

# ¿De qué está hecho el mundo?

José Bernabéu Alberola

jose.bernabeu@uv.es

Académico Correspondiente de la RAC

Dpto. de Física Teórica, Universidad de Valencia e IFIC,  
Centro mixto UV-CSIC

**Palabras clave:** partículas, interacciones, cosmología.



## RESUMEN:

Las Fronteras de la Física en la escala de distancias son las Partículas Elementales exploradas hasta  $10^{-19}$ m. y la Cosmología del Universo Primordial hasta  $10^{+25}$ m., dos campos relacionados entre sí. En ambos se han producido recientemente avances espectaculares del conocimiento.

La pregunta "¿De qué está hecho el mundo?", ya formulada por la Filosofía Natural de la antigua Grecia, tiene hoy su respuesta en términos de constituyentes elementales de la materia: leptones, como electrones y neutrinos, y quarks dentro de los protones y neutrones del núcleo atómico, así como sus antipartículas. Las fuerzas fundamentales entre ellos son: gravitatoria, electromagnética, débil y fuerte. El mecanismo de Higgs explica el Origen de la Masa. El estudio experimental se realiza mediante grandes medios como Aceleradores, Detectores y Computación.

El Universo se halla regido por el Principio Cosmológico, que establece su carácter uniforme (en media) e isotropo, sin ningún "centro" espacial. Se halla en expansión, ahora acelerada, desde un origen del tiempo: el "Big-Bang". El estudio del Universo Primordial se realiza bien observando la radiación emitida por objetos cósmicos muy lejanos, bien por el análisis de remanentes de aquella época como la Radiación de Fondo de Fotones, desacoplada desde la recombinaión de electrones y protones para formar los átomos de hidrógeno. El resultado consistente ha sido que el contenido de energía-materia del Universo es en un 95% de energía y materia oscuras, distinto de lo conocido previamente.

## ABSTRACT:

The Frontiers of Physics on the distance scale are the Elementary Particles probed up to  $10^{-19}$ m. and the Cosmology of the Primordial Universe up to  $10^{+25}$ m., two fields related to each other. Both have seen spectacular advances in knowledge recently.

The question "What is the world made of?", already formulated by the Natural Philosophy of ancient Greece, has today its answer in terms of elementary constituents of matter: leptons, such as electrons and neutrinos, and quarks inside protons and neutrons of the atomic nucleus, as well as their antiparticles. The fundamental forces among them are: gravitational, electromagnetic, weak and strong. The Higgs mechanism explains the Origin of Mass. The experimental study is carried out through large means such as Accelerators, Detectors and Computing.

The Universe is governed by the Cosmological Principle, which establishes its uniform (on average) and isotropic character, without any spatial "center". It is expanding, now accelerating, from an origin of the time: the "Big-Bang". The study of the Primordial Universe is carried out either by observing the radiation emitted by very distant cosmic objects, or by the analysis of remnants of that time such as the Background Radiation of Photons, uncoupled since the recombination of electrons and protons to form hydrogen atoms. The consistent result has been that the energy-matter content of the Universe is 95% of dark energy and matter, different from what was previously known.



## 1. INTRODUCCIÓN: LAS FRONTERAS DE LA FÍSICA

El avance del conocimiento en la Ciencia se mide por múltiples factores, entre ellos: (i) el grado de síntesis alcanzado, (ii) la explicación e interpretación de nuevos fenómenos observados, (iii) la unificación que permite el incremento del dominio de validez. Con ellos, nuevos problemas y fenómenos no vislumbrados antes se abren, y su resolución conduce a una comprensión más profunda y a la formulación de nuevas preguntas.

Queda así claro que una visión lineal del avance de la Ciencia, en el que cada vez habría menos problemas abiertos, no responde a los hechos y, por el contrario, es el propio avance el que abre nuevas fronteras entre el conocimiento y la ignorancia. La imagen de una isla de conocimiento expandiéndose en el mar de la ignorancia, tal como se representa en la Figura 1, sería mucho más apropiada



Figura 1.- Isla de conocimiento y mar de ignorancia

Así pues, es el avance del conocimiento el que genera y aumenta el número de preguntas en las fronteras.

Fronteras existen en todos los campos de la Ciencia. Cuando nos referimos a la escala de distancias exploradas en la Física, las dos Fronteras se sitúan en la física de partículas elementales y en la cosmología. Si tomamos como referencia la escala humana del metro, yendo hacia distancias más pequeñas observamos otras especies del mundo biológico y, descendiendo hasta distancias del orden de 10-10 m, la estructura atómico-molecular de la materia condensada y la química. A distancias más pequeñas entramos en el mundo subatómico explorado en los últimos cien años, habiendo llegado en la actualidad a conocer la estructura más íntima de la materia en la física de partículas hasta distancias del orden de 10-19 m. En sentido contrario, la observación a grandes distancias nos conduce desde el planeta Tierra a la astronomía del sistema solar y de nuestra galaxia La Vía Láctea a galaxias y cúmulos de galaxias más lejanos, habiendo llegado en la actualidad a observar en los confines del Universo hasta distancias del orden de 10+25 m. Cuando nos ocupamos del Universo como un todo en su estructura y su dinámica hablamos de cosmología.

Debido a la velocidad finita de propagación de señales -usualmente la velocidad de la luz- la observación del universo a esas enormes distancias nos está dando información del mismo, no en el momento actual sino en cómo era en los instantes primitivos de su historia, el llamado universo primordial.

El resultado más espectacular de las últimas décadas es que esos dos campos de la física de partículas sobre lo más pequeño y de la cosmología del universo primordial se unifican, de modo que la física que ha de dar cuenta del comportamiento del mundo a esas escalas de distancias extremas ha de ser la misma. De ahí la pregunta del título: ¿De qué está hecho el mundo?».

## 2. CONSTITUYENTES DE LA MATERIA

La Filosofía Natural de la antigua Grecia planteó esta cuestión de la composición de la materia (Böhme & Hartmut, 1998), en combinación con la idea de si se podía dividir en partes cada vez más pequeñas.

Empédocles (~ 490-430 a.C.) sigue la doctrina de Parménides según la cual la materia no puede surgir de la nada, pero, en vez de asignar una esencia única e inmóvil, postula la teoría de los cuatro elementos como principios de la realidad: aire, tierra, fuego y agua, que al interactuar entre sí generaban la sequedad, el frío, el calor y la humedad. La teoría tiene una celebrada ilustración en las pinturas de Joachim Beuckelaer, pintor flamenco del siglo XVI, que están exhibidas en la National Gallery de Londres. Las relaciones entre los elementos y sus formas son parte del mundo de las ideas de Platón (427-347 a.C.) para los efectos sensibles.

Demócrito (460-370 a.C.), discípulo de Leucipo y maestro de Pitágoras, fué el fundador del atomismo. La materia no era infinitamente divisible, sino que tenía una serie de «átomos» con diferentes formas y pesos indivisibles e inmutables.

Aristóteles (384-322 a.C.) es considerado el padre de la filosofía occidental, que ha perdurado durante dos milenarios. Contrario a las ideas de su maestro Platón, considera que la fuente de conocimiento es la observación. También contribuyó al debate sobre la constitución de la materia, distinguiendo la materia terrestre con la teoría de los cuatro elementos de la materia celeste formada por un



quinto elemento al que llamó «quintaesencia». Este éter invisible llena el universo y es de índole superior, mucho más sutil. La quintaesencia es lo más fino de una cosa, lo esencial y más puro.

No hubo grandes novedades históricas sobre la constitución de la materia hasta los albores del siglo XIX con la «ley de proporciones definidas». Es una ley estequiométrica de la química, según la cual cuando se combinan dos o más elementos para dar un determinado compuesto, siempre lo hacen en una relación constante de masas. Fue enunciada por el farmacéutico y químico francés Louis Proust, basándose en los experimentos que llevó a cabo. La explicación de la Ley de Proust vino con la teoría atómica de John Dalton, la primera con bases científicas. El modelo permitió aclarar por qué las sustancias químicas reaccionaban en proporciones estequiométricas fijas, y por qué cuando dos sustancias reaccionan para formar dos o más compuestos diferentes, entonces las proporciones de estas relaciones son números enteros (Ley de las proporciones múltiples). Además, el modelo aclaraba que, aún existiendo una gran variedad de sustancias diferentes, estas podían ser explicadas en términos de una cantidad más bien pequeña de constituyentes elementales o de elementos.

Dimitri Mendeléyev publicó en 1869 la primera versión de La Tabla Periódica de los Elementos. Fue ampliamente reconocida, la desarrolló para ilustrar tendencias periódicas en las propiedades químicas de los elementos entonces conocidos. Mendeléyev también pronosticó algunas propiedades de elementos entonces desconocidos que anticipó que ocuparían los lugares vacíos en su tabla. Posteriormente se demostró que la mayoría de sus predicciones eran correctas cuando se descubrieron los elementos en cuestión.

La tabla periódica de Mendeléyev ha sido desde entonces ampliada y mejorada con el descubrimiento o síntesis de elementos nuevos y el desarrollo de modelos teóricos nuevos para explicar el comportamiento químico. La estructura actual fue diseñada por Alfred Werner a partir de la versión de Mendeléyev. La ordenación correcta corresponde al número atómico, no a la masa atómica. Una versión adecuada de esta estructura se da en la figura 2.

