

Investigación en Física

Miguel Ortuño Ortín

Académico de Número de la
Academia de Ciencias de la Región de Murcia

Excelentísimo Sr. Presidente de la Comunidad Autónoma de Murcia
Excelentísimos Srs. Presidentes de las Academias de la Región de Murcia
Ilustrísimos académicos
Señoras y señores

Es para mí un honor y una responsabilidad impartir la lección inaugural del curso 2016-2017 del Consejo de Academias de la Región de Murcia. Al tratarse de una sesión solemne de todas las Academias, he creído conveniente no hablar sobre el tema específico en el que investigo, demasiado técnico y difícil de explicar a una audiencia no especialista. En su lugar, he elegido hablar sobre la situación actual de la Física en general. En primer lugar, describiré los resultados recientes que considero más relevantes para nuestro conocimiento del mundo y por sus aplicaciones prácticas. Estos van desde los que tratan del universo a gran escala hasta las partículas elementales que constituyen la materia, pasando por los descubrimientos de los materiales más novedosos. A continuación, resumiré algunos de los grandes retos que está tratando de resolver la Física y que es posible que encuentren respuesta en un futuro no muy lejano. También describiré la situación de la investigación en Física en la Región de Murcia, que cuenta con bastantes grupos relativamente nuevos y de gran pujanza. Finalizaré con unas reflexiones sobre la investigación en la ciencia básica.

Deseo expresar mi agradecimiento a mis colaboradores más cercanos, que han hecho posible que nuestro grupo de investigación haya alcanzado un prestigio internacional en el campo de las simulaciones numéricas de sistemas complejos/interactuantes, y en especial a todos los alumnos de investigación que decidieron aprender con nosotros. También he de agradecer el apoyo incondicional de mi familia, tanto de mi mujer, Ester Muñoz, como de mis hijos Miguel y Magdalena, y de mis padres, Carmen y Miguel, Académico de Número de la Academia Alfonso X el Sabio.

Descubrimientos recientes

Vamos a sintetizar los grandes descubrimientos recientes en el campo de la Física que creo que pueden cambiar más profundamente nuestra concepción de la realidad. Podemos clasificarlos de acuerdo con su escala típica. Veremos primero los que corresponden a las mayores escalas posibles, es decir, a la cosmología, para pasar después al extremo opuesto, el de las distancias muy pequeñas, de cuyo estudio se encarga la física de partículas. Finalizaremos con las escalas intermedias, las similares a las del ser humano, centrándonos en las disciplinas de la óptica y, sobre todo, la física de la materia condensada.

Cosmología

La teoría de la gravitación de Newton nos permite entender el movimiento de la Tierra, y de los otros planetas, alrededor del Sol, pero no nos da información de la estructura global del universo. Podemos decir que la cosmología moderna comienza en 1916 cuando Einstein publica la teoría de la relatividad general, que unifica la teoría de la relatividad especial y la ley de la gravitación de Newton. En ella la gravedad es consecuencia de la curvatura del espacio-tiempo cuatridimensional, que a su vez está producida por los objetos con masa. Cuando un objeto se acelera debido a la gravedad, no hace más que seguir la trayectoria más corta en un espacio curvo (ver la figura 1). La curvatura del espacio afecta igualmente a la luz, que se desvía al pasar cerca de un objeto masivo, predicción que fue pronto corroborada experimentalmente por Eddington. Un esquema de este experimento se muestra en el panel derecho de la figura 1.

En 1922 el matemático ruso Alexander Friedmann encuentra que las soluciones de las ecuaciones de Einstein para un modelo homogéneo e isotropo del universo. Poco después, el astrónomo belga George Lemaitre, basándose en ellas,

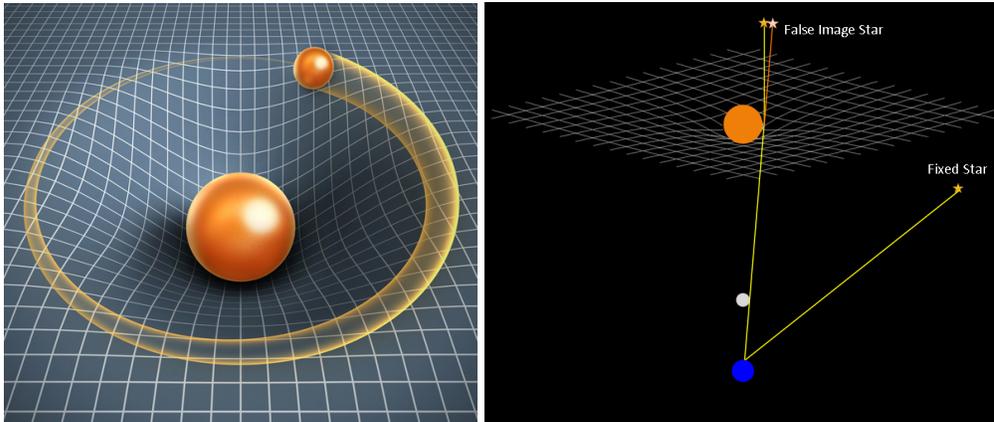


Figura 1: Izquierda: dibujo que muestra la curvatura de un espacio bidimensional producida por el objeto central y como otro objeto se mueve alrededor del primero debido a la curvatura. Derecha: esquema del experimento de Eddington para medir la desviación de la luz proveniente de una estrella debido al Sol; la presencia de la Luna hace que podamos distinguir la luz de la estrella a pesar de pasar cerca del Sol.

propone que el universo está en expansión. El universo podría continuar expandiéndose por siempre o empezar a contraerse después de la expansión. El que el destino final del universo fuera uno u otro dependería de la cantidad de masa presente en relación al ritmo actual de expansión.

A mediados de los años veinte, el astrónomo americano Edwin Hubble prueba que hay nebulosas demasiado lejanas como para ser parte de la Vía Láctea y propone que son galaxias similares a la nuestra. Consigue llegar a esta conclusión utilizando las cefeidas de las galaxias como candelas estándar para medir la distancia. La luminosidad aparente de las estrellas normales depende de la luminosidad real y de la distancia y no sirve para medir ésta. Las cefeidas, por el contrario, son gigantes rojas cuya luminosidad está oscilando debido a que quemamos el combustible de una forma muy característica por lo que podemos suponer que su luminosidad intrínseca es similar para todas ellas y así su luminosidad aparente nos determina la distancia. Al final de esa misma década, Hubble mide la distancia de muchas galaxias y, al mismo tiempo, la velocidad con la que se mueven respecto de nosotros, Esto último es fácil de medir a través del efecto

Doppler, que consiste en el cambio de frecuencia que se observa cuando hay una velocidad relativa entre el emisor y el receptor. La casi totalidad de las galaxias muestran un corrimiento hacia el rojo, lo que significa que se están alejando de nosotros, y además lo hacen tanto más rápido cuanto más lejos están. El universo se está expandiendo. El que la gran mayoría de las galaxias se alejen de nosotros no implica que estemos en el centro del universo. Este se expande por igual en todas direcciones y en todos sitios, de manera similar a como se muestra en el dibujo de la figura adjunta.

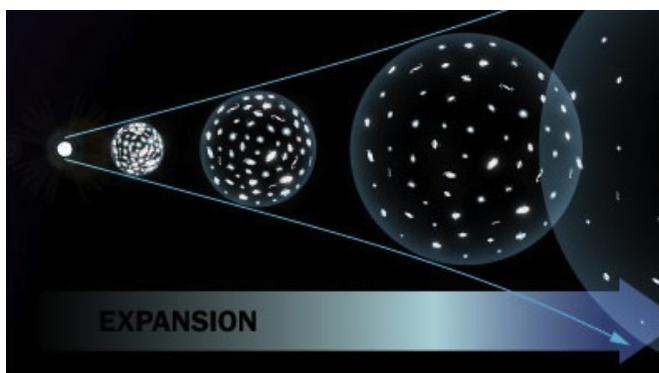


Figura 2: Esquema que muestra como en un universo que se expande las galaxias se alejan unas de otras y no hay un centro de expansión.

En 1998 dos equipos de investigadores encuentran que la expansión del universo se está acelerando. Ambos equipos utilizan medidas de supernovas del tipo Ia. Las supernovas son explosiones de estrellas y pueden ser de varios tipos, reconocibles por sus espectros luminosos. Las del tipo Ia son únicas por poder calibrarse con gran precisión debido a que la explosión siempre tiene lugar en condiciones similares. Se supone que la explosión es de carácter termonuclear y ocurre cuando una estrella enana blanca que gira entorno a otra estrella capta suficiente material de ésta como para generar una reacción termonuclear que funde el núcleo de carbono. Las supernova de tipo Ia son uno de los objetos más brillantes del universo y, además, poseen todas ellas prácticamente el mismo brillo intrínseco por lo que son unas excelentes candelas estándar. En la figura 3 se muestra una recopilación de las mediciones del corrimiento hacia el rojo de las supernovas de tipo Ia. En el eje vertical se representa su luminosidad aparente

(en una escala inversa), que determina su distancia a la Tierra, mientras que en el eje horizontal se representa el corrimiento hacia el rojo. Las supernovas más lejanas se encuentran por encima de la línea de expansión constante (marcada con $(1, 0)$) lo que indica que en el pasado, cuando partió la luz de dichas estrellas, la expansión era menor y que, por lo tanto, ésta está aumentando.

