

ADÁN CABELLO QUINTERO

LA CURIOSIDAD Y EL UNIVERSO

LECCIÓN INAUGURAL
DE LA E.T.S. DE INGENIERÍA DE EDIFICACIÓN
UNIVERSIDAD DE SEVILLA

Curso Académico 2010-2011

EDITORIAL UNIVERSIDAD DE SEVILLA



ÍNDICE

BIOGRAFÍA

COLECCIÓN

ADÁN CABELLO QUINTERO

Dr. en Ciencias Físicas
Catedrático de Universidad
Departamento de Física Aplicada II

LA CURIOSIDAD Y EL UNIVERSO

Lección Inaugural leída en la Apertura
del Curso Académico 2010-2011
en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación.
Universidad de Sevilla

PORTADA

ÍNDICE

BIOGRAFÍA

COLECCIÓN



Sevilla 2015

Colección: Textos Institucionales
Núm.: 49

COMITÉ EDITORIAL:

Antonio Caballos Rufino (Director de la
Editorial Universidad de Sevilla)
Eduardo Ferrer Albelda (Subdirector)

Manuel Espejo y Lerdo de Tejada
Juan José Iglesias Rodríguez
Juan Jiménez-Castellanos Ballesteros
Isabel López Calderón
Juan Montero Delgado
Lourdes Munduate Jaca
Jaime Navarro Casas
M^a del Pópulo Pablo-Romero Gil-Delgado
Adoración Rueda Rueda
Rosario Villegas Sánchez

Reservados todos los derechos. Ni la totalidad ni parte de este libro puede reproducirse o transmitirse por ningún procedimiento electrónico o mecánico, incluyendo fotocopia, grabación magnética o cualquier almacenamiento de información y sistema de recuperación, sin permiso escrito de la Editorial Universidad de Sevilla.

Edición digital de la primera edición impresa de 2010

© EDITORIAL UNIVERSIDAD DE SEVILLA 2015
C/ Porvenir, 27 - 41013 Sevilla
Tfnos.: 954 487 447; 954 487 451; Fax: 954 487 443
Correo electrónico: eus4@us.es
Web: <<http://www.editorial.us.es>>

© ADÁN CABELLO QUINTERO 2015

ISBNe: 978-84-472-1680-2
Edición digital: Dosgraphic, s. L. <www.dosgraphic.es>

Señor Rector Magnífico de la Universidad de Sevilla,

*Señor Director de la Escuela Técnica Superior
de Ingeniería de Edificación de la Universidad de Sevilla,*

*Señor Presidente del Consejo Andaluz
de Colegios Oficiales de Aparejadores y Arquitectos Técnicos,*

*Señor Presidente del Colegio Oficial
de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Sevilla,*

Autoridades Académicas,

Profesores,

Personal de Administración y Servicios,

Alumnos,

Señoras y Señores

PORTADA

ÍNDICE

LA CURIOSIDAD

El otro día, Carlos preguntó: “Papá, ¿por qué el cielo es azul?”. Lo sorprendente no es la pregunta, lo sorprendente es que Carlos tiene sólo tres años.

Demócrito nació hacia el año 470 a.C. en la ciudad griega de Abdera. Su gran preocupación era saber hasta dónde se podía dividir una gota de agua. Uno podía ir obteniendo gotas cada vez más pequeñas hasta casi perderlas de vista. Pero ¿había algún límite? ¿Se llegaba alguna vez hasta un punto en que fuese imposible seguir dividiendo? Leucipo, maestro de Demócrito, había intuido que esa escisión tenía un límite. Demócrito hizo suya esta idea y anunció su convicción de que cualquier sustancia podía dividirse hasta allí y no más. El trozo más pequeño o partícula de cualquier clase de sustancia era indivisible, y a esa partícula mínima la llamó átomo, que en griego quiere decir “indivisible”. Según Demócrito, el universo estaba constituido por esos ladrillos diminutos e indivisibles. Y los habría de distintos tipos que, al combinarse de diferentes formas, darían lugar a las diversas sustancias. Sus contemporáneos se rieron de él.

