

OPTICA ATOMICA ¿LA OPTICA DEL AÑO 2000?

por

Angela M. Guzmán*

Resumen

Guzmán, Angela M.: Optica atómica ¿La óptica del año 2000?. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 22(84): 363-373. 1998. ISSN 0370-3908.

En óptica atómica los papeles de la luz y la materia se invierten con respecto a los de la óptica convencional, dando origen a la posibilidad de manipular átomos con láseres. Esta revisión versa sobre los fundamentos y desarrollos recientes de la Optica Atómica: los métodos de enfriamiento y confinamiento de átomos con láseres, la formación de redes de potencial óptico, la obtención del Condensado de Bose-Einstein (BEC) y el “láser de átomos”. Se describen los rangos esenciales del condensado y de los diferentes modelos teóricos propuestos para la obtención de un haz atómico coherente, señalando los retos tecnológicos involucrados en su implementación. Se mencionan algunas perspectivas y posibilidades de aplicación.

Palabras claves: Optica atómica, Optica cuántica, Condensado de Bose-Einstein, Láser de átomos.

Abstract

In atom optics the roles of light and matter are exchanged with respect to those of conventional optics. Atom optics makes possible the manipulation of atoms with lasers. This review deals with foundations and recent developments on atom optics: laser cooling and trapping, optical lattices, Bose-Einstein Condensation (BEC), and the “atom laser”. Main features of BEC and theoretical models for generation of a coherent atomic beam are described, indicating the technological challenges involved in their implementation. Special attention is devoted to the model of Guzmán et al. Perspectives and possible applications are mentioned.

Key words: Atom Optics, Quantum Optics, Bose-Einstein Condensate, Atom laser.

1. Introducción

La naturaleza de la luz y de la materia ha intrigado al hombre desde hace muchos siglos. Los atomistas griegos ya hablaban de elementos constitutivos de la materia: el aire, el fuego, el agua, la tierra. Los físicos en la actualidad sabemos que los átomos están formados por leptones y bariones y hemos aprendido a no asociar trayectorias con el movimiento de la nube electrónica del átomo. D' Broglie asoció a cada partícula una onda de probabilidad cuya longitud de onda depende de su momentum. En redes cristalinas es posible hacer difracción de electrones cuando su longitud de onda de D' Broglie es comparable a la distancia entre planos interatómicos. Así la materia manifiesta un comportamiento ondulatorio análogo al de la luz, aunque no debe olvidarse que las "ondas" de materia tienen masa y la luz no. Al movimiento del centro de masa de los átomos se asocia también una longitud de onda de D'Broglie. Sin embargo, dado que la masa de un átomo es varios miles de veces mayor que la del electrón, su longitud de onda de D'Broglie es varios miles de veces menor que la de un electrón con la misma energía, lo que dificulta el visualizar el carácter ondulatorio del movimiento del centro de masa.

¿Y qué es la luz? Newton la imaginaba como un haz de partículas, Huygens demostró su comportamiento ondulatorio, Maxwell demostró que la luz portaba momentum y podía ejercer presión sobre la materia, Einstein asoció de nuevo con ella 'corpúsculos' y la electrodinámica cuántica la describe como fotones o cuantos de excitación de un modo del campo de vacío que pueden ser detectados con igual probabilidad en cualquier región del espacio, pero que cuando son absorbidos por la materia le transfieren una cantidad específica de momentum y energía. En la electrodinámica cuántica de cavidades las condiciones de frontera influyen los modos del campo y los "fotones" correspondientes son cuantos de excitación de los modos de campo en la cavidad, que difieren de los modos de campo en el espacio libre. La emisión espontánea de un átomo, que en el espacio libre es irreversible, en una cavidad puede hacerse reversible o incluso, suprimirse. Willis E. Lamb Jr., Premio Nobel de Física 1955 por el descubrimiento del "corrimiento Lamb" en mediciones del espectro del átomo de hidrógeno, ha publicado recientemente un artículo titulado "Anti-photon" (Lamb, 1993) en que plantea el interrogante de si los físicos no le hemos dado al "fotón" una realidad que no le es propia. Según el autor "Por el título de este artículo debería ser claro que al autor no le gusta el uso de la palabra "fotón", que data de 1926. Desde su punto de vista, no existe tal cosa como un fotón. Sólo una comedia de errores y accidentes históricos condujeron a su popularidad entre físicos y científicos en el campo de la óptica.". Entre tanto la fotónica adquiere

relevancia y áreas como la criptografía cuántica despierta interés para la transmisión y codificación de información imposible de intervenir, basándose en la imposibilidad de desdoblarse un fotón.

Aunque la óptica ha sido objeto de estudio desde la antigüedad, con la aparición del láser en 1951 se inició un desarrollo científico y tecnológico vertiginoso. Hoy en día nos son familiares sus múltiples aplicaciones en telecomunicaciones, medicina, industria metálica, etc.

Más recientemente se ha desarrollado un nuevo campo de aplicaciones del láser: la posibilidad de manipular iones y átomos con láseres. Esta aplicación, menos difundida, se basa en la capacidad del láser de producir efectos mecánicos sobre la materia, que ponen de relieve su naturaleza ondulatoria. El desarrollo de técnicas que permiten reflejar, enfocar, difractar o hacer interferir ondas materiales ha dado origen a la **óptica atómica**. Como resultado novedoso y de gran relevancia de la investigación en este campo, se ha producido un nuevo estado de la materia, el condensado de Bose-Einstein, que presenta propiedades de coherencia análogas a las de los láseres convencionales. Este artículo es una revisión de los fundamentos y desarrollos recientes en óptica atómica que no pretende ser exhaustiva, sino brindar al lector una visión general y actualizada del área.

2. Efectos mecánicos de la luz

Mientras los fundamentos físicos de la manipulación de partículas cargadas con campos eléctricos y magnéticos fueron establecidos desde el siglo pasado y sus aplicaciones son la base de la tecnología electrónica en la actualidad, la manipulación de átomos neutros se hizo posible mediante su interacción con láseres.