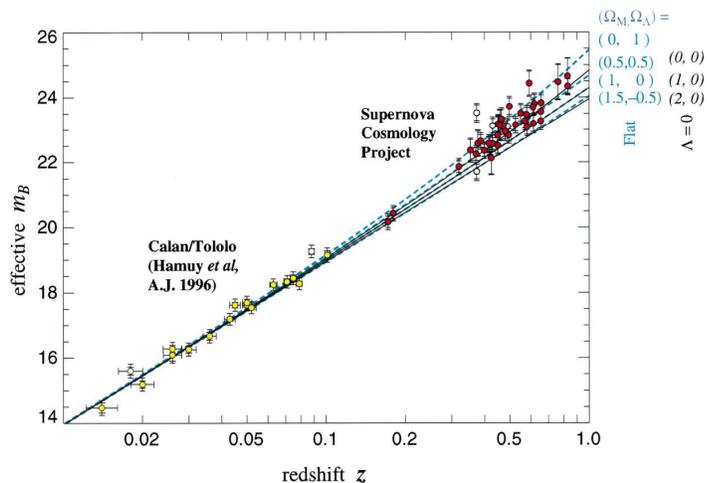


Figura 3: Luminosidad aparente (en escala inversa), que determina la distancia a la Tierra, frente al corrimiento hacia el rojo de supernovas. Las líneas azules corresponden a distintas predicciones de acuerdo con la relación entre la cantidad total de masa y de energía.

El que el universo se esté acelerando conlleva importantes consecuencias. Lo normal sería esperar que la atracción entre las masas fuera disminuyendo la velocidad de expansión y la cuestión entonces sería saber si la velocidad de expansión actual sería suficiente para vencer la fuerza gravitatoria, en cuyo caso el universo acabaría colapsando, o si por el contrario el universo se expandiría por siempre. El nuevo escenario de un universo acelerado nos arrastra casi irremediamente a tener que admitir la existencia de la llamada ‘energía oscura’. Antes de entrar a discutir ésta, vamos a analizar otro experimento que, entre otras cosas, estudia esta cuestión por una vía alternativa.

El satélite Planck fue lanzado en 2009 para observar el universo completo a frecuencias de microondas. Lo que de hecho se observa a dichas frecuencias es

el fondo cósmico de microondas que son las reliquias del Big Bang. Conforme el universo se ha ido expandiendo y enfriando la radiación primordial ha ido aumentando su longitud de onda hasta llegar hoy en día a las microondas. En la parte superior de la figura 4 se muestra la imagen obtenida por la misión Planck, la más detallada obtenida hasta la fecha de la mencionada radiación de fondo, que se originó unos 380.000 años después del Big Bang, en el momento en que las cargas libres se recombinaron formando átomos y dejaron de esta manera viajar a la luz.

Las fluctuaciones que aparecen en la imagen del fondo de microondas son las semillas de la estructura actual del universo, desde las estrellas hasta las galaxias. La mejor forma de cuantificar estas fluctuaciones es mediante su espectro de potencia en función de la escala angular. En el panel inferior de la figura adjunta se muestra dicho espectro de potencia, puntos rojos, junto con la curva verde que representa el mejor ajuste posible al ‘modelo cosmológico estándar’. El ajuste es excelente para casi todos los ángulos y solo se aprecian ciertas anomalías para ángulos grandes, parte izquierda de la curva. Los datos proporcionados por Planck han servido para determinar con precisión los parámetros de nuestro modelo del universo. En concreto, determinan que la materia ordinaria constituye sobre un 5 % del total del universo, mientras que la materia oscura supone sobre un 26 % y la energía oscura el 69 % restante.

El modelo cosmológico estándar o Λ CDM se basa en la teoría de la relatividad general incluyendo la constante cosmológica Λ introducida por Einstein, asociada a la energía oscura, y materia oscura fría. Aunque no incorpora la cuantización de la gravedad, resulta muy eficiente para ‘explicar’ la estructura del fondo cósmico de microondas, la distribución a gran escala de las galaxias, la aceleración del universo y la abundancia relativa de los elementos más ligeros (H, He, Li, . . .).

En la figura 5 se muestran las estimaciones de la cantidad relativa de energía oscura y de materia, tanto visible como oscura, del universo de acuerdo con el corrimiento hacia el rojo de las supernovas (zona azul), con los datos de Planck del fondo de microondas (zona naranja) y con las oscilaciones bariónicas acústicas (zona verde). Estas últimas nos determinan la estructura espacial de la distribución de galaxia y ha sido obtenida a partir de los datos de casi 50.000 galaxias. La línea negra de la figura corresponde a un universo plano. Se observa que en la

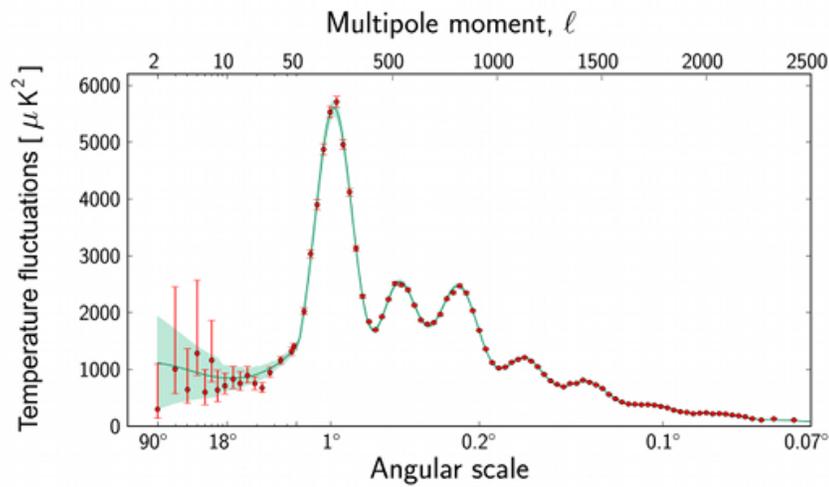
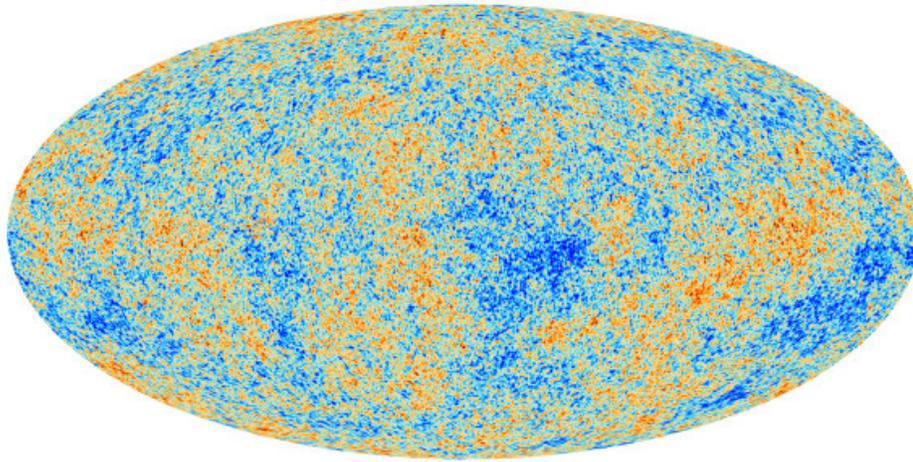


Figura 4: Imagen de la radiación de fondo del universo obtenida por la misión Planck, que muestra como era este unos 380.000 años después del Big Bang. Panel inferior: medida de las fluctuaciones de la temperatura de la imagen de arriba en función del ángulo (puntos rojos); la curva continua es un ajuste al modelo cosmológico estándar del que se extraen los distintos parámetros cosmológicos. (ESA y la Colaboración Planck).

zona central de todos los experimentos el universo es plano. Lo que esto, en verdad, significa es que si el universo fuera curvo, su radio de curvatura tendría que ser significativamente mayor que la zona del universo explorada con las anteriores medidas. Sabemos que el universo es localmente plano, pero no conocemos su topología global.

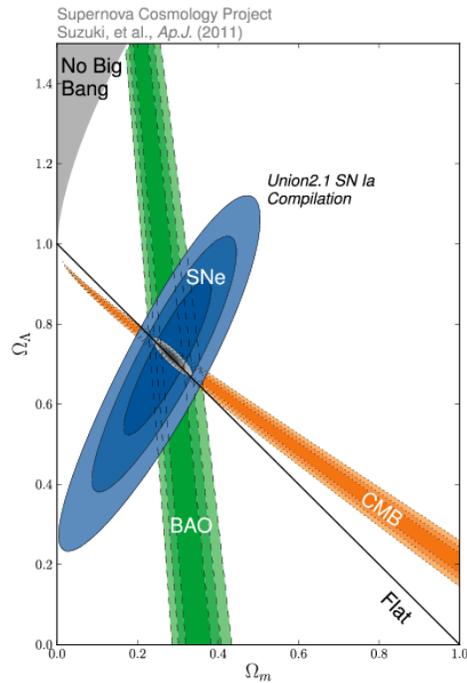


Figura 5: Estimación de la densidad de energía oscura frente a la densidad de materia de acuerdo con tres experimentos: el corrimiento hacia el rojo de la supernovas (azul), la radiación de fondo (naranja) y las oscilaciones bariónicas acústicas (verde).

El término energía oscura puede darle un carácter misterioso al concepto del que se trata. Es simplemente una forma de referirnos al hecho de que el universo se acelera. Además dicha aceleración se explica bien con la constante Λ de Einstein, perfectamente natural en la teoría de la relatividad [4]. Esto no excluye que pudiera haber algún tipo de 'fluido' exótico con presión negativa que produjera la aceleración, pero de momento no hay ningún indicio del mismo.

