

Rys. 154

cyzyjnych, by można było z powrotem ustawić je na dawnym miejscu. Z tem rozwiązaniem zapoznaje nas rys. 154. Mianowicie trzy nóżki przedmiotu trafiają w układ złożony z trójsściennego wgłębienia — żłobka — płaszczyzny. Kelvin zastosował ten układ w swym elektrometrze kwadransowym. Znacznie później znalazł ten układ zastosowanie w interferometrze Michelson'a (rys. 176).

Niektóre omówione przez nas przyrządy, jak komparator Wickman'a, czujniki Sears'a i t. p., stanowią również piękne przykłady zastosowania ogólnych zasad, wyłożonych powyżej.

## ROZDZIAŁ VII

### METODY INTERFERENCYJNE

47. WZORCE KRESKOWE I KOŃCÓWKOWE. Metrologja, jako gałąź fizyki, zajmującej się miarami wogóle, a miarami długości w szczególności, znajdowała się zawsze pod przemożnym wpływem geodezji. Można powiedzieć, że wyrosła ona z jej potrzeb. Postępy metrologji były w ciągu dwóch wieków dyktowane przez rozwój geodezji i samo powstanie metra, tak ściśle związane z pomiarami kuli ziemskiej, jest klasycznym dowodem tej zależności.

Nic też dziwnego w tych warunkach, że etalon międzynarodowy metra wyraził się w kształcie wzorca kreskowego. Jeśli pominąć niektóre specjalne prace<sup>1)</sup>, cały wysiłek w ciągu wieku XIX, zmierzający ku ugruntowaniu systemu metrycznego, był w dziedzinie laboratoryjno-doświadczalnej skierowany na udoskonalenie wzorca kreskowego, oraz samych metod pomiarowych. Jedyną metodą współczesną, mającą na celu określenie położenia kresek, stanowiących zasadnicze elementy wzorca, jest nastawianie na te kreski nitek mikroskopu, zaopatrzonego w okular mikrometryczny. Dokładność pomiarowa, jak również i dokładność wykonania etalonu kreskowego, była i jest funkcją powiększenia, jakie może dać współczesny mikroskop w najlepszych warunkach oświetlenia, odpolerowania wzorca i subtelności wykonania kresek.

Prace Międzynarodowego Biura Miar i Wagi w Breteuil pod Paryżem zdążyły w tym właśnie kierunku. O ile w pierwszych latach istnienia

<sup>1)</sup> Bessel, przy przeprowadzaniu doświadczeń nad długością wahadła w Królewcu w 1823 r. posilkował się specjalnym etalonem końcówkowym, wykonanym za jego wskazówkami.

Biura stosowane były powiększenia 50 i 60-krotne, o tyle późniejszych pomiarów dokonywano zapomocą mikroskopów, dających powiększenia 200-krotne. Odpolerowanie powierzchni etalonów pozostawiało z początku wiele do życzenia. Zastosowanie metalu speculum umożliwiło wykonywanie kresek, posiadających początkowo szerokość około  $8\mu$ . Benoît osiągnął jeszcze większą dokładność, wykonując kreski wyjątkowo prawidłowe szerokości  $2\mu$ . Przy 200-krotnym powiększeniu tarczka podziałowa okularu mikrometrycznego posiadała podziałki, odpowiadające przesunięciu o  $1\mu$  tak, że przy ocenianiu położenia kreski można było odczytywać mikrony bezpośrednio, zaś jego część ocenić na oko. Porównywanie etalonu metra z etalonami wtórnymi odbywało się zapomocą komparatora z tą właśnie dokładnością.

Etalony kreskowe i metody porównywania ich z wzorcami pochodnemi zapomocą mikroskopu z okulem mikrometrycznym posiadają wiele niewątpliwych i cennych zalet. Etalon nie podlega zużyciu, pomiar mikroskopowy jest o wiele łatwiejszy od innych. Przesuwanie w polu obrazu obiektywowego ramki z włoskami wagi kilku gramów nie naraża na zużycie śruby mikrometrycznej tak, jak to się dzieje we wszelkiego rodzaju maszynach mierniczych. Doświadczenie wykazało, że kilkaset nawet pomiarów, dokonanych na komparatorze zapomocą okularu mikroskopowego, nie naruszyło w niczem precyzji śruby mikrometrycznej tego okularu. Decyzja ustalenia metra, jako etalonu kreskowego, była więc najzupełniej usprawiedliwioną.

Rozwój metod pomiarowych w technice maszynowej, w związku z wprowadzaniem zamienności części, zmienił nieco ten stan rzeczy na niekorzyść wzorców kreskowych. Zainteresowanie wzorcami końcówkowemi wzmogło się, zwłaszcza z chwilą ukazania się na rynku przemysłowym klocków Johanson'a. Są to znane dziś powszechnie płytki prostokątne o dwóch ściśle równoległych bokach, wykonane ze stali. Oddają one dziś nieocenione usługi w technice warsztatowej, przyczyniając się w wysokim stopniu do wprowadzenia zamienności części maszyn i t. p.

Klocki Johanson'a są tak stopniowane co do swych wymiarów, że ich komplet daje możność zestawienia każdej dowolnej miary. Są one tak dokładnie dotarte, że powierzchnie ich przywierają do siebie z siłą znaczną, i trudno je oderwać. Doświadczenia Budgett'a <sup>1)</sup> wykazały niezbicie, że przywieranie klocków jest wynikiem adhezji cienkiej warstwy płynu, zawartego pomiędzy powierzchniami. Powierzchnia metalu zawsze jest nieco wilgotna i tylko bardzo staranne wymycie w eterze i wysuszenie jej może usunąć ową wilgoć. W tym wypadku niema przywierania powierzchni klocków.

---

<sup>1)</sup> H. M. Budgett. Proc. Royal Society 86. str. 25. 1912.



Klocki należy utrzymywać w należytej czystości i zabezpieczać od rdzewienia waseliną chemicznie czystą. Dotykać się ich należy czystymi rękami. Przed każdym użyciem należy je wymyć w benzynie lub alkoholu. Pomiaru wykazały, że przy usunięciu kurzu grubość warstwy alkoholu, pozostająca na powierzchni po jej pozornym wysuszeniu, wynosi około  $0,025 \mu$ , wody lub tłuszczu około  $0,075 \mu$ . Na ogólną miarę przy złączeniu kilku klocków błąd, wynikający z obecności tej warstwy, nie wpływa, o ile w rachubę nie wchodzi pomiary ściśle naukowe.

Zwykły komplet klocków obejmuje miary, stopniowane co  $0,01 \text{ mm}$  poczynając od  $1 \text{ mm}$ , a kończąc na  $2 \text{ mm}$ , następne klocki są stopniowane co  $0,5 \text{ mm}$ . Duże klocki są stopniowane co  $25 \text{ mm}$  i więcej. Ponadto istnieją dodatkowe komplety klocków ze stopniowaniem co  $1 \mu$ , poczynając od  $1 \text{ mm}$  tak w górę, jak i w dół (klocki z dodatnimi i ujemnymi mikronami).

Johanson wyrabia obecnie klocki różnej dokładności dla pomiarów wysoce precyzyjnych, jak i dla pospolitego użytku warsztatowego. Jego normalny komplet wzorcowy wykonany jest z dokładnością  $10^{-5}$  długości poszczególnych klocków. Dla klocka  $20 \text{ mm}$  błąd wynosi mniej niż  $0,2 \mu$ . Cieńsze klocki wykonane są z nieco mniejszą stosunkową dokładnością, jednak błąd wynosi zaledwie część mikrona. Komplety wykonywane dla niektórych pracowni metrologicznych wykazały daleko większe dokładności, niż przytoczona powyżej, mianowicie błąd nie przewyższał  $0,025 \mu$ .

Wbrew utartemu pogładowi, klocki Johanson'a, wykonane ze specjalnej stali z dodatkiem chromu i należyte zahartowane, nie ulegają szybkiemu zużyciu. Doświadczenia, wykonane w laboratorium metrologii technicznej politechniki warszawskiej, wykazały, że przy docieraniu klocków pomiędzy dwoma płytami żeliwnymi, zwilżanymi naftą, zmniejszenie grubości klocka o  $1 \mu$  następuje po przejściu przez klocek toru ogólnej długości około  $1000 \text{ m}$ . Obciążenie wynosiło przy tym około  $0,5 \text{ kg}$  na  $\text{cm}^2$ , ścieranie odbywało się z obu stron równocześnie, zaś płyty były wykonane z miękkiego, szarego żeliwa.

W praktyce warsztatowej szybkie zużycie klocków należy przypisać przede wszystkim nieumiejętnemu przechowywaniu, zanieczyszczaniu waseliny brudem i potem, niestarannemu obmywaniu klocków benzyną przed użyciem i t. p. Specjalnie należy strzec irchy, którą wyciera się klocki, przed zanieczyszczeniem jej szmerglem. Irchy takiej nie można już oczyścić i należy ją odrzucić.

Klocki Johanson'a używane są bardzo często jako wzorce do maszyn mierniczych. Stanowią też one etalony końcówkowe w pracowniach metrologicznych.

W ostatnich czasach waszyngtońskie Bureau of Standards zaczęło wykonywać klocki wzorcowe ze stellitu, stopu, składającego się z 60 do

75% kobaltu, 15 do 20% chromu i 2,5 do 5% wolframu (tungstenu), który w naturalnym stanie wykazuje znaczną twardość i daje się obrabiać jedynie zapomocą tarczy szlifierskiej. Jego współczynnik rozszerzalności jest bardzo zbliżony do stali i wynosi średnio  $10,8 \cdot 10^{-6}$  wahając się od 10,1 do  $12,1 \cdot 10^{-6}$ .

Udoskonalenie metod metrologicznych, stosowanych w przemyśle, przyczyniło się w wysokim stopniu do zajęcia się sprawą etalonów końcówkowych. Inicjatywa Johanson'a dostarczenia przemysłowi praktycznych wzorców końcówkowych, uwieńczona niezwykle powodzeniem, była pierwszą podniętą do rozszerzenia działalności pracowni metrologicznych w kierunku nowych potrzeb.

