



AUDENS

Revista estudiantil d'anàlisi interdisciplinària

Núm. 4
2021

Entrevista a Álvaro Fernández¹

Entrevista realizada por Andreu Torres² y Miguel Galiana³

Álvaro Fernández Fernández es ingeniero industrial (UPC) y aeronáutico (SUPAERO-ISAE), actualmente está llevando a cabo su tesis doctoral en Masachussets (MIT). Trabaja en el equipo de investigación del proyecto LIGO, el cual, por sus hallazgos en 2017 respecto a las ondas gravitacionales, logró el premio Nobel y también el Princesa de Asturias.

Miguel: Bien, para esta entrevista de la revista Audens sobre ciencia, tecnología y futuro hemos traído a un invitado muy especial. Se trata de Álvaro Fernández, él es un reputado ingeniero Industrial y Aeronáutico. Actualmente está cursando sus estudios de doctorado en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT por sus siglas en inglés). Ha tenido el honor de formar parte del Observatorio de Ondas Gravitacionales por Interferometría Laser (LIGO por sus siglas en inglés Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory), uno de los mayores experimentos científicos de nuestro tiempo cuyo objetivo es la detección de ondas gravitacionales. Los descubrimientos de este experimento fueron tan relevantes para la ciencia que ameritaron numerosos reconocimientos, tales como el Premio Nobel de Física de 2017 o el Premio Princesa de Asturias de ese mismo año. Como ya sabrán, Audens es una revista estudiantil de análisis interdisciplinar, pero debido a la complejidad del tema hemos decidido traer a un invitado externo a la revista que también es especialista en la materia, Andreu Torres. Él será el encargado de preguntar y repreguntar si es necesario a Álvaro sobre sus investigaciones,

¹ Entrevista realizada el día 7 de Enero de 2021.

² andreu.torres@gmail.com

³ maikigs96@gmail.com

no obstante, también tenemos pensado escuchar sus opiniones respecto a algunos temas generales que son considerados como retos a corto y medio plazo a los que se enfrentan la ciencia y la tecnología. Ahora, una vez introducido el tema, empecemos por dar a los invitados la ocasión de presentarse. Puedes comenzar tú mismo, Álvaro.

Álvaro: Hola, muchas gracias por la invitación. Para empezar mi presentación diré que desde pequeño quise ser inventor en el sentido más clásico de la palabra. Así pues, en el momento de escoger estudios universitarios, me decanté por Ingeniería Industrial en la UPC (ETSEIB). Durante mis estudios, empecé a interesarme por la aerodinámica y se me dio la oportunidad de ir a Toulouse para hacer una doble titulación con Ingeniería Aeronáutica. En la universidad en la que estuve (SUPAERO-ISAE) se nos requería hacer un proyecto de seis meses en el extranjero. Las motivaciones a veces son un poco extrañas, y yo quería perfeccionar mi inglés, así que tenía preferencia por países con ese idioma. Al mismo tiempo, sabía que el nivel de investigación en Estados Unidos era muy potente. Siendo sincero, mi prioridad era la NASA. Mantuve conversaciones con varios grupos, pero finalmente no pude trabajar con ellos por requisitos de ciudadanía; la NASA está muy relacionada con el Ministerio de Defensa de los EEUU, y los proyectos por los que me interesé requerían ciudadanía americana. No obstante, tuve la oportunidad de venir al MIT a trabajar en el proyecto que ha mencionado Miguel y no dudé, pese a no saber realmente qué era un agujero negro. Sabía lo que está en el imaginario colectivo y lo imaginaba como una fuerza enorme y absorbente en mitad del universo, luego me di cuenta de que no tenía ni idea de lo que era. Cuando llevaba un par de meses en el grupo, me hablaron de la posibilidad de quedarme allí para hacer el doctorado. Lo cierto es que nunca me había planteado hacer un doctorado, pero no soy una persona difícil de persuadir en estos temas. Me pusieron la manzana delante y la mordí inmediatamente, pese a no comprender muchas partes del proyecto. Esa fue una de las mayores motivaciones: vi que el grupo era fantástico, que estaba aprendiendo mucho con ellos y que en seis meses no podría aprender todo lo que quería. Así que hice la solicitud, los exámenes de idioma y matemáticas necesarios y fui aceptado en el programa de doctorado.

Volviendo a mi falta de conocimiento cuando empecé, siempre explico que el primer día llegué y había reunión de grupo (una reunión semanal en la que todos los miembros del grupo de LIGO-MIT presentan su progreso), estuve sentado una hora sin entender absolutamente nada. Mi dominio del idioma era insuficiente y mi conocimiento

sobre astrofísica aún peor. Al acabar la reunión fui a hablar con mi supervisor (Dr. Fabrice Matichard) y le comenté que yo no había entendido nada. Recuerdo perfectamente lo que me respondió: “Mira, Álvaro, tú piensa que estamos haciendo un telescopio. Poco a poco irás entendiendo que no es realmente un telescopio, pero de momento piensa eso y trabaja pensando así”. Lo cierto es que ahora ya llevo cinco años trabajando en ese “telescopio” y, además de haber mejorado con el idioma, creo que ya entiendo qué es nuestro “telescopio”. También debo ser humilde y admitir que he tenido la suerte de poder estar en el lugar adecuado en el momento preciso dado que al mes de unirme al grupo tuvimos la primera detección de ondas gravitacionales. Había allí gente que llevaba treinta años trabajando y esperando a que hubiera una primera detección y yo pude vivir esa experiencia al poco de llegar. En resumen, empecé como ingeniero industrial, luego aeronáutico y ahora me considero un físico experimental por práctica más que por teoría.

Miguel: Hay una hazaña en concreto que es la que te amerita como entrevistado en este número, hablaremos extensamente del tema, pero lo mejor sería que la introdujeras tú.

Álvaro: Sí, por supuesto. Yo llegué allí y, como he dicho antes, tuve mucha suerte, porque justo a los dos meses también comenzaba la segunda fase del proyecto LIGO, llamada *Advanced* LIGO. Entre 2002 y 2010 hubo una primera fase del experimento, conocida como *Initial* LIGO, en la que no hubo ninguna detección, pero que sirvió para poner los límites de sensibilidad necesarios para detectar este tipo de ondas y desarrollar tecnología que acabó siendo clave para la detección de 2015. En septiembre de ese mismo año, durante la primera semana de operación de *Advanced* LIGO (de hecho, fue durante la semana previa al inicio oficial de la operación), tuvimos la fortuna tener esa primera detección que, además, fue especialmente nítida, muy limpia, y el nivel de señal por encima de lo esperado.

Miguel: La reacción en el laboratorio debió ser espectacular.

Álvaro: No, porque tardamos cierto tiempo en creérselo; hubo una cierta paranoia. Era demasiado perfecto, demasiado bueno, así que los primeros días el ambiente en el laboratorio era una combinación de alegría contenida y escepticismo. En definitiva,

tardamos un poco en aceptar lo que había ocurrido, hasta que se realizaron varios análisis independientes para determinar que la señal procedía, en efecto, de una onda gravitacional. Esa fue la primera detección que ha habido de ondas gravitacionales. Para ser exactos, en experimentos con pulsares se había medido el efecto de ondas gravitacionales, pero jamás se había hecho una detección directa de dicho fenómeno. Esto fue a finales de 2015, publicamos el artículo en 2016 y en 2017, a Reiner Weiss, que es al que yo más conozco porque está en el grupo de MIT, a Barry Barish y a Kip Thorne se les dio el premio Nobel de Física, entre otros reconocimientos. En 2017 de hecho hubo muchos premios, a todos los colaboradores se nos dio el premio princesa de Asturias y, al ser español, tuve la suerte de poder asistir a la entrega de premios, que fue muy emotiva. El 2017 fue un año muy especial, pero la gente se ha quedado un poco con ese año solamente, y lo cierto es que no hemos dejado de trabajar en el experimento, como muchos deben creer. Eso sería como descubrir el telescopio, mirar por primera vez a Marte y, una vez visto, enterrar el telescopio. Como nuestro nombre indica, somos un observatorio de ondas gravitacionales, no un experimento destinado a hacer una sola detección. Yo sigo trabajando aún en este proyecto y, de hecho, estamos desarrollando ya la tercera generación de detectores de ondas gravitacionales.

