Historias de Matemáticas

¡La luz se curva!

Light bends!

Mª Carmen Escribano Ródenas, José Rojo Montijano, Juan Tarrés Freixenet,

y Susana Victoria Rodríguez

Revista de Investigación

G.I.E Pensamient Matemátic MAIC

Volumen IX, Número 1, pp. 073–094, ISSN 2174-0410
Recepción: 1 Nov'18; Aceptación: 15 Feb'19

1 de abril de 2019

Resumen

Hace ahora cien años que Eddington constató que la gravedad, tal como predecía Einstein, afecta a las trayectorias luminosas. Este cambio de paradigma científico se refleja en la historia de la "ciencia de la visión" que acompaña en gran medida al desarrollo de la pintura.

Palabras Clave: Propagación de la luz, geometría proyectiva, espacio, tiempo, espacio-tiempo, relatividad general.

Abstract

We live today the centenary of Eddington contribution to verify that gravity acts on light trajectories. This change of paradigm is reflected in the circle of ideas that evolves in the "science of vision" that underlies the history of painting.

Keywords: Light propagation, Projective Geometry, Space, Time, Spacetime, General Relativity.

1. Introducción

La ciencia de la luz es una de las claves para entender mejor nuestro universo.

La comprensión de nuestro mundo ha evolucionado de la mano del estudio de preguntas que a menudo parecen muy sencillas de formular. Nos proponemos en este artículo considerar una de ellas: ¿cómo se propaga la luz? ¿lo hace instantáneamente?

Pretendemos destacar la historia intermedia entre estas dos típicas respuestas:

a) la pre-relativista: "la luz se propaga (inmediatamente) en línea recta (en el espacio)" (*Fig.1*);

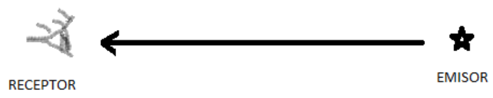


Figura 1

b) la relativista: "un rayo de luz avanza (con velocidad *c*) siguiendo una línea geodésica (del espacio-tiempo)".

Para poder llegar a esta segunda respuesta desde la anterior, se fue incorporando, durante siglos, paso a paso, toda una trama de ideas que queremos sugerir siguiendo en paralelo, a grandes rasgos, la historia de la pintura. El artículo contiene tres epígrafes:

- "Hacia la geometría proyectiva" pone el foco sobre el nacimiento, el manejo y la comprensión madura de la perspectiva lineal, desde los albores del arte egipcio hasta la época de Newton en el siglo XVIII.

- "Los nuevos conceptos de espacio en el siglo XIX" sugiere la consideración del espacio, el tiempo y el movimiento situándolos, en lugar de "en estantes separados", en un único marco: la geometría del espacio-tiempo.

- "Arthur Stanley Eddington" rinde homenaje, 100 años después, a la figura que organizó la expedición que comprobó una de las predicciones centrales de la relatividad general de Einstein: ¡la luz se curva!

2. "Hacia la geometría proyectiva"

La representación del espacio ha ido evolucionando lentamente. En los siglos XV y XVI, con el estudio y perfeccionamiento de la perspectiva, se alcanzó un gran nivel, tanto en el espacio observado y plasmado en un lienzo como en las obras diseñadas por arquitectos e ingenieros y llevadas a planos que permiten su fiel construcción.

Leonardo Da Vinci, en su *Tratado de la Pintura*, dice:

> *La pintura se fundamenta en la perspectiva, que no consiste sino en el exacto conocimiento de los mecanismos de la visión.*

Se trata de una perspectiva lineal (o cónica), desde un único punto de vista, y basada en el fenómeno de la visión ciclópea (con un solo ojo), sin considerar el efecto de la lente del cristalino.

De forma similar a cómo cada punto alcanzado por la visión se plasma en el plano de la retina, cada punto del espacio tridimensional queda representado en un punto del plano del lienzo, interpuesto entre el ojo y el espacio a representar: se trata del punto de intersección del lienzo con la recta que une el ojo del pintor con el punto representado (*Fig.2*).

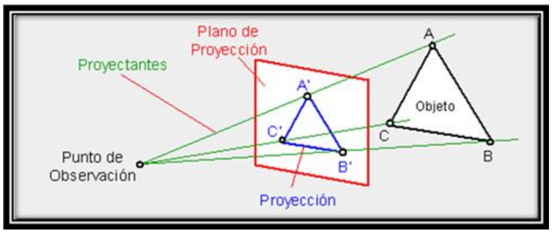


Figura 2

Esta aplicación matemática lleva cada punto del espacio tridimensional a un punto del plano mediante la composición de dos sencillas operaciones geométricas, una proyección y una sección.

Tenemos en el mundo de la pintura una perfecta muestra de la evolución de la importancia y enfoque dado en las distintas épocas a la representación del espacio y los objetos observados o imaginados por el artista. Daremos un rápido repaso valiéndonos de unas pocas imágenes.

En la pintura egipcia, el artista plasma los objetos en sus obras eligiendo los contornos que mejor representan a cada uno de ellos (ojos y hombros de frente, cabeza, piernas y brazos de perfil…) En muchas ocasiones, el tamaño de las figuras humanas responde a su jerarquía (*Fig. 3*). El ocultamiento parcial de una figura junto a otra que aparece completa (“traslapo”) da idea de planos superpuestos y hablan del concepto de distancia (*Fig. 4*)

Figura 3

Figura 4

En la Grecia clásica aparece una perspectiva rudimentaria (*Fig. 5 y 6*). Los estudios de Euclides (S.IV-III a.C.) plasmados en su tratado “Óptica” detallan el fenómeno de la visión, y su conocimiento podría haber permitido representar la tri-dimensionalidad en la pintura de este periodo. Esto no fue así en general, aunque Vitruvio (siglo I a.C.) en su obra *“De Architectura”* cita el interés de los griegos en la representación del espacio llevada a cabo en decorados de obras puestas en escena en el Teatro de Atenas; la base para conseguirlo era una perspectiva lineal.

