

## Polaryzacja światła – idziemy do kina 3D

Tomasz Kawalec

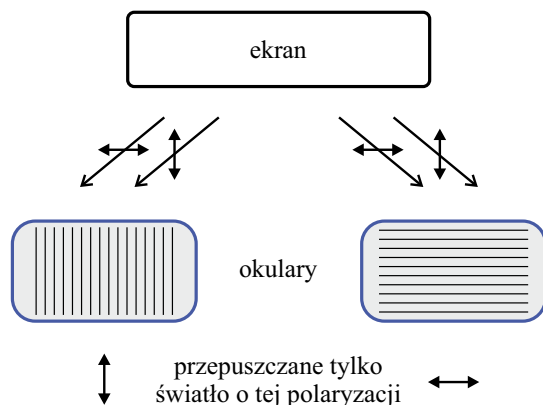
Instytut Fizyki im. Mariana Smoluchowskiego UJ

W numerze 48 *Neutrina* możemy przeczytać ciekawy artykuł, wyjaśniający czym jest polaryzacja fal elektromagnetycznych, a w szczególności – polaryzacja światła. W życiu codziennym jednym z zastosowań polaryzacji, wspomnianym w tym artykule, są kina 3D. W kinach tych obraz przeznaczony dla lewego i prawego oka widzów jest wyświetlany z użyciem różnych polaryzacji światła. Zadaniem okularów jest dopuszczenie do właściwego oka tylko przeznaczonego dla niego obrazu, a zablokowanie tego drugiego.

Okazuje się, że jest to realizowane na dwa sposoby – z wykorzystaniem albo polaryzacji liniowych, albo kołowych. Poniżej przedstawię obie metody, a następnie pokażę, jak można w prosty sposób, w ramach pożytecznej zabawy, rozróżnić okulary przeznaczone do pracy z polaryzacją liniową i kołową. Będą nam do tego potrzebne tylko wspomniane okulary, dowolne lustro (na przykład łazienkowe) oraz podstawowa wiedza o polaryzacji światła – tu polecam właśnie wspomniany artykuł z *Neutrina*.

### Przypadek pierwszy – polaryzacje liniowe

Koncepcyjnie prostsza jest metoda wykorzystująca polaryzacje liniowe – przedstawiona już w artykule w *Neutrinie*. Główna część okularów to dwa polaryzatory, ustawione pod kątem 90 stopni względem siebie. Idea działania jest przedstawiona na rys. 1.

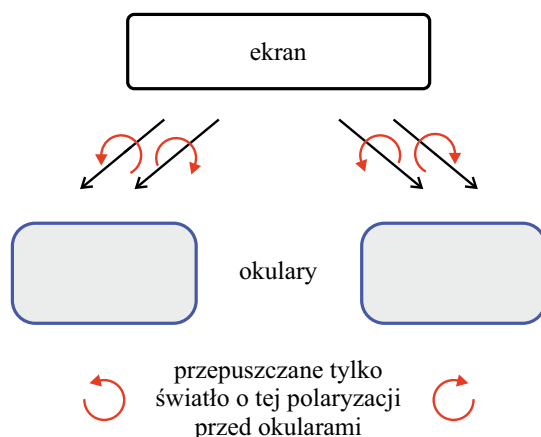


Rys. 1. Zasada działania okularów 3D dla polaryzacji liniowej. Kreskami na okularach są zaznaczone osie polaryzatorów, wybierających właściwy obraz dla właściwego oka

Zaletą tego typu okularów jest ich prostota oraz relatywnie duża jasność. Ta prostota jest jednak okupiona pewną wadą. Gdy przekrzywimy głowę w lewo lub w prawo, do obu naszych oczu będą docierały oba obrazy – w stopniu zależnym od kąta, o jaki odchylił się głowę od pionu. W skrajnym przypadku, gdybyśmy przekrzywili głowę o 90 stopni (niezbyt to wygodna pozycja), do lewego oka docierałby obraz przeznaczony dla oka prawego – i na odwrót. Myślę, że dobrze widać to na bazie koncepcji z rys. 1.

### Przypadek drugi – polaryzacje kołowe

Zasygnalizowanej wyżej wady nie ma system wykorzystujący polaryzacje kołowe – nieco trudniejszy do pełnego zrozumienia. A skoro trudniejszy – to i ciekawszy, więc z tym większą ochotą go przeanalizujemy.



