

2021 Retos Vitales

para una nueva era

**Retos de la cosmología y física de
partículas en tiempos difíciles**

Sheldon Lee Glashow



Claves para entender y mejorar el mundo



Reial Acadèmia Europea de Doctors
Real Academia Europea de Doctores
Royal European Academy of Doctors

BARCELONA - 1914



Retos de la cosmología y física de partículas en tiempos difíciles



Dr. Sheldon Lee Glashow

Premio Nobel de Física 1979.

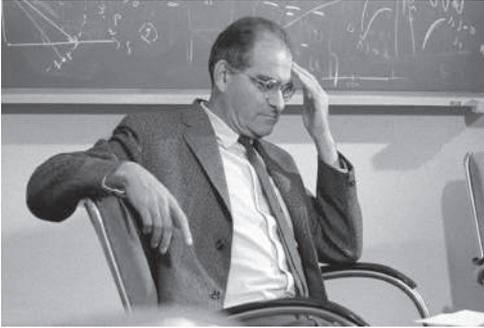
Académico de Honor de la Real Academia Europea de Doctores (RAED).

Mi amigo y colega, el difunto Victor Weisskopf, director general del CERN (la Organización Europea para la Investigación Nuclear) entre 1961 y 1966, me dijo una vez: «El tamaño de un ser humano yace por el centro de todos los tamaños posibles –un abanico de más de sesenta órdenes de magnitud– que va desde la inaccesible longitud de Planck hasta el radio del mismo Universo visible».

La cosmología y la física de partículas, que tratan con la más pequeña y la más grande de las estructuras, son seguramente las más emocionantes, fundamentales y desafiantes de todas las ciencias. También son las más caras, así como las menos relevantes, las menos prácticas y las menos propensas a originar productos patentables o rentables. Entonces, ¿por qué perseguirlas?

Podríamos señalar las numerosas contribuciones que hacen a la tecnología, a la formación de ingenieros y científicos, a la inspiración de los jóvenes estudiantes, y a la mejora del prestigio nacional. Pero, sobre todo ello, reside lo que considero un cometido sagrado: comprender, lo mejor que podamos, el Universo en el que hemos nacido.

Hasta la fecha el mundo ha apoyado generosamente esta visión. Pero no está tan claro que siga haciéndolo en los tiempos complicados que se avecinan.



Victor Weisskopf, director general del CERN durante el período de 1961 a 1966. Imagen cortesía de CERN.

La física de partículas y la cosmología son ahora, como veremos, actividades enormemente caras. Y las instalaciones futuras, que esperamos con ilusión, aún lo serán más. ¿Debería la sociedad financiar estos lujos tan costosos cuando se enfrenta a amenazas existenciales como el cambio climático, la guerra nuclear o a virus cada vez más peligrosos? ¿Es razonable perseguir esas disciplinas en un mundo plagado de nacionalismo, autocracia, racismo e inequidad?

Escribo lo siguiente teniendo en gran consideración estas preguntas.

Estados Unidos comenzó su carrera por la «Gran Ciencia» con el *–discutiblemente lamentable–* desarrollo y el *–seguramente lamentable–* despliegue de las armas nucleares. Poco después de la Segunda Guerra Mundial, en 1949, el telescopio Hale de 200 pulgadas situado en el Observatorio Monte Palomar vería por primera vez la luz. Se convirtió en el telescopio más grande del mundo y así permaneció hasta 1975. A principios de la década de 1950 fueron completados los aceleradores de partículas con acceso a energías de más de mil millones de electronvoltios (Bev); el Brookhaven Cosmotron y el Berkeley Bevatron. Cada uno de ellos costó aproximadamente 100 millones (en dólares de 2020). Estos experimentos descubrirían quásares, producirían y detectarían antiprotones, y realizarían muchas otras contribuciones relevantes en el campo de la cosmología y la física de partículas.

