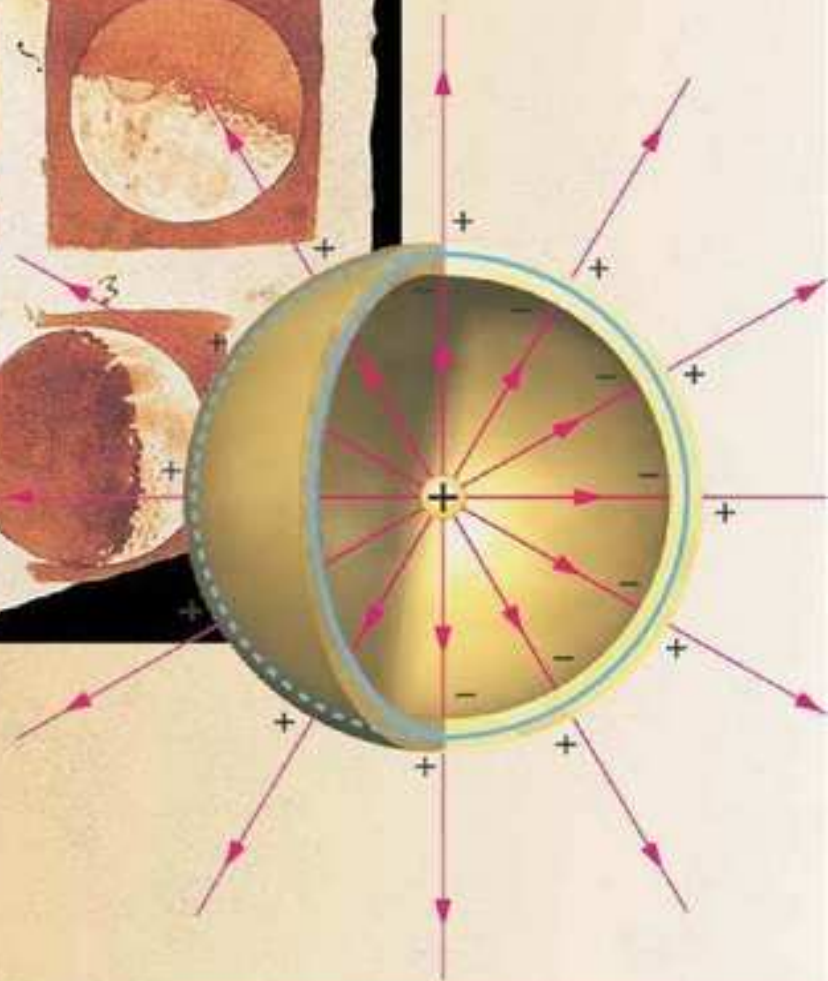
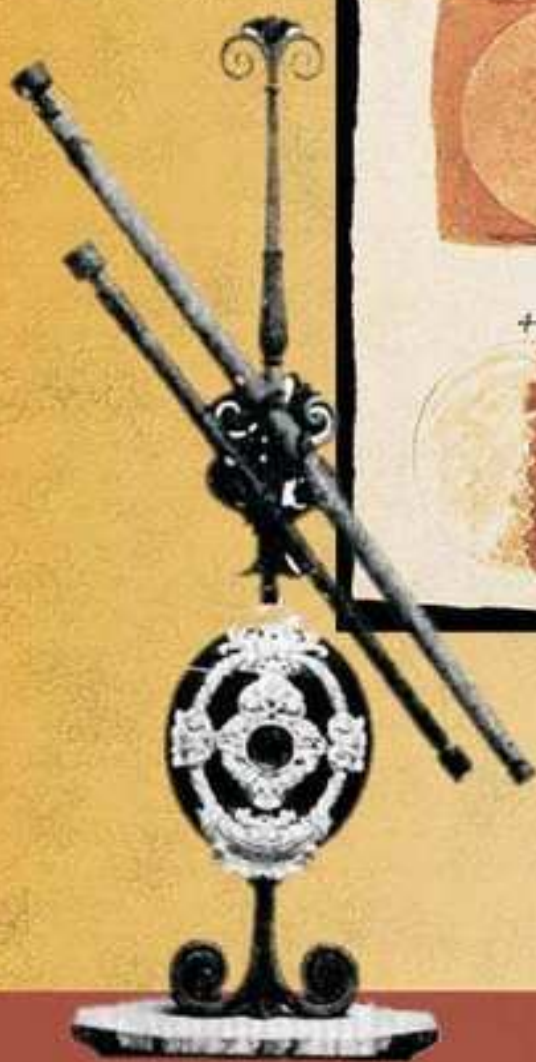


Huellas de los conceptos científicos







Huellas de los conceptos científicos

(Devenir histórico de la ciencia y la tecnología)

Francisco Jarabo

[fejarfri@gmail.com]

A **Gina**,
a la que prometí terminar el trabajo.

 Huellas de los conceptos científicos 	
Devenir histórico de la ciencia y la tecnología	
Índice de capítulos	
INTRODUCCIÓN	5
EDAD ANTIGUA (600 a.C. - 476 d.C.)	13
EDAD MEDIA (476 - 1453)	31
EDAD MODERNA (1453 - 1789)	39
LA FÍSICA CONTEMPORÁNEA (1789 - 20xx)	75
LA QUÍMICA CONTEMPORÁNEA (1789 - 20xx)	115
LA MATEMÁTICA CONTEMPORÁNEA (1789 - 20xx)	145
LA BIOLOGÍA CONTEMPORÁNEA (1789 - 20xx)	167
 ***** 	
ALGO DE BIBLIOGRAFÍA	209

He redactado esta carta más extensa de lo usual porque carezco de tiempo para escribirla más breve.

Blaise Pascal (1623 - 1662)

Objetivos de la obra	
Generales	Específicos
<ul style="list-style-type: none"> ● Proporcionar la información necesaria para profundizar en el conocimiento de la Ciencia mediante aspectos históricos, favoreciendo la cultura científica. ● Realizar el recorrido histórico por el campo de la Ciencia sin profundizar en sus contenidos ni en sus técnicas, lo que no exige especialización, pero sí un cierto espíritu crítico. ● Plantear una reflexión sobre la evolución y el significado de los conceptos e ideas implicados en el desarrollo de la Ciencia. ● Ofrecer las bases para poder comprender las grandes corrientes ideológicas que han atravesado las distintas disciplinas de la Ciencia. 	<ul style="list-style-type: none"> ● ¿Cuáles son las coordenadas temporales que permiten ubicar los hechos en un marco comprensible? ● ¿Cuáles son los grandes problemas de una época? ● ¿Cuáles son los grandes nombres? ● ¿Cuáles son los grandes temas de investigación? ● ¿Cuáles son las preguntas que han obtenido respuesta con el tiempo? ● ¿Cuáles son los nuevos campos del saber que se abren?

Especial agradecimiento
a mi amigo J. Santana
y a mi compañero F.J. García.

Índice - INTRODUCCIÓN

Propósito	7
Tecnología, Ciencia, Ingeniería	8
Ciencia: Deseo de saber	9
De la opinión al conocimiento	10
Entonces, concluyendo	11

Propósito

La esencia del conocimiento radica en percibir:

- Cómo han surgido los principios involucrados en una teoría que explica unos hechos.
- Por qué se han formulado las leyes que soportan esa teoría.
- Cuál ha sido la trayectoria experimental que se ha debido seguir hasta conseguir establecer esa teoría.

La percepción del conocimiento alcanzado puede conseguirse mediante:

- Enumeración acumulada de datos biográficos o culturales de los personajes.
- Evolución de las ideas y las técnicas.
- Análisis del modo de pensar y hacer de los que se han dedicado a llevar la ciencia un paso más allá del estadio en el que se la encontraron (los científicos).

La historia permite entender mejor las influencias recíprocas entre:

- Avances científicos (**C**iencia).
- Innovaciones tecnológicas (**T**ecnología).
- Fenómenos sociales (**S**ociedad).

Esta relación (**C/T/S**) es causa y, al mismo tiempo, efecto del devenir político, económico y cultural del ser humano.

Tecnología, Ciencia, Ingeniería

- **Tecnología:** Afán de **hacer** cosas, cada vez mejores y más eficaces, por conseguir fines prácticos (¿cómo?) [alfarería, metalurgia].
- **Ciencia:** Afán de **conocer** cosas (*epistemología* = fundamentación del conocimiento), afán por descubrir el mundo y las leyes que lo gobiernan (¿por qué?) [física, biología].
- **Ingeniería:** Forma de **conocer** cómo y por qué **hacer** las cosas, es decir, el resultado de aplicar la Ciencia a la Tecnología o “Tecnología Científica” (¿cuánto?) [agronomía, arquitectura].

Ciencia: Deseo de saber

La Ciencia puede considerarse como:

- Un producto de la civilización occidental.
- La creación más importante de la historia de la humanidad.
- Un agente de cambio social, cada vez más importante.

La base del conocimiento es la curiosidad, el deseo de saber, tanto mayor cuanto más evolucionada es la sociedad. La capacidad del cerebro humano de recibir, organizar y almacenar información procedente de su entorno supera ampliamente los requerimientos ordinarios de la vida.

Etapas de empleo de la capacidad mental excedente:

- Satisfacción de las necesidades prácticas (cómo cultivar mejor, cómo fabricar mejores armas).
- Realización de actividades cada vez más complejas, intentando llegar al conocimiento “puro” (por placer), logrando una más eficiente ocupación de la mente.

De la opinión al conocimiento

Opinión (saber ordinario; aproximación casual)		Conocimiento (saber científico; aproximación formal)	
<i>eikasia</i>	<i>pistis</i>	<i>dianoia</i>	<i>episteme</i>
Percepción (imaginación)	Creencia (convicción)	Pensamiento (comprensión)	Inteligencia (discernimiento)
	Sentido común	Ciencia	

Paso racional desde la opinión al conocimiento:

- Lenguaje (forma expresiva)
- Lógica (coherencia racional)
- Método (operaciones ordenadas) de:
 - Observación
 - Descripción y repetición de lo observado
 - Explicación y predicción de lo descrito (hipótesis)
 - Verificación de la hipótesis para establecer una teoría

Entonces, concluyendo ...

La mejor manera de definir la Ciencia es como una búsqueda cuidadosa, disciplinada y lógica del conocimiento acerca de todos y cada uno de los aspectos del universo, obtenidos por el examen de las mejores evidencias disponibles y siempre sujeto a corrección y mejora por descubrimiento de evidencias mejores. Lo que queda es magia. Y no funciona.

James Randi (1928 -)

Índice - EDAD ANTIGUA (600 a.C. - 476 d.C.)

Primero fueron los mitos	15
¿Aritmética + Geometría = Matemática?	15
Los griegos, autores del invento (600 a.C. - 200 d.C.)	16
Los tres de Mileto	17
El problema del cambio	18
La primera teoría atómica	19
El famoso matemático	20
... y el médico (y también biólogo)	21
Los atenienses	22
¡Oh cielos, Aristóteles!	23
Aleandría, centro del mundo científico (1)	24
Aleandría, centro del mundo científico (2)	25
Aleandría, centro del mundo científico (3)	26
Algunos problemas para la posteridad	27
En qué fallaron los griegos	28
¿Aportaron algo estos romanos?	29

Primero fueron los mitos

Un mito es un relato sobre dioses que pretende explicar algún fenómeno de la naturaleza. Las fuerzas de la naturaleza son personificadas y deificadas (Zeus/Júpiter, Odín) y a lo largo de la historia son modificadas y corregidas hasta oscurecer su origen.

Mientras el universo estuviera bajo el control de unas deidades arbitrarias de reacciones incomprensibles, no habría posibilidades de preverlo. Ello lleva a un nuevo pensamiento, la **filosofía** (“amor al conocimiento” = disciplina que trata de la esencia, propiedades, causas y efectos de las cosas naturales). Surge en Grecia alrededor del año 600 a.C. y es un excitante ejercicio intelectual de tratar de descubrir la existencia de leyes en la naturaleza.

¿Aritmética + Geometría = Matemática?

El manejo de cantidades representadas por números (**Aritmética**) ha estado ligado a saber cuántas cabezas de ganado formaban un rebaño. El uso de figuras (**Geometría**) aparece con la agrimensura y con actividades como la alfarería, la cestería o el tejido.

Si se considera la **Matemática** como una disciplina asociada a contar y medir, puede decirse que está ligada a las grandes civilizaciones antiguas (Egipto, Mesopotamia, India, China). Para convertirla en Ciencia (a partir de conceptos primarios y proposiciones se deduce una teoría), hay que remitirse a los que la sistematizaron: los griegos.

Los griegos, autores del invento (600 a.C. - 200 d.C.)

Desarrollan dos importantes técnicas (aplicadas con gran éxito a la Geometría):

- **Abstracción:** Considerar sólo las propiedades necesarias para la solución de un problema, despreciando sus aspectos no esenciales.
- **Generalización:** Considerar lo que es común y esencial en muchas cosas para formar un concepto que las comprenda todas.

Establecen importantes conceptos para el desarrollo de la Ciencia:

- Los sentidos pueden engañarnos.
- La naturaleza no es caprichosa.
- El mundo no se comporta según explicaciones mágicas o religiosas.

Aparece un nuevo tipo de explicación, **la explicación racional**.

Se inicia la vía de **la observación crítica de los fenómenos**.

Comienza a aplicarse el **método** (“*meta-odos*” = camino que conduce a la meta, es decir, una serie de operaciones ordenadas y encaminadas a obtener un resultado repetible e independiente del sujeto que las aplica).

Los tres de Mileto

El origen de las cosas está en una única materia prima (*“archè”* o *“arjé”*).

Tales de Mileto (624 - 546 a.C.):

- El agua, de la que proviene todo por condensación y dilatación.

Anaximandro de Mileto (611 - 547 a.C.):

- Lo indefinido (*“àpeiron”*), algo indeterminado e ilimitado.

Anaxímenes de Mileto (570 - 526 a.C.):

- El aire, del que proviene todo por condensación y rarefacción.

El problema del cambio

El desacuerdo:

Parménides de Elea (510 - 470 a.C.):

- Nada puede cambiar.
- Sólo la **razón** es fiable.

Heráclito de Éfeso (540 - 480 a.C.):

- Todo “fluye”.
- Los sentidos son fiables.

La síntesis:

Empédocles de Akragas (494 - 434 a.C.):

- La naturaleza tiene 4 elementos (**raíces**): **tierra, aire fuego y agua**.
- Las cuatro raíces se mezclan y se vuelven a separar, movidas por dos “fuerzas”: amor y odio.

Anaxágoras de Clazomenas (500 - 428 a.C.):

- La naturaleza está formada por “partes mínimas” que contienen “algo de todo” (**semillas**).
- Existe una fuerza que pone orden en la naturaleza (**espíritu**).

La primera teoría atómica

Demócrito de Abdera (460 - 370 a.C.):

- Toda la materia está compuesta de diminutas partículas *indivisibles* (**átomos**).
- Los átomos son eternos, inmutables e indestructibles y entre ellos sólo existe el vacío.
- Los átomos difieren físicamente entre sí y esa diferencia proporciona las propiedades de las diversas sustancias.
- Los cambios en la naturaleza de las sustancias consisten en la separación de átomos unidos y en su reunión siguiendo un nuevo patrón.

Teoría puramente especulativa (sin bases experimentales), siendo sus características principales:

- **Materialismo:** Sólo se basa en conceptos materiales.
- **Mecanicismo:** El universo se mueve según unas leyes fijas, en las que no interviene ninguna “fuerza”.

El famoso matemático

Pitágoras de Samos (580 - 500 a.C.):

- El universo está gobernado por los números.
- La naturaleza puede ser expresada matemáticamente.
- La tierra es esférica.
- La Matemática se convierte en un conjunto de argumentos deductivos demostrables (**deducción** = consecuencia de un principio, proposición o supuesto).
- Utiliza la técnica experimental, sacando conclusiones a partir de observaciones de la naturaleza (*monocordio*: la vibración de una cuerda es proporcional a su longitud).

... y el médico (y también biólogo)

Hipócrates de Cos (460 - 370 a.C.):

- La enfermedad es un puro proceso físico resultado de un desequilibrio de los fluidos (*humores*) vitales del cuerpo: sangre, flema, bilis negra y bilis amarilla.
- La práctica médica está basada en la observación que, combinada con la razón, permite obtener conclusiones.
- El médico debe interferir lo menos posible en los procesos curativos de la naturaleza.

Considerado fundador de la **Medicina** (ciencia y arte de precaver y curar las enfermedades del cuerpo humano) y quizás también de la **Biología**, estudio morfológica (forma) y fisiológico (funciones) de los organismos vivos.

Utilizaré el tratamiento para ayudar a los enfermos según mi capacidad y juicio, pero nunca con la intención de causar daño o dolor. A nadie daré veneno aunque me lo pida o me lo sugiera, tampoco daré abortivos a ninguna mujer con el fin de evitar un embarazo. Consideraré sagrados mi vida y mi arte.

No utilizaré el cuchillo, ni siquiera en aquellos que sufren indescriptiblemente, dejándoselo hacer a los que se ocupan de ello.

Cuando entre en la morada de un enfermo, lo haré siempre en beneficio suyo; me abstendré de toda acción injusta y de abusar del cuerpo de hombres o mujeres, libres o esclavos.

De todo cuanto vea y oiga en el ejercicio de mi profesión y aún fuera de ella callaré cuantas cosas sea necesario que no se divulguen, considerando la discreción como un deber.

Si cumplo fielmente este juramento, que me sea otorgado gozar felizmente de la vida y de mi arte y ser honrado siempre entre los hombre. Si lo violo y me hago perjuro, que me ocurra lo contrario.

Juramento hipocrático

Los atenienses

Sócrates (470 - 399 a.C.):

- Es el filósofo por excelencia (*“sólo sé que no sé nada”*).
- La base del conocimiento es la razón (**racionalismo**).
- Creador de la **dialéctica** (uso argumentativo del lenguaje): persigue el conocimiento mediante preguntas y respuestas (*“diálogo socrático”*).

Platón (427 - 347 a.C.):

- Fundador de la primera “universidad”, la **Academia** (situada en tierras del griego Academo).
- Creador de la “teoría de las ideas”: hay una realidad eterna e inmutable detrás del mundo de los sentidos que forma el mundo de las ideas.
- La Geometría representa la perfección del mundo de las ideas (*“Oudeis ageometretos eisetos”* = “Que no entre [en la Academia] *quién no sepa Geometría*”).

¡Oh cielos, Aristóteles!

Crea un modelo del universo tan completo y autoconsistente, que pervive durante ¡más de 20 siglos! (s. III a.C. - s. XVII d.C.)

Aristóteles de Estagira (384 - 322 a.C.):

- Funda su propia escuela, el **Liceo** (situada cerca del templo de Apolo Licio).
- Método empírico (basado en la experiencia):
 - Recoger la información de algún aspecto de la naturaleza.
 - Organizar las observaciones en un orden.
 - Deducir los principios que resumen dicho aspecto.
- Formulación de la forma clásica del argumento deductivo: el **silogismo** (dos *premisas* que llevan a una *conclusión*), importante paso en la metodología de la Ciencia.
- Clasificación jerárquica de los reinos de la naturaleza (inanimado, vegetal, animal, humano), estudiando especialmente los animales (**Zoología**) y sus discípulos los vegetales (**Botánica**).
- El mundo está formado por los cuatro elementos habituales (tierra, aire, agua, fuego), corruptibles; en el firmamento la materia es incorruptible y está formada por la “quintaesencia” (el quinto elemento), o “*éter*”.
- Su mayor contribución al campo de la **Física** (estudio de la materia y de la energía y de las leyes que tienden a modificar su estado y su movimiento sin alterar su naturaleza) es la invención de su nombre (física = naturaleza); sus ideas del movimiento terrestre y celeste demostraron tal coherencia lógica, que la Ciencia tardó 20 siglos en superarlas.

Alejandro, centro del mundo científico (1)

La Ciencia emerge como actividad profesional (independiente de la filosofía).

Estratón de Lámpsaco (330 - 269 a.C.):

- Establece el método experimental.

Aristarco de Samos (320 - 250 a.C.):

- Los movimientos de los cuerpos celestes se interpretan más fácilmente si se establece que todos los planetas giran alrededor del sol.

Euclides de Alejandro (325 - 265 a.C.):

- Resume el conocimiento acumulado durante cientos de años y le da una presentación lógica genial en sus **Elementos**.
- Los Elementos está considerado el más grande texto de Matemática de todos los tiempos; es el libro más traducido, publicado y estudiado en todo el mundo occidental (después de la Biblia); sigue siendo libro de texto para el estudio de la Geometría.
- Establece verdades obvias y aceptables por todos, que no necesitan su demostración (**axiomas**).
- Cada **teorema** (proposición demostrable lógicamente mediante reglas de inferencia aceptadas) puede demostrarse partiendo de axiomas o de otros teoremas ya demostrados.
- Todos los teoremas tienen idéntica estructura: enunciado, demostración y conclusión (acostumbrándose luego a utilizar la abreviatura "**q.e.d.**", derivada de la locución latina "*quod erat demonstrandum*" = "como había que demostrar").

Aleandría, centro del mundo científico (2)

Arquímedes de Siracusa (287 - 212 a.C.):

- Principio de la palanca: dos pesos se equilibran a distancias recíprocamente proporcionales a sus pesos (*“Dáme un punto de apoyo y moveré el mundo.”*).
- Principio de flotación: todo cuerpo sólido sumergido en un líquido pierde el peso del líquido desplazado por él (*“¡Eureka, eureka!”*).
- Su cálculo de la relación ente la longitud e la circunferencia y su diámetro (**número π**) utilizando polígonos inscritos (al aumentar el número de lados el polígono se aproxima a la circunferencia) se convierte en precursor del cálculo infinitesimal.

Herón de Alejandría (20 - 62 d.C.):

- Sifón: tubo encorvado para sacar un líquido del recipiente que lo contiene, haciéndolo pasar por un punto superior a su nivel.
- Esfera de reacción (*aeolipile*): esfera hueca con dos tubos acodados enfrentados que expulsan chorros de vapor que la hacen girar.

Ptolomeo de Alejandría (90 - 168 d.C.):

- Compilador de todas las observaciones astronómicas en un modelo con la tierra en el centro del universo y los “planetas” a distancias creciente: luna, Mercurio, Venus, sol, Marte, Júpiter, Saturno (en su libro llamado más tarde *Almagesto*).

Aleandría, centro del mundo científico (3)

Dioscórides de Anazarba (40 - 90 d.C.):

- Especial atención de las propiedades medicinales de las plantas; primera farmacopea sistemática (libro de **Farmacología** = estudio de los medicamentos).

Galeno de Pérgamo (131 - 201 d.C.):

- Importantes trabajos de **Anatomía** (número, estructura, situación y relaciones de las diferentes partes de un organismo) por disección de animales.

Algunos problemas para la posteridad

La geometría griega lega a la posteridad tres grandes problemas no resueltos:

- La cuadratura del círculo: Construcción de un cuadrado de área igual a un círculo dado.
- La duplicación del cubo: Construcción de un cubo de volumen doble al de un cubo dado.
- La trisección del ángulo: División de un ángulo en tres partes iguales.

Sólo en el siglo XIX se demuestra fehacientemente que ninguno de estos tres problemas tiene una solución puramente geométrica (¡utilizando sólo la regla y el compás!).

En qué fallaron los griegos

Retrasan el avance posterior porque:

- Consideran la deducción como único medio respetable de alcanzar el conocimiento excelso, despreciando, en general, el conocimiento experimental.
- Transportan los axiomas usados en Matemática a otras ramas de conocimiento, principalmente la **Astronomía** (estudio del movimiento de los astros), estableciendo “*verdades absolutas*”:
 - La tierra, inmóvil, es el centro del universo (geocentrismo).
 - La tierra es imperfecta y los cielos son perfectos.

Les falta considerar:

- La importancia de la observación de experimentos controlados.
- La necesidad de utilizar también argumentos inductivos (obtener el principio que comprende a un conjunto de hechos).
- La aplicación de la Matemática para representar los fenómenos físicos observados.
- La función social de la Ciencia como herramienta de dominio del mundo material para reducir la necesidad del esfuerzo físico (consideraron la Ciencia como un juego intelectual).

El ocaso de la civilización helénica provoca el abandono de la perspectiva científica, ya que para los griegos la Ciencia es *una forma de **mirar** al mundo*, más que *una forma de **tratar** con el mundo*, es decir, la Ciencia sólo proporciona una imagen del mundo, no hace nada por cambiarlo.

¿Aportaron algo estos romanos?

Son excelentes constructores de edificios, calzadas y acueductos, pero no llevan a cabo ningún progreso notable.

Antes de que los romanos tengan tiempo de conquistar el mundo helénico, la propia Roma se ha convertido en una provincia de cultura griega.

La invasión de los bárbaros provoca la *Caída del Imperio Romano* [Occidental] (año 476).

Índice - EDAD MEDIA (476 - 1453)

La larga noche de mil años (476 - 1453): Antes del año 1000	33
Aquellos árabes ... (1)	34
Aquellos árabes ... (2)	35
La larga noche de mil años (476 - 1453): Después del año 1000	36
Aquellos ingleses	37
Y, por fin	38

La larga noche de mil años (476 - 1453): Antes del año 1000

Comienza la denominada Edad Media.

La Iglesia cristiana sobrevive al Imperio Romano y los conventos adquieren el monopolio de la enseñanza y el pensamiento; la filosofía griega es enterrada (año 529).

Desde la muerte de Mahoma (570 - 632), sus seguidores (*musulmanes*) expanden su religión (*islam*) desde su Arabia natal (*árabes*) por el norte de África y llegan a España, donde se establecen en 711 hasta que son expulsados en 1492 por los Reyes Católicos (*Reconquista*).

Los árabes absorben territorios y enseñanzas:

- Preservan y traducen los textos griegos.
- Introducen las **cifras** (signos con que se representa un número) arábicas, utilizadas desde entonces en todo el mundo.
- Inventan un signo para representar el **cero**, recogido de los indios.