La existencia de materia oscura se infiere a partir del movimiento de rotación

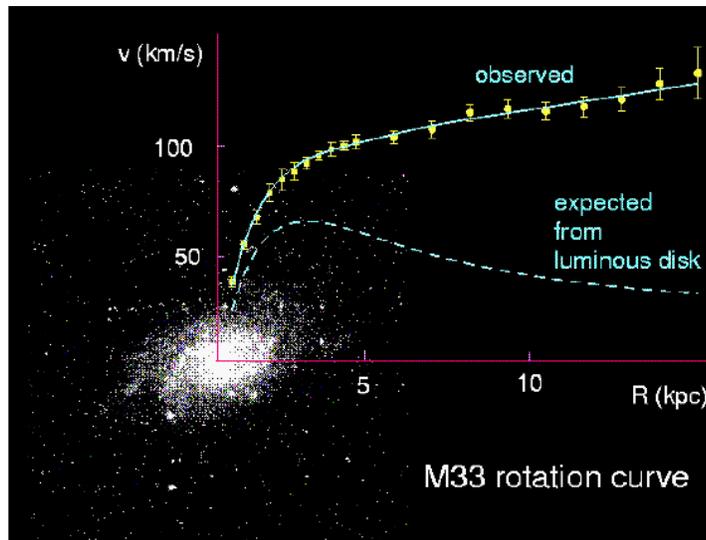


Figura 6: Velocidad de rotación de la galaxia M33 en función de la distancia a su centro y predicción basada en la contribución de la materia luminosa únicamente [6].

interno de las galaxias que es mucho mayor del que debería producir la materia visible. En la figura 6 se muestra la curva de rotación típica de una galaxia y la discrepancia entre los datos experimentales y la predicción basada en la no existencia de materia oscura [5, 6]. Los efectos de ésta también se dejan notar en las lentes gravitacionales, la estructura a gran escala del universo y la radiación del fondo cósmico. Este tipo de materia no está formada por materia conocida de color oscuro y que por ello no se puede detectar. Está hecha de partículas que aún no conocemos, pero de las que sí que sabemos que no interactúan con la luz.

Ondas gravitacionales

La detección de ondas gravitacionales ha sido uno de los experimentos recientes más significativos. En la figura 7 vemos las medidas de la primera detección realizada por LIGO, que responde a las siglas en inglés de observatorio de ondas gravitacionales por interferencia laser, y que está dirigido conjuntamente por Caltech y MIT. Hasta ahora se han realizado solo dos detecciones, pero se

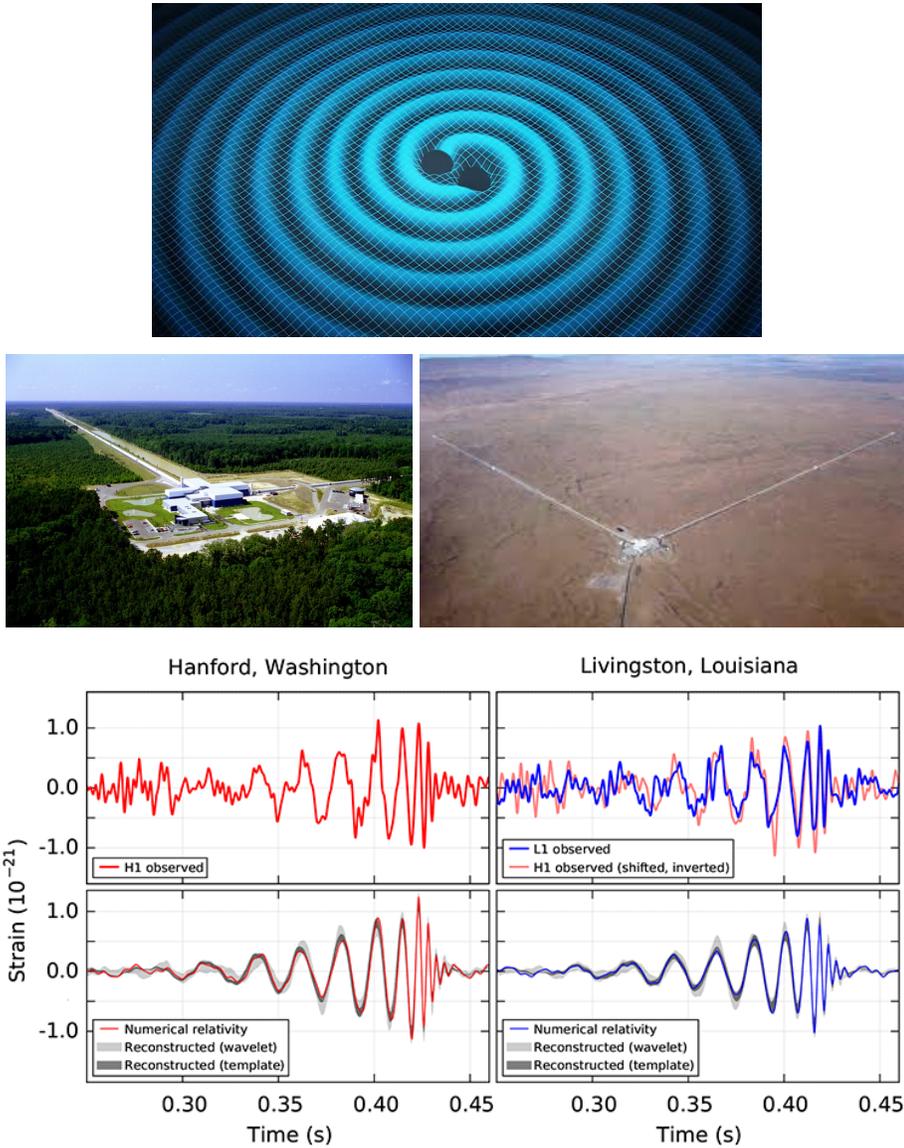


Figura 7: Dibujo de dos agujeros negros girando uno entorno al otro y produciendo ondas gravitacionales. En el centro de ven las dos instalaciones gemelas de LIGO. En la parte inferior se muestra la señal de ondas gravitacionales detectada por LIGO en las dos instalaciones del centro, junto con la predicción teórica (LIGO).

están construyendo varias instalaciones a tal fin. Ambas detecciones corresponden a ondas generadas por dos agujeros negros girando uno entorno al otro cada vez más cerca, hasta que acaben fundiéndose, y emitiendo parte de su energía en forma de ondas.

Las ondas gravitacionales son perturbaciones del espacio-tiempo producidas por los eventos gravitatorios más violentos. La materia curva el espacio-tiempo, lo que apreciamos como gravedad, y si hay una aceleración muy grande la deformación del espacio-tiempo puede viajar a la velocidad de la luz alejándose de sus fuentes. Es un mecanismo similar a la generación de ondas electromagnéticas por cargas aceleradas.

La importancia de este experimento es doble: por una parte proporciona una fuerte evidencia a favor de la teoría general de la relatividad para campos gravitatorios muy intensos y, por otra, supone una herramienta de futuro en la observación del universo, no basada en ondas electromagnéticas como el resto de instrumentos. Los científicos esperan que esta nueva ventana al universo nos enseñe cosas inesperadas.

Exoplanetas: una miríada de nuevos mundos extraños

En los últimos años ha habido y sigue habiendo un importante esfuerzo para detectar planetas similares a la Tierra fuera de nuestro sistema solar, conocidos como exoplanetas. El primero de ellos fue detectado en 1988, orbitando alrededor de un pulsar, y hoy en día ya hay catalogados más de tres mil.

Existe una gran variedad de formas de detección, siendo las más importantes la medida de las variaciones periódicas en la velocidad radial de la estrella sobre la que orbita y de las variaciones de la luminosidad de ésta producidas por el tránsito del planeta [8]. Estos dos métodos tienden a detectar principalmente planetas bastante cercanos a sus estrellas y hay otros métodos como 'microlentes' que observan mejor separaciones mayores y sirven para calcular el porcentaje de estrellas con planetas. Un estudio reciente concluye que la mayoría de las estrellas tienen planetas orbitando a su alrededor [7]. Esto significa que debe haber como mínimo mil millones de planetas solo en nuestra galaxia.

En la parte superior de la figura 8 se muestran los nuevos candidatos a planeta detectados por la sonda Kepler en función de su tamaño, relativo al de la Tierra, y su período orbital. Se aprecia el elevado número de planetas con tamaño similar

al terrestre.

Una cuestión de gran interés es saber si alguno de estos planetas podría albergar vida. En este momento es imposible detectar esto directamente. Aunque puede haber formas de vida muy distintas a las de la Tierra en condiciones muy diferentes a las nuestras, parece lógico mostrar especial interés por aquellos planetas en los que haya condiciones para albergar formas de vida similares a las nuestras, lo que se conoce como planetas en la zona habitable. Ahora mismo parece que el descubrimiento de vida en otro planeta es ya únicamente una cuestión de tiempo y que en cuestión de años se vaya a producir.

Las condiciones que se supone ha de tener la zona habitable son las siguientes. En primer lugar, la estrella sobre la que orbite el planeta ha de ser de tamaño similar al Sol. Las claramente mayores gastan demasiado rápido su combustible y es difícil que duren lo suficiente para que se desarrolle vida compleja en sus planetas, mientras que en las pequeñas los planetas tendrían que estar muy cerca y mostrarían siempre la misma cara a la estrella. Por otra parte el tamaño del planeta ha de ser también similar al de la Tierra y tratarse de un planeta rocoso para que albergue agua en su superficie, dada una presión atmosférica suficiente [11]. Para que la temperatura sea moderada, el planeta ha de estar a cierta distancia de la estrella, que depende de la luminosidad de ésta. En el panel inferior de la figura 8 se muestran los planetas detectados hasta la fecha que encajan en la zona de habitabilidad.