Si bien Maxwell introdujo conceptos de momentum del campo electromagnético y presión de radiación, los efectos mecánicos de la luz a nivel atómico han sido estudiados en detalle sólo en las últimas dos décadas.

En 1975, Theodor Hänsch y Arthur Schawlow (Hänsch and Schawlow 1975) propusieron el método de enfriamiento Doppler de átomos neutros con láser. El método se basa en la conservación del momentum y la energía en la interacción. Consideremos un haz de átomos y un haz láser contrapropagante con frecuencia ligeramente inferior a la de una transición atómica. Debido a que los átomos se encuentran en movimiento, por efecto Doppler, la frecuencia de la luz y por tanto la energía de un fotón en su sistema de referencia es mayor que la observada en el sistema del laboratorio. Si la diferencia entre la frecuencia propia del átomo y la del láser es igual al corrimiento Doppler, es posible que el átomo absorba un fotón. Mediante el proceso de absorción, el átomo hace una transición a un nivel excitado y adquiere el momentum del fotón absorbido, lo

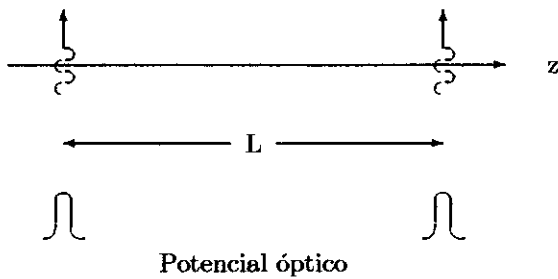


Figura 1. Diagrama de un resonador atómico de tipo Fabry-Pérot

que disminuye su velocidad de propagación. El átomo decae a su estado base por emisión espontánea y adquiere un momentum de retroceso, en dirección aleatoria, igual al momentum del fotón emitido. En promedio sobre varios ciclos de fluorescencia el momentum de retroceso por emisión espontánea es nulo y el láser ejerce una fuerza neta de fricción que reduce la energía cinética de los átomos. La aceleración de frenado resultante es cien mil veces mayor que la aceleración de la gravedad. Análogamente, si el láser tiene mayor frecuencia que la frecuencia propia del átomo y se propaga en la misma dirección del haz atómico, los átomos incrementan su velocidad.

En la década de los 80, dos de los galardonados con el premio Nobel de Física 1997, William Phillips y Claude Cohen-Tannoudji, investigaban, el primero, métodos experimentales para lograr frenar y por lo tanto “enfriar” un haz de átomos mediante láseres, el segundo, teóricamente, buscaba comprender la interacción radiación-materia a nivel atómico, las fuerzas involucradas, los procesos de dispersión y difusión.

Simultáneamente, varios grupos de investigación desarrollaban multiplicidad de montajes y arreglos de láseres que permiten manipular los átomos, en forma análoga a como los dispositivos ópticos permiten manipular la luz, dando origen con ello a la óptica atómica. En la óptica atómica los papeles de la materia y la luz se invierten. Los láseres sirven de espejos para reflejar haces atómicos (Balykin and Letokhov, 1989): el gradiente de intensidad en el perfil de un láser actúa como una barrera de potencial que produce la reflexión. Utilizando dos espejos láser que actúan como “paredes” o potenciales ópticos (Figura 1) es posible construir el análogo atómico de un interferómetro de Fabry-Pérot (Wilkens et al., 1993). La altura de la barrera de potencial óptico depende de la intensidad del láser y de su desintonización con respecto a la frecuencia propia del átomo. Si la frecuencia del láser es mayor que

la frecuencia atómica, los átomos en el estado base ocupan con mayor probabilidad la zona entre los dos láseres.

También es posible producir ondas estacionarias de luz que actúan como rejillas de difracción para haces atómicos (ver p.ej Minogin, 1987). La dispersión coherente resultante de la interacción materia-radiación produce difracción de un paquete de onda atómico. Cuando un átomo atraviesa transversalmente una onda estacionaria generada por dos láseres contrapropagantes y absorbe un fotón, adquiere su momentum. El desdoblamiento por difracción de un paquete de onda es debido a que en un campo resonante las amplitudes de probabilidad se corren en el espacio de momentum en múltiplos del momentum del fotón.

3. Confinamiento tridimensional de átomos neutros

En la década de los 70 se había logrado confinar electrones y aislar iones individuales en experimentos con trampas electromagnéticas. H. Dehmelt y W. Paul, precursores y ejecutores de estos trabajos, recibieron el Premio Nobel en 1989 por su contribución a la espectroscopía de alta resolución. Sin embargo el confinamiento de átomos, debido a su carácter neutro, exigía el uso de técnicas diferentes.

A principios de los 80 se estudiaba la posibilidad de confinar átomos con láseres. En 1985 el físico experimentalista Steven Chu (Chu et al., 1985) y su grupo en Bell Labs. demostraron la posibilidad de confinar tridimensionalmente un gas atómico en la intersección de seis láseres que actuaban como un medio viscoso para los átomos, por lo cual el sistema recibió el nombre de “melaza óptica”. Trabajos posteriores han permitido realizar desarrollos tecnológicos para manipulación genética del ADN mediante láseres y patentar las denominadas “pinzas” ópticas para este uso.

Inicialmente se pensó que el confinamiento en una melaza óptica era producido mediante enfriamiento Doppler, sin embargo, las temperaturas medidas por W. Phillips en una melaza de átomos de Sodio ($40\mu K$), resultaron inferiores a la mínima temperatura obtenible por enfriamiento Doppler, estimada en $240\mu K$.

En 1989, el grupo de la École Normale Supérieure (Dalibard, Cohen-Tannoudji, 1989) presentó la teoría de un nuevo mecanismo de enfriamiento, el método de enfriamiento Sísifo, que involucra el análisis de la interacción de los láseres con los diferentes subniveles magnéticos de los estados excitado y base del átomo. El modelo simple de dos niveles había resultado insuficiente para explicar las bajas temperaturas observadas en la melaza óptica.