El resto del mundo no quedó atrás en esta gran «competición científica». En 1955, doce países europeos fundaron el CERN, la Organización Europea de Investigación Nuclear. Hoy está compuesto por 23 Estados miembros, a los que hay que añadir ocho países asociados. Desde entonces se crearon

muchos otros institutos nacionales de física de partículas; además de los que se establecieron en Europa occidental, en Canadá surgiría el Instituto McDonald, en Australia el AUSHEP, en la Unión Soviética el JINR, en la India el Instituto TATA, en China el IHEP, en Japón el KEK, en Corea del Sur el Centro Asia Pacífico, y otros más.

El Tevatrón, el acelerador de partículas del Fermilab, fue el primer colisionador capaz de acceder a energías de más de un billón de electronvoltios (TeV). Después de explorar durante más de medio siglo límites de energía cada vez más altos, en 2008, Estados Unidos cedió su liderazgo al Gran Colisionador de Hadrones, el LHC del CERN. Muchos físicos estadounidenses siguen utilizando y realizando sus experimentos en este centro europeo. Seguramente una de las instituciones internacionales de más éxito. Fue allí, en el CERN, cuando el 4 de julio de 2012 fue anunciado el triunfal descubrimiento del bosón de Higgs. La búsqueda de esta partícula fue un proyecto costoso que se prolongó durante más de 18 años. Involucró a miles de científicos e ingenieros y costó, en total, más de 20 mil millones de dólares. ¡Big Science, Big Money!

Saltemos ahora al campo de la astronomía y de la cosmología. Los telescopios ópticos pronto superaron la potencia del Hale. A día de hoy, el telescopio óptico-infrarrojo más grande en funcionamiento es el español Gran Telescopio Canarias (GTC), inaugurado en 2007. Goza de cuatro veces el área de recolección del telescopio Hale y su coste fue menos del doble. Pero es en el espacio, en gran parte gracias a la NASA, donde se encuentran los cuatro telescopios más potentes: el telescopio espacial Hubble, el observatorio de rayos gamma Compton, el observatorio de rayos X Chandra y el telescopio espacial Spitzer. Todos ellos han costado más de 16 mil millones de dólares (sin incluir los costes operativos y los de dos visitas de reparación al espacio). El telescopio James Webb, con 100 veces la potencia del Hubble, ha costado 10.000 millones de dólares adicionales. Su lanzamiento está previsto para finales de 2021. ¡La cosmología ha llegado a ser realmente cara!

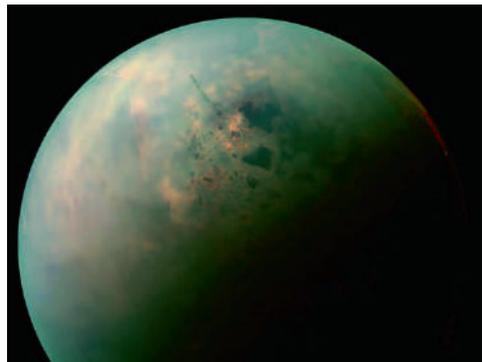


Imagen del Gran Telescopio Canarias, inaugurado en 2007. Goza de cuatro veces el área de recolección del telescopio Hale y su coste fue menos del doble. Imagen cortesía del Instituto Astronómico de Canarias (IAC).

En la década de 2030, la NASA tiene previsto desplegar cuatro nuevos y potentes telescopios espaciales: LUVUOR (un telescopio Hubble reforzado), HabEx (cuyo objetivo es la búsqueda de planetas habitables), LYNX (un telescopio de rayos X más potente) y ORIGINS (el sucesor del extinto telescopio espacial europeo Herschel). Se ha estimado que el coste total de las cuatro misiones será de unos 45.000 millones de dólares, por lo que la realización de cualquiera de estas atrevidas iniciativas parece estar tan lejos como los planetas de nuestro sistema solar.

La misión Apolo 11 celebró su cincuenta aniversario en 2019. Sus intrépidos astronautas instalaron en nuestro satélite los primeros retrorreflectores láser lunares, que posibilitaron algunas de las pruebas más precisas de la teoría de la gravedad de Einstein, ¡además de medir la distancia Tierra-Luna con la precisión de una pulgada!

