

## De Einstein a los attosegundos From Einstein to attoseconds

R. Flores-Cruz <sup>a</sup>, V. Rodríguez-Lugo <sup>a\*</sup>

<sup>a</sup> Universidad Autónoma del estado de Hidalgo Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Carretera Pachuca-Tulancingo km 4.5 Ciudad del conocimiento UAEH, Mineral de la Reforma, 42184 Hidalgo, México.

### Resumen

En el año 2023 fue otorgado el premio Nobel de Física a tres investigadores por sus contribuciones en la generación de pulsos ultrarrápidos de attosegundos. Sin embargo, la generación de attosegundos ha tenido un largo camino el cual comienza en los años 60, por lo que en este trabajo se presenta un breve recorrido de los estudios más relevantes relacionados a los pulsos de attosegundos, comenzando desde escalas de tiempo un poco más grandes como los femtosegundos y los picosegundos, los cuales fueron "los precursores" a los pulsos subsecuentes. También se tratan algunos de los conceptos más relevantes relacionados a esta área y algunas de las aplicaciones, tanto de los equipos utilizados como de los propios pulsos que se generan con ellos, en la presente investigación se abordan algunos de los pasos previos que tuvieron que pasar para que en la actualidad se puedan generar pulsos a escala de attosegundos.

**Palabras Clave:** Attosegundos, tiempo, pulsos, femtosegundos, picosegundos.

### Abstract

In 2023, the Nobel Prize in Physics was awarded to three researchers for their contributions to the generation of ultrafast attosecond pulses. However, the generation of attoseconds has had a long path which begins in the 60s, for this reason in the current work a brief tour of some of the most relevant works related to attosecond pulses is presented, starting from scales of slightly larger time periods such as femtoseconds and picoseconds, which were "precursors" to subsequent pulses. Some of the most relevant concepts related to this area and some of the applications are also discussed, both of the equipment used and of the pulses that are generated with them. The objective of this work is to provide a context for some of the previous steps. . that had to happen so that pulses can currently be generated at the attosecond scale.

**Keywords:** Attoseconds, time, pulses, femtoseconds, picoseconds.

### 1. Introducción

En los años 60 Theodore Maiman consiguió la primera emisión láser, que es un dispositivo con la capacidad de producir un haz de luz más intenso que algunas otras fuentes luminosas, además por su baja dispersión puede verse a simple vista como un hilo recto de radiación electromagnética (Beléndez, 2010). Desde la invención del láser sus aplicaciones a través de los años se han incrementado (Molpeceres, 2006). Como es el caso del láser de diodo de alta potencia para soldadura (Bocos et al., 2004), y aplicaciones tanto industriales como en medicina donde se usan en procesos inflamatorios, lesiones musculares y en medicina estética (Sánchez, 2007).

Una de las aplicaciones más interesantes es cuando se generan pulsos láser para medir procesos dinámicos que ocurren en tiempos extremadamente cortos, como lo son las

reacciones químicas. Para conocer el comportamiento de los átomos, las moléculas y cristales se requiere de una emisión láser que pueda ocurrir tan rápido como para que esta pueda ajustarse a la escala de tiempo del movimiento que es objeto de estudio, los láseres de pulsos ultracortos son aplicables en áreas de comunicaciones y aplicaciones espaciales, por su gran capacidad para enviar información rápidamente (Han et al., 2021).

La óptica ultrarrápida engloba al estudio de los pulsos de luz, considerando su generación, caracterización y las aplicaciones que estos puedan tener. Se han realizado diversas investigaciones relacionadas a los attosegundos, empleando la espectroscopía de absorción transitoria de attosegundos se puede medir el retardo de las transiciones resonantes de vacancias utilizando Kriptón, tal y como lo hicieron Wang et al., (2024) que obtuvieron tiempo de 23.8 y 141.0 as. Para caracterizar los pulsos de attosegundos se han desarrollado

\*Autor para la correspondencia: [ventura.rl65@gmail.com](mailto:ventura.rl65@gmail.com)

Correo electrónico: [rl335558@uaeh.edu.mx](mailto:rl335558@uaeh.edu.mx) (Romel Flores-Cruz), [ventura.rl65@gmail.com](mailto:ventura.rl65@gmail.com) (Ventura Rodríguez-Lugo)

diversos métodos como el método IPROOF (Improved Phase Retrieval by Omega Oscillation Filtering) el cual se basa en la conversión de pulsos de attosegundos en paquetes de onda electrónicos mediante la ionización de átomos y un campo IR (Laurent et al., 2013).

Los pulsos ultracortos como se mencionó anteriormente, tienen innumerables aplicaciones, con ellos se puede ver cómo se comportan los átomos y seguir de esta manera los procesos atómicos de una forma más clara, por etapas (Saiz, 2021). Se ha conseguido generar pulsos rápidos de láser con materiales en bulto como el MgO (Ghimire et al., 2014). Los pulsos ultracortos ocurren a escalas de tiempo muy pequeñas, normalmente se busca que sean fracciones de segundo para asegurar que el pulso sea tan rápido como el fenómeno que se desea estudiar, si el pulso generado está en las fracciones de segundo de  $1 \times 10^{-12}$  s,  $1 \times 10^{-15}$  s y  $1 \times 10^{-18}$  s, entonces este ocurrirá en escalas de tiempo de picosegundos, femtosegundos y attosegundos respectivamente. En 2017 se conseguían pulsos de rayos X blandos de 53 attosegundos con un ancho de banda de (100-330 eV) lo que abre posibilidades de estudio en áreas biológicas y químicas (Li et al., 2017), se ha mostrado que la corriente generada por la polarización entre las bandas de valencia y las bandas de conducción es el mecanismo más importante de los que intervienen en la generación de armónicos de orden alto con láseres de infrarrojo medio (Vampa et al., 2015).

También se demostró que la generación de armónicos de alto orden a partir de un láser infrarrojo puede ser controlada con trenes de pulsos láser en attosegundos (Gademann et al., 2011). Diversos estudios muestran que si se incrementa la distancia del núcleo de un átomo se puede mejorar la ionización involucrando uno o dos electrones y que los estados de carga más altos pueden acoplarse más fácilmente a un láser (Liu et al., 2023), también a partir de la simulación se ha demostrado que existe la posibilidad de generar pulsos de femtosegundos en dos colores con un tiempo de retardo controlable (Zeng et al., 2023). Incrementando la intensidad del láser provoca que también la energía de los fotones aumenta, esto según el trabajo publicado en 1997 en donde consiguieron pulsos de rayos X coherentes con una longitud de onda de 2.7 nm con una duración de pocos femtosegundos, lo que corresponde a la longitud de onda coherente más corta conseguida hasta esa fecha (Chang et al., 1997). En 2008 se generaron pulsos aislados de attosegundos (Goulielmakis et al., 2008).

En el presente trabajo se tratan algunos de los conceptos más relevantes como qué es un láser, el efecto fotoeléctrico y qué es un attosegundo, también se presentan algunas de las técnicas utilizadas para la generación de pulsos ultracortos, de la misma manera se da un contexto sobre los primeros trabajos relacionados a la generación de pulsos láser y algunas de sus aplicaciones más relevantes. Por otra parte, se incluyen explicaciones sobre algunos de los fenómenos físicos que se aprovechan para generar pulsos de attosegundos, tal como la polarización, generación de armónicos y los tipos de armónicos que hay.

## 2. Breve historia del láser

El láser es un dispositivo que tiene diversas aplicaciones en áreas como la medicina, industria y telecomunicaciones (Ibarra

et al., 2018). Además puede definirse como: “Un instrumento que genera un haz de luz colimado y coherente” tal y como menciona Yadav (2009), los primeros indicios de su desarrollo se remontan al siglo XX, cuando Einstein publica su artículo titulado “On the Quantum Theory of Radiation” en el año de 1917, en esa publicación de aproximadamente 15 páginas trata aspectos como la derivación de la ley de radiación de Planck y un método para calcular el movimiento de las moléculas en un campo de radiación, (Einstein 2016). Con esto sentó las bases para poder obtener emisiones de onda controladas a partir de estímulos externos, pero no fue hasta años después, en 1928 cuando Kopfermann y Ladenburg sugieren que la absorción negativa de la teoría de Planck-Einstein sobre la radiación térmica debe incluir también una dispersión negativa, es decir, consiguieron de manera indirecta la emisión estimulada (Kopfermann y Ladenburg, 1928). En 1951 Fabrikant obtiene una patente junto a sus estudiantes, esta consiste en una amplificación de la radiación electromagnética (Gross, 2007). Maiman en 1960 consigue el primer láser utilizando rubí, en la Figura 1 se observa un esquema de la generación láser con este material. Esto fue posible ya que le hizo incidir radiación electromagnética al material con una longitud de onda de 5500 Å, esto provocó una excitación en los átomos de cromo la cual posteriormente decae, emitiendo longitudes de onda a 6929 y 6943 Å. (Maiman, 1960).