Wydawaćby się mogło, że wraz z rozwojem nowych działów metrologji zwiększyłyby się powinny szanse zastąpienia wzorców kreskowych przez końcówkowe. Tak się nie stało jednak. Metr międzynarodowy pozostał etalonem zasadniczym jako etalon kreskowy. Ale dzięki słynnym pracom Michelson'a i Benoit'a na widownię wystąpił nowy wzorzec długości w postaci długości fali światła określonej ściśle barwy. Metr międzynarodowy został porównany z tym wzorcem fizycznym, który posiada niewątpliwą przewagę nad wzorcami materialnymi w postaci etalonów kreskowych czy końcówkowych, tak pod względem stałości swej jak i precyzji. Pomiaru te, zasadnicze dla obecnego rozwoju metrologji, omówimy obszernie po zapoznaniu się ze zjawiskami interferencji światła.

48. ŚWIATŁO MONOCHROMATYCZNE. Od chwili, gdy nauczono się mierzyć długości fal świetlnych z pewną dokładnością i przekonano się o zgodności pomiarów, wykonanych w najróżnorodniejszych warunkach, zjawily się pomysły użycia tych długości naturalnych jako etalonów zasadniczych. Droga do urzeczywistnienia tych zamiarów była jednak wyjątkowo żmudna, gdyż dokładność pomiarów pozostawiała wciąż wiele do życzenia. Dopiero A. A. Michelson, znakomity fizyk amerykański, prof. uniwersytetu w Chicago, po długich badaniach najrozmaitszych źródeł światła, podjął się na wezwanie międzynarodowego biura miar i wag, wspólnie z Benoit, wyznaczenia metra w długości fali określonego światła jednobarwnego. Wybór padł wówczas na zielony prążek widma kadmu, jako wyjątkowo subtelny i zarazem wyraźny.

Od tego czasu rozpowszechniły się bardzo pomiary interferencyjne i udoskonalone zostały sposoby otrzymywania światła monochromatycznego, czyli jednobarwnego. Obecnie przypomniemy niektóre określenia zasadnicze, związane ze światłem monochromatycznym, i opiszemy sposoby jego wytwarzania.

Posiadamy nieskończoną ilość promieniowań monochromatycznych. Tworzą one szereg ciągły, podobnie jak szereg punktów odcinka prostej.



Niepodobna oznaczyć barwy poszczególnych promieniowań zapomocą nazw czy liter. Jedyne wartości liczbowe może scharakteryzować dokładnie światło monochromatyczne.

Tą powszechnie stosowaną wartością liczbową jest długość fali, charakteryzująca w zupełności każde elementarne promieniowanie. Należałoby odnosić długość fali względem próżni, jedyne go ośrodka, którego wybór nie jest dowolny i który nie rozszczepia światła. Ze względów praktycznych odnosimy długość fali względem powietrza przy  $15^{\circ}\text{C}$  i  $76\text{ cm}$ . Spółczynnik załamania powietrza tak mało różni się od 1, że odnośna poprawka jest znikoma.

Jakkolwiek długości fali są bardzo małe, jednak są one określone z krawcową dokładnością. Aby operować liczbami wygodnymi, stosuje się jednostki następujące: mikron, milimikron  $= 0,001\mu = 10^{-6}\text{ mm} = 1\text{ m}\mu$ , wreszcie angström  $= 10^{-7} = 1\text{ \AA}$ . W pomiarach, bliżej nas interesujących, stosuje się promieniowania, działające na wzrok. W celu zorientowania się ogólnego, podajemy tu długości, zresztą najzupełniej przybliżone, fal światła różnych barw:

Fioletowe	4100 $\text{\AA}$	Żółte	5800 $\text{\AA}$
Niebieskie	4700 $\text{\AA}$	Oranżowe	6000 $\text{\AA}$
Zielone	5200 $\text{\AA}$	Czerwone	6500 $\text{\AA}$

Istnieje kilka sposobów wyodrębnienia światła monochromatycznego z pośród różnorodnych promieniowań danego źródła światła. Można w tym celu użyć monochromatora w postaci pryzmatu, czy siatki dyfrakcyjnej, dających widmo źródła światła. Izolowanie światła danej barwy odbywa się za pośrednictwem cienkiej szczeliny. Metoda powyższa posiada wiele wad, gdyż natężenie światła jest przytem małe. Jednak należy dodać, że jest to jedyna metoda, jeśli pragniemy otrzymać ściśle jednobarwne światło. Pryzmat w tym wypadku jest lepszy od siatki dyfrakcyjnej, która daje znacznie większe straty światła. Monochromator jest niczem innym, jak spektroskopem, przystosowanym do specjalnych potrzeb.

Jeśli źródło światła daje niewielką liczbę dobrze wyodrębnionych promieniowań, można posilkować się w tym wypadku ekranami absorbującymi, izolującymi promieniowanie określonej długości fali. Dobór takiego ekranu jest zawsze kwestją przypadku. Można w tym celu użyć roztworu określonej soli, czy barwnika, w naczyniu o ścianach równoległych; można również posilkować się kliszą z żelatyną, przesyconą danym barwnikiem. Nowe klisze fotograficzne, wymyte z bromku srebra i dobrze wypłukane, po nasyceniu danym barwnikiem dają doskonałe ekrany. Wielki wybór takich filtrów dają wytwórnice Wratten lub Calmels.

Światła ściśle monochromatycznego, dającego w spektroskopie prążek nieskończenie cienki, bez względu na rodzaj rozszczepienia, nie można

urzeczywistnić, gdyż jest ono pojęciem abstrakcyjnym, ale nie fizycznym. Nawet najbardziej elementarne promieniowania, wysyłane np. przez gazy świecące, odpowiadają bardzo małemu odcinkowi widma ciągłego. Niech długości fal skrajnych, odpowiadających temu odcinkowi, różnią się o  $d\lambda$ . Wielkość powyższa wyrażona w angströmach jest szerokością prążka. Stosunek  $\frac{\lambda}{d\lambda}$  nazywamy spójczynnikiem subtelności prążka. Dla idealnego

jednobarwnego promieniowania ten spójczynnیک byłby nieskończonością.

W celu zbliżenia się do tego ideału poczynione zostały wielkie wysiłki. Osiągnięto promieniowania, których spójczynnیک subtelności zbliża się do miliona. W zastosowaniach technicznych wystarcza zazwyczaj spójczynnیک równy około stu tysiącom, przyczem blask odpowiednich źródeł światła wciąż jeszcze jest silny.

Najczęściej używanem źródłem światła monochromatycznego jest płomień sodowy w postaci palnika bunzenowskiego, w który wprowadzona jest na pałeczce azbestowej sól kuchenna. W tych warunkach współczynnیک subtelności wynosi około 20.000. Blask płomienia jest niewielki i wynosi około 0,01 świecy na  $cm^2$ . Otrzymuje się przytem, ściśle biorąc, dwa promieniowania o długości fal 5890 i 5896 Å, czyli średnio 5893 Å. Istnienie podwójnego prążka w pewnych razach daje poważne komplikacje.

O wiele lepsze wyniki daje lampa rtęciowa Cooper-Hewitt'a lub pokrewna. Polega ona na wytworzeniu w próżni łuku rtęciowego pomiędzy dwoma elektrodami. Do pomiarów interferencyjnych używa się lampy szklanej, a nie kwarcowej, ze względu na konieczność zatrzymania promieni ultrafioletowych, porażających oczy obserwatora.

Dla prac metrologicznych należy przepuszczać przez lampę prąd możliwie niewielki, gdyż otrzymuje się przytem wyższy spójczynnیک subtelności. Zbiega się to szczęśliwie z możliwością użycia szkła jako materiału do wyrobu lampy. Dla celów laboratoryjnych nadają się najlepiej krótkie lampy, długości zaledwie 10 cm. Lampy rtęciowe zasilane są zasadniczo prądem stałym; istnieją lampy zasilane prądem zmiennym, bardziej skomplikowane, jednak działające bez zarzutu i dające te same promieniowania.

Własności optyczne lampy rtęciowej są bardzo cenne. Daje ona blask 300 razy większy w porównaniu ze światłem sodowym (3 świece na  $cm^2$ ). Największy procent blasku przypada przytem na t. zw. prążek zielony, około 5460 Å, który łatwo wyodrębnić od innych zapomocą ekranu żelatynowego. Najczęściej jest to rzeczą zbyteczną, wobec wielkiej intensywności prążka zielonego w porównaniu z żółtymi i fioletowymi.

Spójczynnیک subtelności zielonego prążka rtęci wynosi około 400.000 pod warunkiem przepuszczania przez lampę umiarkowanego prądu. Przy



pomiarach ściśle naukowych prążki rtęci nie mogą zastąpić czerwonego prążka kadmu, gdyż towarzyszą im t. zw. satelity, komplikujące nieco zagadnienia. W zastosowaniach technicznych lampa rtęciowa jest nieocenionym narzędziem<sup>1)</sup>.

Bardzo poważnym źródłem światła monochromatycznego są rurki Geislera, wypełnione gazami szlachetnymi pod słabym bardzo ciśnieniem. Popularnością cieszą się zwłaszcza rurki, wypełnione neonem lub helem. Pomimo słabego blasku nadają się one doskonale do zastosowań metrologicznych. Specjalne lampki neonowe wyrabia dla celów metrologicznych Georges Claude. Są one zasilane przez cewkę lub mały transformator. Wyjątkowo cienkie prążki daje rurka, wypełniona kryptonem.

Przy rurkach neonowych należy stosować monochromator ze względu na bliskie sąsiedztwo poszczególnych prążków.

49. ZJAWISKA INTERFERENCYJNE. Zjawiska interferencyjne polegają jak wiadomo na tym, że w pewnych warunkach dwa promienie, prawie równoległe, nie dają zwiększenia natężenia świetlnego, jak tego należałoby się spodziewać, lecz odwrotnie, ich wspólne działanie wyraża się w lokalnych zaciemnieniach. Obserwator ma do czynienia z pasmami naprzemian jasnymi i ciemnymi, które noszą miano prążków interferencyjnych.

