

Teorema de no clonación e influencia en el entrelazamiento cuántico

Parte II

Dr. Ing. Ernesto Gandolfo Raso

egandolfo@frm.utn.edu.ar

El detector de bombas de Elitzur-Vaidman

En el teletransporte cuántico, una de las claves era *obtener información sin “medir” algo*, de modo que no lo modificásemos.

El **detector de bombas de Elitzur–Vaidman** permite conocer de la existencia y naturaleza de algo sin mirarlo.

Aunque posteriormente se ha realizado el experimento en la realidad, originalmente se trata de un experimento mental, similar al del gato de Schrödinger.

Fue propuesto por primera vez en 1993 por los físicos Avshalom Elitzur y Lev Vaidman.



Avshalom Elitzur (izquierda) y Lev Vaidman (derecha)

Imaginemos que en una habitación subterránea, en total oscuridad tenemos un conjunto de bombas de características muy peculiares.

En primer lugar, hay dos tipos de bombas:

1- Bombas falsas: Son inofensivas (no pueden estallar), y permiten el paso de la luz sin obstáculos, es decir, son transparentes.

2- Bombas reales: Son extraordinariamente inestables: sólo hace falta que incida sobre ellas la más mínima cantidad de luz para que la absorban y exploten (un simple fotón basta para hacerlas reventar).

Además, ambos tipos de bombas son *absolutamente indistinguibles entre sí* hasta el momento de la explosión –o falta de ella.

Es evidente que determinar si una bomba pertenece a uno u otro grupo es muy fácil: no hay más que exponerla a la luz. Si no explota es una bomba falsa, y si estalla es una bomba real.

El problema con este sistema, claro, es que nunca podemos conseguir una bomba real, lista para explotar, sin hacer que estalle antes... porque la única manera de saber que es real es haciéndola estallar primero.

Con lo que, con este sistema, acabamos con bombas falsas por un lado, y restos de bombas reales ya estalladas por el otro, algo muy poco eficaz porque, además, queremos evitar que las bombas reales exploten.

¿Sería posible tener en la mano lo que sabemos que es, con absoluta seguridad, una bomba real... pero sin hacer que explote?

A primera vista, esto parece imposible, ya que lo único que distingue unas bombas y otras es que unas explotan al recibir luz y otras no. De hecho, si la mecánica cuántica fuera un sueño y la newtoniana –e incluso la relativista– rigieran el Universo, nuestro dilema no tendría una solución satisfactoria. Sólo tenemos certeza si la bomba es falsa, o si la bomba ya explotó.

La única solución válida sería la que obtuviera información sobre la reacción a la luz de una bomba... sin que le llegase un solo fotón de luz.

Y Elitzur y Vaidman dieron con la clave de cómo hacerlo, empleando el concepto de la [DUALIDAD ONDA-CORPÚSCULO](#).

Imagina que construimos el siguiente sistema –que es, básicamente, un [INTERFERÓMETRO DE MACH-ZEHNDER](#).

En primer lugar, disponemos de una fuente de luz, en este caso un láser de gran precisión con el que podemos emitir fotones uno a uno.

Naturalmente, debemos ser cuidadosos con él, porque si un fotón emitido por el láser choca con cualquier bomba, y esa bomba resulta ser real, explota y la perdemos.

Ya hemos descartado, desde luego, la solución trivial: apuntar con el láser a cada bomba en la habitación oscura, ya que entonces tenemos total seguridad de qué bomba pertenece a cada grupo... pero nos hemos quedado sin bombas reales.

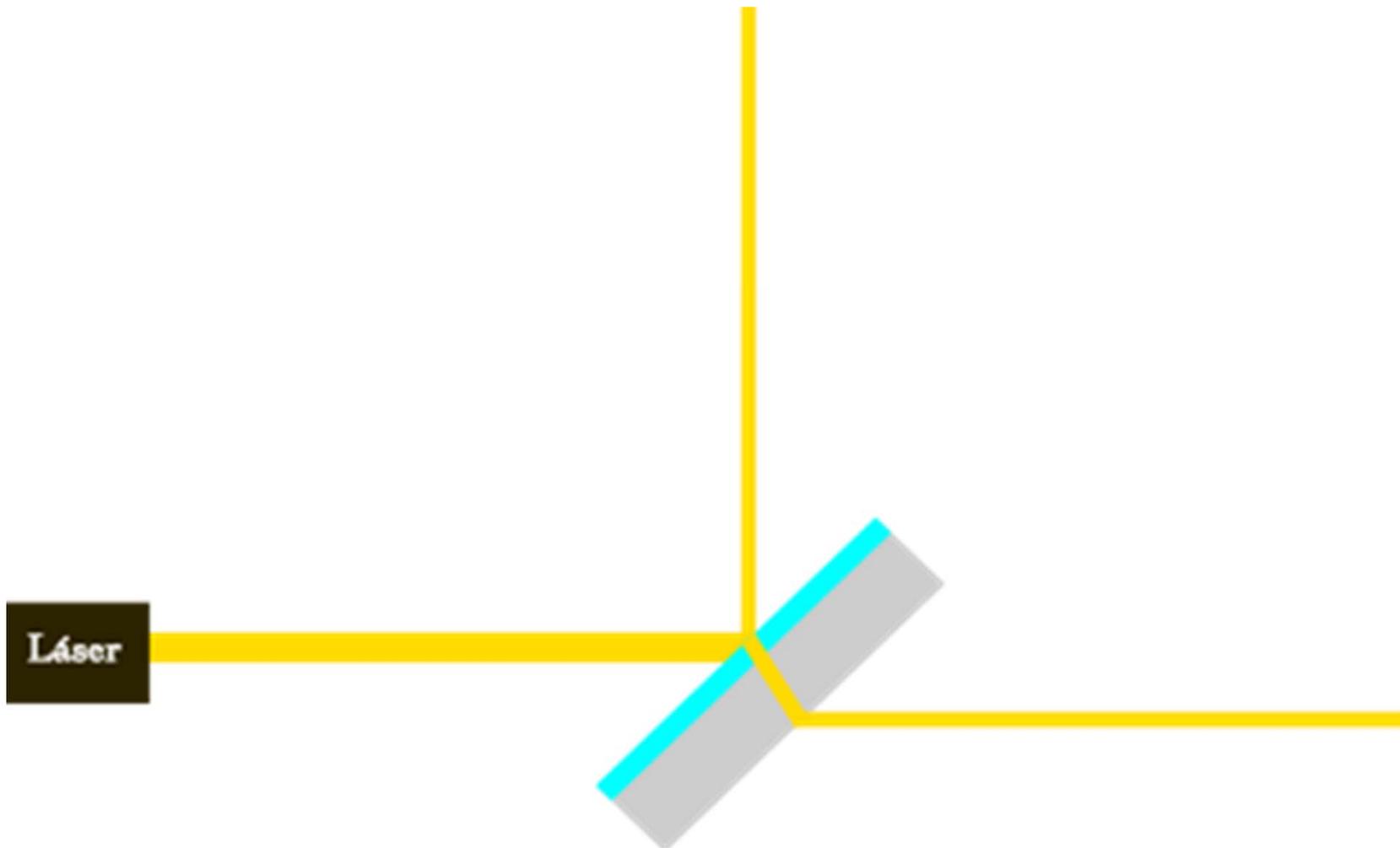
Primero, el láser.

A continuación del láser, ponemos un dispositivo un tanto peculiar, aunque muy empleado en interferometría: una *superficie semiespejada*.

Esta es una lámina de vidrio, con uno de sus dos lados pintados con una capa muy fina de aluminio.

La capa de aluminio tiene el grosor adecuado para que la mitad de la luz que recibe sea transmitida, y la mitad reflejada (o, en términos de partículas, de que un fotón que llega tenga un 50% de ser reflejado y un 50% de atravesarla).

De esta manera es muy fácil dividir un haz de luz en dos perpendiculares con la mitad de intensidad cada uno, simplemente poniendo el espejo de la siguiente manera:

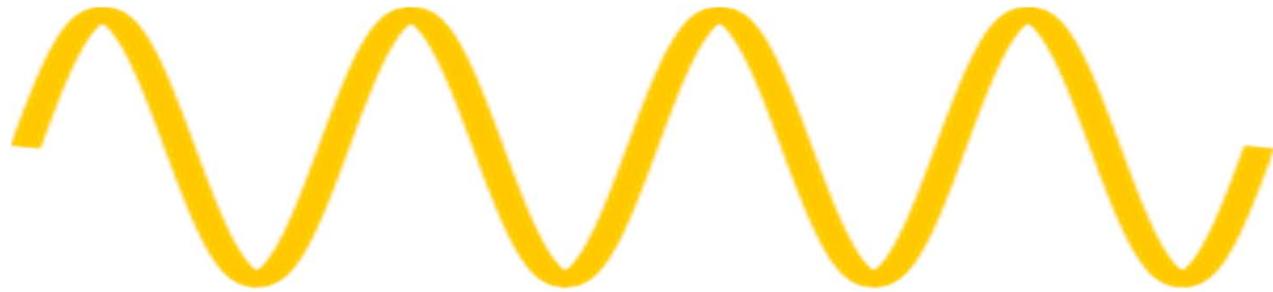


Al llegar a la lámina, la mitad de la luz es reflejada y sale hacia arriba, y la otra mitad atraviesa el aluminio, entra en el vidrio refractándose, y sale por el otro lado en la misma dirección que el rayo original –aunque, por supuesto, no con la misma intensidad–.

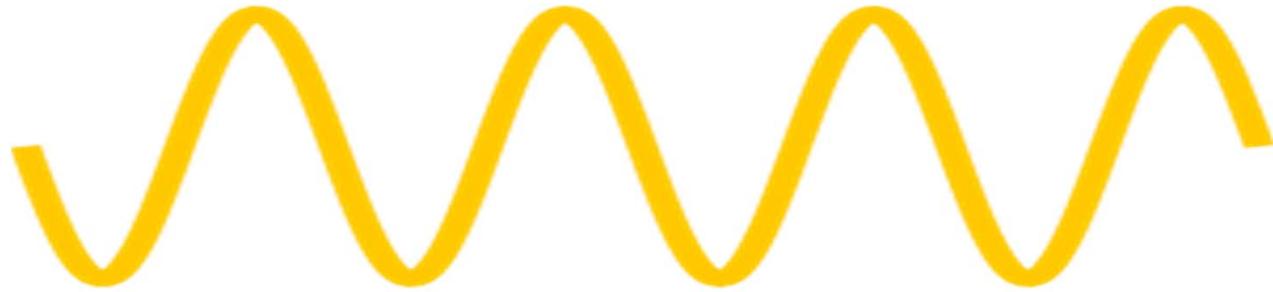
La construcción de la lámina semiespejada es cuidadosa, de modo que ambos rayos salgan perpendiculares el uno al otro.