Miguel: Bien, ahora es momento de que pueda presentarse Andreu, que ha tenido la bondad de venir a ayudarnos. Ninguno de los miembros de la revista era versado hasta este nivel en física, así que él hará la mayor parte de las preguntas en esta entrevista ya que lo domina ampliamente. Posteriormente, también tendrá la oportunidad de opinar en un formato un poco más similar a una tertulia sobre temas generales que sean de interés para este número de la revista. Andreu está trabajando en proyectos muy interesantes también, así que, es posible que lo veamos como futuro entrevistado. Me gustaría, si fuera tan amable, que se presentara.

Andreu: Yo estudié Física en la Universidad Autónoma de Barcelona, me especialicé en Astrofísica teórica, los cursos de postgrado los hice en la misma universidad, y luego la tesina, la hice en el instituto Max Planck de Munich, con un proyecto muy concreto. Estuvimos desarrollando una técnica de reducción de la razón entre señal y ruido, que justamente será de lo más importante en esta entrevista. Lo hicimos utilizando redes neuronales aplicadas en concreto a un proyecto que es el telescopio M.A.G.I.C., que quizás os es también conocido. Para explicarlo rápido, es un

telescopio un tanto especial, de todos los rangos de frecuencias que pueden ser observados, está especializado en uno muy concreto que es la radiación gamma. Luego me fui a San Diego, donde estuve en otro proyecto de astrofísica teórica estudiando púlsares, estrellas compactas, estrellas de quarks... cosas que a veces son consideradas algo exóticas. A día de hoy estoy explorando un nuevo campo orientado a aplicar técnicas de redes neuronales para seguir reduciendo la razón entre señal y ruido en el análisis de la luz que atraviesa la atmósfera de un exoplaneta, detectando así la composición química de ésta para determinar si dicho planeta es habitable o no.

Miguel: ¿Algún candidato para mudarnos la semana que viene?

Andreu: Hay muchos fantásticos, pero, la verdad, aunque las noticias se empeñan en hablar de un planeta idéntico a la tierra continuamente, de momento no hay ninguno realmente confirmado como habitable, así que ya podemos cuidar de nuestro planeta, porque de momento ninguno es mejor que el nuestro.

Miguel: Una vez habiéndoos presentado, si os parece bien, podemos empezar con la entrevista a Álvaro que dirigirá Andreu. Ésta tratará acerca de todo el estudio de ondas gravitacionales.

Andreu: Pues no hay mejor pregunta para empezar que la más evidente: ¿Qué son estás ondas gravitacionales que LIGO está detectando?

Álvaro: Lo mejor es explicarlo cronológicamente, o al menos eso creo, pues así es como yo las comencé a entender. Hasta inicios del siglo XX, la Ley de Gravitacional Universal de Newton era ampliamente aceptada por la comunidad científica como correcta. No obstante, ya en el siglo XIX se hicieron ciertas observaciones que parecían poner en tela de juicio la universalidad de dicha ley. En particular, la órbita de Mercurio, el planeta más cercano al Sol, parecía no seguir los postulados de Newton. Una de las soluciones que se dieron fue la existencia de un nuevo planeta, más cercano al Sol que Mercurio, que simplemente no había sido observado todavía. A dicho planeta se le denominó Vulcano pero, a diferencia de lo ocurrido con Neptuno, la predicción era errónea. La solución correcta al problema de la órbita de Mercurio la dio Einstein en 1915 (justo 100 años antes de nuestra detección) con su Teoría de la Relatividad General (RG).

Esa teoría es lo que permitió la predicción de la existencia de ondas gravitacionales. Básicamente, usando las ecuaciones de los postulados de Einstein se deriva la existencia de unas ondas que se propagan y curvan el tejido espacio-tiempo, cosa de la que luego podemos hablar, pues no es fácil explicar lo que es el tejido espacio-tiempo. Lo realmente relevante de la RG es que no hay una atracción a distancia como la que supone Newton, sino un tejido espaciotemporal que se puede curvar y que los objetos con masa curvan ese tejido. Hay que aclarar que es un tejido muy rígido, pero que puede deformarse y por el que pueden propagarse ondas, que es lo que logramos detectar. Una cosa curiosa fue que con la detección demostramos por una parte que Einstein tenía razón, pero también que Einstein se equivocaba, ya que él mismo, al solucionar estas ecuaciones y ver la existencia de ondas, dijo que la amplitud de estas ondas es tan ínfima que jamás llegará a afectar a los seres humanos y, además, que nunca las íbamos a detectar, por lo que durante años las ondas gravitacionales eran más bien una curiosidad teórica sin aplicación práctica. En sus cálculos iniciales Einstein utilizó trenes, de los que era bastante aficionado según tengo entendido, chocando entre sí como fuente de ondas gravitacionales. Como podéis suponer, tanto la masa como la velocidad que pueden tener los trenes son minúsculas comparados con objetos celestes que conocemos hoy en día. Cuando él estaba “jugando”, en el buen sentido, con trenes, no sabíamos todo lo que sabemos ahora sobre agujeros negros y demás. Dejando a un lado los trenes, en un sistema binario compuesto por estrellas de neutrones o agujeros negros se generan ondas gravitacionales tanto en la fase espiral como en la coalescencia. De hecho, el sistema binario pierde masa en la forma de ondas gravitacionales. Por ejemplo, la primera detección de ondas gravitacionales fue causada por la coalescencia de dos agujeros negros, de 32 y 29 veces la masa del Sol, a 1300 millones de años luz de la Tierra que llegaron a alcanzar la mitad de la velocidad de la luz y que dieron lugar a un agujero negro de 59 veces la masa del Sol. Eso significa que una energía equivalente a 3 veces la masa del Sol fue disipada en forma de ondas gravitacionales, lo que es una barbaridad. ¿Y qué sucedió en la Tierra? Nada; la amplitud de la onda que llegó a la tierra fue 10^{-21} en elongación; es decir, una barra de un metro se expandiría y contraería 10^{-21} metros por el efecto de dicha onda. Por supuesto, la amplitud de las ondas que llegan a la Tierra depende del tipo y de la distancia a la que se encuentre la fuente, pero 10^{-21} es nuestra referencia a nivel de orden de magnitud, y ese es el nivel de elongación que debemos detectar. La analogía que solemos hacer para dar a entender la magnitud de dicha medición es que es como si tuviésemos que medir la distancia entre la Tierra y Próxima Centauri (estrella más cercana a la Tierra -después del

Sol- que está a 5 años luz) con una precisión equivalente al grosor de un cabello. Eso es lo que realmente estamos llegando a detectar con el interferómetro. En números absolutos, como nuestros instrumentos miden 4km, nos podemos permitir el lujo de detectar movimientos de tan solo 10-18 metros.

Andreu: Por ponerlo en un contexto más atómico, podríamos decir que esa elongación es entonces unas mil veces más pequeña que un núcleo atómico ¿No?

Álvaro: Efectivamente. Y ahora estamos tratando de ampliar el interferómetro en la tercera generación de detección de ondas gravitacionales.

Andreu: Espera que luego vendrán preguntas sobre LISA. Mejor sigamos con el método de medición de LIGO.

Álvaro: Perfecto. Pues la forma en la que medimos ondas gravitacionales es mediante un interferómetro Michaelson. Simplificando un poco, el interferómetro se compone de una fuente de luz, un divisor de haz, dos espejos y un fotodetector, como se muestra en Ilustración 1. Su operación consiste en enviar un haz desde la fuente (Láser) a un divisor de haz, que lo divide en dos, enviando la mitad del haz al brazo X y la otra al brazo Y. Al final de cada brazo se coloca un espejo que refleja la luz de vuelta al divisor de haz. El divisor de haz tiene un comportamiento y unas propiedades bastante curiosas a la hora de combinar los haces provenientes de cada brazo⁴. En concreto, dependiendo de la diferencia de longitud entre los brazos X e Y, la luz reflejada puede ir de vuelta a la fuente, al foto-diodo, o dividirse entre ambos caminos. Así pues, mirando la cantidad de luz que incide en el foto-diodo, podemos determinar la diferencia de longitud entre los dos brazos del interferómetro con mucha precisión. No obstante, para alcanzar el nivel de sensibilidad que requiere nuestra detección y poder garantizar que la diferencia de longitud se ha producido por el paso de una onda gravitacional, debemos asegurarnos de reducir el ruido de otras fuentes (como los movimientos sísmicos de la Tierra), lo que constituye el grueso del trabajo que hacemos en el Laboratorio LIGO.

⁴ La combinación de ambos haces se hace siguiendo el principio de superposición, según la diferencia de fase entre ambos haces. No obstante, como se describe más adelante, el divisor de haz, en su descripción cuántica, tiene cuatro entradas y cuatro salidas, siendo la entrada por el brazo del foto-diodo crítica para determinar el límite de detección.