Para celebrar el 150 aniversario de su creación, la UNESCO declaró 2019 como el Año Internacional de la Tabla Periódica de los Elementos Químicos. Se han descubierto o sintetizado todos los elementos de número atómico del 1 (hidrógeno) al 118 (oganesón). Los primeros 94 existen naturalmente, aunque algunos solo se han encontrado en cantidades pequeñas y fueron sintetizados en laboratorio antes de ser encontrados en la naturaleza. Los elementos con números atómicos del 95 al 118 solo han sido sintetizados en laboratorios. Los elementos del 95 a 100 existieron en la naturaleza en tiempos pasados, pero actualmente no. La investigación para encontrar por síntesis nuevos elementos de números atómicos más altos continúa. Para la química, los átomos de la tabla periódica son los constituyentes elementales. Aunque su gran número pueda generar preguntas sobre su «elementariedad», la tabla periódica es científicamente correcta, mientras que la teoría de los cuatro elementos, con su simplicidad, es falsa. La materia agregada de átomos cubre todas las escalas macroscópicas, descendiendo desde el metro a los cristales condensados, las macromoléculas, las moléculas y los átomos hasta distancias del orden de  $10^{-10}$  m. En los últimos años, la NanoCiencia maneja estas «nanopartículas» de átomos y moléculas individualmente.

Periodic Table of the Elements																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
1 IA 11A	2 IIA 2A	3 III 3B	4 IVB 4B	5 VB 5B	6 VI 6B	7 VII 7B	8 VIII 8	9 VIII 8	10	11 IB 1B	12 IIB 2B	13 IIIA 3A	14 IVA 4A	15 VA 5A	16 VIA 6A	17 VIIA 7A	18 VIIIA 8A																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
H Hydrogen 1.008	He Helium 9.012	Li Lithium 6.941	Be Boron 10.81	Na Sodium 22.990	Mg Magnesium 24.305	Sc Scandium 44.956	Ti Titanium 47.88	V Chromium 50.942	Cr Chromium 51.99	Mn Manganese 54.938	Fe Iron 55.933	Co Cobalt 58.933	Ni Nickel 58.933	Cu Copper 63.545	Zn Zinc 65.39	B Boron 10.811	C Carbon 12.011	N Nitrogen 14.007	O Oxygen 15.999	F Fluorine 18.998	Ne Neon 20.180																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
K Potassium 39.098	Ca Calcium 40.078	Sc Scandium 44.956	Sc Scandium 44.956	Ti Titanium 47.88	V Vanadium 50.942	Cr Chromium 51.99	Cr Chromium 51.99	Cr Chromium 51.99	Cr Chromium 51.99	Mn Manganese 54.938	Fe Iron 55.933	Fe Iron 55.933	Co Cobalt 58.933	Ni Nickel 58.933	Al Aluminum 26.982	Si Silicon 28.086	P Phosphorus 30.974	S Sulfur 32.066	Cl Chlorine 35.453	Ar Argon 39.948																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Rb Rubidium 84.468	Sr Strontium 87.62	Y Yttrium 88.905	Y Yttrium 88.905	Zr Zirconium 91.224	Zr Zirconium 91.224	Nb Niobium 92.906	Nb Niobium 92.906	Mo Molybdenum 95.967	Mo Molybdenum 95.967	Tc Technetium 98.957	Tc Technetium 98.957	Ru Ruthenium 102.905	Ru Ruthenium 102.905	Rh Rhodium 106.42	Rh Rhodium 106.42	Pd Palladium 107.866	Pd Palladium 107.866	Ag Silver 107.866	Ag Silver 107.866	Ga Gallium 72.61	Ge Germanium 74.622	As Arsenic 74.922	Se Selenium 75.09	Br Bromine 79.904	Kr Krypton 84.80																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
Cs Cesium 132.905	Fr Francium 223.020	56 77-71	57 72	58 73	59 74	60 75	61 76	62 77	63 78	64 79	65 80	66 81	67 82	68 83	69 84	70 85	71 86	72 87	73 88	74 89-103	75 104	76 105	77 106	78 107	79 108	80 109	81 110	82 111	83 112	84 113	85 114	86 115	87 116	88 117	89 118																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
La Lanthanide Series [57-71]	Ce [58]	Pr [59]	Nd [60]	Pm [61]	Sm [62]	Eu [63]	Gd [64]	Tb [65]	Dy [66]	Ho [67]	Er [68]	Tm [69]	Yb [70]	Lu [71]	La Lanthanide Series [57-71]	Ce [58]	Pr [59]	Nd [60]	Pm [61]	Sm [62]	Eu [63]	Gd [64]	Tb [65]	Dy [66]	Ho [67]	Er [68]	Tm [69]	Yb [70]	Lu [71]	La Lanthanide Series [57-71]	Ce [58]	Pr [59]	Nd [60]	Pm [61]	Sm [62]	Eu [63]	Gd [64]	Tb [65]	Dy [66]	Ho [67]	Er [68]	Tm [69]	Yb [70]	Lu [71]	La Lanthanide Series [57-71]	Ce [58]	Pr [59]	Nd [60]	Pm [61]	Sm [62]	Eu [63]	Gd [64]	Tb [65]	Dy [66]	Ho [67]	Er [68]	Tm [69]	Yb [70]	Lu [71]	La Lanthanide Series [57-71]	Ce [58]	Pr [59]	Nd [60]	Pm [61]	Sm [62]	Eu [63]	Gd [64]	Tb [65]	Dy [66]	Ho [67]	Er [68]	Tm [69]	Yb [70]	Lu [71]	La Lanthanide Series [57-71]	Ce [58]	Pr [59]	Nd [60]	Pm [61]	Sm [62]	Eu [63]	Gd [64]	Tb [65]	Dy [66]	Ho [67]	Er [68]	Tm [69]	Yb [70]	Lu [71]	La Lanthanide Series [57-71]	Ce [58]	Pr [59]	Nd [60]	Pm [61]	Sm [62]	Eu [63]	Gd [64]	Tb [65]	Dy [66]	Ho [67]	Er [68]	Tm [69]	Yb [70]	Lu [71]	La Lanthanide Series [57-71]	Ce [58]	Pr [59]	Nd [60]	Pm [61]	Sm [62]	Eu [63]	Gd [64]	Tb [65]	Dy [66]	Ho [67]	Er [68]	Tm [69]	Yb [70]	Lu [71]	La Lanthanide Series [57-71]	Ce [58]	Pr [59]	Nd [60]	Pm [61]	Sm [62]	Eu [63]	Gd [64]	Tb [65]	Dy [66]	Ho [67]	Er [68]	Tm [69]	Yb [70]	Lu [71]	La Lanthanide Series [57-71]	Ce [58]	Pr [59]	Nd [60]	Pm [61]	Sm [62]	Eu [63]	Gd [64]	Tb [65]	Dy [66]	Ho [67]	Er [68]	Tm [69]	Yb [70]	Lu [71]	La Lanthanide Series [57-71]	Ce [58]	Pr [59]	Nd [60]	Pm [61]	Sm [62]	Eu [63]	Gd [64]	Tb [65]	Dy [66]	Ho [67]	Er [68]	Tm [69]	Yb [70]	Lu [71]	La Lanthanide Series [57-71]	Ce [58]	Pr [59]	Nd [60]	Pm [61]	Sm [62]	Eu [63]	Gd [64]	Tb [65]	Dy [66]	Ho [67]	Er [68]	Tm [69]	Yb [70]	Lu [71]	La Lanthanide Series [57-71]	Ce [58]	Pr [59]	Nd [60]	Pm [61]	Sm [62]	Eu [63]	Gd [64]	Tb [65]	Dy [66]	Ho [67]	Er [68]	Tm [69]	Yb [70]	Lu [71]	La Lanthanide Series [57-71]	Ce [58]	Pr [59]	Nd [60]	Pm [61]	Sm [62]	Eu [63]	Gd [64]	Tb [65]	Dy [66]	Ho [67]	Er [68]	Tm [69]	Yb [70]	Lu [71]	La Lanthanide Series [57-71]	Ce [58]	Pr [59]	Nd [60]	Pm [61]	Sm [62]	Eu [63]	Gd [64]	Tb [65]	Dy [66]	Ho [67]	Er [68]	Tm [69]	Yb [70]	Lu [71]	La Lanthanide Series [57-71]	Ce [58]	Pr [59]	Nd [60]	Pm [61]	Sm [62]	Eu [63]	Gd [64]	Tb [65]	Dy [66]	Ho [67]	Er [68]	Tm [69]	Yb [70]	Lu [71]	La Lanthanide Series [57-71]	Ce [58]	Pr [59]	Nd [60]	Pm [61]	Sm [62]	Eu [63]	Gd [64]	Tb [65]	Dy [66]	Ho [67]	Er [68]	Tm [69]	Yb [70]	Lu [71]	La Lanthanide Series [57-71]	Ce [58]	Pr [59]	Nd [60]	Pm [61]	Sm [62]	Eu [63]	Gd [64]	Tb [65]	Dy [66]	Ho [67]	Er [68]	Tm [69]	Yb [70]	Lu [71]	La Lanthanide Series [57-71]	Ce [58]	Pr [59]	Nd [60]	Pm [61]	Sm [62]	Eu [63]	Gd [64]	Tb [65]	Dy [66]	Ho [67]	Er [68]	Tm [69]	Yb [70]	Lu [71]	La Lanthanide Series [57-71]	Ce [58]	Pr [59]	Nd [60]	Pm [61]	Sm [62]	Eu [63]	Gd [64]	Tb [65]	Dy [66]	Ho [67]	Er [68]	Tm [69]	Yb [70]	Lu [71]	La Lanthanide Series [57-71]	Ce [58]	Pr [59]	Nd [60]	Pm [61]	Sm [62]	Eu [63]	Gd [64]	Tb [65]	Dy [66]	Ho [67]	Er [68]	Tm [69]	Yb [70]	Lu [71]	La Lanthanide Series [57-71]	Ce [58]	Pr [59]	Nd [60]	Pm [61]	Sm [62]	Eu [63]	Gd [64]	Tb [65]	Dy [66]	Ho [67]	Er [68]	Tm [69]	Yb [70]	Lu [71]	La Lanthanide Series [57-71]	Ce [58]	Pr [59]	Nd [60]	Pm [61]	Sm [62]	Eu [63]	Gd [64]	Tb [65]	Dy [66]	Ho [67]	Er [68]	Tm [69]	Yb [70]	Lu [71]	La Lanthanide Series [57-71]	Ce [58]	Pr [59]	Nd [60]	Pm [61]	Sm [62]	Eu [63]	Gd [64]	Tb [65]	Dy [66]	Ho [67]	Er [68]	Tm [69]	Yb [70]	Lu [71]	La Lanthanide Series [57-71]	Ce [58]	Pr [59]	Nd [60]	Pm [61]	Sm [62]	Eu [63]	Gd [64]	Tb [65]	Dy [66]	Ho [67]	Er [68]	Tm [69]	Yb [70]	Lu [71]	La Lanthanide Series [57-71]	Ce [58]	Pr [59]	Nd [60]	Pm [61]	Sm [62]	Eu [63]	Gd [64]	Tb [65]	Dy [66]	Ho [67]	Er [68]	Tm [69]	Yb [70]	Lu [71]	La Lanthanide Series [57-71]	Ce [58]	Pr [59]	Nd [60]	Pm [61]	Sm [62]	Eu [63]	Gd [64]	Tb [65]	Dy [66]	Ho [67]	Er [68]	Tm [69]	Yb [70]	Lu [71]	La Lanthanide Series [57-71]	Ce [58]	Pr [59]	Nd [60]	Pm [61]	Sm [62]	Eu [63]	Gd [64]	Tb [65]	Dy [66]	Ho [67]	Er [68]	Tm [69]	Yb [70]	Lu [71]	La Lanthanide Series [57-71]	Ce [58]	Pr [59]	Nd [60]	Pm [61]	Sm [62]	Eu [63]	Gd [64]	Tb [65]	Dy [66]	Ho [67]	Er [68]	Tm [69]	Yb [70]	Lu [71]	La Lanthanide Series [57-71]	Ce [58]	Pr [59]	Nd [60]	Pm [61]	Sm [62]	Eu [63]	Gd [64]	Tb [65]	Dy [66]	Ho [67]	Er [68]	Tm [69]	Yb [70]	Lu [71]	La Lanthanide Series [57-71]	Ce [58]	Pr [59]	Nd [60]	Pm [61]	Sm [62]	Eu [63]	Gd [64]	Tb [65]	Dy [66]	Ho [67]	Er [68]	Tm [69]	Yb [70]	Lu [71]	La Lanthanide Series [57-71]	Ce [58]	Pr [59]	Nd [60]	Pm [61]	Sm [62]	Eu [63]	Gd [64]	Tb [65]	Dy [66]	Ho [67]	Er [68]	Tm [69]	Yb [70]	Lu [71]	La Lanthanide Series [57-71]	Ce [58]	Pr [59]	Nd [60]	Pm [61]	Sm [62]	Eu [63]	Gd [64]	Tb [65]	Dy [66]	Ho [67]	Er [68]	Tm [69]	Yb [70]	Lu [71]	La Lanthanide Series [57-71]	Ce [58]	Pr [59]	Nd [60]	Pm [61]	Sm [62]	Eu [63]	Gd [64]	Tb [65]	Dy [66]	Ho [67]	Er [68]	Tm [69]	Yb [70]	Lu [71]	La Lanthanide Series [57-71]	Ce [58]	Pr [59]	Nd [60]	Pm [61]	Sm [62]	Eu [63]	Gd [64]	Tb [65]	Dy [66]	Ho [67]	Er [68]	Tm [69]	Yb [70]	Lu [71]	La Lanthanide Series [57-71]	Ce [58]	Pr [59]	Nd [60]	Pm [61]	Sm [62]	Eu [63]	Gd [64]	Tb [65]	Dy [66]	Ho [67]	Er [68]	Tm [69]	Yb [70]	Lu [71]	La Lanthanide Series [57-71]	Ce [58]	Pr [59]	Nd [60]	Pm [61]	Sm [62]	Eu [63]	Gd [64]	Tb [65]	Dy [66]	Ho [67]	Er [68]	Tm [69]	Yb [70]	Lu [71]	La Lanthanide Series [57-71]	Ce [58]	Pr [59]	Nd [60]	Pm [61]	Sm [62]	Eu [63]	Gd [64]	Tb [65]	Dy [66]	Ho [67]	Er [68]	Tm [69]	Yb [70]	Lu [71]	La Lanthanide Series [57-71]	Ce [58]	Pr [59]	Nd [60]	Pm [61]	Sm [62]	Eu [63]	Gd [64]	Tb [65]	Dy [66]	Ho [67]	Er [68]	Tm [69]	Yb [70]	Lu [71]	La Lanthanide Series [57-71]	Ce [58]	Pr [59]	Nd [60]	Pm [61]	Sm [62]	Eu [63]	Gd [64]	Tb [65]	Dy [66]	Ho [67]	Er [68]	Tm [69]	Yb [70]	Lu [71]	La Lanthanide Series [57-71]	Ce [58]	Pr [59]	Nd [60]	Pm [61]	Sm [62]	Eu [63]	Gd [64]	Tb [65]	Dy [66]	Ho [67]	Er [68]	Tm [69]	Yb [70]	Lu [71]	La Lanthanide Series [57-71]	Ce [58]	Pr [59]	Nd [60]	Pm [61]	Sm [62]	Eu [63]	Gd [64]	Tb [65]	Dy [66]	Ho [67]	Er [68]	Tm [69]	Yb [70]	Lu [71]	La Lanthanide Series [57-71]	Ce