Aquellos árabes ... (1)

Abu Musa Jabir Ibn Hayyan [Geber] (Iraq; 760 - 815):

- Modifica la doctrina griega de cuatro elementos (tierra, aire, agua y fuego), introduciendo tres nuevos principios: sal (= cuerpo), azufre (= alma) y mercurio (= espíritu).
- Defiende la existencia de una sustancia misteriosa que da lugar al desarrollo de la **alquimia** (arte con el que se pretendía el fin último de encontrar la “piedra filosofal” [transmutación en oro] y el “elixir de la vida” [panacea universal]).

Abu Jafar Muhammad Ibn Musa Al-Khwarizmi [Al-Khwarizmi] (Uzbekistán; 780 - 850):

- Transmite la numeración arábica.
- De su nombre deriva el término **algoritmo** (= conjunto ordenado y finito de operaciones que permite la solución de un problema).
- De un título de su obra (“*Kitab al-muhtasar fi hirab **al-jabr** wa al-muqqabala*” = “Tratado de cálculo de la **reducción** y de la confrontación”) deriva el término **Álgebra** (generalización de las operaciones empleando signos que representan simbólicamente las entidades matemáticas).
- Introduce la noción de ecuación para expresar clases de problemas de un mismo tipo.

Aquellos árabes ... (2)

Abu Ali Al-Husain Ibn Abdallah Ibn Sina [Avicena] (Uzbekistán; 979 - 1037):

- Numerosos libros de Medicina, basados en las teorías de Hipócrates y Galeno; se mantienen como libros de texto (traducidos al latín en el siglo XII) hasta el siglo XVII.

Abul Walid Muhammad Ibn Ahmad Ibn Rushd [Averroes] (España; 1126 - 1198):

- Constituye la culminación de la filosofía árabe, defendiendo su compatibilidad con la religión; recupera a Aristóteles, realizando largos y concienzudos comentarios a su obra, lo que representa una influencia decisiva en la historia posterior del pensamiento europeo.

La larga noche de mil años (476 - 1453): Después del año 1000

Europa se instala en el feudalismo (fusión de las sociedades romana y germánica; los vasallos son fieles a los señores), en el que cada persona cumple una de las tres funciones sociales:

- **Rezar:** Clérigos y mojes aseguran mediante el culto y la plegaria, la salvación de todos.
- **Combatir:** Guerreros y caballeros aseguran mediante la fuerza y el poder, el orden y la paz.
- **Trabajar:** Campesinos que labran la tierra aseguran la supervivencia de clérigos y guerreros.

Los monasterios aseguran la transmisión del conocimiento.

Las comunidades de profesores o estudiantes (**universidades**) practican enseñanza **escolástica** (síntesis de fe y razón, basada en el pensamiento de Aristóteles y desarrollada por Tomás de Aquino [1225 - 1274]).

Leonardo Fibonacci (Italia; 1170 - 1250):

- Introduce la numeración arábica en Europa, fomentando el uso del sistema decimal en su *Liber Abaci* (ábaco = cuadro de madera con bolas móviles enhebradas en alambres paralelos que se utilizan para contar desde la época babilónica).

Alberto Magno (Alemania; 1193 - 1280):

- Una de las grandes figuras de la alquimia, desarrolla conocimientos, aparatos y procedimientos para la transformación de unas sustancias en otras (transmutación).

Aquellos ingleses ...

Robert Grosseteste (1169 - 1253):

- Reglas para el examen inductivo de los fenómenos.
- Uso de experimentos preparados deliberadamente con el objetivo de decidir entre dos teorías enfrentadas.

Roger Bacon (1220 - 1292):

- Todas las teorías han de estar basadas sobre la evidencia experimental.
- La naturaleza puede ser descrita usando la Matemática.

William of Ockham (1255 - 1349):

- *“Pluralitas non est ponenda sine necessitate”* (no se deben multiplicar innecesariamente los entes).
- La **“navaja de Ockham”**: Si dos teorías se ajustan igualmente a los datos observados, debe aceptarse aquella basada en los supuestos más simples.

Y, por fin ...

Johannes Gutenberg (Alemania; 1398 - 1468):

- Concibe la **imprensa**, uno de los inventos más importantes para el desarrollo posterior de la Ciencia.
- La imprenta abarata los libros, revalúa la literatura y facilita la educación, debido a la mayor rapidez en la **propagación de las ideas** (monopolizada por la Iglesia).

La conquista de Constantinopla por los turcos (año 1453) lleva a la *Caída del Imperio Bizantino* (Imperio Romano Oriental).

Finaliza la denominada Edad Media.

Índice - EDAD MODERNA (1453 - 1789)

El amanecer (1)	41
El amanecer (2)	42
Los primeros renacentistas	43
Los beneficiarios de la imprenta (1)	44
Los beneficiarios de la imprenta (2)	45
Los filósofos revolucionarios	46
Los filósofos revolucionarios: el método científico	47
Galileo, el paladín de la Revolución Científica (1)	48
Galileo, el paladín de la Revolución Científica (2)	49
Galileo, el paladín de la Revolución Científica (3)	50
Algunos contemporáneos de Galileo	51
Los científicos del siglo XVII	52
Los científicos del siglo XVII (biólogos)	53
Los científicos del siglo XVII (matemáticos)	54
Los científicos del siglo XVII (químicos)	55
Los científicos del siglo XVII (físicos, 1)	56
Los científicos del siglo XVII (físicos, 2)	57
Newton, ¡la luz! (1)	58
Newton, ¡la luz! (2)	59
La Revolución Científica desemboca en la Ilustración	60
La Biología ilustrada	61
El arranque de la Geología	62
La Matemática ilustrada (1)	63
La Matemática ilustrada (2)	64
La Química ilustrada (1)	65
La Química ilustrada (2)	66
La Física Ilustrada: óptica (1)	67
La Física Ilustrada: óptica (2)	68

Índice - EDAD MODERNA (1453 - 1789)

La Física ilustrada: electricidad y magnetismo (1)	69
La Física ilustrada: electricidad y magnetismo (2)	70
La Física ilustrada: electricidad y magnetismo (3)	71
La Física ilustrada: calor, trabajo, energía	72
La gran explosión	73

El amanecer (1)

Comienza la Edad Moderna con el **Renacimiento** (vuelta a las fuentes de la cultura) y la **Reforma** (vuelta a las fuentes del cristianismo).

Los habitantes de las ciudades (burgueses) comienzan a emanciparse de los señores feudales y del poder de la Iglesia a través de los gremios.

El resurgimiento del saber se basa en una nueva “visión del hombre” (**humanismo**) y en la utilización escrita de las lenguas vulgares.

Cualquier investigación de la naturaleza tiene que basarse en la observación, la experiencia y el experimento (método **empírico**).

Los seres humanos comienzan a independizarse de las condiciones de la naturaleza: intervienen en ella e intentan dominarla.

El amanecer (2)

Se consideran fundamentales para esta nueva época tres inventos, concebidos en la Edad Media:

- **Imprenta:** Dispositivo para realizar múltiples copias de un documento, que combina la tecnología ancestral del prensado de frutos (vino, aceite), la mejora de la composición de las tintas (utilizadas desde el siglo X), la producción masiva de papel (desarrollada en China alrededor del siglo XII) y el uso de caracteres móviles de madera (traído de Asia central por Marco Polo a finales del siglo XIII). Contribuye a la difusión de las nuevas ideas.
- **Brújula:** Instrumento de navegación para determinar una dirección, consistente en una aguja imantada que gira libremente y se alinea con el campo magnético terrestre. Su origen se sitúa en China durante el siglo XI, apareciendo en Europa durante el siglo XII. Mejora notablemente el sistema de navegación celeste, permitiendo los viajes cada vez más largos. Facilita los descubrimientos.
- **Pólvora:** Sustancia explosiva (mezcla de nitrato potásico, azufre y carbón vegetal, en una proporción de 6/1/1) empleada para impulsar los proyectiles de las armas de fuego. Se atribuye su origen en China durante el siglo XIII, generalizándose su uso bélico en Europa a principios del siglo XIV. Proporciona superioridad militar.

Los primeros renacentistas

Leonardo da Vinci (Italia; 1452 - 1519):

- Gran “renacentista”, ya que destaca en muchas materias diferentes: arte, diseño mecánico, anatomía animal y humana.
- Escribe sus ideas en clave, impidiendo el acceso de sus contemporáneos a su conocimiento, por lo que no tiene influencia en el desarrollo científico posterior, aunque sí es considerado como un referente no sólo artístico.

Philippus Aureolus Paracelso (Suiza; 1493 - 1541):

- Señala el comienzo de la transición de la alquimia a la **Química** (disciplina que estudia la modificación de la constitución de la materia por la acción de alguna forma de energía o de otra clase de materia).
- Las enfermedades pueden curarse mediante sustancias basadas en los tres elementos alquímicos: sal, azufre y mercurio (**iatroquímica** = química médica).
- Fundamenta la ciencia médica practicando el empirismo.

Los beneficiarios de la imprenta (1)

Nicolás Copérnico (Polonia; 1473 - 1543):

- Su obra *De revolutionibus orbium coelestium* (“Sobre la naturaleza cíclica de las trayectorias de los astros”) se publica casi el mismo día de su muerte y le permite redescubrir el modelo propuesto por Aristarco: la Tierra gira alrededor del sol (heliocentrismo) y de su propio eje.
- Su idea, más racional y simple que el modelo geocéntrico de Ptolomeo, no proporciona mejores resultados prácticos que éste, pero produce el gran “giro copernicano” en la visión del universo.

Andreas Vesalio (Bélgica; 1514 - 1564):

- Su obra *De humani corporis fabrica* (“De la estructura del cuerpo humano”) constituye la primera obra fidedigna de anatomía humana, no sólo por sus detalladas descripciones, sino por sus exactas ilustraciones.

Andreas Libavio (Alemania; 1540 - 1616):

- Su obra *Alchemia* (“Alquimia”) puede considerarse el primer libro de texto de Química, ya que organiza los contenidos de la disciplina en tres aspectos:
 - Clasificación de técnicas y experimentos de laboratorio y descripción de aparatos.
 - Elaboración de manuales con recetas sencillas y claras.
 - Creación de un lenguaje sistemático y estandarizado para los nombres de las sustancias, que permitiese reconocerlas fácilmente (nomenclatura).

Los beneficiarios de la imprenta (2)

Franciscus Vieta (Francia; 1540 - 1603):

- Su obra *Isagoge in artem analyticam* ("Introducción al arte analítico") constituye el primer libro conocido de Álgebra y en ella utiliza por primera vez letras mayúsculas para representar cantidades en una **ecuación** (igualdad entre dos expresiones, una de las cuales contiene, al menos, una incógnita).

William Gilbert (Gran Bretaña; 1544 - 1603):

- Su obra *De magnete* ("Sobre el magnetismo") difunde su contribución de considerar a la Tierra como un gran imán esférico, por lo que una brújula siempre apunta a un polo magnético y hacia el suelo (inclinación magnética).

Tycho Brahe (Dinamarca; 1546 - 1601):

- Su obra *De nova et nullius aevi memoria prius visa stella* ("Sobre la nueva y nunca antes vista estrella") derroca las ideas de Aristóteles acerca de la inalterabilidad y perfección de los cielos, ya que demuestra que la nueva estrella está mucho más lejos que la Luna.
- La gran reputación de sus exactísimas observaciones le permite construir el primer observatorio astronómico de la historia y establecer el nuevo "calendario gregoriano" (Gregorio XIII, 1582), en uso hasta el día de hoy.

Giordano Bruno (Italia; 1548 - 1600):

- Su obra *De l'infinito universo e mondi* ("Sobre el infinito, el universo y los mundos") defiende el modelo heliocéntrico de Copérnico y afirma que el universo es infinito y contiene infinitos mundos habitados por seres inteligentes, lo que le lleva a la hoguera.

Los filósofos revolucionarios

Francis Bacon (Gran Bretaña; 1561 - 1626) [*Ipsia scientia potestas est* ("Saber es poder")]:

- Promueve la recopilación de datos experimentales: debe consultarse a la naturaleza, no los libros.
- Insiste en la importancia de registrar cuidadosamente los resultados obtenidos en experimentos detallados y dirigidos, reproducibles en condiciones reales.
- Enaltece la lógica inductiva: a partir de observaciones específicas se establecen hipótesis generales.
- Aunque fomenta la interdisciplinariedad, desprecia la aplicación de la Matemática a los resultados experimentales.

René Descartes (Francia; 1556 - 1650) [*Cogito, ergo sum* ("Pienso, luego existo")]:

- Busca el conocimiento mediante el razonamiento deductivo cuidadoso a partir de ideas básicas irreducibles, de extremo escepticismo (racionalismo).
- Divide cada problema en partes tan pequeñas como sea necesario para poder resolverlo (**reduccionismo**).
- Si bien se basa en una naturaleza material capaz de producir un mecanismo perfecto (mecanicismo), hace especial énfasis en identificar los elementos simples en los fenómenos complejos (**análisis**).
- Contribuye también a la Matemática combinando álgebra y geometría mediante el sistema de coordenadas [des]cartesianas, que da lugar a la **Geometría Analítica** (una curva representa una ecuación y una ecuación se representa por una curva).

Los filósofos revolucionarios: el método científico

La síntesis de la observación (Bacon) y el razonamiento (Descartes) llevará al denominado **método científico** (dialéctica teoría/empirismo):

- Se observan los fenómenos espontáneos o provocados (reduccionismo).
- Se intenta describirlos y repetirlos (repetibilidad).
- Se intenta explicar el fenómeno y predecirlo (hipótesis).
- Se intenta verificar la hipótesis para establecer una teoría (refutación).

Galileo, el paladín de la Revolución Científica (1)

Destierra los últimos vestigios de la ciencia aristotélica, sustituyéndolos por un nuevo marco, dentro del cual se construirá toda la Física. Su contribución no es sólo un aumento del conocimiento, sino un cambio, tanto de la concepción del universo como de la forma de descubrirlo.

Galileo, el paladín de la Revolución Científica (2)

Galileo Galilei (Italia; 1564 - 1642):

- Basa todos sus desarrollos en la observación cuantitativa, es decir, en la **medida** (*“Mide lo que se puede medir y lo que no se puede medir, hazlo medible”*).
- Busca continuamente alguna relación matemática que describa el fenómeno con simplicidad y, simultáneamente, con generalidad (*“El gran libro de la naturaleza está escrito en lenguaje matemático”*).
- Trata de establecer modelos matemáticos para aplicarlos al estudio de los fenómenos naturales; el experimento, a veces no real (experimentos mentales), es una ilustración de las predicciones teóricas.
- Con sus experimentos sobre la caída de los cuerpos sienta las bases de dos de las principales ramas de la **Mecánica**: la **Cinemática** (estudio del movimiento) y la **Dinámica** (estudio de las fuerzas que lo producen). Sus estudios le permiten concluir que:
 - Todo cuerpo posee un movimiento de velocidad (nula = reposo) y dirección constantes (movimiento rectilíneo uniforme), mientras no haya una causa exterior que lo modifique (**inercia**).
 - La causa capaz de modificar el estado de movimiento de un cuerpo es la **fuerza**.
 - La variación de velocidad producida por la aplicación de una fuerza constante es la **aceleración**.
- Con ayuda del telescopio que inventa, realiza importantes descubrimientos astronómicos (montañas de la Luna, manchas del sol, lunas de Júpiter, fases de Venus), que afianzan la teoría heliocéntrica de Nicolás Copérnico.

Galileo, el paladín de la Revolución Científica (3)

Ha de abjurar públicamente de sus ideas ante la Inquisición, pero la **Revolución Científica** es ya imparable.

Algunos contemporáneos de Galileo

Johannes Kepler (Alemania; 1571 - 1630):

- Considera que la Tierra es un planeta en igualdad con los demás y que las leyes físicas rigen en todo el universo.
- Introduce el orden en los caóticos datos astronómicos, resumiendo el movimiento planetario en tres simples leyes matemáticas:
 - 1ª Ley: Los planetas recorren órbitas elípticas con el sol en uno de sus focos.
 - 2ª Ley: Los planetas barren áreas iguales de su órbita en intervalos iguales de tiempo.
 - 3ª Ley: El cuadrado del período de revolución de un planeta es proporcional al cubo de su distancia media al sol.

Jan Baptista van Helmont (Bélgica; 1577 - 1644):

- Realiza multitud de experimentos meticulosamente controlados, lo que marca para la química la introducción de la medida cuantitativa.
- Se interesa por los vapores desprendidos en muchos experimentos y los considera materia en completo caos, llamándolos “**gases**” (= “*chaos*”); distingue algunos de ellos por sus propiedades físicas.

William Harvey (Gran Bretaña; 1578 - 1657):

- Aplica la doctrina científica de Galileo Galilei (principalmente la experimentación y la medida) a la medicina, rechazando las ideas de Galeno de Pérgamo.
- Sus trabajos sobre la circulación sanguínea y el funcionamiento del corazón lo califican como el fundador de la **Fisiología** (estudio de las funciones de un organismo).

Los científicos del siglo XVII

Al volverse inductiva, la Ciencia deja de formar parte de la cultura general de las personas educadas. La gran labor de observación, estudio y análisis hace que los estudiosos se vayan limitando a una parte del saber, transformándose paulatinamente en “científicos profesionales”.

Los científicos del siglo XVII (biólogos)

Los principales descubrimientos en Biología son:

- Utilizando por primera vez el microscopio (= visión de lo pequeño), Marcello Malpighi (Italia; 1628 - 1694) consigue ver los vasos sanguíneos más finos, que se denominaron “capilares” (= como el pelo).
- Nace la **Microbiología** (estudio de los organismos sólo visibles con el microscopio) cuando Anton van Leeuwenhoek (Holanda; 1633 - 1723) descubre los organismos unicelulares y populariza el uso del microscopio.
- Es introducido el término “célula” (= celda) por Robert Hooke (Gran Bretaña; 1635 - 1703) para describir la estructura porosa del corcho vista al microscopio.

Los científicos del siglo XVII (matemáticos)

En Matemática aparecen:

- **Teoría de los números**, iniciada por Pierre de Fermat (Francia; 1601 - 1665): Estudia las propiedades de los números enteros (divisibilidad, factorización, números primos, sucesiones).
- **Teoría de las probabilidades**, iniciada por Blaise Pascal (Francia; 1623 - 1662) junto con Pierre Fermat: Estudia los resultados posibles en sucesos donde interviene el azar (juegos).
- **Lógica matemática**, iniciada por Gottfried Leibniz (Alemania; 1646 - 1716): Estudia los métodos de razonamiento para validar argumentos, utilizando el simbolismo matemático.
- **Topología**, iniciada también por Gottfried Leibniz: Estudia las propiedades de las figuras, con independencia de su tamaño o forma.
- **Análisis matemático**, iniciado por Isaac Newton (Gran Bretaña; 1642 - 1727) y por Gottfried Leibniz: Estudia las relaciones entre los números (funciones) basadas en el cálculo infinitesimal, que comprende las operaciones de cálculo diferencial e integral.

En 1650 es enunciada la **conjetura de Fermat** (“No se puede descomponer una potencia en suma de dos potencias del mismo grado, excepto para los cuadrados”), que no conseguirá ser demostrada hasta finales del siglo XX, transformándose entonces en el **Último teorema de Fermat**.

Los científicos del siglo XVII (químicos)

Los principales desarrollos en Química son:

- Basándose en la teoría corpuscular de la materia, Robert Boyle (Gran Bretaña; 1627 - 1691) interpreta sus numerosos experimentos con aire enunciando la ley de la compresibilidad de los gases (*“el volumen que ocupa un gas es inversamente proporcional a la presión a la que se encuentra”*); esta ley también fue descubierta de forma totalmente independiente (especificando que sólo es válida a temperatura constante) por Edmé Mariotte (Francia; 1620 - 1684).
- Aparece la teoría del **flogisto** (*“phlox”* = llama), principio imaginario para explicar la combustión, enunciada por Georg Ernst Stahl (Alemania; 1660 - 1734): las sustancias combustibles pierden flogisto, de forma reversible, durante la combustión. Su mayor mérito es intentar explicar unos hechos experimentales y dominar la química durante más de un siglo, a pesar de sus muchas contradicciones (el flogisto puede tener peso positivo y negativo).

Los científicos del siglo XVII (físicos, 1)

La Física produce tres importantes resultados en mecánica:

- Evangelista Torricelli (Italia; 1608 - 1647) consigue hacer el primer vacío en un manómetro de mercurio, con el que demuestra que la atmósfera (el aire) ejerce presión y que los gases son materiales, pero con menor densidad que los sólidos y los líquidos.
- Blaise Pascal deduce que *“la presión ejercida sobre la superficie de un fluido se transmite por todo el contenido del recipiente, actuando perpendicularmente a las paredes del mismo”* (principio de Pascal, base de la prensa hidráulica).
- Gottfried Leibniz define la *vis viva* (“fuerza viva”) de un objeto como el producto de su masa por el cuadrado de su velocidad, y relacionándola con la altura, establece la constancia de la suma de ambas (conservación de la *vis viva*, o bien, en términos más modernos, conservación de la energía mecánica).

Los científicos del siglo XVII (físicos, 2)

La Física produce también dos importantes resultados respecto a la luz:

- Christiaan Huygens (Holanda; 1629 - 1695) interpreta por primera vez la luz como una onda longitudinal que se propaga en la dirección de su movimiento, al igual que lo hace el sonido, y establece que *“cada punto del frente de onda puede ser considerado como fuente de una nueva onda* (principio de Huygens).
- Ole Christensen Rømer (Dinamarca; 1644 - 1717) consigue calcular por primera vez la velocidad de la luz (obtiene un valor de 227.000 km/s), basándose en medidas relativas a los eclipses de los satélites de Júpiter.

También se establecen unos fundamentos prácticos que serían de gran trascendencia un siglo después: Thomas Savery (Gran Bretaña; 1650 - 1715) y Thomas Newcomen (Gran Bretaña; 1663 - 1729) construyen la que puede considerarse la primera máquina de vapor. Pero esto ya sucede en el siglo XVIII.

Newton, ¡la luz! (1)

*Nature and Nature's laws lay hid in night:
God said, let Newton be! and all was light.*

[La Naturaleza y las leyes de la Naturaleza yacen ocultas en la noche:
Dios dijo, ¡hágase Newton! y la luz se hizo.]

Alexander Pope (1688 - 1744)

Isaac Newton (Gran Bretaña; 1642 - 1727):

- Demuestra que la luz blanca no es una entidad simple y puede ser separada en colores por refracción a través de un prisma, efecto al que llama “**espectro**” (= “imagen”); los colores pueden ser vueltos a unir para producir luz blanca.
- Interpreta la luz como una corriente de pequeñas partículas (“teoría corpuscular”), en contraposición a la teoría ondulatoria establecida por Cristiaan Huygens.
- En su obra “*Philosophiae naturalis principia mathematica*” (“Principios matemáticos de la filosofía natural”) establece el marco conceptual que permite predecir todos los hechos conocidos sobre el movimiento celeste mediante un modelo matemático verificable del universo, lo que conduce a una nueva concepción del mundo que sustituye a la de Aristóteles.
- Basándose en propiedades mensurables y manejables matemáticamente, establece las siguientes definiciones:
 - **Masa:** Cantidad de materia que hay en un cuerpo, es la medida de la densidad y el volumen conjuntamente.
 - **Momento:** Cantidad de movimiento que tiene un cuerpo, es la medida de la velocidad y la masa conjuntamente.
 - **Inercia:** Poder de la materia inerte de resistir a un cambio de su estado (reposo o movimiento rectilíneo uniforme).
 - **Fuerza:** Acción ejercida sobre un cuerpo para cambiar su estado (reposo o movimiento rectilíneo uniforme).

Newton, ¡la luz! (2)

- Basándose en la mecánica de Galileo Galilei establece las tres **leyes del movimiento**:
 - 1ª Ley: Todo cuerpo continúa en su estado de reposo o de movimiento rectilíneo uniforme a menos que sea obligado a cambiar ese estado por alguna fuerza.
 - 2ª Ley: El cambio de momento de un cuerpo es proporcional a la fuerza que se le ha aplicado y sigue la dirección de ésta.
 - 3ª Ley: A toda acción se opone siempre una reacción de igual intensidad y de sentido contrario.
- Como consecuencia de sus leyes del movimiento y con la idea de Johannes Kepler de que la misma fuerza (gravedad) es la responsable del movimiento de todos los cuerpos celestes, formula la **Ley de la Gravitación Universal**:
“Todo cuerpo material atrae a otro con una fuerza directamente proporcional a sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellos”.
- La gravitación universal conduce a una descripción única del mundo mediante una formulación de extrema sencillez, que no sólo explica **cómo** se mueven los cuerpos, sino que también explica **por qué** se mueven así.

Se completa espectacularmente la **Revolución Científica**, iniciada por Galileo Galilei: la ciencia de los dos siglos siguientes (XVII y XVIII) habrá de verse como una aplicación de la nueva metodología al estudio de otros fenómenos distintos al movimiento (calor, luz, magnetismo, electricidad) con el fin de formular leyes generales expresadas matemáticamente.

La Revolución Científica desemboca en la Ilustración

La Revolución Científica proporciona:

- La pérdida del ser humano de su situación especial en la creación.
- El desafío a la autoridad escolástica aportando un nuevo método inductivo que complementa la lógica silogística deductiva de los escolásticos.
- El proceso esencial para la adquisición del conocimiento, basado en la observación, la experimentación, la medida y el cálculo.
- La necesidad de la comprobación continuada de una generalización (representación ideal del mundo real), que siempre podrá ser refutada por una observación posterior.
- El intercambio de información libre entre los científicos (“comunidad científica”).

Como consecuencia del nuevo método de análisis e investigación basado en la experiencia y con predominio de la razón, se simplifica la enseñanza - aprendizaje del conocimiento. Esto produce un amplio movimiento durante el siglo XVIII, que se denomina **Ilustración**. La importancia que da esta corriente de pensamiento a la instrucción del pueblo, hace que aparezcan varias disciplinas aplicadas:

- Pedagogía: Trata de la educación y la enseñanza.
- Psicología: Trata de las facultades y operaciones del alma.
- Sociología: Trata de las condiciones de existencia y desenvolvimiento de la sociedad humana.