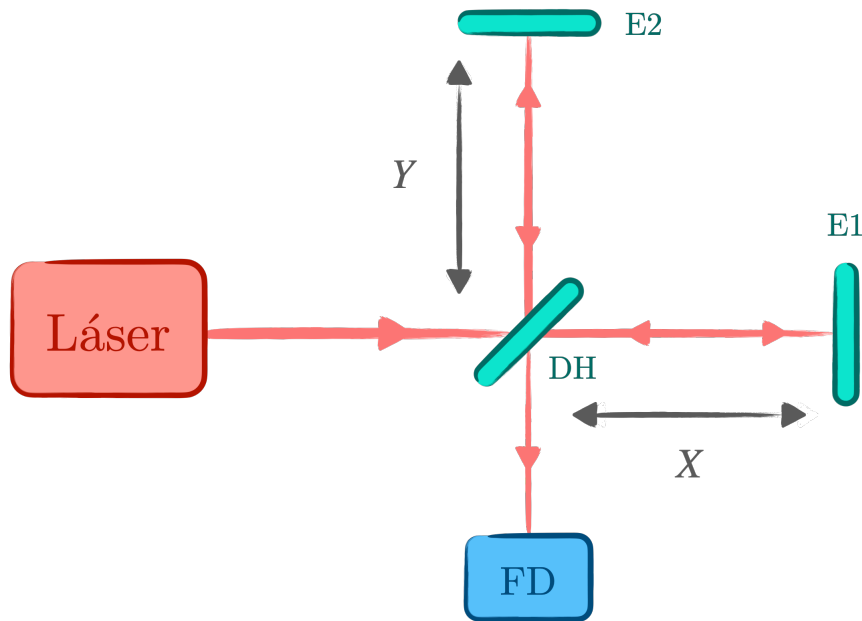


Ilustración 1. Ilustración 1: Esquema de un interferómetro Michelson. FD = fotodiodo, E = espejo, DH = divisor de haz

Miguel: Antes de que Andreu continúe con sus preguntas tanto de LIGO como de LISA, hay algo que no quiero dejar pasar. Cada uno de los términos que introduces hace surgir muchas nuevas preguntas que esta entrevista no podrá abarcar. Es fácil cuando se está hablando de curvaturas de espacio-tiempo y de finales de viejos paradigmas científicos que la imaginación vaya un poco más allá de lo que realmente se está diciendo.

Creo que hay una pregunta que sí que puedo hacerte ya que es en negativo: ¿Qué no son las ondas gravitacionales? Muy posiblemente habrás visto tanto a la teoría de Einstein como a vuestros propios avances respecto a la misma ser malinterpretados en cine, literatura y demás representaciones culturales; quizás tu respuesta pueda evitar que tu explicación de hoy induzca a errores provocados por algunas imaginaciones muy activas.

Álvaro: Pues agradezco la pregunta, ya que comparando con algunos amigos que están haciendo su doctorado en ingeniería, análisis de datos y otros campos, sí que es cierto que yo recibo bastantes más emails de gente un poco aleatoria sobre temas como el fin del mundo o la existencia de nuevas teorías basadas en fenómenos, digamos, con poco fundamento científico. La realidad es que hablar de agujeros negros y explosiones galácticas, da pie un poco a la fantasía, sobre todo porque son cosas que podemos concebir, medir, analizar, pero realmente cuesta imaginarlas. No te puedo decir lo que no

es una onda gravitacional porque no es infinitas cosas, pero ya supongo un poco por dónde vas y lo que quieres evitar que la gente entienda. No hemos descubierto los viajes en el tiempo, ni el teletransporte ni, como alguno pregunta, un arma de destrucción masiva...

Andreu: ¿Te han llegado a preguntar eso?

Álvaro: Sí, la verdad es que en Estados Unidos hay mucha investigación destinada y financiada por el ministerio de Defensa y es bastante habitual intentar ver si los descubrimientos científicos pueden tener aplicación militar. Tiene cierta gracia, y de hecho mi respuesta siempre es que si se tratara de un arma de destrucción masiva seguramente recibiríamos muchísimo más dinero para el proyecto, así que, entiéndase la ironía, tenemos la desgracia de no haberle encontrado una aplicación militar.

Miguel: Hecha esa aclaración, espero que Andreu no haya perdido el hilo de las preguntas por mi interrupción, si os parece, podéis continuar.

Andreu: Ningún problema, tenía claro el siguiente punto que es interesante que aclares. Hay una diferencia muy importante con cualquier tipo de astronomía, y es que todo tipo de radiación electromagnética, en el momento de atravesar cualquier nube molecular o una nebulosa o algo por el estilo, se dispersa, se absorbe, se reemite... digamos que cuando la luz llega a tu telescopio está ya muy perjudicada, pero la onda gravitacional no interacciona con la materia del medio interestelar porque es justamente una onda en el propio tejido del espacio tiempo, entonces no se debería ver afectada en este sentido...

Álvaro: Tú mismo lo has explicado perfectamente. Una de las gracias de medir las ondas gravitacionales con el interferómetro es que la onda llega pura, inalterada, ya que en el viaje desde que se ha generado hasta la Tierra, el polvo interestelar no varía sus propiedades por la falta de interacción. Esto da pie, enlazando con la pregunta que antes me hacía Miguel, a que mucha gente me pregunte si esto es la comunicación del futuro. Yo siempre trato de explicarlo de este modo: hoy por hoy, el emisor son dos agujeros negros y el receptor es un instrumento de cuatro kilómetros de largo por lo que, nótese otra vez la ironía, por muy grandes que se hagan los móviles dudo que sean funcionales si su objetivo es captar ondas gravitacionales. Así que, por ahora, nuestro trabajo no tiene

una aplicación en el ámbito de la comunicación y no es algo en lo que estemos trabajando. Volviendo a lo que me has preguntado, sí, tenemos la suerte de no padecer en nuestro estudio muchos de los contratiempos que se dan cuando se trabaja con luz, lo que hace que la información contenida en estas ondas sea especialmente valiosa.

Andreu: Voy a hacer una pregunta que no quiero que se me escape, ya que algunas de las que tenía preparadas ya las has respondido con las anteriores. Siempre que la raza humana ha usado una nueva tecnología que le ha permitido explorar el universo con algún tipo de luz que no sea la luz visible se han descubierto nuevos fenómenos, quizás desde que Galileo agarró su primer telescopio óptico e hizo descubrimientos muy significativos, pero también en las primeras detecciones de rayos X, al enviar un satélite de luz infrarroja... desde dicho momento estás ya descubriendo cosas que están más allá de lo que puede descubrir el ojo humano. Cada vez que se ha abierto una ventana de observación al cosmos con un nuevo tipo de luz aparece una nueva rama de la astronomía, como puede ser la astronomía de la radiación gamma, la de radiación x etc. Una de las cosas más importantes para mí o, lo que al menos es bajo mi punto de vista el legado más importante de LIGO, es el hecho de ser el primer experimento que abre un nuevo campo de la astronomía, a saber, la astronomía de ondas gravitacionales. Como cada vez que se abre una nueva ventana nueva de investigación al cosmos se descubren nuevos fenómenos, imagino que todos los astrónomos que trabajan en ello ya tienen una batería de nuevos fenómenos que se podrían llegar a descubrir con la astronomía de ondas gravitacionales. La cuestión es si nos podrías hacer un resumen a grandes rasgos de qué es lo que se espera descubrir mediante los detectores de ondas gravitacionales durante las próximas décadas.

