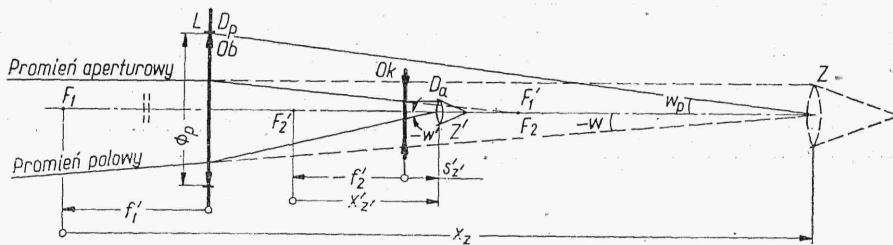


już wydobyć nowych informacji z obrazu, a tylko zwiększa kąt, pod którym widać już rozpoznane elementy. Zaczyna być dostrzegana struktura plamki dyfrakcyjnej obrazu punktu utrudniająca wizualną analizę obrazu.

#### 5.2.4. Typy lunet

##### Luneta Galileusza

Jeżeli obraz ma być powiększony i nieodwrócony ( $G > 1$ ), to dla najprostszego układu, zgodnie z równaniem (5.4), moce okularu i obiektywu muszą mieć znaki różnoimienne i ponadto musi być spełnione  $|f'_1| > |f'_2|$ . Łatwo wykazać, że możliwa jest wtedy konstrukcja lunety, której okular ma moc ujemną. Lunetę taką, nazywaną *lunetą Galileusza*, pokazano na rys. 5.4 w stanie podstawowym. Dla lunety o powiększeniu mniejszym niż 1 i o obrazie również nieodwróconym, kiedy  $0 < G < 1$ , elementem o mocy ujemnej będzie obiektyw.



Rys. 5.4

Żrenica wyjściowa lunety  $Z'$  powinna pokrywać się ze źrenicą wejściową oka, stąd źrenica wejściowa układu luneta-oko oznaczona tu przez  $Z$  sprzężona przez obiektyw i okular z  $Z'$  będzie zawsze leżała w przestrzeni pozornej obiektywu, niezależnie od położenia oka. Oznacza to, że nie można wstawić do przyrządu przysłony, która spełniałaby rolę przysłony aperturowej. Sama źrenica wejściowa oka jest tu źrenicą wyjściową przyrządu, a tęczówka oka przysłoną aperturową. Stąd jasność lunety *Galileusza* dla przedmiotów rozciągłych wynosi zgodnie z p. 5.2.2  $J_r = \eta$ . Liczba elementów jest tu niewielka, a więc straty energetyczne w układzie są małe. Konsekwencją tego jest wysoka jasność lunety *Galileusza*.

Obraz przedmiotów nieskończenie dalekich pozostaje w płaszczyźnie ogniskowej obrazowej obiektywu znajdującej się w pozornej przestrzeni przedmiotowej okularu. Brak płaszczyzny obrazu rzeczywistego jest poważną wadą tej lunety, gdyż uniemożliwia umieszczenie w niej płytki ogniskowej i przysłony pola. Z pierwszego powodu luneta *Galileusza* może być przeznaczona tylko do celów obserwacyjnych, z drugiego luka wejściowa nie leży w płaszczyźnie przedmiotu i nie ma ostrego ograniczenia pola widzenia.

Okular znajduje się blisko oka i dlatego zwykle przysłoną pola  $D_p$  i luką wejściową  $L$  układu jest oprawa obiektywu. Oznaczając średnicę oprawy przez  $\Phi_p$ , kąt pola widzenia  $w_p$ , przestrzeni przedmiotowej określony (p. 2.5.1) dla winietowania geometrycznego bliskiego 50% zgodnie z oznaczeniami rys. 5.4 wyniesie

$$\operatorname{tg} w_p = \frac{\Phi_p}{2(x_z - f'_1)}$$

Uwzględniając zależności (2.20), (5.4) oraz (5.5) otrzymuje się

$$\operatorname{tg} w_p = \frac{\Phi_p}{2f_1' \left[ G \frac{1}{1 - \frac{x_{z'}'}{L}} \frac{x_{z'}'}{(-f_2')} - 1 \right]}$$

Ponieważ dla osób normalnowzrocznych wartość  $x_{z'}'/L$  jest pomijalnie mała w porównaniu z 1 oraz oznaczając  $x_{z'}' = -f_2' + s_{z'}'$ , gdzie  $s_{z'}'$  jest odległością źrenicy wejściowej oka od płaszczyzny głównej obrazowej okularu, wówczas

$$\operatorname{tg} w_p = \frac{\Phi_p}{2f_1' \left( G - 1 + G \frac{s_{z'}'}{-f_2'} \right)} \quad (5.15)$$

Dla  $G > 1$  jest  $-f_2' > 0$ , natomiast dla  $0 < G < 1$ ,  $-f_2' < 0$ . Oznacza to, że w obu przypadkach wraz z odsuwaniem oka od okularu (wzrost  $s_{z'}'$ ) maleje kąt pola widzenia lunety Galileusza. Ponadto pole widzenia lunety jest tym większe, im większy jest otwór względny obiektywu  $1:N = \Phi_p/f_1'$  i mniejsze powiększenie  $G$ . Wzrost otworu wiąże się jednak ze wzrostem aberracji układu i koniecznością komplikowania konstrukcji obiektywu w celu ich kompensacji.