Rys. 2. Ogólna zasada działania okularów 3D dla polaryzacji kołowej. Obraz dla lewego i prawego oka jest rozróżniany skrętnością polaryzacji kołowej

W tym przypadku obraz dla lewego i prawego oka jest wyświetlany z wykorzystaniem polaryzacji kołowej prawoskrętnej i lewoskrętnej. Która z nich jest przeznaczona dla którego oka – nie ma to najmniejszego znaczenia dla zrozumienia idei działania, ale z ciekawości sprawdziłem to doświadczalnie. W jaki sposób? Ponieważ mam dostęp do laboratorium z elementami optycznymi, mogłem wygenerować wiązkę światła laserowego o polaryzacji kołowej i znanej skrętności. Prawdę mówiąc – przygotowanie światła o polaryzacji kołowej jest łatwe, ale stwierdzenie skrętności (czyli czy jest to polaryzacja prawoskrętna, czy lewoskrętna) już wymaga chwili zastanowienia. Wiązkę skierowałem na okulary i sprawdziłem, która „szybka” bardziej tę wiązkę przepuszcza, a która – blokuje. Okazuje się, że szybka dla lewego oka przepuszcza polaryzację prawoskrętą, a dla prawego – lewoskrętą. Tu jednak muszę wtrącić uwagę dotyczącą nazewnictwa, ponieważ fizycy nie doszli do porozumienia w tym zakresie. Jedni określają skrętność, patrząc od strony źródła światła (na przykład lasera) – czyli w tej wersji wiązka od nich „ucieka”. Drudzy patrzą z przeciwnej strony – czyli wiązka światła na nich pada. Obie wersje są dobre, byle tylko było wiadomo, któ-

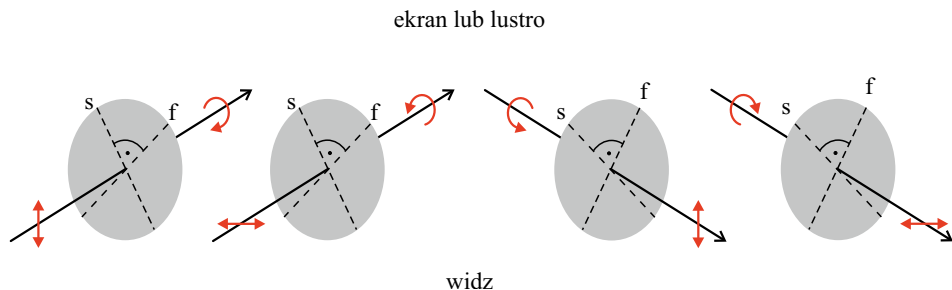
ra została zastosowana. Ja patrzyłem od strony lasera (czyli można powiedzieć „z biegiem wiązki”) – w sumie tak jest bezpieczniej dla oka 😊. Wynik mojego „pomiaru” jest już zawarty w rys. 2, który przedstawia ogólną zasadę działania naszego kina.

Zaletą okularów na polaryzacje kołowe jest odporność na przekrzywianie głowy. Ani skrętność światła, ani działanie okularów nie zmienia się wraz z taką zmianą kąta ustawienia. Tu przypomnę, że w okularach na polaryzacje liniowe rola polaryzacji poziomej i pionowej zamieniała się przy obrocie okularów o 90 stopni. Wadą okularów dla polaryzacji kołowej jest mniejsza jasność niż okularów dla polaryzacji liniowej.

### Jak działają okulary na polaryzację kołową?

Zanim przejdziemy do szczegółów, najpierw podam podstawowe informacje o działaniu tak zwanej płytki ćwierćfalowej – ponieważ szybka okularów jest zbudowana z polaryzatora i właśnie płytki ćwierćfalowej. Płytką tą ma tę właściwość, że gdy pada na nią światło spolaryzowane kołowo, to po przejściu przez nią wychodzi spolaryzowane liniowo (prawa strona rys. 3). Kierunek tej polaryzacji liniowej zależy od skrętności polaryzacji kołowej światła padającego – dla przeciwnych skrętności te polaryzacje liniowe są do siebie prostopadłe. Ponadto, kierunek polaryzacji liniowych leży na dwusiecznej kąta prostego między charakterystycznymi osiami płytki ćwierćfalowej, zaznaczonymi na rys. 3 liniami kreskowanymi. Osie te, z przyczyn fizycznych, są nazywane osią szybką ( $f$  od fast) i osią wolną ( $s$  od slow).

