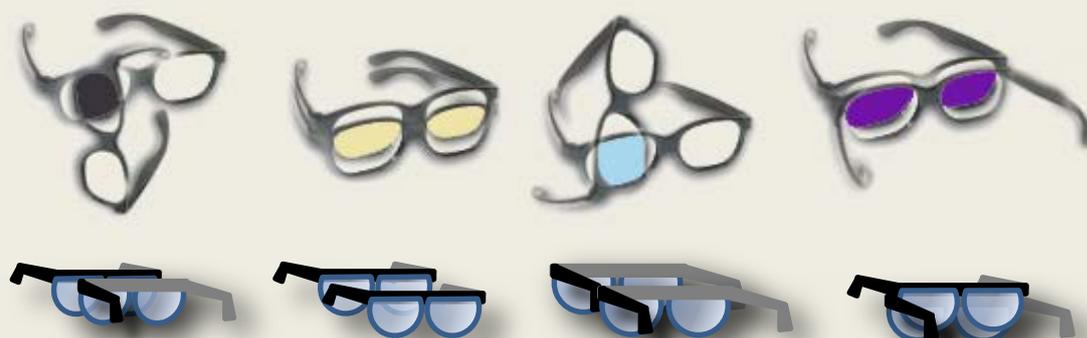


Carlos Rossique Delmas

Jugando con dos pares de GAFAS 3D



¿Alguna vez haz jugado con dos pares de gafas 3D pasivas de polarización circular y te has entretenido en comprobar sus múltiples efectos y combinaciones, y has querido comprender por qué extraña razón pasa todo eso?

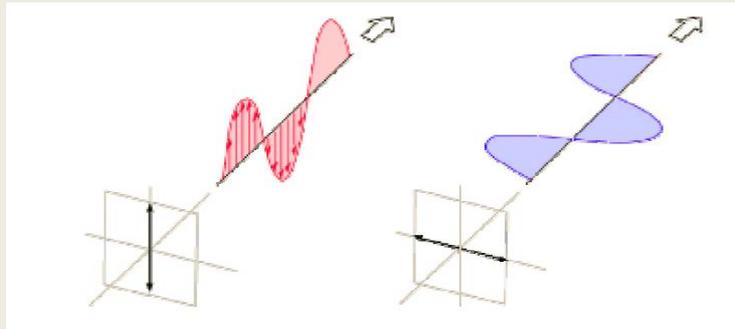
Por fin todos esos curiosos efectos quedan explicados en este documento.

© 2012 Carlos Rossique Delmas. Autorizada la reproducción, citando la fuente



POLARIZACIÓN DE LA LUZ. POLARIZACIÓN LINEAL

La polarización es un fenómeno que puede producirse en las ondas transversales, como la luz, por el cual la onda oscila sólo en determinados planos. Si la luz solamente oscila en un plano determinado, denominado plano de polarización, decimos que la luz está polarizada linealmente. Este plano es perpendicular a la dirección de propagación de la onda. En la figura se muestran dos planos distintos de polarización: lineal en la dirección vertical (90°) y lineal en la dirección horizontal (0°) (pero puede ser cualquiera). Si para cada ojo proyectamos la imagen con un tipo de polarización y para cada uno de ellos usamos el filtro para esa misma dirección obtendremos en cada uno de ellos la imagen deseada produciendo la ilusión de 3D:

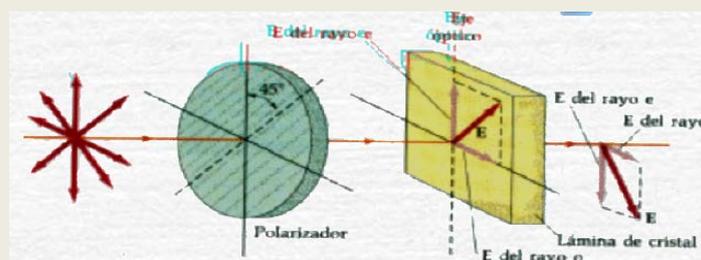


Pero esta técnica (Usada en IMAX 3D por ejemplo) tiene un problema importante, es muy sensible a los cambios de dirección: cualquier ligera desviación de la cabeza dejara pasar aunque sea un poco de luz de la imagen destinada al ojo contrario produciendo efectos “fantasma” indeseados. Es por eso que actualmente se usa la polarización circular, pero veamos como se consigue:

BIRREFRINGENCIA O DOBLE REFRACCIÓN:

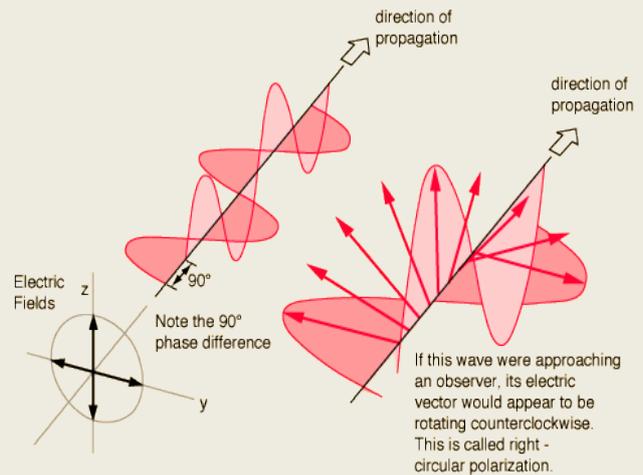
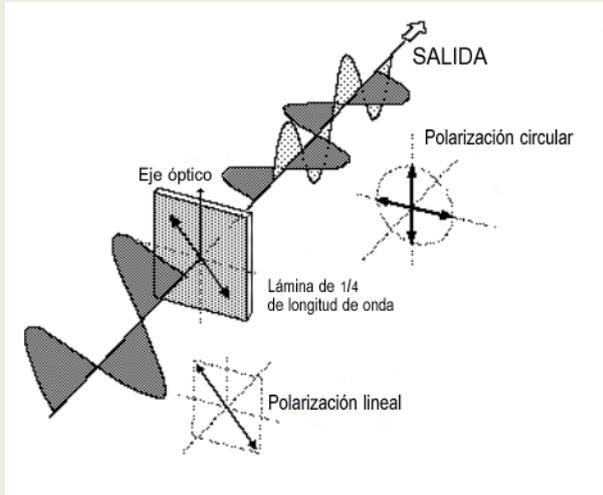
La birrefringencia es un fenómeno que se presenta en algunos cristales de simetría no cúbica. Los materiales birrefringentes son anisótropos, es decir, la velocidad de la luz es distinta dependiendo de su dirección de propagación. Un rayo de luz que incide sobre este material se separa en dos rayos llamados rayo ordinario **o** y rayo extraordinario **e**. Estos rayos están polarizados en direcciones perpendiculares y se propagan con diferentes velocidades. Existe una dirección particular en un material birrefringente en que ambos rayos se propagan a igual velocidad. Esta dirección se llama eje óptico del material. Cuando la luz se propaga a lo largo de ese eje no ocurre nada inusual. Pero si la luz incide en ángulo respecto al eje, los rayos se propagan en distintas direcciones y emergen separados en el espacio con una diferencia de fase que depende del espesor de la placa y de la longitud de onda de la luz incidente.