Álvaro: Sí, voy a dividirlo en dos categorías ya que en el propio grupo hay gente que trabaja en la detección de fuentes esperadas y gente que trabaja en las sorpresas. Para entender un poco donde estamos y hacia dónde vamos, vale la pena recordar que esta parte empezó posiblemente con Kip Thorne, que fue el que lideró en un principio la parte teórica, y gracias a que él y su equipo pudieron predecir con mucha exactitud qué sucedía cuando dos objetos masivos compactos⁵ entran en espiral, el tipo de onda que iban a generar y cómo iba a llegar esta onda a nuestros detectores en la Tierra. Esa fue una parte

⁵ Agujeros negros o estrellas de neutrones.

realmente importante del proyecto ya que, si sabes lo que esperas, tu capacidad de detectarlo aumenta considerablemente. De hecho, nuestro instrumento está especialmente diseñado para la detección de ondas gravitacionales procedentes de la coalescencia de sistemas compactos binarios. Es por ello que nuestra banda de detección se sitúa entre los cien hercios hasta un quilohercio, aproximadamente. No obstante, hay muchos eventos que generan ondas gravitacionales a distintas frecuencias, y hay otros experimentos que trabajan en su detección. En nuestro caso, lo que estamos detectando son coalescencias de estrellas de neutrones y agujeros negros. Supernovas, por ejemplo, no hemos detectado, pero creemos que en algún caso lo podríamos llegar a detectar. Hay otras fuentes, como sistemas binarios de agujeros negros supermasivos o enanas blancas, que emiten ondas a frecuencias por debajo de nuestra banda de detección, y para eso está LISA (por sus siglas en inglés – Laser Interferometer Space Antenna). Hay incluso proyectos que están tratando de encontrar lo que llamamos ondas gravitacionales primordiales, que tienen frecuencias mucho más bajas, y que fueron generadas en el mismo *Big Bang*. Volviendo a la pregunta original, todo lo que he mencionado engloba las fuentes esperadas; y lo que esperamos en los próximos años es seguir detectando dichas ondas con mayor frecuencia y, con ello, mejorar nuestros modelos y el conocimiento que tenemos sobre el universo. Además, es cierto que también tenemos nuestra parte soñadora y todos esperamos detectar una onda de origen desconocido y, a partir de ahí, trabajar para descubrir el fenómeno que pueda haberla generado. A este tipo de fuentes es a las que me refería al hablar de “sorpresas”. Y es que no siempre la teoría viene antes que la práctica. A veces la tecnología te permite realizar observaciones para las que no tienes explicación y es el trabajo de la comunidad científica encontrársela (cómo sucedió con las órbitas de Mercurio y Urano). Así pues, ¿qué es lo que esperamos detectar? Pues ahora mismo las detecciones ya mencionadas, pero soñamos con encontrar algo que nos sorprenda. Ahora bien, ¿qué tipo de ciencia vamos a poder desarrollar con garantías en los próximos años con estas detecciones? Posiblemente entender mucho mejor los agujeros negros y su papel en la formación del universo tal y como lo conocemos hoy en día. Las ondas gravitacionales son de vital importancia en este caso puesto que los agujeros negros, incluso en coalescencias, son silenciosos en el espectro electromagnético, siendo las ondas gravitacionales la única fuente de información que se puede obtener de estos eventos. Por poner un ejemplo, estamos intentando estudiar un elemento muy importante de los agujeros negros que es su rotación. La velocidad y dirección de rotación de los agujeros negros puede dar pistas sobre el origen y la

formación de éstos. Con ello, se pueden validar o descartar ciertas teorías. Y es que, contrariamente a lo que se podría pensar, nuestro conocimiento sobre agujeros negros, cien años después de su “descubrimiento”, sigue sin ser completo. Por ejemplo, sabemos que hay dos tipos de agujeros negros, los llamados estelares, con masas entre 5 y 100 veces la masa del Sol⁶, y los agujeros negros supermasivos, que se encuentran en el centro de la galaxia y tienen una masa de millones y millones de millones de veces la masa del Sol. Existe pues un vacío entre ambas poblaciones de agujeros negros y los mecanismos de formación de estos agujeros negros está siendo investigado en la actualidad. Desde LIGO creemos que con nuestras detecciones podemos contribuir a esclarecer parte del misterio. Del mismo modo, existe un rango (entre 3-5 veces la masa del Sol) en que no está claro si un colapso estelar deriva en una estrella de neutrones o un agujero negro. En este caso, por ejemplo, el nivel de rotación del objeto puede ser un factor determinante. Con los datos de los que disponemos ahora mismo, podemos empezar a clasificar, pero lo idóneo es llegar a un nivel de detecciones diarias en el que podamos empezar a hacer estadísticas seriamente significativas para poder ajustar los márgenes y límites con datos experimentales. Eso es lo que a priori deseamos, aunque, como digo, estaremos encantados de recibir las sorpresas que vengan. El objetivo al final no puede dejar de ser ampliar nuestro conocimiento sobre el universo.

Miguel: ¿Satisfecho con la respuesta?

Andreu: Sí, sin duda que hay muchas partes que han tenido que ser pasadas por encima, pero si queremos que sea asequible tanto por tiempo como por la dificultad del tema no podemos explayarnos más, y hay un tema que quiero que se trate y me sabría muy mal pasar por alto. Abandonando un poco la física y centrándonos más en la vertiente ingeniera. Antes comentábamos que cada vez que se descubre una nueva tecnología se abren nuestros ojos a nuevos fenómenos, también, cada vez que la raza humana se ha visto con el reto, ya sea por curiosidad o por necesidad, de desarrollar una tecnología -en este caso podemos hablar de construir el interferómetro o el telescopio o cualquiera de esos instrumentos que nos han permitido ir más allá de lo que la potencia de nuestros sentidos nos ha permitido-, durante el proceso de creación de estos instrumentos se llevan

⁶ Los límites exactos de los agujeros negros estelares son un área de investigación activa, los límites presentados son una aproximación para dar una estimación del orden de magnitud.

a cabo muchos avances y descubrimientos intermedios que acaban lloviendo al cabo del tiempo como progresos para la sociedad civil. Hay miles de ejemplos de objetos tecnológicos que usamos hoy en día que han comenzado con un experimento científico hecho muchísimos años antes. Entonces, la cuestión sería que nos explicaras lo que se sigue de esta suposición: todo lo que se ha desarrollado, que me imagino que debe ser mucho ya que la tarea de construir un interferómetro que sea capaz de detectar estas señales tan extremadamente débiles frente a un ruido de fondo tan espectacular, supongo que ha conllevado el desarrollo de ciertos avances tanto a nivel de software como de hardware que pueden dentro de unos años terminar teniendo un impacto real sobre la sociedad civil. Si nos pudieras explicar más o menos cuales son esos avances “intermedios” creo que sería de un gran interés.

Álvaro: Pues la verdad es que no sé cómo agradecer que hayas pensado esa pregunta, más aun siendo yo ingeniero de formación. Esta es la pregunta que nunca me hacen, porque la gente nunca piensa en esos avances intermedios, que al final son los que pueden llegar a tener más efecto sobre sus vidas. Entiéndaseme bien, cualquier creencia sobre una jerarquía sobre los distintos saberes es ya absurda, aquí estamos un físico, un ingeniero y un filósofo y seguro que podemos aprender unos de otros, pero es curioso ver a gente preguntarte cómo las ondas gravitacionales van a cambiar su vida. Porque la realidad es que lo más probable es que los avances que nuestras detecciones van a hacer posible en el campo de la astrofísica no lleguen a cambiar la vida de nadie que viva hoy en día. Sin embargo, toda la tecnología que hemos desarrollado para poder hacer esas detecciones sí que puede hacerlo. Volviendo a la pregunta, el trabajo de los experimentalistas de LIGO es reducir el ruido para mejorar la sensibilidad de nuestro instrumento. En particular, tenemos un gráfico indicando la contribución de cada ruido al ruido total de detector y nuestro objetivo es reducir ese nivel de ruido. Justo en el período en el que yo he estado lo que ha limitado nuestro instrumento es el ruido cuántico⁷. Para superar esa limitación nos hemos visto forzados a desarrollar toda una serie de instrumentos ópticos que, como bien decías, sí que pueden tener un efecto directo sobre la vida de la gente. Por ejemplo, la mayor parte de mi trabajo se ha centrado en el desarrollo de lo que se denomina luz comprimida (*squeezed* en inglés). La idea, simplificada, es que la luz no es una onda perfecta⁸, sino que tiene ruido tanto en la fase

⁷ Ruido de disparo y ruido de presión de radiación, ambos debidos a la naturaleza cuántica de la radiación electromagnética.