La ciencia espacial es tan emocionante como la física de partículas o la cosmología, además puede conducirnos a descubrimientos fundamentales, como encontrar vida en otras partes del sistema solar. Precisamente con esta finalidad, en julio de 2020, se lanzaron tres misiones no tripuladas a Marte: una de Estados Unidos, otra de China y una tercera de Emiratos Árabes Unidos. La misión europea a Marte, que habría sido la cuarta, fue retrasada durante un año por la COVID-19.



La NASA, siempre mirando hacia el futuro, está planificando una misión a Titán, la luna más grande de Saturno. Imagen cortesía de EFE.

Con la esperanza de descubrir señales de vida extraterrestre, la nave Dragonfly (Libélula), está programada para pasar por Titán, esta luna ricamente orgánica y acuosa, en la década de 2030.

El modo en que los físicos y astrónomos de hoy en día exploran tanto la Tierra como el espacio es «observando» con sus instrumentos la amplia gama del espectro electromagnético, cuyo rango va desde las ondas de radio hasta los rayos gamma. En 1964, Arno Penzias y Robert Wilson descubrieron, con una antena de microondas desechada, la radiación cósmica de fondo. Compartieron el premio Nobel. Tres años más tarde, Jocelyn Bell, entonces una joven estudiante de posgrado en la Universidad de Cambridge, descubrió el primer púlsar gracias a una antena de radio improvisada que ella misma había ayudado a construir. Su supervisor de investigación, Antony Hewish ganó el Nobel por aquel descubrimiento.

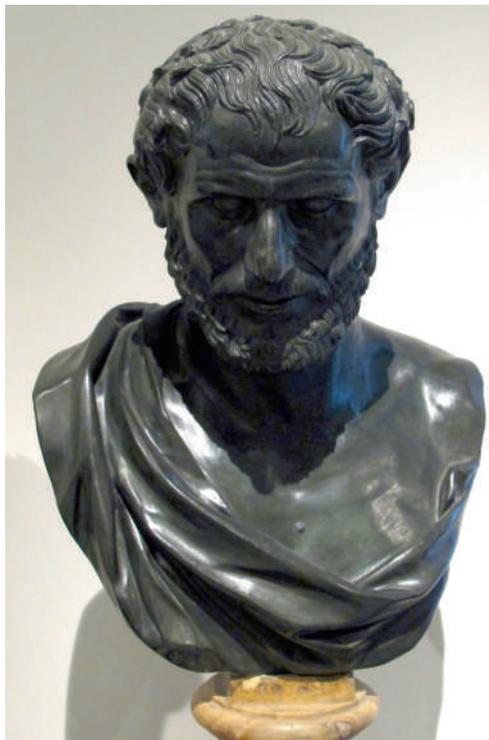
El primer radiotelescopio realmente grande fue el Observatorio de Arecibo, en Puerto Rico: un plato circular fijo con una apertura de 221 metros. Se completó en 1963, costó 80 millones de dólares y escaneó el cielo sin descanso hasta que, en agosto de 2020, una rotura de cable lo dañó. China desplegó un radiotelescopio de plato fijo con cuatro veces el área de recolección del Arecibo. Su coste, de 235 millones de dólares, no cubre la reubicación del gran número de habitantes del lugar. Grandes conjuntos de antenas de radio pueden explorar más área del cielo con una mejor resolución que un solo plato fijo. El Jansky Very Large Array consta de 27 discos de 25 metros, móviles y orientables. Se completó en 1980 con un coste de unos 500 millones de dólares. Recientemente actualizado con electrónica moderna, el VLA Sky Survey tendrá la capacidad de cumplir un propósito aún más ambicioso. Tenemos la suerte de poder examinar el Universo a través de otras dos ventanas: los «telescopios» de neutrinos y los «micrófonos» de ondas gravitacionales.

Los detectores de neutrinos deben ubicarse a grandes profundidades. Por ejemplo, bajo el hielo del Antártico (como el IceCube), en el fondo del mar Mediterráneo (como Antares), en lo profundo de una montaña del oeste de Japón (como el Super-Kamiokande) o, en definitiva, donde la radiación de fondo sea lo suficientemente baja. Estos instrumentos han confirmado

nuestra comprensión de las supernovas y de la producción de energía solar, han resuelto el antiguo problema de los neutrinos solares, han permitido la determinación de varios parámetros del modelo estándar, han arrojado dudas sobre la hipótesis del neutrino estéril, y han observado en 2020 la llamada «resonancia de Glashow».