En la versión unidimensional del enfriamiento Sísifo, los átomos se mueven en el campo resultante de la super-

posición de dos láseres con polarizaciones lineales perpendiculares entre sí (configuración $lin \perp lin$) y que viajan en direcciones opuestas. La superposición de las ondas genera un gradiente de polarización, que modula espacialmente la energía de los subniveles magnéticos del átomo. Esta modulación actúa como un potencial sinusoidal para el movimiento traslacional de los átomos, denominado potencial óptico. En la Figura 2 se esquematiza el proceso para una transición atómica de un nivel base $J = 1/2$ a un nivel excitado con $J = 3/2$. Los potenciales ópticos sinusoidales correspondientes a los subniveles magnéticos $M = +1/2$ y $M = -1/2$ están desfasados espacialmente. A medida que los átomos se mueven en el campo láser, sufren variaciones de su energía interna que son compensadas por variaciones en su energía traslacional. El efecto de enfriamiento se produce porque la interacción con el láser tiende a mantener los átomos en el estado de más baja energía, de modo que cuando alcanzan una cima del potencial, el láser induce una transición a un pozo del potencial correspondiente al otro subnivel magnético. En su movimiento los átomos se ven obligados constantemente a escalar cimas de potencial a costa de su energía cinética y van disminuyendo su velocidad. El mecanismo de enfriamiento recibió el nombre de enfriamiento Sísifo en alusión al rey griego condenado por toda la eternidad a subir una roca por una colina para dejarla caer y recomenzar sucesivamente.

A principios de la década de los 90, se formulan teorías que predicen la cuantización del movimiento traslacional de átomos en potenciales ópticos (Wilkens et al., 1991; Castin and Dalibard, 1991). Queda abierta la posibilidad de confinamiento atómico dentro de pozos de potencial ópticos de ancho espacial inferior a la longitud de onda λ de la luz, y de profundidad apenas cientos de veces mayor que la energía de retroceso (Figura 3).

La generalización tridimensional del método conduce eventualmente a confinamiento 3D de los átomos en pozos de potencial óptico. La mínima temperatura obtenible por enfriamiento Sísifo es del orden de los microKelvins, temperatura correspondiente a la energía de retroceso $\approx 10^{-10} eV$ que adquiere un átomo al emitir un fotón de la frecuencia del láser utilizado en el proceso de enfriamiento.

La comprobación experimental de la existencia de estados cuantizados de movimiento atómico no se hizo esperar. En 1992 Paul Jessen y sus colegas (Jessen et al., 1992) observaron transiciones de átomos de Rb enfriados con láser mediante espectroscopía de resonancia fluorescente de alta resolución. Los espectros observados fueron claro indicio de la cuantización de la energía del centro de masa de átomos confinados en pozos de potencial óptico y se midió la diferencia de energía entre los niveles vibracionales correspondientes. Se obtuvo una localización

espacial de los átomos del orden de $\lambda/15$ con un 60% de la población de átomos atrapados en el estado base vibracional del pozo de potencial óptico. En 1993 el grupo francés (Grynberg et al., 1993) presentó evidencia experimental de cuantización del movimiento atómico en los potenciales ópticos bi- y tridimensionales de una melaza óptica de átomos de Cesio mediante espectroscopía Raman estimulada.

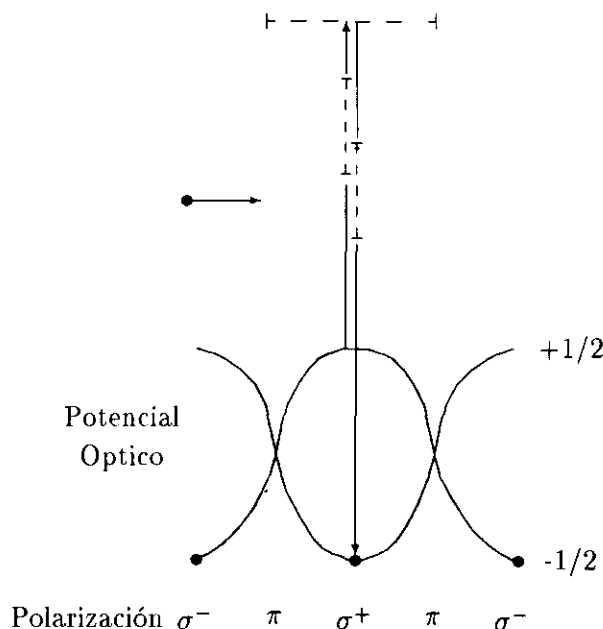


Figura 2. Esquema del proceso de enfriamiento Sísifo.

En 1994 aparecen trabajos (Verkerk et al., 1994; Petas et al., 1994) sobre métodos experimentales para la creación y diseño de redes ópticas bi- y tridimensionales. Aunque el factor de llenado de puntos reticulares de la red obtenido experimentalmente es muy bajo, se producen redes ópticas con diferentes estructuras cristalográficas y se miden las frecuencias de vibración atómicas correspondientes.

Gran esfuerzo teórico se ha dedicado a describir la dinámica de átomos no interactuantes en redes ópticas (Berg-Sørensen et al., 1992; Berg-Sørensen et al., 1993; Marksteiner et al., 1996). En ella intervienen el proceso de enfriamiento por efecto Sísifo, la emisión espontánea y fenómenos de difusión en la red. Para analizar el efecto de la interacción dipolo-dipolo en la dinámica de la red y en posibles fenómenos de transporte, A. Guzmán y P. Meystre (Guzmán and Meystre, 1998)

calcularon los elementos matriciales del potencial dipolo-dipolo eléctrico (Goldstein et al., 1996) para átomos atrapados en una red cúbica de caras centradas (CCC). Se encontró que debido a la anisotropía de la interacción dipolar, los fenómenos de transporte que tienden a alinear los átomos en columnas resultan favorecidos. Estos resultados pueden contribuir a la comprensión de fenómenos de transporte en redes ópticas que pueden tener incidencia en el bajo factor de llenado observado experimentalmente.

