

# Origen del Universo y Altas Energías

Modesto Montoya

**Ediciones CEPRECYT**

## **El autor**

Modesto Montoya, Magister en Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería, UNI (1975), Doctor de Tercer Ciclo (1977) y Doctor de Estado en Física Nuclear (1981) de la Universidad París XI, Francia, es profesor principal de la Facultad de Ciencias de la UNI y Director General de Promoción y Desarrollo Tecnológico del Instituto Peruano de Energía Nuclear. El Dr. Montoya es, además, fundador y director del Centro de Preparación para la Ciencia y Tecnología (CEPRECYT), Presidente de la Sociedad Peruana de Física (SOPERFI) y de la Sociedad Peruana de Ciencia y Tecnología (SOPECYT).

Su trabajo científico en el área nuclear lo desarrolló en la UNI, en la Comisión de Energía Atómica (CEA) y en el Centro Nacional de Investigación Científica (CNRS) de Francia, en el Centro de Estudios Nucleares de Jülich y el Instituto de Investigaciones Nucleares (GSI) de Darmstadt de Alemania, en el Instituto Carnegie-Mellon de EEUU y en el Instituto Peruano de Energía Nuclear. Su especialidad es la fisión nuclear y las interacciones de los neutrones con la materia con fines de aplicación.

Ha participado como expositor en numerosos eventos científicos en diversos países y publicado en revistas científicas internacionales. Es editor de la Revista Nuclear del Perú y de la Revista Peruana de Física y autor del libro "Tecnología Nuclear en el Perú".

*El origen del universo sigue siendo un tema que atrae a científicos y a todos los que quieren saber de dónde vienen y cuál es el futuro del universo. Estas interrogantes han originado una serie de investigaciones que ha permitido una mejor comprensión de la naturaleza.*

*Hoy se plantea teorías sobre la composición de la materia y sobre las fuerzas que la animan y organizan. Se cree que todo lo existente está compuesto de pequeñas partículas elementales y que entre ellas hay una sola interacción que las relaciona.*

*Los esfuerzos para establecer definitivamente cuáles son esas partículas y la interacción única que explican cómo funciona el universo están dando frutos parciales, pero hasta ahora no se logra una demostración convincente de las teorías existentes.*

*El reto es enorme y no es ajeno a las preocupaciones de instituciones andinas y peruanas dedicadas a la investigación en física.*

**Origen del Universo**  
**y**  
**Altas Energías**

**Modesto Montoya**

## **Origen del Universo y Altas Energías**

Primera edición, Abril 1994  
1 000 ejemplares  
©*Modesto Montoya*  
Lima, Perú

**Ediciones CEPRECYT**  
Centro de Preparación para la Ciencia y Tecnología  
Juan de la Fuente 541, Miraflores, Lima, Perú  
Teléfono 475713

**A mis padres**

## **Presentación**

El propósito de este libro es dar una idea sobre el desarrollo de la física de altas energías en el mundo y cómo este campo comienza a interesar a los países de América Latina, entre los cuales el Perú se pone en la lista.

El *primer capítulo*, como introducción, trata la relación del hombre con la ciencia, la que en los primeros tiempos se confundía con actividades llamadas mágicas, donde los hechiceros eran los depositarios del conocimiento y del poder. Luego se aborda algunos aspectos de la fe, que no es tratada en ciencias pero que constituye una forma de concebir el mundo y la vida.

En el *segundo capítulo* se muestra cómo se ha ido investigando sobre el origen del universo, de la vida y la forma en la que, gracias a las intensas y apasionadas investigaciones, el hombre va encontrando respuestas a sus innumerables interrogantes. Algunas de ellas son tan inesperadas que crean colapsos en las estructuras culturales construidas con siglos de experiencia y sobre la base del "sentido común". A fin de cuentas, el hombre aprende a ser cauto, cuidadoso y no tan cerrado en sus ideas sobre el universo y la vida. Después de todo, entiende que nuestro planeta es una pequeñísima parte del universo. Un universo inmenso que nació de la explosión de un punto: algo que aparentemente era minúsculo se convirtió en planetas, estrellas y galaxias.

El *tercer capítulo* incursiona sobre el campo que estudia la formación de las estrellas y las galaxias y las observaciones experimentales que han servido para comprender varias etapas de su formación.

En el *cuarto capítulo* se explica la forma en que los científicos investigan el mundo subnuclear, para saber de qué están compuestas las cosas. Ya desde el tiempo de los griegos se hablaba de los átomos. Hoy en día se habla de los quarks como unos de los componentes elementales de la materia, pero queda la interrogante sobre la eventual existencia de partículas que a su vez conforman los quarks.

El *quinto capítulo* habla sobre las interacciones entre las partículas y las teorías que intentan presentarlas como una sola, con diversas manifestaciones.

El *sexto capítulo* ingresa al mundo de los aceleradores, cuyas tallas ha ido creciendo a medida de que los investigadores han ido interesándose en las partes más elementales de la materia. Esas máquinas son capaces de acelerar partículas hasta alcanzar altos valores de energía y hacerlas colisionar concentrando energías en pequeños volúmenes. Esta energía concentrada da origen a una serie de otras partículas que dan explicación a las interacciones y a la estructura elemental de la materia. Se hace mención al freno en seco que el Congreso norteamericano ha aplicado a la construcción de un acelerador, el supercolisionador, que habría dado luz a una serie de interrogantes sobre la composición de la materia y de las interacciones existentes.

El *séptimo capítulo* ve los aspectos multidisciplinarios de la investigación sobre física de partículas, en las que también se consideran los efectos tecnológicos paralelos de este campo. Finalmente, el *octavo capítulo* echa un vistazo a los esfuerzos de los físicos andinos por ingresar en el campo de la física de partículas, que sólo podrán hacerlo en el marco de una cooperación internacional. En ese marco, algunos físicos peruanos han mostrado su interés por empezar el camino de las partículas. Para ello se inicia un proceso de preparación del potencial humano, que es finalmente el componente fundamental de toda ciencia.

Este libro trata, precisamente, de explicar la naturaleza y posibilidades del campo de la física de partículas elementales.

# Contenido

El autor .....	2
1. Introducción .....	9
1. La aventura de la ciencia .....	9
2. Tiempo de brujos .....	10
3. Cómo y no porqué.....	10
4. Cuestión de fe .....	11
5. Determinismo e indeterminismo .....	12
6. Camino sin fin .....	13
2. Origen del universo.....	13
1. Todo comenzó en un punto .....	13
2. El universo en expansión .....	14
3. La gran explosión .....	14
4. Los tres primeros minutos .....	14
1. Primer cuadro .....	14
2. Segundo cuadro .....	15
3. Tercer cuadro .....	15
4. Cuarto cuadro .....	15
5. Quinto cuadro .....	15
6. Sexto cuadro .....	16
5. Espacio abierto o cerrado .....	16
6. Radiación fósil en el fondo del cosmos.....	16
7. El equilibrio universal .....	17
8. Predicciones cumplidas .....	17
9. Reconstrucción del pasado .....	17
10. Ruptura del equilibrio y universo actual .....	17
11. El Big Bang en tela de juicio .....	18
12. Consagración del Big Bang .....	20
3. Las estrellas.....	20
1. Mirando el cielo .....	20
2. Rastros del pasado .....	20
3. La Vía Láctea .....	20
4. Nacimiento del Sistema Solar .....	21
5. Una vaga idea de la realidad .....	21
6. Las galaxias .....	22
7. Vida de las estrellas .....	22
8. Supernovas y agujeros negros .....	22
9. Las luces de la supernova 1987A .....	23
10. La secuencia principal.....	23
11. Más allá de la secuencia principal .....	23
12. Síntesis nuclear y cebolla cósmica .....	24
13. Explosión de una estrella .....	24
14. La supernova vista desde la Tierra .....	25
15. Fin de una estrella.....	25
16. Observación de la explosión .....	25
4. Búsqueda de materia y energía .....	26
1. Mundo atómico y nuclear .....	26
2. Los límites de la materia .....	27
3. Choques destructores .....	27
4. La energía concentrada .....	28
5. Radiación cósmica .....	29
6. Nuevas partículas .....	29
7. Los aceleradores de partículas .....	30
8. Proliferación de partículas .....	31

5. Las teorías de la unidad .....	32
1. Campos electromagnéticos y gravitacionales .....	32
2. Mensajeros de las fuerzas .....	33
3. Interacción nuclear o fuerte .....	34
4. Interacción electrodébil .....	34
5. Modelo Estándar .....	35
6. Teoría de gauge .....	36
7. Hacia la unificación total .....	36
6. Laboratorios de física de partículas .....	37
1. Aceleradores .....	37
2. Partículas en Estados Unidos .....	38
3. Anillos de almacenamiento .....	39
4. ¿Frustrado sueño de la Teoría Final? .....	39
5. El CERN .....	40
6. El colisionador electrón positrón LEP .....	41
7. Los detectores del LEP .....	41
8. Los cuatro grupos de experimentadores en el LEP .....	41
9. Mirando el futuro .....	42
10. Cazadores de neutrinos .....	42
11. Aceleradores y tecnología .....	42
7. Investigación interdisciplinaria .....	43
1. Cosmología y astrofísica .....	43
2. Rayos cósmicos .....	44
3. Física nuclear .....	44
4. Física atómica .....	44
5. Aceleradores .....	45
6. Superconductividad .....	46
7. Tecnologías de la física de partículas .....	46
8. Impulso tecnológico .....	46
9. Nuevas tecnologías .....	47
10. Potencial humano .....	48
8. Altas energías en los Andes .....	48
1. Física en los Andes .....	48
2. Perspectivas para la física en los Andes .....	49
3. Altas energías en Perú .....	50
4. Perspectivas para la física en el Perú .....	51
9. Bibliografía .....	57



# 1. Introducción

## 1. La aventura de la ciencia

La ciencia es la aventura más apasionante del espíritu humano y una de las actividades que han producido mayores beneficios para la sociedad. Los científicos tratan de describir el comportamiento de la naturaleza en todos sus aspectos. Por ello, la talla de ese desafío es del orden de la magnitud del universo.

En realidad, el hombre no toma la ciencia como un simple reto, sino que se ve atraído por la irresistible curiosidad que lo acompaña desde la niñez y desde los albores de la humanidad. A lo largo de la historia, el hombre ha descubierto los secretos de la naturaleza por pequeñas partes y los ha ido acumulando hasta llegar a formar parcelas fértiles de conocimiento.

Hoy en día, las parcelas de conocimiento están constituidas de teorías, las que explican determinados aspectos de la naturaleza. Pero el científico, en el fondo, aspira a crear una teoría única, que explique todo, una suerte de teoría universal. Sin embargo, de ello aún estamos muy lejos. Por ahora tenemos que contentarnos con la división del conocimiento en disciplinas científicas, las que, a su vez, cuentan con numerosas teorías.

Una de las características más importantes de la ciencia, es que no tiene temas vedados. Cualquier manifestación natural o inducida provoca investigaciones que llevan a una explicación coherente, o a la creación de una teoría, la que debe pasar pruebas experimentales. En este sentido, muchas teorías han sido dejadas de lado porque entraron en contradicción con la experiencia.

Entre las disciplinas que sobreviven se tienen a la física, la química, la biología y la astronomía. Pero existe una disciplina de profunda relación con las anteriores: se trata de las matemáticas. Las matemáticas han demostrado que no son simples medios de expresión de los científicos. En realidad, los conceptos abstractos -considerados por algunos como divagaciones de la mente- han dado lugar a importantes descubrimientos físicos. Ello demuestra que las matemáticas conforman una estructura natural, expresada por nuestro cerebro, que es la más extraordinaria formación física conocida.

Es importante señalar que han surgido actividades que se autocalifican de paraciencias. La ciencia, en principio, no rechaza nada que se someta a la experiencia. En tal sentido, si surge alguna manifestación llamada paranormal, los científicos tratarán de explicarla.

Más aún, en la actualidad ha surgido una corriente que pone en tela de juicio a la ciencia o, más precisamente, a la ciencia occidental. Hay quienes escogen rumbos totalmente diferentes para interactuar con la naturaleza. Todo ello está de acuerdo con la permanente búsqueda de una coherencia natural.

Sin embargo, debe advertirse que en todos los tiempos han surgido charlatanes y farsantes que nos venden falsas verdades. En este contexto, el hombre moderno debe tener una cultura científica mínima para mirar a través de la ventana abierta por la ciencia, y adquirir la manera científica de observar las cosas naturales. En esta dirección debe apuntar una educación moderna.

Formar una generación científica es una tarea mundial de gran envergadura, que implica comenzar con los niños desde muy temprana edad. Para ello debemos considerar algunos aspectos trascendentales de la educación.

En primer lugar, nunca se debe frustrar la curiosidad natural de los niños, la que muchas veces la mutilamos respondiendo a prejuicios culturales, religiosos o a supersticiones. Recordemos que nada debe ser vedado para la ciencia ni para el entendimiento humano.

Además, se debe admitir que podemos equivocarnos en nuestras apreciaciones y que todo puede ser replanteado en cualquier momento. Hay que evitar que el niño conciba la idea de una forma estática o escolástica de ver el mundo.

Asimismo, toda afirmación debe ser comprobable por cualquier ser humano en la plenitud de sus sentidos. En otras palabras, la experimentación es la madre y la jueza suprema de la ciencia. Un experimento debe ser repetible cuantas veces se quiera.

Estos tres aspectos de la educación científica muestran, en cierta forma, la naturaleza misma de la ciencia. De ello se desprende que si decidimos formar una generación científica -crítica, ávida de conocimiento y comprensión, jamás satisfecha con pseudo explicaciones o soluciones fáciles de los problemas- debemos comenzar con la educación de los niños.

## **2. Tiempo de brujos**

El cerebro del hombre no ha cambiado desde los albores de la humanidad. Por lo tanto, su curiosidad por las cosas era la misma que hoy en día. La diferencia en su actitud es que antes conocía menos que hoy. Las manifestaciones naturales, que algunas veces adquirían magnitudes catastróficas, llevaban al hombre a buscar formas de controlarlas.

>Cómo controlar los fenómenos naturales sin antes comprender las fuerzas que los provocan y modulan?. Lo único que tenían ante sí era el rugir aterrador de las tempestades, de las entrañas de la tierra que se abría ante sus pies o de la lava que vomitaban los volcanes. En otros casos, el medio ambiente se convertía en prolongadas jornadas de nieve o bien de calcinante calor que desertificaba todo.

Ante los rayos y truenos, muchos niños perdidos en el campo se libraban en llanto y desesperación, como suele ocurrir todavía a con niños que se encuentran perdidos en los valles andinos. Los adultos, impotentes, buscaban refugio para los suyos.

El primer impulso del hombre fue atribuir una voluntad a los fenómenos naturales. Así se inició el concepto de espíritu en la naturaleza. Habrían espíritus malos y buenos. Así nacieron los espiritistas y magos, aquellos que afirmaban poder llegar hasta los espíritus y convencerlos para cambiar su actitud aparentemente agresiva. Pero, además, se buscó conversar con espíritus buenos que traigan lluvia y mejores tiempos.

Entre las manifestaciones naturales no debemos olvidar las enfermedades, que eran tomadas como manifestaciones de malos espíritus, los que tomaban posesión de los cuerpos humanos. A los espíritus se les otorgó características similares a las humanas, pudiendo entonces tener tiempos de cólera, compasión, tristeza, alegría, hambre, etc. El hombre buscó formas de contentarlos, creyendo muchas veces que los sacrificios humanos podrían satisfacer su sed de sangre.

Poco a poco estos espiritistas lograron un enorme poder en las comunidades. Su comunicación con los espíritus resultaba vital para la supervivencia de la comunidad. Por lo menos eso creía la mayoría.

En su intento de comunicarse con los espíritus o de interactuar con la naturaleza, los magos manipulaban toda suerte de sustancias, lo que los acercó al empirismo.

Pero, con el tiempo, los espiritistas y magos perdían su prestigio porque sus fallas eran más numerosas que sus éxitos. Lo que pedían o pedían a los espíritus se estrellaba con la experiencia que era diferente.

Paralelamente, se iba acumulando información empírica que se apartaba del espiritismo y la magia. Fueron los propios magos los que constataron su fracaso y fueron ellos los que comenzaron a buscar salida al callejón aparentemente bloqueado. En ese sentido, los magos son ancestros de los científicos. A su manera, los magos trataron de buscar solución a los problemas humanos. No lo lograron, pero su trabajo indujo a la búsqueda de otras soluciones.

Cuando se construyeron sistemas de irrigación para transportar agua de lejos, se comenzó a perder la confianza en los espíritus -los que deberían haber producido la lluvia- y se decidió usar el ingenio para resolver los problemas de la comunidad.

A partir de ello subsistieron ambas formas de encarar los problemas, pero con el tiempo fue el empirismo el que ganaba terreno.

La magia y el espiritismo no sólo fueron perdiendo terreno, sino que se degradaron a tal punto que se redujeron a herramientas de charlatanería y de manipulación de masas, hasta convertirse incluso en métodos para preservar el poder político de grupos familiares. Las castas religiosas se levantaron como las detentoras del poder y, al mismo tiempo, guardianes del conocimiento.

Los filósofos griegos decidieron dejar de lado la magia y buscaron forma de analizar racionalmente las cosas. Así se construyó la base para la ciencia occidental.

## **3. Cómo y no porqué**

La ciencia no pretende ni puede explicar el porqué de las cosas, sino que inventa formalismos que permiten dar una relación coherente entre los fenómenos naturales y las teorías o los modelos. Le encuentra un sentido a las cosas, de tal manera que el hombre no pierde la brújula cuando cae en los laberintos de la naturaleza.

En algunos casos, el sentido de los fenómenos sólo puede ser descrito mediante conceptos abstractos, lo que demanda desarrollos matemáticos. En otros casos, se supone formas que,

aunque no se puede comprobar su veracidad, tienen un comportamiento que coincide con lo observado.

Uno de estos ejemplos es el modelo atómico. Nadie ha comprobado que la descripción del átomo es verdadera. No se ha visto los electrones girando alrededor del núcleo. Tampoco se ha visto el núcleo. Sin embargo, el comportamiento de la materia, de las combinaciones químicas, de las propiedades de los materiales son perfectamente predecibles por ese modelo atómico.

En ese sentido, la observación ha sido la primera fuente de la ciencia. Pero la observación debió ser profunda y estricta. La primera vista es sólo un paso para describir un fenómeno. Recordemos que el aparente movimiento de las estrellas llevó al hombre a una visión geocentrista del universo. Esa visión equivocada produjo los desastres históricos que conocemos.

Otra descripción a primera vista fue la Tierra plana. El hombre observaba el horizonte y se hacía mil hipótesis, todas ellas basadas en una Tierra plana con un fin en alguna parte, donde se encontraría todo tipo de monstruosidades. Este es otro ejemplo de una descripción a primera vista de la realidad que nos lleva siempre a impases. Claro que ello no impidió que el hombre sobreviviera y aplicara para ello su manera de ver la Tierra y el universo.

Las limitaciones técnicas impedían al hombre comprobar sus hipótesis. Fue necesario el uso de embarcaciones para darse cuenta que la Tierra era redonda y se realizó algunas mediciones para que se compruebe que la Tierra no era el centro alrededor del cual giraba el universo.

La ciencia no se pregunta porqué. Aunque una vez que se acepta una teoría con hipótesis fundamentales, aparece un esquema de explicación. Por ejemplo, cuando uno se pregunta porqué caen las cosas, surge la respuesta de la existencia de la fuerza de la gravedad. La fuerza de la gravedad es la razón de muchas cosas, porque fue planteada para dar explicaciones coherentes a la caída de los cuerpos y al movimiento de los cuerpos celestes. Pero la pregunta porqué existe la fuerza de la gravedad no tiene respuesta ni es tema de la ciencia.

El cómo es muy práctico y permite predecir eventos. La mecánica celeste, por ejemplo, permite predecir eclipses. Pero no todo puede ser formalizado en forma sencilla. Existen fenómenos de diversa complejidad, algunos de los cuales son imposibles de enmarcar en un modelo. Pero ello se debe al número muy grande de elementos que intervienen. Uno de estos ejemplos son los fenómenos climatológicos. Es imposible hacer un modelo que describa exactamente lo que está pasando climatológicamente y menos que prediga lo que va pasar dentro de algunos días. Ello a pesar de la existencia de satélites que toman en cuenta una serie de aspectos influyentes en el clima. En los últimos tiempos ha surgido la *teoría del caos* que trata de explicar fenómenos aparentemente caóticos e impredecibles como lo son los fenómenos climatológicos.

Describir el cómo es de por sí interesante y un reto para el espíritu humano. Hemos llegado a un elevado nivel de comprensión de la naturaleza, incentivando mayores esfuerzos para comprender mejor los secretos que aún son innumerables.

#### **4. Cuestión de fe**

La fe no es un concepto científico, pero siempre interesa a los hombres de ciencia porque muchas veces parece contraponerse a su ocupación. Esto se debe a que ambos tienen que ver, en cierta forma, con una concepción del mundo, pero generan dos actitudes diferentes. *La ciencia no acepta como verdad algo que no ha sido comprobado, mientras el que tiene fe cree y eso le es suficiente.*

Tener fe en algo es no necesitar ninguna prueba para creer en ello. La más grande experiencia de fe es la que da por hecho que Dios ha creado el mundo y todo lo que contiene. Es conveniente, sin embargo, notar que muchas veces se confunde la fe en Dios, o en otro ser sobrenatural, con la confianza en una persona o agrupación humana.

Esto se ve, por ejemplo, cuando alguien afirma haber visto llorar una estatua representativa de la Virgen María y mucha gente lo cree porque tiene fe en la Virgen. Aquí se confunde la fe en la Virgen con la confianza en la persona que se presenta como testigo del supuesto hecho milagroso.

Que la Virgen pueda o no hacer una manifestación milagrosa es una cosa, que alguien afirme haber sido testigo de una manifestación es otra. Han habido muchos supuestos milagros que han resultado ser falsos. Entre estos se encuentran hechos de abuso de la fe pública, en

beneficio de los que montaron el supuesto milagro.

Han habido personas que afirmaron ser mensajeros divinos, fundando sectas o iglesias sobre las que se instala un poder ejercido por los promotores. Tengan fe, la fe salva a los pecadores, afirman. De esa forma han florecido tantas sectas en las que se enrolan fieles, que en la mayoría de los casos son personas en busca de esperanza.

En países de extrema pobreza y violencia, los ciudadanos son sensibles a todo mensaje de esperanza. De esa forma surgen grupos religiosos de todo tipo, pero con el común denominador de creerse poseedores de la verdad.

Creer en Dios es una cosa completamente diferente a creer en algunos que se autodenominan sus mensajeros o sus representantes. La fe de los hombres es invocada muy a menudo por grupos interesados en controlar las voluntades y que intentan influir en la sociedad. Lo cierto es que nadie puede probar la veracidad de afirmaciones que llaman a la fe como intermediario. (El peor comportamiento que surge en algunas agrupaciones religiosas es su intransigencia y su deseo de imponer sus creencias a otros. América ha sido un triste laboratorio de la intolerancia de religiones importadas.)

Sin embargo, cabe mencionar que hay manifestaciones naturales que son extraordinarias, debido a que no son frecuentes. Entre éstas tenemos la gran influencia de la mente sobre el cuerpo. En ese sentido la fe tiene efectos prácticos. Creer en la posibilidad de curarse de alguna enfermedad es un paso a la mejoría. Sobre esta fe se basa una serie de prácticas curativas, particularmente para enfermedades psicósomáticas. Los curanderos o chamanes advierten, antes de toda sesión de curanderismo, que sin fe nada se logra.

En general creer en uno mismo tiene efectos contundentes en el comportamiento humano. Mucho se puede lograr a través de la plena confianza en lo que uno hace o piensa.

En ese sentido la fe no es incompatible con la ciencia, es otra cosa. Pero no se trata sólo de la fe en Dios, sino en todo lo que consideremos sobrenatural. Los científicos mismos pueden tener fe en algo que no puede ser demostrado pero que intuitivamente se cree verdadero. Sin embargo, nunca puede mezclarse la fe con la ciencia. Para analizar científicamente algún objeto uno debe despojarse de la fe y comprobar toda hipótesis usando los métodos rigurosos y disciplinados de la ciencia.

## **5. Determinismo e indeterminismo**

La ciencia logra describir el comportamiento de sistemas naturales o artificiales. El mayor éxito que se le atribuye es su capacidad predictiva. Una de las mayores demostraciones de dicha característica es la predicción de eclipses o trayectorias de cometas. Hoy se puede saber con gran precisión la fecha de un eclipse. En forma similar, se puede calcular la posición de los cometas a medida que pasa el tiempo.