Durante el período de la Ilustración las disciplinas relacionadas con el estudio de la naturaleza van empezando a constituirse como ciencias independientes, al irse formando comunidades de individuos que se identifican como distintas de los que trabajan en otros campos.

La Biología ilustrada

Se acomete la clasificación de los seres vivos, de los que se conocen por la época decenas de miles de **especies** (seres semejantes entre sí).

- Carolus Linnaeus (Suecia; 1707 - 1778) crea la **taxonomía** (clasificación y nomenclatura de los seres vivos con arreglo a caracteres que se subordinan unos a otros para formar grupos cada vez más reducidos y homogéneos), popularizando la nomenclatura binómica (***Homo sapiens***), que se mantiene desde entonces.
- Georg Leopold Cuvier (Francia; 1769 -1832) extendió el sistema de clasificación a los fósiles (seres vivos que existieron en el pasado y que se encuentran petrificados en la corteza terrestre), creando la **Paleontología** (estudio de los fósiles); define el “catastrofismo”, teoría que supone que la Tierra sufre catástrofes periódicas que borran todo vestigio de vida, que vuelve a aparecer posteriormente de nuevas formas.
- Jean Baptiste Lamarck (Francia; 1744 - 1829) depura la clasificación de Linneo, que le induce a pensar en una evolución de las especies basada en la herencia de caracteres adquiridos; aunque muchas pruebas demuestran que los caracteres no son hereditarios, expresa por primera vez un esquema que racionaliza el desarrollo de la vida.

Y se ha abierto el libro de la Biología contemporánea.

El arranque de la Geología

También se produce el nacimiento de la **Geología** (estudio de la forma del globo terrestre y de la naturaleza, formación y alteraciones de las materias que lo componen) como entidad organizada, por el interés en el estudio histórico de los fenómenos como resultados de un proceso de cambio.

- William Smith (Gran Bretaña; 1769 - 1839) relaciona la sucesión de estratos (capas de terrenos sedimentarios de espesor uniforme) con su contenido en fósiles particulares.
- Abraham Gottlob Werner (Alemania; 1750 - 1817) reconoce que los estratos se dan en sucesiones definidas que provienen de transformaciones producidas en un gran océano (“neptunismo”).
- James Hutton (Gran Bretaña; 1726 - 1797) reconoce que los sedimentos provienen principalmente de masas volcánica (“plutonismo”); su mayor contribución es sugerir que las acciones que modifican lentamente la superficie de la Tierra son semejantes y constantes a lo largo del tiempo (“uniformitarismo”), lo que indica que la edad de la Tierra es de millones de años.

La Matemática ilustrada (1)

La Matemática aparece como un conglomerado de diversas ramas, cada vez más interconectadas, pero carece de una base sólida, ya que los avances que se producen están supeditados a cuestiones externas (resolución de problemas de las ciencias de la naturaleza).

- Christian Goldbach (Alemania; 1690 -1764) aplica la teoría de series a la integración de ecuaciones diferenciales; plantea la llamada **conjetura de Goldbach** (“Todo número par distinto de dos es la suma de dos números primos”), **aún no demostrada**.
- Leonhard Euler (Suiza; 1707 - 1783) es el matemático más prolífico de todos los tiempos, lo que quizá lo convierte en el más universal, debido a la claridad de su exposición y a la variedad de sus obras.
 - Introduce el símbolo imaginario, **i**, para representar la raíz cuadrada de la unidad negativa.
 - Introduce el número **e**, demostrando que es irracional y que su valor coincide con el límite del interés compuesto, es decir $(1 + 1/n)^n$, cuando n tiende a infinito.
 - Establece las funciones primarias del análisis matemático, a partir de las cuáles se deducen o componen todas las demás: x^n , e^x , $\text{sen } x$.
 - Consigue expresar en una ecuación los cinco números más importantes de la Matemática: $e^{\pi i} + 1 = 0$

La Matemática ilustrada (2)

- Joseph Louis Lagrange (Italia; 1736 - 1813) realiza importantes aplicaciones a la mecánica y es el responsable de la implantación del **Sistema Métrico Decimal**.
- Pierre Simon Laplace (Francia; 1749 - 1827) recopila la teoría gravitatoria en su *Traité de mécanique céleste* (“Tratado de mecánica celeste”), obra de gran profundidad matemática y difícil lectura (aunque salpicada con la expresión “... se ve fácilmente ...”).
- Karl Friedrich Gauss (Alemania; 1777 - 1855) reintroduce el rigor en las demostraciones matemáticas:
 - Demuestra el teorema fundamental del Álgebra: “Toda ecuación algebraica (ecuación en la que sólo intervienen polinomios) de grado n tiene n raíces (soluciones)”.
 - Demuestra el teorema fundamental de la Aritmética: “Todo número natural se puede representar como el producto de números primos de una sola forma” (descomposición factorial).
 - Demuestra que, prescindiendo del quinto postulado de Euclides (“por un punto exterior a una recta sólo se puede trazar una paralela a ella”) se puede construir una geometría no euclídea, lo que constituye la declaración de independencia de la Matemática respecto al resto de las ciencias (estudio de temas matemáticos puros, sin aplicaciones).

Y así se considera abierto el libro de la Matemática contemporánea.

La Química ilustrada (1)

Al amparo de la teoría del flogisto, se desarrolla con gran interés en Gran Bretaña el estudio de los gases (**química neumática**), produciéndose el descubrimiento del dióxido de carbono por Joseph Black (1728 - 1799), del hidrógeno por Henry Cavendish (1731 - 1810), del oxígeno por Joseph Priestley (1733 - 1803) y del nitrógeno por Daniel Rutherford (1749 - 1819).

Dos apasionados franceses de los viajes en globo, Joseph Louis Gay-Lussac (1778 - 1850) y Jacques Alexandre Charles (1746 - 1823), enuncian de forma independiente la ley de la dilatación de los gases (*“el volumen que ocupa un gas es proporcional a su temperatura absoluta, a presión constante”*).

- Lorenzo Amedeo Avogadro (Italia; 1776 - 1856) intuye que *“a volúmenes y temperaturas constantes, cualquier gas contiene el mismo número de partículas”* (**hipótesis de Avogadro**); esta afirmación es ignorada durante más de cincuenta años.
- Daniel Bernoulli (Suiza; 1700 - 1782) establece un modelo cinético para los gases, que es ignorado durante más de cien años, cuyas ideas fundamentales son:
 - Un gas está formado por gran número de partículas de dimensiones despreciables respecto al volumen que ocupa el gas.
 - Las partículas se mueven rápidamente en todas direcciones, chocando de forma elástica entre sí y contra las paredes del recipiente.
 - La presión del gas sobre las paredes de un recipiente es el resultado de los impactos de las partículas sobre ellas.
 - La manifestación externa del movimiento de las partículas es la temperatura.

La Química ilustrada (2)

- Antoine Laurent Lavoisier (Francia; 1743 - 1794) es considerado el “padre de la Química”:
 - Introduce en ella la medida cuantitativa precisa y los cálculos matemáticos.
 - Sustituye la teoría del flogisto por la **teoría de la oxidación** (la combustión no libera flogisto, sino que captura oxígeno).
 - Establece la ley de la conservación de la masa: *“la masa de un sistema cerrado permanece invariable cualquiera que sea la transformación que ocurra dentro de él”*.
 - Sistematiza la nomenclatura química, dándole a cada sustancia un nombre determinado, partiendo de aquéllas que no se pueden descomponer (**elementos**); la obra *Traité élémentaire de Chimie* (“Tratado elemental de Química”), de 1789, incluye todas las ideas básicas de la nueva Química.

*“Bastó un instante para cercenar esa cabeza,
pero quizá un siglo no baste para producir otra igual”.*

Joseph Luis de Lagrange (1736 - 1813), sobre Lavoisier.

¡Ya se ha abierto el libro de la Química contemporánea!

La Física Ilustrada: óptica (1)

El estudio de los espectros (**Espectroscopía**) iniciado por Isaac Newton va afianzándose como una importante técnica de análisis de la luz.

- William Herschel (Alemania; 1738 - 1822) mide la temperatura de las distintas zonas del espectro de la luz solar, encontrando que el valor máximo se alcanza en la zona oscura después del extremo rojo, descubriendo la zona **infrarroja** (infra = “por debajo de”) del espectro.
- Johann Wilhelm Ritter (Alemania; 1776 - 1810) estudia el ennegrecimiento de compuestos de plata al exponerlos a la luz solar, encontrando que el fenómeno es más rápido en la zona oscura después del extremo violeta, descubriendo la zona **ultravioleta** (ultra = “además de”) del espectro.
- William Hyde Wollaston (Gran Bretaña; 1766 - 1828) modifica el experimento de refracción de Newton, sustituyendo el orificio de entrada de la luz por una rendija, que da lugar a **líneas espectrales**.
- David Rittenhouse (EE.UU.; 1732 -1792) aprovecha el efecto de la difracción (desviación que se produce en la radiación cuando pasa por el borde de un objeto opaco, formando franjas en los contornos de la sombra) para construir la primera **red de difracción**, que aumenta notablemente la resolución de los espectros.
- Joseph von Fraunhofer (Alemania; 1787 - 1826) descubre numerosas líneas oscuras en el espectro de la luz solar, midiendo su posición y marcándolas con las letras A hasta K (líneas de Fraunhofer).

La Física Ilustrada: óptica (2)

Durante el siglo XIX se va tomando conciencia de las aplicaciones de la espectroscopía, tanto en Física (determinación de la energía de las radiaciones) como en Química (descubrimiento de nuevos elementos). El capítulo de la Óptica sigue abierto en el libro de la Física contemporánea.

La Física ilustrada: electricidad y magnetismo (1)

Uno de los fenómenos físicos más estudiados de la época (siglo XVIII) es la electricidad, que finalmente se asocia al magnetismo.

- Charles François du Fay (Francia; 1698 - 1739) postula la existencia de dos tipos de electricidad (estática), “vítrea” y “resinosa”; cada uno de ellos se repele a sí mismo y atrae al otro.
- Benjamin Franklin (EE.UU.; 1706 - 1790) interpreta los dos tipos de electricidad como un fluido sutil que se puede presentar en exceso (electricidad positiva) o en defecto (electricidad negativa).
- Charles Augustin de Coulomb (Francia; 1736 - 1806) demuestra que “la fuerza de atracción o repulsión entre dos cuerpos cargados eléctricamente es directamente proporcional a sus cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellos” (**ley de Coulomb**).
- Luigi Galvani (Italia; 1737 - 1798) descubre la corriente eléctrica, aunque le atribuye un origen animal.
- Alessandro Volta (Italia; 1745 - 1827) demuestra que la corriente eléctrica (electricidad dinámica) es un fenómeno inorgánico que se produce cuando se ponen en contacto dos metales diferentes con una disolución salina (“pila de Volta”).

La Física ilustrada: electricidad y magnetismo (2)

- André Marie Ampère (Francia; 1775 - 1836) descubre la relación mutua entre dos corrientes eléctricas y formula claramente la corriente eléctrica como el movimiento de la electricidad a lo largo de un conductor, diferenciándola de la fuerza impulsora que provoca el movimiento.
- Georg Simon Ohm (Alemania; 1787 - 1854), trabajando con circuitos eléctricos, descubre que la resistencia que ofrece un conductor al paso de la corriente eléctrica es directamente proporcional a su longitud e inversamente proporcional a su sección ("resistencia" eléctrica del conductor) y que el flujo de corriente (intensidad) a través del conductor es directamente proporcional a la diferencia de potencial (que mantiene el movimiento) e inversamente proporcional a la resistencia (**ley de Ohm**).
- Hans Christian Ørsted (Dinamarca; 1777 - 1851) descubre la relación entre la corriente eléctrica y el magnetismo, lo que constituye el origen del **Electromagnetismo**.

La Física ilustrada: electricidad y magnetismo (3)

- Michael Faraday (Gran Bretaña; 1791 - 1867) lleva a la cima los estudios sobre los fenómenos eléctricos y magnéticos:
 - Descubre la descomposición química mediante la corriente eléctrica (electrólisis) y formula sus leyes (**leyes de Faraday**):
 - 1ª Ley: La cantidad de electrolito descompuesto es proporcional a la cantidad de electricidad que atraviesa la disolución.
 - 2ª Ley: Una cantidad de electricidad dada descompone cantidades equivalentes de partículas cargadas (cada partícula transporta una carga proporcional a su “valencia” o capacidad de combinación de un elemento).
 - Descubre la producción de corriente eléctrica como proceso dinámico que requiere, bien un cambio de intensidad de otra corriente, bien el movimiento de un imán (inducción electromagnética).
 - Introduce el concepto de “campo”, es decir, el espacio en que se manifiesta una fuerza, que puede hacerse visible mediante “líneas de fuerza”, que representan los puntos en donde la fuerza tiene la misma intensidad.
 - Descubre el principio de conservación de la carga: *“La cantidad de cargas positivas y negativas permanece constante”*.

Y el libro de la Física contemporánea abre el capítulo del Electromagnetismo.

La Física ilustrada: calor, trabajo, energía

El concepto de *vis viva* de Gottfried Leibniz emprende un lento y sinuoso camino por el siglo XVIII.

- Daniel Bernoulli (Suiza; 1700 - 1782) aplica la conservación de la *vis viva* a los fluidos, demostrando que un fluido en movimiento compensa su *vis viva* con presión y no con altura.
- Joseph Black (Gran Bretaña; 1728 - 1799) considera el calor como un fluido imponderable (“**calórico**”) que puede penetrar los cuerpos, aumentando su temperatura; establece los conceptos de “capacidad calorífica” (cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de un cuerpo en un grado) y de “calor latente” (calor necesario para un cambio de estado, a temperatura constante).
- James Watt (Gran Bretaña; 1736 - 1819) perfecciona considerablemente las máquinas de Savery y Newcomen, extendiendo sus aplicaciones como fuente motriz, por lo que suele ser considerado como inventor de la **máquina de vapor** (generadora de la denominada **Revolución Industrial**).
- Benjamin Thompson [Rumford] (EE.UU.; 1753 - 1814) concluye que el movimiento mecánico se convierte en calor y, por tanto, el calor es una forma de movimiento.

Y ha comenzado a abrirse el capítulo de la Termodinámica en el libro de la Física contemporánea.

La gran explosión

Todos los conocimientos de la época se sintetizan en la “**Enciclopedia**”, publicada por Jean le Rond D’Alembert (Francia; 1717 - 1783) y Denis Diderot (Francia; 1713 - 1784) en 28 tomos, editados entre 1551 y 1772.

La Enciclopedia contribuye al amanecer de las ideologías, que explotan violentamente en 1789 (Revolución Francesa), acontecimiento que cierra la denominada Edad Moderna.

Índice - LA FÍSICA CONTEMPORÁNEA

El calor empieza a moverse	77
La conservación de la energía	78
La degradación de la energía	79
Implicaciones termodinámicas	80
Aquella luz	81
La luz electromagnética	82
Átomos y electricidad	83
Rayos negativos (1)	84
Rayos negativos (2)	85
Rayos positivos	86
Rayos penetrantes	87
Radiactividad e isótopos	88
Luz y calor (1)	89
Luz y calor (2)	90
La luz de los átomos	91
<i>Quantum</i> , el “átomo” de energía	92
Fotón, el “átomo” de luz (1)	93
Fotón, el “átomo” de luz (2)	94
Einstein: Las nuevas leyes del movimiento (1)	95
Einstein: Las nuevas leyes del movimiento (2)	96
Einstein: Las nuevas leyes del movimiento (3)	97
Einstein: La nueva gravitación universal (1)	98
Einstein: La nueva gravitación universal (2)	99
¿Ondas o corpúsculos?	100
La mecánica cuántica (1)	101
La mecánica cuántica (2)	102
La incertidumbre de Heisenberg	103
La antimateria	104
Reacciones nucleares	105
Los neutrones	106
Radiactividad artificial	107

Fisión nuclear, reacciones en cadena y ... ¡Bum!	108
Fusión termonuclear	109
Partículas elementales (1)	110
Partículas elementales (2)	111
Los quarks: extraños, encantados y coloreados	112
El acercamiento al microcosmos	113

El calor empieza a moverse

La industria del vapor plantea dos problemas prácticos (de rendimiento) en el uso de esta fuerza motriz, que implica el concurso de la ciencia para la búsqueda de soluciones:

- Mejorar técnicamente las máquinas para evitar deficiencias y fallos.
 - Utilizar las máquinas para sustituir mano de obra y así abaratar costes de producción.
-
- Thomas Young (Gran Bretaña; 1773 - 1829) propone el término **energía** (= “trabajo interno”) para distinguir los fenómenos que producen trabajo.
-
- Gaspar de Coriolis (Francia; 1792 - 1843) define dos magnitudes fundamentales.
 - **Energía cinética:** Es la mitad de la masa de un cuerpo por su velocidad al cuadrado.
 - **Trabajo:** Es la fuerza que se ejerce sobre un cuerpo por la distancia que lo hace recorrer venciendo su resistencia.

La conservación de la energía

El concepto de *energía* proporciona un vínculo unificador a los fenómenos mecánicos y térmicos.

- Julius Robert Mayer (Alemania; 1814 - 1878) presenta una cifra para el equivalente mecánico del calor y proclama su creencia en la conservación de la energía, pero sus trabajos no inspiran ningún interés y sólo consigue algún reconocimiento al final de su vida.
- James Prescott Joule (Gran Bretaña; 1818 - 1889) presenta las pruebas experimentales de que una cantidad de trabajo siempre produce la misma cantidad de calor, definiendo el “equivalente mecánico del calor” (4,184 julios/caloría).
- Hermann Ludwig von Helmholtz (Alemania; 1821 - 1894) lleva a cabo la formulación matemática detallada del **principio de conservación de la energía**, enunciado de la forma: *“En un intercambio de calor y trabajo, no se crea ni se destruye energía”*.

El principio de conservación de la energía generalmente puede formularse de diferentes maneras. Cuando sólo se considera el intercambio de calor y trabajo se denomina **Primer principio de la Termodinámica**.

La degradación de la energía

- Nicolas Léonard Sadi Carnot (Francia; 1796 - 1832) demuestra que la máxima eficiencia (cantidad de trabajo que puede realizar un sistema a partir de una determinada cantidad de calor) de una máquina térmica depende sólo de la diferencia de temperaturas entre las que se efectúa el intercambio de calor. En su obra *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance* (“Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego y sobre las máquinas adecuadas para desarrollar esta potencia”) es la primera vez que se contempla la conversión cuantitativa del calor en trabajo, y viceversa, por lo que se considera el fundador de la **Termodinámica** (= “calor en movimiento”).
- William Thomson [Kelvin] (Irlanda; 1824 - 1907) no sólo propone la escala absoluta de temperaturas basándose en que la energía del movimiento de las moléculas es nula a $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$, sino que también concluye que el calor se intercambia espontáneamente desde un foco a temperatura alta hasta otro foco de temperatura baja.
- Rudolf Julius Clausius (Alemania; 1822 - 1888) define la **entropía** (relación entre el contenido de calor de un sistema y su temperatura absoluta y que representa una medida de la parte no utilizable de la energía contenida en un sistema) para establecer el **principio de degradación de la energía** de la forma: “*En cualquier intercambio espontáneo de energía, la entropía aumenta*”.

El principio de degradación de la energía está basado en las ideas de Carnot, Kelvin y Clausius, conociéndose universalmente como **Segundo principio de la Termodinámica**.

Implicaciones termodinámicas

A menudo se enuncian ambos principios de la Termodinámica con la frase de Clausius:

***La energía del universo es constante;
la entropía tiende hacia un máximo.***

La Termodinámica consigue una estructura y entidad bien definidas, pero posee un sentido tan amplio que puede ser aplicada a otras disciplinas como una poderosa herramienta.

Aquella luz ...

A pesar de las evidentes ventajas de la teoría ondulatoria de la luz de Christiaan Huygens, la teoría corpuscular de Isaac Newton prevaleció hasta el siglo XIX.

- Thomas Young (Gran Bretaña; 1773 - 1829) asienta la teoría ondulatoria de la luz mediante experimentos de interferencia (propiedad por la cuál dos ondas superpuestas pueden reforzar o anular su movimiento).
- Agustin Jean Fresnel (Francia; 1788 - 1827) refuerza la teoría de las ondas transversales (la vibración de las ondas es perpendicular a la dirección de propagación) mediante experimentos de polarización (fenómeno por el cual ciertas sustancias modifican las ondas luminosas, de manera que quedan incapaces de reflejarse o refractarse en ciertas direcciones).

Se establece así finalmente la teoría ondulatoria de la luz, por lo menos durante casi un siglo más, si bien basada en el “éter cósmico” (el “quinto elemento” de Aristóteles).

Hasta que en 1887 Albert Abraham Michelson (Polonia; 1852 - 1931) y Edward Williams Morley (EE.UU.; 1838 - 1923) realizan el experimento fallido más importante de la historia: tras cuidadosísimas mediciones de interferencias luminosas destinadas a determinar la velocidad de la Tierra en relación con el éter cósmico tienen que concluir que **el éter no existe**.

La luz electromagnética

El concepto de *campo* introducido por Michael Faraday proporciona un vínculo unificador a los fenómenos eléctricos y magnéticos.

- James Clerk Maxwell (Gran Bretaña; 1831 - 1879) formula las ideas de Faraday de forma matemática sencilla (**ecuaciones de Maxwell**), que permiten:
 - Relacionar el valor del cambio del campo magnético con la distribución espacial del campo eléctrico, y viceversa.
 - Demostrar que los campos eléctricos y magnéticos no sólo están asociados a algunos cuerpos, sino que también pueden existir y propagarse por el espacio en forma de ondas electromagnéticas libres, que poseen una velocidad constante y transportan energía.
 - Calcular la relación entre las unidades del campo eléctrico y las del campo magnético, que resulta ser la velocidad de propagación de las ondas y que numéricamente **coincide con la velocidad de la luz**.

- Heinrich Rudolf Hertz (Alemania; 1857 - 1894) demuestra experimentalmente que una corriente eléctrica oscilante genera radiaciones electromagnéticas (“ondas hertzianas”) sujetas a los fenómenos de reflexión, refracción, polarización e interferencias.

Finalmente se ha llegado, de forma inesperada, a la explicación de la propagación de la luz, que puede ser considerada ahora como una onda electromagnética.

Átomos y electricidad

Aunque la teoría atómica de John Dalton triunfa, a finales del siglo XIX aún no se sabe nada de la estructura del átomo, que los químicos han abandonado a favor de los físicos, que la elucidan mediante estudios de la corriente eléctrica.

Los experimentos de Michael Faraday de dirigir la corriente eléctrica a través de electrolitos se amplían a los gases.

- William Crookes (Gran Bretaña; 1832 - 1919) demuestra que al aplicar una elevada tensión eléctrica en un tubo que contiene un gas a muy baja presión, el cátodo (electrodo negativo) emite una radiación (independiente del tipo de gas) que se mueve en línea recta, posee momento y puede ser desviada de su trayectoria por un campo magnético.
- Eugen Goldstein (Alemania; 1850 - 1930) llama a esta radiación “**rayos catódicos**”.

Rayos negativos (1)

- Joseph John Thomson (Gran Bretaña; 1836 - 1940) estudia los rayos catódicos:
 - Demuestra la desviación de los rayos catódicos por un campo eléctrico, lo que lleva a considerarlos como “corpúsculos” cargados negativamente.
 - Mide la relación entre su carga y su masa, lo que le lleva a concluir que se trata de partículas casi dos mil veces más ligeras que el átomo de hidrógeno.
 - Contempla estas partículas como el componente fundamental del átomo, la mínima carga eléctrica o “átomo de electricidad”, utilizándose el nombre de **electrón**, propuesto por George Johnstone Stoney (Irlanda; 1826 - 1911).
 - Postula la primera teoría para la estructura interna del átomo: una esfera de electricidad positiva con los electrones encajados en ella.

Rayos negativos (2)

- Robert Andrews Millikan (EE.UU.; 1868 - 1953) determina la magnitud de la carga del electrón y demuestra que cualquier carga eléctrica es un múltiplo de dicho valor.
- Pieter Zeeman (Holanda; 1865 - 1943) demuestra la existencia de electrones en los átomos, sometiendo la luz emitida por un elemento a un campo magnético intenso.
- Philipp Edward Anton von Lenard (Austria; 1862 - 1947) demuestra que la radiación emitida por ciertos metales sobre los que se hace incidir luz (efecto fotoeléctrico) está compuesta por electrones.
- Antoine Henri Becquerel (Francia; 1852 - 1908), experimentando con compuestos de uranio descubre que éstos emiten espontáneamente radiaciones, parte de las cuáles consisten en partículas con carga negativa (inicialmente llamados **rayos beta**), que resultan ser electrones impulsados a gran velocidad.

Rayos positivos

- Eugen Goldstein realiza experimentos en un tubo de vacío con un cátodo perforado, descubriendo unos rayos que pasan a través de las perforaciones (“**rayos canales**”), en sentido opuesto a los rayos catódicos y que dependen del tipo de gas.
- Joseph John Thomson propone para los rayos canales el nombre de “rayos positivos” y determina que se propagan en línea recta, poseen carga positiva y su trayectoria puede alterarse mediante campos eléctricos y magnéticos.
- Antoine Henry Becquerel también descubre rayos con carga positiva en la emisión espontánea de los compuestos de uranio, denominándolos **rayos alfa**.
- Ernest Rutherford (Nueva Zelanda; 1871 - 1937), realizando numerosos experimentos con radiaciones:
 - Descubre la similitud entre los rayos canales y los rayos alfa.
 - Sugiere que los rayos de carga positiva más simples deben ser los obtenidos a partir del hidrógeno.
 - Denomina **protones** a estas partículas fundamentales de carga positiva, cuya masa es tan grande como la del átomo de hidrógeno (casi dos mil veces la del electrón).