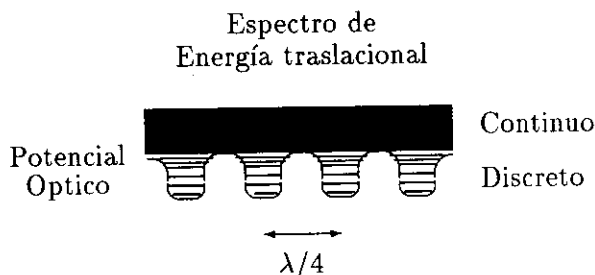


Figura 3. Diagrama de niveles de energía traslacionales para el potencial óptico

4. El condensado de Bose-Einstein

La posibilidad de la existencia de un condensado de bosones fue predicha teóricamente en 1924 por S. N. Bose y A. Einstein: un gas de bosones no interactuantes por debajo de cierta temperatura desarrollará súbitamente una población macroscópica en su estado cuántico de más baja energía.

Por cerca de 15 años numerosos grupos buscaron la condensación de Bose-Einstein en un vapor de Hidrógeno con spin polarizado. La búsqueda del condensado con muestras diluidas de átomos alcalinos enfriados con láser es más reciente, data de principios de esta década. En 1995 el grupo de C. E. Wieman en JILA-NIST de la Universidad de Colorado en Boulder, obtuvo experimentalmente un nuevo estado de la materia: el condensado de Bose-Einstein (Anderson et al., 1995).

Las técnicas de enfriamiento mediante láser desarrolladas en la década pasada habían permitido obtener temperaturas del orden de los microKelvin, pero no suministraban las densidades atómicas necesarias para satisfacer la condición temperatura-densidad requerida para producir el condensado. Había que disminuir la temperatura y/o aumentar la densidad. Para disminuir la temperatura, Wieman encontró una solución: enfriar átomos de ^{87}Rb con láser, confinarlos en una trampa magnética y continuar enfriándolos mediante la técnica de enfriamiento por evaporación. Esta técnica consiste en liberar los átomos más "calientes", dejando que los más "fríos" al-

cancen un nuevo equilibrio térmico por colisiones. Mediante la aplicación de un campo magnético rotante se construyó la trampa TOP (Time orbiting potential) que permitió disminuir las pérdidas de átomos confinados en el centro de la misma. El condensado apareció a una temperatura cercana a los 170nK , a una densidad atómica de $2.5 \times 10^{12}\text{cm}^{-3}$ y pudo ser preservado por más de 15 segundos. Mediante iluminación de la muestra con láseres, se obtuvieron imágenes de la formación y de la expansión del condensado, una vez que es liberado.

5. Láseres de átomos

La condensación de Bose-Einstein, así como la posibilidad real de manipular átomos ultrafríos hicieron revivir el interés por la búsqueda de posibles esquemas de generación de haces atómicos coherentes. Los átomos considerados deben ser bosones, que pueden ocupar un mismo estado cuántico, caracterizado por su estado interno de energía y un estado cuántico de traslación del centro de masa. La cuantización del movimiento del centro de masa se logra mediante confinamiento de los átomos en trampas magnéticas, en pozos de potencial óptico como los generados por enfriamiento de Sísifo, o mediante barreras de potencial como en el resonador atómico de Fabry-Pérot (Wilkins et al., 1993).

En los últimos dos años, el grupo de W. Ketterle en MIT (Ketterle, 1997) ha estudiado las propiedades de coherencia del condensado de Bose-Einstein. Haciendo interferir dos condensados obtuvo franjas de interferencia que evidencian coherencia espacial de largo rango y constituyen una medida directa de la coherencia de primer orden (Andrews et al., 1997).

Como en el caso de las fuentes luminosas, la evidencia de coherencia de primer orden no es conclusiva respecto al estado cuántico del sistema. Luz monocromática, filtrada de la luz emitida por una fuente térmica, puede producir franjas de interferencia con el mismo contraste que un láser. Sin embargo las dos fuentes están caracterizadas por una estadística de fotones diferente: mientras la luz térmica se caracteriza por una distribución exponencial de la probabilidad de detectar un número dado de fotones, la luz láser se caracteriza por una distribución de probabilidad Poissoniana. Para diferenciar una fuente térmica monocromática de un láser, es necesario medir las funciones de correlación de orden superior, es decir, demostrar que el estado cuántico del sistema es un estado coherente. Mediciones recientes de la correlación de segundo orden muestran una gran analogía entre el condensado de Bose-Einstein y el estado cuántico de la luz en un láser (Ketterle and Miesner, 1997).

Sin embargo, desde el punto de vista teórico, se ha explorado la posibilidad de generar haces atómicos cohe-

rentes en un esquema dinámico (Guzmán et al., 1996; Olshanil et al., 1995; Wiseman and Collett, 1995; Spreeuw et al., 1995; Holland et al., 1995). El condensado de Bose-Einstein observado es un estado de equilibrio y de mínima energía de un gas de átomos bosónicos confinados en una trampa. Un láser se obtiene en un estado de no equilibrio mediante manipulación externa que hace posible generar continuamente luz coherente en un proceso dinámico estacionario. Se discute en la literatura (Wiseman, 1997) si un condensado de Bose-Einstein, cayendo bajo la acción de la gravedad puede denominarse "láser de átomos", o si esta denominación debe reservarse para fuentes coherentes y continuas de materia.

Las propuestas teóricas generan expectativas de desarrollar un láser atómico más análogo en su dinámica al láser convencional. A diferencia del condensado, el "láser de átomos" debería provenir de la acumulación de población en un estado propio de energía de una cavidad atómica (no necesariamente en el estado base) y estar descrito por una función de onda coherente, con estadística Poissoniana. Este estado es generado y mantenido mediante un proceso de bombeo adecuado y el haz atómico debe ser extraído de la cavidad manteniendo su coherencia.