Sin embargo, a nivel microscópico, los átomos y los núcleos no pueden ser estudiados con teorías deterministas. Aparecen entonces las teorías basadas en las probabilidades. Ya no se calcula trayectorias sino probabilidad de existencia de materia en tal o cual lugar. En la práctica, eso tiene poca importancia porque los átomos son estudiados como conjuntos de átomos. Tener sólo un átomo es algo inusual. La radiación que viene del Sol, por ejemplo, proviene de una infinidad de reacciones nucleares. La luz tiene su origen en un gran número de átomos imposible de estudiar individualmente.

La Luna, el Sol y la Tierra son cuerpos que pueden ser rastreados continuamente. Eso es imposible realizar con las partículas elementales que viven en el átomo.

Puede establecerse un paralelismo entre la forma de estudiar los cuerpos microscópicos y los cuerpos macroscópicos con la forma de estudiar el hombre y las sociedades. Un hombre observado individualmente tiene comportamientos impredecibles, pero un grupo humano o una sociedad tiene características que permiten cierto grado de predictibilidad. Por supuesto, debe tomarse en cuenta que un sistema macroscópico es analizado utilizando variables que tienen poco que ver con las variables que permiten analizar los sistemas microscópicos.

Los sistemas macroscópicos toman personalidad propia, singular. Por ejemplo, se dice que el Perú está atravesando una profunda crisis económica, que no es lo mismo que decir que todos los peruanos están sufriendo esa crisis. El Perú no viene a ser más que la organización de los peruanos sobre su territorio. La desaparición del Perú no significa la desaparición de los seres humanos llamados peruanos.

La muerte de una estrella no significa la desaparición de los componentes de la estrella. Como tampoco la muerte de un ser humano significa la desaparición instantánea de sus células. Cuando un hombre muere, se paraliza una serie de funciones del cuerpo, que permitían

alimentar las innumerables células de vida; por ello, poco a poco, esas células van muriendo. Pero la muerte de cada una de ellas tampoco significa la desaparición de las moléculas o átomos que las componen.

Al fin de cuentas, podemos percibir que la materia está organizada en forma muy compleja. Cada parte de materia es la organización de componentes más pequeños. Mientras más viajamos hacia lo elemental, menos predecible es el comportamiento individual.

Viajando en el sentido opuesto, hacia lo complejo, veremos que la organización de la materia lleva a una especie de orden. Es como si la organización implicara el establecimiento del orden. A mayor número de elementos, más fácil es la predicción del comportamiento del sistema.

La identificación de ese orden es el objeto de la ciencia. De modo que la predictibilidad de una teoría científica reside en el grado de complejidad del sistema.

## **6. Camino sin fin**

Como hemos visto, la magia, primer intento de comprender y dominar la naturaleza, fue reemplazada por la ciencia. Hay grandes diferencias entre ellas. Mientras que la magia era oculta y guardada celosamente por magos y luego por sacerdotes, la ciencia estaba al alcance de todos. Por otro lado, mientras que la magia aparecía como un asunto espectacular y definitivo, la ciencia se presentaba como un difícil camino, siempre dispuesta a cambiar y mejorar sobre la base de la experiencia.

La religión algunas veces se ha manifestado contra la ciencia. Hoy, ciencia y religión conviven sin problemas porque no interactúan, aunque pueden vivir en la mente de una persona. Es normal que científicos tengan creencias religiosas. Lo que no es aconsejable es dejarse influir por las creencias religiosas en la búsqueda de explicaciones científicas. Cuando Albert Einstein debatía con Niels Bohr sobre la mecánica cuántica, cometió el error de evocar sus creencias religiosas para refutar dicha teoría, con la famosa frase "Dios no puede jugar a los dados". Esto lo dijo porque la mecánica cuántica tiene un componente estadístico y no determinístico. La experiencia ha demostrado que la mecánica cuántica es valedera y hoy todo tratamiento en el mundo atómico, nuclear y subnuclear no puede hacerse sin la mecánica cuántica.

En ciencia nunca se tiene la última palabra. Lo que se cree hoy puede ser derrumbado sin problemas mañana y la ciencia sale ganando.

La ciencia no avanza un milímetro si sus hipótesis no son comprobadas. Muchas teorías científicas han sido pulverizadas cuando se estrellaron contra la experiencia.

Algunos críticos de la ciencia afirman que su debilidad reside precisamente en su falta de estabilidad. El hecho de la fragilidad de las teorías es exagerado hasta el punto de afirmar que nada es verdad. En realidad, la ciencia avanza continuamente, descubre cada día parcelas de verdad en sus caminos. El descubrimiento de nuevas fronteras científicas significa la revisión de teorías antiguas, que no dejan de ser aplicables en sus viejos dominios.

Por ello, aquel que empieza el largo camino de la ciencia debe estar preparado para descubrir continuamente hechos que contradicen sus teorías. Sin embargo, cada descubrimiento será el alimento de su extraordinaria e ilimitada curiosidad. Esa curiosidad que nos ha alejado de las cavernas y el frío glacial.

## **2. Origen del universo**

### **1. Todo comenzó en un punto**

El origen del universo y, sobre todo, de la vida, ha sido y sigue siendo el tema de mayor interés para el hombre, atrayendo la atención de religiosos, filósofos y de aquellos que buscan un sentido a la historia de la vida y de la evolución de todo lo que la rodea.

Saber cómo se formó el universo en el que nos sentimos aparentemente perdidos parece imposible, pero al intentar una respuesta se va construyendo un edificio de conceptos desde el cual se puede ver cada vez más lejos.

En la búsqueda se han ido encontrando insólitos rastros del pasado del universo, el más espectacular de los cuales es la radiación que ha emitido en su inestable pasado, la que ha viajado en el espacio sin ser interrumpida. La radiación que hoy detectamos puede haber sido emitida hace miles de millones de años. De esa forma, logramos una imagen del pasado, por lo

menos de la época cuya radiación no ha sido interceptada por algún fenómeno cosmológico. Así, observando el cosmos, con instrumentos cada vez más sensibles, estamos escudriñando el pasado del universo.

Los últimos resultados de las investigaciones en este campo sostienen la *teoría del Big Bang* (gran explosión), según la cual *el universo surgió en la explosión de un punto infinitamente denso de masa y energía*.

## **2. El universo en expansión**

En el siglo XX se han construido poderosos telescopios ópticos y radiotelescopios, que han permitido recibir señales emitidas por lejanas estrellas. Asimismo, se han elaborado conceptos teóricos que son fundamentales para la formalización del conocimiento sobre el cosmos. Entre éstos contamos con la *teoría de la relatividad*, creada por Albert Einstein. *Ambos elementos, los instrumentos experimentales y las teorías, nos han permitido hacernos una idea más clara del universo del que formamos parte.*

En 1930, se creía que el universo observable tenía un diámetro de cerca de mil millones años luz (un año luz es la distancia que recorre la luz durante un año: la velocidad de la luz es de 300 000 kilómetros por segundo).

Combinando las observaciones telescópicas y la teoría de la relatividad, Edwin Hubble<sup>i</sup> revolucionó la visión del cosmos. Hubble calculó que en el universo observable existen 100 millones de galaxias de diferentes tamaños y configuraciones. Además, observó que las galaxias están alejándose con una velocidad proporcional a sus distancias y en consecuencia lanzó la hipótesis según la cual el universo está en expansión.

## **3. La gran explosión**

Georges Lemaitre<sup>ii</sup> explicó las velocidades de las galaxias, suponiendo que la expansión del universo tiene su origen en una explosión original. Lemaitre propuso la hipótesis según la cual al principio todo estaba contenido en una región pequeña y superdensa, la que explotó por fuerzas desconocidas.

El físico George Gamow<sup>iii</sup> propuso la llamada teoría del Big Bang, la que consideraba las soluciones dependientes del tiempo -obtenidas por A. Friedman- de las ecuaciones de la relatividad y las interacciones nucleares.

Surgió la interrogante si el universo dejará de expandirse para comenzar a comprimirse por efecto de la gravedad, hasta regresar a la situación original. La respuesta depende de la densidad de la materia en el universo, cuestión que hasta ahora no ha sido esclarecida.

## **4. Los tres primeros minutos**

En 1977, Steven Weinberg plantea un esquema sobre la formación del universo<sup>iv</sup> basado en el modelo del Big Bang. Este esquema está compuesto de cuadros que representan la evolución del universo.

### **1. Primer cuadro**

El instante inicial es desconocido, porque no ha dejado rastro visible. Se puede seguir la evolución del universo desde cuando tenía una temperatura de 100 000 millones de grados Kelvin (100 000 000 000 K) y era una sopa de partículas y radiación en equilibrio perfecto. La densidad de energía del universo era entonces equivalente a 3 800 millones de kilogramos por litro, o 3 800 millones de veces la densidad del agua bajo condiciones normales (la equivalencia viene de la fórmula [EQUATION], propuesta por Albert Einstein).

---

<sup>i</sup> E. Hubble, "Our Sample of the Universe", *Scientific Monthly*, diciembre 1937

<sup>ii</sup> Abbé Georges Lemaitre, "The Primeval Atom", en *The Primeval Atom*, Van Nostrand, 1950

<sup>iii</sup> George Gamow, "The Great Expansion", in *The Creation of the Universe*. Viking Press, New York, 1947

<sup>iv</sup> Steven Weinberg, "Los Primeros Tres Minutos", *The Three Minutes*, Basic Books, New York, 1977

En esta fase, las colisiones de protones y neutrones con electrones, positrones, y otras partículas, producen transiciones rápidas de protones a neutrones y viceversa. Las partículas nucleares, debido a sus energías de colisión, no forman núcleos.

La circunferencia del universo era menor que la actual en un factor igual a la razón entre la temperatura de ese entonces (100 000 000 000 K) y la temperatura actual (3 K). Esto hace una circunferencia de cerca de cuatro años luz.

## 2. Segundo cuadro

0,11 segundos más tarde, el universo se enfría hasta los 30 mil millones de grados Kelvin. No hay cambios dramáticos respecto al primer cuadro. El universo es dominado por electrones, positrones, neutrinos, antineutrinos y fotones en equilibrio. La temperatura no permite la formación de núcleos. Sin embargo, los neutrones se convierten en protones y viceversa. La densidad de energía ha caído como la cuarta potencia de la temperatura.

## 3. Tercer cuadro

Han pasado 1,09 segundos desde el primer cuadro. La temperatura llega a 10 000 millones de grados Kelvin. Los decrecimientos de la densidad y temperatura permiten ahora que los neutrinos se comporten como partículas libres, dejando de intervenir en el equilibrio térmico con las otras partículas. La densidad total de energía es equivalente a 380 000 veces la densidad del agua. La temperatura es sólo el doble de la necesaria para crear, a partir de la radiación, el par electrón positrón; esto permite que la aniquilación positrón electrón sea mayor que la creación a partir de la radiación.

La temperatura hace que el balance protón-neutrón sea 24 por ciento de neutrones y 76 por ciento de protones.

## 4. Cuarto cuadro

Han pasado 13,82 segundos desde el primer cuadro. La temperatura es de 3 000 millones de grados Kelvin. Los electrones y los positrones comienzan a desaparecer y la energía liberada disminuye el enfriamiento del universo. Los neutrinos que absorben esta energía tienen 8 por ciento menor temperatura que los electrones, positrones y fotones.

Desde ahora, la temperatura del universo será referida a la temperatura de los fotones. La densidad de energía es algo menor que la correspondiente a la cuarta potencia de la temperatura.

Ahora se pueden formar núcleos de helio. Un neutrón y un protón forma un núcleo de hidrógeno pesado, o deuterio, con momento y energía llevados por un fotón. El deuterio colisiona con un neutrón para formar un isótopo más pesado del hidrógeno, es decir el tritio ( $[EQUATION]H$ ). El deuterio puede chocar con un protón para formar un isótopo liviano del helio ( $[EQUATION]He$ ). Luego el  $[EQUATION]He$  puede colisionar con un neutrón o el  $[EQUATION]H$  con un protón para formar el  $[EQUATION]He$ .

El  $[EQUATION]He$  es bastante ligado y en base a ello se podría formar en el tercer cuadro. Sin embargo, ello no es posible porque el paso intermedio, el deuterio, es poco ligado y no resiste las condiciones del tercer cuadro.

Los neutrones siguen convirtiéndose en protones, aunque a una velocidad menor. El balance es 17 por ciento de neutrones y 83 por ciento de protones.

## 5. Quinto cuadro

Han pasado 3 minutos y dos segundos desde el primer cuadro. La temperatura es de 1 000 millones de grados Kelvin. Esta temperatura es 70 veces menor que la existente en el centro del Sol. Los electrones y positrones han desaparecido casi por completo y el universo está conformado principalmente por fotones, neutrinos y antineutrinos.

Se forman el tritio, el helio 3 y el helio 4, pero el deuterio no permanece el tiempo suficiente como para formar núcleos más pesados. Este hecho es llamado el "cuello de botella del deuterio".

Las colisiones de neutrones y protones con electrones, neutrinos y antipartículas han

disminuído, pero el decaimiento de neutrones a protones comienza a ser significativo. El balance es ahora 14 por ciento de neutrones y 86 por ciento de protones.

Un poco después del quinto cuadro, la temperatura cae a tal punto que el deuterio comienza a mantenerse. Se inicia una cadena de formación de núcleos más pesados que el helio, aunque no se forman en grandes cantidades por que hay otros cuellos de botella: no hay núcleos estables con 5 u 8 partículas.

Tan pronto como el deuterio es formado, los neutrones restantes forman el helio 4. La temperatura a la que ello sucede depende del número de partículas por fotón.

Para un millón de partículas por partícula nuclear, la nucleosíntesis comenzará a una temperatura de 900 millones de grados Kelvin ( $0.9 \times 10^9 \text{K}$ ). Hasta aquí han pasado tres minutos cuarentiseis segundos, desde el primer cuadro.

## 6. Sexto cuadro

Han pasado 34 minutos y 40 segundos desde el primer cuadro. La temperatura es 300 millones de grados Kelvin ( $3 \times 10^8 \text{K}$ ). Los electrones y positrones se han aniquilado completamente, excepto una pequeña parte (1 por 1 000 millones) de electrones necesarios para balancear la carga de los protones. La densidad de energía es 9,9 por ciento de la densidad del agua. De ésta, 31 por ciento está en la forma de neutrinos y antineutrinos y 69 por ciento en la forma de fotones.

La mayoría de las partículas nucleares están conformando el helio o son protones libres, con 22 a 28 por ciento de helio. Hay un electrón por cada protón libre o ligado, pero la temperatura elevada no permite la formación de átomos.

700 000 años después del primer cuadro, la temperatura bajó lo suficiente como para permitir la formación de átomos estables. Los electrones atrapados en los núcleos no significaban obstáculo para la radiación.

El desacoplamiento entre materia y radiación da lugar a la formación de galaxias y estrellas.

Todo ello ocurrió hace más de 10 000 millones de años. Hoy en día, nos encontramos tratando de desentrañar los secretos de esos tiempos con herramientas construídas de la misma materia que se originó en tales épocas remotas.

## 5. Espacio abierto o cerrado

No se ha logrado establecer si el universo es abierto (es decir que seguirá expandiéndose para siempre) o cerrado (o sea que la expansión terminará). Existe la hipótesis según la cual el universo se contraerá para luego volver a expandirse, como un sistema oscilante.

El sistema oscilante supone un comportamiento cíclico del universo. Bajo esta hipótesis y a pesar del avance de la física, persisten varias interrogantes. La primera interrogante nace por el segundo principio de la termodinámica, según el cual un sistema cerrado aumentará el desorden hasta llegar a un punto que se estabiliza. El otro interrogante se refiere al destino de la materia y la energía. No se sabe qué podrá pasar con la energía irradiada por los cuerpos y si esto no disminuiría la energía disponible por el universo oscilante.

## 6. Radiación fósil en el fondo del cosmos

*En 1965, dos astrónomos mostraron la existencia de una radiación electromagnética difusa y de muy baja intensidad que invade el universo. Este descubrimiento es considerado como fundamental para la comprensión del origen del universo. Por ello, Arno Penzias y Robert Wilson, autores del descubrimiento, se hicieron acreedores del premio Nobel en física 1978.*

Entre las teorías cosmológicas existentes hasta esa época, sólo la teoría del Big Bang daba cuenta de la existencia de la mencionada radiación electromagnética.

*Una de las características de dicha radiación es su isotropía, es decir que su intensidad es independiente de la dirección en la que se le observe. Ello significa que su existencia no depende de astro o galaxia algunos.* Se trata de un fenómeno cosmológico, que es la expresión del universo entero. No se puede uno imaginar que algún astro o galaxia puede influenciar el universo entero.



## **7. El equilibrio universal**

Otra característica de la radiación es que su espectro es igual al del llamado "cuerpo negro", según lo muestran los resultados de las mediciones del satélite COBE, lanzado en noviembre de 1989. Las características de la radiación del cuerpo negro son representadas sólo por la temperatura y son similares a las de la radiación en equilibrio termodinámico con la materia. Ello hace pensar que dicha radiación fue generada en condiciones de equilibrio. También significa que la temperatura y la densidad permiten que las partículas de materia y los rayos luminosos se encuentren varias veces, de modo que intercambien energía, estableciéndose un equilibrio.

Las características que acabamos de mencionar son propias de la teoría del Big Bang.

Según la teoría del Big Bang, el universo se expande y se diluye. Las leyes de la física nos permiten deducir que estaba extremadamente caliente y denso. Ello habría ocurrido hace entre 10 y 20 mil millones de años. Las condiciones de densidad y temperatura de ese entonces no permitían la formación de estrellas o galaxias.

Esto parece estar de acuerdo con las edades de las estrellas más viejas encontradas, medidas por métodos independientes.

## **8. Predicciones cumplidas**

De acuerdo a la teoría del Big Bang, las condiciones de densidad y temperatura de esos tiempos permitirían que parte de los protones y neutrones se conviertan en elementos livianos. La abundancia de esos elementos concuerda con las predicciones de la teoría. También se predijo que existirá no más de 3 o 4 familias de partículas elementales. En 1989, en el *Laboratorio Europeo para la Física de Partículas, CERN*<sup>v</sup> se demostró que ese número era 3.

El otro éxito de la teoría es precisamente la existencia de la radiación de cuerpo negro. *Según el modelo del cuerpo negro, la radiación es tanto más intensa cuanto mayor temperatura tenga el cuerpo.*

El fenómeno de radiación de cuerpo negro se produce por ejemplo cuando un metal tiene temperatura elevada, es decir cuando se encuentra al estado incandescente y entonces emite luz.

## **9. Reconstrucción del pasado**

Con los resultados obtenidos se puede pensar que el universo primordial estaba suficientemente caliente, como para que la materia se encuentre ionizada, es decir que los átomos estén despojados de electrones. Los electrones libres y la radiación llegaron a un equilibrio térmico.

La existencia de dicho equilibrio impedía que los rayos luminosos se propaguen en línea recta. Estos encontraban electrones en su camino. Dado que las imágenes resultan de los rayos luminosos que viajan en línea recta o bien sin intersecciones, se deduce que en ese entonces no había nada visible. El universo era opaco. Por otro lado, el choque de la radiación con las partículas impedía la formación de cuerpos por gravedad. Los cuerpos se atraen por gravedad, tendiendo a formar conglomerados; pero difícilmente se podría dar lugar a tales conglomerados si las partes chocaban violentamente. Eso explica la lentitud con la que se han ido formando estrellas y galaxias.

## **10. Ruptura del equilibrio y universo actual**

Si el mencionado equilibrio hubiese persistido, el universo sería opaco, sin estrellas ni galaxias. Los electrones libres habrían continuado chocándose con la radiación. Ello dependía del estado de ionización de la materia, lo que se asegura a temperaturas de miles de millones de grados Kelvin.

La expansión y el enfriamiento del universo hizo que los electrones puedan ser capturados por los protones, para formar átomos de hidrógeno, lo que sucede a temperaturas de 3 000 grad os Kelvin. De esa forma, con menos electrones, se perdió el equilibrio y la materia comenzó a

---

<sup>v</sup> Las siglas CERN vienen del nombre inicial: *Conseil European pour la Recherche Nucléaire*

condensarse, formando estrellas, galaxias, planetas, entre otros cuerpos celestes. Pero la radiación se ha quedado sin interacción. En su viaje, los fotones han perdido energía, en un factor 1 000. Hoy esos fotones corresponden a una radiación de temperatura de 3 grados Kelvin.

Los fotones que se observan en la actualidad se han propagado libremente, desde la última vez que interactuaron con la materia, en el momento de la recombinación. Desde entonces han transcurrido 15 mil millones de años.

Esa radiación fue emitida en la superficie opaca del universo, cuya imagen se refleja en la radiación difusa que se encuentra en el universo.

La superficie, que es la frontera entre la zona opaca y la transparente, la observamos hoy desde su parte central. Por intermedio de la radiación cósmica es imposible observar qué pasó del otro lado. Podemos decir que tampoco se sabe lo que pasó antes, porque la superficie frontera es también temporal.

Si bien se descubrió que la radiación cósmica tenía características de radiación de cuerpo negro, era necesario hacer mediciones más precisas. Desde hace 25 años, diversos laboratorios se dedican a medir la radiación cósmica, para compararla con la predicha por la teoría. Sin embargo, el mayor e incomparable esfuerzo lo constituyó el COBE (*Cosmic Background Explorer Satellite*). Mediante el COBE se muestra que la radiación tiene naturaleza térmica y determina una temperatura de 2,735 K con una precisión de 0,06 K<sup>vi</sup>.

A pesar que la parte del espectro de la radiación de fondo del universo medida por el COBE está de acuerdo al modelo del cuerpo negro, falta explorar la parte del espectro que corresponde a las ondas radio, con longitudes de onda mayores al centímetro.

Existen otras manifestaciones en favor de la teoría del Big Bang, entre las que se tiene las cantidades de helio y deuterio, así como de los elementos livianos como litio, berilio y boro, que son las mismas que las predichas por la teoría del Big Bang<sup>vii</sup>. Según los cálculos correspondientes, durante el Big Bang, 25 por ciento del hidrógeno se convierte en helio 4. Esto es comprobado por el espectro de la radiación de las estrellas viejas.

## **11. El Big Bang en tela de juicio**

Si la teoría del Big Bang es correcta, entonces las estrellas tienen mayor velocidad mientras más lejos se encuentren, tí pico fenómeno en una explosión. Esto se traduce en la *ley de Hubble*, que plantea una relación lineal entre el corrimiento hacia el rojo de la radiación emitida por las estrellas y la distancia de las mismas, ley que se cumple para pequeñas distancias. Para mayores distancias será necesario realizar las correcciones de Einstein, que toma en cuenta las curvaturas del espacio tiempo.

El problema es la falta de un método no ambiguo para determinar la distancia. Hubble usó la inversa del cuadrado de la iluminación, bajo la hipótesis de que todas las estrellas tienen el mismo brillo. Así, mientras más tenue aparece una estrella, más lejos se encuentra. Escogiendo las brillantes de las galaxias entre los grupos se ha demostrado que se cumple la ley de Hubble.

En 1963, investigadores del Instituto de Tecnología de California, descubrieron objetos cuasi estelares, llamados *quasares*. La luz que emiten los quasares tienen un mayor corrimiento al rojo que la luz de las galaxias, lo que implicaría, de acuerdo a la ley de Hubble, que se encuentran más lejos que las galaxias. Pero ello significaría que deben ser mucho más brillantes que las galaxias, para poder ser visibles a tan grandes distancias.

Lo intrigante es que los quasares no cumplen la ley de Hubble, no hay correlación lineal entre el corrimiento al rojo y la iluminación de estos cuerpos celestes. Una de las posibles explicaciones es que existen efectos gravitacionales sobre la luz, que se traducen en especie de lentes gravitacionales que perturban la imagen de estos quasares. Sin embargo, resulta difícil sostener esta hipótesis ante el número elevado de quasares que presentan el supuesto efecto gravitacional.

Otro problema delicado que quedaba como interrogante era el proceso de formación de galaxias, que sugiere la necesidad de cierta heterogeneidad de la radiación de fondo cosmológico.

La formación de galaxias habría comenzado con fluctuaciones de densidad. Algunos sugieren fenómenos relacionados con las partículas elementales y otros apelan a fenómenos

---

<sup>vi</sup> *La Recherche* 227, diciembre 1990

<sup>vii</sup> *New Scientist*, 2 de marzo 1991

gravitacionales o de cosmología cuántica.

Las variaciones de densidad que habrían dado lugar a la formación de las galaxias debieron ser muy pequeñas: una 10 milésima del valor total. Estas variaciones se produjeron en momentos de la recombinación, cuando los electrones comenzaron a girar en torno a los protones para formar el hidrógeno. Entonces, la radiación dejó de interactuar con la materia y quedó en estado fósil, como un testigo de lo que era en esos tiempos la distribución de la materia en el universo. Las fluctuaciones de densidad deberían reflejarse en la radiación cósmica actual. Estas fluctuaciones son las que se buscan en las anisotropías en el fondo difuso cosmológico.

