

Interacción Radiación Materia

Fundamentos de radiación sincrotrónica y fotoionización

Antonio Marcelo Juárez Reyes

juarez@fis.unam.mx

Índice

1. Introducción	1
2. Principios básicos de radiación sincrotrónica	2
2.1. Un poco de historia	2
2.2. Propiedades y características de la radiación sincrotrónica	4
2.2.1. Efecto Faro	4
2.2.2. Composición espectral de la radiación sincrotrón	6
2.3. Lista breve de algunos usos y aplicaciones de radiación sincrotrónica	7
3. Fotoionización de hidrógeno Molecular	8
3.1. Ortho y para-hidrógeno: Dos tipos distintos de moléculas de H_2 , como resultado directo de la estadística Fermi-Dirac	8
3.2. Medición de niveles rotacionales en para- H_2 usando radiación sincrotrónica	10
3.3. Comentarios finales	11

1. Introducción

El desarrollo de las fuentes de radiación sincrotrónica nos proporciona un ejemplo clásico de cómo la investigación básica puede convertirse en una serie de aplicaciones en el campo tecnológico y de investigación fundamental. Esta evolución no es exclusiva de la radiación sincrotrónica. Al contrario, es una característica común en muchas áreas de investigación básica en física, el iniciar como un ejercicio motivado por la curiosidad, y desembocar en aplicaciones insospechadas. Estas aplicaciones y desarrollos tecnológicos modifican profundamente la manera en que vivimos, nos comunicamos, nos transportamos y, mas aún, entendemos el mundo físico que nos rodea. El autor de estas notas ha tenido

la oportunidad de trabajar de manera activa en laboratorios de radiación sincrotrónica en Estados Unidos y Europa. Presentar las propiedades básicas, usos y aplicaciones de la radiación sincrotrónica, es uno de los objetivos principales de este curso. Si embargo, un objetivo igualmente importante para nosotros será el de transmitirles la convicción de que la investigación básica en física, además de ser una actividad muy estimulante intelectual y personalmente, involucra un conjunto amplio de conceptos, técnicas y aplicaciones, cuya importancia va más allá de la investigación pura.

2. Principios básicos de radiación sincrotrónica

Cuando un electrón es acelerado, como ocurre en las antenas de las estaciones de radio o en los teléfonos celulares, se produce radiación electromagnética que se distribuye espacialmente en todas direcciones, con una distribución toroidal. La situación es muy distinta si el electrón es acelerado en un sistema de referencia relativista, es decir que se desplaza a velocidades cercanas a la luz. En este caso, un observador estacionado en un sistema de referencia fijo verá algo muy distinto. En el caso del electrón relativista, el electrón produce radiación electromagnética muy intensa y colimada en un haz muy compacto¹. A este tipo de radiación se le conoce como radiación sincrotrónica. Si, volviendo al caso de la partícula cargada relativista, ésta se mueve en una órbita periódica, esta radiación electromagnética será emitida tangencialmente a los puntos de inflexión de la órbita del electrón. La composición espectral de la radiación emitida por esta partícula relativista consistirá en un continuo de frecuencias, que va del infrarrojo a los rayos X. La posibilidad de producir luz en un continuo de frecuencias es muy útil en física por que, con el uso conveniente de monocromadores se puede elegir una frecuencia particular. De esta manera es posible estudiar las propiedades de gases, líquidos, cristales y superficies y material biológico, como función de la frecuencia de la radiación electromagnética con que se les radia.

