De la ciencia fundamental a la práctica: aplicaciones basadas en el concepto de mediciones débiles

Luis José Salazar-Serrano, Alejandra Valencia



De la ciencia fundamental a la práctica: aplicaciones basadas en el concepto de mediciones débiles

Luis José

Salazar-Serrano Ph. D., investigador del Instituto de Ciencias Fotónicas (ICFO), Barcelona, España Iuis-iose.salazar@icfo.es

Alejandra Valencia Ph. D., profesora asociada del Departamento de Física de la Universidad de los Andes ac.valencia@uniandes.edu.co Cuando realizamos una medición por medio de un aparato de medida, se asigna un número a una propiedad del objeto de interés, de tal forma que esta se pueda comparar posteriormente con otros objetos. En general, podemos entender el dispositivo de medida como un aparato que tiene una aguja que se mueve sobre una escala compuesta por marcas igualmente espaciadas, de tal forma que la magnitud del desplazamiento del indicador está directamente relacionada con el valor numérico asignado a la propiedad del objeto que se está midiendo.

Como ejemplo, consideremos un galvanómetro: un dispositivo utilizado para medir la corriente eléctrica en un circuito. En la figura 1 se presenta un esquema en el que el galvanómetro se compone de una brújula que responde al campo magnético generado por un electroimán cercano. Cuando el galvanómetro se conecta al circuito eléctrico, la magnitud de la corriente eléctrica (propiedad del objeto) que fluye a través de este es proporcional a la deflexión de la aguja (metro).



Figura 1. Ilustración de un galvanómetro. Fuente: autores

En el contexto de la mecánica cuántica, el concepto de medición es algo más sutil, debido a que al medir las dos entidades involucradas, "el metro" y "el sistema" interactúan, y como resultado, la acción de medir perturba el estado cuántico del "sistema". Como resultado, no es posible obtener información de un sistema sin perturbarlo.

Cuando las dos entidades mencionadas interactúan, una correlación entre el metro (que tiene la escala que permite medir) y el sistema (que tiene la propiedad que nos interesa medir) es generada, de tal forma que una propiedad del metro cambia de cierta manera que es proporcional a alguna propiedad observable del sistema. En otras palabras, la acción de medir hace que los dos subsistemas interactúen instantáneamente, de tal forma que los dos grados de libertad, uno del sistema y otro del metro, se "enreden" y, por lo tanto, sea posible extraer información sobre el sistema por medio del metro.

En términos de aplicaciones relacionadas con la luz, el metro corresponde generalmente a un grado continuo de libertad —por ejemplo, el perfil espacial [1], temporal [2] o espectral de un haz de luz [3]—, mientras que el sistema puede corresponder a una propiedad discreta que se va a medir, como el estado de polarización o el sentido de giro de un haz de luz en un interferómetro [4]. Para ilustrar el concepto de medición bajo un contexto cuántico, consideremos la situación en la que queremos determinar el estado de la polarización lineal de un haz de luz láser. En la figura 2 se muestra un haz de luz propagándose en una dirección determinada, cuya polarización, la dirección correspondiente al plano en que oscila el campo eléctrico, es desconocida.

Para determinar experimentalmente el estado de polarización de un haz de luz hay diferentes técnicas disponibles. El método estándar consiste en hacer pasar el haz a través de un polarizador, de tal forma que al rotar el eje del mismo se observa un cambio en la intensidad de la luz transmitida. La dirección del eje del polarizador, en el que la intensidad observada es máxima, corresponde a la dirección en que la luz está polarizada.

Otra alternativa, más ilustrativa para la presente discusión, es el uso de un cristal birrefringente, cuya característica principal es que en él la luz viaja por un camino diferente, según su estado de polarización (véase la figura 3). De esta manera, en términos de los conceptos descritos anteriormente, el cristal birrefringente genera una interacción que acopla la posición transversal del haz (el metro) con su polarización (el sistema).



