

H. Jeżewski (†).

Zjawiska dyfrakcyjne w emulsjach fotograficznych.

Les phénomènes de diffraction dans les émulsions photographiques.

S o m m a i r e.

Parmi les facteurs qui influent sur la netteté des contours de l'image photographique, c'est-à-dire, sur le pouvoir séparateur de la plaque, on doit citer la diffraction de la lumière dans l'émulsion. Cette diffraction se manifeste par les anneaux de *Q u e t e l e t* observés par l'auteur dans des clichés partiellement fixés: lorsqu'il reste encore sur la plaque un peu de bromure d'argent sous l'aspect d'un voile blanchâtre, on peut voir dans la lumière réfléchie, en observant du côté du verre, des anneaux de diffraction qui ne peuvent pas être autres que ceux de *Q u e t e l e t*. On sait que les anneaux de *Q u e t e l e t* apparaissent lorsque la lumière tombe sur une plaque plan-parallèle dont la surface d'entrée est recouverte d'une couche mince de poussière quelconque; le phénomène est dû à l'interférence des rayons diffractés en entrant dans la plaque avec ceux qui ont subi la diffraction en la quittant (fig. 1).

Dans le cas d'une plaque photographique partiellement fixée, la couche de gélatine joue le rôle de la plaque plan-parallèle, les grains d'*AgBr* qui restent — le rôle de grains de poussière (fig. 2). La visibilité des anneaux est d'autant plus bonne que la couche de bromure d'argent non dissous est plus mince (jusqu'à une certaine limite, bien entendu); ce fait est en accord avec la théorie du phénomène de *Q u e t e l e t*, donnée par *R a m a n* et *D a t t a*. L'auteur a observé un nombre de faits concernant les conditions dans lesquelles apparaissent les anneaux en question, et la dépendance de leur aspect des conditions de l'expérience; tous ces faits confirment également l'hypothèse, d'après laquelle les anneaux en question sont ceux de *Q u e t e l e t*, prenant naissance dans la couche de bromure d'argent non dissous envisagée comme milieu trouble.

L'auteur s'est posé ensuite la question sur la possibilité d'obtenir le phénomène bien connu des anneaux de Fraunhofer dans la couche semitransparente de l'émulsion. Il a constaté que ce phénomène se produit en effet sous la forme d'une auréole, entourée parfois d'un faible anneau rouge; ceci a lieu seulement dans le cas où la couche formée de grains d'AgBr est très mince, ce qu'on peut obtenir soit en dissolvant une partie de la couche sensible dans de l'eau chaude, soit en fixant partiellement la plaque photographique.

Varsovie, Institut de Physique Expérimentale de l'Université.

Manuscrit reçu le 30 juin 1931.

W s t ę p.

Tak zwaną zdolność rozdzielczą klisz fotograficznych, mającą wielkie znaczenie dla fotografii naukowej i technicznej, można określić zapomocą najmniejszej odległości na kliszy między sfotografowanymi dwoma punktami, lub dwiema kreskami, przy której dają się one jeszcze oddzielnie rozpoznać. Na zdolność rozdzielczą mogą wpływać następujące czynniki: stopień korekcji obiektywu, zjawisko odbłasku, czas naświetlania, natężenie światła, oraz właściwości samej emulsji (grubość, przezroczystość, zdolność rozpraszająca). Wpływ struktury emulsji przejawia się w rozpraszaniu i uginaniu światła, przez co zostają zaatakowane ziarna bromku srebra, leżące poza obszarem naświetlanym. Zjawisko to występuje w dużym stopniu zwłaszcza w czulszych kliszach, których emulsje zawierają ziarna bromku srebra o bardzo różnej czułości; wskutek czego bardzo czułe ziarna, naświetlone tylko światłem rozproszonym w samej emulsji, mogą się zaczernić przy wywoływaniu nieraz w większym stopniu, niż mało czułe ziarna, leżące w obszarze naświetlanym¹⁾. O ile mi wiadomo, nie zwrócono dotychczas uwagi na udział w zatarciu konturów obrazu, jaki przypada uginaniu światła, przytem zjawisko to nie było wogóle badane w kliszach. Występuje ono jednak bardzo wyraźnie, dzięki czemu w odpowiednich warunkach można obserwować przedewszystkiem dobrze rozwinięte pierścienie Queteleta.

Pierścienie Queteleta w kliszach fotograficznych.