2.1. Un poco de historia

Desde el descubrimiento de los rayos X, en 1895, la comunidad científica ha apreciado la importancia de la luz como herramienta de gran utilidad en el estudio de la materia y sus propiedades. Sin embargo, una cosa es darse cuenta de esta importancia y otra muy distinta es tener la facilidad de producir y controlar la luz a energías altas para llevar a cabo experimentos. Durante muchas décadas los físicos trataron (y en muchos casos fueron exitosos) de desarrollar fuentes de radiación intensa en el ultravioleta y los rayos X a fin de estudiar las propiedades de cristales, y gases. El descubrimiento de la estructura del DNA es un ejemplo conspicuo del éxito de estos esfuerzos. Sin embargo esos estudios estaban limita-

¹El estudio de como un electrón radia en sistemas de referencia distintos fue la motivación inicial de Einstein para postular su principio de relatividad. (el artículo original se de A. Einstein se llamó , "sobre la electrodinámica de cuerpos en movimiento, Annalen der Physik, 1905)

dos por las características de las fuentes de radiación usadas, que normalmente emitían en una sola frecuencia, o en un conjunto discreto de frecuencias, y que eran comunmente muy débiles en intensidad. Fue hasta el desarrollo, a finales de la década de 1950, de aceleradores de partículas de alta energía, que la fuente ideal de radiación electromagnética de espectro amplio fue descubierta, un poco por casualidad. Cuenta la leyenda que, en 1947, en los laboratorios de General Electric, mientras se estudiaba la estabilidad de haces de electrones acelerados a 70 MeV, un técnico observó (usando un espejo) un haz muy intenso de luz que emanaba del tubo circular (que era transparente) en el que se mantenía el haz de electrones. Rápidamente se asoció este fenómeno de emisión de luz con aquella que teóricamente se esperaba, fuera producida por electrones relativistas. La rapidez de esta interpretación se debió, en buena medida, a cálculos de electrodinámica relativista, desarrollados por Schwinger en Estados Unidos y por Pomenranchuk en la Unión Soviética, tres años antes, que habían preparado el terreno para este descubrimiento². Las primeras investigaciones de las propiedades espectrales y de polarización de este nuevo tipo de radiación fueron llevadas a cabo de manera “parasítica”. El científico a cargo de estos experimentos tenía que sentarse en algún rincón oscuro de aceleradores, usados principalmente por físicos de partículas, y usar la radiación que emanaba de una pequeña ventana. Esta “primera generación” de experimentos fue limitada por el hecho de que los aceleradores no estaban diseñados para hacer eficiente la producción de radiación sincrotrón. Cuando fue evidente que los usos de la radiación sincrotrón merecían un acelerador por derecho propio, aceleradores más eficientes fueron desarrollados con el objetivo específico de aprovechar al máximo las ventajas de la radiación sincrotrónica. El laboratorio de radiación sincrotrónica de Daresbury, en el Reino Unido, fue inaugurado en 1981 con este objetivo en mente. Casi en paralelo, en los Estados Unidos (NSLS, Brookhaven), Europa (BESSY, Berlin) y en Japón (Photon Factory), se inauguraron laboratorios de radiación sincrotrónica para la producción de rayos ultravioleta y rayos X. Estas fuentes de radiación, diseñadas expresamente para su uso específico en el estudio de la interacción de la luz con la materia constituyen la “segunda generación” de fuentes de radiación sincrotrónica. Avances posteriores en el diseño de imanes deflectores, arreglados ingeniosamente de forma periódica, así como de óptica optimizada para su uso en el ultravioleta y los rayos X llevaron al desarrollo de fuentes cada vez más brillantes y especializadas, que constituyen las fuentes de “tercera generación”. Estas fuentes se caracterizan por el uso de “elementos de inserción”, que, como se mencionó arriba, consisten en un arreglo periódico de imanes de campo magnético intenso. La periodicidad del campo magnético se arregla de tal manera que los electrones realicen una oscilación sinusoidal. En cada punto de inflexión de esta trayectoria ondulante los electrones emiten radiación sincrotrón. Si el período de los imanes se elige adecuadamente, se conseguirá interferencia constructiva. Esto a su vez logrará que se multiplique en órdenes de magnitud, la intensidad de la luz producida. Estos laboratorios