Por dispares que parezcan, la cosmología y la física de partículas están, y siempre han estado, estrechamente vinculadas entre sí.

Mucho más tarde, Isaac Newton argumentó que sus leyes del movimiento se aplican tanto a los átomos como a los cuerpos celestes. William Herschel descubriría la radiación infrarroja en su laboratorio, y en el cielo, el planeta



Urano. Asimismo, Hans Bethe mostró que las reacciones nucleares que estudiaba son las que alimentan al Sol y a las estrellas. Hoy entendemos cómo se formaron por primera vez los elementos químicos de los que estamos hechos: algunos en el *big bang* y, mucho más tarde, otros elementos se crearían en el centro de las estrellas. Recordemos que fueron los cosmólogos los primeros en insistir en la existencia de tres tipos diferentes de neutrinos, ¡como de hecho los hay! Más recientemente, se ha postulado que la expansión exponencial del Universo, en los principios de su existencia, pueda ser debida a unos nuevos campos cuánticos. Incluso puede que se requieran más campos cuánticos para explicar la energía oscura que subyace a la creciente tasa de expansión del Universo.

Ya en la antigua Grecia, Demócrito argumentó que todo, en la tierra y en los cielos, está hecho de átomos indestructibles. Imagen: Wikipedia.

Los ejemplos de la unión entre estos dos campos, aparentemente tan alejados,

nos muestran que la escalera que utilizamos para medir el Universo no es ni mucho menos una escalera recta, sino más bien una serpiente que se muerde la cola. Es Oroboros, el emblema de la integridad y la unidad.

El modelo estándar actual de física de partículas es una teoría de gauge basada en un grupo de Lie de tres componentes. Sus doce bosones de gauge (el fotón, los ocho gluones y los tres bosones intermediarios de la interacción nuclear débil) actúan sobre las tres familias –extrañamente similares– de fermiones fundamentales (quarks y leptones). Estos bosones medían las interacciones débiles, fuertes y electromagnéticas entre estos 45 fermiones fundamentales, generando así –y describiendo correctamente– todas las fuerzas de la naturaleza, con la excepción de la gravedad.

Disponemos también de un modelo estándar de cosmología. Este nos proporciona una descripción cuantitativa de un universo que comenzó con en el *big bang* y que se está expandiendo desde entonces. Su versión actual se conoce como la teoría del modelo Lambda-CDM (de *cold dark matter*), donde Lambda representa la constante cosmológica mal engendrada de Einstein.

Nuestros dos modelos estándar disfrutaban de éxitos empíricos extremadamente impresionantes. Pero también ambos sufren de problemas graves y sustanciales.

El nuestro es un universo plano, su densidad de energía crítica consiste en aproximadamente un 70 % de energía oscura, un 20 % de materia oscura y un 5 % de materia ordinaria. Fracciones que cambian a medida que el universo evoluciona. Entendemos la radiación cósmica de fondo, en todo su detalle, de forma cuantitativa. Determina tanto la edad del universo como su planitud, con una precisión superior al medio por ciento. Pero no sabemos si la energía oscura del universo se debe a la constante cosmológica de Einstein o a algún otro mecanismo dinámico. Además, no entendemos cómo la constante cosmológica está, de alguna manera, constreñida a ser tan terriblemente minúscula.



¿Qué causó la expansión exponencial del Universo justo después del *big bang*? ¿Y qué le puso fin? Estas son algunas de las muchas preguntas cosmológicas que quedan por responder. Imagen cedida por Pixabay.

exponencial del Universo justo después del *big bang*? ¿Y qué le puso fin? Estas son algunas de las muchas preguntas cosmológicas que quedan por responder.