Algo más cambia en la onda luminosa. Al reflejarse en la lámina de aluminio desde el aire, *la onda luminosa “se da la vuelta”*. Es decir sufre un desfase de 180° .

Esto es, si la onda luminosa fuera como la onda que viaja por una cuerda, cada cresta de la ola se convierte en un valle, y cada valle en una cresta, como si fuera el “negativo” de la onda original:



Antes

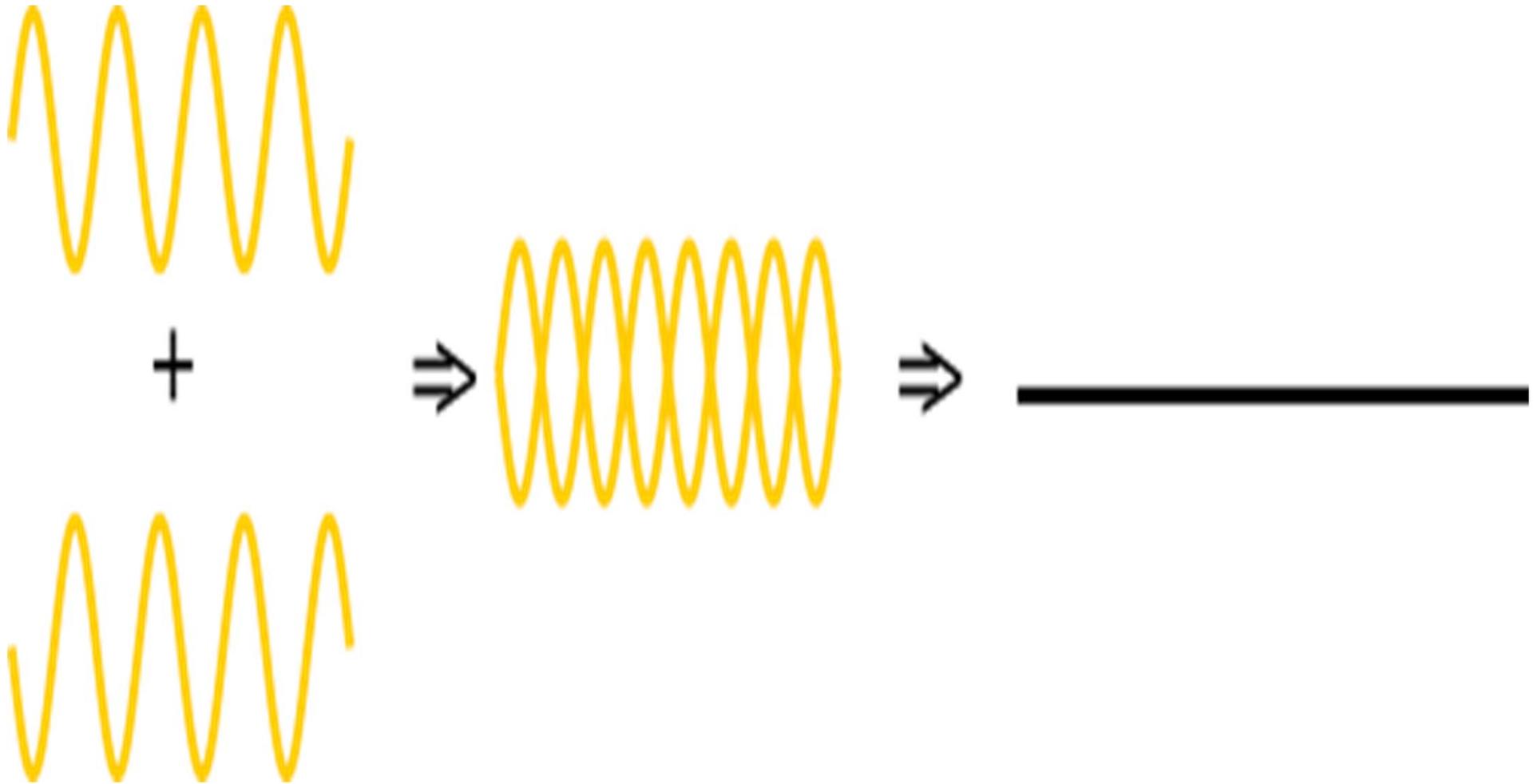


Después

Uno de los aspectos curiosos de esta “inversión” de la onda al reflejarse es que sólo sucede cuando lo que hay al otro lado del aluminio es un medio con un índice de refracción mayor que el inicial.

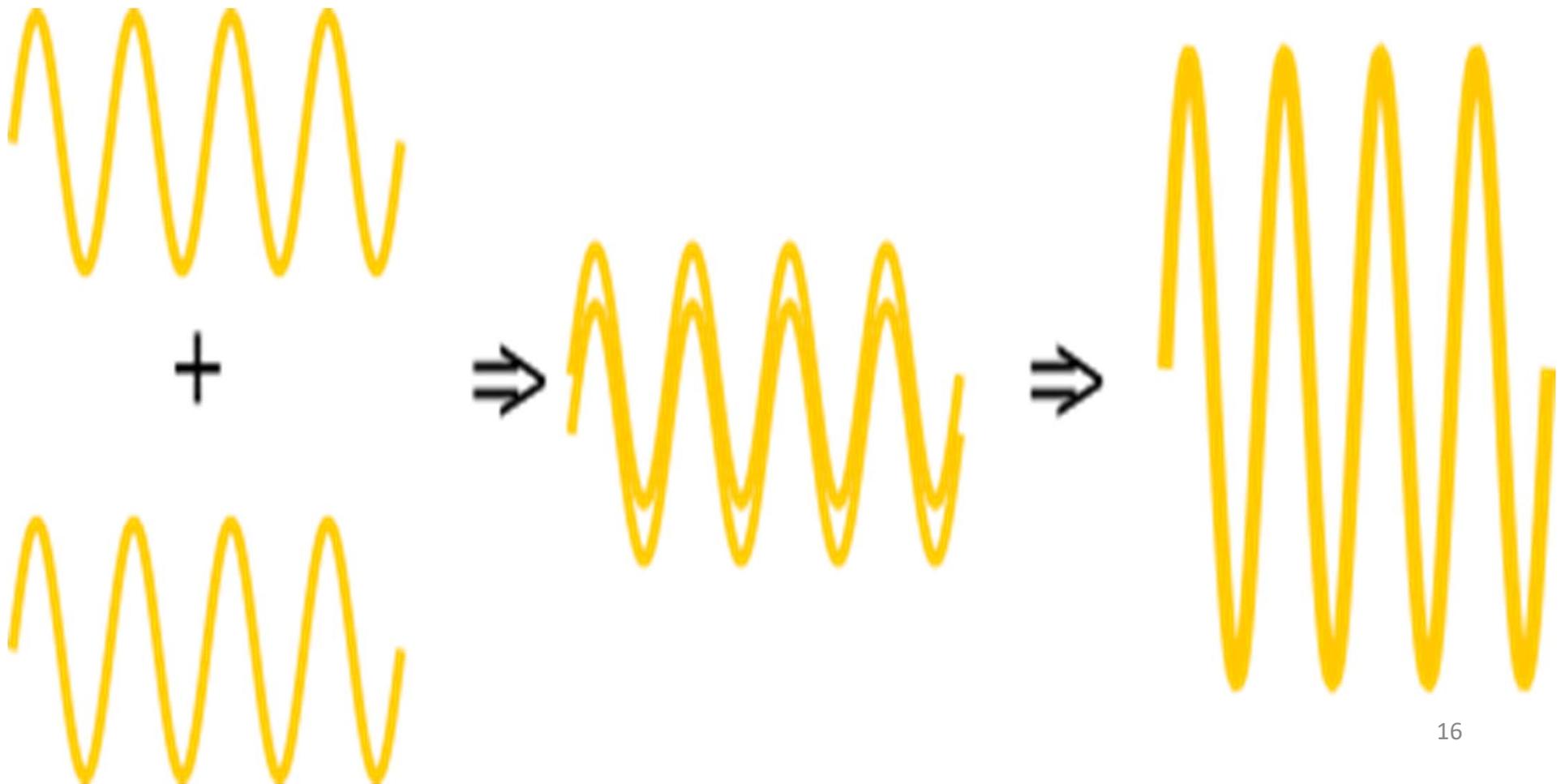
Es decir: si la onda va por el aire y se encuentra con el aluminio y a continuación el vidrio, al reflejarse se “da la vuelta”... *pero si viene por el vidrio y se encuentra con el aluminio y detrás el aire, entonces la reflexión no altera en absoluto la forma de la onda.*

Si por alguna razón la onda original y la onda “invertida” se encuentran de nuevo, lo que sucede es que hay interferencia destructiva y ambas se cancelan.



Este “sumar una onda y la onda invertida” se conoce como **interferencia destructiva**, y en el caso de la luz tu ojo sí podría detectarla, porque al cancelarse ambas ondas se produciría oscuridad.

Sin embargo, si sumamos una onda con otra idéntica a ella en vez de “dada la vuelta”, ambas contribuciones se suman y se produce una onda que es la suma de ambas, en lo que se llama **interferencia constructiva**.



