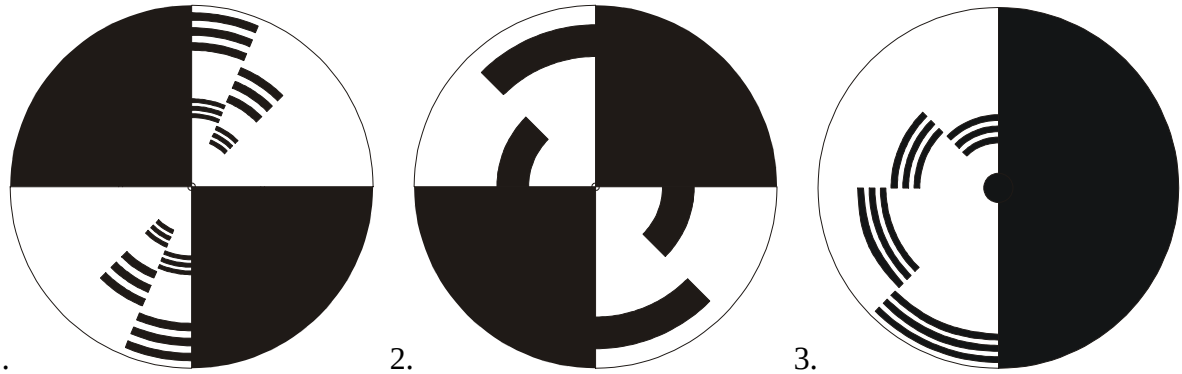
3.2.3. Tarcza Benhama*

Tarcza Benhama podzielona jest wzdłuż promieni koła na białe i czarne ćwiartki lub połowy. Na tarczy, w zależności od modelu zawsze znajduje się dodatkowy element w postaci np. czarnych łuków o różnej długości i szerokości.



Zdj.1. *Modele tarczy Benhama.*

CEL:

Zjawisko występowania barw podczas wirowania tarczy Benhama nie jest wyjaśnione, istnieją jedynie pewne przypuszczenia. Z tego powodu uważam, że najważniejszym celem stworzenia takiej tarczy, zwłaszcza na poziomie gimnazjum, jest wzbudzenie ciekawości. Poza tym barwy są nam bardzo bliskie, co sprawia, że zjawiska z nimi związane, czasem wydają się nam nieskomplikowane. Takie podejście skłania do formułowania wniosków i szukania odpowiedzi. Nie znalezienie jej może wywołać rozczarowanie ale i respekt i szacunek do fizyki.

Za cel doświadczenia z tarczą Benhama, uważam uzyskanie pojawiających się barw oraz przeanalizowanie czynników mających wpływ na ich występowanie i postrzeganie.

MATERIAŁY:

Krążek można wykonać z każdego materiału, z którego jesteśmy w stanie wyodrębnić koło i wykonać w nim otwór. Ponadto takie koło musimy pomalować, a więc nie warto stosować materiałów wymagających dodatkowych czynności takich jak matowienie czy

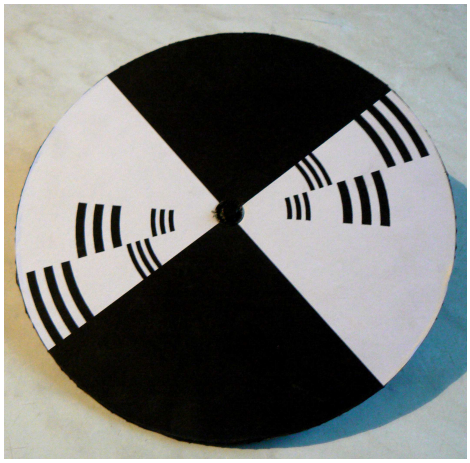
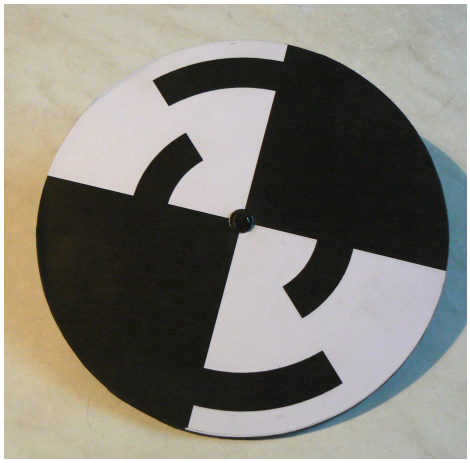
* Problemy poruszane w tym projekcie znajdują się również w XXXV Olimpiadzie Fizycznej, etap Pierwszy, zadanie teoretyczne nr 1.