Si tomamos la hipótesis de la homogeneidad de la materia en momentos de la recombinación, se habría emitido la misma cantidad de radiación y se tendría el mismo espectro en todo punto del universo. Pero la formación de galaxias es explicada sólo si hubiesen ocurrido fluctuaciones.

Las fluctuaciones de densidad producen efectos sobre la radiación, en el sentido que ésta sale más difícilmente de zonas con mayor densidad, debido a efectos gravitacionales. Así, la radiación que proviene de una zona de mayor densidad aparece como de menor temperatura que aquella que viene de regiones vecinas con menor densidad.

Por otro lado, las fluctuaciones de materia en una zona produce el llamado *efecto Doppler*, similar al efecto que causa la velocidad de un automóvil en la tonalidad de la bocina.

A pesar que varios grupos científicos buscaban afanosamente dichas fluctuaciones, era difícil encontrarlas. Es más, las observaciones indicaban que el universo en la época de la recombinación era homogéneo con una aproximación de 0,0001.

Estos resultados preocuparon, porque sugirieron que las fluctuaciones de densidad debían ser significativas como para dar lugar a las galaxias y suficientemente débiles para no producir anisotropías en el fondo difuso cosmológico. Pero las fluctuaciones indicadas eran del mismo orden que la sensibilidad de los experimentos.

Se señalaba, sin embargo, que cualquier modelo existente predecía fluctuaciones no menores que 0,000005. Pero para comprobar esto se necesita mediciones de mayor sensibilidad que las actuales.

Para explicar cómo se ha formado la estructura del universo, los cosmólogos han lanzado la hipótesis según la cual lo que se observa no es todo lo que existe. Ellos afirman que debe existir un tipo de materia no detectada, es decir la *materia oscura*.

Otro problema surge con la edad del universo. Las teorías del Big Bang asumen que el universo pasó por un período de inflación cuando tenía la edad de 10 [EQUATION] segundos. Según esta teoría, el universo tendría una edad entre 6,5 y 13 mil millones de años, la que no está de acuerdo con las edades entre 13 y 17 mil millones de años de las estrellas más viejas detectadas y las edades de 12 a 16 mil millones de los elementos.

Para complicar aún más el caso de las teorías del Big Bang, se presentan problemas en el rango de las galaxias jóvenes. Las teorías predicen que ellas se formaron en un período muy corto, de tal manera que tendrían la misma edad, entre 10 y 15 mil años. Ello implica que no deberíamos ver galaxias jóvenes en nuestro vecindario. Sin embargo, el *Satélite Astronómico de Rayos Infrarrojos (IRAS)* ha observado que varias galaxias son jóvenes en el sentido de las edades de las estrellas de las cuales están formadas.

La coexistencia de galaxias jóvenes y viejas no concuerda con las teorías del Big Bang, lo que hizo renacer los debates que eran candentes en las décadas del 1960 y 1970, entre las teorías del estado permanente y las teorías del Big Bang.

Una de las hipótesis que se plantean algunos investigadores<sup>viii</sup> es que el fondo difuso cósmico podría haber sido emitido recientemente, y no en el origen del universo. Para ello es necesario partículas que absorban microondas y sean casi transparentes a las ondas ópticas y radio. Estas partículas distribuidas en el espacio intergaláctico habrían absorbido y redistribuido las microondas.

En esa dirección apuntan algunas investigaciones, de las cuales están obteniéndose resultados que incentivan mayor esfuerzo.

También ha surgido la idea puente entre las teorías del estado permanente y las teorías Big Bang. En este puente, se considera que las galaxias han sido creadas en diversas épocas, con suertes de pequeños Big Bangs en diferentes tiempos.

En todo caso, el debate está abierto y los experimentos siguen. La astrofísica se ha convertido en una ciencia multidisciplinaria, en la que los adelantos tecnológicos de medición de radiación

---

<sup>viii</sup> Jayant Narikar, *New Scientist*, 2 de mayo 1991)

cósmica han jugado un rol preponderante.

## **12. Consagración del Big Bang**

Es precisamente en ese ambiente de debate que, el 23 de abril de 1992, George F. Smoot, del Laboratorio Nacional de Berkeley, anunció que el COBE descubrió, después de un año de intenso trabajo de análisis, con ayuda de las computadoras del Goddard Space Flight Center de Maryland, que en las microondas del universo mostraron regiones ligeramente más calientes. Unas 30 millonésima de grados más caliente o fría que el promedio. Esa variación es casi imperceptible pero suficiente para que la teoría del Big Bang salga respaldada.

Estos resultados han llevado a afirmar<sup>ix</sup> que se ha abierto la edad de oro de la cosmología.

Uno de los más beneficiados de los resultados del COBE ha sido la cosmología inflacionaria, una versión popular de la teoría del Big Bang desarrollada a comienzos de los años 80 por Alan Guth<sup>x</sup> del Instituto Tecnológico Massachusetts (MIT) y redefinido por Andrei D. Linde de la Universidad de Stanford y por Paul Steinhardt de la Universidad de Pensilvania<sup>xi</sup>.

## **3. Las estrellas**

### **1. Mirando el cielo**

El hombre siempre se sintió fascinado cuando miraba las estrellas. Observándolas, hizo esfuerzos por penetrar mentalmente en sus secretos. De esa forma, los hombres primitivos buscaban desesperadamente, en las estrellas, respuesta a sus interrogantes sobre el origen del todo. Las estrellas se presentaban como los puntos de referencia para sus viajes. Ellas daban el marco para trazar, en el transcurso del año, la trayectoria del Sol y de la Luna, información valiosa para la agricultura y los ciclos de la vida.

La Tierra gira de oeste a este, haciendo una vuelta completa en 24 horas. De esa forma, la Tierra nos muestra un cielo con innumerables estrellas, las que, según los datos históricos, no cambian su distribución relativa.

Esas estrellas eran observadas además como símbolos de lo inalcanzable. Prometer las estrellas significaba prometer lo imposible. Pero, a falta de poder alcanzarlas físicamente, el hombre inició una veloz carrera hacia su comprensión. Situación que sigue hasta ahora sin haber llegado aún a la meta final. Tratar de comprender la naturaleza de las estrellas es tan difícil como apasionante.

### **2. Rastros del pasado**

Para estudiar las estrellas, el hombre usa telescopios y otros instrumentos que reciben una serie de señales del cosmos. Por otro lado, se tiene la suerte de recibir piezas de material cosmológico, las que, en su viaje por el espacio, se acercan y caen en la Tierra. Con una enorme cantidad de datos procesados, hoy se tiene una idea aproximada sobre el nacimiento, vida y muerte de las estrellas.

En los esfuerzos por comprender el cosmos, cabe señalar que, el 21 de julio de 1969, el programa Apolo alcanza el éxito poniendo el primer hombre sobre la Luna, abriendo la época búsqueda de rastros del pasado fuera de la Tierra.

Los meteoritos, por su lado, han viajado miles de millones de años en el espacio, antes de caer en la Tierra. La estructura, la composición y las características de esos meteoritos constituyen valiosa información para el estudio del pasado.

### **3. La Vía Láctea**

Cuando el hombre se dió cuenta de que algunas estrellas se mantenían en trayectorias bien definidas, las usaron como puntos de referencia para sus viajes. De esa forma, los viajeros

---

<sup>ix</sup> *Scientific American*, julio 1992

<sup>x</sup> Alan A. Guth y Paul J. Steinhardt, "The Inflationary Universe", *Scientific American*, mayo 1984

<sup>xi</sup> Paul Davis (editor), *The New Physics*, Cambridge University Press, 1989

tenían en las estrellas sus mejores guías.

Hoy se sabe que el Sol es también una estrella, alrededor de la cual giramos, que se encuentra a 150 millones de kilómetros de la Tierra. A esta distancia se llama *unidad astronómica*, apropiada para describir el Sistema Solar. La estrella Alfa Centauro, muy cercana al Sol, está a una distancia de 4,27 años luz.

Los confines del universo están a miles de millones de años luz, de modo que la luz que vemos ha sido enviada hace miles de millones de años. Ello nos hace pensar que las estrellas, cuya luz observamos, posiblemente hayan desaparecido.

Nuestra galaxia es una de las centenares de miles de millones de galaxias existentes en el universo. El sistema planetario solar, perdido en esa galaxia, tiene una historia que comenzó mucho antes que existiera la Tierra. La galaxia Vía Láctea se parece a un platillo volador de radio de 50 000 años luz y de altura de 15 000 años luz. Contiene más de 100 mil millones de estrellas. Cada estrella tiene su sistema planetario como lo tiene el Sol.

La galaxia tiene forma de espiral con dos brazos, los que en conjunto giran alrededor de su centro. La galaxia da una vuelta completa en 200 a 250 millones de años. Este período es también llamado año cósmico o año galáctico.

#### **4. Nacimiento del Sistema Solar**

El Sol es una estrella como muchas. Por ello, como introduciéndonos en el tema, vemos cómo se formó el Sistema Planetario Solar.

Antes del Sol había un enjambre de polvo y gas, formando una gigante nube, llamada *nube protosolar*. En el espacio existían muchas nubes como ésta, que se forman como las nubes antes de la lluvia.

Esas nubes recorrían la galaxia durante millones de años y eran bombardeadas con partículas provenientes de estrellas vecinas. Estas partículas eran principalmente núcleos de hidrógeno y de helio y, además, núcleos más pesados como hierro, cobalto, níquel, entre otros. La nube aumentaba de peso en forma lenta pero continua.

La nube protosolar estaba perdida en el cosmos, y cada 120 millones de años, cuando la galaxia daba una vuelta completa, la nube se encontraba con un brazo de la galaxia. Las nubes sufrían entonces un cataclismo, que las fragmentaba, las hacía pedazos. Como resultado, salían otras nubes que seguían vagando en la galaxia.

Llegó un momento en que la nube protosolar se encontró con un brazo, en la *región de la Nebulosa de Orión*. Hubo un choque de nubes dando lugar a momentos de inestabilidad y agitación, durante los cuales se condensó una bola brillante, pequeña en comparación con la nube.

En ese ambiente intranquilo, nacían estrellas de todo tamaño. Algunas vivían poco y explotaban espectacularmente, expulsando granulaciones que bombardeaban otras nubes. De estas tormentas, algunas pequeñas estrellas salían arrastrando trazas de la nube, las que daban lugar a pequeñas esferitas.

Esa es la historia de muchas estrellas, entre las que se encuentra el Sol. El *Sol arrastró consigo a los que hoy llamamos planetas* y abandonó la Nebulosa de Orión.

Desde su formación, el Sol ha pasado cuarenta veces un brazo de la Vía Láctea y pasará seguramente muchas otras veces.

#### **5. Una vaga idea de la realidad**

Lo que se viene de describir es una idea aproximada sobre el nacimiento del Sistema Planetario Solar, formada a partir de los rastros que han dejado eventos ocurridos hace miles de millones de años. En el transcurso del tiempo se han sucedido tantos cataclismos cósmicos que muchos rastros han sido borrados.

Sólo para facilitar la descripción hemos comparado el movimiento de nubes cósmicas con las nubes que se forman en la Tierra. Los cataclismos meteorológicos no dan lugar a agregados de materia similares a las estrellas o los planetas, salvo las gotas de lluvia que caen al suelo.

En las nubes cósmicas, es importante la fuerza de atracción entre la materia. Esta fuerza, llamada *fuerza gravitacional*, hace que la materia se junte, dependiendo de las condiciones del medio ambiente.

Por otro lado, prever la evolución de las nubes cósmicas es más difícil que la meteorología. No siempre se obtiene lo mismo. No todas las estrellas se parecen, ni tampoco los planetas.

Algunos tienen sus propios satélites, otros tienen elegantes anillos, que presentan vistas extraordinariamente bellas.

La masa del Sistema Solar está concentrada en un 99 por ciento en el Sol. La Tierra sólo contiene el 0,2 por ciento de la masa total de los planetas. Estamos en un pequeño planeta de un pequeño sistema planetario, alrededor de una pequeña estrella. Es sobre el planeta Tierra que, miles de millones de años después de su formación, estamos tratando de hacernos una idea de esos tiempos de cataclismos cósmicos que dieron lugar a todo lo que hoy vemos.

## **6. Las galaxias**

Las galaxias aparecen ante nuestros ojos como regiones débilmente luminosas. Con poderosos telescopios se puede descubrir que esas galaxias son conglomerados de estrellas.

Las más cercanas galaxias son las llamadas la Pequeña y la Gran Nube de Magallanes. Estas pueden ser observadas desde el Hemisferio Sur. Se encuentran a 150 mil años luz.

La Vía Láctea conforma el llamado Grupo Local, compuesto de once galaxias, entre las cuales se tienen las Nubes de Magallanes y la Galaxia de Andrómeda.

Más allá del Grupo Local, se observa que las galaxias también están en conglomerados. Uno no puede imaginar qué pasa en los confines del universo. Recientemente se han descubierto miles de cuasares, estrellas de talla pequeña, algunas de las cuales son extraordinariamente luminosas. *Estas estrellas se encuentran en los límites de lo observable, a unos quince mil millones de años luz.* Ello significa que la luz ha sido emitida hace 15 mil millones de años. Mientras más lejos observamos, estaremos más cerca del nacimiento del universo.

De esa forma investigamos lo que pasaba, por ejemplo, hace cuatro años y medio en la estrella Alfa de Centauro, hace dos millones de años en la galaxia de Andrómeda, y hace 15 mil millones de años en el cuasar OQ 172.

Las limitaciones de nuestra observación nos imponen un horizonte más allá del cual es imposible ver algo. Claro que no podemos afirmar que no hay nada.

Si la edad del universo fuera 15 000 millones de años, sería imposible observar más allá de distancias superiores a 15 000 millones de años.

Pero el universo puede ser infinito, en cuyo caso el hombre estaría limitado a ver una pequeñísima fracción de ese universo. Sin embargo, esa pequeñísima fracción ya es algo fantástico.

## **7. Vida de las estrellas**

Hemos descrito cómo nació el Sol, lo que nos da una idea de cómo han nacido muchas estrellas. Las estrellas grandes mueren con una gran explosión llamada *supernova*. La mayoría consumen su combustible compuesto de hidrógeno y helio, lo que les permite irradiar calor y luz.

Para las estrellas se puede definir el nacimiento, infancia, período adulto, vejez y muerte. Algunas veces, las estrellas moribundas, debido a reacciones internas, renacen con brío, pero siempre terminan muriendo. Las estrellas grandes tienen vida corta porque consumen mucho combustible o porque terminan como supernova. A mayor talla, mayor presión y temperatura en el interior de la estrella, y por lo tanto consumo más rápido de combustible.

Las estrellas pueden ser divididas en función de su color (relacionado con la temperatura) y su luminosidad. Se tienen estrellas gigantes, supergigantes y enanas.

La observación y clasificación de las estrellas y la relación con sus edades han llevado a trazar la historia de la vida de las estrellas. Así, como hemos dicho, nuestro Sistema Planetario Solar comenzó como una nube protosolar, hace unos 5 mil millones de años. Luego se convertirá en una gigante roja, después en una nebulosa planetaria. Pero en este proceso el Sol crecerá mucho, la vida desaparecerá de la Tierra y luego los planetas se volatizarán. Finalmente, el Sol emitirá sus últimos rayos luminosos como una enana blanca, para terminar como un pequeño objeto celeste sin interés. Esto dentro de unos 5 mil millones de años.

## **8. Supernovas y agujeros negros**

Las estrellas más grandes tienen un fin diferente. Las estrellas cuatro veces más masivas que el Sol, llegan al estado de gigante roja, para luego, después de algunos millones de años, explotar como una supernova.

En este cataclismo, los restos de la supernova, que no son dispersados, se condensarán bajo la forma de estrella de neutrones, la que se convertiría en un agujero negro. Todavía a no se ha detectado algún agujero negro, pero se sigue buscando afanosamente.

## **9. Las luces de la supernova 1987A**

Lo que hemos dicho hasta ahora de la supernova, es en base a las teorías que existían hasta el 24 de febrero de 1987. Ese día, en la Gran Nube de Magallanes, se observó la espectacular explosión de la estrella Sanduleak, hoy llamada *supernova 1987A*. Las investigaciones realizadas en torno a esta supernova mostraron que se trataba de una supergigante azul. Vemos pues que no sólo las estrellas rojas terminan como supernova.

Más aún, las observaciones de la supernova 1987A han esclarecido varios secretos de la formación y comportamiento de las supernovas.

La estrella Sanduleak se formó como una pequeña condensación de una nube de gas y polvo. La pequeña condensación aceleró los efectos de las fuerzas gravitacionales para formar finalmente la estrella.

La nube inicial estaba formada principalmente por los elementos más livianos, hidrógeno y helio. Elementos más pesados existían en pequeña proporción y se originaron en los núcleos de las estrellas más tempranas. La abundancia de elementos pesados en la Nube de Magallanes es un cuarto de la abundancia de elementos pesados en la Vía Láctea.

Lo más difícil es la condensación. Después de todo parece autosostenerse. Una de las preguntas que surge es qué tipo de fuerzas comienzan la condensación. Como lo hemos dicho, esta condensación puede comenzar por inestabilidades creadas por la colisión de nubes interestelares.

Las supernovas también pueden dar origen a condensaciones. La onda de choque de una explosión de semejante magnitud se propaga en el espacio, comprimiendo la materia del vecindario de la supernova, y dando lugar a la formación de estrellas.

El embrión estelar, o proto estrellas, se contrae por efectos de la gravedad, y en esa contracción se libera energía. Finalmente la densidad es suficiente como para atrapar parte de la energía liberada. Se instala entonces un equilibrio entre la fuerza gravitacional atractiva y la presión interna. La fuerza gravitacional trata de comprimir la estrella y la presión trata de expandirla.

Pero el equilibrio no es eterno, porque la energía liberada aumenta la presión, la que puede ser contrarrestada con mayor contracción. Esto llega a tal presión que se inician procesos nucleares en el interior de la estrella.

La estrella sigue brillando mientras la energía liberada es contrabalanceada por las reacciones nucleares en el interior de la estrella.

La velocidad del proceso de una estrella depende de su masa. A mayor masa, más rápido será el proceso. En ese sentido, cuando se formó la estrella Sanduleak -mucho más pesada que el Sol- en su vecindario se condensaban nubes de gas y polvo.

## **10. La secuencia principal**

Cuando se establecen las reacciones nucleares, se inicia la llamada secuencia principal, que es el período más largo en la vida de las estrellas.

La estrella genera energía fusionando átomos de hidrógeno en helio. Cada cuatro hidrógenos se convierten en un átomo de helio, liberando energía. Como ejemplo, podemos mencionar que el Sol quema cientos de millones de toneladas de hidrógeno por segundo.

Las estrellas abandonarán la secuencia principal más rápido mientras más masivas sean. Las estrellas masivas tienen temperaturas mayores en el interior.

El Sol estará 10 mil millones de años en la secuencia principal. Una estrella con la décima parte de la masa del Sol estará 1 000 millones de años en la secuencia principal. Una estrella como Sanduleak, 20 veces más masiva que el Sol, estará sólo algunos millones de años.

## **11. Más allá de la secuencia principal**

Cuando se consume el hidrógeno del núcleo de la estrella, la gravitación vence la presión y se produce una contracción, hacia una inevitable explosión como una supernova.

La contracción calienta el interior de la estrella. El calor adicional es absorbido por la cobertura de hidrógeno de la estrella, expandiéndose enormemente. La expansión enfría la superficie y emite luz roja, convirtiéndose en una estrella roja supergigante, dependiendo de su masa.

El calor generado también eleva la temperatura del hidrógeno cerca del núcleo, lo que acelera las reacciones nucleares. Así, la estrella es más grande, más roja y más luminosa.

La temperatura llega hasta 100 millones de grados Kelvin. Esto es suficiente para la fusión de helio. Cada tres núcleos de helio se convierten en núcleos de carbono, liberándose energía en el proceso. Luego, el carbono fusiona con helio para formar oxígeno, liberándose también energía. La energía liberada expande el núcleo y contrae la envoltura, lo que eleva la temperatura de la superficie.

Debido a las elevadas temperaturas del núcleo, el quemado de helio es más rápido que el del hidrógeno. Cuando se termina el helio, no hay más energía para contrabalancear la contracción por efecto de la gravedad.

Lo que viene después, depende de la masa de la estrella. Si es una estrella tan masiva como el Sol, el núcleo se contrae y se calienta un poco. Pero la temperatura no es lo suficientemente elevada como para iniciar la fusión nuclear. Finalmente, el núcleo es tan pequeño que los electrones comienzan a resistir la compresión.

De modo que, las estrellas de poca masa se convierten en enanas blancas. Estas tienen tamaño de la Tierra y masa de estrella. La densidad es muy elevada, en cada centímetro cúbico hay una tonelada de masa. Sin otra fuente de energía, la enana blanca muere sin pena ni gloria.

Las enanas blancas tienen masas menores que 1,4 veces la masa del Sol. Estrellas con mayor masa pueden terminar como enanas blancas, con la condición de que expulsen masa, lo que puede ocurrir mediante un viento cósmico, durante fases de gigante, supergigante roja, o de nebulosa planetaria.

## **12. Síntesis nuclear y cebolla cósmica**

*Cuando la masa de una estrella es mayor a 8 masas solares, ésta termina como supernova.*

Cuando Sanduleak explotó, tenía 20 masas solares. En estrellas con esta masa, los elementos fusionan hasta que el núcleo llega a conformarse de hierro. Antes de ello se han formado todos los elementos más livianos que el hierro.

Para comenzar, la contracción del carbono y el oxígeno, formado por fusión de helio, alcanza temperaturas alrededor de 600 millones de grados Kelvin. La presión y la temperatura permite entonces la formación de neón y magnesio. Esta secuencia se repite: cada vez que termina un proceso de quemado, el núcleo se contrae y se inicia una nueva fase de reacciones nucleares. Cuando la temperatura alcanza 1 a 3 mil millones de grados Kelvin se quema neón, luego el oxígeno y, finalmente, el silicio se quema para formarse hierro.

Entonces, la estrella toma forma de cebolla. Un núcleo de hierro es rodeado por una capa de silicio, la que a su vez es rodeada de una capa de oxígeno, luego carbón, helio e hidrógeno. Por supuesto que las capas no son puras y entre capa y capa continúan las reacciones nucleares.

Como la temperatura del núcleo crece, las reacciones nucleares son cada vez más rápidas. Así, Sanduleak tardó varios millones de años para convertir su hidrógeno en helio, pero para transformar su helio en carbono tardó sólo un millón de años. Luego todo ocurre muy rápido. El quemado de carbón tardó algunos cientos de años. El quemado de neón tardó un año y el del oxígeno algunos meses. El quemado de silicio tomó un par de días.

Pero, a esta altura, sigue habiendo hidrógeno y helio, de los cuales podría formarse varios soles. Cuando la supernova explota, ese helio e hidrógeno serán despedidos para formar otras estrellas.

## **13. Explosión de una estrella**

El hierro es estable, de modo que la fusión del silicio consume y no libera energía. Por ello, cuando comienza el quemado de silicio para formar hierro, se aproxima el colapso.

El hierro formado de la fusión de silicio va formando el núcleo de la estrella. En la superficie del núcleo, el silicio sigue produciendo hierro sin liberación de energía. La densidad y la presión en el núcleo aumentan muy rápidamente, hasta llegar a una densidad entre 1 000 millones y 10 mil millones de gramos por centímetro cúbico, y una temperatura de varios miles de millones de



grados Kelvin. El radio del núcleo llega a varios miles de kilómetros.

El colapso es muy rápido y, al principio, no afecta la superficie de la estrella. El colapso es entonces un fenómeno que da lugar a una explosión del núcleo de la estrella.

La velocidad del colapso aumenta muy rápidamente. La densidad y la presión produce reacciones entre electrones y protones para dar lugar a neutrones y neutrinos en grandes cantidades. Los neutrinos interactúan con el núcleo de la estrella -el que alcanza una densidad de 100 mil millones de gramos por centímetro cúbico- quedando atrapados por su alta densidad.

En la frontera entre el núcleo y el resto, el colapso ocurre a la velocidad de 70 000 kilómetros por segundo.

El colapso lleva al núcleo interno a densidades de 200 billones de gramos por centímetro cúbico. Después, el núcleo se endurece. Continúa la contracción por unas fracciones de milésimas de segundo. La densidad llega a su máximo de 800 billones de gramos por centímetro cúbico y una temperatura de 100 mil millones de grados Kelvin.

