la historia clínica de enfermería en donde se conocen los antecedentes del paciente, el perfil de higiene, el resultado de laboratorio y diagnóstico de enfermería. De acuerdo con esta información se elabora el plan de acción de enfermería o plan de atención de enfermería, en base a la evaluación de los datos recogidos en el PAE, y, como resultado, la evolución del paciente.

Asimismo, propiciará la integra-

ción de un equipo de investigación en Enfermería, con la participación multidisciplinaria en esta área de la salud.

La estructura del plan se divide en 3 áreas de estudios concebido para esta nueva escuela: conocimiento del hombre y su medio ambiente, que abarca los tres primeros semestres; clínica, que se impartirá en los semestres 4o., 5o. y 6o. y, finalmente, administración y docencia que corresponden a los últimos semestres.

De esta manera se cubre lo que se propone la UAP a través de la Escuela de Enfermería que se ubicará en la zona de la Sierra Norte de Puebla cumpliendo así las etapas de superación, en investigación y docencia, formando profesionales capaces y preparados para enfrentar las necesidades y exigencias de la población.



SOBRE EL USO DEL LENGUAJE: *PATTERN*

José Luis Díaz*

PATTERN: PATRON, MODELO, FORMA, CONFORMACION, PAUTA.

La abundancia de anglicismos en ciencia constituyen un significativo indicador de colonización e imitación. Un término al que supuestamente no se le encuentra equivalente en castellano es *pattern*. En general se le ve traducido o empleado como *patrón*. Esta palabra, aparte de su acepción para designar al amo, señor, dueño, protector o jefe, sólo se debe emplear como su homónima inglesa en su sentido de modelo para ejecutar algo, como "el patrón de un vestido". Rara vez se da esta acepción en las ciencias biológicas. Las otras acepciones de la palabra *pattern* en tanto prototipo se deben traducir como *modelo*: "Athenas fue un modelo de democracia", por ejemplo.

El resto de los sentidos de *pattern* son los que más nos interesan en el lenguaje científico. El primero es el de *forma* cuando se designan aspectos o contornos, el conjunto de líneas que identifican un sujeto, un objeto o una cualidad. Algunas veces podemos especificar usando la palabra *figura*, en especial al designar la forma exterior de un sistema. La palabra *pattern* puede también implicar la *conformación* de elementos que componen un sistema, o sea su

* Instituto Mexicano de Psiquiatría, México, D.F.

disposición o arreglo espacial, su distribución y sus interacciones. Cuando la forma se encuentra en movimiento y en particular cuando presenta un proceso espaciotemporal característico hablamos de pautas, como las notas musicales o algunas acciones conductuales.

Este es un buen ejemplo de cómo el castellano presenta en ocasiones varias opciones para definir los sentidos de un término que en inglés sólo se pueden inferir por el contexto.

• • • • •

¿EXISTE UNA QUINTA FUERZA FUNDAMENTAL?

Gerardo Torres del Castillo

Un elemento fundamental de la teoría gravitacional de Einstein (la relatividad general) es el llamado principio de equivalencia débil, el cual corresponde al hecho de que todos los cuerpos, independientemente de su naturaleza, son atraídos de igual manera por la gravedad. Este hecho, señalado por Galileo, fue verificado con un alto grado de precisión a principios de este siglo por el científico húngaro Roland von Eötvös, quien en 1922 publicó el análisis de sus experimentos; con lo que, hasta hace poco, se consideraba satisfactoriamente confirmada la aseveración de Galileo. Sin embargo, recientemente un grupo de investigadores en los EU ha revisado los resultados obtenidos por Eötvös, llegando a la conclusión de que la ligera dis-

persión de los datos de Eötvös no se debe a errores experimentales sino a la existencia de una fuerza repulsiva de corto alcance cuya intensidad depende de la masa y constitución de los cuerpos sobre los que actúa. Al parecer, el alcance de esta fuerza es de alrededor de 200 metros por lo que prácticamente no afecta las predicciones de la relatividad general en el dominio astrofísico y cosmológico.

Hasta ahora está firmemente establecida la existencia de cuatro fuerzas fundamentales: la gravitacional, la electromagnética, la débil y la fuerte —las dos últimas de alcance extremadamente corto que se manifiestan a escala nuclear— y en la actualidad se efectúan numerosas investigaciones tratando de unificar estas cuatro fuerzas. En caso de confirmarse la existencia de una quinta fuerza fundamental —a la que se ha llamado hipercarga— sería de esperarse que las cinco fuerzas se pudieran unificar de alguna manera.