odtłuszczanie (chyba, że inne zalety przewyższają te trudności). Mogą to być grube (około 5 mm) kartony, pleksi, akryl, czy drewno. Mogą to być także gotowe elementy takie jak np. płyty (winylowe lub CD), tacki do pizzy itp. Przy wyborze materiału należy wziąć pod uwagę możliwość naniesienia wzoru. Na przygotowane koło można nakleić gotowy wydruk, okleinę lub namalować wzór za pomocą sprayu, czy farb (dostosowanych do materiału). Oczywiście poszczególne materiały posiadają pewne wady i zalety. Pleksi, akryl czy drewno to materiały, które są stosunkowo trwałe i estetyczne, ale wycięcie z nich kształtu koła przekraczają nasze możliwości. Tacki do pizzy wymagają długotrwałego i silnego odtłuszczania, które niestety nie zawsze przynosi oczekiwane efekty. Najtańszym materiałem jest karton, oraz płyty. Karton jest materiałem nietrwałym, płyty CD są niewielkie, a płyty winylowe już prawie niedostępne. Zaletą płyt CD jest możliwość wykonania nadruku, co podnosi estetykę powstałego w ten sposób krążka. Ponieważ chcemy krążek wprawić w ruch, musimy również pod tym kątem przeanalizować dostępne materiały. Koło nie może być zbyt ciężkie ani zbyt lekkie (to zależy także od tego, czym chcemy wprawić koło w ruch). Z tego powodu karton wydaje się materiałem raczej nieodpowiednim. Jednak odpowiednio dobrany i przygotowany również dobrze spełnia swoją rolę.

REALIZACJA I PRZEBIEG EKSPERYMENTU:

Jeżeli tarczę Newtona planujemy wykonać na płycie CD, wystarczy zgłosić się z odpowiednim wzorem do najbliższej kafejki internetowej i za niewielką cenę wydrukować wzór na płycie. Jeżeli chcemy zrealizować to w domu, musimy zaopatrzyć się w specjalną płytę przygotowaną do nadruków, oraz odpowiedni program komputerowy (tusz zwykły).

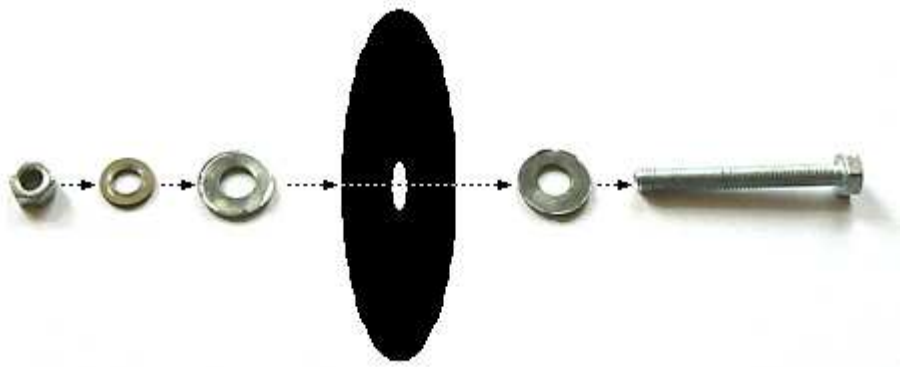
Chcąc wykonać większą tarczę możemy posłużyć się grubym kartonem. Dobrze jest narysować wzór tarczy Benhama w programie graficznym (Corel Draw) i wydrukować go. Najprościej jest skorzystać z opcji dostosowania wydruku do rozmiarów strony, a więc najczęściej do rozmiaru A4. Za pomocą nożyka do tapet wycinamy koło z kartonu.

