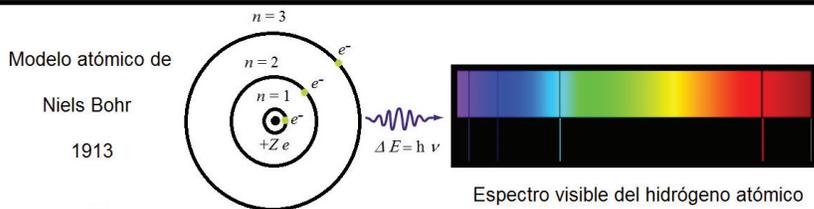


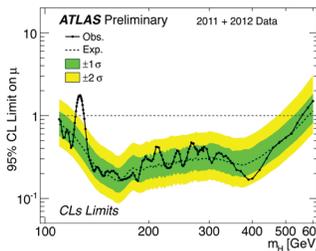
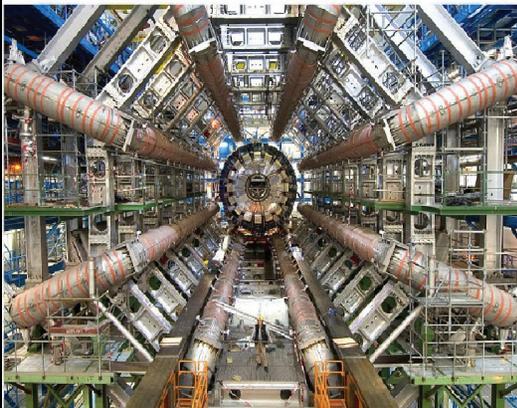
Ciencia e Investigación

Primera revista argentina de información científica / Fundada en enero de 1945



EL BOSÓN DE HIGGS

■ Graciela B. Gelmini

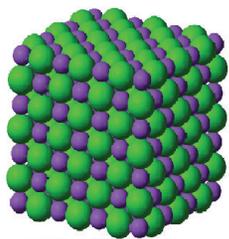


BREVE HISTORIA DEL ADN, SU ESTRUCTURA Y FUNCIÓN

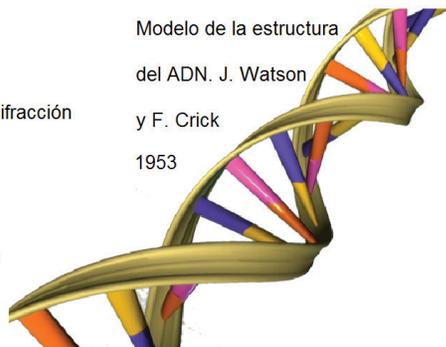
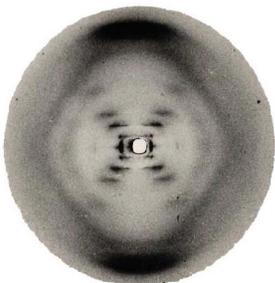
■ Oscar E. Piro

R. GANS Y T. ISNARDI O EL CONFLICTO ENTRE DOCENTES E INVESTIGADORES DURANTE LA ETAPA FUNDACIONAL DEL INSTITUTO DE FÍSICA DE LA UNIVERSIDAD DE LA PLATA

■ Osvaldo Civitarese



Modelo de la estructura del ADN. J. Watson y F. Crick 1953



COMPROMISO

con el bienestar de todos

HACEMOS ENERGÍA NUCLEAR



NUCLEOELÉCTRICA ARGENTINA S.A.

ATUCHA I / ATUCHA II / EMBALSE

Despejá tus dudas sobre la energía nuclear en: www.na-sa.com.ar



Ministerio de
Planificación Federal,
Inversión Pública y Servicios
Presidencia de la Nación

EDITOR RESPONSABLE

Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias (AAPC)

COMITÉ EDITORIAL

Editora

Dra. Nidia Basso

Editores asociados

Dr. Gerardo Castro

Dra. Lidia Herrera

Dr. Roberto Mercader

Dra. Alicia Sarce

Dr. Juan R. de Xammar Oro

Dr. Norberto Zwirner

CIENCIA E INVESTIGACIÓN

Primera Revista Argentina de información científica.

Fundada en Enero de 1945.

Es el órgano oficial de difusión de La Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias.

A partir de 2012 se publica en dos series, Ciencia e Investigación y Ciencia e Investigación Reseñas.

Av. Alvear 1711, 4° piso,
(C1014AAE) Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.
Teléfono: (+54) (11) 4811-2998
Registro Nacional de la Propiedad Intelectual
N° 82.657. ISSN-0009-6733.

Lo expresado por los autores o anunciantes, en los artículos o en los avisos publicados es de exclusiva responsabilidad de los mismos.

Ciencia e Investigación se edita on line en la página web de la Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias (AAPC)
www.aargentinapciencias.org

En 1913 N. Bohr pudo explicar las posiciones de las líneas de los espectros del átomo de hidrógeno con su modelo atómico, lo que fue una comprobación cuantitativa de que la materia estaba constituida por "ladrillos" más pequeños.

Las investigaciones sobre su naturaleza posibilitaron construir el Modelo Standard de las partículas elementales. El experimento más complejo de la historia, el Large Hadron Collider, cuyo detector multipropósito ATLAS es un cilindro de 46 m de largo y 25 m de diámetro, permitió hallar en 2012 una esquiya partícula básica en el Modelo Standard: el bosón de Higgs.

En 1913 W. H. y W. L. Bragg pudieron, mediante la difracción de rayos X, determinar por primera vez una estructura cristalina, la del CINA. La aplicación de ésta a cristales de ADN hizo posible que J. Watson y F. Crick determinaran la estructura de la doble hélice del ADN en 1953.



SUMARIO

EDITORIAL

La física celebra notables centenarios

Roberto C. Mercader 3

ARTÍCULOS

El Bosón de Higgs

Graciela B. Gelmini..... 5

Breve historia del ADN, su estructura y función

Oscar E. Piro 25

R. Gans y T. Isnardi o El conflicto entre docentes e investigadores durante la etapa fundacional del Instituto de Física de la Universidad de La Plata

Oswaldo Civitarese 53

INSTRUCCIONES PARA AUTORES 59

... La revista aspira a ser un vínculo de unión entre los trabajadores científicos que cultivan disciplinas diversas y órgano de expresión de todos aquellos que sientan la inquietud del progreso científico y de su aplicación para el bien.

Bernardo A. Houssay

Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias

COLEGIADO DIRECTIVO

Presidente
Dr. Miguel Ángel Blesa

Vicepresidente
Dr. Eduardo H. Charreau

Secretaria
Dra. Alicia Sarce

Tesorero
Dr. Marcelo Vernengo

Protesorero
Dra. Lidia Herrera

Presidente Anterior
Dra. Nidia Basso

Presidente Honorario
Dr. Horacio H. Camacho

Miembros Titulares
Ing. Juan Carlos Almagro
Dr. Alberto Baldi
Dr. Máximo Barón
Dr. Gerardo D. Castro
Dra. Alicia Fernández Cirelli
Ing. Arturo J. Martínez
Dr. Alberto Pochettino
Dr. Carlos Alberto Rinaldi
Dr. Alberto C. Taquini (h)
Dr. Juan R. de Xammar Oro

Miembros Institucionales
Sociedad Argentina de Cardiología
Sociedad Argentina de Farmacología Experimental
Sociedad Argentina de Hipertensión Arterial
Sociedad Argentina de Investigación Bioquímica
Sociedad Argentina de Investigación Clínica
Unión Matemática Argentina

Miembros Fundadores
Dr. Bernardo A. Houssay – Dr. Juan Bacigalupo – Ing. Enrique Butty
Dr. Horacio Damianovich – Dr. Venancio Deulofeu – Dr. Pedro I. Elizalde
Ing. Lorenzo Parodi – Sr. Carlos A. Silva – Dr. Alfredo Sordelli – Dr. Juan C. Vignaux – Dr.
Adolfo T. Williams – Dr. Enrique V. Zappi

AAPC
Avenida Alvear 1711 – 4º Piso
(C1014AAE) Ciudad Autónoma de Buenos Aires – Argentina
www.aargentinapciencias.org

LA FÍSICA CELEBRA NOTABLES CENTENARIOS

■ **Roberto C. Mercader**

Departamento de Física
Facultad de Ciencias Exactas
Instituto de Física La Plata
CCT-La Plata, CONICET
Universidad Nacional de La Plata
115 y 49, 1900 La Plata, Argentina

mercader@fisica.unlp.edu.ar

Desde la aparición del primer número de *Ciencia e Investigación Divulgación* en 2012, de manera directa o indirecta se han estado celebrando los centenarios de extraordinarios acontecimientos científicos que cambiaron para siempre nuestra forma de pensar. La física clásica con sus ideas mecanicistas y deterministas, constituida por la mecánica, la termodinámica, el electromagnetismo y la física estadística, se creía soberana a fines del siglo XIX. Se suponía que ella bastaba para dar cuenta de todos los fenómenos conocidos y, en la opinión de Lord Kelvin, aun aquéllos por conocer. No obstante, experimentos notables de fines del siglo XIX y comienzos del XX mostraron que el mundo microscópico se comportaba según leyes completamente distintas a las del macroscópico. Fue necesario lentamente tomar conciencia de que era ineludible plantear una nueva visión para entender la naturaleza. Así, las nuevas evidencias dieron nacimiento a la mecánica cuántica, que debió esperar, sin embargo, hasta fines de la década de 1920 para poder ser formulada en forma completa. Con su ayuda hemos sido capaces de comprender el universo como nunca antes.

Además de los fenómenos asombrosos e inexplicables que se descubrieron en la primera década del siglo XX, se consolidaron conceptos científicos que en ese entonces todavía no tenían gran aceptación. Por ejemplo, a pesar de que se había demostrado que la materia estaba constituida por átomos, todavía la idea de que la materia no era continua no gozaba de una aceptación generalizada aun para los más encumbrados hombres de ciencia. Aquéllos que sí aceptaban la teoría atómica, tomaban el sentido literal de la palabra átomo como algo indivisible que no podía tener constituyentes más pequeños. Por eso, a pesar de que el electrón había sido descubierto en 1897 por J. J. Thomson, no había consenso sobre qué eran esas partículas de carga negativa que aparecían en las experiencias con rayos catódicos. En 1904 el mismo Thomson había propuesto un modelo de átomo en el que los electrones estaban uniformemente distribuidos dentro del átomo suspendidos en una “nube de carga” positiva. Así, si como afirma James Burke, “Somos aquello que creemos saber que somos” [1], hasta 1911 –año de la explicación del experimento de dispersión de partículas alfa por láminas de oro hecho por Ernest Rutherford– los átomos “no tenían núcleo”.

En 1911, a partir de sus experiencias, Rutherford planteó su propio modelo de átomo para dar cuenta de sus sorprendentes resultados. En él, el átomo se componía de una región de carga positiva central con casi toda la masa del átomo, que ocupaba un volumen pequeño con relación al del átomo y una suerte de nube con cargas negativas en órbitas alrededor del núcleo que Rutherford suponía que presumiblemente eran electrones. Trabajando con Rutherford, en 1913 Niels Bohr formuló el primer modelo atómico que permitió explicar cuantitativamente la naturaleza de las líneas espectrales del átomo de hidrógeno.

Estos primeros pasos hacia el entendimiento de que los átomos estaban compuestos de partículas más pequeñas fueron las semillas de los desarrollos que en las siete décadas posteriores llevaron a la construcción del

“Modelo Standard de las partículas elementales”, un planteo que puso en un contexto inteligible la enorme complejidad del universo en las escalas más microscópicas accesibles a nuestros experimentos. A pesar de los grandes interrogantes que aún quedan por resolver, el Modelo Standard y la Teoría General de la Relatividad son las dos teorías más exitosas de la física. La consolidación del Modelo Standard ha sido posible gracias al enorme esfuerzo que a escala mundial se ha realizado para comprobar las predicciones de la teoría. Como culminación de la construcción y funcionamiento del laboratorio más complejo del mundo, el *Large Hadron Collider*, situado debajo de la frontera entre Suiza y Francia, a comienzos de 2012 se confirmó la existencia de un eslabón fundamental de la teoría; el bosón de Higgs. En el artículo de Graciela Gelmini tendremos en este número una notable descripción de cómo se pudo llegar a este logro.

A pesar de la explicación del efecto fotoeléctrico por Einstein en 1905, los fotones como cuantos de radiación electromagnética no gozaban tampoco de una aceptación completa. Quizás ésa sea una de las razones por las que Einstein tuviera que esperar hasta 1921 para recibir el premio Nobel por la explicación del efecto fotoeléctrico. No obstante, ya en 1914 Max von Laue recibió el Premio Nobel de física “por su descubrimiento de la difracción de rayos X por los cristales”.

El Premio Nobel de física de 1915 fue otorgado conjuntamente a William Henry Bragg y William Lawrence Bragg, padre e hijo, “por sus servicios en el análisis de la estructura cristalina por medio de rayos x”, que se otorgó en mérito a que, intentando determinar cómo eran los arreglos de átomos que formaban la materia, en 1913 dirigieron haces de rayos X hacia sustancias cristalinas y encontraron por primera vez la ley que lleva su nombre. En honor al centenario de estas notables realizaciones, 2014 ha sido declarado el año internacional de la cristalografía por la *International Union of Crystallography*.

La difracción de rayos X por cristales fue un hecho tan fundamental en la historia de la ciencia que su aplicación permitió cuarenta años después lograr un extraordinario hecho científico: el descubrimiento de la estructura del ADN. El ácido desoxirribonucleico está presente en el núcleo de todas las células y contiene la totalidad del código que permite el desarrollo, la reproducción y el funcionamiento de todos los seres vivos. El descubrimiento de la estructura cristalina del ADN por James Watson y Francis Crick fue uno de los mayores hitos del siglo XX. Tal vez menos conocido es el hecho de que su descubrimiento fuera hecho gracias a la difracción de rayos X en experimentos realizados por Rosalind Franklin, quien murió prematuramente en 1958.

El descubrimiento de la “doble hélice” allanó el camino a la cristalografía de macromoléculas y proteínas y dio paso a la biología molecular, herramientas todas esenciales para las ciencias biológicas y médicas de hoy. Watson y Crick fueron recompensados con el Premio Nobel de Fisiología o Medicina en 1962, junto con Maurice Wilkins, quien había trabajado con Rosalind Franklin. Bien vale la pena entonces celebrar con igual pompa el sexagésimo aniversario del descubrimiento de la estructura del ADN. Estos aspectos están relatados con un cuidadoso detalle y juiciosa opinión en el artículo sobre la historia del ADN escrito por Oscar Piro.

El centenario de las primeras investigaciones doctorales en física de la Argentina se conmemora en el tercer artículo de este número. Está dedicado a aspectos poco conocidos de su desarrollo inicial. Si bien en 1910 Emile Bose, Director del Instituto de Física de La Plata, estableció palmariamente una línea de desarrollo para la física y la ciencia en la Argentina, claramente hubo un gran desvío de sus lineamientos originales luego de su muerte ocurrida en 1911. Aun cuando en 1916 ya se habían graduado los primeros cuatro doctores en física de América Latina, veremos en el artículo de Osvaldo Civitarese cómo las ideas de Bose fueron controvertidas para la época en nuestra sociedad y resistidas casi desde el comienzo por algunos de sus propios discípulos. Esto trajo como consecuencia que durante décadas nuestro país careciera de un desarrollo científico sostenido.

Esperamos que el lector encuentre estos artículos sobre el viaje al muy complejo mundo de las partículas elementales, a la historia de cómo se logró comprender la transmisión de la vida en su nivel más fundamental y a algunos aspectos poco conocidos del desarrollo incipiente de la física en nuestro país, tan amenos e interesantes como los hemos hallado nosotros.

EL BOSÓN DE HIGGS

Palabras clave: Modelo Estándar de las Partículas Elementales, Bosón de Higgs, el origen de la masa.
Key words: Standard Model of Elementary Particles, Higgs Boson, origin of mass.

En el año 2012 fue descubierta la última partícula que completa el Modelo Estándar de las Partículas Elementales, la teoría más sofisticada sobre la naturaleza en la historia de la humanidad. Si bien la presente formulación de la teoría proviene de los años 1960 y 70, ésta incorpora todo lo que miles de científicos descubrieron sobre partículas elementales y sus interacciones (excepto la gravitatoria) desde cerca de 1700 en adelante. Aunque brevemente, aquí trazamos la evolución de los principales conceptos incorporados en la teoría y explicamos la relevancia de la nueva partícula y del mecanismo por el que F. Englert y P. Higgs recibieron el Premio Nobel de física de 2013.

Graciela B. Gelmini

Department of Physics and Astronomy,
University of California, Los Angeles (UCLA),
475 Portola Plaza, Los Angeles, CA 90095, USA.

gelmini@physics.ucla.edu

The last particle that completes the “Standard Model of Elementary Particles”, the most sophisticated theory of nature in human history, was discovered in 2012. Although the present formulation of the theory comes from the 1960’s and 70’s, it incorporates all discoveries that thousands of scientists made about elementary particles and their interactions (except for gravity) since the 1700’s. Even if briefly, here we review the development of the major concepts included in the theory and explain the relevance of the new particle and the mechanism for which F. Englert and P. Higgs received the Nobel Prize in Physics 2013.

El 4 de julio de 2012 miles de físicos de partículas elementales se reunieron en auditorios distribuidos por todo el mundo para presenciar un seminario transmitido a través de Internet en directo desde el auditorio principal de la Organización Europea para la Investigación Nuclear, CERN (*Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*) en Ginebra, Suiza, a las 9 hora local (fig. 1).

En todos esos auditorios y por todo el mundo al unísono, los físicos mantuvieron la respiración en suspenso, gritaron exaltados y aplaudie-

ron hasta que les dolieron las manos y algunos casi lloraron por la emoción. Entre los que sí lloraron estuvo el Dr. Peter Higgs, el físico inglés de 84 años que dio su nombre a una famosa partícula (figura 2). ¿Qué fue lo que hizo que estos físicos se comportaran como los hinchas en un partido de fútbol o el público de un concierto de rock? Lo que anunciaron en este seminario los portavoces de los dos experimentos principales del CERN, CMS y ATLAS, fue que ambos independientemente habían descubierto “una partícula compatible con” el “bosón de Higgs”

(CERN, 2012), la última pieza del Modelo Estándar (ME) de las Partículas Elementales, formulado en los años 1960 y recién completado con este descubrimiento. Con la cautela propia de los científicos, sólo en marzo de 2013 (CERN, 2013) después de poder acumular datos suficientes para confirmar dos propiedades fundamentales de la partícula, declararon que ésta es “un bosón de Higgs”, no aún “el bosón de Higgs”, ya que llevará muchos años descartar o confirmar la posibilidad de encontrar otros “bosones de Higgs” no incluidos en el ME.



Figura 1: Reacción simultánea de físicos de partículas ante el anuncio del descubrimiento del bosón de Higgs. A la izquierda, en el auditorio principal del CERN, Ginebra, Suiza; en el centro, en un auditorio del Fermilab en Chicago EE.UU.; a la derecha, en un auditorio de Melbourne, Australia.

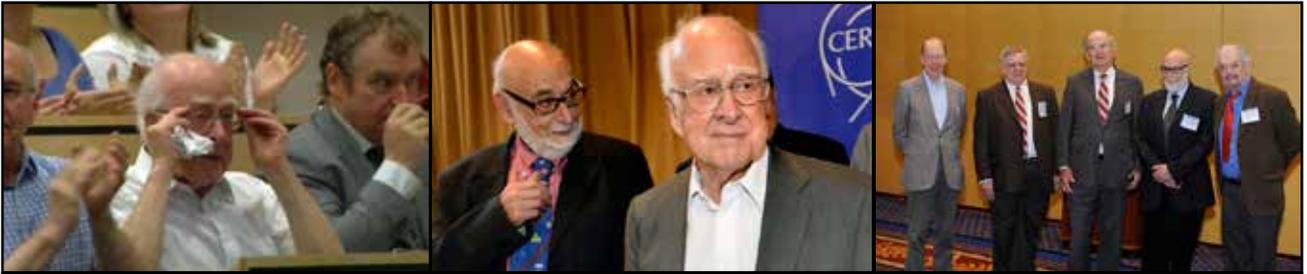


Figura 2: Izquierda: Peter Higgs muestra su emoción durante el anuncio del descubrimiento de la partícula que lleva su nombre. Centro: François Englert y Higgs después del anuncio de su Premio Nobel. Derecha: de izquierda a derecha, T. Kibble, G. Guralnik, C. R. Hagen, F. Englert, y R. Brout en 2010 (ver más adelante).



Figura 3: 3.a A la izquierda se ve el trazado del colisionador circular LHC (el círculo blanco más grande) superpuesto sobre una foto aérea de las afueras de la ciudad suiza de Ginebra, que muestra a la derecha parte de las pistas de aterrizaje del aeropuerto internacional de Ginebra. 3.b En la foto de la derecha se ve el detector del experimento ATLAS. Notar un hombre de pie que da una medida de la escala.

El LHC (*Large Hadron Collider*), Gran Colisionador de Hadrones, en el CERN (Casas, 2009) es el mayor colisionador de partículas del mundo, un acelerador circular de 27 kilómetros de largo (ver la figura 3.a) con varios detectores gigantes (como el de la figura 3.b) que registran las colisiones y algunos consideran por su complejidad y magnitud el equivalente moderno de las catedrales de la edad media. El LHC fue construido, en gran medida, para encontrar el bosón de Higgs.

El 4 de Julio de 2012 el anuncio ocupó las portadas de los principales periódicos del mundo. Algunos (como La Nación, ver la figura 4) usaron el apodo “Partícula de Dios” (Achenbach, 2008), que muchos físi-



Figura 4: Portadas del diario argentino La Nación y del diario español El País del 4 de Julio de 2012.

cos consideramos desatinado por la confusión que genera y que proviene de un libro de divulgación escrito

en 1993 por el Premio Nobel León Lederman. Su título, “The God Particle” (La Partícula de Dios) proviene

en parte de acortar otro que Lederman quería por lo que estaba costando encontrarla, *"The Goddamn Particle"* (La Partícula Maldita) y que el editor no permitió.

Lo que sigue es un intento de explicar el ME para no-físicos. Esta teoría engloba la descripción de los constituyentes más fundamentales de la materia: los "leptones" y los "quarks" y sus interacciones, a excepción de la gravedad, en términos de "campos cuánticos". Las interacciones fundamentales conocidas son cuatro: la gravitatoria, la electromagnética, la débil y la fuerte; el ME describe a la perfección las tres últimas. La interacción gravitatoria es despreciable con respecto a las otras a las distancias que exploran nuestros experimentos de laboratorio, lo que permite una descripción consistente de éstas sin incluirla. En el ME las interacciones electromagnéticas y débiles están unificadas en la interacción electrodébil y para ello la existencia del bosón de Higgs es esencial. Éste es un ejemplo de una idea central en el desarrollo de la ciencia, la de "unificación", la idea de que fenómenos aparentemente independientes se deben a una única causa. Otra idea central en la ciencia es la de "simetría", que parece ser uno de los principios de la naturaleza, y está en la base del ME. Quizás, el mejor modo de en-

tender los conceptos mencionados en este párrafo sea ver cómo y por qué se desarrollaron históricamente (Huang, 2007).

■ LAS PRIMERAS INTERACCIONES: GRAVITACIÓN Y ELECTRO-MAGNETISMO

La gravitatoria es la más conocida de las interacciones y la que plantea mayores problemas teóricos ya que hasta ahora no se la ha podido describir consistentemente en términos de campos cuánticos (ver más adelante). Fue inicialmente descrita por Isaac Newton en 1687 en sus *"Principia"*, en donde también introdujo el concepto de "fuerza" con su famosa ley "fuerza igual a masa por aceleración, $F = ma$ ". Newton probó que el movimiento de un proyectil en la Tierra y el de los planetas alrededor del Sol se deben a la misma fuerza. Con esto demostró que las leyes de la física que valen en la Tierra valen en todo el Universo. Este es el primer ejemplo de la poderosa idea de unificación. El siguiente es el del electromagnetismo.

Los fenómenos eléctricos y magnéticos datan por lo menos de siglo VI AC. Llamamos poderosamente la atención porque son aparentemente "acciones a distancia" en las que un cuerpo ejerce una atracción o repulsión sobre otro sin tocarlo. Sólo

en el siglo XVIII se reconoció (por obra de Charles de Fay y Benjamin Franklin) que hay dos tipos de carga, positiva y negativa, y que cargas del mismo tipo se repelen y de diferente tipo se atraen. Ahora sabemos que la carga eléctrica es una propiedad cuántica fundamental de las partículas elementales.

La electricidad y el magnetismo se consideraron fenómenos separados hasta que en 1820 H. C. Oersted descubriera que las corrientes eléctricas (o sea cargas en movimiento) producen fuerzas magnéticas y que en 1831 Michael Faraday descubriera que se puede generar una corriente eléctrica moviendo un imán dentro de un bucle de alambre conductor. Para explicar este efecto, Faraday visualizó "líneas de fuerza magnética" cerradas que emanan de uno de los polos de un imán y mueren en el otro polo (ver las figuras 5.a y 5.b), llenando todo el espacio en torno del imán y que generan corriente en un alambre que las corta. Esta descripción cambia profundamente el carácter de la interacción: el alambre interactúa localmente con las líneas y no a la distancia con el imán. Faraday también concibió "líneas de fuerza eléctrica" que se irradian de una carga eléctrica en todas direcciones (ver la figura 5.c y 5.d) y con las cuales cualquier otra carga interactúa localmente.

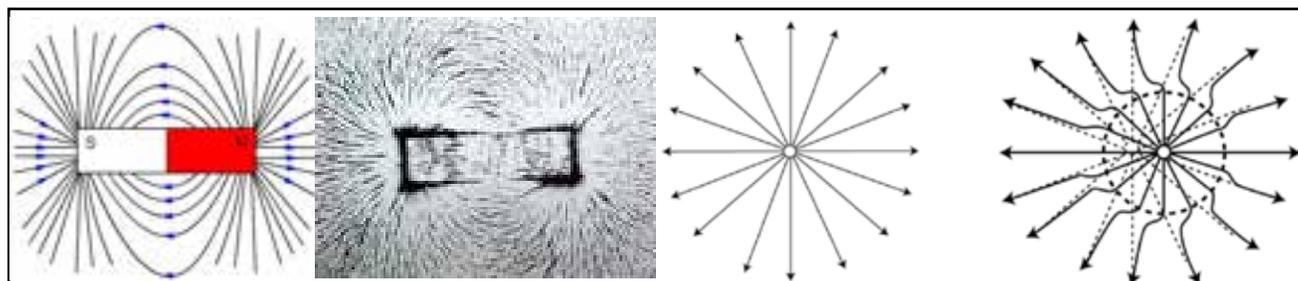


Figura 5: 5.a (izquierda) Líneas de campo magnético postuladas por Faraday conectando los dos polos de un imán que pueden ser vistas por la orientación que toman limaduras de hierro alrededor de un imán en la foto en 5.b (centro izquierda). Líneas de campo eléctrico saliendo de una carga positiva. 5.c (centro derecha) en reposo, y 5.d (derecha) cuando la carga es sacudida y una perturbación (onda electromagnética) empieza a propagarse por las líneas de campo.

EL CONCEPTO CLÁSICO DE "CAMPO" EN EL ELECTROMAGNETISMO: TODAS LAS INTERACCIONES SON LOCALES

Faraday inventó el concepto de "campo de fuerza" representado por las líneas que acabamos de ver. En física se dice que existe un "campo" de una cierta magnitud física cuando ésta adquiere en cada punto de un volumen un valor distinto que puede cambiar con el tiempo.

La idea de un "campo de fuerza" es que la interacción a distancia de cuerpos se debe a que cada uno de ellos genera algo a su alrededor, un campo, que llena el espacio circundante y que interactúa con otro cuerpo en el lugar en que este otro está. Esto permite preservar el concepto de "localidad" de las interacciones, que corresponde a la intuición de que uno puede explicar el comportamiento de objetos cercanos sin referencia a otros lejanos y la relación de causa y efecto en interacciones, ya que ninguna influencia puede ser instantánea (sino que viaja por el campo a una velocidad no mayor que la de la luz, lo que Faraday no sabía, pero que es un resultado central de la Relatividad Especial).

Faraday escribió cuatro ecuaciones que describen todos los fenómenos eléctricos y magnéticos, luego perfeccionadas por James Clerk Maxwell en 1865. Estas ecuaciones predicen la existencia de una onda en la que un campo eléctrico y uno magnético que varían en el tiempo se generan uno a otro sucesivamente y que puede viajar en vacío solo a una velocidad, la de la luz, usualmente denotada con la letra c . La luz es un tipo de estas "ondas electromagnéticas" que podemos detectar con nuestros ojos.

Estas ondas pueden visualizarse usando las líneas de fuerza de Faraday. Si sacudimos una carga,

las líneas de fuerza que emanan de ésta transmiten la perturbación radialmente hacia afuera (ver la figura 5.d) como una onda, que al llegar a otra carga la sacude. La asociación que en Mecánica Cuántica se hace entre una onda y una partícula lleva entonces a interpretar la interacción entre dos partículas cargadas como el intercambio de otra partícula "de fuerza" (el "fotón" en este caso). La relación entre interacciones y sus partículas mediadoras es todavía más estrecha en el concepto de "campo cuántico" (que veremos más adelante).

■ EL ELECTROMAGNETISMO Y LA RELATIVIDAD ESPECIAL

Ya Faraday entendía que una carga en reposo genera un campo puramente eléctrico y una en movimiento genera además uno magnético. Sin embargo, una misma carga puede parecerle estar en reposo a un observador pero en movimiento a otro que, por ejemplo, pase en un auto. O sea que un campo sea eléctrico o magnético depende de la velocidad del observador, por eso lo llamamos "electromagnético". Fue la necesidad de explicar el electromagnetismo lo que llevó a la Relatividad Especial formulada por Albert Einstein en 1905.

El hecho de que las ecuaciones de Maxwell dan un solo valor para la velocidad de la luz en el vacío, c , constituye una de las bases de la Relatividad Especial: la velocidad de la luz es igual para cualquier observador (¡aún cuando éste se mueva con velocidades cercanas a c !) y para que esto sea así el concepto de espacio y de tiempo tiene que depender del observador. Ésta fue una de las ideas más revolucionarias de principios del siglo pasado.

Entre las principales predicciones de la Relatividad Especial están:

1) la relación entre la masa m y la energía E en reposo de una partícula $E = mc^2$, 2) que una partícula con masa sólo puede viajar con una velocidad inferior a la de la luz y 3) que sólo una sin masa se mueve siempre a la velocidad c (en el vacío). Para poder describir cualquier partícula, incluyendo una con $m = 0$, es necesario usar la forma completa y mucho menos conocida de la energía relativista: $E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$, donde p es el "momento" o "cantidad de movimiento". Para una partícula sin masa $E = pc$ sólo es energía de movimiento. Para un cuerpo con velocidad v mucho menor que c , el momento fue definido por Newton como $p = mv$. El momento relativista, $p = mv/\sqrt{1 - (v^2/c^2)}$, se aparta de mv a medida que v se acerca a c . Las teorías relativistas coinciden con las teorías clásicas cuando todas las velocidades son mucho menores que c .

■ LAS PRIMERAS "PARTÍCULAS ELEMENTALES": ÁTOMOS, ELECTRONES, PROTONES Y NEUTRONES

La idea de que toda la materia está compuesta de partículas elementales, o sea de partes no divisibles, data también al menos del siglo VI AC. La palabra "átomos" significa "indivisible" y viene del filósofo griego Demócrito. En 1803 el químico inglés John Dalton regresó a la misma idea para explicar los elementos, que en 1777 Antoine Lavoisier, "el padre de la química moderna", había distinguido de los compuestos.

Sólo en 1911 los experimentos de Ernest Rutherford revelaron la verdadera estructura de un átomo: un "núcleo" compacto conteniendo toda la carga eléctrica positiva y prácticamente toda la masa del átomo y una nube de electrones que llevan toda la carga eléctrica nega-

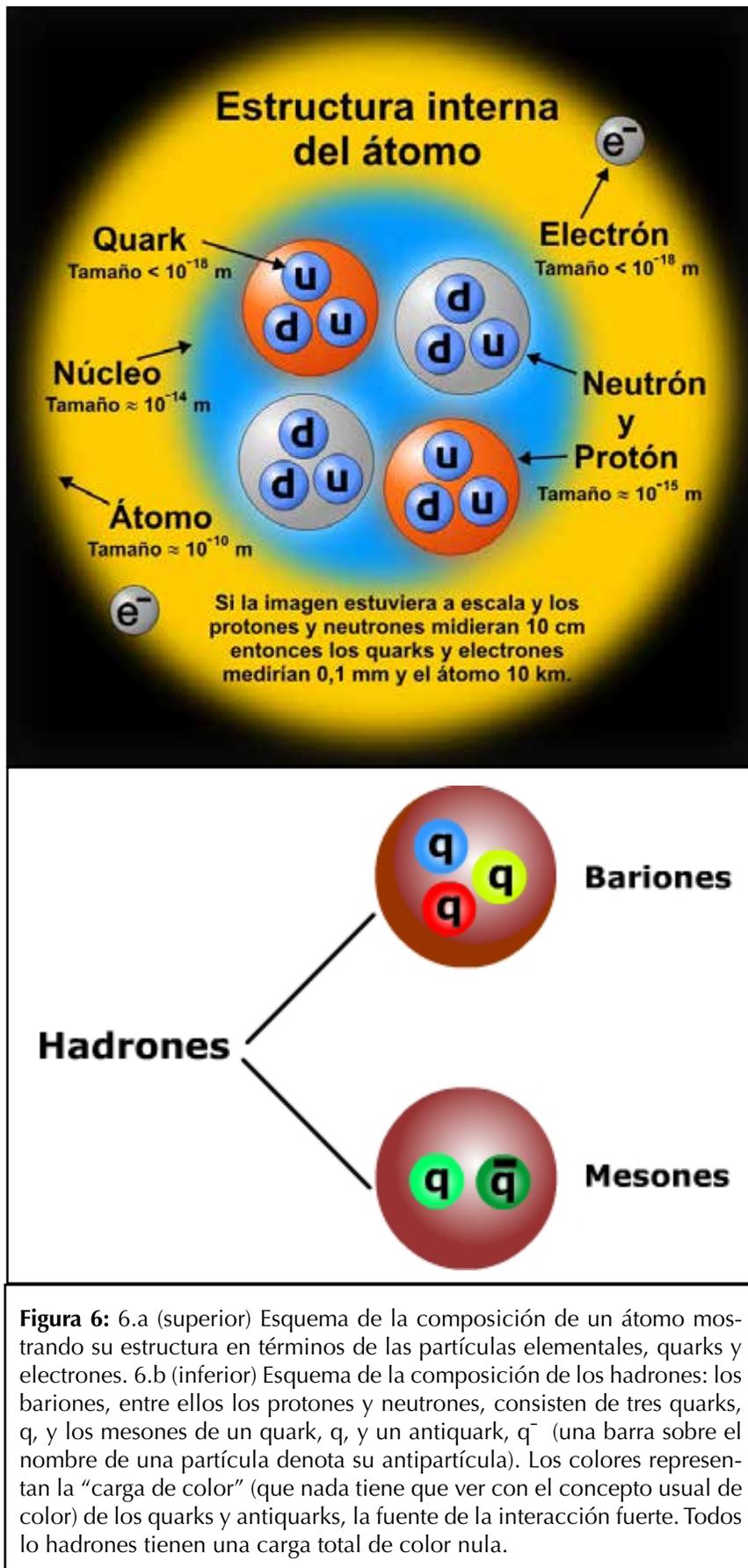


Figura 6: 6.a (superior) Esquema de la composición de un átomo mostrando su estructura en términos de las partículas elementales, quarks y electrones. 6.b (inferior) Esquema de la composición de los hadrones: los bariones, entre ellos los protones y neutrones, consisten de tres quarks, q , y los mesones de un quark, q , y un antiquark, \bar{q} (una barra sobre el nombre de una partícula denota su antipartícula). Los colores representan la "carga de color" (que nada tiene que ver con el concepto usual de color) de los quarks y antiquarks, la fuente de la interacción fuerte. Todos los hadrones tienen una carga total de color nula.

tiva, de manera tal que el átomo es neutro (fig. 6). En un famoso experimento Rutherford lanzó núcleos de helio contra una lámina muy fina de oro, y vio que sólo unos pocos sufrían grandes deflexiones, indicando que habían chocado contra algo muy pesado, y los otros pasaban por el vasto vacío entre los núcleos de oro.