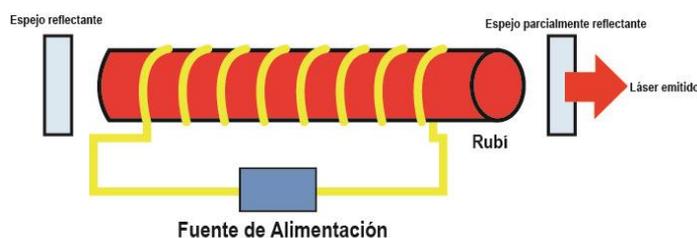


Figura 1: Esquema de láser generado a partir del rubí.

### 2.1. Mecanismo de funcionamiento

De una manera más específica, el nombre de “LASER” proviene de las siglas en inglés de “light amplification by stimulated emission of radiation” (Robert, 2023). Entonces de su nombre puede deducirse un poco del mecanismo que utiliza para generarse, siguiendo la misma nomenclatura la luz (light) es la principal protagonista de este mecanismo, la luz mejor conocida como radiación electromagnética se define como ondas eléctricas y magnéticas que están en fase y son perpendiculares entre sí, que se mueven a través del espacio impulsando una a otra sin necesidad de un medio. Esta radiación está compuesta por cuantos de energía denominados como fotones, los cuales su energía está descrita por la relación entre la constante de Planck  $h=6.63 \times 10^{-34}$  J\*s y la frecuencia de la onda de la siguiente forma:

$$E = h\nu \quad (1)$$

De la ecuación 1 se obtiene la energía de una onda en función de la frecuencia de la misma, este es el principio en el que se sustenta el efecto fotoeléctrico, el cual se atribuye su descubrimiento a Hertz en 1887 (Rodríguez, 2006). Pero no fue hasta que en 1905 Einstein reinterpreta las ondas de luz

como una serie de valores continuos localizados puntualmente en lugar de valor continuo, haciendo uso de la ecuación de Planck (Cassini y Levinas, 2008). Con esto Einstein teorizó que si la luz posee paquete de energía bien definidos entonces esa misma energía podría ser transferida a la materia, de esta manera se podrían provocar estados excitados en los átomos de un material logrando que algunos de los electrones que los componen sean liberados absorbiendo una fracción de la energía de la onda. Sin embargo, no toda la energía que es proporcionada por la onda consigue liberar a todos los electrones que excitó, algunos de ellos regresarán a su estado de mínima energía en el que se encontraban previamente, para esto no es posible que regresen a su estado con la energía absorbida, entonces emiten una fracción de energía en forma de fotones, Figura 2.

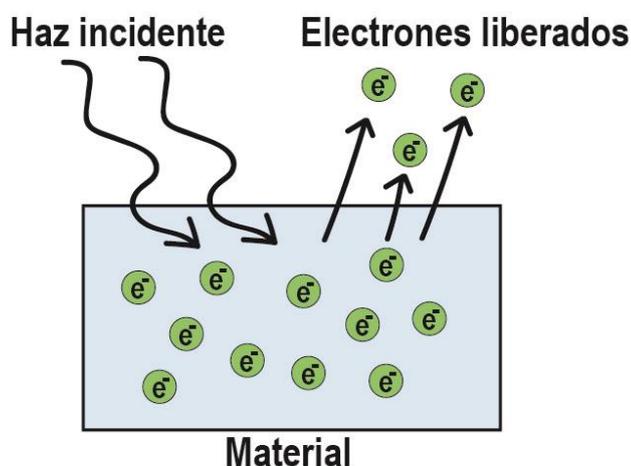


Figura 2: Mecanismo del efecto fotoeléctrico. Sobre un material se incide una radiación la cual al momento de interactuar con el material provocará un intercambio energético, lo que ocasiona que los átomos del material absorban energía del haz, esto podría darles la energía suficiente como para desprender algunos electrones de los átomos que conforman el material.

Para producir un láser no se requiere liberar electrones de un material, ya que lo que se busca con este es una emisión de radiación electromagnética, por esto solo es necesario excitar algunos átomos con una fuente de energía, para que en cuanto se corte el flujo de energía con el que se excitan los átomos, los electrones de un material tengan la necesidad de volver a su estado base y de esta forma liberen la energía absorbida en forma de fotones. Entonces se necesita un medio que pueda excitarse, el cual puede ser sólido, líquido o gaseoso según convenga, este medio se conoce como “medio activo” y puede estar hecho de elementos como el cesio en un ciclo cerrado tal y como muestra Bogachev et al., (2012), silicato dopado con bismuto según (Dvoyrin et al., 2006), o de gases como el CO<sub>2</sub> el cual ya tiene aplicaciones actualmente (Kumar y Gururaja, 2020).

También se requiere algo con lo que se va a excitar ese medio, es decir, algo que le proporcione energía al medio activo, esto es parte del mecanismo de excitación y se hace con técnicas como el bombeo óptico, una vez que se le suministra energía entonces ocurren fenómenos característicos de la emisión láser los cuales son, la emisión espontánea donde ocurre una transición de mayor energía a uno de menor energía siendo E<sub>2</sub> mayor a E<sub>1</sub>, y a una frecuencia ( $\nu$ ) que puede calcularse despejando la ecuación (1) y poniéndola en términos de una diferencia de energía:

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h} \quad (2)$$

Otro mecanismo que ocurre es el de la absorción estimulada, en la cual induce al medio activo a que sufra una transición de menor energía a una de mayor energía, por último, la emisión estimulada donde un átomo interacciona con la fuente de energía (radiación electromagnética a una cierta frecuencia) provocando que el átomo libere dos fotones, el que se le incidió en un inicio y otro nuevo (García y Ponce, 2011), los tres mecanismos anteriores se resumen en la Figura 3. Esto ocurre en cada átomo del medio activo, por lo que la liberación de energía en forma de fotones se ve aumentada según el número de átomos sobre los que se logre estimular, por eso se hace uso de dos espejos a los lados de donde está contenido el medio activo para conseguir que los fotones reboten e interaccionen con más átomos, provocando de esta manera una mayor cantidad de átomos excitados, provocando la denominada inversión poblacional. Uno de los espejos que se mencionó anteriormente es parcialmente reflectivo, por lo que permite el paso de la luz en un momento determinado, así que mientras más fotones se generen, algunos de ellos serán liberados a través de este espejo, cumpliendo con que esas ondas liberadas son monocromáticas, coherentes y colimadas, (Banús, 2008).

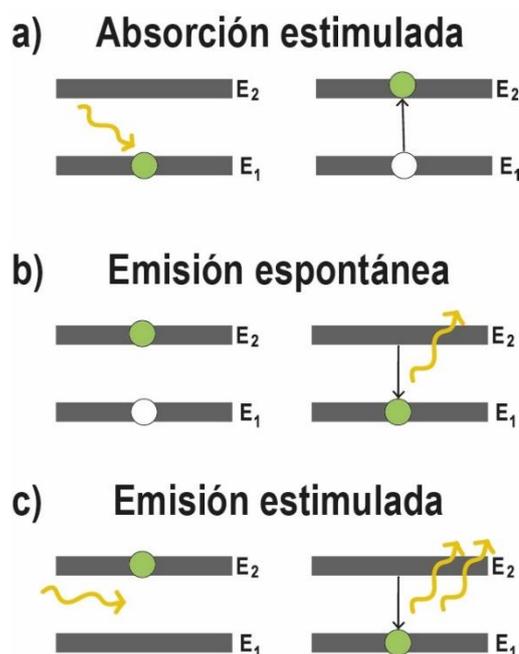


Figura 3: Mecanismos que ocurren para la generación de un láser. A la izquierda de cada sección se muestra el estado inicial y a la derecha el estado final de cada proceso. a) Absorción estimulada: Un haz de luz incide sobre un átomo y excita a un electrón, dándole la energía suficiente para pasar a un estado de mayor energía, b) Emisión espontánea: El electrón excitado regresa a su estado de menor energía previo y libera la energía absorbida en el paso anterior en forma de luz, c) Emisión estimulada: Un electrón de un nivel superior de energía, decae a un nivel inferior en presencia de un fotón, entonces el fotón que es emitido por el electrón es considerado igual al otro fotón.

## 2.2. Aplicaciones del láser

El láser es ampliamente utilizado en la industria y en muchas otras áreas, esto debido a que su implementación asegura mucha precisión. Por esta razón el láser es una

herramienta muy útil en sectores como la microtecnología, donde se incluye en procesos como la microsoldadura de componentes, e incluso en procesos de mecanizado (Gillner et al., 2005). En el área de la odontología ayuda a detectar caries utilizando fluorescencia inducida por láser, también para desinfección y para curar la resina aplicada en los dientes (Walsh, 2003). Actualmente en la medicina sirven para tratar una serie de patologías, como piedras urinarias mediante litotripsia, en la terapia térmica intersticial con láser y en terapia fotodinámica (Azadgoli & Baker, 2016).