Figura 2. Polarización de la luz. Fuente: autores



Figura 3. Efecto de un cristal birrefringente. Fuente: autores

Consideremos ahora el caso en que el cristal se prepara de tal forma que la componente del haz con polarización vertical se propaga a lo largo del mismo sin ningún cambio en su dirección respecto al haz de entrada (figura 4a), mientras que un haz polarizado horizontalmente cambia su dirección debido a refracción; como resultado, se observa a la salida del cristal un haz desplazado una cierta distancia Δ , que depende directamente de la longitud del cristal (figura 4b). La figura 4c presenta el escenario más general en que a la entrada del cristal se tiene un haz cuyo estado de polarización es desconocido. En este último caso, el haz se divide dentro del cristal en dos componentes con polarizaciones ortogonales que se propagan en diferentes direcciones. Después de una segunda refracción en la segunda cara del cristal (interfaz cristalaire), los dos haces de salida están espacialmente separados y se propagan en la misma dirección que el haz de entrada.

Para medir el estado de polarización lineal del haz de entrada, observamos la distribución de intensidad a la salida del cris-

tal con una pantalla que tiene una escala compuesta por dos marcas en las posiciones -1 y +1, que corresponden a las polarizaciones vertical y horizontal, respectivamente. La intensidad observada en cada marca determina la proporción de luz polarizada horizontalmente o verticalmente en el haz de entrada. Por otro lado, la posición del centroide (valor promedio de la distribución, indicado por una flecha en la figura 4) está limitada al intervalo [-1, +1], y está directamente relacionada con el ángulo de polarización del haz de entrada mediante la relación $\theta = \cos^{-1}(x)/2$, en donde x corresponde a la posición del centroide.

Como ejemplo, consideremos los casos en los cuales el haz de entrada está polarizado verticalmente, horizontalmente y a 45°. En el primer caso, el centroide se encuentra en la marca -1 ($\theta = 90^{\circ}$), que corresponde a un haz polarizado verticalmente, como se muestra en la figura 4a. De manera similar, en el segundo caso, ilustrado en la figura 4b, para un haz polarizado horizontalmente, el centroide se encuentra en la marca +1 ($\theta = 0^{\circ}$). Por el contrario, para el caso de polarización diagonal, que resulta de la combinación de los dos casos anteriores, el centroide se encuentra ubicado en la marca 0 ($\theta = 45^{\circ}$), que es consistente con el hecho de que a la salida se observan picos de igual amplitud ubicados en las marcas -1 y + 1. Nótese que los resultados de las mediciones correspondientes a estados de polarización horizontal o vertical solamente pueden resolverse al observarlos en la pantalla si la separación entre los centroides de los haces a la salida, Δ , es mayor al ancho del haz de entrada σ .

En el contexto de la mecánica cuántica, una medición se define como fuerte (*strong measurement*) cuando la magnitud del acoplamiento entre el sistema (polarización) y el metro (posición



Figura 4. Medición del estado de polarización de la luz usando un cristal birrefringente. Fuente: autores



Figura 5. (a) Medición fuerte. (b) Medición débil. (c) Esquema de amplificación del valor débil. Fuente: autores

del haz a la salida) permite diferenciar todos los posibles valores de la propiedad del sistema mediante la observación del metro. En términos del esquema de la figura 5, la medición está en el régimen fuerte cuando el cristal es lo suficientemente largo para permitir que los dos haces con polarizaciones ortogonales se propaguen lo suficiente para que puedan diferenciarse espacialmente a la salida (Δ grande respecto a σ), permitiendo así que todos los posibles valores de polarización (vertical y horizontal) puedan ser claramente diferenciados (figura 5a).

Es importante destacar que el esquema de medición de polarización descrito es consistente con la definición de una medida ideal, según la mecánica cuántica, solo cuando el diámetro del haz de entrada, σ, es menor que la separación espacial entre los posibles resultados (es decir, la distancia entre las marcas -1 y +1). En el régimen de strong measurement, el resultado se caracteriza porque (i) la distribución de intensidad observada en la pantalla está compuesta por picos centrados únicamente en los posibles resultados del experimento; en este caso, $\{-1, +1\}$; (ii) la intensidad de los picos observados proporciona información sobre la cantidad de cada componente de polarización presente en el haz de entrada; (iii) inmediatamente después de la medición, el estado de polarización del haz colapsa hasta el estado correspondiente al valor medido del observable. Nótese que una medición fuerte borra completamente el estado de entrada: el haz de salida es completamente diferente al haz de entrada.