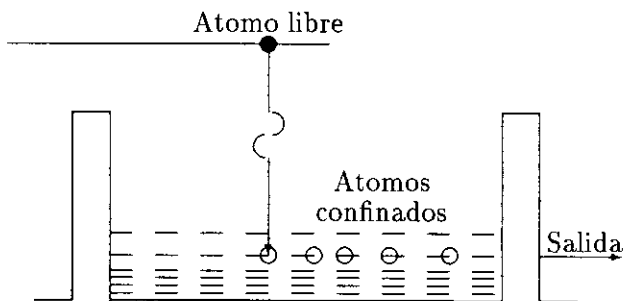


Figura 4. Diagrama de un láser basado en decaimiento por emisión espontánea en un estado confinado de una cavidad óptica

Los modelos propuestos pueden clasificarse en dos grupos: los que consideran átomos no interactuantes (Olshanil et al., 1995; Wiseman and Collett, 1995; Spreeuw et al., 1995) y los que se fundamentan en la interacción entre átomos (Guzmán et al., 1996; Holland et al., 1996). Los primeros demuestran que es posible la acumulación de población de átomos en un modo dado de una cavidad que los rodea y confina su movimiento traslacional. Átomos que se encuentran inicialmente en un estado excitado, no necesariamente confinados en una cavidad, decaen por emisión espontánea al estado base

atómico y simultáneamente quedan confinados en un estado propio de energía traslacional del centro de masa en la cavidad (Figura 4). Dado su carácter bosónico la probabilidad de que otro átomo decaiga en el mismo estado es proporcional al número de átomos que se encuentren en dicho nivel, de modo que la emisión espontánea se ve incrementada por un factor bosónico, que conduce a la acumulación de átomos en un modo de la cavidad. En los trabajos citados no se realiza un análisis sobre las propiedades estadísticas del estado cuántico del conglomerado de átomos, aspecto crucial para determinar su grado de coherencia. La mayor debilidad de estos modelos consiste en ignorar la interacción entre átomos confinados en resonadores ópticos. Por otra parte, el ancho de línea calculado para uno de estos modelos (Wiseman and Collett, 1995) excede notoriamente el límite ideal propuesto por Wiseman en su análisis de las propiedades que debería tener un láser de átomos (Wiseman, 1997).

En la segunda categoría se encuentran: (i) el modelo de la Universidad de Arizona y la Universidad Nacional de Colombia (Guzmán et al., 1996) que introduce un resonador óptico brillante, en que los átomos interactúan con un campo láser y sufren colisiones dipolo-dipolo; (ii) el modelo del grupo de Boulder (Holland et al., 1995) basado en enfriamiento evaporativo. En ambos casos los átomos interactúan, es decir, sufren colisiones, y dicha interacción es el mecanismo que da lugar a la acumulación de población en un estado propio de una trampa atómica. La diferencia básica entre estos modelos de láser atómico y un láser convencional yace precisamente en la interacción inter-atómica: en el caso del láser, los fotones no interactúan y la no linealidad que conlleva a la generación de estados coherentes de la radiación es debida a la interacción con la materia. En el caso atómico, la interacción atómica puede dar lugar a la no linealidad necesaria para generar coherencia en un estado propio de un resonador atómico.

La configuración propuesta por Guzmán et al. para el resonador atómico tridimensional consta de un arreglo bidimensional de cuatro láseres en configuración *lin || lin* como muestra la Figura 5, dispuesto en un plano perpendicular al eje de un resonador atómico tipo Frabry-Pérot (Figura 1).

El arreglo bidimensional de láseres genera un potencial óptico bidimensional esquematizado en la Figura 6, con su correspondiente diagrama de contorno. Átomos en el estado base y diferentes subniveles magnéticos $M=+1/2$ y $M=-1/2$ experimentan potenciales periódicos desfasados espacialmente cuyos mínimos están indicados en el diagrama de contorno con los signos + y -. Mediante el proceso de enfriamiento es posible confinar átomos en pozos del potencial de la red bidimensional en una configu-

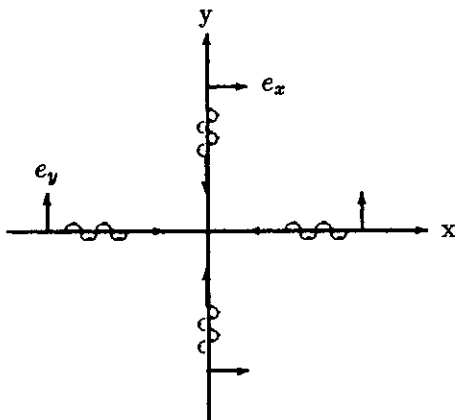


Figura 5. Arreglo bidimensional de láseres en la configuración lin || lin.

ración con proyecciones del momentum angular opuestas en puntos reticulares vecinos, análoga a la de los materiales antiferromagnéticos.

En la dirección perpendicular al plano del arreglo de láseres el confinamiento se obtiene mediante un resonador de Fabry-Pérot (ver Figura 7).

Los niveles de energía del resonador Fabry-Pérot pueden aproximarse por los niveles de un pozo de potencial cuadrado de paredes infinitas:

$$E_n = [n\lambda/2L]^2 E_R, \quad (1)$$

donde E_R es la energía de retroceso del átomo.

El confinamiento atómico tiene lugar en regiones espaciales cilíndricas de longitud L y área transversal de diámetro menor que la longitud de onda λ de la luz (Régimen de Lamb-Dicke). Los átomos confinados poseen un momento de dipolo inducido por el arreglo de láseres. Las colisiones entre ellos son de tipo dipolo-dipolo, interacción de largo alcance que tiene lugar mediante acoplamiento con los modos del campo de vacío, e implica emisión y absorción de fotones (Lenz et al., 1993). Debido al confinamiento transversal la interacción dipolo-dipolo debe tener lugar preferencialmente mediante la emisión y absorción de fotones cuyo momentum sea prácticamente paralelo al eje del resonador Fabry-Pérot atómico (eje z en la Figura 7).

Del cálculo de los elementos matriciales V_{jlm} de la interacción dipolo-dipolo para átomos confinados inicialmente en un mismo estado m del resonador atómico (Chaves y Guzmán, 1998) se obtuvo que el elemento matricial para transferencia de momentum igual al momentum de un fotón en las direcciones paralela o antiparalela al eje del resonador (colisiones inelásticas) es mucho

mayor que aquel que no involucra transferencia de momentum (colisiones elásticas). En la Figura 8 se muestra el elemento matricial en unidades de la energía de retroceso E_0 y en función de la transferencia de momentum M en unidades del momentum del fotón.