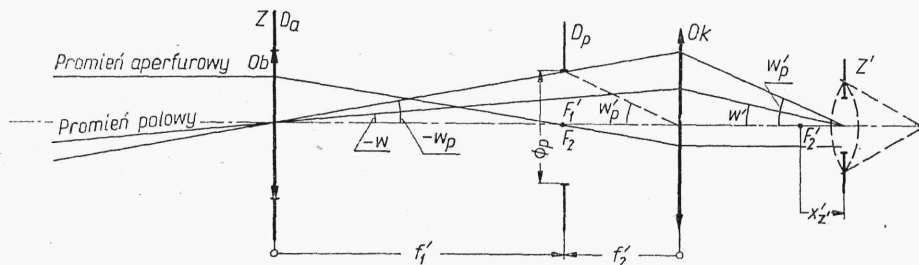


Rys. 5.5

Luneta Galileusza jest układem prostym i o małych gabarytach, lecz z uwagi na wymienione poprzednio wady rzadko stosowanym. Najczęściej wykorzystywana jest do budowy lornetek teatralnych oraz jako układy okularowe dla słabowidzących. Typowy układ optyczny lunety o powiększeniu  $2,5 \times$  i  $2w_p = 8^\circ$  pokazano na rys. 5.5.

### Luneta Keplera

Wpływ położenia oka względem lunety. Jeżeli obraz może być odwrócony np. w przypadku obserwacji astronomicznych, wówczas wstawiając w miejsce okularu ujemnego układu dodatni, powstanie luneta Keplera (rys. 5.6). Z uwagi na gabaryty obiektywu za przysłonę aperturową  $D_a$



Rys. 5.6

lunety najwygodniej jest dobrać jego oprawę, która będzie zarazem źrenicą wejściową. Źrenica wyjściowa  $Z'$  lunety, będąca obrazem przysłony aperturowej odwzorowanym przez układ leżący za nią, jest w tym przypadku obrazem oprawy obiektywu danym przez okular. Źrenica wyjściowa znajduje się w jego przestrzeni rzeczywistej i może się pokrywać ze źrenicą wejściową oka.

Odległość źrenicy wyjściowej od ogniska obrazowego okularu

$$x'_{z'} = \frac{f_2'^2}{f_1'} = -\frac{f_2'}{G} \quad (5.16)$$

Obraz przedmiotu dostatecznie odległego dany przez obiektyw powstaje praktycznie w jego płaszczyźnie ogniskowej obrazowej, w której zwykle również stawia się przysłonę pola  $D_p$  ostro ograniczającą pole widzenia przyrządu. Przedmiotowy kąt pola widzenia

$$\operatorname{tg} w_p = \frac{\Phi_p}{2f_1'} \quad (5.17)$$

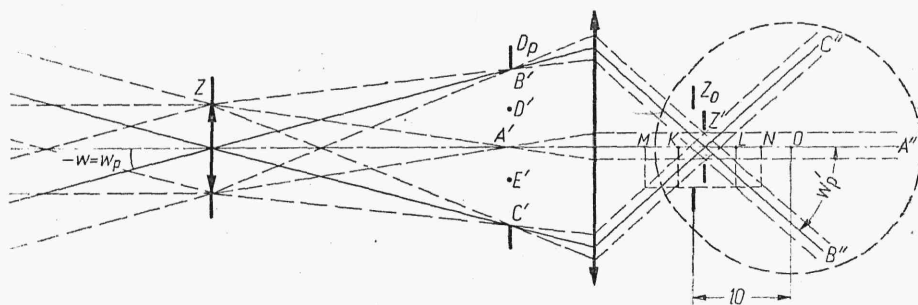
gdzie  $\Phi_p$  — średnica przysłony pola.

Odpowiednio obrazowy kąt pola widzenia z pominięciem wpływu dystryksji układu i akomodacji obserwatora

$$\operatorname{tg} w_p' = |G| \frac{\Phi_p}{2f_1'} = \frac{\Phi_p}{2f_2'} \quad (5.18)$$

Promienie aperturowy i polowy układu zaznaczono na rys. 5.6.

