

**Las simetrías en partículas elementales podrían conducirnos a la unificación de las interacciones**

# La búsqueda de la superfuerza (Supergravedad)

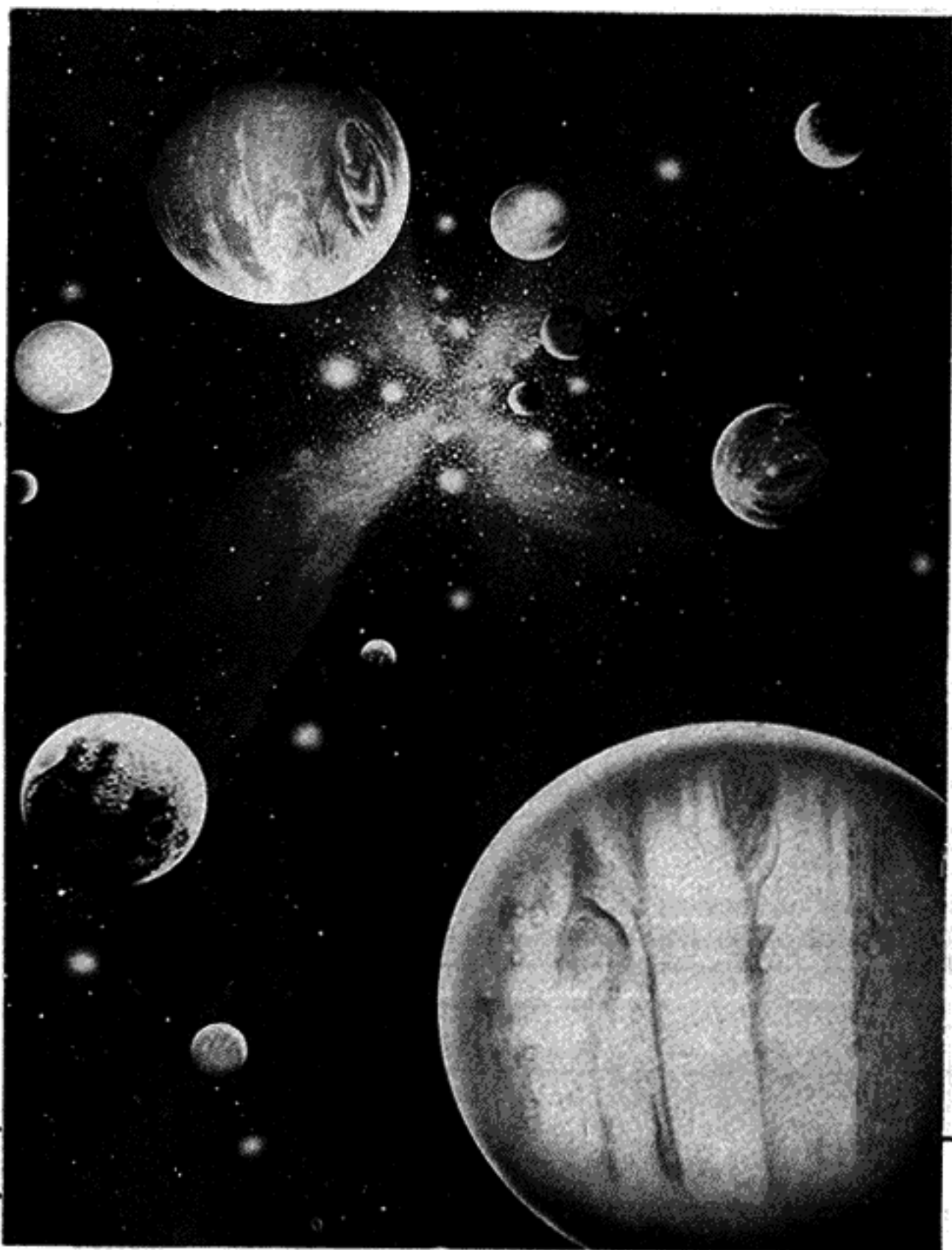
ANTONIO SARMIENTO\*

**L**a teoría general de la relatividad, debida principalmente a Einstein, ha sido considerada recientemente como una mera aproximación al tratamiento de la gravitación. La razón para ello estriba en la incompatibilidad que existe entre dicha teoría y el otro gran logro de la física de nuestro siglo: la mecánica cuántica. Los intentos para encontrar una descripción teórica que unifique ambas teorías, se han visto frustrados durante décadas por problemas conceptuales desanimantes e intrincadas dificultades técnicas.

Sin embargo, recientemente ha surgido un esquema alentador conocido con el nombre de supergravedad, que intenta describir el más familiar de los campos, el campo gravitacional, como una componente más de una red muy elaborada de fuerzas y campos.

Un sentimiento algo común entre los físicos de nuestros días es el de creer que nos encontramos en vísperas de dos sucesos sensacionales: el descubrimiento de dos bloques fundamentales, que unidos de varias formas, originan las partículas subatómicas y el descubrimiento de una nueva superfuerza que unifique todas las fuerzas conocidas de la naturaleza en un solo mecanismo responsable de la unión

\* Investigador del Instituto de Astronomía, UNAM.



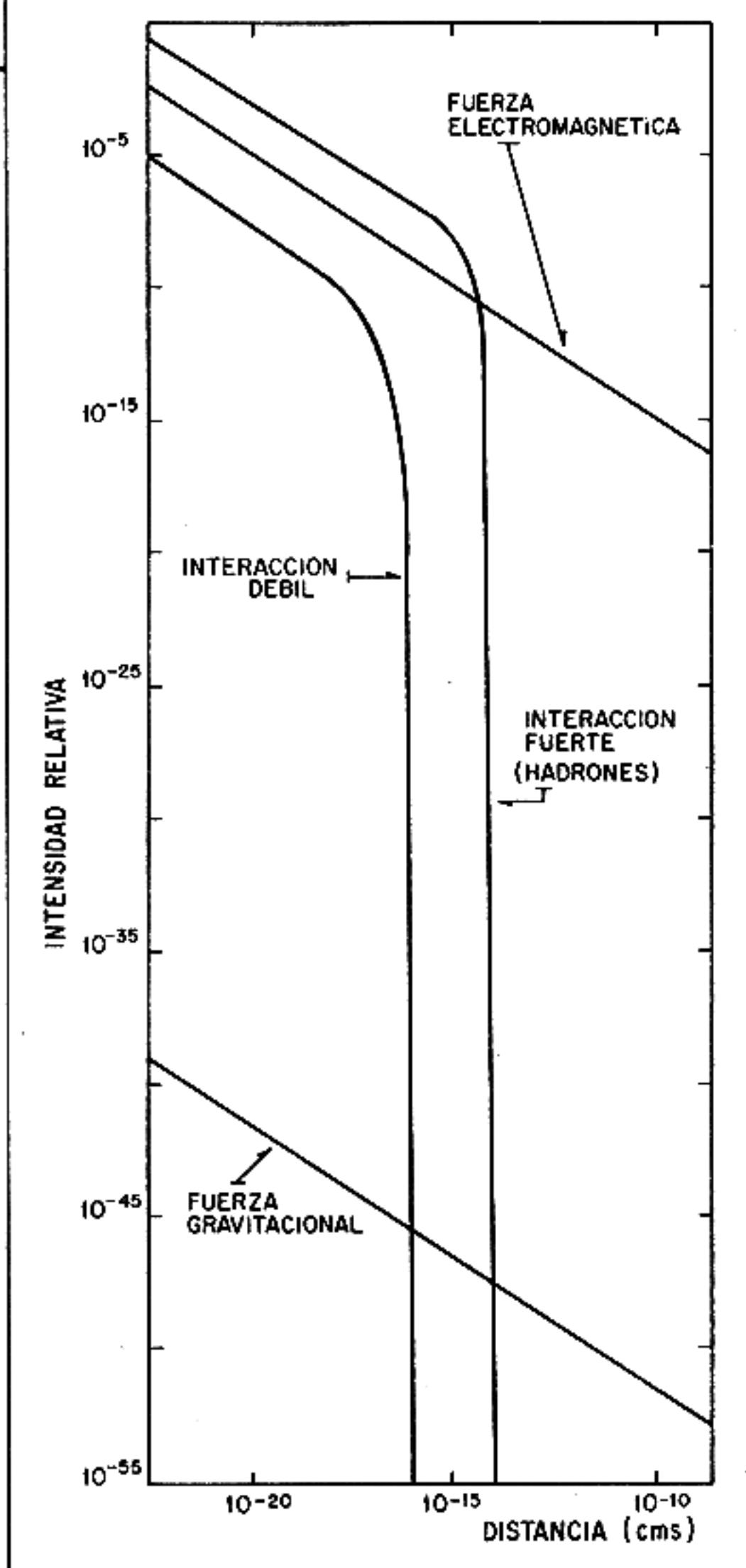
entre los bloques fundamentales. Si contásemos con una teoría de tales fenómenos, tendríamos una explicación total sobre la manera en que está estructurado el universo físico y sobre cuál es su funcionamiento, —la culminación de la ciencia fundamental de acuerdo a algunos científicos.