1.  2. 

Zdj.2. *Tarcze Benhama wykonane na kartonie (modele 1. i 2.).*

Czynność ta wymaga jednak precyzji, ostrożności i cierpliwości. Następnie za pomocą taśmy dwustronnie klejącej lub kleju do papieru przyklejamy wydruk. Czynnością dodatkową, którą można wykonać jest tzw. foliowanie. Tarcza będzie wyglądała estetyczniej, a dodatkowo będzie zabezpieczona przed zabrudzeniami i ścieraniem. Proponuję do wykonania wzoru zastosować również okleinę lub wycinankę samoprzylepną, jeżeli wzór nie jest zbyt skomplikowany.

Do wprawienia tarczy w ruch najlepiej zastosować wiertarkę (maksymalnie 2800 obrotów w ciągu 1 min), którą można dodatkowo zamocować na statywie i przytwierdzić np. do stolika. Montaż tarczy, umożliwiający wykorzystanie wiertarki znajduje się na rys. 3.



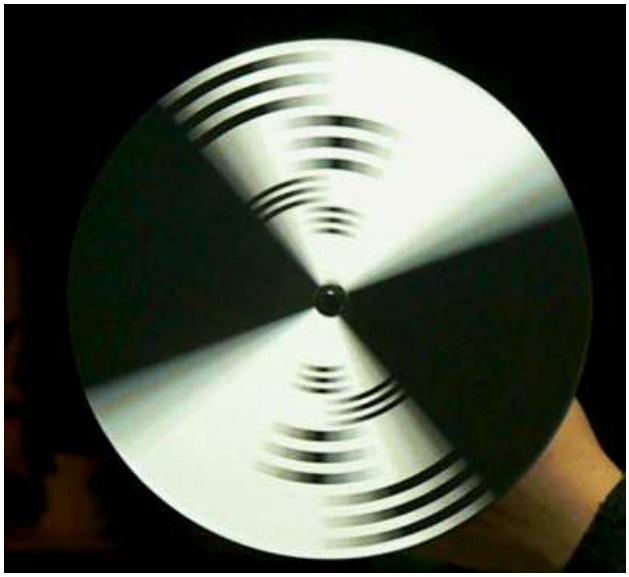
Nakrętka — podkładki (mała i duża) — tarcza — podkładka — śruba

Rys. 3. *Montaż tarczy Newtona.*

Wrażenia barwne pojawiające się podczas obserwacji tarczy, nie są wyjaśnione. Istnieją jedynie przypuszczenia i pewne teorie. Jedna z nich (którą popieram) tłumaczy pojawianie się wrażeń barwnych w oparciu o trzy rodzaje czopków odpowiadających za widzenie barwne.

Na tarczy Benhama znajdują się dwie barwy: biel i czerń w różnych kombinacjach. Gdy tarcza się nie porusza, do naszych oczu trafia światło odbite z białych fragmentów tarczy i pobudza ono czopki odpowiadające za widzenie barwne w taki sposób, że mamy wrażenie bieli. Czerń nie pobudza czopków wcale. Gdy tarcza obraca się powoli, dzieje się podobnie. Czopki odpowiadające za widzenie poszczególnych barw są na zmianę pobudzane i nie.

Im szybciej wiruje tarcza tym szybciej nasze oko stara się reagować. W momencie gdy „nie nadąża", pojawiają się wrażenia barwne. Można określić to jako pewną bezwładność reakcji oka na szybko zmieniające się warunki.