Rayos penetrantes

- Wilhelm Konrad Roentgen (Alemania; 1845 - 1923), trabajando con rayos catódicos descubre que, al chocar éstos con el ánodo, producen una radiación que atraviesa fácilmente materias opacas; a esta radiación la llama **rayos X**, que tienen como características:
 - No son desviados por los campos eléctricos ni por los campos magnéticos.
 - No son refractados, ni reflejados, ni polarizables; son tanto más absorbidos por los materiales cuanto mayor es la densidad de los mismos.
 - Puede aumentarse su intensidad colocando en la trayectoria de los rayos catódicos una placa de metal pesado (“anticátodo”).
- Antoine Henri Becquerel descubre una radiación semejante a los rayos X, pero más energética, en la emisión espontánea de los compuestos de uranio, denominándola **rayos gamma**.
- Marie Sklodowska Curie (Polonia; 1867 - 1934) confirma las emisiones alfa, beta y gamma de los compuestos de uranio y denomina **radiactividad** a este fenómeno de emisión de radiaciones por cierto tipo de sustancias.

Radiactividad e isótopos

Los estudios con elementos radiactivos permiten demostrar a Ernest Rutherford que tanto el uranio como el torio se descomponen en una serie de elementos intermedios (**serie radiactiva**). Para cada uno de ellos, la mitad de cualquier cantidad se desintegra en un tiempo fijo y característico del elemento (**vida media**).

- Frederick Soddy (Gran Bretaña; 1877 - 1956) describe teóricamente el modo exacto en que un elemento cambia al emitir radiactividad y sugiere que los diferentes elementos producidos en una serie radiactiva pueden ocupar el mismo lugar en la tabla periódica (**isótopos** = “mismo lugar”); los isótopos difieren en la masa del núcleo, pero tienen las mismas propiedades químicas.
- Francis William Aston (Gran Bretaña; 1877 - 1945) demuestra que algunos elementos están formados por una mezcla de isótopos utilizando su “espectrógrafo de masas”, mediante el cual un campo magnético desvía de distinta forma iones positivos de distinta masa.

El átomo ya no es indivisible ni inmutable. Se ha cumplido el viejo sueño de los alquimistas: la transmutación.

Luz y calor (1)

Un objeto emite luz cuando está caliente. La radiación emitida a causa de la temperatura se conoce como **radiación térmica**.

- Gustav Robert Kirchhoff (Alemania; 1824 - 1887) establece el modelo de **cuerpo negro** (emite y absorbe todas las longitudes de onda) y sugiere la construcción de su equivalente práctico (cámara cerrada y calentada, con un pequeño orificio).
- Josef Stefan (Austria; 1835 - 1893) determina experimentalmente que la intensidad de radiación emitida por un cuerpo es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura.
- Ludwig Boltzmann (Austria; 1844 - 1906) deduce la ley encontrada por Josef Stefan a partir de consideraciones termodinámicas.

Luz y calor (2)

- Wilhelm Wien (Alemania; 1864 - 1928), analizando las radiaciones de un cuerpo negro, obtiene empíricamente la “ley del desplazamiento”: *“la longitud de la onda correspondiente al máximo de intensidad emitido por un cuerpo es inversamente proporcional a su temperatura”*, que se cumple sólo para longitudes de onda cortas (altas frecuencias).
- John William Strutt Rayleigh (Gran Bretaña; 1842 - 1919), analizando las radiaciones de un cuerpo negro, obtiene empíricamente una ecuación que se cumple sólo para longitudes de onda largas (bajas frecuencias).

Todos estos datos experimentales intentan explicarse utilizando las ecuaciones de Maxwell del campo electromagnético, hasta que ...

La luz de los átomos

El estudio de los espectros no se limita al análisis de la luz natural. También los gases y vapores emiten luz cuando se les excita mediante calentamiento a alta temperatura (llama), descargas eléctricas (chispa) o corrientes eléctricas continuas (lámparas).

- Gustav Robert Kirchhoff (Alemania; 1829 - 1887) y Robert Wilhelm Bunsen (Alemania; 1811 - 1899) demuestran que cada elemento químico produce un espectro de emisión característico de líneas bien definidas, de colores e intensidades variables, separadas irregularmente por espacios oscuros.
- Johannes Jakob Balmer (Suiza; 1825 - 1898) propone una fórmula empírica para relacionar las cuatro líneas del espectro de emisión del hidrógeno en función de un número entero (de 3 a 6), que reproduce perfectamente los datos experimentales, pero que no posee ningún tipo de base física.
- Johannes Robert Rydberg (Suecia; 1854 - 1919) y Walter Ritz (Suiza; 1878 - 1909) generalizan la ecuación de Balmer en función de dos números enteros: el primero distingue una "serie" y el segundo distingue las líneas en una determinada serie, haciendo posible predecir todas las líneas del espectro del hidrógeno.

Pero aún faltan las piezas claves para la construcción del esquema conceptual necesario que explique este fenómeno.

Quantum, el “átomo” de energía

Max Karl Ernst Ludwig Planck (Alemania; 1858 - 1947):

- Planteando la correlación entre la energía y la entropía de un oscilador mediante argumentos termodinámicos y estadísticos, encuentra una ecuación empírica que abarca todo el espectro de la radiación del cuerpo negro (límites de Wien y de Rayleigh).
- La búsqueda del fundamento teórico de la ecuación obtenida le lleva a postular que la radiación electromagnética está constituida por elementos discretos de energía, que denomina “**cuantos**” (¿cuánto? = “quantum”) de radiación.
- La cantidad de energía que posee un cuanto es directamente proporcional a la frecuencia de la radiación que lo emite.
- El factor de proporcionalidad entre la energía del cuanto y la frecuencia, la “unidad elemental de acción”, ha resultado ser una de las constantes fundamentales del universo (“constante de Planck”, **h**).

La idea es tan revolucionaria que inicialmente ni el mismo Planck se cree su propia teoría. No obstante, la **teoría cuántica**, enunciada en 1900, constituye el límite entre la Física “clásica” y la Física “moderna”, siendo sus principales consecuencias inmediatas:

- La explicación del efecto fotoeléctrico (Albert Einstein, 1905).
- El replanteamiento del modelo atómico (Niels Bohr, 1913).

Fotón, el “átomo” de luz (1)

Los estudios experimentales de Phillip Lenard sobre el efecto fotoeléctrico muestran que:

- Para una frecuencia determinada, la energía de los electrones emitidos no depende de la intensidad de la luz incidente, pero su número sí.
- Para cada metal existe una frecuencia (“umbral”), por debajo de la cual no se produce la emisión de electrones, sea cual fuere la intensidad de la radiación incidente.

Albert Einstein (Alemania; 1879 - 1955) aplica la teoría cuántica de Max Planck para explicar el efecto fotoeléctrico:

- El cuanto de energía liberado por el emisor no se diluye por todo el frente de la onda luminosa que se propaga, sino que permanece intacto como cuanto de luz (mas tarde, “**fotón**”), de la misma energía.
- Cuando un cuanto de luz incide sobre el metal, le comunica a un electrón toda su energía: a mayor intensidad de la luz, ésta transporta un mayor número de cuantos de la misma frecuencia y libera un mayor número de electrones con la misma energía cinética.
- Al aumentar la frecuencia de la luz incidente, sus cuantos tienen mayor energía, por lo que liberan los electrones del metal con mayor energía cinética.
- La luz con una frecuencia inferior a un valor crítico (“umbral”) contendría unos cuantos con tan bajo contenido en energía que, aunque fuesen muchos (intensidad alta), no serían capaces de librerá ningún electrón.

Fotón, el “átomo” de luz (2)

Se ha producido un cambio de escala en la interpretación de los fenómenos. La luz ordinaria tiene tantos fotones sobre cada frente de onda, que la individualidad de éstos queda enmascarada y la energía parece distribuida de forma continua. Cuando se analizan fenómenos a escala subatómica es cuando se manifiesta claramente la “estructura fina” de la onda luminosa. Una radiación no revela nunca todas sus características al mismo tiempo y en un conjunto de experimentos; por otra parte, los fotones y otras entidades subatómicas difieren de los cuerpos a gran escala en que no pueden llevarse a cabo experimentos con una determinada entidad.

Es por este trabajo sobre la teoría cuántica de la luz por el que Albert Einstein recibe el premio Nobel de Física en 1921.

- Arthur Holly Compton (EE.UU.; 1892 - 1962) descubre que algunos rayos X dispersados por la materia aumentan su longitud de onda (**efecto Compton**), lo que explica suponiendo que un fotón (partícula de luz) choca con un electrón (partícula de materia), cediéndole parte de su energía.

Einstein: Las nuevas leyes del movimiento (1)

Albert Einstein publica en 1905 su trabajo *Zur Elektrodynamik bewegter Körper* ("Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento"), en el que presenta por primera vez su **teoría de la relatividad especial**.

La teoría de la relatividad especial está basada en dos postulados fundamentales:

- Principio de la relatividad: Las leyes de la electrodinámica y de la óptica serán igualmente válidas para todos los sistemas de referencia en los cuáles se cumplan las leyes de la mecánica (sistemas inerciales, que se mueven con velocidad constante).
- La luz se propaga siempre en el espacio vacío con una velocidad definida, independiente del estado de movimiento del cuerpo emisor.

El concepto de "simultaneidad" se vuelve relativo:

- Sucesos que ocurren en el mismo lugar pero en diferentes tiempos en un sistema, ocurren en diferentes lugares cuando son observados desde otro sistema que se mueve respecto al primero.
- Sucesos que ocurren al mismo tiempo pero en diferentes lugares de un sistema, ocurren en diferentes tiempos cuando son observados desde otro sistema que se mueve respecto al primero.
- Sucesos que ocurren en el mismo lugar y al mismo tiempo serán simultáneos para todos los observadores.

Einstein: Las nuevas leyes del movimiento (2)

El concepto de “sistema de referencia” produce efectos en el espacio y en el tiempo:

- Un observador de un sistema encontraría, a partir de sus propias medidas, que los intervalos de longitud de los objetos que se mueven con otro sistema se acortan (contracción de la longitud).
- Un observador de un sistema encontraría, a partir de sus propias medidas, que los intervalos de tiempo entre los sucesos que se producen en otro sistema se alargan (dilatación del tiempo).
- Estos efectos aparentes no existen para el sistema propio de cada observador y van desapareciendo a medida que la velocidad del movimiento disminuye respecto a la velocidad de la luz.

La conclusión más importante de la teoría de la relatividad especial es que **“la masa de un cuerpo es la medida de su contenido de energía”**, siendo la consecuencia del límite de la velocidad de la luz:

- La aplicación de una fuerza constante causa un aumento de la velocidad de un cuerpo; también se incrementa su energía cinética ya que, aunque la masa permanece constante, aumenta la velocidad.
- En el límite de la velocidad de la luz no permite aumentar más la velocidad, por lo que la fuerza ha de incrementar la energía cinética del cuerpo, incrementando su masa.
- La energía será, pues, equivalente a la masa, en una relación que resulta ser el cuadrado de la velocidad de la luz; así pues, la radiación electromagnética transfiere inercia entre los cuerpos.

Einstein: Las nuevas leyes del movimiento (3)

La relatividad especial de Einstein no contradice las leyes del movimiento de Newton, sólo constituye una generalización de las mismas. Las diferencias entre ambos planteamientos sólo se hacen patentes a velocidades cercanas a la velocidad de la luz.

Einstein: La nueva gravitación universal (1)

Albert Einstein publica en 1916 su trabajo *Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie* (“El fundamento de la teoría de la relatividad general”), en el que presenta por primera vez su **teoría de la relatividad general**.

La teoría de la relatividad general está basada en un postulado fundamental:

- La masa inerte de todo objeto tiene el mismo valor que su masa gravitatoria.

Esta “teoría relativista de la gravitación” conduce a los siguientes efectos:

- Todo campo gravitatorio puede atribuirse a una aceleración relativa.
- La gravedad afecta a todo lo que transporta energía.
- La gravedad altera las propiedades del espacio y del tiempo.

Para el desarrollo de la teoría es necesario utilizar las siguientes herramientas matemáticas:

- El concepto espacio-tiempo, desarrollado por Hermann Minkowski (Rusia; 1864 - 1909), por el que se introduce el tiempo como cuarta dimensión.
- La geometría no euclídea de Georg Friedrich Riemann (Alemania; 1826 - 1866), basada en el axioma de que por un punto situado en una recta no puede trazarse a ella ninguna paralela (geometría sobre una superficie esférica).

Einstein: La nueva gravitación universal (2)

Se dan así las siguientes circunstancias:

- Los fenómenos gravitacionales son manifestaciones de la estructura geométrica del espacio-tiempo.
- El espacio-tiempo tetradimensional es curvo, y su curvatura es real.
- La curvatura del espacio-tiempo es debida a la cantidad de materia y determina su movimiento.

La relatividad general de Einstein se diferencia mucho en sus principios de la gravitación universal de Newton, pero sus resultados prácticos dificultan su diferenciación, que se ha descubierto en los siguiente fenómenos:

- La revolución de las elipses de las órbitas planetarias (precesión del perihelio de Mercurio).
- La curvatura de los rayos de luz por la acción de los campos gravitatorios (luz de las estrellas afectada por el Sol).
- El desplazamiento al rojo de la frecuencia de la luz procedente de una fuente de gran masa (enana blanca de Sirio).

¿Ondas o corpúsculos?

Si Albert Einstein ha demostrado que la luz se comporta como una partícula, podría existir una simetría teórica por la que las partículas (principalmente los electrones) se comportasen como ondas electromagnéticas.

- Louis Victor De Broglie (Francia; 1892 - 1987), combinando la ecuación de Albert Einstein que relaciona la masa y la energía y la ecuación de Max Planck que relaciona la frecuencia y la energía, demuestra que el movimiento de cada partícula material lleva asociado una “onda piloto” que se propaga en el espacio junto con la partícula; dicha onda tiene una longitud inversamente proporcional (múltiplo entero de la constante de Planck) a la cantidad de movimiento de la partícula.

Esta tesis teórica (“**dualidad onda-corpúsculo**”) habría de ser sometida a contraste experimental: las partículas debe mostrar propiedades ondulatorias.

- Clinton Joseph Davisson (EE.UU.; 1881 - 1958) y Georg Paget Thomson (Gran Bretaña; 1892 - 1975) encuentran que una corriente de electrones sufre difracción (fenómeno típicamente ondulatorio) a través de láminas metálicas, pudiendo calcular la longitud de onda asociada al fenómeno, que coincide con la predicha por Louis De Broglie.

Luis De Broglie ha relacionado la mecánica de las partículas con las ondas electromagnéticas, a través de consideraciones cuánticas.

La mecánica cuántica (1)

La Física cuántica toma su mayor impulso cuando aparecen dos teorías radicalmente diferentes para tratar el mismo tipo de experiencia.

- Werner Karl Heisenberg (Alemania; 1901 - 1976) desarrolla la **mecánica matricial**, por la cual consigue explicar las líneas espectrales de los átomos utilizando sólo relaciones entre magnitudes observables, operándolas en forma de matrices (conjuntos de números ordenados en filas y columnas), considerando los electrones como partículas, aunque sin asignarles un espacio definido.
- Erwin Schrödinger (Austria; 1887 - 1941) desarrolla la **mecánica ondulatoria**, por la cual identifica los diferentes niveles de energía de los átomos con las vibraciones de una “función de onda”, considerando el comportamiento ondulatorio del electrón. Convirtiendo la energía de la partícula en una operación matemática sobre esa función, obtiene la denominada “**ecuación de onda**” (“**ecuación de Schrödinger**”).
- Max Born (Polonia; 1882 - 1970) demuestra que ambos desarrollos son dos formalismos matemáticos diferentes, que coinciden en sus resultados: la mecánica matricial se basa en **matrices** para representar las propiedades físicas; la mecánica ondulatoria se basa en **operadores** (conjunto de operaciones) para representar las propiedades físicas. O, lo que es lo mismo, las matrices de Heisenberg representan las soluciones tabuladas de la ecuación de Schrödinger.

La mecánica cuántica (2)

El método de la mecánica ondulatoria resulta menos abstracto que el de la mecánica matricial, por lo que termina imponiéndose, no sin controversias, resultando la base de la actual mecánica cuántica, que utiliza la denominada **ecuación de Schrödinger**, una ecuación diferencial que tiene solución para determinadas funciones de onda que representan cada estado energético del átomo. Dichas funciones de onda no poseen significado físico, pero su cuadrado representa la probabilidad de encontrar al electrón en un punto determinado del espacio.

La incertidumbre de Heisenberg

Werner Karl Heisenberg deduce en 1927 una de las consecuencias más importantes de la mecánica cuántica, **el principio de incertidumbre**:

- Existen ciertos pares de propiedades físicas de una partícula (posición y momento; energía y tiempo) que no pueden medirse simultáneamente hasta un grado de exactitud arbitrariamente elevado: cuanto más exacta es la medida de una propiedad, menos exacta será la medida de la otra propiedad.
- Es aplicable a cualquier objeto, pero sólo constituye una limitación significativa a escala atómica, debido a que la indeterminación es del orden de la constante de Planck (muy pequeña): no se puede medir, pero se puede medir hasta qué punto se puede medir.
- Pone de manifiesto que en el mundo atómico existe una interacción entre el fenómeno y el observador: medir altera lo medido.

El principio de incertidumbre supone la renuncia al principio determinista de causalidad (causa - efecto), que no se había cuestionado desde la época de los filósofos griegos. Cualquier intento para especificar la estructura y la evolución de un sistema atómico, sólo encontrará aleatoriedad e indeterminación; el uso de la experimentación queda en entredicho.

En todo caso, yo estoy convencido de que Él, al menos, no juega a los dados.

Carta de Albert Einstein a Max Born (4 de diciembre de 1926)

La antimateria

- Paul Adrien Maurice Dirac (Gran Bretaña; 1902 - 1984) introduce correcciones relativistas en la mecánica cuántica, postulando una nueva función de onda que describiría una partícula, aún no observada, que tuviese la misma masa que el electrón, pero con carga opuesta. Asimismo propone la existencia de una partícula que tuviese la misma masa que el protón, pero con carga opuesta.
- Carl David Anderson (EE.UU.; 1905 - 1991) demuestra experimentalmente la existencia del anti-electrón, al que se denomina **positrón**.
- Emilio Segré (Italia; 1905 - 1989) demuestra experimentalmente, veinte años después, la existencia del anti-protón.

Se ha descubierto la antimateria; sus propiedades físicas y químicas deben ser las mismas que las de la materia ordinaria. Sólo se pueden reconocer poniéndolas en contacto mutuo: se aniquilarían en una tremenda explosión (conversión de su masa en energía).

Reacciones nucleares

Si se puede reordenar la estructura atómica de las moléculas, también se debería poder reordenar la estructura del núcleo de los átomos en reacciones nucleares.

Como las energías implicadas son mucho más altas, se hace necesario acelerar las partículas para aumentar su energía y así convertirlas en “proyectiles” capaces de producir la desintegración del núcleo atómico.

- Ernest Rutherford lleva a cabo la primera reacción nuclear, bombardeando átomos de nitrógeno con partículas alfa (emitidas por elementos radiactivos naturales), obteniendo átomos de oxígeno.
- John Douglas Cockroft (Gran Bretaña; 1897 - 1967) y Ernest Thomas Sinton Walton (Irlanda; 1903 - 1995) diseñan un acelerador de partículas capaz de obtener protones más energéticos que las partículas alfa naturales; bombardeando con ellos átomos de litio, producen partículas alfa.
- Ernest Orlando Lawrence (EE.UU.; 1901 - 1958) diseña el “**ciclotrón**”, un acelerador de partículas en trayectorias circulares, predecesor de los modernos aceleradores de hasta diez kilómetros de diámetro.

Los neutrones

Desde que Ernest Rutherford descubre el protón, se puede comprobar que los núcleos atómicos poseen mayor masa que la correspondiente a los protones que proporcionan su carga.

- James Chadwick (Gran Bretaña; 1891 - 1974), bombardeando núcleos de berilio con partículas alfa, observa una radiación que se manifiesta por la expulsión de protones de la parafina y deduce que la mejor manera de explicar este efecto era suponer la expulsión de partículas neutras (con la misma masa que los protones), a las que llama **neutrones**.

Por fin puede explicarse la existencia de los isótopos: todos tienen el mismo número de protones (y, por tanto, de electrones, que definen sus propiedades físicas), pero difieren en el número de neutrones.

Radiactividad artificial

- Frédéric Joliot-Curie (Francia; 1900 - 1958) e Irène Joliot-Curie (Francia; 1897 - 1956) bombardean núcleos de aluminio con partículas alfa y obtienen un isótopo del fósforo, no conocido en la naturaleza; han descubierto la “radiactividad artificial”, es decir, cualquier elemento puede ser radiactivo si se prepara el isótopo adecuado (**radioisótopo**). Ello resultaría, no sólo en el descubrimiento posterior de los elementos que faltan en la tabla periódica (isótopos inestables), sino también en importantes aplicaciones en medicina, industria e investigación.
- Enrico Fermi (Italia; 1901 - 1954) descubre que los neutrones son particularmente eficaces para iniciar reacciones nucleares, si son frenados mediante una capa de agua o parafina. Los llamados “neutrones térmicos” o “neutrones lentos” habrían de convertirse en proyectiles muy importantes, no sólo en la obtención de los elementos más pesados que el uranio (“transuránidos”), el más pesado que se conoce en este momento, sino también en el desencadenamiento de un fenómeno que cambiaría el mundo.

Fisión nuclear, reacciones en cadena y ... ¡Bum!

- Otto Hahn (Alemania; 1879 - 1968) y Lise Meitner (Austria; 1878 - 1968) descubren que el núcleo de uranio bombardeado con neutrones por Enrico Fermi realmente se ha partido aproximadamente por la mitad, para producir bario radiactivo. Es la primera **fisión nuclear**.
- Leo Szilard (Hungría; 1898 - 1964) se da cuenta que la fisión del uranio emite, a su vez, neutrones que provocan nuevas escisiones, produciéndose una **reacción en cadena** que libera enormes cantidades de energía en una fracción de segundo.

La Segunda Guerra Mundial está a punto de estallar. El gobierno de los EE.UU. lanza un programa de investigación para obtener la reacción en cadena. El “Proyecto Manhattan” permite construir a Enrico Fermi una “pila atómica” con suficiente cantidad de uranio (*masa crítica*) y barras de grafito (*moderador*).

El 2 de diciembre de 1942, en la universidad de Chicago, “*El navegante italiano ha llegado al nuevo mundo*” (telegrama de Arthur Holly Compton): la reacción en cadena se mantiene y comienza la era atómica.

Aunque diez años después las pilas atómicas, rebautizadas como **reactores nucleares**, comienzan a utilizarse para producir electricidad comercial a gran escala, en agosto de 1945 los habitantes de las ciudades japonesas de Hiroshima y Nagasaki fueron los primeros en comprobar el poder también destructivo de esta fuente de energía. Sobre todo aquéllos que vivieron para contarlo.

Fusión termonuclear

- William Draper Harkins (EE.UU.; 1873 - 1951) demuestra que si cuatro átomos de hidrógeno se convierten en un núcleo de helio, se pierde algo de masa, que aparece en forma de energía (**fusión nuclear**) y sugiere que mediante este mecanismo producen energía las estrellas.

Para lograr la fusión entre núcleos ligeros se necesita una gran cantidad de energía, lo que sólo se ha conseguido de forma instantánea como “bomba de hidrógeno”, “bomba H” o “bomba de fusión”, utilizando como detonante una bomba de fisión.

Se sigue estudiando la manera de obtener de forma controlada la reacción de fusión termonuclear, utilizando potentes campos magnéticos, en un intento de conseguir la fuente de energía útil del futuro.

Partículas elementales (1)

El modelo atómico de tres tipos de partículas fundamentales, los nucleones (protones y neutrones) y los electrones, explica, en principio, la constitución de la materia.

- Wolfgang Pauli (Austria; 1900 - 1958) sugiere que, cuando se emite una partícula beta en una desintegración nuclear, se emite otra, sin carga y quizá sin masa, que es responsable de la energía que falta para completar el balance.
- Enrico Fermi estudia la partícula postulada por Wolfgang Pauli y le da el nombre de **neutrino** (“pequeña cosa neutra”).
- Hideki Yukawa (Japón; 1907 - 1981) propone que las fuerzas que mantienen unidos a los nucleones se deben al intercambio constante entre ellos de una partícula.
- Carl David Anderson descubre diez años después en los rayos cósmicos unas partículas con las propiedades requeridas por la teoría de Hideki Yukawa.

A estas partículas se las denomina **mesones** (“meso” = entre), ya que su masa está comprendida entre la del protón y la del electrón.

Partículas elementales (2)

Durante los años siguientes se descubren varias partículas más pesadas que los protones que reciben el nombre de **hiperones** (“hiper” = grande).

En la década de 1950 el mundo de las partículas subatómicas es una selva, cuya visión global puede expresarse según sus masas crecientes (“hadrón” = masivo):

- No hadrones
 - Fotón
 - Leptones: neutrinos, electrón
- Hadrones
 - Mesones
 - Bariones: protón, neutrón, hiperones

También se clasifican las partículas elementales mediante la estadística cuántica:

- **Bosones:** Partículas cuya distribución de energía sigue una función estadística del tipo de **Bose** - Einstein [Jagadis Chandra Bose (India; 1858 - 1937) - Albert Einstein], es decir, cada estado cuántico puede estar ocupado por más de una partícula y, por tanto, no cumplen el principio de exclusión de Pauli. Este grupo de partículas comprende a los fotones y a los mesones.
- **Fermiones:** Partículas cuya distribución de energía sigue una función estadística del tipo de **Fermi** - Dirac [Enrico Fermi - Paul Adrien Maurice Dirac], es decir, cada estado cuántico sólo puede estar ocupado como máximo por una partícula y, por tanto, sí cumple el principio de exclusión de Pauli. Este grupo de partículas comprende a los leptones y a los bariones.

Los quarks: extraños, encantados y coloreados

Three quarks for mister Mark.