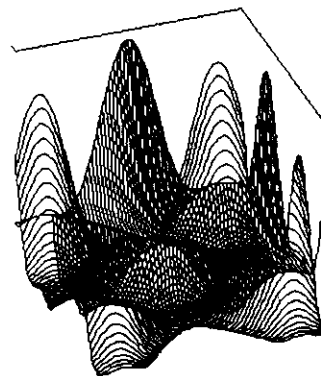
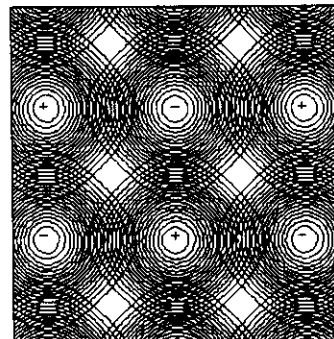


Figura 6. Potencial óptico generado en la configuración lin || lin y su correspondiente diagrama de contorno

Para $L \gg \lambda$, una colisión con transferencia del momentum de un fotón implica una transición entre niveles cuánticos de movimiento del centro de masa con $\Delta n \approx 2L/\lambda \gg 1$. Ello permite reducir el estudio de la dinámica de las colisiones a un conjunto discreto de estados, que a pesar de pertenecer al cuasi-continuo de niveles del Fabry-Pérot, no son contiguos, y aplicar así modelos de tres o cuatro niveles, análogos a los modelos láser.

Las colisiones inelásticas sólo pueden tener lugar absorbiendo o cediendo energía a un depósito. Por tanto en el modelo láser se consideraron colisiones inelásticas que

transfieren uno de los átomos a un depósito. Al desarrollar un análisis de la dinámica de poblaciones en algunos estados (o "modos") del resonador, mediante la teoría cuántica de muchos cuerpos, se encontró (Guzmán et al., 1993) que, para acoplamiento fuerte con el depósito, es posible obtener una distribución tipo Poisson para la población atómica en uno de los "modos" del resonador atómico, característica de un estado cuántico coherente y análoga a la de los estados de la radiación en un láser.

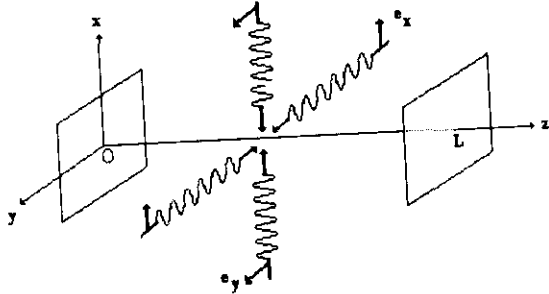


Figura 7. Diagrama de un resonador atómico tridimensional para el modelo láser de átomos de Guzmán et al.

Las colisiones elásticas no modifican la dinámica de las poblaciones en los niveles del Fabry-Perot, pero sí afectan la coherencia de la función de onda que describe el campo atómico.

Un análisis de la dinámica de la fase (Wiseman et al., 1996) de los modelos láser basados en colisiones mostró que las colisiones elásticas, debido a que destruyen la coherencia, producen un crecimiento cuadrático de la tasa de difusión de la fase con el número de átomos en el nivel láser. Para el modelo basado en enfriamiento evaporativo se obtuvo que el ancho de línea del láser de átomos es mucho mayor que el flujo de salida, lo que hace imposible realizar una medición precisa de la fase del campo, debido a que el campo de salida no contiene un número promedio de bosones mucho mayor que 1 (Wiseman, 1997). La contribución predominante al ancho de línea proviene de las colisiones elásticas.

Si la sección eficaz para colisiones elásticas dentro del modo láser fuera despreciable en comparación con la sección eficaz de colisiones inelásticas que acoplan la fuente con el modo láser, como parece ser el caso de las colisiones dipolares en el modelo de A. Guzmán et al., el comportamiento de la fase sería análogo al de un láser óptico y el problema del ancho de línea se solucionaría. Para el modelo de Holland et al., el ancho del espectro de potencia del láser atómico aumenta con la población en el

nivel láser, en tanto que en el de Guzmán et al. disminuiría, en completa analogía con los láseres ópticos.

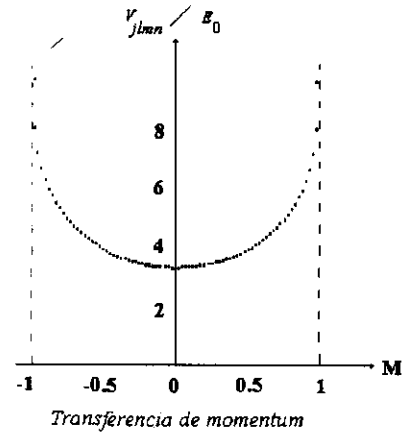


Figura 8. Elemento matricial del operador interacción dipolo-dipolo para colisiones entre átomos en un mismo modo del resonador en función de la transferencia de momentum. (Chaves y Guzmán, 1998).

En todos los modelos se requiere transferir átomos desde una fuente al modo láser, debido a que los átomos siendo partículas materiales no pueden ser creados como los fotones. El bombeo tiene lugar desde un depósito externo a la trampa o desde modos de la trampa energéticamente superiores al modo láser.

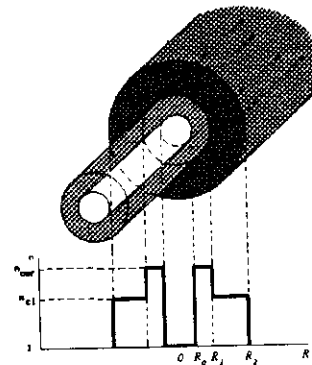


Figura 9. Esquema de una fibra óptica hueca. En la parte inferior se representa el perfil de índice de refracción. La onda evanescente en el núcleo hueco de la fibra produce una pared de potencial óptico que guía los átomos

El mecanismo de remoción de átomos en la trampa para formar un haz coherente de salida constituye otro reto tec-