El electrón fue la primera partícula elemental descubierta (J. J. Thompson, 1897). Rutherford en 1920 dio el nombre de "protón" (del griego "protos", primero) al núcleo de hidrógeno (el más ligero), con carga eléctrica idéntica pero de signo opuesto a la del electrón, y postuló la existencia de protones y de partículas neutras, "neutrones", dentro de otros núcleos. James Chadwick descubrió el neutrón en 1932, con una masa similar a la del protón, unas 2000 veces la de un electrón. La masa de un átomo es casi igual a la suma de las masas de los protones y neutrones que contiene.

■ MECÁNICA CUÁNTICA Y LA DUALIDAD ONDA-PARTÍCULA

La Mecánica Cuántica, un nuevo tipo de mecánica que vale a escalas menores que 10^{-8} cm, fue propuesta para explicar el comportamiento de los átomos y sus constituyentes. Según la Mecánica Clásica los átomos no pueden ser estables porque los electrones deberían caerse al núcleo.

En 1900, para explicar el color que toman los materiales al calentarse, Max Planck postuló que la energía se emite y absorbe sólo en cantidades discretas, que él llamó "cuantos" de energía. En 1905, Albert Einstein (para explicar el efecto fotoeléctrico) propuso que la luz, aunque viaja como una onda, sólo puede ser absorbida o emitida como

si consistiera de partículas que el llamó "cuantos de luz", rebautizados luego (G. Lewis, 1926) "fotones". La luz es a la vez una onda electromagnética y fotones. Este es el primer ejemplo de la "dualidad onda-partícula" en Mecánica Cuántica. En 1924 Louis De Broglie postuló que también las consideradas partículas, como el electrón, se comportan como ondas cuando se propagan (lo que fue confirmado experimentalmente en 1927).

La Mecánica Cuántica, iniciada por Niels Bohr en 1913 y formulada claramente por Werner Heisenberg en 1925 y Erwin Schrödinger en 1926 de dos maneras distintas equivalentes, nació de la necesidad de explicar por qué la energía es emi-

tida y absorbida sólo en cantidades discretas y también la estabilidad de los átomos. La explicación de la Mecánica Cuántica es que cada estado de un sistema corresponde a una energía particular del mismo y los valores intermedios están prohibidos, por lo que sólo puede pasar de un estado a otro emitiendo o absorbiendo una cantidad fija, o "cuanto", de energía. De modo que un electrón en un estado particular de un átomo es completamente estable a menos que emita o absorba un cuanto de energía que le permita saltar a otro estado.

Una de las ideas completamente revolucionarias de la Mecánica Cuántica es que la posición de una partícula no puede determinarse

con precisión. Lo único que puede determinarse es la probabilidad de encontrar a una partícula en un determinado lugar. Por ejemplo, la ecuación de Schrödinger aplicada a los electrones en un átomo tiene por solución una función, llamada "función de onda" o "estado", cuyo cuadrado es la probabilidad de encontrar los electrones en determinadas posiciones. El abandono del determinismo a las escalas subatómicas tuvo consecuencias revolucionarias para el pensamiento científico y filosófico de principios del siglo XX.

■ BOSONES Y FERMIONES

En mecánica clásica se puede determinar la posición y velocidad inicial de cada partícula con preci-

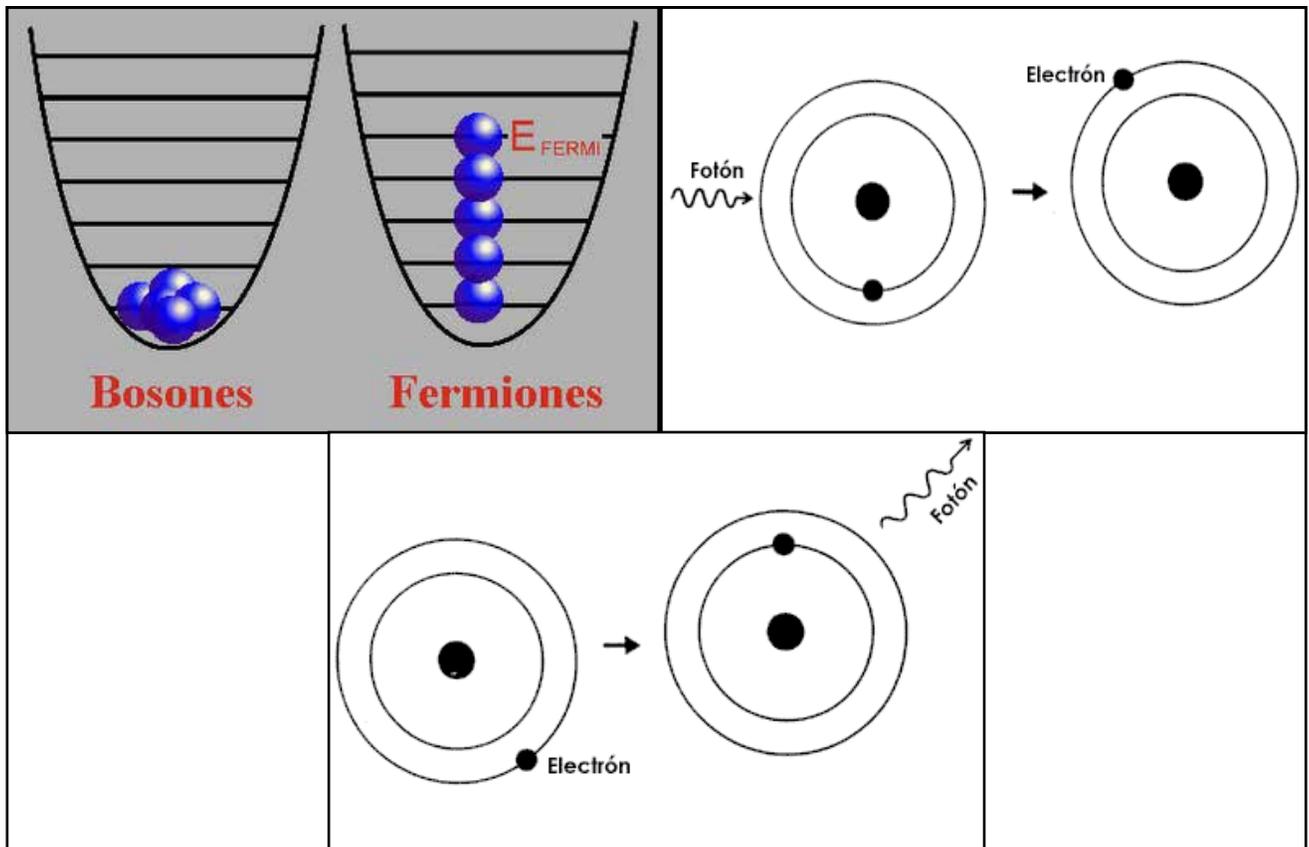


Figura 7: 7.a (izquierda) Bosones y fermiones en el estado de energía más baja de un sistema de partículas. Las líneas horizontales indican los diferentes niveles de energía de una partícula en presencia de un campo. Los bosones van todos al nivel de energía más bajo. En cambio, no más de un fermión puede estar en cada estado de una partícula. 7.b (centro) Emisión y 7.c (derecha) absorción de un fotón por un átomo al saltar uno de sus electrones de un nivel de energía a otro previamente vacío.

sión y seguir su movimiento exactamente. De modo que la posición de cada partícula en cada instante es una etiqueta que permite diferenciar una partícula de cualquier otra. En Mecánica Cuántica, en cambio, la posición y velocidad de la partícula no pueden conocerse con precisión al mismo momento (éste es el “principio de incerteza de Heisenberg”). Que la posición de cada partícula de un sistema sea incierta en Mecánica Cuántica implica que la posición no puede usarse para distinguir una partícula de otra del mismo tipo. Esta imposibilidad es una propiedad netamente cuántica que implica que la probabilidad no puede cambiar si se intercambian dos partículas del mismo tipo en el mismo sistema, ya que éstas son indistinguibles. Esto sólo es así si la función de onda o bien no cambia (en cuyo caso las partículas se llaman “bosones”) o sólo cambia de signo (en cuyo caso las partículas se llaman “fermiones”).

Los nombres “bosones” y “fermiones” derivan de los apellidos de Satyendra Nath Bose y Enrico Fermi, los físicos que exploraron las consecuencias de los respectivos tipos de partículas. En particular, dos fermiones, por ejemplo dos electrones, no pueden estar exactamente en el mismo lugar con las mismas propiedades. Es fácil ver esto en el caso frecuente en el que el estado de un sistema de partículas, como los electrones en un átomo, se puede describir como si cada una de ellas se moviera independientemente de las otras en un mismo campo de fuerza, como el campo eléctrico de un núcleo atómico, en estados de una partícula. Por ejemplo, la función de onda de dos electrones en un átomo, 1 y 2, puede escribirse usando la funciones de onda de cada uno, f_1 y f_2 como $(f_1 f_2 - f_2 f_1)$ que cambia de signo al intercambiar 1 y 2, y es cero si $f_1=f_2$. Este es el “principio de exclusión de Pauli” (Wolfgang Pauli,

1925), que lleva a predecir todas las propiedades de la tabla periódica de los elementos. Por el contrario, no hay problema alguno en que todos los bosones estén en el mismo estado de una partícula.

El estado más estable de todo sistema es el de menor energía. En éste, los fermiones ocupan uno a uno los estados de una partícula con energía más baja, mientras que los bosones van todos al estado de una partícula con menor energía, formando lo que se llama un “condensado de bosones” (ver la figura 7.a). Esta propiedad de los bosones es esencial en el rol que cumple el campo bosónico de Higgs en el ME.

■ “CAMPOS CUÁNTICOS”, CREACIÓN Y DESTRUCCIÓN DE PARTÍCULAS Y LA ELECTRODINÁMICA CUÁNTICA

En el mundo macroscópico, las ondas electromagnéticas pueden generarse, por ejemplo, simplemente agitando una partícula cargada (ver la figura 5.d). En el mundo subatómico, la luz se emite de a un fotón a la vez. Un electrón en un átomo puede ir de un estado de energía a otro sea emitiendo o sea absorbiendo un fotón (ver las figuras 7.b y 7.c) y el fotón no existía antes de ser emitido y no existe después de ser absorbido.

En el mundo macroscópico los cuerpos son permanentes. Si un tornillo se sale de un reloj, sabemos que el tornillo existía en el reloj antes de que saliera de él. En el mundo subatómico las partículas pueden ser creadas y destruidas. La equivalencia relativista entre energía y masa tiene aquí su máxima expresión: una partícula puede convertirse en otras de distinta masa si recibe o da la energía que corresponde. Estos fenómenos sólo pueden entenderse combinando la Mecánica Cuántica

con la Relatividad. El concepto de “campo cuántico” surge necesariamente de esta combinación, así como el de “antipartícula”.

La ecuación de Schrödinger no es relativista y funciona bien para los electrones en un átomo porque éstos se mueven a velocidades mucho menores que c . La Relatividad Especial fue incorporada en la ecuación de Oskar Klein y Walter Gordon (1926), que vale para bosones, y en la de Paul Dirac (1928) que vale para fermiones. Las soluciones de estas dos ecuaciones relativistas no admiten una interpretación probabilística como la solución de la ecuación de Schrödinger. Se deben interpretar, en cambio, como “operadores” (o sea, símbolos matemáticos que indican una operación sobre un objeto matemático) llamados “campos cuánticos”. Éstos crean o destruyen partículas en un estado sobre el que actúan respetando las reglas de la Relatividad Especial. Esto es consecuencia de que la energía relativista E puede tomar valores negativos, ya que $E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$, aunque las partículas libres sólo tienen energía positiva. La existencia de antipartículas deriva de las soluciones con energía negativa.

Por ejemplo, la energía en reposo tiene dos soluciones, $E = mc^2$ y $E = -mc^2$, ya que $E^2 = m^2c^4$. Un campo cuántico caracterizado por un valor dado de la carga eléctrica y cargas de otro tipo, al actuar sobre el estado de un sistema adiciona estas cargas. Además, si tiene $E = -mc^2$ quita una energía mc^2 al aniquilar una partícula con energía positiva mc^2 (o sea que el signo menos significa que se resta una energía) y si tiene energía positiva $E = mc^2$, adiciona esa energía al crear una partícula con esa energía. En ambos casos el campo cuántico particular adiciona sus cargas, por lo que la partícula aniquilada debe tener cargas opues-

tas a las de la partícula creada por el mismo campo, pero la misma masa: la partícula que el campo aniquila es la "antipartícula" de la que crea. En 1932 Carl D. Anderson descubrió el anti-electrón, que llamo positrón, lo que confirmó experimentalmente la existencia de antipartículas.

Cada partícula tiene su antipartícula, con la misma masa y cargas opuestas. Partícula y antipartícula pueden coincidir cuando no llevan cargas que puedan distinguirlas. Por ejemplo, el fotón es su propia antipartícula, así como el bosón de Higgs.

La primera teoría de campos cuánticos que sirvió de paradigma para todas las otras que vinieron después, fue la "Electrodinámica

Cuántica" (QED, Quantum Electrodynamics), la teoría del electrón, el positrón (soluciones de la ecuación de Dirac) y el fotón (cuyo campo resulta de las ecuaciones de Maxwell). Después de los éxitos iniciales en los años 1930, la teoría encontró el problema de obtener valores infinitos al predecir ciertas cantidades observables. En los años 1940, fue desarrollado (principalmente por Shinichiro Tomonaga, Julian Schwinger y Richard Feynman) el proceso de "renormalización" que permite esconder esos infinitos en la definición de unas pocas constantes que se determinan experimentalmente. Después de esto, la QED ha probado ser una de las teorías más precisas que se han creado, capaz de hacer predicciones corroboradas experimentalmente de ciertas mag-

nitudes físicas con una precisión de una parte en 10^{11} .

La generalización matemática de la QED a interacciones con más de una partícula mediadora fue propuesta por Chen-Ning Yang y Robert Mills en 1954. Aunque su importancia no se reconoció en el momento, este tipo de teoría es la base del ME. Junto con la QED, éstas se conocen como "Teorías de Gauge" y sus partículas mediadoras son bosones, llamados "bosones de gauge". "Gauge" significa "calibre" o "escala" y proviene de la primera tentativa, infructuosa, de formular la QED hecha por Hermann Weyl en 1919 aún cuando la teoría correcta que finalmente formuló en 1929 nada tiene que ver con calibres.

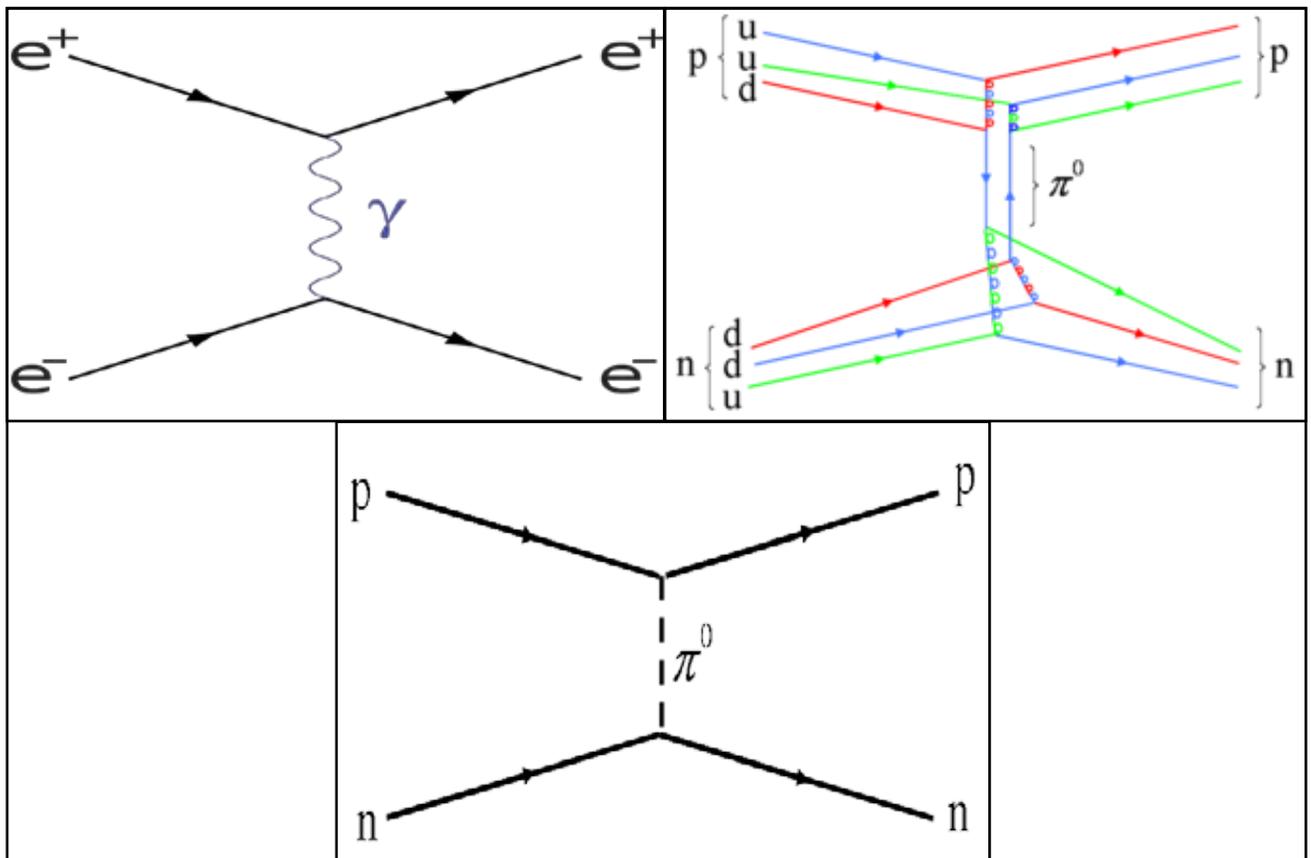


Figura 8: 8.a (izquierda) Diagrama de una interacción electromagnética entre un positrón (e^+) y un electrón (e^-) por intercambio de un fotón (γ). 8.b (centro) Diagrama similar de la interacción entre un protón (p) y un neutrón (n) por intercambio de un pión neutro (π^0). 8.c (derecha) El mismo proceso de 8.b pero en términos de quarks (u y d) y gluones (representados con líneas de dos colores alternados); los colores de los quarks representan las cargas de color; los protones, neutrones y piones tienen carga de color total nula.

Para visualizar y describir las interacciones entre partículas, Feynman introdujo dibujos esquemáticos conocidos como “diagramas de Feynman” (fig. 8) en los que las partículas están representadas por líneas que se unen en los puntos de interacción. Las líneas rectas continuas representan fermiones (como el electrón, los “leptones” en general y los “quarks”) y las onduladas o discontinuas representan bosones (como el fotón, el pión y otros “mesones”). Estos diagramas tienen una interpretación matemática rigurosa, pero también representan las interacciones de manera intuitiva.

■ INTERACCIONES NUCLEARES FUERTES Y DÉBILES, NEUTRINOS, PIONES Y BOSONES W^+ , W^- Y Z^0

Las interacciones electromagnéticas explican la estructura atómica pero para explicar la existencia y comportamiento de los núcleos atómicos son necesarias dos fuerzas fundamentales adicionales, las fuerzas nucleares “fuerte” y “débil”.

Es evidente que debe haber una atracción que sienten ambos, neutrones y protones, y que los mantiene unidos formando un núcleo atómico. Ya que esta interacción debe ser más fuerte que la repulsión

debida a la carga eléctrica de los protones, le fue dado el nombre de “interacción fuerte”.

La “interacción débil” es responsable, por ejemplo, de la “radioactividad beta negativa”, descubierta por Henri Becquerel en 1896. Este es un fenómeno (ver la figura 9.a) en el que un núcleo se transforma en otro de carga mayor, emitiendo un electrón. En términos de los constituyentes del núcleo, un neutrón se desintegra en un protón y un electrón. Sin embargo, algo no funciona bien con esta descripción: la energía del electrón emitido no toma un solo valor (dado por la diferencia de masa entre el núcleo original y el final) sino un continuo de valores. Esto llevó a Wolfgang Pauli en 1930 a hacer algo extremadamente audaz en su momento: postular la existencia de una nueva partícula emitida además del electrón y que por ser neutra no podía detectarse. En 1934 Enrico Fermi llamó “neutrino”, o sea pequeño neutrón en italiano, a la partícula de Pauli, ya que su masa debía ser muchísimo menor que la de un electrón para describir bien los datos (como hizo Fermi en 1934, aunque el neutrino continuó eludiendo una detección directa hasta 1956).

Siguiendo el ejemplo del fotón, Hideki Yukawa propuso en 1935 la existencia de una partícula, mediadora de la atracción entre protones y neutrones en un núcleo que él denominó “pi”, π (ver la figura 8.b). Del tamaño de un núcleo que indica el alcance de la fuerza fuerte, Yukawa infirió que su partícula debía ser más pesada que un electrón y menos que un protón y por esto la llamo “mesotróton” o “mesón” (del griego “mesos”, medio) y ahora es llamado “mesón pi” o “pión”.

El argumento usado por Yukawa es que el alcance r de una fuerza es inversamente proporcional a la masa m de la partícula mediadora de la fuerza. La explicación más simple de esta propiedad, dada por C. G. Wick en 1938, usa una de las relaciones de incerteza de la Mecánica Cuántica, la incerteza en la energía: el valor más probable de la diferencia ΔE entre dos mediciones de la energía de un sistema separadas por un intervalo de tiempo Δt es igual a $h/(2\pi \Delta t)$, o sea $\Delta E \approx h/(2\pi \Delta t)$ (donde h es la “constante de Planck” $h/2\pi = 1,05 \times 10^{-34}$ Joules segundo). Esta relación tiene una implicación física importantísima: en un sistema cuántico la ley de la conservación de la energía puede no verificarse en un intervalo Δt con un error menor

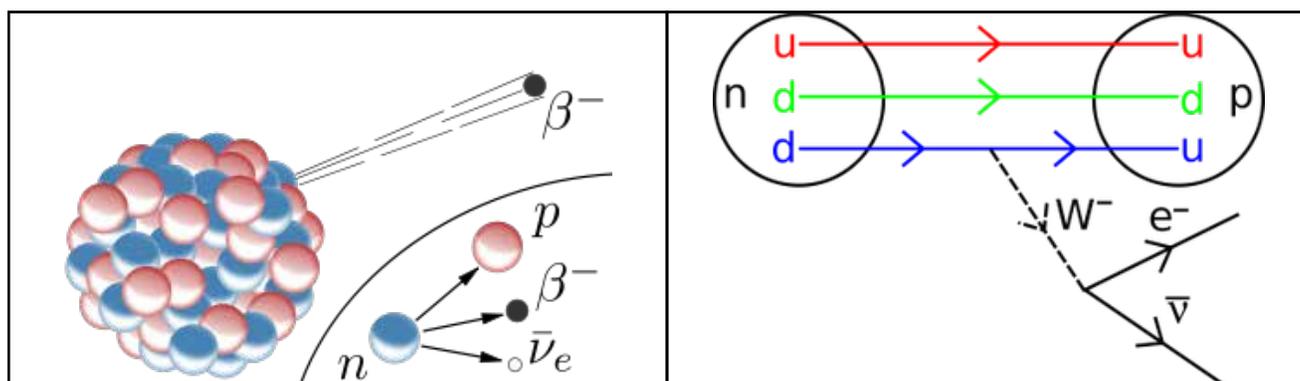


Figura 9: 9.a (izquierda) Desintegración beta negativa (β^-) de un núcleo y el diagrama correspondiente en términos de un neutrón y un protón. La partícula originalmente identificada como β^- es un electrón. 9.b (derecha) Diagrama de Feynman de la misma desintegración vista al nivel de quarks. El tiempo corre hacia la derecha. Uno de los quarks d del neutrón inicial emite un quark u (lo que transforma el neutrón en un protón) y una partícula de fuerza débil W^- que se desintegra en un electrón, e^- , y un antineutrino $\bar{\nu}$.

■ LOS LEPTONES

que el ΔE dado por esta relación. En nuestro caso, durante el tiempo en el que una partícula mediadora de fuerza es intercambiada entre otros, hay tres partículas donde antes y después hay sólo dos sin que la energía total del sistema de dos o tres partículas haya cambiando. Esto es sólo posible si la incerteza en esta energía permite crear la partícula de masa m , o sea $\Delta E \geq mc^2$ durante un tiempo breve Δt y en este tiempo la partícula puede moverse como máximo una distancia $r = c \Delta t$ lo que da el alcance de la interacción. De modo que $mc^2 \approx (h/2\pi) (c/r)$. Las partículas efímeras, que pueden existir sólo debido al principio de incerteza de la energía, se llaman "virtuales".

El fotón tiene masa cero lo que corresponde al alcance infinito de la interacción electromagnética. El pión, descubierto en 1947 por Cecil Powel, tiene una masa 273 veces la del electrón, lo que corresponde a un alcance de $2 \times 10^{-13} \text{cm}$, que es una fracción del tamaño de un núcleo (ver el esquema en la figura 6.a). A pesar del éxito de la descripción de Yukawa, aún quedaba mucho por hacer para entender las interacciones fuertes. En los años 1960 y 70 fue demostrado que los protones, neutrones y piones están constituidos de "quarks", partículas que interactúan intercambiando "gluones" (ver la figura 8.c), como veremos más adelante.

La descripción inicial de Fermi en 1934 de la desintegración beta de un núcleo consistía en una interacción de contacto (o sea de alcance cero) de cuatro campos (ver la figura 9.a) que producían la destrucción de un neutrón y la creación en el mismo punto de un protón, un electrón y un antineutrino. Pero, una teoría con cuatro campos fermiónicos aplicados en el mismo punto produce resultados infinitos incurables (no es renormalizable). Eso llevó a Julian

Schwinger en 1957 y luego a Sheldon Glashow a proponer la existencia de partículas mediadoras de las interacciones débiles, llamadas W^+ , W^- y Z^0 , que debían ser muy pesadas, del orden de 100 veces la masa de un protón, lo que corresponde a un alcance muy corto de 10^{-16}cm . Además, la descripción más fundamental de la desintegración beta debe hacerse en términos de quarks (como en la figura 9.b).

En 1936 Carl Anderson descubrió el "mu" (μ) o muón, que es como el electrón, sólo que con masa 210 veces más grande. La existencia de esta copia del electrón fue una total revelación, la primera indicación de que los leptones y quarks, vienen en tres copias que constituyen tres "familias" o "generaciones" (columnas I, II y III de la tabla en la figura 10), idénticas excepto por la masa que

Las tres generaciones de la Materia (Fermiones)

	I	II	III	
masa →	3 MeV	1.24 GeV	172.5 GeV	0
carga →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
nombre →	u up	c charm	t top	Y photon
Quarks	6 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	95 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	0 0 1 g gluon
	<2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e electron neutrino	<0.19 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ muon neutrino	<18.2 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ tau neutrino	90.2 GeV 0 1 Z^0 fuerza débil
	0.511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e electron	106 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ muon	1.78 GeV -1 $\frac{1}{2}$ T tau	80.4 GeV ± 1 1 W^\pm fuerza débil
Leptones				Bosons (Fuerzas)

Figura 10: Tabla de las partículas elementales, con las familias o generaciones de leptones y quarks (que son fermiones) dadas en las primeras tres columnas, y las partículas mediadoras de fuerzas (que son bosones) dadas en la cuarta columna. La masa de un electrón es 0,5 MeV (aquí se toma $c=1$), 1 MeV = 1000000 eV y 1 GeV = 1000 MeV. La carga eléctrica y el nombre de cada partícula están incluidos. El "espin" o "spin" es una propiedad cuántica de las partículas que no hemos mencionado. En esta tabla falta sólo el bosón de Higgs.

aumenta en cada una. Esta repetición, aún hoy no tiene explicación.

La primera partícula de la tercera generación, descubierta en 1975 (por Martin Perl), también fue una copia del electrón, el tau (τ), cuya masa es unas 4000 veces la del electrón.

Las partículas que no tienen interacciones fuertes fueron llamadas (por Leon Rosenfeld en 1948) "leptones" inicialmente para indicar que eran ligeras, del griego "leptos", delgado (ver la figura 11.a). Ahora este grupo incluye el electrón, e , el μ , el τ , y sus correspondientes neutrinos: el del electrón ν_e , el del muón, ν_μ y el del tau, ν_τ (descubiertos en 1956, 1962 y 2000 respectivamente).

■ DE LOS HADRONES A LOS QUARKS

Los neutrones y protones fue-

ron llamados "bariones" (del griego "barys", pesado) porque eran las partículas más pesadas conocidas hasta el año 1947 (ver la figura 11.a). En 1962, Lev Okun llamó colectivamente "hadrones" (del griego "hadros", denso) a las partículas que tienen interacciones fuertes, que son los mesones y los bariones.

El desarrollo de nuevos aceleradores y detectores de partículas en la década de los 1950 llevó al descubrimiento de un enorme número de hadrones (ver la figura 11.b), de masa cada vez más grande, pero que se desintegran muy rápidamente, en 10^{-8} segundos o menos. Ante la explosión del número de partículas se atribuye a Wolfgang Pauli la exclamación "Si hubiera previsto esto me hubiera hecho botánico".

En 1961, Murray Gell-Mann e independientemente Yuval Ne'emann encontraron un esquema de clasifi-

cación de los hadrones en conjuntos de masa casi igual y conteniendo 8 o 10 partículas. Este fue el preludio de la proposición revolucionaria de Gell-Mann y George Zweig de tres años más tarde. En 1964 ellos explicaron la clasificación de los hadrones suponiendo que todos ellos consisten de partículas que Gell-Mann llamó "quarks" (ver la figura 6.b). En ese momento tres quarks (u , d y s) eran suficientes para formar todos los hadrones conocidos y el muy erudito Gell-Mann se inspiró para elegir el nombre "quark" (que en inglés es una imitación del grito de una gaviota) en una asociación libre con la frase "Three quarks for Muster Mark" (Tres quarks para el Señor Mark) en un poema de James Joyce en el que usa palabras que recuerdan sonidos de pájaros.

Inicialmente vistos sólo como una manera de clasificar hadrones, como si fueran cubos para armar,

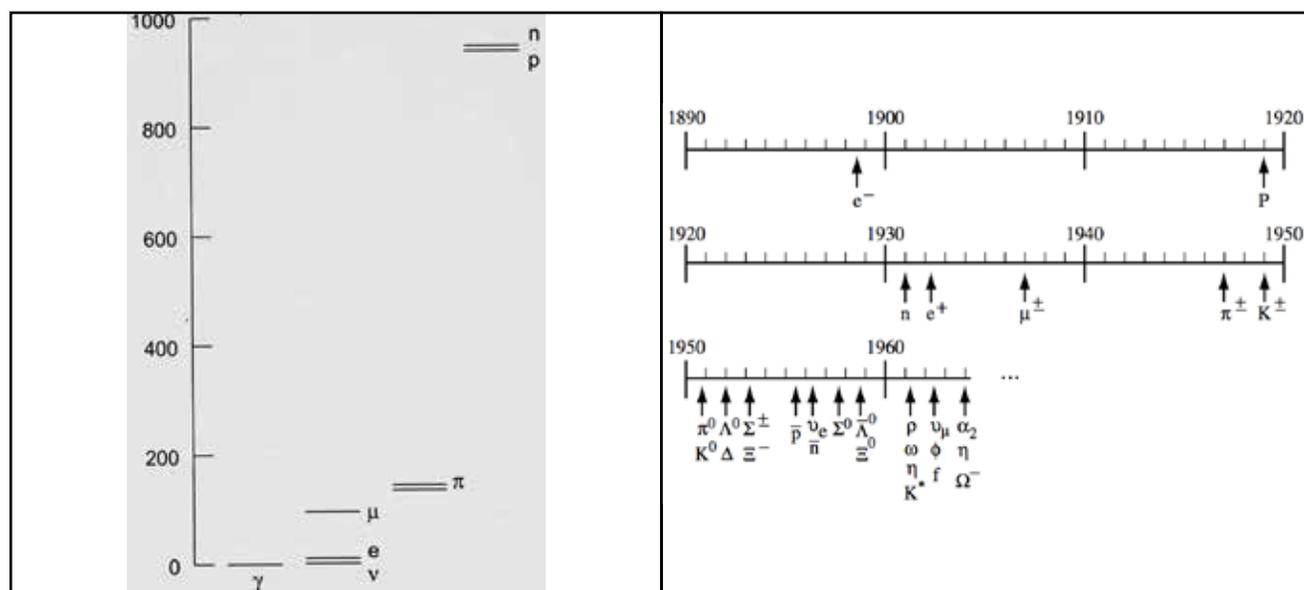


Figura 11: 11.a (izquierda) Partículas conocidas hasta 1947 y sus masas, dadas en la escala vertical en unidades de MeV/c² en las que la masa del electrón es 0.5. Las columnas de izquierda a derecha muestran respectivamente el fotón, los leptones (electrón, muon y neutrino), los mesones (sólo piones) y los bariones (el neutrón y el protón). Los mesones y bariones se llaman colectivamente hadrones (sienten las interacciones fuertes). 11.b (derecha) Línea de tiempo del descubrimiento de partículas hasta 1964 (año de la propuesta de los quarks como constituyentes de todos los hadrones). Una barra encima del nombre de una partícula denota su antipartícula (e.g. p^- es el antiprotón) o también la indicación de la carga eléctrica denota la partícula y la correspondiente antipartícula (e.g. e^- es el electrón y e^+ es el positrón). Excepto por dos neutrinos, ν_e y ν_μ , todas las partículas que se muestran después de 1946 son hadrones.

los quarks fueron encontrados como partículas en una versión moderna del experimento de Rutherford que probó la existencia de núcleos dentro de los átomos. Protones y neutrones fueron bombardeados con electrones en experimentos realizados entre 1967 y 1971 que confirmaron que los quarks son los constituyentes de todos los hadrones y son, por lo tanto, las verdaderas partículas elementales que sienten las interacciones fuertes. Sin embargo, los quarks no se encuentran jamás afuera de un hadrón. Los quarks tienen cargas eléctricas fraccionarias, el u tiene carga $2/3$ y el d , $-1/3$, y jamás se ha observado una carga fraccionaria libre.

Ahora se sabe que los quarks son seis, distinguidos por sus así llamados "sabores" u , d , s , c , b y t . El "up" (en inglés "arriba") quark u y el "down" ("abajo") d pertenecen a la primera generación. El "charm" ("encanto") quark c y el "strange" ("extraño") s y luego el "top" ("superior") quark t y el "bottom" ("inferior") b , son las repeticiones de los dos primeros que están respectivamente en las generaciones II y III (ver la tabla en la fig. 10).

En términos de quarks la desintegración beta negativa de un núcleo consiste de un quark d en un neutrón que emite un quark u (lo que transforma el neutrón en un protón) y un bosón débil de carga negativa W^- , que luego se desintegra en un electrón, e^- , y un antineutrino $\bar{\nu}$ (ver la figura 9.b). Los quarks de las generaciones II y III sufren desintegraciones débiles muy rápidas (que los llevan a los quarks estables de la primera generación), de modo que los hadrones que los contienen tienen una vida muy breve. El quark más pesado, el t , encontrado experimentalmente recién en 1995 en el Fermilab, tiene una masa 175 veces la de un protón y su vida es tan bre-

ve, 5×10^{-25} segundos, que es el único que no tiene tiempo de formar un hadrón antes de desintegrarse.