De acuerdo a la teoría cuántica del campo, puede considerarse que las fuerzas fundamentales se produ-

cen por el intercambio de ciertas partículas mediadoras cuya masa es inversamente proporcional al alcance de la fuerza. Así, la fuerza electromagnética, de alcance infinito, se debe al intercambio de fotones cuya masa es cero; la interacción débil se produce por el intercambio de las partículas W^+ , W^- y Z^0 , detectadas en 1983, mientras que se supone que la interacción fuerte y la gravitacional se deben al intercambio de gluones y de gravitones, respectivamente. De manera similar, la hipercarga se supone transmitida por partículas con masa y se conjetura que estas partículas podrían explicar parte de la "masa faltante" en el Universo. Esto último se refiere a que la masa de las galaxias determinada en base a su efecto gravitacional es mayor que la masa visible de las galaxias. Anteriormente, esta "masa faltante" se ha tratado de explicar suponiendo que en el medio interestelar existe una gran cantidad de neutrinos (invisibles) o suponiendo que hay materia oscura en las galaxias quizá en forma de agujeros negros.

EL Cotidiano

Revista de la realidad mexicana actual



Av. San Pablo 180, Col. Reynosa Tamaulipas
Delegación Azcapotzalco, 02200 México, D.F.
(Informes: Tehuantepec 122 Col. Roma Sur
C.P. 06760. México, D.F. Tel. 574-51-74).



CAOS OPTICO EN SISTEMAS PASIVOS

H.M. Gibbs, F.A. Hopf
y J.V. Moloney**

La turbulencia es un fenómeno inevitable en muchos sistemas físicos. El estudio de la turbulencia es de gran interés en áreas como matemáticas, hidrodinámica y dinámica de poblaciones. La turbulencia, o caos, es un complicado movimiento errático que puede describirse mediante ecuaciones puramente deterministas.



Los experimentalistas han desarrollado muchos sistemas en un intento de estudiar la turbulencia. Un sistema basado en componentes ópticas ha sido desarrollado empleando luz de un láser continuo

* Tomado de: "Optics in 1985", publicado por *Optics News*, Dic. 1985. Traducción de: Jesús E. Reyes. Departamento de Física ICUAP.

** Universidad de Arizona.

en un sistema de codificación-sindifracción con un espejo de retroalimentación simple empleando vapor de sodio. Este sistema posee una oscilación fundamental que sufre una bifurcación dando como resultado una señal de salida cuasiperiódica. Es lo suficientemente simple para permitir estudiar la turbulencia, particularmente la comparación de los resultados esperados predichos por la teoría.

Bibliografía

¹ N.B. Abraham, L.A. Lugiato y I.M. Nadeucci (editores), *Journal of The Optical Society of America*, vol. B2, núm. 7, 1985 (número especial dedicado a inestabilidades en medios ópticos activos).

² M. LeBerre, E. Ressayre, A. Tallet y H. M. Gibbs, en *Digest of Topical Meeting on Inestabilities and Dynamics of Laserse and Nonlinear Optical Systems* (Optical Society of America, Washington D.C., 1985).

³ H. Nakatsuka, S. Asaka, I. Iton, K. Ikeda y M. Matsuoka, *Physical Review Letters*, vol. 50, p. 109, 1983.

⁴ H.M. Gibbs, M.W. Derstine, K. Tai, J.F. Valley, J.V. Moloney, F.A. Hopf, M. LeBerre, E. Ressayre y A. Tallet, en *Digest of...* (ver Nota 2).



COMPUTACION OPTICA

H.J. Caufield**

Grandes esfuerzos simultáneos en el área de la computación óptica se están llevando a cabo actualmen-

* Tomado de: "Optics in 1985", publicado por *Optics News*, Dic. 1985. Traducción de: Jesús E. Reyes. Departamento de Física ICUAP.

** Universidad de Alabama.

te en los Estados Unidos, Japón, Europa y la Unión Soviética, y es probable que tengan pronto un gran impacto.

Estos esfuerzos pueden producir computadoras digitales así como computadoras híbridas digitales-analógicas. Procesadores matriciales de arreglos sistólicos acusto-ópticos pueden llevar a cabo la parte digital. Además las futuras máquinas pueden incluir muchos procesadores separados. Empleando interruptores holográficos estos procesadores podrán ser interconectados en tres dimensiones. Las interconexiones verticales además de las planares harán posibles arquitecturas de procesamiento enteramente novedosas.

Mirando hacia el futuro, computadoras totalmente nuevas serán desarrolladas. Estas máquinas serán tan complicadas para programar que en lugar de ello serán "enseñadas". La óptica puede de hecho permitir llevar a cabo computación pasiva lineal a la máxima velocidad, la de ancho de banda de la fuente de luz.