En cierta ocasión Richard Feynman, premio Nobel de Física en 1965, reflexionando sobre si, por algún cataclismo, todo el conocimiento científico se destruyese, y sólo fuese posible legar

PORTADA

ÍNDICE

una frase a las siguientes generaciones, se planteó cuál sería la frase que contendría más información en menos palabras. No lo dudó: “Todas las cosas están hechas de átomos [pequeñas partículas]”. Ese conocimiento científico fundamental, que se sintetiza en una tabla de partículas elementales (ver la figura 1), nace de la pregunta que se hizo Demócrito más de dos mil años antes de que se obtuviesen evidencias experimentales de que los átomos existen: “¿Hasta dónde se puede dividir una gota de agua?”.

Hace no mucho, Luis, un niño de seis años, me preguntó: “¿Cuál es el trozo más pequeño que existe?”. Me acordé de Demócrito.

A diferencia de lo que muchas veces se piensa, las niñas y los niños quieren entender el universo. No hay más que ver cómo

		Three Generations of Matter (Fermions)			
		I	II	III	
mass→		2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge→		$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin→		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name→		u	c	t	photon
		up	charm	top	
	Quarks	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
		$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
		d	s	b	g
		down	strange	bottom	gluon
	Leptons	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV
		0	0	0	0
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
		ν_e	ν_μ	ν_τ	Z
		electron neutrino	muon neutrino	tau neutrino	weak force
		0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
		-1	-1	-1	± 1
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
		e	μ	τ	W $^\pm$
		electron	muon	tau	weak force

Figura 1. Tabla de las partículas elementales según el modelo estándar de la física de partículas. La materia está hecha de seis quarks (con fondo violeta) y seis leptones (con fondo verde). Los bosones (con fondo rojo) son los mediadores de las interacciones (electromagnética –el fotón–, fuerte –el gluón– y débil –la partículas Z y las W–). Fuente: Wikipedia.

PORTADA

ÍNDICE

lo observan, cómo tienen siempre la antena puesta a las conversaciones de los mayores. Quieren saber más y no paran de hacer preguntas. Siempre preguntan el porqué de todo. Desgraciadamente, en la mayoría de los casos, esta cualidad desaparece con el paso del tiempo. Yo creo que es por varios motivos. El más importante de ellos es que no se les dan las respuestas que piden. Sus padres, sus amigos y sus profesores simplemente no saben las respuestas. Pero no reconocen que no las saben, ni les orientan sobre dónde encontrarlas. Hablan mucho pero no responden a las preguntas. Ello les lleva a dos conclusiones: que muchas de las preguntas que hacen no tienen respuestas, y que muchas de las preguntas que hacen no son importantes porque a los que les rodean parecen no importarles.

Las instituciones educativas, incluyendo la universidad, promueven que los profesores transmitan el saber que les transmitieron. En una viñeta de *El Roto*, publicada en el periódico *El País* el 11 de septiembre de 1997, un niño le decía a su maestra: “Por favor, no nos enseñe lo que le enseñaron, enséñenos lo que averiguó”. ¿Cuánto de lo que enseñamos nos lo enseñaron y cuánto es cosecha nuestra? No hay nada más apasionante de enseñar que aquello que uno ha descubierto. Y para descubrir hay que hacerse preguntas, buscar respuestas, fallar, volver a fallar, reformular las preguntas y volver a fallar hasta que, mucho tiempo después, se hace la luz. Y esa luz es la que brilla en los ojos de los que enseñan lo que descubrieron. Pero hay muy poca de esa luz en nuestras universidades.

Vivimos una época ya demasiado larga en la que se formulan y reformulan leyes, estructuras, títulos y planes de estudio, en la creencia de que en ellos reside la clave de la eficacia y la

excelencia educativa. Yo quisiera aprovechar esta solemne ocasión para defender otros valores clave como motores de la educación.