A pesar del enorme éxito del modelo de quarks, en 1964 todavía había que explicar por qué sólo algunas combinaciones de varios quarks (sólo sistemas de quark-antiquark y de tres quarks) aparecen en la naturaleza y no otras. En 1964 Oscar Greenberg y luego Moo Young Han y Yoichiro Nambu en 1965, propusieron la existencia de una carga adicional de los quarks (llamada más tarde "color"), tal que sólo sistemas con valor cero de esta carga deberían existir en la naturaleza (para lo cual esta debía tener tres valores posibles para cada quark). No se tuvo idea de como explicar esta propiedad hasta los años 70.

■ EL MODELO ESTÁNDAR DE LAS PARTÍCULAS ELEMENTALES

La palabra "modelo" en el nombre viene del periodo de los años 1970 en el que todavía la teoría no había sido suficientemente probada. Ahora el ME es una teoría comprobada experimentalmente en cientos de modos distintos.

El ME es una teoría relativista de campos cuánticos, basada en las ideas de unificación y de simetría que incorpora todos los elementos que hemos presentado hasta ahora. Es la teoría de todas las partículas elementales puntuales que conocemos (o sea que no muestran ninguna estructura interna que son los leptones y los quarks en la tabla en la figura 10), sus respectivas antipartículas y los bosones mediadores de fuerza conocidos (en la misma tabla).

Ya vimos varios ejemplos previos de la idea de unificación. En el ME las interacciones electromagnéticas y débiles están unificadas en la teoría electrodébil de Glashow, Wein-

berg y Salam y la teoría de la interacción fuerte es la Cromodinámica Cuántica. Ambas son teorías de Yang y Mills.

En física una simetría (Livio, 2012) de un objeto es una transformación que lo deja "invariante", o sea idéntico a sí mismo. Por ejemplo, si rotamos un cuadrado 90 grados alrededor de su centro, seguiremos teniendo un cuadrado idéntico al inicial. Esta es una transformación "discreta" en la que el parámetro, el ángulo, que la define sólo puede tomar ciertos valores. Un círculo es, en cambio, invariante bajo una rotación cualquiera alrededor de su centro. Esta es una transformación "continua" ya que el parámetro que la define, el ángulo de rotación, puede tomar cualquier valor.

La tremenda importancia de la simetría en física reside en que por cada simetría continua de una ley física hay una cantidad física conservada. Este teorema demostrado por la matemática Emmy Nöther en 1918 es un resultado central en física teórica. Por ejemplo, el hecho de que un experimento de laboratorio dé el mismo resultado hoy, que mañana, que dentro un siglo o sea que las leyes de física que lo determinan sean invariantes respecto de traslaciones temporales asegura la conservación de la energía.

Hay transformaciones, llamadas "internas", que no involucran traslaciones o rotaciones en el espacio o el tiempo. Una de estas simetrías (la multiplicación de campos por una fase) lleva a la conservación de la carga eléctrica (la suma total de las cargas participantes es la misma antes, durante, y después de todo proceso) y a la QED. La simetría bajo rotaciones de varios campos entre sí lleva a las teorías de Yang y Mills.

■ LA INTERACCIÓN ELECTRODÉBIL EN EL MODELO ESTÁNDAR: LA TEORÍA DE GLASHOW, WEINBERG Y SALAM

La unificación del electromagnetismo y las interacciones débiles proviene de la simetría de las interacciones bajo rotaciones simultáneas de las partículas interactuantes entre sí y de las partículas mediadoras entre sí, relacionadas de manera matemáticamente precisa en las teorías de Yang y Mills. Por ejemplo, tomando como punto de partida la interacción de un electrón que va a un fotón y a un electrón (mostrada en la figura 12.a) y transformando simultáneamente el electrón inicial en un neutrino (del electrón) y el fotón en un W^+ , obtenemos otra interacción (mostrada en la figura 12.b) que se realiza en la naturaleza y forma también parte de la teoría.

Estas relaciones llevaron primero a Julian Schwinger en 1957 y luego a su ex-estudiante Sheldon Glashow en 1961 a proponer que las interacciones electromagnéticas, mediadas por el fotón, y las débiles, mediadas por los bosones cargados W^+ y W^- , se pueden describir conjuntamente como parte de una sola teoría. Por motivos de consistencia del modelo, Glashow agregó otra partícula mediadora de interacciones débiles:

el bosón neutro Z^0 . Pero la simetría (llamada "simetría de gauge") en la teorías de Yang y Mills impone que los bosones mediadores (los "bosones de gauge") no tengan masa. Además en el modelo de Glashow la misma simetría también impone que los leptones y los quarks tengan masa nula. La solución de este problema propuesta en 1964 es el "mecanismo de Higgs" que, como veremos en detalle, consiste en que la simetría de la teoría esté "espontáneamente rota" (aunque la simetría no está en verdad rota, sino que sólo no es aparente).

Este mecanismo fue aplicado al modelo de Glashow por Steven Weinberg en 1967 e independientemente por Abdus Salam en 1968, quienes, postulando la existencia de una nueva partícula elemental, el bosón de Higgs, y su respectivo campo cuántico lograron dar su masa a los mediadores de la interacción débil, W^+ , W^- y Z^0 y a los leptones y quarks, dejando el fotón sin masa, como debe ser, lo que completó la teoría electrodébil.

En 1970 hubo un avance decisivo para el ME: Martinus Veltman y Gerard 't Hooft probaron que las de Yang y Mills son teorías de campos consistentes o sea renormalizables y

en 1971 't Hooft extendió la prueba a aquéllas con masas generadas por el mecanismo de Higgs.

Uno podría suponer que el artículo de Weinberg de 1967 tuvo inmediatamente cientos de citas. Pero esto no fue así. Entre 1968 y 1970 el artículo tuvo sólo una cita por año (en 1968, en lecciones de Salam). El motivo de la casi total falta de interés inicial en la teoría electrodébil fue que ésta no parecía ser válida para los quarks, o sea los hadrones. Este grave problema fue solucionado en 1970 cuando Sheldon Glashow, John Iliopoulos y Luciano Maiani reconocieron la importancia crítica de la existencia del quark c aún no descubierto al momento y predijeron su masa. Sólo después de que la existencia de las interacciones del Z^0 fuera probada experimentalmente en el CERN en 1973, y el quark c fuera encontrado experimentalmente en 1974, la teoría de Glashow, Weinberg y Salam fue aceptada ampliamente y sus autores reconocidos con el Premio Nobel en 1979, al igual que Carlo Rubbia y Simon van der Meer en 1984 por los experimentos en el CERN en 1983 que encontraron los bosones Z^0 , W^+ y W^- , y Veltman y 't Hooft en 1999 por probar la renormalización de la teoría.

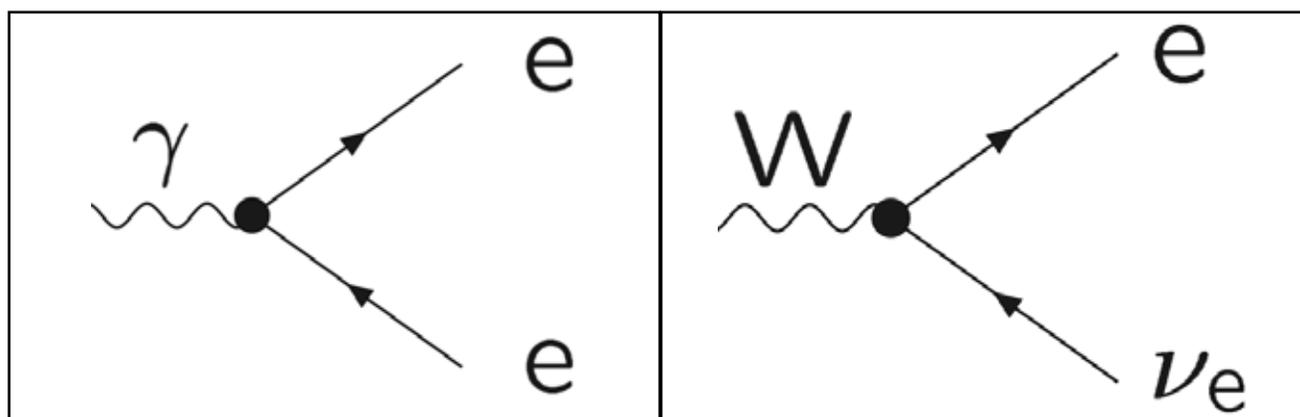


Figura 12: 12.a Diagrama de una interacción electromagnética en la que un electrón, e , emite otro electrón, e , y un fotón, γ . 12.b Diagrama similar de una interacción débil en la que un neutrino ν_e emite un electrón, e , y un bosón de carga positiva W^+ . Se puede pasar del primero al segundo cambiando el electrón inicial por un neutrino (del electrón) y simultáneamente el fotón por un W^+ .

■ LA INTERACCIÓN FUERTE EN EL MODELO ESTÁNDAR: LA CROMODINÁMICA CUÁNTICA

Aquí retomamos la historia de los quarks y su nueva carga adicional con tres valores, propuesta en 1964 y 65. En 1971 Harald Fritzsch y Murray Gell-Mann llamaron a esta carga "color" como complemento del "sabor" de los quarks, y en 1972 Fritzsch, Gell-Mann y Heinrich Leutwyler, propusieron que, así como la interacción electrodébil también la fuerte fuera descrita como una teoría de Yang y Mills cuyos bosones mediadores, los "gluones" (del inglés "glue", pegamento) no tienen masa y llevan cargas de color. La teoría relativista de campos cuánticos de quarks y gluones se llama Cromodinámica Cuántica (de la palabra griega "cromos", color) o QCD (Quantum Chromo-Dynamics).

Sólo en 1973, David Politzer e independientemente David Gross y Frank Wilczek probaron que la QCD explica las propiedades de los quarks y los hadrones, y fueron reconocidos por ello con el Premio Nobel en 2004. Mostraron que, debido a que los gluones tienen carga de color, la interacción entre quarks aumenta de intensidad con la distancia, de modo que los quarks son casi libres a distancias muy cortas (propiedad que se llama "libertad asintótica") pero no pueden separarse a una distancia mayor del tamaño de un hadrón. Aunque los gluones tienen masa cero, como el fotón, están confinados dentro de objetos (los hadrones) que tienen carga de color cero: por lo tanto, no hay interacciones de color de larga distancia.

■ EL ORIGEN DE LA MASA EN EL MODELO ESTÁNDAR

El concepto de masa fue introducido por Newton en su famosa ecuación $F = ma$, para indicar la "inercia" de un cuerpo, que es su resistencia

a cambiar su estado de movimiento. La masa m aparece como un atributo intrínseco de un objeto que se define operacionalmente (usando la misma ley de Newton se mide la masa de un cuerpo relativa a la de otro definida como unidad). Ésta es la definición de masa de objetos macroscópicos. En cambio, en el ME la masa de las partículas es una propiedad que depende de la interacción de éstas con un campo bosónico, que "rompe espontáneamente" la simetría electrodébil.

Se dice que una simetría de un sistema esta "espontáneamente rota" cuando el sistema está en un estado en el que la simetría no es evidente. Un ejemplo típico es la magnetización de un imán de hierro. Cada átomo de hierro es como un pequeño imán. A altas temperaturas los átomos vibran mucho, por lo que los imanes atómicos apuntan en todas direcciones, la magnetización total es cero y la simetría esférica (bajo rotaciones en todas direcciones) del material es aparente. Al bajar la temperatura, los imanes atómicos de hierro empiezan a alinearse y finalmente por debajo de una temperatura crítica, apuntan todos en una misma dirección elegida al azar, por lo que aparece una magnetización espontánea macroscópica del pedazo entero de hierro (ver la figura 13.a) y la simetría esférica dentro de éste no es más evidente.

Un ejemplo mucho más simple de rotura espontánea de simetría es el de una mesa redonda dispuesta para muchos comensales en la que cada vaso es equidistante de dos platos. Cuando un comensal elige el vaso de la izquierda (o el de la derecha), todos los otros por cortesía se ven forzados a hacer lo mismo. La simetría entre una "mesa izquierda" y una "mesa derecha" está rotada espontáneamente una vez que un comensal elige un vaso.

La superconductividad es otro ejemplo más relevante. Si un material se encuentra en un campo magnético (B en la figura 13.c) y se vuelve superconductor (al bajar la temperatura por debajo de un cierto valor crítico) expulsa las líneas del campo casi totalmente. Éste es el "efecto Meissner". El campo magnético sólo penetra dentro de superconductor en una capa muy fina, cuyo espesor es el alcance del campo electromagnético dentro del material. Esto significa que el fotón adquiere una masa inversamente proporcional a ese alcance dentro del material. El fenómeno de la superconductividad, como fue explicado por Bardeen, Cooper y Schrieffer en 1957, se debe a la formación de un condensado de "pares de Cooper" (cada par consiste de dos electrones ligados formando un bosón) y es dentro de este condensado que el fotón adquiere una masa (proporcional a la función de onda del condensado).

Yochiro Nambu en 1960 y luego Nambu y Giovanni Jona-Lasinio en 1962 propusieron un mecanismo de formación de pares similar al de la superconductividad para dar masa a los hadrones pero no en una teoría de gauge. En 1962, por analogía con el efecto Meissner, Philip Anderson, un físico de materia condensada, mantuvo que también en teorías de campos la rotura espontánea de la simetría de gauge llevaría a tener bosones de gauge con masa. Pero el artículo de Anderson usaba un lenguaje no familiar para los físicos de partículas y sus ejemplos concretos eran no relativistas.

La prueba de que el que ahora llamamos "mecanismo de Brout, Englert, Higgs (BEH)" o simplemente "mecanismo de Higgs" vale para teorías relativistas de campos cuánticos, fue dada en 1964 en tres artículos independientes y casi si-

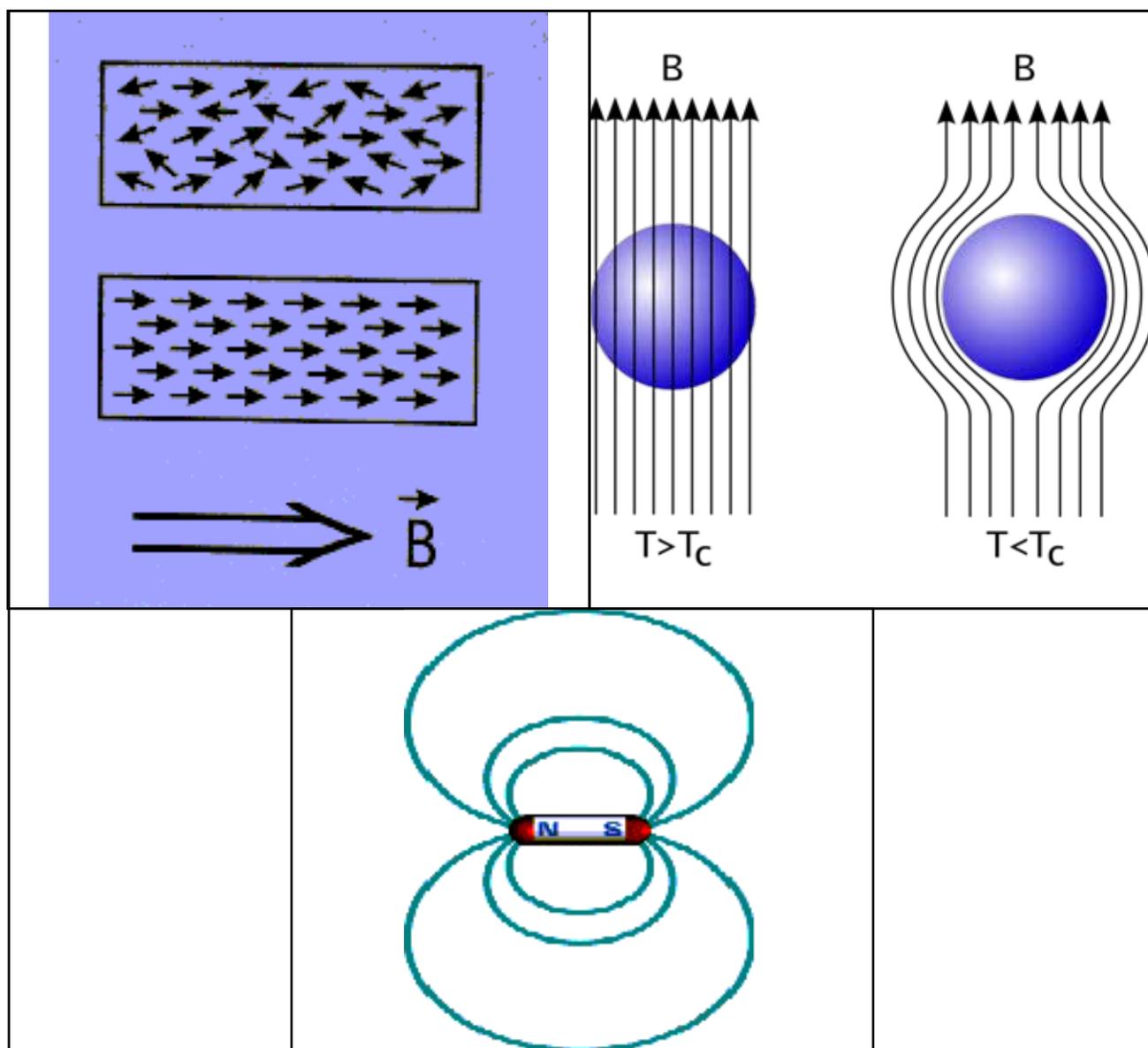


Figura 13: 13.a (izquierda) El panel superior muestra el material ferromagnético sin magnetización a altas temperaturas y el inferior, el material con todos los imanes atómicos orientados en la misma dirección, lo que produce una magnetización espontánea no nula, como la del imán mostrado en 13.b (centro izquierda) con las líneas de Faraday de su campo magnético. 13.c (derecha) Efecto Meissner: las líneas del campo magnético B que pasan por dentro de un material (a temperaturas más altas que una temperatura crítica, $T \geq T_c$) son expulsadas cuando el material se vuelve superconductor (a temperaturas inferiores a la crítica $T \leq T_c$).

multáneos: el primero de Francois Englert y Robert Brout, el segundo de Peter Higgs y el último de Gerald Guralnik, Carl Richard Hagen y Tom Kibble (Higgs, 2002). Por los dos primeros artículos, Englert y Higgs han recibido el premio Nobel 2013 (que llegó demasiado tarde para Brout, fallecido en 2011) (The Nobel Prize in Physics, 2013). En estos artículos es por primera vez un campo bosón-

nico elemental el que rompe espontáneamente la simetría. De los tres, sólo el artículo de Higgs menciona algunas propiedades de la partícula asociada con el campo bosónico, el "bosón de Higgs", y es por esto (y algo de suerte (Higgs, 2002)) que es el nombre de Higgs el que se asocia con el mecanismo, el campo y el bosón. Ninguno de estos tres artículos aplicó el mecanismo al ME (sino

Weinberg y Salam más tarde, como ya dijimos).

En el ME la rotura espontánea que da masa a las partículas elementales se debe al valor (técnicamente a un "valor de expectación en el vacío" o VEV) no nulo del campo de Higgs adicionado al modelo de Glashow ad-hoc por Weinberg y Salam. La aparición de un VEV no



Figura 14: Interpretación artística de una partícula que adquiere masa en el “condensado” del campo de Higgs

nulo es equivalente a la formación de un condensado de bosones en superconductividad. Las partículas adquieren una masa proporcional al VEV y a la magnitud de su interacción con el campo de Higgs. El fotón y los gluones no interactúan con este campo, que es eléctricamente neutro y no tiene carga de color y por lo tanto no adquieren masa. Los tres bosones de la interacción débil, en cambio, así como los leptones y quarks sí interactúan con el campo de Higgs y, por lo tanto, adquieren masa. Una descripción intuitiva (ilustrada en la figura 14) es que en el VEV las partículas que interactúan con éste no pueden moverse a la velocidad de la luz, como partículas sin masa, sino a velocidades cada vez menores (lo que corresponde a que tengan una masa mayor) cuanto más se acoplen al campo de Higgs.

En 1993 el entonces Ministro de Ciencias británico ofreció una botella de champagne como premio a quien pudiera explicarle mejor el mecanismo de Higgs. Lo ganó David Miller de *University College, London*, quien ideó la analogía entre el condensado de Higgs y un salón lleno de personas, supongamos físicos (que representan los bosones en el condensado) que se muestra en la figura 15. Al llegar una persona famosa (como Einstein), los físicos se

aglomeran a su alrededor tratando de verla y hablarle y ésta se desplaza no como una persona sola sino como un gran grupo, que tiene mucha más dificultad para cambiar su velocidad, es decir adquiere inercia o sea, masa. En cambio, una persona desconocida podrá atravesar el salón sin mayor dificultad, ya que los físicos no se inmutarán.

Es importante mencionar que un bosón de gauge sin masa sólo tiene dos estados (o polarizaciones) posibles, pero uno masivo tiene tres. El estado adicional, manifiesta un componente adicional del bosón de gauge masivo que viene del campo bosónico que origina su masa. En el ME este campo tiene originalmente cuatro partes (o componentes), tres de ellas se asocian a (son “comidas” por) los tres bosones de gauge que adquieren masa y sólo una queda como un campo independiente, el campo de Higgs.

La única manera de probar que es en verdad el mecanismo de Higgs el que opera en el ME era detectar el bosón de Higgs. De aquí la monumental importancia del descubrimiento de esta partícula. El problema fundamental para encontrarla fue que su masa no se puede predecir porque también se debe al VEV de su campo y a la intensidad

de su auto-interacción y ésta no está fija en la teoría. Una vez medida la masa del bosón de Higgs podemos predecir con exactitud dentro del ME la intensidad de todas sus interacciones, lo que permitirá probar en el LHC en los próximos años si la partícula descubierta es en verdad este bosón.

Debemos aclarar en este punto, que la masa adquirida por el mecanismo de Higgs de los quarks u y d dentro de un neutrón o un protón sólo constituye aproximadamente dos centésimos de la masa de éstos. El 98% restante de la masa de los átomos, y de toda la materia visible, se debe a las interacciones de la QCD (Wilczek, 2012). Dentro de un hadrón, un quark interactúa con otros emitiendo gluones virtuales, que como tienen color, pueden ellos mismos emitir otros gluones y pares de quark y antiquark que generan otros gluones, etc. Además, hay pares de quark-antiquark que se ligan formando bosones (similares a los pares de Cooper) y forman un condensado dentro del hadrón. Esta nube de partículas virtuales y el condensado de pares quark-antiquark, resiste el movimiento acelerado de los quarks dentro de un hadrón y produce inercia, o sea, una masa que (para distinguirla de la masa del quark generada por el mecanismo

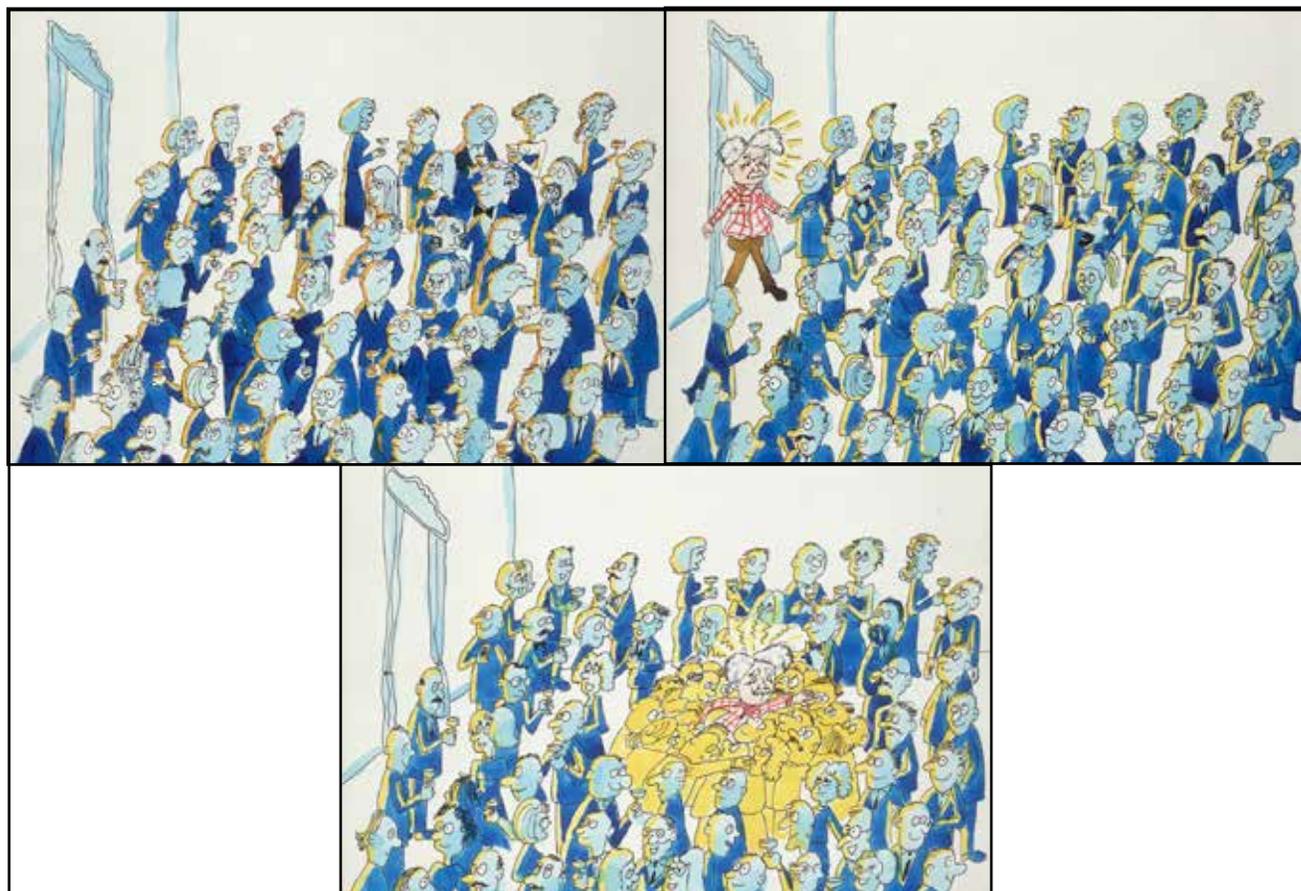


Figura 15: Explicación del mecanismo de Higgs para generar masa por analogía con una persona famosa que atraviesa un salón lleno de gente (dibujos obtenidos en el CERN Document Server).

de Higgs) se llama “masa constituyente”. Para los quarks u y d esta masa constituyente es aproximadamente un tercio de la masa de un protón o neutrón. La masa constituyente es mucho menos importante para los quarks más pesados, porque su masa generada por el mecanismo de Higgs es similar o mucho mayor.

El cálculo de la masa del neutrón, del protón y de otros hadrones, empezando por primeros principios, basado sólo en la QCD, fue completado recién en el 2008 usando una red de supercomputadoras en Alemania, Hungría y Francia (The Nobel Prize in Physics, 2013).

■ DESPUÉS DEL MODELO ESTÁNDAR

El ME deja muchas cosas por explicar. Deja separadas la interacción

fuerte y la electrodébil, no incluye la interacción gravitatoria, ni una explicación de la jerarquía de las masas de los leptones y quarks, sea su repetición en tres generaciones, sea la jerarquía dentro de cada generación. Tampoco da una explicación de la carga relativa del electrón y los quark que asegura que los átomos sean neutros y de por qué la materia atómica estable en el Universo está hecha sólo de átomos y no de anti-átomos.

Finalmente, el tipo de materia compuesta por átomos constituye sólo menos del 5% del contenido del Universo. Un 27% del contenido está en la forma de “materia oscura”, un tipo de materia que no absorbe ni emite luz de ningún tipo y para la cual no hay candidatos en el ME, y el 68% restante está en una forma más exótica aún, la “energía

oscura”, que, contrariamente a la materia, tiene interacciones gravitacionales repulsivas y para la cual no hay ningún modelo teórico todavía.

Los físicos de partículas elementales esperamos que pronto el ME sea superado por otro que explique más sobre las partículas elementales y sus interacciones y que en los próximos años los experimentos en el LHC marquen la vía a seguir.

■ RECONOCIMIENTOS

Agradezco muchísimo la ayuda de Roberto C. Mercader en la producción de este artículo, que no existiría sin su participación. Este trabajo fue apoyado en parte por el subsidio DE-SC0009937 del US Department of Energy.

■ REFERENCIAS

- Achenbach, J. (2008) En busca de la partícula de Dios. National Geographic 22: 72-87.
- Casas, A. (2009) El LHC y la frontera de la física. La Catarata.
- CERN (2012) Observación de una nueva partícula con una masa de 125 GeV. Ver: https://cms-docdb.cern.ch/cgi-bin/PublicDocDB/RetrieveFile?docid=6116&filename=CMSHiggs2012_ES.pdf
- CERN (2013) New results indicate that particle discovered at CERN is a Higgs boson. Ver: <http://press.web.cern.ch/press-releases/2013/03/new-results-indicate-particle-discovered-cern-higgs-boson>
- Higgs, P.W. (2002) My life as a boson, the story of the Higgs. Int. J. Mod. Phys. A 17, 86.
- Huang, K. (2007) Fundamental Forces of Nature: The story of Gauge Fields. World Scientific.
- Livio, M. (2012) Physics: Why symmetry matters. Nature 490: 472473
- The Nobel Prize in Physics (2013) http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2013/popular-physicsprize2013.pdf
- Wilczek, F. (2012) Origins of Mass. arXiv:1206.7114 [hep-ph].

Recuperación de tecnologías ancestrales y sustentables en Jujuy

La vicuña como modelo de producción sustentable

Ciencia e historia se unen para preservar a la vicuña

*Cazando vicuñas anduve en los cerros
Heridas de bala se escaparon dos.*

*- No caces vicuñas con armas de fuego;
Coquena se enoja, - me dijo un pastor.*

*- ¿Por qué no pillarlas a la usanza vieja,
cercando la hoyada con hilo punzó ?*

*- ¿Para qué matarlas, si sólo codicias
para tus vestidos el fino vellón ?*

Juan Carlos Dávalos, Coquena

Lo primero es pedir permiso a la Pachamama. Porque a ella, en la cosmovisión andina, pertenecen las vicuñas que se extienden por el altiplano de Perú, Bolivia, Chile y Argentina. Una ceremonia ancestral, unida a la ciencia moderna, permite que comunidades y científicos argentinos exploten de manera sustentable un recurso de alto valor económico y social.

La vicuña es una especie silvestre de camélido sudamericano que habita en la puna. Hasta 1950-1960 estuvo en serio riesgo de extinción debido a la ausencia de planes de manejo y conservación. Desde la llegada de los españoles se comenzó con la caza y exportación de los cueros para la obtención de la fibra, que puede llegar a valer U\$600 por kilo, lo que llevo a la casi desaparición de estos animales. Por ese entonces, la población de vicuñas en América era cercana a los 4 millones de ejemplares, en 1950 no eran más de 10.000.

A fines de la década del 70 Argentina, Bolivia, Chile, Perú y Ecuador firmaron un Convenio para la conservación y manejo de la vicuña que permitió recuperar su población hasta contar en la actualidad con más de 76 mil ejemplares en nuestro país.

En Santa Catalina, Jujuy, a 3.800 metros sobre el nivel del mar, investigadores de CONICET, junto a comunidades y productores locales, han logrado recuperar una tecnología prehispánica sustentable para la obtención de la fibra de vicuña. Se trata de una ceremonia ancestral y captura mediante la cual se arrean y esquilan las vicuñas silvestres para obtener su fibra. Se denomina chaku y se realizaba en la región antes de la llegada de los conquistadores españoles. Según Bibiana Vilá, investigadora independiente de CONICET y directora del grupo Vicuñas, Camélidos y Ambiente (VICAM) *"Hoy podemos pensar en volver a hacer ese chaku prehispánico sumado a técnicas que los científicos aportamos para que las vicuñas pasen por toda esa situación sufriendo el menor stress posible. Las vicuñas vuelven a la naturaleza, la fibra queda en la comunidad, y nosotros tomamos un montón de datos científicos."*

El chaku

El chaku es una práctica ritual y productiva para la esquila de las vicuñas. Durante el imperio inca, las cacerías reales o chaku eran planificadas por el inca en persona. En esta ceremonia se esquilaba a las vicuñas y se las liberaba nuevamente a la vida silvestre. La fibra obtenida era utilizada para la confección de prendas de la elite y su obtención estaba regulada por mecanismos políticos, sociales, religiosos y culturales. Se trata de un claro ejemplo de uso sustentable de un recurso natural. Hugo Jacobaccio, zoarqueólogo e investigador principal de CONICET, explica que *"actualmente el chaku concentra hasta 80 personas, pero durante el imperio inca participaban de a miles. Hoy las comunidades venden esa fibra a acopiadores textiles y obtienen un ingreso que complementa su actividad económica principal, el pastoreo de llamas y ovejas"*.

El proceso comienza con la reunión de todos los participantes, luego toman una soga con cintas de colores reunidos en semicírculo y arrean lentamente a las vicuñas guiándolas hacia un embudo de red de 1 km de largo que desemboca en un corral. Cuando los animales están calmados se los esquila manipulándolos con sumo cuidado para reducir el stress y se los libera. Hoy, 1500 años después del primer registro que se tiene de esta ceremonia, la ciencia argentina suma como valor agregado: el bienestar animal y la investigación científica. En tiempo del imperio Inca, el chaku se realizaba cada cuatro años, actualmente se realiza anualmente sin esquila a los mismos animales *"se van rotando las zonas de captura para que los animales renueven la fibra"* explica Jacobaccio. Según Vilá *"es un proyecto que requiere mucho trabajo pero que demuestra que la sustentabilidad es posible, tenemos un animal vivo al cual esquilamos y al cual devolvemos vivo a la naturaleza. Tiene una cuestión asociada que es la sustentabilidad social ya que la fibra queda en la comunidad para el desarrollo económico de los pobladores locales."*

Yanina Arzamendia, bióloga, investigadora asistente de CONICET y miembro del equipo de VICAM, explica que se

esquilan sólo ejemplares adultos, se las revisa, se toman datos científicos y se las devuelve a su hábitat natural. Además destaca la importancia de que el chaku se realice como una actividad comunitaria *“en este caso fue impulsada por una cooperativa de productores locales que tenían vicuñas en sus campos y querían comercializar la fibra. Además participaron miembros del pueblo originario, estudiantes universitarios y científicos de distintas disciplinas. Lo ideal es que estas experiencias con orientación productiva tengan una base científica.”*

Paradojas del éxito.

La recuperación de la población de vicuñas produjo cierto malestar entre productores ganaderos de la zona. Muchos empezaron a percibir a la vicuña como competencia para su ganado en un lugar donde las pasturas no son tan abundantes. En este aspecto el trabajo de los investigadores de CONICET fue fundamental, según Arzamendia *“el chaku trae un cambio de percepción que es ventajoso para las personas y para la conservación de la especie. Generalmente el productor ve a las vicuñas como otro herbívoro que compite con su ganado por el alimento y esto causa prejuicios. Hoy comienzan a ver que es un recurso valioso y ya evalúan tener más vicuñas que ovejas y llamas. Nuestro objetivo es desterrar esos mitos”,* concluye.