⁸ En este caso hablamos de onda electromagnética, el láser que utilizamos para la detección; no

como en la amplitud. La famosa relación indeterminación de Heisenberg indica que es imposible reducir ambos ruidos por debajo de un cierto nivel. Volviendo al mecanismo de detección simplificado (ver **Error! Reference source not found.**), podemos decir que el divisor de haz distribuye la luz reflejada por los dos espejos en función de la fase con la que llegan al divisor (que depende de la longitud de cada brazo). Así, el ruido de fase de la luz limita la sensibilidad del instrumento. No obstante, el límite impuesto por la relación de indeterminación no es sobre el ruido de fase o el ruido de amplitud, es sobre la combinación de ambos⁹. Así pues, la solución consiste en la generación de luz comprimida. Esta luz tiene menos ruido de fase que la luz clásica, pero más ruido de amplitud¹⁰. Esto nos permite realizar nuestras mediciones con mayor sensibilidad. La analogía que hacemos es la siguiente: nuestro instrumento es como una regla que vibra (tiene ruido) a lo ancho y a lo largo. Si intentamos medir un objeto con dicha regla nuestra capacidad de determinar la longitud exacta de dicho objeto estaría limitada por la vibración (ruido) en la longitud de la regla, no en el ancho. Así pues, reducir la vibración longitudinal de la regla mejorará la precisión de tu medición, independientemente de si eso implica un aumento en la vibración a lo ancho. Esto es un poco lo que hacemos...

Andreu: O sea dejáis que el ruido de la amplitud sea el que quiera y reducís el ruido de fase al mínimo.

Álvaro: Efectivamente, pero hay una trampa que es lo que he comentado antes, y es que el efecto que nos limita es distinto dependiendo de si la frecuencia es alta o baja. En la zona de altas frecuencias, nuestro instrumento está limitado por el ruido de disparo, que se reduce con el uso de la mencionada luz comprimida en fase. El problema es que, a baja frecuencia, el límite viene dado por el ruido de presión de radiación. Ese ruido proviene del hecho de que los fotones llegando al espejo son como una pelota rebotando contra una puerta, los fotones rebotan igual que esa pelota y, si la puerta no está bien fijada, la puerta se mueve. Así, como los espejos de LIGO están suspendidos, el impacto de los fotones hace que el espejo se mueva, y ese movimiento se traduce en ruido. Por desgracia, ese ruido aumenta al aumentar el ruido de amplitud, lo que hace que tengamos

confundir con la onda gravitacional que detectamos.

⁹ El producto de las varianzas.

¹⁰ Por definición, la luz comprimida es la que tiene una variación inferior a la de Poisson en una de las dos cuadraturas.

que buscar soluciones distintas para altas y bajas frecuencias. En resumen, una forma de mejorar el nivel de sensibilidad de un interferómetro limitado por ruido cuántico consiste en el uso de luz comprimida, que es introducida en el interferómetro por el puerto¹¹ del foto-diodo. Volviendo al fin a la pregunta que me hacíais, para crear esta luz comprimida, lo que hacemos es crear correlaciones entre los fotones, dando lugar a un efecto conocido como entrelazamiento cuántico. Este entrelazamiento es un recurso imprescindible para la mayoría de los esquemas más prometedores de computación cuántica basada en fotones. En la computación cuántica lo que realmente necesitas es que los fotones no sean independientes ya que, de ser así, no podrías realizar operaciones de interés con ellos. Así pues, la tecnología que hemos desarrollado en un principio para el interferómetro puede ser importante para el desarrollo de computadores cuánticos; una dirección que estamos explorando en los últimos años. Por otro lado, LIGO también ha realizado importantes avances en el campo de la ingeniería en áreas como el aislamiento de vibración, o tecnologías de vacío, entre otros.

Andreu: Bueno, si tiene una aplicación en computación cuántica, inmediatamente, eso ya paga todo lo que se hayan gastado todas las instituciones implicadas en desarrollar LIGO, porque me atrevo a decir que la computación cuántica es lo que va a transformar a la sociedad civil por completo. De todos modos, vayamos un poco más allá de LIGO, tras todas las dificultades que nos has expuesto, y también tras todos los increíbles avances que ha hecho LIGO, han surgido una serie de nuevos proyectos que quieren ir un poco más allá. Ya estaba yo en la carrera y se estaba hablando sobre LISA, es un proyecto que se ha retrasado muchísimo, supongo que una parte de la problemática es económica, pero también puedo suponer que hay una dificultad de ingeniería muy importante. Si nos puedes explicar ahora un poco el estado de LISA hoy en día podrías darnos noticias muy importantes.

Álvaro: La gente cree que nosotros y LISA nos llevamos mal y que somos enemigos, que competimos por detectar lo mismo. No negaré que la alegría de haber detectado primero es increíble, pero lo cierto es que nosotros somos los primeros que queremos que tanto LISA como los demás detectores de ondas gravitacionales tengan éxito. Nos iría genial que ellos ya estuvieran funcionando y poder colaborar. El tema aquí es el que he señalado antes, para detectar ondas gravitacionales necesitas un instrumento

¹¹ *Puertos* son cada una de las cuatro entradas y salidas de un divisor de haz en su descripción cuántica.

con un nivel de ruido ínfimo, ya que éste enmascara la señal que estás intentando detectar. Lo ideal sería tener un instrumento de bajo nivel de ruido a cualquier frecuencia, pero eso no es técnicamente posible. A la hora de desarrollar el instrumento debes encontrar compromisos y hacer concesiones. En nuestro caso, al ser un detector terrestre, estamos limitados por el ruido sísmico por debajo de los diez hercios, aproximadamente. Por debajo de ese nivel, nuestros sistemas de aislamiento, que están basados en el efecto del péndulo, no funcionan¹². Es lo que llamamos el “muro sísmico”. La solución, es igual de “básica” que el problema: hay que irse fuera de la Tierra. Esa es precisamente la base del proyecto LISA, muchas veces llamado “el LIGO del espacio”. Imagino que no les gusta mucho el nombre, pero da una idea del proyecto: es un detector espacial de ondas gravitacionales basado en interferometría láser. El espacio tiene otra ventaja: la longitud del interferómetro no está limitada por la disponibilidad de suelo. Pensad que uno de los proyectos para la tercera generación de observatorio es un interferómetro de cuarenta kilómetros. ¿Por qué? Porque, dado un cierto nivel de elongación, cuanto más largo sea el brazo del instrumento, menor es la distancia real que debemos medir¹³. Así, los brazos de LISA van a medir 2.5 millones de kilómetros, lo que les permite reducir los requisitos en otros aspectos del instrumento. Además, en el espacio no hay ruido sísmico, por lo que la su banda de detección está situada por debajo de la nuestra, teniendo la capacidad de detectar otras fuentes de ondas gravitacionales. Así pues, LISA y LIGO somos proyectos complementarios, no competidores. Y de hecho hay muchas colaboraciones abiertas entre investigadores de ambos grupos. Respecto a los avances del proyecto, si no me equivoco la fecha de lanzamiento está prevista para la década de 2030, lo que coincidiría con nuestra tercera generación de detectores. Sé que han tenido retrasos porque en algún momento NASA decidió desvincularse del proyecto, pero creo que ahora ya ha vuelto y vuelve a ser una misión conjunta ESA-NASA. Volviendo un poco a lo de la rivalidad, creo que desde fuera hay una idea de que en el mundo científico siempre nos estamos pisando unos a otros y, pese a que me consta que ocurre más de lo que debería, mi experiencia es que tiende a prevalecer la colaboración más que la competición, ya que es la mejor forma de avanzar. De hecho, todos en el grupo estuvimos viendo juntos el

¹² La longitud de péndulo necesaria para conseguir altos niveles de aislamiento por debajo de ese límite la hace inviable técnicamente.

¹³ Para medir una elongación de en una barra de 1 m he de ser capaz de medir diferencias de longitud de 10^{-21} m. En cambio, si la barra mide 1 km he de medir diferencias de longitud de 10^{-18} m.

lanzamiento de LISA Pathfinder¹⁴, y no lo vimos como un hincha del Madrid viendo un partido del Barcelona esperando que pierda, sino que todos nos alegramos de ver que había sido un éxito. Estamos ilusionados con la posibilidad de colaborar y esperamos poder tener los dos detectores operativos en la década de 2030.