Consideremos ahora el caso contrario, en que el cristal no es lo suficientemente largo. En este régimen, las dos componentes a la salida del cristal se sobreponen y no pueden diferenciarse espacialmente. Este caso es conocido como una *medición débil (weak measurement*), y se ilustra en la figura 5b. En principio, puede pensarse que una medición de este tipo no ofrece información alguna respecto al estado de polarización del haz de luz a la entrada, ya que bajo este esquema no es posible diferenciar las posiciones correspondientes a cada una de las polarizaciones. En otras palabras, el centroide está limitado a moverse sobre un intervalo tan pequeño que su cambio de posición es imperceptible en la pantalla.

Sorprendentemente, si se selecciona de modo apropiado el estado final del sistema, es decir, si se incluye un polarizador después del cristal birrefringente y se rota su eje a cierto ángulo particular, es posible observar un desplazamiento del centroide por fuera del intervalo [-1, +1]. Este curioso efecto, descrito en 1988 por Yakir Aharonov, David Albert y Lev Vaidman bajo el nombre de *amplificación del valor débil*, o WVA (*weak value amplification*) [5] en el artículo "How the result of a measurement of a component of the spin of a spin-1/2 particle can turn out to be 100", ha demostrado desde entonces ser de gran utilidad para medir cantidades extremadamente pequeñas, debido a que permite amplificar pequeños desplazamientos dependientes de la polarización, caracterizados en este caso particular por Δ a partir de grandes desplazamientos de la posición del centroide.

Comparando la figura 5b con la 5c se ilustra la diferencia entre una medida débil y un esquema de amplificación del valor débil. En el primer caso, el desplazamiento Δ es pequeño respecto al diámetro del haz de entrada, y por lo tanto no puede resolverse

su valor. En el segundo caso se introduce una etapa de postselección de la polarización, que genera un efecto de amplificación en el que la distribución de intensidad observada a la salida corresponde a un solo pico, cuyo centroide se encuentra fuera del intervalo [-1, +1], y por lo tanto puede medirse fácilmente.

Aharonov y sus colaboradores demostraron que el desplazamiento del centroide es máximo cuando el eje del polarizador utilizado en la postselección corresponde a un estado de polarización ortogonal al estado inicial de la luz. Como resultado, a medida que el desplazamiento del centroide es mayor, su amplitud se ve drásticamente reducida. De esta manera, desde el punto de vista experimental, el máximo desplazamiento medible del centroide (máxima amplificación) se determina a partir de la mínima señal que puede ser medida por los detectores disponibles.

Es importante reconocer que el esquema de amplificación del valor débil es bastante general y no está restringido solamente al uso de los grados de libertad de polarización y posición. Como resultado, puede consultarse en la literatura una amplia gama de aplicaciones, que van desde la medición de deflexiones y desplazamientos de haces extremadamente pequeños, pasando por mediciones de actividad óptica, hasta llegar a la medición de temperatura. En la tabla 1 se enumeran algunos de los ejemplos más relevantes que hacen uso de esta técnica.

Observable	Resultados
Desplazamientos de haces	Primera demostración experimental del efecto Hall de la luz (SHEL), en la que se consigue medir el desplazamiento de un haz a través de una interfaz aire-vidrio, con una sensibilidad de ~ 0,1 nm [6]
Deflexiones angulares	Medición del ángulo de deflexión de un espejo del orden de 400 femtorradianes [4]
Actividad óptica	Medición de birrefringencia circular del orden de $\Delta n = 10^{-9}$ con un error de menos del 1% [8]
Corrimiento de fase	Medición de corrimientos de fase del orden de ~10 ⁻³ radianes con una precisión de 10 ⁻⁴ rad, usando un diodo emisor de luz comercial [9]
Retardos temporales	Medición de retardos entre pulsos de luz del orden de femtosegundos, usando pulsos del orden de picosegundos [2]
Distancia	Identificación del número de capas de grafeno de una muestra haciendo uso del SHEL [10]
Temperatura	Medición de temperatura con sensibilidad de 0,2 mK sobre un intervalo de 20 mK de forma indirecta a partir de la medición de desviaciones del orden de nanómetros en la posición de un haz [11]