Warunki, aby dwa źródła światła  $S_1$  i  $S_2$ , wysyłające dwa promienie prawie równoległe, w pewnym punkcie  $P$  wywoływały w nim lokalne zaciemnienia, są następujące: Oba promienie posiadają jednakową barwę, czyli jednakowy okres drgań. Oba promienie posiadają te same natężenia, czyli jednakową amplitudę. Pomiedzy dwoma składowymi wektorami świetlnymi w punkcie  $P$  istnieje różnica fazy:

$$\Delta = 2\pi \frac{r_1 - r_2}{\lambda} = (2k + 1)\pi$$

gdzie  $r_1$  i  $r_2$  oznaczają odległości źródeł światła  $S_1$  i  $S_2$  od punktu  $P$ . Ostatni warunek można wyrazić w kształcie

$$r_1 - r_2 = (2k + 1)\lambda/2$$

czyli, aby otrzymać zaciemnienie w punkcie  $P$ , promienie interferujące w tym punkcie muszą posiadać różnicę przebiegu  $r_1 - r_2$ , równą nieparzystej wielokrotności półfali światła.

W zastosowaniach metrologicznych mamy do czynienia ze zjawiskami interferencyjnymi, polegającymi na otrzymaniu prążków interferen-

---

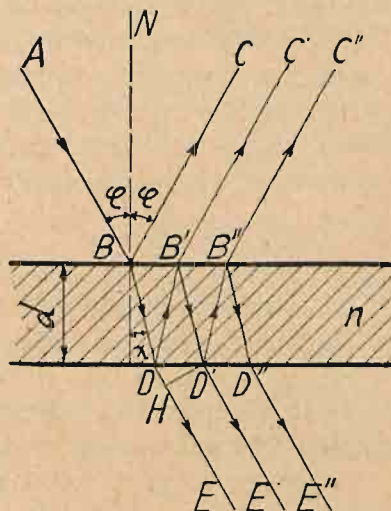
<sup>1)</sup> Laboratorium metrologii technicznej politechniki warszawskiej posiada lampkę rtęciową pomysłu Fabry-Perot. Wykonaną ona została w laboratorium fizycznym politechniki.

cyjnych, zlokalizowanych w pewnych ściśle określonych obszarach przestrzeni. W tym wypadku można użyć bardziej rozległego źródła światła <sup>1)</sup>.

Zjawiska interferencyjne, otrzymane zapomocą cienkich warstwek, polegają na istnieniu prążków zlokalizowanych wewnątrz samej warstewki. W grubszych warstwach, gdy różnicę fazy otrzymuje się przez nachylenie promieni padających, prążki są, ogólnie biorąc, zlokalizowane w nieskończoności i obserwuje się je zapomocą małych lunetek, nastawionych „na nieskończoność”.

Obie te metody otrzymywania prążków interferencyjnych znajdują zastosowanie w metrologji. Rozpatrzmy naprzód zjawiska interferencyjne w cienkich warstewkach (płytkach) przezroczystych przy użyciu światła jednobarwnego, uwzględniając dla lepszego zrozumienia tak światło przechodzące, jak i odbite.

Niech promień  $AB$  światła jednobarwnego pada pod kątem  $\varphi$  (rys. 155) na warstewkę grubości  $d$  i o współczynniku załamania  $n$ . Odbija się on częściowo i załamuje. Niech  $\chi$  będzie kątem załamania. Promienie  $DE$  i  $D'E'$  mogą interferować; zaciemnienie zauważymy, gdy różnica fazy wyniesie  $\Delta = (2k + 1)\pi$ . Niech  $D'H$  będzie prostokątną względem  $DE$ . Ogólnie biorąc w punktach  $D'$  i  $H$  istnieje różnica fazy



Rys. 155

$$\Delta = 2\pi \left( \frac{DB' + B'D'}{\lambda'} - \frac{DH}{\lambda} \right)$$

gdzie  $\lambda'$  oznacza długość fali danego światła w warstwie, zaś  $\lambda$  długość fali w powietrzu. Obie te wielkości łączy zależność  $\lambda: \lambda' = n$ . Jeśli uwzględnimy zależności geometryczne  $BD = DB' = B'D' = \frac{d}{\cos \chi}$  oraz  $DH = 2d \tan \chi \sin \varphi$ , jak również prawo Descartes'a  $\sin \varphi = n \sin \chi$ , to otrzymamy jako wzór ostateczny po dokonaniu odpowiednich przeróbek

$$\Delta = 2\pi \frac{2d}{\lambda'} \cos \chi$$

<sup>1)</sup> Przy niezlokalizowanych prążkach, jakie zaobserwować można w rozległych obszarach przestrzeni, należy użyć punktowego źródła światła. Tego rodzaju prążki otrzymuje się zapomocą lusterek Fresnel'a i urządzeń analogicznych (Drude, Lummer, Fabry).



Łatwo sprawdzić, że wzór ten stosuje się i do wypadku, gdy  $d = 0$ , gdyż i różnica fazy wówczas  $= 0$ . Zaciemnienie nastąpi, jeśli:

$$\Delta = (2k + 1)\pi$$

Jeśli przeprowadzilibyśmy analogiczny rachunek dla dwóch promieni odbitych  $BC$  i  $B'C'$ , to warunek zaciemnienia przedstawiłby się nam w postaci wzoru identycznego:  $\Delta = (2k + 1)\pi$ .

Te dwa wyniki należy uznać za sprzeczne, jeśli przyjmiemy pod uwagę, że w warstwie światło nie jest pochłaniane; łatwo bowiem przyjąć, że pewnemu maximum światła odbitego odpowiada minimum światła przechodzącego i odwrotnie. Elektromagnetyczna teoria światła poucza nas, że w wypadku światła odbitego zaciemnienie istnieje dla

$$\Delta + \pi = (2k + 1)\pi$$

Tą dodatkową różnicę fazy objaśnić można faktem, że odbicia w punkcie  $B$  i  $D$  zachodzą w różnych warunkach fizycznych, a mianowicie odbiciu w punkcie  $D$  przy przejściu z ośrodka bardziej łamliwego o współczynniku załamania  $n$  do ośrodka mniej łamliwego (powietrze) towarzyszy różnica fazy  $= \pi$ . Przy świetle przechodzącym powstają dwie różnice fazy w punktach  $D$  i  $B'$  i wskutek tego wynik ostateczny nie ulega zmianie ( $\pi + \pi = 2\pi$ ).

Jeśli zamiast płytki szklanej rozpatrywać warstewkę powietrza, zawartą pomiędzy dwoma równoległymi płytkami szklanymi, to warunki odbicia wyrażą się w tych samych wzorach, co i poprzednio, jednak należy w nich zastąpić współczynnik  $n$  przez 1.

Podana przez nas elementarna teoria prążków interferencyjnych nie uwzględnia wielokrotnego odbijania się promieni, co jest dopuszczalne wobec ich szybko malejącego natężenia<sup>1)</sup>.

Przy zwykłych powierzchniach szklanych już promień  $E'$  jest słaby z powodu małego współczynnika sprawności odbijania, wynoszącego dla powierzchni styku szkła z powietrzem zaledwie  $1/20$ . Jeśli wysrebrzyć nieco powierzchnię szkła i zwiększyć tym sposobem sprawność odbijania, nie ograniczając zbytnio przezroczystości cienkiej warstewki srebra, to wpływ wielokrotnego odbicia będzie wyraźny i wygląd zjawiska zmieni się radykalnie. Natężenia kolejnych promieni będą małe według szeregu geometrycznego, którego stosunek zbliża się do jedności.

Niech  $f$  oznacza sprawność odbijania obu płaszczyzn, tworzących daną płytkę, zaś  $\theta$  część ułamkową światła padającego, którą ta płytka przepuszcza. Jeśli przyjmiemy, że natężenie wiązki promieni padających

<sup>1)</sup> Zainteresowany czytelnik znajdzie odnośny materiał w pracy: E. Gehrcke. Die Anwendung der Interferenzen in der Spektroskopie und Metrologie. Str. 36 i nast. Brunświk. F. Vieweg. 1906. Również: Ch. Fabry. Les applications des interferences lumineuses. Wyd. Revue d'optique. Paryż, 1923. Art. 27 i nast.

jest równe jedności, to po  $2p$  odbiciach natężenie światła wychodzącego będzie  $\Theta^2 f^{2p}$ . Amplituda przesunięcia wibracyjnego wyrazi się przez pierwiastek drugiego stopnia z natężenia i wyniesie  $\Theta f^p$ , otrzymamy więc nieskończoną liczbę fal, których amplitudy utworzą szereg  $\Theta, \Theta f, \Theta f^2, \dots, \Theta f^p$ , zaś różnice przebiegu  $0, \Delta, 2\Delta, \dots, p\Delta$ . Aby otrzymać wypadkową tych promieni, należy zsumować wektory, charakteryzujące natężenia i fazy poszczególnych promieni. Najlepiej w tym celu użyć przedstawienia promieni w postaci zmiennych zespolonych. Otrzymamy wówczas sumę:

$$\Theta(\cos 0 + i \sin 0) + \Theta f \left( \cos 2\pi \frac{\Delta}{\lambda} + i \sin 2\pi \frac{\Delta}{\lambda} \right) + \Theta f^2 \left( \cos 2\pi \frac{2\Delta}{\lambda} + i \sin 2\pi \frac{2\Delta}{\lambda} \right) + \dots$$

Sumując oddzielnie składowe rzeczywiste i urojone, podnosząc oba składniki do drugiej potęgi i dodając je, otrzymamy wyrażenie natężenia wypadkowego w postaci szeregu

$$I = \frac{2\Theta^2}{1-f^2} \left( \frac{1}{2} + f \cos 2\pi \frac{\Delta}{\lambda} + f^2 \cos 2\pi \frac{2\Delta}{\lambda} + \dots + f^p \cos 2\pi \frac{p\Delta}{\lambda} + \dots \right),$$

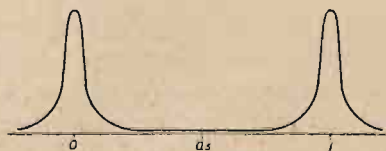
który można wyrazić w postaci wzoru skończonego, zastępując  $\cos$  przez urojone funkcje wykładnicze (E. Goursat. Kurs analizy matematycznej. Tom drugi). Otrzymamy wówczas wzór Airy'ego

$$I = \frac{\Theta^2}{(1-f)^2} \frac{1}{1 + \frac{4f}{(1-f)^2} \sin^2 \pi \frac{\Delta}{\lambda}}$$

Jeśli oznaczymy maximum natężenia przez  $I_0 = \frac{\Theta^2}{(1-f)^2}$ , zaś stałą  $\frac{4f}{(1-f)^2}$  przez  $A$ , to wzór Airy uprości się

$$I = I_0 : \left( 1 + A \sin^2 \pi \frac{\Delta}{\lambda} \right)$$

Badając zależność natężenia od fazy widzimy, że minima są prawie zupełnie czarne, zaś prążki interferencyjne, naodwrot, cienkie i błyszczące. Rys. 156 wskazuje, że krzywa natężenia odbiega całkowicie od sinusoidy, którą otrzymujemy przez nałożenie dwóch fal. Ostrość prążków na ciemnym tle ułatwia pomiary i zwiększa ich dokładność. Przy mierzeniu klocków stalowych wysrebrzenie płytki szklanej jest wprost koniecznością, gdyż inaczej prążki są mało wyraźne.