Jeśli utrwalić częściowo kliszę (naświetloną lub nie naświetloną, w każdym razie nie wywołaną) tak, aby pozostało jeszcze nieco bromku srebra w postaci lekkiego dymku, i obserwować ją od strony szkła w świetle

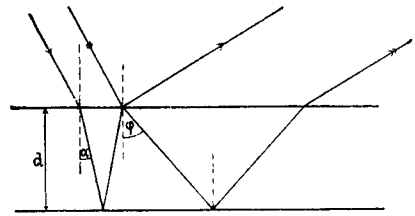
¹⁾ E d e r, Handbuch d. Phot., t. II, 105, 1927.

odbitem, wówczas dokoła obrazu źródła światła widać szereg pierścieni interferencyjnych, wykazujących wszystkie cechy pierścieni jednakowego nachylenia. Pierścienie widoczne są jednak tylko w obszarach pokrytych dymkiem bromku srebra i znikają zupełnie po całkowitem wymyciu bromku, skąd wynika, iż nie są one pierścieniami *Haidingera*, (które nie mogą powstać, jak zgóry było do przewidzenia, ponieważ szkło i żelatyna kliszy tworzą ze względu na niemal jednakowy współczynnik załamania jedną grubą płytkę), lecz pierścieniami *Queteleta*¹⁾.

Gdy światło pada na płytkę płasko-równoległą, której przednia powierzchnia pokryta jest pyłem jakiegokolwiek natury, wtedy część promieni doznaje ugięcia już przy wejściu do płytki, biegnąc dalej według zwykłych praw odbicia i załamania, inne uginają się dopiero wtedy, gdy opuszczają płytkę. Interferencja tych dwóch rodzajów promieni powoduje powstanie pierścieni *Queteleta*, określonych równaniem:

$$2nd(\cos \alpha - \cos \beta) = \pm k\lambda, \quad (1)$$

gdzie n —spółczynnik załamania płytki, k —dowolna liczba całkowita, λ —długość fali światła; znaczenie pozostałych oznaczeń wyjaśnia rys. 1. Jak widać z wzoru, średnica kątowa pierścieni nie zależy od wielkości uginających ziaren, zależy natomiast między innymi od grubości płytki, rolę której gra w kliszach warstwa żelatynowa. Dokonane bezpośrednie pomiary grubości emulsji dają istotnie liczby tego samego rzędu, co wartości obliczone z wzoru (1).



Rys. 1.

Opisane pierścienie można też otrzymać w błonach fotograficznych, gdzie ulegają jednak różnorodnym deformacjom zależnie od chwilowych zmian kształtu, którym podlegają błony.

Powstanie w kliszy struktury, dającej pierścienie *Queteleta* należy wyobrazić sobie w następujący sposób. Utrwalacz wnika w głąb emulsji przez dyfuzję, przyczem zmienia się jego skład chemiczny wskutek działania na bromek srebra, co powoduje spadek stężenia tiosiarczanu sodu w utrwalaczu. Dzięki temu bromek srebra jest usuwany z emulsji warstwami, poczynając od powierzchni górnej, kończąc na powierzchni, przylegającej do szkła. Przekrój częściowo utrwalonej kliszy musi więc odpowiadać rys. 2. Pozostałe ziarna bromku srebra tworzą warstwę uginającą, a właściwie szereg warstw, ze względu na co będzie tu miała

¹⁾ Gehrcke, Handbuch d. phys. Optik I, 444 i 556, 1927; tamże literatura.

zastosowanie teorii, którą podali R a m a n i D a t t a¹⁾. Według tych uczonych widzialność pierścieni (zależna od kontrastu pomiędzy największością i najmniejszością interferencyjną w świetle jednobarwnym) powinna być tem lepsza, im większa jest przezroczystość warstwy uginającej. Zależność ta sprawdza się jakościowo dobrze w kliszach fotograficznych, naturalnie do pewnej granicy, poczynając od której natężenie ugiętych promieni zbyt mało różni się od zera, przez co pierścienie zanikają.

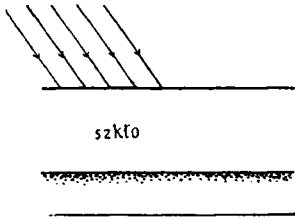
Warstwą, w której zachodzą odbicia ugiętych promieni, jest warstwa żelatynowa, na co wskazuje wspomniana wyżej zgodność doświadczenia z wzorem (I) (przyczem, jak widać z rys. 2, zgodność może być tylko przybliżona, gdyż wzór (I) daje grubość warstwy żelatynowej, zmniejszoną o grubość warstwy uginającej, podczas gdy pomiar bezpośredni daje grubość całkowitą), jakoteż następujące fakty:

a) Klisza, obserwowana od strony żelatyny nie wykazuje pierścieni. Warstwą odbijającą ugięte promienie jest w tym przypadku płytka szklana o grubości od kilkudziesięciu do stu kilkudziesięciu razy większej od grubości warstwy żelatynowej. Zgodnie z wzorem (I) odległości kątowe między pierścieniami muszą być więc małe, a wówczas (nawet przy małych rozmiarach źródła) pierścienie, wytworzone przez poszczególne elementy powierzchniowe źródła, zachodzą na siebie, co powoduje ich zatarcie.