[Tres quarks para el señor Mark]

Finnegan's wake [El despertar de Finnegan]

James Joyce (1882 - 1941)

- Murray Gell-Mann (EE.UU.; 1929 -) y Georg Zweig (EE.UU.; 1937 -) proponen el concepto de **quark** como partículas de vida más breve, cuya existencia viene revelada por estados en interacciones en las que se ven envueltos los hadrones, de vida más larga.
- Richard Phillips Feynman (EE.UU.; 1918 - 1988) confirma experimentalmente la existencia de los quarks como componentes del protón.

Inicialmente, bastan tres características de los quarks para ensamblar hadrones normales: **arriba** (*up*), **abajo** (*down*) y **extrañeza** (*strange*).

El descubrimiento de nuevos hadrones hace que sea necesario definir otras tres características de los quarks: **encanto** (*charm*), **encima** (*top*) y **debajo** (*bottom*).

- Murray Gell-Mann y Harald Fritzch (Alemania; 1943 -) postulan la existencia de un nuevo número cuántico de los quarks, el "**color**" para explicar el comportamiento de nuevas partículas: se habla ahora de quarks "rojos", "verdes" y "azules".

¿Constituyen los quarks los ladrillos
verdaderamente indivisibles y fundamentales de la materia?

El acercamiento al microcosmos

La teoría electromagnética explica la propagación en el vacío de la luz, pero no la transferencia de fuerza entre cargas.

- Julian Seymour Schwinger (EE.UU.; 1918 - 1994) plantea el concepto de “cuanto de fuerza” y establece las bases de la Electrodinámica Cuántica, QED (**Q**uantum **E**lectro**D**ynamics), que traduce la intensidad de un campo clásico a la densidad local de sus cuantos de fuerza.

La Electrodinámica Cuántica permite relacionar la fuerza con la materia a través de las partículas elementales:

- Los bosones son propagadores de las fuerzas de interacción nuclear débil.
- Los fermiones son los constituyentes de la materia.
- Los quarks son propagadores de las fuerzas de interacción nuclear fuerte.

La asignación del número cuántico de color a los quarks hace que se desarrolle la Cromodinámica cuántica, QCD (**Q**uantum **C**hromo**D**ynamics), que se ocupa de la interacción electromagnética a escala cuántica para explicar la estructura y comportamiento de la materia.

Índice - LA QUÍMICA CONTEMPORÁNEA

Las leyes fundamentales de la Química	117
Dalton: Un nuevo atomismo para una nueva Química	118
Un ligero inconveniente gaseoso	119
Elementos: Símbolos y clasificación (1)	120
Elementos: Símbolos y clasificación (2)	121
¡La Tabla!	122
Los gases, testigos de una unión	123
La afortunada imperfección de los gases	124
La Química y la vida	125
Teoría atómica y estructura molecular	126
Tipos, “mecanos” y 3D	127
La Química y el calor	128
Ese delicado equilibrio	129
Dos grandes “equilibristas”	130
La velocidad de las reacciones y los catalizadores	131
La tabla periódica definitiva	132
Cálculos químicos: el primer mol	133
El átomo de Rutherford	134
El átomo de Bohr	135
... y Sommerfeld	136
La estructura electrónica del átomo (1)	137
La estructura electrónica del átomo (2)	138
El modelo electrónico de orbitales	138
El poder enlazante de los electrones	139
El enlace según la teoría cuántica	140
Iones, ácidos y electrones (1)	141
Iones, ácidos y electrones (2)	142
La Química se “integra”	143
El moderno mol	144

Las leyes fundamentales de la Química

Una vez definido el concepto de elemento, se empieza a analizar un gran número de sustancias para determinar si son o no compuestos. Ahora siempre se tiene en cuenta el principio de conservación de la materia.

- Jeremías Benjamin Richter (Alemania; 1762 - 1807) enuncia la **ley de las proporciones equivalentes**: *“Los pesos de diferentes elementos que se combinan con un mismo peso de un elemento dado, son los pesos relativos de aquellos elementos cuando se combinan entre sí, o bien múltiplos o submúltiplos de estos pesos”*.
- Joseph Louis Proust (Francia; 1754 - 1826) enuncia la **ley de las proporciones definidas**: *“Todos los compuestos contienen elementos en ciertas proporciones definidas y no en otras combinaciones, independientemente de las condiciones en las que se hayan formado”*.
- John Dalton (Gran Bretaña; 1766 - 1844) enuncia la **ley de las proporciones múltiples**: *“Las cantidades de un mismo elemento que se unen con una cantidad fija de otro elemento para formar, en cada caso, un compuesto distinto, están en la relación de números enteros sencillos”*.

Se han establecido las bases de la **estequiometría** (= “medida de los elementos”); pero falta una teoría que explique a qué se deben estas leyes, que no tarda en llegar.

Dalton: Un nuevo atomismo para una nueva Química

John Dalton (Gran Bretaña; 1766 - 1844) integra las leyes de las combinaciones de los elementos retomando la idea atomista de Demócrito: la materia está formada por pequeñas partículas denominadas **átomos**.

La teoría atómica está basada en las siguientes premisas:

- La materia está compuesta por átomos indivisibles.
- Los átomos de cada elemento son invariables: son iguales en todas sus propiedades y conservan su identidad.
- Los compuestos se forman por la unión de átomos de distintos elementos en una relación sencilla.
- Los “átomos compuestos” de una sustancia pura son idénticos.
- En las reacciones químicas los átomos no sufren alteración, sólo se reorganizan en una nuevas distribuciones.

La teoría atómica permite alcanzar los siguientes logros:

- Explica el principio de conservación de la masa: si los átomos sólo se reagrupan, no puede haber variación de masa.
- Explica las tres leyes de las proporciones: una teoría continua de la materia sería incapaz de explicarla.
- Permite establecer una tabla de pesos atómicos (relativos): utiliza el hidrógeno como referencia, por ser la sustancia más ligera de todas las conocidas.

Un ligero inconveniente gaseoso

- Joseph Louis Gay Lussach (Francia; 1778 - 1850) enuncia la **ley de los volúmenes de combinación**: *“Cuando dos gases se combinan y los compuestos resultantes son también gaseosos, entre los volúmenes de todos ellos, medidos en las mismas condiciones, existe una relación sencilla de números enteros”*.

Las relaciones de volúmenes de los elementos de un compuesto gaseoso no son explicables, en principio, mediante la teoría atómica, ya que Dalton supone que un compuesto se forma por la combinación de un solo átomo de un elemento con un solo átomo de otro.

Cuando Avogadro señala que en los gases correspondientes a elementos las últimas partículas no son átomos aislados, sino agregados de átomos, que denomina **moléculas** (= “pequeñas masas”), nadie le hace caso.

- Stanislao Cannizzaro (Italia; 1826 -1910) pone orden en los métodos de señalar la estructura de las sustancias en términos de átomos y moléculas. En el Primer Congreso Internacional de Química (Karlsruhe, Alemania; 1860) redescubre las hipótesis de Avogadro, las aplica a las leyes ponderales y volumétricas y hace posible la determinación de pesos moleculares y pesos atómicos.

La teoría atómica finalmente encaja.

Elementos: Símbolos y clasificación (1)

Al ir aumentando el número de elementos conocidos (doce en 1700; treinta y tres en 1800) y establecerse cada vez mejor sus propiedades físicas y químicas, surge la necesidad de relacionarlos de modo sistemático, intentando encontrar algún tipo de "periodicidad".

En el desarrollo de su teoría atómica, Dalton introduce el uso de símbolos para representar los elementos y sus compuestos, consistentes en pequeños círculos diferentes para representar los átomos. Pero la nomenclatura aceptada es la propuesta por Jöns Jacob Berzelius (Suecia; 1779 - 1848), que sugiere el uso de una o dos letras iniciales del nombre (en latín) para los elementos; en las agrupaciones de átomos se representa el número de ellos por un superíndice (actualmente subíndice).

- Johann Wolfgang Döbereiner (Alemania; 1780 - 1849) capta un atisbo de orden, encontrando grupos de tres elementos ("tríadas") con propiedades similares, débilmente relacionadas con el peso atómico, concepto aún desestimado por falta de claridad.

Elementos: Símbolos y clasificación (2)

Cuando en el Primer Congreso Internacional de Química (1860) se aclara la cuestión de los pesos atómicos aparecen nuevas ideas que relacionan esta propiedad con un cierto orden.

- John Alexander Reina Newlands (Gran Bretaña; 1838 - 1898) ordena los elementos según sus pesos atómicos crecientes en columnas de siete (“ley de las octavas”); los que son semejantes tienden a quedar en la misma fila. Como las filas también contienen elementos dispares, el intento de organización no tiene éxito.
- Julius Lothar Meyer (Alemania; 1830 - 1895) representa los volúmenes atómicos de los elementos en función de sus pesos atómicos y obtiene una serie de ondas que corresponderían a “períodos”: el primer período constituido sólo por el hidrógeno, el segundo y el tercero, de siete elementos cada uno (octavas de Newlands) y los dos siguientes, más largos.

Pero Meyer ha llegado demasiado tarde ...

¡La Tabla!

- Dimitri Ivanovich Mendeleiev (Rusia; 1834 - 1907) ordena los elementos conocidos (63) según su peso atómico creciente, bajo el punto de vista de la **valencia**, construyendo una tabla similar a la de Newlands, pero con períodos crecientes, como hace Meyer.

La primer tabla se publica en 1869; dos años después cambia las filas por columnas, quedando definitivamente construida la tabla que se denomina **Sistema Periódico**: las columnas representan los **grupos** de elementos y las filas representan los **períodos**.

El gran éxito de este descubrimiento reside en el uso espectacular que hace de la tabla:

- Cambia algunos elementos de orden para que queden en la columna de la misma valencia.
- Considera necesario dejar huecos en la tabla.
- Predice la existencia de elementos aún no conocidos, que deben llenar los huecos, y aún más, también predice sus propiedades.
- **¡Y esos elementos se descubren!**

De nuevo se abre paso un esquema simple, revelando insospechadas analogías entre los elementos. Pero quedan por explicar las regularidades observadas en la tabla periódica según un modelo físico para el átomo.

Los gases, testigos de una unión

La teoría atómica y las leyes de la conservación de la energía están en plena ebullición ...

- Rudolf Julius Clausius (Alemania; 1822 - 1888) resucita el modelo cinético para los gases de Daniel Bernuilli utilizando la teoría atómica de John Dalton, relacionando las propiedades térmicas y mecánicas de los gases.
- James Clerk Maxwell (Gran Bretaña; 1831 - 1879) y Ludwig Boltzmann (Austria; 1844 - 1906), de forma independiente, consideran una distribución estadística de velocidades de las partículas de un gas, relacionando este movimiento interno con sus propiedades térmicas observables (temperatura, calor). Se trata de la **teoría cinética de los gases**, que enlaza la Mecánica con la Termodinámica.

La afortunada imperfección de los gases

La combinación de las leyes de la compresibilidad (Boyle y Mariotte) y de la dilatación (Gay-Lussach y Charles) permite obtener la **ecuación de los gases ideales**, que relaciona de un modo simple las tres variables que definen el estado de un gas (presión, volumen y temperatura), en condiciones ordinarias (presiones “bajas” y temperaturas “altas”).

Si los gases fuesen estrictamente ideales, no se podrían licuar. Pero paulatinamente se logra de forma experimental la licuefacción de muchos de ellos, inicialmente comprimiéndolos y, más tarde, enfriándolos, lo que lleva a Thomas Andrews (Irlanda; 1813 - 1889) a definir el “punto crítico” (condiciones de presión y temperatura en las que coexisten las fases líquida y gaseosa de un compuesto, es decir, ambas fases poseen igual densidad).

- Johannes Diderik Van der Waals (Holanda; 1837 - 1923) obtiene una **ecuación de estado para los gases reales**, que permite explicar la existencia del punto crítico a la luz de la teoría cinética de los gases:
 - Las moléculas no son simples masas puntuales (lo que afecta al volumen).
 - Las moléculas ejercen fuerzas de interacción entre ellas (lo que afecta a la presión).

La Química y la vida

Hasta el siglo XIX se diferencian claramente los compuestos procedentes de animales o vegetales (vivos u “orgánicos”) de aquéllos de origen mineral (no vivos o “inorgánicos”), porque se piensa que los primeros requieren una “fuerza vital” para ser formados (**vitalismo**).

- Friedrich Wöhler (Alemania; 1800 - 1882) obtiene urea (orgánica) a partir de cianato amónico (inorgánico), inspirando a otros a tratar el problema de la síntesis orgánica a partir de la inorgánica.
- Justus von Liebig (Alemania; 1803 - 1873) establece que la actividad vital proviene de la energía que se produce de la oxidación de los alimentos (hidratos de carbono y grasas) en el interior del cuerpo.
- Adolph Wilhelm Hermann Kolbe (Alemania; 1818 - 1884) sintetiza ácido acético a partir de sus elementos constituyentes: carbono, hidrógeno y oxígeno.
- Pierre Eugène Marcellin Berthelot (Francia; 1827 - 1907) lleva a cabo la síntesis sistemática de compuestos orgánicos: metano, acetileno, metanol, etanol y benceno.

La teoría del vitalismo, ya bastante perjudicada, queda totalmente destrozada.

Teoría atómica y estructura molecular

Las sustancias inorgánicas reciben fácil interpretación atómica mediante fórmulas empíricas (determinadas por experimentación), que dan el número de átomos de cada tipo en una molécula, debido a que aquél es muy bajo (generalmente menor que ocho). Las sustancias orgánicas más sencillas tienen moléculas formadas por un número alto de átomos (generalmente mayor que doce), principalmente carbono, hidrógeno y oxígeno, cuyas fórmulas empíricas pueden plantear serios problemas.

El descubrimiento de compuestos con idénticas fórmulas empíricas pero distintas propiedades induce a Jöns Jacob Berzelius (Suecia; 1779 - 1848) a sugerir el concepto de **isómero** (= "iguales proporciones"), que establece las bases para intuir que la estructura de los átomos en la molécula puede ser la responsable de sus propiedades.

Tipos, “mecanos” y 3D

- Auguste Laurent (Francia; 1807 - 1853) cree que las moléculas orgánicas pueden agruparse en familias o “tipos”, cada una de las cuáles están construidas según una cierta agrupación atómica.
- Edward Frankland (Gran Bretaña; 1825 - 1899) propone la denominada “teoría de la valencia” (= “poder”), por la cual cada átomo tiene un poder de combinación fijo.
- Friedrich August Kekule von Stradonitz (Alemania; 1828 - 1896) aplica el concepto de valencia a la estructura de las moléculas orgánicas, sugiriendo que el carbono es tetravalente y que puede unirse, a su vez, a otros átomos de carbono formando cadenas lineales o ramificadas abiertas y también cerradas (anillos).
- Archibald Scott Couper (Gran Bretaña; 1831 - 1892) sugiere representar gráficamente las uniones entre átomos (enlaces) mediante trazos, lo que populariza definitivamente estas fórmulas estructurales.
- Jacobus Henricus Van’t Hoff (Holanda; 1852 - 1911) y Joseph Archille Le Bel (Francia; 1847 - 1930) sugieren, de forma independiente, que los cuatro enlaces del carbono están distribuidos hacia los cuatro vértices de un tetraedro.

Se pueden explicar ahora tantas cosas, que la idea de estructura tridimensional (**Estereoquímica**) sirve durante medio siglo como guía adecuada para el estudio de los compuestos orgánicos.

La Química y el calor

Los mundos de la Física y de la Química se unen y empiezan a andar juntos.

Germain Henri Hess (Suiza; 1802 - 1850) demuestra que la cantidad de calor intercambiada en la transformación de una sustancia en otra (calor de reacción) es la misma, cualquiera que sea la reacción seguida y las etapas en las que se produce (**ley de Hess**). Es el principio de la conservación de la energía para las reacciones químicas y con él se funda la **Termoquímica** (Química del calor).

La Termodinámica y sus principios ya pueden aplicarse a la Química.

Ese delicado equilibrio

Un sistema está en equilibrio cuando su estado es tal, que no puede experimentar ningún cambio espontáneo.

Los experimentos de licuefacción de algunos gases realizados por Thomas Andrews (Irlanda; 1813 - 1888) llegan a mostrar que existe un equilibrio entre los distintos estados de agregación de la materia (porciones homogéneas y uniformes), o **fases**.

Los estudios de algunas reacciones químicas realizados por Alexander William Williamson (Gran Bretaña; 1824 - 1904) llegan a mostrar su **reversibilidad**, es decir, las sustancias formadas pueden reaccionar entre sí para formar las sustancias originales; después de un tiempo no se observan más cambios, ya que el sistema alcanza el equilibrio.

La comprensión de las reacciones reversibles aumenta con los trabajos de Cato Maximilian Guldberg (Noruega; 1836 - 1902) y Peter Waage (Noruega; 1833 - 1900) y su **ley de acción de masas**, que establece que *“en un equilibrio químico, la relación entre el producto de las concentraciones de las sustancias formadas y el producto de las concentraciones de las sustancias originales permanece constante”* (**constante de equilibrio**).

Dos grandes “equilibristas”

- Josiah Williard Gibbs (EE.UU.; 1839 - 1903) aplica los principios termodinámicos a los estados de equilibrio:
 - El número de propiedades que definen el estado de equilibrio de un sistema (“grados de libertad”) está relacionado con el número de fases y el número de componentes presentes mediante una ecuación muy simple (**regla de las fases**).
 - El equilibrio de una reacción química se alcanza cuando su **energía libre** (magnitud que incorpora su contenido en calor [“entalpía”] y su entropía) es mínima; a la variación de energía libre la denomina “potencial químico”, siendo la fuerza impulsora de las reacciones químicas.
- Henri Louis Le Chatelier (Francia; 1850 - 1936) enuncia que *“una alteración en uno de los factores que interviene en un equilibrio supone un reajuste del sistema para reducir el efecto del cambio”* (**principio de Le Chatelier**).

Pero el equilibrio es dinámico, consecuencia de la igualdad de velocidades para alcanzar y abandonar ese estado.

La velocidad de las reacciones y los catalizadores

La velocidad de las reacciones depende de varios factores, cuya correlación es casi enteramente empírica.

Los **catalizadores** (“catálisis” = destruir) son sustancias que, incluso presentes en pequeñas cantidades, incrementan la velocidad de una reacción química sin tomar parte, aparentemente, en ella.

- Ludwig Ferdinand Wilhelmy (Alemania; 1812 - 1864) realiza el primer estudio cuantitativo sobre la velocidad con que transcurre una reacción, según las concentraciones de las sustancias presentes, con lo que comienza a desarrollarse la disciplina conocida como **Cinética Química**.
- Friedrich Wilhelm Ostwald (Letonia; 1853 - 1932) interpreta la acción de los catalizadores como la de acelerar la reacción sin consumirse ellos mismos.
- Svante August Arrhenius (Suecia; 1859 - 1927) establece la dependencia exponencial de la velocidad de una reacción con la temperatura (**ecuación de Arrhenius**) y sugiere la existencia de una “energía de activación” o umbral mínimo de energía que deben poseer las sustancias para que reaccionen.

Si bien la Cinética Química aún no ha sido suficientemente explicada, sus aplicaciones prácticas son muy importantes, ya que para la industria es fundamental obtener productos en períodos de tiempo razonablemente cortos.

La tabla periódica definitiva

Los rayos X descubiertos por los físicos, utilizados como “cañones” de radiación, van a ayudar a explicar los detalle que quedan pendientes de la tabla periódica de Mendeleiev.

- Henry Gwyn Jeffreys Moseley (Gran Bretaña; 1887 - 1915) utiliza la difracción de rayos X, que es característica de cada elemento, para relacionar su longitud de onda con los protones contenidos en su átomo. Descubre que los elementos están ordenados por la carga de su núcleo, a la que denomina **número atómico**, perfeccionando el ordenamiento periódico existente.

Puede ahora definirse el **elemento** como *“la sustancia que se compone de átomos que poseen todos un número atómico idéntico y característico”*, así como predecir mucho más exactamente los elementos que quedan por descubrir (siete, en 1913; el último se encuentra en 1947).

Cálculos químicos: el primer mol

Las leyes estequiométricas de las reacciones químicas permiten su estudio matemático mediante ecuaciones denominadas “ecuaciones estequiométricas”, cuyos coeficientes representan las proporciones en las que se combinan las especies químicas.

- Friedrich Wilhelm Ostwald introduce en 1900 el concepto de **mol** en relación con la cantidad de sustancia, definiéndolo como “*el peso molecular de una sustancia expresado en gramos*”.

El átomo de Rutherford

Los experimentos de los físicos con radiaciones proporcionan los medios para comprobar el extraño interior del átomo.

Ernest Rutherford (Nueva Zelanda; 1871 - 1937) elabora un modelo para la estructura interna del átomo:

- El átomo consiste en una diminuta zona central cargada positivamente (núcleo), que contiene todos sus protones y, por tanto, la parte esencial de su masa.
- El núcleo se encuentra rodeado de un sistema de electrones (corteza), retenidos por las fuerzas atractivas del núcleo, cuya carga total negativa coincide con la positiva del núcleo y cuyo número es aproximadamente igual a la mitad del peso atómico.

Aunque inicialmente este modelo goza de buena aceptación, las hipótesis tienen dos puntos fácilmente vulnerables:

- Los electrones externos justifican los fenómenos eléctricos, pero no explican cuantitativamente sus detalles ni los espectros de emisión de líneas.
- Los electrones han de girar para compensar la atracción eléctrica del núcleo; como una carga en movimiento emite radiación electromagnética, el electrón giraría en espirales cada vez más cerradas y con mayor velocidad (emitiendo frecuencias cada vez mayores), cayendo finalmente sobre el núcleo.

Se necesita una nueva idea del átomo nuclear, que aparece muy pronto.

El átomo de Bohr ...

El modelo atómico de Ernest Rutherford se replantea mediante la revolucionaria teoría cuántica de Max Planck.

Niels Henrik David Bohr (Dinamarca; 1885 - 1962) establece su modelo atómico para el átomo de hidrógeno:

- El electrón se encuentra en una órbita estacionaria, en la que no irradia energía.
- El electrón emite o absorbe radiación electromagnética cuando cambia de órbita.
- Cada órbita posee un determinado nivel de energía; el cambio de órbita del electrón provoca una emisión o absorción de energía, equivalente a un cuanto de Planck.
- Cada órbita estable donde puede estar el electrón se designa mediante un número entero, el **número cuántico principal, n** ($n = 1$ es la órbita más próxima al núcleo).

... y Sommerfeld

Arnold Johannes Wilhelm Sommerfeld (Lituania; 1868 -1951) introduce algunas modificaciones:

- El electrón puede describir órbitas circulares o elípticas dentro de cada nivel energético, lo que da lugar a subniveles energéticos.
- La excentricidad de las órbitas elípticas se designa mediante un **número cuántico secundario u orbital**, ℓ .

Este modelo predice todas las series espectrales del hidrógeno, así como el tamaño del átomo. Aunque es incapaz de explicar los espectros de los átomos multielectrónicos, introduce el concepto de “capas” electrónicas, de modo que los electrones contenidos en la capa más externa (electrones de **valencia**) determinan las propiedades químicas del elemento en cuestión.

La estructura electrónica del átomo (1)

El modelo atómico de Bohr - Sommerfeld lleva a la interpretación teórica de los datos espectroscópicos mediante un modelo de órbitas electrónicas basado en números cuánticos.

- Arnold Sommerfeld introduce el **número cuántico magnético, m_l** , que designa las distintas orientaciones e inclinaciones en el espacio de las órbitas electrónicas.
- Samuel Abraham Goudsmit (Holanda; 1902 - 1978) y George Eugene Uhlenbeck (Indonesia; 1900 - 1988) introducen el **número cuántico de espín, m_s** (“spin” = giro), que designa los dos posibles sentidos de la rotación del electrón.
- Wolfgang Pauli (Austria; 1900 - 1958) establece el denominado “principio de exclusión”, según el cual dos electrones con igual sentido de rotación no pueden coexistir en la misma órbita.
- Edmund Clifton Stoner (Gran Bretaña; 1899 - 1968) enuncia el “principio de construcción progresiva”, por el cual los electrones se disponen en capas según los mínimos niveles de energía.
- Friedrich Hermann Hund (Alemania; 1896 - 1997) plantea de forma empírica el “principio de máxima multiplicidad” según el cual, los electrones se distribuyen en el mayor número posible de órbitas, de forma que tengan los espines paralelos.

La estructura electrónica del átomo (2)

Los números cuánticos derivados de los espectros atómicos indican las estructuras atómicas de los elementos. Como, a su vez, el número atómico de Henry Moseley se identifica con el número de protones y, por tanto, también con su número de electrones, aparece una estrecha concordancia entre la estructura electrónica de los átomos y su clasificación periódica.

El modelo electrónico de orbitales

La aplicación de la ecuación de Schrödinger a la estructura electrónica del átomo de hidrógeno permite obtener los mismos estados energéticos que para el modelo de Bohr - Sommerfeld, pero no permite ubicar exactamente al electrón, sino acotar una región del espacio con mayor probabilidad de albergarlo (**orbital atómico**).

Un orbital atómico se representa, pues, mediante un función de onda que satisface la ecuación de Schrödinger y depende de los números cuánticos principal, orbital y magnético. Se ha establecido para ellos una nomenclatura heredada de la clasificación empírica de los espectros, asignando a cada valor del número cuántico orbital una letra:

- $l = 0$, orbitales **s** (“spheric”, esféricos)
- $l = 1$, orbitales **p** (serie **p** principal)
- $l = 2$, orbitales **d** (serie **d**ifusa)
- $l = 3$, orbitales **f** (serie **f**undamental)

El poder enlazante de los electrones

El poder de combinación de los átomos y la estructura de las moléculas aún no poseen explicaciones convincentes. El modelo atómico de Ernest Rutherford junto con el número atómico de Henry Moseley permiten una interpretación del enlace químico basada en la estructura electrónica del átomo.