Figura 5

Figura 6

Un ejemplo de la representación del espacio natural en Roma son las pinturas murales de Pompeya. En lo que se denomina "efecto ventana", el muro se abre dando paso a la visión de paisajes, en muchas ocasiones arquitectónicos (*Fig.7*). Es patente la aparición del sentido de perspectiva.

Aparecen también ejemplos de perspectiva aérea (representación de la profundidad por gradación y tono del color y por la nitidez de las figuras) (*Fig.8*)

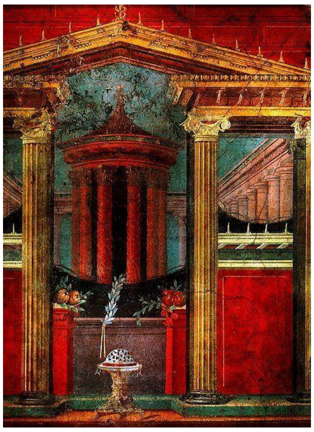


Figura 7

Figura 8

En la Edad Media se retrocede a una representación plana, dando importancia a la simbología y las figuras. Hasta el final de este periodo, no existe interés en captar el espacio ni hay sentido de profundidad en sus obras. Algunos objetos se muestran desde un punto de vista diferente al resto (desde el que mejor se aprecia su visión) y las dimensiones no guardan coherencia (*Fig. 9 y 10*).

Figura 9

Figura 10

La perspectiva es de tipo jerárquico: las figuras de mayor importancia son las de mayor tamaño, no importa el lugar que ocupen espacialmente. Como muestra, la obra de Lorenzetti (*Fig.11*) o el cuadro de Duccio de la *Fig.12*, ambos de la primera mitad del siglo XIV. En ésta última vuelve a utilizarse el traslapo, apareciendo ya cierto interés por plasmar el ambiente tri-dimensional.

Figura 11

Figura 12

En los siglos XIII y XIV se pasa de la frontalidad a la oblicuidad, buscando representar lo captado por la visión, aunque aún sin tener la perfección alcanzada en la perspectiva renacentista, que es la evolución de lo conseguido progresivamente en estos dos siglos anteriores.

Giotto (1267-1337), pintor, escultor y arquitecto nacido cerca de Florencia, fue uno de los principales precursores del movimiento renacentista italiano. Dota de volumen y humanismo a las figuras planas de la pintura medieval, aparecen posiciones oblicuas, y sumerge en muchas ocasiones las escenas en la arquitectura, buscando una perspectiva natural (de la visión) (*Fig.13, 14 y 15*)

Ffigura 13

Figura 14

Figura 15

En el siglo XV se persigue una perfecta imitación del espacio, la naturaleza y las figuras. La maestría lograda en el conocimiento y dominio de la perspectiva nos dejan obras como *"La Escuela de Atenas"* y *"Los desposorios de la Virgen"* de Rafael (*Fig. 16 y 17*), o la *"Entrega de las llaves a San Pedro"* de Perugino (*Fig.18*)

Figura 16

Figura 17

Figura 18

El ambiente cultural humanista del Renacimiento contribuye al estudio de la geometría, óptica, arquitectura, anatomía, astronomía…y gran parte de estos conocimientos influyen en la perspectiva y su consideración como ciencia de la representación: un lenguaje gráfico fundado en las leyes de la geometría.

Los primeros pintores renacentistas dieron rigor al manejo de la perspectiva por medio de la experimentación. Brunelleschi (1377-1446) utilizaba un espejo y una mirilla que perforaba el cuadro para comprobar si la perspectiva dibujada encajaba perfectamente en la imagen real del espejo (*Fig.19*). Otro de sus experimentos comprobaba cómo obtener una vista de ambas caras del Palacio de la Signoria de Florencia, sin verse ninguna de ellas frontalmente (fugando a dos puntos) (*Fig. 20*): se plantea la situación de los objetos en el cuadro antes de su representación.

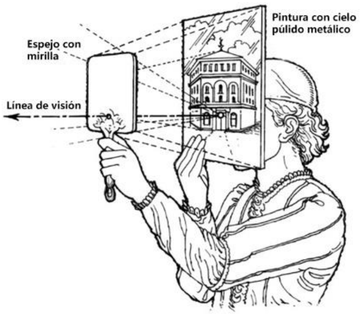


Figura 19

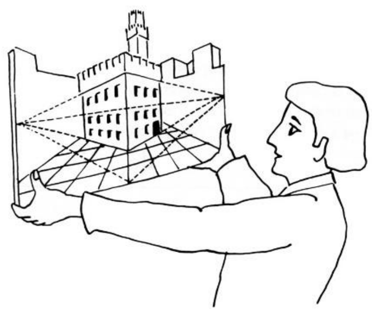


Figura 20

La primera perspectiva sistemática que incorpora reglas que rigen las distancias y las líneas de fuga aparecen con Brunelleschi en la pintura, antes de que Alberti (en su tratado "*Della Pintura*", 1453) la estudie matemáticamente. En el siglo XVI, Alberto Durero lleva a cabo estudios teórico-prácticos en sus *"Libros de la medida"* en los que aborda la representación visual de forma científica.

La utilización en el Renacimiento de la perspectiva cónica para la representación del espacio, hizo que León Baptista Alberti se planteara cuestiones como éstas: ¿cuál es la relación entre dos secciones de la misma figura? ¿cuáles son las propiedades comunes a dos secciones distintas?

Las geometrías existentes no explicaban el comportamiento de esta aplicación matemática. Se crea una nueva Geometría, la Geometría proyectiva (nombre alusivo a sus orígenes). Esta nueva teoría se inició con Desargues (1591-1661) y Pascal (1623-1662)

En el contexto de las matemáticas, tenemos distintas geometrías definiendo en cada una de ellas cuáles son sus objetos, cuáles los movimientos que permiten identificar dichos objetos, y cuáles son sus "propiedades geométricas", las que se conservan al aplicar los movimientos.