El pasado mes de agosto se detectó un planeta en Proxima Centauri, la estrella más cercana a tan solo cuatro años luz de nosotros. El planeta, llamado Proxima b, es algo mayor que la Tierra y rocoso por lo que podría tener agua. Su período orbital es de once días debido a que está cerca de la estrella y a que ésta es mucho menor que el Sol. La estrella tiene una luminosidad mil veces menor que el Sol y la temperatura en el planeta debe ser moderada por lo que se le puede considerar en la zona habitable [12].

El satélite de la misión Gaia ya está en órbita y le sigue la pista a mil millones de estrellas. Dada su astrometría de precisión, se espera que descubra decenas de miles de exoplanetas en los próximos años.

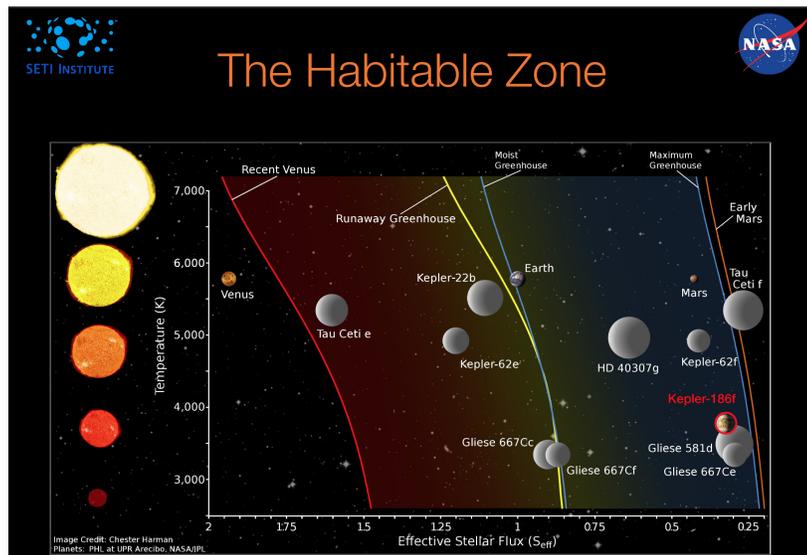
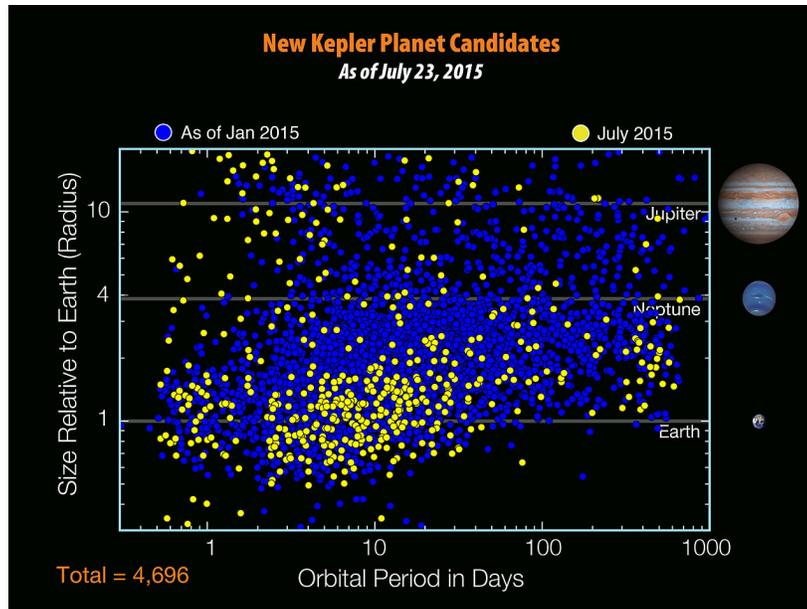


Figura 8: Parte superior: cada punto representa un candidato a planeta detectado por la sonda Kepler en función de su tamaño y de su período orbital. Parte inferior: Planetas descubiertos con parámetros característicos en la zona habitable, que depende de la luminosidad de la estrella y la distancia a ella. (NASA [9, 10])

Física de partículas

El ser humano siempre ha tenido un gran interés en saber qué objetos fundamentales forman toda la materia. Por fundamental entendemos que no poseen estructura interna o, lo que es lo mismo, que no están hechos de otros objetos más elementales.

Grandes pensadores a lo largo de la historia han postulado que la materia no es una sustancia continua, si no que está formada por átomos, pequeñas unidades indivisibles. A finales del siglo XIX quedó demostrada su existencia, pero duraría poco su reconocimiento como partículas elementales, pues en 1897 Thompson descubre el electrón y que este es emitido por los átomos en determinadas circunstancias. Los átomos no eran indivisibles, podían separarse en objetos más fundamentales. El descubrimiento de la tabla periódica, que clasifica a los átomos de acuerdo con sus propiedades químicas, es también un fuerte indicador de la estructura interna de los átomos

Rutherford en un experimento fundamental a principios del siglo pasado demuestra que la mayor parte de la masa del átomo, conteniendo toda la carga positiva, se concentra en un núcleo atómico de tamaño mucho menor que el del átomo, alrededor del cual giran los electrones, con carga negativa. El experimento consiste en bombardear un objetivo con proyectiles microscópicos (átomos de helio, en su caso) lo más rápidos posible y observar cómo se desintegra el objetivo. Los modernos detectores de partículas siguen este mismo principio. El propio Rutherford consigue descubrir en 1919 el protón, la partícula del núcleo atómico que posee carga positiva. La otra partícula del núcleo atómico, el neutrón, fue descubierta por Chadwick en 1932. Durante bastante tiempo, electrones, protones y neutrones fueron las partículas elementales conocidas, tal como se representa en la figura 9.

La explicación de la estabilidad del átomo requirió la creación de toda una nueva teoría, la física cuántica, uno de los grandes logros de la humanidad y a la que volveremos en la próxima sección.

En los aceleradores de partículas, se fueron descubriendo más y más partículas inestables, llegándose a una situación muy compleja que fue finalmente clarificada por Gell-mann y Zweig mediante la introducción de una clasificación de las partículas, análoga a la tabla periódica de los elementos, que implicaba el que los protones y neutrones estaban constituidos por tres nuevas partículas, que

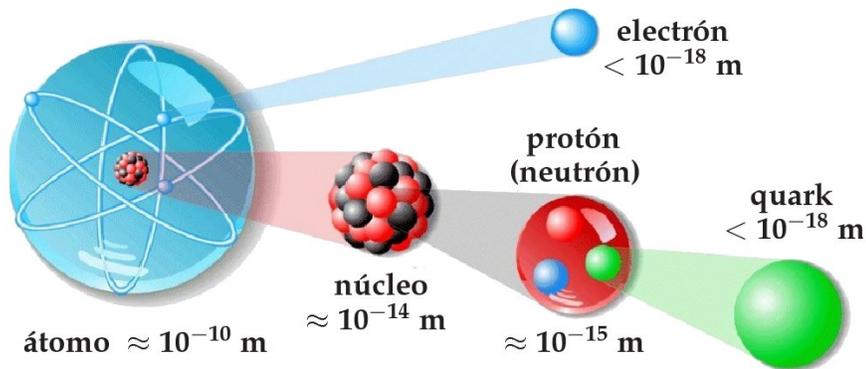


Figura 9: Estructura del átomo, compuesto por un núcleo y electrones a su alrededor. El núcleo, a su vez está formado por neutrones y protones. Tanto neutrones como protones están constituidos por quarks.

recibieron el nombre de quarks. Cuatro años después, el análisis de choques entre electrones y protones supuso una evidencia experimental de que los nucleones estaban en verdad formados por tres quarks. Los quarks, junto a una importante contribución de los gluones que veremos más adelante, forman los protones y los neutrones, y el resto de partículas subatómicas encontradas. Hasta la fecha no se ha conseguido dividir un quark.

El modelo estándar de partículas elementales es la teoría actual más consolidada y es capaz de explicar la mayoría de los experimentos subatómicos, aunque no incluye la gravedad. En la figura 10 se muestra una tabla con las partículas que conforman el modelo estándar. Vamos a describirlas brevemente.

La materia que conocemos está hecha de quarks (partículas de color violeta en la figura) y leptones (color verde), de los que hay seis de cada tipo, divididos en tres familias cada una de ellas con masas bastante diferentes. La familia más ligera es con mucho la más abundante. En ella encontramos al electrón y a los quarks conocidos como up y down que son los constituyentes del neutrón y del protón.

El último integrante de la anterior familia es el neutrino, una partícula sin apenas masa y sin carga eléctrica. Debido a ello, son partículas muy difíciles de detectar y de estudiar. Pauli intuyó su emisión en reacciones nucleares, pues era

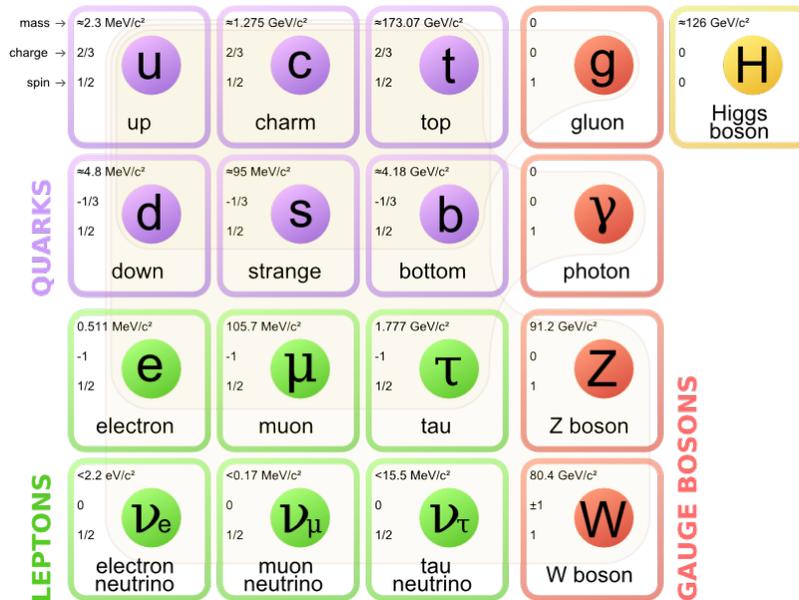


Figura 10: Partículas elementales de acuerdo con el modelo estándar. A la izquierda están los quarks y los leptones que son las partículas que constituyen la materia, son fermiones y están clasificadas en tres familias. A la derecha están las cuatro partículas portadoras de las fuerzas y que son bosones. Por último está el bosón de Higgs.

la única forma de que en ellas se conservaran la energía y el momento. Su masa es tan pequeña que no se supo si tenían o no hasta hace poco. El que los neutrinos tienen masa ha sido un gran descubrimiento que abre la puerta a que supongan una parte importante del total de la masa del universo.