En el campo de la física de partículas el modelo estándar, con sus quarks, la cromodinámica cuántica, la síntesis electrodébil, y un poco de ayuda de los ordenadores, nos ofrece una explicación satisfactoria del amplio espectro de partículas «aparentemente» elementales. También nos proporciona una descripción cuantitativa de las interacciones entre ellas. Pero, desafortunadamente, el modelo estándar no es único. Además, necesita unas dos docenas de distintos parámetros ajustables para que funcione (como los múltiples botones de los televisores antiguos que deben manipularse para sintonizar correctamente los canales). Estos parámetros se obtienen –son medidos– en los experimentos, pues no se ha encontrado, hasta la fecha, ninguna relación entre ellos. Demasiados parámetros para que el modelo estándar sea la última respuesta a la física de partículas.

El modelo estándar deja otras preguntas sin respuesta; no explica cómo obtuvieron masa los neutrinos, tampoco suprime las no deseadas e ilimitadas correcciones radioactivas de la masa del bosón de Higgs, no puede tampoco explicar la estructura tripartita del grupo de gauge. Y lo más importante,

¿Está la materia oscura constituida por partículas masivas no detectadas que interactúan débilmente (llamadas WIMPS, por sus siglas en inglés)? ¿O bien por los axiones postulados por Frank Wilczek? ¿O acaso por algo completamente diferente? ¿Podría su existencia ser una ilusión? La tensión persistente en las distintas medidas de la constante de Hubble, ¿exige una nueva física?, ¿o simplemente es un reflejo de la incertidumbre experimental? ¿Qué causó la expansión

no puede decirnos qué nuevas fuerzas y partículas –si las hay– acechan a energías superiores a las ya exploradas.

Claramente, todavía nos queda mucho por aprender sobre estas diminutas partículas de materia y las grandiosas estructuras del Universo.

Muchas de las preguntas que nos formulamos podrán ser respondidas por las observaciones y los experimentos del futuro: el proyecto *Advanced LIGO* nos brindó la primera evidencia directa tanto de los agujeros negros estelares como de las ondas gravitacionales. En el camino ha creado una nueva disciplina, la astronomía de ondas gravitacionales. Con esta nueva «disciplina», el enigma de los elementos químicos más pesados, como el oro o el uranio, puede resolverse gracias a la observación de la fusión de estrellas de neutrones. No solo resolverán preguntas antiguas, sino que formularán otras nuevas: LIGO y su socio italiano, VIRGO, han creado dos nuevos rompecabezas: encontraron un agujero negro estelar sorprendentemente ligero y otros que son inexplicablemente pesados. Se están planificando futuros detectores terrestres de ondas gravitacionales en Japón y la India. La Agencia Espacial Europea y, por su lado, también China tienen programado lanzar en órbita detectores de ondas gravitacionales.

El LHC, el Gran Colisionador de Hadrones, opera a energías de colisión de las más altas que disponemos hoy en día. Gracias a ello descubrió, triunfalmente, la última partícula restante del modelo estándar: el bosón de Higgs. Y, sin embargo, no pudo revelar nada sobre la nueva física que nos espera más allá del modelo estándar. Los físicos teóricos y experimentales esperan con impaciencia la creación de nuevos y poderosos colisionadores protón-protón, programados para ser construidos en China y en el CERN, en Europa. En sus colisiones, estos aceleradores circulares de unos 100 km de radio, alcanzarían energías de unos 100 TeV, siete veces la del LHC. Sin embargo, todavía no está del todo claro si –o cuándo– se aprobará la construcción de estos gigantes.

Lamentablemente, pasarán décadas antes de que podamos acceder a esta nueva frontera de alta energía, si es que alguna vez lo conseguimos.

¿Qué deberían hacer mientras tanto los jóvenes físicos? Los experimentales todavía están estudiando la gran cantidad de datos proporcionados por el LHC y, relativamente pronto, adquirirán datos de su actualización de alta luminosidad. También podrán recurrir a los datos significativos disponibles de otras fuentes que no son aceleradores.