Zdj. 4. *Tarcza Benhama (1.) podczas powolnych obrotów.*

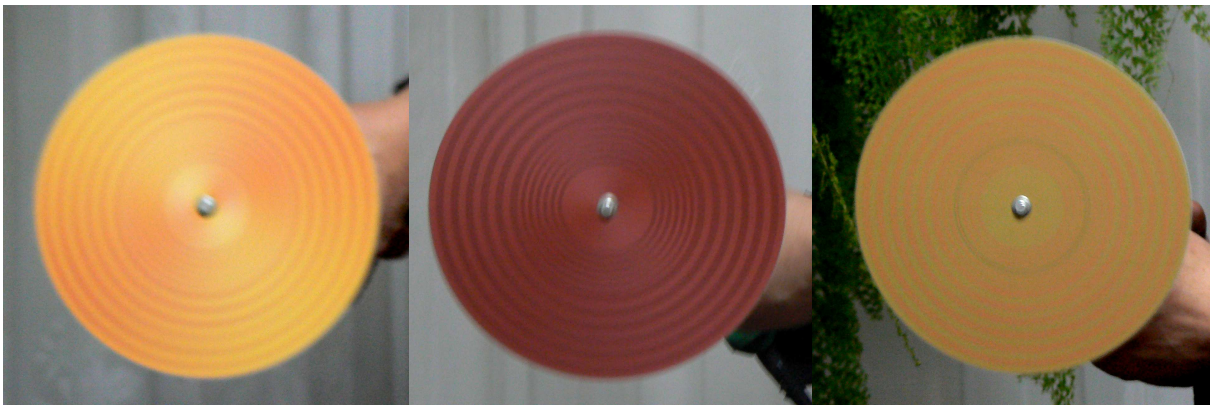
Aparat fotograficzny jest pod względem działania najbardziej zbliżony do naszych oczu. Zdjęcie 4. zostało zrobione przy na tyle długim czasie reakcji, aby otrzymać obraz, jaki otrzymują nasze oczy. Tarcza obraca się prawostronnie (dla patrzącego przeciwnie do ruchu zegara). Na zdjęciu widać wyraźnie konsekwencje pewnej bezwładności w reagowaniu na zmiany barwy. Obszary pozostające wciąż wyraźnie czarne, to obszary, które pozostają czarne również przy niewielkim obrocie (centralne fragmenty ćwiartek i łuków), natomiast krawędzie czarnych obszarów zaczynają się rozmywać i wraz ze wzrostem szybkości obrotów- stopniowo zwężać. Na zdjęciu 3. czarne ćwiartki mają już nie po 90° a około 70°. Przy szybszych obrotach czarne obszary zawężą się do czarnych linii a następnie w ogóle

przestaną być rejestrowane nawet przez aparat fotograficzny. Co ciekawe, bez względu na barwy samej tarczy i jej ruch, tylko łuki łączące się bezpośrednio z barwnymi ćwiartkami pozostają lepiej widoczne (dłużej widzimy daną barwę). Widoczne to jest na zdjęciu 5. Można więc wywnioskować z tego, że lepiej widoczne fragmenty pasów nie są spowodowane konkretnymi barwami, a innym czynnikiem (budową tarczy, cechami aparatu wzrokowego).

a b c

Zdj.5. *Tarcza Benhama (1.) o różnych barwach :a- czerwono- biała, b- czerwono- żółta, c- czarno- biała.*

Barwne tarcze nie powodują nieprzewidzianych efektów barwnych. Zarówno na tarczach z zdjęć 5. jak i 6. wynika, że przy obrotach tracz Benhama z różnymi (innymi) kombinacjami barw, zachodzi zwykłe mieszanie barw. Potwierdza to, że efekt barwnych pasów występuje tylko na czarno- białych krążkach.