Cada una de las doce partículas que forman la materia tiene su antipartícula, con idéntica masa y carga opuesta. Estas otras partículas forman la antimateria. La antipartícula del electrón es el positrón. Cuando una partícula y su correspondiente antipartícula chocan, se aniquilan ambas y se desprende una gran cantidad de energía, la asociada a su masa a través de la famosa fórmula de Einstein $E = mc^2$. Las leyes de la física son casi simétricas para la materia y la antimateria. Aunque el modelo estándar incluye una pequeña asimetría asociada con la interacción débil (técnicamente, hay un término que viola la conservación de la

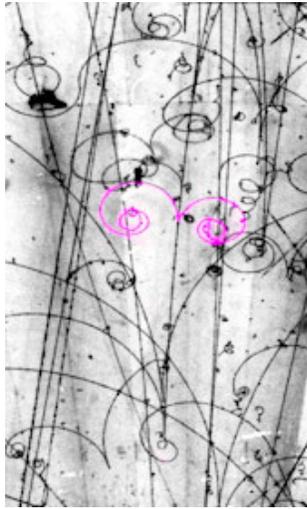


Figura 11: Trazas dejadas por partículas en una cámara de burbujas en presencia de un campo magnético. Las líneas rectas corresponden a partículas sin carga y los giros a uno y otro lado a partículas con carga positiva o negativa. Las trazas coloreadas representan un electrón y un positrón. (Fermilab)

conjugación de la carga), ésta no es suficiente para explicar por qué casi no hay antimateria en el universo. Esto ha de ser así pues de lo contrario habría grandes explosiones en las zonas limítrofes entre materia y antimateria. Se supone que tras el Big Bang debía haber tanta materia como antimateria por lo que es un misterio cómo ha desaparecido casi toda la antimateria del universo. La antimateria no es una entelequia de ciencia ficción. En los aceleradores de partículas se generan antipartículas continuamente, como se muestra en la figura 11. El PET, el mejor equipo de detección de muchos tipos de cáncer, son las siglas en inglés de ‘tomografía por emisión de positrones’.

Siguiendo con la descripción de las partículas del modelo estándar, vemos que en la figura hay cuatro de color marrón denominadas bosones de *gauge*. Son las partículas portadoras de las fuerzas o interacciones. En la física cuántica, las interacciones se deben al intercambio de partículas microscópicas. Una analogía sería la repulsión entre dos jugadores que están lanzándose continuamente pelotas. Hay cuatro interacciones fundamentales en la naturaleza: la gravedad, la interacción electromagnética, la fuerza nuclear débil y la nuclear fuerte. Todas

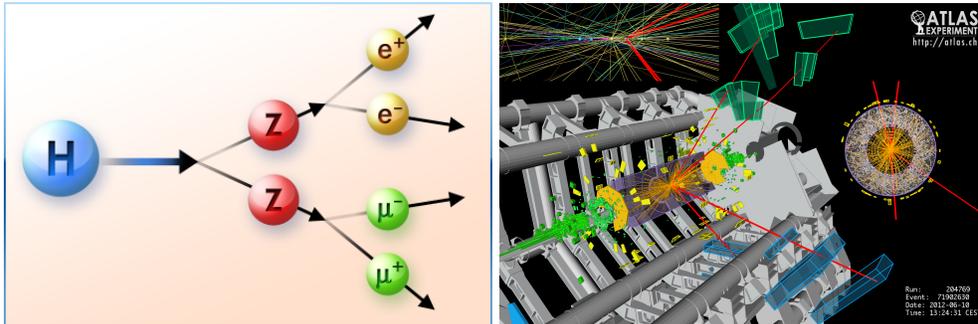


Figura 12: Izquierda: Esquema de una desintegración de un bosón de Higgs en dos bosones Z, que a su vez decaen en un par electrón-positrón y en un par muón-antimuón. Derecha: dibujo de cómo se produce en realidad y se detecta un proceso de decaimiento en el CERN.

ellas actúan mediante el intercambio de partículas.

El fotón es la más famosa de las partículas portadoras de fuerza. Es el cuanto de luz, propuesto por Einstein, y cualquier onda electromagnética está hecha de fotones. Pero también es el responsable de la interacción eléctrica y magnética entre cargas. Solo interactúa con las partículas con carga.

Los gluones transportan la interacción nuclear fuerte, que mantiene unidos a los quarks, formando neutrones y protones. También mantiene unidos a estos últimos, denominados globalmente nucleones, en el núcleo atómico.

Las partículas W y Z son las responsables de la interacción nuclear débil, que hoy en día está unificada con la electromagnética en la denominada interacción electrodébil. Igual que sabemos desde el siglo XIX que la electricidad y el magnetismo son facetas de una única teoría que las engloba, desde hace poco sabemos que el electromagnetismo y la interacción débil son facetas de una sola teoría.

Como ya se ha mencionado, la gravedad no está incluida en el modelo estándar. En una teoría cuántica gravitatoria ha de haber una partícula portadora de la interacción a la que se ha denominado gravitón. Dado que las ondas gravitatorias clásicas, que estarían formadas por muchísimos gravitones, son difíciles de detectar, es prácticamente imposible de momento pensar en poder identificar un gravitón.

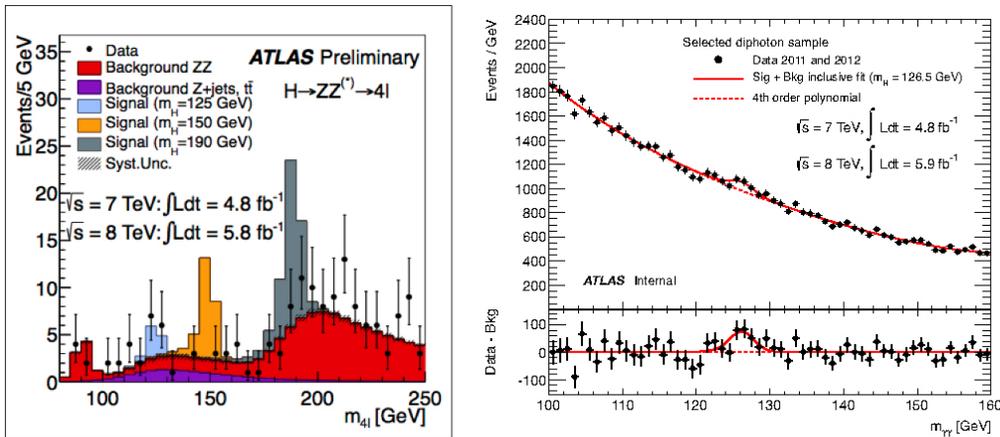


Figura 13: Medida de la existencia del bosón de Higgs en dos de sus canales de decaimiento (CERN).

La última partícula que nos queda que analizar es el bosón de Higgs, la última del modelo estándar en ser descubierta, en 2012. El bosón de Higgs es la partícula responsable de darle masa al resto de partículas. Si no existiera, el resto de partículas se movería libremente sin obstáculos, mientras que en su presencia al tratar de avanzar una de las otras partículas se ve rodeada de bosones de Higgs que le impiden en parte su movimiento dando lugar a su masa. El bosón de Higgs, una vez producido en una colisión, decae rápidamente a través de varios procesos o canales cuyos subproductos son las partículas directamente detectadas por los sensores. En la figura 12 se muestra un esquema de uno de esos procesos y otro de cómo se mide en realidad en el CERN. Su existencia ha sido detectada en los distintos canales de decaimiento. En la figura 13 se muestra la medida real realizada en el CERN en dos de los canales de decaimiento.

Los datos obtenidos hasta la fecha son compatibles con el bosón de Higgs del modelo estándar, pero nuevas medidas experimentales en condiciones mejoradas, que se comenzarán a realizar el próximo año, tendrán que confirmar estos datos o decir si es necesaria una modificación de dicho modelo.

Física en las escalas intermedias

Las escalas extremas son las más atractivas desde un punto de vista ‘filosófico’, pues son las que suelen involucrar nuevas leyes y cuestiones de carácter fundamental. Las escalas intermedias, desde la escala humana a la escala de los átomos, son las que presentan un mayor interés práctico, pero además son también altamente atrayentes desde un punto de vista básico. Esto se debe a la complejidad inherente de la naturaleza: aunque sepamos las leyes de objetos individuales, al agregarse estos se establecen nuevas leyes emergentes. La cantidad de nuevos tipos de materiales, tanto naturales como sintetizados, es increíble, así como la cantidad de nuevas técnicas físicas que han servido y continúan sirviendo a todos los campos de la ciencia, la medicina y la técnica. Vamos a analizar algunas teorías, técnicas y materiales que han revolucionado nuestra forma de vida. Este análisis no puede ser en absoluto exhaustivo. Por motivos de espacio es imposible mencionar muchos de los grandes avances que se han producido recientemente. La física es, por ejemplo, fundamental en el desarrollo de la instrumentación médica, así como en muchas áreas de la técnica, de la meteorología, las ciencias de la Tierra, etc., que no podremos abordar en esta necesariamente breve revisión.