Płytką ćwierćfalową działa też w drugą stronę – gdy pada na nią światło o polaryzacji liniowej, to wychodzi o polaryzacji kołowej, o skrętności zależnej od orientacji polaryzacji liniowej względem osi szybkiej i wolnej (lewa strona rys. 3). Tu jednak uwaga – żeby tak było, kierunek polaryzacji liniowej musi być dokładnie na dwusiecznej kąta prostego między osiami płytki ćwierćfalowej.

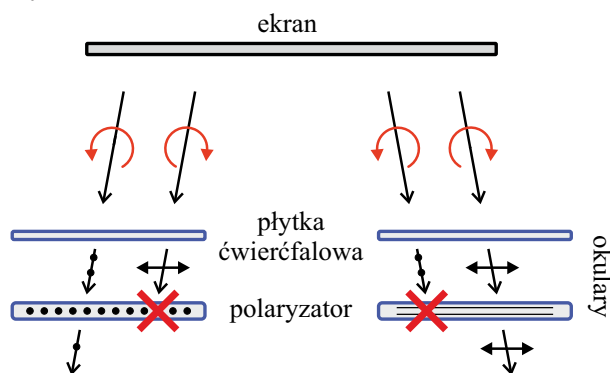


Rys. 3. Działanie płytki ćwierćfalowej na wybranych przykładach. Cztery pokazane przypadki dobrałem tak, żeby pasowały do konfiguracji, które pojawiają się w naszych okularach 3D na polaryzację kołową. Ten rysunek jest szczególnie przydatny przy analizowaniu rys. 7, gdzie korzystamy z lustra

Okulary na polaryzację kołową składają się – patrząc od strony ekranu kinowego – z płytki ćwierćfalowej, a następnie (od strony oka) polaryzatora. Najistot-

niejszy jest tutaj kąt ustawienia osi polaryzatora względem osi płytki ćwierćfalowej. Dla lewego i prawego oka polaryzator jest ustawiony wzdłuż wspomnianych już dwusiecznych. Mamy dwie dwusieczne (pod kątem prostym względem siebie) i polaryzatory są ustawione jeden wzdłuż jednej, a drugi wzdłuż drugiej dwusiecznej.

Zasada działania tych okularów jest już pewnie jasna. Do lewej i prawej szybki okularów trafia światło o polaryzacji i lewoskrętnej, i prawoskrętnej. Po przejściu przez płytki ćwierćfalowe, światło ma już polaryzację liniową – ale o kierunku zależnym od skrętności polaryzacji światła. Polaryzatory, znajdujące się między płytką ćwierćfalową a okiem, są tak zorientowane, że do lewego oka trafia tylko światło o polaryzacji (pierwotnie) prawoskrętnej, a do prawego – lewoskrętnej. Widzimy to na rys. 4.



Rys. 4. Szczegółowa zasada działania okularów 3D dla polaryzacji kołowej. Szkic jest wykonany jako widok z góry. Kropki oznaczają polaryzację liniową pionową – prostopadłą do ekranu lub kartki. Uwaga – w mojej wersji rysunku polaryzatory są względem siebie obrócone o 90 stopni, a płytki ćwierćfalowe są ustawione względem siebie identycznie (i tak, jak na rys. 3). Czerwony krzyżyk to symbol blokady światła przez polaryzator

Na pierwszy rzut oka oba typy okularów niczym się nie różnią z wyglądu – a przynajmniej jeśli chodzi o same „szkła”. Jak zatem szybko je odróżnić?

### Zabawa z lustrem

Okazuje się, że metoda jest naprawdę bardzo prosta. Najpierw ją przedstawię, a następnie wyjaśnię, jakie są jej podstawy fizyczne. Bierzymy nasze okulary 3D, wkładamy na nos i maszerujemy na przykład do łazienki. Stajemy przed lustrem i zamykamy jedno oko. Dzieje się ciekawa rzecz – jedna z szybek (widziana przez nas w lustrze) robi się praktycznie czarna! Zamykamy dla odmiany drugie oko – a czarna robi się druga szybka.

I teraz najważniejsze – o tym, jakiego typu są to okulary, mówi nam to, która szybka robi się czarna. Czy ta, która jest przy zamkniętym oku, czy ta, która jest przy otwartym.