Mostramos un cuadro de las tres geometrías lineales (con rectas como principales elementos) ordenadas de más a menos general:

Tabla 1. Geometrías lineales anteriores a la Geometría Proyectiva

Geometría	Gª AFÍN	Gª EQUIFORME	Gª EUCLÍDEA
Movimientos	Movimientos afines	Semejanzas (isometrías+homotecias)	Isometrías
Propiedades geométricas	Colineaciones Paralelismo Razón simple	Colineaciones Paralelismo Razón simple Ángulos	Colineaciones Paralelismo Razón simple Ángulos Distancias Áreas Volúmenes

Que cierto movimiento sea colineación significa que la imagen de toda recta es una recta. La razón simple entre tres puntos alineados A, B, C es el número k que cumple

$$\overrightarrow{AC} = k\,\overrightarrow{AB}$$

y escribimos $[A, B, C] = k$. La conservación de la razón simple significa que las imágenes de los puntos A', B', C' cumplen:

$$[A, B, C] = [A', B', C']$$

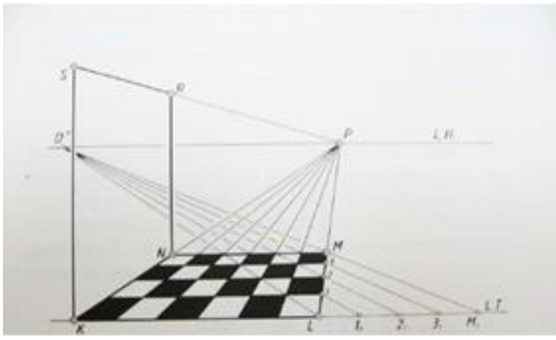


Figura 21

Al hacer un dibujo en perspectiva lineal, por ejemplo, de un embaldosado cuadrado (*Fig.21*), las baldosas no las vemos cuadradas, sino como cuadriláteros; haces de rectas paralelas convergen en un único punto de fuga ("un punto del infinito"); no se conservan ángulos ni distancias; pero sí son colineaciones.

La aplicación matemática que se precisa es una "transformación proyectiva". Éste será el germen de otra nueva geometría, la proyectiva, más general que las enumeradas en el cuadro anterior.

Así, la búsqueda de una representación fiel del espacio sobre un plano mediante la técnica de la perspectiva cónica o lineal, da lugar al nacimiento de un espacio matemático "nuevo", el proyectivo, más amplio que el "espacio ordinario", al que incluye, incorporando a los viejos "puntos ordinarios", y en plano de igualdad con ellos, a los "puntos del infinito". Nace también a una nueva geometría, la de las transformaciones proyectivas (sus colineaciones), repleta de propiedades geométricas y topológicas, desarrollada en los siglos XIX y XX, en los que se llega a una más plena comprensión de este modelo proyectivo.

3. "Los nuevos conceptos del espacio en el siglo XIX"

Cuando Lewis Carroll publicó su "*Alicia en el País de las Maravillas*" junto con "*Al otro lado del Espejo*", abrió a sus lectores un mundo de fantasía y ensueños al situar sus personajes en un espacio diferente al que vivimos, un espacio en el que cambian las leyes y las relaciones entre los objetos que lo componen: Por ejemplo, Alicia cambia su tamaño según el lugar en el que se encuentra y al cruzar la frontera de un espejo queda situada en un espacio en el que "todo va al revés". Estos y otros ejemplos nos hacen pensar en la posibilidad de que existan "otros mundos", inmersos en "otros espacios".

Durante el siglo XIX, la geometría sufre una gran revolución. Aparecen nuevas ideas sobre el espacio que van a revolucionar los conceptos básicos de la geometría. Vamos a destacar una de ellas, que dio lugar a una nueva concepción del espacio. Son las *Geometrías no euclideas* introducidas de manera independiente por Janos Bolyai en 1828 y Nikolai Ivanovich Lovachevski en 1832, a propósito del análisis del postulado V de los "*Elementos*" de Euclides.

Este descubrimiento obligó a replantearse el concepto de espacio, lo que originó la aparición de nuevos conceptos en geometría que fueron aprovechados por muchos científicos de la época así como en la tradición popular, que imaginó "otros mundos", intentando encajar las nuevas ideas en el ambiente de aquellas gentes.

En el siglo XVII, Leibniz afirmaba que el espacio existe solamente una vez que se han determinado cuáles son sus elementos y se han establecido ciertas relaciones entre ellos. Esta afirmación abría la posibilidad de que se pudieran considerar otros tipos de espacios además del espacio físico, en contraposición a la idea de Newton sobre la existencia de un espacio único absoluto en el que se desarrollaba una única geometría: la que propuso Euclides en sus elementos.

Esta idea de Newton era sustentada todavía por Kant en la segunda mitad del siglo XVIII cuando este último autor se planteaba la cuestión de por qué el espacio tenía que ser tridimensional:

> *Las tres dimensiones del espacio parecen explicarse pensando que las sustancias, en el mundo existente, obran de tal modo que la cantidad de acción es inversa al cuadrado de la distancia que las separa.*

Afirma que esta ley es arbitraria y que Dios hubiera podido establecer otra, como por ejemplo, la de la triple relación inversa de las distancias, y esta ley hubiera dado lugar a un espacio con otras propiedades. Esto abre la posibilidad a la existencia de espacios diferentes al que conocemos, pero Kant rechaza la idea y afirma:

> *… no es probable que existan muchos mundos (aunque en sí sea posible), si bien puedan existir muchas clases de espacios.*

Evidentemente, no rechaza de manera contundente la posibilidad de la existencia de diversas clases de espacios, aunque la conclusión a la que finalmente llega es que el espacio tridimensional es algo previo a todo conocimiento y, por lo tanto, toda geometría debe desarrollarse en el mismo. Considera también, de acuerdo con Newton, que la geometría propia de ese espacio debe ser la de Euclides.