La estrella Sanduleak tomó varios millones de años para formarse, pero el núcleo de hierro colapsó en una centésima de segundo.

El núcleo interno de la estrella rebotó mientras que la parte externa del núcleo siguió colapsando. Ambas partes colisionaron produciendo una onda de choque. Así surgió la explosión supernova 1987A.

## **14. La supernova vista desde la Tierra**

La explosión provocó la disminución de la densidad y la liberación de neutrinos en algunas centésimas de segundo, pero tardaron varios segundos en salir, debido a la opacidad del núcleo ante los neutrinos. Estos viajaron luego a velocidad de la luz y fueron detectados en la Tierra, dando informaciones de lo que sucedió en el núcleo de la estrella en explosión. La cantidad de energía liberada en neutrinos fue  $3 \times 10^{46}$  ergios, que significa mil veces la energía liberada por el Sol durante su vida total de 10 mil millones de años (o de la energía liberada por la galaxia Vía Láctea durante 10 años). La energía en neutrinos es liberada en algunos segundos.

Estos eventos predichos por la teoría han sido comprobados por las observaciones de la supernova 1987A. Al mismo tiempo, los científicos han podido determinar los límites de la masa del neutrino, la vida media del neutrino y otros aspectos de la física de partículas.

## **15. Fin de una estrella**

Después de la explosión, el núcleo de la estrella alcanza la densidad nuclear, convirtiéndose algo así como en un gigantesco núcleo atómico, con una masa de 1,4 masas solares. Los neutrones proporcionan la presión para impedir mayor contracción. Así se formó una estrella de neutrones, la que podría ser visible alguna vez por la radiación que emita en el futuro.

Los datos sobre los neutrinos permiten deducir que el tamaño de la estrella de neutrones es de 10 a 20 kilómetros de diámetro.

Existe aún mucho que investigar sobre la explosión de las estrellas. Entre estas interrogantes tenemos >cómo la onda de choque pasa a través de la frontera en colapso? >qué pasa con los elementos pesados formados por reacciones nucleares en la supernova?

La onda de choque alcanzó la superficie de la estrella en una hora y media después del colapso de Sanduleak. Hasta ese momento, ninguna señal electromagnética fue emitida al exterior de la estrella.

Desafortunadamente, cuando apareció la supernova, los satélites observadores no estaban dirigidos hacia la Gran Nube de Magallanes. Esto impidió detectar la radiación electromagnética, valiosa información para comprobar las teorías sobre evolución de las estrellas.

La supernova comenzó a verse muy tarde, después que la radiación de alta energía llegó a la Tierra.

## **16. Observación de la explosión**

El primer interés se concentró en la luz de la explosión. Ello permitió determinar que la posición

de la supernova correspondía a la estrella Sanduleak -69[EQUATION]202. Se trataba de estrella azul supergigante con unas 20 masas solares y una magnitud visual de 12,36.

La teoría predecía que supernovas como la 1987A podía ocurrir a partir de una gigante roja. Pero ello no fue grave porque podía explicarse aceptando algunas alteraciones pequeñas en las estrellas rojas. La pregunta que surge ahora es si Sanduleak fue alguna vez una estrella roja supergigante.

Actualmente se siguen observando los restos de la supernova con las teorías que se tiene para comparar continuamente.

## 4. Búsqueda de materia y energía

### 1. Mundo atómico y nuclear

Así como los astrónomos han buscado febrilmente los secretos del cosmos, usando telescopios cada vez más poderosos, numerosos grupos de físicos están empeñados en encontrar los componentes elementales de la materia y las fuerzas que la dominan. Para ello usan instrumentos cuyo grado de complejidad y tamaño crece en la medida que se introducen más en las profundidades infinitesimales de los núcleos atómicos.

Desde fines del siglo XIX comenzó a descubrirse una serie de partículas que componen la materia, creando un abrupto renacimiento de los conceptos atómicos iniciados por filósofos griegos. En griego, la palabra átomo significa indivisible, lo que es una muestra de lo que buscaría el hombre en el siglo XX: las partes indivisibles de la materia.

La pregunta que desde entonces domina los laboratorios se refiere a los componentes elementales de la materia. Ello ha llevado a buscar las partículas más pequeñas, lo que se ha hecho desde fines del siglo XIX.

En 1897, el físico británico J. J. Thomson descubre una partícula de carga negativa, -[EQUATION], la que llamó electrón. El electrón era entonces la partícula más pequeña conocida. Por otro lado, se observó que la materia absorbe o emite luz. Con ello se estaba iniciando el camino hacia el mundo infinitesimal.

Thomson interpreta los resultados de sus experimentos como un indicio de que el átomo es una esfera cargada positivamente conteniendo electrones un poco como las pasas se colocan en un pastel.

En 1898 Henri Becquerel descubre que el uranio emitía una misteriosa radiactividad. Luego, trabajos de Marie y Pierre Curie llevan a identificar tres tipos de radiación: [EQUATION], [EQUATION] y [EQUATION].

Los rayos [EQUATION] eran partículas con dos cargas [EQUATION] y alrededor de 4 unidades de masa. En 1909, Ernest Rutherford prueba que esos rayos no eran otra cosa que núcleos atómicos de helio. Los rayos [EQUATION] son partículas con carga negativa -[EQUATION], que luego fueron identificados como electrones. La radiación gamma no tienen carga ni masa. Se trata de radiación electromagnética con muy cortas longitudes de onda.

En 1913, Ernest Rutherford, bombardeando láminas de oro con partículas [EQUATION], descubre que el átomo estaba compuesto de un núcleo pequeño, de un radio de aproximadamente de  $10^{-14}$  m, donde estaba concentrada casi toda la masa atómica y alrededor del cual giraban los electrones en órbitas de un radio aproximado de  $10^{-10}$  m. El número de electrones, Z, era igual al número atómico. La neutralidad de carga del átomo exigía entonces que el núcleo tenga la carga  $Z[EQUATION]$ . De estos resultados nace entonces el *modelo planetario* del átomo.

Rutherford era tan infatigable como brillante, en 1919 logra otro descubrimiento de trascendencia. Se trata del protón, como núcleo del átomo de hidrógeno, resultante del bombardeo del nitrógeno 14 ( $Z = 7$  y  $A = 14$ ) con partículas [EQUATION], es decir de núcleos de helio 4 ( $Z = 2$ ,  $A = 4$ ).

La reacción producida es la siguiente:

$$[EQUATION]$$

(1)

Se tiene evidencias de que el protón es componente del núcleo y que el número de protones es igual a Z. Por otro lado se observa que la masa atómica es aproximadamente un múltiplo de la masa del protón.

Para completar una idea coherente del átomo, en 1932, James Chadwick descubre el neutrón como otro de sus componentes. La masa del neutrón es ligeramente mayor a la del protón.

Entonces, el núcleo atómico era descrito como compuesto por A nucleones: Z protones N neutrones ( $N = A - Z$ ).

Resultados de los trabajos arriba descritos llevaron a la comprensión cabal del comportamiento atómico, permitiendo explicar una serie de fenómenos de los elementos que tienen que ver con la vida diaria.

El hidrógeno 1 aparece como el átomo más simple de la naturaleza, con  $Z = 1$  y  $A = 1$ , mientras que el átomo más pesado era el uranio 238, [EQUATION]U.

La simplicidad del átomo y la explicación de su comportamiento en relación con los fenómenos naturales de la vida cotidiana eran fascinantes.

Pero, poco a poco, se fue detectando una serie de otras partículas, presentándose la naturaleza como si fuera un eterno desafío para la curiosidad del hombre.

## 2. Los límites de la materia

La persecución de las partículas elementales de la materia, desde los aislados laboratorios repletos de detectores y sistemas de tratamiento de datos, terminaban en publicaciones donde se volcaban los resultados, generando los héroes del siglo XX en el mundo de la ciencia. El ambiente científico se iba convirtiendo en un mundo aparte, donde la publicación parecía convertirse en el objetivo final. *Publish or perish*, publica o perece, era la consigna acuñada en los muros de cada laboratorio. La pasión por encontrar nuevos secretos de las partículas era sólo comparada con la obsesión por publicar.

Los físicos atómicos y nucleares llegaron a constituirse en símbolos del científico moderno. Las trascendentales aplicaciones industriales, y las controvertidas aplicaciones para fines militares de los conocimientos del mundo nuclear, permitieron solicitar impresionantes presupuestos para seguir buscando los secretos de la materia. Los gobiernos asignaban recursos sabiendo que la investigación, a la larga, siempre ha resultado beneficiosa para los países descubridores.

Ante el impresionante poder nuclear que resultaba de las investigaciones -representado históricamente en la bomba atómica- hasta los países con escasos recursos económicos, se esforzaron y otorgaron recursos para iniciar la aventura nuclear<sup>xii</sup>.

Numerosos laboratorios nacieron con el propósito de dominar las intensas fuerzas que controlan el mundo infinitesimal. Los científicos aprovecharon el interés de los gobiernos en las inmensas posibilidades de la ciencia nuclear para obtener grandes facilidades experimentales, apropiadas para la investigación de los más profundos secretos de la naturaleza. Con ello atendió an su insaciable curiosidad que los lleva a explorar y ampliar las fronteras del conocimiento humano.

A decir verdad, a pesar de los enormes laboratorios instalados y los miles de científicos trabajando en el tema, aún quedan interrogantes, las que son cada vez más difíciles de responder.

Se puede decir que la naturaleza se quedará con sus secretos más profundos. Los hombres, limitados en energía y tecnología, habrán tenido el placer de explicar lo que pueden observar, pero parece imposible por ahora crear instrumentos que miren el mundo más pequeño. Ni siquiera se sabe hasta dónde podemos "pulverizar" la materia.

En ese sentido, la naturaleza presenta los límites para el hombre. Parece entonces que cualquier avance será sólo un paso en un camino que se hace más difícil a medida que uno cree acercarse a la meta.

## 3. Choques destructores

Los científicos que se han dedicado a "pulverizar" la materia, en granos cada vez más pequeños, han logrado una serie de descubrimientos que los ha llevado a tener una imagen más o menos simplificada de esa materia.

En primer lugar, se descubrió que para dividir la materia es necesario energía. Para pulverizar un ladrillo necesitamos energía que será usada a través de un martillo, o de un molino electromecánico. En los molinos electromecánicos más sofisticados se obtienen partículas microscópicas.

Una forma más familiar para los físicos modernos, de pulverizar un ladrillo, es lanzarlo a gran

---

<sup>xii</sup> Ver por ejemplo el caso argentino en *El secreto atómico de Huemuel*, Mario Mariscotti, Sudamericana/Planeta (editores) S.A., Buenos Aires, 1985

velocidad contra otro en reposo y observar los pedazos, que como productos de la colisión salen disparados en toda dirección.

Para la máxima comprensión del fenómeno sería necesario instalar un sistema de detección que permita medir la masa, energía cinética y la orientación del movimiento de cada uno de los fragmentos.

Con este sistema se observa que a mayor energía cinética (equivalente a mayor velocidad del ladrillo para una determinada masa) más pequeños serán los fragmentos obtenidos.

Si el ladrillo tiene poca energía cinética sólo se logra otorgar parte de ésta al ladrillo que sirvió de blanco, que después del choque se pone en movimiento.

Para aumentar la probabilidad de romper los ladrillos será necesario aumentar la energía del proyectil. Pero siempre se tendrá el problema que parte de la energía será usada para poner en movimiento el blanco.

La eficacia para romper los ladrillos aumenta si el choque es frontal, es decir que los ladrillos se acercan el uno al otro con igual velocidad. En el choque frontal toda la energía es usada para romper los ladrillos.

Para explicar de otra forma, pensemos en un automóvil que choca con otro que está en reposo. Parte de la energía que traía el automóvil es usada para empujar el otro que estaba en reposo. Pero si los automóviles chocan frontalmente, toda la energía será usada en la destrucción mutua de los automóviles.

La experiencia muestra que a mayor velocidad de los vehículos que chocan, mayor es el grado de destrucción. También comprendemos que las velocidades a las que llegan los automóviles tienen límites que se pueden alcanzar con los medios que están a nuestro alcance.

Pero si nuestro deseo es pulverizar la materia en el mayor grado posible, entonces podemos colisionar las partículas más pequeñas que estén a nuestro alcance. Para ello es necesario que las partículas pequeñas tengan velocidades elevadas. Más propiamente deberíamos decir partículas con valores elevados de energía cinética, porque según las leyes de la relatividad de Albert Einstein, el límite de las velocidades que pueden alcanzar los cuerpos es la velocidad de la luz ( $c = 299\,792\,458$  metros por segundo). Según la relatividad, será más difícil acelerar las partículas en la medida de que tengan velocidades más cercanas a  $c$ . Ello se debe a que la masa, [EQUATION], de una partícula aumenta con la velocidad, según la relación,

$$[EQUATION]$$

(2)

donde [EQUATION] es la masa en reposo de la partícula.

Para lograr que las partículas adquieran altos valores energéticos se usan los llamados *aceleradores*, que más propiamente deberían llamarse entonces *energetizadores*.

#### **4. La energía concentrada**

La búsqueda de partículas más pequeñas por intermedio de colisión de partículas muy energéticas, generaba la necesidad de concentrar grandes cantidades de energía en regiones de poco volumen.

Entonces, como una rebelión de la materia, en lugar de pulverizar las partículas, se produce más masa de la que se tenía antes del choque. La conversión de la energía en masa genera la búsqueda de partículas nuevas, las que se multiplican y crea una sensación de caos en las mentes de los físicos. De donde salen tantas partículas y >¿cómo encontrarles una organización coherente? es la pregunta que crece en la mente de los físicos que tratan de esclarecer los secretos de la naturaleza en una visión simple.

Una rápida observación de hechos en la vida diaria nos hace notar que la energía concentrada genera fenómenos sorprendentes. Por ejemplo, si colocamos una mano ante el sol en un día normal, no tenemos ningún problema; pero si concentramos la energía que llega a la mano, con ayuda de una lupa, sobre una región pequeña de la misma, entonces probablemente suframos una quemadura.

Cuando una cantidad pequeña de energía de la vida diaria, es concentrada en regiones de la talla de  $10^{-10}$  m surgen nuevas partículas de masa. De modo que se comprueba la teoría de Albert Einstein según la cual la materia es una forma compacta y condensada de energía. Einstein planteó su célebre fórmula [EQUATION], que significaba que una masa [EQUATION] era la concentración de una energía [EQUATION] equivalente a [EQUATION]. Ello permite que la masa de una partícula pueda ser expresada en unidades de energía.

La energía o la masa de las partículas es expresada en electronvoltios, [EQUATION]. Un [EQUATION] es la energía que gana un electrón al pasar por una diferencia de potencial eléctrico de 1 voltio. Dependiendo de la magnitud, la energía de las partículas se expresa en

kiloelectronvoltios  $[EQUATION]$  ( $10[EQUATION]$ ), megaelectronvoltios  $[EQUATION]$  ( $10[EQUATION]$   $[EQUATION]$ ), gigaelectronvoltios  $[EQUATION]$  ( $10[EQUATION]$   $[EQUATION]$ ), etc<sup>xiii</sup>.

Las partículas que nacen de la concentración de energía en dimensiones arriba mencionadas son invisibles para el hombre. Por otro lado, esas partículas son muy inestables, se desintegran en fracciones de segundo, volviendo a tomar su forma de energía o transformándose en partículas estables.

Estas partículas estables son las que finalmente forman todo lo que vemos en la vida diaria. El protón, el neutrón y el electrón son las tres partículas que componen los animales, vegetales y minerales.

Surge la pregunta sobre el origen de los protones, neutrones y electrones. La respuesta fue encontrada en el estudio del cosmos, la que nos dio la teoría del Big Bang. Aquí es donde se encuentran los investigadores del microcosmos y los del macrocosmos.

## 5. Radiación cósmica

Fue el físico austriaco Victor Hess, midiendo la conductividad del aire en alturas -con ayuda de globos aerostáticos- descubre que la conductividad del aire aumentaba con la altura. Este fue el indicio que había radiación que venía del espacio.

Si bien la radiactividad era conocida a fines del siglo pasado como emitida por sustancias llamadas radiactivas, en el aire se encuentran numerosas partículas que vienen desde el espacio, y vienen con energías muy elevadas. La mayoría de estas partículas está compuesta de protones.

El estudio de la radiación cósmica a principios de siglo permitió comprobar la conversión de energía en masa. Esta comprobación fue posible por la enorme cantidad de energía que traen las partículas cósmicas, las que interactuaban con partículas del aire y permitían observar cómo esa energía daba lugar a otras partículas. Las partículas generadas en la reacción fueron identificadas con detectores de radiación desarrollados por necesidades de la física.

Al principio sólo se medía la conductividad del aire, que era un indicio de la presencia de partículas cósmicas. Luego se construyeron detectores que generaban una señal eléctrica al paso de una partícula cósmica. Después vinieron las emulsiones fotográficas que mostraban en el microscopio puntos negros por donde habían pasado las partículas.

Un avance importante en instrumentación para la detección de partículas lo constituyó la cámara de niebla, en las que se dibujaban trazos finos de niebla similares a los que dejan los aviones a reacción que viajan a elevadas alturas.

Con ayuda principalmente de las emulsiones fotográficas, las cámaras de nieblas y los contadores se estudiaron las partículas hasta los años 60.

## 6. Nuevas partículas

Hasta 1932 se conocían entonces el electrón, el protón y el neutrón, partículas que explicaban las propiedades del átomo. La pregunta que surge es si la energía de los rayos cósmicos sólo podría condensarse en estas partículas.

En 1932, el físico Carl Anderson, experimentando con los rayos cósmicos, descubrió una carga positiva con la misma masa que el electrón. Esta partícula, llamada luego *positrón*,  $[EQUATION]$ , fue detectada con ayuda de una cámara de niebla. La existencia del positrón fue predicha por Paul Dirac en 1928, como la antipartícula del electrón.

A partir del descubrimiento del positrón, los físicos se lanzaron en la búsqueda de nuevas partículas, varias de las cuales habían sido predichas por las teorías que florecieron entre los físicos.

Algunas de las partículas predichas eran difíciles de detectar, como es el caso del *neutrino*,  $[EQUATION]$ , una partícula neutra y de masa nula o casi nula. Esta partícula predicha en 1930 por Wolfgang Pauli fue descubierta en 1956 por Clyde Cowan y Fred Reines en Los Alamos, EEUU. La reacción usada por Cowan y Reines para descubrir el neutrino fue

$$[EQUATION]$$

que es la reacción inversa a la desintegración del neutrón:

(3)

---

<sup>xiii</sup> la masa del protón es 938,28  $[EQUATION]$ , la del neutrón 939,57  $[EQUATION]$  y la del electrón 0,511  $[EQUATION]$ .

[EQUATION]

(4)

es decir que el neutrón se desintegra para dar lugar a un protón, un positrón y un *neutrino electrónico*.

En 1932, el físico japonés Hideki Yukawa -basado en la tesis que toda fuerza debe tener un intermediario- para explicar la fuerza que mantiene a los nucleones en el núcleo planteó la existencia del *mesón pi*, [EQUATION]. Esta partícula fue descubierta en 1947 por los físicos italianos Marcell Conversi, Ettore Pancini y Oreste Piccioni.

La partícula [EQUATION] es generada en colisiones de partículas cósmicas con núcleos en el aire a elevadas alturas. Dado que la probabilidad de interacción de la partícula [EQUATION] es elevada, ésta no viaja lejos en el aire. La interacción de la partícula [EQUATION] con los núcleos da lugar a la partícula llamada *muón*, [EQUATION], la que por interactuar poco con la materia llega al nivel del mar.

Entre 1947 y 1964 fueron descubiertas varias partículas inestables -producto de la conversión de la energía en masa- que se clasificaron en familias de partículas con propiedades similares.

En 1947 surgió el *mesón K* o *kaón*, [EQUATION], de la cámara de niebla estudiada por George Rochester y Clifford Butler en la Universidad de Manchester. Estos físicos observaron que de un mismo punto salían dos trayectorias que formaban una V. La interpretación fue que una partícula cósmica neutra -por lo tanto no dejaba rastro- se desintegraba para formar dos partículas.

En 1949, Cecil Powell y el grupo de Bristol, observando emulsiones fotográficas, descubrieron una partícula que decaía en tres piones. Esta partícula fue llamada *mesón tau* [EQUATION].

En 1957 pudieron comprender que las partículas [EQUATION] y las partículas [EQUATION] eran estados diferentes del kaón, que puede ser positiva o negativa con 494 [EQUATION] de masa y dos neutras con una masa de 498 [EQUATION].

A principios de los años cincuenta se encontró otra partícula [EQUATION], aún más pesada que la anterior. A esta partícula neutra que tenía una masa de 1115 [EQUATION], que era 20% más pesada que el neutrón, se le llamó *lambda*, [EQUATION].

## 7. Los aceleradores de partículas

La dificultad que surge en el estudio de los rayos cósmicos es el bajo flujo de los mismos, que no genera reacciones en cantidades suficientes como para llegar a conclusiones definitivas.

Por ello es que se han construido aceleradores que, además de generar partículas con gran energía, logran concentrarlas en regiones muy reducidas, rodeadas de detectores que dan información sobre los eventos que suceden a las colisiones.

Es fácil imaginar que a mayor energía y flujo de partículas, mayor será la probabilidad de crear y detectar nuevas partículas. Por esta razón, los laboratorios de partículas se esfuerzan por construir los aceleradores más poderosos.

Para observar las partículas creadas es necesario contar con detectores que no dejen escapar nada que se genere en la colisión de las partículas. Estos detectores deberán ser capaces de determinar las diversas características de las partículas.

De esa forma también se está investigando los procesos que se generan en el mundo infinitesimal.

Los aceleradores comenzaron a construirse desde principios del siglo XX. La carrera de los físicos consistía en alcanzar la mayor energía posible.

Entre 1928 y 1932, John D. Cockroft y Ernest Walton construyeron un acelerador que generaba cientos de miles de voltios entre dos electrodos. Así, los protones generados por ionización del hidrógeno eran acelerados hasta alcanzar la energía de 750 [EQUATION].

Hubo otros aceleradores. Sin embargo, la energía de las partículas aceleradas en los aceleradores de la primera mitad del siglo XX no era suficiente como para producir materia.

En 1954 se dio un gran paso con el acelerador *sincrotrón betatrón* de Berkeley, en California, EEUU. Las fuerzas eléctricas del betatrón aceleraban protones hasta alcanzar energías de 6,4 [EQUATION] que eran guiados por campos magnéticos. Con el betatrón era posible producir pares de protones y antiprotones.

Los antiprotones (con la misma masa del protón pero con carga negativa) fueron descubiertos por Owen Chamberlain y Emilio Segre, disparando protones de 6 [EQUATION] contra un blanco en reposo en la reacción:

[EQUATION]

(5)

En la carrera de los aceleradores las dimensiones fueron creciendo muy rápidamente. El

betatrón pesaba más de de 1 000 toneladas y medía varias decenas de metros. En 1959 el CERN se construye un acelerador que tiene un diámetro de 200 metros. El CERN tiene también un sincrotrón de un diámetro de 2,2 kilómetros. Desde entonces se pensaba en el futuro acelerador LEP (*Large Electron-Positron*), en el que los electrones entrarán en colisión con los *antielectrones*, tendrá un diámetro superior a ocho kilómetros.

## **8. Proliferación de partículas**

Habiéndose comprendido que la concentración de energía daba lugar a partículas de materia, el ejercicio rutinario de los físicos era colisionar partículas de la mayor energía a posible.

Producto de ello, los físicos se vieron invadidos por una serie de partículas que significaron una proliferación desconcertante para los investigadores, los que se sentían cómodos explicando todo con sus protones, neutrones y electrones. Lo que era interesante en el trabajo intelectual de los científicos cazadores de partículas era que, algunas veces, la existencia de éstas era predicha, ante la necesidad de explicar alguna observación o un cálculo. Ello significaba, entonces, que las partículas predichas traían orden en la física, es decir que aportaban una explicación coherente de los fenómenos donde encajaban.

Las partículas descubiertas sorpresivamente, sin haber sido predichas por alguna teoría, traían con ellas una fuente de nuevas preocupaciones y trabajo para los físicos, los que se enfrascaban en especulaciones o búsqueda de teorías. Estas teorías algunas veces aportaban explicaciones de partículas o fenómenos observados, al mismo tiempo que planteaban la necesidad de encontrar nuevas partículas o fenómenos.

En ese camino han trabajado y siguen trabajando miles de físicos con la sola esperanza de encontrar una teoría que explique la existencia de todas las partículas y sus comportamientos en la naturaleza. Además, esperan que ello explique también los procesos que dieron lugar al universo.

Hasta ahora, en los laboratorios se siguen produciendo partículas nuevas y se mantiene con el deseo de construir aceleradores más grandes.