Rys. 156

Wysrebrzanie nawpół przezroczyste można osiągnąć na drodze chemicznej lub zapomocą rozpylania katodowego. Ostatni sposób jest znacznie pewniejszy i jest powszechnie stosowany.



W zastosowaniach metrologicznych znacznie wygodniej operować pojęciem rzędu interferencji zamiast różnicy fazy. Rzędem interferencji nazywamy wielkość liczbową

$$p = \frac{2dn}{\lambda} \cos \chi$$

Jeśli  $p$  jest liczbą całkowitą otrzymujemy maximum lub minimum natężenia światła. Przy powiększaniu  $p$  o jednostkę otrzymujemy to samo zjawisko. Jeśli ponumerujemy wszystkie prążki kolejne, poczynając od  $p = 0$ , to każdy prążek będzie wyznaczony przez liczbę całkowitą, którą możemy nazwać porządkową.

We wzorze, określającym  $p$ , należy w myśl poczynionych założeń uważać  $n$  i  $\lambda$  za wielkości stałe. Wartość  $p$  jest zatem funkcją dwóch innych wielkości, mogących podlegać zmianom, a mianowicie grubości warstewki  $d$  i kąta  $\chi$ . Wynikają stąd dwa sposoby obserwowania prążków:

1. Stosujemy wiązkę promieni równoległych ( $\chi = \text{const.}$ ), padającą na warstewkę (płytkę), której grubość zmienia się powoli. Prążki wyznaczają wówczas krzywe jednakowej grubości warstewki. Będziemy je nazywali prążkami jednakowej grubości.

2. Stosujemy warstewkę, ograniczoną przez ściśle równoległe płaszczyzny i promienie o różnych pochyleniach. Każdemu punktowi pola musi odpowiadać dane pochylenie promieni, co zmusza do posilkowania się przy obserwacji lunetką nastawioną na nieskończoność. Prążki są krzywami jednakowego kąta padania: są to okręgi współśrodkowe względem tego punktu pola, w którym promień pada prostopadle do płaszczyzn warstwy. Prążki powyższe nazywamy krzywami jednakowego pochylenia, lub pierścieniami w nieskończoności ze względu na ich kształt i sposób obserwacji.

**50. WARUNKI OTRZYMYWANIA PRĄŻKÓW INTERFERENCYJNYCH.** Wzory, poprzednio przez nas podane, dotyczą światła idealnie monochromatycznego, czyli o ściśle określonej długości fali. Jeśli mamy do czynienia ze światłem barwnym, zjawisko będzie polegało na superpozycji oddzielnych promieniowań monochromatycznych. W zastosowaniach metrologicznych najwięcej znaczenia posiada powstawanie prążków w tych warunkach, gdy światło nie jest ściśle monochromatyczne i zawiera wszelkie promieniowania o długości fali, wahającej się jednak w bardzo ograniczonym odstępnie od  $\lambda$  do  $\lambda + d\lambda$ . Jeśli przejść od jednej do drugiej skrajnej wartości fali, to rząd interferencji  $p$  zmieni się o wartość  $dp = -p \frac{d\lambda}{\lambda}$ , którą otrzymujemy, różniczkując wzór podany poprzednio przy stałej wartości  $d$  i  $\chi$ . Jeśli  $dp$  jest małe w stosunku do jedności, wszystkie promieniowania zachowują się mniej więcej jedna-

kowo i prążki są tak samo wyraźne, jak gdyby promieniowanie było ściśle jednorodne. Jeśli więc oznaczymy przez  $\varepsilon$ <sup>1)</sup> wielkość małą w stosunku do jedności, to otrzymamy warunek zupełnej wyrazistości prążków w postaci wzoru

$$\frac{\lambda}{d\lambda} > \frac{p}{\varepsilon},$$

w którym  $\lambda/d\lambda$  jest współczynnikiem subtelności prążka. Im prążek widmowy jest subtelniejszy i im rząd interferencji jest mniejszy, tem prążki interferencyjne są wyraźniejsze. Zwiększając wartość  $p$ , czyli biorąc coraz grubsze warstwy, doprowadzimy do zaniku prążków. Zakładając sobie pewną wartość  $\varepsilon = 0,2$  do  $0,5$  i znając współczynnik subtelności promieniowania, można określić grubość warstwy, przy jakiej można się jeszcze spodziewać występowania prążków. Rozważanie powyższe wskazuje, jakie znaczenie posiada przy pomiarach interferencyjnych odpowiedni wybór źródła światła.

Dotychczas przyjmowaliśmy, że kąt pochylenia był stały, czyli że na daną warstewkę padała wiązka ściśle równoległa. W zastosowaniach praktycznych, polegających na obserwowaniu krzywych jednakowej grubości, wymagałoby to użycia kolimatora. W wielu razach byłoby to uciążliwym i dlatego dobrze jest określić dokładność, z jaką powinien być urzeczywistniony warunek  $\chi = \text{const}$ . Niech wiązka pada na warstewkę mniej więcej prostopadle. Wiazka rozważana nie jest przytem ściśle równoległa: obok promieni, ściśle prostopadłych względem warstewki, zawiera ona promienie, posiadające wszelkie możliwe pochylenia w granicach kąta  $\chi$  od zera do pewnej niewielkiej wartości  $\alpha$ , przedstawiającej zarazem półkął wierzchołkowy wiązki stożkowej, wchodzącej w warstewkę. Przyjmijmy, że  $\varepsilon$  jest wielkością małą w stosunku do jedności. Warunek wyrazistości prążków, uwzględniający różne pochylenia promieni, wyrazi się w postaci wzoru  $2n(1 - \cos \alpha) \frac{d}{\lambda} < \varepsilon$ , a po zastąpieniu  $1 - \cos \alpha$  przez  $1/2 \alpha^2$ :

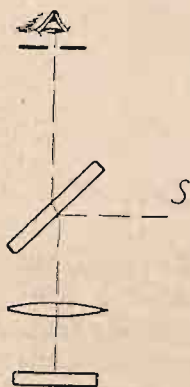
$$\alpha^2 < \frac{\varepsilon \lambda}{n d}$$

Poza warstewką kąt stożka jest nieco inny, a mianowicie, półkął  $\beta = n \alpha$ .

Przytoczony wzór wyjaśnia, że im grubsza jest warstewka, tem stożek promieni padających musi być węższy. Przy odpowiednich obliczeniach należy przyjmować według Fabry wartość  $\varepsilon = 0,2$ . Przy powyższem założeniu półkął stożkowy może wynosić przy obserwowaniu warstewki o grubości  $0,1 \text{ mm}$  około  $60^\circ$ , gdy tymczasem przy grubości  $20 \text{ mm}$  zaledwie  $8'$ . Wskazuje to na trudności otrzymania prążków inter-

<sup>1)</sup> M. Ch. Fabry. La lumière monochromatique, sa production et son emploi en optique pratique. Wyd. Revue d'optique. Paris 1923.

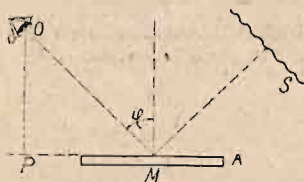




Rys. 157

ferencyjnych przy odnośnych pomiarach metrologicznych, gdy jesteśmy zmuszeni do stosowania większych grubości warstwy.

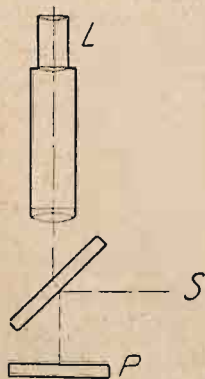
Krzywe jednakowej grubości najlepiej jest obserwować w kierunku prostopadłym do warstwy. Ponieważ i wiązka promieni powinna padać również prostopadle względem warstwy, przeto istnieje trudność pogodzenia obu tych warunków. Najczęściej stosuje się przytem urządzenia, oparte na tej samej zasadzie, co i oświetlacze w mikroskopach metalograficznych (rys. 157). Fabry podaje (l. c.) opis jednego z przyrządów, w których płytka równoległa i płaska optycznie jest oświetlana od spodu i stanowi stolik, na którym umieszcza się badany klocek Johanson'a. I w tym wypadku mamy do czynienia z analogją w stosunku do mikroskopu metalograficznego Le-Chatelier.



Rys. 158

Obserwowanie krzywych jednakowej grubości pod kątem, a nie według prostopadłej, może prowadzić do poważnych omyłek. Przestrzega przed tem Fabry, przytaczając następujący przykład: Niech na płytkę pada pod kątem  $45^\circ$  światło z dość rozległego źródła światła  $S$ . Pod tym samym kątem obserwujemy płytkę z odległości 30 cm (rys. 158). Jeśli warstewka powietrza posiada grubość 0,1 mm, to np. zamiast prążków ściśle prostolinijowych otrzymamy okręgi kół, których środek będzie się znajdował w punkcie  $P$ .

Wynikałoby z tego, że warstewka posiada wydatnie niejednostajną grubość, co byłoby błędem. Przy bardzo małych grubościach warstewki, wynoszących kilka mikronów, tej omyłki nie należałoby się zresztą obawiać.



Rys. 159

Przy większej grubości warstwy obserwujemy t. zw. krzywe jednakowego pochylenia, o których była mowa powyżej. W tym wypadku używa się płytek szklanych o wyjątkowo dokładnie wykonanej płaszczyźnie. Warstewka obserwowana musi być ograniczona przez ściśle równoległe płaszczyzny. Zapomocą lunetki ustawionej na nieskończoność obserwuje się wówczas pierścienie ze środkiem, któremu odpowiadają promienie ściśle prostopadłe ( $\gamma = 0$ ). Z odpowiednim urządzeniem zapoznaje nas rys. 159. Zapomocą kolimatora otrzymujemy wiązkę promieni ściśle równoległych, którą rzucamy za pośrednictwem szkiełka oświetlaczonego na obserwowaną płytkę  $P$ . Lunetka  $L$  składa się z obiektywu i okularu, mocno zdja-

ferencyjnych przy odnośnych pomiarach metrologicznych, gdy jesteśmy zmuszeni do stosowania większych grubości warstwy.

fragmowanego. Światło musi być w tym wypadku monochromatyczne, np. lampy rtęciowej przy użyciu filtru.