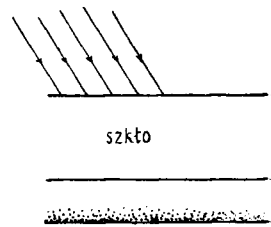
b) Przyklejając do żelatyny kliszy, dającej pierścienie, czystą szybkę szklaną, otrzymuje się zanik pierścieni. Objaśnienie jak w a).

c) Klisza, której emulsja jest mokra, przez co posiada grubość większą niż w stanie suchym, wykazuje pierścienie bardziej skupione; pierścienie stopniowo rozsuwają się w miarę schnięcia emulsji.

d) Jeśli zdjąć błonę żelatynową częściowo utrwalonej kliszy i nałożyć ją na szkło odwrotnie, wtedy pierścienie zanikają. Rys. 3 ilustruje ten przypadek. Przy obserwacji od strony szkła warstwa odbijająca ugięte promienie oczywiście nie istnieje, natomiast przy obserwacji od strony żelatyny grubość warstwy odbijającej równa się całkowitej grubości kliszy ze względu na wspomnianą już przybliżoną równość współczynników załamania szkła i żelatyny. Przyczyną braku pierścieni jest więc w ostatnim przypadku też sama jak w a).



Rys. 2.



Rys. 3.

¹⁾ C. V. Raman and G. L. Datta. Phil. Mag. 42, (VI), 826, 1921.

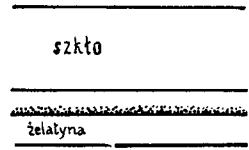
Natomiast klisza, której błona żelatynowa została zdjęta i nałożona zpowrotem bez odwracania, oraz klisza, której emulsja została odwrócona jeszcze przed utrwaleniem, wykazują pierścienie. Obydwa te przypadki odpowiadają oczywiście rys. 2.

e) W kliszy, która z powodu odwrócenia częściowo utrwalonej emulsji nie wykazuje pierścieni, można je zaobserwować po powleczeniu kliszy dodatkową warstwą czystej żelatyny, przez co wytwarza się warstwę odbijającą (rys. 4).

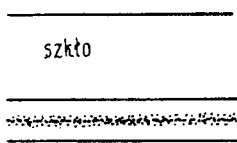
f) Powlekając kliszę, dającą pierścienie, dodatkowymi warstwami czystej żelatyny, czyli zwiększając stopniowo grubość warstwy odbijającej, osiąga się coraz większe skupianie się pierścieni.

g) Pierścienie o bardzo żywych barwach można też otrzymać, splukując częściowo emulsję w ciepłej wodzie i powlekając następnie pozostałą niezmiernie cienką warstewkę czystą żelatyną. Pozostała warstewka emulsji tworzy w tym przypadku warstwę uginającą bardzo jednostajną, jakiej prawie nigdy nie można otrzymać zapomocą utrwalania.

h) Jeśli zdjętą emulsję zanurzyć do utrwalacza, wtedy działa on z obu stron, dzięki czemu warstwa uginająca wytwarza się pośrodku emulsji; pierścienie widoczne są wtedy niezależnie od tego, którą stroną przyłożymy emulsję zpowrotem do szkła (rys. 5). Widzialność pierścieni jest jednak w tym przypadku dużo gorsza, niż w poprzednio wymienionych, co należy zapewne przypisać temu, iż spadek stężenia tiosiarczanu sodu w utrwalaczu jest mniejszy, niż przy jednostronnem działaniu utrwalacza, przez co warstwa uginająca ma bardziej rozmyte granice.



Rys. 4.



Rys. 5.

Pierścienie Fraunhofera w kliszach fotograficznych.

W przypadku wielu jednakowych (tego samego kształtu i tej samej wielkości) otworów, rozmieszczonych w przestrzeni bezładnie, jednak w taki sposób, że płaszczyzny ich są równoległe, obraz dyfrakcyjny jest identyczny z obrazem, jaki daje jeden otwór; natężenie zaś obrazu dyfrakcyjnego m otworów jest m razy większe od natężenia obrazu dyfrakcyjnego jednego otworu¹⁾. Opierając się na tym wyniku teorii oraz na zasadzie Babinet'a można wytłumaczyć pochodzenie pierścieni interferencyjnych w świetle przechodzącym przez przezroczyste płytki,

¹⁾ Odpowiednia teoria podana jest w Handbuch d. Phys. XX, 180, 1928 i Handbuch d. phys. Optik I, 555, 1927.

posypane lycopodium, oraz t. zw. wieńców, widocznych dokoła przy-słoniętego półprzezroczystymi obłokami słońca i księżycą, lub otaczających cień obserwatora, rzucony na ścianę mgły.