Actualmente, el acelerador más grande con el que cuentan los físicos se encuentra en el CERN. El gran acelerador de protones del CERN otorga una energía superior a 400 GeV.

El deseo de los físicos choca algunas veces con la realidad económica de los países y las prioridades nacionales. Además de las limitaciones económicas, se levantan numerosos grupos de investigadores que se dedican a temas mucho más relacionados con los problemas cotidianos del desarrollo de la humanidad.

Actualmente, los nuevos materiales y la biología molecular son los temas de investigación cuyos resultados se piensa puede traer consigo mejoras en la calidad de vida de la humanidad.

Esa realidad hizo imposible que el Congreso de los EEUU apruebe la construcción del acelerador SSC (*Superconducting Super Collider*), más conocido como *Super Collider*, super colisionador. Muchas voces se han levantado para criticar la decisión del Congreso, afirmando que se trata de un suicidio científico y tecnológico o, por lo menos, una ceguera que puede costar caro en el mediano plazo.

De esa forma, EEUU perderá definitivamente el liderazgo en las ciencias nucleares y de altas energías que había mantenido indiscutiblemente durante un cuarto de siglo después de la Segunda Guerra Mundial.

El CERN surge entonces como la única esperanza de mediano plazo para que se siga investigando los límites de la materia. En este esfuerzo se ha convocado también a todos los países del planeta. Aquellos que quieran participar en la aventura en el mundo infinitesimal deberán proporcionar recursos en la medida de sus posibilidades.

Algunos países latinoamericanos ya están participando en esa aventura. Tanto México, como Argentina, Brasil y Chile, realizan trabajos sobre física de partículas, en colaboración con EEUU y Europa.

En el Perú, el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONCYTEC, ha firmado con el CERN un convenio de colaboración para promover la formación y la investigación en física de partículas. Ver anexo 8-B.

Cabe señalar que para promover el desarrollo de la física en el Perú, el CONCYTEC ha firmado un convenio de colaboración con el Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN), la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM), la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP). Ver anexo 8-A. Según este convenio, el IPEN cede en uso un ambiente para la ejecución del proyecto, donde trabajarán los profesores y alumnos de postgrado de física de las universidades. Asimismo, los

experimentos de formación se desarrollarán en los laboratorios del IPEN, los que constituyen la mayor inversión que ha realizado el Estado peruano en infraestructura científica y tecnológica.

## 5. Las teorías de la unidad

*Origen del Universo y Altas Energías/M. Montoya Las teorías de la unidad*

### 1. Campos electromagnéticos y gravitacionales

En 1972, el físico peruano José Carlos del Prado estaba concentrado en la teoría de *unificación del campo electromagnético y el gravitacional* propuesta por Albert Einstein. Del Prado me contagié su fascinación, por lo que me vi envuelto en un trabajo de tesis de maestría en la Escuela de Graduados de la Universidad Nacional de Ingeniería. Intuitivamente, los físicos creían que al encontrar una teoría única para ambos campos todo sería fácil de comprender.

Por otro lado, las teorías de unificación eran una forma de encontrar el orden y la estética en la naturaleza. El electromagnetismo había surgido naturalmente de la búsqueda de unidad y belleza del campo eléctrico y el campo magnético.

La fuerza eléctrica es ejercida por una carga sobre otra, independientemente de su estado de movimiento. La fuerza magnética es ejercida por una carga en movimiento sobre otra carga en movimiento. En el fondo, el origen era el mismo pero su manifestación era de acuerdo al estado dinámico de las cargas. Es más, la variación del campo eléctrico generaba variaciones en el campo magnético y viceversa. Ello llevó a plantearse la posibilidad de que ambos campos obedezcan las mismas ecuaciones.

Fue el físico escocés James Clerk Maxwell (1831-1879) quien fundó la *teoría electromagnética* sobre las bases de los trabajos experimentales de Michael Faraday (1791-1867).

Las matemáticas eran bellas, tenían una estética que surgía de la naturaleza como las flores o como el brillo de las estrellas, inimitables, sólo comparables con los fuegos artificiales, los que tomando infinitas formas venían de las reacciones naturales de la química.

Sin embargo, tales ecuaciones no son fácilmente comprendidas por los físicos experimentales, los que prefieren fórmulas que puedan ser aplicadas directamente a sus mediciones. En 1857, Faraday escribe una carta a Maxwell en la que, entre otras cosas, le preguntaba "Cuando un matemático, comprometido en el estudio de acciones y resultados físicos, ha llegado a sus conclusiones, ¿no pueden expresarlas en lenguaje común de manera tan completa, clara y definitiva que en sus fórmulas matemáticas?". Luego preguntaba si era posible traducir "esos jeroglíficos de manera que los experimentales puedan trabajar"<sup>xiv</sup>.

Veamos el tema de la gravitación. El *campo gravitacional* tiene sus bases en el trabajo de Isaac Newton (1642 - 1727) quien unificó la física que explicaba la caída libre de los cuerpos con la mecánica celeste que gobernaba el movimiento de los planetas.

Después de un largo reinado de la mecánica newtoniana, Albert Einstein, en 1915, planteó la *teoría general de la relatividad*, en la que la gravitación apareció como el campo que se originaba en la masa. La masa crea el campo gravitacional, el que da lugar también a ondas gravitacionales, en forma similar a la forma como se generan las ondas electromagnéticas.

El sueño de Albert Einstein fue obtener una teoría única para el campo gravitacional y el campo electromagnético, dando lugar a la llamada teoría unitaria del campo no simétrico, denominación que caracterizaba la no simetría de los tensores representativos del nuevo campo único, en contraste con la simetría de los tensores de la gravitación y la antisimetría de los tensores del electromagnetismo. Como puede notarse, las propiedades de simetría o antisimetría, conceptos relacionados con la estética o la geometría, surgen en las matemáticas que describen la naturaleza.

Un poco en el sentido de la demanda de Faraday a Maxwell, quisimos emplear un formalismo más relacionado con el trabajo experimental, dando lugar a la tesis titulada *Análisis cronométricamente invariante de la teoría unitaria del campo no simétrico*<sup>xv</sup>. Fueron años de apasionante trabajo, pero también de toma de conciencia de que la teoría a me causaba un sentimiento de estar viajando mentalmente por el cosmos, lejos de las preocupaciones de la

<sup>xiv</sup> Emilio Segre, "Personaggi e scoperte della Fisica classica", Ediciones Arnoldo Mondadori, 1983

<sup>xv</sup> Tesis sustentada en la Escuela de Postgrado de la Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, 1974



mayoría de los peruanos.

En mi mente cruzaban miles de especulaciones, entre las cuales se acentuaba la idea que, de existir los platillos voladores, éstos tenían que dominar las consecuencias experimentales de la teoría que une el campo gravitacional y el electromagnético. Teóricamente, jugando con cualquiera de los dos campos podí a inducirse variaciones en el otro. Pensaba que de las mismas formas en la que se generaba un electroimán, podía construirse un aparato para crear un campo antigravitacional. De ese modo podría ser posible desplazarse y controlar una nave especial sin necesidad de los reactores actuales.

Las ecuaciones resultantes, que generaban relaciones entre los campos electromagnéticos y gravitacionales, expresadas en un formalismo tridimensional, eran "kilométricas". Cuando presenté el trabajo en el I Simposio Peruano de Física, en el Touring Club de Lima, los símbolos de las fórmulas los dibujé tan pequeños que el Prof. Holguer Valqui, con su conocido tono irónico, preguntó: ">Ha escrito Ud. los caracteres tan pequeños como para que no los podamos leer?".

## 2. Mensajeros de las fuerzas

Cuando dos personas quieren comunicarse utilizan señales que siempre resultan ser algo físico. Aún cuando el código de comunicación es complejo, el mensajero puede ser relativamente simple, dependiendo de las capacidades de los seres que se comunican. Veamos algunos ejemplos.

Entre dos personas normales la comunicación oral implica la emisión de sonido usando las cuerdas vocales y la recepción de las señales con el sistema auditivo. En esta comunicación se intercambia energía que viaja en forma de ondas sonoras. En ese sentido, el sistema de comunicación es bastante dispendioso en energía, puesto que el sonido se emite en toda dirección, sólo para ser usado la pequeña parte que llega al oído.

Entre dos sordomudos, el mensaje es con señales visuales. En este caso, el mensaje va en la luz emitida por cada uno de los que intercambian mensajes. Si hubiera una oscuridad total, este tipo de mensajes sería imposible.

Lo que si está claro es que la comunicación entre dos personas requiere de todas formas un intercambio de algo, que puede eventualmente ser detectado por terceros.

Independientemente del tipo de comunicación, ésta se realiza para determinados fines, lo que implica acciones. Por ejemplo, una señal determinada podía generar el acercamiento de dos personas.

La comunicación entre dos cuerpos o partículas se llama *interacción*. La interacción gravitacional genera la atracción entre dos cuerpos, con una fuerza que es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre esos cuerpos, según la relación

$$[EQUATION]$$

(6)

donde [EQUATION] y [EQUATION] son las masas de los dos cuerpos, [EQUATION] su respectiva separación y [EQUATION] una constante universal.

La gravitación tiene un intermediario que es el *gravitón*, y todo cuerpo emite ondas gravitacionales. Estas ondas gravitacionales son muy difíciles de detectar en la vida diaria. La primera vez que se tuvo alguna evidencia de su existencia fue cuando Russell Hulse y Joseph Taylor, en 1974, descubrieron un pulsar binario, cuerpos celestes masivos y que rotan a gran velocidad, emitiendo ondas gravitacionales, y perdiendo por lo tanto energía. Por ese descubrimiento, más tarde Hulse y Taylor serían distinguidos con el premio Nobel.

La interacción electromagnética es más compleja que la gravitacional. Por ejemplo, entre dos cargas en reposo existe la fuerza electrostática cuya intensidad también es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, según la fórmula

$$[EQUATION]$$

(7)

donde [EQUATION] y [EQUATION] son las cargas y [EQUATION] es una constante universal (diferente a [EQUATION]). El sentido de la fuerza puede ser de atracción si las cargas son de signos opuestos y de repulsión si las cargas son de signos iguales.

Los intermediarios de la interacción electromagnética son los fotones, los que dan lugar a las ondas electromagnéticas, muy fáciles de detectar con instrumentos convencionales.

Tanto los gravitones como los fotones no tienen masa y su alcance es infinito, es decir que dos cuerpos muy alejados siguen intercambiando fotones o gravitones. Claro que a mayor distancia menor será la intensidad de interacción.

### 3. Interacción nuclear o fuerte

Lo curioso es que existen interacciones con intermediarios masivos, cuyo alcance es pequeño pero su intensidad mucho mayor. Esta es la llamada *interacción fuerte*.

Haciendo una no muy osada comparación, podríamos decir que la comunicación entre dos personas donde el intermediario es la luz no es tan intensa como la comunicación cuyo intermediario es un balón o una piedra.

El comienzo de la teoría de la interacción nuclear se debe al físico japonés Hideki Yukawa (1907 - 1981), quien creó una escuela de física teórica en la Universidad de Kyoto.

Yukawa se preguntaba sobre las características de los intermediarios para la fuerza nuclear, cuyo alcance es de [EQUATION]. En el marco de una teoría de campos, cuya explicación está fuera del alcance de este libro, Yukawa propuso un intermediario con una masa 200 veces mayor que la del electrón, es decir que su masa en reposo sea equivalente a unos 100 MeV. Esto significa una décima parte de la masa del protón.

Yukawa publicó un artículo de sus resultados en 1935, en el *Journal of the Mathematical and Physical Society of Japan*. Los científicos de la época tomaron el trabajo de Yukawa como una especulación, puesto que nadie había detectado una partícula con esa masa.

En 1937, Carl Anderson y colaboradores, entre los rayos cósmicos, descubren partículas con una masa unas 200 veces mayor que la del electrón, las que fueron llamadas *mesotrones*. Estas partículas eran inestables, desintegrándose en unos 2 microsegundos cuando estaban al estado libre. Lo interesante es que los investigadores que descubrieron los mesotrones al comienzo de su trabajo no conocían el trabajo de Yukawa. El descubrimiento de una partícula con una masa similar a la de las partículas predichas por Yukawa generó bastante interés. Sin embargo, durante la Segunda Guerra, escondidos de los alemanes, M. Conversi, E. Pancini y O. Piccioni muestran que los mesotrones no tenían las propiedades que se esperaba de las partículas de Yukawa. Por ejemplo, no se observaba la interacción violenta con los nucleones, que genera su destrucción. La situación creó bastante confusión entre los teóricos y gran alboroto entre los experimentales. Todos buscaban formas de encontrar salida ante el aparente impase. Sin embargo, la guerra frenó sensiblemente el ritmo de las investigaciones en física, dejando pendiente varios fascinantes temas de investigación.

Fue en 1947 que el físico Cecil Powell (1903-1969) con G. Occhialini descubrieron una partícula que interactuaba con los nucleones tal como se deducía de la hipótesis de Yukawa. La masa equivalente de esta partícula era 139 MeV. Además, esta partícula, que luego fue llamada *pión* ([EQUATION]), se desintegraba en una partícula con masa de 106 [EQUATION], luego llamada *muón* ([EQUATION]), y dos partículas neutras, lo que puede expresarse mediante el simbolismo siguiente:

$$\text{[EQUATION]} \tag{8}$$

Lo más espectacular obtenido en física en esos tiempos fue el descubrimiento de partículas de Yukawa, el *pion neutro*, [EQUATION], con una masa de 264,1 veces la del electrón; el pión cargado positivamente [EQUATION], con masa de 273,1 veces la del electrón y el pión cargado negativamente, [EQUATION], con masa de 273,1 veces la del electrón.

El descubrimiento de las partículas de Yukawa, que daba fuerza a la hipótesis de que toda interacción se realiza a través de un intermediario, impulsó las investigaciones en esa dirección.

### 4. Interacción electrodébil

A pesar del éxito de la teoría de Yukawa, no daba luces sobre la naturaleza de todas las interacciones nucleares, como por ejemplo la emisión beta, que no era provocada por la interacción fuerte.

Por ello se planteó la necesidad de una cuarta interacción, llamada *interacción débil*. Una de las reacciones en la que se ve involucrada la interacción débil es el decaimiento del neutrón, expresada en la relación

$$\text{[EQUATION]} \tag{9}$$

Para comprender mejor la nueva interacción, consideremos el proceso, equivalente al anterior,

$$\text{[EQUATION]} \tag{10}$$

Aquí se toma como equivalentes la absorción de un neutrino por un neutrón y la emisión de un antineutrino.

El tema fue abordado por físicos teóricos en los años 60, inducidos por propiedades de simetría de la naturaleza, expresada en las funciones matemáticas que la representaban. Entre ellos estaban Steven Weinberg, nacido en 1933, Sheldon Lee Glashow y Abdus Salam, nacido en 1926. El proceso señalado significa que la colisión de un neutrón y un neutrino produce un protón y un electrón. Puede pensarse que el neutrón y el neutrino intercambian partículas mensajeras, las que fueron llamadas [EQUATION]. Estas podían tener cargas negativas ([EQUATION]) o positivas ([EQUATION]). En los los intermediarios que son planteadas por la teoría surge también la partícula [EQUATION].

La interacción débil apareció ante los teóricos como una expresión de la interacción que involucra la electromagnética. A esa interacción se le llamó *interacción electrodébil*. Pero, mientras que en la interacción electromagnética dos electrones intercambian fotones sin masa, en la interacción débil hay intercambio de partículas [EQUATION] con masa. El alcance de la interacción electromagnética es infinito, mientras que el alcance de la interacción débil depende de la masa de las partículas [EQUATION]. Dado que el alcance de la interacción débil es pequeño (menos que  $10[EQUATION]$  fermis), las partículas intermediarias deben ser muy masivas, unas 80 veces más pesadas que el protón.

En 1973, en el CERN, se obtenía indicios de la existencia de las partículas  $W^+$  y  $W^-$ , que conformaban la llamada *corriente neutra*. Por estas confirmaciones de la teoría electrodébil, Weinberg, Salam y Glashow compartieron el premio Nobel de física de 1979.

A mitad del año 1983, Carlo Rubbia y colaboradores observaron eventos en los que la partícula estaba presente, anunciándose entonces oficialmente su existencia. Su masa era de 94 GeV. También observaron las partículas  $Z^0$ , mediante la colisión frontal entre protones y antiprotones. En 1984, Carlo Rubbia fue distinguido con el premio Nobel por este descubrimiento. Compartió el premio Van der Meer, quien inventó nuevas técnicas de enfriamiento, las que permitieron la construcción del colisionador protón antiprotón.

Las partículas  $W^+$  y  $W^-$  tienen una vida muy corta ( $\sim 10^{-25}$  s), por lo que su detección fue indirecta, gracias a su desintegración. Por ejemplo, cada partícula  $W^+$  se convierte en un electrón y un neutrino:  $W^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$ . La búsqueda de la partícula  $Z^0$  se basó en sus modos de decaimiento:

## 5. Modelo Estándar

El modelo estándar fue definitivamente aceptado en el dominio de la física. Según este modelo, las partículas elementales de las que está formado el resto de partículas eran los *leptones* y los *quarks*. Los quarks eran afectados por la interacción fuerte, ante la cual los leptones eran imperturbables.

Los quarks y leptones eran separados por generaciones, que correspondían al orden en que fueron descubiertos y cuyas masas eran en orden creciente. Cada generación estaba conformada por un par de leptones y un par de quarks de cargas  $\pm \frac{2}{3}$  y  $\pm \frac{1}{3}$ . La primera generación estaba conformada por los quarks *down* ( $d$ ), *up* ( $u$ ) y los leptones electrón ( $e^-$ ), neutrino electrónico ( $\nu_e$ ). En la segunda generación se encontraban los quarks denominados *strange* ( $s$ ) y *charm* ( $c$ ) y los leptones *muón*, ( $\mu^-$ ), y *neutrino muónico* ( $\nu_\mu$ ). La tercera generación era representada por los quarks *bottom* ( $b$ ) y *top* ( $t$ ) y los leptones *tau* ( $\tau^-$ ), y *neutrino taónico* ( $\nu_\tau$ ).

Los quarks  $u$  y  $d$  forman los protones y los neutrones, y por lo tanto son los constituyentes ordinarios de la materia. Los otros han sido producidos en las colisiones de partículas en grandes aceleradores o en partículas cósmicas.

De acuerdo al modelo estándar, las interacciones entre partículas elementales se realizan a través de bosones intermediarios de espín 1. Las interacciones electromagnéticas y débiles son tratadas con el modelo de la fuerza electrodébil de Weinberg, Salam y Glashow, que resalta el origen común de esas interacciones. Las partículas portadoras de las fuerzas son, en este caso, las partículas masivas  $W^+$ ,  $W^-$  y los fotones sin masa. La interacción fuerte es expresada en la teoría llamada  *cromodinámica cuántica*, basada en 8 partículas eléctricamente neutras portadoras, llamadas *gluones*. La palabra *gluón* en Inglés viene de *glue*, es decir pegamento, cola.

## 6. Teoría de gauge

Para completar el esquema, debemos mencionar la *teoría de gauge*, según la cual las ecuaciones que describen los campos, fuente de las interacciones, no cambian cuando se realizan algunas operaciones sobre la familia de partículas en cualquier parte del espacio. La palabra *gauge*, en Alemán, se refiere a la herramienta que servía para controlar la separación entre los rieles del ferrocarril.

El hecho que las interacciones pueden ser expresadas en teorías de gauge, abre la oportunidad de encontrar la teoría unificada.

Para comprender la importancia de la teoría de gauge, tomemos el caso de la electrodinámica cuántica, teoría que describe los fenómenos que se producen entre electrones, positrones y fotones. Se escoge el campo que describe el electrón, que significa la selección de una función compleja, que posee una amplitud y una fase. Las predicciones que genera esta función depende de la fase, la que se escoge arbitrariamente. Para impedir esa dependencia se añade a las ecuaciones un campo suplementario, llamado *campo de gauge*.

Resulta, ante la sorpresa de los físicos, que ese *campo de gauge* no es otro que el *campo electromagnético*, cuyos cuantos sin masa son los fotones. Con ello se establece una fuerza que acoplan los electrones y los positrones, la que precisamente es la *fuerza electromagnética*. Aquí surge la denominación de *bosones de gauge* para las partículas intermediarias de una interacción.

Las partículas de gauge nacen entonces como hijas de la simetría, las que juegan el papel de sincronizar las fases entre las partículas interactuantes. Es claro que para que los campos de dos partículas estén sincronizados y puedan interactuar debe haber un intermediario. Esto nace por necesidad de simetría, poniendo el sentido físico de acuerdo con el sentido común.

Esta extraordinaria coincidencia muestra que arte y ciencia parecen ser hermanas casi gemelas, porque buscando belleza y simetría a las ecuaciones se encuentran teorías más cercanas a la realidad.

En esta dirección avanzan los físicos que buscan la forma de unificar las fuerzas de la naturaleza.

## 7. Hacia la unificación total

El modelo estándar tiene varios vacíos que obligan a buscar otras teorías. Uno de los problemas se refiere al llamado *confinamiento de los quarks*, en el que no se puede explicar porqué no se ha podido ver quarks libres, fuera de los nucleones.

Otro vacío está en la falta de claridad en el origen de las masas de las partículas y de la relación entre las generaciones de los quarks y leptones.

Existen también dificultades que conciernen a las predicciones de reacciones aún no observadas experimentalmente. Uno de los más importantes desafíos lo constituye la predicción de la existencia de la partícula llamada *bosón de Higgs*, que parece que acompañaría a los portadores con masa de la interacción electrodébil, lo que excluye al fotón que no tiene masa. Para comprender el hecho que los intermediarios de la interacción débil ( $W^+$  y  $W^-$ ) tienen masa, mientras que los intermediarios de la interacción electromagnética (fotones) no tienen masa -siendo ambas parte de una misma interacción, la electrodébil- nace la hipótesis de *ruptura espontánea* de la simetría electrodébil. Esta ruptura se habría generado en el origen del universo, atribuido al llamado *mecanismo de Higgs*.

El mecanismo de Higgs trata de explicar, al mismo tiempo, el origen de la masa de las partículas. Para ello se introduce una nueva partícula, el bosón de Higgs, la que sería responsable de la ruptura de la simetría. Al momento de la ruptura de la simetría, tres de los cuatro intermediarios de la interacción electrodébil adquieren masa, quedando sólo el fotón sin masa. El bosón de Higgs no tiene masa predicha por la teoría, aunque no debería exceder  $1 \text{ (} 1000 \text{ )}$ . Para producir partículas con esta masa será necesario construir aceleradores mucho más potentes que los existentes actualmente.

Han surgido las teorías de gran unificación (GUTs: *grand unified theories*) que tratan de unir la interacción electrodébil y la fuerte. Estas teorías, como sucede con todas, tienen predicciones que deberán comprobarse antes de aceptarlas. Los fenómenos predichos son buscados desesperadamente por los físicos del mundo entero. *Una de las predicciones es el decaimiento del protón, lo que aún no es observado pese a los múltiples intentos.*

De acuerdo a Howard Georgi, Helen Quinn y Steven Weinberg, para dar algún crédito a las teorías de gran unificación, el tiempo de vida del protón estaría en el rango de 10 a 10 años. Ese tiempo de vida tan largo es mayor que la edad del universo. Steven Weinberg señala<sup>xvi</sup> que, de observarse el decaimiento del protón, habría una intensificación espectacular de la investigación en física de partículas, buscando las formas de decaimiento del protón.

Los numerosos experimentos que han buscado el decaimiento del protón han usado básicamente gigantescos detectores, instalados en el subsuelo, para evitar la llegada de partículas del cosmos.

*Otra predicción aún no confirmada es la existencia de los llamados monopolos magnéticos* (como se sabe los magnetos siempre vienen en dos polos), que se habrían creado a 10 segundos después del nacimiento del universo. Han habido varios intentos de detectar monopolos magnéticos. En 1975, el mundo de la física recibió con gran expectativa la noticia que en la Universidad de California, en Berkeley, se había descubierto un monopolo magnético, basado en mediciones realizadas con globos a grandes alturas. Luego, las críticas mostraron la poca confiabilidad de esos resultados. Ello no impidió que sigan aumentando las predicciones de la existencia de los monopolos magnéticos y los anuncios del descubrimiento de indicios de alguno. Otras teorías asumen que los quarks y los leptones están compuestos de partículas aún más fundamentales. La gravitación es la interacción que mayor dificultad ofrece a la unificación. Por ello, muchos físicos han puesto atención a la llamada *teoría de las supercuerdas*. La teoría de las supercuerdas nació en 1970 para explicar la fuerza nuclear como una interacción entre partículas tipo cuerda. Aunque fue opacada por las teorías de quarks y gluones, las supercuerdas siguen vigentes, sobre todo porque dan lugar también a la gravedad y dan cuenta de una serie de problemas matemáticos que surgen en otras teorías. Edward Witten, del *Institute for Advance Studies* (Estados Unidos), ha logrado relacionar las supercuerdas con los agujeros negros, proeza que lo ha puesto en un preponderante lugar de la física y las matemáticas<sup>xvii</sup>.