Pierścienie interferencyjne (rys. 160) posiadają wygląd, żywo przypominający pierścienie Newtona. Rzeczywiście prawo, według którego oblicza się średnice kolejnych pierścieni, jest analogiczne. Rząd interferencji, przy uwzględnieniu małej wielkości, kątów wyrazi się w postaci wzoru

$$p = p_0 - p_0 \frac{\alpha^2}{2n^2}, \text{ gdzie } p_0 = 2n \frac{d}{\lambda}$$

Przyjmijmy, że  $p_0$  jest liczbą całkowitą. Niech pierścień „ $k$ ”, licząc od środka posiada numer  $p = p_0 - k$ . Zastępując  $p$  przez powyższą wartość w poprzednim wzorze, otrzymamy

$$k = p_0 \frac{\alpha^2}{2n^2},$$



Rys. 160.  
Prążki jednakowego pochylenia

skąd znaleźć można odległość kątową  $\alpha$  odnośnego pierścienia. Ze wzoru powyższego widzimy, że promienie kolejnych pierścieni wzrastają jak pierwiastki kwadratowe liczb całkowitych.

Przy silnem zdiafragmowaniu lunetki podlega obserwacji małe pole warstwy czy płytki równoległej. W tym wypadku łatwo jest zaobserwować pierścienie, gdy płaszczyzny nie są ściśle wykonane.

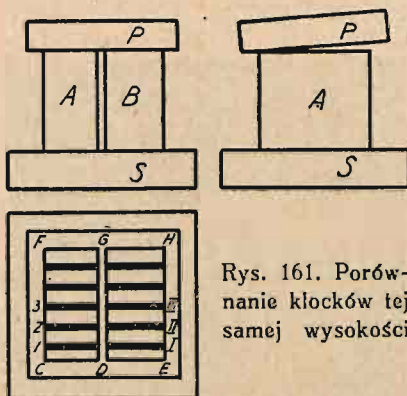
Metoda prążków jednakowego pochylenia znajduje zastosowanie w interferometrach, o czym będzie mowa poniżej. Jest ona bardzo subtelna; stosuje się ją przy pomiarach grubości płytki, którą w tym celu przesuwamy stopniowo na stoliku przyrządu, przedstawionego na rys. 159. Obserwując pierścienie w szeregu punktów można otrzymać mapkę topograficzną grubości płytki z dokładnością do  $0,01 \mu^1$ ).

51. METODY INTERFERENCYJNE WASZYNGTOŃSKIEGO BUREAU OF STANDARDS. W praktyce metrologicznej zachodzi często potrzeba porównania wzorców długości z klockami użytkowymi tej samej nominalnej długości, jednak nieco zużytych. Zwykle jeden komplet klocków Johansona, starannie utrzymywany, jest uznany za wzorcowy, i należy z nim porównać inny komplet użytkowy, którego zużycie nie może przekraczać pewnych określonych norm. Do porównania nadają się doskonałe metody interferencyjne, gdyż odnośne różnice wynoszą najczęściej

<sup>1)</sup> Fabry. 1. c. Również aparat Abbé—Pulfrich w optyce Lummera, opisywany przez Czapskiego w Z. f. Instrumentenkunde. 1885.



zaledwie po kilka mikronów. Zasięgą waszyngtońskiego Bureau of Standards było zwrócenie uwagi na techniczną wartość niektórych sposobów, stosowanych oddawna w pracowniach optycznych. Metody te są o tyle cenne, że polegają na użyciu niezwykle prostych narzędzi w postaci



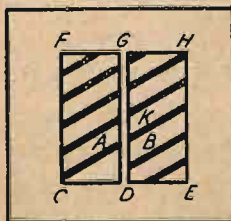
Rys. 161. Porównanie klocków tej samej wysokości

kilku płytek szklanych, optycznie płaskich, czyli t. zw. planparalelek, oraz źródła światła monochromatycznego, sodowego lub rtęciowego.

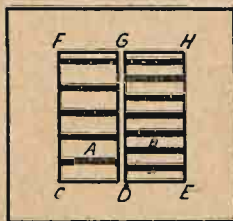
Założmy, że komplet wzorcowy składa się z klocków Johanson'a o dokładnie płaskich i ściśle równoległych ściankach. Z klockami temi mamy porównywać inne, nieco mniejsze lub większe, których zasadnicze ścianki mogą nie być równoległe. Niech na płytce szklanej  $S$ , obok klocka wzorcowego  $A$ , będzie umieszczony klocek badany  $B$  (rys. 161).

Przy należytem przyleganiu klocków do płytki  $S$  możemy być pewni, że dolne ścianki klocków leżą w tej samej płaszczyźnie, gdyż ewentualna grubość warstewki alkoholu pomiędzy przylegającymi powierzchniami, jak wykazują to doświadczenia, wynosi zaledwie drobną część mikrona. Tym sposobem porównanie wysokości obu klocków sprowadza się do określenia odległości pomiędzy płaszczyznami górnymi klocków. W tym celu nakładamy na klocki płytkę szklaną, pozostającą w styku z klockami wzdłuż prostej  $CDE$  i nieco pochyloną względem płaszczyzn górnych. Otrzymujemy obok siebie dwie warstewki klinowe, w których, przy zastosowaniu oświetlenia pionowego, powstają prążki interferencyjne.

Jeśli oba klocki posiadają tę samą wysokość, to otrzymamy zgodność poszczególnych prążków. Tak 1 odpowiadać będzie 1 i t. d. Częściej zdarza się jednak, że klocki



Rys. 162. Porównanie klocków nieco różnej wysokości



Rys. 163. Próba równoległości klocków.  $B$  krótszy przy  $GH$  niż przy  $DE$

różnią się nieco co do swej wysokości. Niech klocek  $B$  (rys. 162) będzie niższy o kilka mikronów od klocka  $A$ . Przyciskając zlekka płytkę  $P$  tak, by oparła się ona o klocek  $A$  w punkcie  $D$ , zaś o klocek  $B$  w punkcie  $E$ , otrzymamy pewien układ prążków, jak na rys. 162. Rozważmy, jaka będzie różnica wysokości obu klocków w punkcie  $K$ . Na klocku  $A$

widzimy dwa prążki pomiędzy punktem  $D$  i  $K$ , z czego wnosimy, że w punkcie  $K$  grubość warstewki wynosi  $2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \lambda$ . Co się tyczy klocka  $B$ ,

to grubość warstewki w punkcie  $K$ , przy odniesieniu względem punktu  $E$ , wynosi  $4 \cdot \frac{1}{2} \lambda$ . Tak więc przyjmując równoległość wierzchnich płaszczyzn klocków, wyprowadzamy stąd wniosek, że klocek  $B$  jest niższy o  $(4 - 2) \cdot \frac{1}{2} \lambda = 2 \cdot \frac{1}{2} \lambda$  od klocka  $A$ . Przy bardzo drobnych różnicach wysokości klocków błąd, wynikający z nierównoległości, jest również mały, i dlatego metoda powyższa może być uważana za prowadzącą bezpośrednio do celu: porównania wysokości klocków.

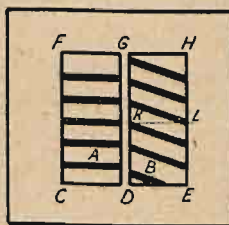
Przy pomiarach należy zwracać baczną uwagę na to, by światło padało w kierunku pionowym na klocki i aby obserwacja odbywała się mniej więcej w tym samym kierunku. Płytkę szklaną należy lekko przyciskać do krawędzi klocków. Pomiar ułatwia ta okoliczność, że przy przyciskaniu płytki zmienia się natychmiast w sposób subtelny położenie prążków.

Metody Bureau of Standards obejmują również i sprawdzanie równoległości płaszczyzn klocków. Załóżmy po dawnemu, że klocek  $A$  posiada wierzchnią płaszczyznę ściśle płaską i równoległą. Jeśli oprzemy płytkę szklaną o krawędź  $CD$  tak, że na klocku ukaże się kilka równoległych prążków, to z położenia odnośnych prążków na klocku  $B$  sądzić będziemy mogli o równoległości wierzchu klocka  $B$  względem swej podstawy.

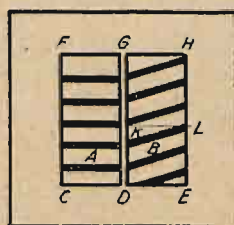
Rys. 163 przedstawia nam układ prążków na klocku  $B$  w wypadku, gdy jest on nieco niższy ze strony boku  $GH$ , niż  $DE$ . Odnośna różnica wysokości może być z łatwością obliczona na mocy ilości prążków na klocku  $A$  (5) i klocku  $B$  (7), a mianowicie  $(7 - 5) \cdot \frac{1}{2} \lambda$ . Przy sposobności należy zauważyć, że klocek  $A$  musi być przytem nieco wyższy od klocka  $B$ . Przy stopniowaniu co  $1 \mu$  części klocków Johanson'a warunek powyższy łatwo urzeczywistnić. Nie trudno również wprowadzić ewentualną poprawkę w razie pewnej nierównoległości klocka  $A$ , jeśli jest ona znana z innych pomiarów.

Rys. 164 przedstawia układ prążków na klocku  $B$  w wypadku, gdy jest on nieco wyższy ze strony boku  $HE$  niż  $DG$ , przyczem krawędź  $GD$  jest równoległa do wierzchu  $A$ ; łatwo zdać sobie sprawę, że taki właśnie będzie układ prążków jednakowej grubości warstewki powietrznej. Odwrotnie rzecz się ma (rys. 165), gdy klocek  $B$  jest niższy ze strony boku  $HE$  niż  $DG$ .

Na pokrewnej zasadzie oparta jest metoda porównywania klocków z wałeczkami i kulkami tej samej nominalnej średnicy <sup>1)</sup>.