Física cuántica

La física cuántica es la teoría que determina el comportamiento de las partículas microscópicas, desde las distancias más pequeñas exploradas hasta las distancias atómicas. Fue construida a principios del siglo pasado. Nos dice que todos los objetos son en parte onda y en parte partícula. El carácter ondulatorio de los objetos físicos hace que estén deslocalizados, pudiendo estar un único objeto en varios sitios al mismo tiempo. Cuando tratamos de detectarlo se materializa en un único sitio y el resultado de dónde se ha materializado es aleatorio.

El premio Nobel de Física de 2012 fue concedido a Haroche por desarrollar una técnica experimental para controlar fotones en una cavidad electromagnética mediante el paso de átomos de Rydberg (átomos unas mil veces mayores de lo normal debido a que están en estados muy excitados) y a Wineland por desarrollar una técnica de control preciso de iones atrapados eléctricamente mediante láseres. En la figura 14 se muestra un esquema de sus experimentos. Ambos

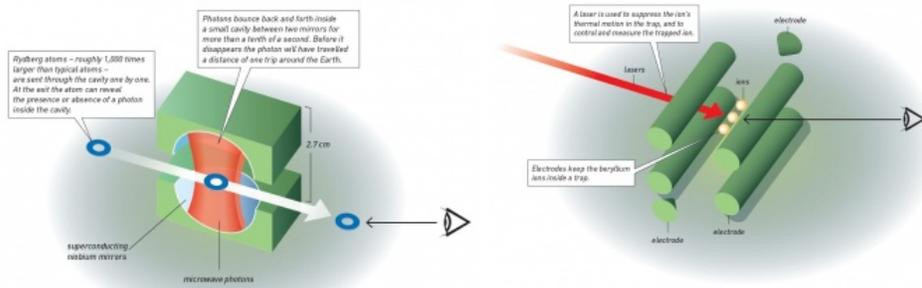


Figura 14: Izquierda: esquema del experimento de Haroche, en donde hay fotones confinados en una cavidad y son manipulados mediante átomos de Rydberg que la atraviesan. Derecha: esquema del experimento de Wineland, en donde iones atrapados eléctricamente son controlados mediante láseres.

experimentos tratan con problemas similares a la famosa paradoja del gato de Schrödinger, que podía estar a la vez vivo y muerto. Manipulan objetos microscópicos, fotones en un caso e iones en el otro, para que se comporten de acuerdo a las leyes cuánticas y, en concreto, que un objeto pueda estar en dos estados (sitios, por ejemplo) simultáneamente.

A pesar del carácter tan antiintuitivo de la física cuántica, se trata probablemente de la teoría que más ha influido en nuestras vidas. Nos permite entender la estructura atómica, la molecular y la de los sólidos. La química y la biología descansan ampliamente en sus resultados, pues entre otras cosas explica el enlace químico. La electrónica moderna, basada en los materiales semiconductores, no habría surgido sin la física cuántica. Los ordenadores, las telecomunicaciones y los móviles, por ejemplo, dependen del entendimiento cuántico que tenemos de sus componentes. La superconductividad y el láser, que estudiaremos más adelante, están fundamentados en la cuántica. Se calcula que la cuarta parte del PIB del mundo recae en dispositivos que no existirían si no hubiéramos descubierto la física cuántica.

Información cuántica

El área de la información cuántica es una de las más activas en las últimas décadas. Se dedica al manejo de información con sistemas cuánticos. La unidad

de información cuántica es el qubit, que a diferencia del bit toma valores continuos. Un conjunto de qubits puede almacenar una superposición de estados, por lo que la cantidad de información que puede almacenar crece logarítmicamente con su número. Un futuro ordenador cuántico sería capaz de procesar en paralelo esa superposición de estados, lo que le daría unas prestaciones tremendamente mayores que las de los ordenadores clásicos.

Hoy en día la seguridad de las telecomunicaciones, que incluye transacciones comerciales, banca online, secretos militares, etc., depende completamente de la dificultad de factorizar números muy grandes. Se ha desarrollado un algoritmo de factorización cuántico que una vez que existieran ordenadores cuánticos sería capaz de descodificar cualquier sistema de encriptación actual. Esta posibilidad hace que se dediquen ingentes esfuerzos a tratar de construir ordenadores cuánticos.

En la actualidad no está claro cuál acabará siendo la mejor tecnología para los ordenadores cuánticos y se están intentando muy diversas formas de implementación. Destacan las siguientes posibilidades:

- Iones atrapados magnéticamente.
- Átomos atrapados en redes ópticas, que consisten en láseres enfrentados que forman pozos de potencial en los que residen los átomos.
- Circuitos superconductores, en los que la información se guarda en el estado de uniones Josephson. En la figura 15 mostramos un circuito de nueve qubits hecho con esta tecnología.
- Puntos cuánticos en los que la información puede estar en su espín o en la posición dentro de un par de puntos cuánticos.
- Resonancia magnética nuclear en donde el qubit es el espín nuclear.
- Ordenadores topológicos en los que la información está en estados de distinta topología y, por tanto, muy estables.

La criptografía cuántica se encarga de enviar mensajes cifrados utilizando qubits y es la parte de la información cuántica más desarrollada. Ya existen productos comerciales para enviar y recibir información con esta tecnología. La gran

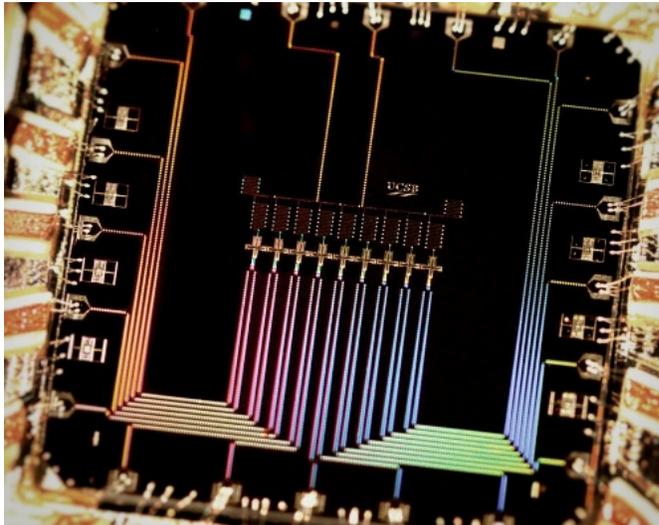


Figura 15: Circuito superconductor compuesto por nueve qubits construido por el grupo de Jon Martinis en Santa Barbara, en una colaboración de Google y la Universidad de California.

ventaja de la criptografía cuántica es que uno puede saber si el mensaje transmitido ha sido leído por algún observador, como asegura el teorema de no-clonación cuántica. Por una parte, si se lee un qubit se perturba y, por otra, es imposible copiarlo y reenviar el original sin perturbarlo.

Superconductividad

En 1911, el holandés Kamerlingh Onnes descubrió el fenómeno de la superconductividad en su laboratorio de bajas temperaturas. Observó que a bajas temperaturas la resistencia eléctrica de algunos metales caía bruscamente a cero. Este fenómeno fue explicado en 1957 por Bardeen, Cooper y Schrieffer. Cuando un electrón viaja en un metal atrae hacia él a los iones metálicos positivos creándose una zona propicia a la existencia de un segundo electrón, resultando en una atracción efectiva entre electrones. A temperaturas suficientemente bajas los electrones forman pares, llamados de Cooper, que no son dispersados por los defectos del material y que pueden viajar así libremente.

Los superconductores se utilizan en bobinas para generar campos magnéti-



Figura 16: En el CERN, las partículas a alta velocidad que circulan por el anillo que se muestra en el panel de la izquierda son desviadas por bobinas superconductoras. En la derecha se ve levitar a un superconductor.

cos altos. Los aparatos de resonancia magnética usan este tipo de bobinas, así como los aceleradores de partículas. También dispositivos superconductores se emplean en las medidas precisas de campos magnéticos. Por otra parte, estos dispositivos son prometedores en aplicaciones de información cuántica. Las corrientes superconductoras hacen que el campo magnético no pueda entrar en determinados superconductores, efecto que puede usarse para la levitación magnética, como aparece en la figura 16.

En 1986, Müller y Bednorz descubrieron superconductividad de alta temperatura en cupratos. Desde el primer momento quedó claro que el mecanismo de atracción electrónica no podía ser el de los superconductores metálicos, pero a pesar de los ingentes esfuerzos investigadores realizados hasta la fecha aún no se ha podido esclarecer cuál es dicho mecanismo. Es claro que los electrones se mueven de forma altamente correlacionada, pero no sabemos cómo describir dicho movimiento. Los cupratos son básicamente aislantes dopados, por lo que resulta muy sorprendente que se conviertan en superconductores y más a las relativamente altas temperaturas a las que lo hacen. El potencial de los superconductores de alta temperatura es muy elevado.

Láser

El láser fue inventado en 1960 y se ha convertido en toda una industria. En el siglo XX, fue la tercera área en número de patentes. La palabra láser responde a las siglas en inglés de ‘amplificación de luz por emisión estimulada de radiación’. Como su nombre indica, se basa en la emisión estimulada, efecto cuántico descubierto por Einstein. Los fotones que componen la luz son bosones y como tales les gusta estar agrupados, lo que hace que en presencia de fotones la probabilidad de emisión de nuevos fotones aumente. Un esquema del principio de emisión estimulada se muestra en la figura 17.