El valor de la curiosidad, la que tienen los niños y que nunca deberían perder. El valor de la investigación científica, como método de saciar esa curiosidad. El valor de generar nuevos conocimientos como forma más eficaz para transmitir conocimiento. El valor de enseñar lo que uno ha descubierto y no sólo lo que a uno le han enseñado. El valor de saber decir: es una pregunta importante pero no sé la respuesta. El valor de tener el valor para ir a buscar respuestas allá donde las haya y de recabar la ayuda de los que también las buscan. El valor de descubrir las cosas por uno mismo.

A mí me gustaría que Carlos, Luis y Rodrigo (que aparecerá más adelante) puedan hacer, dentro de muchos años, como ese señor mayor con anorak que un día se presentó en una charla informal sobre física y convirtió lo que iba a durar cuarenta y cinco minutos en tres horas de muchas preguntas y no tantas respuestas. Pero claro, ese señor mayor con anorak, acababa de recibir el premio Nobel de Física y se podía permitir un lujo que sólo los niños se pueden permitir: el lujo de preguntar.

PORTADA

ÍNDICE

AZUL, VIOLETA, ROJO, NEGRO

Carlos quiere saber por qué el cielo es azul. Durante miles de años los seres humanos han vivido bajo un cielo azul (de día) sin saber la respuesta a esa pregunta. Los distintos colores del cielo se deben a la interacción de la luz del Sol con los átomos y moléculas que forman la atmósfera terrestre.

La luz también está compuesta por partículas elementales, los fotones. Cada uno de ellos tiene una energía que depende de la longitud de onda del fotón. En el espectro visible, cada longitud de onda corresponde a un color. La luz solar contiene fotones de todas las longitudes de onda visibles: desde el violeta al rojo, pero no en las mismas proporciones. La suma de todos esos colores hace que la luz del Sol sea blanca.

La atmósfera es una capa que cubre la superficie terrestre. Está compuesta por partículas “pequeñas” (de menor tamaño que las longitudes de onda visibles): átomos y moléculas de distintos gases (fundamentalmente nitrógeno y oxígeno), y por partículas “grandes” (de mayor tamaño que las longitudes de onda visibles): agua (en forma de pequeños cristales, gotas y vapor) y partículas de polvo, entre otras muchas cosas. Tiene un espesor de unas pocas decenas de kilómetros y su densidad disminuye gradualmente con la altura.

El color azul del cielo es consecuencia de la interacción entre la luz del Sol y los átomos y moléculas de gas de la atmósfera. La energía de algunos de los fotones que vienen del Sol se comunica a los electrones de los átomos y moléculas, provocando que éstos pasen a estar en un estado excitado. Pero los átomos y moléculas no permanecen en ese estado excitado mucho tiempo, sino que pronto se desexcitan, emitiendo fotones como los que absorbieron. Emiten fotones en todas las direcciones y no sólo en la dirección de incidencia. Es como el estallido simultáneo de miles de millones de fuegos artificiales. Este proceso de absorción y posterior emisión está gobernado por las leyes de la Mecánica Cuántica (de la que hablaremos más adelante) que, para esta situación, predicen que el número de fotones emitidos de una determinada longitud de onda (la intensidad de la luz) es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda. Es decir, se emiten muchísimos más fotones de longitudes de onda cortas (que corresponden al violeta y al azul) que de longitudes de onda largas (que corresponden al rojo). El resultado neto es que parte de la luz (blanca) que llega del Sol en línea recta, al atravesar la atmósfera se difunde en todas direcciones. El efecto se multiplica por los kilómetros de espesor de la atmósfera.

Según lo dicho hasta ahora, el color del cielo debería ser violeta, que es la longitud de onda visible más corta, pero no lo es por dos motivos: porque la luz solar contiene más luz azul que violeta, y porque el ojo humano es más sensible al azul que al violeta.