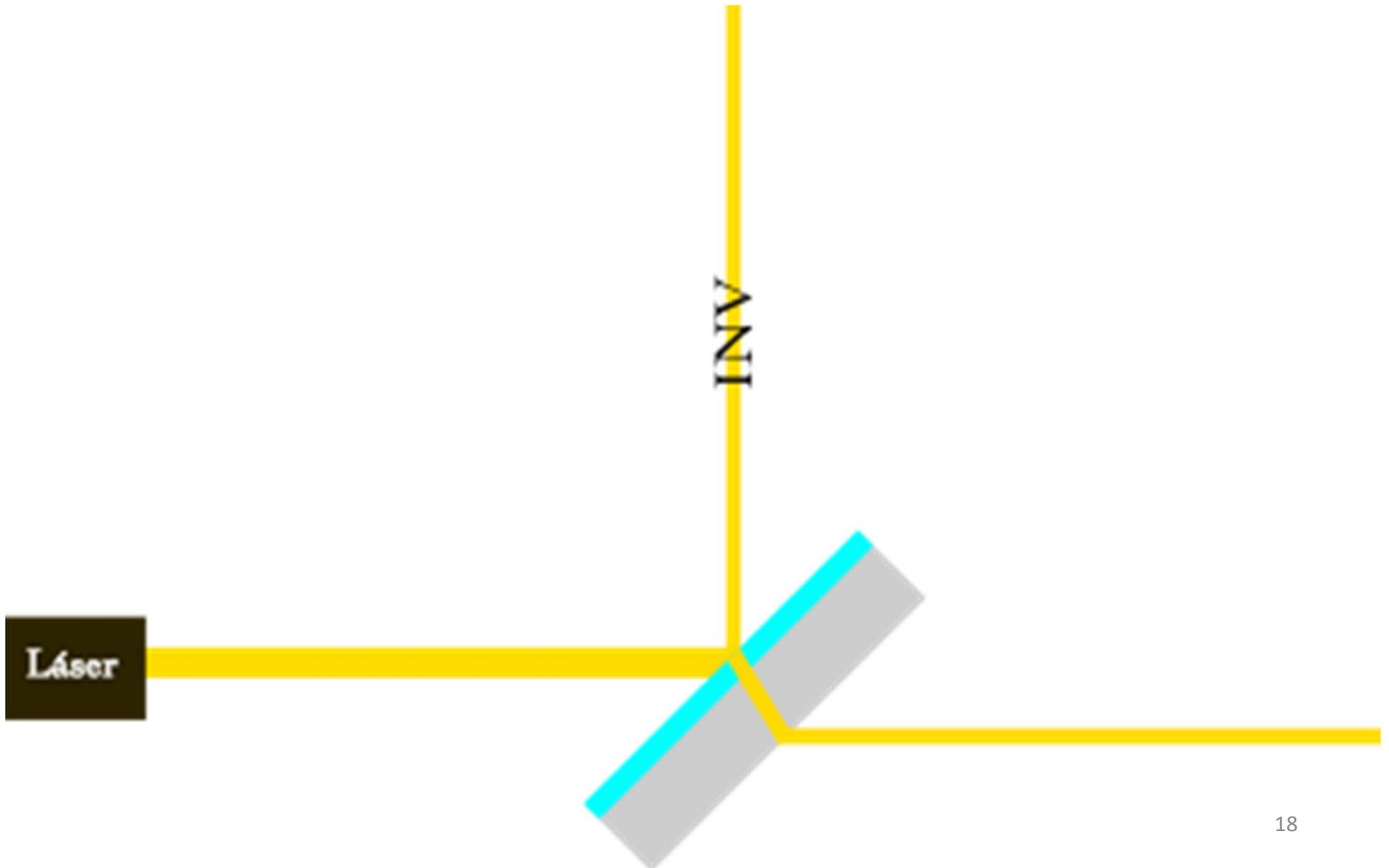
Es posible, por lo tanto, dividir un haz luminoso en dos, y luego volver a juntar las dos “mitades”... y obtener un haz como el original (si conseguimos producir una interferencia constructiva), o simplemente oscuridad (si producimos una interferencia destructiva). Es importante además, para entender el resto del experimento mental, que se comprenda una cosa: **invertir una onda dos veces significa dejarla como estaba.**

Si reflejamos un haz de luz en una superficie de aluminio, se “da la vuelta”, pero si luego la reflejamos en una segunda superficie, se “da la vuelta otra vez”...

¡con lo que se queda como al principio!

Lo que importa es que la onda que sale hacia arriba, al haberse reflejado, se ha “invertido”.

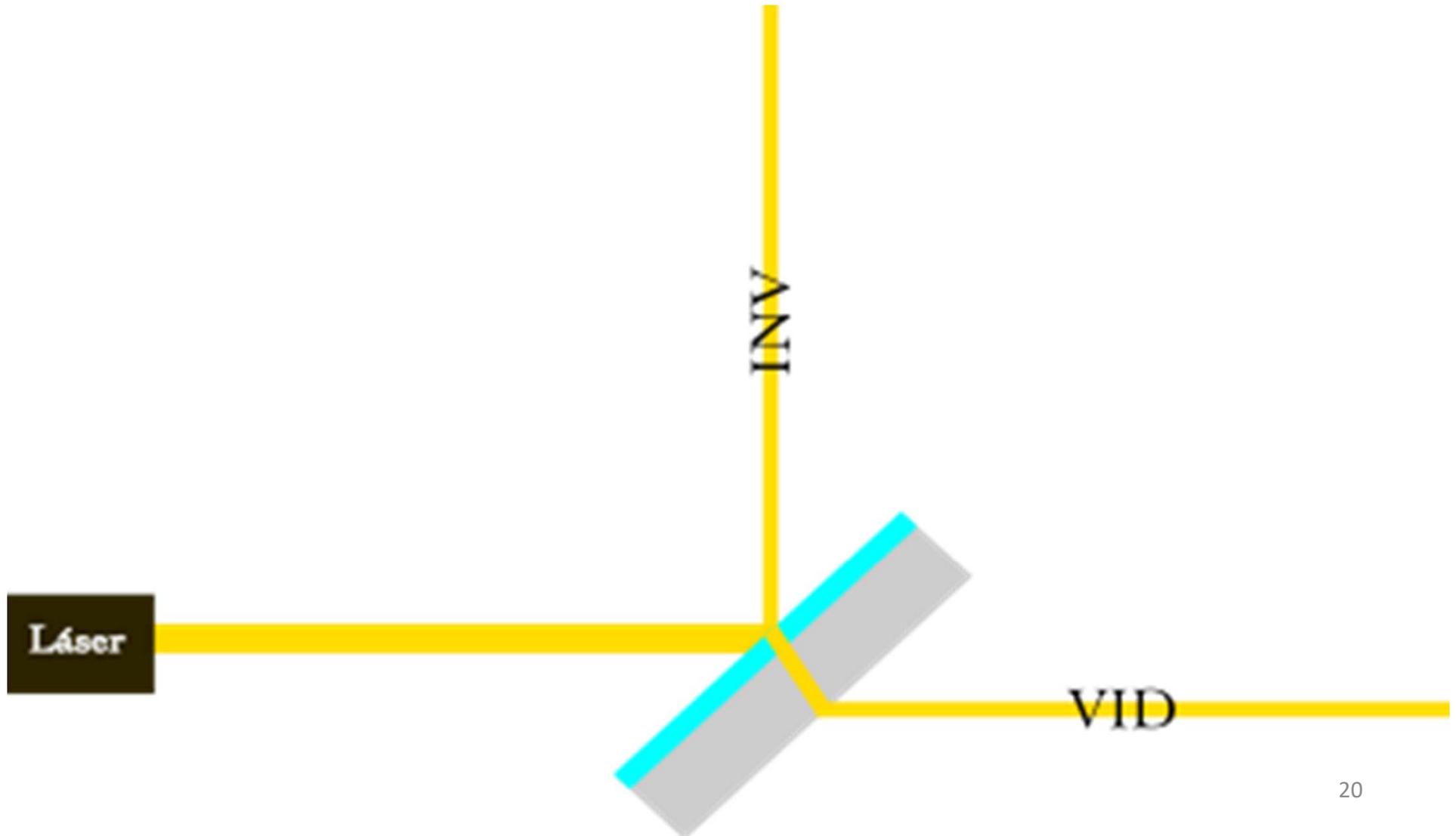
En el dibujo pongamos un “INV” en el haz de luz reflejado para representar ese hecho.



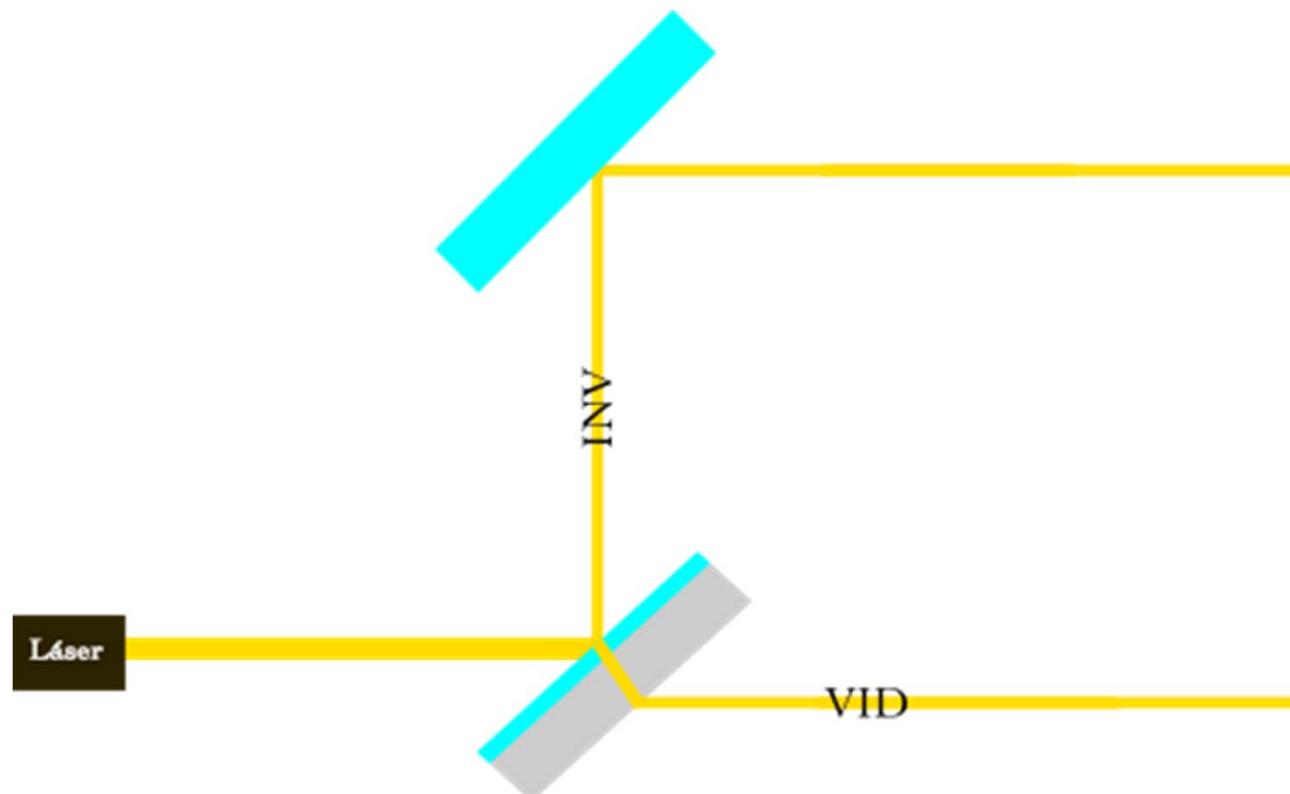
Ahora bien, *¿le pasa algo similar a la otra parte de la onda original, la que atraviesa el aluminio y se refracta a través del vidrio?*

La respuesta es que sí, aunque en este caso, al atravesar el vidrio la onda es alterada de maneras más complicadas, de modo que no está justo “dada la vuelta”, sino desplazada en un factor que depende de la naturaleza del material, el grosor, etc. Las buenas noticias son que, en este caso, *nos da exactamente igual* lo que le pase a esa parte de la onda original siempre va a suceder lo mismo con lo que no hace falta conocer el detalle.