### 3. Manfred Eigen y las reacciones químicas ultrarrápidas

Para saber lo que pasa en un proceso que se lleva a cabo muy rápido es necesario disponer de algo igual de rápido que se pueda medir, de lo contrario se conocerían únicamente intervalos del proceso cada cierto tiempo. Por ejemplo, si se le quiere tomar una foto a algo que se mueve rápidamente, la foto muy probablemente salga borrosa ya que inicialmente la cámara no tiene la configuración precisa como para registrar una imagen en un instante, para solucionar esto se debe modificar algo conocido como “velocidad de obturación”, si este parámetro tiene valores considerados como “rápidos” 1/1000, 1/2000, etc., entonces la cámara podrá capturar fotografías de cuerpos en movimiento sin que estas salgan borrosas, esto es porque prácticamente capturó un instante preciso de ese movimiento en un intervalo muy corto de tiempo, como se muestra en la Figura 4. Esta analogía es claramente aplicable a otros ámbitos científicos, por ejemplo, si se quiere saber cómo ocurre una reacción química en cada una de sus etapas también se necesitaría un equipo que pueda registrar de manera rápida y precisa la información más relevante que ocurre en la reacción química, Manfred Eigen a mediados del siglo XX tuvo la idea de estudiar reacciones químicas ultrarrápidas, utilizando el método de relajación. Este método es aplicable para todas las reacciones que ocurren en un tiempo de segundos hasta cantidades menores a un segundo, se realiza con una modificación del equilibrio químico aplicando una perturbación externa como temperatura y presión (Manfred y Gordon 2009), en 1967 ganó el premio Nobel de química por sus estudios en reacciones químicas ultrarrápidas.

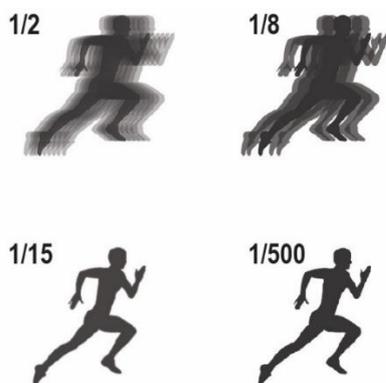


Figura 4: Descripción gráfica de cómo afecta la velocidad de obturador a la fotografía tomada por una cámara, se parecía que mientras más rápida sea más capacidad tiene de capturar cuerpos en movimiento, es una analogía que ejemplifica lo que se busca con la generación de pulsos ultrarrápidos.

### 4. La femtoquímica

En 1999 Ahmed Zewail recibe el premio Nobel por analizar reacciones químicas en tiempos más pequeños que los que había considerado Manfred Gein (Hargittai, 2024). En esos años se tenía tal control de las etapas de reacción que ya se tomaban escalas de tiempo de picosegundos  $10^{-12}$  s y se consideraba la posibilidad de utilizar femtosegundos  $10^{-15}$  s a partir de pulsos de láser para observar la reacción de moléculas de yodo con el gas xenón (Potter et al., 1992). Decenas de femtosegundos son suficientes para estar a la misma escala de tiempo de las vibraciones en las moléculas o para observar la formación de enlaces químicos, para conocer de una manera más clara la magnitud que representa un femtosegundo es posible hacer una relación con una escala conocida respecto a una más grande, entonces un femtosegundo es tan pequeño respecto a un segundo, como un segundo lo es a 32 millones de años, la luz en un femtosegundo recorrería una distancia de tres micras (Cardoso et al., 2000).

### 5. Los Attosegundos

La escala atómica es muchas veces más pequeña comparada con el mundo macroscópico, además se sabe que a esa escala también ocurren movimientos de los átomos o moléculas, ya sean vibraciones o desplazamientos. Sin embargo, estos movimientos ocurren en longitudes muy inferiores a las que los seres humanos están acostumbrados, es por ello que si se tratan de aplicar las magnitudes de tiempo del mundo microscópico a lo anterior, se habla de que estos movimientos ocurren en fracciones de segundo, esto quiere decir que las cosas a pequeña escala ocurren “más rápidamente” y por esta razón surgieron escalas de tiempo que corresponden a fracciones de segundo, por ejemplo un picosegundo ( $1 \times 10^{-12}$  s) y el femtosegundo ( $1 \times 10^{-15}$  s). Una de las primeras propuestas para generar attosegundos surgió a partir de un método basado en la síntesis de Fourier con láser para inducir armónicos, donde consiguieron producir pulsos láser de entre 30-70 as (Farkas et al., 1992). Los armónicos de alto orden llamaron la atención de investigadores para producir pulsos de láser muy rápidos o ultracortos, desde la invención del láser el principal objeto de estudio fue el de encontrar una manera para que los pulsos láser sean más rápidos, una forma de obtener esto era considerando que para un sistema cuántico la emisión armónica está determinada por el módulo al cuadrado de la segunda derivada del momento dipolar y es necesario encontrar este momento en función del tiempo (Corkum et al., 1994). En 1999 se publica un artículo donde se observa un subfemtosegundo a partir de la superposición de armónicos de alto orden en gas de argón (Papadiogiannis et al., 1999). Si un pulso láser intenso se dirige hacia un gas, se producen armónicos de alto orden, en un gráfico de emisión de estos armónicos se observaría que son emitidos en cantidades impares de energía (Paul, 2001).

Un mecanismo de ionización muy utilizado es el de efecto túnel, este efecto consiste en que una partícula puede superar una barrera de potencial, incluso cuando en principio no tiene la energía suficiente para pasar este límite desde el punto de vista clásico (Nuñez et al., 2017). La ionización puede también con la técnica de ionización multifotónica, para distinguir entre

ambos métodos se utiliza el parámetro de adiabaticidad, el cual fue desarrollado por Keldysh, y se puede expresar por la ecuación 3:

$$\gamma = \frac{\omega\sqrt{2E_B}}{F} = \frac{Z\omega}{n*F} \quad (3)$$

Donde  $\omega$  es la frecuencia del láser,  $F$  es la amplitud del láser y  $E_B = Z^2/2n^2$  se refiere a la energía de enlace, de aquí se deduce que cuando  $\gamma \ll 1$  la ionización por efecto túnel domina, pero cuando  $\gamma \gg 1$  lo hace la ionización multifotónica (Bauer, 2016). Un modelo que también sirve para encontrar la tasa de ionización es el ADK o teoría ADK (Amosov-Delone-Krainov) considerando un átomo de hidrógeno y un campo eléctrico estático (Tong et al., 2002).

### 5.1. La técnica RABBITT

Este método se realiza midiendo los espectros medidos de los fotoelectrones los cuales son emitidos por un gas que es excitado, estos espectros tienen un comportamiento discreto separados por una distancia dada por  $2\omega\hbar$ , la frecuencia corresponde a un pulso de infrarrojo (Calegari et al., 2016). Las siglas RABBITT se refieren a “reconstruction of attosecond harmonic beating by interference of two-photon transitions”, (Pazourek et al., 2013). En la técnica RABBITT la medición de fotones en el ultravioleta extremo o XUV se hace mediante fotoemisión a través del efecto fotoeléctrico (Baykusheva y Wörner, 2021).

### 5.2. Cámara Streak

Los láseres con pulsos ultracortos tienen un periodo más corto que el de una vibración en una molécula, si estos pulsos interactúan con los electrones en un material de tal manera que se supera el campo eléctrico de los propios electrones, entonces ocurre ionización. Cuando se incluye un campo IR en los armónicos se generan picos adicionales a los generados en un inicio, estos se deben a la absorción o emisión de fotones IR.

Una cámara streak es un instrumento que sirve para medir pulsos de luz, es decir qué tan intensos son con respecto al tiempo. Este método fue presentado en 2001 con la intención de dar a conocer una forma con la cual se pueda medir un pulso de rayos X, para ello tomaron en cuenta dos consideraciones:

- El subciclo de oscilación del campo eléctrico del láser sirve para determinar la duración del pulso.
- La señal del fotoelectrón que es emitida por el láser es resuelta en ángulo y energía.

Con ello la resolución obtenida da una resolución de menos de 100 as, para ello el campo del láser con respecto del pulso de rayos X debe ser menor a:

$$2\pi\left(\frac{\tau_\omega}{\tau_L}\right) \quad (4)$$

Un fotoelectrón aparece con una energía cinética de:

$$W_o = \frac{v_o^2}{2} \quad (5)$$

Y su velocidad final es:

$$v_f = v_o - \frac{A(t)}{c} \quad (6)$$

Donde  $A(t)$  es el vector potencial, todo esto según lo que menciona Ryabikin et al., (2023). El cuerpo de una cámara de este tipo consiste en un tubo, en un inicio la luz atraviesa por una apertura hasta golpear el fotocátodo que la convierte en electrones, proporcionalmente a la intensidad de la luz, el fotocátodo está ubicado al inicio del tubo y los electrones generados pasan por unos electrodos a los cuales se les aplica un voltaje elevado, este está sincronizado con la luz incidente. Los electrones siguen avanzando, pero son desviados ligeramente hasta entrar en contacto con una placa de microcanales (micro-channel plate, MCP) donde se multiplica la intensidad de las partículas que entran en contacto mediante emisión secundaria. Una vez que atraviesan la MCP colisionan con una pantalla fluorescente de fósforo y esa señal es nuevamente convertida en luz (Saarela et al., 2004).