- Walter Kossel (Alemania; 1888 - 1956) sugiere que los átomos tienden a adquirir la configuración de gas noble (la más estable); pueden enlazarse entre sí convirtiéndose en iones mediante la ganancia o pérdida de electrones, dando lugar al **enlace iónico**, que sólo explica la formación de compuestos polares.
- Gilbert Norton Lewis (EE.UU.; 1875 - 1946) e Irving Langmuir (EE.UU.; 1881 - 1957) proponen, de forma independiente que, los átomos pueden enlazarse entre sí mediante la compartición de electrones, con lo que pueden adquirir también la configuración de gas noble, dando lugar a un **enlace covalente**, que sólo explica la formación de compuestos no polares.

Ambos modelos tienen el gran mérito de poner de relieve la contribución de los electrones de los átomos para la formación de los enlaces químicos propios de las moléculas. Son eficaces por su simplicidad, pero son modelos límites, por lo que no son aplicables a la gran variedad de compuestos de carácter intermedio.

El enlace según la teoría cuántica

La mecánica cuántica se aplica a la interpretación del enlace químico, introduciendo el concepto de zonas de densidad electrónica definidas por una función de onda.

- Walter Heitler (Alemania; 1904 - 1981) y Fritz Wolfgang London (Alemania; 1900 - 1954) desarrollan la teoría del **enlace de valencia**, por la que los átomos que constituyen una molécula se comportan de modo similar a los átomos aislados y conservan sus orbitales, modificándose sólo aquéllos que intervienen directamente en el enlace.
- Linus Carl Pauling (EE.UU.; 1901 - 1994) y John Clarke Slater (EE.UU.; 1900 - 1976) desarrollan la teoría del enlace de valencia estableciendo que los electrones se comparten entre dos átomos formando unos orbitales combinados, denominados **orbitales híbridos**.
- Friedrich Hund (Alemania; 1876 - 1997) establece la teoría de los **orbitales moleculares**, que considera a la molécula como una unidad a la cual pertenecen todos los electrones de los átomos constituyentes.
- Robert Sanderton Mulliken (EE.UU.; 1896 - 1986) sistematiza los estados electrónicos de la moléculas (orbitales moleculares tipo “sigma”, $[\sigma]$ o tipo “pi” $[\pi]$, “enlazantes” o “antienlazantes”), interpretando con ellos numerosas propiedades físicas.

Iones, ácidos y electrones (1)

Cuando Michael Faraday habla del movimiento de los iones a través de una disolución de un electrolito al aplicarle corriente eléctrica, está pensando en que aquéllos se forman cuando fluye la corriente. Posteriormente, Rudolf Clausius sugiere que los iones están presentes en las disoluciones en cantidad apreciable, aún no pasando corriente.

- Svante August Arrhenius (Suecia; 1859 - 1927):
 - Formula de **teoría de la disociación electrolítica**: *“los iones siempre están presentes en una disolución, a veces en cantidades apreciables, en equilibrio con las moléculas no disociadas; el efecto de una fuerza electromotriz no es producir esos iones, sino que éstos se muevan a través de la disolución”*.
 - Las sustancias que al disolverse dan origen a iones hidrógeno (protones, H^+) las define como **ácidos**; las sustancias que al disolverse dan origen a iones hidroxilo (OH^-) las define como **bases**; estas definiciones presentan dificultades en las disoluciones no acuosas.

Iones, ácidos y electrones (2)

- Soren Peter Lauritz Sorensen (Dinamarca; 1868 - 1939) sugiere operar con el logaritmo negativo de la concentración de protones para simplificar la notación, introduciendo el concepto de **pH**, que ha resultado ser uno de los más importantes de la Química.
- Johannes Nicolaus Bronsted (Dinamarca; 1879 - 1947) y Thomas Martin Lowry (Gran Bretaña; 1879 - 1936) plantean de forma independiente y simultánea la **teoría ácido-base**: *Un ácido es un dador de protones y una base es un aceptor de protones*”, que permite salvar muchas dificultades, pero sigue presentando puntos débiles en las disoluciones no acuosas.
- Gilbert Norton Lewis (EE.UU.; 1875 - 1946) enuncia su teoría de ácidos y bases: *“Un ácido es toda especie (molecular o iónica) capaz de aceptar un par de electrones y base toda especie capaz de ceder un par de electrones”*; así, la unión de un ácido con una base implica la formación de un enlace covalente y sus predicciones no dependen del disolvente ni de la intervención de protones.

La Química se “integra”

- Felix Bloch (EE.UU.; 1905 -1983) aplica la mecánica cuántica para explicar el enlace metálico, considerando que los electrones de un metal están restringidos a ciertas bandas de energía (“teoría de bandas”): justifica el comportamiento de los conductores (bandas solapadas), de los aislantes (bandas separadas) y de los semiconductores (las impurezas conectan las bandas).

La explicación de un tipo de enlace químico ha dado lugar a la **Física del estado sólido**.

- William Bradford Shockley (Gran Bretaña; 1910 - 1989), John Bardeen (EE.UU.; 1908 - 1991) y Walter Houser Brattain (China; 1902 - 1987) desarrollan el **transistor** (**transfer resistor** = resistencia transmisora), combinación de materiales semiconductores que permite controlar la corriente eléctrica.

- Geoffrey Dummer (1909 - 2002) concibe el **circuito integrado**, consistente en la interconexión de todos los componentes de un circuito eléctrico (transistores, resistencias y condensadores) en una misma pieza de semiconductor).

Desde ese momento, los circuitos integrados se han transformado en componentes ineludibles de la estructura de las sociedades modernas.

El moderno mol

A la luz de la teoría atómica, la unidad fundamental del pensamiento químico es el átomo o la molécula, por lo que es primordial la aptitud para medir y expresar el número de átomos o moléculas presentes en cualquier sistema químico.

Para contar las entidades elementales a partir de las magnitudes macroscópicas de las sustancias se define una unidad de **cantidad de sustancia** que sea fácil de manejar mediante la medida de su masa o su volumen.

- La IUPAP (International **U**nion of **P**ure and **A**ppplied **P**hysics = Unión Internacional de Física Pura y Aplicada) en 1961 y la IUPAC (International **U**nion of **P**ure and **A**ppplied **C**hemistry = Unión Internacional de Química Pura y Aplicada) en 1965, conceden al concepto de cantidad de sustancia introducido por Friedrich Wilhelm Ostwald en 1900 el rango de magnitud fundamental: el **mol**.

“El mol es la cantidad de sustancia de un sistema que contiene tantas entidades elementales (átomos, moléculas, iones u otras partículas) como hay en 12 gramos de carbono-12”, o lo que es lo mismo, “el mol es la cantidad de sustancia que contiene un número de Avogadro de entidades elementales y que tiene una masa igual a la masa atómica o molecular de dichas entidades”.

Índice - LA MATEMÁTICA CONTEMPORÁNEA

La nueva Geometría	147
La aritmetización del Análisis	148
Las ecuaciones algebraicas	149
Los antiguos problemas pendientes	150
Un problema nuevo para la lista	150
Nuevas Álgebras abstractas	151
Del grupo al conjunto	152
Vectores y tensores	153
Estadística y probabilidad	154
La belleza de los números	155
La transición entre los siglos XIX y XX	156
Los problemas del siglo XX	156
La axiomatización de la Matemática	157
La escuela logicista	157
La escuela formalista	158
La escuela intuicionista	158
La incompletitud de Gödel	159
Nicolas Bourbaki (Poldavia; 1933 -)	160
Los orígenes de la informática	161
Fractales, caos y catástrofes	162
Privacidad y comunicaciones (1)	163
Privacidad y comunicaciones (2)	164
Los modernos problemas pendientes	165
Los problemas del siglo XXI	165

La nueva Geometría

Durante veinte siglos el sistema geométrico de Euclides permanece intocable; pero su quinto teorema (*“por un punto que no está contenido en una recta dada sólo puede trazarse una paralela a ella”*) no parece completamente evidente.

- Nikolai Ivanovich Lobachevski (Rusia; 1793 - 1856) establece como axioma que por un punto que no está contenido en una recta dada pueden trazarse infinitas rectas paralelas a ella, lo que le lleva a una nueva geometría, no euclidiana, en la que la suma de los tres ángulos de un triángulo es menor de 180° (esta geometría se produce sobre la superficie de un hiperboloide).
- Johann Karl Friedrich Gauss y Janos Bolyai (Hungría; 1802 - 1860) construyen, independientemente, geometrías similares; el primero no se atreve a publicarla, el segundo lo hace más tarde.
- Georg Friedrich Bernhard Riemann (Alemania; 1826 - 1866) establece como axioma que por un punto que no está contenido en una recta dada no puede trazarse ninguna recta paralela a ella, lo que le lleva a una nueva geometría, no euclidiana, en la que la suma de los tres ángulos de un triángulo es mayor de 180° (esta geometría se produce sobre la superficie de una esfera).

La aritmetización del Análisis

- Bernard Bolzano (Checoslovaquia; 1781 -1849) realiza un estudio riguroso de las funciones continuas, preconizando el rigor en el análisis.
- Agustin Louis Cauchy (Francia; 1789 - 1857) fundamenta el cálculo infinitesimal en el concepto de límite, utilizando deducciones claras, concisas y rigurosas.
- Johann Peter Gustav Lejeune Dirichlet (Alemania; 1805 - 1859) da una definición general de función.
- Hermann Hankel (Alemania; 1839 - 1873) señala que la condición para construir una aritmética universal es considerar a los números reales como estructuras intelectuales y no como magnitudes geométricas inductivas.
- Karl Weierstrass (Alemania; 1815 -1897) prescinde de la intuición geométrica y define de forma precisa el límite de una función.
- Richard Dedekind (Alemania; 1831 - 1916) define el número real como una cortadura en el conjunto de los números racionales, dando a los números reales una interpretación en forma de línea recta.
- Georg Cantor (Rusia; 1845 - 1918) identifica los números reales con sucesiones convergentes de números racionales, demostrando la no equivalencia de ambos conjuntos y la existencia de distintos tipos de infinito.

Se logra la aritmetización definitiva del análisis matemático, es decir, se considera la operación de paso al límite junto con las demás operaciones aritméticas.

Las ecuaciones algebraicas

- Niel Henrik Abel (Noruega; 1802 - 1829) demuestra que las ecuaciones de quinto grado no se pueden resolver por radicales (utilizando sólo las cuatro operaciones y la radicación, o extracción de raíces), métodos algebraicos utilizados para las ecuaciones de grado inferior.
- Evariste Galois (Francia; 1811 - 1832) desarrolla un criterio para establecer si una ecuación puede ser resuelta por radicales.
- Joseph Liouville (Francia; 1809 - 1882) demuestra la existencia de números trascendentes (trascienden, van más allá), es decir, aquéllos que no pueden constituir la solución de ninguna ecuación algebraica.
- Charles Hermite (Francia; 1822 - 1901) demuestra que el número e y las expresiones que lo contienen son trascendentes y, por tanto, no pueden ser solución para ninguna ecuación algebraica, sea cual fuere su grado.

Los antiguos problemas pendientes ...

- Pierre Laurent Wantzel (Francia; 1814 - 1848), trabajando en la resolución de ecuaciones algebraicas, consigue demostrar que tanto la duplicación del cubo como la trisección del ángulo son imposibles, utilizando sólo la regla y el compás.
- Ferdinand Lindemann (Alemania; 1852 - 1939) demuestra que el número **pi** (π) es trascendente, lo que, a su vez lleva a la conclusión de que la cuadratura del círculo es imposible utilizando sólo la regla y el compás.

La “algebraización” de la geometría ha permitido, después de veinte siglos, resolver los tres grandes problemas legados por los griegos.

Un problema nuevo para la lista

- Georg Friedrich Bernhard Riemann formula en 1859 una importante conjetura sobre la distribución de los números primos en el conjunto de los números naturales, que expresa en términos de los ceros de una cierta función (*La parte real de todos los ceros no triviales de la función “zeta”* [$\zeta(s) = \sum (1/n^s)$] es $1/2$), pero no consigue demostrarla.

La hipótesis de Riemann pasa a engrosar la lista de problemas no resueltos, en la que aún figuran la conjetura de Fermat y la conjetura de Goldbach.

Nuevas Álgebras abstractas

El álgebra comienza a ampliarse a elementos que no son necesariamente los números reales y las cuatro operaciones aritméticas.

- William Rowan Hamilton (Irlanda; 1805 - 1865) elabora un álgebra no conmutativa basada en la manipulación de números complejos en tres dimensiones, a los que llama “cuaterniones”.
- Hermann Grassmann (Alemania; 1809 - 1875) elabora un álgebra hipercompleja, no conmutativa ni asociativa, a la que denomina “teoría de las extensiones”.
- George Boole (Gran Bretaña; 1815 - 1864) desarrolla una serie de símbolos aplicables a operaciones lógicas, creando una estructura algebraica que se denominará “lógica matemática” o “álgebra de Boole”.
- Arthur Cayley (Gran Bretaña; 1821 - 1895) formula el álgebra de las matrices, definidas como un cuadro de coeficientes dispuestos en filas y columnas.
- Gottlob Frege (Alemania; 1848 - 1925) mejora la lógica simbólica de George Boole e intenta aplicarla a la aritmética para construir una estructura matemática completa, pero no logra su propósito.

Del grupo al conjunto

- Evariste Galois (Francia; 1811 - 1832) centra su atención en los objetos tomados en su conjunto y relacionados por lazos que lo estructuran; define la estructura de grupo como idea principal de la teoría de ecuaciones algebraicas.
- Leopold Kronecker (Alemania; 1823 - 1891), Richard Dedekind y Marius Sophus Lie (Noruega; 1842 - 1899) conducen el álgebra hacia el estudio de las entidades algebraicas abstractas basadas en el concepto de conjunto, cuya estructura se define mediante la constatación de las diferencias entre sus elementos.
- Georg Cantor construye una completa estructura para los conjuntos infinitos, elaborando toda una teoría sistemática para su tratamiento; nace la **teoría de conjuntos**.
- Ernst Friedrich Ferdinand Zermelo (Alemania; 1871 - 1953) establece que cada conjunto puede ser bien ordenado y construye un sistema axiomático para la teoría de conjuntos, aunque no logra demostrar su consistencia.
- Adolf Abraham Halevi Fränkel (Alemania; 1891 - 1965) y, algo más tarde, Albert Thoralf Skolem (Noruega; 1887 - 1963), refinan el sistema axiomático de Ernst Zermelo, consiguiendo evitar las paradojas suscitadas.

Vectores y tensores

Se denomina **vector** a una magnitud que precisa de orientación espacial para quedar definida.

- Josiah Willard Gibbs (EE.UU.; 1839 - 1903) expone un álgebra para los vectores en el espacio tridimensional.
- Otto Töplitz (Polonia; 1881 - 1940) desarrolla una teoría general de espacios de infinitas dimensiones, estableciendo la estructura del espacio vectorial.

Se denomina **tensor** a una entidad geométrica que generaliza el concepto de vector, haciéndolo independiente del sistema de referencia elegido. Se representa mediante un conjunto ordenado de componentes (**matriz**).

- Gregorio Ricci-Curbastro (Italia; 1853 - 1925) y Tullio Levi-Civita (Italia; 1873 - 1941) desarrollan el cálculo diferencial absoluto, que constituye la base del análisis tensorial, cuya axiomatización conduce al álgebra tensorial.

La teoría de la relatividad general formulada por Albert Einstein (Alemania; 1879 - 1955) está formulada completamente en lenguaje tensorial.

Estadística y probabilidad

- Karl Pearson (Gran Bretaña; 1857 - 1936) es uno de los fundadores de la estadística (disciplina que describe los fenómenos estocásticos, es decir, los fenómenos aleatorios o sometidos al azar) y del desarrollo de modelos de distribución de probabilidades (función de la probabilidad de obtener un resultado determinado en un experimento aleatorio). Su principal interés en este campo es la distribución de variable continua conocida como “*chi-cuadrado*”.
- William Sealey Gosset (Gran Bretaña; 1876 - 1937) desarrolla estudios sobre diversos parámetros estadísticos. Su principal interés se centra en la distribución de variable conocida como “*t de Student* (Gosset escribe bajo el seudónimo de Student).
- Andrey Andreyevich Markov (Rusia; 1856 - 1922) estudia las secuencias de variables aleatorias en las que la variable futura viene determinada por la presente, pero es independiente de la forma en que ésta resulta de las pasadas (“cadenas de Markov”). Este trabajo es la base de la teoría de los procesos estocásticos.
- Andrey Nikolaevich Kolmogorov (Rusia; 1903 - 1987) construye la teoría de probabilidades de forma rigurosa a partir de axiomas fundamentales, con lo que logra la abstracción necesaria para el desarrollo posterior de una teoría de distribuciones.

La belleza de los números

A principios del siglo XX coinciden tres matemáticos en el Trinity College de Cambridge (Gran Bretaña), que son considerados como los grandes especialistas en teoría de números del siglo. Trabajan en la hipótesis de Riemann, que no consiguen probar, pero obtienen como resultados secundarios la demostración de innumerables teoremas de la teoría de números, utilizando un enfoque analítico.

- Godfrey Harold Hardy (Gran Bretaña; 1877 - 1947), uno de los más puros y excéntricos, cuyo sentido estético le lleva a insistir exageradamente en negar la utilidad de la Matemática.
- John Edensor Littlewood (Gran Bretaña; 1885 - 1977), que forma con Godfrey Hardy la pareja más famosa de la historia de la Matemática.
- Srinivasa Aiyangar Ramanujan (India; 1887 - 1920), uno de los genios indios más grandes de la Matemática.

La transición entre los siglos XIX y XX

Durante el siglo XIX algunos matemáticos descubren que la Matemática no es una ciencia natural, sino una creación intelectual sobre la cual proyectar su imaginación y creatividad.

Se intenta fundamentar la Matemática eligiendo algunas propiedades como axiomas o ideas primeras, enunciadas de modo preciso, que cumplan ciertas condiciones de compatibilidad e independencia, pero el empleo del lenguaje corriente y de unas reglas lógicas obligan aún al uso implícito de la intuición, lo que suscita numerosas paradojas.

Los problemas del siglo XX

En el Segundo Congreso Internacional de Matemáticas, celebrado en París el 8 de agosto de 1900, David Hilbert (Alemania; 1862 - 1943) enuncia sus 23 problemas, que plantea como un reto para los matemáticos del siglo XX. La mayoría de ellos han sido resueltos a finales de este siglo y, a su vez, han generado nuevos problemas.

Wir müssen wissen, wir werden wissen!

[¡Debemos saber y sabremos!]

Epitafio en la tumba de Hilbert

La axiomatización de la Matemática

Aunque a principios del siglo XX se acepta que la Matemática es una forma de pensamiento axiomatizado, no existe un acuerdo en la forma de establecer los fundamentos, por lo que los matemáticos se dividen en tres grupos, que persiguen el mismo fin, pero utilizan diferentes medios:

- Logicistas
- Formalistas
- Intuicionistas

La escuela logicista

Considera que la Matemática se fundamenta en la lógica, rehuendo de buscar analogías en el mundo físico. El lenguaje matemático es un subconjunto del lenguaje lógico y, por tanto, los teoremas matemáticos también constituyen un subconjunto de las demostraciones lógicas.

- Giuseppe Peano (Italia; 1858 - 1932) publica los axiomas que definen el número natural en términos de conjuntos, lo que constituye un hito en la lógica matemática y en su fundamentación.
- Alfred North Whitehead (Gran Bretaña; 1861 - 1947) y Bertrand Arthur William Russel (Gran Bretaña; 1872 - 18970) publican *Principia Mathematica* ("Principios de Matemática"), obra en la que traducen todo el razonamiento matemático en lógica simbólica.

La escuela formalista

Considera que la Matemática se fundamenta en un juego de signos y símbolos de carácter formal, sin base empírica, que son sometidos a unas simples reglas para su empleo.

- David Hilbert (Rusia; 1862 - 1943) es uno de los matemáticos que más influencia tiene en el siglo XX, ya que deja su sello personal en todos los problemas que aborda. Preconiza la unidad de la Matemática y relaciona su vitalidad con la existencia de problemas abiertos a la investigación.

La escuela intuicionista

Considera que la Matemática es una actividad constructiva donde prima la intuición como única fuente de conocimiento, buscando analogías en el mundo físico.

- Jules Henri Poincaré (Francia; 1854 - 1912) es capaz de realizar un trabajo creador de primera magnitud en todas las ramas de la Matemática, pura y aplicada, por lo que es considerado como el último matemático universalista.
- Luitzen Egbertus Jan Brouwer (Holanda; 1881 - 1966) rechaza en las demostraciones matemáticas el principio del “tercio excluso” (toda proposición matemática es, o verdadera, o falsa), por lo que sus teorías no resultan fáciles de construir, debido a que la noción de conjunto no puede ser tomada como un concepto básico.

La incompletitud de Gödel

Los matemáticos han llegado a la convicción de que toda la vasta área de razonamiento de su ciencia puede fundamentarse mediante el método axiomático. Pero en 1931 se encuentra el límite de la matemática del siglo XX, que muestra que esta ciencia realmente no es algo completo. También la mente humana tiene su cuota de “incertidumbre cuántica”.

- Kurt Gödel (Alemania; 1906 - 1978) demuestra que en un sistema axiomático hay proposiciones que no pueden ser demostradas o refutadas con los propios axiomas del sistema; en particular, no puede ser demostrada la propia consistencia de los axiomas. El desarrollo de esta demostración es conocida luego como el “**teorema de incompletitud**” o “teorema de Gödel”

La Matemática ya no es un “reino de la verdad absoluta”: las verdades demostrables no pueden ser distinguidas *a priori* de las verdades indemostrables. El uso de la razón queda en entredicho.

Nicolas Bourbaki (Poldavia; 1933 -)

Este nombre es el seudónimo colectivo adoptado por un grupo de jóvenes matemáticos franceses, cuyos miembros fundadores son:

- Jean Frédéric Auguste Delsarte (1903 - 1968)
- Henri Paul Cartan (1904 - 2008)
- Jean Alexandre Eugène Dieudonné (1906 - 1992)
- André Weil (1906 - 1998)
- Claude Chevalley (1909 - 1984)

Reescriben gran parte de la Matemática con un exquisito rigor y detalle, partiendo de la lógica, la teoría de conjuntos y las estructuras matemáticas. Su obra *Eléments de Mathématique* (Elementos de Matemática), que comienza a aparecer en 1939, constituye la axiomatización más extraordinaria en la historia de la Matemática.

La axiomatización se fundamenta en el uso de un lenguaje con unas reglas morfológicas (símbolos y palabras) y unas reglas sintácticas (relación entre los elementos morfológicos) que dan lugar a la actual **Matemática formalizada**.

Los orígenes de la informática

Aunque los ordenadores parecen ser sólo aparatos eminentemente prácticos, su creación está relacionada con cuestiones de base filosófico-matemática.

- Alan Mathison Turing (Gran Bretaña; 1912 - 1954) formula una máquina abstracta (a la que posteriormente se denomina “máquina de Turing”) que pasa de un estado a otro utilizando un conjunto finito de reglas y dependiendo de un único símbolo que lee de una cinta. Afirma que esta máquina es capaz de efectuar cualquier cómputo, si bien demuestra que es imposible saber de antemano si un problema tiene solución (“teorema de incomputabilidad” o “teorema de Turing”).
- Janos von Neumann (Hungría; 1903 - 1957) es uno de los pioneros de la informática al desarrollar la teoría de los **autómatas** (aparato que encierra en sí mismo el mecanismo que le imprime determinados movimientos) como síntesis de la teoría de las demostraciones lógicas y de las computadoras electrónicas (las denominadas de “primera generación”, conteniendo válvulas de vacío). Consigue resolver el problema de obtener respuestas fiables a partir de componentes electrónicos poco fiables y propone la adopción del **bit** (**binary digit**) como unidad de medida para la memoria de los ordenadores.

Fractales, caos y catástrofes

- Benoit Mandelbrot (Polonia; 1924 - 2010) desarrolla la que denomina “geometría fractal” (“fractus” = fracción), basada en espacios de dimensión fraccionaria, que explica estructuras extraordinariamente complejas, anteriormente ignoradas (conjunto de Cantor, curva de Peano, curva de Koch, triángulo de Sierpinski) y ahora llamadas **fractales**. Estos objetos con simetría interna (de sus partes respecto al todo) son también característicos de muchos fenómenos naturales y pueden ser estudiados con ayuda de ordenadores, cada vez más potentes.
- Edward Norton Lorenz (EE.UU.; 1917 - 2008) observa la sensibilidad de los sistemas dinámicos respecto a las condiciones iniciales, que se conoce como *efecto mariposa* (“Does the flap of a butterfly’s wings in Brazil set off a tornado in Texas?” [¿Produce el batir de las alas de una mariposa en Brasil un tornado en Texas?]). Es el fundamento de la denominada **teoría del caos**, basada en sistemas simples con sólo pocas variables que pueden presentar un comportamiento tan complicado que es prácticamente impredecible. Su principal aplicación es el modelado de sistemas de predicción meteorológica.
- René Thorn (Francia; 1923 - 2002) desarrolla la **teoría de las catástrofes**, un tratamiento matemático de la acción continua que produce un resultado discontinuo, es decir, intenta describir aquéllas situaciones en las que fuerzas que varían gradualmente producen cambios abruptos (catástrofes). Esta teoría ha encontrado amplias aplicaciones en ciencias físicas, naturales y sociales, aunque no permite predicciones cuantitativas.

Privacidad y comunicaciones (1)

La **criptografía** (= “escritura oculta”) comprende el estudio de los principios y técnicas por las que una información se altera de tal forma que resulta ilegible para cualquiera que no conozca la manera de obtener la información original. La información se altera (encripta, codifica o cifra) mediante claves y se vuelve a recuperar (desencripta, descodifica o descifra) mediante las mismas u otras claves. El estudio de la recuperación de la información sin conocer sus claves se denomina **criptoanálisis**.

