

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“¹⁾, 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

¹⁾ 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).

określonej grubości, wyznaczonej mianowicie zapomocą dwóch dokładnych i równoległych płaszczyzn, zamocowanych w sztywnej podstawie. Powtórę, należało porównać tę odległość z kreskami, wyznaczającymi długość metra międzynarodowego. Pierwsza operacja z natury rzeczy objęła wyznaczenie całkowitej liczby fal oraz reszty ułamkowej. Druga operacja składała się z dwóch części, a mianowicie, z porównania danej odległości z pomocniczym wzorcem kreskowym, wykonanym z tego samego materiału, co i suporciki z płytkami równoległymi, a następnie, wyrażenia tego pomocniczego wzorca, posiadającego w przybliżeniu długość metra, w funkcji długości metra-prototypu.

Wymienione operacje z punktu widzenia teoretycznego przedstawiają się niezmiernie prosto. Ale znikoma długość fal świetlnych w stosunku do metra zmusza do pokonania całego szeregu trudności. Michelson pokonał te trudności z takim talentem, że zarówno metody pomiarowe, jak i konstrukcja interferometru jego pomysłu, pozostaną przez długi czas nie tylko wzorem do naśladowania, ale i punktem wyjścia dla nowych pomysłów. Tak sam interferometr Michelsona, jak i jego liczne odmiany, są po dziś dzień niezastąpionymi przyrządami naukowymi, stosowanymi w zagadnieniach metrologicznych.

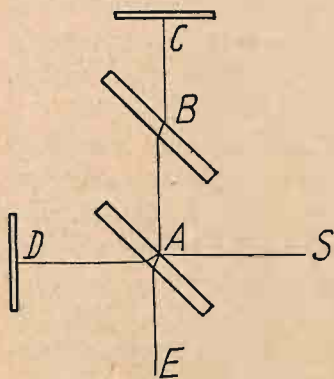
Metoda Michelsona w pierwszej linii polegała na użyciu zespołu etalonów pośrednich o długości 100; 50; 25; 12,5; 6,25; 3,125; 1,5625; 0,78125 i 0,390625 *mm*. Poza tem użyty został metr pomocniczy. Etalony pośrednie zostały porównane kolejno między sobą tak, że długość każdego z nich została wyrażona w funkcji poprzedniego z przybliżeniem, wynoszącym dziesiątą część długości fali.

Etalon 0,390625 *mm* został wyznaczony bezpośrednio w falach światła przez ich przeliczenie. Odnośna reszta ułamkowa została ustalona i skorygowana zapomocą oddzielnych pomiarów z dokładnością do setnych części długości fali. Powyższy etalon I został porównany następnie z dwa razy dłuższym etalonem II, przyczem reszta ułamkowa dla etalonu II została znów znaleziona doświadczalnie. W dalszym ciągu etalon II został porównany z etalonem III i t. d., aż wreszcie etalon IX o długości 100 *mm*, zaopatrzony w odpowiedni indeks kreskowy, został porównany z metrem pomocniczym zapomocą dziesięciokrotnego przedstawienia go o swą długość. Metr pomocniczy został porównany z prototypem zapomocą komparatora z mikroskopami, zaopatrzonemi w okulary mikrometryczne.

Zasadniczy schemat komparatora interferencyjnego jest przedstawiony na rys. 174. Składają się nań dwa lusterka płaskie *C* i *D* i dwie planparalelki *A* i *B*. Światło, wysyłane przez źródło *S*, pada pod kątem około 45° na przezroczystą srebrną błonkę, pokrywającą pierwszą powierzchnię planparalelki *A*. Tu promień rozdziela się, i jedna jego część przechodzi, padając na lustro płaskie *D*, zaś druga odbija się i skiero-

wywuje ku lusterku *C*. Oba lusterka odrzucają światło na planparalelkę *A*, gdzie pierwsza część jest odbita, zaś druga przechodzi, poczem obie wiązki zespolone zbiegają się w oku obserwatora lub w lunecie, umieszczonej w *E*.

Planparalełka *B* tej samej grubości, co i *A*, ma za zadanie usunąć pewne straty fazy. Pozatem używa się jej jako kompensatora do poręcznego i precyzyjnego mierzenia fazy prążków interferencyjnych.

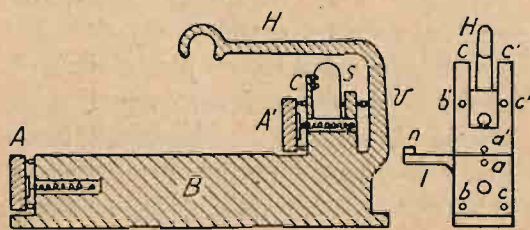


Rys. 174

Chwila rozważy wystarczy, aby się przekonać, że ten schemat jest równoważny pod każdym względem warstwie powietrza, zawartej pomiędzy dwoma płaszczyznami. Zjawiska interferencyjne, jakie tu zachodzą, są identyczne ze zjawiskami w warstwie powietrza, o jakich mówiliśmy poprzednio. Położenie i wyrazistość prążków zależy w danym wypadku od pochylenia płaszczyzn granicznych i ich odległości.

Nie od rzeczy będzie dodać, że w zmodyfikowanym modelu interferometru promień, idący od *A* ku *D*, ulega jeszcze dodatkowemu odbiciu od lusterka pod kątem 45° tak, że lusterko *D*, zwane płaszczyzną odniesienia, zajmuje położenie równoległe względem *C*. Jest to zmiana nieistotna, lecz ważna ze względów konstrukcyjnych. Pomiaru metra dokonano już zapomocą modelu zmienionego.

56. KONSTRUKCJA INTERFEROMETRU MICHELSON'A. Urzeczywistnienie pomysłów, omówionych poprzednio, wymagało obmyślenia



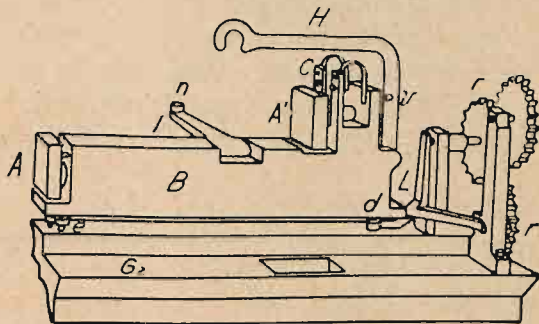
Rys. 175

różnorodnej aparatury doświadczalnej. A więc należało wykonać etalony pośrednie, zaprojektować i wykonać komparator interferencyjny z licznymi akcesorjami, zbadać wszelkie możliwe źródła światła i wyszukać najodpowiedniejsze promieniowanie, wreszcie izolować wybrane promieniowania jedno-

barwne od innych, zaprojektować subtelne regulowanie biegu promieni w aparacie, a wkońcu obmyśleć najdogodniejsze sposoby obserwacji.