## 6. Técnicas espectroscópicas del attosegundo

Los átomos que se someten a campos electromagnéticos intensos pierden electrones y se convierten en iones, en lo attosegundos es muy utilizada la generación de altos armónicos (HGG) por sus siglas en inglés, con esto se consiguen pulsos de luz UV de attosegundos, los cuales tienen energías de pulso bajo en un rango de femtojoules o nanojoules (Kretschmar, et al., 2024). Desde que se consiguió por primera vez la generación de los attosegundos se ha buscado la forma de medirlo a partir de diferentes técnicas, todo esto benefició el conocimiento aspectos como el retraso de la fotoemisión y el movimiento de los electrones (Borrego et al., 2022). La espectroscopía hace uso de la radiación para explorar el comportamiento de sistemas físicos, si es un sistema muy pequeño entonces este estará regido bajo la física cuántica, esta clase de estados pueden ser estudiados con espectroscopía línea. La espectroscopía resuelta en el tiempo o de resolución temporal es utilizada en la actualidad para fases líquidas, sólidas o gaseosas (Pfeifer et al., 2008).

### 6.1. Espectroscopía de absorción transitoria (ATAS)

Es una técnica espectroscópica muy utilizada para hacer estudios dinámicos muy rápidos que ocurren en escalas de tiempo más rápidas a la del femtosegundo, la resolución temporal en esta técnica depende del control del desfase relativo y los pulsos de prueba, permite además la caracterización de sistemas con una dinámica ultrarrápida y picos espectrales muy próximos, respetando los límites de Fourier (Santra et al., 2011). Las medidas de esta técnica se realizan en la región del infrarrojo, el espectro visible y el ultravioleta, en la actualidad es posible generar pulsos láser muy rápidos aislados (Henstschel et al., 2001). Por su nombre

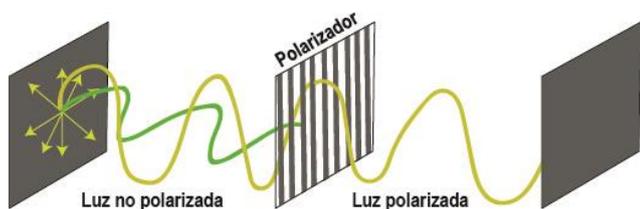
en inglés se abrevia como ATAS, desde el año 2010 ha servido para estudiar la dinámica de los átomos, esta ha permitido observar el movimiento de los electrones de valencia en un átomo Kriptón a partir de un campo ionizado (Goulielmakis et al., 2010), la autoionización del Argón con un pulso aislado de láser NIR (Wang et al., 2010) y el control de la dinámica de dos electrones de Helio (Ott et al., 2014) tal y como menciona (Bækthøj et al., 2015).

## 6.2. Espectroscopía de altos armónicos (HGG)

Técnicas que incluyen campos fuertes han sido utilizados para estudiar el tiempo a la escala de los attosegundos, una característica interesante de esto es que puede conseguirse sin la necesidad de producir pulsos de luz (Kraus y Wörner, 2018). Estos armónicos pueden producirse de diferentes maneras, por ejemplo, en 1993 se logró generar impulsos a partir de átomos de Neon, utilizando pulsos láser en femtosegundos de 805 nm en dirección al gas, dando como resultado, armónicos de orden 109 nm (Macklin et al., 1993). Un electrón de un átomo bajo la influencia de un campo de algún láser pasa por distintas etapas entre las que están la ionización, aceleración y recombinación, la energía que ganó el electrón durante su interacción con el láser se convierte en un fotón de alta energía hasta que se vuelve a su estado fundamental, como en un gas la distancia entre los átomos es considerablemente grande, entonces pueden ser tomados en cuenta cada uno de manera individual y por lo tanto, cada uno de ellos es una fuente de HGG (Park, et al., 2022).

En un cristal en bulto la generación de armónicos se atribuye también a un movimiento electrónico sometido a un láser (You, et al., 2017). En un artículo publicado en 2011 se mostró por primera vez una observación experimental de armónicos de alto orden no perturbativos utilizando pulsos láser del infrarrojo medio de entre 0.34 y 0.38 eV, donde también se observa una dependencia del espectro en números pares o impares en función de la orientación cristalográfica, de acuerdo a sus resultados de polarización lineal, elíptica y circular, el comportamiento muestra una menor sensibilidad a la polarización elíptica y para revertir el proceso hace falta aplicar polarización circular (Ghimire et al., (2011).

## 7. Los armónicos



Fourier desarrolló un método para poder expresar mediante sumas trigonométricas de senos y cosenos a una función periódica, es decir, una función con amplitud y frecuencia constantes (González, 1997). Esto es aplicable siempre que se cumplan las condiciones:

- La integral a lo largo de un periodo de una función es un resultado finito.

- Que la función posea finitas discontinuidades en un periodo.
- El número de máximos y mínimos en un periodo sea finito.

Esto según lo que menciona Arcila (2010), matemáticamente una función periódica es:

$$f(t) = f(t + T) \quad (7)$$

La frecuencia  $f$  es el número de ciclos que hay en una onda cada segundo o el inverso del periodo  $T$ :

$$f(t) = 1/T \quad (8)$$

Como cada ciclo es igual a dar una vuelta completa en una circunferencia, entonces el recorrido de un ciclo es lo mismo que decir que se recorrió  $2\pi$  rad, esto es conocido como pulsación o frecuencia angular, González (2003). Expresado es:

$$\omega_0 = 2\pi/T \quad (9)$$

Toda serie trigonométrica  $2\pi$  es de la forma:

$$\frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^N (a_k \cos kx + b_k \sin kx) \quad (10)$$

Donde  $a_k$  y  $b_k$  son de la forma:

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos kx \, dx \quad (11)$$

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin kx \, dx \quad (12)$$

Estos valores de la ecuación 11 y 12 son conocidos como los coeficientes de Fourier (Duoandikoetxea, 2003). Es de suma importancia conocer una manera en la cual descomponer una onda, esta onda es conocida como onda fundamental y todas las ondas en las que se descompone son las que se conocen como frecuencias armónicas, las cuales son múltiplos enteros de la onda fundamental (Chapman, 2010).

## 8. Polarización

La polarización de la luz es un fenómeno que puede sufrir la radiación electromagnética en el cual la luz se orienta en direcciones específicas, o sea que se restringe el paso de la luz que está orientada de otra manera (Vera et al., 2023), en la Figura 5 se ilustra el proceso de polarización.

Figura 5: Esquema de la polarización de la luz. En un inicio la luz surge de una fuente de emisión y posteriormente se desplaza en una dirección, si se coloca en medio de su camino un polarizador (un instrumento que restringe el paso de la luz a una dirección), entonces la luz que atraviesa al polarizador tendrá restringida las direcciones en las que se propaga.

### 8.1. Polarización lineal

En este tipo de polarización la luz es confinada a lo largo de un único plano en dirección de donde se está propagando la onda. El campo eléctrico oscila en un plano y el campo magnético el cual es perpendicular al eje de propagación y al campo eléctrico oscila en otro plano, pero solo se considera la oscilación del campo eléctrico para considerar la polarización, si ocurre este tipo de polarización puede clasificarse como vertical u horizontal.

### 8.2. Polarización circular

Es muy similar a la polarización lineal, pero una vez que atraviesa el polarizador, el campo electromagnético tiende a rotar, el sentido de la rotación subclasifica los tipos de polarización circular. La onda se mueve en un patrón helicoidal y la trayectoria circular en definición cambia continuamente debido a la dirección de propagación, esto les da mayor resistencia a perturbaciones externas (Chattopadhyay y Bharti 2019).

### 8.3. Polarización elíptica

En la polarización circular la amplitud de dos componentes con valor de  $\pi/2$  respecto a su diferencia, si estos dos componentes exhiben diferentes amplitudes entonces se produce luz polarizada elípticamente, la polarización lineal y circular se consideran como casos de la polarización elíptica, en este caso se llama polarización elíptica porque la propagación del campo eléctrico traza una elipse, estas polarizaciones se ilustran en la Figura 6.

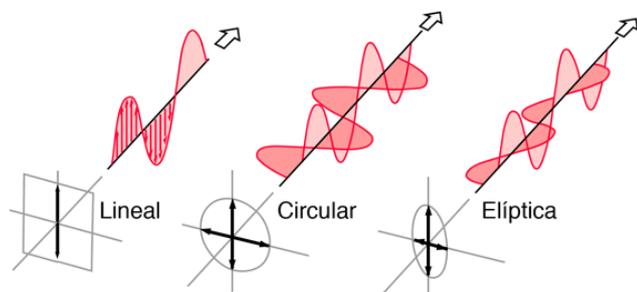


Figura 6: Ilustración de los tres tipos de polarización. Imagen recuperada de: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/phyopt/polclas.html>

## 9. Pulsos de attosegundos

La fase estabilizada ha sido estudiada en diversos artículos donde tratan la ionización, en el artículo de Maurisson et al., (2006) presentan un trabajo sobre la generación de pulsos en el ultravioleta extremo (XUV) de unos cuantos ciclos, los pulsos son producidos seleccionando armónicos a partir de Argón: Utilizando un interferómetro de Michaelson separaron los pulsos obtenidos, de esta manera mostraron la posibilidad de que los pulsos pares e impares puedan ser sincronizados y separados por un ciclo IR.