La física moderna, hoy llamada física subatómica o fundamental, surgió en los albores del siglo XX con el descubrimiento del electrón y la estructura interna del átomo. Joseph John Thomson anuncia en 1897 el descubrimiento del electrón a partir de sus experimentos con los rayos catódicos. Demostró que los campos eléctricos podían provocar la desviación de éstos y estudió el efecto combinado de campos eléctricos y magnéticos, buscando la relación existente entre la carga y la masa de las partículas, proporcionalidad que se mantenía constante aún cuando se alterase el material del cátodo. Demostró que la masa del electrón era aproximadamente dos mil veces más ligera que el átomo de hidrógeno. Thomson fue, por lo tanto, el primero que identificó partículas subatómicas, constituyentes del átomo. La existencia de un Núcleo central en los átomos fué descubierta en 1911 por Rutherford a partir del análisis de la dispersión de partículas alfa por los átomos. Si el átomo tiene dimensiones de  $10^{-10}$  m, el núcleo atómico tiene un radio entre  $10^{-15}$  y  $10^{-14}$  m, al pasar de elementos ligeros a más pesados. La estructura del átomo viene así descrita por electrones orbitando alrededor del núcleo en un modelo tipo «planetario».

Con el descubrimiento del protón como componente de los rayos anódicos y la radioactividad beta - electrones emitidos por algunos núcleos - se intentó un modelo nuclear con protones y electrones que contradijo los resultados experimentales. Fué a partir de 1932, con el descubrimiento del neutrón por Chadwick y con las reacciones nucleares llevadas a cabo por los esposos Joliot-Curie, cuando nace la Física Nuclear con una estructura del núcleo atómico en términos de protones y neutrones empaquetados a esas pequeñas distancias por una interacción fuerte entre ellos. La existencia de núcleos con el mismo número de protones positivos -igual al de electrones negativos en la corteza atómica- el número atómico, y distinto número de neutrones dió una explicación natural de los isótopos de un mismo elemento químico.

En las décadas posteriores, una nueva subestructura empezó aemerger a partir de la observación de los rayos cósmicos y la experimentación con aceleradores terrestres de partículas. Nuevas partículas que no formaban parte de los átomos o los núcleos se descubrieron como resultado de las colisiones con protones y neutrones.

La proliferación de nuevas partículas con interacción fuerte, los hadrones, y de sus antipartículas -de la misma masa y carga opuesta- condujo en los años 60 del siglo XX a la formulación del Modelo Quark por parte de Gell-Mann. Aunque el modelo fué considerado inicialmente como un instrumento matemático para construir los distintos hadrones observados, los experimentos de dispersión profundamente inelástica de electrones de alta energía por protones completados en 1970 dieron un

soporte experimental de existencia real a los quarks. A esas altas energías, la sonda electrónica penetra en el interior del protón y descubre, similarmente al experimento de Rutherford para los átomos, centros puntuales de dispersión que fueron identificados con los quarks. En la actualidad se ha llegado a explorar distancias tan íntimas como  $10^{-19}$  m, no habiéndose encontrado una subestructura inferior para los electrones y quarks. En la Figura 3 se representan las escalas descendentes desde las moléculas a los quarks