Etalony pośrednie, w liczbie dziesięciu, zostały wykonane wszystkie z tego samego metalu. Pomimo znacznych różnic pod względem długości, konstrukcja ich była podobna, i wystarczy opisać jeden z nich, na przykład

etalon IX o długości 10 cm. Rys. 175 wskazuje, że jest to klocek prostokątny, *B*, wykonany z brązu, którego przekrój wynosi 20×25 mm. Z przodu jest on zaopatrzony w trzy wystające ćwieczki brązowe *a*, *b* i *c*, zaokrąglone i odpolerowane, o które opiera się płytka płaska optycznie *A*. Z drugiego końca klocek posiada dwa wystające oporniki *C* i *C'*, przyczem trzy ćwieczki *a'*, *b'* i *c'* mają za zadanie być oparciem dla drugiej płytki szklanej *A'* (rys. 176). Do oporników *C* i *C'* przymocowane są sprężyny wstążeczkowe ze stali *s* i *s'*, których nałożenie reguluje się zapomocą śrubek *v*.



Rys. 176. Etalon optyczny

Od spodu etalon jest zaopatrzony w mały otwór z przodu, w rowek podłużny i małą płaszczyznę oporową z tyłu. Jest to znane rozwiązanie Kelwina, dzięki któremu etalon może być zawsze umieszczony zpowrotem na trzech kołkach zaokrąglonych, w jakie są zaopatrzone saneczki *G*, bez widocznej zmiany wzajemnego położenia. Do podnoszenia etalonu służy haczyk *H*.

Etalon IX tem się różni od poprzednich, że jest zaopatrzony we wskaźnik z guziczkiem niklowym *n*. Na górnej części tego guziczka jest wykonana kreska, umożliwiająca porównywanie tego etalonu z metrem pomocniczym.

Lusterka przednie *A* i tylne *A'* posiadają idealnie płaskie ścianki przednie, starannie wysrebrzone. Zapomocą przyklejonej do szkła blaszki mosiężnej, do której przymocowana jest sprężyna, lusterka są dociskane do ćwieczków. Napięcie sprężynki można regulować zapomocą kołeczka, do którego przymocowany jest drugi koniec sprężynki. Aby osiągnąć równoległość lusterek, zgina się wystające oporniki *C* i *C'* zapomocą sprężynek i śrubek *v*. Ten rodzaj regulacji okazał się niezastąpionym ze względu na swą subtelność.

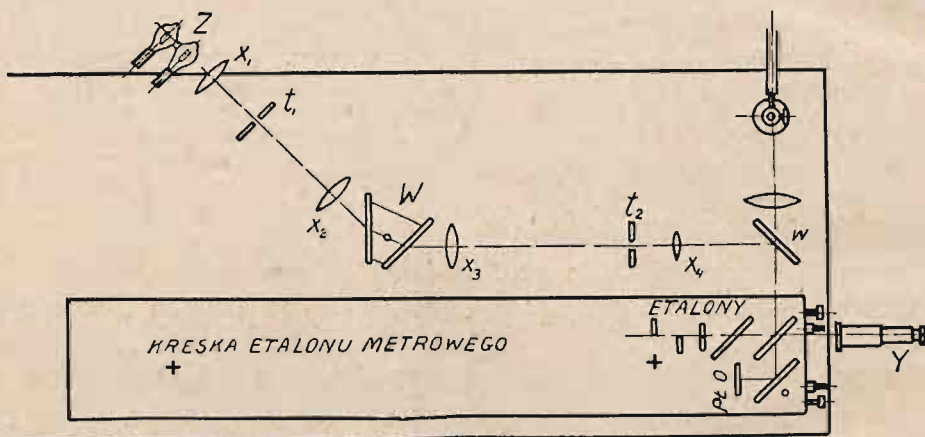
Rys. 177 przedstawia ogólny schemat instalacji interferometru, zaś rys. 178 — jego najważniejszy przekrój i widok z góry. Ciężkie i masywne łożo żeliwne zaopatrzone jest w prowadnice *P-P*. W środek wstawiona jest belka *Q*, do której przymocowane są stalowe prowadnice *s₁*, *s₂* i *s₃*. Prowadnice *s₁* i *s₂* podtrzymują sanki *G₁* i *G₂*, zaś *s₃* prowadzi je z boku.

Przesuw podłużny sanki otrzymują za pośrednictwem nakrętek pociągowych i śrub, spoczywających na całej swej długości w półokrągłym wgłę-

bieniu, dzięki czemu unika się zupełnie ich zginania. Od obracania się nakrętkę chronią t. zw. ogonki, obejmujące prowadnicę E . Połączenie nakrętki z sankami G jest luźne i ma na celu uniknięcie przy pewnym położeniu śruby pociągowej wszelkiego możliwego nacisku.

Sanki nie opierają się na prowadnicach wzdłuż całej swej długości, i styk sprowadza się do trzech niewielkich powierzchni. Sanki G_2 posiadają w górnej części wyjęcie, odpowiadające kształtowi stolika T , na którym umieszczony jest etalon stały. Oba etalony stały i ruchomy umieszczone są obok siebie, tak, że można je obserwować i porównywać.

Sposób zamocowywania etalonów na sankach i na stoliku jest identyczny. Do tego celu służą trzy śruby d , e i f , z których jedna ma za-



Rys. 177. Schemat interferometru Michelson'a

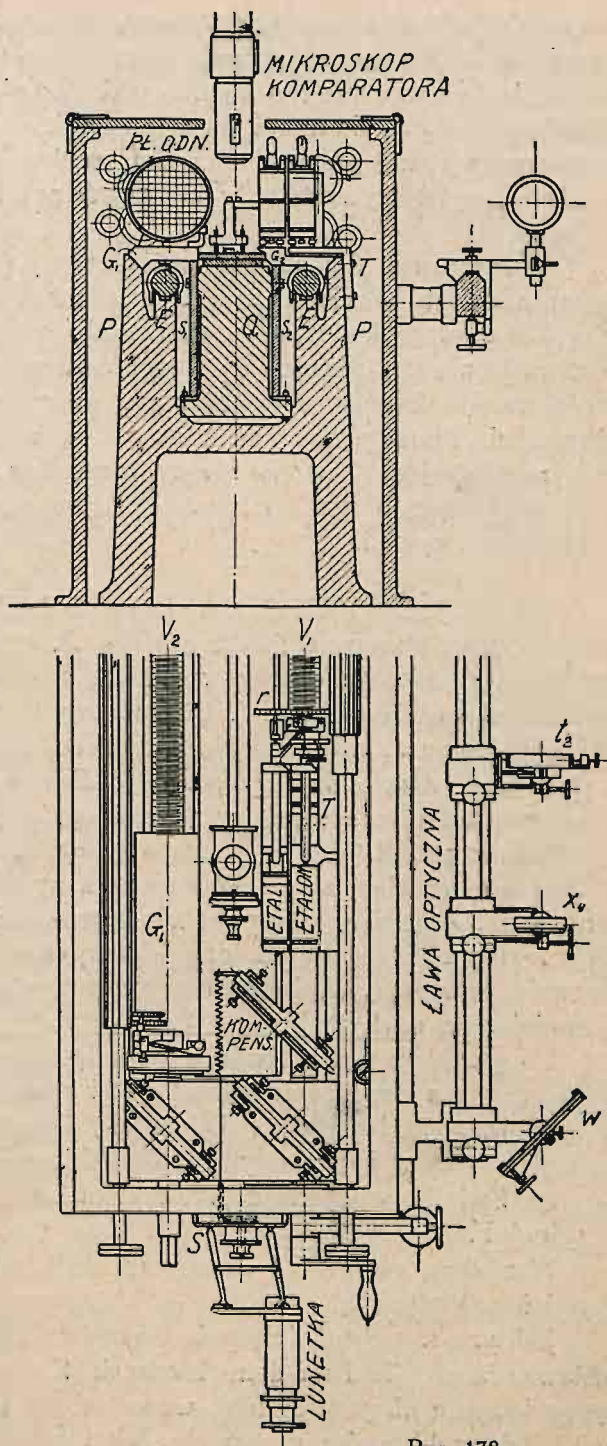
kończenie płaskie i opiera się o płaski występ dna etalonu, pozostałe zaś dwie posiadają zakończenia stożkowe. Jest to omówione już poprzednio rozwiązanie Kelwina: otwór-żłobek-płaszczyzna.