Privacidad y comunicaciones (2)

- William Frederik Friedman (Rusia; 1891 - 1969) es considerado el fundador de la criptografía moderna al aplicar métodos estadísticos a la encriptación.
- Claude Elwood Shannon (EE.UU.; 1916 - 2001) es considerado el “padre de la teoría de la información”. Aplicando el álgebra de Boole a relés electrónicos establece el diseño práctico de los circuitos digitales: relación de los valores “verdadero” y “falso” de la lógica simbólica con los valores binarios “1” y “0” del álgebra binaria y las condiciones “encendido” (“*on*”) y “apagado” (“*off*”) de los circuitos electrónicos.
- Horst Feistel (Alemania; 1915 - 1990) establece el método para construir algoritmos de encriptación, precursores del sistema de cifrado DES (**Data Encryption Standard** = Estándar de Encriptación de Datos).
- Whitfield Diffie (EE.UU.; 1944 -) y Martin Hellman (EE.UU.; 1945 -) introducen un nuevo método de distribución de claves criptográficas, basado en el concepto de **clave pública**, mediante la utilización de algoritmos de encriptación de “clave asimétrica” (parejas de claves, una pública, que puede ser distribuida ampliamente, y otra privada, que ha de ser mantenida secreta).
- Ronald Rivest (EE.UU.; 1947 -), Adi Shamir (Israel; 1952 -) y Leonard Adleman (EE.UU.; 1945 -) desarrollan el algoritmo basado en grandes números primos para la manipulación de claves asimétricas, conocido como RSA (**R**ivest - **S**hamir - **A**dleman), uno de los más utilizados desde 1977.

Las aplicaciones de estos fundamentos matemáticos a las tecnologías de la información y las comunicaciones son una realidad en la sociedad del siglo XXI.

Los modernos problemas pendientes ...

La **conjetura de Fermat**, ahora llamada “último teorema de Fermat” es demostrada el 19 de septiembre de 1994 por Andrew John Wiles (Gran Bretaña; 1953 -) mediante un trabajo altamente original, que ha sido considerado un monumento a la perseverancia individual.

La **hipótesis de Riemann** parece haber sido demostrada por Louis De Branges (Francia; 1932 -), según anuncia la Universidad de Purdue (Indiana, EE.UU.) el 8 de junio de 2004, pero la comunidad matemática permanece escéptica, al no haber sido sometida la demostración a un análisis profundo.

La **conjetura de Goldbach** aún no se ha demostrado.

Los problemas del siglo XXI

Transcurrido un siglo desde la famosa formulación de los problemas de Hilbert, el 24 de mayo de 2000 se dan a conocer en París los denominados **Siete Problemas del Milenio**, seleccionados por un equipo de expertos entre aquellas cuestiones clásicas cuya solución se ha resistido durante años.

Ahora hay un millón de dólares de premio por cada problema que sea resuelto, otorgado por el Clay Mathematics Institute de Cambridge, Massachusetts (EE.UU.).

Índice - LA BIOLOGÍA CONTEMPORÁNEA

Esa propiedad llamada vida	169
Células y más células	170
Células y enfermedades (1)	171
Células y enfermedades (2)	172
La Geología del siglo XIX	173
La evolución de Darwin (1)	174
La evolución de Darwin (2)	175
Los guisantes de la herencia	176
Redescubriendo a Mendel	177
Embriones	178
Células, herencia y evolución (1)	179
Células, herencia y evolución (2)	180
Mutaciones	181
Los ladrillos químicos de la vida (1)	182
Los ladrillos químicos de la vida (2)	183
Los ladrillos químicos de la vida (3)	184
Los ladrillos químicos de la vida (4)	185
Alimentos esenciales para la vida (1)	186
Alimentos esenciales para la vida (2)	187
Transmisión de estímulos eléctricos: neuronas	188
Transmisión de estímulos químicos: hormonas (1)	189
Transmisión de estímulos químicos: hormonas (2)	190
Balas mágicas, drogas maravillosas (1)	191
Balas mágicas, drogas maravillosas (2)	192
Fermentaciones y enzimas (1)	193
Fermentaciones y enzimas (2)	194
Ácidos nucleicos (1)	195
Ácidos nucleicos (2)	196

La energía de la vida (1)	197
La energía de la vida (2)	198
Moléculas vivientes (1)	199
Moléculas vivientes (2)	200
El encaje de las piezas en la doble hélice (1)	201
El encaje de las piezas en la doble hélice (2)	202
Mensajes y códigos (1)	203
Mensajes y códigos (2)	204
El origen de la vida	205
La Geología del siglo XX (1)	206
La Geología del siglo XX (2)	207

Esa propiedad llamada vida

La ciencia de lo vivo ya no se conforma con el estudio descriptivo de los organismos, creándose la necesidad de indagar en las causas que mantienen todo el sistema de funciones biológicas. El descubrimiento de la organización de los seres vivos permitirá comprender la vida: se penetra en los organismos que se quiere estudiar, primero en los órganos para luego estudiar los tejidos, después las células y finalmente las moléculas.

- Claude Bernard (Francia; 1813 - 1878) se considera el fisiólogo experimental más importante del siglo XIX. Transforma el estudio de la función de los órganos en análisis específicos de los procesos celulares aplicando principios físicos (regulación térmica del cuerpo) y químicos (reacciones de la digestión).

Células y más células

- Matthias Jakob Schleiden (Alemania; 1804 - 1881) afirma que todos los vegetales están constituidos por células y que la célula es la unidad de vida a partir de la cual se constituyen organismos enteros.
- Theodor Schwann (Alemania; 1810 - 1882) afirma que también todos los animales están constituidos por células, que cada célula está separada de las demás por una membrana y que los tejidos están formados por células de una variedad particular.

Se han puesto las bases de la **teoría celular** y con ella se inicia la **Citología** (estudio de las células).

- Karl Theodor Ernst Siebold (Alemania; 1804 - 1885) demuestra que la célula es capaz de poseer vida independiente, es decir, la existencia de organismos vivos unicelulares.
- Rudolph Virchow (Alemania; 1821 - 1902) demuestra que la teoría celular se extiende a los tejidos enfermos, ya que éstos provienen de células de tejido ordinario que sufren un progreso lento de anormalidad, por lo que se le considera fundador de la **Patología** (estudio de los tejidos enfermos); su conclusión "*Omnis cellula e cellula*" ("Todas las células provienen de células"), rechaza la generación espontánea (desarrollo de organismos vivientes a partir de objetos no vivientes).

Células y enfermedades (1)

A fines del siglo XVIII aún se ignoraba la causa de las enfermedades infecciosas, a pesar del descubrimiento de la vacuna contra la viruela por Edward Jenner (Gran Bretaña; 1749 - 1823) y su aplicación masiva.

- Louis Pasteur (Francia; 1822 -1895):
 - Enuncia la “teoría del germen de la enfermedad”, según la cual una enfermedad se contagia porque la causan minúsculos organismos (“microorganismos”) y éstos se propagan de un individuo a otro por diferentes vías; la comprensión de la naturaleza de la enfermedad permite su control.
 - Asesta el golpe definitivo a la teoría de la generación espontánea, demostrando experimentalmente que en el polvo del aire existen organismos vivos.
 - Estudiando los gérmenes de varias enfermedades desarrolla vacunas para el carbunco (del ganado lanar y vacuno), el cólera aviar y la rabia (manifestada en algunos animales y en el ser humano).

Células y enfermedades (2)

- Ignaz Philipp Semmelweis (Hungría; 1818 - 1865) introduce el concepto de “**asepsia**” (acciones para la prevención de gérmenes infecciosos) aún sin conocer los experimentos de Pasteur.
- Joseph Lister (Gran Bretaña); 1827 - 1912) introduce el concepto de “**antisepsia**” (acciones para la eliminación de gérmenes infecciosos) al conocer los experimentos de Pasteur.
- Robert Koch (Alemania; 1843 - 1910) centra su estudio en las bacterias (vegetales unicelulares, microscópicos) patógenas (causantes de enfermedades), consiguiendo la identificación, aislamiento y cultivo de las que provocan el carbunco, la tuberculosis, la peste bubónica y el cólera.

La Geología del siglo XIX

La controversia entre las dos teorías geológicas del siglo XVIII (neptunismo y plutonismo) propicia numerosos trabajos de campo, llevados a cabo en el siglo XIX.

- Charles Lyell (Gran Bretaña; 1797 - 1875) publica "*Principles of Geology*" ("Principios de Geología"), obra en la que populariza el uniformitarismo sugerido por Hutton, insistiendo en que las fuerzas actuales actuando a la velocidad actual han podido producir todos los fenómenos geológicos observables, habiendo transcurrido el tiempo suficiente para ello.

Las teorías catastrofistas comienzan a ser relegadas, y el uniformitarismo enlaza con el evolucionismo de Darwin.

En este contexto se desarrollan las teorías orogénicas (formación de montañas):

- **Teoría de la contracción:** Enunciada por Leonce Elie de Beaumont (Francia; 1798 - 1874), propone una Tierra originalmente fundida que se va enfriando, lo que provoca su contracción y la formación de arrugas en su superficie.
- **Teoría de la isostasia:** Enunciada por Clarence Edward Dutton (EE.UU.; 1841 - 1912), propone que las grandes masas rocosas alcanzan su nivel natural de equilibrio, hundiéndose o emergiendo según su densidad.

La evolución de Darwin (1)

Charles Robert Darwin (Gran Bretaña; 1809 - 1882) publica en 1858 su libro *“On the origin of species by means of natural selection or the preservation of favored races in the struggle for life”* (“Sobre el origen de las especies por medio de selección natural o la preservación de las razas favorecidas en la lucha por la vida”), más conocido por **“El origen de las especies”**. En este libro, considerado el más importante de la historia de la Biología, se presenta el concepto de desarrollo de la vida o “evolución” mediante el mecanismo de “selección natural”.

La teoría sobre el origen de las especies está basada en los siguientes precedentes:

- Lectura de la obra de Charles Lyell (Gran Bretaña; 1797 - 1875) *“Principles of Geology”* (“Principios de Geología”), que le convence de la uniformidad geológica de la Tierra y los largos períodos durante los que la vida ha tenido tiempo de desarrollarse.
- Expedición científica alrededor del mundo en el navío de la marina británica *Beagle* (1831 - 1836), durante la cual observa un grupo de pájaros (pinzones) que pueblan las islas Galápagos, archipiélago situado a unos 1.200 km de las costas de Ecuador.
- Reflexión sobre el proceso de selección: si el ser humano ha logrado razas de vegetales y animales adaptadas a sus necesidades mediante selección, de igual forma la naturaleza podría realizar la misma selección para adaptar los seres vivos a su medio, en períodos mucho más largos.
- Lectura de la obra de Thomas Robert Malthus (Gran Bretaña; 1766 - 1834) *“An essay on the principle of population”* (“Ensayo sobre la población”), que mantiene que el aumento de la población humana es mayor que el de su disponibilidad alimentaria, lo que conduce inexorablemente a su reducción por hambre, enfermedad o guerra.

La evolución de Darwin (2)

Estos precedentes y el profundo estudio del material recopilado durante el viaje del *Beagle* le permiten a Darwin obtener las siguientes conclusiones:

- Los individuos de una población están sometidos a diferencias o variaciones.
- Estas variaciones pueden ser transmitidas a sus descendientes por herencia.
- Se producen más descendientes de los que el medio puede soportar (progresión geométrica de la población frente a la progresión aritmética de los recursos), lo que provoca una competencia por los recursos disponibles.
- Aquellos individuos cuyas características les permiten una mayor adaptación al entorno sobreviven, se reproducen y tienen más descendencia (**supervivencia del más apto**).
- Por tanto, en cada población se produce una descendencia modificada (a lo largo de muchas generaciones) debido a la selección natural, es decir, a la presión del medio sobre las variaciones espontáneas según su capacidad de competir, sobrevivir y reproducirse.

La aplicación de la teoría de la evolución a la especie humana la llevó a cabo Darwin en su libro "*The descent of man*" ("La descendencia humana"), editado en 1871. Basándose en la existencia de muchos órganos atrofiados en la especie humana afirma que ésta ha de ser descendiente de un primate simiesco.

El descubrimiento de fósiles intermedios entre humano y mono ("eslabones perdidos") ha afianzado con el transcurso del tiempo en concepto de evolución.

Los guisantes de la herencia

El defecto principal de la teoría evolutiva de Darwin es la falta de una explicación adecuada de la herencia, lo que impide determinar el origen de las variaciones.

Gregor Johann Mendel (República Checa; 1822 - 1884) realiza durante ocho años numerosos experimentos con plantas (más de 27.000) de guisantes (*Pisum sativum*), cuantificando los resultados obtenidos de los diversos cruces, que le permiten sistematizar las claves del mecanismo de la herencia:

- Los caracteres de una especie se transmiten por herencia y permanecen inalterados, es decir, no existen caracteres intermedios ni mezclas entre ellos.
- En toda transmisión hereditaria existen dos factores: uno visible (dominante) y otro oculto (recesivo).
- Los caracteres hereditarios son unidades discretas, que van en parejas (“alelos”, tienen la misma función [color] pero distintos efectos [amarillo, verde]), siendo uno de ellos seleccionado al azar al ser transmitido.

Mendel publica los resultados pero no sigue investigando; sus trabajos permanecen desconocidos, mostrando que la selección natural puede trabajar lenta pero eficazmente en la evolución. Ha fundado la **Genética** (estudio del mecanismo de la herencia), pero él no lo sabrá nunca.

Redescubriendo a Mendel

- Hugo de Vries (Holanda; 1848 - 1935) realiza experimentos con la onagra vespertina ("*Oenothera lamarckiana*") y descubre que los caracteres individuales se transmiten sin mezcla, desarrollando una teoría para explicar sus resultados; cuando revisa la bibliografía para publicar su trabajo, encuentra la publicación de Mendel.
- Karl Erich Correns (Alemania; 1864 - 1933) y Erich Tschermak von Seysenegg (Austria; 1871 - 1927) llegan, simultánea e independientemente a conclusiones similares, encontrando también los escritos de Mendel.

Los tres botánicos publican sus obras en 1900, todos citan a Mendel y además reconocen que sus propios trabajos sólo son la confirmación de los estudios de éste. Las leyes de la herencia se convierten en las **Leyes de Mendel**.

Embriones

El estudio de la célula fertilizada que se multiplica para dar lugar a millones de células, conformando un organismo capaz de una existencia independiente, da lugar a la **Embriología**.

- Karl Ernst von Baer (Estonia; 1792 - 1876) descubre el huevo de mamífero en el ovario.
- Rudolf Albert von Kölliker (Suiza; 1817 - 1905) señala que el óvulo y el espermatozoide son células individuales y demuestra que el óvulo fecundado es aún una célula simple, a partir de la cual se inicia el desarrollo del embrión.
- Alexander Onufriyevich Kovalevski (Letonia; 1840 - 1901) demuestra mediante estudios embriológicos que los animales vertebrados y los invertebrados deben tener un tronco común ("*Cordados*"), reforzando el concepto de vida como unidad básica.

Células, herencia y evolución (1)

El desarrollo de la química de los colorantes sintéticos a mitad del siglo XIX proporciona una nueva herramienta a la Citología: las células transparentes pueden ser teñidas para resaltar detalles, antes invisibles incluso al microscopio.

- Walther Flemming (Alemania; 1843 - 1905) observa el núcleo de una célula durante su proceso de división, en el que se produce una condensación de materia, previamente coloreada, en fragmentos filamentosos; estos fragmentos se denominan posteriormente **cromosomas** (= “cuerpos coloreados”) y el proceso de división, **mitosis** (“*mitos*” = “hilo”).
- Edouard van Beneden (Bélgica; 1846 - 1910) muestra que el número de cromosomas es constante en todas las células de cada organismo y su número es característico de la especie; en el proceso de división de las células sexuales, denominado **meiosis** (“*meio*” = “menor”), no se produce duplicación de los cromosomas, por lo que estas células reciben sólo la mitad del número normal de cromosomas.

Células, herencia y evolución (2)

- Walter Stanborough Sutton (EE.UU.; 1877 - 1916) relaciona las observaciones de la división celular con las leyes de la herencia y afirma que los cromosomas se comportan como los factores que transmiten la herencia:
 - Cada célula tiene un número de parejas de cromosomas que reproducen los caracteres al pasar a una nueva célula, ya que su número se mantiene.
 - En las células sexuales, cada una sólo recibe la mitad del número de cromosomas, que se vuelve a recuperar en la fecundación.
 - El nuevo organismo posee el mismo número de cromosomas, pero la mitad corresponde a cada uno de sus progenitores.
 - La mezcla de cromosomas puede hacer aparecer caracteres recesivos y dar lugar a variaciones sobre las que puede actuar la selección natural.

El “factor” de Mendel se convierten en un **gen** (parte de los cromosomas que contiene un factor hereditario); el conjunto de genes de un organismo se conoce como **genoma**.

Mutaciones

- Hugo de Vries comprueba en sus trabajos con las flores de onagra que a veces aparece alguna variedad con marcadas diferencias de las otras, variedad que puede perpetuarse en sucesivas generaciones. Denomina “mutación” (= “cambio”) a esta transformación súbita y advierte que se trata de una evolución por saltos.
- Thomas Hunt Morgan (EE.UU.; 1866 - 1945) descubre una importante “arma biológica” que permite comprobar experimentalmente la relación entre cromosomas y genes: la mosca del vinagre (*Drosophila melanogaster*), un pequeño insecto que se cría fácilmente, se reproduce rápidamente y cuyas células sexuales sólo contienen cuatro cromosomas.
- Hermann Joseph Muller (EE.UU.; 1890 - 1967) aumenta la velocidad de las mutaciones utilizando radiaciones ionizantes (rayos X), lo que permite avanzar más rápidamente en su estudio y demuestra que las mutaciones pueden ser inducidas externamente.
- Albert Francis Blakeslee (EE.UU.; 1874 - 1954) comprueba que las sustancias químicas también pueden producir mutaciones, lo que representa la primera interferencia química directa con el mecanismo de la herencia.

Los ladrillos químicos de la vida (1)

A principios del siglo XIX empieza a ser habitual clasificar las sustancias orgánicas que se encuentran en los tejidos vivos en tres grupos (conociéndose su estudio como **Bioquímica**): carbohidratos, lípidos y proteínas (en su denominación actual).

- **Carbohidratos**, o hidratos de carbono, están compuestos de carbono hidrógeno y oxígeno (estos dos elementos en la misma proporción que en el agua): almidón, celulosa, azúcar.
 - Gottlieb Sigismund Kirchoff (Alemania; 1764 - 1833) disgrega el almidón en moléculas de glucosa.
 - Henri Braconnot (Francia; 1781 - 1855) disgrega la celulosa en moléculas de glucosa.
 - Claude Bernard (Francia; 1813 - 1878) disgrega el glucógeno en moléculas de glucosa.
 - Ernst Felix Hoppe-Seyler (Alemania; 1825 - 1895) disgrega el azúcar de caña (sacarosa) en moléculas de glucosa y fructosa.

El ladrillo común principal de los diferentes carbohidratos resulta ser la glucosa, para cualquier ser vivo.

Los ladrillos químicos de la vida (2)

- **Lípidos**, denominación que comprende los aceites (líquidos) y las grasas (sólidas), están compuestos de carbono, hidrógeno y oxígeno (este elemento, en pequeña proporción): aceite de oliva, mantequilla.
 - Micher Eugene Chevreul (Francia; 1786 - 1889) encuentra que grasas y aceites están formados por varios tipos de ácidos débiles (“ácidos grasos”) unidos siempre a un alcohol (“glicerina”).

Los ladrillos principales de los diferentes lípidos resultan ser los ácidos grasos, para cualquier ser vivo.

Los ladrillos químicos de la vida (3)

- **Proteínas**, están compuestas por carbono, hidrógeno y oxígeno, además de nitrógeno y azufre: albúmina (clara de huevo), gelatina.
 - François Magendie (Francia; 1783 - 1853) descubre que la vida es imposible en ausencia de alimentos que no contengan sustancias nitrogenadas.
 - Henri Braconnot disgrega la gelatina en un compuesto nitrogenado distinto de los azúcares y a los ácidos grasos.
 - Gerhard Johann Mulder (Holanda; 1802 - 1880) reconoce que las sustancias albuminosas constituyen el grupo más frágil y más característico de la vida, dándoles el nombre de “proteínas” (= “de primera importancia”).
 - Emil Hermann Fischer (Alemania; 1852 - 1919) constata mediante estudios estructurales que los componentes fundamentales de la disgregación de las proteínas contienen siempre grupos amino (similares a la molécula de amoníaco) y grupos ácido, unidos mediante un enlace llamado “peptídico” (-OC-NH-); la diferencia entre los aminoácidos estriba en la cadena de átomos que acompaña a dichos grupos.

Algunas proteínas (“proteínas conjugadas”) también poseen grupos adicionales (“grupos prostéticos”), pero los ladrillos principales de las diferentes proteínas (también llamadas “polipéptidos”) resultan ser los aminoácidos (20 distintos, como máximo), para cualquier ser vivo.

Los ladrillos químicos de la vida (4)

La función biológica de la digestión descompone las sustancias complejas en sus respectivos constituyentes, que son utilizados para reconstruirlas de nuevo, de forma que se adapten a las necesidades propias de cada organismo: **químicamente, la vida es única.**

Alimentos esenciales para la vida (1)

Los estudios de las enfermedades relacionadas con la dieta realizados por James Lind (Gran Bretaña; 1710 - 1794) llevan al concepto de “factor alimentario”, compuesto que no puede formarse en el organismo a partir de sus constituyentes más simples y que, por tanto, debe estar presente en la dieta, por ser imprescindible para la vida.

- Frederick Gowland Hopkins (Gran Bretaña; 1861 - 1947) demuestra que algunas proteínas no pueden ser formadas por ciertos organismos debido a la falta en su dieta de los aminoácidos correspondientes (“aminoácidos esenciales”).
- Christiaan Eijkman (Holanda; 1858 - 1930) determina que la enfermedad conocida como “beriberi” está relacionada con la dieta; aunque el causante es la ausencia de un componente esencial, no se da cuenta del verdadero significado de su descubrimiento, relacionándolo con la presencia de una toxina.

Alimentos esenciales para la vida (2)

- Casimir Funk (Polonia; 1884 - 1967) amplía el concepto de Hopkins de los aminoácidos esenciales a otras sustancias ausentes de la dieta, que causan enfermedades como escorbuto, pelagra y raquitismo; propone para estas sustancias el nombre de “**vitaminas**” (= “aminas de la vida”), aunque se comprueba posteriormente que no todas ellas son aminas.
- Elmer Verner McCollum (EE.UU.; 1879 - 1967) descubre vitaminas solubles en agua (hidrosolubles) y vitaminas solubles en grasa (liposolubles); las denomina con las letras A y B, nomenclatura que se extiende posteriormente a otras vitaminas, aunque pudieran determinarse sus estructuras químicas, permaneciendo en la actualidad.

Transmisión de estímulos eléctricos: neuronas

Los estudios sobre el movimiento de los músculos llevan a Albrecht von Haller (Suiza; 1708 - 1777) a observar que los estímulos que los controlan circulan por los nervios; la descripción de la naturaleza de las fibras nerviosas aún es imprecisa, si bien se encuentran células similares en el cerebro y en la médula espinal.

- Wilhelm von Waldeyer (Alemania; 1836 - 1921) afirma que las fibras nerviosas constituyen delgadas prolongaciones de unas células nerviosas a las que llama “neuronas”, demostrando que dichas células se aproximan sin unirse (“sinapsis”).
- Santiago Ramón y Cajal (España; 1852 - 1934) confirma la teoría de la neurona, por la cual el tejido nervioso consiste enteramente de células nerviosas y sus prolongaciones, que se encuentran tanto en la materia gris del cerebro como en la médula espinal.
- Otto Loewi (Alemania; 1873 - 1961) demuestra que el impulso nervioso produce un cambio químico a la vez que un cambio eléctrico, liberando el nervio una sustancia que cruza el espacio sináptico.
- Henry Hallet Dale (Gran Bretaña; 1875 - 1968) identifica la sustancia química transmisora de los impulsos nerviosos como “acetilcolina”.

Transmisión de estímulos químicos: hormonas (1)

Los impulsos eléctricos que recorren los nervios no son los únicos controles del cuerpo; también hay mensajeros químicos que viajan a través del sistema circulatorio.

- Jokichi Takamine (Japón; 1854 - 1922) aísla una sustancia de las glándulas suprarrenales, la epinefrina (más conocida por su nombre comercial, adrenalina), sin conocer su función.
- Ernest Henry Starling (Gran Bretaña; 1866 - 1927) y William Maddock Bayliss (Gran Bretaña; 1860 - 1924) descubren una sustancia que estimula la secreción pancreática; sugieren el nombre de **hormona** (= “excitar actividad”) para los productos de secreción interna de las llamadas “glándulas endocrinas”, que son vertidos a la corriente sanguínea para excitar a otros órganos.

Transmisión de estímulos químicos: hormonas (2)

- Edward Albert Sharpey-Schäfer (Gran Bretaña; 1850 - 1931) conjetura que debe existir una hormona en las secreciones de los islotes de Langerhans del páncreas, para la que propone el nombre de **insulina** (= “isla”).
- Edward Calvin Kendall (EE.UU.; 1886 - 1972) aísla la hormona segregada por la glándula tiroides (“tiroxina”), responsable de todos los procesos metabólicos del cuerpo.
- Frederick Grant Banting (Canadá; 1891 - 1941) y Charles Herbert Best (EE.UU.; 1891 - 1941) aíslan la insulina a partir de la secreción pancreática, lo que permitirá más tarde el tratamiento de la enfermedad conocida como *Diabetes mellitus*.

Posteriormente se aíslan otras hormonas, pero ya se ha iniciado la **Endocrinología**, disciplina que estudia las secreciones de las glándulas endocrinas, las hormonas.

Balas mágicas, drogas maravillosas (1)

Cuando se empieza a conocer mejor a las bacterias se intuye la posibilidad de que puedan desarrollarse productos químicos que puedan destruirlas sin afectar seriamente a las células del huésped al que están infestando.