Ahora bien, si la geometría del espacio estuviera determinada por éste, al considerar una única geometría existiría también un único espacio y tendríamos un único mundo sin posibilidades de cambio. Pero cuando Bolyai y Lovachevski llegaron a la conclusión de que se puede construir una geometría distinta de la de Euclides, al prescindir del axioma V de los "*Elementos*", todas las teorías que propugnaban un único espacio y una única geometría se vinieron abajo.

En realidad, un análisis de los axiomas de la geometría de Euclides plantea ciertas dudas acerca de la verdadera naturaleza de su geometría y no es difícil hallar algunas contradicciones en sus propios planteamientos. Por ejemplo, los dos primeros axiomas de los "*Elementos*" dicen:

> *1. Postúlese el trazar una línea recta desde un punto cualquiera hasta un punto cualquiera.*
> *2. Y el prolongar continuamente una línea recta finita en línea recta.*

El primero de los dos postulados afirma que dos puntos cualesquiera determinan siempre una recta. El segundo, más problemático, afirma que toda línea recta se puede prolongar de manera indefinida. Hay que tener en cuenta que la definición que se da de recta en la misma obra es un tanto ambigua:

> *Una línea recta es aquélla que yace por igual respecto de los puntos que están en ella.*

Resulta bastante obvio que esta definición presenta notables deficiencias y admite múltiples interpretaciones. Posteriormente, Arquímedes subsanó estos problemas definiendo una línea recta como la que determina la menor distancia entre dos puntos de la misma.

A la vista de todo esto cabe preguntarse cómo y dónde hay que prolongar una recta. En una geometría que se desarrolla en un ámbito suficientemente pequeño, esta duda carece de importancia, pero también es cierto que en los propios "*Elementos*" se dice:

> *Son rectas paralelas las que estando en el mismo plano y siendo prolongadas indefinidamente en ambos sentidos, no se encuentran una a otra en ninguno de ellos.*

Parece evidente que la prolongación de una recta debe tener lugar en una superficie plana, pero, situados en un determinado punto de la superficie de la Tierra, esta prolongación debería tener lugar a lo largo del plano tangente a dicha superficie para ir surcando el Universo, lo que nos ofrece la posibilidad de grandes sorpresas dada nuestra ignorancia acerca del espacio en el que se halla situado este último. Si, por otra parte, optamos por una prolongación que se adapte a la superficie terrestre (que, para simplificar, podemos suponer esférica) debemos decidir qué se considera una "recta" de la misma. Conforme a la definición de Arquímedes, tales "rectas" serían arcos continuos de sus círculos máximos de la misma. Pero entonces, la geometría que se planta en tal superficie ya no puede ser la de los "*Elementos*" pues, por ejemplo, ninguna línea se puede prolongar indefinidamente, y además, en tal geometría desaparece el concepto de rectas paralelas por cuanto dos rectas cualesquiera de la misma tienen siempre dos puntos en común.

En otro orden de ideas, Newton afirma lo siguiente, en su *"Tractatus de Quadratura Curvarum"*:

> *No voy a considerar aquí cantidades matemáticas compuestas de partes extremadamente pequeñas, sino como generadas por un movimiento o flujo continuo. Las líneas se describen, y por describirse son generadas, no por superposición de partes, sino por un flujo continuo de puntos.*

Con estas palabras, el autor indica que una línea queda generada por el movimiento de un punto y así, a la naturaleza geométrica del concepto añade una nueva característica: el movimiento, que sólo puede determinarse a través de otro concepto: el tiempo.

Esta presencia del tiempo en la concepción del propio espacio está también presente en Kant, quien en su Disertación académica de 1770: *"De mundi sensibilis atque intellibilis forma et princiìis"*, en el que anticipa su teoría del espacio y el tiempo como formas *a priori* de la sensibilidad geométrica.

La idea de movimiento la podemos ver reflejada también en la pintura, como por ejemplo en "*La fábula de Aracne*" *(Fig. 22)*, de Velázquez:

-

-

Figura 22

En la parte inferior izquierda del cuadro aparece una rueca que va girando presuntamente a gran velocidad. Podemos decir que el pintor realizó en la obra, no sólo un excelente tratamiento del espacio, sino que incluyó en la misma un nuevo parámetro al plasmar el movimiento de la rueca; es decir, a las tres dimensiones tradicionales del espacio añade una cuarta dimensión: el tiempo, que nos permite observar el giro veloz de la rueca. Esta misma idea viene plasmada en la obra literaria titulada *"La Máquina del Tiempo"*, de Herbert George

Wells, publicada en 1895 en el que describe la metáfora de una rueda que al girar no permite ver los radios interiores que la sostienen.

Esto plantea una nueva visión de nuestro espacio, en el que además de las tres dimensiones tradicionales había que considerar la presencia del tiempo. Con ello, surgía una nueva geometría en un espacio de cuatro dimensiones: el *espacio-tiempo*. Esta idea fue aprovechada por Einstein para establecer su *Teoría de la Relatividad*. Faltaba dar una geometría adecuada a este nuevo espacio que explicara los fenómenos descritos en la teoría de Einstein. Éste la encontró en la que se ha llamado *Geometría Riemanniana*, definida por Bernhard Riemann en su trabajo *"Über die Hypothesen, welche der Geometrie zu Grunde Liegen"*, escrito en 1854 en su *"Habititationvertrag"* a petición de Gauss y que fue publicado en 1868, dos años después de la muerte de su autor, en el que abandona la metodología de Euclides introduciendo una métrica determinada aplicada a espacios de cualquier dimensión, que permite tratar conceptos como la curvatura del espacio. Einstein adopta en el espaciotiempo, al formular la Relatividad General, no sólo la suposición de que la luz avanza a velocidad constante, la velocidad-límite c, sino también, al incorporar la gravitación, una métrica, semi-riemanniana, que evoluciona siguiendo sus célebres ecuaciones de campo. Los rayos de luz describen sus geodésicas nulas (las que avanzan con velocidad c).