Omawiane trzy śruby nadają się do przedwstępного ustawienia etalonów. Aby precyzyjnie ustawić lusterka w kierunku prostym do prowadnic, trzecia śruba jest przymocowana do krótkiej trójramiennnej dźwigienki, połączonej z etalonem za pośrednictwem krótkiej sprężyny, przytrzymującej dźwigienkę w miejscu schodzenia się ramionek. Dokręcając śrubkę, której ostrze opiera się o ramię dźwigienki, zginamy sprężynę i udzielamy śrubie d przesuwu pionowego. Inna śrubka, działająca na ramionko, skręca sprężynę i nadaje śrubce d subtelny przesuw poziomy. Obrót śrubek dociskających nadaje się za pośrednictwem kółek zębatych r i r' , poruszanych zapomocą długich pręcików zębatych p , umieszczonych wzdłuż łoża.

Etalon, umieszczony na stoliku, jest taki sam, jedynie regulowanie położenia śrubki d odbywa się tu ręcznie, a nie zapomocą pręcików p .

Charakterystycznym szczegółem konstrukcyjnym jest powiększenie znaczne luzu międzyzębnego w przekładniach, co miało na celu uniknięcie wszelkich połączeń wskutek tarcia i zarazem wyrugowanie możliwych zwichrowań całości, któreby dały się bez wątpienia odczuć w postaci nieoczekiwanych przesunięć prążków interferencyjnych.

Doświadczenie wykazało, że zapomocą śrub pociągowych, pokręcanych za pośrednictwem przekładni zębatej, dzięki specjalnej konstrukcji nakrętek pociągowych i niezwykle starannemu odrobieniu przewodnic, było rzeczą łatwą ustawić lusterka etalonów z dokładnością, sięgającą dziesiątych części długości fali świetlnej. Jednak okazało się rzeczą pierwszorzędnego znaczenia pójść jeszcze dalej i osiągnąć dokładność w setnych częściach fali świetlnej. W tym celu obraca się płytkę kompensacyjną o bardzo mały kąt, wystarczający dla doprowadzenia prążka czarnego dokładnie do wybranej kreski. Oprawka z płytką jest przymocowana zapomocą śruby do brązowego pręta, wkręconego w nadlew łoża. Do łapki



Rys. 178

przymocowana jest sprężyna stalowa, naciągana za pośrednictwem nitki nawijanej na bleczek, przyczem tarczka wskaźnikowa S daje możliwość ocenienia znikomo małego kąta, o jaki odchyła się płytka. Tego rodzaju urządzenie odpowiada mniej więcej stosunkowi przekładni 1 : 10.000, przy zachowaniu pełnej proporcjonalności pomiarów. Podziałki na tarczce podziałowej wytarowywane były w długościach fali poszczególnych promieniowań.

W rozprawie Michelson'a zamieszczony jest wyczerpujący opis wykonania całego interferometru. Specjalistów mogą zainteresować szczegóły, dotyczące wykończania powierzchni prowadnic, dopasowywania części i sprawdzania dokładności wykonania. Niemniejsze znaczenie posiadają uwagi co do zabezpieczenia przyrządu od zmian temperatury podczas doświadczeń. Ponadto wartość praktyczną, nietylko historyczną, posiada opis nastroczających się w pracy trudności, sposoby ich pokonywania i wreszcie dane o ilości czasu, niezbędnego na wykonanie poszczególnych dopasowań.

57. CZĘŚĆ OPTYCZNA INTERFEROMETRU MICHELSON'A.
Światło, wychodzące ze źródła światła Z , przechodzi naprzód przez podwójną soczewkę zbierającą x_1 , która daje w odległości około 10 cm obraz części rurki kadmowej. Obraz powyższy jest zdiafragmowany za pomocą ekranu t_1 z otworem o szerokości około 3 mm. Ten otwór odgrywa rolę punktu świecącego. Pęk światła równoległy otrzymuje się zapomocą kolimatora x_2 o odległości ogniskowej około 30 cm. Wiązka promieni w przybliżeniu równoległa przechodzi przez pryzmat rozszczepiający z siarczkiem węgla W , umieszczony tak, by otrzymać najmniejsze odchylenie. Zapomocą soczewki x_3 skierowywujemy widmo na ekran t_2 , przyczem przechodzenie od jednej barwy do drugiej osiągamy przez pokręcanie pryzmatu W , który coprawda wychodzi wówczas z położenia najmniejszego odchylenia.

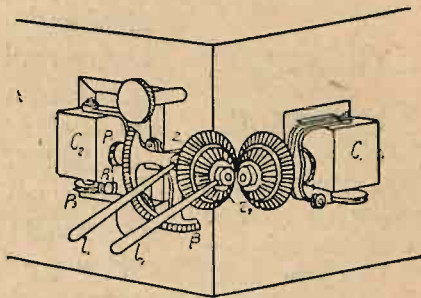
Po przejściu przez otwór w ekranie światło pada na soczewkę x_4 , która zapewnia dodatkowo równoległość promieni, poczem odbija się od lusterka w , nachylonego pod kątem 45° i regulowanego dowolnie w kierunku pionowym i poziomym, które skierowywuje światło do wnętrza aparatu. Światło, wychodzące z refraktometru, dostaje się do lunetki obserwacyjnej Y .

Wszystkie soczewki i ekrany są umieszczone na prowadnicy, stanowiącej ławę optyczną.