Ponieważ oko jest elementem niezależnym od lunety, to mogą występować względne ich przemieszczenia, które będą wpływały na obraz odbierany przez obserwatora. Rozważania zostaną tu ograniczone do najczęściej spotykanego przypadku, kiedy źrenica wyjściowa lunety jest mniejsza niż źrenica wejściowa oka (rys. 5.7). Dla uproszczenia niech luneta



Rys. 5.7

będzie w układzie podstawowym. Ciągłą linią zaznaczono trzy promienie polowe wybrane przykładowo dla kątów pola  $w = 0$  i  $w = \pm w_p$ , natomiast przerywaną odpowiadające im skrajne promienie pęków.

Niech  $Z_0$  oznacza źrenicę wejściową oka, natomiast  $Z'$  — źrenicę wyjściową lunety. Zakładając chwilowo, że środek źrenicy oka znajduje się na osi układu i występują tylko przemieszczenia wzdłuż jego osi, wówczas dla położenia źrenicy w przedziale  $KL$  wszystkie promienie przechodzące przez lunetę wejdą również do oka. Ogólnie biorąc jakość odwzorowania obrazów punktów w płaszczyźnie siatkówki może się zmieniać

z uwagi na zmianę aberracji układu optycznego oka przy przemieszczeniach względem niego promieni głównych. Jeżeli jednak uwaga obserwatora jest skupiona na obrazie  $A''$  leżącym na osi układu (punkt fiksacji), wówczas pęk promieni tworzący obraz tego punktu przechodzi do oka w jednakowy sposób niezależnie od przemieszczenia oka wzdłuż osi i jakość odwzorowania punktu  $A$  nie ulega wtedy zmianie. Ewentualna zmiana jakości obrazu poza osią jest mniej istotna z uwagi na szybki spadek zdolności rozpoznawania szczegółów przez oko wraz ze wzrostem kąta polowego (p. 4.3).

Gdyby nastąpiło takie przemieszczenie oka, że źrenica  $Z_0$  wyjdzie poza przedział  $KL$ , wówczas występuje zjawisko winietowania geometrycznego, a dla położenia w płaszczyznach przechodzących przez punkty  $M$  i  $N$  nawet obcięcie obrazów punktów  $B$  i  $C$ . W tym przypadku tęczówka oka przyjęła rolę przysłony pola w układzie luneta-obszawator. Aby więc wykorzystać pełne pole dawane przez lunetę wymagane jest odpowiednie ustawienie źrenicy wejściowej względem źrenicy wyjściowej przyrządu. Dokładność ustawienia jest tym wyższa, im większy jest kąt pola obrazowego  $w_p'$  przyrządu i im mniejsza jest średnica źrenicy wejściowej oka. W ogólnym przypadku zjawisko to ma charakter nieco bardziej złożony z uwagi na istniejące aberracje w źrenicach przyrządu. Położenie źrenicy wyjściowej zmienia się wraz z kątem pola i może np. występować przy pewnych położeniach oka obcinanie stref pośrednich pola (np. punkty  $D$  i  $E$  na rys. 5.7).

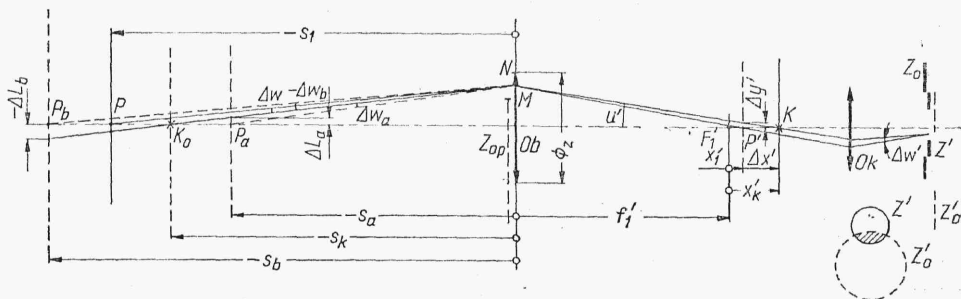
Przy przemieszczeniach poprzecznych oka względem osi optycznej przyrządu, zgodnie z rozważaniami p. 4.3, występuje obniżenie zdolności rozdzielczej oka. Wymagana dokładność ustawienia oka względem przyrządu, przy pomijalnie małej zmianie jakości obrazu wynosi około 0,5 mm (rys. 4.10). Poza tym środek obszaru źrenicy oka o najwyższej zdolności rozpoznawczej jest przesunięty średnio o 0,3 mm w stronę nosa, co jest faktem nieistotnym przy obserwacji jednoocznej, gdyż obserwator dobiera takie położenia oka względem przyrządu, aby obraz był najbardziej wyraźny, natomiast będzie miał znaczenie przy obserwacji przez przyrządy binokularowe, kiedy wymagane jest odpowiednie dobieranie odległości źrenic wyjściowych przyrządów do rozstawu oczu obserwatora.

Możliwie najlepsze wykorzystanie możliwości danego przyrządu wiąże się więc z dość dokładnym ustawieniem przestrzennym oka względem niego. Dokładności ustawienia są tym większe, im większy jest obrazowy kąt pola widzenia przyrządu.