Miguel: Creo que con esto podemos dar por terminada la sección de entrevista. La siguiente parte de nuestro encuentro hoy tendrá el formato de una tertulia. Previamente se ha comentado que hay ciertos temas relacionados con ciencia y tecnología que pueden llegar a afectar sustancialmente a la sociedad civil. Como sabréis, el número trata sobre ciencia, tecnología y futuro. Los temas elegidos pueden ser vistos como tópicos, han tenido representaciones varias en ciencia ficción y muchas veces se ha querido especular sobre cómo será la sociedad futura si se llegan a dar esos avances. Los temas para tratar van a ser la computación cuántica, de la que ya se han dado algunas pinceladas durante la entrevista, así como también ciertas aplicaciones de los avances en ingeniería genética. Quiero, antes de empezar, hacer una defensa de los tópicos en el campo de la ciencia, y es que no hay ninguna razón para llegar a pensar que algo que se haya tratado múltiples veces deja de ser interesante para la sociedad civil. De hecho, la aparición en producciones culturales de estas temáticas, ya sean vistas como una distopía o como un elemento más de un futuro lejano o próximo ya nos indica la preocupación o interés que hay por ciertas preguntas. Desde un punto de vista más general trataremos estos temas, pudiendo ustedes dar su opinión. De todos modos, animo, sobre todo, ya que hay abundante bibliografía sobre el tema, a desmitificar todas aquellas cosas que se hayan podido decir acerca de los mismos. Vuestra opinión es especialmente interesante ya que esta puede corregir o dar razón a ciertas creencias que están en el imaginario colectivo. Sin más dilación, el que quiera de vosotros puede comenzar con el tema de la computación cuántica. La fórmula de la pregunta para iniciar vuestro discurso va a ser en ambos casos la misma: A un nivel general ¿Cómo puede llegar a afectar la computación cuántica a un nivel social? ¿Cuál es realmente su potencial transformador?

Andreu: Si os parece, seré yo el que comience y luego vamos ya intercambiando opiniones. La computación cuántica tiene un poder transformador superlativo, aunque no

¹⁴ Satélite desarrollado por la ESA y lanzado en 2015 para validar tecnología crítica para el desarrollo de LISA.

siempre en el sentido en el que nos imaginamos. Vosotros dos no sabéis, por vuestra juventud, qué es vivir sin internet. Yo sí que viví en una época en la que el internet ni siquiera existía, y he podido ver cómo se ha transformado la sociedad con el advenimiento de la globalización de las comunicaciones. El hecho de que existieran teléfonos es prácticamente irrisorio, evidentemente era importantísimo, pero el salto cualitativo en las comunicaciones desde la única posibilidad de comunicarse por teléfono a poder mandar imágenes, películas, videos, o cuando se hacen análisis de datos poder enviar unos cálculos a un centro de datos para que dé resultados en menos de un segundo ya es una transformación absolutamente superlativa en la capacidad comunicativa, así como también en la eficiencia científica. Sí que recordaréis como en un tiempo récord se pudo gestar una revolución como la primavera árabe gracias a internet. Todo esto que he mencionado está basado en un tipo de hardware que tiene una gran cantidad de limitaciones que se nota, sobre todo, en el volumen de cálculos que el ordenador puede hacer por segundo. Cuando tienes estas limitaciones, tal como indica la palabra, hay una serie de cosas que no puedes hacer. A mí me da la sensación de que cuando se habla de computación cuántica la gente se imagina simplemente ordenadores mucho más rápidos y potentes, como si solamente pudiera servirnos para ver películas en nuestro ordenador en 4K en vez de en HD o para poder descargar un fichero de música en un segundo en lugar de en media hora. El potencial, desde luego, va mucho más allá. El hecho es que tener un internet que esté apoyado en una serie de hardwares que funcionen con computación cuántica nos permite, gracias al volumen de cálculos que se pueden llevar a cabo, hacer cosas que van al límite de lo que hoy en día se considera ciencia ficción. Por ejemplo, un entorno, completamente virtual, inmersivo, como el que aparece en la película *Mátrix*, hoy en día es completamente inviable. Visualmente no podemos construir un sistema que no te permita distinguir con tus ojos la realidad de la realidad virtual. Podemos ponernos un casco de Oculus, puedes hacer cosas espectaculares, pero es evidente que estás en un entorno virtual. Pongamos el caso de este año en el que nos hemos quedado sin poder celebrar la Navidad a causa de la Covid-19 y no nos hemos podido encontrar con casi nadie de nuestras familias, sobre todo cuando se vive en distintas ciudades. El día en que podamos, desde nuestras casas, ponernos un casco y estar literalmente comiendo y hablando con nuestros padres y nuestros primos de la misma forma que estamos hablando ahora entre nosotros es posible mediante computación cuántica. Creo que este hecho, que es solo un ejemplo, ya tiene un potencial transformador de la sociedad increíble, puesto que la forma de relacionarnos de forma no-presencial

sería absolutamente distinta, justo en un momento, además, en el que por suerte o por desgracia nos vemos forzados a tratar con muchísimas personas mediante redes sociales. Vayamos un poco más allá, una vez podemos tener conversaciones gracias a esa cantidad inhumana de cálculos a los que puede llegar la computación cuántica, se hace completamente irrelevante dónde vives y dónde trabajas. Podríamos estar viviendo donde nos diera la gana y, esta idea que se empieza a hacer real hoy en día de teletrabajo se hace mucho más sencillo y trae muchos menos problemas una vez que tienes tecnología cuántica implantada a nivel civil. Esto es lo que estoy completamente seguro de que se podrá hacer, luego, evidentemente, está todo aquello que ni siquiera nos imaginamos. Podríamos especular, sin duda, y en este caso quizás nos quedaríamos cortos especulando, pero estos ejemplos seguro que podrán ser reales.

Álvaro: No puedo poner ninguna objeción a lo que ha dicho Andreu. Estamos llegando a la era en la que el silicio está empezando a alcanzar su límite, y todo está basado en él...

Miguel: Disculpa, para nuestros lectores, ¿puedes hacer una breve explicación de la importancia del Silicio en todo lo que estamos hablando?

Álvaro: Por supuesto. Todos los chips (o circuitos integrados) que utilizamos están compuestos en su mayor parte de silicio dopado, y con el avance de la tecnología se han ido construyendo cada vez mejor, mejorando su capacidad de computación. Pero en esta mejora está llegando a un punto de estancamiento. De hecho, el creador de Intel formuló, en los años 60, la denominada Ley de Moore, que predecía que el número de transistores en un chip se duplicaría cada dos años. Esta velocidad de crecimiento, que se ha mantenido durante más de medio siglo, ha empezado a ralentizarse en los últimos años. En otras palabras, esta década puede marcar el principio del fin de las tecnologías de computación basadas en el silicio. Este tipo de reducción de rendimiento está presente en la mayoría de las tecnologías emergentes. Un ejemplo que me explicaron en una clase y que me permito reproducir es el de las maquinillas de afeitar. Simplificando un poco la situación, parece que en las últimas décadas hemos visto una mejora en el rendimiento de las maquinillas con el aumento del número de cuchillas por maquinilla. De hecho, todavía recuerdo cuando apareció la maquinilla de tres cuchillas, que era lo último del mercado, cuando ahora eso parece lo mínimo. En cualquier caso, esas mejoras incrementales tienen

un límite, dado que la mejora de rendimiento por cada cuchilla añadida sigue una ley de rendimientos decrecientes (el cambio de una a dos cuchillas es mucho mayor que el cambio de cinco a seis). Así pues, llega un momento en el que es muy difícil o caro conseguir mejorar el rendimiento mediante mejoras incrementales de la misma tecnología. Por otro lado, están las tecnologías disruptivas, que están basadas en principios distintos. En el caso de la tecnología de afeitado, la aparición de la maquinilla eléctrica sería un ejemplo de tecnología disruptiva. Para saber cuándo es necesaria la aparición de una tecnología disruptiva (que no siempre aparece), es útil ver la curva coste¹⁵-rendimiento de la tecnología, como el ejemplo en **Error! Reference source not found.** Toda tecnología tiene una fase inicial en la que el incremento de rendimiento no tiene repercusión en el coste. A medida que intentamos mantener mayores niveles de rendimiento mediante mejoras incrementales, el coste de dicho aumento incrementa (la derivada de la curva incrementa), hasta que se alcanza el punto de saturación en el que la tecnología no da más de sí (punto β para la tecnología A en **Error! Reference source not found.**). En cambio, quizá hay una tecnología que te permite aumentar ese rendimiento, pero cuyo coste inicial es mayor (tecnología B). Volviendo al silicio, estamos empezando a entrar en la zona en la que la pendiente de la curva está empezando a aumentar seriamente. Por lo que sé, hoy en día ya se está invirtiendo una gran cantidad de recursos para conseguir aumentos de rendimiento cada vez menores. No nos equivoquemos, al silicio le quedan todavía muchos años, pero, si no empezamos a desarrollar nuevas tecnologías de computación, corremos el riesgo de encontrarnos en un futuro en un punto de estancamiento. También es importante entender que la aparición de una nueva tecnología, como la computación cuántica, no tiene por qué desbancar completamente la tecnología anterior (maquinillas manuales y eléctricas llevan conviviendo muchos años). Un ejemplo de lo que este estancamiento puede significar está en el desarrollo de los móviles. Muchos de nosotros recordamos los móviles anteriores a los *smartphones* tales como el Nokia 3310, que salió en el 2000. Es usual pensar que el progreso va a continuar igual e imaginar que en 20 años veremos el iPhone 12 como vemos ahora un Nokia 3310 (y podemos discutir si esa ilusión de que lo bueno perdura también la tenemos en otros ámbitos de la vida). No obstante, sin la aparición de una nueva tecnología disruptiva es muy difícil que llegemos a esa situación¹⁶. Llegar a un nivel de estancamiento de las

¹⁵ El coste no tiene por qué ser económico, puede ser de tiempo de producción u otros factores de interés.