Un intrigante arreglo de fragmentos brota cuando las partículas nucleares chocan entre sí a enormes energías, estos fragmentos se desintegran en formas más estables después de fracciones de tiempo increíblemente diminutas, mucho menores que un segundo. Al analizar cuidadosamente dichos fragmentos se descubren docenas de especies distintas de partículas que contrastan con las pocas formas estables de que está compuesta la materia ordinaria. La tarea requerida es la de organizar estas diversas especies en un patrón significativo y entender las relaciones entre ellas. ¿Cuál es su función? ¿Por qué necesita la naturaleza tantas especies?

Las partículas subnucleares interactúan de formas complejas pero, afortunadamente, las fuerzas involucradas en dichas interacciones pueden organizarse en cuatro tipos básicos que, en orden de poder relativo creciente, son: gravitacionales, nucleares débiles, electromagnéticas y nucleares fuertes (Ver Tabla).

Las fuerzas gravitacionales y electromagnéticas son familiares en la vida diaria mientras que el campo de acción de las fuerzas nucleares se restringe a las dimensiones subatómicas: la interacción fuerte mantiene a los núcleos unidos y la interacción débil controla procesos como la emisión de electrones por núcleos radiactivos (decaimiento beta). En principio, estas cuatro fuerzas deberían explicar la estructura interna y la organización de toda la materia. Uno de los avances más excitantes de la década pasada fue el desarrollo de esquemas que parecen combinar las fuerzas nucleares con el electromagnetismo (Teorías de Gran Unificación), esto significa que en lugar de las cuatro fuerzas tradicionales tendremos que analizar sólo dos tipos de fuerzas: la fuerza nucleo-electromagnética y la fuerza gravitacional. Pero, ¿acaso no resulta intrigante que la gravedad quede aislada de esta manera?

Quizá la gravedad, la primer fuerza que se modeló matemáticamente y sin embargo la más misteriosa de la naturaleza, no pueda unificarse con las demás sino sólo



**Fig. 1** Cuatro fuerzas básicas regulan todas las interacciones conocidas entre las partículas materiales. A pesar de sus diferencias en intensidad y rango de acción, las cuatro fuerzas describen mediante teorías de igual forma matemática; las teorías de norma local. En teoría cuántica de campo la fuerza entre dos partículas se manifiesta a través del intercambio de una tercer partícula llamada virtual. La masa de esta partícula virtual determina el rango de acción de la fuerza. Las partículas virtuales sin masa, como el fotón y el gravitón originan fuerzas con un rango de acción infinito.

Fuerza	Intensidad Relativa	Alcance	Partículas sobre las que actúa	Partículas Mensajeras	Masa de las partículas mensajeras	Espin de las partículas mensajeras	Naturaleza	Función
Nuclear fuerte	1	corto	cuarks	gluones piones	?	1	Repulsiva	Unir núcleos
Electromagnética	$10^{-2}$	largo	partículas cargadas	fotones	0	1	Repulsiva	Fenómenos Electromagnéticos
Nuclear débil	$10^{-5}$	corto	electrones neutrinos cuarks	bosones vectoriales intermedios	80-100 GeV	1	Repulsiva	Fenómenos como decaimiento
Gravitacional	$10^{-39}$	largo	todas	gravitones	0	2	Atractiva	Caídas y estructura del Universo

TABLA I. CARACTER INDIVIDUAL DE LAS CUATRO FUERZAS CONOCIDAS EN LA NATURALEZA

a través de una superfuerza —una simple interacción básica que pueda describir todos los procesos conocidos.

El confirmar qué tan correctas son estas ideas adquiere una importancia vital para el conocimiento de las condiciones imperantes en el universo desde su origen, condiciones que nos permiten intentar una descripción de su evolución. De acuerdo a la representación cosmológica aceptada hoy en día, poco después de la Gran Explosión la temperatura del universo era lo suficientemente alta como para pensar en la existencia de un solo tipo de fuerza. Al expandirse el universo con el transcurrir del tiempo y disminuir su temperatura, todas las fuerzas conocidas, empezando por la gravedad se fueron desacoplando una a una y adquirieron el carácter individual que exhiben en el presente. Este proceso puede verse de manera análoga a la forma en que ocurren los cambios de fase gas — líquido — sólido al disminuir la temperatura. De manera que, validez de por medio, mientras no logremos someter a la gravitación a los esquemas unificadores, no podremos empezar a formarnos una idea de las condiciones existentes en el universo antes de que la gravedad se desacoplara de las demás fuerzas conocidas. El papel de las diferentes fuerzas en la evolución del universo constituye un tema que escapa a la intención original de este trabajo y que, consecuentemente, no será tratado más ampliamente.

### UNIFICACION Y SIMETRIA

La ambiciosa tarea de combinar todas las interacciones está siendo desarrollada por un ejército de teóricos que utilizan técnicas fascinantes. Un concepto central en el programa de unificación es el de

simetría, cualidad que observamos en la naturaleza desde los copos de nieve hasta la estructura de la Vía Láctea. La simetría, concepto que ha jugado un papel importante en las normas decorativas de muchas culturas, es la cualidad de algunos objetos que, en pocas palabras, les permite mantener su forma ó su diseño bajo ciertos movimientos.