Si la luz incidente está polarizada linealmente de forma que el vector campo eléctrico forma un ángulo de 45° con el eje óptico, como se indica en la siguiente figura, la luz en un eje se retrasa una porción de λ . Y si se retrasa $\lambda/4$ (90°), produce lo que damos en llamar polarización circular:

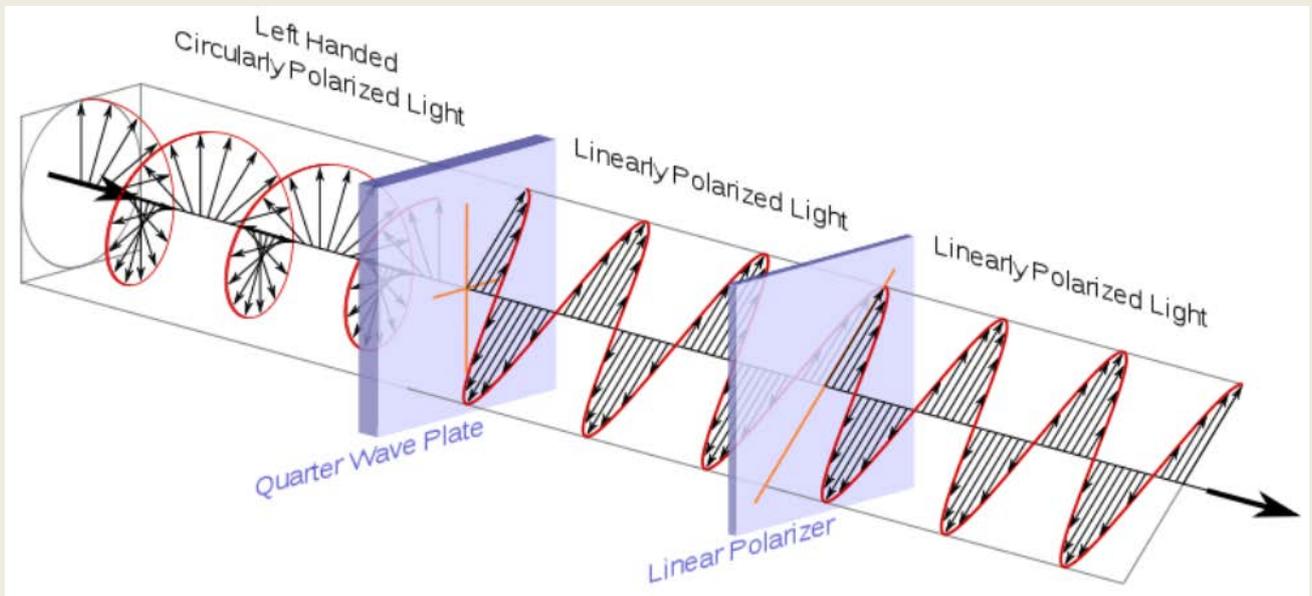


COMO SE EMITE LUZ POLARIZADA CIRCULARMENTE Y COMO SON LAS GAFAS 3D:

Ese es el método para producir luz polarizada circularmente: una capa de polarización lineal normalmente en los ejes vertical (90°) u horizontal (0°) más una capa birrefringente que se llama "lamina de un cuarto de onda" o "*quarter wave plate*" con eje horizontal a 45° (o 135°) para producir luz polarizada a derechas o izquierdas dependiendo el polarizador lineal. (en la figura el plano esta a 135° y el eje óptico a 90°)



En las gafas se da el proceso inverso al anterior, la luz polarizada circularmente en el mismo sentido que la gafa correspondiente produce una luz polarizada linealmente en ese eje



En las gafas comerciales Real 3d, para el ojo izquierdo se usa polarización circular a derechas ("*clockwise*") y para el derecho polarización a izquierdas ("*counterclockwise*") los polarizadores lineales están a 0° . Pero si esto no se entiende bien no hay porqué preocuparse, volveremos sobre ello enseguida, tras presentar los efectos que se dan en las gafas 3D y que trataremos de explicar uno por uno.

TODOS LOS MISTERIOS DE LAS GAFAS 3D DE POLARIZACION CIRCULAR A DESVELAR: (EXPERIMENTACIÓN)

Experimentemos con dos pares de gafas 3D de polarización circular (RealD 3D en este caso). Llamemos F al lado frontal de las gafas y R al reverso, el lado más cercano a los ojos. Sin tener en cuenta las diferencias entre la gafa izquierda y la derecha podemos juntar dos gafas de cuatro maneras, en serie directamente (FRFR) o reverso (RFRF), o bien enfrentadas con el frontal afuera (FRRF) o adentro (RFFR). Experimentamos lo siguiente, con luz natural (ojo que la luz del monitor del PC no sirve para las pruebas por ser polarizada) y probando todas as configuraciones, giros y combinaciones posibles:

1) Las gafas en serie directa, ya sea →FRFR o →RFRF nunca obturan, en ningún ángulo ni combinación.

1_b) Solamente una ligera coloración independiente del sentido FRFR o RFRF o de si es derecha o izquierda.

1_c) La coloración es azulada con 90° o -90° de giro, y amarillenta con 0° o 180°.

Las gafas sólo obturan en algunos ángulos FRRF o RFFR:

2) En modo RFFR una gafa (derecha ó izquierda) no obtura (ni colorea) consigo misma en ningún ángulo.

(se aprecia un ligerísimo tono verdoso..?)

3) En RFFR una gafa con su contraria siempre obtura; violeta oscuro a 0°-180°, y casi negro a 90° y -90°.

4) En modo FRRF una gafa consigo o su contraria sólo obtura en 90° y -90°, en el resto deja pasar toda luz.

5_a) Delante del espejo un solo par de gafas puestas (FR) obtura el reflejo del mismo ojo pero no del otro

5_b) Con las gafas puestas del revés (RF), no hay obturación alguna.

6) Delante del ordenador un solo par de gafas obturan sólo el revés (RF) en los ángulos 135° y 315°.

Todos estos raros fenómenos deben ser explicados según la doble capa lineal/birrefringente. Lo más sencillo es explicar que en configuración FRRF se produce una obturación, ya que enfrentamos dos polarizadores lineales, así, por 4) y por 6) pareciera que las polarizaciones lineales de ambas gafas se dan en el mismo ángulo (0° según el fabricante). El resultado de 2) también parece lógico ya que enfrentar dos lados F iguales los pone en fase, digamos que todo es transparente a ese par y nunca obturan.

También es lógico el resultado de 3) ya que presentamos la polarización contraria a cada gafa y en ese caso siempre obturarán. En realidad el resultado de 5) es similar. Explicar la coloración violeta es un poco más complicado, pero tiene que ver con que la lámina de un cuarto de longitud de onda se calcula para una longitud de onda central (verde); lo que está pasando es que algunas longitudes de onda más extremas, azul-violetas por arriba y rojas por abajo, se están “colando” en ciertos ángulos.

El resultado de 1) también es lógico, nunca puede haber obturación en configuraciones FRFR y RFRF porque enfrentar una luz polarizada (saliendo de R) a una capa birrefringente (F) siempre va a dejar pasar luz y viceversa, y todas las posiciones son sucesiones de F y R alternas. Lo ocurrido en 1_b) y 1_c) es parecido a lo que se comentaba en el caso del violeta, pero complementariamente aquí no se cuelan unas pocas longitudes de onda sino que se bloquean unas pocas longitudes de onda largas (rojas y amarillas) en el caso de la coloración azulada, o cortas (azules y violetas) en el caso de la coloración amarillenta.

Todo esto es un poco difícil de asimilar, pero tal vez lo más complicado es captar intuitivamente lo que hace, en ambos sentidos, una lámina birrefringente de cuarto de longitud de onda (“*quarter wave plate*”). Ya hemos explicado lo que hace para producir luz polarizada circularmente: a partir de una luz polarizada linealmente y a -45° del eje óptico de la “*quarter wave plate*”, crea luz polarizada circularmente a derechas. Si a esa misma placa llega luz polarizada circularmente desde el otro lado produce exactamente lo contrario, luz polarizada linealmente. La idea es que si es a derechas o a izquierdas produce la polarización lineal a 45° o -45° del eje óptico, con lo que pasa o bloquea en el polarizador lineal que le sigue.

Seguidamente vamos a tratar de expresar con reglas lo que pasa en todos los casos. Primero explicaremos mejor lo que hace una lámina birrefringente, luego trataremos los casos básicos y por último estudiaremos el caso, más complejo, de las coloraciones.