Jeśli czarna szybka jest od strony zamkniętego oka – to są to okulary na polaryzację liniową. Jeśli czarną szybki widzimy od strony oka otwartego, to okulary są na polaryzację kołową. Innymi słowy:

- w wersji dla polaryzacji liniowej czarna szybka zasłania w lustrze zamknięte oko;
- w wersji dla polaryzacji kołowej czarna szybka zasłania w lustrze otwarte oko.



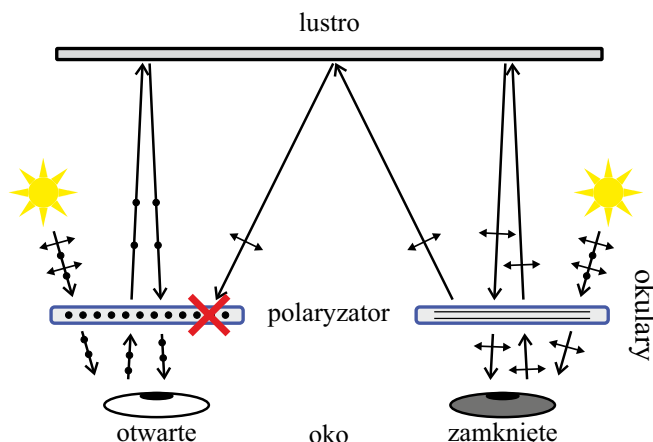
Rys. 5. Zabawa z okularami 3D i lustrem – przypadek dla wersji z polaryzacją kołową. Na lewym rysunku mam zamknięte moje lewe oko, a na prawym rysunku – prawe. Pamiętajmy, że szybka okularów nie robi się w rzeczywistości czarna. Jedynie wydaje się taka w odbiciu w lustrze

Przykład dla polaryzacji kołowej jest pokazany na rys. 5. Widać na nim autora tego artykułu, patrzącego na swoje odbicie w lustrze. Obraz pochodzi z małej kamery z modułem wi-fi, wstawionej pomiędzy oko a szybki okularów. Kamera pełni zatem rolę otwartego oka i dzięki niej widzimy dokładnie to, co widać „na żywo”, gdy patrzymy w lustro. Widoczne na zdjęciach białe przewody to zasilanie kamery.

### Wiemy już jak odróżnić okulary – ale jak naprawdę działa nasza metoda?

Zacznijmy od polaryzacji liniowej. Załóżmy, że mamy otwarte lewe oko i zamknięte prawe. Światło w łazience mamy niespolaryzowane. Światło to pada na nasze okulary i przechodzi przez ich szybki, a po przejściu jest już spolaryzowane liniowo (patrzmy na rys. 6). Światło to odbija się od oczu i ich najbliższej okolicy (zapewne też trochę depolaryzuje), znów przechodzi przez szybki i jego część trafia na lustro. Po odbiciu od lustra część światła trafia w kierunku naszych oczu – ale po drodze znowu ma okulary. Światło od lewego oka było spolaryzowane pionowo. Po odbiciu od lustra nadal jest spolaryzowane pionowo i bez większych problemów przechodzi przez szybki przy lewym oku. Lewe oko widzi zatem samo siebie (widzimy w lustrze nasze otwarte oko). Światło od prawego oka – spolaryzowane poziomo – po odbiciu od lustra nie przechodzi przez szybki przy lewym oku. Czyli nie widzimy w lustrze ani zamkniętego (prawego) oka, ani jego okolic twarzy – szybka wydaje się czarna. Analogicznie działa to,

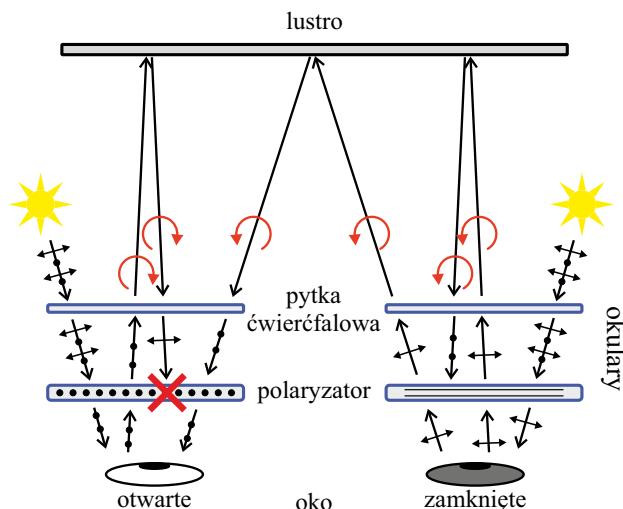
gdy zamkniemy lewe oko, a zostawimy otwarte prawe – zawsze w lustrze będziemy widzieć odbicie otwartego oka i ciemną szybkę na zamkniętym oku.