Muchos de mis colegas más brillantes recurren a la teoría de supercuerdas, o a su hermanito de siempre, la supersimetría. Hace cuarenta años, muchos teóricos esperaban la inminente llegada de la única y verdadera «teoría del todo», que respondería a todas nuestras inquietantes preguntas. Sin embargo, hoy en día, la supersimetría ha quedado casi excluida por los experimentos. Mientras tanto, las supercuerdas nos han impuesto un número prácticamente incontable de universos desconectados causalmente que forman el llamado multiverso. En él, cada universo tiene su propio sistema de leyes naturales y partículas fundamentales. Si esto fuera cierto, la supersimetría no podría responder a ninguna de nuestras preguntas y se convertiría en una «teoría de la nada».

Necesitamos desesperadamente una nueva generación de soñadores, de jóvenes científicos que se conviertan en los próximos impulsores y agitadores de la física.

Concluyo con una breve mención de seis ejemplos de teóricos que han estado trabajando, para bien o para mal, de manera muy original y al margen del pensamiento convencional:

1. Mordechai Milgrom, del Instituto Weizmann de Ciencias, pone en duda la necesidad de la existencia de materia oscura en el Universo. Propone, en cambio, la dinámica newtoniana modificada (o MOND, por sus siglas en inglés). Su formulación original explica gran parte, pero no toda, la evidencia de materia oscura. Para sus seguidores acérrimos, MOND es un campo de estudio activo, pero todavía no es ampliamente aceptado como alternativa a la materia oscura.

2. Subir Sarkar, de la Universidad de Oxford y el Instituto Niels Bohr, duda de la necesidad de la energía oscura. Propone, en cambio, un universo que no sea ni isotrópico ni que se expanda cada vez más rápido. Pese a que la radical visión de Sarkar no es ampliamente aceptada, él y otros investigadores de todo el mundo la persiguen activamente.
3. Nicolas Gisin, de la Universidad de Ginebra, considera que los números reales son herramientas útiles, pero solo herramientas que carecen de importancia física. Concluye que «los números reales no son realmente reales». Así pues, no deberían desempeñar ningún papel en las teorías fundamentales de la física.
4. Lee Smolin, del Perimeter Institute, fue uno de los creadores de la gravedad cuántica de bucles (LQG, por sus siglas en inglés). Un enfoque de la gravedad cuántica distinta a la propuesta por la teoría de supercuerdas y que no requiere ni supersimetría ni dimensiones adicionales. La gravedad cuántica de bucles considera el espacio-tiempo como una red de bucles distintos en la escala de longitud de Planck, lo que proporciona una base contable para el espacio de Hilbert de estados cuánticos.
5. Mi quinto ejemplo es el Premio Nobel Gerard 't Hooft, de la Universidad de Utrecht. Aboga por una estructura separada del espacio y del tiempo. La teoría de 't Hooft no ha sido revisada por pares, sino presentada como un libro titulado *La interpretación del autómata celular de la mecánica cuántica*. Afirmo que su enfoque está libre de los espeluznantes atributos de la teoría cuántica convencional, y promete conducir a una teoría cuántica consistente y unificada que incorpore tanto la gravedad como el modelo estándar.
6. Mi último personaje atípico es Stephen Wolfram, el inventor de Mathematica y fundador de Wolfram Research. Como 't Hooft, es ambicioso y audaz, y como 't Hooft presenta su trabajo como un libro, titulado *Un proyecto para encontrar la teoría fundamental de la*

física, también evitando la revisión por pares. «Finalmente tenemos un camino hacia la teoría fundamental de la física, y es precioso...» Wolfram escribe: «Todo comienza con algo muy simple y sin estructura. Podemos pensar en ello como una colección de relaciones abstractas entre elementos abstractos». Pero, al final, admite que «no conocemos (todavía) ninguna regla real que represente nuestro universo».

No critico a estos científicos imaginativos, ni a sus nociones extravagantes. Siguiendo el espíritu de Pauli y Einstein, se atreven a prestar atención a sus propios instintos en lugar de seguir las tendencias populares. Su camino se ha vuelto cada vez más peligroso en el turbulento mundo de hoy, donde el pensamiento no convencional está mal visto, las ideas poco ortodoxas rara vez se pueden financiar y todo lo que decimos, escribimos o hacemos está cada vez más limitado por visiones de corrección social, sexual, racial, política y científica.