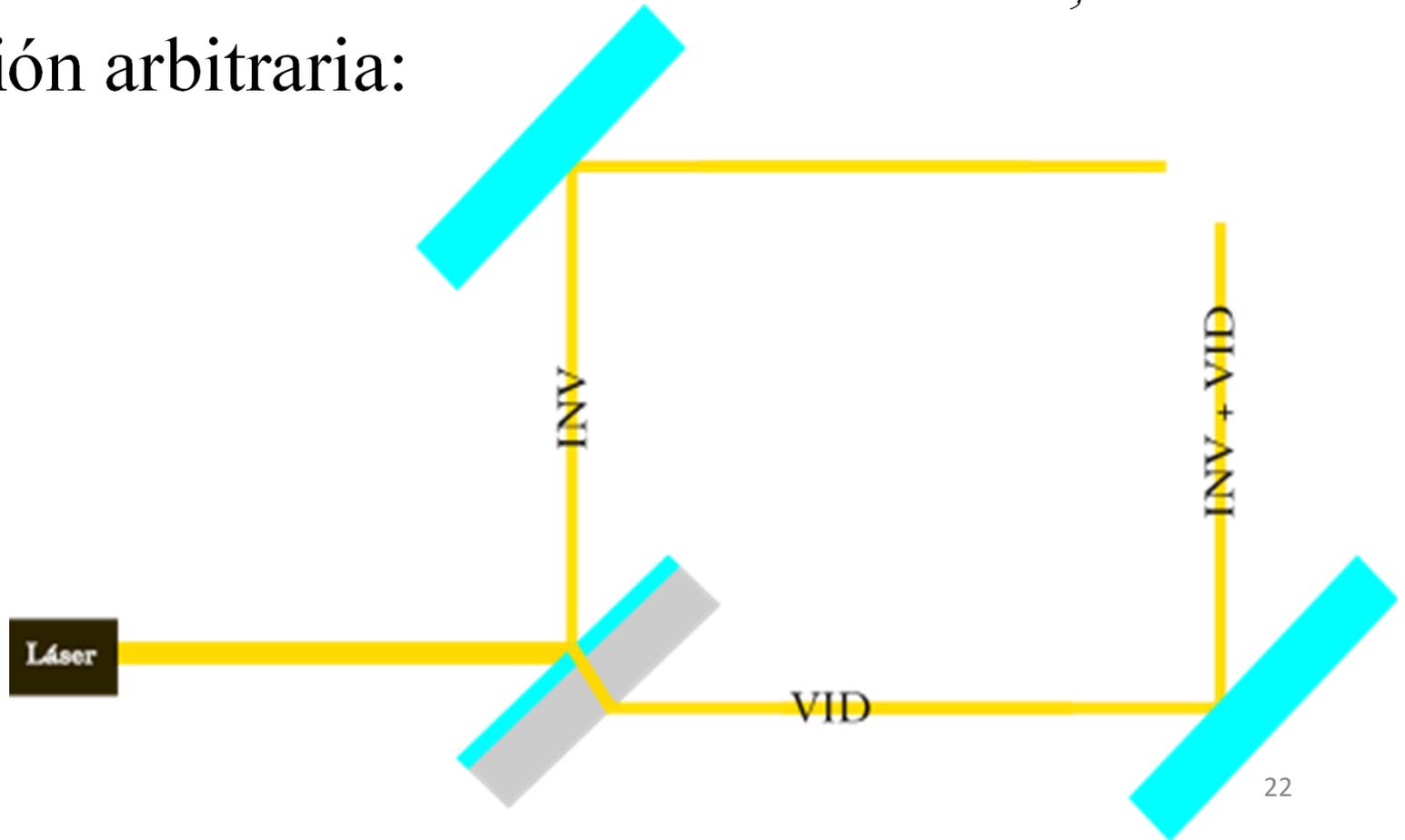
Llamemos a la modificación de la onda original “VID” en los dibujos, ya que es la alteración producida al atravesar el vidrio.



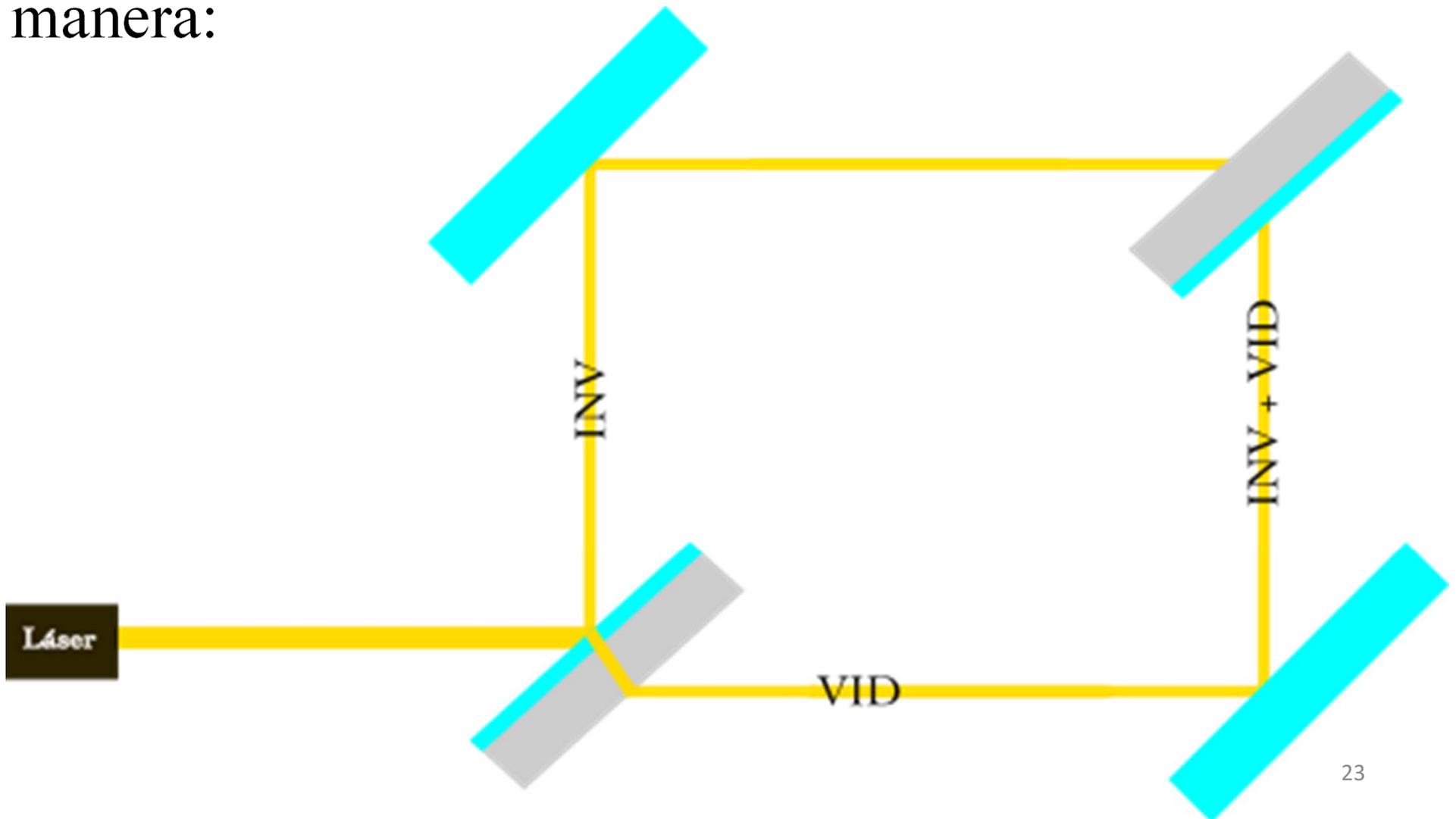
Arriba ponemos un espejo normal y corriente, para reflejar el rayo superior. Ya que se trata de una reflexión, la onda se “da la vuelta”, es decir, se invierte de nuevo, lo que significa que se queda otra vez exactamente igual que al principio, pues ha sufrido dos inversiones ($INV + INV$ es lo mismo que no hacer nada):



Y pongamos otro espejo normal idéntico que desvíe el rayo inferior, de modo que se dirija hacia arriba.
Una vez más, la reflexión produce “inversión”, pero en este caso no podemos cancelarla con otra igual, porque esta onda no ha sufrido una inversión, sino una modificación arbitraria:



Pongamos ahora una segunda lámina semiespejada igual que la primera, de modo que esté justo donde se encuentran los dos haces luminosos, de la siguiente manera:



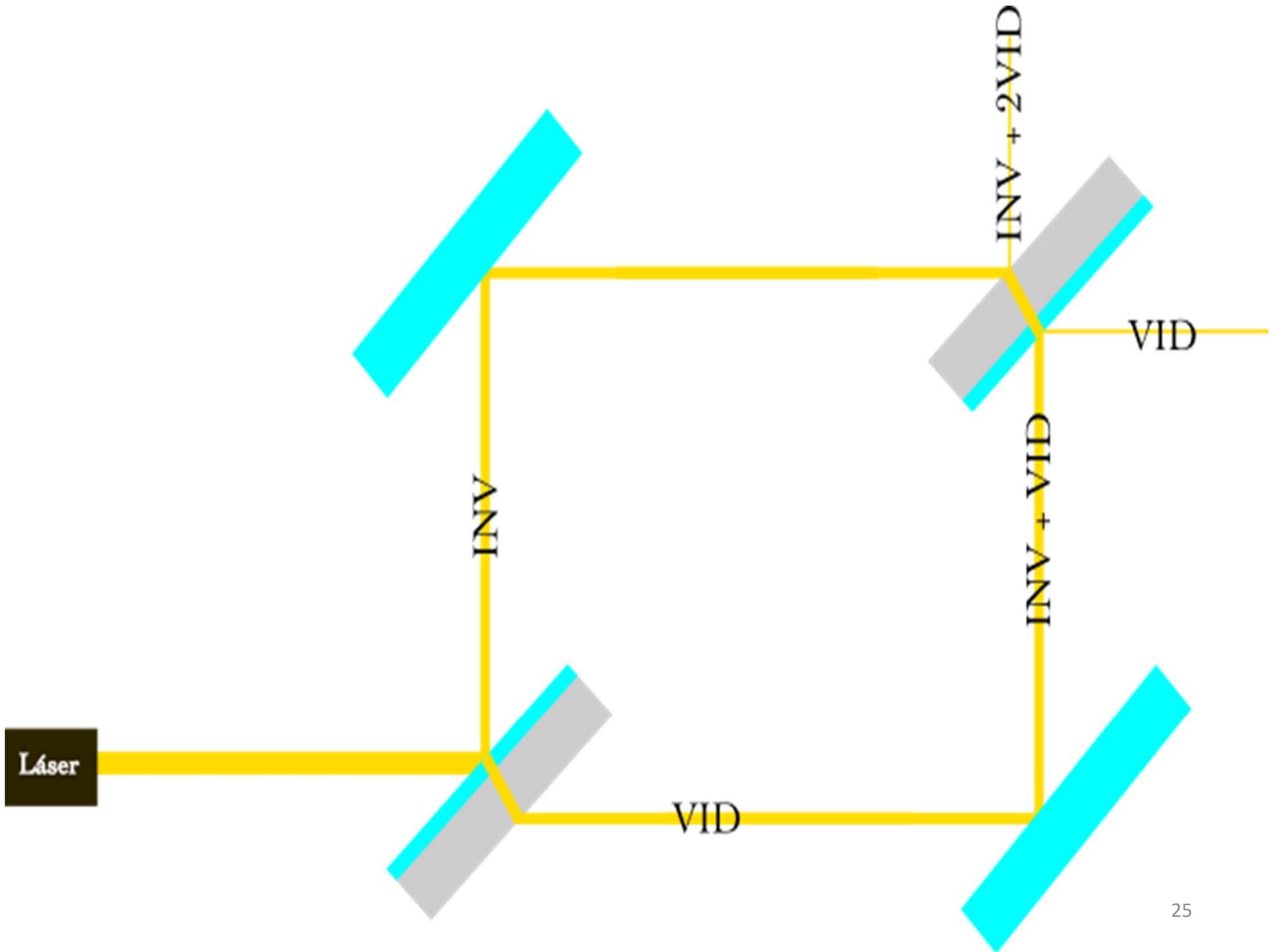
Pensemos ahora lo que le sucede a cada uno de los dos haces que llegan a la segunda lámina semiespejada. El rayo inferior se dividirá de nuevo en dos: la mitad se reflejará en el aluminio y saldrá hacia la derecha, con lo que sufrirá una segunda “inversión”.

La modificación total de ese haz habrá sido:

$VID + INV + INV = VID$ (porque $INV + INV$ es dejarla como antes).

La mitad que atraviese la lámina hacia arriba sufrirá una vez más la modificación debida al vidrio, es decir, VID , con lo que su modificación total será:

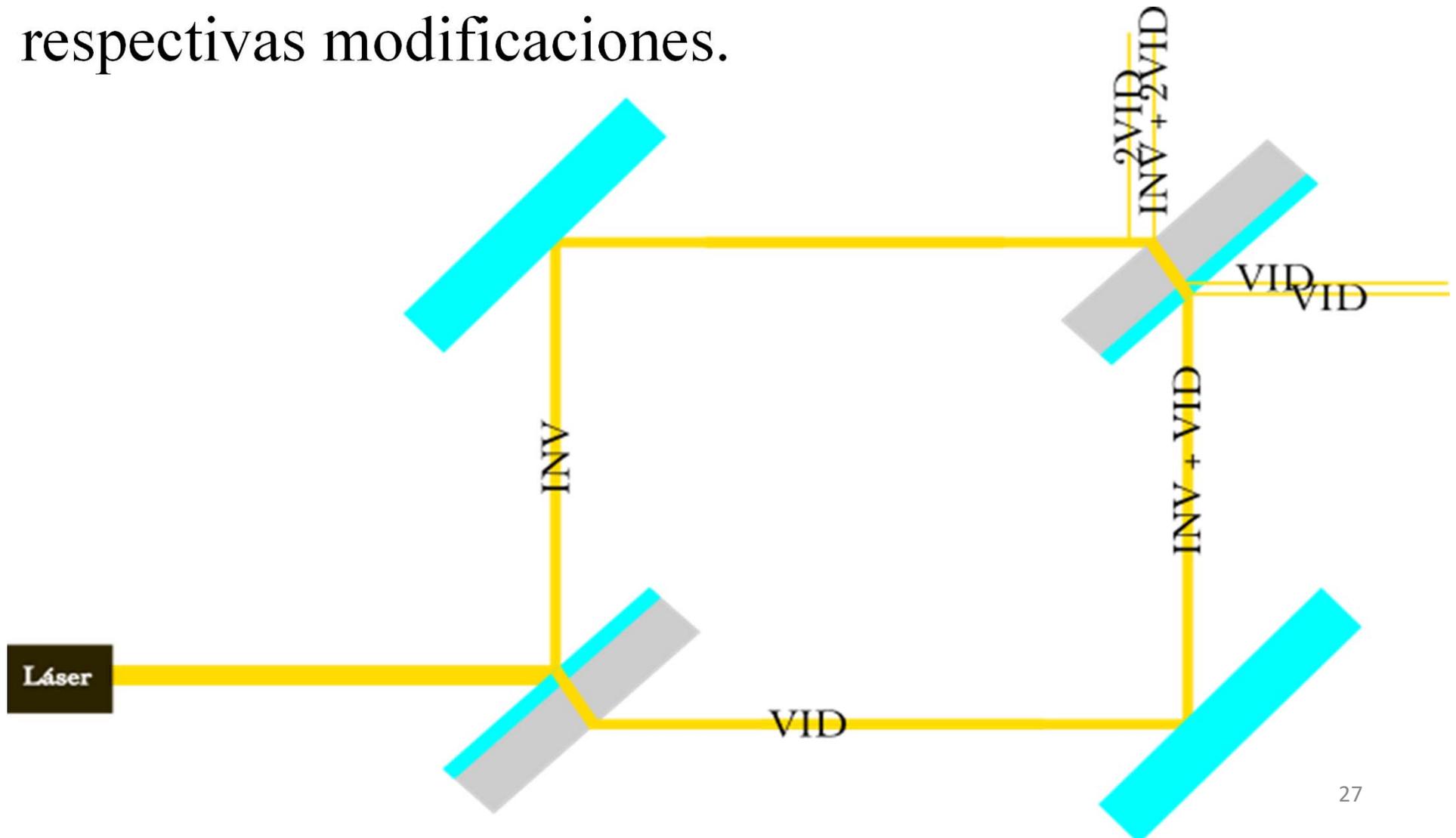
$VID + INV + VID = INV + 2VID$.



El haz superior, como el otro, también se dividirá en dos mitades. Una de ellas atravesará la lámina y saldrá hacia la derecha. Al atravesar la lámina, su modificación será la correspondiente VID, con lo que su modificación total es simplemente VID.

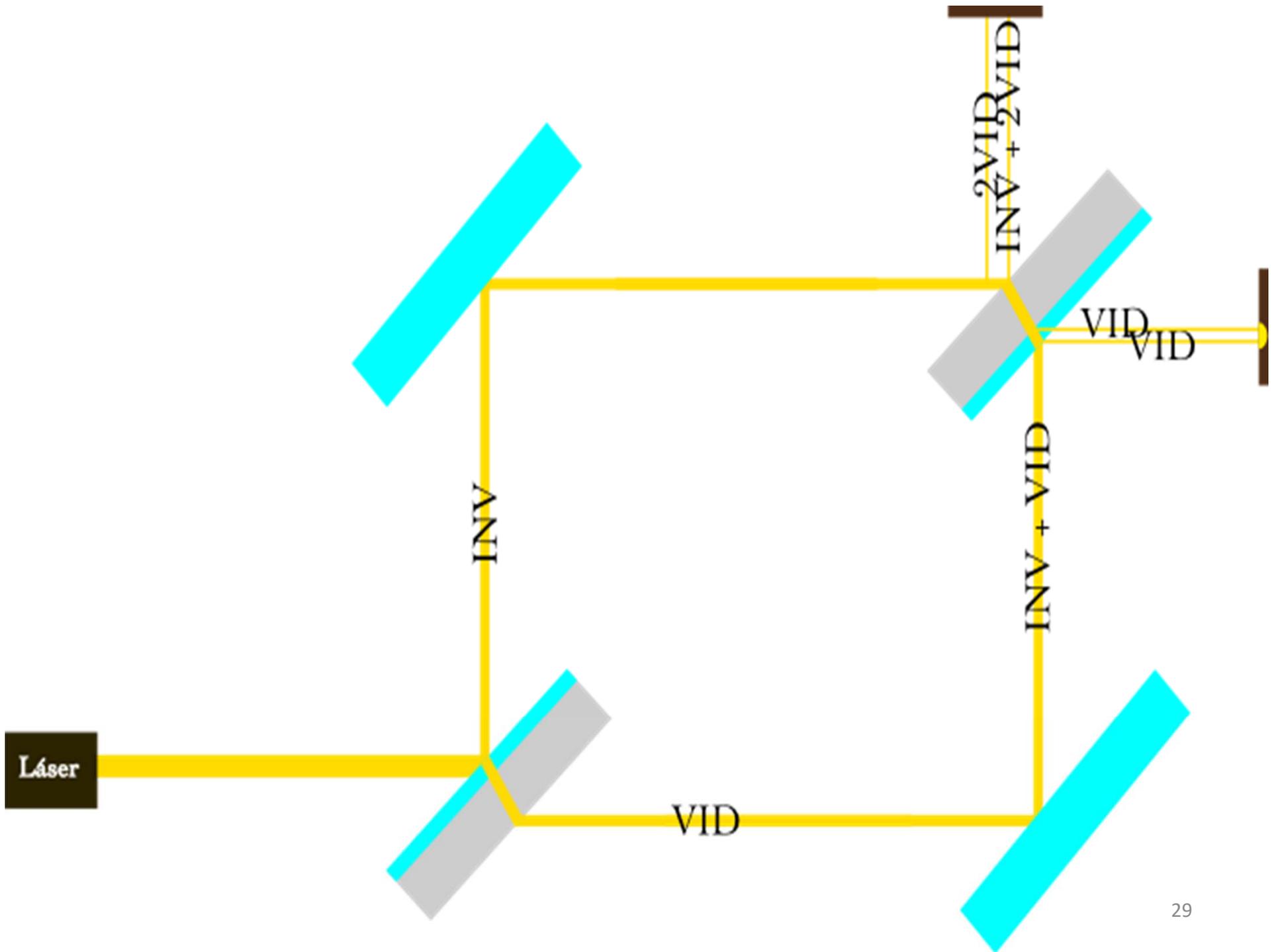
La otra mitad atravesará el vidrio, se reflejará en la lámina de aluminio y volverá a atravesar el vidrio para salir hacia arriba. Sin embargo, dado que la reflexión en el aluminio se produce en este caso no desde el aire, sino desde el vidrio, como hemos dicho antes, no hay inversión de la onda, y la reflexión la deja igual que antes. En lo que a nosotros respecta, esa onda atraviesa el vidrio (modificación VID), se refleja en el aluminio desde el vidrio (no hay modificación) y luego atraviesa de nuevo el vidrio hasta salir por arriba (modificación VID).