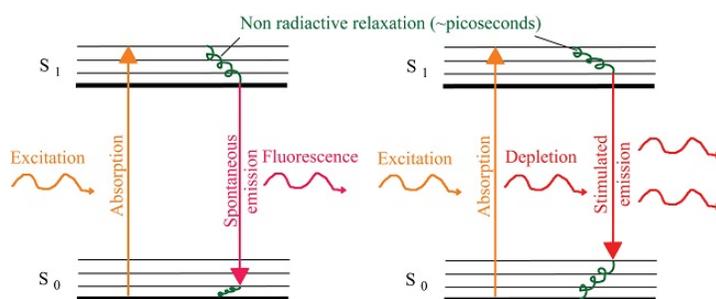


Figura 17: Esquema del principio de emisión estimulada por el que funcionan los láseres. En la izquierda se muestra el proceso de emisión normal: un electrón salta de un nivel de alta energía a otro de menor energía emitiendo un fotón. En la derecha, el salto del electrón se produce en presencia de otro fotón igual al que se va a emitir y ambos salen coherentemente.

El principio en todos los láseres es el mismo, pero los materiales usados son muy diversos, así como sus características y aplicaciones. Las principales propiedades de los láseres emanan de que su emisión sea estimulada. Ello hace que haya coherencia espacial y temporal, lo que implica un elevado grado de direccionalidad (alineamiento) y la posibilidad de altas intensidades [15]. Su elevada direccionalidad se usa en medidas de distancia, como la distancia de la Tierra a la Luna, por ejemplo. Su alta intensidad se emplea en aplicaciones industriales o en medicina para realizar todo tipo de cortes e incisiones. Por otra parte, su coherencia temporal los convierte en indispensables en ciencia básica y en aplicaciones espectroscópicas. La fibra óptica, fundamental en las telecomuni-

caciones, funciona con láser, así como los lectores de DVD, códigos de barra, etc.

Dos aplicaciones recientes de los láseres que han abierto nuevos campos científicos son los denominados átomos fríos y la espectroscopía de femtosegundos. Los dispositivos de átomos fríos consisten en enfrenar láseres de manera que produzcan un potencial estacionario y colocar átomos en los mínimos de dicho potencial. Otros rayos láseres son capaces de enfriar los átomos a temperaturas tremendamente bajas a las que es más fácil observar sus propiedades fundamentales. La versatilidad de los láseres hace que con esta técnica se puedan construir 'materiales' a medida con nuevas propiedades. En cuanto a la espectroscopía de femtosegundos, se ha desarrollado gracias a la existencia de láseres ultrarrápidos que hace posible 'ver', por ejemplo, cómo los átomos se recombinan en las reacciones moleculares.

Condensados de Bose-Einstein

Un condensado de Bose-Einstein es un nuevo estado de la materia en el que los constituyentes son bosones (partículas con espín entero) todos apilados en el estado fundamental, el de energía más baja. Los objetos microscópicos se dividen en bosones, con espín entero, y fermiones, con espín semientero. Los fermiones no pueden estar en el mismo estado, lo que resulta en el principio de exclusión de Pauli, responsable de la estructura atómica o de las bandas de energía, mientras que los bosones sí. Los pares de Cooper en los superconductores forman un condensado de Bose-Einstein, pero la fuerte interacción entre ellos debido a que poseen carga hace más difícil observar algunas de sus propiedades más interesantes.

En 1995 se construyó el primer condensado de Bose-Einstein con átomos neutros, en este caso de rubidio. Pocos meses después se consiguió otro de átomos de sodio. Los líderes de ambos equipos recibieron el premio Nobel en 2001. Estos condensados tienen importantes aplicaciones en estudios de carácter básico, pero también podrían utilizarse en un futuro la construcción de un 'láser' atómico.

Grafeno

El grafeno consiste en una capa bidimensional de átomos de carbono formando una red hexagonal, tal como la que se muestra en la figura 18. El grafito es un conjunto de capas de grafeno apiladas unas encima de otras, pero cuando estas capas están unidas pierden sus principales propiedades. El grafeno fue aislado por primera vez en 2004 por Geim y Novoselov en la Universidad de Manchester mediante una cinta adhesiva. A partir de entonces se inició una actividad frenética para estudiar sus propiedades, métodos de fabricación y sus posibles aplicaciones.

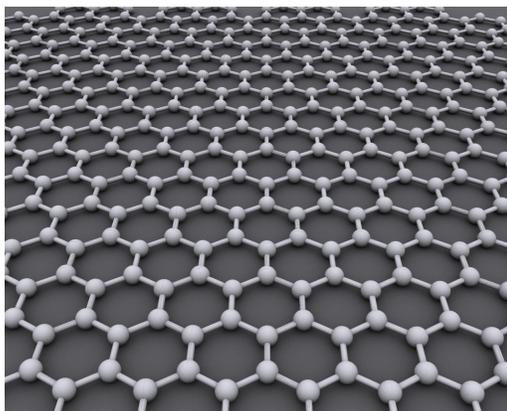


Figura 18: Estructura hexagonal del grafeno. Cada bola de este dibujo representa un átomo de carbono.

El grafeno posee unas propiedades verdaderamente sorprendentes, entre las que destacamos las siguientes. Es ultraligero y al mismo tiempo 200 veces más duro que el acero. A pesar de su espesor de una única capa atómica, es una membrana excelente que no deja atravesar a ninguna sustancia. Ni siquiera el helio puede atravesarlo. También posee una alta conductividad eléctrica cuando está dopado .

Sus propiedades hacen de él un candidato idóneo para multitud de aplicaciones desde la alta tecnología, hasta otras mucho más asequibles. Se podrá utilizar en membranas, en revestimientos, en aplicaciones energéticas y en baterías, para construir sensores, en biomedicina y en electrónica, entre otras aplicaciones.

La simetría de su red hace que las bandas de energía tenga forma de dos conos unidos por sus vértices. Esto hace que la energía de sus electrones sea proporcional al momento lineal, en vez de al momento lineal al cuadrado como en los conductores estándar. Dicha dependencia energética es la que tienen en la teoría de la relatividad las partículas sin masa (o con velocidades muy cercanas a la de la luz) por lo que el grafeno puede ser un laboratorio de estudios relativistas.

Grandes cuestiones sin resolver

Cuanto más descubrimos, más retos sin resolver se nos presentan. El hacer una lista de estos es una cuestión necesariamente limitada e influida por las inquietudes personal. Me gustaría seleccionar como cuestiones candentes en el área de la física que es posible que resolvamos en un futuro no muy lejano las que siguen, clasificadas de acuerdo con el esquema que utilizamos para los descubrimientos recientes.

Cosmología

- ¿Necesitaremos modificar la teoría de la gravedad para explicar la aceleración del universo o, por el contrario, descubriremos una verdadera energía oscura?
- ¿Cuáles serán las partículas constituyentes de la materia oscura? Entre los aspirantes a explicar la materia oscura están las teorías de supersimetría. Algunas de ellas ya han sido descartadas en los experimentos del CERN para encontrar el bosón de Higgs, pero el próximo año comenzará un segundo período de detección mejorado que podrá analizar en más detalle las predicciones de muchas de estas teorías.
- ¿Qué nuevos fenómenos gravitatorios violentos descubriremos mediante las ondas gravitacionales?
- ¿Cuándo encontraremos vida en un planeta cercano? ¿De qué forma de vida se tratará? ¿será una civilización avanzada? ¿Qué lejos de nosotros estará el primer planeta en donde encontremos vida?
- ¿Qué nuevas estrellas y nuevos mundos descubriremos con la misión Gaia?

Partículas elementales

- ¿Es el bosón de Higgs el predicho por el modelo estándar? ¿Hay solo uno?
- Desde hace poco se sabe que los neutrinos tienen masa, pero no se sabe cuál es. Tampoco se conoce si los neutrinos son partículas de Majorana, es decir si coinciden con su propia antipartícula. En la actualidad hay varios experimentos importantes en grandes instalaciones tratando de descubrir esta cuestión. Uno de ellos está dirigido por Juan José Gómez Cadenas, natural de Cartagena, en el laboratorio subterráneo de Canfranc.
- No se sabe como unificar la gravedad con el resto de fuerzas de la naturaleza y uno de los grandes retos de la física es construir una teoría del todo, que incluya en un mismo formalismo a las cuatro interacciones fundamentales de la naturaleza. ¿Conoceremos pronto esa teoría del todo?
- La teoría de cuerdas supone que las partículas son vibraciones de cuerdas unidimensionales superpequeñas. Con esta teoría es natural explicar la existencia de las partículas, pero en contrapartida necesita que el espacio tenga 10 u 11 dimensiones muchas de ellas contraídas. ¿Se podrá comprobar si la teoría de cuerdas es correcta?

Escalas intermedias

- Un primer reto en estas escalas es conocer la naturaleza del tiempo en física cuántica. En ésta, el tiempo aparece como un parámetro y, en principio, no puede medirse.
- ¿Cuándo se construirá el primer ordenador cuántico que supere a los clásicos? ¿Qué tecnología utilizará? ¿Serán las comunicaciones cuánticas la norma de las telecomunicaciones del futuro?
- Un gran reto es encontrar el mecanismo de la superconductividad de alta temperatura. ¿Qué materiales serán los más adecuados para construir bobinas y otros dispositivos superconductores a altas temperaturas? ¿Podremos conseguir superconductividad a temperatura ambiente?

- ¿Qué nuevas aplicaciones de los láseres se implementarán?
- ¿Cómo cambiará el grafeno nuestras vidas? ¿Surgirán nuevos materiales bi-dimensionales con propiedades igual de interesantes?
- ¿Será posible construir 'láseres' atómicos y se abrirán con ellos nuevas posibilidades?

