

PLAN DE TRABAJO DE TESIS DE LICENCIATURA

Interferencia Cuántica en Interacción Luz-Materia

Director: Diego Arbó (diego@iafe.uba.ar)

Lugar de trabajo: Instituto de Astronomía y Física del Espacio – IAFE (CONICET-UBA).

Objetivos

El objetivo es la investigación básica de los fenómenos físicos que ocurren cuando pulsos ultracortos de radiación electromagnética interactúan con la materia, en especial, átomos [Krausz09]. En particular, se estudiarán los fenómenos de interferencia de los paquetes de ondas de los electrones emitidos durante el proceso de ionización atómica por pulsos láser de alta intensidad y corta duración. La intensidad del láser se considera alta cuando es comparable a la intensidad del campo eléctrico que sienten los electrones en presencia del núcleo atómico. Así mismo, se considera que un pulso es de muy corta duración cuando ésta es comparable al tiempo de revolución del electrón alrededor del núcleo, en una imagen clásica del orbital atómico.

Antecedentes

Durante los últimos años se ha logrado un progreso muy importante tanto en el aspecto experimental como en el análisis teórico de los procesos de emisión electrónica en presencia de campos electromagnéticos externos. La producción de pulsos láser en el extremo ultravioleta (XUV) de duración sub-femtosegundo ($1\text{fs} = 10^{-15}\text{ s}$) [Hentschel01, Sansone06, Goulielmakis08] como de pulsos láser infrarrojos intensos de pocos ciclos con fase absoluta estabilizada y controlada [Paulus04] conduce a características novedosas de la interacción láser-materia. La fuerte dependencia de los procesos de excitación y ionización con la fase absoluta del pulso ha puesto a nuestro alcance la exploración directa de la dinámica electrónica. El control de la forma de la onda de pulsos de pocos ciclos abre una nueva forma de estudiar y guiar procesos electrónicos ultrarrápidos, lo cual ha provocado un gran avance en la generación de pulsos de attosegundo [Hentschel01, Lan07]. Los pulsos ultracortos e intensos de luz láser han permitido la observación en tiempo real de numerosos procesos ultrarrápidos de la naturaleza como ser el “tunneling” de electrones atómicos [Uiberacker07] y el bombeo de átomos y moléculas en el decaimiento Auger [Drescher02]. Para lograr un control cabal de estos procesos ultrarrápidos se requiere un entendimiento cuantitativo de la respuesta dinámica de átomos y moléculas frente a las interacciones electromagnéticas no perturbativas.

Desarrollo

Este plan de investigación se aboca al estudio de los efectos no adiabáticos en los procesos de fotoionización atómica. El modelo semiclásico de los dos pasos (SCTS) [Shvetsov16, López19a, López19b] es no perturbativo, ya que considera la dinámica clásica de una distribución electrónica inicial, sujeta al campo eléctrico externo y a la interacción con el potencial Coulombiano debido al ion remanente en toda su extensión. El primer paso del modelo SCTS consiste en el proceso de ionización por efecto túnel a través de la barrera de potencial formada por el potencial atómico y el campo eléctrico externo, el cual es calculado mediante la SFA [PPT66, ADK16] despreciando efectos no adiabáticos. El segundo paso consiste en la evolución temporal de la trayectoria del electrón emitido según las ecuaciones de Hamilton de la mecánica clásica. Por lo tanto, la reproducción de la dinámica electrónica mediante las ecuaciones clásicas es la principal hipótesis del modelo SCTS. Para dar cuenta

de los fenómenos de interferencia se considera la suma coherente de los estados electrónicos finales, sopesados con una fase debida a la acción clásica acumulada en cada una de las trayectorias electrónicas. La validez del modelo SCTS se basa en el efecto túnel en condición estática [Keldysh65], aunque su uso se extienda muchas veces por fuera de la misma. Por ello, se espera que el estudiante trabaje en el desarrollo y entendimiento de la no adiabaticidad debida al movimiento oscilatorio de la barrera de potencial (inducido por el láser) en el efecto túnel [Popov04, Trabert21, Xiao22, Hofmann16, Ni18, Yudin01]. Se planea que el alumno incluya la oscilación temporal del láser dentro del cálculo de probabilidades del efecto túnel del electrón activo dentro del cálculo del modelo SCTS. Su aplicabilidad será testeada al incluir en el modelo los fenómenos de polaridad inducida del estado inicial, como así también la posibilidad de ionización no adiabática, introduciendo una distribución de velocidades longitudinales al final del primer paso.