Jednym z najważniejszych organów interferometru jest aparat do nastawiania promieni na dany kierunek. Służy on do natychmiastowego wyregulowania biegu promieni, wchodzących i wychodzących z refraktometru, tak w kierunku pionowym, jak i poprzecznym. Organ powyższy

będziemy nazywali nastawnicą (rys. 179). Składają się nań dwa sześciany szklane C_1 i C_2 , umieszczone pod kątem prostym względem siebie i połączone ze sobą za pośrednictwem podwójnej przekładni zębatej tak, że mogą się one obracać równocześnie o ten sam kąt w płaszczyźnie pionowej pod działaniem dźwigienki l_1 , lub o jednakowe kąty, ale w przeciwnym kierunku w płaszczyźnie poziomej zapomocą dźwigienki l_2 .

Obrót w płaszczyznach pionowych otrzymuje się bezpośrednio zapomocą dźwigienki l_1 , osadzonej na osi z_1 . Segment uzębiony β wraz z odpowiednią sprężynką zapewnia stałe położenie dźwigienki l_1 . Dźwigienka l_2 jest osadzona na osi z_2 , umieszczonej wewnątrz osi z_1 . Na końcu tych osi wewnętrznych osadzone są kółka z obrzeżami, na które nawinięte są cięgna, działające za pośrednictwem kółek p_2 i p_3 na pionowe osi obrotu sześcianków szklanych.



Rys. 179. Nastawnica

Pozostaje jeszcze omówić źródło światła monochromatycznego, ustalone przez Michelson'a na mocy długoletnich, żmudnych badań, poprzedzających okres bezpośrednich pomiarów metra. Doprowadziły one do wniosku, że do doświadczeń metrologicznych nadają się najlepiej z ówczesnych źródeł światła rurki próżniowe Geislera z kadmem. Rurkę tą utrzymywano w temperaturze powyżej 200 i poniżej 300°, i przepuszczano przez nią prąd z cewki Ruhmkorffa.

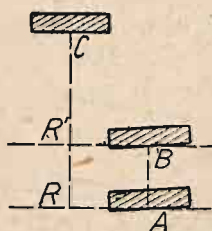
Pozostaje jeszcze omówić źródło światła monochromatycznego, ustalone przez Michelson'a na mocy długoletnich, żmudnych badań, poprzedzających okres bezpośrednich pomiarów metra. Doprowadziły one do wniosku, że do doświadczeń metrologicznych nadają się najlepiej z ówczesnych źródeł światła rurki próżniowe Geislera z kadmem. Rurkę tą utrzymywano w temperaturze powyżej 200 i poniżej 300°, i przepuszczano przez nią prąd z cewki Ruhmkorffa.

58. POMIARY MICHELSON'A I BENOÎT'A. Pierwszą czynnością było określenie liczby prążków, zawartych w najkrótszym etalonie. Oto jak Michelson opisuje odnośne pomiary:

„ R i R' (rys. 180) przedstawiają dwa położenia płaszczyzny odniesienia, oba równoległe względem lusterka stałego C (np. jednego z lusterek etalonu II), umieszczonego w odległości, zapewniającej otrzymanie prążków pierścieniowych wielkości dogodnej dla ich obliczania. A i B oznaczają dwa lusterka etalonu I, zlekka nachylonego w celu otrzymania w białym świetle prążków prostoliniowych, pionowych i właściwie rozstawionych. Błąd, wprowadzony przez owe pochylenie, jest najzupełniej znikomy.

„Po pozostawieniu aparatu samemu sobie na jakiś czas, w celu osiągnięcia zupełnej równowagi, sprowadzamy zapomocą sprężynki, działającej na kompensator, czarny prążek na I do położenia, wyznaczonego ściśle przez kreskę pionową na płaszczyźnie odniesienia. Po wyregulowaniu ogólny widok czterech lusterek przedstawia rys. 181 A. Odczytujemy po-

działkę a na tarczce kompensatora S . Następnie znów zapomocą kompensatora ustalamy w etalonie II zapomocą czerwonego światła kadmowego

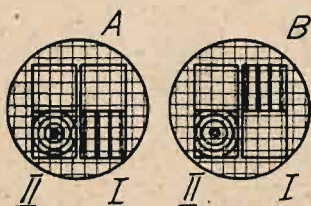


Rys. 180. Określanie liczby prążków w najmniejszym etalonie

fazę zerową, czyli taką, przy której otrzymuje się jednostajną plamkę czarną pośrodku pierścieni, i zapisujemy odnośną wartość b . Zaczynamy wówczas obracać powoli i jednostajnie śrubę V_2 , przesuującą płaszczyznę odniesienia i rachujemy prążki kołowe w miarę ich znikania w środku przy ich kurczeniu się. Podczas tego ruchu nie jest rzeczą możliwą zachować ściśle równoległość płaszczyzn, dla tak niewielkiego przesuwu, z jakim mamy do czynienia, można przyjąć jednak, że prowadnice są doskonale prostolinjowe, i zmiana fazy wypadkowej, wynikająca z tego tytułu, nie przekracza nigdy kilku dziesiątych prążka; ponadto, co

jest rzeczą ważniejszą, owe zmiany nie zachodzą nigdy nagle, tak, że z tego powodu nie zachodzi obawa zatracenia rachuby pierścieni.

„Gdy tak przebiegniemy, z dokładnością wynoszącą kilka fal, przestrzeń, dzielącą dwie powierzchnie etalonu, widzimy jak prążki, pochodzące ze światła białego, zaczynają się zjawiać na górnem lusterku. Przedtuzamy ruch nadzwyczaj powoli aż do chwili, gdy czarny centralny prążek na etalonie I znajdzie się prawie że na kresce zasadniczej, nie przerywając przytem ani na chwilę rachuby prążków na etalonie II. W tym momencie poprawia się nadzwyczaj dokładnie równoległość wzajemną płaszczyzny odniesienia



Rys. 181. Ustalanie położenia prążków

powierzchni II zapomocą sposobu, poprzednio omówionego. Owo nowe wyregulowywanie musi być uskuteczniiane nader powoli i ostrożnie, aby być pewnym, że się nie pominęło niepostrzeżenie całkowitego prążka.

„Widok powierzchni lusterek jest przedstawiony wówczas przez rys. 181. B. Sprawdzamy z jednej strony pierścienie na etalonie II do fazy zerowej zapomocą kompensatora, zanotowując odpowiednią wartość b_1 . Z drugiej strony doprowadzamy znowu dokładnie prążek achromatyczny na etalonie I do kreski zasadniczej i zapisujemy podziałkę a_1 .

„Liczba fal czerwonej barwy kadmu, zawarta w etalonie I wynosi więc:

$$N + \frac{1}{\tau_r} (b - b_1) - \frac{1}{\tau_b} (a - a_1),$$

gdzie N oznacza całkowitą liczbę prążków przeliczonych, zaś τ_r i τ_b oznaczają fazy kompensatora dla światła czerwonego i białego.