²Una versión más extensa de esta historia, así como un conjunto útil de referencias bibliográficas puede consultarse en la dirección de web: <http://xdb.lbl.gov>

de tercera generación han sido inaugurados en la década pasada, y su número empieza a ser tan grande que es difícil enumerarlos en su totalidad. Podemos mencionar el “Advanced light Source”, en Berkeley, California, inaugurado en 1994, y el laboratorio “Elettra” en Trieste, Italia, puesto en marcha el mismo año, como ejemplos representativos. La evolución de las fuentes de radiación sincrotrón no parece detenerse. La necesidad de fuentes de radiación coherentes, de mayor intensidad y de corta duración de pulso (femtosegundos), está llevando el desarrollo de este tipo de fuentes a su “cuarta generación”. Estas nuevas fuentes basarán su operación en la radiación producida por electrones libres, que oscilan coherentemente (“free electron lasers”) estimulados por la radiación emitida por otros electrones dentro de la fuente. Basados en el gran éxito que las fuentes anteriores han tenido en distintas ramas aplicadas y fundamentales, es de esperarse una nueva generación de desarrollos científicos y tecnológicos, como resultado del desarrollo de estas nuevas fuentes de radiación sincrotrón.

2.2. Propiedades y características de la radiación sincrotrónica

En esta sección explicaremos con un poco más de detalle algunos de los aspectos de radiación sincrotrónica que se mencionaron en la introducción³.

2.2.1. Efecto Faro

Un electrón, de carga e , que es acelerado con aceleración a , radia energía electromagnética en distintas direcciones. En particular, la potencia por unidad de ángulo sólido está dada por la siguiente expresión:

$$\frac{dP}{d\Omega} = \frac{r^2 a^2}{16\pi^2 \epsilon_0 c^3} \sin^2(\Theta) \quad (1)$$

Es decir, la radiación electromagnética es emitida de forma toroidal, como se mencionó en la introducción. Es interesante notar que, debido a la dependencia $\sin^2(\Theta)$, no hay emisión de radiación en la dirección de la aceleración. También es importante notar que esta expresión es válida para un observador que mida la potencia emitida en el mismo sistema de referencia en la que el electrón es acelerado. Supongamos ahora que el electrón es acelerado en un sistema de referencia que se mueve a velocidades relativistas. Un observador montado en el mismo sistema de referencia que el electrón relativista observaría que la potencia radiada por unidad de ángulo sólido es la misma que aquella dada por la ecuación 1. Sin embargo, un observador fijo en el sistema de referencia del laboratorio, vería una cosa muy diferente. Esto se debe a que los ángulos medidos en distintos sistemas de referencia tienen que ser corregidos por las transformaciones de Lorentz. En el caso particular de la transformación de ángulos, se puede probar que la transformación de Lorentz para ángulos medidos por alguien en reposo

³La mayor parte de esta discusión está basada en el libro “Soft X-Rays and Extreme Ultraviolet Radiation, Principles and applications”, David Atwood, Cambridge University Press, First edition, United Kingdom, 1999.

Θ comparado con el ángulo medido Θ' por alguien que se mueve a velocidad v , está dada por:

$$\tan(\Theta) = \frac{\sin(\Theta')}{\gamma(\beta + \cos(\Theta'))} \quad (2)$$

donde: $\beta=v/c$ es la razón entre la velocidad de el sistema ed referencia con respecto a la de la luz y $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$

Para apreciar de manera simple que pasa con la radiación emitida por un electrón relativista, tal como es vista por un observador en reposo, basta observar, de la ecuación 2 que, en el límite relativista, donde $\beta \approx 1$, y $\gamma \gg 1$ ocurre que, para cualquier valor de el ángulo Θ' , la radiación esta acotada, para el observador en reposo, en el intervalo de ángulo $\Theta = \frac{1}{\gamma}$. compresión caracteriza la radiación sincrotrón . La comparación entre la radiación normal, emitida por un electrón en un sistema de referencia en reposo, y aquella producida por un electrón relativista se muestran en la figura 1. La figura muestra la potencia de radiación electromagnética, emitida por un electrón en trayectoria circular para el caso no relativista (a) y el caso relativista (b).