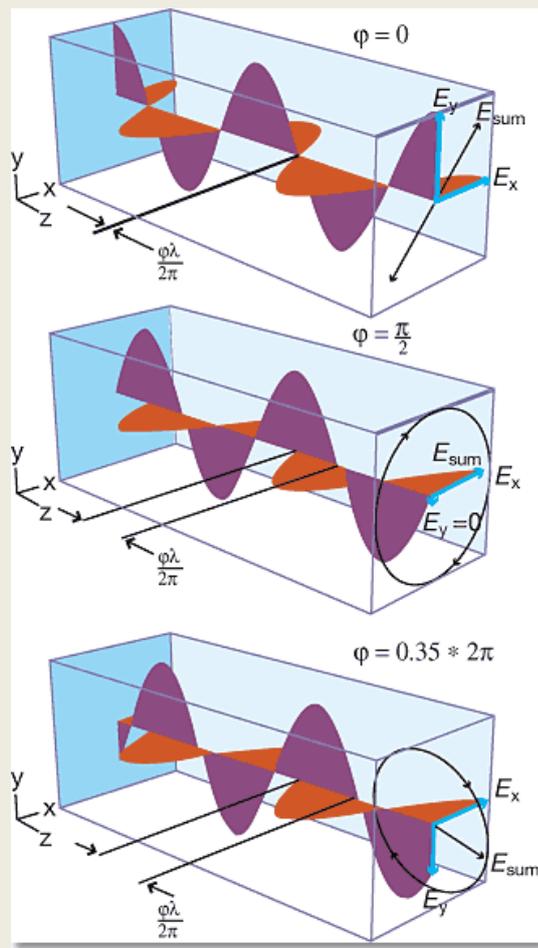
UNA MANERA MÁS SENCILLA DE VER LO QUE HACE LA LÁMINA BIRREFRINGENTE DE LAS GAFAS 3D

La luz natural (según sale del sol) supuestamente no tiene ningún plano privilegiado de vibración. La atmosfera u otro tipo de materiales pueden polarizarla. Lo más sencillo es un polarizador lineal que obliga a la luz a vibrar en un solo plano. Esto es lo que hace:

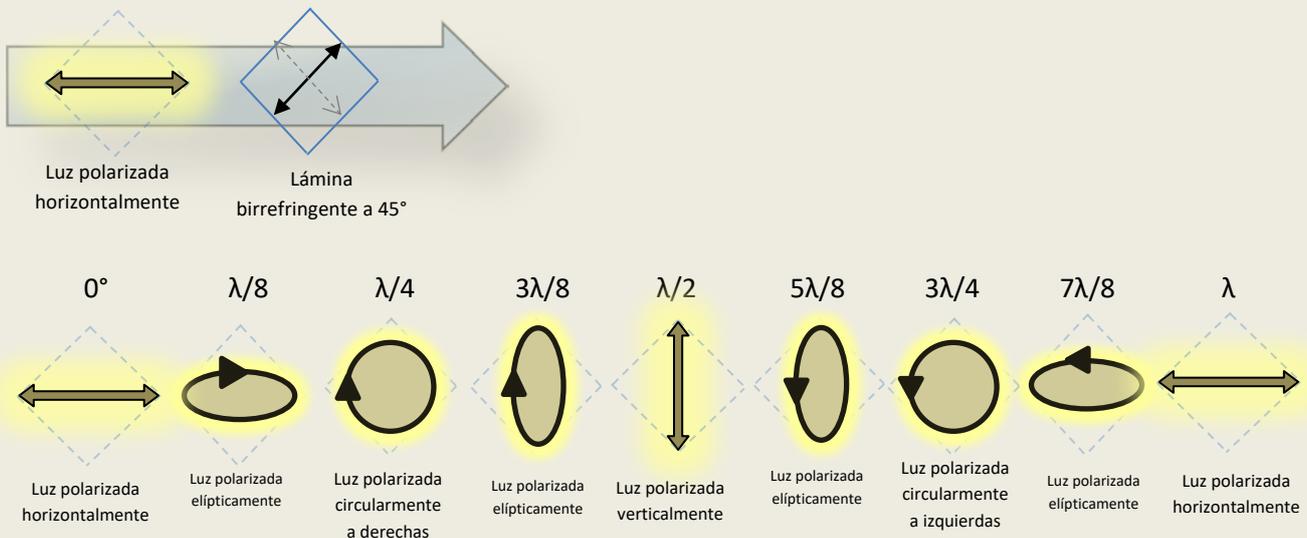


Por el contrario, una lámina birrefringente, como su nombre sugiere, lo que hace es separar la luz en dos planos perpendiculares: En uno sin retardo (en el llamado eje óptico o rayo ordinario) y en otro con un determinado retardo (perpendicular al eje óptico o rayo extraordinario).

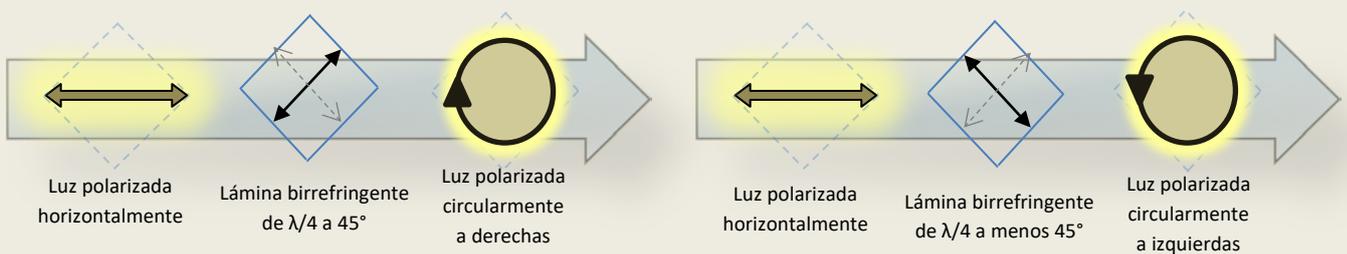
Si consideramos que la luz con dos componentes ortogonales, y lo hacemos en los ejes ordinario y extraordinario de la lámina birrefringente, con distintos retardos podemos producir distintas polarizaciones lineales, circulares o elípticas.



Si partimos de la luz polarizada horizontalmente de antes y aplicamos distintos retardos (el eje óptico está representado por la flecha negra llena y el rayo extraordinario por la flecha punteada) con la lámina birrefringente producimos, distintos tipos de polarización, por ejemplo:



Pero de momento nos vamos a quedar solamente con las láminas birrefringentes de $\lambda/4$ que son llamadas también “quarter wave plate”, que son las que hay en las gafas 3D



Nuestras gafas 3D están compuestas como hemos dicho antes por dos capas (en el sentido de afuera a adentro): una lámina birrefringente de $\lambda/4$ de retardo, más un polarizador horizontal:

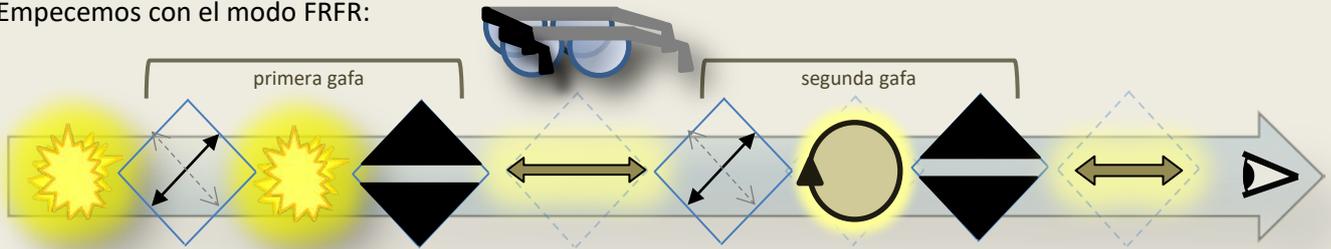


Lo que haremos ahora es explicar, aplicando lo anterior, todos los efectos básicos producidos en las gafas.