Rys. 164. Próba równoległości klocków.  $B$  dłuższy przy  $HE$ , niż przy  $GD$



Rys. 165. Próba równoległości klocków.  $B$  krótszy przy  $HE$ , niż przy  $GD$

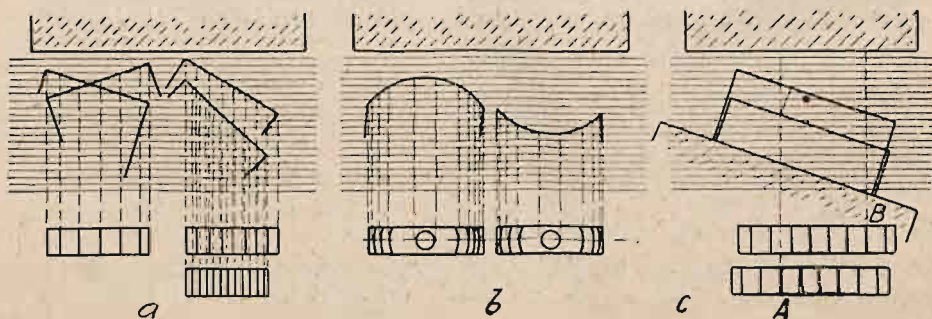
<sup>1)</sup> C. G. Peters and H. S. Boyd. Interference Methods for Standardizing and Testing Precision Gage Blocks. Maj. 1922. Scientific Papers of the Bureau of Standards. E. T. Geisler prof. Pomiaru techniczne za pomocą fal świetlnych. Przegląd Techniczny 1922 r.



52. KOMPARATOR INTERFERENCYJNY KÖSTER'A. Jak już o tem wspominaliśmy poprzednio przy pomiarach interferencyjnych, należy uważać na to, by oświetlanie planparalelek i obserwowanie prążków odbywało się w kierunku prostopadłym do warstewki powietrza. Właściwe rozwiązanie konstrukcyjne tego zagadnienia znaleźć można w komparatorach interferencyjnych, które ponadto umożliwiają obserwowanie prążków przy znacznie większych grubościach warstwy powietrznej, dzięki zastosowaniu odpowiedniego kolimatora. Przykładanie bezpośrednie planparalelki do klocków nie jest rzeczą zalecenia godną, ze względu na wycieranie się jej i wpływ temperatury wskutek dotykania się płytki szklanej. Prostota i poręczność metod Bureau of Standards jest oczywiście zaletą, jednak w wielu razach pomiar zapomocą komparatora interferencyjnego nie nastęrcza większych trudności, a jest pewniejszy.

W komparatorach interferencyjnych umieszcza się porównywane klocki na stoliczku z płytką, wykonaną ze szkła, kwarcu lub stali, i stanowiącą dokładną równię optyczną. Stoliczek ten daje się podnosić i opuszczać, oraz nachylać w dowolnym kierunku. Ponad stolikiem w odległości, umożliwiającej umieszczenie klocków, znajduje się płytka, płaska optycznie. Prążki powstają w warstewce powietrza pomiędzy górną płytką, a wierzchem klocków.

Przy interpretowaniu układu prążków najlepiej jest posiłkować się metodą graficzną. Niech  $P$  (rys. 166) przedstawia górną płytkę szklaną.



Rys. 166. a — zależność odległości między prążkami od pochylenia płaskiego klocka; b — układ prążków przy klockach wypukłych i wklęsłych; c — rozpoznawanie prążków, odpowiadających tej samej warstwy, zapomocą światła o specjalnym zabarwieniu

Przeprowadźmy szereg płaszczyzn równoległych (warstwic) do płaszczyzny płytki  $P$ : w przekroju przedstawiają się one nam w postaci układu prostych równoległych. Odległość pomiędzy dwoma dowolnymi płaszczyznami sąsiednimi przyjmijmy równą długości półfali określonego promieniowania monochromatycznego. Rzutując punkty przecięcia się poszczególnych warstwic z wierzchem klocków, wyznaczamy miejsce prążków

na wierzchniej płaszczyźnie klocka, który obserwujemy zapomocą komparatora.

Schemat, przedstawiony na rys. 166, daje nam możność wyprowadzania ważnych wniosków. Mianowicie, lewa strona rysunku zapoznaje nas poglądowo z faktem, że temu samemu układowi prążków mogą odpowiadać dwa zgoła różne położenia klocka. Następnie dowiadujemy się, że przy podnoszeniu klocka do góry (bez zmiany nachylenia) prążki zaczynają „wędrować“ w kierunku takim, jak gdyby „wychodziły z klina“. Należy zapamiętać sobie ten kierunek, który w dalszym ciągu będziemy nazywali stale „kierunkiem przesuwania się prążków“. Określenie powyższe kojarzy więc: 1. podnoszenie stolika, czyli zbliżanie wierzchu klocka do płytki *P*, następnie 2. przesuwanie prążków od cieńszej ku grubszej części klinowatej warstewki powietrza. Rzecz prosta, że w tem określeniu tkwi metoda rozpoznawania, w którym kierunku pochylony jest wierzch klocka, jak na rys. 166. W podobny sposób rozpoznaje się wklęsłość lub wypukłość powierzchni klocka. Mianowicie (rys. 166) podnoszeniu klocków z wypukłym wierzchem towarzyszy zwiększanie się prążków pierścieniowych, zaś z wklęsłym — kurczenie się prążków. Tak więc, rozpoznawanie układu prążków odbywa się zawsze zapomocą podnoszenia, lub opuszczania klocka.

W komparatorze Köster'a znalazła zastosowanie ponadto jeszcze inna zasada. Mianowicie, obok światła monochromatycznego używa on przy pomiarach światła wielobarwnego z lampki helowej (rurka Geislera). Światło powyższe rozkłada się na następujące składowe:

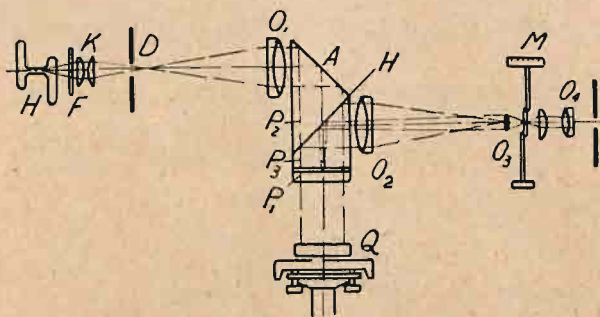
promien.	czerwone . . . . .	0,6678 $\mu$
	żółte $D_3$ . . . . .	0,5876 $\mu$
	zielone . . . . .	0,5016 $\mu$
	niebieskie . . . . .	0,4713 $\mu$
	fioletowe . . . . .	0,4471 $\mu$

Pod płytką *P* otrzymujemy wówczas pięć układów warstwic, odpowiadających poszczególnym długościom fali. Prążki interferencyjne otrzymuje się drogą superpozycji oddzielnych zaciemnień: są one barwne i przytem, ze względu na niewspółmierny stosunek poszczególnych długości fal, nie powtarzają się one periodycznie. Przy świetle helowem charakterystyczne są pewne prążki brązowe, zlekka czerwono zabarwione, które łatwo odróżnić od sąsiednich. Jeśli więc na dwóch klockach spostrzegamy identyczne układy prążków różnobarwnych i przytem umiemy wyodrębnić z pośród tych układów charakterystyczny prążek brązowy, to temsamem mamy możność ustalenia położenia zasadniczej warstwic w warunkach wolnych od wszelkiej omyłki. Warstwica ta odpowiada pewnej grubości warstewki powietrznej. Przy następem oświetleniu klocków zapomocą światła mo-



nochromatycznego, o określonej długości fali, zanotowane położenie prążka brązowego daje możność niezawodnego ustalenia odpowiedniości pomiędzy prążkami monochromatycznymi, inaczej mówiąc, znalezienia różnicy rzędów interferencji dwóch układów prążków.

Rys. 166 *c* zapoznaje nas bliżej z tem rozwiązaniem. Dwa klocki posiadają układy prążków równoległych monochromatycznych. Rzeczą jest oczywistą, że różnicę wysokości klocków potrafimy określić tylko wtedy, gdy wiemy np., że prążkowi  $AA'$  odpowiada prążek  $BB'$  na drugim klocku. Otóż, użycie odpowiednich filtrów przy lampce helowej daje nam możność przechodzenia naprzemian od światła monochromatycznego, w danym wypadku zielonego, o długości fali  $0,501\ \mu$ , do charakterystycznych prążków barwnych. Jeśli więc odpowiednia lunetka obserwacyjna jest zaopatrzona w nitki, przesuwane za pośrednictwem mikrometru okularowego, to nie łatwiejszego, jak ustalić odpowiedniość prążków  $AA'$  i  $BB'$ . W zastosowaniach praktycznych nader dogodnie jest posiłkować się prążkiem zielonym helu, wobec długości fali wynoszącej  $\sim 0,5\ \mu$ . Przy omawianych pomiarach stosuje się dwa filtry, jeden zielony dla światła monochroma-



Rys. 167. Schemat komparatora Köster'a

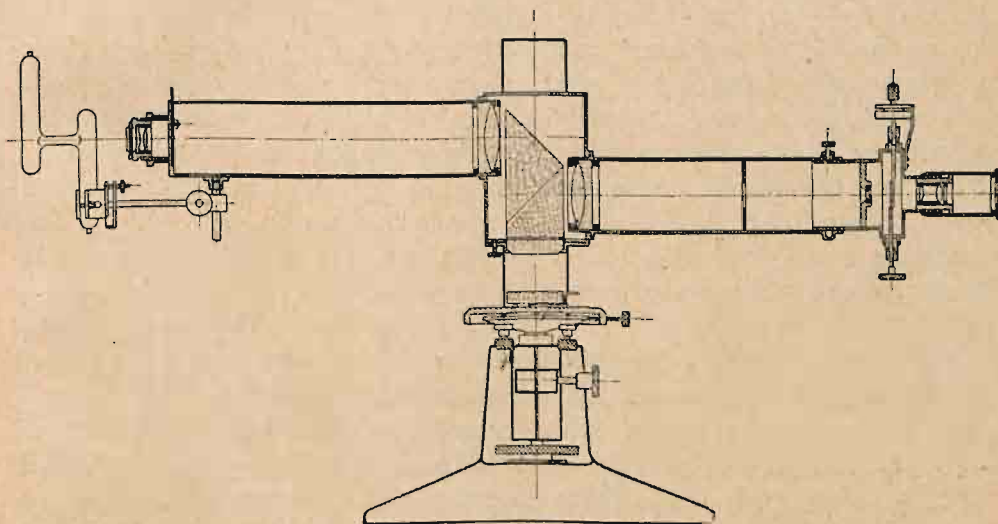
tycznego, drugi zaś fioletowy, osłabiający specjalnie intensywne światło żółte, dla światła barwnego, dającego charakterystyczne prążki brązowe.