Para introducir al alumno en el plan de investigación para su tesis de licenciatura, se proyecta que el alumno estudie la interacción de un átomo con un campo láser linealmente polarizado para el caso de tener ionización directa [Arbó08, Arbó14a, Arbó14b, Arbó10] y luego considere la posibilidad de rescattering del electrón sobre el ion remanente por un pulso de varios ciclos [Borbely19, López19a, López19b]. De este modo, se estudiará la interferencia entre el paquete de onda directo y el de rescattering (holografía, por su similitud a la holografía óptica) [Huismans11, Huismans12] (ver figura). Como se ha mencionado, en los trabajos realizados en el GQDM del IAFE [López19a, López19b] se ha considerado que el efecto túnel es un fenómeno totalmente adiabático, despreciando así la distribución de velocidades del electrón apenas escapa del núcleo. Los resultados obtenidos reflejan la distribución cuántica de forma cualitativa, dando lugar a mejoras del modelo para obtener una mayor precisión. Una de las principales cuestiones que el alumno deberá investigar será la relevancia de los fenómenos no adiabáticos en los procesos de ionización atómica y su incidencia en la distribución de momentos del fotoelectrón. Así, se planea mejorar el modelo SCTS para el caso de hidrógeno atómico, para extenderlo posteriormente a otras especies atómicas (gases nobles) sujetas a pulsos cortos de varios ciclos y además teniendo en cuenta otros tipos de polarización del láser (circular y elíptica).

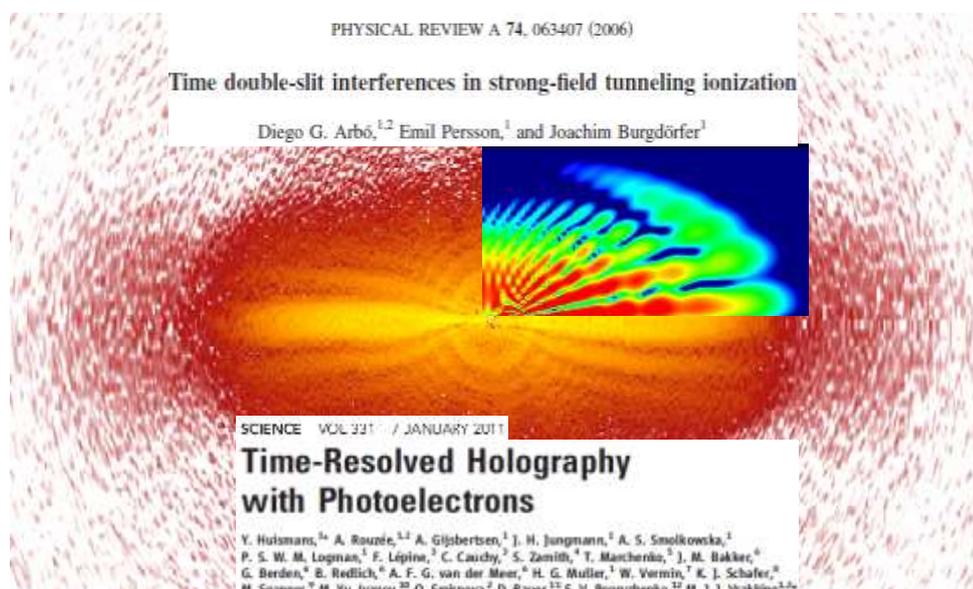


Fig: Mapa de velocidad medido para ionización de átomos Xenón metastable por radiación de $7 \mu\text{m}$ (FELICE). El eje horizontal corresponde a la dirección de polarización y el vertical es transversal. $I = 7.1 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ [Huismans2011]. Inset: Distribución electrónica doblemente diferencial para un campo láser tipo coseno [Arbó06b].