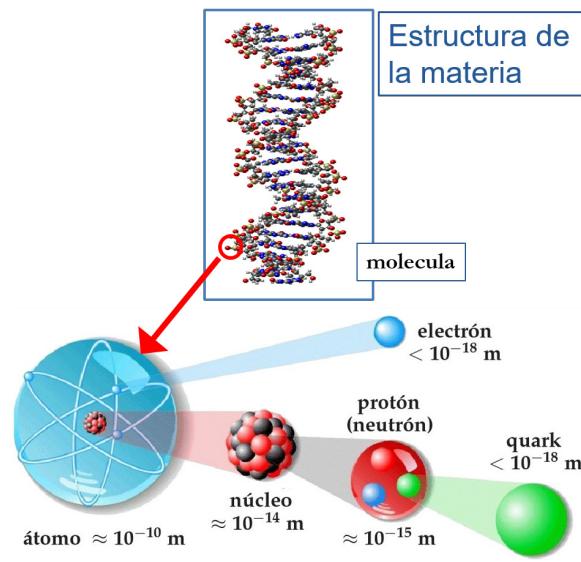


Figura 3.- Estructura de la materia

Esos mismos quarks «u» de carga +2/3 y «d» de carga -1/3 describen otros hadrones como los protones y neutrones con tres quarks, llamados «bariones», así como otros hadrones como el píon -descubierto en 1947 en los rayos cósmicos y después producido en aceleradores terrestres- con quark y antiquark, llamados «mesones». Así

$$\text{Protón} \rightarrow u(+2/3) u(+2/3) d(-1/3) \rightarrow \text{carga +1}$$

$$\text{Neutrón} \rightarrow u(+2/3) d(-1/3) d(-1/3) \rightarrow \text{carga 0}$$

$$\text{Píon} + \rightarrow u(+2/3) \bar{d}(+1/3) \rightarrow \text{carga +1} \quad (1)$$

La Edad de Oro de la física de partículas elementales desde los años 70 ha sido espectacular (Close, 2004), habiendo descubierto tres familias (o «generaciones») de quarks, y sus antiquarks, en los hadrones, replicando al par (u, d) con las mismas cargas y masas más altas.

Asimismo, tres familias de partículas como el electrón y su neutrino -producido en la desintegración beta nuclear, predicho por Pauli en 1930 y descubierto en 1956-, sin interacción fuerte y llamados «leptones», han sido también descubiertas en una perfecta simetría quark-lepton. En consecuencia, las tres primeras columnas de la Figura 4 dan cuenta de los constituyentes elementales de la materia, tanto para quarks (violeta) como para leptones (verde)

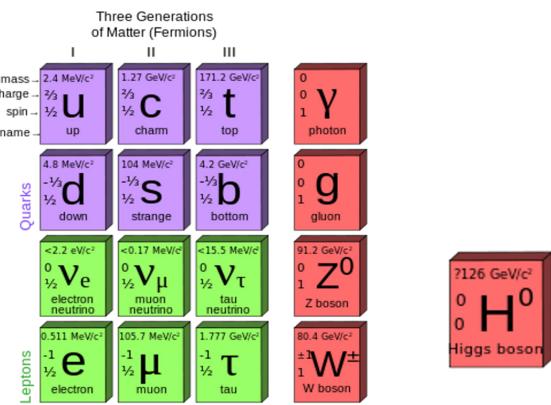


Figura 4.- Partículas Elementales

Tal simplicidad para describir y explicar el comportamiento de todos los fenómenos observados en la complejidad de los hadrones es una síntesis teórica formidable.

### 3. LAS FUERZAS FUNDAMENTALES

Una vez discutidos los «ladrillos» que constituyen la materia, hemos de entrar ahora en cuál es el «pegamento» que existe entre ellos para construir esa materia. Esa relación platónica entre los constituyentes elementales la establecen las «interacciones» o fuerzas que consideramos fundamentales no siendo fuerzas «de contacto».

Las interacciones no se producen a distancia entre los constituyentes sino a través del intercambio de «mediadores» que actúan localmente sobre los mismos. Por ello se llaman fuerzas «de intercambio». Esos campos intermedios se describen cuánticamente en términos de partículas - «cuantos» -, cuyas masas determinan en proporcionalidad inversa los alcances de las fuerzas. Las interacciones fundamentales son cuatro, tal como se describen en la Figura 5

LAS FUERZAS FUNDAMENTALES			
Fuerza	Cuanto	Masa	Alcance
Gravedad	gravitón ?	0	$\infty$
Electromagnética	fotón	0	$\infty$
Débil	$n \rightarrow p + e^- + \nu_e$ $v + p \rightarrow v + X$	$W^+, Z$	$80, 90$ GeV $\sim 0.01$ fm
Fuerte entre quarks	gluones	0	$O(1)$ fm (confinamiento)

Figura 5.- Características de las cuatro fuerzas fundamentales

(i) la gravedad que sienten todos los sistemas con energía -incluyendo su masa  $E_0 = m.c^2$  según la relación einsteniana-. La Gravitación Universal de Newton representó la primera gran Unificación de la Física entre la

caída de graves de Galileo cercana a la superficie terrestre y la dinámica planetaria de Kepler en el sistema solar. Su extensión relativista mediante la Relatividad General de Einstein predice la existencia de una perturbación del espacio-tiempo en forma de ondas gravitacionales, que sólo en 2016 han sido observadas por primera vez de modo directo gracias a fenómenos tan energéticos y catastróficos en el universo como la colisión de dos grandes agujeros negros creando uno mayor más energía gravitatoria. Esta observación ha abierto una nueva ventana al Universo más allá de otros mensajeros como son la radiación electromagnética o de astropartículas como los protones de rayos cósmicos o los neutrinos. La versión cuántica de Gravedad no ha sido observada, siendo el cuanto el gravitón de masa nula generando una interacción de largo alcance.

(ii) el electromagnetismo, que representa con Maxwell una segunda unificación entre la electricidad generada por cargas y el magnetismo generado por corrientes eléctricas. Esta interacción es responsable de la formación de átomos y de toda la materia agregada. Su unificación conduce a la existencia de ondas electromagnéticas, primero observadas por Hertz -las ondas hertzianas- como radiación clásica y, desde principios del siglo XX, descritas cuánticamente mediante Fotones que han sido observados por detección directa. Los fotones son de masa nula, mediando por tanto la interacción electromagnética de largo alcance. Los fotones, como en su caso los gravitones, se mueven para todas sus energías a la velocidad de la luz.

(iii) la interacción débil, responsable tanto de la desintegración del neutrón y de la radioactividad beta nuclear como del proceso de fusión nuclear en las estrellas y de la dispersión de neutrinos en materia.

Existen contribuciones con intercambio de carga, mediadas por el bosón  $W^\pm$ , y de «corrientes neutras», mediadas por el bosón Z. Tanto los  $W^\pm$  cargados como el Z neutro son muy masivos, unos 80, 90 GeV respectivamente (casi 100 veces la masa del protón). En consecuencia, su alcance es muy corto, del orden de  $10^{-18}$  m. A bajas energías, mucho menores que las masas de los bosones intermedios, esta interacción es muy débil, pero a muy altas energías la intensidad de esta interacción es similar a la electromagnética. Como señalaremos en la sección 4, el Modelo Estándar de la física de partículas explica estos hechos como una unificación entre las interacciones (ii) y (iii), la interacción «electrodébil», unificación rota por debajo de la escala de centenares de GeV.

(iv) la interacción fuerte entre quarks en los hadrones, responsable de la existencia de éstos, así como residualmente de las fuerzas nucleares entre protones y neutrones. La interacción entre quarks viene mediada por los gluones de masa nula. Sin embargo, esta fuerza es



confinante a largas distancias -similar a la de un muelle- produciendo dos efectos: quarks, antiquarks y gluones no se pueden propagar libremente como lo hacen electrones, neutrinos o fotones, y, además, el alcance de la interacción es corto, del orden de  $10^{-15}$  m. Así pues, quarks, antiquarks y gluones son «visibles» a distancias más cortas y su manifestación a distancias mayores es en términos de «chorros» de hadrones.

Para las partículas elementales de las tres primeras columnas de la Figura 4, todas ellas sienten las fuerzas gravitatorias (i) y débil (iii), mientras que la electromagnética (ii) afecta a las partículas cargadas -no a los neutrinos- y la interacción fuerte (iv) tan solo a los quarks -no a los leptones-. Sin embargo, para su intensidad están ordenadas según (iv) > (ii) > (iii) >> (i). De ahí que el Modelo Estándar de la física de partículas no incluya actualmente gravedad, pues ésta es completamente despreciable a las energías que se pueden alcanzar en experimentos terrestres con los constituyentes elementales.

Un buen ejercicio para el lector es explicar por qué, sin embargo, la fuerza gravitatoria es la que rige a escalas humanas, del sistema solar o mayores en el cosmos actual.

Los mediadores de las interacciones (ii), el fotón, (iv), los gluones y (iii), los  $W^\pm$  y Z son listados en su versión cuántica como partículas en la cuarta columna (magenta) de la Figura 4.

#### 4. MODELO ESTÁNDAR - ORIGEN DE LAS CARGAS Y LAS MASAS

Tal como se ha señalado, los constituyentes elementales, quarks y leptones de la Figura 4, se presentan en la naturaleza replicando sus cargas, mientras los valores de sus masas son crecientes. Al hablar de «cargas» no sólo hemos de pensar en la carga eléctrica para la interacción electromagnética. Hay también una carga débil para todos los constituyentes y una carga -»de color»- fuerte para los quarks.

Esas cargas, asociadas a las interacciones, son propiedades intrínsecas de las partículas y sus antipartículas, con cargas opuestas, y se mantienen invariantes. También existen otras cargas conservadas en algunos casos, como la que distingue a los quarks de los leptones, para las cuales no hay una interacción asociada. Vamos a hablar aquí de las cargas de interacción.