Pedro Navarro es el director de la Cooperativa Agroganadera de Santa Catalina y reconoce los temores que les produjo la recuperación de la especie: *“Hace 20 años nosotros teníamos diez, veinte vicuñas y era una fiesta verlas porque habían prácticamente desaparecido. En los últimos años se empezó a notar un incremento y más próximamente en el último tiempo ya ese incremento nos empezó a asustar porque en estas fincas tenemos ovejas y tenemos llamas”. Navarro identifica la resolución de estos problemas con el trabajo del grupo VICAM: “Yo creo que como me ha tocado a mí tener que ceder en parte y aprender de la vicuña y de VICAM, se puede contagiar al resto de la gente y que deje de ser el bicho malo que nos perjudica y poder ser una fuente más productiva.”*

La fibra de camélido

Además de camélidos silvestres como la vicuña o el guanaco, existen otros domesticados como la llama cuyo manejo es similar al ganado, para impulsar la producción de estos animales y su fibra, el Estado ha desarrollado dos instrumentos de fomento. En la actualidad se encuentran en evaluación varios proyectos para generar mejoras en el sector productor de fibra fina de camélidos que serán financiados por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva. Se trata de dos Fondos de Innovación Tecnológica Sectorial destinados a la agroindustria y al desarrollo social que otorgarán hasta \$35.000.000 y \$8.000.000 respectivamente. Los proyectos destinados a la Agroindustria son asociaciones entre empresas y organismos del sector público con el objetivo de mejorar la calidad de la fibra de camélido doméstico a partir del desarrollo de técnicas reproductivas, mejoramiento genético e innovaciones en el manejo de rebaños; incorporar valor a las fibras a partir de mejoras en la materia prima o el producto final; permitir la trazabilidad de los productos para lograr su ingreso en los mercados internacionales y fortalecer la cadena de proveedores y generar empleos calificados.

La convocatoria Desarrollo Social tiene como fin atender problemas sociales mediante la incorporación de innovación en acciones productivas, en organización social, en el desarrollo de tecnologías para mejorar la calidad de vida de manera sostenible y fomentar la inclusión social de todos los sectores. Otorgará hasta \$8.000.000 por proyecto que mejore las actividades del ciclo productivo de los camélidos domésticos, la obtención y/o el procesamiento de la fibra, el acopio, el diseño y el tejido, el fieltro y la confección de productos.



BREVE HISTORIA DEL ADN, SU ESTRUCTURA Y FUNCIÓN

Palabras clave: Genética, Leyes de Mendel, ADN, Difracción de Rayos-X, Biología Molecular.
Key words: Genetics, Mendel's Laws, DNA, X-ray Diffraction, Molecular Biology.

Durante 2012 se celebraron dos acontecimientos científicos relacionados. Uno de ellos es el Centenario de un descubrimiento cardinal de la Física, esto es el fenómeno de difracción de rayos-X por cristales, realizado por Walter Friedrich, Paul Knipping y Max von Laue. La instrumentación e interpretación de este fenómeno por el trabajo pionero de William Henry Bragg y su hijo William Lawrence Bragg inició el desarrollo de los hoy poderosos métodos de análisis estructural. Dichos métodos estructurales por difracción de rayos-X resultarían clave en el otro acontecimiento que se conmemoró en 2012: el Cincuentenario del Premio Nobel en Fisiología o Medicina otorgado a Francis Crick, James Watson y Maurice Wilkins por sus trabajos de 1953 sobre la estructura molecular del ácido desoxirribonucleico (ADN), la sustancia de la herencia, un hallazgo fundamental para el entendimiento del fenómeno natural más extraordinario: la Vida. A sesenta años de la culminación de aquellos trabajos, hacemos aquí una descripción sucinta de los eventos que desembocaron en uno de los descubrimientos científicos más importantes del siglo XX.

Oscar E. Piro

Departamento de Física e Instituto de Física
La Plata (CONICET), Facultad de Ciencias Exactas,
Universidad Nacional de La Plata, CC 67, 1900
La Plata, Argentina.

piro@fisica.unlp.edu.ar

"En el campo de las observaciones, la suerte favorece sólo a la mente preparada".
Louis Pasteur.

During 2012 two related scientific breakthroughs were celebrated. One of them was the Centennial of a cardinal discovery in Physics, namely the X-ray diffraction by crystals, by Walter Friedrich, Paul Knipping and Max von Laue. The instrumentation and interpretation of this phenomenon by the pioneer work of William Henry Bragg and his son William Lawrence Bragg paved the way for the development of the today powerful methods of structural analysis. These X-ray diffraction methods would play a key role in the other discovery celebrated in 2012: the fifty years of the Nobel Prize in Physiology or Medicine awarded to Francis Crick, James Watson and Maurice Wilkins for their work of 1953 on the molecular structure of deoxyribonucleic acid (DNA), the substance of the heredity, a fundamental finding for the understanding of the most extraordinary natural phenomena: Life. In the sixtieth anniversary of the culmination of those works, we succinctly describe here the events that lead to one of the major scientific discoveries of the twentieth century.

"In the field of the observations, luck only favors the prepared minds".
Louis Pasteur.

■ PARTE 1. BREVÍSIMA HISTORIA DE LA GENÉTICA CLÁSICA HASTA INICIOS DE LOS 1950'S

1.1 PRE-HISTORIA DE LA GENÉTICA.

A pesar que se trata de una disciplina científica con sólo unos 150 años de desarrollo, el interés en los fenómenos biológicos relacionados con la Genética puede remontarse a la Era Neolítica (alrededor de 10.700 a 9.400 AC) cuando el crecimiento de la población demandó cambios en los métodos ancestrales

para la obtención de alimentos mediante la recolección, caza y pesca. Entonces, dio comienzo (principalmente en Medio Oriente) el desarrollo de la agricultura y la ganadería con la siembra de plantas y la cría de animales domésticos (Pierce, 2007). Pronto se descubre que se pueden modificar los cultivos y los animales mediante su reproducción selectiva cuando rasgos (*fenotipos*) deseables de los progenitores eran transmitidos a su descendencia (*herencia*).

En paralelo y desde tiempos re-

motos, ya se habían observados dichos fenómeno de herencia en los humanos y el describir y entender sus mecanismos en Occidente ocupó la mente de los filósofos griegos. Entre ellos, Leucipo de Mileto (Siglo V AC), Anaxágoras (500-428 AC) y Demócrito (460-370 AC) notaron que virtualmente todas las partes del cuerpo exhiben diferencias hereditarias. Así concluyeron que cada órgano y estructura del cuerpo producía pequeños sedimentos (más tarde llamados *gémulas*) que por vía sanguínea llegaban a los órganos reproductores desde donde eran pasa-

dos al embrión en el momento de la concepción (ver Fig. 1). En el marco de este concepto, que más tarde se conocería como *pangénesis*, Anaxágoras creía que un perfectamente preformado y diminuto humano (*homúnculo*) preexistía en el aparato reproductor masculino y era transmitido a la madre durante la procreación para su desarrollo embrionario en la matriz (Guttman et al., 2004).

Por aquella época se creía que sólo el hombre contribuía a la herencia de sus descendientes y también que podía transmitir *caracteres adquiridos* durante su vida a dicha progenie. El filósofo griego Aristóteles (384-322 AC) adhirió a este último concepto pero creía que ambos sexos contribuían a los rasgos de

la descendencia, considerando por lo tanto incorrecta la hipótesis del homúnculo. Rechazó también el concepto de pangénesis, señalando, además, que a veces la gente se parece más a sus ancestros que a sus propios padres.

A pesar que durante la Antigua Roma (hasta la caída del Imperio Romano de Occidente en 476 AD) se contribuyó poco al entendimiento de la herencia, durante ese período se desarrollaron exitosamente por el método de prueba y error un cierto número de técnicas de cría de animales y de crecimiento de plantas. Se avanzaría muy poco en el entendimiento de la Genética durante los próximos 1000 años. Las antiguas ideas erróneas sobre pangénesis y

herencia de caracteres adquiridos, junto con las técnicas empíricas de cría de animales y plantas, sobrevivían durante el surgimiento de la ciencia moderna en los siglos XVII y XVIII de nuestra era, llegando a tener gran influencia hasta fines del siglo XIX (Guttman et al., 2004).

1.2. AVANCES DEL SIGLO XVII. BIOLOGÍA MÁS ALLÁ DE LA RESOLUCIÓN DEL OJO HUMANO

Empleando los primeros microscopios, en 1665 Robert Hooke (naturalista inglés, 1635-1703) estudiaba el origen de la baja densidad del corcho mediante la observación de delgadas láminas. Allí descubre que el vegetal está constituido por *celdas* organizadas espacialmente de una manera similar a un panal de abejas. No pudo demostrar el significado biológico de estas celdillas en los seres vivos, por cuanto lo que estaba observando eran células vegetales muertas que retenían su característica forma poligonal.

Antón van Leeuwenhoek (fabricante de lentes holandés, 1632-1723) fue probablemente la primera persona en observar bacterias (organismos unicelulares) y otros microorganismos. En 1674 observa protozoarios; en 1677 descubre los espermatozoides humanos y de otros animales (a los que llamó *animáculos*). Entusiastas practicantes de la microscopía durante esa época creyeron ver que un minúsculo *homúnculo* reside en el espermatozoide humano, reavivando antiguas creencias en *preformacionismo* de hace más de 2000 años (ver Fig. 2)

Durante la misma década de los 1670's, Régnier de Graaf (médico y anatomista holandés, 1641-1673) describió por primera vez el folículo ovárico, la estructura en la cual se forman los ovocitos, células precursoras del óvulo humano. Aunque el

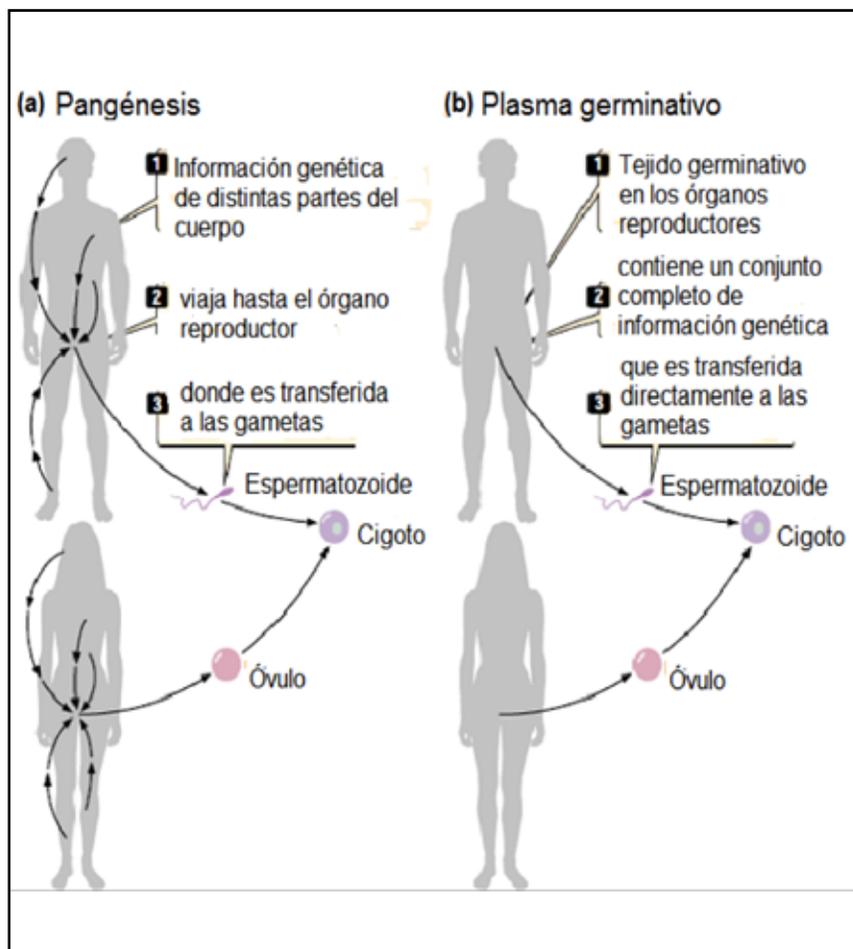


Figura 1: Antiguo concepto de herencia a través de la pangénesis (a) comparado con la moderna teoría del plasma germinativo (b). Figura adaptada de Pierce (2007).

óvulo real no se visualizó hasta pasados otros 150 años, su existencia fue rápidamente aceptada. De hecho, de Graaf atrajo a una escuela de adeptos, liderados por Marcello Malpighi (anatomista y biólogo italiano, 1628-1694), llamados *ovistas*, que creían que era el óvulo femenino el que contenía el futuro ser humano y no el espermatozoide como sostenía la escuela que se dio a llamar *animalculista* o *espermista*. ¡La controversia entre las dos escuelas se extendió por décadas!

Otra noción previa al desarrollo científico de la genética establecía equivocadamente que la descendencia adquiriría una *herencia mezclada* de los caracteres aportados por los padres.

1.3. DESCUBRIMIENTOS GENÉTICOS DEL SIGLO XIX. LEYES DE MENDEL SOBRE LA HERENCIA

Karl Reinhold Ernst von Baer (naturalista alemán del Báltico, 1792-1876) descubre en 1827 los óvulos mamíferos, cuya existencia fue predicha por Régnier de Graaf unos 150 años antes.

Robert Brown (botánico escocés, 1773-1858) describe en 1831 el núcleo de células eucariotas.

Matthias Jakob Schleiden (botánico alemán, 1804-1881) y su compatriota Friedrich Theodor Schwann (naturalista, 1810-1882) establecen en 1839 la *teoría celular*: todos los animales y plantas consisten en agregados de células, las que constituyen la mínima unidad de vida. Proponen que todo organismo comienza con una única célula y que las criaturas multicelulares se forman por sucesivas divisiones celulares (ver Fig. 3).

Charles Darwin (naturalista inglés, 1809-1882) enuncia en 1859 su famosa teoría sobre el *origen y evolución de las especies*. Darwin adoptó el modelo de pangénesis para la herencia, lo que le impidió desarrollar la base genética subyacente en su teoría de la evolución a través de la selección natural.

Gregor Johann Mendel (monje católico y naturalista austríaco, 1822-1884) establece en 1865 las leyes de la herencia, fundando la



Figura 2: Grabado de 1694 mostrando un homúnculo en la cabeza de un espermatozoide humano.

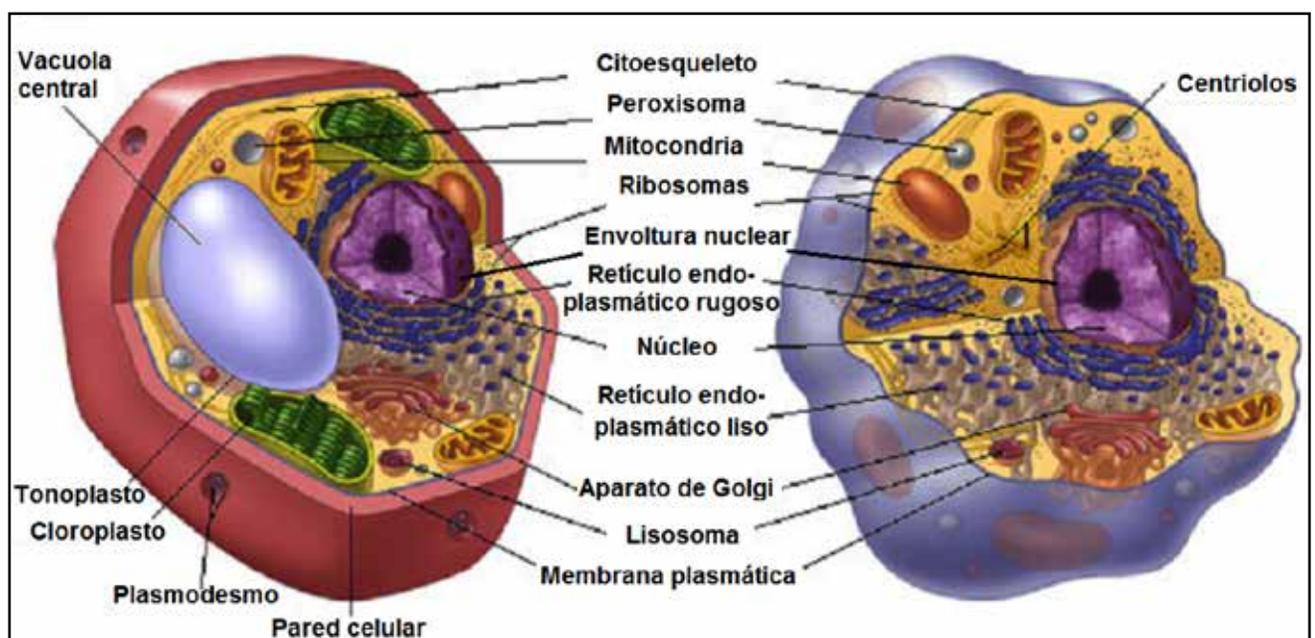


Figura 3: Esquema moderno de la estructura celular de plantas (izquierda) y animales (derecha).

disciplina científica de la Genética. Los trabajos de Mendel durante el período 1856-1863 precisan y cuantifican resultados de sus predecesores, valiéndose de i) Numerosos y precisamente controlados experimentos de fertilización cruzada entre diversas variedades de arvejas (usó unas 28.000 plantas) con siete bien determinadas características fenotípicas, tales como el color (amarillas o verdes) y la textura (lisas o rugosas) de las semillas, el color de las flores (blancas o púrpuras), etc. ii) Seguimiento de los patrones de herencia a lo largo de varias generaciones y iii) Empleo de conceptos simples de matemática combinatoria y estadística para derivar las leyes de la herencia.

Mendel trabajó con variedades 'puras' de arvejas con respecto a un dado rasgo (fenotipo): cruzadas entre sí a lo largo de varias generaciones mostraban consistentemente siempre el mismo fenotipo. Cada experimento consistió en cruzar genéticamente entre sí dos de tales variedades puras que difieren en sólo uno de las siete características fenotípicas seleccionadas (monohibridización). Las plantas híbridas resultantes pueden exhibir cierta combinación de rasgos que fueron seguidos en posteriores cruzamientos. Ejemplifiquemos esto con la experiencia donde Mendel cruzó una variedad pura de arvejas de semillas verdes con la correspondiente variedad pura de semillas amarillas mediante la remoción del aparato polinizador de cada planta de un tipo seguido de su fertilización manual mediante polen extraído de la variedad opuesta, obteniendo el siguiente patrón (Guttman et al., 2004):

P **Amarillo x verde**

↓

F₁ **Todas amarillas (se cruzan en sí)**

↓

F₂ **Mayoría amarillas, algunas verdes**

Donde

P: Generación parental

F₁: Primera generación filial

F₂: Segunda generación filial

A pesar que las ideas previas de *herencia mixta* predecían que los híbridos F₁ deberían presentar un color intermedio verde-amarillento, sin embargo la experiencia mostró que *todas* las semillas resultaron amarillas, como si el rasgo verde ¡hubiera desaparecido! Sorprendentemente, en la generación siguiente F₂, obtenida por cruce de la F₁ entre sí, ¡las semillas verdes (a pesar que en menor proporción) reaparecieron!

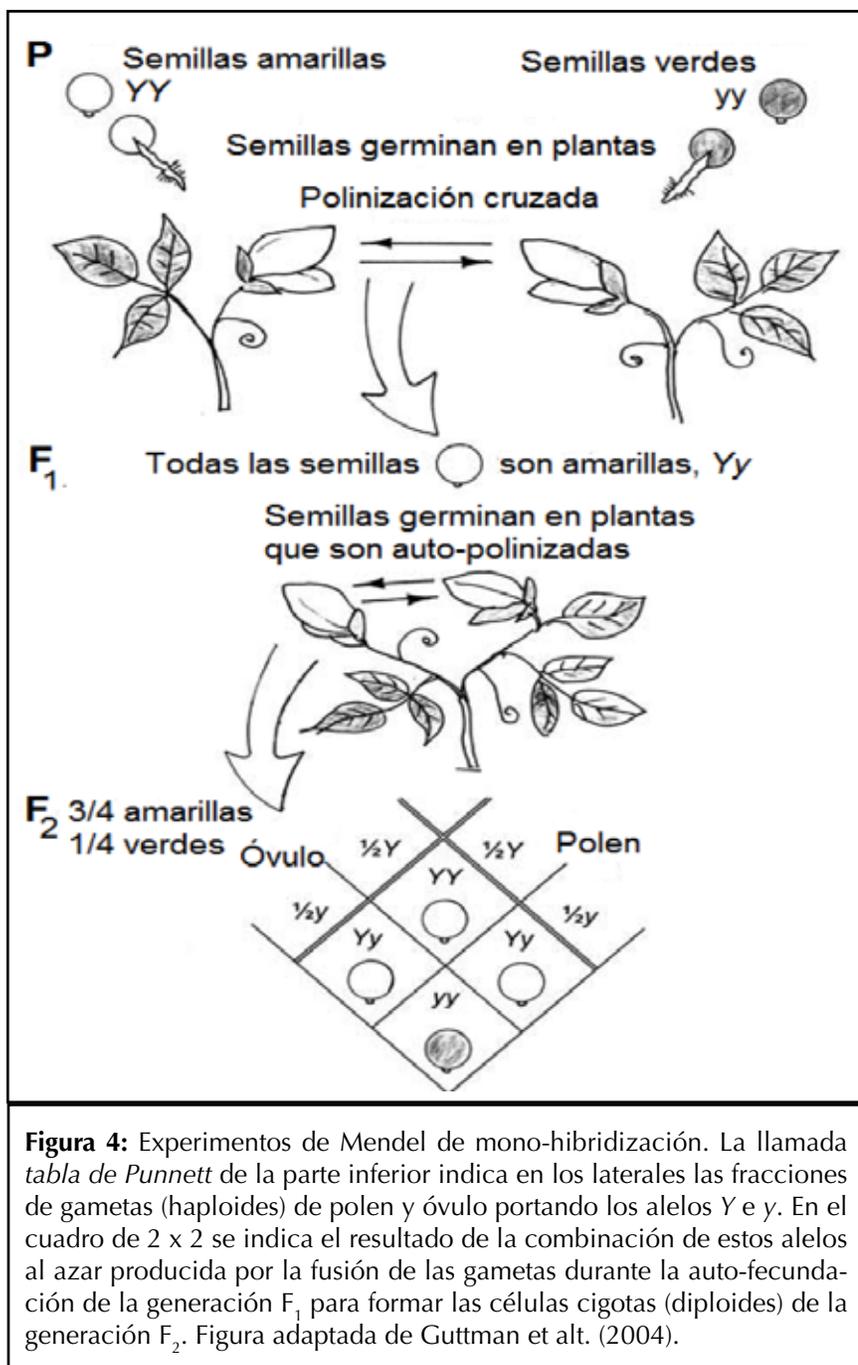
Los otros rasgos estudiados por Mendel siguieron el mismo patrón. Así al repetir sus experimentos comenzando con sendas variedades puras de arvejas con flores púrpuras y blancas, observó sólo flores púrpuras en la generación F₁ (no una intermedia violeta) y la reaparición de flores blancas en la generación F₂.

Cuantitativamente, en el caso del seguimiento del color de las semillas, Mendel obtuvo en F₂ 6022 amarillas y 2001 verdes. En el caso del seguimiento del color de las flores, obtuvo en la generación F₂ 705 púrpuras y 224 blancas. Mendel notó que ambos conjuntos de números presentan un radio muy próximo a 3:1. La explicación de esta observa-

ción lo llevaría a la elaboración de un modelo hipotético y al enunciado de su primera ley de *segregación*.

El modelo de Mendel postulaba que las plantas contienen *factores* que determinan la herencia de cada rasgo de las mismas y que cada planta porta *un par* de factores hereditarios por cada rasgo, respectivamente suministrados por ambos progenitores. Además, él postuló que cuando la planta posee dos factores diferentes, uno de ellos es *dominante* (su efecto fenotípico es visible) mientras que el otro es *recesivo* (su efecto no se manifiesta). Así, el color amarillo de las semillas de arveja debe ser dominante, mientras que el verde es recesivo; el color púrpura de las flores es dominante frente al color blanco. En Genética, se acostumbra simbolizar un factor hereditario dominante con una letra mayúscula (por ejemplo Y) y el correspondiente recesivo con la letra minúscula correspondiente (y). Modernamente, identificamos estos dos factores como formas de un solo gen (que determina ya sea el color de las semillas o el de las flores) y que llamamos *alelos* uno de otro.

La Figura 4 muestra la explicación de los resultados experimentales de Mendel, basada en su modelo. Su variedad pura conteniendo semillas amarillas deben portar dos factores dominantes Y (YY), mientras que la variedad pura de semillas verdes debe contener dos factores recesivos y (yy). Dado que ambos factores en estas variedades son los mismos, se los llama *homocigóticos* o se dice que las plantas son *homocigotas*. Cada una de las plantas contribuye un factor determinante del color, así que todas las plantas F₁ son Yy; dado que ellas portan diferentes factores, estas plantas son *heterocigotas*. Cuando se reproducen mediante cruce entre ellas, cada una produce dos tipos de gametas, la mi-



tad portando el alelo Y y la otra mitad el alelo y. Estas gametas se combinan al azar durante la fecundación para producir una de cuatro posibles combinaciones: YY, Yy, yY, o yy. Sólo la última (que posee dos factores y recesivos) es verde; las otras tres conteniendo el alelo dominante Y dan lugar a semillas amarillas, de esta manera explicando la razón amarillo/verde de 3:1 observada.

Las conclusiones de Mendel

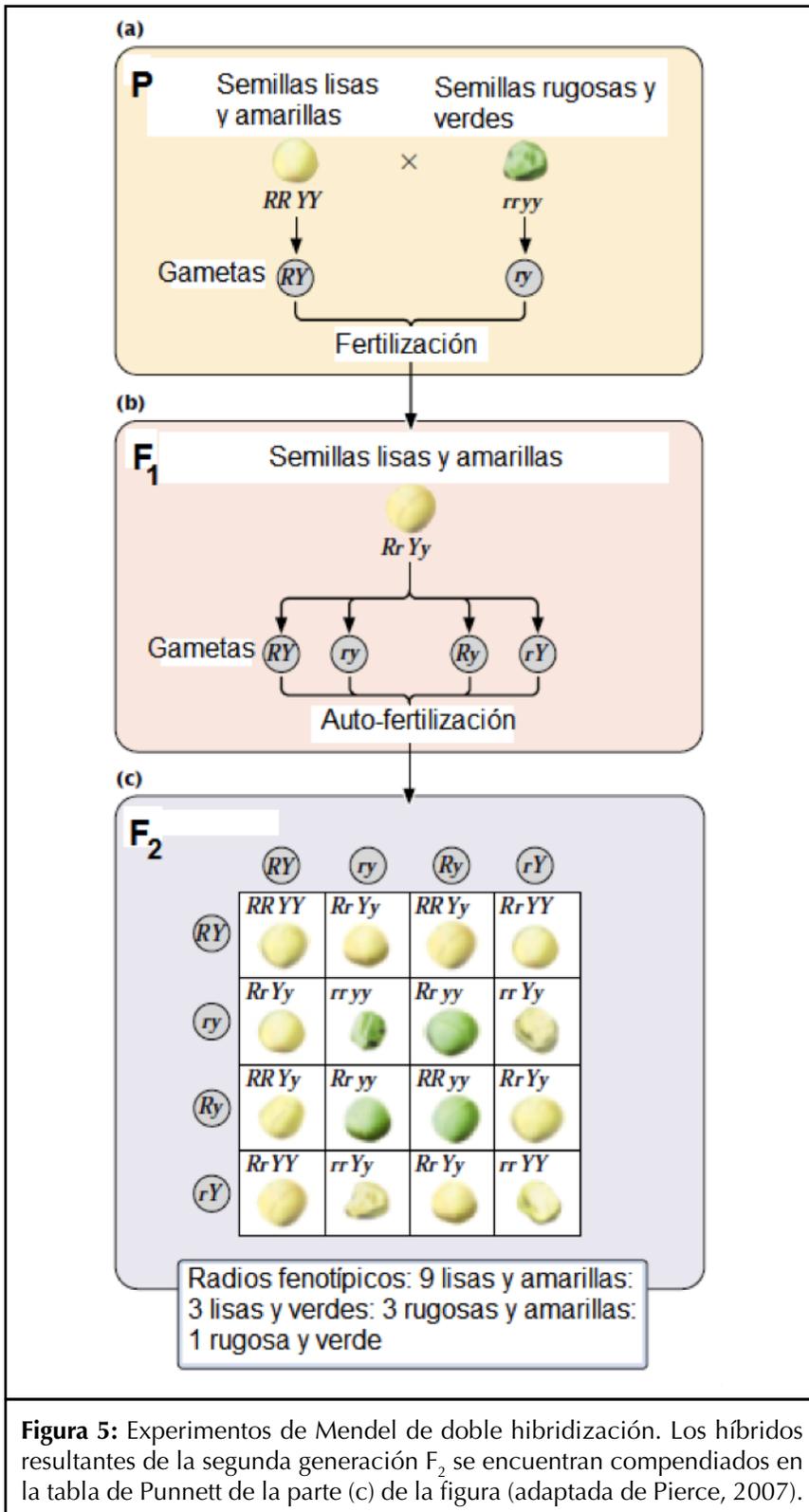
acerca de la herencia derivadas de sus cruzamientos mono-híbridos han sido posteriormente desarrolladas y formalizadas en el **principio de segregación** (*Primera Ley de Mendel*) aplicable a toda reproducción sexual. Este principio establece que cada organismo diploide posee dos alelos por cada rasgo característico (fenotipo). Estos dos alelos se segregan (separan) durante la formación de las gametas (haploide), yendo cada alelo a diferentes gametas en

proporciones iguales.

Además de su trabajo en mono-híbridos, Mendel también realizó cruzamientos entre variedades puras de arvejas con respecto a *dos* rasgos característicos (doble hibridización). Por ejemplo, creció una variedad homocigota de arvejas que producían semillas lisas (factor RR) y amarillas (YY) dominantes y también otra variedad homocigota que producía semillas rugosas (rr) y verdes (yy) recesivas. Al cruzar estas dos variedades entre sí observó que *toda* la progenie F₁ consistía en semillas lisas y amarillas. Luego procedió a cruzar la progenie F₁ entre sí para obtener en la subsecuente generación F₂ la siguiente distribución: 315 semillas lisas y amarillas; 101 rugosas y amarillas; 108 lisas y verdes; y 32 rugosas y verdes. Mendel observó que estos fenotipos guardaban entre sí aproximadamente las proporciones 9:3:3:1 (Pierce, 2007).

Mendel repitió estos cruces di-híbridos con otros pares tomados entre sus siete características fenotípicas para obtener *siempre* las mismas proporciones 9:3:3:1. Este resultado puede entenderse en el marco de los principios de segregación y dominancia anteriores si se agrega un tercer principio, el de la **recombinación independiente de los factores** (*Segunda Ley de Mendel*). Este principio establece que alelos que codifican diferentes rasgos fenotípicos se separan y se transmiten *independientemente* entre sí. Esto es, diferentes rasgos son heredados independientemente unos de otros; por lo tanto el patrón de herencia de un rasgo no afectará al patrón de herencia de otro.

Mendel fue afortunado en seleccionar sus siete rasgos característicos en las plantas de arvejas. Ahora se sabe que los genes correspondientes residen en cromosomas dis-



Walther Flemming (médico y biólogo cito-genetista alemán, 1843-1905) publica primero en 1878 y luego en su libro seminal de 1882 sobre "Sustancia celular, núcleo y división celular" una descripción detallada de las diversas fases durante el proceso de división celular (mitosis).

La meiosis es un tipo especial de división celular necesaria en la reproducción sexual de organismos eucariotas (con células nucleadas). Las células producidas por meiosis se llaman gametas. En muchos organismos, incluyendo todos los animales y plantas terrestres (exceptuando algunos otros grupos, tales como los hongos), las gametas son llamadas también células espermáticas y óvulos. La meiosis fue descubierta y descrita por primera vez en 1876 por Oscar Hertwig (zoólogo alemán, 1849-1922). Fue descrita (a nivel de cromosomas) nuevamente en 1883 por Edouard Joseph Marie Van Beneden (zoólogo belga, 1846-1910). Sin embargo, la relevancia de la meiosis para la reproducción y herencia fue descrita recién en 1890 por Friedrich Leopold August Weismann (biólogo evolucionista alemán, 1834-1914) quien notó que se necesitan dos divisiones celulares para transformar una célula diploide en cuatro células haploides manteniendo el número de cromosomas. Una descripción esquemática moderna de los procesos de mitosis y meiosis se muestra en la Fig. 6.

Hacia fines del siglo XIX ya se reconocía que el núcleo celular contenía la información sobre la herencia.

1.4. DESCUBRIMIENTOS GENÉTICOS DEL SIGLO XX

Hugo de Vries (botánico holandés, 1848-1935), Carl Franz Joseph Erich Correns (genetista y botánico alemán, 1864-1933) y Erich von

tintos, una condición necesaria para la estricta validez de su segunda ley.

Johan Friedrich Miescher (biólogo y médico suizo, 1844-1895) identifica en 1868 el ADN como un

ácido débil constituyente químico del núcleo de células eucariotas, obtenidas de los glóbulos blancos de la sangre en pus colectado en hospitales.

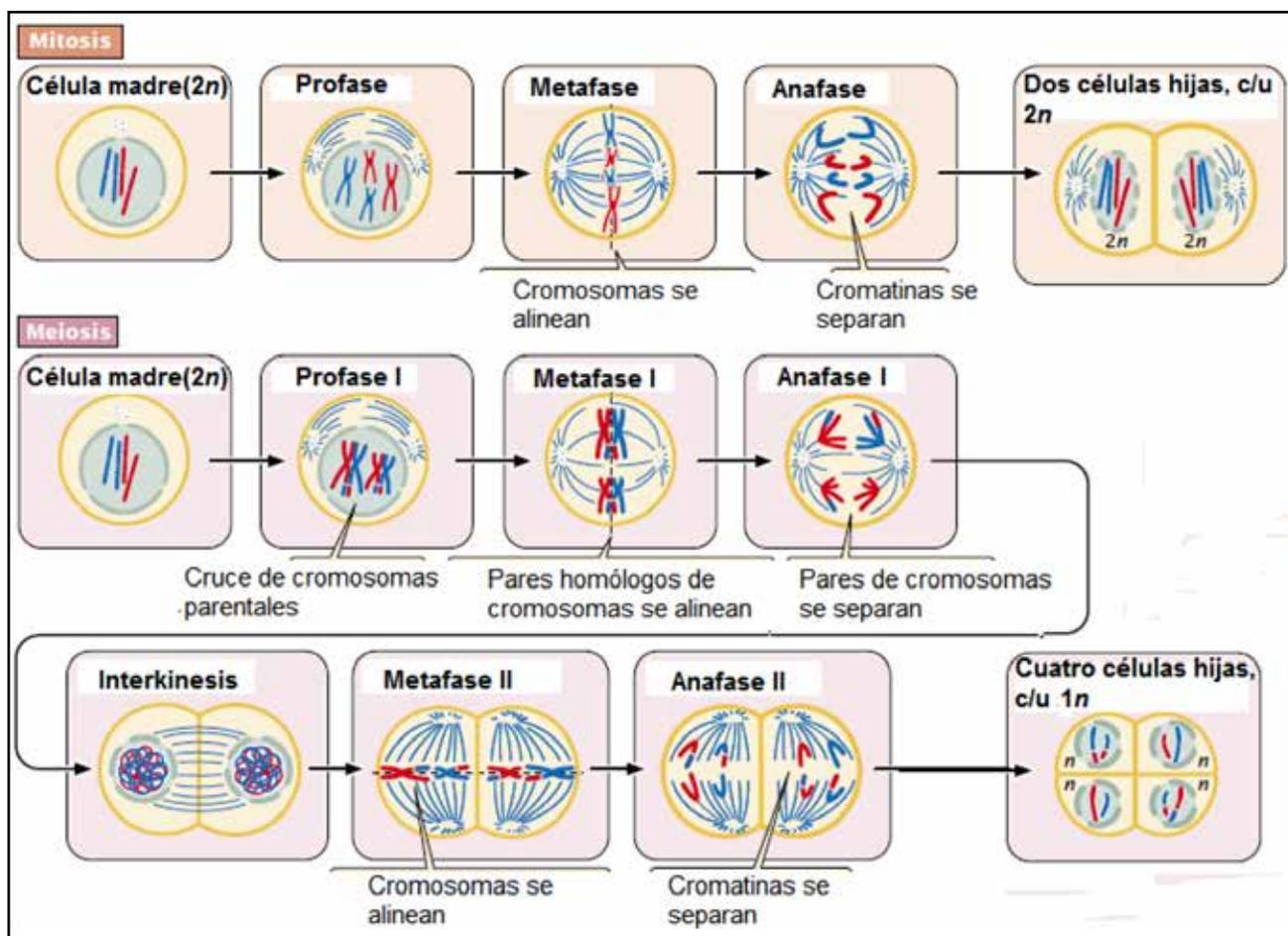


Figura 6: Comparación esquemática de los procesos de mitosis y meiosis en células eucariotas. Por simplicidad se ha considerado una célula madre diploide ($2n$) con sólo dos pares de cromosomas ($n=2$). Los colores azul y rojo distinguen los cromosomas aportados a la célula madre por ambos progenitores. El ejemplo de meiosis indicado corresponde al caso de la *espermatogénesis* animal donde por cada célula madre se producen cuatro espermatozoides. En el caso equivalente de la *ovogénesis* femenina sólo se forma un óvulo con capacidad reproductiva por célula madre. Figura adaptada de Pierce (Pierce, 2007).