4. "Arthur Stanley Eddington"

Arthur Stanley Eddington nació un 28 de diciembre de 1882, en Kendall (Reino Unido). Su padre, Arthur Henry Eddington, era el director de la *Stramongate School*, que hoy día sigue existiendo en esta ciudad y en cuya placa histórica (*Fig. 23*) se puede ver su reconocimiento al mismo y a la Real Sociedad Astronómica.

Cuando aún no había cumplido los dos años, a la muerte de su padre en una epidemia de fiebres tifoideas, su madre, Sarah Ann Stout, que no contaba con una buena economía, se trasladó a Weston-super-Mare, donde nuestro personaje estudió en su casa con sus hermanas mayores, hasta que acudió a una escuela primaria entre los ocho y los once años.

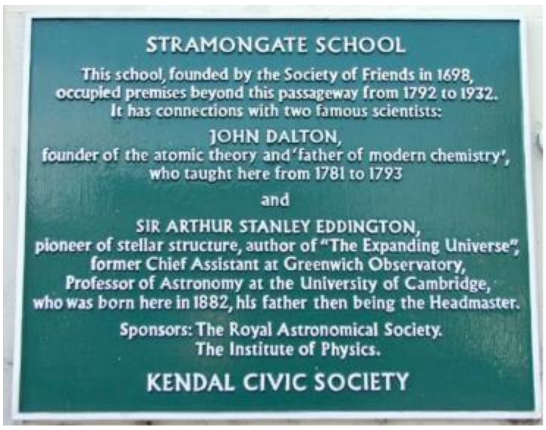
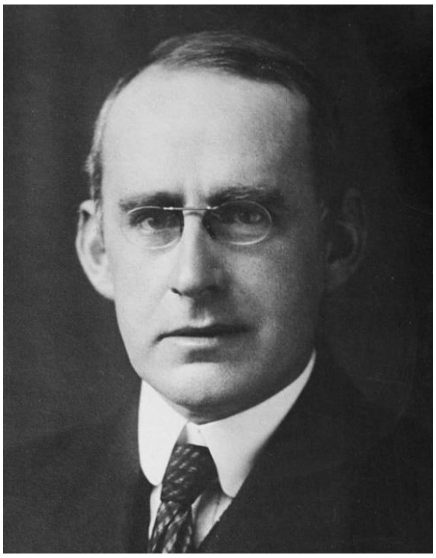


Figura 23

En 1893, accedió a la *Brymelyn School*, donde estuvo cinco años destacando en matemáticas y literatura, hasta que en 1998, al cumplir los 16,consiguió una beca para poder ingresar en el *Owens College* de Mánchester, a pesar de su juventud. Allí siguió estudiando, obteniendo diversas becas y ayudas gracias a su tesón, hasta obtener el título de *Bachelor in Science*, con mención de primero de clase, en 1902. Al año siguiente, y gracias a una nueva ayuda económica para Ciencias Naturales, logró entrar en el *Trinity College* de la Universidad de Cambridge, obteniendo poco después una nueva beca un poco más cuantiosa para estudiar matemáticas.

En 1905 consiguió su maestría, y entró en el Laboratorio Cavendish, investigando sobre la emisión termoiónica. Antes de finalizar este año de 1905 fue nombrado asistente jefe del Astrónomo Real Británico (lo que fue su primer trabajo[1]), en el Observatorio Real de Greenwich. Como se habían estado tomando fotografías del asteroide Eros durante más de un año, se le encargó el análisis del paralaje de este asteroide, para lo que desarrolló un nuevo método estadístico sobre el desplazamiento aparente de dos estrellas lejanas, lo que le mereció el Premio Smith en 1907, gracias a un ensayo sobre el movimiento propio de las estrellas. Este premio ayudó a que le nombrasen Fellow del *Trinity College*.

En 1913, tras el fallecimiento de George Darwin (hijo del naturalista Charles Darwin) el año anterior, fue nombrado para la Cátedra Plumiana de Astronomía y Filosofía Experimental (en el Instituto de astronomía de Cambridge). Al año siguiente fue nombrado director del Observatorio de Cambridge (cuyo cargo ocupó hasta su muerte), y poco después miembro de la Royal Society[2]. Vivió con su madre o con su hermana, y era reconocido como cuáquero, al igual que su familia, lo que le permitió no incorporarse al ejército cuando fue llamado a filas para la primera guerra mundial, declarándose objetor y pacifista, consiguiendo el reconocimiento de persona valiosa para la ciencia.



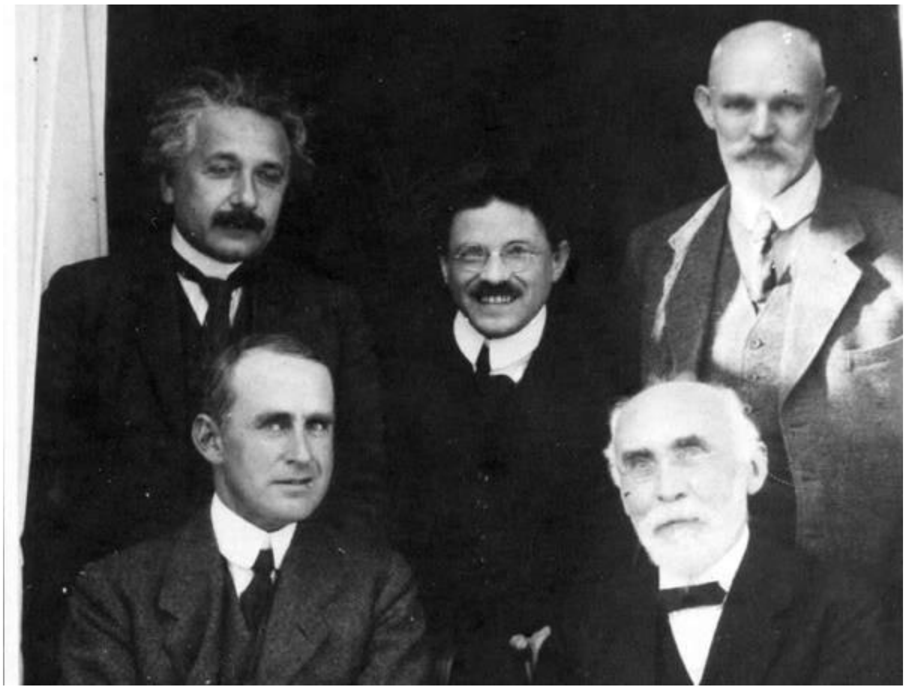
A través de la Royal Astronomical Society, en 1915 le llegaron las investigaciones de Einstein y de De Sitter, que consiguieron interesarle y empezó a divulgarlas, manteniendo una correspondencia intensa con Einstein desde entonces. Dio conferencias en 1916 y escribió un importante artículo, titulado *"Report on the relativity theory of gravitation"*, lo que le permitió transmitir la Teoría de la Relatividad.