Jeżeli punktem fiksacji jest punkt leżący poza osią optyczną lunety, np. punkt  $C''$ , wówczas obserwator musi dokonać takiego zwrotu gałki ocznej, aby obraz punktu  $C$  znalazł się w dołku środkowym siatkówki. Środek obrotu  $O$  gałki ocznej znajduje się w odległości około 10 mm od źrenicy wejściowej oka i tym samym zwrot gałki ocznej powoduje poprzeczne przemieszczenie źrenicy oka. Oznacza to, że do analizy obrazu obserwowanego przez nieruchomy przyrząd wraz ze zwrotem gałki ocznej konieczne są poprzeczne przemieszczenia oka względem przyrządu.

W lunecie *Keplera* w płaszczyźnie obrazu rzeczywistego można wstawić płytkę ogniskową umożliwiającą pomiar kątów między różnymi elementami przedmiotu. W jednym przypadku będzie to krzyż, przy którym pomiar kątów odbywa się przez celowanie i obrót przyrządu, w drugim zaś podziałka pozwalająca bezpośrednio mierzyć wspomniany kąt w zakresie kąta pola widzenia.

Niech  $P$  (rys. 5.8) będzie płaszczyzną przedmiotu lunety a  $P'$  jest obrazem danym przez obiektyw. W ogólnym przypadku płaszczyzna płytki ogniskowej z krzyżem  $K$ , nie pokrywa się z płaszczyzną obrazu  $P'$ . Różnica położen  $x'_K - x'_1$  może wynikać nie tylko z błędów montażowych przyrządu, ale również ze zmiany odległości  $s_1$  przedmiotu od lunety w stosunku do założonej. Ponieważ oko ma swobodę w doborze swego położenia, to może nastąpić takie jego przemieszczenie, że żrenica wejściowa oka  $Z_0$  znajdzie się w położeniu  $Z'_0$ . Żrenica wyjściowa układu lune-



Rys. 5.8

ta-oko będzie miała wtedy kształt pokazany w prawym dolnym rogu rysunku (obszar zakreskowany) i jej środek przesunie się poza oś optyczną lunety. Rozpatrując zjawisko w przestrzeni przedmiotowej lunety oraz oznaczając przez  $Z_{op}$  obraz żrenicy oka  $Z'_0$  w tej przestrzeni, a przez  $K_0$  płaszczyznę sprzężoną przez obiektyw z  $K$ , wówczas środek żrenicy wejściowej układu luneta-observator będzie się znajdował w punkcie  $M$ . Przy przemieszczeniu oka obserwator odniesie wrażenie, że nastąpiło przesunięcie punktów  $P$  i  $K_0$  o kąt  $\Delta w$  w przestrzeni przedmiotowej, lub o odpowiadający mu kąt  $\Delta w'$  w przestrzeni obrazowej. Zjawisko to noszące nazwę *paralaksy położenia* (p. 2.5.3) wpływa na obniżenie dokładności celowania. Ściśle biorąc paralaksa położenia nie występuje dopiero wtedy, gdy następuje przecinanie się wzajemnie obu żrenic. Żrenica oka ma różną przepuszczalność w poszczególnych miejscach, największą na środku i zmniejszającą się przy przechodzeniu ku jego brzegowi (zjawisko *Stiles-Crawforda*). W wyniku tego nawet przy takich przemieszczeniach żrenicy, kiedy żrenica wyjściowa przyrządu pozostaje w obszarze żrenicy wejściowej oka powstaje asymetryczny rozkład intensywności w żrenicy wyjściowej układu przyrząd-oko, czego skutkiem jest przesunięcie promieni głównych układu poza środek żrenicy przyrządu. Trudno jest to zjawisko ująć rachunkiem. Komplikuje zagadnienie dodatkowo fakt, że na wielkość paralaksy wpływają również aberracje obiektywu. Położenie punktu  $P'$ , a więc i odległość  $x'_1$  zmieniają się wraz z przesłanianiem obiektywu zależnie od sposobu korekcji.

Z wyżej wymienionych powodów przesunięcie punktów  $P$  i  $K_0$  szacuje się zwykle przez założenie z nadmiarem, że w skrajnym przypadku promień główny może co najwyżej przechodzić przez brzeg żrenicy przyrządu (punkt  $N$ ). Szacowanie jest szczególnie wtedy zawyżone, jeżeli obserwator dobiera swoje położenie zwracając uwagę na jakość obserwowanego obrazu.