Tschermak-Seysenegg (agronomo austríaco, 1871-1962) re-descubren independientemente en 1900 las Leyes de Mendel.

Walter Stanborough Sutton (médico y genetista estadounidense, 1877-1916) y Theodor Heinrich Boveri (biólogo alemán, 1862-1915), independientemente, proponen en el período 1902-1903 que las unidades de herencia (genes) están localizados en los cromosomas, integrados por ADN y proteínas (histonas). La propuesta resultó controversial hasta su confirmación en 1915 por los trabajos de Thomas Hunt Morgan (genetista estadounidense, 1866-

1945) sobre la herencia y cruce de cromosomas parentales en la mosca de la fruta (*Drosophila melanogaster*), siendo posteriormente reconocida como **teoría cromosomática de la herencia** o **teoría de Sutton-Boveri**. La teoría identifica los cromosomas con los factores (*alelos*) apareados requeridos por las Leyes de Mendel de la herencia. También establece que los cromosomas poseen una *estructura lineal* con los genes localizados en sitios específicos a lo largo de ellos.

Durante el período 1909-1929, Phoebus Aaron Theodore Levene (médico y bioquímico ruso-esta-

dounidense, 1869-1940) determina la estructura molecular y modo de polimerización de los nucleótidos en el ADN (ver Fig. 7). Cada monómero del polímero consiste de un grupo fosfato (PO_4) con uno de sus oxígenos vinculados a un azúcar deoxirribosa a través de su carbono en la posición 5' (enlace éster). La polimerización se logra mediante el enlace éster del C3' de la ribosa con un oxígeno del fosfato próximo sobre la cadena. Así resulta un polímero con una orientación 3'-5' constante a lo largo del mismo. Unida covalentemente al C1' de la deoxirribosa existe una de cuatro bases nitrogenadas diferentes que

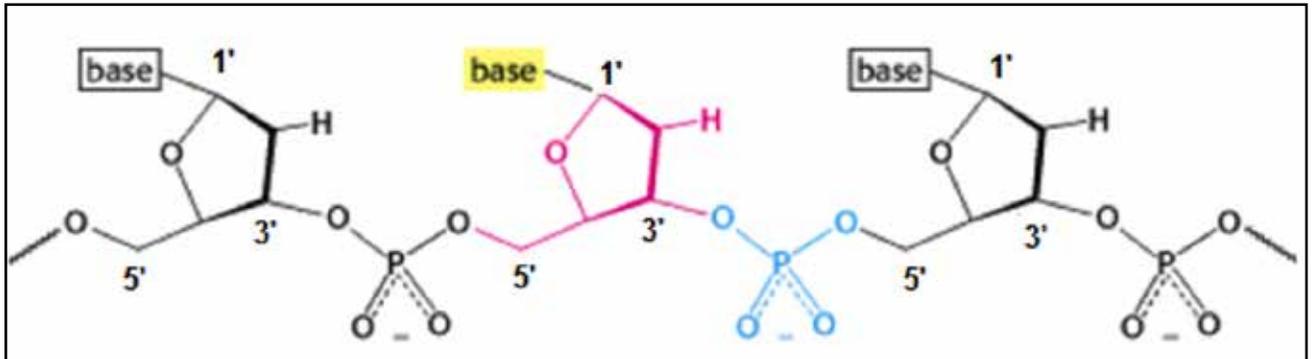


Figura 7: Estructura química de un poli-nucleótido de ADN.

caracterizan al nucleótido. Dos de ellas son pirimídicas: citosina (C) y timina (T), las otras dos purínicas: adenina (A) y guanina (G).

Sin embargo, Levene formula la hipótesis incorrecta que el ADN consiste en tetra-nucleótidos CATG repetidos (...CATGCATGCATGCATG...), que en su momento desvió la consideración de los ácidos nucleicos como sustrato para la información genética (formarían polímeros repetitivos ‘poco inteligentes’) hacia las proteínas, otro importante componente de todos los organismos. Como el ADN (¡y por profundas razones de biología molecular!) las proteínas biológicas son polímeros lineales (no ramificados) cuyas unidades monoméricas consisten en

uno de 20 posibles aminoácidos levógiros (L), tal como muestra la Fig. 8. De esta forma, en un polímero de dimensión N dichos aminoácidos pueden arreglarse en principio de 20^N maneras diferentes, un número muy grande aún para las proteínas más pequeñas (para sólo $N=4$ ya se tienen teóricamente ¡160.000 combinaciones diferentes!).

Por sus comparativamente sencillos sistemas genéticos y rápida reproducción, los genetistas comienzan en la década de 1940 a usar virus capaces de infectar bacterias, llamados bacteriófagos (que ‘comen’ bacterias) o, simplemente, fagos, para estudiar la organización y estructura de los genes. Algunos genetistas se organizan en el llamado

“Grupo de los Fagos”.

En 1928, Frederick Griffith (médico y genetista británico, 1879-1941) mostró que la virulencia de la cepa Tipo III (S) de la bacteria neumococo puede transferirse desde células muertas de esta cepa a la cepa atenuada Tipo II (R) de bacterias vivas (Griffith, 1928). Basados en este resultado, Oswald Theodore Avery (médico e investigadores canadiense, 1877-1955), Colin Munro MacLeod (genetista canadiense-estadounidense, 1909-1972) y Maclyn McCarty (genetista estadounidense, 1911-2005) en un experimento clave identifican en 1944 al ADN como el material genético transferido (por aquél entonces llamado “principio transformador”), responsable por la

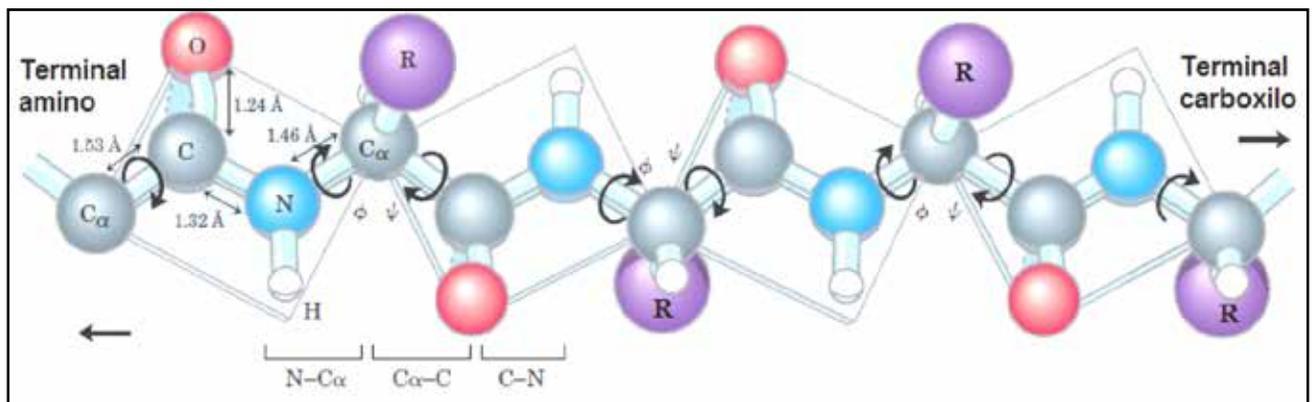


Figura 8: Vista de un polímero integrado por aminoácidos. R indica uno de 20 posibles grupos químicos laterales. Los aminoácidos se conectan entre sí vía un enlace peptídico C-N que (por ser parcialmente doble) no puede rotar, lo que determina la planaridad molecular indicada. Los enlaces simples $N-C_{\alpha}$ y $C_{\alpha}-C$, en cambio, pueden rotar (ángulos de torsión ϕ y ψ) libremente, sujetos a impedimentos estéricos. Los valores de ϕ y ψ a lo largo de la cadena determinan la conformación espacial de la proteína. Por referencia, se incluyen algunas distancias de enlace ($1\text{\AA}=10^{-8}\text{ cm}$). Figura adaptada de Lehninger, Nelson & Cox, 2005.

virulencia del neumococo Tipo III (Avery, MacLeod & McCarty, 1944).

Erwin Chargaff (bioquímico austriaco-estadounidense, 1905-2002) descubre en 1950 que los cuatro nucleótidos no están presentes en los ácidos nucleicos de diversos organismos en la misma proporción, como proponía Levene. También descubre que parecen valer ciertas reglas generales (ahora llamadas *reglas de Chargaff*): por un lado el número de nucleótidos conteniendo la base adenina (A) es igual a aquellos que contienen la base timina (T); por el otro el número de nucleótidos que tienen guanina (G) iguala el de

aquellos que contienen citosina (C) (Chargaff et al., 1949; Vischer, Zamenhof & Chargaff, 1949).

El primero de estos descubrimientos cardinales mostró que la teoría de los tetra-nucleótidos de Levene era incorrecta y que la secuencia de bases del ADN era suficientemente rica en arreglos como para almacenar la información genética usando algún tipo de codificación. En efecto, una cadena de N nucleótidos puede arreglarse en 4^N formas distintas (para $N=10$, ya se tienen ¡1.048.576 combinaciones diferentes!).

Sin embargo, Chargaff no advirtió en su momento la relevancia del segundo de sus descubrimientos, esto es las igualdades $A=T$ y $G=C$. Escribiría: "Una comparación de las proporciones molares revela ciertas sorprendentes, pero tal vez *sin sentido*, regularidades" (Vischer, Zamenhof & Chargaff, 1949). Dichas enigmáticas igualdades jugarían un papel clave en la determinación por Watson y Crick a inicios de 1953 de la estructura molecular del ADN, la que a su vez proveería una explicación simple de las mismas.

En 1952, los estadounidenses Alfred Day Hershey (bacteriólogo y genetista, 1908–1997) y Martha Cowles Chase (genetista, 1927–2003) realizan un experimento fundamental probando que la información genética de los bacteriófagos (y de todos los otros organismos) reside en el ADN y no en las proteínas (Hershey & Chase, 1952).

■ PARTE 2. ADN, LA MOLÉCULA DE LA HERENCIA. HISTORIA DE SU ESTRUCTURA

2.1. VER PARA ENTENDER. DIFRACCIÓN DE RAYOS-X: UN MICROSCOPIO DE X100.000.000 AUMENTOS QUE REVELA DETALLES A RESOLUCIÓN ATÓMICA

La visualización de células y de los procesos de división celular (mitosis) y de síntesis de gametas (meiosis) a nivel macroscópico requiere una magnificación de unos 1000-2000 aumentos (ver Fig. 9).

Detalles aún más finos pueden visualizarse mediante micrografías electrónicas que, en la práctica, pueden proveer aumentos de hasta 10^6 (ver Fig. 10).

Esto puede lograrse con un microscópico óptico o electrónico cuyo principio de funcionamiento

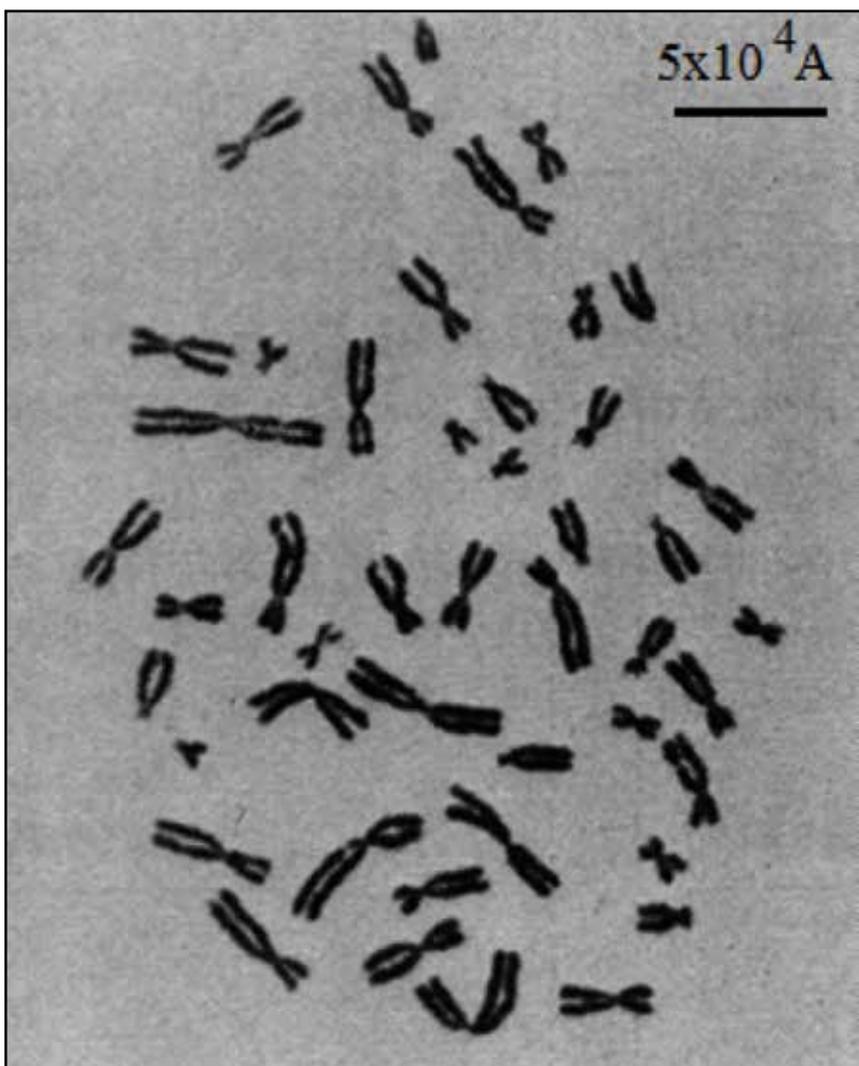


Figura 9: Micrografía óptica (unos 2000 aumentos) mostrando la duplicación de los 46 cromosomas humanos durante la profase de la mitosis (Guttman et al., 2004).

en términos de la óptica geométrica se esquematiza en la Fig. 11.

A pesar de que la construcción geométrica parece indicar que el aumento de un microscopio óptico puede incrementarse indefinidamente acercando el foco objeto F a la red, el carácter ondulatorio de

la luz invalida esta noción y limita la máxima resolución de tal instrumento a la longitud de onda λ de la luz. Esto es, no podemos ver detalles estructurales a escalas menores que unos 5000 Å. De esta manera, si queremos divisar procesos en la escala atómica y molecular (objetos con un tamaño de unos cien

millonésimos de centímetros, esto es, $10^{-8} \text{ cm} = 1 \text{ Å}$, se requiere luz de $\lambda \sim 1 \text{ Å}$, esto es, rayos-X. Sin embargo, no es posible el diseñar un microscopio de rayos-X por una razón muy simple: no existen lentes que desvíen luz de alta frecuencia. En efecto, el índice de refracción resulta de la polarización inducida en el medio por el campo eléctrico del haz de luz. Para las altas frecuencias de los rayos-X (unos 10^{18} ciclos por segundo), aún las partículas cargadas más livianas, esto es los electrones, sólo pueden seguir las oscilaciones del campo excitatriz con una amplitud extremadamente pequeña. Esto implica una polarización inducida minúscula en cualquier material y, consecuentemente, un índice de refracción que difiere del valor uno para el vacío en unas pocas partes en 10^6 .

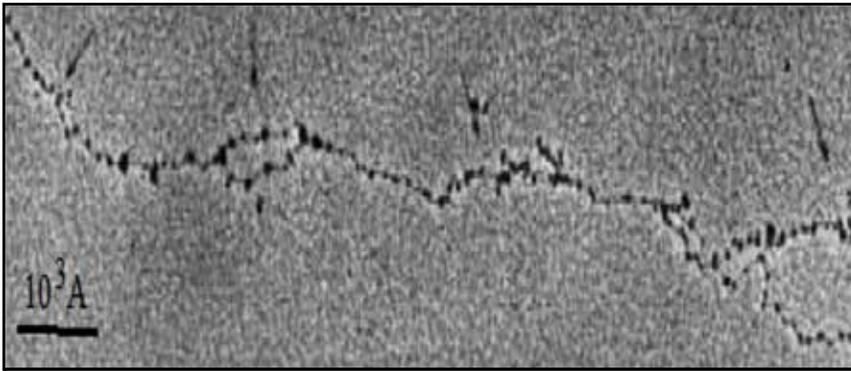


Figura 10: Micrografía electrónica (unos 100.000 aumentos) mostrando ADN de células eucariotas en proceso de duplicación durante la interfase de la mitosis (Pierce, 2007).

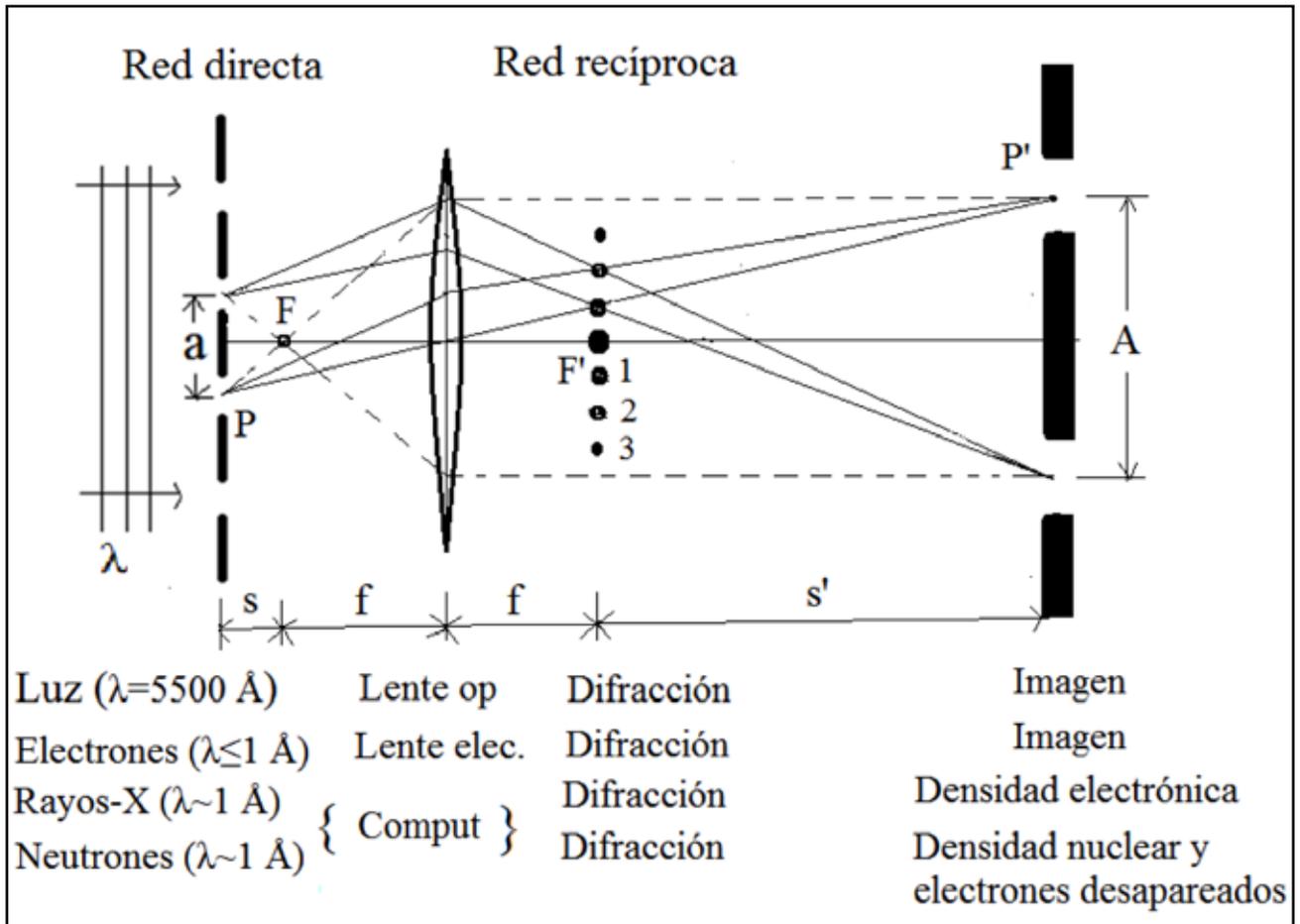


Figura 11: Reconstrucción de imágenes en microscopios.

Sin embargo, como ocurre en el rango óptico, aun tenemos el patrón de difracción que no requiere de lentes y el obtener aumentos de $\times 10^8$ se reduce a resolver el problema inverso de reconstruir la densidad de

electrones a partir de la figura de difracción de rayos-X producida por la dispersión de los mismos.

Ejemplifiquemos el problema inverso mediante el análogo óptico de

la Fig. 12. Allí, el problema consiste en derivar la estructura de la red (regiones transparentes y opacas a la luz) a través de su figura de difracción. La amplitud F de la luz dispersada por toda la red consiste en un

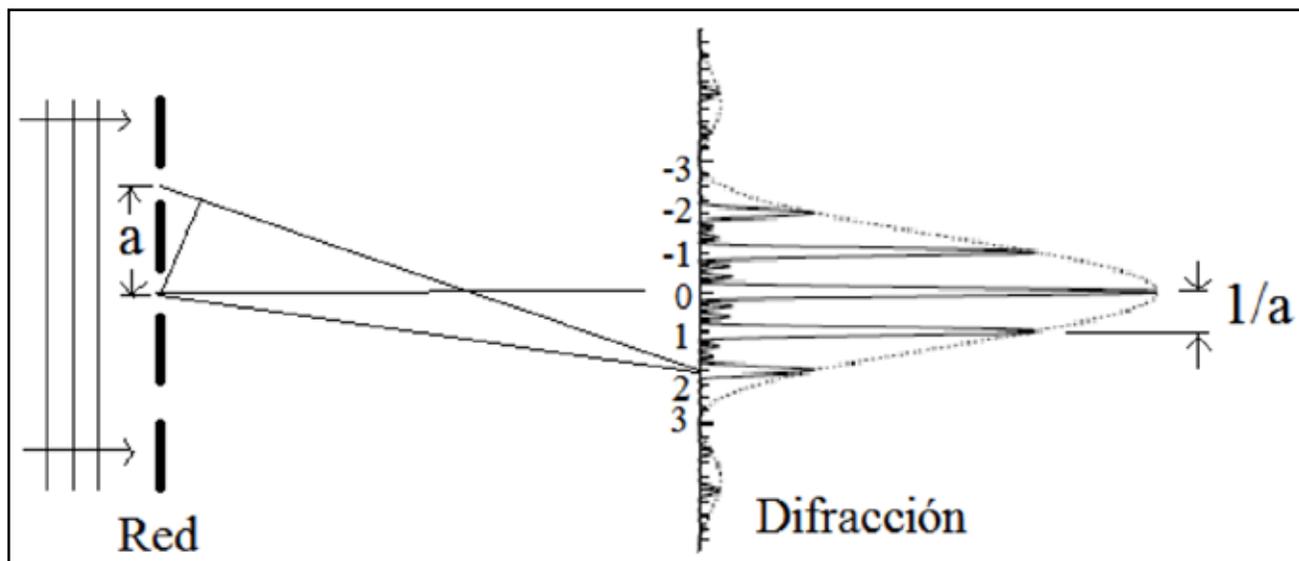


Figura 12: Figura de difracción de un arreglo de ranuras idénticas uniformemente espaciadas.

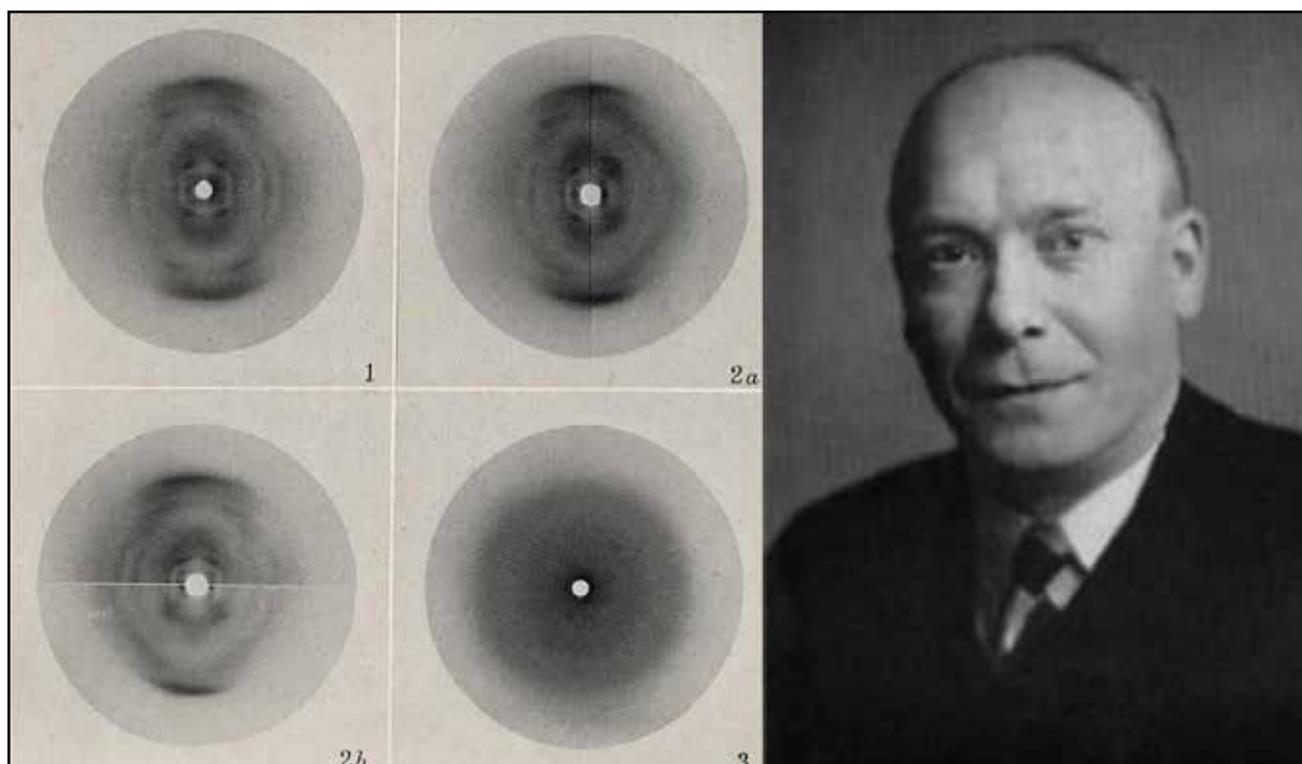


Figura 13: *Izquierda.* Placa 1: difracción de rayos-X en fibras (orientadas verticalmente) de la sal sódica de ADN extraído de timo de cabra (NaADN). Placas 2a,b: comparaciones de los patrones de difracción de ADN de cabra con ADN de arenque. El haz incidente es perpendicular a las fibras y al plano de las placas. Placa 3: difracción en polvos de ADN de levadura. *Derecha:* William Thomas Astbury (1898-1961).

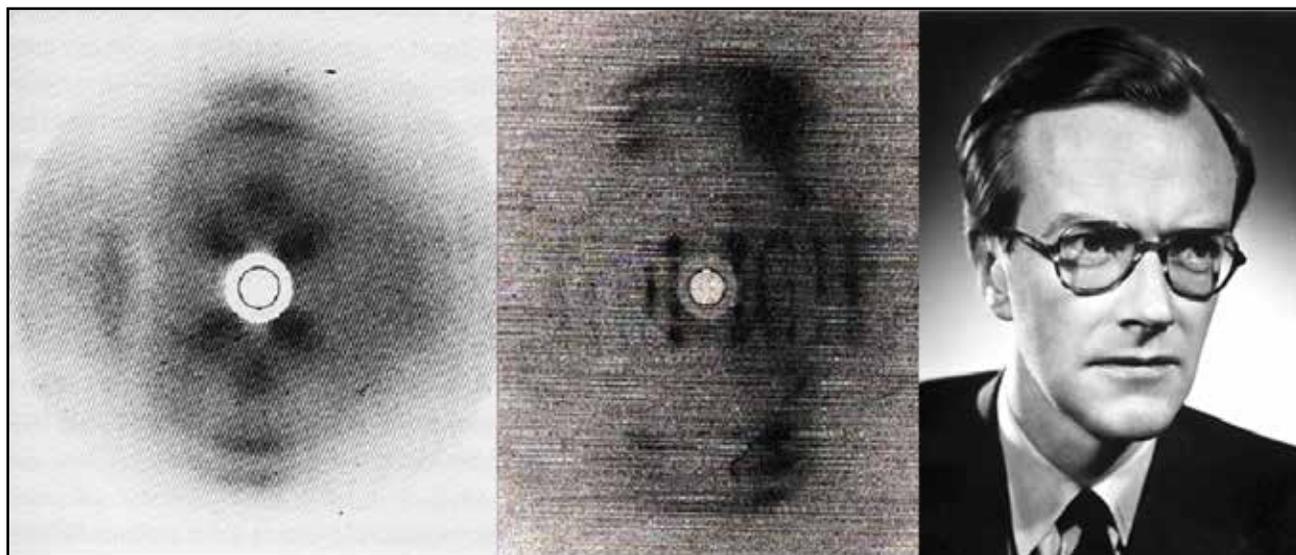


Figura 14: Izquierda: primeras figuras de difracción de rayos-X en fibras de ADN obtenidas en el King's College de Londres. Derecha: Maurice Hugh Frederick Wilkins (1916-2004).

patrón de difracción proporcional al de una sola ranura muestreado uniformemente a intervalos $1/a$, donde ocurren los máximos de interferencia. Cambios de signo en la amplitud de difracción F indican oscilaciones de la luz en contra-fase. En la región de rayos-X no se pueden determinar experimentalmente estos cambios de signos, sólo la intensidad F^2 indicada en la figura ('Problema de las fases').

Si la separación entre ranuras idénticas está distribuida al azar, los máximos de interferencia desaparecen y sólo queda una figura proporcional a la *difracción continua de una sola ranura*.

2.2. DIFRACCIÓN DE RAYOS-X EN ADN. PRIMEROS ESTUDIOS

Los primeros estudios de difracción de rayos-X en ADN fueron realizados por W. T. Astbury en la Universidad de Leeds, Inglaterra, durante el período 1937-1947 (Astbury, 1947). Los patrones de difracción fotográficos resultaron demasiado difusos como para extraer más que unas pocas dimensiones molecula-

res características del ADN (ver Fig. 13)

2.3. DIFRACCIÓN DE RAYOS-X EN ADN POR WILKINS Y FRANKLIN DEL KING'S COLLEGE DE LONDRES

En el King's College de Londres, Inglaterra, y bajo la dirección de su ex-supervisor de tesis John Randall, Maurice Wilkins comienza en 1946 un proyecto sobre estudios de ADN por microscopía UV, visible e infrarroja polarizada, espectroscopia de absorción infrarroja y difracción de rayos-X (Wilkins, Gosling & Seeds, 1951; Wilkins, 2003). En colaboración con el doctorando Raymond Gosling obtiene las primeras fotos de difracción de ADN extraído de esperma de arenque (ver Fig. 14). Las fotos resultan de una calidad informativa tan pobre como las de Astbury.

Durante un congreso en Londres, Wilkins obtiene muestras extremadamente puras de ADN (extraído del timo de cabra) provistas por el bioquímico suizo Rudolph Signer y la calidad de las fotos de difracción co-

mienza a mejorar substancialmente.

Vista la relevancia de los estudios por difracción de rayos-X, a mediados de 1950 Randall contrata por tres años a Rosalind Franklin (Foto en Fig. 15), una fisicoquímica con formación en Cristalografía, con un doctorado de la Universidad de Cambridge obtenido en 1945.

Franklin había trabajado en la estructura del carbón mineral y del grafito, primero en Inglaterra y luego en París, desde donde arribó a Londres hacia fines de 1950. A pesar de que inicialmente se le había asignado el estudio de proteínas en solución, a último momento y con el acuerdo de Wilkins y la misma Franklin, Randall cambia su plan de trabajo a difracción de rayos-X en fibras de ADN. También acuerdan que el trabajo del tesista Gosling pasara a ser supervisado por ella. En una reunión con Randall y Gosling cuando Wilkins estaba de vacaciones, Franklin recibe las excelentes muestras de Signer y el mejor equipamiento de rayos-X del laboratorio, esto es, el liderazgo de los estudios sobre difracción en ADN. Esto no es



Figura 15: Rosalind Elsie Franklin (1920–1958).



Figura 16: Francis Harry Compton Crick (1916–2004) y James Dewey Watson (1928).

lo que Wilkins entendía iba a ser la participación de ella en el proyecto y el conflicto que se suscitó entorpeció el desarrollo del mismo.

2.4. MODELADO DE LA ESTRUCTURA MOLECULAR DEL ADN POR WATSON Y CRICK EN CAMBRIDGE.

Inicialmente interesado en ornitología, James Watson ingresa en 1943 a la Universidad de Chicago a la edad de 15 años. Influenciado por la lectura en 1946 del libro de Erwin Schrödinger titulado *What Is Life?* (Schrödinger, 1946), Watson cambió su interés profesional de la ornitología a la genética. En 1947 obtiene el grado de BS en Zoología de la Universidad de Chicago. En 1950 (a la edad de 22 años) completa su PhD en la Universidad de Indiana bajo la supervisión del genetista Salvador Luria. Por ese entonces integraba el llamado Grupo de los Fagos, liderado por Luria y el físico Max Delbrück, y ya tenía conocimiento del experimento de Avery, MacLeod y McCarty de 1944 que sugería que el ADN y no las proteínas codificaban la información genética. En Sep-

tiembre de 1950 Watson comienza una estadía por un año como postdoctorando en la Universidad de Copenhague, Dinamarca, inicialmente en el Laboratorio del bioquímico Herman Kalckar. Éste estaba interesado en el metabolismo de los ácidos nucleicos y quería usar fagos como sistema experimental. Sin embargo, Watson quería explorar la estructura del ADN y este interés no coincidía con el de Kalckar. Luego de trabajar parte del año con él, Watson invirtió el resto del tiempo en Copenhague realizando experimentos con el fisiólogo microbiano Ole Maaloe, entonces también un miembro del Grupo de los Fagos. Durante los meses de Abril-Mayo de 1951, Watson visita la Estación Zoológica de Nápoles, Italia. Durante la última semana de su estadía atiende un congreso sobre la determinación de la estructura 3-D de moléculas por métodos de difracción de rayos-X. Allí llama su atención una comunicación de Wilkins sobre difracción de rayos-X en ADN que lo convence que sólo a través de esta herramienta puede determinarse la estructura molecular del ácido nucleico. Watson transmite a Luria su interés en

formarse en el empleo de dichos métodos de cristalografía estructural. Durante el verano de 1951, Luria contacta a John C. Kendrew de Cambridge y arregla un nuevo proyecto post-doctoral de investigación (sobre la estructura de la hemoglobina) para Watson en Inglaterra.

Watson arriba a Cambridge en el otoño de 1951. Con una formación en Zoología, por aquel entonces un novicio en cristalografía estructural, estableció una cordial y altamente complementaria colaboración con el físico Francis Crick (Foto de Fig. 16), un brillante cristalógrafo teórico. Crick estaba realizando su trabajo doctoral sobre cristalografía de proteínas en el grupo de Max Perutz y John Kendrew del laboratorio Cavendish dirigido por William Lawrence Bragg. Watson y Crick deciden dilucidar la estructura molecular del ADN mediante modelización consistente con los datos experimentales accesibles.