 Tabla 1. Ejemplos de aplicaciones que hacen uso de un esquema de amplificación del valor débil

 Fuente: autores

En lo que respecta al Laboratorio de Óptica Cuántica de la Universidad de los Andes, hemos tenido la oportunidad de aplicar el concepto de amplificación del valor débil para desarrollar y demostrar un desplazador de haces supersensible (*highly sensitive tunable beam displacer*), capaz de desplazar un haz con una sensibilidad de 40 nm/arcmin, y también para mejorar la sensibilidad de mediciones de temperatura basadas en *Fiber Bragg Gratings (FBG*). En la figura 6 se describen los esquemas experimentales. En cada caso se selecciona inicialmente la polarización de la luz a 45° (preselección), y posteriormente se implementa un desplazamiento que depende de la polarización (medición débil). En el primer caso, el desplazamiento se lleva a cabo en el dominio del espacio Δx (figura 6a), mientras que en el segundo, en el dominio de la frecuencia Δv (figura 6b). Nótese que para garantizar el régimen de medición débil, cada desplazamiento es pequeño respecto al ancho del haz σ o al ancho de banda B. Después de la etapa de postselección, implementada con un polarizador, se observa que el centroide de la distribución de intensidad final se desplazar respecto al valor inicial en una cantidad definida como el factor de amplificación A.











Figura 6. (a) sistema y metro en aplicaciones que desplazan espacialmente un haz de luz. (b) sistema y metro para aplicaciones en las que se desplaza la frecuencia de un haz de luz Fuente: autores



Figura 7. a. Desplazador de haz basado en una lámina transparente de placas paralelas; b. Desplazador de haz sintonizable; PBS denota un divisor de haz polarizado, y E denota espejos Fuente: autores

DEMOSTRACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN DESPLAZADOR DE HACES SUPERSENSIBLE

En el caso de algunas aplicaciones ópticas es necesario contar con un haz de luz que pueda escanearse sobre un intervalo determinado. Una alternativa para conseguir este objetivo es utilizar cristales birrefringentes de diferentes longitudes. Sin embargo, dada la complejidad que supone esta configuración, normalmente se acude al uso de espejos móviles [11, 12], una placa transparente de cierto espesor con superficies paralelas o un desplazador de haz sintonizable (*Tunable Beam Displacer* [TBD]) [13]. En todos los casos mencionados, el cambio en la posición del haz de salida resulta de la rotación mecánica de un elemento óptico. Esta condición impone una limitación técnica a la sensibilidad del desplazador de haz, ya que se relaciona directamente con la sensibilidad mecánica que podemos alcanzar al realizar la rotación. Como ejemplo, al usar una lámina transparente de placas paralelas se puede obtener un desplazamiento típico del haz de $\approx 12,5 \ \mu m/grado$, en donde el factor de proporcionalidad depende del espesor de la placa y su índice de refracción (figura 7a). Por otro lado, para un TBD, el factor de proporcionalidad es $\approx 5 \ mm/grado$, que se determina principalmente por la distancia desde los espejos al PBS (figura 7b).

En el artículo "Demonstration of a highly-sensitive tunable beam displacer with no use of beam deflection based on the concept of weak value amplification" [15] presentamos los resultados experimentales correspondientes al desarrollo y demostración de un nuevo tipo de desplazador de haz, cuya sensibilidad mejora significativamente las limitaciones impuestas por el uso de elementos ópticos móviles que utilizan la reflexión o refracción de la luz como principio físico de funcionamiento. El esquema, basado en el concepto de amplificación del valor débil [5], permite convertir dos haces con polarizaciones ortogonales que se superponen ligeramente en el espacio en un solo haz, cuyo centroide puede ser ajustado al cambiar solamente la polariza-



Figura 8. Montaje experimental para la implementación de un desplazador espacial de un haz de luz, en el que se indican claramente las etapas de preselección (pre), postselección (post) y medición débil (MD) Fuente: autores

ción lineal del haz de salida mediante una etapa de postselección implementada con un polarizador.