EXPLICACIÓN DE LOS EFECTOS BÁSICOS

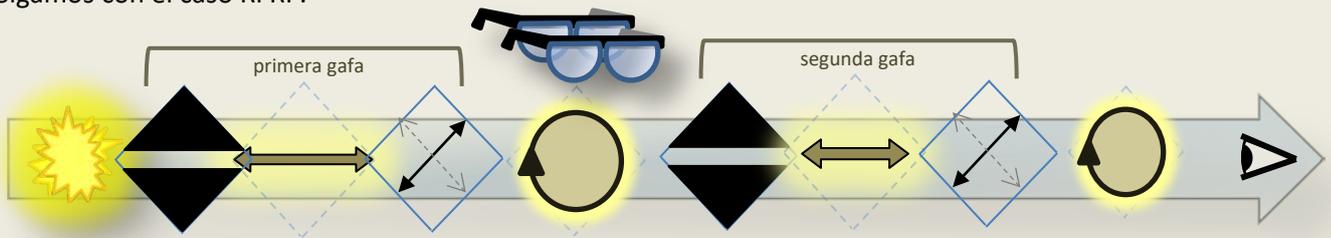
1 - Las gafas en serie directa, ya sea →FRFR o →RFRF nunca obturan, para todo ángulo o combinación

Empecemos con el modo FRFR:



La 1ª capa birrefringente (da igual el sentido) no polariza la luz natural, que tras el 1º polarizador lineal queda polarizada linealmente (da igual el ángulo). La 2ª capa birrefringente polariza circularmente la luz (da igual el sentido) que tras el 2º polarizador queda de nuevo polarizada linealmente (da igual el ángulo). Por mucho que variemos el ángulo o combinemos las gafas izquierda o derecha obtendremos siempre lo mismo; luz polarizada linealmente en el ángulo del ultimo polarizador lineal. (Eso sí, un poco atenuada en $\sqrt{2}/2$) no es posible el bloqueo.

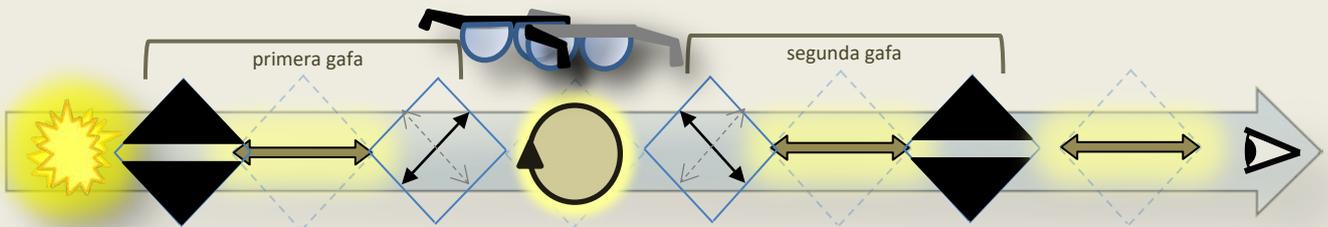
Sigamos con el caso RFRF:



Ahora el 1º conjunto polarizador lineal – capa birrefringente produce polarización circular, que independiente de su ángulo y sentido volverá a polarizarse linealmente y luego circular, también independiente de cual sea la gafa o el ángulo que la giremos, al final produciremos lo mismo, luz polarizada circularmente (a izquierdas o derechas según la segunda gafa) un poco atenuada ($\sqrt{2}/2$) pero nunca un bloqueo.

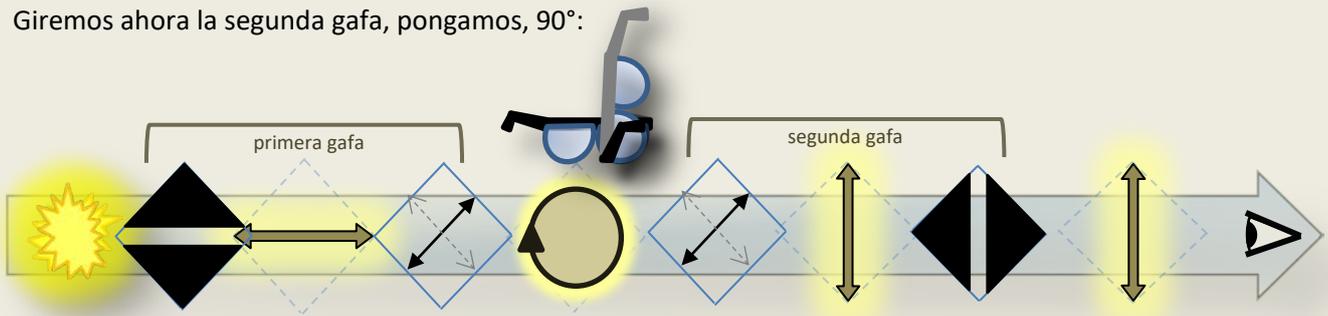
2 - En modo RFRF una gafa (derecha ó izquierda) no obtura consigo misma en ningún ángulo.

Comprobémoslo, primero sin giro (da igual la gafa derecha o izquierda):



Tengamos en cuenta que al enfrentar la gafa consigo misma *especularmente*, en realidad estamos deshaciendo el efecto de la 1ª capa birrefringente, es decir el efecto de las dos es girar 0°, con lo cual volvemos a la polarización lineal que traspasa perfectamente el 2º polarizador lineal horizontal (además sin atenuación alguna).

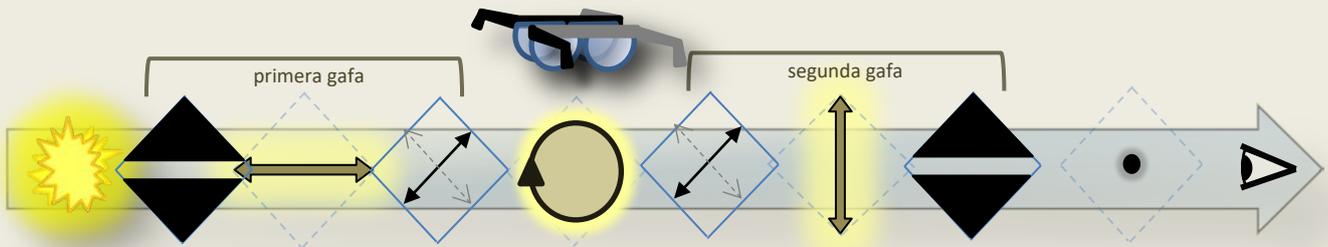
Giremos ahora la segunda gafa, pongamos, 90°:



El efecto de la 2ª capa birrefringente ahora *se suma* al de la 1ª (nótese que coinciden en eje óptico), produciendo entre las dos un *half wave plate*, lo que produce un giro de 90° la polarización lineal, poniéndola en fase con el 2º polarizador lineal (que gracias al giro ahora es vertical) e igualmente traspasándolo perfectamente (sin atenuación).

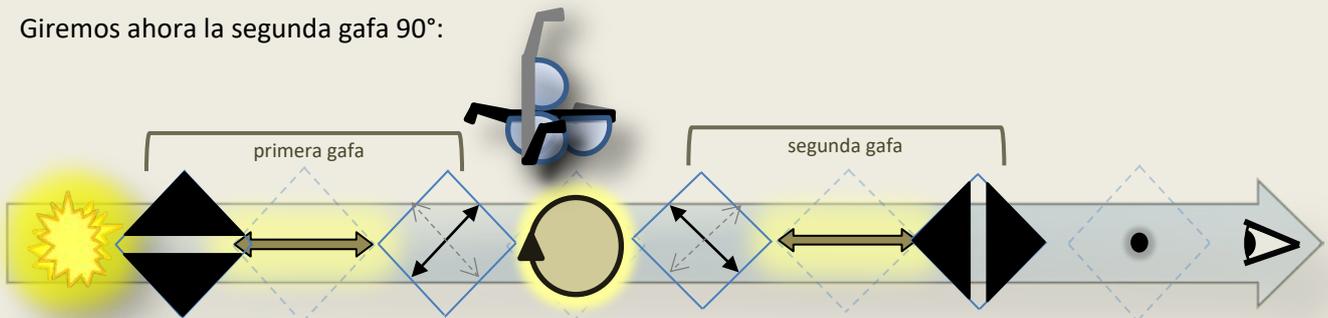
3 - En RFFR una gafa con su contraria siempre obtura

Comprobémoslo, primero sin giro (da igual que gafa pongamos antes):



En este caso las capas birrefringentes suman su efecto, produciendo como antes un *half wave plate*, pero como ahora no ha habido giro, el 2º polarizador bloquea totalmente la luz.