La generación de armónicos (HHG) es un proceso de tres etapas (Corkum, 1993). La intensidad total de una serie de armónicos según Anoine, et al., (1996) siempre que tengan la misma amplitud está en función de su periodicidad:

$$\frac{T_L}{2} = \frac{\pi}{\omega} \quad (13)$$

La generación de pulsos de alta energía mediante pulsos aislados y la posibilidad de estudiar procesos electrónicos a una escala de tiempo tan pequeña, como lo es la attoescala ha provocado que se abran nuevos campos de estudio tanto en investigación como en tecnología, el uso de láseres para producir pulsos cortos y de alta energía, sumado a los avances en generación de pulsos a partir de XUV y materiales sólidos apertura la posibilidad de producir attosegundos desde diferentes maneras (Nisoli y Sansoni, 2009).

Si la radiación UV o de rayos X se genera con armónicos impares se genera un pulso de attosegundo si ocurre un medio ciclo de algún armónico (Ryabikin et al., 2023).

## 10. Tiempos más pequeños que un segundo

Como se mencionó anteriormente los femtosegundos y los attosegundos son escalas de tiempo correspondientes a fracciones de tiempo muy pequeñas, sin embargo, estas dos no son las únicas que se han considerado, ni los femtosegundos fueron la única escala que se utilizó en un inicio ni los attosegundos son la barrera en la que el avance científico se detendrá, algunas fracciones de segundo son las siguientes:

- **Milisegundos:** Sencillamente se define como la milésima parte de un segundo o 0.001s, se abrevia como “ms”.
- **Centisegundos:** Es un segundo dividido en 100 partes o 0.01s=1 cs.
- **Decisegundos:** Un segundo dividido en 10 partes o 0.1s= 1 ds.
- **Microsegundos:** La millonésima parte de un segundo, se simboliza como  $\mu$ s. Los destellos de una cámara son tan rápidos que usan estas escalas de tiempo,  $1 \times 10^{-6}$  s.
- **Nanosegundos:** Es la milmillonésima parte de un segundo, se representa como ns, un segundo, por lo tanto, es 1000000000 ns o  $1 \times 10^{-9}$  s.
- **Picosegundos:** La fracción que corresponde a la billonésima parte de un segundo, o sea que  $1 \text{ps} = 1 \times 10^{-12}$  s, esta unidad ayuda a describir la vibración de algunos grupos de átomos o moléculas.
- **Femtosegundos:** Esta escala de tiempo es muy inferior a las anteriores, además supuso uno de los primeros avances en el estudio de reacciones químicas, al igual que los picosegundos. Un femtosegundo es la milbillonésima parte de un segundo,  $1 \text{fs} = 1 \times 10^{-15}$  s, el tiempo de vibración de las moléculas se ajusta perfectamente a esta fracción de tiempo.
- **Attosegundos:** Si la fracción de segundo anterior era ya sorprendente, aún no era suficiente para describir de manera precisa cada etapa de los movimientos que

ocurren a escalas pequeñas, un attosegundo es la trillonésima parte de un segundo,  $1 \text{ as} = 1 \times 10^{-18} \text{ s}$ , esta escala se ajusta más a la dinámica de los átomos.

- **Zeptosegundos:** Es la miltrillonésima parte de un segundo, entonces por cada segundo hay miltrillones de zeptosegundos, esto es  $1 \text{ zs} = 1 \times 10^{-21} \text{ s}$ , encajaría con la dinámica dentro del núcleo de un átomo.

Para comprender la magnitud de estos tiempos, es posible hacer la comparación con la distancia que recorrería la luz en ese tiempo, considerando la velocidad de la luz en el vacío la cual es de  $299,792,458 \text{ m/s}$  o  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ , esto significa que la luz cada segundo recorre esta distancia, pero con las escalas de tiempo mostradas anteriormente se da a notar que muchas de ellas ocupan fracciones de segundo muy pequeñas, o sea que la luz recorre menos distancia considerando esos tiempos, pero para saber qué tan pequeña es la distancia que recorrería la luz tomando en cuenta lo anterior, en la Tabla 1 se resume la distancia recorrida por la luz en milisegundos, centisegundos, decisegundos, etc.

Tabla 1: Distancia recorrida por la luz en un segundo y en distintas fracciones de segundo.

Tiempo en un:	Distancia recorrida por la luz:
Segundo	299,792,458 m
Decisegundo	29,979,245.8 m
Centisegundo	2,997,924.58 m
Microsegundo	299.792458 m
Nanosegundo	29.9792 cm
Picosegundo	299.79 $\mu\text{m}$
Femtosegundo	299.79 nm
Attosegundo	2.9979 $\text{Å}$
Zeptosegundo	0.2997 pm

La luz es tan rápida que en un segundo recorrería aproximadamente 7.5 veces la circunferencia de la tierra, por esta razón el conseguir pulsos de luz inferiores a un segundo es de suma importancia, en un microsegundo recorrería la distancia correspondiente a 3 campos de fútbol, cada nanosegundo la luz se desplazaría de un punto a otro a lo largo de una regla promedio de 30 cm, en un attosegundo la luz recorre poco menos de la distancia entre dos átomos ubicados en los vértices de una celda unitaria de cobre del tipo cúbica con  $a=3.61 \text{ Å}$ , en la Figura 8 se ilustra el tiempo que le tomaría a la luz recorrer una distancia equivalente a la altura de la Torre Eiffel y a una regla.

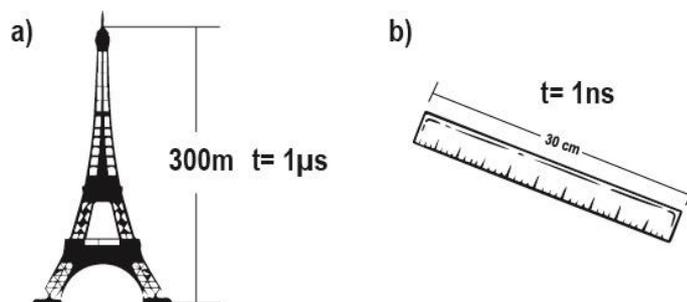


Figura 7: Distancia que recorrería la luz en tiempos menores a un segundo. a) En un microsegundo la luz podría llegar desde debajo de la Torre Eiffel hasta casi su parte más alta, b) En un nanosegundo la luz recorrería la longitud de una regla de 30 cm.

### 10.1. Mecanismo de tres pasos

Para conseguir tiempos tan pequeños que son fracciones de segundo, se puede recurrir al mecanismo de tres pasos, de manera más clara se hacen incidir pulsos láser en fs a un gas, esto genera armónicos de orden alto, todo esto según Antonio (2011) quien también resume estos pasos como:

- **Ionización:** Se hace inducir un fuerte campo láser de infrarrojo, esto puede generar un efecto túnel, esto determina la probabilidad de que ocurra la ionización.
- **Aceleración:** Los electrones ganan energía cinética de entre 50 y 1000 eV.
- **Recombinación:** En esta etapa es probable que se produzca dispersión inelástica, la recombinación entre el electrón liberado y los iones generados provocan una emisión fotónica de attosegundos. En la Figura 8 se observa de manera gráfica este mecanismo.

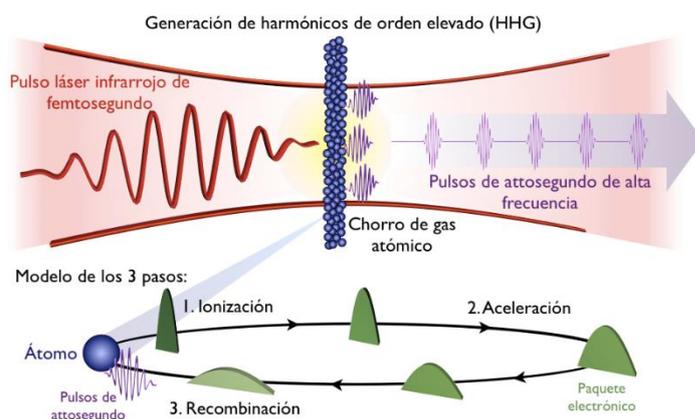


Figura 8: Generación de attosegundos a partir de armónicos de orden elevado y mecanismo de 3 pasos.

Imagen recuperada de: <https://www.dicyt.com/blogs/attociencia/?p=7>

## 11. Paquetes de ondas

Los procesos que ocurren a nivel cuántico se describen por medio de ondas que pueden interferir entre ellas, por esta razón la interacción de los átomos se hace con paquetes de ondas, el movimiento de los átomos se describe mediante superposición

de estados vibracionales respetando la relación de incertidumbre:

$$\Delta x \Delta p = \hbar \quad (14)$$

Esto se refiere a que el pulso de láser provoca un ensanchamiento en la energía con una localización de la posición, todo esto tal y como menciona Antonio (2007).