El esquema descrito en la figura 8 resulta ventajoso si se compara con otras alternativas basadas en reflexiones o refracciones inducidas por la rotación de una óptica específica, porque la máxima sensibilidad está determinada por el tamaño de paso de la etapa de rotación utilizada para girar el polarizador de postselección, que puede ser muy pequeño. A partir de los resultados experimentales, sin necesidad de utilizar elementos ópticos que refleien o refracten el haz, demostramos que el centroide de un haz gaussiano puede desplazarse una distancia bastante inferior a su ancho. En particular, en el experimento encontramos que la dependencia entre la posición del centroide y el ángulo del polarizador de postselección es casi lineal, lo que nos permitió desplazar el centroide de un haz gaussiano con un ancho de \sim 600 µm, a lo largo de un intervalo de -120 µm a +120 µm en pasos de menos de $\sim 1 \mu m$, girando solamente el polarizador de postselección entre 0º y 90º. Los resultados corresponden a una sensibilidad de 40 nm/arcmin, que es bastante superior a la normalmente presentada por componentes comerciales, entre 200 nm/arcmin y 400 nm/arcmin.

MEJORANDO LA SENSIBILIDAD DE MEDICIONES DE TEMPERATURA USANDO FIBER BRAGG GRATINGS (FBG)

Una *Fiber Bragg Grating* (FBG) es una fibra óptica en la que se escribe una variación periódica del índice de refracción, como se



Figura 9. a) Respuesta espectral de una FBG; b) espectros medidos para una FBG a diferentes temperaturas

Fuente: a) adaptación de https://en.wikipedia.org/wiki/Fiber_Bragg_grating#/media/File:Fiber_ Bragg_Grating-en.svg; b) autores



Figura 10. Montaje experimental para la implementación de un desplazador de frecuencias de un haz de luz, indicando claramente las etapas de preselección (pre), postselección (post) y medición débil (MD). Fuente: autores

ilustra en la figura 9a. El dispositivo se comporta como un filtro óptico pasabanda, cuya frecuencia central (centroide) depende del valor de la temperatura a la que está sometida la fibra. Los sensores FBG han atraído gran interés en las últimas tres décadas debido a sus características intrínsecas, tales como inmunidad a la interferencia electromagnética, tamaño pequeño, peso ligero y su capacidad de multiplexación.

En la actualidad hay diferentes métodos para inferir la temperatura a partir de la medición de la posición del centroide del espectro reflejado de la FBG. Por ejemplo, pueden usarse filtros sintonizables, fuentes de luz sintonizables o métodos interferométricos, entre otros [16]. Las tecnologías actuales ofrecen típicamente una sensibilidad de ~ 0,01 nm/°C; de esta manera, medir una diferencia de 10 °C requiere de un sistema de detección capaz de diferenciar un desplazamiento de 0,1 nm entre dos espectros cuyo ancho es de alrededor de 1 nm. Como referencia, la figura 9b presenta espectros medidos a diferentes temperaturas. Nótese la dificultad para identificar con precisión la posición del centroide en una variación de temperatura de 10 °C.

En general, mejorar la sensibilidad mencionada se traduce en un aumento considerable de la complejidad del esquema de interrogación, que al final se traduce en un componente de detección bastante más costoso. Sin embargo, una situación en la que se observa un pequeño desplazamiento de frecuencia respecto al ancho del espectro es el escenario perfecto para un esquema de amplificación del valor débil, tal y como fue mencionado anteriormente para el caso de desplazamientos espaciales.

En el artículo "Enhancement of the sensitivity of a temperature sensor based on fiber Bragg gratings via weak value amplification" [3] presentamos los resultados de utilizar un esquema de WVA para mejorar la sensibilidad de mediciones de temperatura basadas en FBG. El esquema implementado, ilustrado en la figura 10, hace uso de una fuente de luz con un espectro ancho, dos FBG a temperaturas ligeramente diferentes y un analizador de espectro óptico (OSA), todos ellos interconectados por circuladores ópticos y fibras ópticas. La técnica requiere solo elementos ópticos lineales para su implementación, y aparece como un método prometedor para aumentar la sensibilidad que los sensores de última generación pueden proporcionar actualmente.