Giremos ahora la segunda gafa 90°:

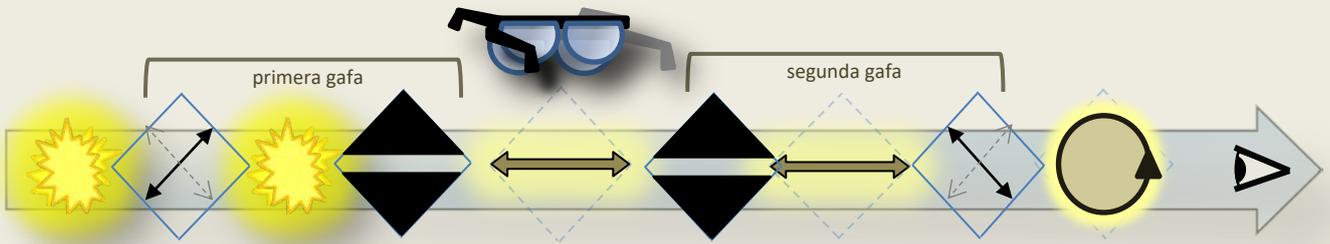


Ahora las capas birrefringentes se anulan, como si no existiese ninguna de las dos, lo cual deja la luz polarizada horizontalmente que finalmente es anulada por el 2º polarizador, ahora vertical gracias al giro.

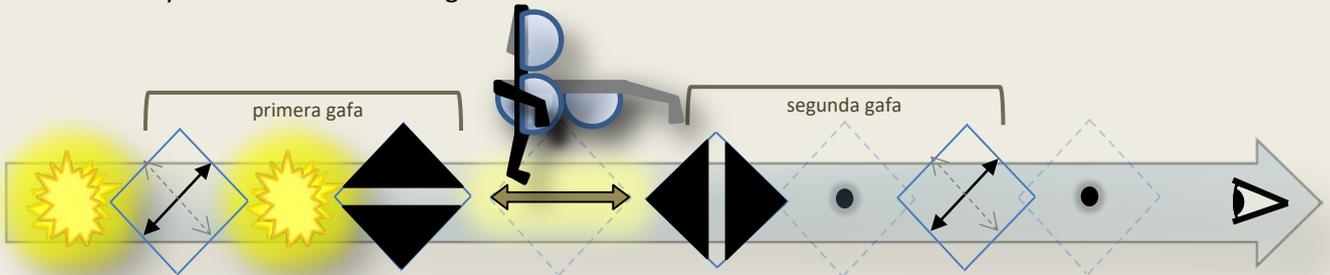
Esta últimas combinaciones (2 y 3: RFFR con gafas iguales o contrarias) explican la función básica de las gafas 3D; su capacidad de bloquear la luz polarizada circular en un sentido por la gafa contraria, pero dejando pasar la luz por la correspondiente gafa. La gafa RF se está comportando como un polarizador circular (barato), y la FR (que es en realidad como nos ponemos las gafas naturalmente cuando vamos al cine 3D) como un receptor-discriminador de la luz polarizada circular que toca a cada ojo. También hemos visto que es independiente del giro de la cabeza, lo que da una ventaja sustancial respecto a las antiguas IMAX 3D.

4 - En modo FRRF una gafa consigo o su contraria sólo obtura en $+90^\circ$, en el resto deja pasar la luz.

Comprobémoslo, primero sin giro:

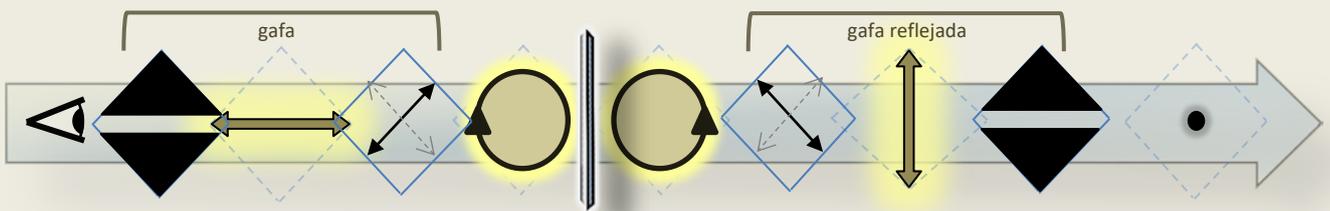


Vemos que en este caso lo crucial es que ahora los dos polarizadores lineales están directamente enfrentados, da igual el giro que impriman antes o después las capas birrefringentes, siempre se producirá al final de la cadena luz polarizada circular excepto en el caso que se enfrenten perpendicularmente que anulará la luz ya a la entrada de la 2ª gafa.

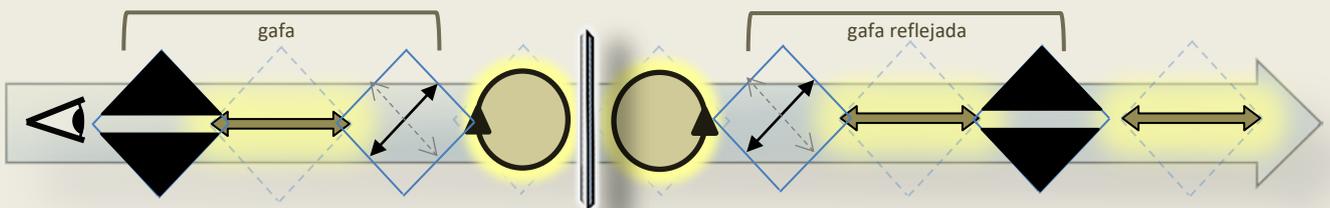


5 - Delante del espejo un solo par de gafas puestas (FR) obtura el reflejo del mismo ojo pero no del otro

Estamos como el caso 2, aquí obviamente en ningún caso hay giro, pero hay que considerar que el espejo cambia el sentido de la polarización circular por eso para la misma gafa produce un $\lambda/2$ y obtura:

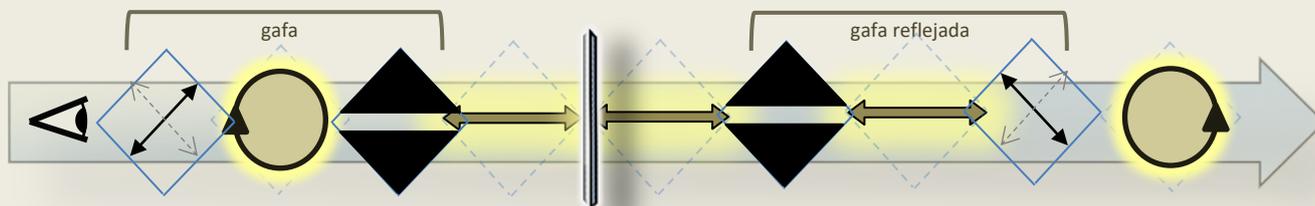


Pero no para la contraria (anulan sus efectos las capas birrefringentes):



5_b - Con las gafas puestas del revés (RF), no hay obturación alguna en el espejo.

Esto es lógico pues la polarización lineal se enfrenta siempre con su mismo ángulo, da igual la gafa y aún giremos la cabeza:



6 - Delante del ordenador un solo par de gafas obturan sólo el revés (RF) en los ángulos 135° y 315°.