Układy prążków na rys. 166 *c* nie dają bezpośredniej odpowiedzi na pytanie, który z klocków jest wyższy. Aby rozstrzygnąć to pytanie, musimy zastosować

tu zasadę podnoszenia stolika przy równoczesnem obserwowaniu kierunku przesuwania się prążków. Z rozważań poprzednich wynika następująca reguła praktyczna: ten klocek jest wyższy, którego układ prążków jest przesunięty względem układu drugiego klocka w kierunku wędrowania prążków.

Rys. 167 i 168 przedstawia układ i widok komparatora Köster'a. Światło rurki helowej jest ześrodkowane zapomocą kondensora  $K$  na diafragmę  $D$ , której otworek umieszczony jest w ognisku soczewki  $O_1$ . Otrzymana wiązka promieni równoległych wchodzi do pryzmatu, składającego się z trzech części. Pryzmat  $P_2$  posiada wysrebrzoną płaszczyznę  $H$ , przystającą do pryzmatu  $P_3$ . Płyta  $P_1$  stanowi trzecią część składową. Za oddzieleniem jej od pryzmatu  $P_3$  przemawiały wyłącznie względy praktyczne, mianowicie konieczność otrzymania wyjątkowo dokładnie wy-

konanej płaszczyzny spodniej  $P$ . Płytką  $P_3$  jest oddzielona od  $P_1$  cieniutką warstwą gliceryny. Odbita od płaszczyzny przekątnej  $A$  wiązka promieni równoległych odrzucona jest pionowo na dół na płytki, umieszczone na kwarcowej płytce  $Q$ , przechodząc przez nawpół wysrebrzoną przekątną pryzmatu  $P_2$  oraz przez doskonale wykończoną płaszczyznę  $P$ . Po odbiciu od powierzchni klocków promienie są odrzucone przez przekątną  $H$  w kierunku poziomym. Obiektyw  $O_2$  daje w punkcie  $O_3$  obraz źródła światła  $L$ . Otrzymuje się tym sposobem dla oka, umieszczonego w tym punkcie, obraz klocków oraz układu prążków, jednak ten obraz



Rys. 168. Konstrukcja komparatora interferencyjnego Köster'a

jest urojony. Przekształcamy go na rzeczywisty zapomocą krótkoogniskowego obiektywu  $O_3$ , dającego obraz w płaszczyźnie  $M$ . W tej płaszczyźnie znajdują się dwa suwaczki mikrometryczne z kreskami, naciętymi na szkło, które obserwujemy za pośrednictwem okularu  $O_4$ .

Wobec tego, że powierzchnie metalowe klocków są nader błyszczące, powierzchnia  $P$  musi być nawpół wysrebrzona, gdyż jedynie przy zachowaniu powyższego warunku otrzymuje się wyraźne, piękne prążki interferencyjne.

Klocki porównywane umieszcza się na płytce kwarcowej  $Q$ . W tym celu po oczyszczeniu klocków i płytki zapomocą spirytusu należy klocki zlekka dotrzeć do płytki, by otrzymać silną adhezję. Przy drugostronnem oglądaniu płytki  $Q$  nie powinno się zauważyć prążków Newtona, chyba, że klocek nie jest równy.



53. METODA POMIARÓW BEZWZGLĘDNYCH BENOÎT-PÉRARD. René Benoît dał metodę dokonywania pomiarów bezwzględnych zapomocą różnych promieniowań o określonej i znanej długości fali. Przy pomiarach metra międzynarodowego ta metoda posiadała doniosłą rolę, gdyż kontrolowała otrzymywane niezależnie wyniki.

A. Pérard zastosował zmienioną w szczegółach metodę Benoît'a do pomiarów klocków Johanson'a, oraz do pomiarów pokrewnych<sup>1)</sup>. Jest ona prosta i może znaleźć szersze zastosowanie w laboratorjach metrologicznych.

Jak wiemy z poprzedniego, z położenia prążków interferencyjnych, stanowiących krzywe jednakowej grubości warstewki powietrza, nie możemy określić bezpośrednio rzędu interferencji. Przy porównywaniu klocków pomiędzy sobą można rząd interferencji określić zapomocą mniej lub więcej pomysłowych sposobów. Ogólnie biorąc, dowolnemu punktowi w polu prążków interferencyjnych, w normalnych warunkach pomiaru, t. zn. przy prostopadłym względem warstewki kierunku oświetlenia i obserwacji, odpowiadać będzie grubość warstewki  $p = (k + r)$ , gdzie  $k$  jest nieznaną liczbą całkowitą, zaś  $r$  — resztą ułamkową, znaną z położenia danego punktu względem dwóch sąsiednich prążków, których rzędy interferencji wynoszą  $k$  oraz  $(k + 1)$ . Ową resztę ułamkową możemy określić z dość dużą dokładnością pod warunkiem otrzymania wyraźnych prążków interferencyjnych. Jak jednak znaleźć bezpośrednio  $k$ ?

W tym celu użyjmy kilku promieniowań o znanej długości fal  $\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_m$ . Jeśli podczas doświadczenia będziemy kolejno oświetlali daną warstewkę zapomocą różnych promieniowań i nie zaniedbamy przytem dokonania dwukrotnych pomiarów w celu wyrugowania możliwych błędów wskutek powolnych przesunięć np. wywołanych przez zmianę temperatury, to jako średnie z dwóch odczytań otrzymamy reszty ułamkowe; na mocy wzoru:

$$2d = (k_1 + \varepsilon_1) \lambda_1 = (k_2 + \varepsilon_2) \lambda_2 (= k_3 + \varepsilon_3) \lambda_3 = \dots = (k_m + \varepsilon_m) \lambda_m.$$

Bierzemy za punkt wyjścia jedno z promieniowań np.  $\lambda_1$  i następnie obliczamy stosunki  $\lambda_1 : \lambda_2$ ;  $\lambda_1 : \lambda_3$ ;  $\dots \lambda_1 : \lambda_m$ . Aby wypróbować jakąkolwiek liczbę całkowitą  $k_1$ , dodajemy do niej resztę ułamkową  $\varepsilon_1$  i następnie przemnażamy sumę przez wyżej wspomniane stosunki. W wyniku otrzymujemy, po odrzuceniu części całkowitej, szereg reszt ułamkowych  $r_2, r_3 \dots r_m$ , które porównujemy z otrzymanymi doświadczalnie. Jeśli odrzucić przypadkowe błędy obserwacji, to reszty obliczone i zaobserwowane powinny być zgodne przynajmniej w zakresie pierwszego znaku dziesiętnego. Cała trudność polega na uciążliwych rachunkach, wynikają-

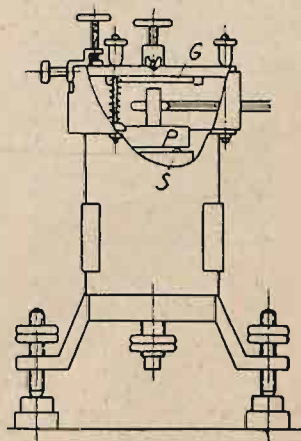
<sup>1)</sup> Albert Pérard. Procédés actuels pour l'étude des calibres industriels au moyen des interferences lumineuses. Revue d'optique Nr. 5. 1922.

cych z wypróbowywania różnych liczb całkowitych  $k$ . Jeśliby dany klocek posiadał wymiar znany z dokładnością do  $10\mu$ , to należałoby wypróbować około 30 różnych liczb całkowitych. Zwykle znamy jednak wymiary klocków z większą dokładnością, i odnośne obliczenia nie są znów tak żmudne.

$M_v$	$M_2$	$M_1$	$N_c$	$N_s$	$N_o$	$N_{r12}$	$M_i$
$m\mu$	$m\mu$	$m\mu$	$m\mu$	$m\mu$	$m\mu$	$m\mu$	$m\mu$
546,0746	576,9598	579,0660	585,2488	587,1895	594,4834	640,2245	435,8325
$r_1 = 0,53$	$r_2 = 0,02$	$r_3 = 0,22$	$r_4 = 0,97$	$r_5 = 0,64$	$r_6 = 0,16$	$r_7 = 0,91$	$r_8 = 0,63$
43789,53	41445,44	41294,69	40858,43	40654,16	40223,75	37349,95	54865,92
43790,53	6,38	6,63	9,37	5,09	4,67	37350,80	7,17
1,53	7,33	6,58	40860,30	6,02	5,59	1,65	8,42
2,53	8,28	7,52	1,23	6,95	6,50	2,51	9,68
3,53	9,22	8,46	2,17	7,87	7,42	3,36	54870,93
4,53	41450,17	9,41	3,10	8,80	8,34	4,21	2,18
5,53	1,12	41300,35	4,03	9,73	9,26	5,06	3,43
43796,53	41452,06	41301,29	40864,97	40660,66	40230,18	37355,92	54874,69
7,53	3,01	2,24	5,90	1,59	1,10	6,77	5,94
8,53	3,96	3,18	6,83	2,52	2,02	7,62	7,19

Omawiana metoda zgodności wyników (methode des coïncidences) daje pewne wyniki pod warunkiem dokładnej znajomości reszt ułamkowych i stosunków długości fal. Pérard w tym celu zaleca stosowanie promieniowań, otrzymywanych zapomocą lampy rtęciowej niskowoltowej, oraz neonowej. Odpowiednie długości fal mało różnią się pomiędzy sobą, i za pośrednictwem ciekawej metody rachunkowej (l. c.), której nie będziemy tu bliżej omawiać, można na podstawie znajomości reszt ułamkowych wyznaczyć granice, w których pozostaje dany wymiar. Metoda powyższa polega na obliczaniu t. zw. okresów zgodności.