- Paul Ehrlich (Alemania; 1845 - 1915) descubre un tinte (“tripán rojo”) que ayuda a destruir a los tripanosomas causantes de la enfermedad del sueño y un derivado del arsénico, la arsfenamina (comercializado como “Salvarsán”) muy eficaz para destruir los treponemas causantes de la sífilis; es el principio de la moderna **quimioterapia**.
- Alexander Fleming (Gran Bretaña; 1881 - 1955) observa que el hongo *Penicillium notatum* libera algún componente que inhibe el desarrollo bacteriano; no identifica la sustancia, pero la llama “**penicilina**”.
- Gerhard Domagk (Alemania; 1895 - 1964) descubre que un colorante naranja conocido como “Prontosil” ataca a los estreptococos; es la primera **sulfamida**.
- René Jules Dobos (Francia; 1901 - 1982) constata que no sólo los compuestos sintéticos, sino también los compuestos naturales producidos por microorganismos, pueden servir como agentes antibacterianos, lo que hace resurgir los trabajos olvidados de Fleming.

Balas mágicas, drogas maravillosas (2)

- Howard Walter Florey (Australia; 1898 - 1968) y Ernst Boris Chain (Alemania; 1906 - 1979) aíslan la penicilina, determinan su estructura y consiguen su producción a escala industrial.
- Selman Abraham Waksman (Rusia; 1888 - 1973) aísla una sustancia a partir de un moho de la familia de los estreptomicetos, al que llama “**estreptomici-na**”; comienza el auge de los “**antibióticos**” (= “contra la vida”).

Se avanza en el desarrollo de los antibióticos de “amplio espectro” (eficaces contra un gran número de bacterias), principalmente las **tetraciclinas**, que son las armas más poderosas contra las infecciones rutinarias.

Fermentaciones y enzimas (1)

Los organismos vivos pueden producir cambios químicos, pero son suaves y lentos. Podrían existir en los tejidos vivos algunas sustancias, desconocidas en el mundo inanimado, que respondiesen al concepto de “catalizador” (catálisis = “destruir”) introducido por Jöns Jacob Berzelius (Suecia; 1779 - 1848).

La reacción de fermentación (conversión de azúcares en alcohol), conocida desde los tiempos prehistóricos, se produce mediante sustancias llamadas “fermentos” o “levaduras”, relacionadas con la vida. Pero se empieza a encontrar nuevos fermentos.

- Anselme Payen (Francia; 1785 - 1871) separa una sustancia (a la que llama “diastasa”) del germen de cebada, que acelera la conversión del almidón en azúcar.
- Theodor Schwann obtiene un extracto de jugo gástrico que digiere la carne más eficazmente que el ácido clorhídrico, al que llama “pepsina” (= “digerir”).
- Willy Kühne (Alemania; 1837 - 1900) sugiere conservar la denominación “fermento” para las sustancias que aceleran las reacciones biológicas en el interior de las células y recomienda el término “enzima” (= “en el fermento”) para aquellas sustancias que actúan en el exterior de las células.

Fermentaciones y enzimas (2)

- Eduard Buchner (Alemania; 1860 - 1917) consigue demostrar que los procesos químicos en el interior de la célula se efectúan por fermentos que no se diferencian de los que actúan en las demás actividades químicas; los fermentos de todas las clases reciben desde entonces el nombre de **enzimas**, dado por Kühne.
- Arthur Harden (Gran Bretaña; 1865 - 1940) descubre que las enzimas contienen como parte de su estructura y como elemento esencial de su función una molécula más pequeña, débilmente combinada, que denomina “**coenzima**”.
- Leonor Michaelis (Alemania; 1875 - 1949) y Maud Leonora Menten (Canadá; 1879 - 1960) aplican los conceptos de cinética química a las enzimas y describen la velocidad de una reacción catalizada por una enzima (ecuación de Michaelis - Menten), situando estas sustancias al mismo nivel que cualquier otro compuesto químico corriente.
- James Batcheller Sumner (EE.UU.; 1887 - 1955) aísla la enzima que cataliza la descomposición de la urea (ureasa) y demuestra que es una proteína.
- John Howard Northrop (EE.UU.; 1891 - 1987) aísla diversas enzimas digestivas (pepsina, tripsina, quimotripsina) capaces de romper moléculas proteicas, demostrando definitivamente que todas las enzimas son proteínas.

El estudio de las enzimas queda ya englobado en el contexto más general de las proteínas.

Ácidos nucleicos (1)

- Friedrich Miescher (Suiza; 1844 - 1895) aísla del núcleo de la célula una sustancia a la que denomina “nucleína” y, más tarde, **ácido nucleico**; en el núcleo de las células este compuesto está asociado a las proteínas, formando una proteína conjugada denominada “**nucleoproteína**”.
- Albrecht Kossel (Alemania; 1853 - 1927) encuentra que los ácidos nucleicos están formados por tres componentes:
 - Un grupo fosfato, que les confiere su carácter ácido (fosfórico).
 - Un azúcar, que no consigue identificar.
 - Unos compuestos nitrogenados (genéricamente llamados “bases”) monocíclicos, las **pirimidinas** (**Citosina**, **Timina**, **Uracilo**) y bicíclicos, las **purinas** (**Adenina**, **Guanina**).
- Alexander Todd (Gran Bretaña; 1907 - 1997) confirma las conclusiones de Levene, sintetizando todos los nucleótidos naturales que componen los ácidos nucleicos.

Ácidos nucleicos (2)

- Phoebus Aaron Theodor Levene (Rusia; 1869 - 1940):
 - Demuestra que el ladrillo principal de los diferentes ácidos nucleicos, al que llama **nucleótido**, está formado por una molécula de azúcar, un grupo fosfato y una base.
 - Identifica los azúcares contenidos en los ácidos nucleicos como **ribosa** (azúcar de cinco átomos de carbono) y **desoxirribosa** (ribosa con un átomo de oxígeno menos).
 - Acuña los términos **Ácido RiboNucleico** y **Ácido DesoxirriboNucleico**, más conocidos por sus respectivos acrónimos, **ARN** y **ADN**.
 - Comprueba que el ARN siempre carece de timina y que el ADN siempre carece de uracilo.

- Alexander Todd (Gran Bretaña; 1907 - 1997) confirma las conclusiones de Levene, sintetizando todos los nucleótidos naturales que componen los ácidos nucleicos.

La energía de la vida (1)

Todos los organismos necesitan energía para vivir y la obtienen a partir de las reacciones químicas que se producen en las células.

- Arthur Harden (Gran Bretaña; 1865 - 1940) encuentra que en la fermentación de la glucosa juegan un importante papel las moléculas de fosfato.
- Carl Ferdinand Cori (República Checa; 1896 - 1984) y Gerty Theresa Radnitz Cori (República Checa; 1896 - 1957) observan que en la descomposición del glucógeno en el tejido muscular se forma una secuencia de compuestos fosfatados que permiten pequeños cambios energéticos, fácilmente restituibles.
- Fritz Albert Lipmann (Alemania; 1899 - 1986) demuestra que el metabolismo de los hidratos de carbono está relacionado con la fijación de grupos fosfato en las moléculas orgánicas produciendo diferentes configuraciones energéticas; el contenido energético de los distintos alimentos se acumula en los compuestos fosfatados cuando las moléculas se rompen. El compuesto más versátil de este tipo es el llamado **Adenosín Trifosfato (ATP)**, que aparecerá en casi todos los puntos donde exista intercambio energético.
- Hans Adolf Krebs (Alemania; 1900 - 1981) estudia la absorción de oxígeno en la última fase de la descomposición de la glucosa, descubriendo un proceso cíclico que es la fuente de energía más importante de los organismos vivos ("ciclo de Krebs"), tanto en la degradación de hidratos de carbono como en la de lípidos y proteínas.

La energía de la vida (2)

- David Ezra Green (EE.UU.; 1910 - 1983) comprueba que todas las reacciones con oxígeno molecular implicadas en el ciclo de Krebs se producen en las mitocondrias, pequeños corpúsculos del protoplasma celular que han demostrado ser la “central energética” de la célula.

Pero la energía que utilizan los seres vivos procede de la radiación solar que es transformada en productos químicos sólo por las plantas verdes, a través del proceso de la **fotosíntesis**, ya descrito por Jan Ingenhousz (Holanda; 1730 - 1791) en el siglo XVIII.

- Julius von Sachs (Alemania; 1832 - 1897) descubre que la fotosíntesis es catalizada por la clorofila, pigmento verde contenido en el interior de unos corpúsculos (“cloroplastos”) de las plantas verdes, en presencia de luz.
- Melvin Calvin (EE.UU.; 1911 - 1997) aísla los productos intermedios involucrados en la fotosíntesis (entre los que se encuentra el ATP) y deduce la relación entre ellos (en la que interviene el ciclo de Krebs), construyendo el esquema del proceso, actualmente aceptado.

Moléculas vivientes (1)

- Martinus Willem Beijerinck (Holanda; 1851 - 1931) descubre en la enfermedad del mosaico del tabaco un agente infeccioso que no es una bacteria y lo denomina “**virus** (= “veneno”) filtrable”, entidad responsable también de otras enfermedades humanas comunes (paperas, varicela, gripe).

- Wendell Meredith Stanley (EE.UU.; 1904 - 1971) cristaliza el virus del mosaico del tabaco, lo que induce a considerar a estas entidades como exentas de vida.

Se consigue demostrar que todos los virus son nucleoproteínas y, por tanto, todas contienen ácidos nucleicos.

- Torbjörn Oskar Caspersson (Suecia; 1910 - 1997) desarrolla un método que permite concluir que los cromosomas están formados por nucleoproteínas.

Se empieza a sospechar que los genes son compuestos químicos, de hecho, que son meras moléculas de nucleoproteínas.

- George Wells Beadle (EE.UU.; 1903 - 1989) y Edward Lawrie Tatum (EE.UU.; 1909 - 1975) trabajan con moho de pan (*Neurospora crassa*), que puede fabricar por sí solo todos los aminoácidos a partir de azúcares y sales inorgánicas; consiguen mutaciones que pierden dicha facultad, lo que les lleva a concluir que cada gen es responsable de la reproducción de una única enzima.

Moléculas vivientes (2)

Cada vez está más claro que los cromosomas de un organismo contienen información para un conjunto de enzimas, cuyo número es prácticamente igual al de los genes; este patrón de cromosomas es el que se conoce como **código genético**.

- Oswald Theodore Avery (Canadá; 1877 - 1955), Colin Munro MacLeod (Canadá; 1909 - 1972) y Maclyn McCarty (EE.UU.; 1911 - 2005), trabajando con cultivos de neumococos, las bacterias causantes de la neumonía, consiguen demostrar que la parte de ácido nucleico es la que lleva el código genético, no la parte de la proteína.
- Alfred Day Hershey (EE.UU.; 1908 - 1997) y Martha Chase (EE.UU.; 1930-2003) realizan un experimento crucial con “bacteriófagos”, virus que infestan las bacterias, en el que se demuestra definitivamente que el código es transmitido por el ácido nucleico.

Los virus contienen ARN, ADN o ambos; dentro de la célula el ADN sólo se halla en los genes. La herencia se basa, pues, en el ADN.

Ha nacido la **Biología Molecular** y ya casi todo está preparado, ... doctor Watson.

El encaje de las piezas en la doble hélice (1)

- Erwin Chargaff (Austria; 1905 - 2002) demuestra que en una molécula de ácido nucleico el número de grupos purina coincide con el de grupos pirimidina, más concretamente, el número de unidades de adenina es equivalente al de timina, mientras que el número de unidades de guanina es equivalente al de citosina.
- Linus Carl Pauling (EE.UU.; 1901 - 1997) proporciona pruebas de que las moléculas de grandes proteínas tienen estructura de hélice, basada en un eje central de glicina del que parten las cadenas laterales.
- Maurice Hugh Frederick Wilkins (Nueva Zelanda; 1916 - 2004) vislumbra que las moléculas de ADN tienen estructura de hélice, basada en un eje central de azúcar-fosfato del que parten lateralmente las bases.
- Francis Harry Compton Crick (Gran Bretaña; 1916 - 2004) y James Dewey Watson (EE.UU.; 1928 -) sugieren que la molécula de ADN consiste en una **doble hélice** formada por sendos soportes de azúcar-fosfato que giran alrededor de un eje común, configurando una molécula cilíndrica en el que las bases parten desde cada uno de los soportes hacia el interior.

El encaje de las piezas en la doble hélice (2)

El modelo de Watson-Crick se publica en 1953 y explica elegantemente:

- La igualdad de unidades de purina y pirimidina: Para que el diámetro de la molécula permanezca constante, siempre tiene que enlazar una purina grande con una pirimidina pequeña (A-T y G-C).
- La replicación de la molécula de ADN: Cada una de las dos cadenas de azúcar-fosfato se desenrolla y sirve de modelo para formar una hélice complementaria; donde existe una adenina se acopla una timina del medio y viceversa, y donde existe una guanina se acopla una citosina del medio y viceversa; cada hélice sintetiza una nueva, complementaria y pronto se forman dos dobles hélices donde antes sólo había una.
- Las mutaciones: Cuando se produce una imperfección en el proceso, la nueva molécula de ADN es ligeramente diferente a su precursora y se produce una mutación.

La formación de los ácidos nucleicos está catalizada por enzimas, lo que permite su síntesis.

- Severo Ochoa (España; 1905 - 1993) produce ARN sintético utilizando una enzima bacteriana, mostrando que se forma por la adición de un nucleótido a otro.
- Arthur Kornberg (EE.UU.; 1918 - 2007) produce ADN sintético utilizando otra enzima bacteriana, mostrando que se forma por reproducción de una molécula presente.

El ADN es el producto primario y el ARN es el producto secundario, si bien éste es el responsable de la síntesis de las proteínas.

Mensajes y códigos (1)

El ADN de los genes siempre permanece dentro del núcleo de la célula, pero la síntesis de proteínas específicas se produce siempre en el citoplasma; de alguna forma la molécula de ácido nucleico ha de contener la información requerida para la construcción de la molécula de proteína, y dicha información ha de ser transmitida de un lugar a otro de la célula.

- Georg Emil Palade (Rumanía; 1912 - 2008) demuestra que las mitocondrias presentes en el protoplasma celular (hay unas 2.000 en una célula) contienen unos corpúsculos independientes (diez millones de veces más pequeños), ricos en ARN, a los que denomina “ribosomas”, estableciendo que éstos son el centro de la síntesis de proteínas.
- Mahlon Bush Hoagland (EE.UU.; 1921 - 2009) localiza una variedad de ARN (“ARN mensajero”) que adopta la estructura de una molécula de ADN dentro de los cromosomas del núcleo y se traslada hasta los ribosomas del citoplasma, donde se combina con otra variedad de ARN (“ARN transferente”), dando lugar a una enzima característica que contiene, por tanto, la información del cromosoma.

Si sólo existen 4 bases en el ADN para transmitir la información sobre 20 proteínas, se necesitan como mínimo grupos de 3 bases ($4^3 = 64$) para hacerlo. El sistema por el cual un triplete de nucleótidos codifica un aminoácido se denomina **código genético** y cada uno de esos tripletes se llama “**codón**”.

Mensajes y códigos (2)

El código genético tiene como características:

- Está formado por combinaciones trinucleótidas que discurren a lo largo de la cadena polinucleótida.
- Cada combinación representa a un solo aminoácido, pero pueden existir combinaciones que no dan lugar a ningún aminoácido (no codificantes).
- Es degenerado, es decir, un aminoácido puede ser representado por más de una combinación.
- Se considera universal, ya que rige para todos los organismos vivos.

El diccionario con la clave se elabora en pocos años.

- Marshall Warren Nirenberg (EE.UU.; 1927 - 2010) establece la primera correspondencia entre un codón y un aminoácido.
- Har Gobind Khorana (India; 1922 -) termina de descifrar completamente la clave del código genético.

El estado actual es la determinación del orden en que están colocados dichos tripletes en la molécula de ADN, es decir, establecer la secuencia de los nucleótidos, identificar los genes y conseguir descifrar, finalmente, el genoma humano.

Mientras tanto, se siguen aislando y uniendo fragmentos de ADN, lo que hace posible construir moléculas de ADN recombinante "*in vitro*" (en un ambiente artificial, fuera de un organismo vivo).

El origen de la vida

- Alexander Ivanovich Oparin (Rusia; 1894 - 1980) publica en 1936 el libro “El origen de la vida”, en el que describe paso a paso las condiciones hipotéticas que habrían sido necesarias para la aparición de la vida sobre la Tierra a partir de la existencia de una atmósfera de metano y amoníaco y de una fuente de energía representada por el Sol.
- Stanley Lloyd Miller (EE.UU.; 1930 - 2007) reproduce experimentalmente las condiciones de la Tierra primitiva; a partir de agua, hidrógeno y metano y utilizando descargas eléctricas como fuente de energía consigue que se formen, después de una semana, compuestos orgánicos simples y algunos aminoácidos sencillos.

Si en una pequeña preparación de laboratorio se pueden conseguir aminoácidos en una semana, no parece muy aventurado especular que pudieran aparecer ácidos nucleicos después de mil millones de años, contando con un océano y una atmósfera.

Después de todo, quizás sea necesario resucitar el concepto de generación espontánea.

La Geología del siglo XX (1)

La aplicación de técnicas físicas y químicas a la Geología contribuye de forma importante a su avance en el siglo XX.

- Victor Moritz Goldschmidt (Suiza; 1888 - 1947) usa las propiedades de los elementos químicos para predecir su aparición en un determinado mineral, por lo que es considerado el precursor de la **Geoquímica**.
- Beno Gutenberg (Alemania; 1889 - 1960) usa el estudio de las ondas sísmicas para determinar el estado del interior de la Tierra (manto sólido sobre núcleo líquido), por lo que es considerado el precursor de la **Geofísica**.

La Geología del siglo XX (2)

La idea básica para explicar la dinámica del planeta Tierra y que dará lugar al desarrollo de la Geología contemporánea aparece en 1915.

- Alfred Lothar Wegener (Alemania; 1880 - 1930) formula la **teoría de la deriva continental**, según la cual los continentes se han movido sobre el manto hacia sus actuales posiciones desde una masa única inicial ("*Pangea*" = "todo tierra") rodeada por un océano continuo ("*Panthalassa*" = "todo mar"), que se fractura y divide. Los medios tecnológicos de la época no permiten confirmar esta teoría.
- John Tuzo Wilson (Canada; 1908 - 1993) incorpora la deriva continental a su **teoría de la tectónica de placas**, que considera la existencia de grandes placas rígidas en movimiento, con crecimiento por unos bordes y destrucción por otros, fenómeno en el que la energía tiene un papel impulsor. Esta teoría se apoya en el fenómeno de expansión del fondo marino, comprobado por medidas de gran exactitud, por lo que este modelo de la dinámica terrestre ha sido aceptado como el más real.

Índice - ALGO DE BIBLIOGRAFÍA

Referencias materiales	211
Referencias virtuales	214

Referencias materiales

- **Aragón, F.;** *Historia de la Química*, Editorial Síntesis, Madrid (2004).
- **Argüelles, J.;** *Historia de la Matemática*, Ediciones Akal, Madrid (1989).
- **Asimov, I.;** *The wellsprings of life*, New American Library, New York (1960).
- **Asimov, I.;** *Enciclopedia biográfica de Ciencia y Tecnología*, Revista de Occidente, Madrid (1973).
- **Asimov, I.;** *Breve historia de la Química*, Alianza Editorial, Madrid (1975).
- **Asimov, I.;** *Breve historia de la Biología*, 3ª ed., Editorial Universitaria de Buenos Aires, Buenos Aires (1975).
- **Asimov, I.;** *El código genético*, Plaza y Janés Editores, Barcelona (1982).
- **Asimov, I.;** *De los números y su historia*, Ediciones Lidiun, Buenos Aires (1984).
- **Asimov, I.;** *Nueva guía de la Ciencia*, Plaza y Janés Editores, Barcelona (1985).
- **Beiser, A.;** *Conceptos de Física moderna*, Ediciones del Castillo, Madrid (1967).
- **Boorstin, D. ;** *Los descubridores*, Editorial Crítica, Barcelona (2000).
- **Carpentier, J. y Lebrun, F. (dirs.);** *Breve historia de Europa*, Alianza Editorial, Madrid (1994).
- **Cartwright, J.;** *Del flogisto al oxígeno*, Fundación Canaria Orotava de Historia de la Ciencia, La Orotava (2000).
- **Checkland, P.;** *Systems thinking, systems practice*, John Wiley & Sons, Chichester (1998).
- **Doxiadis, A.;** *El tío Petros y la conjetura de Goldbach*, Ediciones B, Barcelona (2000).
- **Espasa-Calpe (ed.);** *El pequeño Espasa*, Espasa-Calpe, Madrid (1988).
- **Esteban, S.;** *Introducción a la historia de la Química*, Universidad Nacional de Educación a Distancia, Madrid (2001).
- **Gaarder, J.;** *El mundo de Sofía. Novela sobre la historia de la Filosofía*, 43ª

Referencias materiales

- ed., Ediciones Siruela, Madrid (2000).
- **Gamov, G.;** *Biografía de la Física*, Alianza Editorial, Madrid (1979).
 - **González, M.A.;** *El método experimental y la ciencia de lo vivo*, Fundación Canaria Orotava de Historia de la Ciencia, La Orotava (2002).
 - **Gribbin, J.;** *Science. A history. 1543 - 2001*, Penguin Books, London (2003).
 - **Guedj, D.;** *El teorema del loro*, Editorial Anagrama, Barcelona (2002).
 - **Guillen, M.;** *Cinco ecuaciones que cambiaron el mundo*, Editorial Debate, Madrid (1999).
 - **Izquierdo, M.C, Peral, F., De La Plaza, M.A. y Troitiño, M.D.;** *Evolución histórica de los principios de la Química*, Universidad Nacional de Educación a Distancia, Madrid (2003).
 - **Hayek, N.;** *Los orígenes de la matemática moderna*, Universidad de La Laguna, La Laguna (1979).
 - **Holton, G y Brush, S.G.;** *Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas*, Editorial Reverté, Barcelona (1976).
 - **Mandel, S.;** *Dictionary of Science*, Dell Publishing Co., New York (1969).
 - **Mason, S.F.;** *Historia de las ciencias. 1. Las etapas iniciales del conocimiento científico* Alianza Editorial, Madrid (2001).
 - **Mason, S.F.;** *Historia de las ciencias. 2. La revolución científica de los siglos XVI y XVII* Alianza Editorial, Madrid (2001).
 - **Mason, S.F.;** *Historia de las ciencias. 3. Las aportaciones de la Ilustración* Alianza Editorial, Madrid (2001).
 - **Mason, S.F.;** *Historia de las ciencias. 4. La ciencia del siglo XIX* Alianza Editorial, Madrid (2001).
 - **Mason, S.F.;** *Historia de las ciencias. 5. La ciencia del siglo XX* Alianza Editorial, Madrid (2001).
 - **Méndez, J.;** *Las Matemáticas: su historia, evolución y aplicaciones*, Servicio de Publicaciones, Universidad de La Laguna, La Laguna (2003).
 - **Salas, C.;** *Pasaje al infinito*, Mira Editores, Zaragoza (1993).

Referencias materiales

- **Sánchez, J.M.;** *Como al león por sus garras*, Editorial Debolsillo, Barcelona (2003).
- **Sequeiros, L. y Anguita, F.;** *Nuevos saberes y nuevos paradigmas en Geología. Historia de las nuevas propuestas en las Ciencias de la Tierra en España entre 1978 y 2003*, Lull, Sociedad Española de Historia de las Ciencias y de las Técnicas, 26, 279-307 (2003).
http://www.aepect.org/hemeroteca/Anguita-Sequeiros_Lull2003.pdf

Referencias virtuales

- **Anónimo**; *Historia de las Matemáticas*, Plan Nacional para las Tecnologías de la Información y la Comunicación (PNTIC), Madrid (2004).
<http://almez.pntic.mec.es/~agos0000/>
- **Carter, J.S.**; *History of Biology*, Clermont College, University of Cincinnati, Batavia (2002).
http://biology.clc.uc.edu/courses/bio104/hist_sci.htm
- **Clay Mathematics Institute**; *Millenium problems*, CMI, Cambridge (2000).
<http://www.claymath.org/millennium/>
- **Danchin, A.**; *History of Biology: some important dates*, Genetic of Bacterial Genome Unit, Institut Pasteur, Paris (2005).
http://www.pasteur.fr/recherche/unites/REG/causeries/dates_1700.html
- **Fernández Buey, F.**; *Historia de la Ciencia*, Universidad Pompeu y Fabra, Barcelona (1998).
<http://www.upf.es/iuc/buey/ciencia/index.htm>
- **Furió, C., Azcona, R. y Guisasola, J.**; *Dificultades conceptuales y epistemológicas del profesorado en la enseñanza de los conceptos de 'cantidad de sustancia' y de 'mol'*, Enseñanza de las Ciencias, 17(3), 359-376 (1999).
<http://www.bib.uab.es/pub/ensenanzadelasciencias/02124521v17n3p359.pdf>
- **Furió, C., Azcona, R. y Guisasola, J.**; *The learning and teaching of the concepts 'amount of substance' and 'mole': A review of the literature*, Chemistry Education: Research and Practice in Europe, 3(3), 277-292 (2002).
http://www.uoi.gr/cerp/2002_October/pdf/02Furio.pdf
- **Hatch, R.A.**; *History of science study guide*, University of Florida, Gainesville (1999).
<http://www.clas.ufl.edu/users/rhatch/HIS-SCI-STUDY-GUIDE/index.htm>
- **Johnston, I.C.**; *... And still we evolve (A handbook for the early history of modern science)*, 3ª ed., Malaspina University College, Nanaimo (1999).
<http://www.mala.bc.ca/~johnstoi/darwin/title.htm>

Referencias virtuales

- **New South Wales Department of Mineral Resources;** *History of geology* Minifact no. 60, New South Wales (2002).
<http://www.minerals.nsw.gov.au/invest/minifacts/pdfs/60.pdf>
- **O'Connor, J.J. y Robertson, E.F.;** *The MacTutor History of Mathematics archive* University of St. Andrews, Scotland (2004).
<http://www-gap.dcs.st-and.ac.uk/~history/index.html>
- **Wudka, J.;** *Physics 7: Relative space-time and cosmology*, University of California, Riverside (1998).
http://phyun5.ucr.edu/~wudka/Physics7/Notes_www/notes_www.html