De modo que el mundo físico está abierto aún a los exploradores de la naturaleza infinitesimal, que no por ser pequeña deja de ser fascinante. Al contrario, pareciera que mientras más pequeña sea la magnitud del universo estudiado, mayor será la pasión y el esfuerzo por comprenderlo.

## 6. Laboratorios de física de partículas

### 1. Aceleradores

Los laboratorios dedicados a la física de partículas cuentan, como parte central, con grandes aceleradores, los que son de diversos tipos. Los físicos involucrados en ese campo buscan constantemente tecnologías que mejoren la calidad de los haces de partículas. Como producto paralelo de la investigación en aceleradores, se tiene sorprendentes avances en otras disciplinas, como es el caso del radar y la fusión termonuclear controlada.

El principio de un acelerador de partículas es simple. Un paquete de partículas cargadas, electrones o protones por ejemplo, pasan a través de un campo eléctrico que los acelera.

Los aceleradores pueden ser lineales o circulares. En un acelerador lineal, las partículas ganan toda su energía en un solo paso a través de un campo electromagnético. En un acelerador circular las partículas circulan varias veces, aumentando su energía en cada vuelta.

Hasta 1960, los blancos sobre los que incidían los haces de partículas eran fijos. Generalmente, el blanco estaba compuesto de hidrógeno, cuyo núcleo está constituido de un protón. Luego se desarrollaron los colisionadores de partículas, en las que se provocaba choques de haces contra haces.

En los colisionadores, la mayoría de las partículas pasan sin colisionar; éstas rotan durante varias horas, haciendo miles, y en algunos casos millones, de vueltas por segundo.

Algunos colisionadores reciben partículas aceleradas por un acelerador llamado "inyector" para luego entregar partículas con su energía completa antes de colisionar.

Entre las combinaciones de partículas colisionantes se tienen las siguientes:

- electrones colisionando con positrones
- protones colisionando con protones

<sup>xvi</sup> Steven Weinberg, *Scientific American*, junio 1981

<sup>xvii</sup> John Morgan, "Particle Metaphysics", *Scientific American*, Febrero 1994

- protones colisionando con antiprotones
- electrones colisionando con protones
- positrones colisionando con protones.

Una cantidad característica importante en los aceleradores es el número de colisiones que es capaz de producir durante un experimento. Por ello se ha definido la luminosidad:

Existen sistemas en los que se colisionan dos haces logrados en aceleradores lineales. En este caso es necesario paquetes densos, puesto que no se tiene la facilidad de los múltiples intentos de colisión que se da en un acelerador circular.

Un elemento importante en un acelerador circular lo constituyen los magnetos instalados a lo largo de la trayectoria de las partículas, puesto que los campos magnéticos mantienen a las partículas en sus trayectorias circulares. *A mayor energía de las partículas más intenso será el campo magnético necesario.*

En el mundo, los laboratorios de partículas han construido aceleradores como en una suerte de carrera hacia las altas energías. En esa carrera se han descubierto muchos secretos del mundo "infinitesimal" pero quedan aún otros, que para tener posibilidades de estudiarlos se necesita mayores esfuerzos.

## **2. Partículas en Estados Unidos**

En 1963 se empezó una gran aventura científica en el vecindario de la Universidad de Stanford, con la construcción del que sería el SLAC (*Stanford Linear Accelerator*). En una longitud de aproximadamente 3 , se tendió un tubo de cobre de 4 pulgadas, que luego fue rodeado de concreto. La potencia en el tubo sería proporcionada por más de 200 osciladores de microondas. Al final del tubo se levantaron dos enormes edificios, donde se empezaría entonces a competir con otros laboratorios del mundo de las partículas elementales. Para ello contarían con haces de electrones de 20 al final de este tubo acelerador.

El SLAC fue posible gracias a trabajos anteriores en la Universidad de Stanford, entre los cuales resaltan los osciladores de microondas desarrollados por William W. Hansen, cuyo trabajo fue interrumpido por la Segunda Guerra Mundial.

En 1947, Hansen construyó en Stanford el Mark I, un acelerador de 12 pies de largo del que se obtenía electrones de 6 MeV. Hansen murió en 1949, interrumpiéndose un trabajo de grandes proyecciones. Bajo la dirección de Edward Ginzton se construyó los aceleradores Mark II y Mark III. En 1952, el Mark II, en sus 80 pies de largo, aceleró electrones hasta alcanzar la energía de 200 . En 1960, el Mark III llegó a 300 pies de largo y entregaba electrones de 1 .

En el Mark III, Robert Hofstadter y colaboradores descubrieron que los protones y los neutrones no eran puntuales sino que tenían un diámetro de 10 .

Con esos antecedentes nació el proyecto SLAC que fue autorizado por el Congreso norteamericano en 1961. En un contrato entre la Universidad de Stanford y la Comisión de Energía Atómica (AEC: *Atomic Energy Commission*), se dió el inicio del proyecto con un costo de 114 millones de dólares, que en ese momento significó la mayor inversión en aceleradores realizadas en el mundo. En 1961, Wolfgang Panofsky fue designado director del proyecto.

En 1968, con electrones de 20 , en el SLAC, en un trabajo de colaboración con el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT: *Massachusetts Institute of Technology*), un equipo dirigido por Richard Taylor y Jerome Friedman -los que más tarde serían distinguidos con el premio Nobel- se obtuvo las primeras evidencias de que los protones tenían una estructura interna, la que más tarde significaría la composición en quarks.

En los años 60 algunos laboratorios norteamericanos desarrollaron significativamente la física de partículas. En Estados Unidos, unos ocho aceleradores lograron haces con energías mayores que 1 . Los más grandes aceleradores se construyeron en Berkeley, Argonne, Brookhaven, Cornell y Stanford, los que eran usados, en general, por científicos de esos laboratorios.

En 1965, un grupo consultor recomendó la formación de un nuevo laboratorio para construir un sincrotrón, como una facilidad nacional, para ser administrada por un consorcio de universidades. Como consecuencia de ello, se fundaron la Asociación de Universidades para la Investigación (URA: *Universities Research Association*) y el Laboratorio Nacional de Aceleradores (NAL: *National Accelerator Laboratory*). Este último, instalado en un emplazamiento de Illinois, fue luego denominado *Fermi National Laboratory* (FNAL), más conocido como Fermilab. El FNAL fue creado con la idea de un laboratorio abierto a investigadores universitarios sin restricciones, como solución a los problemas de colaboración

que surgían cuando se trataba del acelerador de una universidad en particular.

En Estados Unidos, el más grande acelerador de protones lo tiene el Fermilab, el que cuenta con un sincrotrón de protones de 400 , el que entró en operación en 1972 y que hoy se usa como inyector del Tevatrón, el colisionador de partículas del Fermilab.

### **3. Anillos de almacenamiento**

En 1957, Gerard O'Neal de Stanford planteó la idea de dos haces circulando en sentidos opuestos para luego colisionar frontalmente, obteniendo \$ 800 000 para empezar un proyecto de anillos de acumulación.

En 1961, la AEC aprobó el proyecto del Cambridge Electron Accelerator (CEA), compuesto de ciclotrón de electrones de 6 . El CEA entró en operación en 1968, pero los experimentos con resultados serios comenzaron en 1972. En 1973, el CEA generó resultados sobre la razón de creación de hadrones a muones ( $\mu$ ), que dió lugar a una verdadera crisis en los laboratorios, por las divergencias en resultados y por sus consecuencias teóricas. fue encontrado entre 4 y 6, mientras que el ADONE (*Anello de Accumulazione*) encontraba cerca de 2. Con mayor claridad en resultados experimentales, debido a sus características tecnológicas, a fines de 1973, el SPEAR (*Stanford Positron Electron Asymmetric Rings*) confirmó los resultados del CEA.

Los físicos italianos comenzaron en los años 60 a construir el ADONE. En Orsay, Francia, se construyó un anillo pequeño para colisiones electrón positrón. En Rusia también se construyó este tipo de máquinas, en Novosibirsk, Siberia central. Por su parte, el CERN comenzó a construir su anillo de almacenamiento, el ISR (*Intersection stockage Ring*).

El ADONE, construido por el Laboratorio Nacional Frascati, tuvo una vida fructífera hasta que, el 26 de abril de 1993, fue puesto fuera de servicio por su primer Director Giorgio Salvini.

Después de muchos intentos para convencer a la AEC y luego de varias modificaciones al proyecto de Stanford, en 1971, Burton Richter logró el apoyo para construir el SPEAR. En 1973 el SPEAR entraba en operación.

En Alemania, el Acelerador de Electrones de Alemania (DESY: *Deutsches Elektronen Synchrotron*), instalado en Hamburgo, decidió construir HERA, una máquina que, en julio de 1994, produjo sus primeras colisiones de alta energía entre protones y electrones. El proyecto HERA fue aprobado en 1984, con la idea de producir colisiones entre protones de 820 y electrones de 30 .

### **4. ¿Frustrado sueño de la Teoría Final?**

Como podemos notar, los físicos están lejos de la simulación del Big Bang. Para acercarse deberá construirse aceleradores más poderosos. En tal sentido, los físicos del LEP piensan en colisiones de 90 .

Los físicos norteamericanos anhelaban construir el acelerador más grande del mundo. Se trataba super colisionador SSC, que habría consistido de dos anillos de 87 de magnetos superconductores para colisionar protones de 40 (40 000 ) con el objetivo de investigar el comportamiento de los quarks en las partículas colisionantes.

La construcción del SSC, sin duda, habría traído resultados nuevos e interesantes para la comprensión de los fenómenos relacionados con los quarks, los que permanecen prisioneros en los nucleones.

En el proyecto también había un componente de orgullo de los EEUU, los que estaban perdiendo la carrera científica a nivel mundial. El SSC era, por otro lado, parte de la euforia tecnológica creada en los años 80, que dió lugar asimismo a la llamada *Guerra de las Galaxias*. Por todo ello, los físicos norteamericanos habían batallado intensamente para obtener la aprobación de la construcción por el Congreso norteamericano. Pero el día 21 de octubre de 1993, la Cámara de Representantes propuso la cancelación del proyecto que ya había gastado 2 000 millones de dólares.

En julio de 1993, el Secretario de Energía de los Estados Unidos presentó un plan para maximizar el valor de la inversión y minimizar las pérdidas. También surgió la idea de convertir al SSC en un proyecto internacional.

Era en realidad un golpe casi mortal para la física de partículas en Estados Unidos. A decir verdad, el fin se veía venir desde 1992 cuando en el Congreso se negaron los fondos para el SSC. Los físicos utilizando un poderoso y organizado *lobby* lograron que se acuerde los fondos

al proyecto. Del debate salieron 517 millones de dólares para el año 1993. En 1993, con la nueva administración liderada por Bill Clinton, la cosa se ponía difícil. La confrontación entre las dos cámaras fue total. El Senador Bennett Johnston, entusiastamente pro SSC, logró que su cámara recomiende seguir apoyando al SSC. Los oponentes de la cámara baja, usando procedimientos de "alta ingeniería política" negaron el pedido y se dió el golpe final a un proyecto que generó expectativas en los físicos de todo el mundo.

Los planes sobre el SSC comenzaron en los 80, pensando colisionar haces de 20 . Los físicos de alta energía veían en el SSC enormes posibilidades. En 1984, en Berkeley, se comenzaron a diseñar los magnetos. El presidente Ronald Reagan mostraba su conformidad con el inicio del ambicioso proyecto en 1987.

Se necesitaba entonces un emplazamiento para el SSC. Una de las propuestas era al lado del Fermilab, en el Estado de Illinois, donde se encontraban los anillos de protones de mayor energía, que podrían servir como inyectores para el SSC.

La decisión de los políticos fue instalarlo en Ellis County, Texas un Estado que era visto como deseoso de ciencia y cultura.

En el camino surgió la idea de que el SSC sea internacional. Se comenzó a negociar una serie de contribuciones, entre los que estaban interesados Rusia, India, China y Corea.

Los trabajos del túnel comenzaron, y en 1992 fueron presentados a los cientos de físicos participantes en una reunión sobre altas energías realizada en Dallas. En 1993 se había construído 23 de túnel.

Con el fin del SSC se han arruinado carreras de brillantes científicos norteamericanos, lo que en el debate produjo la sugerente pregunta de Bennett Johnston ">Saben Uds. lo que hemos hecho a esta gente?".

"Es claro que el interés de la física no puede ser cambiada por decisión del Congreso", dijo un físico de Argonne, al iniciarse una nueva etapa del proyecto SSC, esta vez con el objetivo de convertirlo definitivamente en internacional. Los laboratorios de física de partículas están en plena movilización para lograr una facilidad de una envergadura jamás vista y que nos acerque a la comprensión de los fenómenos que se producen al nivel ultramicroscópico.

## **5. El CERN**

Antes de 1939, año en que empezó la segunda guerra mundial, la supremacía de la ciencia europea era incontestable. Durante la guerra hubo un proceso de traslación de la ciencia hacia los Estados Unidos. Ello se debió, principalmente, a que las condiciones en ese país eran las más apropiadas para el desarrollo de la ciencia. Mientras que el campo de batalla se encontraba en Europa, en Estados Unidos de América instalaban los laboratorios nucleares para realizar investigaciones con el apoyo decidido del Gobierno. Numerosos científicos de primer nivel dejaron Europa para refugiarse en los Estados Unidos.

Después de la guerra, el centro de la investigación científica y tecnológica se encontraba en Estados Unidos.

En 1954, algunos países europeos decidieron comenzar la recuperación europea en investigación nuclear. Para ello decidieron la construcción de un modesto acelerador de partículas, un sincrociclotrón capaz de acelerar protones a 600 , fundando el CERN (*Conseil European pour la Recherche Nucléaire*), que más tarde será llamado *Laboratorio Europeo para la Física de Partículas*.

Este sincrociclotrón era sólo una etapa en el proceso de largo alcance. Paralelamente, se comenzó a construir el sincrotrón de protones (PS), el que entró en operación en 1959, entregando a los experimentadores protones de 28 . Se constituyó entonces en el acelerador más poderoso del mundo.

Hoy en día, el PS entrega partículas (protones, antiprotones, electrones, positrones, núcleos) en su primera etapa de aceleración para que luego entren a las máquinas más potentes y más recientemente construídas.

Entre 1971 y 1984, nacieron en el CERN los anillos de almacenamiento con intersecciones (ISR). En estas máquinas, se producen dos haces de partículas en dos anillos con intersecciones, para luego hacerlos chocar uno contra otro.

El punto de colisión de los protones era rodeado de grandes instrumentos para detectar la mayor parte posible de las partículas y radiaciones que emergían del choque.

A principios de los años 70, se empezó a trabajar en una gran nueva máquina, llamada *supersincrotrón de protones* (SPS). En 1976, el SPS produjo protones de 400 y, luego, su energía nominal llegó a 450 . El anillo de 7 fue construído parte en Suiza y parte en Francia.



Luego surgió la idea de acelerar protones (carga positiva) y antiprotones (carga negativa) en un mismo anillo, para producir colisiones entre ellos. Dado que sus cargas son opuestas, los protones y los antiprotones son acelerados en sentido contrario por el mismo campo electromagnético.

El problema que enfrentaron los físicos del CERN fue el bajísimo número de antiprotones que podían generarse. Para producir un antiprotón es necesario chocar cientos de miles de millones de protones contra un blanco, mientras que para los experimentos son necesarios millones a la vez.

La solución vino cuando Simon van der Meer inventó la técnica llamada de *refrigeración estocástica* para controlar los antiprotones y lograr un haz intenso. Esta técnica fue coronada de éxito con el descubrimiento de las partículas  $\chi$  y  $\psi$ .

Al mismo tiempo, en 1983, se comenzó la construcción del gran anillo electrón-positrón (LEP: *Large Electron-Positron Ring*), que entró en operación en 1989.

## **6. El colisionador electrón-positrón LEP**

El colisionador electrón-positrón LEP (*Large Electron-Positron*) está construido en un túnel de 27 km que toca tanto territorio francés como suizo. Miles de grandes imanes obligan a electrones y positrones a mantenerse en órbitas opuestas en un tubo al vacío construido de una aleación de aluminio. La aceleración de las partículas, que llegan a energías superiores a 50 GeV, es producida por equipos de radiofrecuencia.

El complejo sistema del LEP ocupa una superficie de 80 km<sup>2</sup>. En ese complejo se tiene el túnel principal, las galerías laterales, los 19 pozos de acceso, los edificios en superficie y los equipos auxiliares. Las instalaciones comportan unas 60 000 toneladas de equipamiento.

La disminución de la energía por radiación sincrotrónica, debido a la trayectoria curva de los electrones, es minimizada con ayuda de dipolos magnéticos débiles. En total, hay unos 3 000 imanes de 6 metros de largo cada uno.

Para separar los haces de electrones y positrones, durante su inyección y aceleración, se usa separadores electrostáticos. Cuando las partículas adquieren la energía deseada, se les guía a puntos de colisión en cuatro zonas rodeadas por inmensos detectores de partículas y sistemas de análisis de resultados.

Los detectores cuentan con sistemas electrónicos sofisticados y una tecnología avanzada que permiten determinar las trayectorias de las partículas y sus características físicas. En cada colisión se genera información en cantidades impresionantes, las que pueden llenar libros enteros. Sólo se acumula información de eventos interesantes, para lo cual se establecen criterios de selección rápida de eventos.

## **7. Los detectores del LEP**

Cada uno de los cuatro detectores del LEP tienen módulos que realizan tareas específicas. Alrededor del tubo al vacío se instalan detectores para las partículas con vida muy corta, las que, a pesar de su alta velocidad, sólo avanzan algunos micrometros antes de desintegrarse. Luego viene la cámara de trayectografía, la que sigue las partículas menos efímeras y que se escapan hacia los "calorímetros" que miden la energía de los diferentes tipos de partículas.

Una capa exterior del detector sirve para dar cuenta de los muones, partículas muy penetrantes que atraviesan metros de hierro absorbente de los calorímetros. Los neutrinos, aún más penetrantes que el muón, se escapan del detector. La presencia de los neutrinos es deducida del balance energético que se realiza a partir de las trayectorias establecidas.

Cada etapa de detección cuenta con su propio sistema de adquisición y tratamiento de información, la que luego de ser procesada es enviada a la computadora principal del experimento.

## **8. Los cuatro grupos de experimentadores en el LEP**

En el LEP se realizan experimentos en los que participan unos 2 000 físicos de Estados miembros del CERN. Estos están organizados en torno a los cuatro detectores.

El más grande de los grupos se encuentra en torno al L3, que ocupa una caverna a 45 metros bajo tierra, en Sergy. La instalación está rodeada de un imán de 14 metros de largo y 16 metros alto, que contiene 6 500 toneladas de acero y es recorrido por una corriente de 30 000 amperios.

amperios.

Otro equipo, llamado OPAL, está a 100 metros bajo tierra, en el punto 6, situado cerca de la frontera franco-suiza. En OPAL, los físicos ponen énfasis en técnicas de detección bien probadas. El tercer grupo es DELPHI, punto 8 en Metegnin, el que utiliza detectores Cherenkov para diferenciar los hadrones. El sistema está en el interior del imán superconductor más grande del mundo, de 7,4 metros de largo y 6,2 metros de diámetro.

El cuarto grupo es ALEPH, en el punto 4 del LEP, en Echenevex, está situado a 150 metros bajo tierra. Tiene una cámara de proyección tridimensional para seguir las partículas. El sistema está rodeado de un imán superconductor un poco más pequeño que el de DELPHI.

## **9. Mirando el futuro**

El CERN tiene planes de construir el Gran Colisionador de Hadrones (LHC: *Large Hadron Collider*), que estará constituido por un anillo de intensos imanes de superconductores, en el túnel del LEP, para hacer colisionar haces de protones a 8 (8 000 ). Con el LHC se estaría explorando los terrenos del campo de Higgs, fuente de la ruptura de la simetría, que en el vacío origina los fotones sin masa del electromagnetismo y los intermediarios y con masa.

El LHC, el que se construirá en el túnel de 27 del LEP, usará la cadena de aceleradores existentes como inyectores de partículas. Con este acelerador se comenzará a realizar experimentos la primera década del siglo XXI. Como planes de más corto plazo, en 1996, el LEP será duplicado en energía. Con haces de 90 , los experimentos del LEP servirán para investigar más sobre las partículas . Estos planes implican renovaciones importantes en los actuales sistemas de detección, sobre todo para la caza de las partículas de Higgs y las llamadas *partículas supersimétricas*.

Con la experiencia de la cancelación del SSC, físicos de EEUU, Europa y Asia, plantean hoy un proyecto de Colisionador Lineal (NLC: *Next Linear Collider*), que se trata de una máquina en un túnel de 20 de largo en el que electrones y positrones chocarán frontalmente.

En esta búsqueda de nuevas facilidades experimentales surgen ideas sobre técnicas avanzadas en diversos laboratorios del mundo.

Otro proyecto en ejecución es la Facilidad de Acelerador Continuo de Electrones (CEBAF: *Continuous Electron Accelerator Facility*), el que comenzará a funcionar en 1994. El CEBAF entregará un haz de electrones continuo e intenso de alrededor 6 , que servirá para explorar las propiedades de materia en campos intermedios entre la física nuclear y la física de partículas.

## **10. Cazadores de neutrinos**

La física de partículas también es usuaria de las reacciones nucleares producidas en los confines del universo. Entre otras partículas, de estas reacciones proviene una enorme cantidad de neutrinos, partículas muy evasivas, difíciles de detectar.

Para lograr la detección de algunos neutrinos se construyen observatorios en el subsuelo, donde no se genere interferencia con otras radiaciones.

Precisamente, dos observatorios han encontrado que el Sol emite menos neutrinos que lo calculado con el modelo estándar. Esto se ha logrado con dos detectores nuevos. Uno de los detectores es el llamado Experimento Sovietico Americano Galio (SAGE: *Soviet American Gallium Experiment*), construido bajo una montaña del Cáucaso ruso, y el Experimento Galio (GALLEX: *Gallium Experiment*), parte del laboratorio Gran Sasso en Italia.

Entre las probables explicaciones de la discrepancia de la teoría con el experimento sobre neutrinos está la planteada por Stanislaw Mikheyev y Aleksei Smirnov de la Academia de Ciencias de Moscú y Lincoln Wolfenstein de la Universidad Carnegie Mellon, según la cual existe un cambio de los neutrinos electrónicos en neutrinos menos detectable<sup>xviii</sup>.

## **11. Aceleradores y tecnología**

Muchos critican el hecho que se construyan enormes aceleradores para investigar campos de la física poco relacionados con la tecnología o cuyas aplicaciones son remotas. Sin embargo, es oportuno señalar que el desarrollo de nuevas tecnologías para lograr aceleradores más

---

<sup>xviii</sup> Ver "Particle Methaphysics", *Scientific American*, febrero 1994

poderosos llevan, necesariamente, a un impulso de tecnologías paralelas, las que de todas formas tendrán consecuencias en la industria.

En la segunda mitad del siglo XX se han construido una serie de aceleradores de partículas en todo el mundo. Sin embargo, estamos lejos de las energías que se necesitan para lograr datos relacionados con la unificación de los campos.

Por ello es que se hace cada vez más evidente que la colaboración internacional será acentuada en el año 2 000. Ello porque los recursos tecnológicos y económicos necesarios para seguir con las investigaciones sobre partículas escapan a las posibilidades de un solo país.

En esa colaboración, todos los países del mundo tienen su lugar, incluyendo los del Tercer Mundo que cuenta con científicos interesados en el tema de las partículas. Es más, la construcción de complejos equipos tiene aspectos que pueden ser tomados por empresas de países con limitados recursos.

En esa perspectiva, la participación de investigadores de países del Tercer Mundo en proyectos gigantescos relacionados con la física de partículas está convirtiéndose en un mecanismo que tiene que ver con la *transferencia de tecnología*.

Ello no deja de lado la importancia que tiene, para los científicos de todo el mundo, de países pobres y ricos, la comprensión de las propiedades de la materia en el marco de la cultura universal y de la búsqueda de la explicación del origen del universo.

En tal sentido, cuando se investigan las propiedades de las partículas, muchos científicos creen estar buscando la verdad de todas las cosas o la teoría del todo. En esa milenaria búsqueda se han logrado progresos inmensos, pero que descubren aún territorios más grandes por explorar. Y, así como hace cinco siglos se buscaba embarcaciones más grandes para explorar el mundo, el moderno hombre de ciencias está empeñado en construir aceleradores más grandes para, explorar regiones que nos acercan al origen del universo.