Las simetrías geométricas como las que caracterizan formas simples, círculos o cuadrados, sobresalen al verlas. Existen también otras simetrías, de naturaleza no geométrica y por ello no tan obvias, que resultan mucho muy útiles: las simetrías entre frío y caliente, entre las cargas eléctricas positiva y negativa, entre los polos magnéticos norte y sur. —simetrías abstrac-

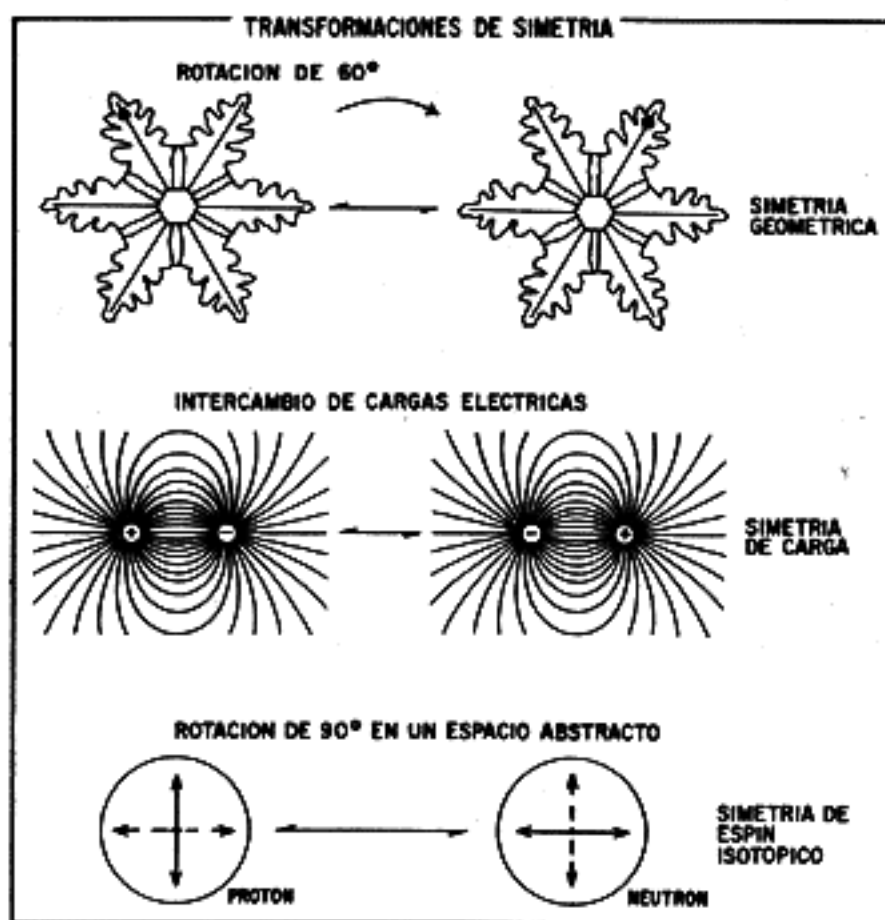
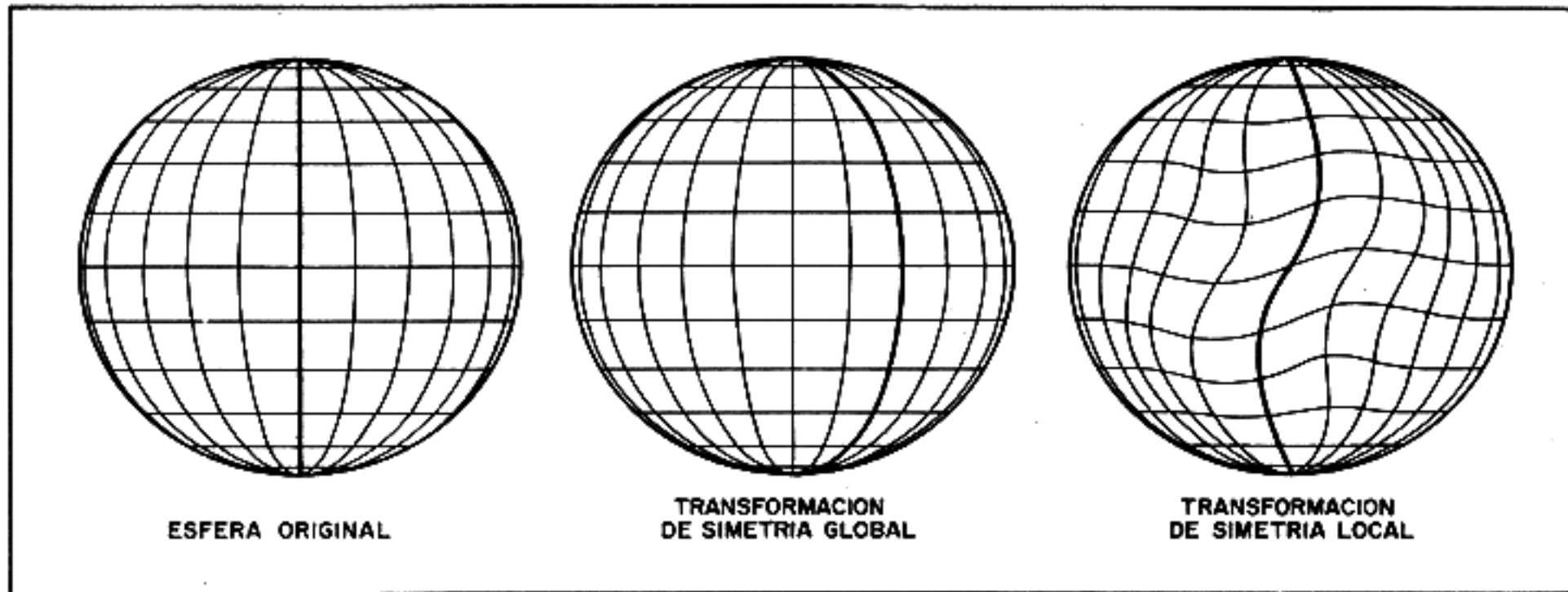


Fig. 2 Las simetrías de la naturaleza determinan las propiedades de las fuerzas en las teorías de norma. La forma de un copo de nieve permanece invariante al girar el copo  $60^\circ$ . En Física se trabaja con simetrías no geométricas: la invariancia de las fuerzas entre un conjunto de partículas cargadas cuando las polaridades de todas ellas se invierten, se conoce como simetría de carga. La simetría de espín isotópico es la invariancia de las interacciones fuertes bajo el intercambio de protones y neutrones, ambas partículas son dos estados alternativos de una sola superpartícula y las transiciones entre los estados se pueden imaginar como el ajuste de la orientación de un indicador en un espacio interno. A las simetrías de esta última clase, donde la transformación es una rotación interna o un corrimiento en la fase, se les conoce como simetrías de normas.



**Fig. 3** Simetrías locales y globales. Consideramos un globo perfectamente esférico marcado con un sistema de coordenadas que nos permite identificar todos los puntos en la superficie. Al girar el globo sobre un eje, la forma permanece invariante y la simetría correspondiente es global pues las posiciones de todos los puntos en la superficie cambian por el mismo desplazamiento angular. La simetría local requiere que el globo mantenga su forma aun si los puntos en la superficie se mueven independientemente. Nótese que la deformación de la superficie que resulta de dicho movimiento, introduce fuerzas entre los puntos. Se piensa que cada una de las cuatro fuerzas en la naturaleza se origina al requerir que alguna ley de la naturaleza permanezca invariante bajo transformación de simetría local.

tas cuya función esencial es la de proporcionar una relación simple entre entidades físicamente distintas, conceptos que constituyen un lenguaje unificado para la descripción de cosas diferentes mediante el uso de un solo esquema. Recientemente se han descubierto simetrías muy sutiles en los nichos más profundos de la materia y se les ha utilizado en la construcción de una descripción de las partículas y fuerzas fundamentales con la que se ha logrado cierta simplicidad y orden en el estudio de las prolíficas especies subnucleares. En la física, lo que permanece invariante no es un dibujo o un objeto, es el esquema matemático de la teoría que nos permite la descripción de las partículas y de las fuerzas que rigen sus interacciones.