a b c

Zdj.6. *Tarcza Benhama (1.) o różnych barwach :a- czerwono- żółta, b- czarno- czerwona, c- czerwono- zielona.*

Jeśli chodzi o same barwy, to być może zależą one od cech czopków odpowiadających za konkretne barwy (R, G, B). Są one zróżnicowane pod względem szybkości reakcji oraz czasu trwania w stanie „wzbudzenia”. Np. czopki odpowiadające za wrażenie barwy niebieskiej, reagują najwolniej ale za to najdłużej. Nie wykluczone, że czas reakcji czopków na zmieniające się bodźce jest na tyle zróżnicowany, iż niektórych z nich w ogóle nie odbieramy (np. barwy czerwonej). Jednak oprócz tych przypuszczalnych cech, nie można moim zdaniem pominąć własności samego światła, a konkretnie częstotliwości i długości fali jego poszczególnych składowych. Być może właśnie z tego powodu częściej obserwatorzy widzieli barwy krótkofalowe, a czerwieni wcale.

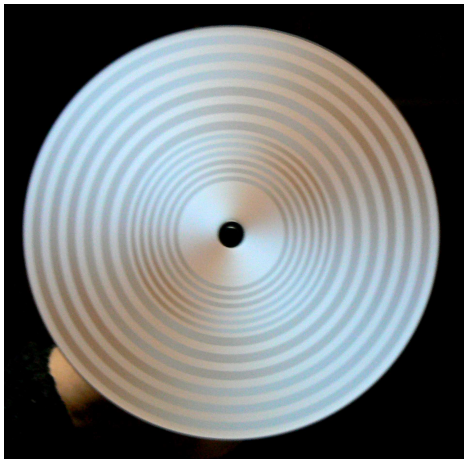
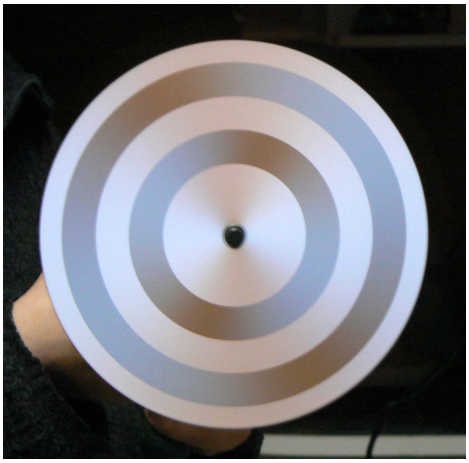
Istnieje też inna ewentualność: skoro biała powierzchnia odbija całe padające promieniowanie, a czarna całe pochłania, to możliwe, że na skutek odbić światła od poruszającej się powierzchni, następuje wzmocnienie lub osłabienie pewnych składowych światła, w efekcie czego mamy tylko pewne wrażenia barwne. Przemawia za tym środek tarczy pomalowany na czarno. Nie zmienia on swojego położenia i z tego powodu niezależnie od wszystkich czynników pozostaje wciąż czarny. Częściowo tę możliwość potwierdza również występowanie barw (widocznych już na zdjęciu 3.) jedynie na krawędziach czarnych powierzchni. Zastanawiające jest również ich ułożenie w postaci pasów: na przemian niebieskich i pomarańczowych przy ćwiartkach, a zielonkawo-szarych na pasach. Po analizie innych zdjęć i filmów mam też wrażenie, że barwy zaznaczają się wyraźniej na obszarach gdzie czerń wkracza, a słabiej na obszarach jej ustępowania.

Pojawianie się poszczególnych barw może być powodowane zmęczeniem kolejnych komórek wzrokowych (fotoreceptorów), podobnie jak w zjawisku powidoku[*] . Obserwowany obraz, odwzorowany na siatkówce, zostaje wówczas odtworzony w barwach dopełniających. Zmęczenie fotoreceptorów może być spowodowane przez wiele czynników, dlatego nie można go wykluczyć także przy obserwacji tarczy. Sprawdzając doświadczalnie zjawisko powidoku ale dla barwy czarnej (czarny kwadrat), już podczas obserwacji, pojawiają się barwy: zielona i fioletowa. Odwzorowany obraz (na białym tle) przedstawia biały kwadrat w otoczeniu barw: różowej i żółtej. Barwy: zielona, fioletowa, żółta i różowa, są to barwy wymieniane najczęściej podczas obserwacji tarcz Benhama.