„Tym sposobem otrzymano 20 i 21 października 1892 r. wyniki następujące (prążki były liczone naprzemian przez R. Benoît i przezemnie, po sto prążków kolejnych):

Pierwszy pomiar	1212,61
Drugi pomiar	1211,83
Średnio	1212,22

„Różnicę pomiędzy tymi dwoma wynikami należy przypisać drobnemu przesunięciu jednego z etalonów podczas dość długiego odstępu czasu niezbędnego dla przeliczenia prążków. Byłoby rzeczą niezbędną powtórzyć wielokrotnie ten pomiar, gdybyśmy nie posiadali metod sprawdzania i absolutnej kontroli znalezionej liczby, co wynika z naszych rozważań.

„Przedwstępne porównanie wszystkich etalonów, następnie etalonu IX z metrem pomocniczym i wreszcie tego ostatniego z prototypem, wyznaczyło jako podwójną długość etalonu I prowizoryczną wartość 0,780392 mm. Skądinąd długość fali światła czerwonego kadmu, zmierzona zapomocą siatki dyfrakcyjnej Rowlanda, została określona jako równa 0,64389 μ . (Ames znalazł, że ta długość wynosi 0,64388 μ). Stosunek tych dwóch wielkości wynosi 1212,00, czyli jest liczbą, która zgadza się z wynikiem bezpośredniego liczenia prążków.

„Nie liczono zupełnie całkowitej liczby prążków, zawartych w etalonie I, dla innych promieniowań kadmu, zato zmierzono z największą starannością nadmiary ułamkowe, jednocześnie dla czterech barw. Znalezione liczby są zamieszczone w tablicy obocznej wraz z liczbami obliczonymi na podstawie znanych stosunków długości fal, przyjmując, że liczba 1212 jest dokładna dla promieniowania czerwonego. Ale rachunek powyższy jest dostatecznie dokładny, by określić ułamkowe części fali z dość znaczną dokładnością (sięgającą setnych części fali). Tak obliczone wartości ułamkowe powinny być dostatecznie zgodne z wartościami, otrzymanymi przez bezpośrednią obserwację:

Promieniowanie	Długość fali μ	Liczba fal zawarta w podwójnej długości etalonu I		
		Obs. Michelson	Obs. Benoît	Obliczona
Czerwone	0,64389	1212,37	1212,34	1212,35
Zielone	0,50863	1534,79	1534,79	1534,75
Niebieskie	0,48000	1626,18	1626,16	1626,29
Fioletowe	0,46789	1668,54	1668,52	1668,38

„Zgodność ułamków zaobserwowanych i obliczonych jest więcej niż dostateczna, aby zagwarantować, że liczba całkowita 1212 jest, poza możliwością błędu, liczbą długości fal światła czerwonego, która odpowiada podwójnej długości etalonu I. Jeśli przeprowadzić ten sam rachunek, zmieniając tę liczbę o jedną lub więcej jednostek, tak dodatnich jak

i ujemnych, zgodność pomiędzy ułamkami zaobserwowanymi i obliczonymi zanika w zupełności, i odchylenia przyjmują rząd wartości około $\frac{1}{4}$ fali.

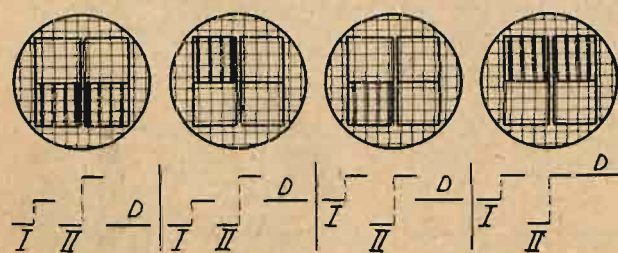
„Nie będzie nigdy rzeczą zbyteczną nalegać na wagę i doniosłe znaczenie tej kontroli, gdyż występuje ona przy każdym nowym etapie pracy i daje się jednakowo skutecznie zastosować przy porównywaniu wszystkich etalonów pośrednich, nie wyłączając ostatniego. Pewność tej metody jest taka, że mogłaby ona posłużyć do wyznaczenia bezpośredniego, bez jakichkolwiek innych czynności, liczby całkowitej, szukanej za każdym razem; porównywania etalonów pomiędzy sobą przy posilkowaniu się światłem białym, mogą być uważane za pomiary, ułatwiające jedynie wybór liczby całkowitej, która może w każdym wypadku ustalić zgodność pomiędzy nadmiarami ułamkowymi zaobserwowanymi i obliczonymi“.

59. METODA PORÓWNYWANIA ETALONÓW POŚREDNICH.

Metoda porównywania dwóch etalonów pośrednich, z których jeden jest dwa razy większy od drugiego, została oparta wyłącznie na zjawiskach interferencyjnych. W tym celu etalon dłuższy był umieszczony na stoliczku, zaś krótszy na ruchomych sankach.

Pierwsza czynność polegała na doprowadzeniu do styku optycznego z płaszczyzną odniesienia przednich lusterek obu etalonów. W tym celu użyte zostało światło białe. Aby wyrugować możliwe błędy, skądinąd niezmiernie małe, wynikające z krzywizny płaszczyzny odniesienia, doprowadzano czarny centralny prążek, obserwowany w świetle białym, do pionowej kreski tuż obok szczeliny dzielącej oba etalony. Odnośne kreski były wykonane na wysrebrzeniu płaszczyzny odniesienia.

Rys. 182 przedstawia cztery kolejne fazy porównania etalonów. Podczas pierwszej w styku optycznym z płaszczyzną odniesienia znaj-



Rys. 182. Kolejne położenia etalonów

dują się przednie lusterka etalonów I i II. Podczas drugiej — płaszczyzna odniesienia pozostaje w styku optycznym z tylnym lustrem etalonu I. Podczas trzeciej fazy etalon I jest cofnięty o całą swą długość, tak, że jego przednie lustro wchodzi w styk optyczny

z płaszczyzną odniesienia. Podczas ostatniej fazy płaszczyzna odniesienia wchodzi w styk optyczny z obu tylnymi lusterkami optycznymi etalonów.

Podczas tych wszystkich doświadczeń posługiwano się kompensatorem w celu osiągnięcia pełnej zgodności, co byłoby rzeczą niemożliwą, gdyby poprzestać na przesuwach etalonów lub płaszczyzny odniesienia.