Rys. 6. Rozróżnianie okularów – polaryzacja liniowa. Przykładowo – lewe oko nie widzi światła, które wyszło przez prawą szybkę i odbiło się od lustra (zwróćmy uwagę na czerwony krzyżyk – symbol blokady światła przez polaryzator). Prawa szybka w odbiciu w lustrze wydaje się zatem czarna. Lewe oko widzi natomiast samo siebie w lustrze

A co się dzieje, gdy mamy okulary na polaryzację kołową? Tu sprawa jest trochę trudniejsza. Pomagamy sobie rysunkami 3 i 7, i analizujemy sytuację. Niespolaryzowane światło zewnętrzne pada na okulary i po przejściu przez nie – oświetla nasze oczy. W okularach, po przejściu przez płytkę ćwierćfalową, światło nadal jest niespolaryzowane. Z kolei po przejściu przez polaryzator jest już spolaryzowane liniowo. To światło odbija się od naszych oczu, pada od środka na okulary, przechodzi przez polaryzator (tu nic ciekawego się nie dzieje) i przechodzi przez płytkę ćwierćfalową. Po niej światło jest już spolaryzowane kołowo! To światło pada na lustro i znów jego część trafia z powrotem do nas. Tu jednak dzieją się ciekawe rzeczy. Światło odbite od lustra ma skrętność jak na rysunku – mówimy, że przy odbiciu światło zmienia skrętność polaryzacji. Co prawda wektory pola elektrycznego (i magnetycznego) obracają się w tę samą stronę w świetle padającym i odbitym od lustra, ale skrętność określamy, patrząc (przykładowo) od strony źródła światła, czyli „z biegiem wiązki”. Wtedy widzimy, że faktycznie skrętność jest odwrócona.

Zatem u nas, ze względu na sposób działania płytki ćwierćfalowej, światło po ponownym przejściu przez nią ma polaryzację liniową, ale prostopadłą do znajdującego się dalej polaryzatora! Zatem to światło nie dociera do naszego lewego oka. Oznacza to, że lewe oko nie widzi samego siebie – szybka okularów wydaje się czarna. Natomiast światło odbite od prawego (zamkniętego) oka, spolaryzowane kołowo, ze skrętnością jak na rysunku, po odbiciu od lustra przechodzi przez lewą szybkę! Zatem prawe oko jest dla nas widoczne – lewym okiem.



Rys. 7. Rozróżnianie okularów – polaryzacja kołowa. Lewe oko nie widzi siebie samego (zwróćmy uwagę na czerwony krzyżyk – symbol blokady światła przez polaryzator). Lewa szybka okularów wydaje się być w lustrze czarna. Lewym okiem widać natomiast prawe (zamknięte) oko. Płytki ćwierćfalowe są zorientowane dokładnie jak na rys. 3, ale tu patrzymy na nie z góry

Polaryzację światła wykorzystaliśmy tutaj do zabawy, ale warto pamiętać, że zjawiska związane z polaryzacją odegrały ogromną rolę w fizyce. Studenci fizyki naszego Wydziału poznają te zagadnienia na drugim roku studiów, ale już na pierwszym roku, w ramach I Pracowni Fizycznej, badają ciekawy efekt skręcania kierunku liniowej polaryzacji światła przez rozpuszczony w wodzie cukier.

### Uwagi:

W rzeczywistości, w okularach na polaryzację liniową polaryzatory zazwyczaj są ustawione nie poziomo i pionowo, ale pod kątem 45 i 135 stopni do poziomu. Ja wybrałem inną wersję na rysunkach, żeby łatwiej było przygotować wyjaśnienia na rys. 6.

Z kolei w okularach na polaryzację kołową, to polaryzatory są ustawione równolegle (oba są zorientowane poziomo), a obrócone względem siebie są płytki ćwierćfalowe. Ale znów, mój wybór był podyktowany względami dydaktycznymi – działanie całości jest dokładnie takie samo.

Nie przedstawiałem fizycznej zasady działania płytki ćwierćfalowej, żeby artykuł nie zrobił się zbyt „ciężki”. Jeśli Czytelnicy będą zainteresowani – przedstawię podstawy działania w jednym z kolejnych numerów.

Dziękuję Katarzynie Cieślar za dyskusję na temat kin 3D.