

---

# Práctica N° 2

## Medición de velocidad de la luz con pares de fotones



Araiza Bautista Luis Angel  
Jain Jiménez Abraham  
Sánchez Nicolás Cristo Fernando  
Silva Ruiz Andrés

Laboratorio de Física Contemporánea II  
Universidad Nacional Autónoma de México,  
Facultad de Ciencias.



Entregado - 28 de junio de 2024

---

### Resumen

Este experimento tuvo como objetivo medir la velocidad de la luz utilizando un método basado en la correlación de fotones entrelazados.

Se empleó un láser violeta de 405 nm y 120 mW, incidiendo sobre un cristal de Beta-Bario-Borato ( $\beta$ BBO) tipo II para generar pares de fotones mediante Conversión Paramétrica Espontánea Descendente (SPDC). Los fotones se detectaron utilizando dos detectores de fotones únicos conectados a un osciloscopio WavePro 760Zi con resolución temporal de 50 ps.

Se midió la diferencia de distancia entre los detectores y el cristal, así como la diferencia temporal entre las señales detectadas. Se realizaron 25 mediciones de distancia y 25 de tiempo, analizando únicamente los casos con coincidencias de fotones en ambos canales.

Los resultados mostraron una velocidad de la luz promedio de  $v = 2.555 \pm 0.015 \times 10^8 \frac{m}{s} \times 10^8$  m/s, con una incertidumbre relativa del 0.59 %. Esta medida difiere en un 14.76 % del valor aceptado, lo cual se atribuye principalmente a errores sistemáticos en la medición de distancias y limitaciones en la resolución temporal del osciloscopio.

---

## 1. Introducción

Este experimento utiliza el SPDC (Conversión Paramétrica Espontánea Descendente) para generar pares de fotones correlacionados. En un proceso de SPDC, un fotón de alta energía incidente en un cristal no lineal se divide espontáneamente en dos fotones de menor energía, conservando la energía y el momento total [1].

Este proceso genera pares de fotones correlacionados, también conocidos como fotones entrelazados. El entrelazamiento cuántico es un fenómeno

fundamental en la mecánica cuántica que describe una correlación fuerte entre partículas que persiste incluso cuando están separadas espacialmente [2].

La naturaleza correlacionada de los pares de fotones generados por SPDC permite medir con gran precisión la diferencia en los tiempos de llegada a dos detectores separados espacialmente.

La velocidad de la luz ( $c$ ) se puede calcular utilizando la relación:

$$c = \frac{\Delta d}{\Delta t} \quad (1)$$

donde  $\Delta d$  es la diferencia en las distancias recorridas por los fotones y  $\Delta t$  es la diferencia en sus tiempos de llegada a los detectores.

donde  $\Delta d$  es la diferencia en las distancias recorridas por los fotones y  $\Delta t$  es la diferencia en sus tiempos de llegada a los detectores.

Esta relación fundamental se deriva de la definición de velocidad en la mecánica clásica, pero se aplica igualmente a la propagación de la luz en el vacío [3].

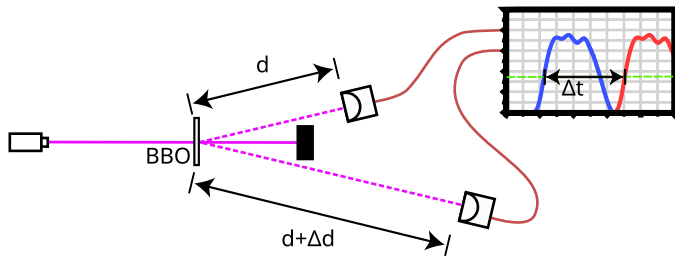


Figura 1: Diagrama del desfase que sufre la detección de la señal de fotones al momento de haber una diferencia de distancia entre los detectores.

Las fuentes de luz más apropiadas para este experimento son los láseres, dispositivos que emiten luz mediante procesos de amplificación óptica basados en la emisión estimulada de radiación electromagnética [4].

Los láseres emiten luz coherente, que posee una frecuencia angular, fase y amplitud constantes. La coherencia en física refiere al potencial de dos ondas para interferir; dos rayos monocromáticos de una misma fuente siempre interfieren, mientras que los producidos de diferentes fuentes son mutuamente incoherentes [5].

Para detectar los fotones individuales, se utilizan detectores de fotones únicos, generalmente basados en fotodiodos de avalancha. Estos dispositivos son capaces de detectar niveles de luz extremadamente bajos, incluso fotones individuales, con una resolución temporal del orden de picosegundos [6].