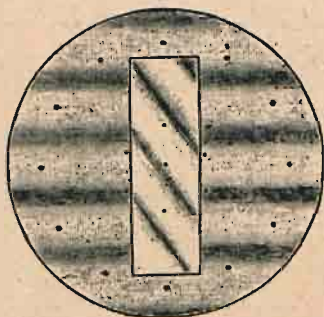
Technika Perarda polega na skierowaniu światła naprzemian z lampki rtęciowej i neonowej przez monochromator pryzmatowy do interferometru, opartego na tej samej zasadzie, co i komparator Köster'a, ale bez porównania prostszego, gdyż składającego się jedynie ze stolika  $S$  z płytką stalową  $P$ , spoczywającą na kulkach (rys. 169). Nad stolikiem w pewnej odległości umieszczona jest płytka szklana  $G$ , na której wyznaczone są punkty czarne. Płytkę powyższą zapomocą subtelnej regulacji można



Rys. 169



ustawić pod znikomo małym kątem względem płytki stalowej  $P$ , przyczem otrzymuje się kilka prążków. Ogólny widok zjawiska jest przedstawiony na rys. 170. Nazewnątrż otrzymujemy prążki pomiędzy płytką szklaną  $G$  i stalową  $P$ , pośrodku prążki na powierzchni badanego klocka. Położenia prążków w stosunku do zaznaczonych czarnych punktów ocenia się na oko.

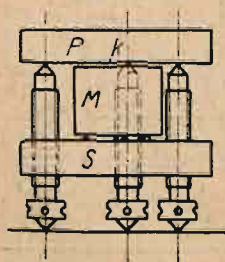


Rys. 170. Wewnątrz prostokąta, odpowiadającego klockowi, prążki interferencyjne, powstające pomiędzy powierzchnią klocka i płytki szklanej; nazewnątrż prążki, powstające pomiędzy dwoma płytkami szklanymi. Punkty czarne służą do ustalenia położenia prążków

Jak widzimy z powyższego, Pérardowi udało się znacznie uprościć aparaturę bez szkody dla ścisłości pomiarów. Z doświadczeń, jakich dokonał on przy posilkowaniu się opisanym przyrządem, na uwagę zasługuje znalezienie minimalnej grubości smaru, stosowanego w celu zapewnienia odpowiedniej adhezji klocka względem płytki stalowej. Wynosi ona w dobrych warunkach zaledwie 0,2 do 0,3  $\mu$ . Pozatem, Pérard badał specjalnie stratę fazy, wynikającą z pewnego przenikania światła włąb lustra metalowego. Badania te wykazały istnienie tej straty. Mianowicie, można przyjąć, że odbicie od płaszczyzny stalowej zachodzi nie na płaszczyźnie mechanicznej, a na optycznej, nieco pograżonej włąb ośrodka metalowego. Jako

średnią wartość tej odległości dla różnych promieniowań Pérard znalazł 0,073  $\mu$ . Płaszczyzna mechaniczna dla szkła wydaje się być identyczną z płaszczyzną optyczną.

54. DILATOMETR FIZEAU. Zapomocą metod interferencyjnych można określić współczynnik rozszerzalności różnych ciał. Do tego celu



Rys. 171

służy stolik interferencyjny, obmyślony i wykonany przez Fizeau (rys. 171). Składa on się ze statywu na trzech nóżkach, wykonanych z platyny lub stali. Płytkę  $S$  posiada wierzch, optycznie płaski i odpolerowany. W stoliku tym osadzone są trzy szpice, na których spoczywa próbka z badanego materiału  $M$ . Nad stolikiem w pewnej odległości umieszczona jest planparalełka  $P$  z małym krążkiem srebrnym  $k$ , stanowiącym punkt pomocniczy dla obserwacji (rys. 171). Płytkę  $P$  ustawia się tak zapomocą śrub, by pomiędzy płaszczyzną stolika  $S$ ,

a spodem płytki otrzymywała się zlekka stożkowa warstwa powietrza. W dilatometrze Priest'a stolik  $S$  (rys. 172), wykonany z kwarcu, posiada krawędź, o którą opiera się płytka  $P$ .

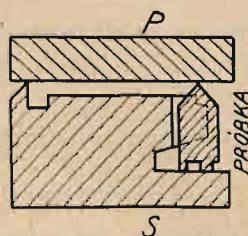
W dilatometrze (rys. 173), zbudowanym, według wskazówek Benoît, dla międzynarodowego biura miar, stolik Fizeau jest umieszczony wewnątrz puszkii *B*, wykonanej z grubej blachy miedzianej. Puszka ta znajduje się w naczyniu szklanem *E*. Całość osłonięta jest blachą miedzianą, obitą nazewnątrz wołokiem. Zwykle całość umieszcza się w naczyniu cynkowym o podwójnych ściankach, które napelnia się lodem lub wodą.

Światło, wprowadzone do środka przez otwory z boku, zostaje odrzucone na dół w kierunku pionowym za pośrednictwem pryzmatu *D*. Kilka termometrów *t*, znajdujących się wewnątrz dilatometru, można obserwować, podobnie jak i prążki interferencyjne, zapomocą odpowiednich lunetek. Naczynie wewnętrzne ogrzewa się zapomocą palników gazowych, regulowanych samoczynnie zapomocą termometru.

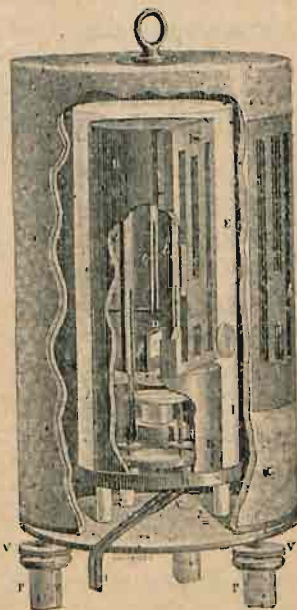
Pierwszą czynnością musi być znalezienie spółczynnika rozszerzalności śrubek, podtrzymujących płytkę szklaną *P* w stoliku Fizeau. W miarę rozszerzania się tych śrubek zwiększa się odległość pomiędzy stolikiem *S* i płytką *P*, i prążki zaczynają wędrować, przechodząc kolejno przez punkt *m*. Po znalezieniu spółczynnika rozszerzalności śrubek można przystąpić do właściwego pomiaru. W tym celu umieszcza się na stoliku płytkę z danego materiału *M* z odpolerowanym wierzchem, pochylonym pod znikomym kątem względem płytki *P*, poczem obserwuje się wędrowanie prążków przy stopniowym ogrzewaniu próbki w danym odstępie temperatur. Rzecz prosta, że liczba mijających punkt *m* prążków odpowiada różnicy rozszerzenia śrubek stolika i próbki *M*.

W dilatometrze Abbe<sup>1)</sup> bieg wiązki promieni światła i obserwowanie odbywa się z góry. Odpowiedni schemat optyczny przypomina żywo optyometr. Mianowicie lunetka jest pozioma, i światło monochromatyczne dostaje się zboku. Różnica polega na tem, że przyrząd zaopatrzony jest w monochromator pryzmatowy i okular mikrometryczny do odczytywania odstępów międzyprążkowych.

Pomiary rozszerzalności nie należą do rzeczy łatwych i wymagają specjalnych instalacji. Z tego też względu większość komisji standar-



Rys. 172



Rys. 173

<sup>1)</sup> Müller-Pouillet's Lehrbuch der Physik. Tom II. O. Lummer. Optik — str. 759.



dyszacyjnych wprowadziły jako normalną temperaturę sprawdzianów 20° C. Temperaturę powyższą łatwo zrealizować w warunkach laboratoryjnych a nawet przemysłowych, dzięki czemu porównywanie najrozmaitszych maszyn, przyrządów i narzędzi mierniczych w tej samej temperaturze usuwa wiele niepożądanych sporów, dając pewność zgodności pomiarów.

## ROZDZIAŁ VIII.

### WYZNACZENIE METRA W DŁUGOŚCI FALI ŚWIETLNEJ

55. CHARAKTERYSTYKA PRACY MICHELSON'A. Odkąd tylko nauczono się mierzyć długości fal świetlnych z pewną dokładnością i stwierdzono niezależność pomiarów dokonywanych w różnych warunkach i czasie, zaczęły powstawać projekty ustalenia wzorca długości w postaci długości fali świetlnej określonej barwy. Pierwszy zdał sobie z tego właściwie sprawę Fizeau, pisząc: „un rayon de lumière avec ses series d'ondulations d'une ténuité extrême mais parfaitement régulière peut être considéré comme un micromètre naturel de la plus grande perfection, parfaitement propre à déterminer les longueurs“.

Właściwą pobudką do podjęcia zasadniczej pracy nad określeniem wartości metra w długościach fal świetlnych był referat „O możliwości ustalenia długości fali świetlnej, jako podstawowego wzorca długości“<sup>1)</sup>, w którym Michelson wspólnie z Morley'em wykazali, że można wypełnić wielką lukę, jaka istnieje pomiędzy długością metra, a długością fali świetlnej, posługując się pewną liczbą wzorców pośrednich, z których każdy posiadałby długość podwójną w stosunku do poprzedniego. Ponadto w referacie powyższym wskazano, że stosowanie przy pomiarach światła różnej barwy stanowić może doskonały sposób kontrolowania otrzymywanych wyników.

Na propozycję Komitetu Międzynarodowego Wag i Miar, A. A. Michelson, podówczas jeszcze prof. Clark University w Worcester (St. Zjedn.), podjął się wykonania interferometru, który został wypróbowany na wiosnę 1892 r. w pracowni Clark University. W lecie tegoż roku został on ustawiony w laboratorium międzynarodowego biura miar i wag w Breteuil pod Paryżem. Przy końcu października rozpoczęły się właściwe prace Michelson'a i Benoît'a z wyregulowanym już interferometrem, które na wiosnę 1893 r. uwieńczone zostały pełnym powodzeniem.

Pomiar metra w długościach fali składał się z dwóch oddzielnych operacji. Naprzód należało ustalić liczbę długości fali świetlnej, wysyłanej przez dostatecznie jednorodne źródło światła, w warstwie powietrza

<sup>1)</sup> Albert A. Michelson i Edw. W. Morley: On the feasibility of establishing a light-wave as the ultimate standard of length (American Journal of Science. Vol. XXXVIII str. 181 wrzesień 1889).