Esto es también bastante evidente y no necesita de mucha más explicación pues los LCD suelen polarizar a 45°, lo que hace que a 45° +/- 90°, y solamente a esos ángulos, el polarizador lineal (lado R) simplemente bloquee la luz.



Con esto, hemos explicado todos los efectos básicos de las gafas 3D en cuanto paso o bloqueo de la luz. Ahora nos podemos centrar en algo un poco más complejo, los efectos de coloración en distintas configuraciones.

EXPLICACIÓN DE LOS EFECTOS DE COLORACIÓN

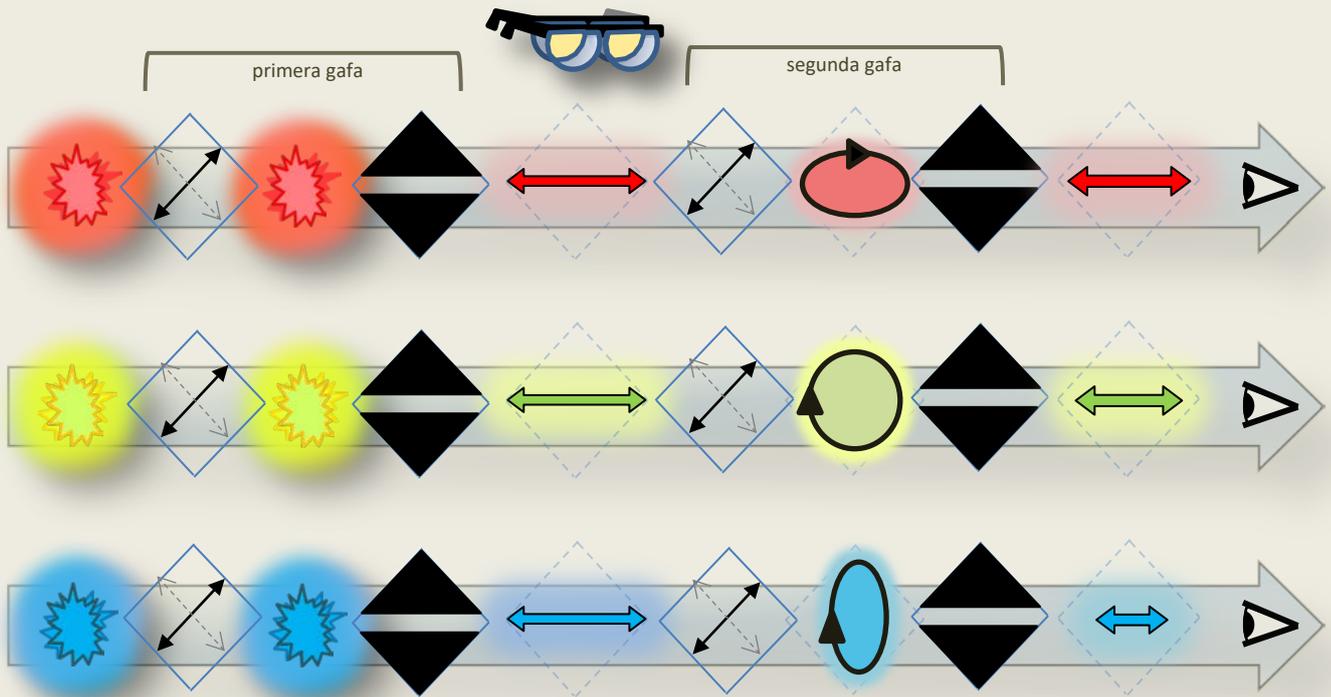
Recordemos los efectos de coloración de ciertas combinaciones en los casos 1,2 y 3.

- 1) En FRFR o RFRF hay una ligera coloración independiente del sentido o de si es derecha o izquierda:
(La coloración es amarillenta sin giro o con 180° y es azulada con 90° o -90° de giro)
- 2) En RFFR una gafa no obtura consigo misma (se aprecia un ligerísimo tono verdoso en 90°..?)
- 3) En RFFR una gafa con su contraria siempre obtura; (violeta oscuro a 0°-180°, y casi negro a 90° y -90°
(En este caso se producen otros efectos de coloración variando el ángulo de incidencia.

En general todos los efectos de coloración se explican porque, la lámina birrefringente (*quarter wave plate*) está calculada para producir precisamente ese $\lambda/4$ para el color central del espectro lumínico visible para el ser humano (esto es, λ de 550 nm aprox, verde amarillento) produciendo polarización circular en esa λ .

Para las longitudes de onda más largas (rojas y amarillas) en un polarizador circular el retardo es de menos de $\lambda/4$ con lo cual la polarización es elíptica con el eje mayor coincidiendo con el eje de polarización lineal (0° en este caso). Para las longitudes de onda más cortas el retardo es de más de $\lambda/4$ con lo cual la polarización es elíptica con el eje mayor perpendicular al eje de polarización, tendiendo hacia una *half wave plate* (el efecto de una lámina así es simplemente girar 90° una polarización lineal).

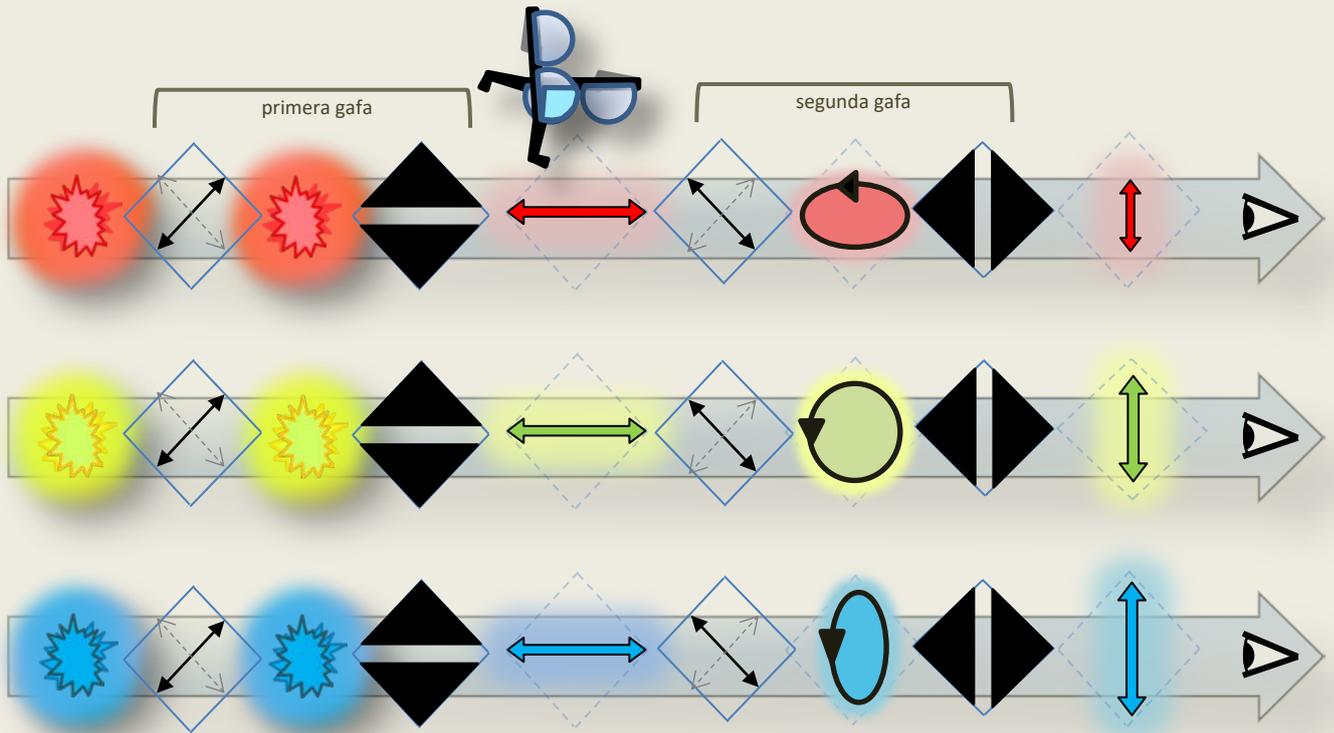
1A - Veamos dos gafas iguales en modo FRFR (oRFRF) sin giro, separado por ondas largas, medias y cortas:



Lo que se está produciendo es que para las longitudes de onda largas, la *quarter wave plate* se está quedando corta (no llega a $\lambda/4$) y se produce aún gran excursión horizontal mientras que para las longitudes de onda cortas (azules) la *quarter wave plate* es demasiado gruesa y produce polarización elíptica con poca excursión horizontal. Para las ondas medias se produce la cantidad normal (el diámetro del círculo). El resultado es que se produce un poco más de luz en ondas largas que cortas, de ahí el tono amarillento.