Existen dos tipos de simetría, las simetrías que resultan de la aplicación de una transformación uniforme a todos los constituyentes de un objeto (globales) y aquellas en las que la transformación que las origina es distinto para cada una de las partículas del objeto (locales). Si bien, una simetría global donde la transformación es la misma para todos los puntos de un cuerpo, puede parecer un concepto más amplio, las simetrías locales en donde cada punto se transforma independientemente, imponen exigencias más estrictas en las teorías y revelan uniones más profundas en la naturaleza. Un ejemplo debido a Freedman y Van Nieuwenhuizen aclara esta afirmación. Un globo esférico al que se gira cierto ángulo alrededor de un eje que pase por su centro, preserva su forma esférica y como todos los puntos de su superficie se han transformado de la misma manera (han rotado un mismo ángulo), se tiene entonces una simetría global. Sin embar-

go, moviendo independientemente cada uno de los puntos en la superficie del globo de manera que permanezcan sobre dicha superficie, es decir, que sus distancias al centro de la esfera permanezcan fijas para que la forma esférica se mantenga, estamos originando una simetría local. En este caso, la superficie del globo se arrugará en algunas regiones y se estirará en otras dando origen a fuerzas que tratarán de restituir a la superficie a su estado original. Estas fuerzas aparecen de una manera idéntica cuando una teoría física posee una simetría local: el paso de una simetría global a otra local puede usarse para describir el origen de las fuerzas gravitacionales y electromagnéticas.

Existen razones para sospechar que las demás fuerzas surgen también de simetrías locales pues mediante la aplicación de simetrías abstractas a las partículas subatómicas se ha logrado el reconocimiento de ciertos patrones que no son de manera alguna obvios. Un ejemplo sencillo es el del protón y el neutrón, los constituyentes de todos los núcleos atómicos: superficialmente se trata de dos partículas distintas— el protón está cargado eléctricamente mientras que el neutrón no sólo no tiene carga sino que es ligeramente más pesado; sin embargo, en muchos procesos nucleares ambas partículas se comportan de manera idéntica y la carga del protón actúa únicamente como una etiqueta y no como un atributo físico adicional. Es posible entonces considerar a ambos, neutrón y protón, como dos estados del mismo objeto básico y pensarlos relacionados por una simetría abstracta similar a aquella que existe entre polo norte y polo sur.

De esta manera se ha logrado agrupar a legiones enteras de especies subnucleares en familias, representando cada familia esencialmente un solo tipo de objeto que posee varias facetas distintas. Se necesitan simetrías mucho más complejas, que involucren muchas componentes, para identificar estas agrupaciones más elaboradas; aun así, la técnica ha rendido altos dividendos al extender nuestra comprensión del mundo subnuclear.

Desde que fueron reconocidas como tales, las partículas subatómicas se habían dividido en dos grupos completamente distintos: los fermiones y los bosones. Las partículas como los electrones poseen una propiedad crucial que afecta drásticamente su comportamiento colectivo: dos electrones idénticos, i. e. dos electrones con las mismas características cuánticas (incluyendo la orientación), no pueden moverse en la misma órbita alrededor de un único átomo. Esta exclusividad, formulada como un principio de la física por Wolfgang Pauli, opera en forma de repulsión: cuando se intenta aglutinar electrones, se manifiesta una poderosa resistencia a ello.



La tendencia de los electrones a evitarse entre ellos y buscar la soledad es la responsable de la estructura difusa de los átomos, obliga a los electrones a apilarse alrededor del núcleo en órbitas progresivamente más alejadas, tal y como se acumulan aeronaves sobre un aeropuerto en espera de pista para aterrizar.

Las partículas que obedecen el principio de exclusión de Pauli se conocen por el nombre colectivo de fermiones (en honor de Enrico Fermi quien sentó las bases de su comportamiento estadístico); en este grupo se encuentran también los protones y los neutrones. Una característica de estos fermiones es que se encuentran girando de una manera similar a como la tierra gira sobre su propio eje y que además, dicho movimiento permanece siempre constante —una unidad fundamental fija llamada espín. Usualmente, al espín del electrón se le asigna el valor  $1/2$ .

Existen también otras partículas que no giran sobre su propio eje, no obedecen al principio de exclusión y pueden ser aglutinadas sin resistencia; los mesones son un ejemplo de tales partículas. Su comportamiento colectivo es muy distinto del de los fermiones y se les conoce con el nombre de bosones (en honor de Satyendra Bose por razones similares al nombre de los fermiones). Algunas otras partículas como los fotones, tienen también espín pero este es el doble del de los electrones; en general, las partículas con múltiplos pares de espín (valores enteros) son también bosones mientras que aquellas partículas con múltiplos impares de espín (valores semienteros) son fermiones.

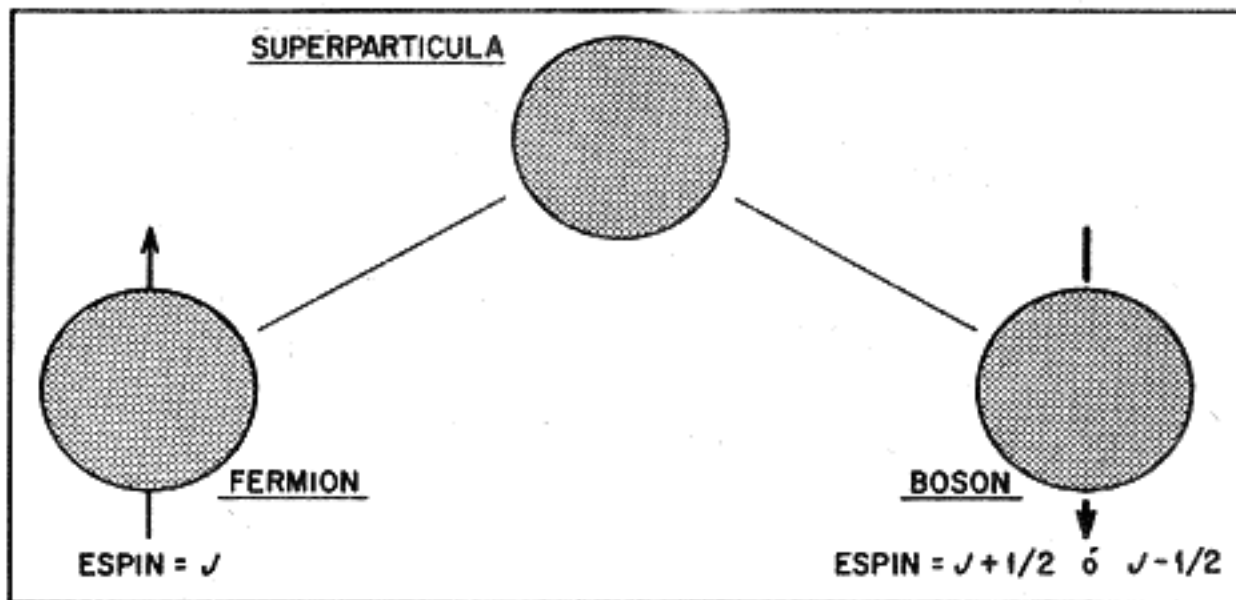


Fig. 4 La supersimetría relaciona partículas cuyos espines son adyacentes, i.e. difieren por  $1/2$ , de aquí que cualquier fermión y bosón cuyos espines son adyacentes se consideren como manifestaciones alternativas de una sola "superpartícula" con un indicador (flecha) en un espacio auxiliar.