El método utilizado en este experimento, aprovecha la precisión del SPDC y la alta resolución temporal de los osciloscopios al observar los pulsos emitidos por detectores de fotones únicos. Esta técnica permite realizar una medición precisa de la veloci-

dad de la luz, con potenciales ventajas sobre métodos más tradicionales.

## 2. Objetivos

Los objetivos principales de este experimento son:

- Medir la velocidad de la luz utilizando el método de correlación de fotones entrelazados, comparando el resultado obtenido con el valor aceptado.
- Demostrar la aplicación práctica del proceso de Conversión Paramétrica Espontánea Descendente (SPDC) en mediciones de alta precisión.
- Evaluar la precisión y las limitaciones del método propuesto, identificando las principales fuentes de error experimental.
- Comparar las ventajas y desventajas de este método con otros métodos tradicionales de medición de la velocidad de la luz.
- Explorar las implicaciones de la naturaleza cuántica de la luz en mediciones de alta precisión y su potencial en aplicaciones futuras.

## 3. Metodología

Se implementó el siguiente arreglo experimental (Figura 1):

Un láser violeta de 405 nm y 120 mW se hizo incidir sobre un cristal de Beta-Bario-Borato ( $\beta$ BBO) tipo II de 3 mm de espesor, alineado perpendicularmente a la trayectoria del haz. Este cristal se utilizó para generar pares de fotones mediante el proceso de Conversión Paramétrica Espontánea Descendente (SPDC).

La salida del cristal formó una estructura de dos conos, con un ángulo de  $3^\circ$  entre ellos respecto a la trayectoria original del haz.

La componente del haz debida a la transparencia se bloqueó con un objeto opaco.

Los haces provenientes de los conos se conectaron por medio de fibras ópticas a dos detectores de fotones únicos, denominados *Testigo* (g) y *Señal* (i).

El arreglo se dispuso de manera que uno de los detectores estuviera a una distancia considerablemente mayor (más de 1 m) que el otro respecto al cristal BBO.

Los detectores se conectaron a un osciloscopio de alta velocidad *WavePro 760Zi-A* con resolución capaz de resolver diferencias de tiempo del orden de hasta 50ps por muestra.

Se midió la diferencia de distancia ( $\Delta d$ ) entre los detectores y el cristal utilizando un flexómetro con escala milimétrica, realizando 25 mediciones (ver Anexo A).

Los pulsos provenientes de los detectores se analizaron mediante el osciloscopio. Estos pulsos, con una altura característica de 1.96 V, y un perfil particular (Figura 2), se identificaron fácilmente.

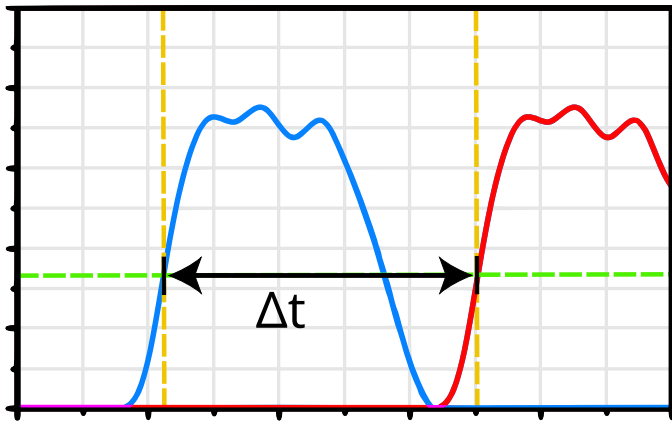


Figura 2: Vista esquemática de los pulsos en el osciloscopio

Utilizando la función de *trigger* del osciloscopio, se observó una de las señales en una posición fija, mientras que la otra aparecía intermitentemente.

Debido a la distribución aleatoria de los fotones, se observó que, a pequeñas diferencias de tiempo, aparecía repetidamente una señal en una posición temporal fija respecto a la señal *triggeada*, interpretándose como fotones provenientes del mismo grupo de fotones.

Se utilizó la función de *congelar* y *descongelar* la imagen del osciloscopio múltiples veces, obteniendo pares de fotones en aproximadamente el 4 % de las mediciones. Se analizaron únicamente los casos con un fotón en cada canal.

Para estas coincidencias, se midió la separación temporal de los pulsos utilizando los cursores verticales del osciloscopio. Se estableció como referencia un punto en que los pulsos alcanzaban aproximadamente 1/3 de su altura total.

Se realizaron 25 mediciones de esta separación temporal (ver Anexo B).