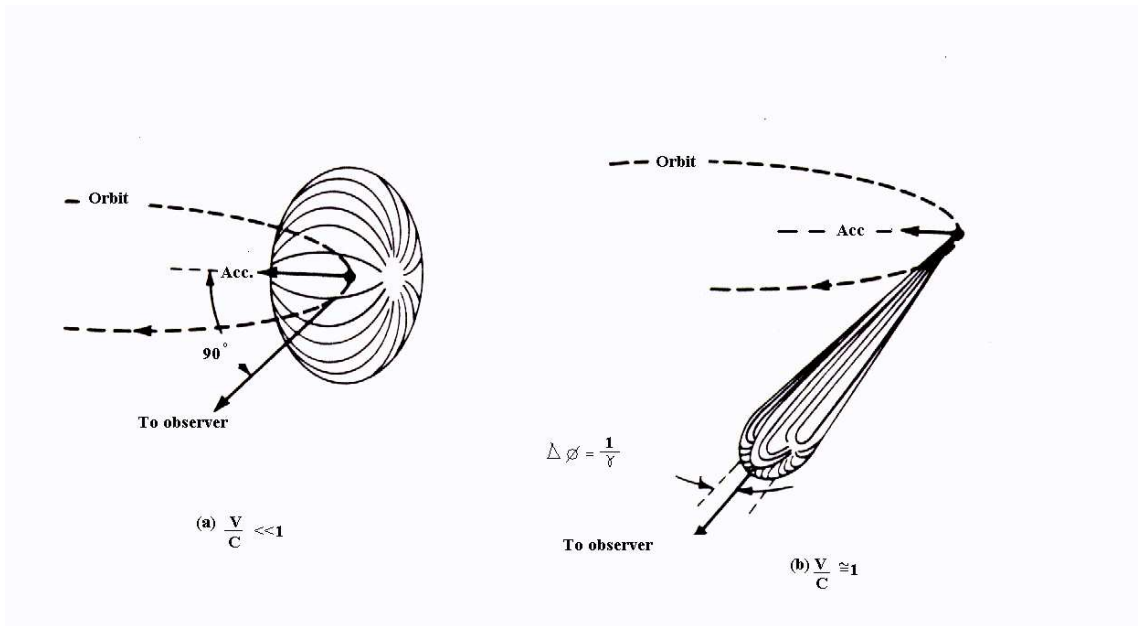


Figura 1 Comparación de los patrones de radiación electromagnética entre (a) un electrón que se observa en el mismo sistema de referencia y (b) un electrón que se mueve a velocidades relativistas, desde un sistema de referencia fijo en el laboratorio.

2.2.2. Composición espectral de la radiación sincrotrón

Hemos mencionado en la introducción que una característica importante de la radiación sincrotrón es que produce un continuo de frecuencias. En esta subsección explicaremos de manera breve la razón física de que se produzca este continuo de frecuencias. Regresando a la figura 1, es posible ver que la radiación es emitida, en el caso relativista, tangencialmente a la trayectoria del electrón. Hemos visto también que la radiación es emitida en un cono con amplitud angular dada por $\Theta = 1/\gamma$. Debido a que la radiación es emitida en un cono de luz, un observador fijo vería, conforme el electrón gira en su órbita, un pulso de luz cada vez que el electrón pasara frente a el observador, como se muestra en la figura 2.

La duración del pulso de luz, Δt , depende del radio de curvatura de la trayectoria, R , así como de la velocidad a la que se mueve el electrón. Es posible mostrar que, para el caso de un electrón relativista, para el cual $\beta = v/c \approx 1$, la duración del pulso de radiación, Δt , está dado por:

$$2\Delta t = \frac{R}{2c\gamma^3} \quad (3)$$

Usando el principio de incertidumbre de Heisenberg, $\Delta E \Delta t = \hbar/2$, se puede probar de manera sencilla que la radiación emitida por el electrón, consiste en un continuo dado por el rango espectral:

$$\Delta E \geq \frac{2\hbar c \gamma^3}{R} \quad (4)$$

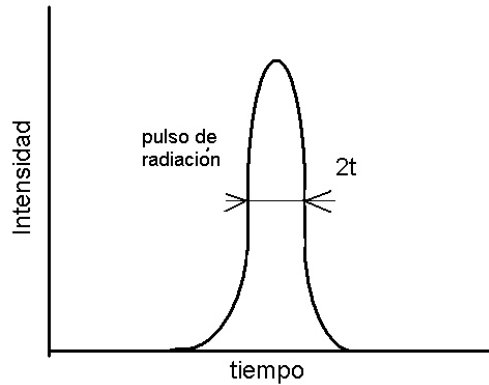


Figura 2 La duración del pulso de radiación sincrotrón, vista por un observador fijo. Usando el principio de Heisenberg es posible inferir que la composición espectral (frecuencia) de la radiación emitida es amplia, y que consiste de un continuo de frecuencias.

Esta propiedad de las fuentes de radiación sincrotrón la hace una fuente producida por el hombre que puede proporcionarnos de manera controlada un

conjunto amplio de longitudes de onda. La utilidad práctica de poder usar luz de distintas frecuencias será discutida en la siguiente sección.

2.3. Lista breve de algunos usos y aplicaciones de radiación sincrotrónica

Presentamos aquí una lista de ejemplos, que de ninguna manera es exhaustiva, sobre algunas aplicaciones de radiación sincrotrón en ciencia de materiales, biología, ciencia de superficies y otras áreas.

1. Caracterización de esfuerzos de tensión y esfuerzo en las uniones de alas de aviones. La distribución de esfuerzos en las juntas de alas de avión pueden ser observadas gráficamente usando rayos X suaves. Esto es por que la separación, a nivel atómico, de los átomos que componen el metal varía dependiendo de los esfuerzos. Al difractarse los rayos X de manera distinta en distintas regiones, se tiene un mapa de esa distribución de esfuerzos.
2. Estudio de la estructura por difracción de rayos X, de proteínas de importancia biológica, como la hemoglobina y la insulina. Dado que la longitud de onda de los rayos X es del mismo orden que la separación de átomos en una proteína, la luz se difracta. Haciendo un análisis inverso de la transformada de Fourier, es posible inferir la estructura de este tipo de componentes de gran importancia en los seres vivos.
3. Estudio de fotoionización, disociación, recombinación de moléculas y radicales libres de importancia atmosférica (O_2 , O_3 , SO_2 , NO , N_2O , NO_2). En la atmósfera superior, la interacción de la luz ultravioleta del sol, interactuando con las moléculas presentes en ella da lugar a una rica fotoquímica, de gran importancia en la vida del planeta. Simular este tipo de dinámica química en el laboratorio, usando luz sincrotrón ha sido uno de los más grandes logros en el estudio de la atmósfera de nuestro planeta.
4. Caracterización de propiedades ópticas y de polarización en cristales líquidos. Este tipo de materiales ha cobrado una relevancia tecnológica de gran envergadura en los últimos años. Basta mencionar la gran cantidad de pantallas hechas de este material en componentes electrónicos y pantallas de computadoras portátiles, para darse cuenta de su importancia comercial y tecnológica. A un nivel más avanzado, los cristales líquidos se pueden emplear en óptica avanzada para generar pulsos de luz de formas diseñadas a voluntad, controlando la propagación selectiva de ondas de frecuencias distintas.
5. Estudio de superficies en catalizadores, por espectroscopía de emisión de electrones Auger.

3. Fotoionización de hidrógeno Molecular

En esta sección se discutirán las propiedades de una molécula muy simple pero muy interesante: *Para*- H_2 . Se verá como el espín nuclear de esta molécula afecta las propiedades globales de el H_2 . Se discutirán brevemente algunos experimentos en el laboratorio de luz sincrotrón de Trieste, en los que se estudiaron los niveles rotacionales de esta molécula.