La cantidad de espín presente en cada partícula es crucial para el tipo de matemáticas utilizadas en su descripción: los bosones muestran ciertas simetrías que son muy distintas de las simetrías que muestran los fermiones, razón por la cual se les había considerado como dos grupos distintos y ajenos. No obstante, a principios de los años 70 un número de físicos teóricos descubrieron independientemente una simetría matemática sutil que relaciona a los dos grupos que hasta entonces se consideraban dispares. Tal y como una reflexión en el espejo cambia a una mano derecha en izquierda, una clase de reflexión abstracta cambia a un fermión en un bosón. Esta poderosa simetría se conoce hoy día con el nombre de supersimetría.

La operación de supersimetría, al igual que las otras simetrías abstractas, es únicamente un aparato conceptual, no es

posible cambiar real o físicamente a un fermión en bosón, como tampoco lo es el cambiar un protón en un neutrón. Lo que se logra mediante el concepto de supersimetría es la construcción de un lenguaje matemático unificado que describirá el comportamiento de estos dos diferentes tipos de partículas usando un solo esquema.

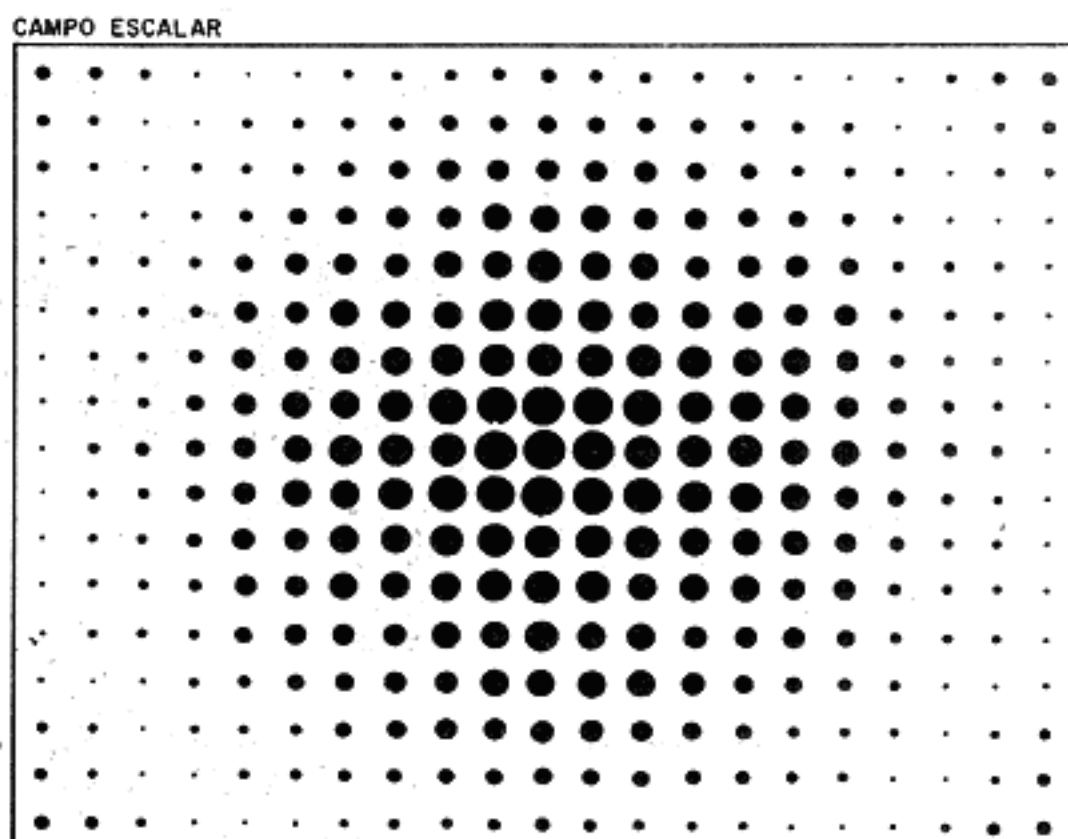
#### UNIFICACION E INTERACCION

El concepto de supersimetría constituye una herramienta que podría capacitarnos para unificar a la gravedad con las demás fuerzas de la naturaleza y simultáneamente descubrir la superfamilia final que contendría a todas las partículas subatómicas, un logro doble que resolvería de una buena vez el problema de la constitución del mundo material. La clave para lograr tal ambición se encuentra en el hecho de que en el dominio subatómico las partículas actúan como portadoras de las fuerzas.

Dos partículas interactúan mediante el intercambio de partículas mensajeras de forma análoga a dos jugadores de tenis que interactúan mediante el intercambio de pelotas. Las fuerzas fundamentales son entonces inseparables de la naturaleza de las partículas materiales mismas; se encuentra un esquema de agrupación que incluya a las partículas mensajeras de todas las fuerzas en la naturaleza, entonces la simetría asociada con dicho esquema proveerá una descripción unificada de todas las fuerzas.

Para poder incorporar a la gravedad en el esquema unificador será entonces necesario describir a la fuerza gravitacional en términos del intercambio de partículas mensajeras; si bien no encontramos en la vida diaria partículas de fuerza gravitacional, ni partículas de fuerza electromagnética, en el dominio atómico se vuelve manifiesta la naturaleza de dichas fuerzas. La fuerza electromagnética mues-

Fig. 5 El concepto de campo, una o varias cantidades definidas en cada punto del espacio-tiempo, puede representarse en teoría cuántica de campo por medio de las partículas virtuales. Para el caso de un campo escalar, que se define por una sola cantidad en cada punto (cuya intensidad es proporcional al área de los discos de la figura), se puede pensar en una partícula virtual con una sola orientación o espín cero. Las tres componentes (una magnitud y dos ángulos) de un campo vectorial en el espacio tridimensional se pueden representar mediante una partícula virtual con tres posibles orientaciones o espín uno.