Pozorne przesunięcie liniowe  $\Delta y'$  obydwu punktów odniesione do płaszczyzny obrazu punktu  $P$  wyniesie  $\Delta y' = \Delta x' u'$ . Ale ponieważ  $|x'_K| \ll f'_1$ ,

to  $u' < \Phi_z/2f_1'$ , gdzie  $\Phi_z$  — średnica źrenicy wejściowej lunety. Kąt, pod którym widać odcinek  $\Delta y'$  przez okular wynosi  $\Delta w' = \Delta y'/f_2'$  i stąd ostatecznie

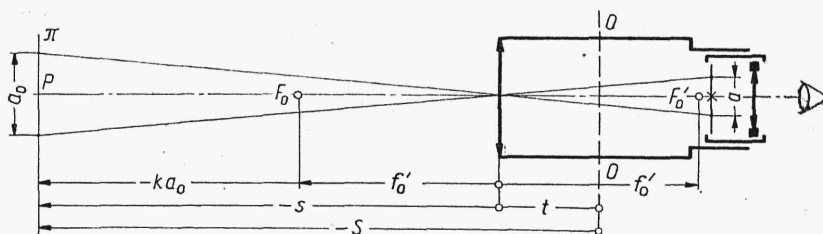
$$\Delta w' < \frac{\Delta x' \Phi_z}{2f_1' f_2'} \quad (5.19)$$

Jest to wzór umożliwiający oszacowanie kąta paralaksy położenia  $\Delta w'$  w przestrzeni obrazowej lunety. Kątowi temu odpowiada kąt w przestrzeni przedmiotowej  $\Delta w = \Delta w'/G$  gdzie  $G$  — powiększenie wizualne lunety. Jeżeli błąd celowania pochodzący z paralaksy nie może być większy niż  $\Delta w'_g$ , wówczas z warunku (5.19) można wyznaczyć dopuszczalną odległość  $\Delta x'_g$  krzyża płytki ogniskowej od obrazu punktu, na który wykonywane jest celowanie.

Luneta jest często stosowana do wyznaczania kątowych położzeń przedmiotów leżących na różnych odległościach od niej. Bez ruchu ogniskującego płytki lub obiektywu paralaksa może być usunięta tylko dla jednej odległości, w przypadku rys. 5.8 oznaczonej przez  $s_k$ . Paralaksa dla pozostałych punktów jest tym większa im większa jest odległość punktów od płaszczyzny przechodzącej przez  $K_0$ . Powstaje pytanie, w jaki sposób dobrać odległość  $s_k$ , aby zoptymalizować błąd paralaksy w całym zakresie pomiarowym, którego granice oznaczono przez punkt  $P_a$  i  $P_b$ ? Optymalizacja zależy od kryterium, według którego ustalony jest rozkład dopuszczalnych błędów na różnych odległościach. Wychodząc np. z założenia, że dla skrajnych odległości  $s_a$  i  $s_b$  dopuszcza się stały błąd kątowy, to znaczy, że zgodnie z rysunkiem powinno być spełnione  $|\Delta w_a| = |\Delta w_b|$ , wówczas łatwo wykazać, że  $s_k = 2s_a s_b / (s_a + s_b)$ . Natomiast jeżeli dopuszczalny jest stały błąd liniowy, to znaczy  $|\Delta L_a| = |\Delta L_b|$ , wtedy  $s_k = (s_a + s_b)/2$ .

### Lunety geodezyjne

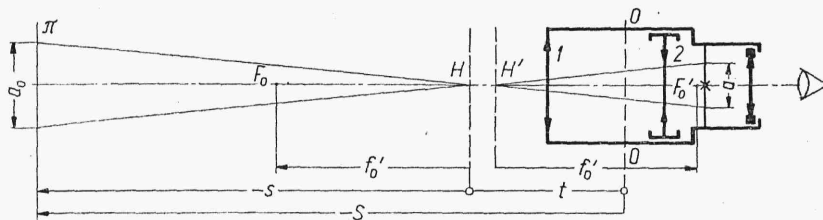
Jeżeli przedział  $P_a P_b$  (rys. 5.8), dla którego wykonywane są pomiary jest zbyt duży, wówczas błąd paralaksy może przekraczać dopuszczalne granice. Co więcej przy nastawieniu okularu na ostre widzenie siatki płytki ogniskowej tylko część obszaru  $P_a P_b$  może leżeć w głębi ostrości przyrządu, pozostała część będzie widziana nieostro. Zarówno w jednym, jak i w drugim przypadku istnieje konieczność ogniskowania obrazów przedmiotów na płycie ogniskowej. Szczególnie istotne jest to w przyrządach geodezyjnych (teodolitach, niwelatorach), kiedy pomiary prowadzone są na odległościach od 1,5 m do nieskończoności.