3.1. Ortho y para-hidrógeno: Dos tipos distintos de moléculas de H_2 , como resultado directo de la estadística Fermi-Dirac

H_2 , es la molécula neutra mas simple del universo. esta hecha de dos protones, y dos electrónes. Como cualquier molécula diatómica, sus grados de libertad estan sujetos a las reglas de cuantización correspondientes a transiciones vibracionales, rotacionales y electrónicas, respectivamente. H_2 es muy similar respecto a otras moléculas en la manera en que vibra y es excitada a sus distintos niveles electrónicos. Sin embargo, con lo que respecta a su manera de rotar, H_2 presenta una propiedad muy peculiar. Si uno toma una muestra de H_2 , tal como se obtiene naturalmente, se observa que un 25 % de las moléculas de la muestra dada tiene niveles rotacionales que tienen numero cuántico par, mientras que el 75 % restante solo puede tener niveles rotacionales con numeros cuánticos impares. Al primer tipo, se le denomina *para*- H_2 mientras que al segundo se le conoce como *orto*- H_2 . ¿Cuál es la razón por la cual un porcentaje de las moléculas de H_2 sólo pueden rotar con unidades pares de momento angular, mientras que las otras lo hacen de exclusivamente en unidades impares de momento angular?. ¿Cuál es la razón de “misteriosos” numeros 25 y 75 %?. La razón de que existan dos tipos de H_2 se debe al hecho de que los protones que la componen son partículas idénticas, en el sentido cuántico de la palabra. Existen básicamente dos grupos de partículas idénticas en el universo (y no se han descubierto que haya otras que no caigan en alguno de estos dos grupos). Un conjunto de ellos, los que tienen espín con valor entero tienen la obligación de que su función de onda total sea simétrica cuando uno intercambia las “etiquetas” con que se designan las partículas. El segundo conjunto, cuyo espín tiene valores semienteros, tiene la obligación de que su función de onda total sea antisimétrica bajo intercambio de “etiquetas”. El primer grupo de partículas se les conoce genéricamente como “bosones”, y se dice que obedece la estadística de Bose-Einstein. Al segundo grupo se les conoce como “fermiones”, y obedecen la estadística de Fermi-Dirac. ¿Quiéne que ver esto con la molécula de H_2 , y sus dos variantes?. Resulta que los protones que forman la molécula de H_2 son fermiones, y tienen espín nuclear $I=1/2$. Esto implica que la función de onda total, Ψ_{Tot} de ésta molécula debe ser antisimétrica. Veamos a que lleva esto y que tiene que ver con los niveles rotacionales. La función de onda de H_2 puede ser separada en distintas partes (esta es la famosa aproximación, denominada de “Born-Oppenheimer”). Es decir, la función total de onda puede ser separada en: electrónica, Ψ_e , vibracional, Ψ_v , rotacional, Ψ_r y de espín nuclear Ψ_{ns} tal

como se expresa en la ecuación 5:

$$\Psi_{Tot} = \Psi_e \Psi_v \Psi_r \Psi_{ns} \quad (5)$$

Las partes electrónica y vibracional son simétricas en el estado base de H_2 . Las funciones de onda rotacionales son simétricas para niveles rotacionales con número cuántico par y antisimétricas para niveles rotacionales impares. La función de onda nuclear tien dos maneras de aparecer, dependiendo de si los espines nucleares son antiparalelos -en cuyo caso es antisimétrica- o si los espines nucleares son paralelos (en cuyo caso la función de onda es simétrica). Considerando lo anterior (y despues de un rato de pensar, que se sugiere sea con la taza del café favorito) se verá que hay sólo una manera de construir una función nuclear de onda simétrica , y tres maneras distintas de formar una función simétrica. Para aquellos que a estas alturas tengan demasiadas ganas de ver correr por tanta discusión de simetrias, no se preocupen: nos queda sólo una ecuación para acabar el suplicio. La ecuación 6 muestra, la forma simétrica y la ecuacion 7 las tres funciones simetricas.

$$\Psi_{ns}^a(1, 2) = \frac{1}{\sqrt{2}}[\alpha(1)\beta(2) - \beta(1)\alpha(2)] \quad (6)$$

$$\Psi_{ns}^s(1, 2) = \begin{cases} \alpha(1)\alpha(2) \\ \frac{1}{\sqrt{2}}[\alpha(1)\beta(2) + \beta(1)\alpha(2)] \\ \beta(1)\beta(2) \end{cases} \quad (7)$$