¿Cómo aparecen las interacciones entre esos constituyentes, descritas en la sección 3? Requerimos una teoría que satisfaga una SIMETRÍA DE LAS LEYES FÍSICAS bajo TRANSFORMACIONES GENERADAS POR LAS CARGAS

(Bernabeu, 2020). Similamente a la simetría de objetos bajo una operación, lo que exigimos es que la ley física sea la misma antes y después de efectuar la transformación en nuestra descripción de las partículas. Pues bien, esa transformación -distinta para distintas cargas- no conduce a una ley simétrica si las partículas son libres y es necesario introducir un ingrediente «compensador» para hacerla simétrica. Esa nueva componente es el mediador de la interacción:

- el fotón para la carga eléctrica, una por partícula.
- los  $W^\pm$ , Z para las cargas débiles, tres por partícula.
- los gluones para las cargas fuertes de color, ocho para todo quark.

La unificación electrodébil se produce al relacionar las cargas débiles con la carga eléctrica. Por contra, los gluones son ciegos a esas cargas electrodébiles y sólo ven las cargas de color, las mismas para todos los quarks.

Las interacciones resultantes entre las partículas son debidas al intercambio de los mediadores y pueden ser representadas por diagramas de Feynman. Un caso familiar es la interacción electromagnética entre electrones, explicada mediante el intercambio de un fotón tal como se ilustra en la Figura 6

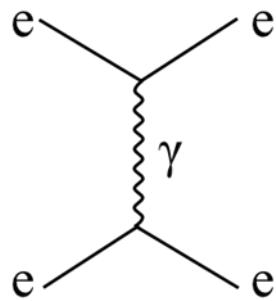


Figura 6.- La interacción electromagnética entre electrones por intercambio de un fotón.

Todos los resultados experimentales obtenidos en las últimas décadas mediante el estudio de fenómenos de la física de partículas, que involucran a los distintos constituyentes elementales y a los mediadores de las interacciones, están en acuerdo espectacular con las predicciones de este MODELO ESTÁNDAR.

Pero... nos hemos olvidado de un punto crucial no mencionado en los párrafos anteriores. La restauración de la simetría exacta de las leyes físicas al introducir la interacción entre los constituyentes, con los mediadores, sólo se produce si todos ellos, constituyentes y mediadores, son de masa nula. El fotón y los gluones lo cumplen, pero no los demás. ¡Si incluimos su masa en la teoría, la simetría se rompe! Sin embargo, la teoría basada en esa simetría tiene un éxito incontestable. Hemos de concluir que la



masa de las partículas no puede ser incluida de partida y que debe existir un mecanismo que la origine, rompiendo la simetría, una vez que las interacciones basadas en la simetría están fijadas. La pregunta es por tanto ¿CUÁL ES EL ORIGEN DE LA MASA?

El mecanismo tan sutil de ruptura de la simetría electrodébil (la simetría fuerte de color se mantiene exacta) es, en el Modelo Estándar, el propuesto por Brout-Englert-Higgs. Se conoce como ruptura «espontánea» de la simetría y está basado en que una teoría simétrica puede tener una solución «de vacío» -el estado de más baja energía posible- no simétrica. El resultado final de ese mecanismo es que los mediadores débiles  $W^\pm$ ,  $Z$  y los quarks y leptones adquieren masa sin alterar las interacciones entre ellos. Y hay una predicción determinante para saber si éste es el origen de la masa: ha de existir un remanente, señal de todo el proceso, el Bosón de Higgs  $H$ , con la propiedad característica de que interacciona con los demás proporcionalmente a la masa de estos últimos. Su descubrimiento en el CERN anunciado en 2012 y el estudio detallado de sus propiedades en los últimos años será discutido en la sección 5.

Y ahora podemos volver al contenido integral de la figura 4. Se distinguen sus integrantes por el «espín», una propiedad intrínseca de las partículas elementales que nos dice cómo se comportan bajo rotaciones y que puede tomar valores enteros o semienteros. Las tres primeras columnas de las familias de constituyentes de la materia tienen espín  $1/2$  y se llaman «fermiones», sean quarks o leptones.

«bosones vectoriales» -se transforman como los vectores bajo rotaciones-. Por último, el Bosón de Higgs tiene espín  $0$  y es un «bosón escalar» -no le afectan las rotaciones-.

## 5. EL LABORATORIO EUROPEO DE FÍSICA DE PARTÍCULAS: CERN

La física experimental de partículas necesita grandes medios para su desarrollo:

(i) Aceleradores de alta energía, preparando haces de partículas que, mediante experimentos de colisión, sean capaces de crear partículas masivas que contribuyen al balance de conservación de energía según la ecuación relativista de Einstein  $E_0 = m.c^2$ , con « $c$ » la velocidad de la luz. Asimismo, los altos momentos  $p$  de los haces actúan como sondas que exploran la constitución de la materia a pequeñas distancias con una longitud de onda dada por la relación cuántica de de Broglie  $\lambda = h/p$ , siendo « $h$ » el cuantitativo de acción de Planck.

La frontera de alta energía en los aceleradores está en la actualidad en el LHC - Large Hadron Collider - del CERN -Laboratorio Europeo de Física de Partículas- (CERN web). Situado a los dos lados de la frontera entre Suiza y Francia, a unos 10 Km de Ginebra (Suiza), el CERN es un modelo de colaboración científica y de organización de la investigación fundamental. La visión de científicos y políticos científicos europeos en los años 50 del siglo XX de aunar la cooperación en este campo, después del desgarro producido por la Segunda Guerra y poder competir con los desarrollos en USA y la extinta URSS, fructificó en un

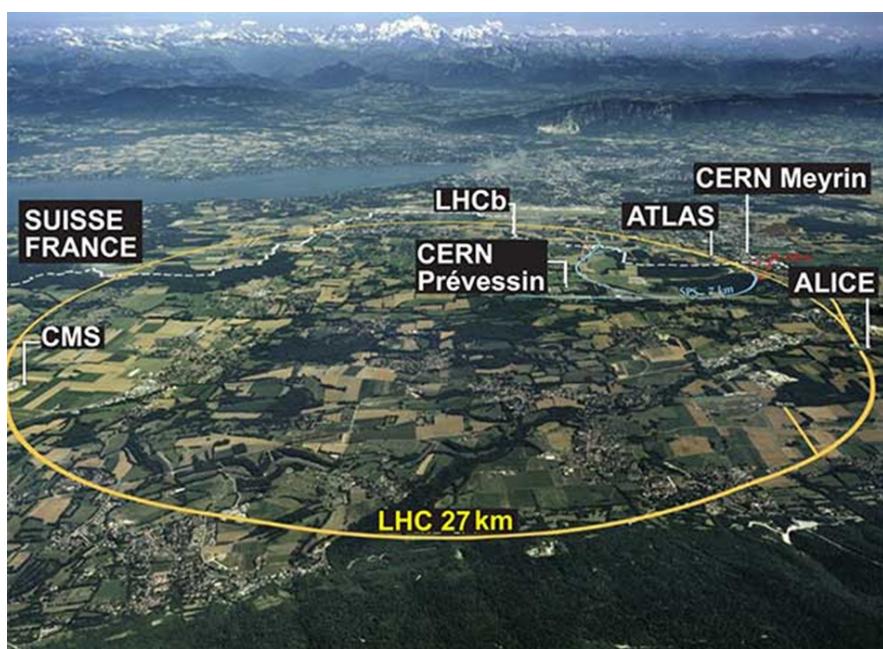


Figura 7- El CERN, cerca de Ginebra (Suiza)

La cuarta columna de los mediadores de las interacciones, tal como predice la teoría, tiene espín  $1$  y se llaman

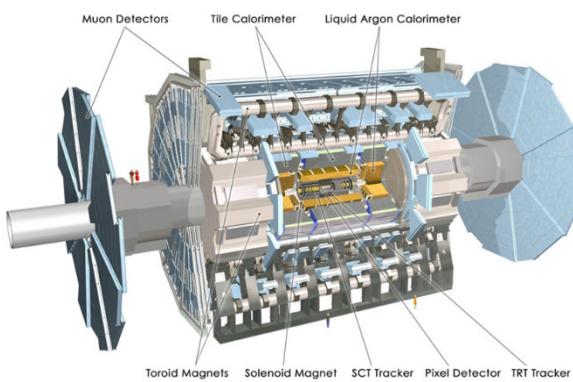
avance de la ciencia europea que al cabo de unas décadas alcanzó el liderazgo. En la actualidad, forman parte del CERN 23 países miembros -España lo es desde 1983- y un conjunto de países asociados y observadores, como



USA, Rusia, China o Japón. El desarrollo continuado del CERN a lo largo de los años se manifiesta en su gran complejo de aceleradores, de modo que los que han ido quedando durante su historia como de bajas energías se han reconvertido en inyectores intermedios de los nuevos a más alta energía. Es el caso del acelerador SPS -SuperProtonSinchrotron- anterior al LHC que se ilustra con el conjunto en la figura 7, donde la circunferencia del túnel que alberga el LHC tiene 27 Km

Los parámetros más importantes en un acelerador son su energía y su luminosidad. En el LHC la energía total disponible mediante los dos haces de protones en colisión es de 13 TeV, donde  $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$  siendo el eV la energía adquirida por un electrón al ser sometido al potencial de 1 Volt. El valor de la «luminosidad» ha sido de  $10^{34}$  colisiones por  $\text{cm}^2$  y por segundo, a disponer por los detectores, y se ha aprobado un programa para alcanzar más altas luminosidades en los próximos años.

(ii) Detectores de Partículas. En los puntos de intersección de los dos haces en colisión se instalan grandes detectores con el propósito de registrar los productos resultantes de la colisión y analizar la física involucrada en los mecanismos de producción y las propiedades características observables. Alrededor del LHC hay 7 detectores, dos de ellos -ATLAS y CMS- son de propósito muy general, mientras los demás tienen un objetivo más definido.