## 4. Resultados

### SOBRE $\Delta d$ :

Con respecto a este término en la definición de  $v$ , medimos veinticinco veces esta distancia asociada a los lentes con el flexómetro cuya mínima escala es de 1mm. De aquí que cada medición tendrá una incertidumbre asociada de  $\frac{1}{2}$ (escala mínima), es decir, 0.5mm.

La tabla con las mediciones directas de  $\Delta d$  se encuentra en el [Apéndice A](#).

Con base en esas mediciones, calculamos el promedio de  $\Delta d$  y su incertidumbre con respecto a las 25 mediciones:

$$\begin{aligned}\overline{\Delta d} &= \frac{1}{25} \sum_{i=1}^{25} \Delta d_i \\ &= 108.82800000000003cm \\ &= 1.0882800000000003m\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma(\overline{\Delta d}) &= \frac{1}{\sqrt{25}} \sqrt{\sum_{i=1}^{25} \sigma^2(\Delta d_i)} \\ &= \frac{1}{5} \sqrt{25(0.05)^2} = 0.05cm = 0.0005m\end{aligned}$$

Con ello se determinó  $\Delta d$  como:

$$\boxed{\Delta d = 1.08828 \pm 0.0005m}$$

### SOBRE $\Delta t$ :

Ahora se presentan los resultados, análogos, pero con respecto al término temporal.

En cuanto a la incertidumbre temporal, asociada a la diferencia de fase, se optó por partir de tomar la escala mínima del osciloscopio; esto debido a la dificultad de conocer todos los valores presentes en la fórmula asociada a la precisión de la medición de la delta de tiempo (*Delta Time Measurement Accuracy*) que presenta el fabricante.

De acuerdo al manual registramos la escala mínima,  $50ps$ , por lo que tomamos la incertidumbre como  $\frac{1}{2}$ (escala mínima), es decir,  $25ps$ .

La tabla con las mediciones directas de  $\Delta t$  se encuentra en el [Apéndice B](#).

Con base en tales mediciones, calculamos el promedio de  $\Delta t$  y su incertidumbre con respecto a las 25 mediciones:

$$\overline{\Delta t} = \frac{1}{25} \sum_{i=1}^{25} \Delta t_i = 4.2588ns = 4.2588 \times 10^{-9}s$$

$$\sigma(\overline{\Delta t}) = \frac{1}{\sqrt{25}} \sqrt{\sum_{i=1}^{25} \sigma^2(\Delta t_i)} = \frac{1}{5} \sqrt{25(0.025)^2} \\ = 0.025ns = 2.5 \times 10^{-11}s$$

Con ello se determinó  $\Delta t$  como:

$$\Delta d = 1.08828 \pm 0.0005$$

### SOBRE $v$ :

De acuerdo a la ecuación 1, usando los resultados reportados anteriormente tenemos que:

$$v = \frac{\overline{\Delta d}}{\overline{\Delta t}} = \frac{108.82800000000003cm}{4.2588ns}$$

Por lo que obtenemos que:

$$v = 25.55367709213864 \frac{cm}{ns} \\ = 255536770.9213864 \frac{m}{s} \\ = 2.55536770921386 \times 10^8 \frac{m}{s}$$

Ahora, con respecto a la propagación de las incertidumbres asociadas a  $v$ , reportamos:

$$\sigma(v) = v \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma(\overline{\Delta d})}{\overline{\Delta d}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma(\overline{\Delta t})}{\overline{\Delta t}}\right)^2} \\ = 0.15046388784190784 \frac{cm}{ns} \\ = 1.50463887841908 \times 10^6 \frac{m}{s}$$

Con todas estas consideraciones, se concluyó que la velocidad medida fue de:

$$v = 2.555 \pm 0.015 \times 10^8 \frac{m}{s}$$

## 5. Análisis, discusión e interpretación de los resultados

De acuerdo a los resultados, con respecto a nuestra medición de  $v$ , reportamos el siguiente error relativo porcentual:

$$E_r^v = \frac{\sigma(v)}{v} \cdot 100 \% \quad (2) \\ = \frac{0.15046388784190784 \frac{cm}{ns}}{25.55367709213864 \frac{cm}{ns}} \cdot 100 \% \\ \approx 0.59 \%$$

Ahora, en cuanto al error de nuestro cálculo con respecto a la definición de la velocidad real de la luz,  $c \approx 29.979246 \frac{cm}{ns}$ , reportamos lo siguiente para el error absoluto:

$$E_a = |valor_{real} - valor_{medido}| = |c - v| \quad (3) \\ = |29.979246 \frac{cm}{ns} - 25.55367709213864 \frac{cm}{ns}| \\ \approx 4.425 \frac{cm}{ns}$$