Factibilidad

El IAFE es un importante instituto de doble dependencia (UBA-Conicet) abocado a la investigación en astronomía, astrofísica y física básica con sede en la Ciudad Universitaria de Buenos Aires. En la actualidad el IAFE ostenta más de un centenar de integrantes entre investigadores, alumnos y personal de apoyo y depende del CONICET y de la Universidad de Buenos Aires. El IAFE cuenta con un acervo bibliográfico que incluye más de 3000 títulos y mantiene suscripciones a las revistas de astronomía y física más importantes del mundo. Con su equipo de cómputos HOPE, integra el Sistema Nacional de Computación de Alto Desempeño (SNCAD) creado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología. Además, el IAFE funciona como portal nacional del Nuevo Observatorio Virtual Argentino (NOVA), reservorio de los datos astronómicos producidos en el país. Varios grupos de investigación mantienen su propio *cluster* de computadoras para simulaciones numéricas. Éste es el caso del Grupo de Dinámica Cuántica en la Materia, que dispone de un *cluster* propio de 32 computadoras de 64 y 32 GB de memoria RAM con ocho núcleos cada una para correr simulaciones numéricas.

Bibliografía

- [Arbó08] D. G. Arbó *et al.*, Phys. Rev. A **77**, 013401 (2008).
- [Arbó10] D. G. Arbó *et al.*, Phys. Rev. A **82**, 043426 (2010).
- [Arbó14b] D. G. Arbó, J. Phys. B **47**, 204008 (2014).
- [Arbó14a] D. G. Arbó, *et al.*, Phys. Rev. A **89**, 043414 (2014).
- [Drescher02] M. Drescher *et al.*, Nature **419** 803 (2002).
- [Goulielmakis08] E. Goulielmakis *et al.*, Science **320**, 1614 (2008).
- [Hentschel01] M. Hentschel *et al.*, Nature **414**, 509 (2001); A. D. Bandrauk y N. Shon, Phys. Rev. A **66**, 031401 (2002).
- [Hofmann16] C. Hofmann *et al.*, New Jour. Phys. **18**, 043011 (2016).
- [Huisman11] Y. Huisman *et al.*, Science **331**, 61 (2011).
- [Huisman12] Y. Huisman *et al.*, Phys. Rev. Lett. **109**, 013002 (2012).
- [Krausz09] F. Krausz and M. Ivanov, Rev. Mod. Phys. **81**, 163-234 (2009).
- [Lan07] P. Lan *et al.*, Phys. Rev. A **76**, 043808 (2007).
- [López19a] S. D. López and D. G. Arbó, Phys. Rev. A **100**, 023419 (2019).
- [López19b] S. D. López and D. G. Arbó, Eur. Phys. Jour. D **73**, 28 (2019).
- [Ni18] H. Ni *et al.*, Phys. Rev. A **98**, 013411 (2018).
- [Paulus04] G. G. Paulus *et al.*, Phys. Rev. Lett. **91**, 253004 (2003).
- [Popov04] V. S. Popov, Physics – Uspekhi **47**, 855 (2004).
- [Sansone06] G. Sansone *et al.*, Science **314**, 443 (2006).
- [Shvetsov16] N. I. Shvetsov-Shilovski *et al.*, Phys. Rev. A **94**, 013415 (2016).
- [Trabert21] D. Trabert *et al.*, Phys. Rev. Lett. **127**, 273201 (2021).
- [Uiberacker07] M. Uiberacker *et al.*, Nature **446**, 627-632 (2007).
- [Xiao22] Z-L Xiao *et al.*, Optics Express **30**, 14873 (2022).
- [Yudin01] G. Yudin and M. Y. Ivanov, Phys. Rev. A **64**, 013409 (2001).