Rys. 5.9

Ogniskowanie można zrealizować bądź przez przesuw okularu z płytką ogniskową (rys. 5.9) bądź przez zastosowanie soczewki ogniskującej (rys. 5.10). Ponieważ luzy w prowadzeniu lub brak prostoliniowości ruchu oku-

laru powodują zmianę położenia osi celowej, pierwszy sposób został prawie całkowicie zarzucony i obecnie stosuje się wyłącznie układy z wewnętrzną soczewką ogniskującą (rys. 5.10). Obiektyw lunety składa się z dwóch elementów, pierwszego nieruchomego o mocy dodatniej i drugiego przesuwanego wzdłuż osi o mocy ujemnej. Obiektyw taki, nazywany *teleobiek-*



Rys. 5.10

*tywem*, ma wysunięte płaszczyzny główne  $HH'$  ku przodowi i jego długość mechaniczna mierzona od pierwszego elementu do ogniska obrazowego jest krótsza od jego ogniskowej, dzięki czemu przy założonej jej wartości zmniejszają się wymiary przyrządu w porównaniu z układem pokazanym na rys. 5.9.

Przesuwem elementu drugiego zmieniana jest w nieznacznym stopniu ogniskowa obiektywu oraz położenie ogniska obrazowego  $F'_0$ , co łącznie zapewnia możliwość ogniskowania w płaszczyźnie krzyża płytki obrazów przedmiotów leżących w różnych odległościach od lunety. Wymagana dokładność prostoliniowego prowadzenia soczewki ogniskującej jest kilkakrotnie niższa w porównaniu z wymaganiami stawianymi przy przesuwie samej płytki ogniskowej.

W lunetach geodezyjnych oprócz krzyża celowniczego na płycie ogniskowej nanosi się kreski dalmiercze pozwalające na pomiar odległości od dowolnego punktu lunety do przedmiotu. Jeżeli odległość między kreskami wynosi  $a$ , to w płaszczyźnie  $\pi$  sprzężonej z siatką płytki ogniskowej kreski odcinają odległość  $a_0$ , którą można odczytać przez lunetę na podziałce znajdującej się w  $\pi$ . Jeżeli odległość płaszczyzny  $\pi$  mierzona jest od ustalonej osi  $O-O$  (osi obrotu lunety), wówczas zgodnie z rys. 5.9 i 5.10

$$S = -s + t$$

gdzie  $t$  — odległość płaszczyzny głównej przedmiotowej obiektywu od wspomnianej osi  $O-O$

Ale  $s = f'_0 \left( \frac{1}{\beta} - 1 \right) = -f'_0 \left( \frac{a_0}{a} + 1 \right)$  i stąd

$$S = \frac{f'_0}{a} a_0 + f'_0 + t \quad (5.20)$$

W lunecie pierwszej (rys. 5.9)  $f'_0$ ,  $a$  i  $t$  są wielkościami stałymi i stąd

$$S = ka_0 + C \quad (5.21)$$

gdzie:

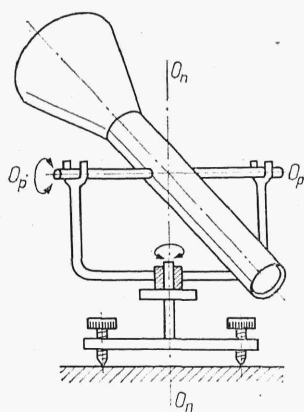
$k = f'_0/a$  — stała mnożenia lunety,  
 $C$  — stała dodawania.

Punkt, dla którego  $C = 0$ , zwany *punktem analaktycznym lunety*, pokrywa się w tym przypadku z ogniskiem przedmiotowym obiektywu. Dla dru-



giej lunety wraz z odsuwaniem się od niej płaszczyzny  $\pi$  maleje odległość między elementami obiektywu, a tym samym wydłuża się ogniskowa  $f'_0$ ; poza tym rośnie odległość  $t$  oraz odcinek  $a_0$ . Zależność (5.20) jest wtedy funkcją dość złożoną, którą można aproksymować za pomocą wyrażenia (5.21). Wygodnie jest tak dobrać parametry obiektywu, aby z wystarczającą dokładnością dla przedziału mierzonych odległości było zachowane  $C = 0$ . Lunety spełniające ten warunek nazywane są *lunetami analaktycznymi*. Są one podstawowymi elementami przyrządów geodezyjnych takich jak niwelatory i teodolity.

Niwelatory są przeznaczone do wyznaczania kierunków poziomych. Elementem pozwalającym na sprawdzenie, czy oś celowa leży w płaszczyźnie poziomej jest poziomnica na stałe związana z lunetą. W nowszych rozwiązaniach stosuje się urządzenia samopoziomujące, które niezależnie od położenia lunety w pewnym zakresie kątowym utrzymują oś celową w płaszczyźnie poziomej.



Rys. 5.11

*Teodolity* umożliwiają wyznaczenie kątów w płaszczyźnie poziomej i pionowej. Luneta (rys. 5.11) ma możliwość obrotu dookoła osi poziomej  $O_p-O_p$  i pionowej  $O_n-O_n$ . Odczyt kątów odbywa się na odpowiednich kręgach z podziałkami kątowymi.