¹⁶ El iPhone 3 salió a la venta en 2008, sólo ocho años después que el Nokia 3310.

tecnologías de computación tendría una grandísima repercusión, pues ralentizaría y limitaría el crecimiento o progreso tecnológico y científico de nuestra sociedad. Por ello, es imperativo buscar alternativas, nuevas soluciones. A título personal, creo que la computación cuántica es ese siguiente nivel que nos va a permitir mantener el nivel de crecimiento. Ahora bien, ¿cuán lejos estamos de una verdadera implementación de computación cuántica? o ¿cuál es la mejor forma de implementarla? son preguntas complicadas de responder. Hay muchas dudas al respecto. Mi opinión, supongo que también porque es la que me es más conocida, es que la más prometedora es la computación cuántica fotónica, pero estamos lejos...

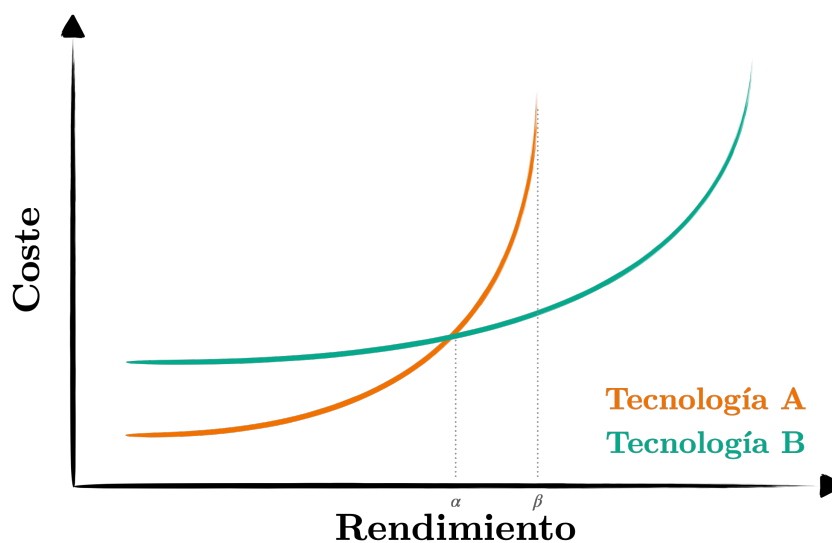


Ilustración 2: Ejemplo de la ley de rendimientos decrecientes y la necesidad de tecnologías disruptivas.

Andreu: Creo que también vale la pena que digamos las cosas malas. Hemos hablado de las ventajas, pero, para cualquier tecnología, hemos de saber que la tecnología no es moral. Como hemos comentado antes, el problema de las distopías es que a veces tienen sentido, ya que la tecnología se puede usar bien o mal. Podemos crear una planta de fusión nuclear o una bomba de fisión nuclear y destruir una ciudad. He expuesto antes cuales son los motivos por los que creo que la computación cuántica tiene el potencial de transformar la sociedad hacia bien si la sabemos utilizar, de hecho, diré una más que es quizás la más importante para mí, y es que mediante computación cuántica ya nadie podría dar argumentos sólidos para no aceptar que se implantara una democracia directa y real ya a nivel mundial. Más allá de eso, la misma potencia de cálculo, que te permite crear un entorno virtual inmersivo para que cualquier persona del mundo pueda

encontrarse en un café virtual se puede usar también para hackear cuentas bancarias, para gestionar volúmenes de datos descomunalmente grandes como, por ejemplo, los que hacen referencia a nuestros hábitos de navegación por internet. Por dónde te mueves, qué te gusta, qué es lo que compras... La recopilación enorme de datos que las empresas publicitarias ya están haciendo para hacer una campaña de marketing puede ser mucho más exagerado si se hace mediante computación cuántica, la forma de dirigirse a nuestros gustos sería tan certera y personalizada, que, si nos asusta ahora, es normal que pueda preocuparnos cómo será mediante esta nueva tecnología. En definitiva, si el desarrollo de esta tecnología cae en manos de una universidad pública que hace la investigación con un método ético y con la motivación de hacer mejor a la sociedad, el resultado puede ser fantástico. Si la tecnología de computación cuántica cae –exclusivamente– en manos de *Google, Facebook, Amazon* y demás, entonces a mí me entra el pánico.

Álvaro: A mi parecer, la publicidad debe preocuparnos relativamente. Es decir, comparto lo que has dicho, pero no me preocupa especialmente la capacidad de una empresa de dirigir mi consumo para su beneficio económico; me preocupan más otro tipo de campañas. Creo que todos estamos viendo a personajes que están ganando elecciones políticas y cuya campaña está fuertemente basada en la propaganda personalizada y las noticias de dudosa veracidad. Esto se ve en la cantidad de dinero invertido en las campañas digitales. La pregunta que me hago es, si estuviésemos todos con Nokia 3310, ¿esta gente habría llegado donde ha llegado? Y no quiero culpar a los que desarrollan las tecnologías; la tecnología hay que saber usarla. Yo mismo cuando pienso en mi trabajo siempre creo estar contribuyendo al bien común, pero quizá el día de mañana alguien encuentra la forma de usar parte de mi trabajo para algo que yo no considero correcto. Al final, que muchas cosas tienen un lado bueno y otro lado malo ya lo sabemos, la ciencia no puede avanzar con miedo a aquellos que quieren usar la tecnología para fines inapropiados, pese a que sí que se debe hacer lo posible por evitar esas situaciones.

Miguel: Supongo que al final la alternativa simplemente es que esa tecnología no se desarrolle y, por lo que decís, parece que ya es tarde para eso.

Andreu: Una vez tienes al genio fuera de la lámpara ya no hay quien lo vuelva a meter dentro. En este sentido podemos asegurar que el genio está fuera y lo único que podemos esperar es que se desarrolle de una forma ética. Por suerte o por desgracia es una cuestión política, de legisladores, van a ser ellos los que tomen todas esas decisiones sobre cómo regular lo que ahora estamos poniendo sobre la mesa. Esto no es un juicio de

valor, sino más bien de hecho, sé que las decisiones en este ámbito suelen tomarse con un asesoramiento insuficiente. Deberían asesorarse muchísimo más en todo lo referente a ciencia y tecnología...

Álvaro: Y dar más dinero, aunque supongo que al final son causa y efecto, si se asesoraran más darían más dinero.

Miguel: Si os parece, pasaremos al último punto de la entrevista. El segundo tema general que hemos elegido es el de CRISPR (en inglés Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats, en español repeticiones palindrómicas cortas agrupadas y regularmente interespaciadas). Repito que la pregunta es del mismo formato: de cara a nuestro número, que trata de ciencia, tecnología y futuro, ¿Qué podéis aventurar, opinar, comentar o incluso dudar del poder transformador de este proyecto?