O ile zawiesina nie jest jednorodna, pierścienie zacierają się, redukując się przy znaczniejszych różnicach wielkości cząstek zawiesiny do białawej aureoli otaczającej źródło lub jego obraz. Podobne zjawisko występuje nawet w przypadku zawiesiny jednorodnej, o ile źródło ma zbyt duże wymiary, gdyż wtedy pierścienie, należące do poszczególnych elementów powierzchniowych źródła, zachodzą na siebie.

Podług dokładniejszej teorii, podanej przez *Lauego*¹⁾, który stosował rachunek prawdopodobieństwa, pierścienie interferencyjne wykazują bezładne wahania natężenia, wskutek czego pierścienie przecięte są jakby wiązką promieni, rozchodzących się we wszystkie strony ze źródła.

Ziarna bromku srebra, zawieszane w żelatynowej warstwie klisz fotograficznych, powinny dawać pierścienie interferencyjne analogiczne do wyżej opisanych, o ile stanowią zawiesinę, spełniającą w dostatecznym stopniu założenia teorii.

O ile chodzi o rozmieszczenie ziaren bromku srebra, to można zgóry przyjąć wobec metody fabrykacji emulsji, że są one rozłożone bezładnie. Rozkład wielkości ziaren dany jest według badań *Wightmana*, *Trivelli'ego* i *Shepparda*²⁾ przez wzór $y = y_0 e^{-k(z-a)^2}$, gdzie y oznacza liczbę ziaren o danej wielkości, na tysiąc ziaren, y_0 — liczbę ziaren o wielkości najczęściej spotykanej na tysiąc ziaren, k — stałą zależną od rodzaju emulsji, z — średnicę ziarna, a — średnicę ziaren najczęściej spotykanych. Często lepszą zgodność z doświadczeniem daje wzór $y = Ae^{-k(ln x - a)^2}$, gdzie x jest powierzchnią ziarna. Należy zaznaczyć, że często krzywe rozkładu wielkości posiadają kilka największości, o ile przy fabrykacji zmieszano ze względów praktycznych kilka gatunków emulsji.

Można się więc spodziewać, że pierścienie *Fraunhofera* powstaną tylko wtedy, gdy krzywa rozkładu wielkości ziaren będzie mieć tylko jedną, przytem ostrą największość. Z drugiej strony trzeba wziąć pod uwagę, że w normalnej emulsji znajduje się kilkadziesiąt warstw ziaren bromku srebra, wskutek czego promienie ugięte przez pierwsze warstwy ulegają następnie silnemu rozpraszaniu i uginaniu przez pozostałe warstwy, dzięki czemu pierścienie nie mogą wystąpić. I tu trzeba więc usunąć większą część bromku srebra zapomocą utrwalenia lub

¹⁾ M. v. Laue, Berl. Ber. 47, 1144, 1914.

²⁾ E. P. Wightman, A. P. H. Trivelli, T. E. Sheppard, Journ. Phys. Chem. 27, 1, 1921.

spłukania kliszy w ciepłej wodzie. Wówczas dopiero zjawisko daje się obserwować, lecz ogranicza się we wszystkich zbadanych przypadkach (różne gatunki klisz z fabryk: L u m i è r e, G e v a e r t, E r n e m a n n, Alfa, Stafra) do aureoli, otoczonej czasem jeszcze słabą obwódką czerwonawą.

Trudno jest powiedzieć, w jakim stopniu zatarcie konturów obrazu fotograficznego jest spowodowane przez promienie ugięte, a w jakim stopniu przez rozproszone, zjawiska ugięcia i rozproszenia nie dają się bowiem oddzielić od siebie w emulsjach fotograficznych. Promienie ugięte są następnie rozpraszane i odwrotnie promienie rozpraszane ulegają ugięciu, co razem składa się na tak zw. dyfuzję światła w emulsjach. Opisane zjawiska dowodzą jednak, że ugięcie musi odgrywać pewną rolę. Być może dzięki niemu emulsje o bardzo drobnem ziarnie nie wykazują naogół największej zdolności rozdzielczej.

Zakład Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Warszawskiego.

Rękopis otrzymany dn. 30 czerwca 1931.