## 12. El Nobel de Física y los láseres

El premio Nobel de Física del año 2023 se entregó a tres científicos, Pierre Agostini, Anne L’Huillier y Ferenc Krausz, “por sus métodos experimentales que generan pulsos de luz de attosegundos para el estudio de la dinámica electrónica en la materia”. Las investigaciones relacionadas a la obtención de attosegundos tienen décadas, aunque evidentemente en un inicio no se comenzó con la búsqueda directa de attosegundos, se partieron de tiempos más accesibles hasta que se llegó a los impulsos láser actuales. En 1988 Anne L’Huillier y sus colaboradores observaron la generación de armónicos de alto orden a partir de láser, en 1990 no se tenían las herramientas adecuadas como para determinar la evolución temporal de la radiación UV y no se tenía claro si el pulso emitido era lo suficientemente corto, posterior a esto Ferenc Krausz desarrollaron una técnica de medición, Pierre Agostini casi al mismo tiempo obtenía pulsos de 250 as (Dumbe y Schultze 2023).

En la Figura 9 se puede observar cómo ha ido avanzando la ciencia de los pulsos láser desde los años 60 hasta por lo menos 10 años antes de que se entregara el Nobel de física por las aportaciones en esta área, en los años 60 apenas se entraba al rango de los nanosegundos y 10 años después se conseguían pulsos láser de picosegundos, en 1990 se conseguía sobrepasar la barrera de los picosegundos para llegar a los femtosegundos y para el año 2023 los attosegundos son generados de diferentes maneras.

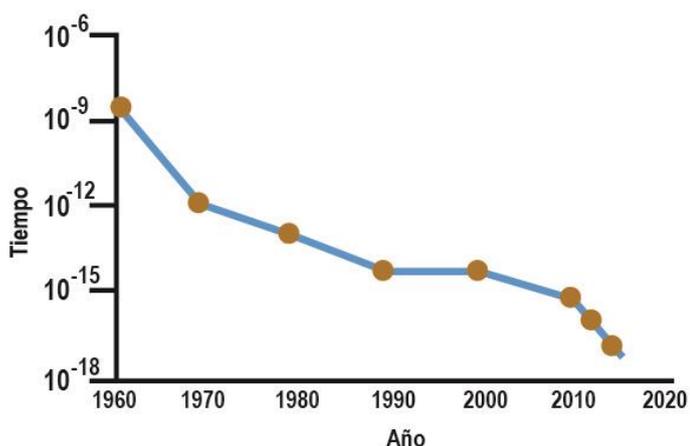


Figura 9: Evolución de los pulsos láser ultrarrápidos desde los años 60. Recuperada del trabajo de Chacón (2014).

Sin embargo, este no es el único premio Nobel que se entrega a científicos que investigan temas relacionados a los láseres (hablando de épocas recientes). En el año 2018 Arthur Ashkin, Gérard Mourou y Donna Strickland recibieron el Nobel por sus trabajos relacionados a pinzas ópticas y sus aplicaciones biológicas, estos dispositivos tienen la capacidad

de atrapar, desplazar y separar partículas muy pequeñas, esto puede conseguirse con pulsos ultracortos (Ramírez, 2019).

Los trabajos sobre pinzas ópticas también comenzaron a desarrollarse casi a la par del descubrimiento de los pulsos láser, cuando se demostró la posibilidad de atrapar partículas dieléctricas en aire y agua se encontró una nueva forma de mover cosas muy pequeñas. Si era posible atrapar una partícula, eso significaba que con un control del láser, haciendo referencia a su posición y dirección, entonces podrían moverse cosas que estuvieran confinadas en él (Lobato et al., 2022).

Con las pinzas ópticas los científicos han obtenido una nueva herramienta para manipular objetos muy pequeños, como la manipulación de nanomateriales en alguna superficie teniendo total control del procedimiento (Polimeno et al., 2018). Las pinzas ópticas se transformaron entonces en una herramienta muy importante y con posibilidad de aplicación en áreas como la biología, física, química, biofísica, biotecnología (Sepulveda et al., 2007).

Entonces con esto se da a notar que los pulsos láser tienen una gran implicación en diferentes áreas de la ciencia, no solamente sirven para “fotografiar” movimientos muy rápidos, también ayudan a la manipulación de cosas muy pequeñas, por lo que los avances en esto han sido tan relevantes que dos de los premios Nobel más recientes se han entregado a científicos que trabajan con temas relacionados a este tema. En la Figura 9 se muestran algunos de las cosas que ocurren a escalas de tiempo inferiores a un segundo.

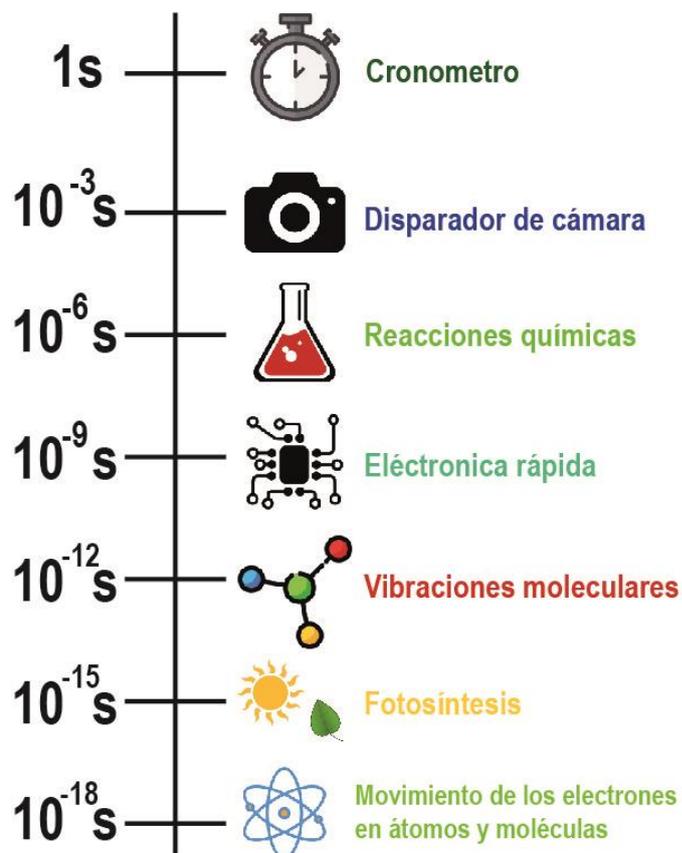


Figura 10: Escalas de tiempo inferiores a un segundo y cosas que ocurren a esas escalas. Adaptada de The Royal Swedish Academy of Science. The Nobel Prize in Physics 2028. Popular Science Background, pp. 5

### 13. Conclusiones

Desde principios del siglo XX con el surgimiento de la teoría cuántica se ha tenido un mayor entendimiento del comportamiento que tiene la materia a escalas microscópicas, como moléculas, átomos y electrones. Esta comprensión del mundo a pequeña escala ha permitido que se pueda hacer uso de la naturaleza de los átomos, con el fin de obtener un comportamiento aprovechable para la investigación científica. Tal y como lo hizo Einstein en 1917, cuando se anticipó a la invención del láser prediciendo de cierta manera cómo podría llevarse a cabo la emisión estimulada a partir de estímulos externos. Esto sumado a los esfuerzos de diversos científicos como Kopfermann, Ladenburg, Fabrikant y Maiman, finalmente se consiguió la primera emisión láser, en la actualidad el láser es tan importante que es utilizado en área como medicina, a nivel industrial tanto para corte como para unión de piezas, para detección de gases, detección de movimiento, etc. Sin embargo, es importante recordar que un láser es un haz de luz, por lo que la velocidad a la que se propaga por el espacio es tan rápida como el medio le permita, considerando fenómenos de difracción y dispersión.

Los movimientos subatómicos como el de los electrones y la velocidad a la que ocurre una reacción son tan rápidos que la mayoría de las veces no demoran un segundo en ocurrir. Es por ello que Manfred Eigen se propuso encontrar una manera con la que se pueda analizar experimentalmente lo que ocurre a esta escala de tiempo y de tamaño, este es sin duda uno de los antecedentes más importantes en esta área de estudio. La importancia del láser para esto radica en lo que se mencionaba con anterioridad, es un haz de luz, se sabe que la luz se mueve a una velocidad constante en el vacío y que nada puede moverse más rápido, entonces un láser resulta ser un aliado importante si se quiere analizar paso a paso cómo se mueve un electrón o cómo ocurre una reacción química, aunque para ello no se puede hacer uso de láseres que emiten continuamente radiación, esto es por la misma razón que una cámara necesita una velocidad de obturación más rápida si se quiere tomar una foto de un cuerpo en movimiento.