A partir de los resultados experimentales, encontramos que el sistema propuesto es capaz de obtener una sensibilidad de ~ 0,035 nm/°C, un aumento de casi cuatro veces de la sensibilidad correspondiente al mismo sistema FBG interrogado usando métodos estándar (panel en la figura 10).

Los experimentos expuestos son sumamente valiosos, ya que, además de proporcionar conclusiones de valor científico, son una clara demostración del importante papel que juega la investigación básica en el desarrollo de nuevas tecnologías que pueden redefinir nuestro estilo de vida. En los últimos años, el desarrollo de las naciones ha estado cada vez más ligado a su competitividad en conocimiento. Consciente de este patrón, el Grupo de Óptica Cuántica Experimental de la Universidad de los Andes pretende contribuir al entendimiento de la luz, no solo para avanzar el límite del conocimiento científico, sino también para impulsar la cultura científica en Colombia y así contribuir a la generación de riqueza y al desarrollo de nuestro país.

REFERENCIAS

- Ritchie NWM, Story JG, Hulet RG. Realization of a measurement of a "weak value". Physical Review Letters 1991; 66(9): 1107-1110.
- [2] Salazar-Serrano LJ, Janner D, Brunner N, Pruneri V, Torres JP. Measurement of sub-pulse-width temporal delays via spectral interference induced by weak value amplification. Physics Review A 2014; 89(1): 012126.
- [3] Salazar-Serrano LJ, Barrera D, Amaya W, Sales S, Pruneri V, Capmany J et al. Enhancement of the sensitivity of a temperature sensor based on fiber Bragg gratings via weak value amplification. Optics Letters 2015; 40(17): 3962-3965.
- [4] Dixon PB, Starling DJ, Jordan AN, Howell JC. Ultrasensitive beam deflection measurement via interferometric weak value amplification. Physical Review Letters 2009; 102(17): 173601.
- [5] Aharonov Y, Albert D, Vaidman L. How the result of a measurement of a component of the spin of a spin-1/2 particle can turn out to be 100. Physical Review Letters 1988; 60(14): 1351-1354.
- [6] Hosten O, Kwiat P. Observation of the spin hall effect of light via weak measurements. Science 2008; 319(5864): 787-790.
- [7] Pfeifer M, Fischer P. Weak value amplified optical activity measurements. Optics Express 2011; 19(17): 16508-16517.
- [8] Xu XY, Kedem Y, Sun K, Vaidman L, Li CF, Guo GC. Phase estimation with weak measurement using a white light source. Physical Review Letters 2013; 111(3): 033604-033607.
- Zhou X, Ling X, Luo H, Wen S. Identifying graphene layers via spin Hall effect of light. Applied Physics Letters 2012; 101(25): 251602.
- [10] Egan P, Stone JA. Weak-value thermostat with 0.2 mK precision. Optics Letters 2012; 37(23): 4991-4993.
- [11] Gálvez EJ. Achromatic polarization-preserving beam displacer. Optics Letters 2001; 26(13): 971-973.
- [12] Li Y. Laser beam scanning by rotary mirrors. II. Conic-section scan patterns. Applied Optics 1995; 34(28): 6417-6430.
- [13] Salazar-Serrano LJ, Valencia A, Torres JP. Tunable beam displacer. Review of Scientific Instruments 2015; 86(3): 033109.
- [14] Salazar-Serrano LJ, Guzmán DA, Valencia A, Torres JP. Demonstration of a highly-sensitive tunable beam displacer with no use of beam deflection based on the concept of weak value amplification. Optics Express 2015; 23(8): 10097-10102.
- [15] Chen J, Liu B, Zhang H. Review of fiber Bragg grating sensor technology. Frontiers of Optoelectronics in China 2011; 4(2): 204-212.