En la Figura 8 se muestran los dos detectores ATLAS y CMS. Mientras los aceleradores del CERN se consideran una instalación del mismo, los detectores son concebidos, diseñados, construidos, instalados y explotados en sus análisis de física por grandes colaboraciones internacionales de grupos pertenecientes a laboratorios y universidades de todo el mundo. En la terminología de la física de partículas, es el detector el que define el «experimento». En España, instituciones de Valencia, Barcelona y Madrid participan en ATLAS y de Madrid y Santander en CMS, mientras otras instituciones españolas participan en otros experimentos del LHC o de otros aceleradores.

(iii) Computación. Los detectores actuales proporcionan registros electrónicos con enorme abundancia de sucesos. Un requisito primordial para el estudio de los fenómenos que ocurren en las colisiones es la capacidad de almacenamiento de esos registros y su puesta a disposición de los físicos que han de realizar el análisis de los sucesos observados. Ello pasa por la «visualización» de esos sucesos mostrándolos para su discusión en un monitor. La espectacularidad de algunos de esos sucesos no deja de sorprender como se ilustra en la Figura 9

El descubrimiento del Bosón de Higgs en los experimentos ATLAS y CMS, anunciado por el CERN en 2012, ha

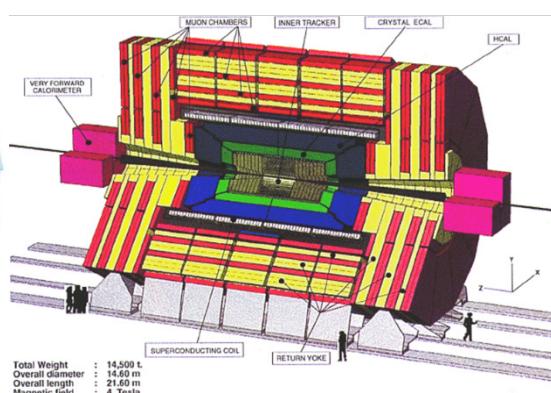


Figura 8.- Los detectores ATLAS y CMS instalados en el LHC.

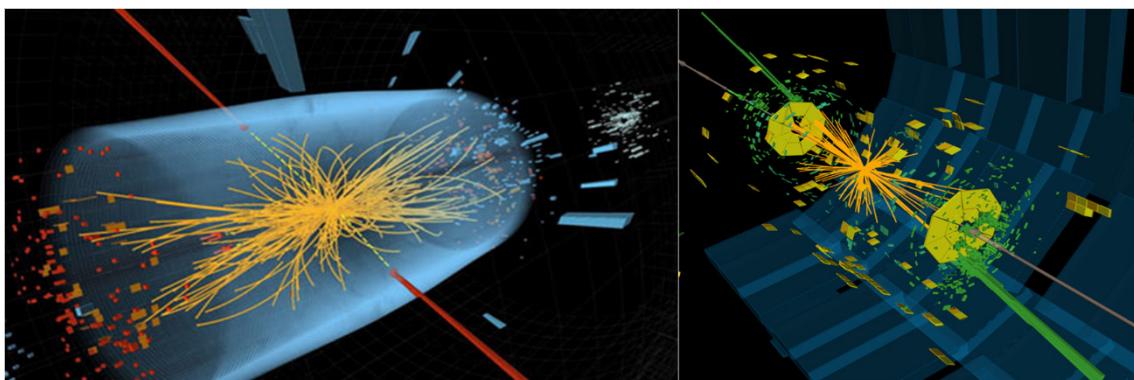


Figura 9.- Sucesos registrados en los detectores CMS y ATLAS.



representado un hito histórico en la consistencia y consolidación del Modelo Estándar de la física de partículas, dando respuesta a la pregunta del Origen de la Masa. Su mecanismo de producción y su desintegración son compatibles con lo predicho por la teoría, cuyo único parámetro desconocido era la masa del Higgs, encontrado con el valor  $m(H) = 125$  GeV. Los análisis de los últimos años en esos experimentos están demostrando que se trata en efecto de un Higgs, con interacciones con las demás partículas elementales proporcionales a la masa de éstas. La historia con el Higgs no está finalizada, sino que quedan por estudiar nuevos fenómenos del mismo, entre ellos su autointeracción al disponer de masa.

## 6. COSMOLOGÍA OBSERVACIONAL - PARADOJA DE OLBERS Y LEY DE HUBBLE

Hasta avanzado el siglo XX, la Cosmología y las ideas sobre el espacio-tiempo eran materia filosófica. El debate histórico sobre el universo como un todo, sin entrar en los detalles de la dinámica de los objetos que están presentes, ha estado ligado a la confrontación idealista-realista de si el «marco de referencia» tiene una existencia separada. Con los principios de relatividad especial, en que el tiempo transcurre de modo distinto para distintos observadores en movimiento relativo, y sobre todo de relatividad general que incorpora el principio de equivalencia, por el cual una masa cambia la geometría del espacio-tiempo, el debate filosófico ha decaído. Se ha trasladado a la cosmología física, que se suele arrancar con la observación del llamado «corrimiento hacia el rojo».

Existe sin embargo un antecedente de cosmología observacional en el siglo XIX a través de una paradoja formulada por el astrónomo alemán Heinrich Wilhelm Olbers en 1823, aunque existen indicios de que había sido mencionada anteriormente por Kepler en el siglo XVII y por Chézeaux en el siglo XVIII. En términos precisos, las hipótesis de un universo

- i. infinito y estático
- ii. eterno
- iii. con una distribución uniforme de estrellas

conducen a un cielo nocturno uniformemente brillante. En efecto, bajo esas condiciones la intensidad  $I(r)$  de la luz recibida aquí al ser emitida por las estrellas disminuye con su distancia  $r$  como  $I(r) \sim 1/r^2$  y es exactamente compensada por su distribución numérica  $N(r)$  en la superficie esférica de radio  $r$   $N(r) \sim r^2$ . La conclusión es observationalmente falsa. ¿Por qué la noche es negra?, sólo punteada por la presencia de los astros más cercanos.

A lo largo de la lectura de esta publicación descubriremos que la solución a la Paradoja de Olbers se halla en que

las hipótesis (i) y (ii) son ambas falsas. Sigue siendo un estudio interesante conocer cuál de esas dos rupturas es la más importante para entender el cielo nocturno.

Con el anuncio en 1929 de sus resultados sobre el corrimiento hacia el rojo de la luz emitida por galaxias lejanas, Edwin Powell Hubble es considerado el fundador de la cosmología observational. La observación de esta radiación con longitudes de onda  $\lambda$  desplazadas hacia valores más altos de los nominales en su emisión fué interpretada inicialmente como un efecto Doppler debido a una recesión de las galaxias lejanas respecto de la Tierra. Definiendo el corrimiento hacia el rojo por « $z$ », su valor está conectado con una baja velocidad de recesión  $v \ll c$  mediante

$$z = (\lambda_{\text{obs}} - \lambda_{\text{emi}})/\lambda_{\text{emi}}, \quad z \sim v/c \quad (2)$$

El efecto Doppler relativista modifica la ecuación (2), pero sigue determinando la velocidad de recesión  $v$  de la galaxia lejana. Al coleccionar resultados desde galaxias a diferentes distancias  $d$ , se obtiene la denominada «Ley de Hubble»

$$v = H d \quad (3)$$

donde  $H$  es la «constante de Hubble». Esta ley es la única ley para  $v$  que permite reconocer que la recesión no es respecto al planeta Tierra (que le hubiese dado un estatus especial como «centro») sino de todos los objetos del universo respecto de todos. Nos podemos convencer de esta conclusión comparando en una dimensión (a)- la distribución de objetos con velocidad  $v$  respecto del punto rojo en el instante  $t$ , con (b)- su distribución en el instante  $2t$  si la ley es la de Hubble (3) y con (c)- esa misma distribución en  $2t$  si se tratara de una  $v$  constante, tal como se ilustra en la Figura 10

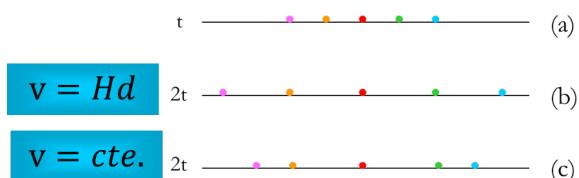


Figura 10.- Distribuciones de objetos dependiendo de la ley para  $v$ .

Evidentemente en (c) el punto rojo tendría un estatus especial, mientras en (b) no. Además, lo observado en (b) corresponde a una velocidad global del sustrato que alberga esos objetos. ¡Concluimos que el corrimiento hacia el rojo no es efecto Doppler respecto de la Tierra, que no hay centro en el universo y que éste se expande en el tiempo! Retrocediendo en el tiempo cosmológico, el universo primitivo debía estar comprimido y caliente procediendo a su expansión hasta el universo actual diluido y frío.



La constante de Hubble tiene dimensiones de  $[t]^{-1}$  y su inversa es una medida de la Edad del Universo. El valor de  $H$  medido en la actualidad nos da  $H^{-1} \sim 1.4 \times 10^{10}$  años. El Universo tuvo un «Big Bang» inicial y este fenómeno marca el Origen del Tiempo.

## 7.PRINCIPIO COSMOLOGICO - HISTORIA DEL TIEMPO

La ausencia de centros privilegiados en el universo sugiere el cumplimiento del Principio Cosmológico. El principio cosmológico es la hipótesis principal de la cosmología moderna, basada en un número creciente de indicios observables. Afirma que, en escalas espaciales suficientemente grandes, el Universo es isótropo y homogéneo. En este contexto, la expresión «suficientemente grandes» se refiere a escalas del orden de cientos de megapársecs (1 parsec  $\sim 3 \cdot 10^{16}$ m).