Por lo tanto, la modificación total de este haz que sale hacia arriba es $2VID$. Representemos ambos haces resultantes de la división del haz superior, con sus respectivas modificaciones.



En el dibujo se puede ver que *la situación no es igual a la derecha y arriba*. A la derecha, ambos haces han sufrido la misma modificación total, con lo que son absolutamente idénticos y sufren una interferencia constructiva, de modo que por ahí sale bastante luz. Sin embargo, hay que observar lo que sucede arriba: tanto un haz como el otro han sufrido la misma modificación debida al vidrio (2VID), *pero uno está invertido respecto al otro*.

Por lo tanto, ahí arriba la interferencia es destructiva, y no hay absolutamente **nada de luz**. Si pusiéramos una pantalla en cada una de las dos “salidas” de nuestra construcción, la de la derecha brillaría, mientras que la de arriba permanecería oscura.



Todo esto viene perfectamente descrito por la física clásica, y hasta ahora no hemos utilizado la cuántica en absoluto.

¿Qué sucedería si nuestro láser emite un único fotón? ¿Cuál de los caminos seguirá?

En este aspecto, este experimento se parece mucho al de la doble rendija de Young: *¿por cuál de las dos rendijas viaja el electrón?*

Y la respuesta, : el único fotón *recorre los dos caminos*, pues se está comportando como onda.

“Pero, si uno de los dos caminos de salida brilla y el otro no por las interferencias, ¿con quién diablos interfiere ese fotón, si es el único?”

Y la respuesta tiene que ser la misma que en el experimento de la doble rendija: **el fotón interfiere consigo mismo.**

Recuerda que la onda no está “compuesta por fotones que oscilan”, *nuestro fotón es la onda*.

El hecho de que haya un solo fotón no hace que se comporte únicamente como partícula y no como onda; lo que determina un comportamiento u otro es *qué tipo de experimento realizamos*.

En la doble rendija, que tal vez sea un experimento más intuitivo para resaltar este hecho: cuando permitimos que el fotón pase por los dos caminos, se produce la interferencia, y la luz se comporta como onda.

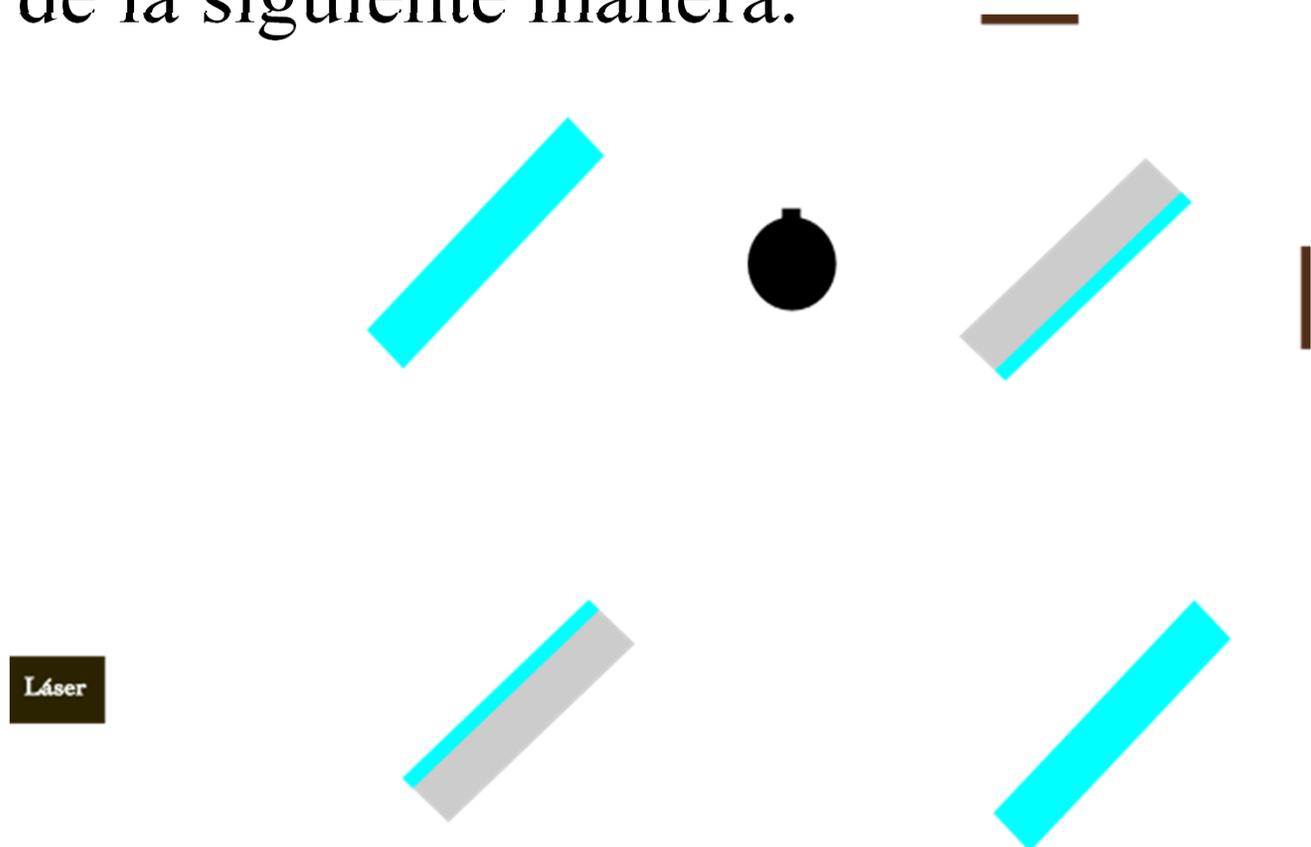
Pero, si en algún momento introducimos un elemento que nos diga *por cuál de los dos caminos* ha pasado, entonces deja de producirse la interferencia y la luz se comporta como un fotón de naturaleza corpuscular.

Entonces, no es posible diseñar un experimento en el que ambas naturalezas se muestren a la vez. Lo que se tiene que tener muy claro es lo siguiente: cuando ponemos en marcha nuestro láser en el interferómetro, y el láser dispare un único fotón, la lámina de la derecha se iluminará y la de arriba no, porque da igual que haya un fotón o cinco millones, el comportamiento es ondulatorio. Será, por supuesto, un brillo brevísimo, pero detectable.

Hasta aquí, ningún problema.

Pero veamos qué sucede si ponemos una bomba en el escenario porque para eso hemos construido el interferómetro.

Supongamos que introducimos una bomba en el aparato, de la siguiente manera.



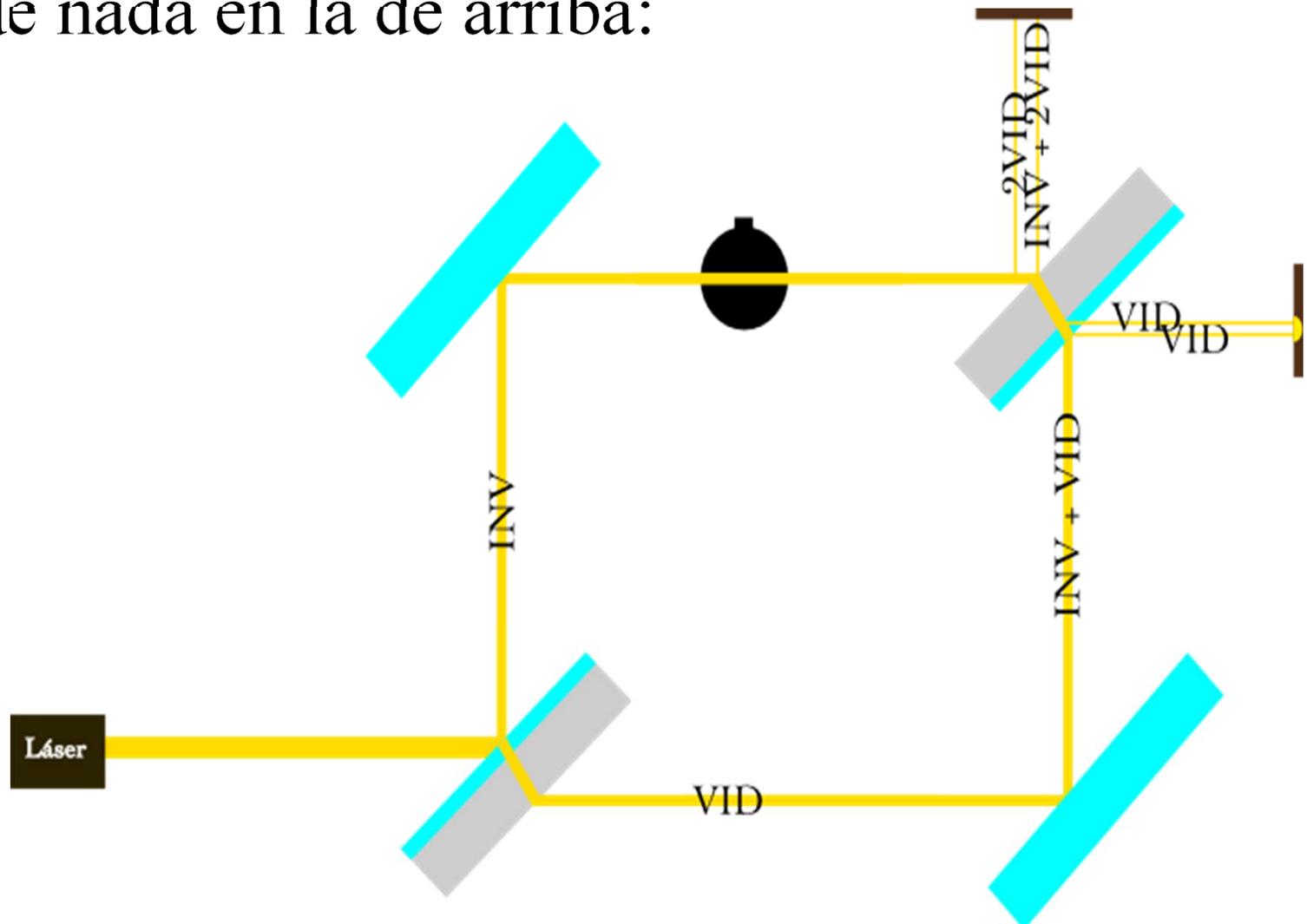
Lo que suceda entonces cuando el láser emita un fotón, naturalmente, depende de si la bomba es real o falsa, aunque eso no lo sabemos al introducir la bomba en escena.