[1] Desde pequeño se había interesado por la astronomía, incluso disponía de un pequeño telescopio de tres pulgadas, que le habían regalado cuando tenía diez años, y se le considera el impulsor de la astronomía experimental desde que llegó al observatorio.

[2] Después fue admitido en la Royal Society of Edinburgh, la Royal Irish Academy, la National Academy of Sciences, la Russian Academy of Sciences, la Prussian Academy of Sciences, y otras más. Además, fue invitado a dar la conferencia Bakeriana en la Royal Society de Londres en 1926, impartiendo la conferencia *Diffuse matter in interstellar space*.

A lo largo de su vida consiguió diferentes premios[3] y publicó numerosos libros[4]. Hay que destacar, por su importancia, sus investigaciones sobre el movimiento, la estructura interna y la evolución de las estrellas. Fue el primero en sugerir que las estrellas obtienen su energía a partir de la fusión nuclear del hidrógeno y el helio, y enunció que las fuerzas de atracción gravitatorias debían estar compensadas con las de repulsión ejercidas por la presión de los gases y de la propia presión de radiación. Estableció la relación entre masa estelar y luminosidad, lo que permitió calcular la masa de algunas estrellas. Hoy se llama "límite de Eddington" a la luminosidad máxima de una estrella (más allá de la cual se pierde dicho estado de equilibrio).

Fue uno de los primeros científicos que defendió la teoría del *Big Bang*. También demostró que la energía en el interior de las estrellas era transportada por radiación y convección, y dedujo que el interior de las estrellas debe encontrarse a millones de grados.



[3] Gold medal from the Astronomical Society of the Pacific (1923), Bruce Medal (1924), Henry Draper Medal (1924), Gold Medal of the Royal Astronomical Sciety (1924), Medal of the National Academy of Washington (1924), Royal Medal of the Royal Society (1928), Medal of the French Astronomical Society (1928), Knighted (1930), Order of Merit (1938)

[4] *Stellar Movements and the Structure of the Universe*. London: Macmillan (1914). *Space, Time and Gravitation: An Outline of the General Relativity Theory*. Cambridge University Press (1920). The Mathematical Theory of Relativity. Cambridge University Press (1923, 1952). *Stars and Atoms*. Oxford: British Association (1926). *The Internal Constitution of Stars*. Cambridge University Press (1926). *Fundamental Theory*. Cambridge University Press (1928, 1946). *The Nature of the Physical World*. MacMillan (1928, 1935). *Science and the Unseen World*. Macmillan (1929). *Why I Believe in God: Science and Religion, as a Scientist Sees It* (1930). *New Pathways in Science*. Cambridge University Press (1935). *Relativity Theory of Protons and Electrons*. Cambridge Univ. Press (1936). *Philosophy of Physical Science.* Cambridge University Press (1939). *The Domain of Physical Science* (1925, 2005). *Fundamental Theory* (1946).

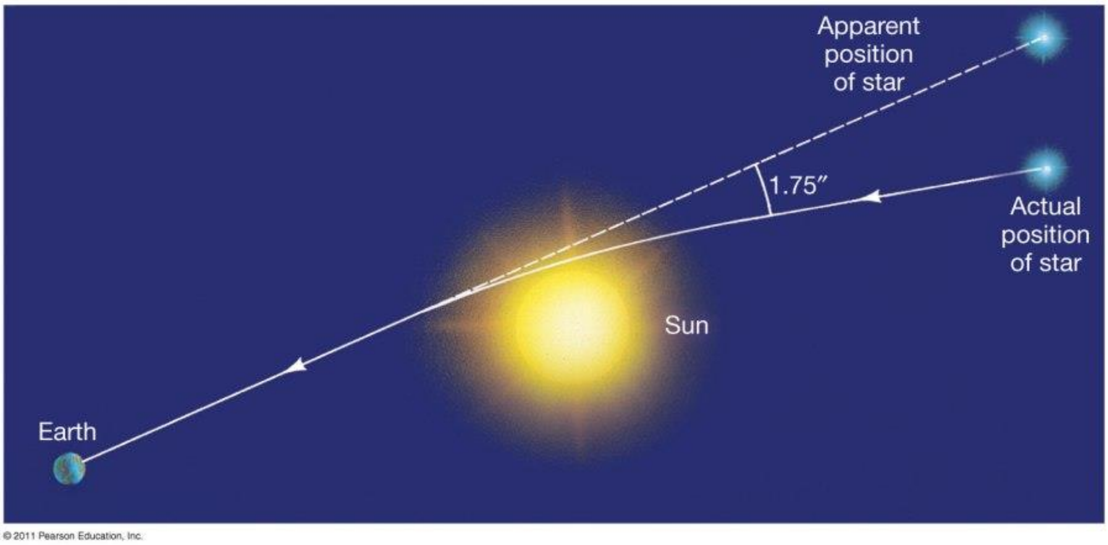
Durante los veinte últimos años de su vida se dedicó, en paralelo con Einstein, a lo que llamaron la teoría fundamental. Esta teoría, que aún se sigue investigando, trata de unificar la mecánica cuántica con la teoría de la relatividad y la gravitación universal, ya que Eddington se preocupaba por las constantes fundamentales de la naturaleza.