### Teleskopy

Teleskopami nazywane są przyrządy przeznaczone do obserwacji astronomicznych. Mogą to być lunety, gdy odbiornikiem jest człowiek lub też tylko obiektywy, gdy obraz jest rejestrowany na emulsji światłoczułej. Zwykle każdy z teleskopów jest przystosowany do obydwu funkcji.

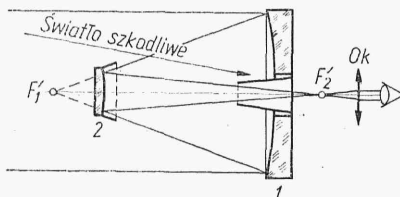
W porównaniu z dotychczas omawianymi lunetami teleskopy mają znacznie większe średnice źrenic wejściowych i związane z tym duże powiększenie, gdyż jak wynika z rozważań p. 5.2.3, im większa jest średnica źrenicy wejściowej, tym większe są możliwości przyrządu. Największy z dotychczas zbudowanych teleskopów jest zainstalowany w obserwatorium Mount Palomar (USA); ma on średnicę 5 m.

Z uwagi na techniczne trudności uzyskania odpowiednio jednorodnego materiału o takich wymiarach obiektywy teleskopów nie są budowane z układów soczewkowych lecz z elementów zwierciadlanych. Przemawia za tym dodatkowo fakt, że badania są obecnie prowadzone w szerokim



zakresie widma fal elektromagnetycznych i z jednej strony układy zwierciadlane nie wnoszą aberracji chromatycznych, z drugiej strony uwalniają od wpływu absorpcji elementów refrakcyjnych.

Najczęściej obecnie stosowanym rozwiązaniem jest *obiektyw typu Cossegraina* (rys. 5.12), w którym obie powierzchnie zwierciadlane są asferyczne. Pierwsza jest paraboloidą, a druga hyperboloidą obrotową. Dzięki temu zarówno w płaszczyźnie przechodzącej przez  $F'_1$  (bez zwierciadła 2), jak i przez  $F'_2$  można wykonywać fotografie przedmiotów nieskończenie

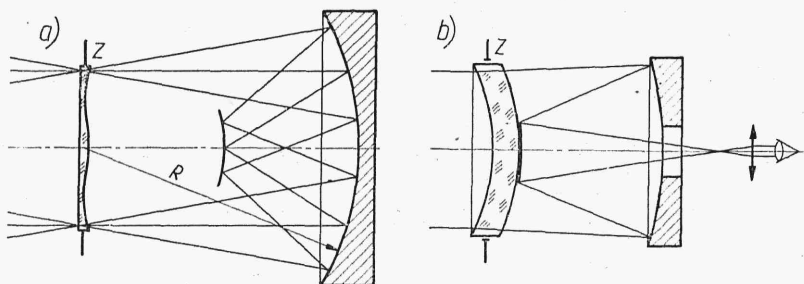


Rys. 5.12

dalekich. Obrazy na osi są w obu przypadkach pozbawione aberracji sferycznej. Korzystne jest wykonywanie fotografii w pierwszym ognisku, gdyż unika się światła szkodliwego padającego bezpośrednio na płaszczyznę obrazu. Światło to szkodliwe również przy obserwacjach wizualnych można usunąć za pomocą przysłon stożkowych pokazanych na rysunku.

Straty spowodowane ekranowaniem pęku aperturowego przez zwierciadło 2 nie są duże i maleją wraz ze wzrostem powiększenia teleskopu, gdyż decyduje o nich stosunek powierzchni obu zwierciadeł.

Powierzchnie asferyczne stosowane przy konstrukcji obiektywów zwierciadlanych są stygmatyczne tylko dla przedmiotów leżących na osi układu. Poza osią szybko rosną aberracje komy i astygmatyzmu. Z tego powodu teleskopy te mają małe kąty pola widzenia (poniżej  $1^\circ$ ).



Rys. 5.13

W celu zwiększenia kąta widzenia można stosować układy zwierciadlano-refrakcyjne, które jednak ograniczają możliwości pracy przyrządu w szerokim zakresie widma. Przykładem tego mogą być *obiektywy Schmidta* (rys. 5.13a) i *Maksutowa* (rys. 5.13b). Zwierciadła są wtedy sferyczne, z tym że w pierwszym przypadku źrenica wejściowa układu pokrywa się ze środkiem krzywizny zwierciadła, dzięki czemu skorygowana jest aberracja komy i astygmatyzmu. Aberracja sferyczna zwierciadła kompensowana jest przez płytkę z odpowiednio zdeformowaną jedną z powierzchni. Z uwagi na duże otwory względne (nawet 1:1) i duże kąty pola (do