Los números (1) y (2) en ecuaciones 6 y 7 designan los protones que componen el núcleo de H_2 y las funciones $\alpha(n)$ y $\beta(n)$ (con $n=1$ o 2) son las funciones de onda de espín nuclear. El carácter antisimétrico o simérico de la función de onda total está determinada por el producto de las funciones de onda parciales. En particular, en el estado base de la molécula, el caracter simétrico o antisimétrico esta determinado por el producto de funciones de onda rotacional y nuclear. La función de onda es antisimétrica solo si estados rotacionales pares se acompañan de la función de onda antisimétrica. Por el otro lado, las tres funciones de onda simétricas sólo aparecen con niveles rotacionales pares. Todo lo anterior debería servir para explicar la la razón por la cual existen dos tipos de moléculas de H_2 . Incidentalmente, el hecho de que haya una razón de 3 veces mas orto-hidrógeno que para-hidrógeno es consecuencia directa de el número de funciones de onda nucleares antisimétricas y antisimétricas que pueden construirse (que aparecen en una razon de 3:1). En el curso se explicó el porqué este fenómeno es tan inusual e interesante. Se explicó también como es posible cambiar las moléculas orto en para-hidrógeno, por medio de campos magnéticos muy intensos (que nos proporciona la naturaleza en forma de moléculas paramagnéticas) y usando temperaturas cercanas a 20 K.

3.2. Medición de niveles rotacionales en para- H_2 usando radiación sincrotrónica

En el curso se discutirá como, usando radiación sincrotrónica, es posible determinar las distintas maneras en que ocurre la ionización en para- H_2 . Se discutirá brevemente el fenómeno de autoionización que incrementa en órdenes de magnitud la posibilidad de ionización de una molécula. Se presentarán algunos resultados obtenidos recientemente en el laboratorio de radiación sincrotrónica de Trieste, en Italia, y se explicará por que este tipo de experimentos no habían podido ser llevados a cabo con anterioridad.

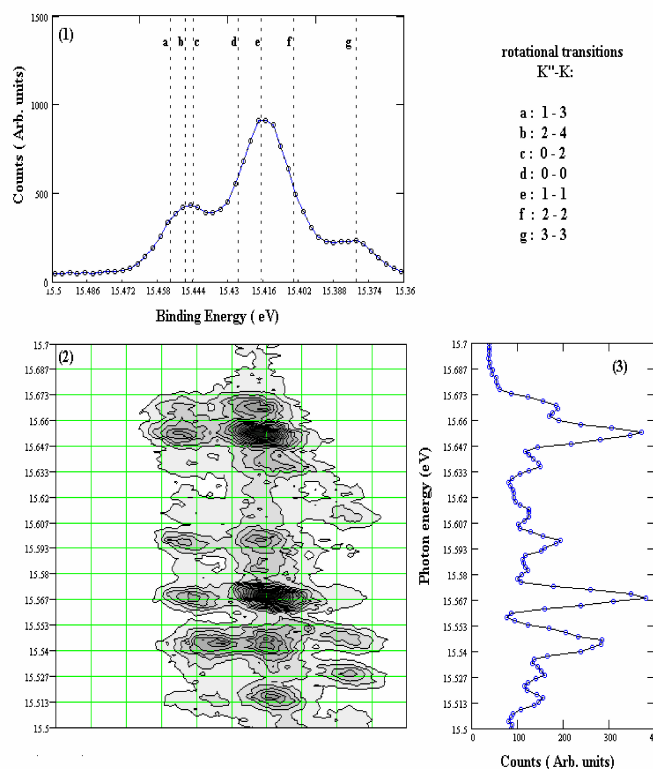


Figura 3. Mapa bidimensional que muestra la probabilidad de ionización de para- H_2 como función de la energía del foton.

La figura 3 muestra un mapa en dos dimensiones que representa la probabilidad de ionización de para- H_2 como función de la energía de la radiación ionizante. En base a estos mapas es posible obtener información valiosa sobre el proceso de fotoionización. Esto es notable por que ese tipo de fenómenos ocur-

ren en escalas del orden de 10^{-15} segundos, típicamente. A pesar de la brevedad de este tiempo, es notable que podamos medir propiedades de ese fenómeno.