Pozatem sprawdzano wyniki ściśle zapomocą metody nadmiarów ułamkowych, obliczanych i zaobserwowywanych dla różnych promieniowań. Najwięcej uwagi poświęcono pomiarom etalonu IX o długości 10 cm. Oto, co o tem pisze Michelson:

„Pomiar nadmiarów ułamkowych etalonu IX jest najważniejszą i najsubtelniejszą z czynności podczas całej pracy. Przy różnicy biegu (odstępie) 10 cm prążki są gęstsze, niż przy etalonach krótszych, i znacznie mniej wyraziste, zwłaszcza dla promieniowania niebieskiego. Pozatem wpływ zmian temperatury i ciśnienia atmosferycznego, wzrastający wraz z długością etalonu, staje się bardzo poważny, a ponieważ mamy tu do czynienia nie z pomiarem względnym, lecz zasadniczym, przeto elementy pomiaru muszą być wyznaczone z wielką starannością. Liczby fal, zawartych w podwójnej odległości lusterek, wynosiły tym razem około 400.000, zmiana temperatury o 0,01 stopnia odpowiadała różnicy 0,05 fali, wielkości łatwo ocenianej. Obserwacja termometru musiała uwzględniać tę skalę dokładności, i zmiany temperatury powinny były być na tyle powolne, by wyczyty (poprawione) odpowiadały rzeczywiście istotnej temperaturze znajdującego się obok etalonu.

„Z etalonem IX wykonano znacznie więcej doświadczeń niż z innemi. Ponieważ zależało przytem w danym wypadku na otrzymaniu raczej wartości bezwzględnych, niż porównawczych, przeto przy mierzeniu nadmiarów ułamkowych zmieniono nieco porządek obserwacji: uzupełniano pomiar fazy zapomocą kompensatora dla jednego z promieniowań dla obu płaszczyzn, zanim przystępowano do promieniowania innego. Przy tej metodzie wyzyskuje się możliwość, że spożytkowywane części lusterek mogą się nieco różnić dla trzech rodzajów promieniowań: jeśli nachylenie obu powierzchni jest wyczuwalne, zgodność wyników zobserwowanych i obliczonych musi być wówczas z konieczności rzeczy mniejszą. W praktyce okazało się jednak, że te obawy były płonne“.

W wyniku ostatecznym całej pracy Michelson i Benoît otrzymali następujące wartości metra w długościach fal świetlnych, mierzonych w powietrzu przy 15° C na skali termometru z twardego szkła i przy ciśnieniu 760 mm słupa rtęci

Czerwone	1 metr = 1 553 163,5 λ_c
Zielone	1 966 249,7 λ_z
Niebieskie	2 083 372,1 λ_n

Odwrotnie długość fal światła w tych samych warunkach wynosi:

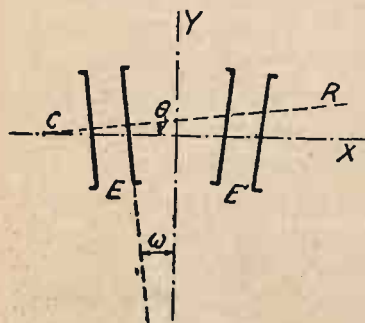
$$\begin{aligned} \mu \\ \lambda_c &= 0,643\,847\,22 \\ \lambda_z &= 0,508\,582\,40 \\ \lambda_n &= 0,479\,991\,07 \end{aligned}$$

60. NOWE OZNACZENIE METRA W DŁUGOŚCIACH FAL ŚWIETLNYCH, DOKONANE PRZEZ FABRY'EGO I PEROT'A.

Ze względu na doniosłe znaczenie pomiaru metra w długościach fal świetlnych Międzynarodowy Komitet Wag i Miar powierzył Fabry'emu i Perot'owi dokonanie nowego pomiaru metra zapomocą metod, różniących się zasadniczo od użytych przez Michelson'a, lecz opartych również na zjawiskach interferencyjnych. Fabry i Perot, wywiązując się z powierzono im trudnego zadania, sprawdzili pomiary Michelson'a z precyzją być może większą nawet od tej, jaką dał znakomity fizyk amerykański.

Zanim przystąpimy do omówienia tej metody, należy wspomnieć o pewnych zjawiskach interferencyjnych, odkrytych przez Brewster'a jeszcze w r. 1817. Polegają one na obserwowaniu prążków, występujących przy przechodzeniu wiązki promieni równoległych przez dwie plan-paralelki, znajdujące się w pewnej od siebie odległości, i tworzących między sobą niewielki kąt. Zjawiska te dają możność porównywania wzajemnego dwóch etalonów optycznych pod warunkiem, że stosunek długości ich będzie prosty np. $\frac{1}{2} : \frac{1}{3}$ i t. d. Niekiedy zapomocą tej metody można porównać długości optyczne, których stosunek wynosi $\frac{1}{10}$.

Etalony, jakich użyli Fabry i Perot, polegały na umieszczeniu w odpowiednich oprawkach nawpół wysrebrzonych lusterek, nieposzlakowane płaskich i wzajemnie równoległych. Wiązka promieni, przechodząca przez porównywane etalony, była obserwowana zapomocą lunetki, nastawionej na nieskończoność.



Rys. 183

Niech E i E' oznaczają dwie płytki powietrzne, ograniczone przez nawpół wysrebrzone lusterka, zaś e i e' ich grubości, niewiele różniące się między sobą. Płaszczyzny etalonu E tworzą z płaszczyznami E' mały kąt (rys. 183). Niech Cx będzie prostopadłą do dwusiecznej kąta międzyetalonowego. Zbadajmy stan rzeczy w układzie przy przepuszczeniu przezeń wiązki promieni ściśle równoległych, tworzącej z Cx kąt θ , zaś z prostopadłą do etalonów kąty α i α' . Różnica przebiegu wyniesie $\Delta = 2e \cos \alpha - 2e' \cos \alpha'$. Jeśli zauważymy, że kąty α i α' są bardzo małe, to różnica przebiegu będzie

$$\Delta = 2(e - e') + e(\alpha'^2 - \alpha^2) = 2(e - e') + 2e\omega\theta$$

biorąc pod uwagę zależności geometryczne z rys. 183.

Ponieważ e i e' należy uważać za wielkości stałe, podobne jak i kąt ω , przeto Δ zmienia się proporcjonalnie do kąta θ . Prążki są więc prostolinjowe, równoległe i prostopadłe do płaszczyzny rysunku.

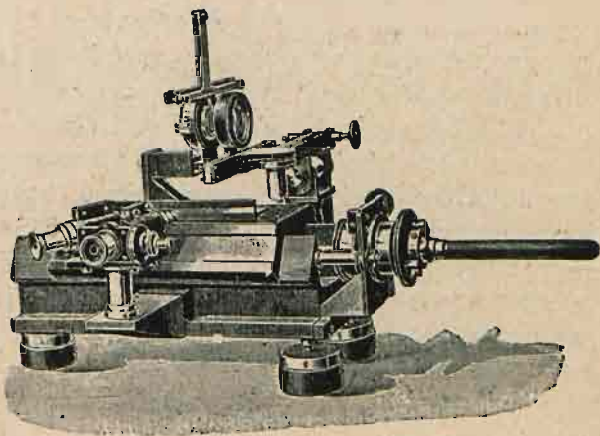
Odległość kątowna dwóch sąsiednich prążków wynosi $\frac{\lambda}{2e\omega}$. Prążek środkowy odpowiada $\Theta = \frac{e' - e}{e\omega}$.