El Sol se ve amarillento (en lugar de blanco) porque los fotones violetas y azules no consiguen llegar en línea recta sino

que son mayoritariamente difundidos por la atmósfera. Desde el espacio o desde la Luna (donde no hay atmósfera) el Sol se ve blanco y el “cielo” negro.

El color blanco y gris de las nubes es consecuencia de otro tipo de interacción. Cuando la luz del Sol interacciona con las gotas de agua de las nubes (que son incoloras), esas gotas reflejan parte de la luz sin alterar su color y absorben la otra parte.

El color rojizo de las puestas de sol se debe a que el camino que recorren los fotones solares por la atmósfera hasta llegar a nuestros ojos es cada vez más largo a medida que el Sol va desapareciendo por el horizonte. Ello hace aumentar la interacción de la luz del Sol con partículas grandes que absorben no sólo las longitudes más cortas como el violeta o el azul, sino también otras como el verde, el amarillo y el naranja, con lo que sólo se salvan las longitudes de onda más largas. Por eso el Sol y el cielo a su alrededor son cada vez más rojizos al atardecer (ver la foto 1).

PORTADA

ÍNDICE



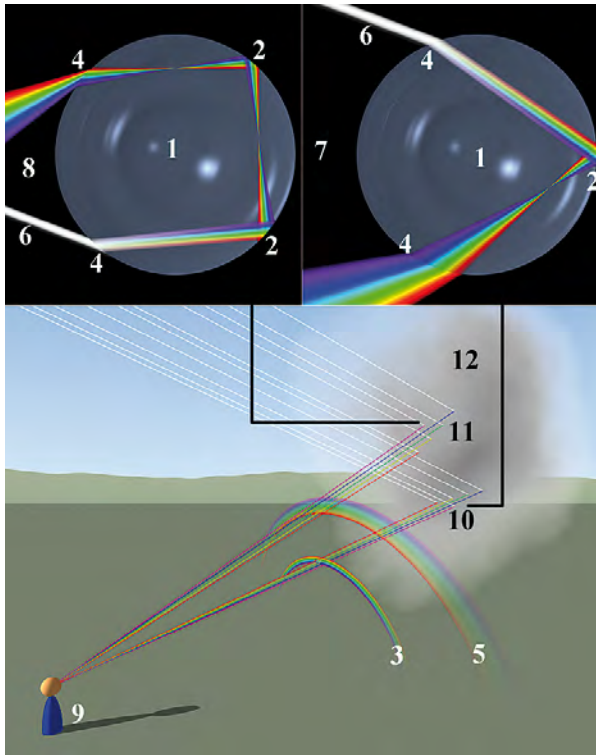
Foto 1. Puesta de sol desde el observatorio de Edimburgo en marzo de 2008. Foto: Adán Cabello, © Adán Cabello.

EL ARCO IRIS ESTÁ EN TU OJO

Los niños quieren tocar el arco iris y hay canciones que hablan de caminar por el arco iris o atravesarlo, pero nada de eso es posible. El arco iris no es algo que ocupe un sitio fijo, es sólo un fantasma, una imagen. Cuando uno mira un arco iris, lo que está viendo es la luz dispersada por unas gotas de agua. Otra persona que se encuentre al lado del primer observador verá la luz dispersada por otras gotas de agua. Un tercer observador un poco más alejado puede no ver nada.

El arco iris es un fenómeno que se produce cuando la luz del Sol, que tiene todos los colores visibles, interacciona con gotas de agua. Las gotas son pequeños esferoides en los que la luz de los rayos solares que forman el arco iris (primario) cambia tres veces su dirección. La primera al pasar del aire al interior de la gota de agua: las diferentes velocidades de propagación de la luz en el aire y en el agua hacen que la luz se desvíe de su dirección de incidencia (refracción). Tanto más se desvía la luz cuanto más corta sea su longitud de onda: el rojo se desvía poco, el violeta mucho. Luego todos los colores se reflejan (con distintos ángulos de incidencia) en el interior de la gota y, finalmente, vuelven al aire sufriendo una nueva desviación (tanto mayor cuanto más corta es la longitud de