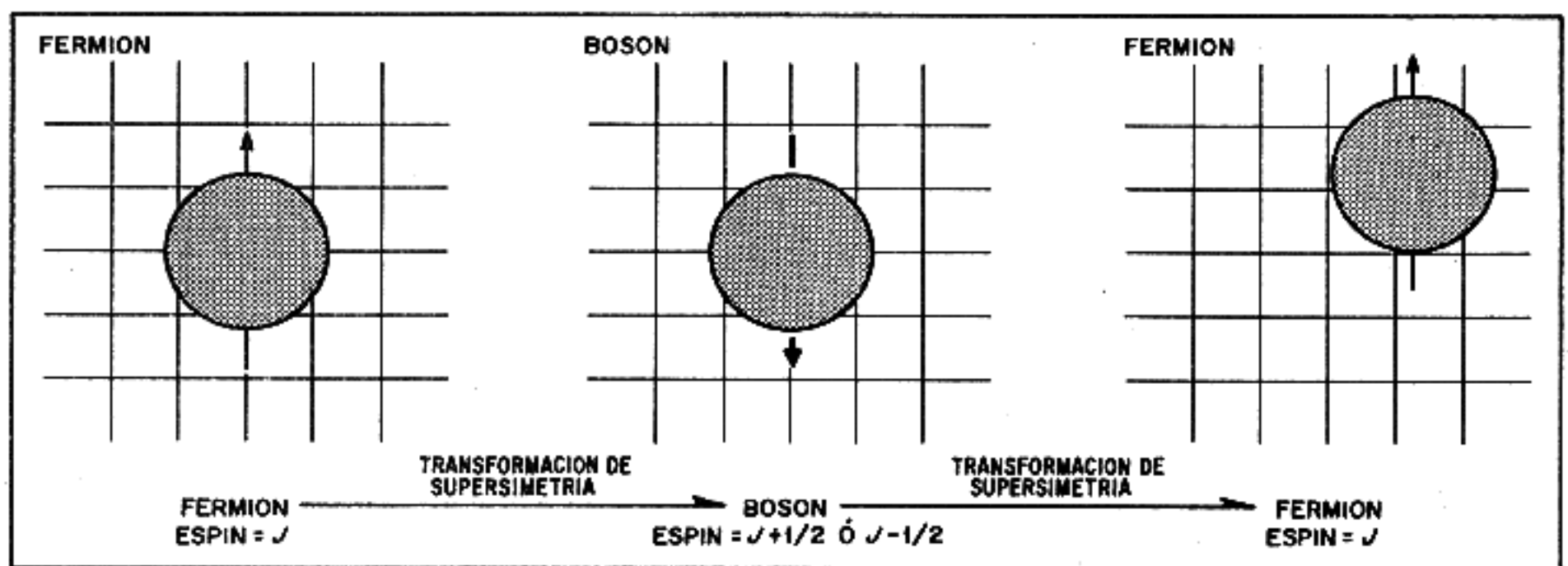
tra su comportamiento corpuscular a través del fotón, la interacción fuerte lo hace a través de mesones  $\pi$ , la interacción débil mediante bosones vectoriales intermedios y, de la misma manera, la fuerza gravitacional se asocia con una nueva clase de partícula: el gravitón (ver Tabla). Esta partícula, todavía no detectada pero requerida por los esquemas actuales que intentan representar a la física como un todo unitario, jugaría en la gravitación el mismo papel que el fotón juega en el electromagnetismo, que los mesones  $\pi$  juegan en la interacción fuerte y que los bosones vectoriales juegan en la interacción débil.

Con la ayuda de las matemáticas podemos explorar las propiedades de estos aún no detectados gravitones. Al hacerlo encontramos que los gravitones deberían

el hecho de que el gravitón deba carecer de masa explica el rango de acción de la atracción gravitacional, ya que se puede probar que las fuerzas de largo alcance provienen del intercambio de partículas sin masa, mientras que las de corto alcance se originan del intercambio de partículas con masa. Pero ¿a qué familia deberán pertenecer los gravitones? ¿Podrán relacionarse con otras partículas a través de una simetría abstracta de la misma manera que los neutrones están relacionados con los protones? Es aquí donde interviene el concepto de supersimetría; se han encontrado varios esquemas que combinan al gravitón con otras partículas y que precisamente se distinguen por el hecho de requerir que ambos, fermiones y bosones, pertenezcan a esta nueva superfamilia. Mediante la transformación de supersimetría podemos asociarle a cada fermión

Este esquema teórico recibe el nombre de *supergravidad* y el reto central al que se enfrenta es el de identificar la simetría abstracta particular que utiliza la naturaleza para unificar al gravitón con todas las otras partículas. Las matemáticas utilizadas permiten varias posibles elecciones, pero ¿cuál, si existe, es la simetría correcta?

La elección más promisoría requiere de la existencia de ocho gravitinos, veintiocho partículas con espín doble, cincuenta y seis con espín unitario y no menos de setenta partículas sin espín. ¿Pueden identificarse todos estos nuevos miembros de la familia del gravitón con todos los otros fragmentos de materia que se han descubierto? En particular, ¿cabén en la nueva familia el fotón y los mensajeros de las fuerzas nucleares?