Podobne zjawiska otrzymamy, jeśli zamiast etalonu o grubości e' , mało różniącej się od e , użyć etalonu o grubości mało różniącej się od $e/2$ lub $e/3$ i t. d.

Aby zaobserwować prążki, należy umieścić jeden etalon za drugim i przeświecić oba wiązką promieni białego światła. Możemy przytem użyć jednego etalonu o stałej grubości i drugiego o zmiennej, czyli interferometru (rys 184). Jeśli będziemy zmieniali stopniowo grubość etalonu w interferometrze, to spostrzeżemy prążki barwne, ilekroć ta grubość znajdzie się w prostym stosunku z grubością etalonu stałego. Daje to możliwość skopjowania zapomocą interferometru grubości danego etalonu, lub podzielenia jej na dwie lub trzy i t. p. części.

Można też z łatwością porównywać dwa etalony stałe pod warunkiem, że stosunek ich grubości jest prostą liczbą ułamkową.

Przystępując do pomiaru metra, Fabry i Perot postanowili stworzyć przyrząd, w którym metrologiczny etalon kreskowy, o długości mniej więcej metra, i dający się porównać z jego prototypem, byłby zarazem etalonem optycznym, dającym się określić bezpośrednio w długościach fali. W tym celu wykonali oni etalon o stałej odległości między dwoma wysrebrzonymi płaszczyznami, wynoszącej około 999,2 mm. Oprawa została wykonana z inwaru w kształcie belecarki o przekroju korytkowym. Na odpolerowanym i wysrebrzonym płaskim górnym boku każdej z płytek zostały nacięte kreski, równoległe do zasadniczych płaszczyzn optycznych. Etalon optyczny stał się tym sposobem rzeczywistym etalonem metrologicznym, wykonanym z inwaru, który można było z łatwością porównać z prototypem za pośrednictwem komparatora poprzecznego, zaopatrzonego w mikroskopy z okularami mikrometrycznymi. Porównania tego etalonu z pośrednimi etalonami optycznymi, jak z drugiej strony z metrem, można było dokonać równocześnie.



Rys. 184. Interferometr Fabry-Perot

Metrowy etalon optyczny nie nadawał się do pomiarów bezwzględnych, gdyż przy tej odległości żadne ze znanych promieniowań nie daje interferencji, którąby można zaobserwować. Należało użyć etalonów pośrednich o długościach 50; 25; 12,5 oraz 6,25 *cm*. Porównanie ich kolejno zapomocą superpozycji prążków interferencyjnych nie nastręczało trudności. Pozostało jedynie określić liczbę fal w najmniejszym etalonie i w tym celu użyto światła kadmowego.

Zaobserwowano pierścienie interferencyjne w nieskończoności wywołane w etalonie 6,25 *cm*, oświetlonym zapomocą czerwonego promieniowania kadmu. Pomiar średnicy pierwszego widzialnego pierścienia dał możliwość określenia nadmiaru ułamkowego rzędu interferencji. Co się tyczy liczby porządkowej, to znaleziono ją przez obserwowanie wzajemnego położenia pierścieni czerwonych i zielonych. Jeden z pierścieni czerwonych nałożony był zupełnie dokładnie na pewien pierścień zielony, co dawało możliwość odnalezienia zawsze bez omyłki tej samej liczby porządkowej. Pozatem zapomocą interferometru Fabry - Perot udało się, zmniejszając pięciokrotnie odległość 6,25 *cm*, i obserwując wzajemne położenia prążków kadmowych i rtęciowych, określić rząd interferencji.

Po dokonaniu czynności przedwstępnych można było pomiary zasadnicze wykonać w ciągu kilkunastu minut. Wielokrotne powtórzenie pomiaru zabezpieczało od błędów przypadkowych. Pozatem pozostał jeszcze pomiar odległości kresek w etalonie metrowym od płaszczyzn zasadniczych. Nie wchodząc w szczegóły tego pomiaru, należy zaznaczyć, że w tym celu płytki wysrebrzone zostały wyjęte z etalonu metrowego i założone kolejno w dwa znacznie krótsze etalony optyczne.

Wyniki pomiarów Fabry - Perot okazały się prawie identyczne z pomiarami Michelson'a. Długość fali czerwonego prążka kadmu w powietrzu przy 15⁰ C i normalnem ciśnieniu barometrycznem wyniosła 0,643 846 96 μ . Metr zawiera tym sposobem tych fal 1 553 164,13. Liczba ta była określona z dokładnością 0,1 μ . Ponieważ porównywanie prototypu z etalonami jest dokonywane z tą samą dokładnością, przeto można powiedzieć, że porównanie metra z długością fali osiągnęło precyzję, zawartą w definicji samego metra.

BIBLIOGRAFJA.

- Benoît, Fabry et Pérot.* Nouvelle détermination du rapport de longueurs d'onde fondamentales avec l'unité métrique. Travaux et Mémoires du Bureau International des Poids et des Mesures. Tom XV. Paryż 1913.
- G. Berndt u. H. Schulz.* Grundlagen und Geräte technischer Längenmessungen. Berlin 1921.
- Bouasse et Carrière.* Interferences. Paryż 1923.
- British Standard Tables giving Corrections to effective Diameter. Londyn 1919.
- Bulletin of the Bureau of Standards (Gage Section): B. 461. 1917. On the specification of the Threads. B. 466. 1919. Inspection of the Gages. B. 507. Shop Inspection of the Taper Threads Gages. B. 510. Design and Use of the Projecting Apparatus for Inspection of the Threads Gages. B. 511. Notes on the Microscope in Shop Measurements. B. 513 Apparatus for Pitch Measurements. B. Micrometer, Microscope and their Use. B. 522. Inspection of the Taper Gages. B. 523. Measurements concerning the effective Diameter of the Threads.
- M. A. Cotton.* Notes sur l'argenture du verre par le procédé au formol; Revue d'optique. 1924, str. 57.
- C. Dévé.* Étude cinématique du travail des surfaces optiques. Revue d'optique 1924, str. 108.
- Ch. Fabry.* Les applications des interferences lumineuses. Paryż 1923.
- L. Gages.* Standardisation. Théorie et pratique des calibres pour le production en série. Paryż 1919.
- R. T. Glazebrook.* Dictionary of Applied Physics. Vol. III. Metrology. Londyn 1923.
- E. Gehrcke.* Die Anwendung der Interferenzen in der Spektroskopie und Metrologie. Brunświk 1906.
- Ch. Ed. Guillaume.* La convention du mètre et le Bureau International des Poids et Mesures. Paryż 1902.
- Interim Report on British Standard Whitworth Screw Threads and their Tolerances. Londyn 1919.
- O. Kienzle.* Passungssysteme. Forschungsarb. a. d. G. des Ing. Zeszyt 259. Berlin 1923.
- W. Kühn.* Toleranzen. Berlin 1920.
- Macé de Lipinay.* Franges d'interferences et leurs applications métrologiques. Collection Scientia. Paryż 1902.
- A. A. Michelson.* Light Waves and their Uses. University of Chicago Press. 1902.
- Détermination expérimentale de la valeur du mètre en longueur d'ondes lumineuses. Tome XI. Travaux et Mémoires du Bureau International des Poids et Mesures. Paryż 1895.
- National Physical Laboratory. Notes on Screw Gauge. Londyn 1917.
- C. G. Petere and H. S. Boyd.* Interference Methods for Standardising and Testing Precision Gage Blocks. Scient. Paper Nr. 436 of the Bureau of Standards. Waszyngton 1922.