onda). El efecto neto es que de la gota sale luz amarilla con un ángulo de aproximadamente 138 grados con respecto a la dirección de incidencia de la luz blanca del Sol; también sale luz roja con un ángulo menor, luz violeta con un ángulo mayor y, entre una y otra, todos los colores del espectro visible (ver la figura 2). La luz emerge de muchas gotas al mismo tiempo. El efecto combinado es un mosaico de pequeños destellos de luz distribuidos como un arco. Cada ojo ve luz dispersada por gotas de agua diferentes.



PORTADA

ÍNDICE

Figura 2. Explicación del arco iris primario y secundario. Fuente: Wikipedia.

Para que el arco iris se forme en nuestros ojos, éstos tienen que estar mirando gotas de agua iluminadas por el Sol que está detrás de nosotros, de manera que los rayos solares, las gotas y nuestros ojos formen los ángulos precisos (ver la figura 2).

A veces se ve un segundo arco iris, mucho más tenue, por encima del primero y con los colores invertidos (como el que se adivina en la foto 2). Está provocado por la luz que ha sufrido no una sino dos reflexiones en el interior de las gotas. No están “uno sobre otro” y ambos “sobre” las Cataratas del



Foto 2. Arco iris fotografiado en el lado canadiense de las Cataratas del Niágara en noviembre de 2009. Foto: Adán Cabello, © Adán Cabello.

Niágara (ver la foto 2), sino que se han formado en el plano de la cámara con la que se tomó la fotografía.

Los niños quieren tocar el arco iris y, si no pueden, quieren saber por qué no pueden. Si no se lo explicamos su desilusión es, también, doble.

PORTADA

ÍNDICE

¿DÓNDE ACABA EL CIELO?

Rodrigo es sorprendente. Con cuatro años ya sabía que cuando mete un palo en el agua, parece que el palo se rompe. Y sabía que es porque la luz se propaga a velocidades distintas en el agua y en el aire. Ventajas de ser hijo y nieto de científicos e ingenieros. Rodrigo hace muchas preguntas. Por ejemplo: ¿Dónde acaba el cielo? Y no se refiere sólo al cielo que parece azul por el día por la difusión de la luz del Sol en la atmósfera. Se refiere también al cielo negro que ve por las noches, con planetas y estrellas.

Nuestro conocimiento de la extensión, constitución y evolución del universo ha avanzado más en los últimos sesenta años que en los seis mil años anteriores. La respuesta a la pregunta de Rodrigo es que el cielo, nuestro universo, es finito pero no tiene fronteras. Igual que la superficie de un globo es finita pero no tiene bordes. El universo surgió de una gran explosión hace unos trece mil millones de años y se expande; igual que la superficie de un globo se expande cuando se hincha. Y se expande aceleradamente; es decir, que la velocidad de expansión del universo aumenta con el tiempo. ¿Por qué? No lo sabemos. Esa expansión implica que el vacío posee energía (al igual que los átomos no son indivisibles, el vacío no está vacío; en ciencia

muchos nombres pierden pronto su sentido original). El que el vacío tenga una densidad de energía no nula es algo perfectamente compatible con la Mecánica Cuántica (de la que tenemos que hablar). La energía de todo el vacío del universo es lo que se llama la “energía oscura”. No se sabe de dónde viene pero debe existir y su existencia es perfectamente compatible con las leyes fundamentales de la naturaleza que manejamos. El 75% del universo es energía oscura. El 25% es masa: un 4% es visible, pero el otro 21% no sabemos exactamente de qué se compone; es la llamada “materia oscura”.

Sabemos mucho más que nuestros padres sobre el universo y sabemos que hay preguntas importantes por responder.

PORTADA

ÍNDICE

LO QUE AVERIGÜÉ

La absorción y emisión de luz que explica el azul del cielo está gobernada por la Mecánica Cuántica, la expansión acelerada del universo sólo se explica si el vacío tiene energía y eso es compatible con la Mecánica Cuántica, pero ¿qué es la Mecánica Cuántica?