Fue el presidente de la Unión Astronómica Internacional desde 1938 a 1943. Falleció el 22 de noviembre de 1944 en Cambridge, sin haber completado su teoría de la unificación, donde pretendía utilizar la base algebraica para la física fundamental, pero, incluso así, su libro "Teoría Fundamental" fue publicado después de morir, en 1946.

Poco después de su fallecimiento, la Real Sociedad Astronómica de Londres instauró un premio denominado Medalla Eddington, que se otorga cada dos años a un investigador que realice méritos suficientes en la astrofísica teórica.

En el centenario de su nacimiento se dio su nombre a un cráter lunar. También se le puso su nombre a un asteroide, que descubrió Eduard L.G. Bowell, desde el observatorio astronómico de la Estación Mesa Anderson, en Flagstaff (EEUU).

En 2019 se cumple el centenario de la célebre expedición de Eddington para comprobar el efecto de la gravedad sobre la luz.



Eddington viajó, junto al astrónomo real Frank Watson Dyson, a la Isla Príncipe en el Golfo de Guinea, cerca de la costa africana, para observar el eclipse total de sol que tuvo lugar el 29 de mayo de 1919. Otro equipo que salió hacia Brasil tuvo dificultades meteorológicas y no consiguió su fin.

Partió de Inglaterra en marzo de 1919, teniendo los instrumentos ya posicionados en la isla a mediados del mes de mayo. Sin embargo, la mañana del día 29 hubo una gran tormenta con nubes que cubrían el cielo y una lluvia intensa. No empezó a verse el sol hasta las 13:30, estando el eclipse previsto para las 14h. Allí fotografió las estrellas cercanas al Sol, que sólo se pueden ver con el eclipse, ya que el brillo del Sol las hace invisibles al ojo humano.

Aunque muchas de las placas fotográficas no sirvieron, sin embargo, con algunas (*Fig.24*) consiguió confirmar la Teoría de la Relatividad General de Einstein, ya que las estrellas deberían aparecer cerca del Sol, pero un poco desplazadas, porque su luz es curvada por el campo gravitatorio solar.

Esta noticia apareció publicada en primera página en muchos periódicos.

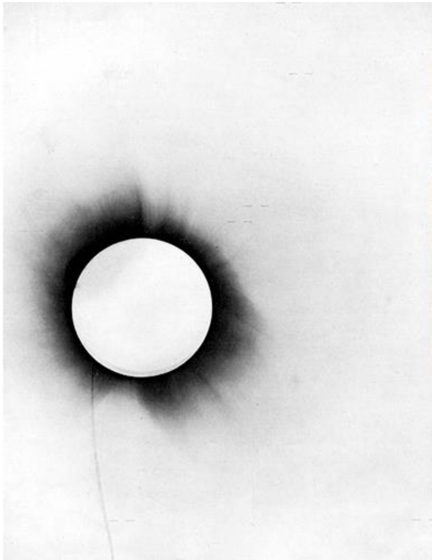
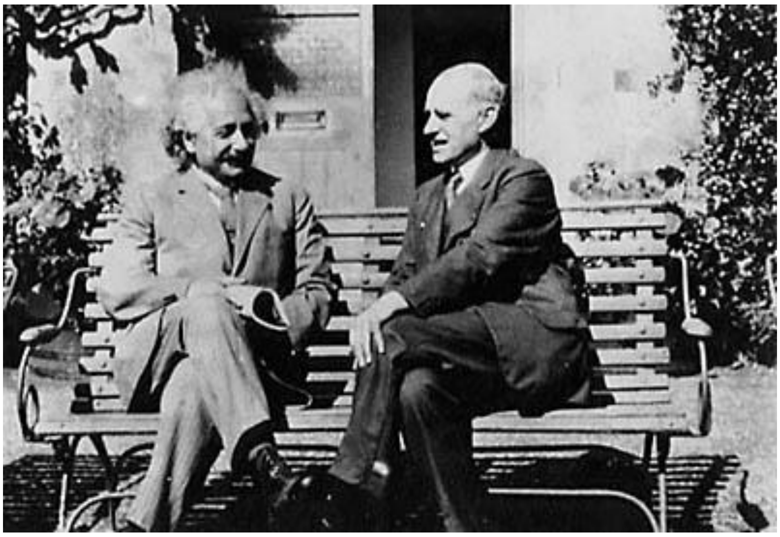
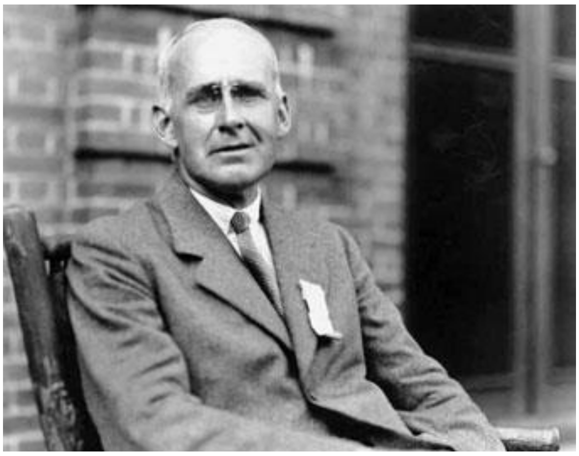


Figura 24



De esta época se cuenta una anécdota: cuando le comentaron que Einstein había dicho que sólo había tres personas que comprendiesen la Teoría de la Relatividad, Eddington preguntó: ¿quién es la tercera?

Durante mucho tiempo se dudó de esta confirmación debido a la posible falta de precisión en los datos tomados, en primer lugar, por las dificultades habidas en la realización del experimento, y, en segundo lugar, por la escasa y pobre tecnología al respecto que había en esta época. Sin embargo, experimentos modernos han confirmado los hechos. El último (realizado con un telescopio óptico) llevado a cabo por el astrónomo aficionado Donald Bruns en Casper (Wyoming)[5] durante el eclipse solar del 21 de agosto de 2017, fue una réplica del experimento de Eddington.