Álvaro: Bien, quizás ya lo saben los lectores, pero, para asegurarse recordaré que la tecnología CRISPR es una herramienta que permite la edición genética. Este no es ni mucho menos mi campo, pero la idea que tengo es que esta tecnología permite seleccionar secuencias específicas del ADN y sustituirlas por una secuencia sintética creada en un laboratorio. Supongo que la conclusión será muy similar formalmente a la que hemos extraído respecto a la computación cuántica. Sin embargo, debo admitir que en este tipo de investigaciones en concreto sí que me cuesta mucho menos ver el lado negro y los riesgos que acarrea. Tengo muchas menos dudas de que se va a incurrir en prácticas éticamente reprobables usando esta tecnología que en el caso de la computación cuántica. En un principio, es fácil ver la cara amable de esta tecnología y sus aplicaciones: cura de enfermedades, mejora de la salud, mejora de la capacidad intelectual... ¿La razón de mi miedo respecto al uso de esta tecnología? Creo que estamos ante un caso en el que hemos desarrollado una tecnología increíblemente potente pero que carecemos del conocimiento suficiente para poder gestionarla. Dejando a un lado la parte ética, tengo la impresión de que el proceso evolutivo que nos ha permitido llegar a ser quien somos hoy en día ha sido un proceso muy lento, en el que la selección natural ha actuado como mecanismo de “corrección”. Ahora tenemos la capacidad de cambiar rápidamente, pero considero que, en muchos casos, no somos todavía capaces de establecer una relación causal con suficiente conocimiento como para poder llegar a determinar qué carácter es beneficioso potenciar y cuáles serán sus consecuencias a largo plazo. Evidentemente, los defensores de esta tecnología dirán que la evolución ha sido como ir dando palos de ciego, confiando en la ocurrencia de mutaciones aleatorias, y que ahora tenemos la posibilidad de seguir

un camino claro hacia una mejora evolutiva. El problema es que no tengo claro que sepamos el camino a seguir. Además, no hay que olvidar otros aspectos como el acceso desigual a estas tecnologías y las implicaciones que podría conllevar. Por ejemplo, si hay un problema de desigualdad económica podemos imaginar fácilmente como una distopía el hecho de que esa desigualdad económica supusiera al mismo tiempo una desigualdad genética.

Andreu: A parte, en esta lista de tópicos podemos añadir otra razón por la que es normal que nos asuste un discurso demasiado vehemente en favor de CRISPR, y es que el vocabulario que se usa para referirse a ese humano hecho lo más genéticamente perfecto que se puede nos recuerda a cosas del pasado que no nos gustan nada. El darwinismo social ya fue una realidad en un momento dado y el imaginario colectivo lo tiene aún como el momento más oscuro de todos los tiempos.

Miguel: Quiero recordar, justamente, uno de los problemas que muchos de los más jóvenes conocerán, porque se suele poner de ejemplo en los manuales de biología de la escuela cuando se habla de genética. La anemia falciforme es una enfermedad que te hace inmune a la malaria; lo que en principio es una enfermedad, está siendo uno de los caracteres predominantes en los países donde existe malaria. Se trata de una enfermedad genética que en un principio nadie desearía para sus hijos, es decir, si vas a modificar el ADN de tu hijo antes de nacer por tal de evitarle posibles desgracias, jamás elegirías que tuviese este tipo de anemia, en cambio, si sabes que vas a vivir cerca de la malaria, tendría sentido que prefirieras que tu hijo tuviese esa anomalía en los glóbulos rojos. Lo que quiero poner sobre la mesa es la evidente arbitrariedad que poseen los caracteres elegidos para la evolución, teniendo en cuenta que lo único que le importa a la evolución es la supervivencia de la especie. Me da la impresión de que el problema no es que no hayamos progresado aun lo suficiente como para saber que caracteres debemos potenciar, sino que el azar y el entorno juegan un papel tan importante que no nos permitirán saber jamás cual es el carácter que debe ser potenciado.

Álvaro: Para mí hay otro aspecto importante, relacionado con lo que mencionas. Hasta hace pocos años, los tratamientos que se hacían a los pacientes con enfermedades eran tratamientos que afectaban exclusivamente al paciente. Este no es el caso con la tecnología CRISPR ya que, al modificar el código genético de un paciente, esa modificación puede ser traspasada a sus descendientes. Esto crea un nuevo paradigma en el que las consecuencias de mala praxis médica pueden ser impredecibles, y creo que aquí

dejaré que el lector haga volar su imaginación, lo que no será difícil pues es un tema recurrente en la literatura y el cine. No me cabe duda de que va a haber un boom en el uso de esta tecnología en los próximos años (de hecho, ya lo hay), porque como ha dicho Andreu, cuando el genio está fuera de la lámpara... Así que lo que espero es que seamos muy cuidadosos a la hora de determinar qué factores genéticos son “modificables” por ser objetivamente dañinos, y cómo se deben modificar.

Andreu: No es que quiera hacer de abogado del diablo, lo parecerá, pero lo que realmente sucede es que, lo que habéis dicho lo comparto, y al mismo tiempo las consecuencias negativas que puede tener CRISPR no creo que sean muchas más de las que ya habéis dicho. Tengo una parte optimista que, en este caso se puede considerar casi aventurera, por eso me ha interesado siempre este tema. Todo lo que habéis dicho puede llegar a hacerse cierto, pero también veo que puede llegar a tener cosas muy buenas. No me parece imposible encontrar una serie de caracteres que sean objetivamente mejorables en la raza humana, y que es deseable mejorarlos en general. Evidentemente, aquí, jamás estaría pensando en cuestiones anatómicas o, mejor dicho, superficiales. Si nos ponemos radicales o, como he dicho antes, aventureros, debo aceptar que un aumento razonable de inteligencia para toda la raza humana no me parece mal si se puede hacer de forma controlada. Estoy hablando desde el supuesto de que tengamos un mapeado del genoma humano tan específico que nos sea imposible dudar de que tocando una tecla estaremos produciendo un cambio en concreto, de no tener eso es aberrante llegar a hacer lo que estoy diciendo, pero sabemos que en un momento u otro ese mapeado existirá. Me quedaré con el ejemplo de la inteligencia, pero seguro que reunidos todos los especialistas logran tener un pack de caracteres que objetivamente nos son deseables o incluso necesarios. Evidentemente, lo que comentaba Álvaro es totalmente cierto, pero nos coloca un poco más en el terreno especulativo esta conversación, y es que en ningún caso las mejoras genéticas pueden llegar a ser un producto para vender, lo cual coloca como condición necesaria una serie de cambios políticos que, por lo menos, nos alejan mucho de la situación actual. Son cambios que no se pueden hacer si un gobierno no puede garantizar que ese cambio, mediante presupuesto público, se otorgará a toda la población. Evidentemente, todo lo que sean malformaciones o discapacidades, con todo el respeto a la gente que las padece y la admiración por los retos a los que se enfrentan cada día, me parece que es deseable que nadie sufra estas situaciones si son evitables a priori. Está bien que nos lo preguntemos nosotros tres aquí, porque echamos de menos a un biólogo o a un

ingeniero genético, pero para un tema como estos que estamos tratando, cuando el problema nos lo encontremos de cara, y eso es algo que va a suceder porque al genio ya lo hemos sacado de la lámpara, ante el reto que nos veremos no podremos no posicionarnos ninguno de nosotros. Debemos aceptar la interdisciplinariedad de los problemas científicos del futuro y necesitaremos filósofos, biólogos, ingenieros, médicos etc. Todos deberemos posicionarnos ante temas así, digo mi opinión, pero delimitar la línea que separa esos cambios objetivamente buenos de aquellos que pueden llegar a salir mal a la larga es algo que no puede llegar a decidirse desde una sola disciplina.

Miguel: Me parece que esa parte aventurera de la que presumes está callándose por prudencia algunas de las esperanzas que tienes en CRISPR.

Andreu: La verdad es que, si puedo soñar en voz alta, antes que aumentar la inteligencia creo que sería un sueño poder erradicar de la mente humana todas aquellas cosas que genéticamente nos llevan a la avaricia. Me miráis sorprendidos, pero, dejad que me quite por un momento el traje de científico y que exprese un deseo, imaginaos la cantidad de problemas que nos afectan a nivel global que podríamos resolver en una sola generación. De todos modos, lo que más ilusión me haría sería ver que no nos centramos en usar CRISPR únicamente sobre humanos. Las mejores aplicaciones de esta tecnología están fuera de nosotros mismos si logramos una buena manipulación genética. Si, por ejemplo, pudiéramos manipular genéticamente una bacteria para hacerla capaz de degradar el plástico lograríamos revertir un incalculable daño que ya le hemos hecho al planeta. Tiene riesgos, sí, pero el beneficio que podemos obtener es limpiar nuestros océanos, creo que es un precio que merece la pena plantearse.

Miguel: ¿Algo que Álvaro quiera decir ya para acabar?

Álvaro: Sí, simplemente hay que comentar que, tristemente, la mejora de la salud de la especie humana puede acarrear ciertos problemas como la sobrepoblación. Si pienso en la mejora de nuestra especie, creo que un factor importante sería mejorar nuestra eficiencia energética. Si conseguimos minimizar el consumo de recursos por parte tanto de los organismos de los que dependemos como de nosotros mismos, conseguiremos mejorar la situación actual.

Miguel: Muchas gracias a los dos por haber aceptado la invitación, ha sido un placer teneros aquí.