- I. G. Priest.* A new interferential dilatometer. Scient. Paper Nr. 365. Bureau of Standards. Report on British Standard Fine Screw Threads and their Tolerances. Londyn 1918.
- K. Scheel.* Grundlagen der praktischen Metronomie. Brunświk 1911.
- G. Schlesinger.* Passungen im Maschinenbau. Forschungsarb. a. d. G. des Ing. Zeszyt 193/4. Berlin 1917.
- A. Steinle.* (Iena) Neue optische Messverfahren für den Werkzeug- und Maschinnenbau. Maschinenbau 1924, str. 244.
- Optische Zahnradprüfungen Werkstattstechnik. 1924, str. 169.
- Stanley.* Accurate Tool Work. New-York 1917.
- A. E. H. Tutton.* A universal Interferometer. Proc. Roy. Soc. 1934, str. 47.
- H. T. Wright.* The Mechanical Measurements of Pitch. Machinery II. 237.
- J. W. Woodworth.* Gages and gaging Systems. 1908.



MP.53

SKOROWIDZ

	Str.		Str.
Aberacja sferyczna	119	Krawędź narzędziarska Johanssona . . .	88
Aparat projekcyjny National Physical Laboratory	134	Lampa rtęciowa	169
Aparat projekcyjny Hartness'a	135	Linja zerowa	17
Astygmatyczne wiązki	118	Linjał trójpunktowy	89
Czujniki	77	Lunetka autokolimacyjna	90
Czujnik Hirth'a	77	Luz maksymalny	3
Czujnik Goerz'a (digor)	78	Luz minimalny	3
Czujniki zegarkowe	79	Macki	57
Czujniki optyczne	80	Maszyna miernicza Newall'a	87
Czujnik optyczny Sears'a	84	Maszyna miernicza Pratt-Whitney'a . . .	145
Czujnik przeponkowy	86	Maszyna miernicza Zeissa	150
Czujnik mechaniczno-optyczny	152	Maszyna miernicza Shaw	153
Digor	78	Maszyna do nastawiania sprawdzianów różnicowych	155
Dilatometr Fizeau	186	Maszyna podziałowa Société Gènevoise .	158
Dilatometr Benoît	187	Maszyna do podziałek kątowych	160
Dilatometr Abbe	187	Maszyna do punktowania	161
Docieranie na farbę	89	Metody interferencyjne Waszyngtońskiego Bureau of Standards	177
Duplety symetryczne	130	Metoda pomiarów absolutnych Benoît-Pérard	184
Flank gwintu	33	Metoda trójdrukowa sprawdzania średnicy flankowej	98
Francuski układ pasowań	17	Mikrometr	62
Głębokomierz	61	Mikrometr Johanssona	65
Głębokomierz ukośny	61	Mikrometr nastawny Pratt-Whitney'a . . .	66
Interferometr Michelsona	190	Mikrometr Société Gènevoise	67
Jednostka pasowania w układzie niemieckim	26	Mikrometr do śrub	96
Jednostka pasowania gwintu	45	Mikrometr postumentowy do drucików National Physical Laboratory	100
Jednostka pasowania gwintu w ukl. ang. .	55	Mikroskop	124
Kalibry	68	Mikroskop Zeissa do mierzenia gruntów	137
Kalibry różnicowe	69	Mikroskop do sprawdzania podziałek kół zębatych i tarcz podziałowych	156
Komparator Prestwich'a	87	Niemiecki układ pasowań	20
Komparator projekcyjny Wilson'a	131	Nonjusz	60
Komparator Wickman'a	153		
Komparator interferencyjny Köster'a . .	180		
Kondensor	128		
Klocki Johanssona	165		

	Str.		Str.
Objektyw	124	Różnicowy trzpień śrubowy	95
Odontometr Pratt-Whitney'a	106	Różnicowy pierścień śrubowy	95
Odskok	34	Samorejestrujący komparator Hartmanna	141
Okular Ramsdena	125	Skośnica sinusowa	93
Okular Huygensa	125	Sprawdzian nastawny do otworów	71
Okular mikrometryczny	125	Sprawdzian widelkowy Johanssona	72
Optimetr Zeissa	81	Sprawdzanie płaszczyzn	88
Osadzenie szczelne	28	Sprawdzanie stożków	91
Osadzenie przylgowe	28	Sprawdzanie stożków drucikami	92
Osadzenie posuwiste	28	Sprawdziany Wickmana	97
Osadzenie ślizgowe	29	Sprawdzanie kół zębatach	106
Osadzenie ciasne obrotowe	29	Sprawdzian czujnikowy van West'a	107
Osadzenie obrotowe	29	Sprawdziany funkcyjne	108
Osadzenie obrotowe luźne	29	Średnica flankowa (efektywna)	33
Osadzenie bardzo luźne	29	Średnica pełna (wierzchołkowa)	33
Osadzenie gładkie posuwiste	29	Średnica rdzeniowa	33
Osadzenie gładkie obrotowe	30	Średnicówka mikrometryczna	65
Osadzenie gładkie luźne	30	Suwmiarka	58
Osadzenie śpicowe	79	Suwmiarka do kół zębatach	61
Pasowanie selekcyjne	4	Śruba mikrometryczna	63
Pasowanie spoczynkowe	28	Światło monochromatyczne	167
Pasowanie ruchowe	29	Tolerancja	3
Pasowanie gładkie	29	Trzpień mikrometryczny	65
Pasowanie zgrubne	30	Telecentryczny bieg promieni	124
Profil zerowy	39	Tulejka wzorcowa	91
Poziomnica (libella)	87	Układy pasowań	15
Przymiar linjałowy	92	Układy „mixte“	26
Przyrząd Bureau of Standards do sprawdzania skoku gwintu	104	Uniwersalna maszyna miernicza Société Gènevoise	146
Przyrząd do sprawdzania podziałek kół zębatach Fortuna-Werke	108	Uniwersalny komparator Wickman'a	149
Przyrząd do sprawdzania działania przekładni zębatach	109	Wzór Kelly'ego	13
Projekcyjna maszyna miernicza National Physical Laboratory do gwintów	136	Wzór Moore'a	13
Pierścienie interferencyjne	177	Wzór Schlesinger'a	13
Reguła sinusów	23	Wysokomierz	60
Równia optyczna	91	Wzorzec kątowy	94
		Wzór Abbe'go	123
		Zasada stałego otworu	3
		Zasada stałego wałka	4



np. 53