Bibliografía

¹ *Optical Engineering*, vol. 24, núm. 1 (número especial dedicado a la computación óptica).

² *Digest of the Topical Meeting on Optical Computing* (Optical Society of America, Washington D.C., 1985).

³ *Proceedings of the IEEE*, vol. 72, núm. 7 (número especial dedicado a la computación óptica).

⁴ R. Landauer, *IBM Journal of Research and Development*, vol. 5, p. 183, 1961.

⁵ E. Fredkin y T. Toffoli, *International Journal of Theoretical Physics*, vol. 21, p. 219, 1982.

PRUEBA DE UNA CONJETURA DE POINCARÉ

Gerardo Torres del Castillo

En el campo de las matemáticas existen de tiempo en tiempo problemas cuya solución desafía a los matemáticos durante varias décadas e incluso durante siglos. Estos problemas usualmente consisten en alguna afirmación hecha sin demostración y muchos de estos problemas son identificados con el nombre de algún destacado matemático quien formuló el problema. Uno de los matemáticos más sobresalientes en los últimos tiempos ha sido Henri Poincaré (1854-1912), notable por dominar prácticamente todos los campos de las matemáticas de su tiempo y además por ser el iniciador de varias de las áreas de las matemáticas actuales. En 1904, Poincaré formuló un problema, dentro del terreno de la topología, que hasta ahora no se había resuelto.

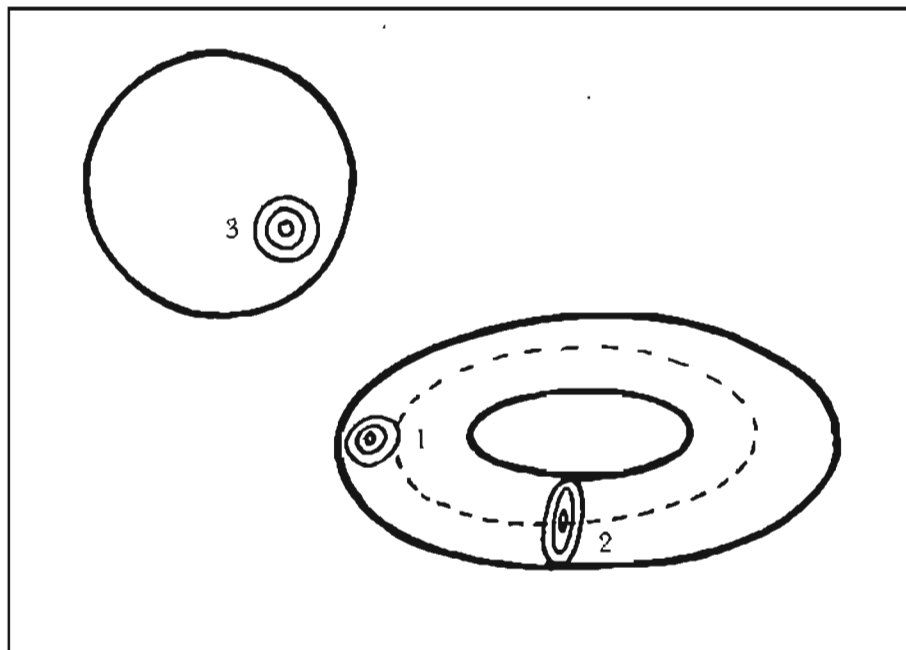
En el siglo pasado se logró entender y caracterizar las posibles superficies bidimensionales, entre las cuales se encuentran, por ejemplo, la superficie de una esfera ordinaria y la superficie de una dona. Una peculiaridad de la superficie de una esfera, y de cualquier superficie equivalente a ella, es decir, que se obtenga de ésta deformándola sin romperla, es que cualquier curva cerrada trazada

sobre la superficie puede ser deformada, cerrándola, hasta terminar en un punto, permaneciendo siempre sobre la superficie. En cambio, en el caso de la superficie de una dona, existen curvas cerradas que no pueden contraerse hasta terminar en un punto sin salirse de la superficie (las curvas 1 y 2 en la figura; la curva 3, por otra parte, sí puede contraerse a un punto).

Poincaré estableció la siguiente pregunta: si en un espacio (o, técnicamente, una variedad) tridimensional toda curva cerrada puede ser contraída a un punto ¿tal espacio es (equivalente a) la superficie (tridimensional) de una esfera en dimensión cuatro? Obviamente,

la pregunta puede extenderse a dimensiones más altas y de hecho en 1961, Stephen Smale en EU la resolvió para dimensiones mayores o iguales a cinco, y veinte años después, Michael Freedman, también en EU, resolvió el problema para la dimensión cuatro; quedando entonces solamente sin respuesta el caso tridimensional, que es justamente el propuesto por Poincaré.