Na obserwowane barwy wpływa również zmiana oświetlenia tarczy. Zależność obserwowanych barw od oświetlenia jest adekwatna do tej występującej przy obserwacji tarczy Newtona. Najwyraźniej jednak widać różnicę w barwach pojawiających się przy

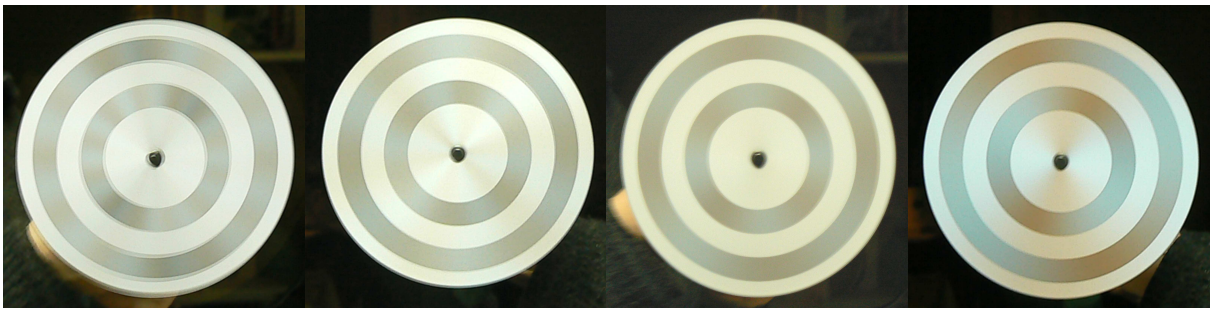
[*] Więcej informacji i przykładów na ten temat znajduje się w pracy Grzegorza Adamowicza „Fizyka złudzeń optycznych”, US, Szczecin 2006.

maksymalnej szybkości obrotów. W świetle zwykłej żarówki barwy widoczne są nieco słabiej lub wcale, natomiast przy świetle jarzeniówki powstaje zupełnie nowy efekt. Powstają regularne obszary o wyraźnych, utrzymujących się barwach. Najczęściej pojawiające się barwy to pomarańczowa i błękitna (rzadziej zielona). Warto zauważyć, że barwy: pomarańczowa i błękitna są barwami dopełniającymi (a więc mogłyby powstawać w wyniku zjawiska powidoku).

1.  2. 

Zdj.7. *Tarcza Benhama wprawiona w ruch o maksymalnej szybkości (*2800 obrotów w ciągu 1 min).

W miarę zwiększania szybkości obrotów zmienia się ilość obszarów, ich barwę i jej intensywność. Na zdjęciach 8. a, b, c i d widać kolejne zmiany. Na zdjęciu 8.a na obu ciemnych pasach występuje po 16 pomarańczowych prążków, w kolejnych etapach ich liczba wynosiła 14, 12, 10, 8, 6 (zdj.8. b), 4 (zdj.8.c) i ostatecznie 2 (zdj.8.d). Widać też dość wyraźnie pogłębianie się barw wraz ze wzrostem szybkości obrotów.