## **7. Investigación interdisciplinaria**

La física de partículas busca la comprensión de las reglas que explican la materia sobre la hipótesis de que está constituida por sus partes elementales. Para ello se han realizado grandes esfuerzos, muchas veces a pesar de las necesidades no satisfechas de otros campos de investigación más cercanas a las aplicaciones prácticas y de consecuencias inmediatas.

Dicho esto debemos aclarar, sin embargo, que a lo largo de la historia de la física de partículas se han generado una serie de interacciones con otras disciplinas científicas y tecnológicas.

La investigación sobre física de partículas interactúa con otros campos de la física misma, entre los que podemos mencionar cosmología y astrofísica, física de rayos cósmicos, física nuclear y física atómica.

En cuanto a la tecnología, cabe señalar que el desarrollo de aceleradores, de detectores y sistemas relacionados con los experimentos, tienen resultados que son luego aplicados en la industria u otros sectores de la actividad humana.

En primer lugar, los aceleradores desarrollados son aplicados en campos diversos. En segundo lugar, el diseño y construcción de aceleradores y detectores dan nacimiento a instrumentos utilizables en otros campos, como es el caso de los superconductores.

### **1. Cosmología y astrofísica**

Como se ha visto en la sección sobre el origen del universo, la física de partículas interactúa estrechamente con la cosmología. La comprobación de la teoría del Big Bang por los observatorios del mundo, acentúa la necesidad de buscar estados de materia y energía concentrada en pequeños volúmenes, como se logra en las colisiones de partículas.

En los laboratorios se encuentra que la concentración de energía genera masa, tal como ocurrió en el Big Bang. Las colisiones de fotones dan lugar a masa. Dado que después del Big Bang, el universo comenzó a expandirse y a enfriarse, muchos fotones dejaron de chocar entre sí, quedando entonces una radiación fósil, que hoy es observada por los astrofísicos.

Existen cuestiones críticas, como es el caso de la abundancia de partículas generadas en el Big Bang. Por ejemplo, según los cálculos de nucleosíntesis, el número de neutrinos debe ser limitado a tres o a lo más cuatro. Cabe preguntarse si en los laboratorios se producirán un número mayor que el indicado. Otro tema de interés común es la masa del neutrino, la que es crucial para concluir que si el universo seguirá eternamente en expansión o si en algún se

empezará el movimiento inverso.

Se tiene también el tema de materia oscura, que se refiere al hecho de que la masa observada parece ser mucho menor que la que se deduce de la interacción con la masa visible. Los neutrinos pueden dar cuenta de la masa faltante. Los neutrinos pueden entonces haber participado en la formación de galaxias y otras estructuras del universo.

El cosmos es también un inmenso laboratorio para comprobar las teorías sobre las partículas, entre las que se tiene el decaimiento de partículas con masas mayores que  $10$ .

Los monopolos magnéticos son buscados porque invalidarían las actuales teorías cosmológicas. Las masas de estos monopolos magnéticos serían del orden de  $10^{27}$ , que se habrían producido en los primeros instantes del universo.

## 2. Rayos cósmicos

El cosmos es fuente de partículas de altas energías, por ello varios descubrimientos en física de partículas se hicieron usando rayos cósmicos. Entre las partículas descubiertas en este campo tenemos el *positrón* y el *muón*. Estos rayos consisten en primer lugar de protones que vienen de fuera del sistema solar, los que al interactuar con los componentes de la atmósfera generan otras partículas.

El desarrollo de los aceleradores disminuyó el uso de los rayos cósmicos. Sin embargo, el cosmos sigue siendo visto como la fuente de partículas de energías que no pueden ser alcanzadas en los aceleradores.

Los datos generados en las reacciones de rayos cósmicos en la atmósfera son tratados de tal forma que permiten identificar la partícula iniciadora de las reacciones (protones, núcleos de carbono o hierro). Uno de los misterios que persisten es la forma cómo se han producido estos rayos cósmicos de altas energías superiores a  $10^{15}$  eV.

Las investigaciones sobre rayos cósmicos tienen regiones de intersección con la física nuclear, la astrofísica y la física de partículas. Entre éstas se cuenta la búsqueda de antimateria y las interacciones nucleares de altas energías. La observación de antinúcleos con masas similares a la de hierro serían evidencias de la existencia de galaxias distantes de antimateria.

## 3. Física nuclear

La física nuclear y la física de partículas están emparentadas. La física de partículas surgió de la física nuclear. Los núcleos son usados para estudiar las partículas y viceversa. La diferencia reside en los grados de desagregación con los que se estudia la materia en las dos disciplinas. Ambos campos usan los aceleradores para lograr las reacciones.

Los núcleos constituyen los laboratorios de alta densidad, los que bombardeándolos con electrones de alta energía, o con otros núcleos, se puede probar las interacciones entre quarks. En el otro sentido, los procesos de generación de partículas extrañas tipo protón o neutrones, familiares en la física de partículas, son usados para estudiar las propiedades nucleares.

Otra de las cuestiones que preocupa a los físicos nucleares y los particulistas es la eventualidad que en las colisiones nucleares se creen densidades de materia suficientemente elevadas como para lograr el *plasma quark gluón*.

En el CERN y el SLAC se han encontrado evidencias de que los núcleos no son sólo una colección de nucleones. Con la dispersión de muones, electrones y neutrinos en núcleos, se han encontrado diferencias en la distribución de los quarks en núcleos de deuterio y de hierro.

## 4. Física atómica

Hoy en día, para estudiar las propiedades de nuevas partículas es necesario contar con aceleradores que proporcionen la energía apropiada. Sin embargo, las propiedades de las partículas pueden evidenciarse con mediciones de alta precisión en las manifestaciones del átomo, que son hoy posibles gracias al avance de la tecnología. Los experimentos de física atómica sirven, entonces, para comprobar ciertas predicciones de las teorías de las partículas. Una de éstas se refiere a la diferencia en la absorción de luz polarizada izquierda y derecha, respectivamente. Ello ha sido posible gracias a las técnicas de espectroscopía de luz láser.

Otro campo de experimentación común lo generan los sistemas conformados por dos partículas, cuyo estudio es similar al átomo de hidrógeno, compuesto por un protón y un electrón. Entre estos sistemas se tiene el *positronio*, compuesto por un positrón y un electrón;

el *muonio*, compuesto por un muón y un electrón.

El estudio espectroscópico de los sistemas atómicos compuestos de partículas dan información sobre la estructura de esas partículas.

Los experimentos atómicos permiten también la medición de alta precisión de las propiedades magnéticas del electrón y del muón.

## 5. Aceleradores

Los aceleradores desarrollados para estudiar la física nuclear y la física de partículas tienen una serie de otras aplicaciones, entre las que se puede mencionar la radiación sincrotrónica, la medicina, fuentes intensas de neutrones y física de plasmas. Esta variedad de aplicaciones ha llevado a que sólo 1 % de los aceleradores en servicio sean usados en física de partículas. Miles de aceleradores son hoy construídos para aplicaciones médicas e industriales, lo que significa un mercado de varios miles de millones de dólares.

Las perspectivas de los aceleradores en aplicaciones diversas señalan una gran expectativa en la radiación sincrotrón. La radiación sincrotrón se refiere a la radiación electromagnética producida por los electrones en órbitas circulares, como es el caso en aceleradores circulares. La radiación es emitida tangencialmente. El rango de frecuencias de la radiación es muy amplia, cubriendo desde la luz ultravioleta hasta los rayos X. El interés de este tipo de fuente de radiación reside en el hecho de que se logra intensidades mucho más elevadas que con otros métodos. Ello permite aplicaciones interesantes en física aplicada, geología, ciencia de materiales, ingeniería eléctrica, metalurgia, biología, bioquímica, biofísica y química, microelectrónica, holografía y microscopio de rayos X. Una de las aplicaciones de mayor trascendencia es la impresión sobre pastillas de circuitos con densidades 100 a 1 000 veces superiores a las existentes, abriendo paso a un fulgurante avance de la informática y la inteligencia artificial. Las perspectivas de la radiación sincrotrón han convencido a los países europeos para construir la Instalación Europea de Radiación Sincrotrón (ESFR: *European Synchrotron Radiation Facility*) en Grenoble, Francia. Esta instalación, que entrará en funcionamiento en 1994, servirá para el estudio de las estructuras complejas atómicas y moleculares de la materia.

En medicina, los aceleradores de electrones se han constituido en una herramienta importante en la terapia de tejidos cancerosos. Los electrones de alta energía chocan contra un blanco y producen un intenso y bien dirigido haz de rayos X. Este haz es aplicado sobre el tejido canceroso. La mayoría de los aceleradores de electrones usados en medicina son lineales, aunque también son usados los circulares, pero en menor escala. También se ha construído aceleradores de otros tipos de partículas para fines médicos. Asimismo se usa neutrones e iones pesados, estos últimos producidos en aceleradores.

Otra aplicación de los aceleradores es la producción de materiales radiactivos de vida corta, los que producen positrones. Estos positrones al incidir sobre el paciente se aniquilan con los electrones para emitir fotones que permiten la tomografía.

Por otro lado, cabe mencionar que los aceleradores son usados para fuentes intensas de neutrones. Los protones acelerados inciden sobre núcleos pesados para producir su desintegración por el fenómeno de espalación. Como producto de esta reacción, se genera un número elevado de neutrones. Estos neutrones son usados luego en investigación sobre ciencia de materiales, física del estado sólido, química de polímeros, biología molecular, entre otras áreas.

Las técnicas de aceleración sirven también para producir radiaciones monocromáticas de una gran intensidad y en una gama de frecuencias muy elevadas. Ello ayuda en la tecnología de fusión nuclear. Estos son usados para producir la fusión inercial, con los iones pesados. Los aceleradores también sirven para inyectar partículas cargadas en el plasma para aumentar su energía.

Los aceleradores sirven asimismo para tratar alimentos, eliminando las bacterias y prolongando su duración. Estas técnicas son usadas para esterilizar productos o desechos.

La composición y datación de materiales geológicos, arqueológicos y oceanógrafos son también aplicaciones de los aceleradores. Mencionaremos, asimismo, la implantación de iones en circuitos integrados, y la modificación de propiedades superficiales de los materiales; la prolongación de la vida de prótesis médicas, lo que evita la repetición de operaciones.

Como vemos, los aceleradores -construídos al principio para investigar en física nuclear y física de partículas- son usados en múltiples campos de la ciencia y la tecnología.

## 6. Superconductividad

La *superconductividad* es un fenómeno en el cual un material no ofrece resistencia a la corriente, por lo que no se gasta energía ni se genera calor.

Temperaturas cerca del cero absoluto (-273 grados centígrados) convierten ciertos materiales en superconductores. Este fenómeno es conocido en el laboratorio desde principios de siglo, pero su aplicación en mayor escala ha sido posible gracias a su intenso desarrollo con el objetivo de construir aceleradores más poderosos. Los aceleradores Tevatrón del Fermilab y el LEP del CERN usan miles de magnetos superconductores. El enfriamiento de estos magnetos se logra con helio líquido.

Los planes de nuevos aceleradores impulsará el desarrollo de nuevas tecnologías de superconducción a una escala industrial. Ello se debe a que, en un gran acelerador, el uso de la superconductividad requiere de facilidades de refrigeración, sistemas de control de temperatura y dispositivos, así como sistemas de emergencia para actuar cuando hay repentina disminución de superconductividad y todo comienza a calentarse.

La experiencia ganada en superconductividad, gracias al desarrollo de aceleradores, permite visualizar aplicaciones en diversos campos industriales, donde sea necesario grandes cantidades de corriente eléctrica sin calentamiento.

El desarrollo de superconductividad en mayor escala acelerará a el avance de las supercomputadoras de gran velocidad. Los imanes superconductores tienen aplicaciones en los terrenos de la fusión nuclear, la separación de minerales, los equipos de diagnóstico por resonancia magnética nuclear (RMN), la purificación de los humos de las centrales de carbón, los trenes de alta velocidad por levitación magnética, el almacenamiento de energía en bobinas y su transmisión por cables superconductores, etc.

La aplicación de los superconductores y los aceleradores pueden llevarnos a la solución energética y no contaminante, a través de la energía de fusión nuclear.

## 7. Tecnologías de la física de partículas

Una mejor idea de las posibilidades de los laboratorios de física de partículas podría obtenerse si listamos las tecnologías desarrolladas en el marco de la investigación en este campo. Entre esas tecnologías se tienen las siguientes<sup>xix</sup>:

cavidades de radiofrecuencia, usadas para producir campos electromagnéticos de aceleración, imanes con elevados campos magnéticos para focalizar el haz de partículas cargadas, técnicas criogénicas para refrigerar imanes superconductores y cavidades de aceleración, convertidores de potencia de gran fiabilidad usados para la excitación eléctrica de los imanes, técnicas de ultravacío para el recinto donde circula el haz de partículas, estructuras mecánicas sofisticadas con exigencias mecánicas, eléctricas y ópticas para el rendimiento de alta precisión, sensores ópticos y electrónicos rápidos y ultrasensibles, para observar los haces, o en sistemas de detección de partículas, electrónica ultrarápida y de alta precisión para el procesamiento de los datos generados en cada colisión, sistemas informáticos complejos, redes de transmisión de datos, instrumentos de topografía de precisión y geodesia para la alineación de las instalaciones con una precisión del orden de un milímetro sobre una distancia de diez kilómetros.

## 8. Impulso tecnológico

Como hemos visto, el desarrollo de la investigación científica tiene el objetivo de conocer la naturaleza con la mayor profundidad que permiten los instrumentos. Pero, precisamente, siendo estos instrumentos fundamentales en la investigación gran parte de los esfuerzos de los laboratorios son gastados en la búsqueda de los mejores equipamientos. Como consecuencia natural de

---

<sup>xix</sup> CERN, *Laboratorio Europeo para la Física de Partículas*, Ediciones CERN, Ginebra, febrero de 1992

ello, de los laboratorios salen nuevos dispositivos tecnológicos -los que luego son llevados a la industria- y los servicios para generar alta competitividad.

Desde principios de siglo, se viene constatando las fructíferas consecuencias tecnológicas de la investigación. Los descubrimientos de Ernest Rutherford sobre la transformación de los átomos en los años treinta, dieron origen más tarde a la fisión y fusión nucleares, los que luego serían puestos al servicio de la tecnología.

La teoría cuántica dió lugar a una comprensión del comportamiento de los átomos, lo que sirvió para un rápido desarrollo de actividades científicas y tecnológicas. Este desarrollo permitió clarificar varias propiedades mecánicas de la materia, los fenómenos de emisión de luz y rayos X, entre otros. Todo ello permitió el desarrollo de las técnicas de láser, superconductividad y un rápido avance de la informática, electrónica y de las telecomunicaciones.

Entre los dispositivos desarrollados en los albores de la física nuclear y de partículas, que hoy sirven en diversos campos, tenemos el tubo catódico, el que fue puesto a punto para medir la carga y la masa de los electrones. Este tubo catódico guía hoy el haz de electrones para obtener imágenes en el televisor o en los terminales de las computadoras.

También se puede mencionar que el *flip flop* -inventado en los años 30 como contador de partículas- sirve hoy como circuito base para la memoria electrónica en las computadoras modernas.

## **9. Nuevas tecnologías**

Para lograr nuevos descubrimientos se requiere de tecnología cada vez más sofisticada. Ello ha llevado al perfeccionamiento de diversas tecnologías existentes y a la creación de nuevas. Este desarrollo ha dado lugar, cada vez más, a una estrecha relación entre los laboratorios de física de partículas y la industria.

Entre los inventos modernos realizados en los laboratorios de física de partículas con aplicaciones diversas tenemos la *cámara de deriva*, logrado por el físico francés Georges Charpak, galardonado con el premio Nobel de Física 1993. Esta cámara se presenta en forma de arpas con numerosos hilos, tendidos en el detector y conectados a un sistema de electrónica rápida. Ante el paso de una partícula, se provoca una señal electrónica, la que luego de procesarla permite identificar su traza. Su alta precisión ha hecho posible su aplicación en el examen de órganos y tumores, con una sensibilidad que reduce -en un factor 10 a más- la dosis de radiación a la que se somete el paciente. Cabe mencionar que en el CERN, en colaboración con el Hospital de Ginebra, se logró construir una cámara de positrones que hoy está comercializándose.

Uno de los aspectos más trascendentales en la tecnología moderna es la adquisición y procesamiento de datos, el que está completamente informatizado en la física de partículas. Las computadoras de los equipos de detección constituyen hoy el sistema nervioso del sistema.

El avance de la ciencia y la cooperación internacional ha impulsado la creación de redes informáticas que transmiten enormes cantidades de información, dejando completamente obsoletas las antiguas formas de comunicación.

Un desarrollo similar se ha logrado en la electrónica rápida. En física nuclear y de partículas es necesario la adquisición de grandes cantidades de datos en intervalos muy breves. Ello ha llevado a que los laboratorios de física de partículas se conviertan en lugares preferidos para la prueba de nuevas computadoras. La enorme cantidad de información generada en cada colisión ha creado la necesidad de una selección de eventos. Esta selección que incluye la identificación del momento en que se produce la colisión y las características previamente establecidas para ser considerada interesante. Este mecanismo de disparo ha impulsado desarrollos electrónicos e informáticos utilizados en procesos de simulación.

Un ejemplo de la interacción entre la ciencia y la industria lo constituye el proyecto ESPRIT (*European Strategic Programme for Research and Development in Information Technology*) en el que el CERN es un socio científico que ha creado expectativa. El proyecto ESPRIT fue establecido por la Comunidad Europea en 1984 en cuatro programas, el cuarto de los cuales fue creado en junio de 1993. El cuarto programa tiende a provocar el máximo uso de los recursos disponibles y a aumentar las aplicaciones prácticas y tecnológicas de la ciencia para que la industria europea sea más competitiva. Se promoverá también una mejor coordinación de los Estados de la comunidad en grandes proyectos internacionales y la investigación conducida por organizaciones europeas incluyendo el CERN y la Agencia Europea del Espacio. Dentro del proyecto ESPRIT, el CERN tendrá una importante contribución en el campo de la

adquisición y procesamiento rápidos de grandes cantidades de información, la que es imprescindible en el análisis de los experimentos realizados en un gran acelerador.

Considerando el desarrollo del colisionador de protones LHC, donde se tendrá una cantidad enorme de eventos, será necesario técnicas de procesamiento paralelo, en las que las tareas complementarias serán llevadas al mismo tiempo, en vez de la forma secuencial que se sigue normalmente. Este nuevo reto conlleva la elaboración de *hardware* y *software* con amplias aplicaciones en la industria moderna.

## **10. Potencial humano**

Hemos descrito complejos científicos y tecnológicos con instalaciones gigantescas y costosas. Hemos visto que todo ello nos está llevando a la comprensión de la materia. Sin embargo, lo más importante tal vez se encuentre en algo inmaterial, pero de consecuencias trascendentales en el desarrollo de los países comprometidos en la física de partículas. Me refiero a la formación de un potencial humano en ciencia y tecnología con capacidad para atacar complejos problemas.

Las universidades nos entregan generaciones de ingenieros y científicos de una calidad proporcional a los recursos científicos y tecnológicos usados en su formación. En tal sentido, esas generaciones formadas en los grandes laboratorios están aptas para participar en un mundo de alta competitividad tecnológica e industrial.

La infraestructura de los laboratorios de física nuclear y de partículas del mundo constituye una garantía para la formación de nuevos profesionales.

Por ello, los laboratorios se han convertido en centros donde convergen estudiantes de todos los niveles, desde los escolares hasta los postdoctorales, para recibir una formación de avanzada.

Los complejos mecanismos del desarrollo científico y tecnológico son adquiridos por los futuros profesionales en la práctica, en los talleres de mecánica, electrónica, frente a las computadoras, con los detectores, en los magnetos, en los miles de kilómetros de cables, procesando señales electrónicas generadas al paso de invisibles partículas.

Ese tipo de formación es invaluable, y genera la mayor de las riquezas de un país, el saber hacer, el *know how* para usar un término generalizado. Ello asegura un lugar en el concierto científico y tecnológico que se vivirá en el siglo XXI.

## **8. Altas energías en los Andes**

### **1. Física en los Andes**

Las diversas iniciativas y actividades realizadas en los años 80 muestran que existe voluntad de iniciar un proceso de colaboración en física en la Región Andina, animada en forma particular por el Centro Internacional de Física (CIF) de Bogotá. Una prueba de esa voluntad es la formación del Comité Ejecutivo de Física Fundamental en la Región Andina (SCFPAR: *Steering Committee for Fundamental Physics in the Andean Region*). Este comité se ha reunido en varias oportunidades, en el Fermilab (29 de julio de 1991), Triumf (7 de febrero de 1992), Madrid (6 de julio 1992) y en Cartagena (19 de agosto de 1992), esta última en ocasión del Quinto Simposio sobre Colaboración Panamericana en Física Experimental<sup>xx</sup>.

Las sucesivas versiones del Simposio sobre Colaboración Panamericana sobre Física Experimental, en cuya organización participó la Federación Latinoamericana de Sociedades de Física (FELASOFI), es otra prueba de una voluntad de colaboración en el hemisferio occidental. Cabe mencionar que la participación de Leon Lederman, experimentalista de física de partículas, ex director del Fermilab y premio Nobel de Física, se ha constituido en un pilar de la colaboración entre los países de América Latina y EEUU.

La colaboración panamericana en física experimental tiene una fuerte tendencia hacia la física de partículas, en gran parte debido a la procedencia del apoyo a dicha colaboración, que viene principalmente del Fermilab.

Sin embargo, la formación de SCFPAR, toma en consideración la física fundamental en un

---

<sup>xx</sup> Un borrador del informe final de la última reunión del SCFPAR ha sido preparada por Sergio Torres y Galileo Violini, 7 de diciembre de 1993



sentido más amplio, permite pensar que en la Región Andina hay posibilidades de una colaboración bien organizada y con proyecciones hacia el siglo XXI.

En la Región Andina, la física no tiene una tradición tan profunda como en países vecinos como Brasil y Argentina. Por ello es que el desarrollo de la física se enfrenta a varias dificultades de orden práctico.

Una de las falencias se da en los sistemas computacionales, sin los cuales todo intento de avanzar en física sería vano. Otro aspecto que debe tomarse en serio es la relación entre grupos de investigación de todo el mundo, lo que es difícil por falta de mecanismos modernos, pero que es mitigado gracias al correo electrónico. Asimismo, en la promoción de la física es imprescindible la participación de instituciones financieras.

Una de las posibilidades vista por el SCFPAR es la participación en grupo de la Región Andina en grandes proyectos internacionales. El SCFPAR está tomando contacto con instituciones internacionales para lograr una colaboración más amplia en este sentido.

## **2. Perspectivas para la física en los Andes**

Como en muchos otros campos de la ciencia, el problema de física en los países andinos se encuentra en la falta de recursos, generada por la baja priorización que recibe de los agentes gubernamentales en momentos de estrechez económica.

Las ciencias aparecen como un lujo que no nos podemos pagar. Ello no impide que los políticos repitan frases de apoyo a la ciencia y a los científicos y afirmaban que la ciencia es necesaria para el desarrollo.

Esta realidad provoca una falta de incentivo para que los jóvenes escojan el camino de las ciencias, llegándose entonces a un problema de masa crítica.

Un fenómeno que se ha ido intensificando es la salida de jóvenes a los países industrializados para seguir estudios doctorales. En estos últimos tiempos ha comenzado un período positivo con el regreso de un grupo importante.

En ese sentido, en física de partículas, el Fermilab ha llevado a cabo una interesante política, porque ha generado grupos de investigación en este campo en varios países de la Región. Hay una treintena de físicos de la Región Andina, América Central y el Caribe en el Fermilab.

El primer grupo fue formado en México, seguido por otros en Brasil, Argentina y Colombia. Hoy en día, en el CERN hay varios latinoamericanos realizando trabajos de investigación.

Se puede notar que la Región Andina está cada vez más activa en física fundamental. Sin embargo, para que ésta sea intensificada será necesario facilitar las comunicaciones y obtener recursos suficientes.

Debido a la falta de facilidades experimentales, la mayoría de los físicos de partículas son teóricos. En el CIF y la Universidad Nacional de Bogotá se están formando físicos orientados a la fenomenología, creándose una red de fenomenología, gracias a las comunicaciones electrónicas. Esta red constituye un valioso apoyo para el grupo, cuyo trabajo pone en evidencia la necesidad de poder tener un *login* remoto, una comunicación para trabajar en computadoras lejanas, incluyendo aquellas de los grandes laboratorios de física de partículas, los que permitirían el acceso a sus bases de datos.