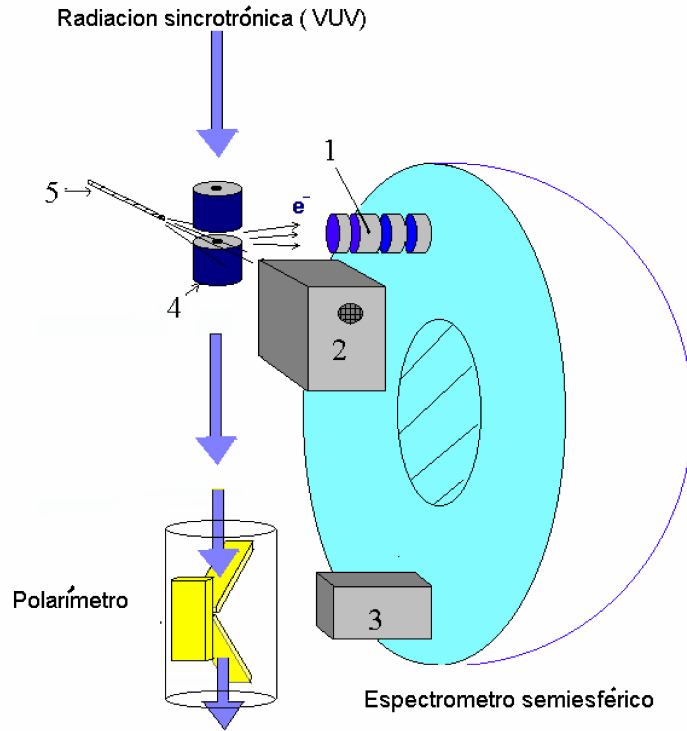


Figura 4. Arreglo experimental que se emplea en el laboratorio de luz sincrotrón en Trieste para obtener los datos experimentales que se presentaron en la figura 3

La figura 4 muestra un espectrómetro del tipo semiesférico que se usa en este tipo de experimentos. Se discutirá brevemente la manera en que este tipo de aparatos funcionan y son usados, así como sus aplicaciones en física básica y aplicada. En el curso se discutirán también, de manera breve, algunos experimentos de los que se estudia la interacción de la luz láser con un plasma de resplandor. Igualmente se comentarán algunos experimentos sencillos de efectos denominados "magnetoópticos".

3.3. Comentarios finales

Se vive en la actualidad una revolución muy profunda en varios campos de la física. Muchos de estos desarrollos se han llevado a cabo en el campo experimental. Por sólo mencionar algunos ejemplos, destacan los desarrollos que se

han llevado a cabo en nanotecnología, fuentes de luz pulsada de attosegundos, de condensar miles de átomos en el mismo estado cuántico (condensación de Bose-Einstein), de armar estructuras autoensamblables con material biológico (DNA³) y de manipular material microscópico con luz (pinzas ópticas⁴) entre otros. Independientemente de la orientación y gustos personales, consideré importante presentarles, así fuera de manera breve, algunos ejemplos de trabajo experimental actual, a fin de presentarles una faceta de esta área tan relevante actualmente. espero que el curso haya servido para darles una noción de como se realiza este tipo de actividades, de su importancia e, idealmente, de lo interesante que puede ser. Por razones evolutivas nuestros sentidos estan entrenados a percibir sólo lo que nos es útil en el mundo macroscópico. En este sentido, la fexperimental, por medio de sus instrumentos y técnicas, extiende de manera sorprendente nuestros sentidos, y nos permite medir y cuantificar procesos que ocurren en escalas de tiempo y espacio muy ajenas a nuestra experiencia cotidiana. Esa es el encanto especial de la física experimental y espero haberles dado una muestra pequeña de esta actividad tan importante. Ojalá que hayan disfrutado la escuela y pongo mi correo electrónico a su disposición (en la primera página de estas notas) en caso que tuvieran cualquier duda.