Ahora, después de 82 años de haberse formulado la conjetura de Poincaré, un par de matemáticos en la Universidad de Warwick, Inglaterra: Colin Rourke y Eduardo Rego, han logrado, finalmente, dar una demostración de esta conjetura.



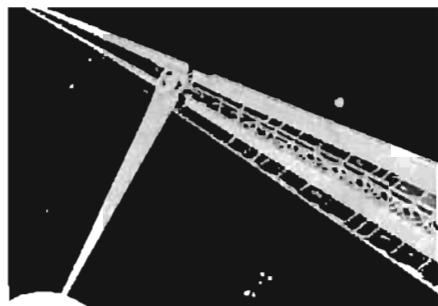
AUTORES Y COLABORADORES

Nora Eva Bretón Báez. Nació en la ciudad de Puebla. Cursó la licenciatura en física en la Escuela de Ciencias Físico Matemáticas de la Universidad Autónoma de Puebla y los estudios de maestría y doctorado en física en el Departamento de Física del Centro de Investigaciones y de Estudios Avanzados del IPN. Su área de investigación es la generación de soluciones exactas de las ecuaciones de Einstein. Cuenta con tres artículos publicados en revistas internacionales. Ha impartido clases en la Universidad Autónoma de Puebla y en la Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Azcapotzalco.



Mauricio Beuchot. Doctor en filosofía, realizó sus estudios en México y en Suiza (Friburgo). Investigador en el Instituto de Investigaciones Filosóficas de la UNAM. Profesor de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Filosofía y Letras de la UNAM. Ha publicado: *Elementos de semiótica* (UNAM, 1979); *La filosofía del lenguaje en la Edad Media* (UNAM, 1982), y prepara junto con Walter Redmond un estudio sobre *La lógica en México*. Investigador Nacional y colaborador permanente de *Elementos*.

José Luis Lucio Martínez. Nació en la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P. Obtuvo su licenciatura en física en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, maestría en ciencias en el Departamento de Física del Centro de Investigaciones y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV) doctorado en ciencias de la Université Catholique de Louvain, Bélgica; continuando con estancias posdoctorales en la Universidad de Princeton, Nueva Jersey, y el Fermi National Accelerator Laboratory, en los Estados Unidos. Es miembro de la Academia de la Investigación Científica y de las Sociedades Mexicana y Americana de Física. Actualmente es profesor titular del Departamento de Física del CINVESTAV del IPN. Sus campos de investigación son la física nuclear y la física de altas energías y sus áreas de interés específico son el estudio de procesos fotonucleares, supersimetría y teorías tridimensionales.



José Núñez Flores. Nació en Tecalí, estado de Puebla. Obtuvo su licenciatura en la Escuela de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Puebla y su maestría en química, rama de físico-química, en el Departamento de Química del Instituto de Ciencias de la misma institución. Su experiencia profesional es en el área industrial: auxiliar de control de calidad, De-

rivados Meléicos, S.A., Puebla. Su pervisor de producción, Vidriera de México, S.A., México, D.F. Supervisor de laboratorios, Dirección General de Aprovechamiento de Aguas Salinas y Energía Solar, México, D.F. En docencia: profesor de física y matemáticas (Medio tiempo "B"), Escuela de Ciencias Químicas, UAP. Asistente del curso propedéutico "Química Inorgánica Avanzada" durante la Escuela de Verano 1985, UAP.



Jorge Pérez-Peraza. Cursó estudios de licenciatura en la Facultad de Ciencias de la UNAM y en la Escuela Superior de Física y Matemáticas del IPN. Realizó su posgrado en la Facultad de Ciencias de la Universidad de París, en donde obtuvo su grado doctoral; hizo varios posdoctorados en diversas instituciones de Astronomía y Geofísica; profesor en la Facultad de Ciencias de la UNAM, y asesor del planetario del IPN y del ININ. Actualmente es Director Técnico del INAOE, en Tonantzintla, Puebla. Su área de investigación es la astrofísica (incidencia de la fenomenología estelar sobre el planeta y su medio ambiente). Los campos que cultiva son la física solar y la física de rayos cósmicos, y las disciplinas correspondientes son la física de plasmas, magnetohidrodinámica, y física de interacciones de partículas energéticas con la materia y campos electromagnéticos. Es colaborador de *Elementos*.