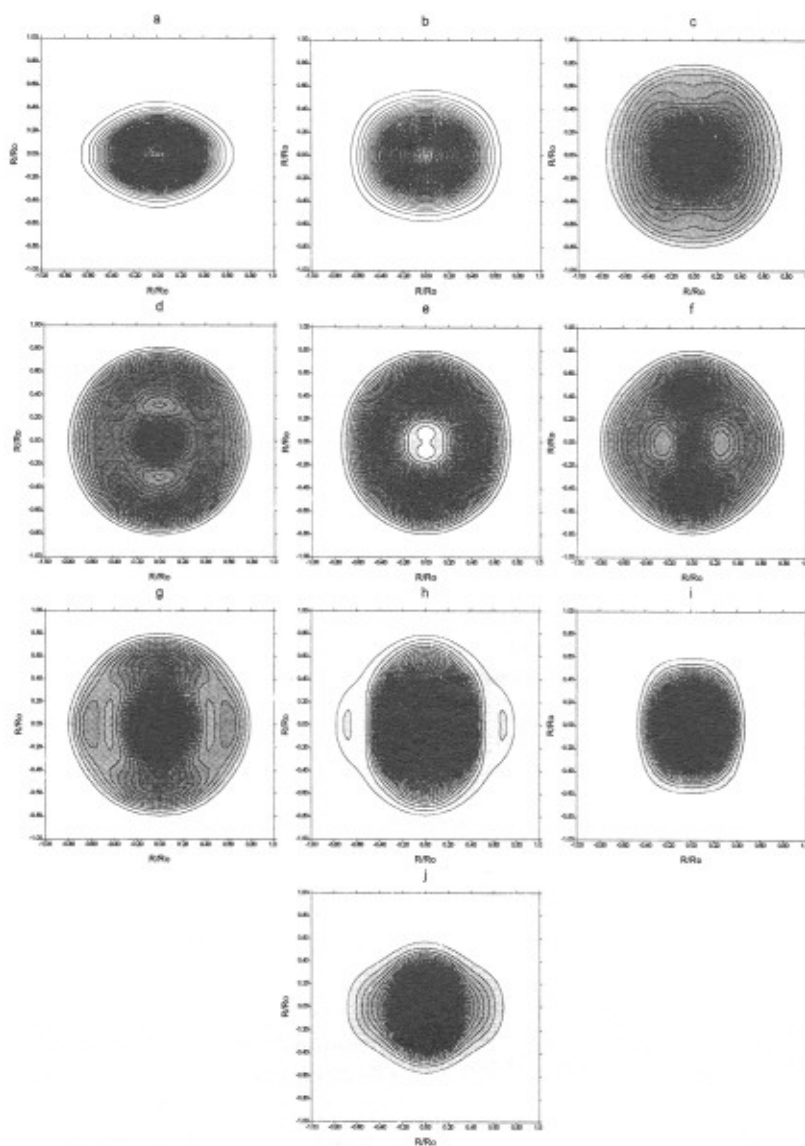


Figura 10. Distribuciones de probabilidad para un haz atómico de entrada no cilíndrico: $a:z = 0\mu\text{m}$, $b:z = 1.57\mu\text{m}$, $c:z = 3.15\mu\text{m}$, $d:z = 4.73\mu\text{m}$, $e:z = 6.31\mu\text{m}$, $f:z = 7.88\mu\text{m}$, $g:z = 9.46\mu\text{m}$, $h:z = 11.04\mu\text{m}$, $i:z = 12.62\mu\text{m}$, $j:z = 14.2\mu\text{m}$

nológico. Experimentalmente se ha realizado un acoplador de salida para el condensado de Bose-Einstein (Mewes et al., 1997) que permitiría generar "pulsos" coherentes de materia; sin embargo no se han estudiado las propiedades de coherencia del "pulso" de salida.

Para transportar el haz coherente sería útil realizar un acoplamiento a una guía de ondas atómicas. Experimentalmente se ha logrado guiar átomos de Rb con un campo láser evanescente en el interior de una fibra óptica hueca como la esquematizada en la Figura 9 (Ito et al., 1996). Se demostró un incremento del flujo atómico en un factor de 20 para una fibra hueca con diámetro interior de $7\mu\text{m}$ y longitud de 3cm . Un análisis de los modos de propagación de haces atómicos a temperaturas del orden de los μK en fibras ópticas huecas ha sido realizado por E. Arévalo y A. Guzmán (Arévalo y Guzmán, 1998). En la Figura 10 se muestran los perfiles de probabilidad para un haz atómico guiado a lo largo del eje z por una fibra hueca de diámetro interior $2\mu\text{m}$. El perfil inicial del haz es elíptico, la temperatura del haz definida con respecto a la energía cinética de los átomos es de $1\mu\text{K}$ y su longitud de onda de D'Broglie de $0.5\mu\text{m}$. Se observa que la propagación es multimodal y que el perfil cambia debido a que los modos involucrados tienen distintas constantes de propagación (Arévalo, 1998).

1 ¿La óptica del 2000?

El Premio Nobel 1997 fué concedido a William Phillips, Claude Cohen-Tannoudji y Steven Chu, por considerar que además de contribuir a una mayor comprensión de la interacción entre luz y materia, su trabajo tiene aplicaciones de gran impacto tecnológico. Las técnicas de enfriamiento desarrolladas y la comprensión del comportamiento cuántico de gases a temperaturas ultrabajas, pueden conducir a un avance muy significativo en la precisión de la medición del tiempo y la longitud. Una de las metas es obtener relojes atómicos con una precisión cien veces mayor que la actual. Los relojes atómicos constituyen el estándar internacional para calibrar el sistema de posicionamiento global (Global Positioning System) basado en señales satelitales. El sistema es usado para navegación espacial y en general para la determinación exacta de posiciones.

Las aplicaciones tecnológicas de haces atómicos coherentes no son fácilmente vislumbrables en la actualidad. Es posible imaginar un gran impacto en la tecnología de deposición de películas, fabricación de microchips ópticos o microláseres. Todos los avances en manipulación de átomos con láseres podrán contribuir a generar una técnica de litografía atómica, que constituiría

la clave para una mayor miniaturización y compacidad de chips electrónicos y optoelectrónicos.