La isotropía significa que sin importar en qué dirección se esté observando, veremos las mismas propiedades en el Universo. La homogeneidad quiere decir que cualquier punto del Universo luce igual y tiene las mismas propiedades que cualquier otro punto dado. La distribución en el cielo de las fuentes extragalácticas confirma la homogeneidad e isotropía del universo. Si se toman dos puntos diferentes en el cielo al azar, se tendrá una densidad de fuentes similar en ambos. La única excepción será en puntos del cielo ocupados por la Vía Láctea, ya que esta no permite observar objetos a través de ella.

Además de la Ley de Hubble, la prueba más decisiva de la teoría del Big Bang ha sido la observación del fondo cósmico de microondas. Con la expansión del universo primordial, al cabo de unos 400.000 años después del Big Bang, la temperatura descendió lo suficiente para que la formación de átomos de hidrógeno tuviera lugar sin poder ionizarlos con energía inferior a 13,6 eV. Al ser un sistema neutro, los fotones quedaron desacoplados. A esa época en la historia del Universo se la llama «de la última dispersión, la recombinación o el desacoplamiento». Con la subsiguiente expansión, la longitud de onda de los fotones se fué desplazando a valores más altos, de modo que, en la época actual, con una temperatura de la radiación de 2,7 K, el espectro electromagnético del fondo cósmico se halla en la región de microondas.

El descubrimiento de esta radiación de fondo por Penzias y Wilson en 1965 se considera la mejor prueba del Big Bang y del razonamiento anterior. Su espectro de frecuencias es el de la radiación de cuerpo negro y es actualmente el mejor medido en la naturaleza, como se muestra en la Figura 11 donde los errores experimentales quedan ocultos por la curva teórica de radiación de cuerpo negro. Por medio de observaciones de la radiación de fondo cósmico se

ha podido comprobar con mayor precisión el Principio Cosmológico. Mapas del cielo han sido reconstruidos mediante las observaciones realizadas por los Exploradores COBE, WMAP y PLANCK sucesivamente en las tres últimas décadas y mostramos en la figura 12 la distribución de temperaturas de uno de ellos.

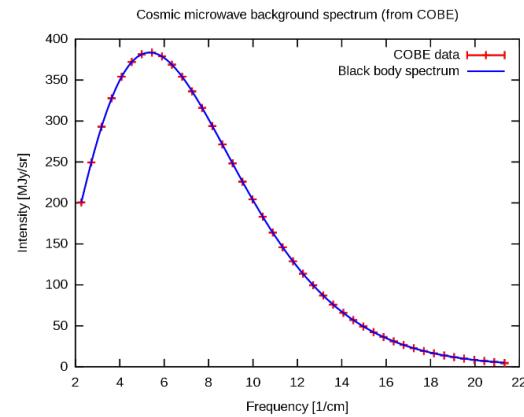


Figura 11.- Espectro de la radiación de fondo de microondas

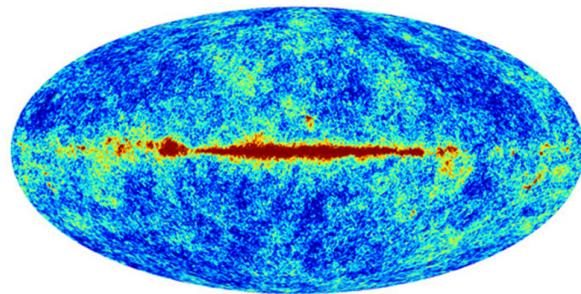


Figura 12.- Mapa del cielo obtenido mediante la radiación de fondo de microondas

El Universo aparece, en media, igual en todas partes. Las fluctuaciones térmicas son del orden de  $\Delta T \sim 10^{-5}$ K.

En el Universo primordial tienen lugar otros fenómenos en su historia anteriores a la recombinación. En esas eras la radiación y la materia se comportan tal como las estudiamos recreándolas en la física de partículas discutida en las secciones anteriores. El problema es que, con la información que proporciona la física de altas energías actualmente hasta energías del orden del TeV, la era muy primordial con tiempos anteriores a  $10^{-12}$ s después del Big Bang es esencialmente desconocida. Comentaremos la cronología «conocida» para después de ese tiempo en el universo primordial, cuando era un plasma de quarks y gluones, junto con electrones, positrones, fotones y neutrinos.

(i) La época electrodébil:  $10^{-12}$ s

Cuando se produce la ruptura espontánea de simetría electrodébil, todas las partículas fundamentales adquieren masa vía el mecanismo de Higgs discutido en la sección 4.



(ii) La época del hadrón:  $10^{-6}$ s. El plasma quark-gluon del que está compuesto el universo en ese momento se enfriá hasta formar hadrones, incluyendo bariones como los protones y los neutrones.

(iii) Desacoplamiento de los neutrinos:  $\sim 0,1$  s. Mientras las temperaturas se habían mantenido altas, las partículas se encontraban en equilibrio termodinámico y los neutrinos lo estaban con los bariones. Sin embargo, al descender la temperatura las reacciones se desplazaron hacia su producción y el ritmo de expansión del universo no permitiendo la reacción inversa. Los neutrinos se desacoplaron originando un fondo cósmico de neutrinos (CNB) similar al CMB posterior. También la aniquilación electrón-positrón se desplazó hacia la producción de fotones.

(iv) Nucleosíntesis primordial: 1 - 3 minutos

En este momento, el universo se ha enfriado lo suficiente como para que se empiecen a formar los núcleos atómicos. Los protones y neutrones se combinan en núcleos atómicos. Al final de la nucleosíntesis, unos tres minutos después del Big Bang el universo se había enfriado hasta el punto que la fusión nuclear paró. En este momento, hay unas tres veces más iones de hidrógeno que núcleos de  $^4\text{He}$  y solo escasas cantidades de otros núcleos. La llamamos nucleosíntesis «primordial» para distinguirla de la nucleosíntesis estelar actual.

(v) Recombinación y Desacoplamiento: 380.000 años

Los átomos de hidrógeno y helio se empiezan a formar y la densidad del universo disminuye. Durante la recombinaión ocurre el desacoplamiento, causando que los fotones evolucionen independientemente de la materia. Esto significa, en gran medida, que los fotones que componen el fondo cósmico de microondas son un dibujo del universo de esa época.

En la figura 13 se presentan esos fenómenos primordiales de la era de la radiación junto a la formación de estructuras posteriores en la era de dominancia de la materia.

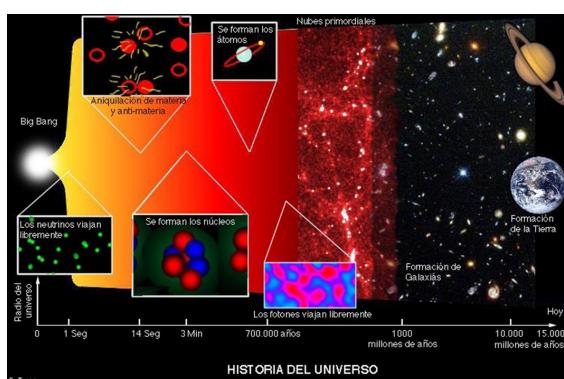


Figura 13.- Historia del Universo con sus escalas de tiempo.

Evidencia directa de la era de la radiación, prueba del Big Bang, se tiene de la nucleosíntesis primordial (iv) y, sobre todo, del fondo cósmico de microondas producto de (v), tal como hemos discutido antes.

## 8. MATERIA Y ENERGÍA OSCURAS

Los métodos de observación cosmológica combinan señales provenientes de lo más lejano en el universo visible con el estudio de remanentes «fósiles» del universo primordial.

Observando lo más lejano se obtiene información de los tiempos cosmológicos tempranos y un estudio muy fiable se realiza con la inspección de la radiación emitida por las llamadas Supernovas de tipo I que presentan un alto corrimiento hacia el rojo  $z$ . La «constante» de Hubble  $H$  es constante en su dependencia espacial, pero depende de los tiempos cosmológicos considerados. Interesa explorar esa dependencia temporal midiendo velocidades y distancias en la Ley de Hubble. Así como la medida de velocidades es directa a través del corrimiento al rojo « $z$ », la medida de distancias es muy complicada y la elección de los objetos cósmicos a tener en cuenta es crucial con las llamadas «candelas», que presentan un brillo controlado con la distancia. El peldaño final de la escalera de distancias cósmicas lo aporta la observación de supernovas, en especial las de tipo Ia. El desarrollo de este método es lo que permitió en los últimos años extender el estudio de la expansión del universo hasta distancias en las que la dependencia con el tiempo cosmológico es detectable.

A esas grandes distancias, al hablar de velocidades, es necesario distinguir entre la velocidad de expansión del universo en tiempos de la emisión y la velocidad actual. Además, la conexión entre el corrimiento al rojo  $z$  y la velocidad de expansión del Universo ya no es la misma que en el efecto Doppler. Por ello, se utiliza directamente la magnitud experimental  $z$ , y la conexión con la expansión depende del modelo cosmológico. La distancia se determina a partir del brillo de las candelas estándar. El resultado observational con las Supernovas I conectando la distancia con  $z$  se representa en la Figura 14

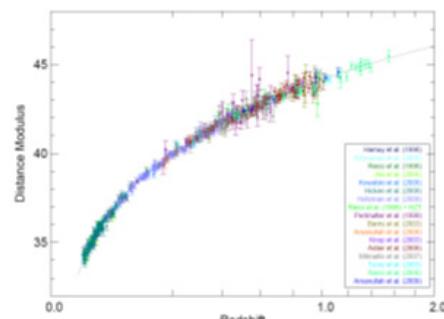


Figura 14.- Diagrama distancia-corrimiento al rojo para las observaciones con Supernovas I a altos  $z$ .