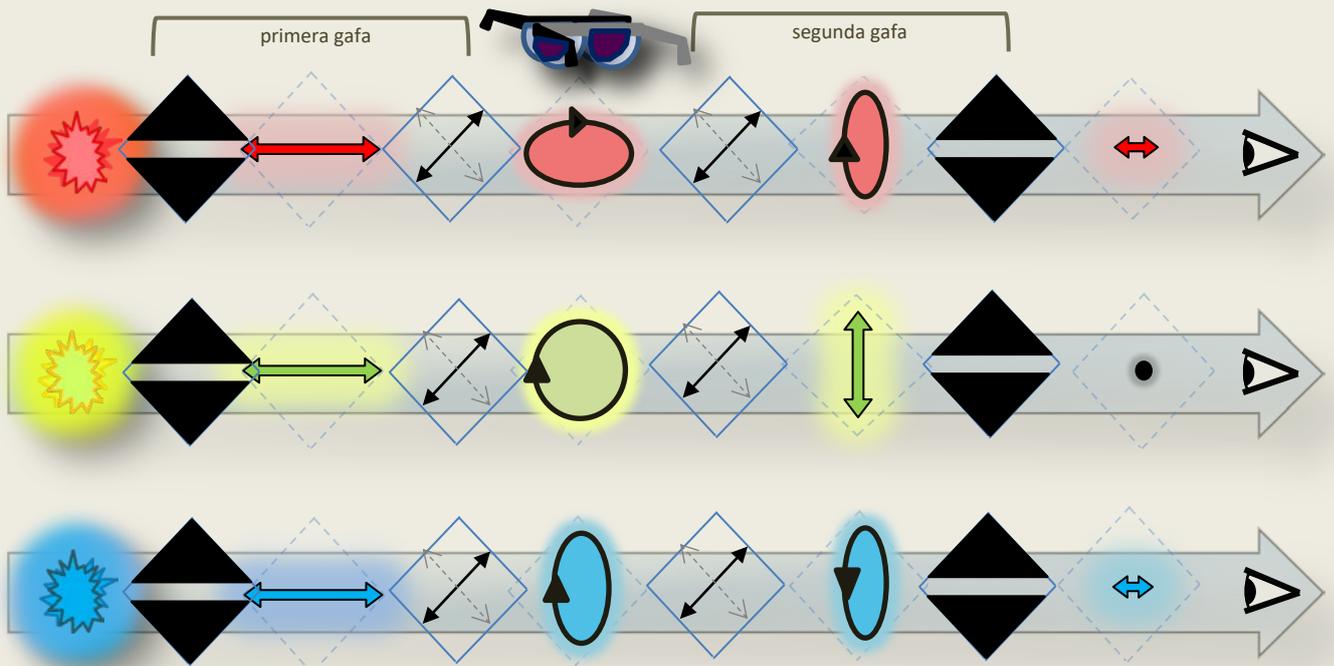
Hay que decir que una serie RFRF produce lo mismo que la FRFR ya que el efecto mencionado, como vemos, se produce en la tripleta RFR, con lo cual no repetiremos los casos para RFRF.

1B - Veamos ahora dos gafas iguales en modo FRFR (oRFRF) pero con un giro de 90°:



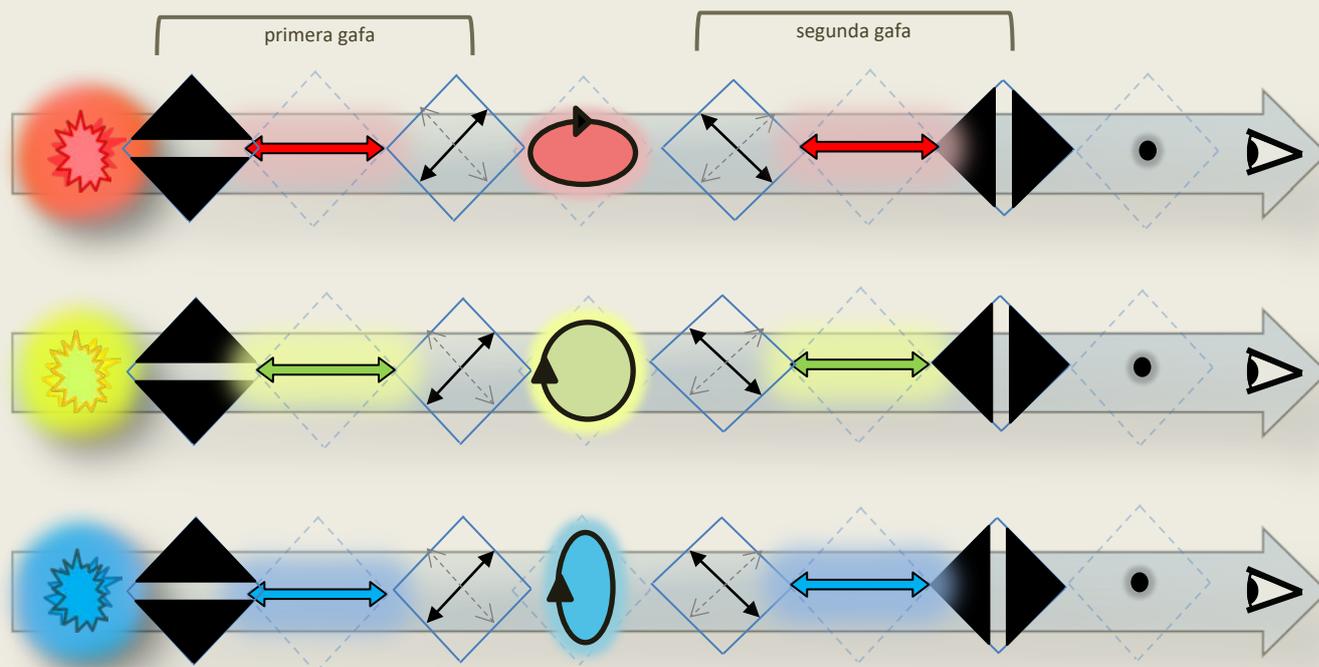
Lo que se está produciendo ahora es las mismas polarizaciones elípticas (aunque en sentido de giro contrario al anterior porque el eje óptico esta del otro lado) pero al haber girado también el polarizador lineal deja pasar mayor amplitud ahora en las ondas cortas (azules) que en las largas (hacia el rojo), que ahora están muy atenuadas, de ahí el tono azulado general a la salida.

3A - Veamos ahora dos gafas contrarias en modo RFFR, primero sin giro:



Lo que ha pasado es que al enfrentar dos gafas contrarias el efecto de las capas se está sumando, produciendo un efecto de half wave plate para las ondas centrales pero no llegando a $\lambda/2$ (para las ondas hacia el rojo) o pasándose (para las hacia el azul) según lo explicado en la página 5, de ahí que sólo pasen el filtro horizontal una pequeña cantidad de ondas muy cortas o muy largas, cuanto más extremas más, por lo que se explica ese tono oscuro profundamente morado. ¿Pero por qué la luz es aún más oscura cuando giramos las gafas 90°?