De lo anterior, para el error relativo porcentual de  $v$  con respecto a  $c$  tenemos:

$$E_r = \frac{E_a}{valor_{real}} \cdot 100 \% = \frac{4.425 \frac{cm}{ns}}{29.979246 \frac{cm}{ns}} \cdot 100 \% \quad (4) \\ = 14.76 \%$$

## 6. Conclusiones

- El método demostró ser una alternativa viable a las técnicas tradicionales de medición de la velocidad de la luz, con la ventaja adicional de ilustrar principios fundamentales de la óptica cuántica. Se logró medir la velocidad de la luz con un valor de  $v = 2.555 \pm 0.015 \times 10^8 \frac{m}{s} \times 10^8 m/s$ .
- Con una incertidumbre relativa del 0.59 % nuestra medida difiere en un 14.76 % del valor aceptado, lo cual se atribuye principalmente a errores sistemáticos en la medición de distancias y limitaciones en la resolución temporal del osciloscopio. Esto sugiere la necesidad de mejoras en el control de errores sistemáticos, y el uso de técnicas de medición de distancia más precisas y equipos con mayor resolución temporal.

## Referencias

- [1] Paul G. Kwiat, Klaus Mattle, Harald Weinfurter, Anton Zeilinger, Alexander V. Sergienko, and Yanhua Shih. New high-intensity source of polarization-entangled photon pairs. *Physical Review Letters*, 75(24):4337–4341, 1995.
- [2] Albert Einstein, Boris Podolsky, and Nathan Rosen. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Physical review*, 47(10):777, 1935.
- [3] John David Jackson. *Classical Electrodynamics*. Wiley, 1999.
- [4] Charles H. Townes. *How the Laser Happened: Adventures of a Scientist*. Oxford University Press, 1999.
- [5] M. Born and E. Wolf. *Principles of Optics*. Cambridge University Press, 1999.
- [6] Sergio Cova, Massimo Ghioni, Andrea Lacaita, Carlo Samori, and Franco Zappa. Avalanche photodiodes and quenching circuits for single-photon detection. *Applied optics*, 35(12):1956–1976, 1996.

## Apéndice A

Tabla con las mediciones de  $\Delta d$ :

Medición	$\Delta d [cm]$	Incertidumbre [cm]
1	108.9	$\pm 0.05$
2	108.8	$\pm 0.05$
3	108.9	$\pm 0.05$
4	109.0	$\pm 0.05$
5	108.9	$\pm 0.05$
6	108.8	$\pm 0.05$
7	108.7	$\pm 0.05$
8	108.9	$\pm 0.05$
9	108.8	$\pm 0.05$
10	108.7	$\pm 0.05$
11	108.9	$\pm 0.05$
12	108.8	$\pm 0.05$
13	108.9	$\pm 0.05$
14	108.6	$\pm 0.05$
15	108.9	$\pm 0.05$
16	108.7	$\pm 0.05$
17	108.9	$\pm 0.05$
18	108.7	$\pm 0.05$
19	108.8	$\pm 0.05$
20	108.7	$\pm 0.05$
21	108.8	$\pm 0.05$
22	108.8	$\pm 0.05$
23	109.0	$\pm 0.05$
24	108.8	$\pm 0.05$
25	109.0	$\pm 0.05$

---

## Apéndice B

La tabla con las mediciones directas de  $\Delta t$ :

Medición	$\Delta t[ns]$	Incertidumbre $[ns]$
1	4.53	$\pm 0.025$
2	3.68	$\pm 0.025$
3	4.68	$\pm 0.025$
4	4.17	$\pm 0.025$
5	4.28	$\pm 0.025$
6	3.68	$\pm 0.025$
7	4.31	$\pm 0.025$
8	4.24	$\pm 0.025$
9	4.46	$\pm 0.025$
10	3.93	$\pm 0.025$
11	4.41	$\pm 0.025$
12	4.17	$\pm 0.025$
13	4.50	$\pm 0.025$
14	4.54	$\pm 0.025$
15	4.55	$\pm 0.025$
16	4.32	$\pm 0.025$
17	4.34	$\pm 0.025$
18	4.35	$\pm 0.025$
19	4.24	$\pm 0.025$
20	4.46	$\pm 0.025$
21	4.46	$\pm 0.025$
22	2.52	$\pm 0.025$
23	4.69	$\pm 0.025$
24	4.43	$\pm 0.025$
25	4.53	$\pm 0.025$

---