En la Figura 14 la curva corresponde a una modelización de la evolución cosmológica. Para altos valores de  $z$  a partir de supernovas a gran distancia (brillo bajo), sólo modelos con aceleración positiva de la expansión del universo pueden explicar las observaciones. La solución preferida es la de incluir la llamada «constante cosmológica»  $\Lambda > 0$  en las ecuaciones de Einstein de Relatividad General. Utilizando el principio cosmológico discutido antes, se obtienen soluciones (Peebles & James, 2001) para la geometría del espacio-tiempo con un factor de escala en la expansión del universo que depende del tiempo a través de  $\Lambda$ . Este resultado de una expansión acelerada ha sido la mayor sorpresa cosmológica de los tiempos recientes. Siendo la gravedad una fuerza atractiva, la densidad de materia presente en el universo podría estar frenando suavemente la expansión; sin embargo, se observa una aceleración positiva. ¿Cuál es la interpretación de la constante cosmológica? En una descripción de física cuántica, el estado de más baja energía (el «vacío») no es de energía cero, que estaría prohibido por el principio de incertidumbre. Pues bien, para el sistema continuo espacio-tiempo del universo, la constante cosmológica sería la densidad de energía de vacío. Esta energía no es observable de manera directa, por lo que se ha acuñado el nombre de «energía oscura» y, retrocediendo en el tiempo  $5 \times 10^9$  años, el Universo ha entrado en una era de dominancia de la energía de vacío después de la dominancia de la materia.

Además del diagrama de Hubble, existen otras observaciones que permiten obtener información sobre la energía oscura. La más importante es a partir del estudio del fondo cósmico de microondas. Sus inhomogeneidades se observan midiendo la intensidad de la radiación en todas direcciones con el nivel de los cambios de brillo a cada escala angular. A las medidas originales del satélite COBE en los años 90 se han añadido nuevas observaciones obtenidas con nuevas generaciones de satélites, como WMAP y PLANCK. El nivel creciente de precisión en las medidas de las fluctuaciones de temperaturas del mapa del cielo es visible en la Figura 15

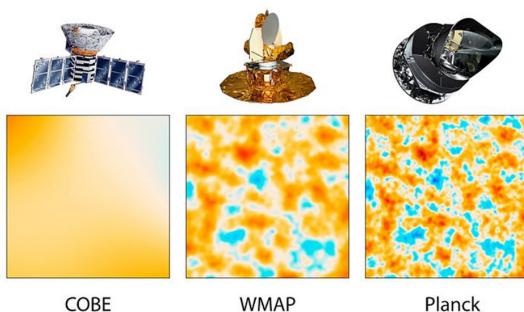


Figura 15.- Fluctuaciones de temperatura en el mapa del cielo

Estas medidas revelan el estado del plasma de bariones y fotones que componía el universo cuando la

radiación se originó, y corresponden a una medida de la expansión del universo con un desplazamiento al rojo  $z$  de aproximadamente 1.100. Desde este momento de emisión, la radiación del fondo cósmico ha viajado por el espacio y, por ello, las inhomogeneidades originales llevan superpuestas los efectos de la expansión del universo. Observando esas inhomogeneidades, podemos remontarnos a una época en la que todavía no había ni galaxias ni supernovas, y que es por tanto inaccesible usando la técnica del diagrama de Hubble.

La combinación de los resultados de supernovas y anisotropías del fondo cósmico de radiación proporciona una prueba de autoconsistencia muy fuerte al modelo de expansión acelerada del universo. De forma independiente, cada observación sugiere un universo en expansión acelerada. Juntas, las observaciones pueden usarse para determinar con gran precisión la composición material y energética del universo.

En lo referente a la composición material, hemos de contemplar también la existencia de materia no visible, que se denomina «materia oscura». Su nombre se debe a que no emite ningún tipo de radiación electromagnética (como la luz). De hecho, no interactúa en ninguna forma con la radiación electromagnética, siendo completamente transparente en todo el espectro electromagnético. Su existencia se puede inferir a partir de sus efectos gravitacionales en la materia, tales como el movimiento de las estrellas en las galaxias, así como en las anisotropías del fondo cósmico de microondas presente en el universo. La materia oscura fue propuesta por Fritz Zwicky en 1933, ante la evidencia de una masa no visible que influiría en las velocidades orbitales de estrellas y gas en galaxias en función de la distancia al centro galáctico. Posteriormente, otras observaciones han indicado la presencia de materia oscura en el universo, las cuales incluyen la citada velocidad de rotación de las galaxias, así como las lentes gravitacionales de los objetos por los cúmulos de galaxias; igualmente, la distribución de la temperatura del gas caliente en galaxias, cúmulos de galaxias y nebulosas, así como la actividad electromagnética separada después de una colisión de galaxias. La materia oscura también desempeña un papel central en la formación de estructuras y la evolución de galaxias y tiene efectos medibles en la anisotropía de la radiación de fondo cósmico de microondas. Estas evidencias sugieren que las galaxias, los cúmulos de galaxias y todo el Universo contendría mucha más materia que la visible.

Su detección directa en laboratorios subterráneos no ha dado resultados positivos hasta ahora, ni tampoco su producción en los experimentos del LHC del CERN. La composición de la materia oscura se desconoce. No existe en el Model Estándar de física de partículas ningún candidato para la materia oscura, ni siquiera los neutrinos.



Candidatos han sido sugeridos dependiendo de qué interacción pueda tener la materia oscura más allá de la gravitatoria (Silk, 1989). El componente de materia oscura tiene bastante más masa que el componente visible del Universo. Actualmente, se estima que la densidad de bariones ordinarios y la radiación en el Universo equivalen aproximadamente a un átomo de hidrógeno por metro cúbico de espacio. La información precisa aportada por las inhomogeneidades del fondo cósmico de microondas y la consistencia entre las distintas observaciones permite responder a la pregunta: ¿De qué está hecho el Universo? En la Figura 16 se da el contenido de materia-energía del Universo

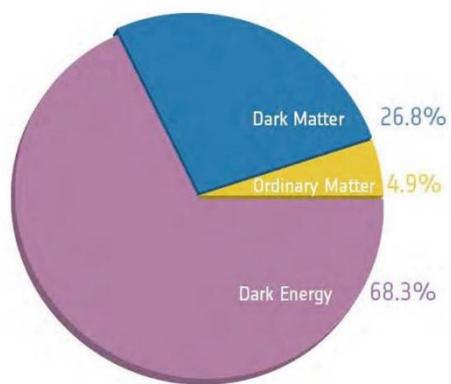


Figura16.- Contenido de materia-energía del Universo

Aproximadamente, solo el 5% de la densidad de materia-energía total en el Universo (inferido de los efectos gravitacionales) se puede observar directamente. Se estima que en torno al 25% está compuesto de materia oscura. El 70% restante consistiría en energía oscura.

## 9.- CONCLUSIÓN

El siglo XVI vivió una Primera Revolución Copernicana con la supresión de considerar al ser humano y el planeta Tierra el centro del Universo, eliminando el modelo de Ptolomeo con epíciclos para el sistema solar. Según la cosmología moderna, de hecho, no hay ningún centro del Universo de acuerdo con el Principio Cosmológico. Pues bien, el siglo XXI está viviendo una Segunda Revolución Copernicana, por la cual sólo el 5 % del contenido de materia-energía del Universo es de naturaleza bariónica cuyos constituyentes elementales son de los que estamos formados y visibles a nuestro alrededor. El cielo, como sugirió Aristóteles, nos ha deparado una sorpresa formidable a la pregunta ¿De qué está hecho el mundo?

La determinación de la naturaleza de esta masa y energía no visibles - el 95 % del total - es una de las cuestiones más importantes de la cosmología moderna y de la física de partículas. Las denominaciones «materia oscura» y «energía oscura» expresan nuestro desconocimiento

de su origen. La materia oscura ha de ser neutra y fría y el Modelo Estándar de física de partículas no tiene candidato. La energía oscura es de momento sólo un nombre, sin conocer su origen más allá de que la constante cosmológica es capaz de describir los datos. ¿Podría ser la densidad de energía de vacío cuántico del campo de Higgs? Si el descubrimiento del Origen de la Masa en física de partículas ha sido un hito histórico, la expansión acelerada del Universo ha provocado una formidable expansión de la isla de conocimiento con nuevas preguntas abiertas en la frontera del mismo.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos, FIS2017-84543-P del MICINN y PROMETEO/2017/033 de la Generalitat Valenciana.

## REFERENCIAS

- Bernabeu, J. (2020). Symmetries and their breaking in the fundamental laws of physics. *Symmetry*, 12(8), 1316. e-Print: 2006.13996 [hep-ph].
- Bohme, G., & Hartmut, P. (1998). *Fuego, agua, tierra, aire: una historia de la cultura de los elementos*. Herder.
- CERN Home website, "<https://home.cern/>".
- Close, F. (2004). *Particle physics: A very short introduction* (Vol. 109). Oxford University Press.
- Peebles, E., & James, P. (2001). El sentido de la cosmología moderna. *Investigación y ciencia*, (294), 80-81.
- [Silk 89] J. Silk, "El Big Bang" (ThriftBooks, Atlanta, 1989), Cap. IX, p. 182.