Si se usa un láser que emite continuamente radiación de cierta manera se estaría capturando información durante todo el tiempo que el láser esté propagándose linealmente hacia un objeto de interés. Entonces para solventar esta cuestión se tuvo que desarrollar una metodología con el objetivo de generar pulsos láser ultracortos, de esta manera estos pulsos se emitirían a la misma velocidad que tarda un electrón en moverse por una determinada distancia o a la misma velocidad a la que vibra una molécula, es ahí donde se radica la importancia de los pulsos láser ultracortos y de todas las técnicas que existen para generarlos o para aprovecharlos en el estudio de la materia. La generación de pulsos con una duración de fracciones de segundo con el paso de los años se ha ido mejorando y cada vez se obtienen pulsos más rápidos, en sus inicios las escalas de tiempo eran de picosegundos, después se consiguieron pulsos en femtosegundos y actualmente se ha conseguido generar pulsos de unos cuantos attosegundos, el reto a futuro será ir acortando cada vez más estas fracciones de tiempo lo suficiente como para poder estudiar de manera experimental la dinámica de sistemas subatómicos y conocer de una manera más detallada cómo se comporta la materia a pequeña escala e incluso poder

manipularla con el fin de favorecer el desempeño de computadoras.

### Agradecimientos

Los autores agradecen al CONAHCYT por el apoyo financiero a R. Flores-Cruz en el programa de doctorado (432) en el Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales e Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

### Referencias

- Antoine, P., L'Huillier, A., & Lewenstein, M. (1996). Attosecond Pulse Trains Using High-Order Harmonics. *Physical Review Letters*, 77(7), 1234–1237. doi:10.1103/physrevlett.77.1234
- Antonio, J. S. (2007). Ciencia Ultrarrápida: Desvelar y controlar la danza de los átomos. *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 101(2), 329-346.
- Antonio, J. S. (2011). Dinámica de los electrones con pulsos láser ultrarrápidos: Hacer cine en attosegundos. *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (Esp)*, 105(1), 129-149.
- Arcila, J. D. (2010). Armónicos en sistemas eléctricos. *Ieb Sa*, 1-26.
- Azadgoli B, Baker RY. Aplicaciones láser en cirugía. *Ann Transl Med*. 2016 Dic;4(23):452. doi: 10.21037/atm.2016.11.51. PMID: 28090508; PMCID: PMC5220034.
- Bækhoj, J. E., Yue, L., & Madsen, L. B. (2015). Nuclear-motion effects in attosecond transient-absorption spectroscopy of molecules. *Physical Review A*, 91(4). doi:10.1103/physreva.91.043408
- Banús Gassol, J. M. (2008). Física del láser. *Archivos Españoles de Urología (Ed. impresa)*, 61(9), 961-964.
- Bauer, J. H. (2016). Keldysh theory re-examined. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 49(14), 145601.
- Baykuseva, D., & Wörner, H. J. (2021). Attosecond Molecular Dynamics and Spectroscopy. In *Molecular Spectroscopy and Quantum Dynamics* (pp. 113-161). Elsevier.
- Beléndez, A. (2010). Una revolución para la óptica: cincuenta aniversario del láser.
- Bocos, J. L., Zubiri, F., Garcandía, F., Peña, J., Cortiella, A., Berrueta, J. M., & Zapirán, F. (2004). Aplicación del láser de diodo para la soldadura en tailored blanks. *Revista de metalurgia*, 40(2), 146-151.
- Bogachev, A. V., Garanin, S. G., Dudov, A. M., Eroshenko, V. A., Kulikov, S. M., Mikaelian, G. T., ... & Sukharev, S. A. (2012). Diode-pumped caesium vapour laser with closed-cycle laser-active medium circulation. *Quantum Electronics*, 42(2), 95.
- Borrego-Varillas, R., Lucchini, M., & Nisoli, M. (2022). Attosecond spectroscopy for the investigation of ultrafast dynamics in atomic, molecular and solid-state physics. *Reports on Progress in Physics*, 85(6), 066401.
- Calegari, F., Sansone, G., Stagira, S., Vozzi, C., & Nisoli, M. (2016). Advances in attosecond science. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 49(6), 062001.
- Cardoso, Ó. O., Castañares, R. L., & Carvajal, E. C. (2000). La femtoquímica y el premio Nobel de 1999. ¿Cómo seguir paso a paso una reacción química?. *CIENCIA ergo-sum*, 7(3), 292-299.
- Cassini, A., & Levas, M. L. (2008). La explicación de Einstein del efecto fotoeléctrico: un análisis histórico-epistemológico. *Revista latinoamericana de filosofía*, 34(1), 5-38.
- Chacón Salazar, A. A. (2014). Interaction of attosecond and femtosecond pulses with atoms and molecules.
- Chang, Z., Rundquist, A., Wang, H., Murnane, M. M., & Kapteyn, H. C. (1997). Generation of coherent soft X rays at 2.7 nm using high harmonics. *Physical Review Letters*, 79(16), 2967.
- Chapman, D. (2010). Armónicos causas y efectos.
- Chattopadhyay, D., & Bharti, M. (2019). Implementation of C-PolSK Modulation in FSO Network and Analysis of its Atmospheric Performance. *Journal of Telecommunications and Information Technology*.
- Chmura, L. G., & Convissar, R. A. (2015). Lasers in orthodontics. *Principles and Practice of Laser Dentistry-E-Book: Principles and Practice of Laser Dentistry-E-Book*, 203.
- Corkum, P. B. (1993). Plasma perspective on strong field multiphoton ionization. *Physical review letters*, 71(13), 1994.