Veamos qué pasa si la bomba es de las falsas, con lo que deja pasar la luz sin absorberla y, por supuesto, sin explotar.

Lo que sucedería entonces es lo mismo que sucedía cuando no había bomba.

Puesto que nuestra bomba no altera la luz que le llega, la onda puede seguir viajando por los dos caminos – superior e inferior– sin problemas, interfiriendo consigo misma al llegar a las salidas, y produciendo el mismo efecto.

De modo que, si la bomba es falsa, seguiríamos viendo exactamente lo mismo que cuando no la había, es decir, un destello de luz en la pantalla de la derecha y nada de nada en la de arriba:



En este caso la luz sigue comportándose de forma ondulatoria, y nos es imposible saber por cuál de los dos caminos ha recorrido el interferómetro.

De hecho, la respuesta a esa pregunta es “ambos”. Y, aunque ahora seguiremos con el otro caso, recuerda que no es lo mismo decir “*si la bomba es falsa, necesariamente brilla la pantalla de la derecha*” que “*si brilla la pantalla de la derecha, necesariamente la bomba es falsa*”.

Antes de sacar conclusiones así tenemos que ver si, de ser la bomba verdadera, esa pantalla no brilla.

De modo que pensemos en qué sucederá si la bomba es verdadera.

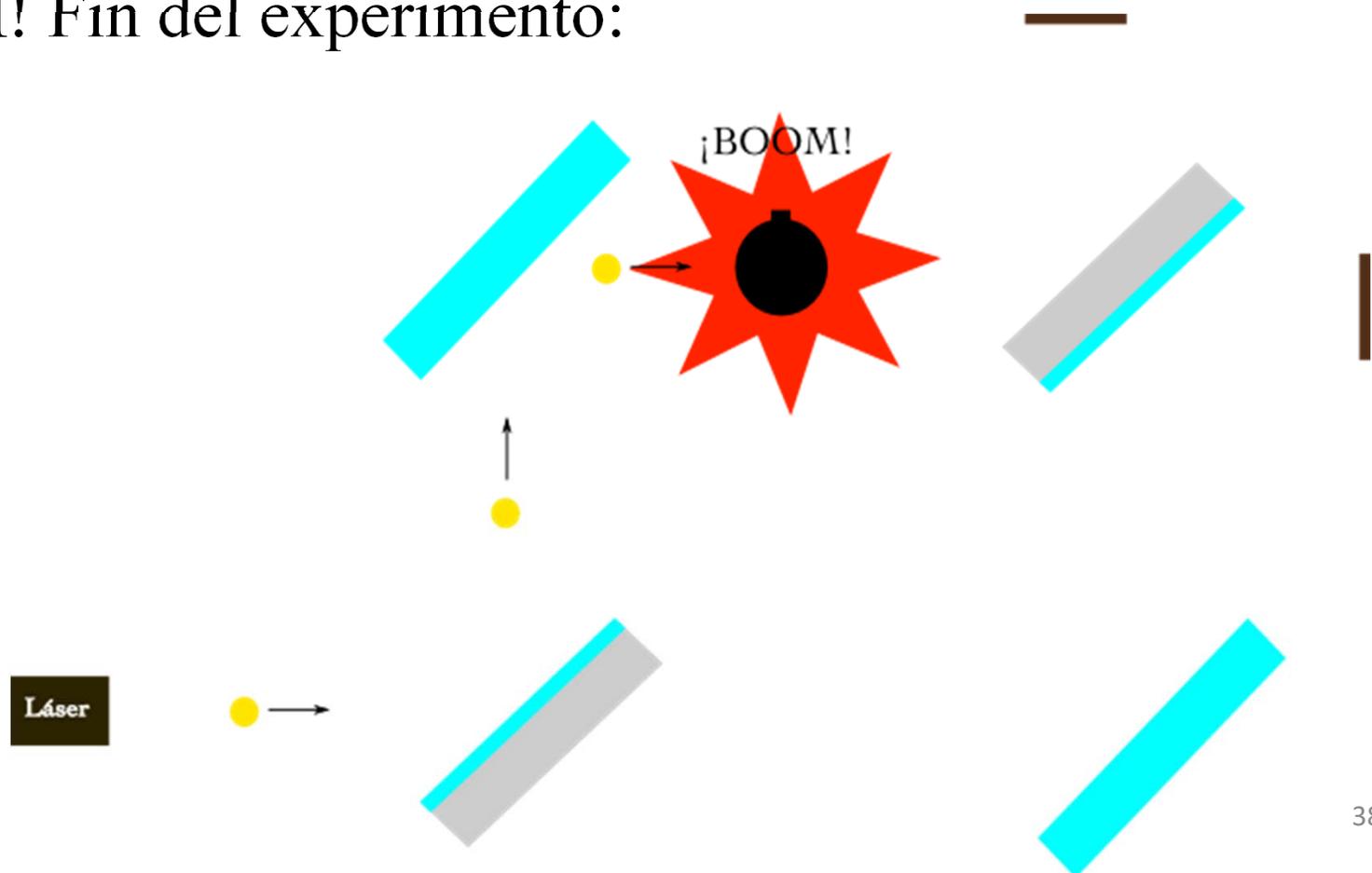
En ese caso, si el fotón emitido por el láser llega a la bomba, ésta lo absorberá y explotará.

Es decir: ahora estamos poniendo un “detector de fotones” en uno de los dos caminos.

Es como si, en la doble rendija de Young, pusiéramos un detector en una de las rendijas pero no en la otra.

Ahora ya no da igual qué camino recorre el fotón, y se pone de manifiesto la naturaleza corpuscular de la luz: tenemos que pensar en el fotón como partícula, y en probabilidades en vez de interferencias.

El fotón sale del láser, y se encuentra con la primera superficie semiespejada. Allí debe elegir un camino al azar; tendrá un 50% de probabilidad de salir por arriba, y otro de salir hacia la derecha. Supongamos primero que sale por arriba, con lo que rebota en el espejo de arriba y se encuentra con la bomba. ¡BOOOM! Fin del experimento:

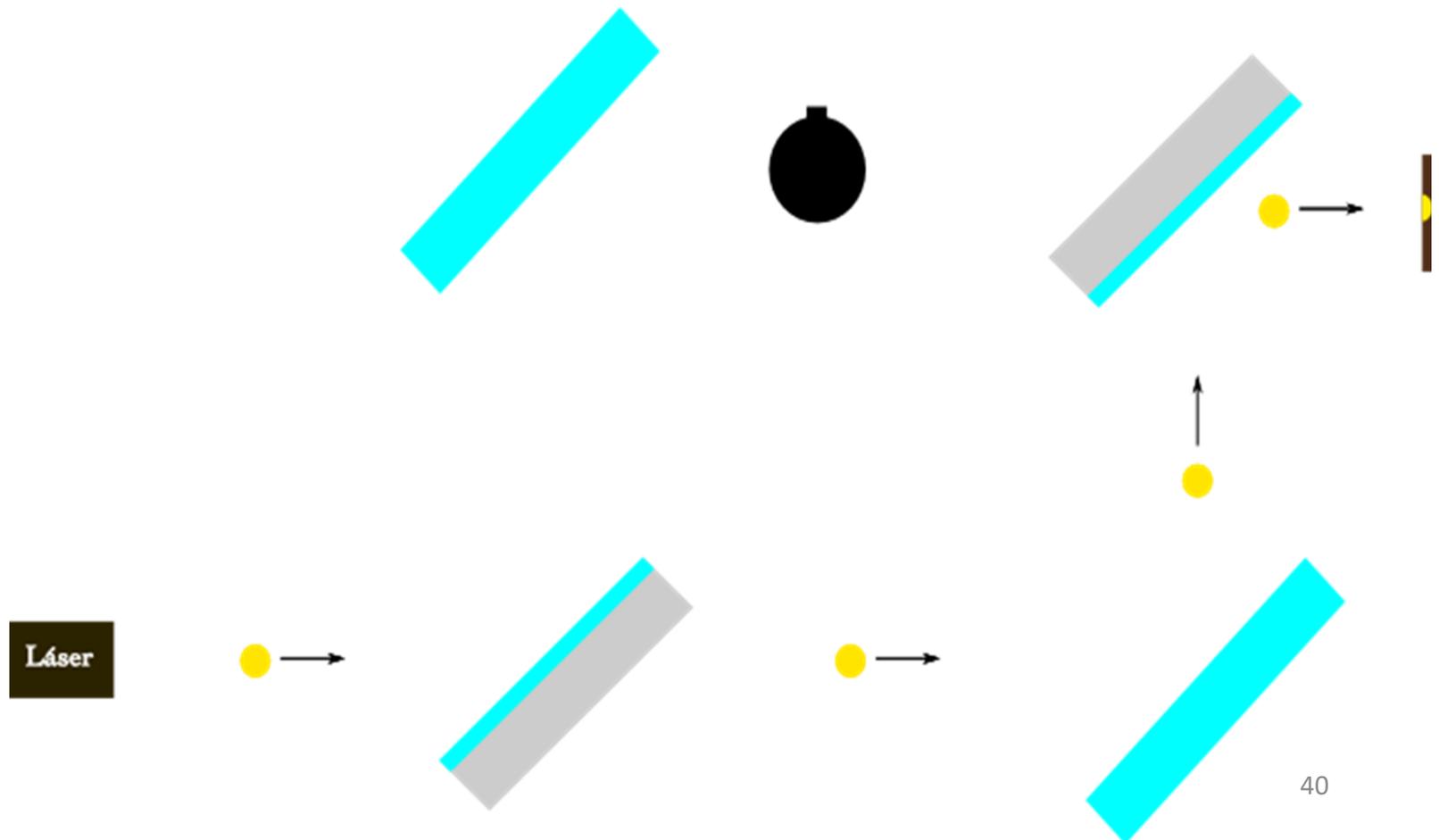


En este caso no brilla ninguna de las dos pantallas, claro. Y hemos “detectado” el tipo de bomba con total seguridad... pero, claro, no hemos conseguido nada digno de mención, porque la bomba ha estallado y lo mismo hubiéramos conseguido simplemente exponiéndola a la luz.