2.5. NUEVOS DATOS Y DESCUBRIMIENTOS DE FRANKLIN

Hasta la incorporación de

Franklin al proyecto, se había estado trabajando esencialmente con fibras de la sal sódica de ADN (NaADN) en una forma cristalina poco hidratada (obtenida con una humedad relativa próxima al 75%) llamada forma A. En Septiembre de 1951, Franklin realiza un importante descubrimiento. Controlando cuidadosamente la humedad de las muestras de ADN encuentra, a partir de los patrones de difracción colectados con humedades relativas del orden del 92%, una nueva forma de ADN que llamó forma B. Más todavía, descubre que las formas A y B se inter-convierten reversiblemente (ADN-A \leftrightarrow ADN-B) bajo cambio de humedad (ver Fig. 17). La forma B origina un patrón de difracción de unos pocos picos difusos, correspondientes a moléculas de ADN relativamente orientadas según el eje de la fibra pero desordenadas entre sí (Franklin & Gosling, 1953a). Este hallazgo permite explicar el carácter poco informativo de los difractogramas de rayos-X previos colectados por Astbury y por Wilkins y Gosling: probablemente trabajaron con muestras que eran mezclas de las dos formas. Siguiendo su instinto de cristalografía, Franklin no se interesa demasiado en la forma B y concentra sus esfuerzos en la forma crista-

lina A con un número mayor y más preciso de datos.

Para Wilkins y su colaborador el físico Alec Stokes, sin embargo, el patrón de difracción de la forma B era revelador, pues confirmaba una presunción de Stokes de un año atrás de que la molécula de ADN era helicoidal. Durante un viaje en tren, Stokes había derivado la forma característica de la difracción por una hélice aislada que indicaba la carencia de reflexiones sobre o cerca del meridiano del patrón de rayos-X (a lo largo de la fibra). Este cálculo acordaba cualitativamente con la figura en X del difractograma observado por Franklin para la forma B.

A mediados de Noviembre 1951 Franklin dicta un seminario en el King's College donde describe sus nuevas fotos de difracción en cristales de NaADN (mejores que las previas de Wilkins y Gosling) y sus medidas precisas del contenido de agua, Watson asiste al seminario y sólo colecta información memoriosa.

Probablemente, las fibras de ADN-A empleadas por Franklin consistían en poli-cristales fuertemente orientados a lo largo del eje

de la fibra (coincidente con el eje-c cristalográfico vertical en la Fig. 18) con una distribución angular uniforme de micro-cristales alrededor del eje. De esta manera, el patrón de difracción de rayos-X distribuido en capas obtenido con una muestra estacionaria de ADN es similar al de una fotografía de rotación en 360° de un único mono-cristal (Warren, 1990). Seguramente, el uso de unas pocas fibras ultra delgadas (18-30 μm) irradiadas por un haz de rayos-X fuertemente colimado (100 μm) contribuyó a reducir sensiblemente el ancho acumulado en los picos de difracción y así mejorar la calidad de los datos fotográficos.

Empleando un ingenioso procedimiento basado en la función de Patterson (que fuera sugerido a Franklin en París a fines de 1951 por su amigo y experimentado cristalógrafo, Vittorio Luzzati), Franklin y Gosling determinaron a partir de patrones de difracción similares al de la Fig. 18 la red de Bravais (monoclínica centrada-C) y las correspondientes constantes de celda del NaADN. Luego procedieron a indexar diversas reflexiones (66) distribuidas en las nueve capas de red recíproca perpendicular al eje-c (ver Fig. 18). Por aquella época, los métodos de

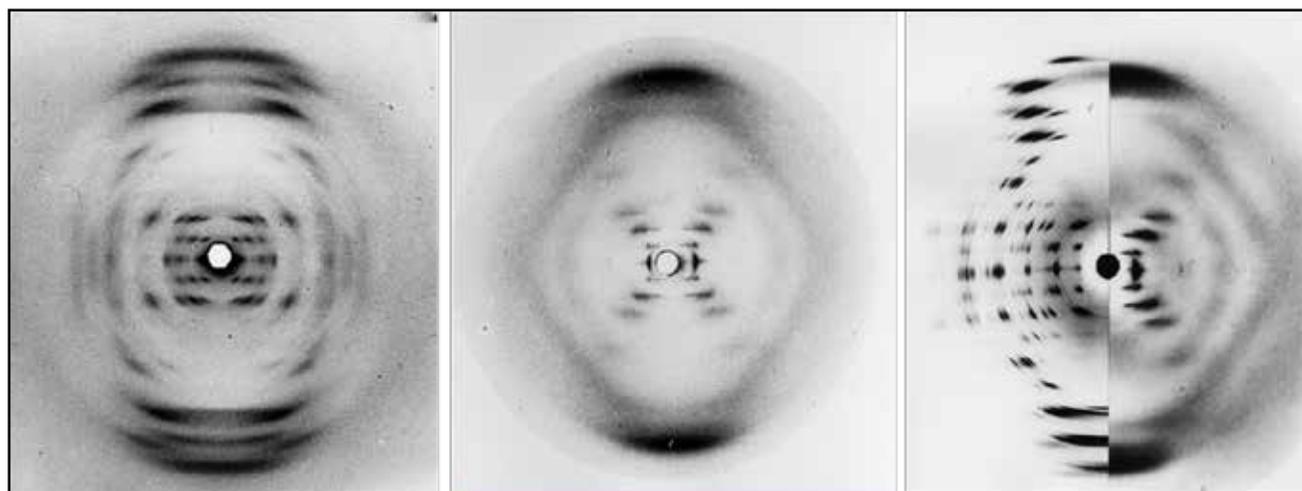


Figura 17: *Izquierda:* foto de difracción de rayos-X de ADN-A (75% humedad). *Centro:* foto de ADN-B (92% humedad). *Derecha:* comparación de ambos patrones.

resolución estructural a partir de datos de difracción de rayos-X estaban en su infancia, por no mencionar las limitaciones en las facilidades computacionales para realizar las sumas de Fourier de muchos térmi-

nos requeridas en estos métodos. A pesar de ello, valiéndose de un método diseñado por H. Lipson y C. A. Beveers en 1936 (Lipson & Beveers, 1936) y empleando una calculadora de escritorio, Franklin y Gosling realizaron la laboriosa síntesis de los mapas de Patterson (Franklin & Gosling, 1953b).

2.6. MODELO DE TRES HÉLICES DE WATSON Y CRICK

Creuyendo tener suficientes datos y basándose en la información memoriosa de Watson sobre el contenido del seminario de Franklin en Londres de mediados de Noviembre 1951, Watson y Crick construyen hacia fines de ese mes un modelo de ADN. El mismo consistía en tres hélices con los fosfatos hacia dentro y sus cargas negativas neutralizadas por iones Mg^{2+} , tal como muestra el esquema original de la Fig. 19.

Wilkins es invitado a Cambridge para opinar sobre el modelo. Viaja de inmediato, acompañado por Franklin y otros colaboradores del laboratorio. Franklin provee argumentos contundentes que demuelen el modelo: i) El ión Mg^{2+} no puede jugar el rol de neutralizar la repulsión electrostática entre fosfatos negativos vecinos pues en un medio

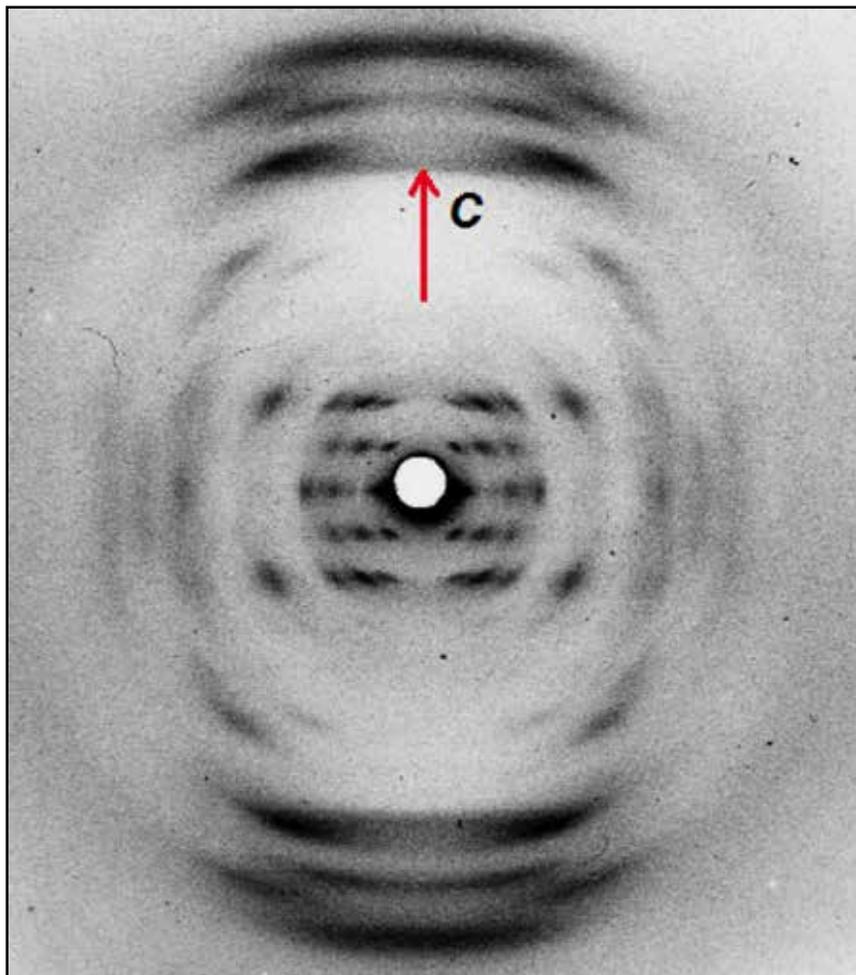


Figura 18: Fotografía de difracción de rayos-X de tres fibras (18-30 μm de espesor) de NaADN deshidratado (humedad relativa del 75%) mostrando la forma cristalina A del ácido nucleico. La foto fue tomada por Franklin y Gosling luego de una larga exposición (116 h).

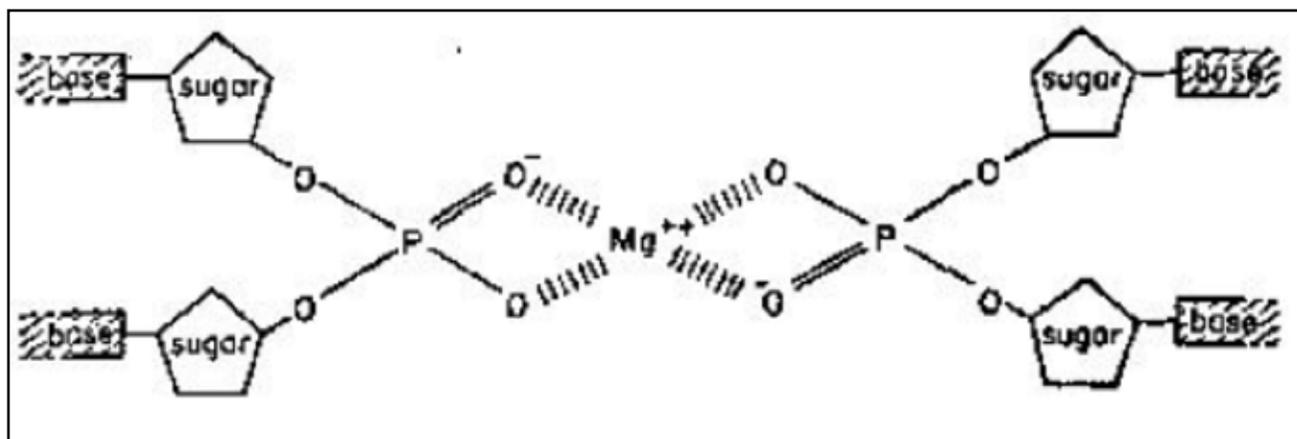


Figura 19: Esquema del modelo preliminar de ADN de Watson y Crick consistente en tres hélices (se muestran sólo dos) con las bases proyectándose hacia fuera y los grupos fosfatos hacia el eje helicoidal. La repulsión electrostática entre las cargas negativas de fosfatos próximos se vería compensada por iones Mg^{2+} coordinados.

biológico estaría rodeado por una coraza de moléculas de agua; ii) El ADN está fuertemente hidratado, contrariamente al modelo propuesto que contiene ¡diez veces menos agua que el valor experimental!; iii) La gran afinidad del ADN por el agua sugiere que los fosfatos (hidrofílicos) deben estar en el exterior, no en el interior de la molécula.

Enterado del fiasco, Bragg ordena a Watson y Crick que vuelvan a sus tareas específicas (la estructura de la hemoglobina) y dejen el estudio estructural del ADN a los investigadores de Londres.

2.7. UNA LECCIÓN RELEVANTE DE CRISTALOQUÍMICA

En un informe de laboratorio fechado el 7 de Febrero de 1952, Franklin reporta el indexado tentativo del patrón de la forma A del Na-ADN en términos de una celda de Bravais monoclinica C. Los grupos espaciales posibles para esta cel-

da son cinco: $C2$, Cm , $C2/m$, Cc y $C2/c$. Durante la primavera de 1952, Franklin viaja a Oxford donde muestra sus fotos a la cristalógrafa Dorothy Hodgkin y le manifiesta que había reducido las posibilidades de grupos espaciales a tres ($C2$ y, posiblemente, Cm y $C2/m$). Hodgkin le señala que dos de ellos (conteniendo planos espejo) no pueden ser, debido a la quiralidad (propiedad estructural de una molécula que no coincide con su imagen especular) de los azúcares en ADN. Esto deja a $C2$ como *único grupo espacial*. Como veremos más adelante, la presencia de ejes de simetría diádicos en ADN-A resultó una pieza de información clave para Crick en el modelado del ADN-B.

2.8. MODELO DE TRES HÉLICES DE LINUS PAULING

Desde Caltech en Pasadena, California, USA, surge un poderoso rival en la carrera por la estructura del ADN: Linus Pauling. Era un fi-

sicoquímico estadounidense y uno de los científicos más importantes del siglo XX. Él mismo se llamaba cristalógrafo, biólogo molecular e investigador médico. Fue uno de los primeros químicos cuánticos, realizando trabajos fundamentales describiendo la naturaleza de los enlaces químicos, por los que recibiría el Premio Nobel en Química en 1954. Ya en dos oportunidades anteriores había prevalecido compitiendo científicamente con Bragg:

i) En 1929 con la estructura de silicatos, tales como topacio, talco, mica, etc. (Pauling, 1929). Sus conocimientos en química estructural le dieron a Pauling una ventaja frente a Bragg en la resolución del problema. En efecto, Pauling modeló correctamente los silicatos como integrados por unidades tetraédricas covalentes de grupos SiO_4 (ver Fig. 20). Bragg, por su parte, suponía que la estructura podría derivarse del empaquetamiento óptimo de átomos considerados como esferas

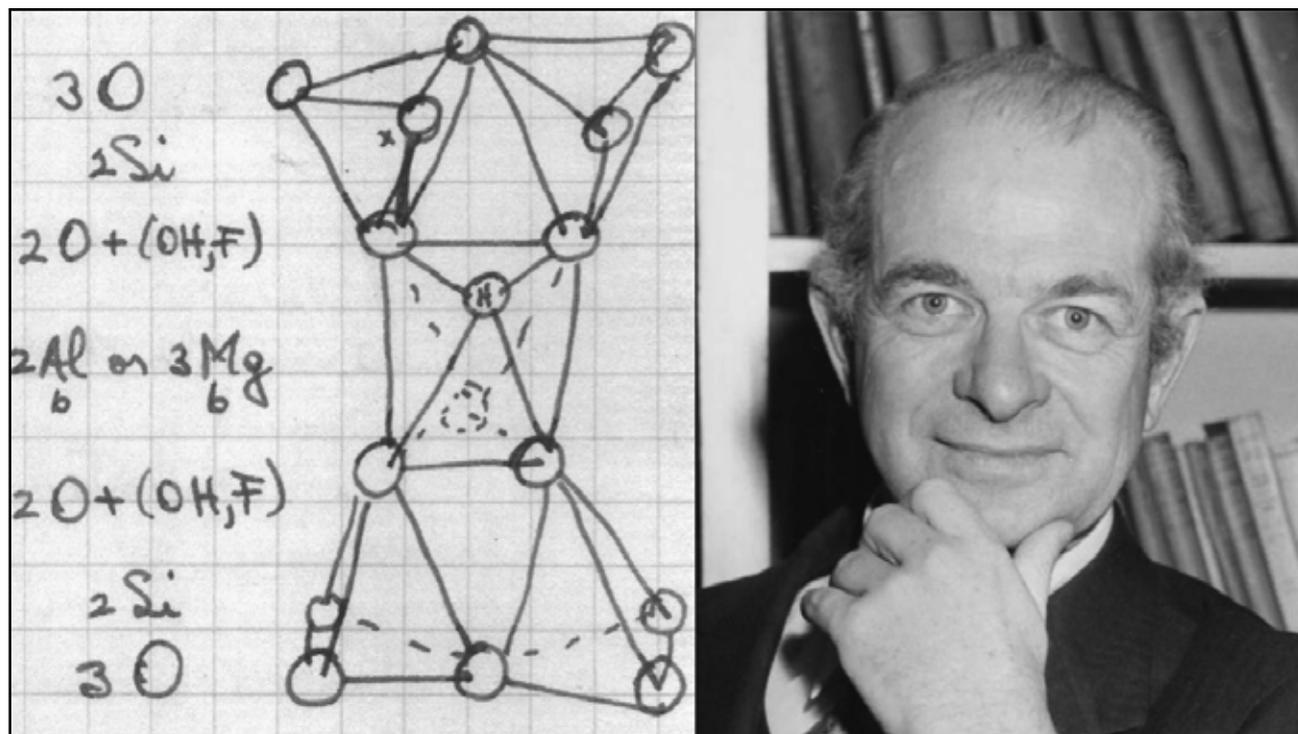


Figura 20: Izquierda: notas de laboratorio de Pauling indicando su metodología en el modelado de la estructura cristalina de silicatos. Derecha: Linus Carl Pauling (1901-1994).

cargadas de diferentes radios, una hipótesis que le fue útil en la determinación de la estructura de cristales iónicos, tales como los haluros alcalinos (NaCl, KCl, etc.).

ii) En 1951 con la estructura secundaria de hélice- α en proteínas (Pauling, Corey & Branson, 1951). Aquí Pauling poseía mayor información sobre cristalografía por difracción de rayos-X en aminoácidos aislados y en cadenas poli-peptídicas cortas (dos y tres aminoácidos). Estos datos confirmaban la *naturalidad plana del enlace peptídico* predicho por la teoría de enlaces resonantes que el mismo Pauling había contribuido a desarrollar (ver Fig.

8). Adoptando de partida esta propiedad molecular, procedió a modelar arreglos helicoidales que optimizaran los enlaces de hidrógeno N-H...O intra-moleculares. Bragg y colaboradores (Bragg, Kendrew & Perutz, 1950), sin embargo, aceptaron la hipótesis errónea de que la estructura helicoidal debía poseer un número entero de aminoácidos por vuelta. También se equivocaron al relajar la condición de planaridad de los enlaces peptídicos (Fig. 21).

Basándose en los difusos difractogramas de Atsbury y sin contar con el acceso a los excelentes datos de Franklin, en Febrero de 1953 Pauling publica con Robert Corey un artícu-

lo proponiendo una estructura para el ADN en forma de triple hélice, con los fosfatos en el interior y las bases nitrogenadas proyectadas hacia fuera, como muestra la Fig. 22 (Pauling & Corey, 1953).

El 28 de Enero de 1953, Peter Pauling (entonces doctorando de John Kendrew en Cambridge), que compartía la oficina 103 con Watson y Crick, les alcanza un pre-print con el artículo del padre (quien había también enviado una copia a Bragg). El desasosiego inicial de aquellos se disipa luego que una rápida lectura del trabajo indicaba una propuesta de estructura para el ADN similar a su frustrado intento de fines de No-

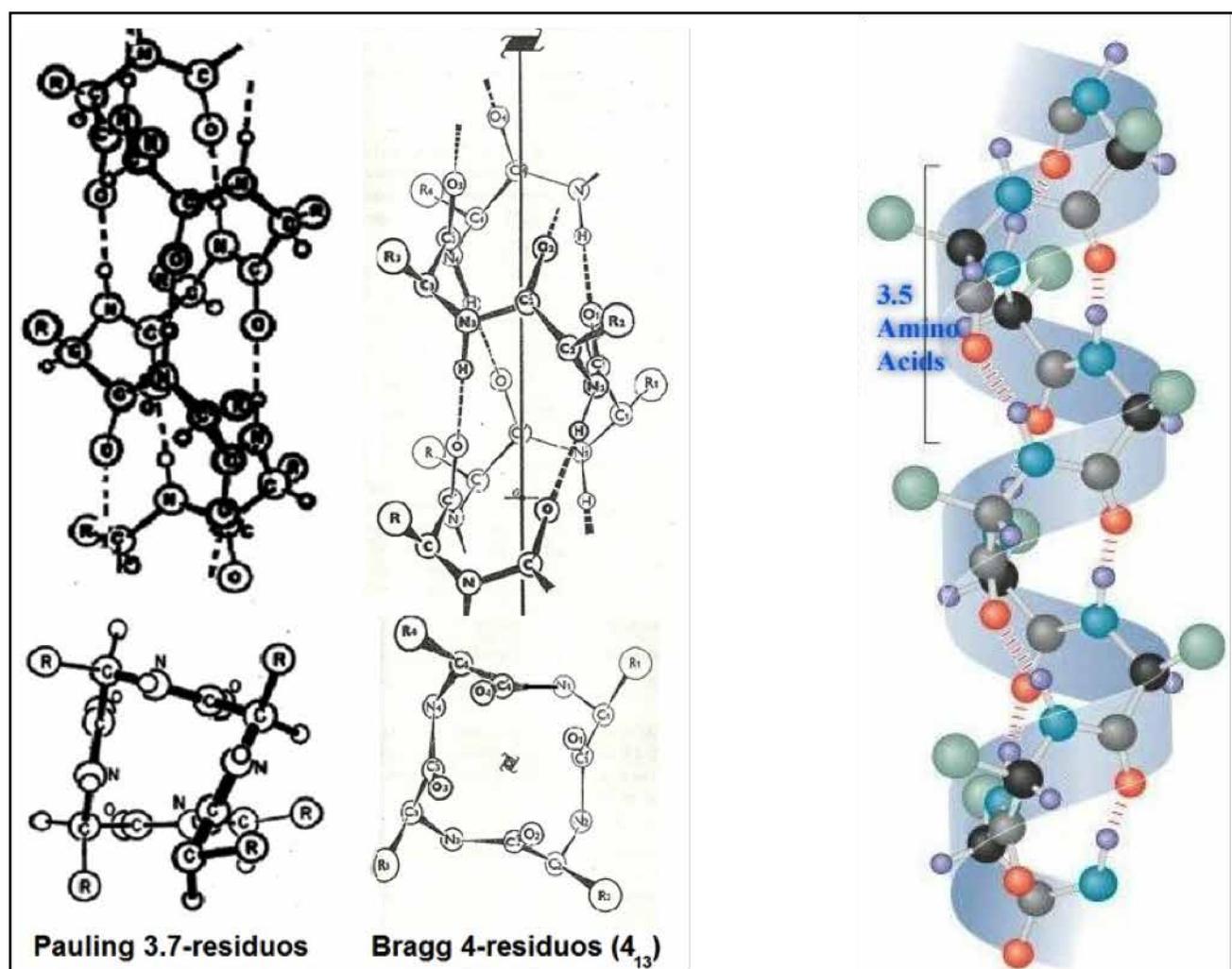
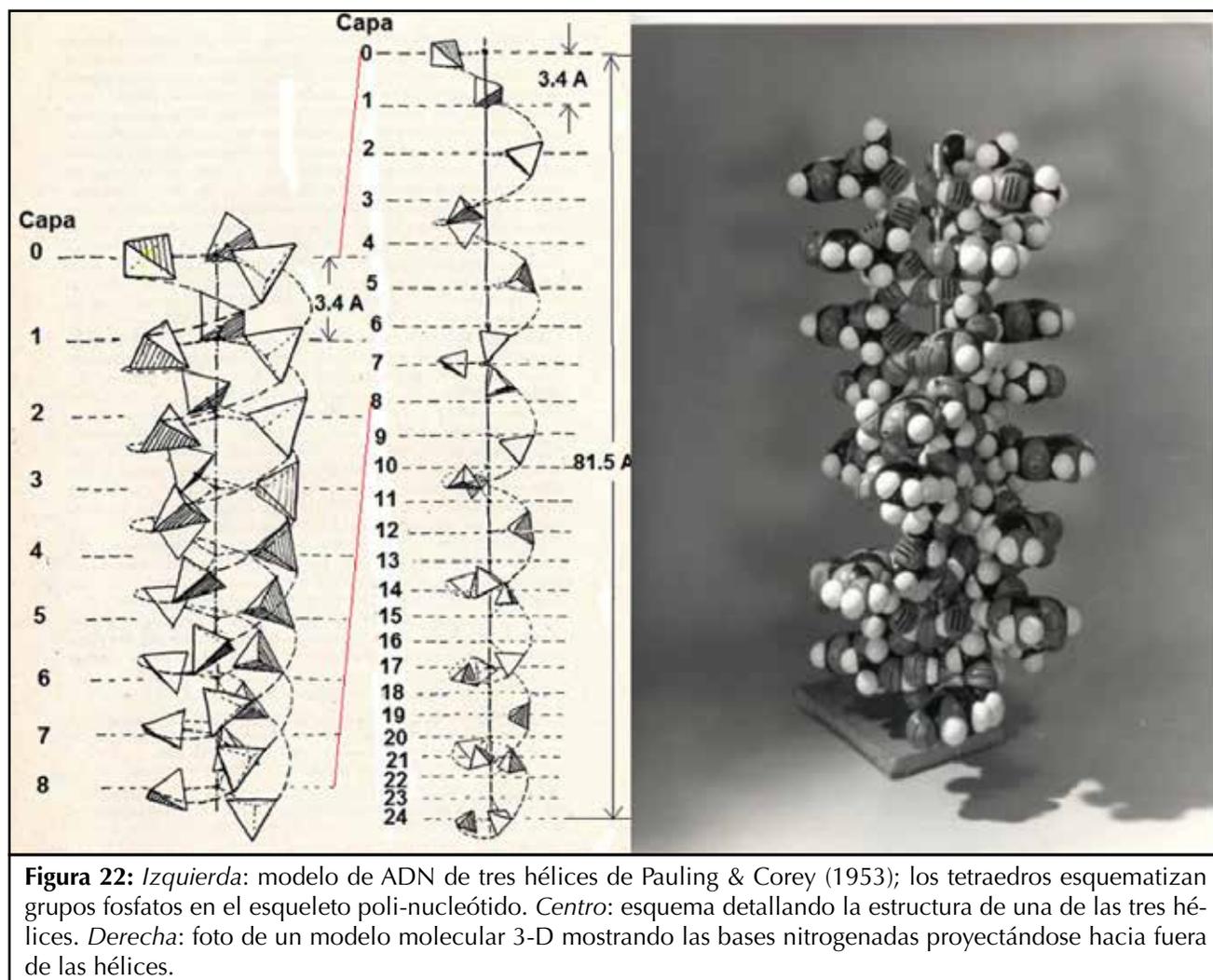


Figura 21: Comparación de las estructuras helicoidales de proteínas propuesta por Pauling, Corey & Branson (1951) (izquierda: 3.7 péptidos/vuelta) y por Bragg, Kendrew & Perutz (1950) (centro: 4 péptidos/vuelta). Derecha: esquema molecular actual de la estructura secundaria de hélice- α en proteínas.



viembre pasado.

2.9. WATSON VISITA A FRANKLIN Y WILKINS EN LONDRES

El viernes 30 de Enero de 1953 Watson visita intempestivamente a Franklin en su laboratorio londinense para recabarle opinión acerca del modelo de ADN propuesto en el artículo de Pauling y Corey y establecer una eventual colaboración. Desalojado de la sala por Franklin, Watson visita a Wilkins. En el transcurso del encuentro Wilkins, desprevenidamente y sin el consentimiento o conocimiento de Franklin, le muestra la mejor foto de la forma B tomada por ella y Gosling (ver Fig. 23) y que le alcanzara este último ese mismo día (Wilkins, 2003).

El examen de la foto impactó a Watson con la fuerza de una revelación: "En el instante que vi la foto quedé boquiabierto y mi pulso se aceleró", comentaría más tarde (Watson, 1968, 1981).

Esa noche los dos hombres continuarían discutiendo durante la cena sobre la posible estructura helicoidal del ADN. Watson continuó recabando de Wilkins información cuantitativa derivada de aquella foto de la forma B, obteniendo algunos números: el paso de la hélice era de 34.4 Å.

En el tren de regreso a Cambridge, Watson dibuja de memoria el patrón de difracción en forma de X en el margen de un periódico. Este esquema de la Foto 51 de Franklin sugiere a Crick que se trata de una

hélice y que los datos obtenidos de Wilkins sobre las dimensiones críticas pueden utilizarse en la construcción del modelo helicoidal para la forma B.

Los acontecimientos comienzan a desarrollarse rápidamente. Al día siguiente, sábado 31 de Enero de 1953, Bragg levanta la 'moratoria' a la dupla de trabajar en el ADN y accede al pedido de Watson de que el taller del Cavendish le provea representaciones moleculares en escala hechas de chapas y alambres. El miércoles 4 de Febrero, Watson retoma el modelado de la estructura del ADN.

Durante la siguiente semana (9-14 Febrero 1953), Crick and Watson confirman la información memoriosa de éste último cuando tienen ac-

ceso (facilitado por M. Perutz) a un informe privado sobre el estado de avance de las investigaciones en la unidad de biofísica del King's College. El mismo fue elevado al Medical Research Council (MRC) durante la visita del comité de evaluación realizada el 15 de Diciembre del año anterior. La sección del informe con los resultados cuantitativos de Franklin sobre las formas A y B del ADN es más que reveladora para ellos. Allí se detalla la transformación reversible entre ambas formas bajo cambio del contenido de agua y, aún más importante para Crick, información cristalográfica precisa sobre la forma deshidratada A. Esta forma cristalizaba en la red de Bravais monoclinica centrada-C, con las constantes de celda $a=22.0 \text{ \AA}$, $b=39.8 \text{ \AA}$, $c=28.1 \text{ \AA}$ y $\beta=96.5^\circ$ y pertenecía al grupo espacial C2, que contiene un eje doble.

2.10. DATOS DE DIFRACCIÓN DE FRANKLIN CLAVES EN EL MODELO DE LA FORMA B DEL ADN

El patrón de difracción de rayos-X por fibras de ADN-B corresponde

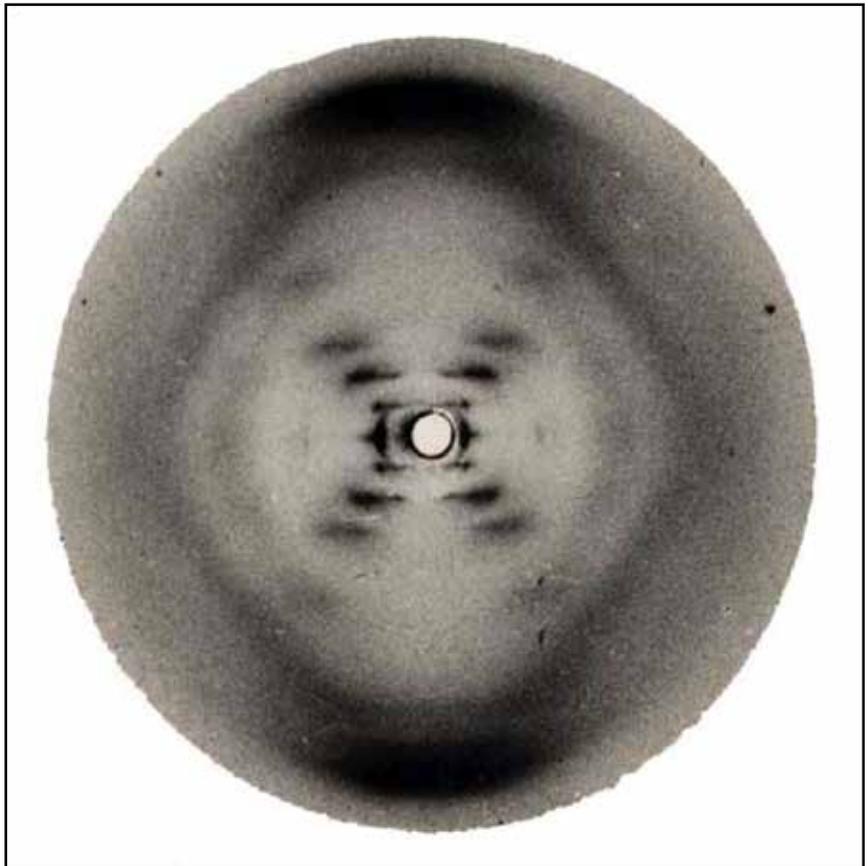


Figura 23: La ahora famosa "Foto 51" con el patrón de difracción de rayos-X de la forma B fuertemente hidratada (92% de humedad) de Na-ADN. La foto fue tomada por Franklin y Gosling el viernes 2 de Mayo de 1952 mediante una exposición prolongada (62 h) de una sola fibra de 50 μm de espesor (como el de un cabello). La distancia muestra-film fue de 15 mm y se empleó un colimador de 100 μm de diámetro.

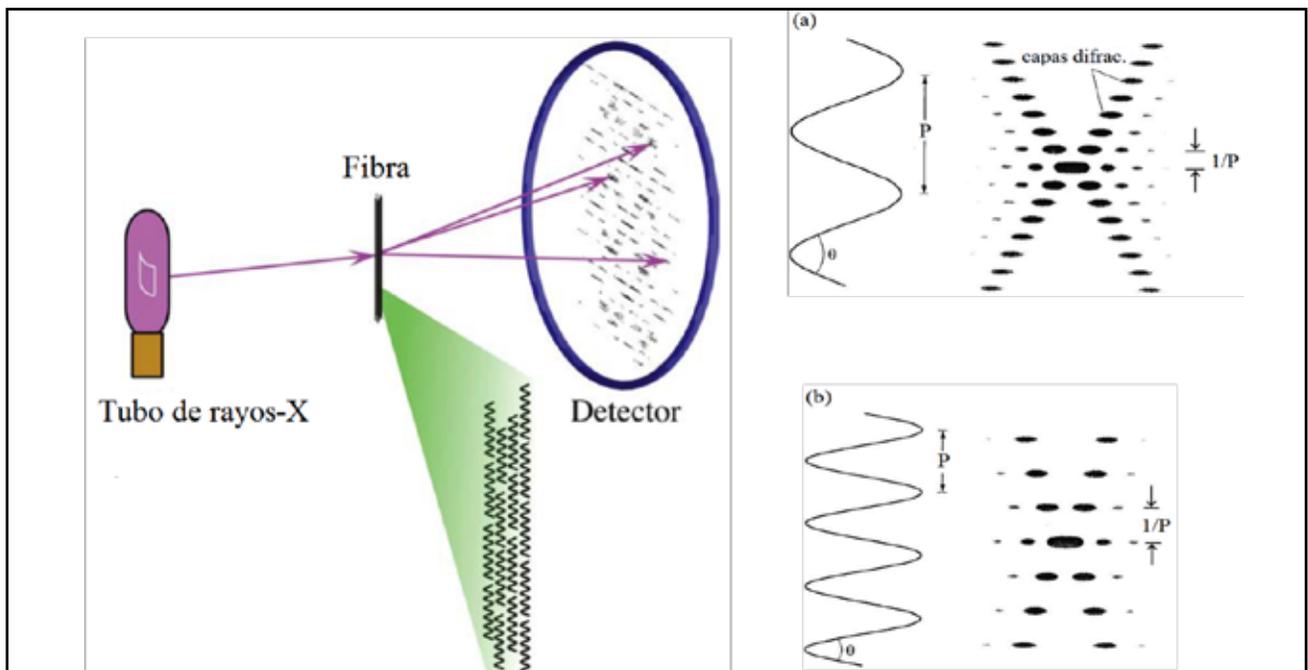


Figura 24: Izquierda: arreglo experimental para difracción de rayos-X en fibras de DNA-B. Derecha: relación recíproca entre el paso de hélices y sus correspondientes patrones de difracción.

al de moléculas de ADN alineadas pero desordenadas entre sí (ver Secciones 2.1 y 2.5 y Fig. 24).