Eddington siguió dando conferencias y cursos en la universidad sobre la Teoría de la Relatividad, y se hizo famoso por poder explicar la teoría con rigor, y también como divulgador de la misma. En 1923 publicó el libro titulado "*Mathematical Theory of Relativity*" que, según el propio Einstein:

es la mejor introducción al tema en cualquier idioma

5. Epílogo

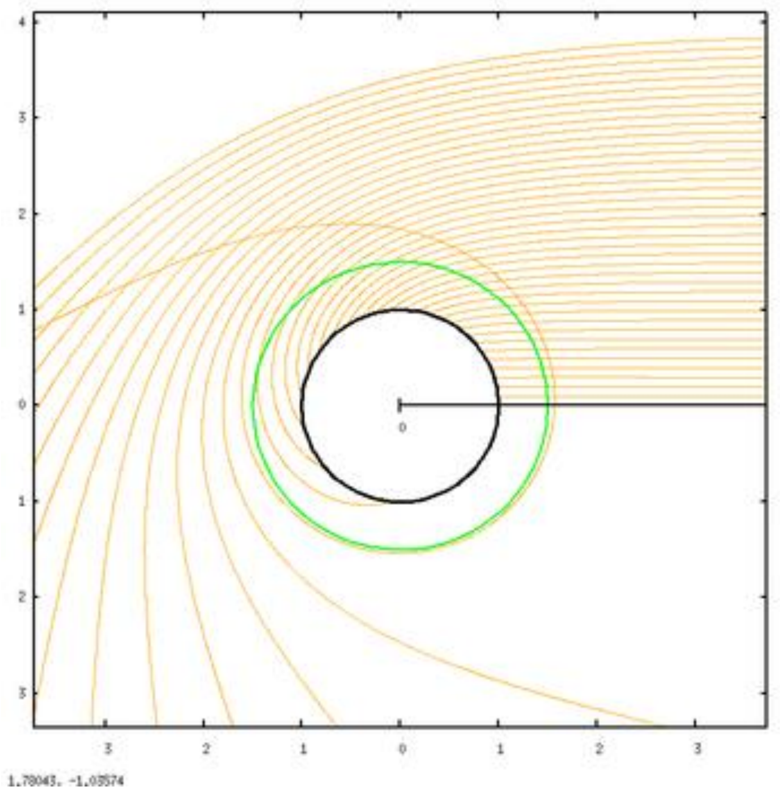
Las nuevas ideas sobre el efecto de la gravedad en el espaciotiempo y la propagación de la luz tuvieron un rápido y profundo impacto en la ciencia, la cultura y el arte del siglo XX. Baste recordar, por ejemplo, estas célebres obras de Salvador Dalí (*Fig. 25* y *26)*:

[5] Publicó un artículo en la revista *Classical and Quantum Gravity*, explicando todo el experimento y las características técnicas de los telescopios y cámaras utilizadas, así como las mediciones de deflexión obtenidas.

Figura 25

Figura 26

Cien años después del experimento de Eddington, nuestra idea es discutir en un próximo artículo lo que hoy se conoce sobre este efecto en el marco del análisis de la sombra de un agujero negro; no sólo por su evidente relevancia astrofísica (parece que resulta inminente la publicación de la primera observación de la sombra de Sagitarius A*, en la región central de nuestra galaxia), sino también por el progreso en el entendimiento teórico de algunas propiedades dinámicas, geométricas y topológicas que su estudio puede implicar, incluso sobre los límites de la propia Relatividad General.



Referencias

[1] ETAYO GORDEJUELA, Miguel; ETAYO GORDEJUELA, Fernando. *Hasta el infinito y más allá,* pp. 24-27, 51-54, 62, 63, 122-126, Ediciones Universidad Cantabria,España, 2011.

[2] HENDERSON, Linda D., *The fourth Dimension and Non-Euclidean Geometry in Modern Art,* Revised Edition, The MIT Press, Cambridge, Massassuchets and London. 2012.

[3] MILLER, Arthur I. , *Einstein y Picasso. El espacio, el tiempo y los estragos de la belleza*, Metatemas, Tusquets, 2007.

[4] REES, Martin; WHITTAKER, Edmund; DINGLEE, Herbert; BRAITHWAITE, Richard B.; LONDSDALE, Kathleen; WARNOCK, Mary. *A.S. Eddington and the Unity of Knowledge: Scientist, Quaker and Philosopher: A Selection of the Eddington Memorial Lectures with a Preface by Lord Martin Rees*. Cambridge University Press, U.K, 2012.

[5] ROJO, José, *Dimensiones extra y gravedad: geometría y dinámica alrededor de un agujero negro,* Tesis, 2017.

[6] TARRÉS, Juan, *Sobre los Espacios de Dimensión Superior*, en *Contribuciones Matemáticas en Honor del profesor Joaquín Arregui Fernández*, pp. 347-354, Editorial Complutense, Madrid, 2000.

[7] TARRÉS, Juan, *Cómo pasó Alicia al otro lado del espejo*, www.matematicasenacccion.unican.es/transparencias20101011/tarres.pdf

[8] TARRÉS, Juan, *La Topología General, de sus comienzos hasta Hausdorff, en Historia de las Matemáticas en el siglo XIX (2ª Parte)*, pp. 191-211. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Madrid, 1994.

[9] WELLS, H. G., *La Máquina del Tiempo*, Sportula, 2015.

Sobre los autores:

Nombre: Mª Carmen Escribano Ródenas
Correo Electrónico: escrod@ceu.es
Institución: Universidad San Pablo CEU, España.

Nombre: José Rojo Montijano
Correo Electrónico: jrojo.eps@ceu.es
Institución: Universidad San Pablo CEU, España.

Nombre: Juan Tarrés Freixenet
Correo Electrónico: jtarres@ucm.es
Institución: Universidad Complutense de Madrid, España.

Nombre: Susana Victoria Rodríguez
Correo Electrónico: victoria.eps@ceu.es
Institución: Universidad San Pablo CEU, España.