¡Pero ésta es sólo una de las posibilidades para el fotón!

La otra posibilidad es que el fotón hubiera salido por el camino de la derecha, en cuyo caso rebotará en el espejo de la esquina inferior derecha y saldrá hacia arriba, hasta encontrarse con la siguiente superficie semiespejada.

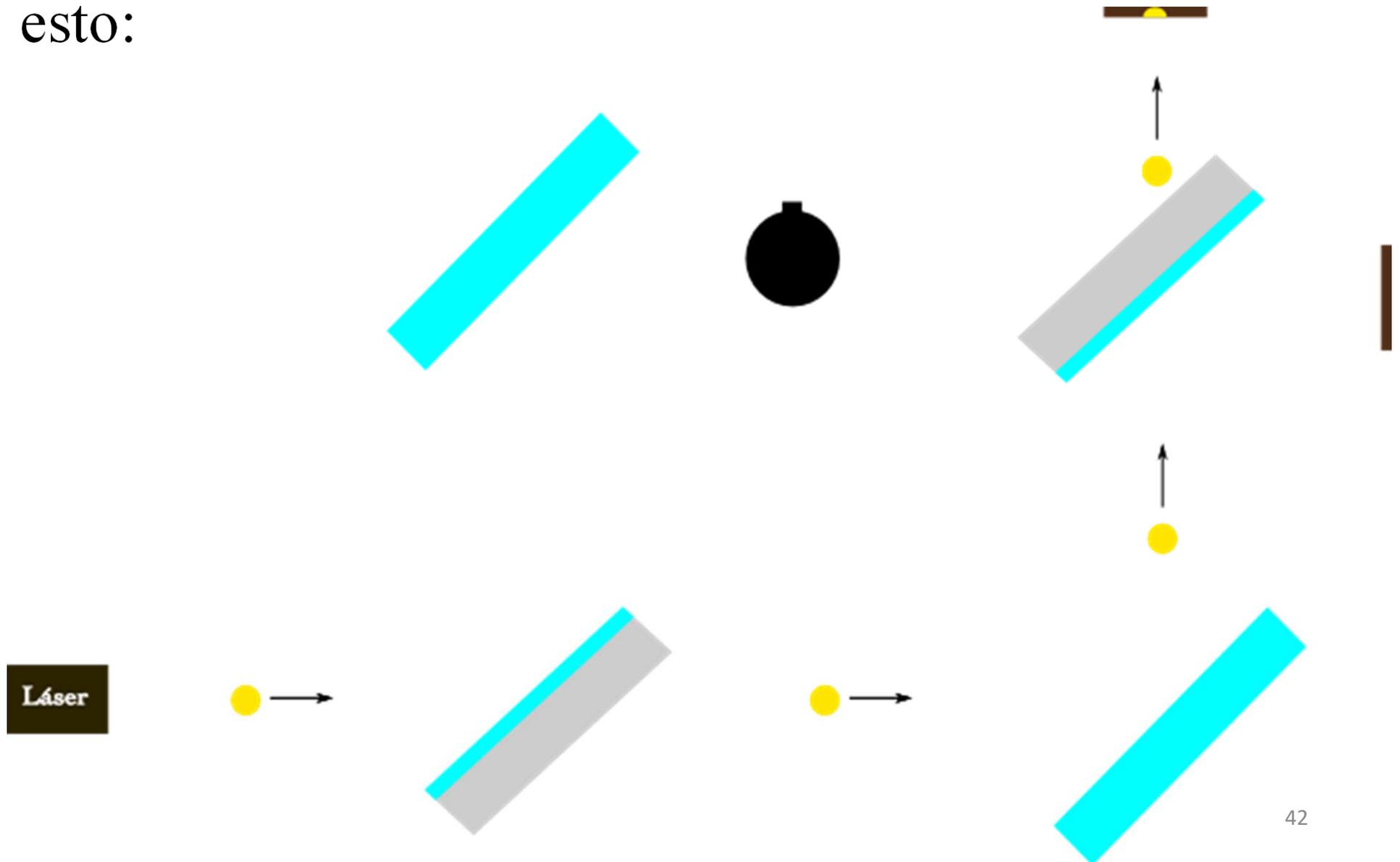
Allí tiene dos opciones, ambas con un 50% de probabilidad: o bien rebota en el aluminio y sale hacia la derecha, o bien atraviesa la lámina y sale hacia arriba. La primera opción resulta en esto: —



Observa que lo que observaríamos es exactamente lo mismo que cuando la bomba era falsa.
Con lo que el hecho de que la pantalla de la derecha brille no quiere decir que la bomba sea falsa necesariamente: puede que la bomba sea falsa, o puede que la bomba fuera verdadera y que el fotón siguiera el camino marcado en esta figura, algo que sucederá un 25% de las veces (50% elige el camino de la derecha en la primera lámina, 50% de esas veces elige el camino de la derecha otra vez en la segunda lámina).

Así que, si la lámina de la derecha brilla, *la bomba puede ser verdadera o falsa, no lo sabemos.*

Finalmente, la otra mitad de las veces el fotón saldrá hacia arriba atravesando la lámina, con lo que veremos esto:



Si la bomba es verdadera, ya hemos visto que un 50% de las veces estallará, un 25% de las veces no estallará y brillará la pantalla de la derecha... **y un 25% de las veces no estallará y brillará la pantalla de arriba.** Pero, si la bomba era falsa, la pantalla de arriba no brillaba jamás, pues se producía la interferencia destructiva en ella, y sólo brillaba la de la derecha.

De modo que, si brilla la pantalla de arriba, **tenemos una bomba verdadera e intacta en el detector.**

Ya sé que el sistema no detecta todas las bombas verdaderas, y que nunca estamos seguros de que las falsas lo sean.

Pero hemos detectado la bomba verdadera sin que el fotón la toque jamás.

Si en la pila de bombas hubiera, por ejemplo, 20 bombas verdaderas, acabaríamos con 5 bombas verdaderas sin explotar en la mano.

Hemos detectado la naturaleza de la bomba verdadera sin “mirarla”

Este tipo de medición suele denominarse “*medición sin interacción*”, aunque el nombre es algo confuso. Lo fascinante del asunto es que pensábamos que la única manera que hay de saber si una bomba verdadera era hacer incidir un fotón sobre ella... pero no hemos hecho incidir ningún fotón sobre ella, y sin embargo sabemos que es verdadera con absoluta certeza.

La naturaleza “borrosa” del Universo hace que de algunas cosas de las que, de acuerdo con la mecánica clásica, deberíamos estar completamente seguros, ya no podemos estarlo... pero, al mismo tiempo, obtenemos certezas que antes nunca jamás podríamos obtener.

Sólo un año después del planteamiento teórico de Vaidman y Elitzur, un grupo de físicos (Anton Zeilinger, Paul Kwiat, Harald Weinfurter y Thomas Herzog) construyó un “detector de bombas” que utilizaba este concepto –aunque, por supuesto, no detectaba la presencia de bombas sino de espejos... y el experimento funcionó: detectó la presencia de los espejos sin que le llegase luz alguna. Dicho de otro modo, esto no es una elucubración teórica, sino que ha sido comprobado experimentalmente.

Lo que nos lleva al “elefante en la habitación”:

¿cómo rayos se pueda medirse algo sin interaccionar con él?

Si el fotón que llega a la pantalla de arriba en nuestro caso no ha interaccionado de ningún modo con la bomba:

¿por qué se comporta de manera diferente cuando la bomba está ahí?

Las preguntas más filosóficas.

¿Es posible que la bomba y el fotón que nunca la toca sino que llega a la pantalla de arriba sí estén interaccionando de alguna manera?

Pero, si nuestro interferómetro no tuviera unos pocos centímetros de tamaño sino que fuese del tamaño del Sistema Solar, de modo que el fotón nunca estuviera a menos de cien millones de kilómetros de la bomba, *¿cómo puede alterar el fotón su comportamiento dependiendo de si hay bomba o no?*

Si aceptamos que es posible esa alteración a distancias arbitrarias y de manera instantánea, estamos desterrando la concepción de **localidad**.

Otra pregunta es:

¿tiene sentido hablar de la naturaleza de una bomba con la que nunca hemos interactuado?

¿No habíamos quedado, desde Heisenberg, en que si no lo “vemos” no tiene sentido hablar de ello?

Renegar de la naturaleza de la bomba independientemente de nuestra medición es descartar la idea de **realismo** –la idea de que existe una realidad independiente de su observación.

Tanto una cosa como la otra, incomodaban seriamente a Einstein, y nunca cesó en su empeño de defender localidad y realismo.

Cuando Elitzur y Vaidman propusieron su experimento, estas preguntas llevaban muchos años planteadas y un físico en particular, el genial John Stewart Bell, elaboró uno de los teoremas más importantes de la cuántica tratando de responderlas.

Para saber más:

[Elitzur-Vaidman bomb-tester.](#)

[Quantum Mechanical Interaction-Free Measurements,](#)
[de Elitzur y Vaidman](#)

[Interaction-free measurements,](#) de Paul Kwiat

[Locality and Quantum Mechanics](#)

[Experimental Realization of “interaction-free”](#)
[measurements,](#) de Zeilinger, Kwiat, Weinfurter y
Herzog