Para una hélice continua aislada, la amplitud F_n de dispersión de rayos-X (factor de estructura) de la n -ésima capa (ver Fig. 24) viene dada por (Cochran, Crick & Vand, 1952):

$$F_n = J_n(2\pi kR) \exp[in(\psi + \pi / 2)],$$

donde $J_n(x)$ es la función de Bessel (ubicadas en la solución de problemas físico-matemáticos con simetría cilíndrica) de orden n , R es el radio de la hélice, y k y ψ son la coordenada radial y acimutal de una posición en el espacio recíproco (de difracción). Las funciones de Bessel de los órdenes más bajos se indican en la Fig. 25.

Así, la intensidad de difracción de una hélice aislada con una densidad lineal de electrones uniforme resulta proporcional a $J_n^2(x)$. La Fig. 26 muestra el patrón de difracción de la forma B del ADN y su interpretación teórica.

En la Fig. 26, el ángulo de la X con el ecuador es igual al ángulo que forma la hélice con el eje de la misma. Del patrón resulta $P=34 \text{ \AA}$, $p=3.4 \text{ \AA}$ y $R=10 \text{ \AA}$. La ausencia de la reflexión en la cuarta capa sugiere la presencia de una segunda hélice idéntica desplazada en $3/8P$ a lo largo del eje que produce efectos de interferencia destructiva (extinciones sistemáticas) en las capas con $n = 4, 12, 20$, etc.

Watson y Crick tenían ahora valiosas piezas de información experimental, cruciales para la elaboración de su modelo para la forma B del ADN:

- a) El polímero ADN se encuentra arreglado en forma de hélices.
- b) Los fosfatos se encuentran en el

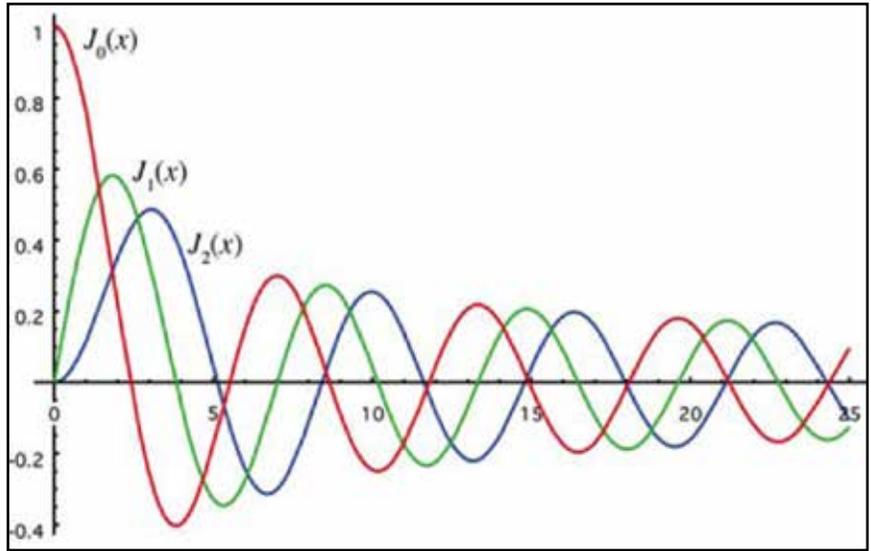


Figura 25: Primeras tres funciones de Bessel $J_n(x)$.

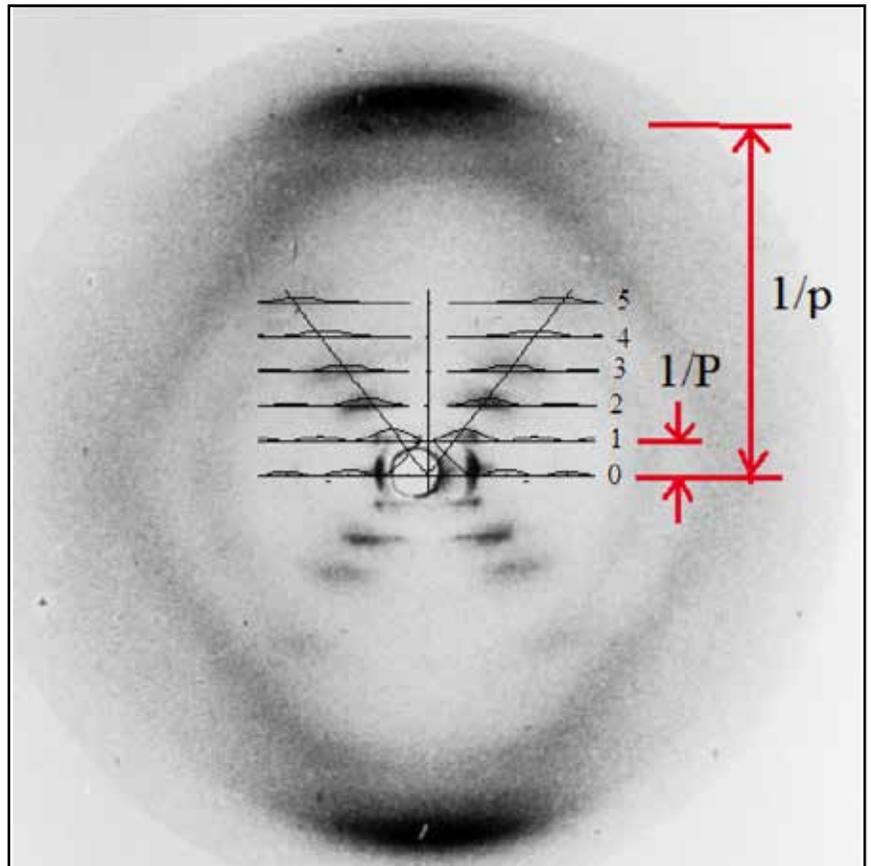
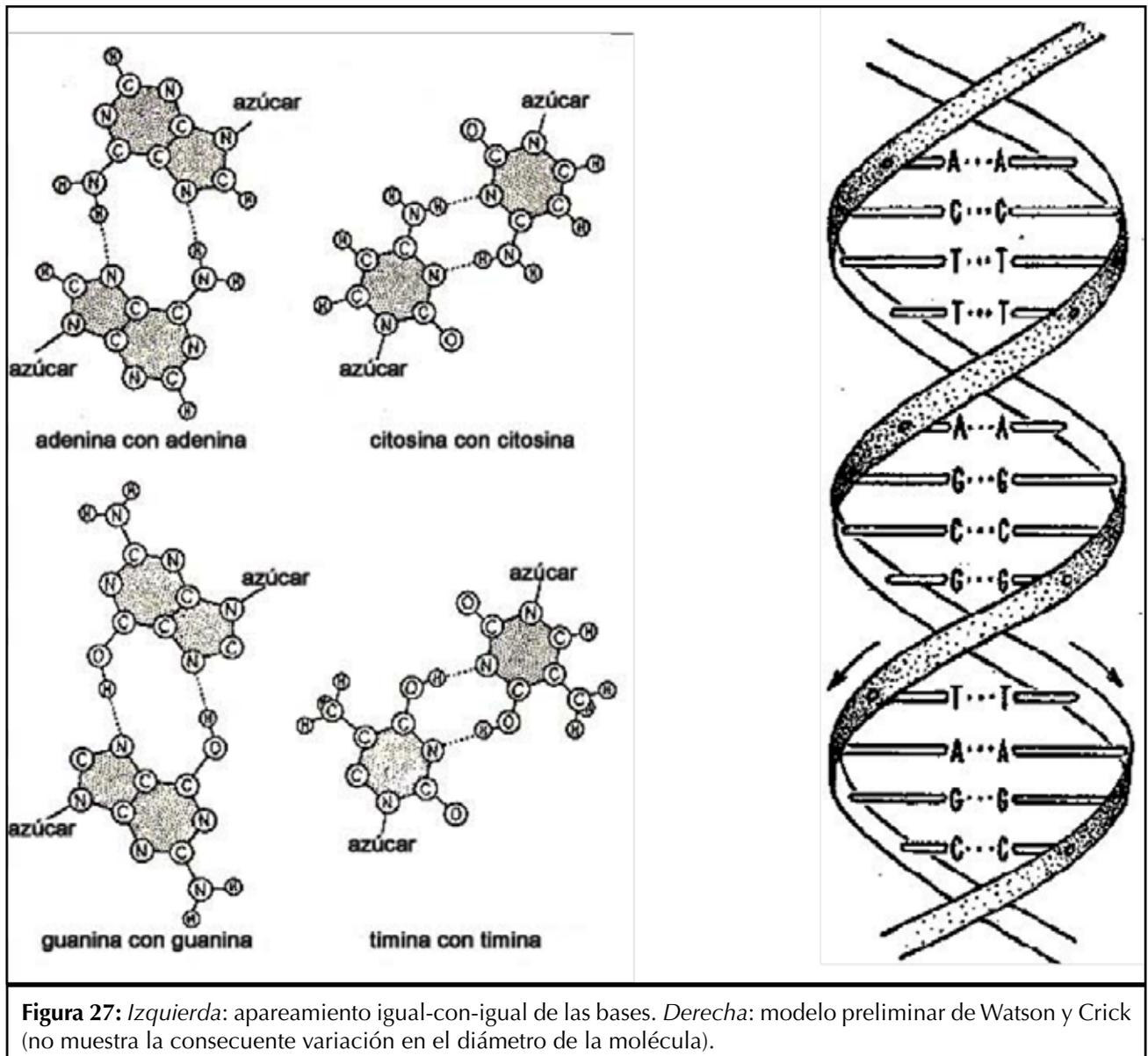


Figura 26: Interpretación de la Foto 51 de Franklin en términos de la intensidad de difracción calculada, correspondiente a una hélice aislada de paso P y con una densidad lineal de electrones constante. La intensa difracción meridional que se observa a alto ángulo se debe a la fuerte reflexión por parte de las bases nitrogenadas, apiladas con una separación uniforme p entre ellas.

exterior de la hélice a unos 10 \AA c) Las bases se disponen hacia el interior de la hélice, son paralelas

- y uniformemente separadas en 3.4 Å entre sí (como una pila de platos).
- d) El paso de la hélice es de unos 34 Å y, por lo tanto, comprende unos 10 nucleótidos por vuelta.
- e) Haciendo la suposición razonable que la forma-A cristalina del ADN tenía la misma conformación (topología) básica que la forma-B más hidratada, entonces el grupo espacial C2 determinado por Franklin para el cristal sugirió claramente a Crick una característica estructural fundamental para el ADN: debe tratarse de dos hélices enrolladas alrededor de un eje común con sus marcos de fosfato-ribosa polimerizados aproximadamente relacionados entre sí por un eje doble perpendicular al eje de la molécula. Consecuentemente, el par de hélices tienen sus respectivos esqueletos moleculares corriendo en *direcciones opuestas*, una en la dirección 3'→5' de los carbonos del azúcar, la otra en la orientación 5'→3' (ver Fig. 7).
- f) Las dos hélices están desplazadas entre sí en 3/8 del paso común *P*.
- g) Para la conformación 3-D de los nucleótidos aislados, disponían de la estructura cristalográfica determinada en 1949 por S. Furberg del Birkbeck's College de Londres (Furberg, 1950). Este trabajo muestra la importante característica molecular que las bases son prácticamente *perpendiculares* al plano medio del azúcar ribosa, contrariamente a la conclusión derivada por Astbury, a partir de difracción de rayos-X en fibras de ADN, que dichos planos eran *paralelos* entre sí.



2.11. ARREGLO DE LAS BASES NITROGENADAS

Para completar el modelo restaba determinar el arreglo de las bases. Entendiendo que las bases que se proyectaban hacia el centro desde los esqueletos helicoidales a lados opuestos del eje sólo pueden estar vinculadas a través de puentes de hidrógeno, Watson comenzó a aparear las cuatro bases en todas las combinaciones posibles. Notó a partir de modelos moleculares que las bases igual-con-igual se aparean mediante un par de puentes de hidrógeno (ver Fig. 27) y propuso un modelo estructural para el ADN y un mecanismo para su replicación. Sin embargo, el tamaño de las asociaciones diméricas de bases variaba grandemente en tamaño, hecho que se reflejaría en un arrollamiento ci-

lindrico con protuberancias y adelgazamientos (como ocurre con una pila de monedas de diferentes valores). Esto contrariaba la regularidad observada en la Foto 51 de Franklin, que implicaba un enrollamiento cilíndrico con un diámetro relativamente constante.

Una circunstancia fortuita por un lado descalificaría su modelo, mientras que por el otro indicaría el camino para encontrar el apareamiento correcto de las bases. En un escritorio de la oficina 103 que ocupaban Crick y Watson estaba Jerry Donohue, un competente cristalógrafo que había sido estudiante graduado de Pauling en Caltech y se encontraba realizando un post-doctorado en el Cavendish. Donohue le hizo notar a Watson que los modelos moleculares que estaba usando para

las bases timina y guanina (tomados del libro de J. N. Davidson sobre *The Biochemistry of the Nucleic Acids*), esto es las formas *enólicas* (ver Fig. 27), eran incorrectos y le sugirió el empleo de las formas *cetónicas* (ver Fig. 28) que liberaban un oxígeno para actuar como aceptor de un puente de hidrógeno adicional.

Con esta nueva información, y sin esperar que el taller del Cavendish completara los modelos metálicos en escala de las bases A, T, C y G, a mediados de Febrero de 1953 Watson retomó el modelado del ADN empleando representaciones moleculares recortadas en cartón. Luego de intentos infructuosos asociando bases igual-con-igual, logró el posicionamiento correcto de las bases opuestas vinculadas a través de enlaces de hidrógeno optimizados que estabilizan la estructura de doble hélice (ver Fig. 29). Otros apareamientos de bases tienden a desestabilizar dicha estructura.

2.12. REGLA DE CHARGAFF A=T Y G=C EXPLICADA. COPIADO DE LA INFORMACIÓN GENÉTICA

El aspecto más importante de la asociación en pares de las bases es que sólo ciertos pares pueden formar parte de una doble hélice de diámetro uniforme. Un miembro del par debe ser una base de mayor tamaño purina y, complementariamente, la otra la más pequeña pirimidina. Si (como en el frustrado modelo previo de Watson y Crick) el par consistiera de dos purinas, la hélice mostraría allí un ensanchamiento; si consistiera en dos pirimidinas, la hélice tendría un estrechamiento. La optimización de los enlaces de hidrógeno llevaría a una restricción adicional: los únicos pares de bases posibles son

Adenina (A) con Timina (T)

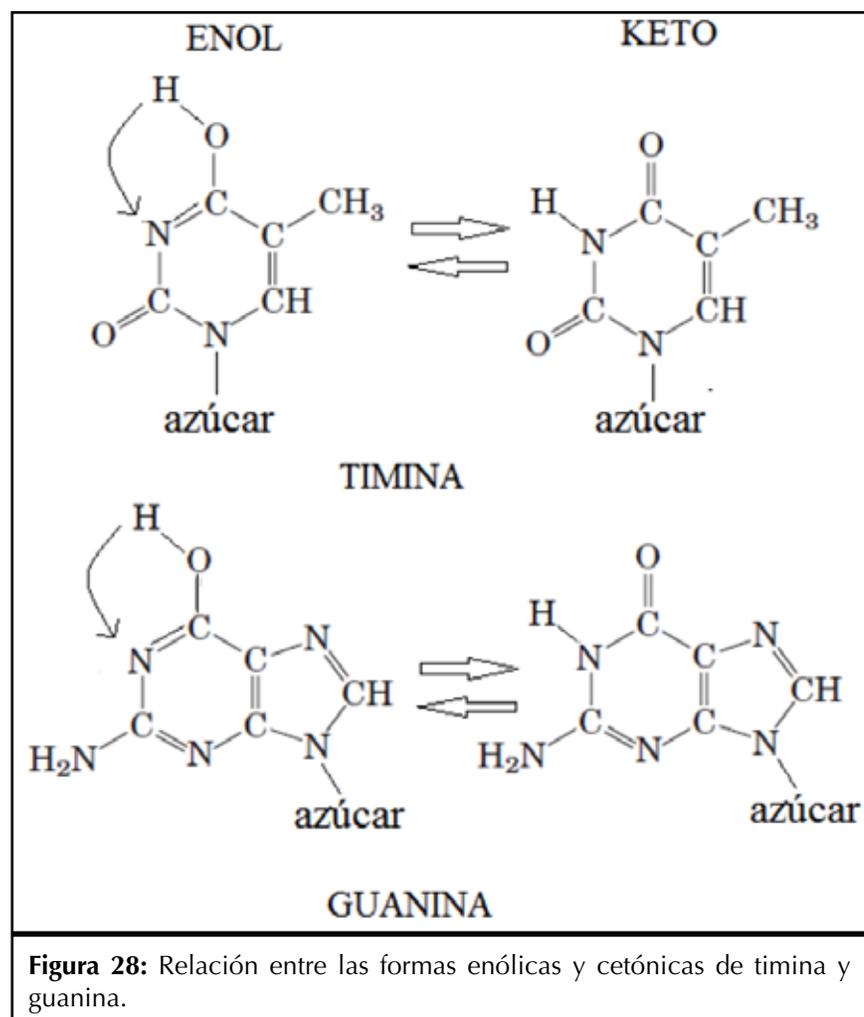


Figura 28: Relación entre las formas enólicas y cetónicas de timina y guanina.

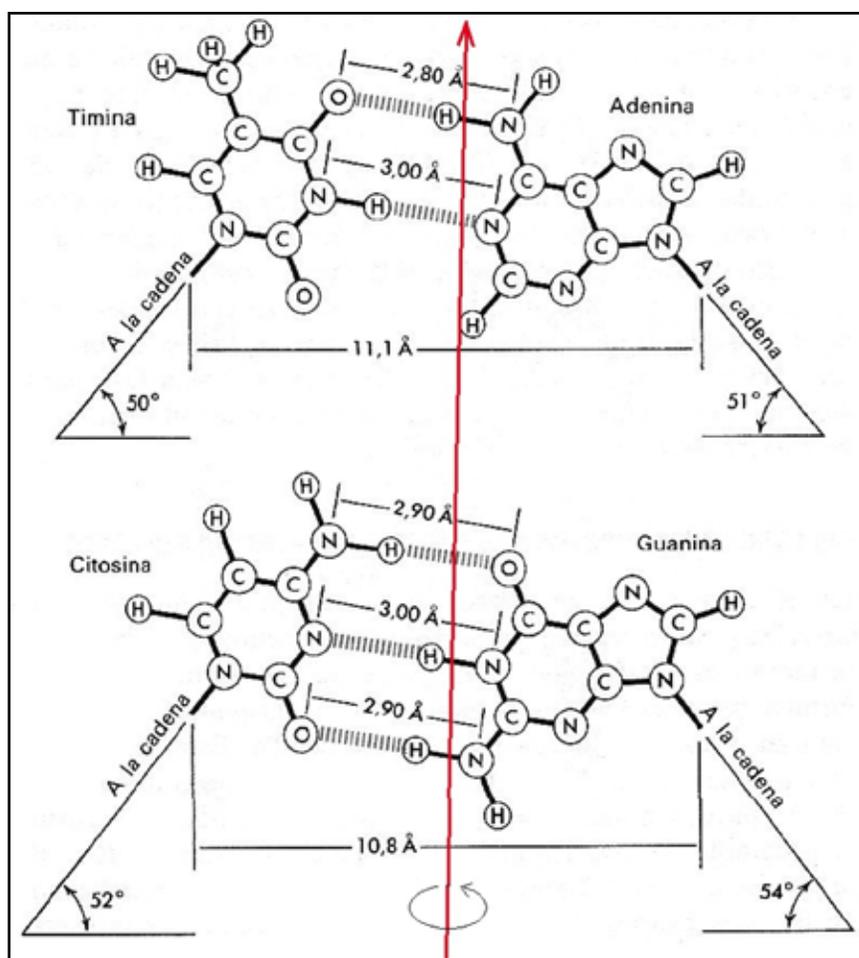


Figura 29: Apareamiento optimizado de las bases nitrogenadas A=T y G=C vía puentes de hidrógeno (Watson et al., 2006). El puente (guanina) N-H...O=C(citosina) no fue tenido en cuenta en el modelo original de Watson y Crick. Notar que el apareamiento confiere al ADN una serie de pseudo-ejes dobles (o ejes diádicos) de simetría (línea en rojo), pasantes por el centro de cada par de bases y perpendiculares al eje común de las hélices.

Guanina (G) con Citosina (C)

Como un bono inesperado, esta propiedad estructural explicaba un enigmático resultado experimental, la llamada *regla de Chargaff*. A pesar que el porcentaje de las bases

nitrogenadas variaban ampliamente de una especie a otra, sin embargo, las relaciones molares A/T y G/C eran siempre muy próximas a uno, tal como lo sugiere la tabla siguiente (adaptada de Chargaff et al., 1949).

Fuente de ADN	Adenina (A)	Timina (T)	Guanina (G)	Citosina (C)
Timo de cabra	1.7	1.6	1.2	1.0
Bazo de vaca	1.6	1.5	1.3	1.0
Levadura	1.8	1.9	1.0	1.0
Bacilo de la tuberculosis	1.1	1.0	2.6	2.4

¡Todas las piezas del rompe-ca-bezas caían ahora maravillosamente en su lugar! La dupla pudo entonces completar rápidamente su modelo 3-D (ver Fig. 30) y ser los primeros en admirar la elegancia con que la Naturaleza había diseñado la arquitectura molecular del código genético. Ellos propusieron que la molécula de ADN toma la forma de una doble hélice dextrógira (como la espiral de un tirabuzón común) que recuerda una escalera algo retorcida a lo largo de su extensión. Las barandas de la escalera están hechas de grupos químicos fosfato y azúcar deoxirribosa ligados covalentemente entre sí y dispuestos de manera alternada para formar una estructura polimérica. Los peldaños están compuestos de un par de bases nitrogenadas (que se proyectan hacia el eje de la hélice desde sendos azúcares sobre hélices opuestas) enlazadas entre sí por puentes de hidrógeno.

Era el sábado 28 de Febrero de 1953. De acuerdo con Watson (Watson, 1968, 1981), a la hora del almuerzo Crick entró exultante en "The Eagle" (una 'pub' cercana al laboratorio) y anunció a quien pudiera oírle que habían encontrado el *secreto de la Vida*.

Convencidos de la corrección de tan atractivo modelo hipotético y sin pruebas experimentales propias que lo sustenten, Watson y Crick escriben rápidamente el 2 de Abril de 1953 los resultados en un sucinto artículo titulado "A Structure for Deoxyribose Nucleic Acid" ("Una Estructura para el Ácido Deoxi Ribonucleico") y lo envían para su publicación a la prestigiosa revista Nature (Watson & Crick, 1953a). No reconocen el empleo de información experimental clave producida por Franklin o Wilkins mas allá de declarar el haber sido estimulados por el conocimiento de la 'naturaleza general de resultados experi-

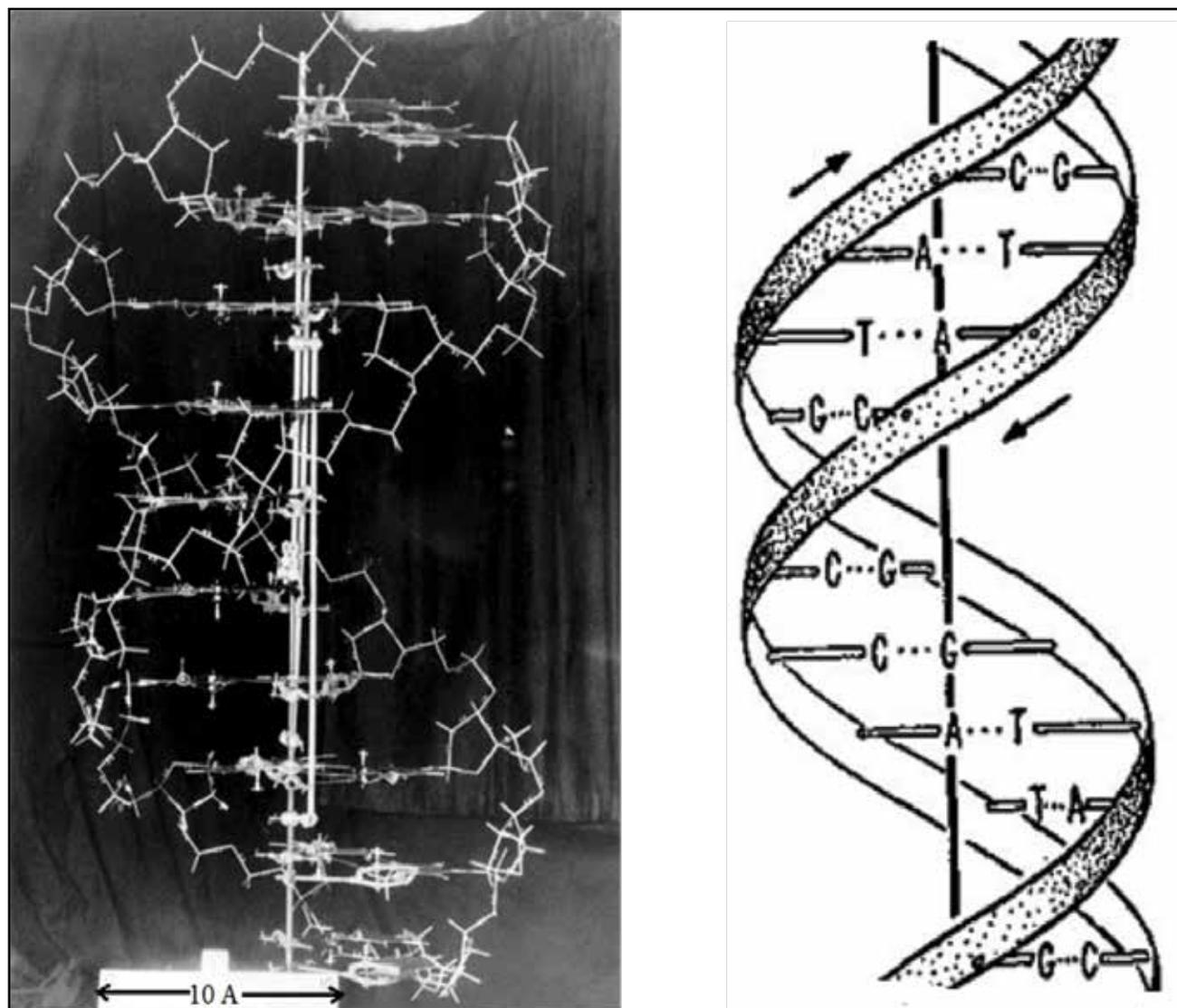


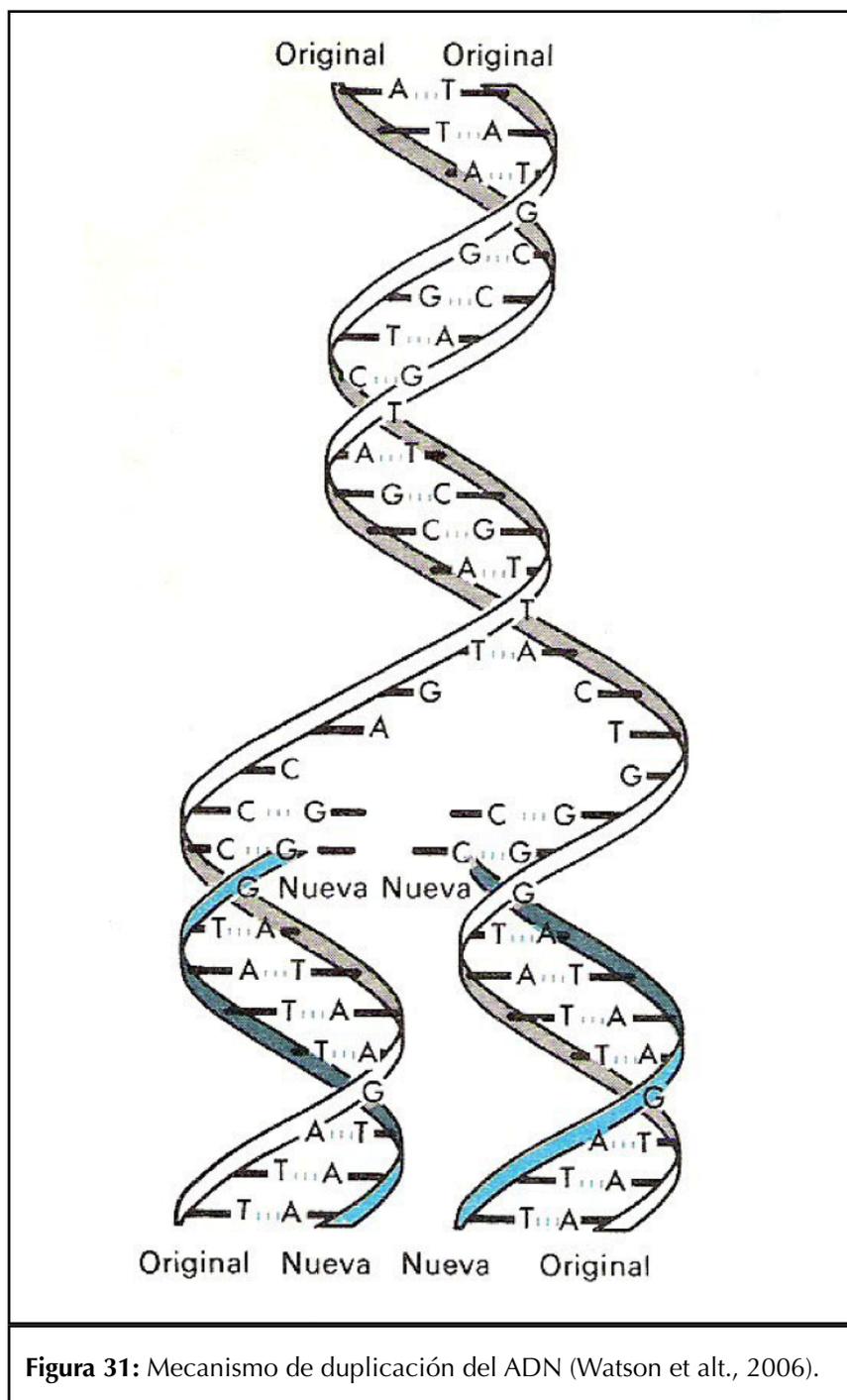
Figura 30: *Izquierda:* Modelo original en escala de Watson y Crick de la molécula de ADN-B (hecho de alambres y chapas). La tira horizontal al pie del modelo indica la magnificación del mismo y corresponde a una longitud de 10 Å. El modelo se extiende verticalmente un paso de la hélice (unos 34 Å). *Derecha:* esquema original del ADN (adaptado de Watson & Crick, 1953).

mentales e ideas no-publicadas de Wilkins, Franklin y sus colegas del King's College de Londres'.

Mediante un arreglo entre los directores del Cavendish (Bragg) y del grupo del King's College (Randall) con el Editor de Nature, se acordó en que los resultados de Wilkins (Wilkins, Stokes & Wilson, 1953) y Franklin (Franklin & Gosling, 1953c) se publicaran separadamente en el mismo volumen (Nature, Vol. 171, April 1953), siguiendo el artículo de Watson y Crick.

La estructura de doble hélice con apareamiento específico entre bases propuesta tendría una implicancia aún más extraordinaria en desentrañar el mecanismo molecular por el cual durante millones de años los organismos se desarrollaban y reproducían. Tan extraordinaria que Watson no se atrevió a explicitarlo en el primer artículo en Nature, a pesar de la opinión en contrario de Crick (Crick, 1974, 1989). Los autores alcanzaron una solución de compromiso que reza: "No ha escapado a nuestra consideración que

el apareamiento específico postulado sugiere inmediatamente un posible mecanismo de copiado de la información genética". Los autores dejaron rápidamente de lado esta hesitación y poco después publicaron las importantes consecuencias genéticas implicadas por su modelo (Watson & Crick, 1953b). La Fig. 31 muestra (esquemáticamente) el mecanismo propuesto de duplicación del ADN.



Fisiología o Medicina “por su descubrimiento relacionado con la estructura molecular de ácidos nucleicos y su importancia para la transferencia de información en la materia viva”. En sus respectivas conferencias Nobel, Watson, Crick y Wilkins realizaron 83, 23 y 24 citas, ninguna de Franklin. Sólo Wilkins incluyó a ella en sus reconocimientos (http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/1962/).

Existe la opinión generalizada que el Premio Nobel debió haberse otorgado también a Rosalind Franklin, en razón que sus datos experimentales fueron una clave muy importante en la resolución de la estructura del ADN. Sin embargo, Franklin falleció de cáncer en 1958 y el Premio Nobel no se otorga *post-mortem*; así que el Premio de 1962 estaba fuera de cuestión. Pero ella pudo haber sido nominada en vida. Los archivos Nobel que, entre otra información, contienen las nominaciones relacionadas con los galardones se mantienen cerrados durante un cierto tiempo después que un premio particular ha sido otorgado. Así, en 2008 fue posible el encontrar si Rosalind Franklin fue alguna vez nominada para el Premio Nobel en relación con sus trabajos sobre el ADN. La respuesta es que nadie la nominó ni para el Nobel en Fisiología o Medicina o el de Química (http://nobelprize.org/educational_games/medicine/dna_double_helix/readmore.html).