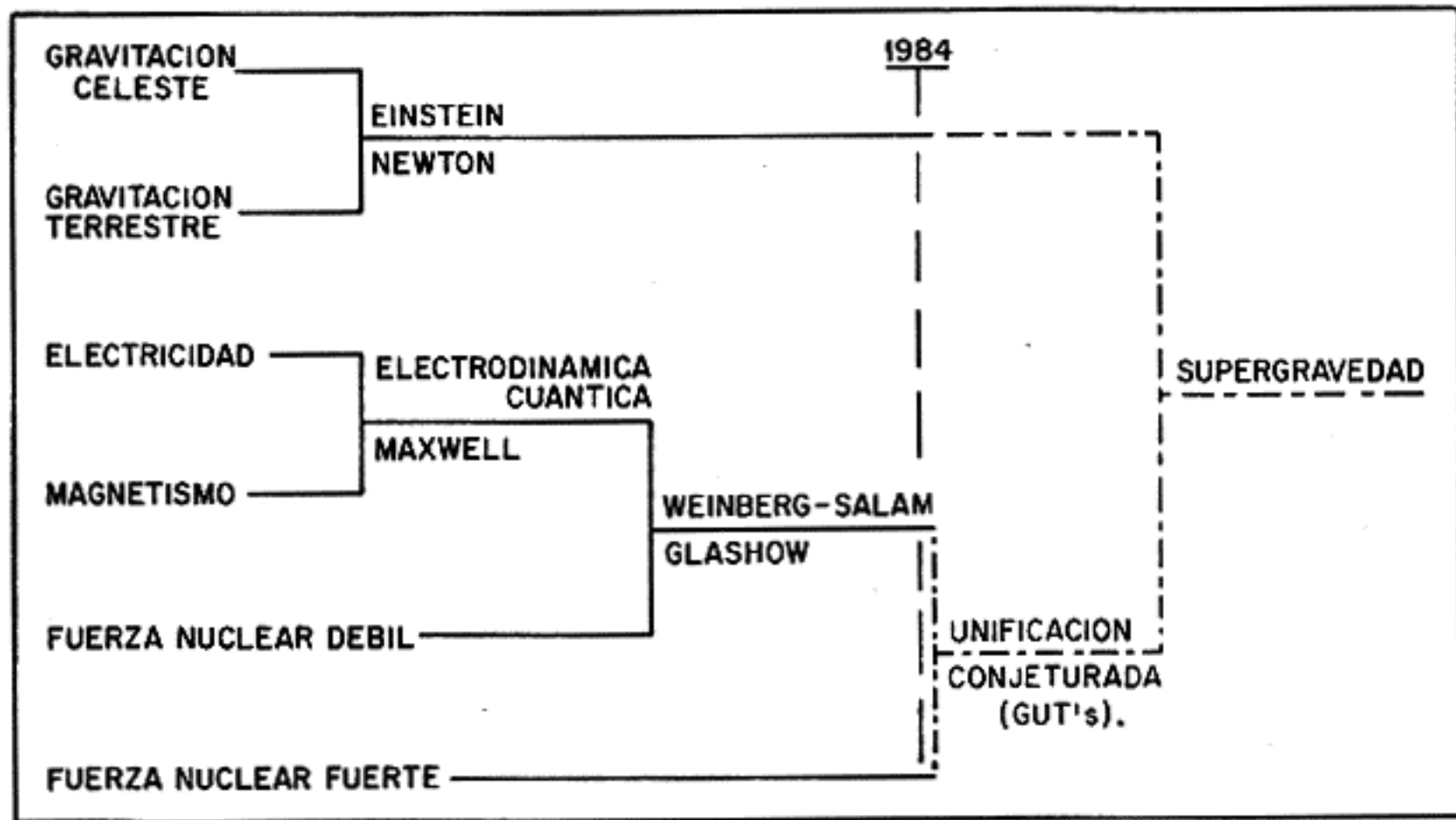


**Fig. 6** El repetir una transformación de supersimetría como la indicada (fermión  $\rightarrow$  bosón  $\rightarrow$  fermión) mueve a la partícula de un punto en el espacio a otro distinto. Si la supersimetría es local, el desplazamiento puede ser diferente para cada punto del espacio. Esta relación entre supersimetría y la estructura del espacio-tiempo da origen a la fuerza gravitacional en teoría cuántica de campo.

ser bosones, poseer un espín de cuatro veces la unidad, carecer de masa, y que deberían viajar a la misma velocidad que los fotones, la velocidad de la luz. De hecho, se puede demostrar que el intercambio de bosones con valores enteros impares de espín origina fuerzas repulsivas entre las partículas. De aquí que el hecho de que el gravitón deba tener el doble del espín que el fotón, sirva para explicar la diferencia entre los dos tipos de interacción: dos cargas del mismo signo se repelen mutuamente en electromagnetismo pues interactúan a través de partículas cuyo espín tiene el valor 1, mientras que dos cuerpos con masa (del único signo conocido) se atraen al interactuar gravitacionalmente pues intercambian partículas con valor 2 para el espín. También

un bosón de espín contiguo, es decir, la operación transforma a un fermión con espín  $J$  en un bosón cuyo espín puede tener uno de dos valores:  $J + 1/2$  ó  $J - 1/2$ . Además, al pedir que la supersimetría global se extienda a invariancia local, aparece de manera natural una nueva fuerza que deberá representarse mediante partículas mensajeras cuyo espín deberá tener un valor que diferirá del espín del gravitón en  $1/2$ . De esta manera, un fermión llamado gravitino debería introducirse para jugar el papel de la contraparte del gravitón y redondear la teoría. El gravitino debería tener la poco usual propiedad de poseer un espín de tres veces la unidad y su descubrimiento representaría un poderoso apoyo en favor de las ideas mencionadas.

Un análisis superficial sugiere que esta particular versión de supergravidad es sólo parcialmente correcta. De acuerdo al pensamiento actual, la superfamilia no es lo suficientemente grande como para acomodar todos los esperados bloques constituyentes de la materia, bloques cuya detección no se ha logrado aún para todos ellos pero cuya aparición se considera sólo una cuestión de tiempo. Esto último se debe a los grandes éxitos logrados recientemente en la detección de las partículas mensajeras involucradas en la teoría que unifica las interacciones débiles y las electromagnéticas (las 3 partículas mensajeras llamadas bosones vectoriales intermedios fueron descubiertas en 1983 y comunicadas mediante artículos que firman 137 autores).



**Fig. 7** Historia sobre las teorías sobre las interacciones de la naturaleza. Supergravedad es una teoría desarrollada en la segunda mitad de la década de los setenta, que describe la gravitación dentro de una teoría cuántica de campo. La teoría de supergravedad no ha sido aún confrontada con resultados experimentales.

### PARTICULARIDADES DEL ESQUEMA TEORICO

Mientras esperamos que el difícil y penoso trabajo de llevar a la teoría a un contacto mayor con el experimento empiece a dar algunos frutos, podemos continuar colectando evidencia que apoye o vuelva inaceptable la idea de supergravedad. (La espera puede resultar larga pues las energías involucradas en el siguiente paso, las teorías de Gran Unificación que no contemplan incluir a la gravitación, sino sólo a la interacción nuclear fuerte, son del orden de  $10^{13}$  veces mayores que la capacidad disponible actualmente en el supersincrotrón más poderoso).

Uno de tales segmentos de evidencia involucra a los gravitinos. Intentos previos para introducir el concepto de partículas con tres unidades de espín habían encontrado serios problemas. Cálculos elementales indicaban que las fuerzas entre ellos podían viajar más rápido que la luz contraviniendo la teoría especial de la relatividad. En las teorías actuales de supergravedad no se encuentra este indeseable problema.

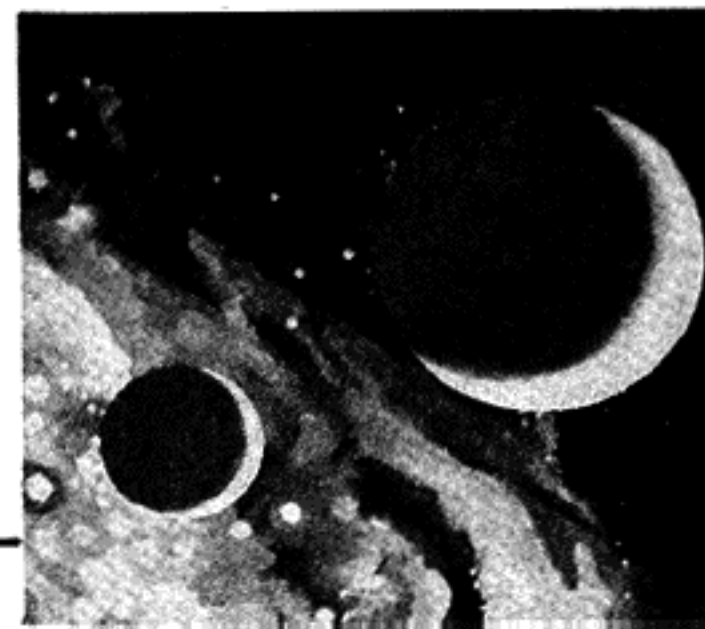
Otro signo alentador en el frente técnico está relacionado con una enfermedad que plaga todo el trabajo teórico moderno en procesos subatómicos: antes de poder hacer alguna predicción las teorías deben sobrepasar un enorme obstáculo, el hecho de que en todos los procesos investigados (excepto los simples), los

cálculos divergen dando infinitos, es decir, respuestas sin sentido. Algunos físicos, mediante sagaces manipulaciones matemáticas, han diseñado técnicas que en algunos casos, pero no siempre, evitan la aparición de estas divergencias. La experiencia de la última década sugiere que, mientras mayor sea el grado de simetría abstracta en la teoría, mayor será la facilidad para evitar las divergencias destructivas.