La Mecánica Cuántica es como el código de la circulación: es un conjunto de reglas que todos los vehículos (en este caso los sistemas físicos: los átomos, los fotones, y todas las partículas conocidas y por descubrir) tienen que cumplir. No te dice cómo van a ser los coches que se fabriquen el año que viene, pero te dice cómo circularán: qué cosas podrán hacer y cuáles no. Este código de la circulación se fue descubriendo entre 1900 y 1927. Todas las fuerzas y partículas que se conocían antes y todas las que se han descubierto después se acomodan sin problemas en este marco (la gravedad es la única posible excepción).

La Mecánica Cuántica ha servido para explicar el espectro de la radiación del cuerpo negro, el efecto fotoeléctrico, la estabilidad de los átomos (es decir, por qué los electrones forman capas con energías discretas en torno a los núcleos), la superconductividad, la superfluidez y otros muchos fenómenos. Ha llevado a multitud de aplicaciones prácticas, algunas de las cuales,

PORTADA

ÍNDICE



Foto 3. Experimento de contextualidad cuántica con fotones realizado en la Universidad de Estocolmo en 2009. Foto: Elias Amsellem y Magnus Rådmark, © Fysikum Stockholm University.

como el transistor y el láser, están en la base de las recientes revoluciones en informática y comunicaciones (se calcula que el 30% del producto interior bruto de Estados Unidos se debe a industrias cuya base es la Mecánica Cuántica). Sus reglas nos permiten atrapar y manipular átomos de uno en uno, ralentizar la velocidad aparente de la luz hasta hacerla similar a la de un ciclista. La Mecánica Cuántica nos promete comunicaciones eternamente seguras y cálculos exponencialmente más rápidos que los de cualquier ordenador actual.

Llevamos casi 100 años usándola y nunca ha fallado. Conocemos todas sus reglas pero no sabemos de dónde vienen. La teoría de la relatividad se deduce de un supuesto teórico: que las leyes de la física son las mismas en distintos sistemas de referencia,

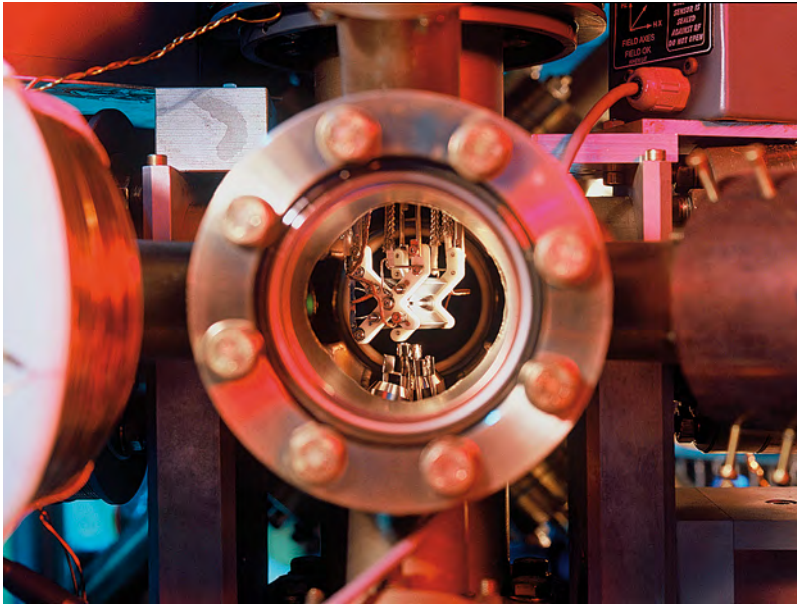


Foto 4. Trampa para atrapar iones (átomos a los que se han quitado electrones) en la Universidad de Innsbruck (Austria). Foto: C. Lackner, © Institut für Experimentalphysik, Universität Innsbruck.