3B - Veamos ahora dos gafas contrarias en modo RFFR, girando una 90°:

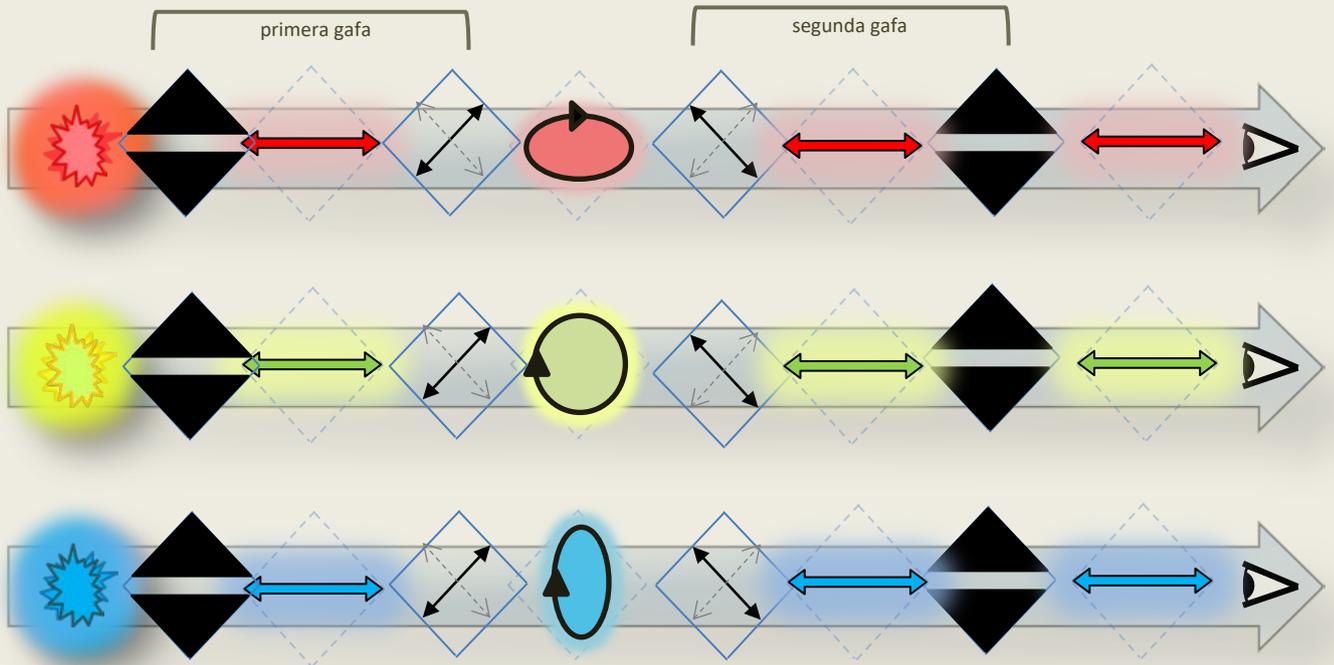


Lo que está pasando ahora es que la segunda capa birrefringente al cambiar el eje óptico desanda el camino hecho por la primera, independientemente de la longitud de onda involucrada y nos encontramos con una luz polarizada horizontal que topa en cualquier longitud de onda con el polarizador vertical, produciendo el máximo bloqueo de luz y no coloreado, como si fuera exactamente como enfrentar dos polarizadores lineales cruzados.

Vemos como van quedando explicados perfectamente todos efectos de coloración de las gafas, pero antes de seguir debemos advertir que estas coloraciones (sobre todo al fundamental explicada en 3B) no están presentes en el funcionamiento normal de nuestras gafas RealD 3D porque lo que estamos haciendo es usar una de ellas como un polarizador “barato” que produce polarizaciones circulares sólo para las longitudes de onda centrales y elípticas para las extremas. Los polarizadores profesionales, mucho más elaborados, son “acromáticos” produciendo polarización circular igual para todas las longitudes de ondas o incluso “precompensando” el efecto cromático que luego pueden producir las gafas. Así que el interés que tenemos en estas coloraciones es simplemente el interés intelectual de saber y explicar teóricamente que está pasando en todas esas múltiples formas con las que jugamos combinando nuestros dos pares de gafas.

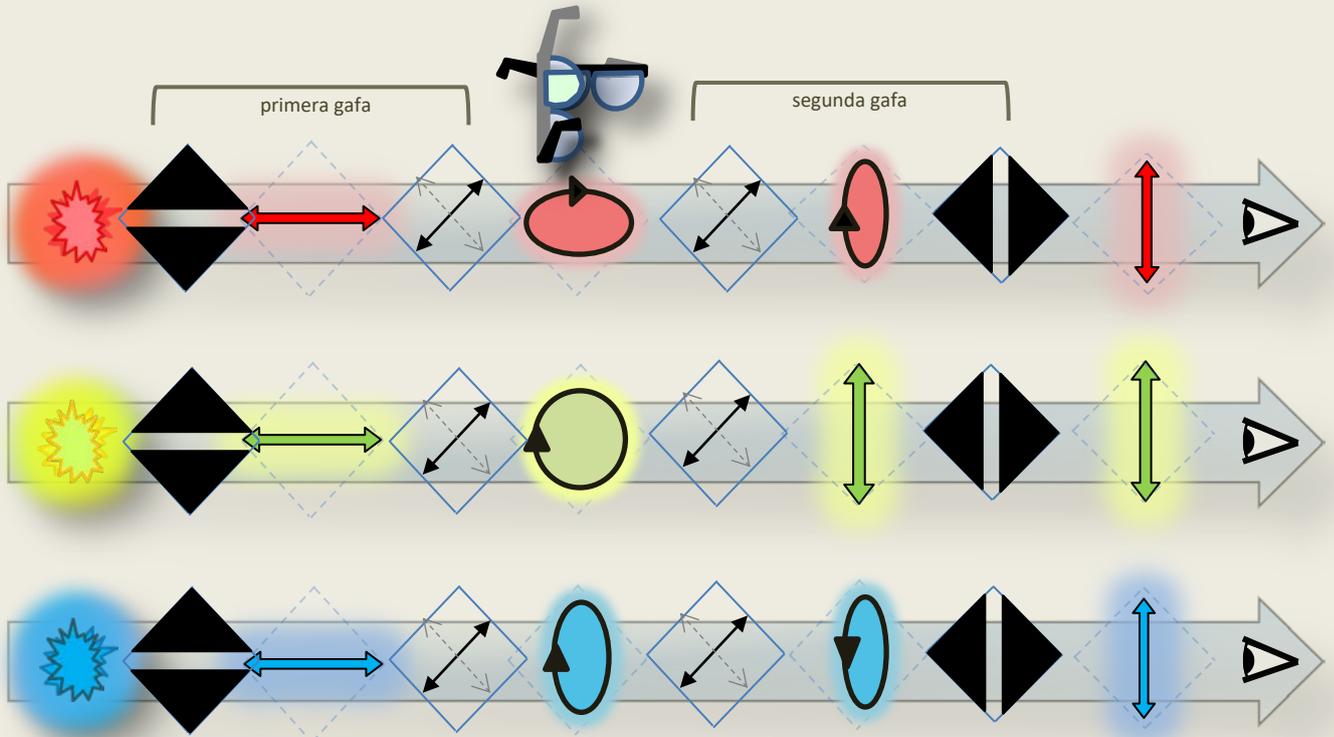
Pasemos a explicar por último por qué se el ligerísimo tono amarillo-verdoso que se produce al enfrentar una gafa consigo misma en modo RFFR, pero girando 90° (y que no presenta coloración alguna sin giro)

2A - Veamos ahora dos gafas iguales en modo RFFR, primero sin giro:



Si no hay giro se anulan las capas f y evidentemente no se produce según efecto de color.

2B - Y ahora con giro de 90°, dos gafas iguales en modo RFFR:



Efectivamente vemos que la “elipticidad” de las longitudes de onda extremas resta un poco, muy poco, de excursión vertical respecto a la central, que es máxima, lo que explica ese ligerísimo toque verdoso.