- Corkum, P. B., Burnett, N. H., & Ivanov, M. Y. (1994). Subfemtosecond pulses. *Optics letters*, 19(22), 1870-1872.
- Dombi, P., & Schultze, M. (2023). The Nobel Prize in Physics 2023. *Europhysics News*, 54(5), 8-9.
- Duoandikoetxea, J. (2003). Lecciones sobre las series y transformadas de Fourier. Recuperado de <http://www.ugr.es/acanada/docencia/matematicas/analisisdefourier/Duoandikoetxeafourier.pdf>.
- Dvoyrin, V. V., Mashinsky, V. M., Bulatov, L. I., Bufetov, I. A., Shubin, A. V., Melkumov, M. A., ... & Guryanov, A. N. (2006). Bismuth-doped-glass optical fibers—a new active medium for lasers and amplifiers. *Optics letters*, 31(20), 2966-2968.
- Einstein, A. (2016). 7 On the Quantum Theory of Radiation. *The Old Quantum Theory: The Commonwealth and International Library: Selected Readings in Physics*, 167.
- Farkas, G., & Tóth, C. (1992). Proposal for attosecond light pulse generation using laser induced multiple-harmonic conversion processes in rare gases. *Physics Letters A*, 168(5-6), 447-450.
- Gademann, G., Kelkensberg, F., Siu, W. K., Johnsson, P., Gaarde, M. B., Schafer, K. J., & Vrakking, M. J. J. (2011). Attosecond control of electron-ion recollision in high harmonic generation. *New Journal of Physics*, 13(3), 033002.
- García, V. D. G., & Ponce, J. M. I. (2011). Rendimiento térmico de Carnot de un LASER. *Lat. Am. J. Phys. Educ. Vol.*, 5(4), 763.
- Ghimire, S., DiChiara, A. D., Sistrunk, E., Agostini, P., DiMauro, L. F., & Reis, D. A. (2011). Observation of high-order harmonic generation in a bulk crystal. *Nature physics*, 7(2), 138-141.
- Ghimire, S., Ndashimiye, G., DiChiara, A. D., Sistrunk, E., Stockman, M. I., Agostini, P., ... & Reis, D. A. (2014). Strong-field and attosecond physics in solids. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 47(20), 204030.
- Gillner, A., Holtkamp, J., Hartmann, C., Olowinsky, A., Gedicke, J., Klages, K., ... Bayer, A. (2005). *Laser applications in microtechnology. Journal of Materials Processing Technology*, 167(2-3), 494-498. doi:10.1016/j.matprotec.2005.05.049
- González, C. J. C., & de Enxeñeiros Industriais, E. T. S. (2003). Fundamentos del análisis de Fourier. GAMESAL.
- González, G. (1997). Series de Fourier, transformadas de Fourier y aplicaciones. *Divulgaciones matemáticas*, 5(1/2), 43-60.
- Goulielmakis, E., Loh, Z. H., Wirth, A., Santra, R., Rohringer, N., Yakovlev, V. S., ... & Krausz, F. (2010). Real-time observation of valence electron motion. *Nature*, 466(7307), 739-743.
- Goulielmakis, E., Schultze, M., Hofstetter, M., Yakovlev, V. S., Gagnon, J., Uiberacker, M., ... Kleineberg, U. (2008). Single-Cycle Nonlinear Optics. *Science*, 320(5883), 1614-1617. doi:10.1126/science.1157846
- Gross, A. J., & Herrmann, T. R. (2007). History of lasers. *World journal of urology*, 25, 217-220.
- Han, M., Smith, D., Ng, S. H., Anand, V., Katkus, T., & Juodkazis, S. (2021). Ultra-short-pulse lasers Materials Applications. *Engineering Proceedings*, 11(1), 44.
- Hargittai, I. (2024). Timescales—the 2023 Physics Nobel Prize through the eyes of a chemist. *Structural Chemistry*, 35(1), 1-5.
- Hentschel, M., Kienberger, R., Spielmann, C., Reider, G. A., Milosevic, N., Brabec, T., ... & Krausz, F. (2001). Attosecond metrology. *Nature*, 414(6863), 509-513.
- Ibarra Villalón, H. E., Pottiez, O., & Gómez Vieyra, A. (2018). El camino hacia la luz láser. *Revista mexicana de física E*, 64(2), 100-107.
- Kopfermann, H., & Ladenburg, R. (1928). Experimental proof of 'negative dispersion.'. *Nature*, 122(3073), 438-439.
- Kraus, P. M., & Wörner, H. J. (2018). Perspectives of attosecond spectroscopy for the understanding of fundamental electron correlations. *Angewandte Chemie International Edition*, 57(19), 5228-5247.
- Kretschmar, M., Svirplys, E., Volkov, M., Witting, T., Nagy, T., Vrakking, M. J., & Schütte, B. (2024). Compact realization of all-attosecond pump-probe spectroscopy. *Science Advances*, 10(8), eadk9605.
- Kumar, D., & Gururaja, S. (2020). Investigation of hole quality in drilled Ti/CFRP/Ti laminates using CO2 laser. *Optics & Laser Technology*, 126, 106130.
- Laurent, G., Cao, W., Ben-Itzhak, I., & Cocke, C. L. (2013). Attosecond pulse characterization. *Optics express*, 21(14), 16914-16927.
- Li, J., Ren, X., Yin, Y., Zhao, K., Chew, A., Cheng, Y., ... & Chang, Z. (2017). 53-attosecond X-ray pulses reach the carbon K-edge. *Nature communications*, 8(1), 186.
- Liu, B., Li, Z., Sun, Z., & Yang, Y. (2023). Multi-Electron Ionization and Coulomb Explosion of the IBr Molecule in the Near-Infrared Femtosecond Laser Field. *Applied Sciences*, 13(24), 13185.
- Lobato, E. T. S., Núñez, H. H. C., & Sosa, P. P. (2022). Pinzas y trampas ópticas: el fenómeno del atrapamiento óptico. *Revista Digital Universitaria*, 23(4).
- Macklin, J. J., Kmetec, J. D., & Gordon, C. L. (1993). High-order harmonic generation using intense femtosecond pulses. *Physical Review Letters*, 70(6), 766-769. doi:10.1103/physrevlett.70.766
- Maiman, T. H. (1960). Stimulated optical radiation in ruby.
- Manfred Eigen, G., & Gordon, G. (2009). Elementary steps in enzyme reactions (as studied by relaxation spectrometry). *Advances in enzymology and related areas of molecular biology*, 1-¿.
- Mauritsson, J., Johnsson, P., Gustafsson, E., L'Huillier, A., Schafer, K. J., & Gaarde, M. B. (2006). Attosecond pulse trains generated using two color laser fields. *Physical review letters*, 97(1), 013001.
- Molpeceres, J. L. C. (2006). Fundamentos físicos de la tecnología Láser. *Laboratorio de Física, USP*.
- Nisoli, M., & Sansone, G. (2009). New frontiers in attosecond science. *Progress in Quantum Electronics*, 33(1), 17-59. doi:10.1016/j.pquantelec.2008.10.004
- Núñez Barreto, Nicolás Adrián. (2017). Algunos aspectos de la teoría cuasiclásica de ionización atómica por efecto túnel. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.
- Ott, C., Kaldun, A., Argenti, L., Raith, P., Meyer, K., Laux, M., ... Pfeifer, T. (2014). Reconstruction and control of a time-dependent two-electron wave packet. *Nature*, 516(7531), 374-378. doi:10.1038/nature14026
- Papadogiannis, N. A., Witzel, B., Kalpouzos, C., & Charalambidis, D. (1999). Observation of attosecond light localization in higher order harmonic generation. *Physical Review Letters*, 83(21), 4289.
- Park, J., Subramani, A., Kim, S., & Ciappina, M. F. (2022). Recent trends in high-order harmonic generation in solids. *Advances in Physics: X*, 7(1), 2003244.
- Paul, P. M. (2001). Observation of a Train of Attosecond Pulses from High Harmonic Generation. *Science*, 292(5522), d1689-1692. doi:10.1126/science.1059413
- Pazourek, R., Nagele, S., & Burgdörfer, J. (2013). Time-resolved photoemission on the attosecond scale: opportunities and challenges. *Faraday Discussions*, 163, 353. doi:10.1039/c3fd00004d
- Pfeifer, T., Abel, M. J., Nagel, P. M., Jullien, A., Loh, Z. H., Bell, M. J., ... & Leone, S. R. (2008). Time-resolved spectroscopy of attosecond quantum dynamics. *Chemical Physics Letters*, 463(1-3), 11-24.
- Polimeno, P., Magazzu, A., Iati, M. A., Patti, F., Saija, R., Boschi, C. D. E., ... & Marago, O. M. (2018). Optical tweezers and their applications. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 218, 131-150.
- Potter, E. D., Herek, J. L., Pedersen, S., Liu, Q., & Zewail, A. H. (1992). Femtosecond laser control of a chemical reaction. *Nature*, 355(6355), 66-68.
- Ramírez, C. (2019). Pinzas Ópticas y Pulsos Ópticos Ultracortos: Un Nobel Bien Merecido. *Momento*, (58), 103-109.
- Robert, A. C. (2023). *Principles And Practice Of Laser Dentistry*. ELSEVIER-HEALTH SCIENCE.
- Rodríguez-Meza, M. A., & Cervantes-Cota, J. L. (2006). El efecto fotoeléctrico. *CIENCIA ergo-sum, Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva*, 13(3), 303-311.
- Ryabikin, M. Y. E., Emelin, M. Y. E., & Strelkov, V. V. (2023). Attosecond electromagnetic pulses: generation, measurement, and application. Attosecond metrology and spectroscopy. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 193(4), 382-405.
- Ryabikin, M. Y. E., Emelin, M. Y. E., & Strelkov, V. V. (2023). Attosecond electromagnetic pulses: generation, measurement, and application. Attosecond metrology and spectroscopy. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 193(4), 382-405.
- Saarela, J., Tormanen, M., & A Myllylä, R. (2004). Three methods for photon migration measurements in pulp. *Opto-Electronics Review*, 12.
- Saiz Baz, N. (2021). 60 aniversario del láser: fundamentos físicos y aplicaciones.
- Sánchez, M. E. C. (2007). El láser de media potencia y sus aplicaciones en medicina. *Plasticidad y restauración neurológica*, 6(1-2), 45-53.
- Santra, R., Yakovlev, V. S., Pfeifer, T., & Loh, Z. H. (2011). Theory of attosecond transient absorption spectroscopy of strong-field-generated ions. *Physical Review A*, 83(3), 033405.
- Sepulveda, K. V., Vargas, I. R., & García, R. R. (2007). Pinzas ópticas: las delicadas manos de la luz. *Ciencia*, 58(3), 18-25.
- Tong, X. M., Zhao, Z. X., & Lin, C. D. (2002). Theory of molecular tunneling ionization. *Physical Review A*, 66(3), 033402.
- Vampa, G., McDonald, C., Fraser, A., & Brabec, T. (2015). High-harmonic generation in solids: Bridging the gap between attosecond science and condensed matter physics. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 21(5), 1-10.

- Vera, O. E. H., Perez, M. M., Elena, N., Gomez, G., & Berlios, M. G. R. (2023). Polarización de la luz.
- Walsh, L. (2003). The current status of laser applications in dentistry. *Australian Dental Journal*, 48: 146-155. <https://doi.org/10.1111/j.1834-7819.2003.tb00025.x>
- Wang, H., Chini, M., Chen, S., Zhang, C. H., He, F., Cheng, Y., ... & Chang, Z. (2010). Attosecond time-resolved autoionization of argon. *Physical review letters*, 105(14), 143002.
- Wang, L., Bai, G., Wang, X., Zhao, J., Gao, C., Wang, J., ... & Zhao, Z. (2024). Raman time-delay in attosecond transient absorption of strong-field created krypton vacancy. *Nature Communications*, 15(1), 2705.
- Yadav, R. K. (2009). Definitions in laser technology. *Journal of cutaneous and aesthetic surgery*, 2(1), 45-46.
- You, Y. S., Reis, D. A., & Ghimire, S. (2017). Anisotropic high-harmonic generation in bulk crystals. *Nature physics*, 13(4), 345-349.
- Zeng, L., Wang, X., Liang, Y., Yi, H., Zhang, W., & Yang, X. (2023). Chirped-Pulse Amplification in an Echo-Enabled Harmonic-Generation Free-Electron Laser. *Applied Sciences*, 13(18), 10292.