Un ejemplo clásico lo constituye la interacción nuclear débil, interacción que al estudiarse de manera aislada no puede entenderse debido a que su descripción matemática se encuentra contaminada de inevitables divergencias. Sin embargo, al final de la década de los 60 y de manera un tanto independiente, Abdus Salam y Steven Weinberg, lograron unificar la fuerza nuclear débil con la fuerza electromagnética, esta última mucho más simétrica que la primera. Con el grado adicional de simetría, la teoría que describe la combinada fuerza electromagnético débil queda libre de divergencias. El decaimiento débil de núcleos atómicos involucra el cambio de neutrones en protones (o viceversa) con la creación de un electrón y un antineutrino (o sus antipartículas) que balancean el cambio en la carga eléctrica. La interacción se realiza a través de partículas mensajeras, los mencionados bosones vectoriales intermedios cargados denotado por  $W^+/W^-$  dependiendo del signo de la carga). Existen también otras interacciones en la teoría incorporadas por Sheldon Glashow que explican el cambio

de protones en protones, electrones en electrones, etc. y que se conocen con el nombre de Corrientes Neutras; éstas se llevan a cabo mediante el intercambio de un bosón vectorial intermedio neutro denotado por  $Z$ ). Todos los bosones vectoriales intermedios son extremadamente inestables y decaen casi inmediatamente.

En forma similar al caso de la interacción débil, al estudiar a la gravedad de manera aislada brotan divergencias que sólo han permitido la realización de muy pocos cálculos de interés; nadie ha encontrado hasta ahora la manera de evitar dichas divergencias. Se espera que, con la simetría extra que posee supergravedad, se repita el éxito de la teoría de Salam-Weinberg. Parece prematuro tomar una decisión a este respecto. Mencionaremos sin embargo que varios cálculos irrealizables por las divergencias presentes en la gravedad aislada han sido realizados con éxito dentro de supergravedad, proporcionando resultados finitos.



## EPILOGO

En la relatividad general la atracción gravitacional se deriva de las propiedades geométricas del espaciotiempo, mientras que en la teoría cuántica las fuerzas se originan mediante el intercambio de partículas mensajeras. Existen, pues, dos formas distintas de intentar la unificación de las dos teorías. Una es describir a la relatividad general con el lenguaje cuántico de campos y pensar a la interacción gravitacional en términos de partículas, la teoría expuesta en las líneas precedentes y llamada supergravedad. La otra sería pensar a ambas teorías en términos geométricos, el conceptualizar superes-

pacios con propiedades que nos dijese cómo se realizan las interacciones. Pocos intentos se han hecho en este campo y consecuentemente la literatura sobre el tema es comparativamente escasa.

Hasta hoy día la supergravedad es una tarea tenuemente percibida —un audaz intento de resolver de un solo golpe muchos de los problemas más importantes de la física fundamental moderna. Si resulta exitoso el intento, cosa que sólo con el tiempo sabremos, ¿significará esto que los físicos habrán terminado con su tarea y ya no tendrán qué hacer? Este punto de vista, en el que la teoría sería considerada

como un vivo reflejo de la realidad, conduce a preguntas fuera de la intención original de este trabajo y difiere fuertemente de la experiencia previa. Con sólo un vistazo encontramos que la Historia sugiere lo contrario: los grandes avances en nuestra comprensión del universo vienen usualmente acompañados de inmensas extensiones en el horizonte conceptual y por el surgimiento de nuevos tipos de problemas que reemplazan con creces a los viejos problemas resueltos. Más que llegar a convertirse en el fin del camino, la supergravedad bien podría significar el acceso a nuevos, mucho más ricos campos científicos. ⊕

## REFERENCIAS PARA LECTURAS COMPLEMENTARIAS

### *Sobre Supergravedad*

1. D. Z. Freedman y P. Van Nieuwenhuizen. Supergravity and the unification of the laws of Physics. *Scientific American*, February 1978, 126-143. Reimpreso en Investigación Científica, en español.
2. G. Hooft. Gauge Theories of the Forces between Elementary Particles. *Scientific American*, June 1980, 104-138.
3. S. Weinberg. Unified Theories of Elementary Particle Interaction. *Scientific American*, July 1974, 50-59.
4. S. Glashow. Quarks with color and flavor. *Scientific American*, October 1975, 38-50.
5. S. Deser and B. Zumino. Consistent Supergravity. *Physics Letters* 62B, 335-337, 1976.
6. D. Z. Freedman, P. Van Nieuwenhuizen and S. Ferrara. Progress toward a theory of supergravity. *Physical Review D*, 13, 3214-3218, 1976.
7. M. T. Grisaru, P. Van Nieuwenhuizen and J. A. M. Vermaseren. One-Loop renormalizability of pure supergravity and of Maxwell-Einstein theory in extended supergravity. *Physical Review Letters*, 37, 1662-1666, 1976.
8. J. Wess and J. Bagger. *Supersymmetry and Supergravity*. Princeton University Press. New Jersey, USA. 1983.

### *Sobre unificación de electromagnetismo e interacción nuclear débil*

1. E. Fermi. *Zeitschrift für Physik* 88, 161, 1934.
2. S. Weinberg. *Physical Review Letters*, 19, 1264, 1967.
3. S. Weinberg. *Lectures on Elementary Particles and Quantum Field Theory*. S. Deser, M. Grisaru and H. Pendleton eds. MIT Press, Cambridge, Mass. 1970.
4. A. Salam. *Weak and electromagnetic interactions, in Elementary Particle Physics*, N. Svartholm ed. Almquist and Wiksells, Stockholm. 1968, pág. 367.
5. S. Glashow. *Nuclear Physics* 22, 579, 1961.

### *Sobre el descubrimiento de los bosones vectoriales intermedios*

1. Electroweak interference confirmed. *Physics Today*, August 1982, 19-21.
2. PP collisions yield intermediate bosons at 80 GeV, as predicted. *Physics Today*, April 1983, 17-20.
3. Stalking the W particle. *Sky and Telescope*, May 1983, 406-407.
4. Proton Decay not seen at predicted rate. *Physics Today*, September 1983, 20.
5. Discovery of the Z<sup>0</sup> at CERN also yields anomalous events. *Physics Today*, November 1983, 17-19.

6. Z<sup>0</sup> particle discovered. *Sky and Telescope*, December 1983, 503-504.
7. G. Arnison et al. *Physics Letters*, 126B, 398 y 129B, 273, 1983.
8. P. Bagnaia et al. *Physics Letters*, 129B, 130, 1983.

### *Sobre Gravedad*

1. J. Schwarts and M. McGuinness. *Einstein for Beginners*. Writers and Readers Pub. Coop. London, 1979.
2. A. Sarmiento G. Gravitación. *Ciencias*, No. 5, Enero-Marzo 1984, 16-23.
3. S. Weinberg. *Gravitación and Cosmology*. J. Wiley & Sons, Inc., N. Y., 1972.
4. D. M. Greenberger and A. W. Overhauser. The Role of Gravity in Quantum Theory. *Scientific American*, May 1980, 66.

### *Sobre simetría y teoría de grupos*

1. A. B. Wolbarst. *Symmetry and Quantum Systems*. Van Nostrand Reinhold Co. N. Y. 1977.
2. K. Moriyasu. *An Elementary Primer for Gauge Theory*. World Scientific Pub. Co. 1984.

### AGRADECIMIENTOS

*Se agradece a Alberto García la adaptación de las figuras.*