PORTADA

ÍNDICE

y de un hecho experimental: la constancia de la velocidad de propagación de la luz en esos sistemas de referencia. Las reglas de la Mecánica Cuántica no sabemos de dónde salen.

Algunas de sus predicciones son sorprendentes: si no somos capaces de abandonar la idea de que los resultados de los experimentos revelan propiedades predeterminadas del universo, entonces la Mecánica Cuántica sólo es compatible con un universo en el que lo que pase aquí influye instantáneamente en todos los rincones del universo. La otra opción, más sensata, es renunciar a creer que los resultados de los experimentos

están predeterminados y concluir que lo que indica la Mecánica Cuántica es que el universo es esencialmente indeterminista. ¿Por qué? Una razón sencilla es que los sistemas físicos sólo pueden contener una cantidad finita de información. Quizá la Mecánica Cuántica es como es por este motivo. Quizá no. Pero hay que hacer hipótesis, hacer experimentos, jugar con las mismas partículas de luz responsables del azul del cielo o del arco iris (foto 3), encerrar átomos en una caja y empezar a hacerles preguntas (foto 4). Nunca hay que dejar de hacer preguntas.

Mi propósito hasta aquí ha sido hacer un breve recorrido por lo que conocemos del universo y por lo que a mí más me preocupa de lo que no conocemos del universo (pero podemos llegar a conocer si nos ponemos a ello), y defender la curiosidad, la investigación y la generación de nuevos conocimientos como valores fundamentales en la tarea de transmitir conocimiento.

Muchas gracias por su atención.

PORTADA

ÍNDICE

ÍNDICE

<i>La curiosidad</i>	9
<i>Azul, violeta, rojo, negro</i>	13
<i>El arco iris está en tu ojo</i>	17
<i>¿Dónde acaba el cielo?</i>	21
<i>Lo que averigüé</i>	23

PORTADA

BIOGRAFÍA

COLECCIÓN

ADÁN CABELLO QUINTERO

Adán Cabello Quintero nació en Madrid en 1968. Licenciado en Ciencias Físicas (1991) y doctor en Ciencias Físicas (1996) por la Universidad Complutense de Madrid, se trasladó en 1996 a la Universidad de Sevilla, de la cual es catedrático de Física Aplicada. El trabajo de Cabello se ha centrado, sobre todo, en el estudio de la no-localidad cuántica y la contextualidad cuántica, y de sus aplicaciones a la información cuántica y computación cuántica. Es autor de más de 90 artículos científicos sobre estos temas. Es colaborador habitual de varios grupos de física experimental de Alemania, Austria, China, Italia y Suecia, y presidente del Grupo Especializado de Información Cuántica de la Real Sociedad Española de Física. En 2002 obtuvo el Premio Andalucía de Jóvenes Investigadores.

PORTADA

ÍNDICE

COLECCIÓN

LECCIONES INAUGURALES DE LA E.T.S. DE INGENIERÍA DE EDIFICACIÓN. UNIVERSIDAD DE SEVILLA

A favor del ingenio

Curso Académico 2012-2013

SANTIAGO LLORENS CORRALIZA

Iluminación y vigilancia de museos

Curso Académico 2011-2012

M. ÁNGELES GARRIDO VÍZUETE

La curiosidad y el universo

Curso Académico 2010-2011

ADÁN CABELLO QUINTERO

Pasado, presente y futuro del ingeniero de edificación

Curso Académico 2009-2010

ANTONIO RAMÍREZ DE ARELLANO AGUDO

La luz y el color de Sevilla

Curso Académico 2008-2009

MARÍA DOLORES ROBADOR GONZÁLEZ

Symboleion. Símbolos y ritos del construir

Curso Académico 2007-2008

AMPARO GRACIANI GARCÍA

*Catálogo completo de nuestras publicaciones
en la página web*

<<http://www.editorial.us.es>>

PORTADA

ÍNDICE

BIOGRAFÍA