En el plano experimental, unos diez físicos experimentales trabajan en Honduras, Puerto Rico, Colombia y Ecuador, los que se unen a los esfuerzos llevados a cabo antes por Brasil, México y Argentina. El Fermilab, desde 1981 ha jugado un rol importante en este desarrollo. La Universidad de los Andes (Uniandes), Bogotá, comenzó a trabajar en colaboración en el Tevatrón desde 1988. Hoy en día, una docena de físicos de Uniandes trabajan en este grupo, incluyendo Bruce Hoeneisen de Ecuador y Manuel Zanabria de Perú.

El CERN, prosiguiendo su política internacional, ha establecido acuerdos de colaboración con varios países de América Latina. Otro aspecto es el incentivo por parte del CERN por crear centros de física de partículas en América Latina, según informó, Juan Antonio Rubio, cuando en Madrid presentó el programa del CERN para América Latina. Esta iniciativa sería apoyada por algunos países europeos.

Por otro lado, varios estudiantes latinoamericanos están trabajando en TRIUMF, esperándose que su política de colaboración internacional se fortalezca.

El grupo de Colombia y Ecuador está consolidando su presencia en el Fermilab, en el experimento D0, un detector para las colisiones protón antiprotón. Los efectos tecnológicos de la física de partículas son también tomados en cuenta en las reuniones del SCFPAR. En Bogotá Georges Charpak explicó el programa que realizó en el CERN. Como se sabe, Charpak inventó la cámara de deriva y ha realizado sistemas de detección para imagenología médica, en

el Hospital de Ginebra. Podemos ver que existen posibilidades para que los estudiantes de física inicien trabajos de investigación en física de partículas; ello gracias a la colaboración internacional. Sin embargo, el desarrollo de esta colaboración también conlleva el riesgo de perder a varios de los graduados que deseen quedarse en los países industrializados.

Un campo en que la cooperación internacional puede favorecer enormemente la física en los Andes es el de los rayos cósmicos. Esto porque las condiciones geográficas lo favorecen. Uno de los ejemplos es el laboratorio de Chacaltaya, Bolivia, donde se han realizado trabajos de nivel internacional durante treinta años. Esta situación puede seguir siendo aprovechada para la detección de rayos cósmicos, los que generan cadenas de otras partículas. La altura de los picos ofrecen condiciones de baja humedad y de tener mucho menos aire que frene las partículas que vienen del cosmos.

Uno de los proyectos susceptibles de llevarse a cabo en los Andes en colaboración con Fermilab es el experimento de luz ultravioleta Cherenkov (CLUE) que servirá para medir rayos cósmicos de alta energía.

### **3. Altas energías en Perú**

En el Perú se tiene un número reducido de físicos y estudiantes de física. En todo el país sólo hay una decena de doctores en física y no se ha logrado crear la masa crítica para llevar a cabo grandes proyectos de investigación.

A mediados de los años 80, Eduardo Ugaz, quién se había formado en el extranjero, intentó fundar un grupo de teoría de física de partículas en la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) y luego en la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP). Varios estudiantes se entusiasmaron, dando lugar a seminarios sobre los temas de actualidad. Desafortunadamente, Eduardo Ugaz regresó al hemisferio Norte, creándose un vacío que todavía no termina de llenarse.

Una de las fuentes de nuevos investigadores sería un programa de maestría, pero estos no tienen un número suficiente de estudiantes como para asegurar su mantenimiento constante. En las tres universidades donde se da las carreras de física con cierta antigüedad son la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM), la UNI y la PUCP.

En estos últimos tiempos, en cierto sentido, el problema se ve agravado porque resulta más fácil realizar programas de maestría en el extranjero que en el Perú, sobre todo porque no existe un número suficiente de becas para asegurar que la dedicación a los estudios sea completa.

Por ello es que se han realizado esfuerzos tendientes a una maestría multiinstitucional. En ese sentido, se tiene la experiencia de maestrías en energía nuclear, llevadas a cabo por la UNI y el Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN).

En 1992 se estableció por primera vez la maestría en física nuclear, en colaboración entre el IPEN, la UNI y la UNMSM.

Ambos esfuerzos son repetidos en 1994, con el otorgamiento de becas para los estudiantes, gracias al apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONCYTEC).

En ese marco, la Sociedad Peruana de Física (SOPERFI) ha decidido promover los programas de maestría conjuntas en diversas especialidades. Este trabajo de cooperación interinstitucional se formalizaría más tarde en un convenio de cooperación para promover el desarrollo de la física en el Perú. Ver apéndice 8-A.

Como se ha dicho, en el campo específico de la física de partículas, sólo será posible iniciar su desarrollo con la colaboración internacional. Por ello es que se participó en una comisión designada por el CONCYTEC para trabajar sobre proyectos de promoción de la física de partículas, conformada ahora por los representantes de la PUCP, UNI, UNMSM y el IPEN.

Esta comisión, en base a convenios firmados por el CERN con países vecinos, como Chile por ejemplo, llegó a una propuesta de convenio CERN CONCYTEC para promover el desarrollo de la colaboración en física de partículas, el que luego fue firmado por el presidente del CONCYTEC, Ing. Carlos Chirinos, y el Director del CERN, Dr. Carlo Rubbia. Ver apéndice 8-B.

Una de las ideas que tiene aceptación en Lima, es comenzar con la formación de un potencial humano sobre el tema. Ello sería factible con la promoción de una maestría en física a realizarse en Lima, con la participación de las universidades de Ingeniería, San Marcos y Católica y del Instituto Peruano de Energía Nuclear.

Las maestrías en las universidades son autónomas, con programas de cursos aprobados por las autoridades correspondientes. Los alumnos serán seleccionados con reglas de cada universidad. Los cursos comunes, especialmente el de física de partículas, serán dictados por

un mismo profesor para los alumnos de las tres universidades.

La parte experimental, la que implica detectores de radiaciones, tratamiento de señales y procesamiento de datos serán llevados a cabo en laboratorios del IPEN. Se requiere que el graduado conozca las técnicas de experimentación, las que tienen parte en común con aquellas de otras especialidades de la física.

La parte teórica en física de campos de una misma especialidad si tiene diferencias fundamentales. Por ello, para el dictado de cursos de teoría, se requiere especialistas extranjeros.

Respecto a las características de las maestrías, podemos informar que la UNI otorga maestría en ciencias con mención en física, en la que hay líneas de física nuclear, física de estado sólido. En virtud del convenio, ahora podrá ofrecerse la especialidad de física de partículas, energía solar y física teórica.

En la UNMSM existe la maestría en física nuclear, física de estado sólido y en geofísica.

En 1993, la PUCP empezó la maestría en física, cuyas líneas son física de estado sólido y física de partículas.

#### ***4. Perspectivas para la física en el Perú***

Las perspectivas para la física en el Perú depende de la cooperación interinstitucional. Cualquiera de las instituciones que desarrollan de física, si se mantiene aisladas de las otras no tienen probabilidades de avances significativos.

Las universidades no cuentan con laboratorios donde se pueda investigar y formar nuevas generaciones de físicos. Algunos institutos de investigación cuentan con instrumentos especializados, los que eventualmente pueden ser potenciados por el trabajo de jóvenes tesisistas.

De ello se desprende que el camino a seguir es la utilización óptima de las instalaciones científicas y tecnológicas del país.

Cabe señalar que en los programas de colaboración interinstitucional resulta importante el hecho de que se cuenta con el Centro Nuclear de Huarangal (CNH), ubicado a 40 km al norte de Lima, el que constituye la mayor infraestructura científica y tecnológica del país.

El Centro Nuclear de Huarangal explota un reactor de investigaciones de 10 MW, el reactor RP-10. Ello implica el dominio de una serie de técnicas de detección y de procesamiento de datos, que facilitan la formación de científicos, ingenieros y técnicos.

En este marco, el CONCYTEC le toca desempeñar un rol preponderante en la cooperación, puesto que cuenta con los recursos para incentivarla, priorizando precisamente los proyectos donde participen investigadores de varias instituciones.

## **Apéndice 8-A: Cooperación para la física en el Perú**

ACUERDO DE COLABORACION INTERINSTITUCIONAL PARA EL DESARROLLO DE LA FISICA EN EL PERU

CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA (CONCYTEC)

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS (UNMSM)

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA (UNI)

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU (PUCP)

INSTITUTO PERUANO DE ENERGIA NUCLEAR (IPEN)

Conste por el presente documento, el acuerdo que celebran el *Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología* -en adelante CONCYTEC- representado por su presidente, Ing. Carlos Chirinos Vi llanueva, con domicilio en Parque Universitario, ex edificio del Ministerio de Educación, piso 18; la *Universidad Nacional Mayor de San Marcos* -en adelante UNMSM- representada por su Rector, Ing. Wilson Reátegui Chávez, con domicilio en Av. República de Chile 295, piso 6; la *Universidad Nacional de Ingeniería* -en adelante UNI- representada por su Rector, Arq. Javier Sota Nadal, con domicilio en Av. Túpac Amaru, s/n, Rímac; la *Pontificia Universidad Católica del Perú* -en adelante PUCP- representada por su Rector, Ing. Hugo Sarabia Swett, con domicilio en Av. Universitaria c 18 s/n San Miguel y el *Instituto Peruano de Energía Nuclear* -en adelante IPEN- representado por su Director Ejecutivo, Dr. Conrado Seminario Arce, con domicilio en Av. Canadá 1470, San Borja; en los términos siguientes:

### **ANTECEDENTES**

El CONCYTEC, la UNMSM, la UNI, la PUCP y el IPEN se encuentran abocados al desarrollo de la ciencia y la tecnología en sus diferentes rubros, habiendo suscrito, con este objeto, en algunos casos, convenios bilaterales entre sí y con otras instituciones, a nivel tanto nacional como internacional.

Desde hace dos años, profesores e investigadores de dichas instituciones sostienen reuniones de coordinación para determinar el marco de referencia dentro del cual se promoverá el estudio y el desarrollo de la física atómica, física nuclear y física de partículas en el país.

### **FINALIDAD**

[2.1] Estimular e intensificar la colaboración interinstitucional en el desarrollo de la física, en el marco de los planes institucionales de promoción y desarrollo científico y tecnológico.

[2.2] Apoyar los esfuerzos tendientes a desarrollar programas de estudios de postgrado en física en las universidades, buscando evitar la duplicación de esfuerzos, a la vez que optimizar el aprovechamiento de la infraestructura y el potencial humano existentes.

### **OBJETIVOS A CORTO Y A MEDIANO PLAZO**

[3.1] Formar grupos de estudio e investigación en el área de física atómica, física nuclear y física de partículas.

[3.2] Promover e incentivar la creación de vínculos con instituciones nacionales y extranjeras, con el fin de elevar el nivel del potencial humano e incrementar los recursos necesarios para el estudio e investigación en física.

### **OBLIGACIONES DE LAS PARTES**

#### **[4.1] DEL CONCYTEC**

Gestionar recursos de la cooperación internacional dedicados al desarrollo de la física. Gestionar ante los organismos de cooperación internacional el entrenamiento y capacitación de

profesores e investigadores de las instituciones que suscriban el Acuerdo. Proporcionar a los programas de Maestría o investigación en física los recursos adicionales necesarios, de acuerdo a disponibilidad. Apoyar los programas de estudio e investigación acordadas dentro del presente Acuerdo. Administrar los bienes y servicios que sean fruto del Acuerdo, en coordinación con la Comisión Coordinadora del presente Acuerdo.

#### **4.2 DE LA UNMSM, LA UNI Y LA PUCP**

Incentivar la implementación de los estudios de postgrado al más alto nivel en física atómica, física nuclear y física de partículas en sus respectivas instituciones, coordinando para que éstos sean compatibles con un programa conjunto. Promover la participación de profesores y la colaboración institucional para realizar las tareas de docencia e investigación, en instituciones firmantes del Acuerdo. Facilitar la participación de profesores e investigadores para la realización de proyectos de investigación conjuntos, dentro de las actividades programadas del Acuerdo. Promover el desarrollo de tecnologías afines a las investigaciones en física atómica, física nuclear y física de partículas que sean de interés para el país.

#### **[4.3] DEL IPEN**

Ceder un local para la realización de las actividades conjuntas y para la instalación de equipos e instrumental, al que tendrán acceso los profesores, investigadores, alumnos y profesionales de las instituciones firmantes del Acuerdo. Hacerse cargo del mantenimiento del local, así como de los gastos de los servicios correspondientes. Facilitar el acceso de miembros del Acuerdo al local y a los laboratorios de IPEN, que sean necesarios, para el desarrollo de los cursos o para los trabajos de investigación acordados. Gestionar ante el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), en su calidad de representante del Perú, apoyo económico, equipo, asistencia profesional y técnica para los proyectos que lo requieran.

#### **DE LA ADMINISTRACION**

[5.1] La coordinación de los alcances del Acuerdo estará a cargo de una Comisión Coordinadora, la cual estará conformada por los representantes de las instituciones que suscriben, y se regirá por sus propias normas. Habrá un representante por cada institución.

#### **DURACION**

[6.1] Este acuerdo entra en vigencia en la fecha de la suscripción y su duración será de (02) dos años, prorrogables en forma automática por un período igual, salvo decisión contraria de la Comisión Coordinadora.

[6.1] Cada una de las partes podrá retirarse del Acuerdo, en cuyo caso la decisión será puesta en conocimiento de la Comisión Coordinadora, por la institución a la que pertenece, con una anticipación mínima de 6 meses. Las obligaciones asumidas por la parte que se retira podrán concluirse dentro de un plazo prudencial, acordado por la Comisión Coordinadora, sin causar detrimento de ninguno de los programas que se estuvieran llevando a cabo.

En mérito de lo cual se firma el presente Acuerdo a los veintitres días del mes de julio de 1993.

**Ing. Carlos Chirinos Villanueva**  
**Consejo Nacional de Ciencia y**  
**Tecnología**  
**PRESIDENTE**

**Dr. Wilson Reátegui Chávez**  
**Universidad Nacional Mayor**  
**de San Marcos**  
**RECTOR**

**Arq. Javier Sota Nadal**  
**Universidad Nacional de**  
**Ingeniería**  
**RECTOR**

**Ing. Hugo Sarabia Swett**  
**Pontificia Universidad**  
**Católica del Perú**  
**RECTOR**

**Dr. Conrado Seminario Arce**  
**Instituto Peruano de Energía**  
**Nuclear**  
**DIRECTOR EJECUTIVO**

## **Apéndice 8-B: Acuerdo CERN - CONCYTEC**

### **ACUERDO DE COOPERACION**

Entre

**CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGIA DEL PERU (CONCYTEC)**  
**THE EUROPEAN ORGANIZATION FOR NUCLEAR RESEARCH (CERN)**

sobre

### **EL MAYOR DESARROLLO DE LA COOPERACION CIENTIFICA Y TECNICA EN LOS PROYECTOS DE INVESTIGACION DEL CERN**

El Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología del Perú (CONCYTEC) representado por su Presidente, y la European Organization for Nuclear Research, actualmente llamada CERN y representada por su Director General, a continuación ambas serán llamadas las Partes, CONVENCIDOS de que la investigación en física de altas energías es importante para el desarrollo de las ciencias básicas y el progreso tecnológico;

CONSIDERANDO el deseo del CERN de establecer y promover la cooperación con los Estados que no son miembros de él pero con los cuales es posible establecer una cooperación directa y beneficiosa; CONSIDERANDO el objetivo del Perú de desarrollar el campo de la física de partículas, en base a un plan nacional de largo plazo; RECONOCIENDO la conveniencia e interés de ambas partes de fomentar la colaboración técnica y científica existente en la física de partículas elementales y áreas relacionadas;

TOMANDO EN CUENTA el propósito del Perú de asegurar a largo plazo la oportunidad de que sus especialistas participen en proyectos de investigación del CERN y utilicen sus exclusivas instalaciones experimentales;

### **HAN ACORDADO**

#### **ARTICULO 1**

##### **Propósito**

El propósito del presente Acuerdo es proporcionar un marco de referencia que permita a las partes desarrollar la cooperación científica y técnica partiendo de una base de reciprocidad, con la participación en proyectos de investigación y en programas de interés mutuo.

#### **ARTICULO 2**

##### **Participación en proyectos de investigación**

- (a) La cooperación se organizará principalmente sobre la base de proyectos de investigación. Cada uno de ellos dará origen a un protocolo específico, que será parte del presente Acuerdo, conforme a lo establecido en el Artículo 6. L
- (b) Los físicos, ingenieros y técnicos especialistas peruanos podrán participar en proyectos de investigación del CERN en el área de la física teórica y experimental, ingeniería de aceleradores y detectores (incluyendo la modernización del LEP) e informática, conforme a los protocolos que se definirán en los proyectos.
- (c) La contribución del Perú a un proyecto específico del CERN podrá ser, indistintamente, en términos de mano de obra, de materiales o de dinero o cualquier combinación de éstos.

#### **ARTICULO 3**

##### **Participación en programas mayores del CERN**

La parte peruana expresa su interés y propósito en participar en futuros programas mayores y/o proyectos del CERN. Las partes consideran los términos y condiciones de dicha participación que será definida en un(os) Protocolo(s) específico(s) del presente Acuerdo, bajo las condiciones establecidas en el Artículo 6.

## **ARTICULO 4**

### **Validez**

El presente Acuerdo no afectará cualquier otro compromiso internacional de cualquiera de las partes.

## **ARTICULO 5**

### **Personal Científico**

- (a) El CERN considerará las solicitudes de científicos en el Perú que postulen a los puestos en el marco del programa de Científicos Asociados para ciudadanos de Estados No-Miembros.
- (b) El CERN también podrá, ocasionalmente, pagar los gastos de estadía de ingenieros, técnicos provenientes del Perú para trabajar en el CERN en proyectos específicos.
- (c) Científicos e ingenieros jóvenes del Perú también podrán postular para asistir a las Escuelas de Formación del CERN como la Escuela de Aceleradores, Escuela de Computación y Escuela de Física.

## **ARTICULO 6**

### **Protocolos**

- (a) El cumplimiento de este Acuerdo estará sujeto a la celebración de Protocolos específicos que deberán regir la cooperación entre los Centros de Investigación peruanos con el CERN durante el desarrollo de proyectos determinados de interés mutuo. Aquellos deberán redactarse y firmarse entre el CERN, el CONCYTEC y las instituciones peruanas involucradas. Las obligaciones contraídas por esta(s) Institución(es) respecto de lo(s) proyecto(s) son estrictamente definidas en cada Protocolo. Los Protocolos serán parte integral de este Acuerdo.
- (b) Cuando las partes estimen, definirán un(os) Protocolo(s) específico(s) los términos que regirán la condición de su respectivo personal mientras se encuentre en territorio de la contraparte, el ámbito de la responsabilidad y seguro, el régimen de propiedad intelectual y de transferencia de tecnología.

## **ARTICULO 7**

### **Programa del Comité Conjunto**

Para poder aplicar las disposiciones del presente Acuerdo, el CONCYTEC y el CERN elegirán un programa de trabajo. Para preparar este programa de trabajo y para revisar la implementación y aplicación de este Acuerdo así como de las medidas que serán tomadas por las dos partes para la futura promoción del presente acuerdo, un comité será establecido. El Comité elevará sugerencias sobre las nuevas posibilidades de cooperación de ambas partes. El Comité Conjunto se reunirá cada dos años alternativamente en Suiza y en el Perú.

## **ARTICULO 8**

### **Consultoría**

A petición del CONCYTEC, el CERN podría enviar a miembros de su personal al Perú como consultores, con el fin de asesorar y ayudar a establecer nuevas actividades en el Perú relacionadas con el CERN.

## **ARTICULO 9**

### **Aprobación**

Este acuerdo y cualquiera de los Protocolos contemplados en los términos del Artículo 6 deberán ser aprobados por las partes contratantes, de acuerdo a sus propios procedimientos.

## **ARTICULO 10**

### **Disputas**

Toda disputa que pudiera originarse entre el CERN y el CONCYTEC, relacionada con la

interpretación o aplicación del presente Acuerdo y que no pudiera ser resuelta en las negociaciones directas, deberá, a menos que las partes concuerden en otro procedimiento de solución, someterse -a pedido de cualquiera de ellas- a un tribunal arbitral compuesto por tres miembros, a saber un árbitro elegido por el Director del CERN o quien lo represente, un árbitro elegido por el CONCYTEC y un tercer árbitro independiente, elegido conjuntamente por los otros dos, quien presidirá el tribunal.

La demanda deberá incluir el nombre del árbitro elegido por el demandante; el demandado deberá designar su árbitro e informar su nombre a la otra parte, dentro de los dos meses de haber recibido la demanda. Si el demandado no cumple con este plazo o si los dos árbitros no concuerdan con la elección del tercero dentro de los dos meses de designación del último de ellos, el árbitro del demandado o el tercer árbitro, según corresponda, será elegido por el Presidente de la Corte Internacional de Justicia, a petición de la parte que apele en primer lugar a la Corte.

El tribunal establecerá sus propios procedimientos. Sus decisiones deberán ser acatadas por las partes las cuales no tendrán derecho a apelar.

## **ARTICULO 11**

### **Duración**

Este Acuerdo se mantendrá vigente por un período inicial de cinco años a partir de su firma. Podrá renovarse por el mismo período, a menos que cualquiera de las partes manifieste a la otra su deseo de ponerle término, seis meses antes de su caducidad.

En caso del término del Acuerdo, los proyectos y programas incluidos bajo el presente Acuerdo deberán continuar su validez hasta su terminación.

Hecho en .....

En dos versiones, en idioma inglés y español. En caso de dudas sobre su interpretación o en caso de disputa se tendrá en cuenta sólo la versión en inglés.

**Por el Consejo Nacional de  
Ciencia y Tecnología  
(CONCYTEC)**

**Carlos CHIRINOS  
Presidente**

**Por la European Organization  
for Nuclear Research  
(CERN)**

**V. Carlo  
Director**

**RUBBIA  
General**



## 9. Bibliografía

1. Richard Feynman, *La Nature de la Physique*, Editions du Seuil, París, 1980.
2. *La Matière Aujourd'hui*, Editions du Seuil, París, 1981.
3. Colloque International sur l'Histoire de la Physique des Particules, *Journal de Physique*, París, C8-1982.
4. *La Recherche en Physique Nucléaire*, Editions du Seuil, París, 1983.
5. Pierre Radvanyi y Monique Bordry, *La Radiativité Artificielle et son Histoire*, Editions du Seuil, París, 1984.
6. Emilio Segrè, *From X-Ray to Quarks, Modern Physicists and their Discoveries*, Arnoldo MONDATORI Editori, 1980.
7. Richard Feynman, *QED, The Strange Theory of Light and Matter*, Princenton University Press, Princenton, 1985.
8. Yuval Ne'eman y Yoram Kirsh, *The Particle Hunters*, Cambridge University Press, 1986.
9. John Gribbin, *In Search of the Big Bang*, A batam Book, New York, 1986.
10. Gilles Cohen-Tannoudji, Michel Spiro, *La Matière-Espace-Temps*, Fayard, París, 1986.
11. Luc Valentin, *Le Monde Subatomique*, Hermann, París, 1986
12. P.C.W. Davies, *The Forces of Nature*, Cambridge University Press, New York, 1986.
13. Michel Riordan, *The Hunting of the Quark*, Simon and Schuster/Touchstone Books, New York, 1987.
14. *Physics Through the 1990s: Nuclear Physics*, National Academy Press, Washington, D.C. 1986.
15. *Physics Through the 1990s: Elementary-Particle Physics*, National Academy Press, Washington, D.C. 1986.
16. Paul Davies (editor), *The New Physics*, Cambridge University Press, New York, 1989.
17. Richard Carrigan y W. Peter Trower (editores), *Readings from Scientific American: Particle Physics in the Cosmos*, W. H. Freeman and Company, New York, 1989.
18. Richard Carrigan y W. Peter Trower (editores), *Readings from Scientific American: Particles and Forces at the Hearth of the Matter*, W. H. Freeman and Company, New York, 1990.
19. *Le CERN: Un Exemple de Coopération Scientifique International*, Publications CERN, Ginebra, 1991.
20. CERN, *Laboratorio Europeo para la Física de Partículas*, Publications CERN, Ginebra, 1992.
21. B.R. Martin y G. Shaw, *Particle Physics*, John Wiley and Sons, Chichester, Inglaterra, 1992.
22. Steven Weinberg, *The Discovery of Subatomic Particles*, Penguin Books, England, 1993.
23. Steven Weinberg, *The first 3 minutes*, Flamingo, Londres, 1993.
24. Steven Weinberg, *Dreams of a Final Theory*, Vintage, Londres, 1993.
25. Etienne Klein, *Sous l'Atome les Particules, Dominos/Flammarion*, París, 1993.