a b c d

Zdj.8. *Obrazy tarczy Benhama (2.) przy zwiększaniu szybkości obrotów.*

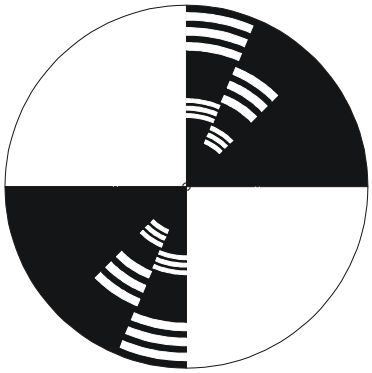
Zadziwiającym czynnikiem mającym wpływ na widzenie barw jest kierunek ruchu tarczy. Wielu obserwatorów stwierdziło, że przy obrotach lewostronnych szybciej pojawiły

się barwy. Nie jestem w stanie dokładnie wytłumaczyć przyczyn. Przypuszczam jedynie, że może być to konsekwencją skłonności naszego organizmu do ruchu prawostronnego. Na ogół jesteśmy praworęczni. Wchodząc do nowego pomieszczenia, odruchowo obserwujemy najpierw prawą stronę* itd. Jeżeli łatwiej jest nam wykonywać ruchy prawostronne, być może obserwując obracającą się prawostronnie tarczę dłużej za nią „nadążamy" i dlatego barwy pojawiają się później niż przy jej ruchu lewostronnym.

Jeszcze jednym zjawiskiem potwierdzającym moje przypuszczenia, jest przesuwanie się barwnych pól widocznych przy maksymalnych obrotach**. Jest to efekt identyczny z tym, jaki można zaobserwować patrząc na np. koło jadącego roweru. Patrząc na same koło można mieć wrażenie, że porusza się ono raz w jedną, raz w drugą stronę. Z barwnymi obszarami jest podobnie. W miarę zwiększania szybkości obrotów, obszary o zabarwieniu pomarańczowym poruszają się początkowo zgodnie z kierunkiem ruchu tarczy, następnie przeciwnie i tak na zmianę. Dopiero przy maksymalnych obrotach dzieje się inaczej. Przy obrotach tarczy zgodnie z ruchem zegara, pomarańczowe obszary dość wolno przesuwają się w przeciwną stronę. Wydawałoby się, że przy obrotach tarczy przeciwnie do ruchu zegara, zaczną się one poruszać również przeciwnie do ruchu samej tarczy. Dzieje się jednak inaczej. Bez względu na kierunek ruchu tarczy (tylko podczas maksymalnych obrotów), pomarańczowe obszary poruszają się przeciwnie do ruchu zegara. Gdy tarcza zwalnia, ponownie obszary poruszają się na zmianę. Myślę, że opisane zjawisko jest również konsekwencją bezwładności naszego narządu wzroku.

Chcąc znaleźć wytłumaczenie przesuwania się opisanych obszarów dokonałam obserwacji ruchów tarczy po zamianie barw obszarów (rys.9.). Wynik jest zaskakujący. Okazuje się, że po zamianie barw za każdym razem obszary poruszają się przeciwnie do ruchu tarczy. Świadczyć to może o tym, że decydującą rolę w całym zjawisku odgrywa ułożenie barw, a nie aparat wzroku (choć jego rola jest wciąż niepodważalna). Taki wniosek wpisuje się w rozważania nad zdjęciem 3., dotyczącym m.in. roli czarnych pasów w powstawaniu wrażeń barwnych.

* Jest to powszechnie wykorzystywane w marketingu. Z tego powodu w marketach po prawej stronie znajdują się produkty na ogół nieprzydatne, a produkty powszechnego użytku po stronie lewej.
** Zjawisko to zostało utrwalone na filmach dołączonych do pracy.



Rys. 9. *Tarcza Benhama z odwróconymi barwami.*

WNIOSKI:

Cel, jakim było uzyskanie plam barwnych na tarczy został osiągnięty. Występowanie barw na czarno - białej tarczy wciąż pozostaje zagadką. Wiadomo, że pojawiające się barwy zależą od indywidualnych cech obserwatora, oświetlenia, szybkości obrotów i zmiany kierunku obrotów.

Tarcza Benhama stanowi bardzo ciekawą i przede wszystkim zaskakującą i twórczą pomoc naukową.