Ismael Soto López. Realizó sus estudios en la Escuela de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Puebla recibiendo de químico en 1978, y de químico farmacobiólogo en 1980. La experiencia profesional ha sido en la industria SEARLE en 1978 y en la Secretaría de Salubridad de 1979 a 1980. Ha desempeñado las cátedras de farmacología en la Escuela de Medicina de la UAP de 1978 a 1980; temas selectos de farmacología en la Escuela de Ciencias Químicas en 1980, y química bioinorgánica en dicha escuela desde 1979 a la fecha. Es colaborador en el Tribunal Superior de Justicia del Estado de Puebla, como Químico Legista desde mayo de 1985. Coordina el área de química inorgánica en la Escuela de Ciencias Químicas desde 1980 a la fecha.



Luis Angel Urguells Lorié. Se graduó de médico en el año 1977. Especialista en fisiología normal y patológica. Cursó posgrados en el Centro Nacional de Investigaciones Científicas de Cuba (CENIC) y en la República Popular de Bulgaria, en la especialidad de neurofisiología clínica. Cursó estudios de especialización en acupuntura en el Instituto de Medicina Tradicional de la República Socialista de Vietnam. Actualmente es investigador auxiliar en el Instituto Nacional de Oncología y Radiobiología de la ciudad de La Habana. Es colaborador permanente de *Elementos*.

Participa en el proceso científico a través de



revista trimestral que te ofrece artículos científicos, didácticos, divulgativos, de opinión, noticias y novedades en las áreas de ciencias exactas, naturales y aplicadas.

Para subscribirte por un año (4 números) envía un giro postal u orden de pago a:

Revista Elementos
Universidad Autónoma de Puebla
Maximino Avila Camacho 219, C.P. 72 000
Puebla, Pue. México

Marca el espacio correspondiente:

	Subsc. normal	Subsc. de apoyo
México	\$ 2 000 (M.N.) ☐	\$ 3 000 (M.N.) ☐
América Latina	U.S. 10 ☐	U.S. 15 ☐
EE.UU. Canadá	U.S. 15 ☐	U.S. 20 ☐
Europa	U.S. 18 ☐	U.S. 25 ☐

anexa el siguiente talón

Nombre _____

Dirección _____

_____ C.P. _____

Ciudad _____

Estado _____ País _____



INTERNATIONAL CIRCLE FOR RESEARCH IN PHILOSOPHY

September 2, 1986
Mr. Julio Mendoza Alvarez
Editor
ELEMENTOS
Instituto de Ciencias de la UAP
Maximino Avila Camacho No. 219
CP 72000
Puebla, Pue. MEXICO

Dear Sr. Mendoza:

Fernando Casas, a friend and associate of the International Circle for Research in Philosophy draws my attention to your publication which looks extremely interesting to me.

I would like to initiate an exchange between ELEMENTOS and KRISIS. Please find under separate cover Nos. 1 and 2 and the table of contents of 3-4 of KRISIS. As you can see, to the extent that scientists are able to deal with critical problems of philosophical and interdisciplinary import, we are printing their essays.

I would be grateful if you could reciprocate by sending me Nos. 1, 2, 3 and 4 of ELEMENTOS.

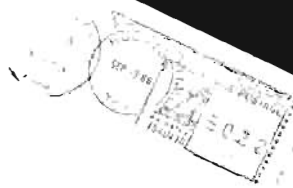
We may arrange for some selected mutual collaborations in the future, especially communications in the philosophy of science, if you feel it is worthwhile spending a lot of time and effort in translating back and forth from Spanish into English and vice-versa.

For the time being, I am gratefully anticipating your response.

Ileana Marculesco
Ileana Marculesco, Editor

1421 Branard St Houston Texas 77006 (713) 79-1440

Julio Mendoza Alvarez
ELEMENTOS
Instituto de Ciencias de la UAP
Avila Camacho No. 219
Puebla, Pue. MEXICO



A.H. Cuautla, Mor., a 20 de Agosto de 1986.

Estimado Señor:

Espero que al recibir la presente, gocen de buena salud.

Soy estudiante de la Preparatoria "Cuautla" (UAEM), la razón por la que le escribo es

saber que hay que hacer para suscribirse a la revista ELEMENTOS y cuanto cueste.

En la suscripción y durante cuanto tiempo, favor de informarme sobre ello, gracias.

Atte.

Tomas Ramirez Carino
Tomas Ramirez Carino

Tomas Ramirez Carino
Calle de Piedra #73
Gabriel Tepepa
Puebla, Morelos
P. 62742



Revista ELEMENTOS
Instituto de Ciencias de la UAP
Maximino Avila Camacho
No. 219, C.P. 72000
Puebla, Pue.