La investigación en Física en la Región de Murcia

La Física es un área relativamente reciente en la Comunidad de Murcia y, en consecuencia, el número de grupos de investigación en la misma es relativamente pequeño y muchos de los miembros no son conocidos a nivel general, pero sí en sus campos específicos, pues en general son muy activos. Por ello creo conveniente reseñar brevemente los grupos más importantes desde un punto de vista investigador en el área de física en nuestra región.

En la Universidad de Murcia ha existido desde hace bastante tiempo un Departamento de Física, que en sus orígenes tenía un carácter predominantemente docente, encargado de la enseñanza de esta materia en otras titulaciones. Estaba vertebrado en torno a la figura de Ernesto Martín, con una línea de investigación en microondas. Con el crecimiento universitario, el departamento recibió diversas incorporaciones, como fue mi caso y el de varios compañeros de mi grupo, que mencionaré más adelante, que elevaron el nivel de la investigación. Después hubo tres fases de crecimiento importantes, todas ellas con criterios de calidad (raros en la universidad española, dicho sea de paso). Primero se incorporó Pablo Artal para crear el área de óptica, encargada de gran parte de la docencia en Óptica y Optometría. Después, se contrató a seis profesores para completar la docencia en la recientemente creada Licenciatura de Física. Por último, hemos conseguido la incorporación y estabilización de tres profesores Ramón y Cajal. En la actualidad, grupos del Departamento de Física disfrutan de dos Proyectos Europeos, dos Proyectos de Grupos de Excelencia de la Fundación Séneca y ocho Proyectos Nacionales, entre otros. Gran parte de la investigación se realiza en el Centro de Investigación en Óptica y Nanofísica, una imagen del cual aparece en la figura 19. Ha contado con dos Gestores del Plan Nacional de In-



Figura 19: Centro de Investigación en Óptica y Nanofísica de la Universidad de Murcia.

vestigación.

En cuanto a la Universidad Politécnica de Cartagena, también ha contado por mucho tiempo con un departamento de carácter fundamentalmente docente al que se han ido incorporando cada vez más investigadores. En la actualidad disfrutan de un Proyecto de Grupos de Excelencia de la Fundación Séneca y de tres Proyectos Nacionales.

Los grupos de investigación más activos de la Región de Murcia en el área de Física (en un orden prácticamente arbitrario) son los siguientes:

- Laboratorio de Óptica, dirigido por Pablo Artal, Grupo de Excelencia Regional. Se dedica a muy variados aspectos de la óptica de la visión, como son el diseño de instrumentos de medida del ojo, el diseño de lentes intraoculares, óptica adaptativa, estudios del comportamiento del ojo, etc. Posee numerosas patentes.
- Grupo de Materia Condensada teórica, del que formo parte junto con Rafael García Molina (Premio de este año de la Real Sociedad Española de Física de Enseñanza y Divulgación de la Física), Andrés Somoza y Emilio Cuevas. También es Grupo de Excelencia Regional. Se dedica al estudio de las transiciones de fase cuánticas, los sistemas interactuantes y la interacción de la radiación con la materia.

- Grupo de Física de Partículas y Teoría Nuclear, compuesto por José Antonio Oller (premio Joven Investigador del Año) y Luis Roca. Dedicado a entender las nuevas resonancias que se generan en física de partículas en aceleradores como el CERN (Ginebra), BES III (Pekin), SLAC (Standford), etc., así como nuevos estados de materia generados a partir de quarks exóticos y pesados, gluones, etc.
- Laboratorio de Microscopía de Fuerza Atómica, formado por Jaime Colchero y Elisa Palacios. Trabajan en la mejora de este tipo de microscopios, en la interpretación física de las señales medidas y en aplicaciones a la energía solar.
- Grupo de Astropartículas, al que pertenecen Emilio Torrente y Kostas Glampeidakis. Estudia las estrellas de neutrones, los agujeros negros y las ondas gravitacionales.
- Grupo de Medio Ambiente Regional, del que forman parte Juan Pedro Montávez y Pedro Jiménez. Modelizan diversos aspectos del clima, la contaminación atmosférica y las energías renovables.
- En la Universidad Politécnica de Cartagena está el tercer Grupo de Excelencia Regional del área de Física, dirigido por Antonio Urbina y Javier Prior. Se dedica al estudio de polímeros conductores, energía solar fotovoltaica e información cuántica, con énfasis en las aplicaciones biológicas.
- En la Universidad Politécnica de Cartagena también hay un grupo de investigación en Astrofísica, del que forman parte Antonio Pérez y Anastasio Díaz, y que centra su atención en la búsqueda de exoplanetas, en colaboración con el profesor cartagenero Rafael Rebolo.

Importancia de la ciencia básica

Una conclusión que se extrae de la primera parte de esta charla es la importancia de la ciencia básica. Al final, todos los grandes inventos han surgido de nuestro mejor conocimiento de las leyes físicas. El electromagnetismo cambió radicalmente nuestra forma de vivir, pero lo mismo ha ocurrido con la cuántica que, debido a que su rango directo de aplicación es el mundo microscópico y a lo contrario al sentido común de muchos de sus efectos, podría pensarse que es una teoría de poco contenido práctico. Lo que aquí se dice para la física es aplicable a todas las ramas de la ciencia.

La revolución producida por el láser es emblemática de la importancia de la ciencia básica. Al principio, se tildó a este invento de ‘una solución a la búsqueda de un problema’ y hoy en día representa una de las tecnologías con mayores aplicaciones. Las grandes revoluciones tecnológicas no surgen tratando de aplicar los conceptos conocidos. Se dice que nadie habría inventado la bombilla tratando de mejorar la vela, ni nadie habría conseguido el láser intentado mejorar la bombilla.

Todo lo anterior no significa un desprecio de la investigación aplicada, que evidentemente es tremendamente útil. Pero su importancia está tan clara, para la sociedad en general y para los políticos y los gestores que deciden sobre la financiación de la investigación en particular, que no necesita una defensa explícita. Todo lo contrario que la ciencia básica, sobre todo en estos tiempos de crisis.

La investigación, tanto básica como aplicada, ha de ser de calidad. La investigación es altamente sensible a la calidad. Sin ella no sirve de nada. La presión que hay hoy en día para que se investigue, en las promociones universitarias por ejemplo, hace que haya muchos investigadores más preocupados por el baremo, que por producir resultados de calidad, que cambien nuestra visión de la realidad o nuestra forma de vida.

Creo que otro problema que tiene la investigación en ciencia básica en España en general y en Murcia en particular es la sensación de que la ciencia básica es demasiado difícil como para que desde aquí podamos contribuir a ella. El famoso ‘que investiguen ellos’ puede estar aún en nuestro subconsciente en lo relativo a la ciencia básica, pero no así en la aplicada.

En la mayoría de los sitios en que se han conseguido los grandes logros la cuestión diferencial era la existencia de instituciones de calidad. La mejor inversión que se puede hacer es construir una institución de calidad. Esto lleva décadas, pero la inversión que hay que hacer no es mucho mayor que la que se necesita para mantener una institución mediocre.

La inversión en investigación en España y en Murcia está por debajo de la media de los países de nuestro entorno y ha empeorado notablemente con la crisis. Creo totalmente necesario un aumento en las inversiones en investigación con criterios de calidad. Me permito sugerir como una de las actuaciones a llevar a cabo el establecimiento de un programa Ramón y Cajal propio de nuestra comunidad que atraiga a nuestra región a científicos de calidad y que haga que la contratación de personal se salte los baremos mediocres que imperan en nuestras instituciones universitarias.

Bibliografía

- [1] S. Hawkins, Historia del Tiempo, Ed. Crítica, Barcelona
- [2] Supernova Cosmology Project, <http://www-supernova.lbl.gov/>
- [3] Camille M. Carlisle, Planck Upholds Standard Cosmology, Sky & Telescope, February 10, 2015.
- [4] E. Bianchi y C. Rovelli, Why all these prejudices against a constant? arXiv:1002.3966v3.
- [5] E. Corbelli y P. Salucci. "The extended rotation curve and the dark matter halo of M33". Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 311 (2): 441–447 (2000). arXiv:astro-ph/9909252.
- [6] V. Sahni, Dark Matter and Dark energy, Lecture Notes in Physics 653 (2004).
- [7] A. Cassan et al., One or more bound planets per Milky Way star from microlensing observations, Nature, 12 enero (2012).
- [8] The Extrasolar Planets Encyclopaedia, <http://exoplanet.eu/>
- [9] NASA Exoplanets Exploration, <https://exoplanets.nasa.gov/>
- [10] Kepler: A search for habitable planets, <https://kepler.nasa.gov/index.cfm>
- [11] M. Cruz y R. Coontz, Alien Worlds Galore, Science, 340, 565 (2013)
- [12] A terrestrial planet candidate in a temperate orbit around Proxima Centauri, Nature 536, 437 (2016).

- [13] Particle Data Group at Lawrence Berkeley National Laboratory, <http://www.particleadventure.org/>
- [14] A. G. Smart, Physics Nobel honors pioneers i quantum optics, *Physics Today*, 16, Dcember (2012).
- [15] M. Ducloy, The laser: from yesterday (1960) to tomorrow, *Europhys. News* 42 (1), 17 (2011).
- [16] D. v Delft y P. Kes, The discovery of superconductivity, *Europhys. News* 42 (1), 21 (2011).
- [17] J. Zaanen, A modern, but way too short history of the theory of superconductivity at a high temperature, en "100 years of superconductivity", Eds. H. Rochalla and P.H. Kes, (Chapman and Hall, 2011).