2.13. EPÍLOGO

Favorecidos por desintelencias entre Franklin y Wilkins del grupo del King's College de Londres, el acceso a la excelente información experimental producida por Franklin y Gosling, la momentánea desorientación de Pauling en Caltech en la determinación de la estructura del ADN, y algunas circunstancias for-

tuitas, Crick y Watson estuvieron en condiciones de ‘tomar un atajo’ al problema, proponiendo un modelo molecular que resultó, esencialmente, correcto. De esta manera ganaron, en una suerte de ‘sprint final’, la no-declarada carrera por la estructura de la molécula biológica más importante y así la inmortalidad científica. En 1962 Watson, Crick y Wilkins recibieron el Premio Nobel en

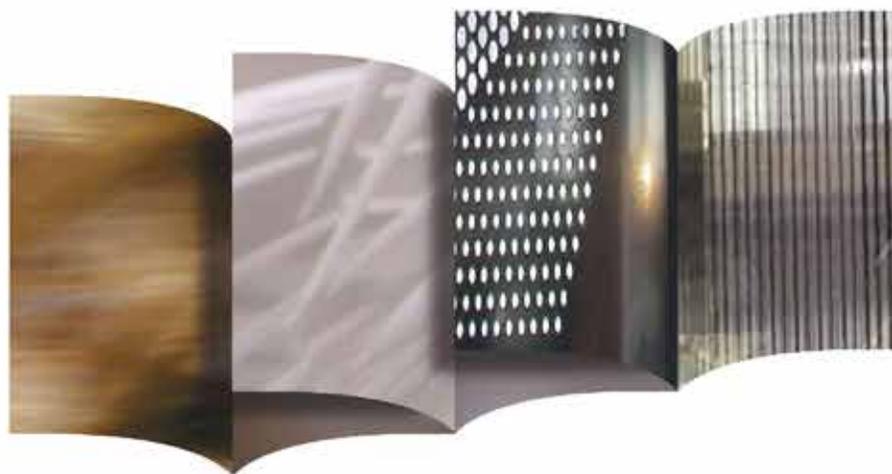
■ REFERENCIAS

- Astbury W.T. (1947) Nucleic Acids, Symposium of the Society for Experimental Biology, No. 1, Cambridge University Press, 66-76.
- Avery O.T., MacLeod C.M., McCarty M. (1944) Studies on the Chemical Nature of the Substance Inducing Transformation of Pneumococcal

- Types. Induction of Transformation by a Desoxyribonucleic Acid Fraction Isolated from Pneumococcus Type III. *Journal of Experimental Medicine* **79**, 137-157.
- Bragg W.L., Kendrew J.C., Perutz M. (1950) Polypeptide chain configuration in crystalline proteins. *Proc. Roy. Soc.* **A203**, 321-357.
- Chargaff E., Vischer E., Doninger R., Green C., Misani F. (1949) The composition of the desoxypentose nucleic acids of thymus and spleen. *J. Biol. Chem.* **177**, 405-416.
- Cochran W., Crick F.H.C., Vand V. (1952) The Structure of Synthetic Polypeptides. I. The Transform of Atoms on a Helix. *Acta Cryst.* **5**, 581-586.
- Crick F.H.C. (1974) The Double Helix: A Personal View. *Nature* **248**, 766-769.
- Crick F.H.C. (1989) *What Mad Pursuit. A Personal View of Scientific Discovery.* Penguin Books, England.
- Franklin R.E., Gosling R.G. (1953a) The Structure of Sodium Thymonucleate Fibres. I. The Influence of Water Content. *Acta Cryst.* **6**, 673-677.
- Franklin R.E., Gosling R.G. (1953b) The Structure of Sodium Thymonucleate Fibres. II. The Cylindrically Symmetrical Patterson Function. *Acta Cryst.* **6**, 678-685.
- Franklin R.E., Gosling R.G. (1953c) Molecular Configuration in Sodium Thymonucleate. *Nature* **171**, 740-741.
- Furberg S. (1950) An X-ray Study of the Stereochemistry of the Nucleosides. *Acta Chem. Scand.* **4**, 751-761.
- Griffith F. (1928) The Significance of Pneumococcal Types. *Journal of Hygiene (Cambridge University Press)* **27**, 113-159.
- Guttman B., Griffiths A., Suzuki D., Cullis T. (2004) *Genetics*, Oneworld Publications, Oxford.
- Hershey A., Chase M. (1952) Independent Functions of Viral Protein and Nucleic Acid in Growth of Bacteriophage. *Journal of General Physiology.* **36**, 39-56.
- Lehninger A., Nelson D.L., Cox M.M. (2005) *Lehninger Principles of Biochemistry.* Freeman Publisher, 4th Edition.
- Lipson H., Beevers C.A. (1936) An improved numerical method of two-dimensional Fourier synthesis for crystals. *Proc. Phys. Soc.* **48**, 772-780.
- Pauling L. (1929) The principles determining the structure of complex ionic crystals. *J. Am. Chem. Soc.* **51**, 1010-1026.
- Pauling L., Corey R.B., Branson H.R. (1951) The Structure of Proteins: Two Hydrogen-Bonded Helical Configurations of the Polypeptide Chain. *Proc. Nat. Acad. Sci. Wash.*, **37**, 205-211.
- Pauling L., Corey R.B. (1953) A proposed structure for the nucleic acids. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **39**, 84-97.
- Pierce B.A. (2007) *Genetics: A Conceptual Approach.* Freeman Publisher, 3rd Edition.
- Schrödinger E. (1946) *What is Life? The Physical Aspect of Living Cell.* Cambridge University Press; MacMillan Company, New York.
- Vischer E., Zamenhof S., Chargaff E. (1949) Microbial Nucleic Acids: the Desoxypentose Nucleic Acid of Avian Tubercle Bacilli and Yeast. *J. Biol. Chem.* **177**, 429-438.
- Warren B.E. (1990) *X-ray Diffraction.* Dover Publications, New York.
- Watson J.D. (1968, 1981) *The Double Helix: A Personal Account of the Discovery of the Structure of DNA.* Athenaeum, New York (1968); Weidenfeld and Nicholson, London (1981).
- Watson J.D., Baker T.A., Bell S.P., Gann A., Levine M., Losick R. (2006) *Biología Molecular del Gen.* Editorial Médica Panamericana, Quinta Edición.
- Watson J.D., Crick F.H.C. (1953a) A Structure for Deoxyribose Nucleic Acid. *Nature* **171**, 737-738.
- Watson J.D., Crick F.H.C. (1953b) Genetical Implications of the Structure of Deoxyribonucleic Acid. *Nature* **171**, 964-967.
- Wilkins M. (2003) *The Third Man of the Double Helix*, Oxford University Press Inc., New York, USA.
- Wilkins M.H.F., Gosling R.G., Seeds W.E. (1951) Physics Studies of Nucleic Acids. *Nature*, London **167**, 759-760.
- Wilkins M.H.F., Stokes A.R., Wilson H.R. (1953) Molecular Structure of Deoxypentose Nucleic Acid. *Nature*, London **171**, 738-740.

Otras referencias, reivindicatorias de la personalidad y labor científica de R. Franklin:

- Klug A. (1974) Rosalind Franklin and the Double Helix. *Nature* **248**, 787-788.
- Maddox B. (2003) *Rosalind Franklin, the Dark Lady of DNA.* Harper Collins Publishers.
- Sayre A. (1975) *Rosalind Franklin and DNA.* Norton & Company, New York.



Desarrollo y gestión de proyectos científicos y tecnológicos innovadores

FUNINTEC es una organización sin fines de lucro creada por la Universidad de San Martín cuyo objetivo es promover y alentar la investigación, el desarrollo tecnológico y la transferencia de conocimientos a los sectores público y privado, sus empresas y en particular a las PyMES.

Dentro de los alcances previstos por la Ley de Innovación Tecnológica, funciona como vínculo entre el sistema científico tecnológico y el sector productivo.

CONTACTO:
www.funintec.org.ar

Fundación
Innovación
y Tecnología

FUNINTEC

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN



El 98 por ciento de los doctores formados por el CONICET tiene empleo

Según un informe dado a conocer por este organismo científico acerca de la inserción de doctores, sólo un 1 por ciento de estos ex-becarios no tiene trabajo o no poseen ocupación declarada y un 10 por ciento posee remuneraciones inferiores a un estipendio de una beca doctoral.

Asimismo, proyecta que el 89 por ciento de los encuestados tiene una situación favorable en su actividad profesional, pero sobre todo asegura que más del 98 por ciento de los científicos salidos del CONICET consigue trabajo.

Los datos surgidos del estudio "Análisis de la inserción laboral de los ex-becarios Doctorales financiados por CONICET", realizado por la Gerencia de Recursos Humanos del organismo, involucró 934 casos sobre una población de 6.080 ex-becarios entre los años 1998 y el 2011.

Al respecto, en el mismo se considera que del número de ex-becarios consultados, el 52 por ciento (485 casos), continúa en el CONICET en la Carrera del Investigador Científico y Tecnológico.

De los que no ingresaron en el organismo pero trabajan en el país, sobre 341 casos, el 48 por ciento se encuentra empleado en universidades de gestión pública y un 5 por ciento en privadas; el 18 por ciento en empresas, un 6 por ciento en organismos de Ciencia y Técnica (CyT), un 12 por ciento en la gestión pública y el resto en instituciones y organismos del Estado.

En tanto, en el extranjero, sobre 94 casos, el 90 por ciento trabaja en universidades, el 7 por ciento en empresas y el 2 por ciento es autónomo.

El mismo informe traduce que la demanda del sector privado sobre la

incorporación de doctores no es aún la esperada, pero está creciendo. La inserción en el Estado, si se suma a las universidades nacionales y ministerios, se constituye en el mayor ámbito de actividad.

Frente a ello, a los fines de avanzar en la inserción en el ámbito publico-privado el CONICET realiza actividades políticas de articulación con otros organismos de CyT, es decir, universidades, empresas, a través de la Unión Industrial Argentina (UIA), y en particular con YPF que requiere personal altamente capacitado en diferentes áreas de investigación.

Desde el CONICET se espera que en la medida que la producción argentina requiera más innovación, crecerá la demanda de doctores. Para cuando llegue ese momento el país deberá tener los recursos humanos preparados para dar respuestas. Es por ello se piensa en doctores para el país y no solamente doctores para el CONICET.

Programa +VALOR.DOC

Sumar doctores al desarrollo del país

A través de esta iniciativa nacional, impulsada por el CONICET y organismos del Estado, se amplían las posibilidades de inserción laboral de profesionales con formación doctoral

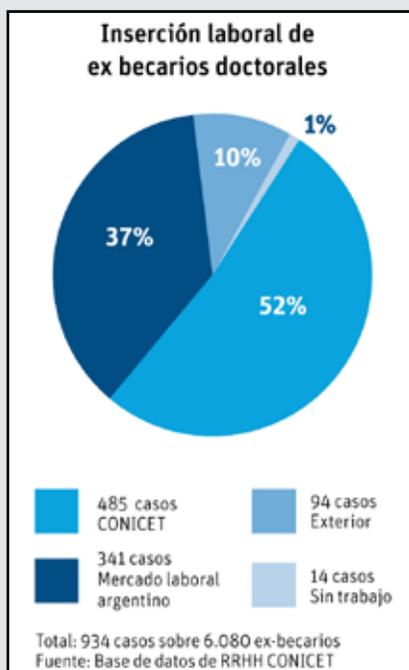
El programa +VALOR.DOC bajo el lema "Sumando Doctores al Desarrollo de la Argentina", busca vincular los recursos humanos con las necesidades y oportunidades de desarrollo del país y fomentar la incorporación de doctores a la estructura productiva, educativa, administrativa y de servicios.

A partir de una base de datos y herramientas informáticas, se aportan recursos humanos altamente calificados a la industria, los servicios y la gestión pública. Mediante una página Web, los doctores cargan sus curriculum vitae para que puedan contactarlos por perfil de formación y, de esta manera, generarse los vínculos necesarios.

Con el apoyo del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva, este programa tiene como objetivo reforzar las capacidades científico-tecnológicas de las empresas, potenciar la gestión y complementar las acciones de vinculación entre el sector que promueve el conocimiento y el productivo.

+VALOR.DOC es una propuesta interinstitucional que promueve y facilita la inserción laboral de doctores que por sus conocimientos impactan positivamente en la sociedad.

Para conocer más sobre el programa www.masVALORDoc.conicet.gov.ar.



R. GANS Y T. ISNARDI O EL CONFLICTO ENTRE DOCENTES E INVESTIGADORES DURANTE LA ETAPA FUNDACIONAL DEL INSTITUTO DE FÍSICA DE LA UNIVERSIDAD DE LA PLATA

Palabras clave: antecedentes del conflicto investigación-docencia, ciencia y docencia reproductivista.
Key words: first signals of the conflict between scientific research and teaching, science and repetitive lecturing.

El Instituto de Física de la Universidad Nacional de La Plata, con el paso de los años transformado en el Departamento de Física de la Facultad de Ingeniería y finalmente de la Facultad de Ciencias Exactas, tuvo su origen en la iniciativa de modernización de las universidades encarada a fines del siglo XIX. El trabajo fundacional fue orientado hacia el logro de niveles de excelencia existentes en las universidades e institutos europeos de la época. Sin embargo, por los motivos que pueden deducirse del material que analizaremos, tal objetivo fue paulatinamente desdibujándose a pesar de algunos intentos aislados resultantes de acciones individuales y no de políticas institucionales activas.

Osvaldo Civitarese

Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata.

osvaldo.civitarese@fisica.unlp.edu.ar

The scientific profile of the Institute of Physics of the University of La Plata, during the first twenty years of the twentieth century, was modeled after the traditional central European system that is as the supporting environment for research at leading and competitive levels. However, in the coming decades this profile was gradually transforming to a less competitive structure almost solely devoted to teaching. In this note, we analyze some of the reasons that may eventually be identified as the forces behind this transformation.

■ INTRODUCCIÓN.

El tradicional modelo universitario español, representado por colegios y facultades orientados principalmente hacia las humanidades, el derecho y la medicina, fue duramente cuestionado por los gobiernos modernizadores de fines del siglo XIX, particularmente los de D. F. Sarmiento y J. A. Roca (Luna, 1999), que apreciaron de manera francamente notable el papel que le correspondería al desarrollo científico-tecnológico en los años siguientes. Como ejemplo, podemos citar la

manifestación de principios formulada por el fundador de la Universidad Nacional de La Plata (Joaquín V. González) asignándole a esta casa de estudios un papel central en el desarrollo de nuevas tecnologías y conocimientos científicos, diferenciándola del modelo reproductivista imperante, por ejemplo, en otras universidades de la época (Buenos Aires y Córdoba).

Esta concepción de la universidad como ámbito generador de conocimientos y motor de transferencia hacia el medio (concepto re-

descubierto no hace mucho por las corrientes extensionistas) era absolutamente natural para, por ejemplo, las universidades europeas de primera línea y también para las más jóvenes universidades de América del Norte (Pyenson, 1985). La vinculación entre ciencia básica y desarrollo tecnológico y, por ende, económico fue un concepto clave en la vida universitaria mundial de fines del siglo XIX y comienzos del XX y la Argentina, notablemente, no fue ajena a esa concepción.

La gira de González por Eu-

ropa, y en gran medida también la estadía de Sarmiento en Estados Unidos, tuvieron como resultado la importación de un modelo de universidad centrado en el conocimiento científico y en el desarrollo de sus aplicaciones (Luna, 1999). Esta circunstancia, sumada a la incipiente diáspora de científicos en Europa, a la que no eran ajenos el racismo, el expansionismo y la discriminación social, (Krüger, 1911; Swinne, 1992) permitió a la Argentina captar un número importante de jóvenes investigadores, principalmente oriundos de Europa central, formados en el más alto nivel.

Centrales a esta construcción han sido las figuras de Emil Bose (Krüger, 1911) y Richard Gans (Swinne, 1992) quienes moldearon al Instituto de Física de la Universidad de La Plata a imagen de una institución europea competitiva y seria. Lamentablemente, por las razones que expondré a continuación, esta impronta fundacional se perdió y durante décadas (hasta bien avanzados los años 1960) el Instituto de Física siguió un camino errático, separado de las corrientes dominantes en la investigación en física.

Todo lo que sigue es, claro está, una muy limitada interpretación personal (la mía) de los hechos consignados en cartas y documentos de la época. Ciertamente una investigación profesional, desde el punto de vista histórico, aportará una visión más general de la época y de los problemas que motivan esta nota. Mientras tanto, hasta que tal investigación se materialice, sugiero se tomen los comentarios siguientes como elementos muy limitados en torno a la cuestión central: ¿por qué el Instituto de Física de La Plata no se constituyó en un centro de referencia mundial tal como se hubiera podido esperar en sus orígenes?

Respecto a las fuentes consultadas, el lector interesado puede remitirse a las mencionadas en la sección bibliográfica de esta nota.

■ EMIL BOSE.

Emil H. Bose (Bremen 1874, La Plata 1911) fue un físico alemán, cursó sus estudios universitarios en la Universidad de Göttingen, a partir de 1896, y se doctoró en dicha Universidad en 1898. Su tesis doctoral fue dirigida por W. Nerst (quien posteriormente ganó el premio Nobel de Química, edición 1920, por sus investigaciones sobre el comportamiento del calor específico a bajas temperaturas). Bose se distinguió por sus investigaciones sobre la termodinámica de mezclas binarias y por el estudio del comportamiento térmico de las componentes ionizadas de una reacción química. Entre 1900 y 1905 estudió el origen microscópico de las corrientes electroquímicas. Con anterioridad a su llegada a La Plata (1909) se desempeñó como editor asociado del *Physikalische Zeitschrift*. Durante los años 1900-1909 E. Bose publicó unos treinta y cinco trabajos de investigación.

La actividad de Emil Bose como director del Instituto de Física de la Universidad de La Plata, desde su contratación luego de la misión europea de J. V. González (Bibiloni, 2001) muestra su preocupación por el nivel de formación de los estudiantes, por la falta de continuidad de las políticas de apoyo a la investigación y por el desconocimiento existente en el medio local referido al papel de la investigación científica básica en el desarrollo de emprendimientos industriales (tal el caso de los primeros desarrollos en la industria del frío, que en la primera década del siglo XX era un emprendimiento tecnológico de punta, según los estándares actuales).

Una prueba de la posición de Bose respecto a la necesidad de un apoyo continuado a las actividades de investigación es su carta del 20 de octubre de 1909, pocos meses después de iniciar su corta y trágicamente interrumpida gestión como director del Instituto (Bose murió en 1911 víctima de tifus), dirigida al Presidente de la Universidad donde enumera las dificultades generadas por la falta de bibliografía, equipamiento y personal de apoyo. El texto completo de la carta se puede consultar en un trabajo previo sobre este mismo tema (Civitarese, 2001) y un párrafo destacado de la misma es el siguiente *"En Alemania, como en Inglaterra, Francia y los Estados Unidos, es una cosa bien conocida que una enseñanza verdaderamente universitaria de las ciencias exactas es imposible sin trabajos de investigación de los profesores de dichas materias, necesitando esto de un conocimiento perfecto de las publicaciones científicas, tanto anteriores como últimas de la materia, se da un valor enorme a la perfección de la biblioteca de cada laboratorio, evitando de esta manera que se hagan investigaciones inútiles y obteniendo en esta forma una enseñanza siempre dirigida a los puntos de vista más modernos"*. Sorprende la actualidad del mensaje, ya que de esta manera Bose expresa con claridad uno de los pilares básicos de la investigación científica en su relación con la docencia universitaria. Durante su corta gestión (1909-1911) Bose definió las líneas básicas de investigación en el Instituto de Física de La Plata y, junto a su esposa, M. Bose, elaboró un currículum adecuado a la época siguiendo el modelo europeo de formación de físicos.

■ RICHARD GANS

Richard Gans (Hambourg 1880, City Bell 1954), físico alemán y pro-

fesor en las universidades de Tübingen y Strassbourg, fue el sucesor de Emil Bose en la dirección del Instituto de Física de La Plata (luego del interinato de K. Simon), cargo que ocupó entre 1912 y 1925. La personalidad científica de Gans ha sido analizada en detalle en los textos de Swinne (Swinne, 1992) y de Galles (Galles, 2001) y por otros autores (Pyenson, 1985). Tuvo un papel preponderante en la organización del Instituto de Física como centro de investigación, fue un pionero en temas de investigación relacionados con la cuantificación del momento angular, el magnetismo a bajas temperaturas, la dispersión de la luz en medios coloidales y su relación con la estructura molecular de dichos medios. Expresó en la docencia su experiencia como investigador, dictando los primeros cursos de la naciente mecánica cuántica, dirigió las tesis y trabajos de seminario de destacados investigadores (W. Schroer y C. G. Bollini entre otros) e impulsó la por entonces desconocida figura de investigador con dedicación exclusiva. Se ocupó, entre otras cosas, de la confección de un catálogo de las revistas de ciencias exactas, naturales e ingenierías existentes en bibliotecas de Argentina. Mantuvo correspondencia con Gerlach y con Debye, recibió el apoyo explícito de A. Einstein, al presentarse como candidato a un cargo de Profesor en Königsberg, quien lo definió como "uno de los más prominentes y talentosos físicos". Einstein también dice de él, refiriéndose a las condiciones de trabajo en Argentina, "Bajo circunstancias muy difíciles y en un entorno totalmente ignorante de su trabajo, Gans ha trabajado teórica y experimentalmente en temas de avanzada en magnetismos" (Swinne, 1992). Entre 1913 y 1918 la producción científica de Gans consiste en unas veinte publicaciones y tres notas sobre la "teoría de cuantos" y entre 1918 y 1925 Gans

consolida su posición como experto en temas de magnetismo y en la cuantificación del momento angular. Esta actividad, un tanto insólita para un profesor universitario de la época, acompañada de tareas de gestión, redacción de las memorias del Instituto, dirección de alumnos y dictado de cursos es ciertamente más afín a la moderna concepción de un docente-investigador con dedicación a tiempo completo. Ésta fue una de las iniciativas de Gans (contratar profesores de tiempo completo para el dictado de materias y para la realización de tareas de investigación) que más rechazo generó en el ambiente universitario de la época, más enfocado hacia la docencia.

La situación de la Universidad de La Plata, en relación a la investigación científica, está documentada en la correspondencia que mantuvo Gans con Gerlach (Swinne, 1992). En sus cartas consigna que el presupuesto del Instituto de Física de La Plata igualaba, en 1912, al presupuesto del Instituto de Física de la Universidad de Berlín (unos 100.000 pesos de la época), pero que "de los 100 aparatos incluidos en el catálogo de instrumental del Instituto, adquiridos en gestiones anteriores a 1909 (gestión Ricaldoni) ninguno funciona". Resulta también llamativa la referencia que Gans hace a la actitud de sus colegas locales y de los alumnos, respecto a la dedicación a la investigación (nula por parte de los locales) y al empeño de los estudiantes (escaso), en sus propias palabras "al ritmo de trabajo con los estudiantes, a razón de una consulta mensual, a mi estudiante le llevaría unos 50 años terminar con su trabajo de tesis". Resulta claro entonces que los padecimientos de Gans tienen dos orígenes: a) su insistencia en trasladar al medio local los hábitos de trabajo adquiridos en Europa durante su etapa de formación

académica y b) la marcada diferencia entre su visión de la física como actividad de investigación básica y la visión de sus colegas, más relacionada con una muy limitada expresión docente. Los conflictos generados por estas concepciones distintas acompañaron a Gans durante sus dos estadías en La Plata (1912-1925; 1947-1951), como veremos a continuación.

■ OPINIONES OPUESTAS Y CONFLICTOS LOCALES

Los acontecimientos desarrollados durante los treinta años siguientes a la prematura muerte de Bose y a la llegada de Gans determinaron la orientación que adoptó el Instituto de Física hasta bien entrados los años 1960 (y en alguna medida aún hoy se pueden percibir rastros de aquellos conflictos).

Para situarnos en el clima de la época, vale la pena retrotraerse a las circunstancias sociales y políticas imperantes en los primeros veinte años del siglo XX. Por ese entonces, las primeras oleadas migratorias se habían consolidado y las aspiraciones sociales y metas educativas de los "nuevos" argentinos evolucionaron, preferentemente, hacia los modelos de la Europa central, instalando, entre los inmigrantes, metas más inmediatas que la subsistencia, centradas en la educación como medio de obtención de una mejor calidad de vida. Así, la universidad (como ámbito social) reprodujo la diversidad de orígenes aportada por la inmigración (Ogambide, 1963). Como podía esperarse, se produjo una muy clara diferenciación en las composiciones sociales de alumnos y profesores, en las facultades e institutos "tradicionales" y los nuevos. Las reacciones al modelo de Universidad científico-tecnológica (y por ende creativa) fueron variadas y no faltaron las muestras de franca hos-

tilidad hacia esos “nuevos modelos y ámbitos”

Para simplificar la naturaleza del conflicto (y antes de analizar algunos documentos de la época) es posible determinar dos posiciones opuestas: a) la concepción de la física como una herramienta subordinada a la formación de docentes especializados e ingenieros, en un esquema reproductivista sin aportes a la investigación básica y b) la concepción de la física como rama del conocimiento cuyo desarrollo, por medio de la investigación científica, enriquece los contenidos propios y de las carreras profesionales.

La primera posición queda claramente representada por Teófilo Isnardi, quien en 1916 escribe, para las Memorias de la Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas “Nuestra misión principal no debe ser por hoy la investigación. Hacer algunos trabajos originales y publicarlos en la revista de la Facultad y en revistas alemanas puede ser muy interesante (y no a todos) desde un punto de vista personal, pero interesa muy poco al país, si esos trabajos no son el motivo (o el pretexto) para preparar nuestro ambiente intelectual de modo que mañana puedan ser no cuatro sino cuatrocientos los profesores de física egresados de la escuela. La función de enseñanza es, por algunos años –tal vez por algunas décadas, principal. Sin que esto signifique relegar la otra al olvido, lo que no obstante sería siempre preferible al caso inverso actualmente en práctica”. Claramente, Isnardi opone a la concepción “cientificista” de Gans su propia postura “docente”. Docencia versus investigación, como conflicto instalado, fue durante décadas el elemento con mayor capacidad para la generación de conflictos en el Instituto de Física de La Plata, conflictos que se manifestaban en las asignaciones de cargos

de profesor y en las designaciones de director del Instituto (caso Loyarte-T. Isnardi, 1926; designación del Director del Departamento de Física). Estos conflictos se propagaron hasta la década de los años 1950 (caso Balseiro-Rodríguez, concurso y designación en un cargo docente del Departamento de Física).

La visión de Isnardi se contrapuso fuertemente a la de Gans, quien concebía a la investigación como la actividad central del Instituto. De la calidad de la investigación desarrollada dependía, según Gans, la calidad de la docencia impartida. Para T. Isnardi, poco o nada se podía esperar de la investigación científica y por lo tanto debía encararse a la docencia como única actividad prioritaria. Nuevamente aquí se demuestra a las claras que la concepción de la física como herramienta de carreras profesionales (como las ingenierías, por ejemplo) determinó el perfil de las personas contratadas y/o designadas en el Instituto de Física.

■ CONCLUSIONES.

La reflexión que surge inmediatamente del material expuesto se puede sintetizar en la pregunta: la pérdida de contacto con la física del momento ¿es producto de las circunstancias o es el producto de una actitud elaborada?

En el caso del Instituto de Física el inicio fue promisorio, se organizó siguiendo el modelo académico alemán, se desarrollaron líneas de investigación de actualidad para la época y se acompañó esta actividad de investigación con la modernización del currículum de la carrera (tarea en la que se distingue claramente la influencia de M. Bose, quien fuera la esposa de E. Bose). Desde el punto de vista presupuestario el Instituto de Física contaba con me-

dios suficientes y las conexiones internacionales de Gans facilitaron la inserción de estudiantes argentinos en Institutos europeos. Las etapas que siguieron a este muy promisorio comienzo no fueron tan brillantes. Poco a poco se perdió la impronta de Gans, especialmente después de su regreso a Alemania en 1925 y a su retorno a La Plata, terminada la segunda guerra mundial. Su gestión a favor de la investigación resultó sencillamente ajena al medio local. La experiencia de Gans no fue la única, ya que otros investigadores también debieron optar por otros ámbitos de trabajo (G. Beck, J. Balseiro entre otros) mientras que otros definitivamente abandonaron la investigación (el escritor E. Sabato, por ejemplo, quien dejó la física a su regreso de una estadía en Francia). Las explicaciones de esta situación de deterioro institucional son varias, pero quizá la burocratización de la función docente, el aislamiento y la endogamia fueron las causas principales del silenciamiento de la actividad científica en el Instituto de Física de La Plata, situación que imperó hasta bien entrada la década de los años 1960. Resulta también muy indicativo del deterioro de la estructura académica en el Instituto de Física de aquellos años el papel de espectador pasivo que le cupo frente al desarrollo de otras instituciones en el país: tal el caso de la creación de la CNEA y del ahora Instituto Balseiro (década de 1950), el desarrollo del Departamento de Física de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires (década de 1960) y del propio desarrollo de la física a nivel mundial, que registró entre 1950 y 1970 uno de los períodos de mayor creatividad. Retornado a la pregunta que formulamos al comienzo, quizá la respuesta se deba a ambas causas. Afortunadamente esta situación comenzó a revertirse a finales de la década de 1960 y no precisamente

por aplicación de políticas de desarrollo científico, sino más bien por todo lo contrario. La Universidad Nacional de La Plata recibió, en esa época, a docentes e investigadores provenientes mayoritariamente de la Universidad de Buenos Aires, luego de los acontecimientos que determinaron el cierre de instituciones y la migración forzada de investigadores que siguieron a la caída del gobierno del Presidente Arturo Illia. La polarización entre docentes e investigadores se mantuvo a lo largo de los años siguientes. La casi desaparición de las actividades de investigación en el Instituto de Física queda demostrada en la muy pobre producción científica documentada hasta bien entrados los años ochenta. Desde entonces, las tensiones entre estas visiones contrapuestas no han desaparecido, más bien se han recreado bajo formas asociadas a la discusión de contenidos curriculares más orientados hacia carreras profesionales, bajo el diseño de centros y laboratorios separados de la Universidad, etc. La polémica Gans-Isnardi marcó un lamentable apartamiento del rumbo fundacional del Departamento de Física. Lejos de ser una mera anécdota, aún hoy podemos apreciar la existencia de manifestaciones de ambas opiniones, tanto en ejemplos tomados de la política científica como de la universitaria. Persisten entonces la concepción de la física como herramienta en el cu-

rrículo de profesiones afines, que no requiere de investigadores que practiquen la docencia y la contrapuesta visión del desarrollo de la física en ámbitos (centros, institutos, etc.) relacionados sólo periféricamente (o no relacionados de ninguna manera) con la docencia universitaria, que requieren de investigadores no necesariamente involucrados en la docencia. En el caso del Instituto de Física de la Universidad de La Plata, el predominio de la línea que relativizó el rol de la investigación en el medio universitario es, en mi opinión, el responsable del silencio de cuarenta años que imperó en el Instituto, científicamente hablando, desde la finalización de la primera gestión de Gans (1925).

■ BIBLIOGRAFÍA

Bibiloni, A. G. (2001) Emil y Margrete Heilberg-Bose, pioneros de la investigación en física en la Argentina. *Encuentro de historia da ciência: análises comparativas das relações científicas no Século XX entre os países do Mercosul no campo da Física*. Rio de Janeiro CBPF, 20.

Civitarese, O. (2001) Sobre la investigación en física en los primeros años del Instituto de Física de la Universidad de La Plata. *Encuentro de historia da ciência: análises comparativas das relações científicas no Século XX entre os países do Mercosul no campo da Física*. Rio de Janeiro CBPF, 194.

lises comparativas das relações científicas no Século XX entre os países do Mercosul no campo da Física. Rio de Janeiro CBPF, 194.

Galles, C. D. (2001) *Semblanza de Ricardo Gans. Encuentro de historia da ciência: análises comparativas das relações científicas no Século XX entre os países do Mercosul no campo da Física*. Rio de Janeiro CBPF, 62.

Krüger, F. (1911) Emil Bose Wirken. *Physikalische Zeit.* 12, 1244.

Luna, F. (1999) Julio Argentino Roca. *Colección Grandes Protagonistas de la Historia Argentina*. Editorial Planeta. Buenos Aires.

Ogambide, P. (1963) *Al filo del medio siglo*. Editorial Planeta. Buenos Aires.

Pyenson, L. (1985) *Cultural imperialism and exact sciences: German expansion overseas 1890-1930*. Peter Lang. New York, Bern, Frankfurt.

Swinne, S. (1992) Ricardo Gans, Profesor en Alemania y en Argentina (traducción del Instituto de Lenguas de Buenos Aires con asesoramiento del autor de estas notas). Edición original de Editorial ERS-Verlag-Berlin.



Ciencia Tecnología Innovación

34 CENTROS DE INVESTIGACIÓN PROPIOS, ASOCIADOS, VINCULADOS O EN RED

INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

- CARRERA DEL INVESTIGADOR CIENTÍFICO Y TECNOLÓGICO
- CARRERA DEL PERSONAL DE APOYO A LA INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO
- PROGRAMA DE BECAS
 - Becas de entrenamiento para alumnos universitarios
 - Becas de estudio
 - Becas de perfeccionamiento
- SUBSIDIOS
 - Para la Realización de Reuniones Científicas y Tecnológicas y Asistencia a Reuniones
 - Para Publicaciones Científicas y Tecnológicas
 - Para Proyectos de Investigación de Interés Provincial

INNOVACIÓN, TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA Y CULTURA EMPREDEDORA

- PROGRAMA DE MODERNIZACIÓN TECNOLÓGICA
- PROGRAMA EMPRECIC
- CRÉDITO FISCAL
- PROGRAMA DE FORMACIÓN DE FORMADORES EN EMPRENDEDORISMO

 *comisioendeinvestigaciones.
cientificas*

www.cic.gba.gov.ar

INSTRUCCIONES PARA LOS AUTORES

Revista CIENCIA E INVESTIGACION

Ciencia e Investigación, órgano de difusión de la Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias (AAPC), es una revista de divulgación científica y tecnológica destinada a educadores, estudiantes universitarios, profesionales y público en general. La temática abarcada por sus artículos es amplia y va desde temas básicos hasta bibliográficos: actividades desarrolladas por científicos y tecnólogos, entrevistas, historia de las ciencias, crónicas de actualidad, biografías, obituarios y comentarios bibliográficos. Desde el año 2009 la revista tiene difusión en versión on line (www.aargentinapciencias.org)

PRESENTACIÓN DEL MANUSCRITO

El artículo podrá presentarse vía correo electrónico, como documento adjunto, escrito con procesador de texto word (extensión «doc») en castellano, en hoja tamaño A4, a doble espacio, con márgenes de por lo menos 2,5 cm en cada lado, letra Time New Roman tamaño 12. Las páginas deben numerarse (arriba a la derecha) en forma corrida, incluyendo el texto, glosario, bibliografía y las leyendas de las figuras. Colocar las ilustraciones (figuras y tablas) al final en página sin numerar. Por tratarse de artículos de divulgación científica aconsejamos acompañar el trabajo con un glosario de los términos que puedan resultar desconocidos para los lectores no especialistas en el tema.

La primera página deberá contener: Título del trabajo, nombre de los autores, institución a la que pertenecen y lugar de trabajo, correo electrónico de uno solo de los autores (con asterisco en el nombre del autor a quién pertenece), al menos 3 palabras claves en castellano y su correspondiente traducción en inglés. La segunda página incluirá un resumen o referencia sobre el trabajo, en castellano y en inglés, con un máximo de 250 palabras para cada idioma. El texto del trabajo comenzará en la tercera página y finalizará con el posible glosario, la bibliografía y las leyendas de las figuras. La extensión de los artículos que traten temas básicos no excederá las 10.000 palabras, (incluyendo título, autores, resumen, glosario, bibliografía y leyendas). Otros artículos relacionados con actividades científicas, bibliografías, historia de la ciencia, crónicas o notas de actualidad, etc. no deberán excederse de 6.000 palabras.

El material gráfico se presentará como: a) figuras (dibujos e imágenes en formato JPG) y se numerarán correlativamente (Ej. Figura 1) y b) tablas numeradas en forma correlativa independiente de las figuras (Ej. Tabla 1). En el caso de las ilustraciones que no sean originales, éstas deberán citarse en la leyenda correspondiente (cita bibliográfica o de página web). En el texto del trabajo se indicará el lugar donde el autor ubica cada figura y cada tabla (poniendo en la parte media de un renglón Figura... o Tabla..., en negrita y tamaño de letra 14). Es importante que las figuras y cualquier tipo de ilustración sean de buena calidad. La lista de trabajos citados en el texto o lecturas recomendadas, deberá ordenarse alfabéticamente de acuerdo con el apellido del primer autor, seguido por las iniciales de los nombres, año de publicación entre paréntesis, título completo de la misma, título completo de la revista o libro donde fue publicado, volumen y página. Ej. Benin L.W., Hurste J.A., Eigenel P. (2008) The non Lineal Hypercycle. Nature 277, 108 – 115.

Se deberá acompañar con una carta dirigida al Director del Comité Editorial de la revista Ciencia e Investigación solicitando su posible publicación (conteniendo correo electrónico y teléfono) y remitirse a cualquiera de los siguientes miembros del Colegiado Directivo de la AAPC: abaladi@dna.uba.ar - nidiabasso@yahoo.com - miguelblesa@yahoo.es - xammar@argentina.com - sarce@cnea.gov.ar y con copia a secretaria@aargentinapciencias.org

Quienes recepcionen el trabajo acusarán recibo del mismo y lo elevarán al Comité Editorial. Todos los artículos serán arbitrados. Una vez aprobados para su publicación, la versión corregida (con las críticas y sugerencias de los árbitros) deberá ser nuevamente enviada por los autores.