Bibliografía

- Anderson M.H., Ensher J.R., Matthews M.R., Wieman C.E. and Cornell E.A., 1995. Observation of Bose-Einstein Condensation in a Dilute Atomic Vapor. *Science* **269**, 198-201.
- Andrews M.R., Towsend C.G., Miesner H.-J., Durfee D.S., Kurn D. M and Ketterle W., 1997. Observation of interference between two Bose condensates, *Science* **275**, 637-641.
- Arévalo E. y Guzmán A. 1998. Propagación en una guía para átomos. Enviado a III RIAO - OPTILAS'98.
- Balykin V. I. and Letokhov V. S. 1989. Atomic cavity with light induced - mirrors. *Appl. Phys. B*, **48**, 517-523.
- Berg-Sørensen K.J., Castin Y., Bonderup E. and Mølmer K., 1992. *J. Phys. B* **25**, 4195.
- Berg-Sørensen K., Castin Y., Mølmer K., and Dalibard J., 1993. *Europhys. Lett.* **22**, 663.
- Castin Y. and Dalibard J., 1991. Quantization of Atomic Motion in Optical Molasses. *Europhys. Lett* **14**, 761.
- Chaves F., Guzmán A. M. 1998. Interacción dipolo-dipolo de átomos en un resonador Fabry-Pérot. Enviado a III RIAO - OPTILAS'98.
- Chu S., Hollberg L.W, Bjorkholm J.E, Cable A., Ashkin A., 1985. Three-dimensional viscous confinement and cooling of atoms by resonance radiation pressure. *Phys. Rev. Lett.* **55**, 48-51.
- Dalibard J., Cohen-Tannoudji C., 1989. Laser cooling below the Doppler limit by polarization gradients: Simple theoretical models. *JOSA B*, **6**, 2023-2045.
- Goldstein E.V., Pax P. and Meystre P., 1996. Dipole-Dipole interaction in three-dimensional optical lattices. *Phys. Rev. A* **53**, 2604-2615.
- Grynberg G., Lounis B., Verkerk P., Courtois J.-Y., Salomon C., 1993. Quantized motion of cold cesium atoms in two- and three- dimensional optical potentials. *Phys. Rev. Lett.* **70**, 2249-2252.
- Guzmán A.M., Moore M. and Meystre P., 1996. Theory of coherent atomic-beam generator. *Phys. Rev. A* **53**, 977-984.
- Guzmán A.M., and Meystre P., 1998. Dynamical effects of the dipole-dipole interaction in three-dimensional optical lattices. *Phys. Rev. A* **57**, 1139-1148.
- Hänsch T.W, Schawlow A.L, 1975. *Opt. Commun.* **13**, 68.
- Holland M., Burnett K., Gardiner C., Cirac J. I. and Zoller P., 1996. Theory of an atom laser. *Phys. Rev. A* **54**, R1757-R1760.
- Ito H., Nakata T, Sasaki K, Ohtsu M., Lee K. I., Jhe W. 1996. Laser Spectroscopy of Atoms Guided by Evanescent

- Waves in Micron-Sized Hollow Optical Fibers. *Phys. Rev. Lett.* **76**, 4500.
- Jessen P.S., Gerz C., Lett P.D., Phillips W.D., Rolston S.L., Spreuw R.J.C., and Westbrook C.I.**, 1992. Observation of quantized motion of Rb atoms in a optical field. *Phys. Rev. Lett.* **69**, 49-52.
- Ketterle W.**, 1997. Bose-Einstein-Kondensate - eine neue Form von Quantenmaterie. *Phys. Bl.* **53** Nr.7/8, 678-680.
- Ketterle W. and Miesner H.-J.**, 1997. Coherence Properties of Bose-Einstein condensates and atom lasers. *Phys. Rev. A* **56**, 3291-3293.
- Lamb W. E. Jr** 1993. Anti-photon. Proceedings of the International Conference on Lasers'92, 1-4, (Society for Optical and Quantum Electronics, Alexandria, VA)
- Lenz G., Meystre P. and Wright E.M.**, 1993. Nonlinear atom optics. *Phys. Rev. Lett.* **71**, 3271-3274.
- Marksteiner S., Ellinger K., and Zoller P.**, 1996. Anomalous diffusion and Lévy walks in optical lattices. *Phys. Rev. A* **53**, 3409-3430.
- Mewes M.-O., Andrews M.r., Kurn D.M, Durfee D.S, Towsend C. G. and Ketterle W.**, 1997. Output Coupler for Bose-Einstein Condensed Atoms. *Phys. Rev. Lett.* **78** 582-585.
- Minogin V.G.**, 1987. Laser light pressure on atoms. Gordon and Breach Science Publishers. OPA (Amsterdam).
- Olshanii M., Castin Y. and Dalibard J.**, 1995. Proceedings of the 12th International Conference on Laser Spectroscopy, ed. M. Inguscio, M. Allegrini and A. Lasso, World Scientific.
- Petsas K.L., Coates A.B and Grynberg G.**, 1994. Crystallography of optical lattices. *Phys. Rev. A* **50**, 5173-5189.
- Spreuw R.J.C, Pfau T., Janicke U. and Wilkens M.**, 1995. Preprint Fakultät für Physik, Universität Konstanz.
- Verkerk P., Meacher D.R., Coates A.B, Courtois J.-Y., Guibal S., Lounis B., Salomon C., and Grynberg G.**, 1994. *Europhys. Lett.* **26**, 171.
- Wilkens M., Schumacher E. and Meystre P.**, 1991. Band theory of a common model of atom optics. *Phys. Rev. A* **44**, 3130-3137.
- Wilkens M., Goldstein E., Taylor B. and Meystre P.**, 1993. Fabry Pérot interferometer for atoms. *Phys. Rev. A* **47**, 2366-2369.
- Wiseman H.M. and Collett M.J.**, 1995. An atom laser based on dark-state cooling. *Phys. Lett. A*, **202**, 246.
- Wiseman H., Martins A. and Walls D.**, 1996. An atom laser based on evaporative cooling. *Quantum Semiclass. Opt.* **8**, 737.
- Wiseman H. M.**, 1997. What is an atom laser?. *Phys. Rev.A* **56**, 2068.