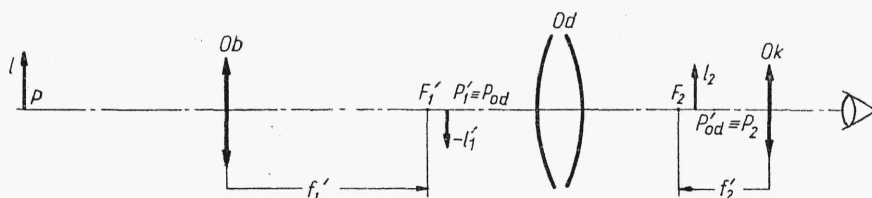
20°) obiektywy *Schmidta* znalazły zastosowanie przede wszystkim do wykonywania fotografii obiektów szybko poruszających się (sztuczne satelity), kiedy wymagany jest krótki czas ekspozycji. Wadą tego obiektywu jest duża krzywizna pola oraz większa średnica zwierciadła niż średnica żrenicy wejściowej. W obiektywie *Maksutowa* elementem korekcyjnym jest achromatyczny menisk z powierzchniami sferycznymi. Osiągane otwory względne wynoszą 1 : 3, a kąty pola  $2w = 6^\circ$ . Nakładając na drugą powierzchnię menisku warstwę zwierciadlaną (zaznaczoną na rysunku grubszą linią) otrzymuje się wtedy układ typu *Maksutowa-Cassegraina* pozwalający na konstrukcję lunety.

### Lunety z układami odwracającymi

Wadą lunety *Keplera* jest jej ujemne powiększenie i związane z tym odwrócenie obrazu. Jeżeli między obiektyw i okular (rys. 5.14) wstawiony zostanie dodatkowy układ *Od* wówczas powiększeniem wizualnym takiej lunety będzie

$$G = - \frac{f'_1}{f'_2} \beta_{od} \quad (5.22)$$

gdzie:  $\beta_{od} = l_2/l'_1$  — powiększenie poprzeczne dodatkowego układu.



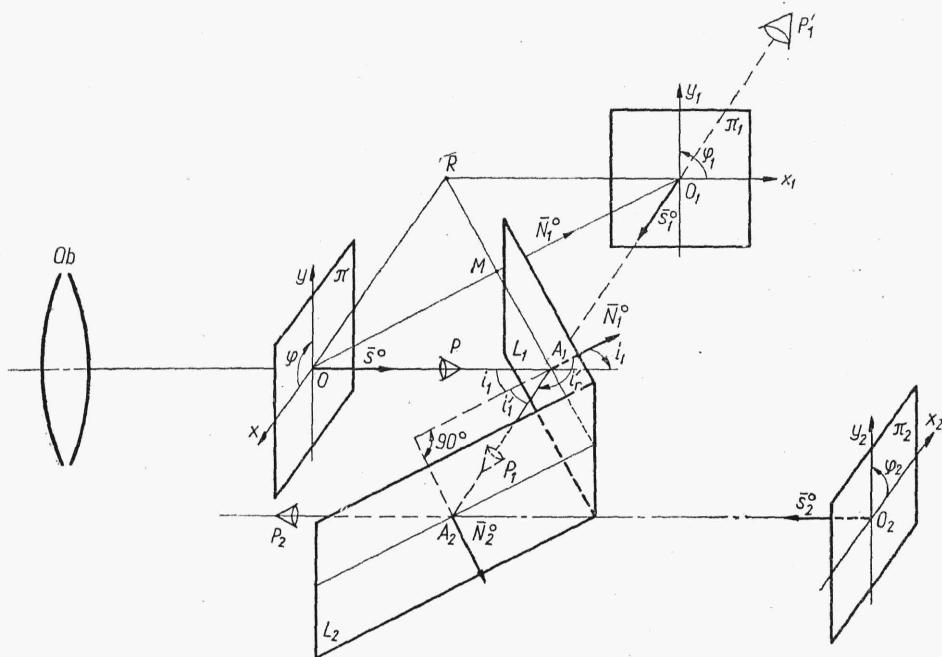
Rys. 5.14

Jeżeli  $\beta_{od} < 0$ , to układ nazywa się układem *odwracającym* i zgodnie z równaniem (5.22) dla  $f'_1, f'_2 > 0$  również  $G > 0$ , a więc obraz jest prosty. Najczęściej stosowanymi układami odwracającymi są układy przyrząteczne, które można w pierwszym przybliżeniu uważać za pewien zbiór płaskich zwierciadeł leżących pod kątem do osi optycznej. Luneta pozbawiona jest wówczas obrotowej osi symetrii i zjawisko przekształcenia przestrzeni przedmiotowej w obrazową może być różne dla różnych przekrojów południkowych.

Niech  $\pi$  (rys. 5.15) będzie płaszczyzną obrazu daną przez obiektyw *Ob*, prostopadłą do jego osi optycznej. Jeżeli  $L_1$  jest płaszczyzną zwierciadła, której położenie w przestrzeni określone jest za pomocą prostopadłego do niej wersora  $\bar{N}_1^0$ , to obrazem punktu *O* danym przez zwierciadło jest punkt  $O'_1$  leżący na prostej *OM* o kierunku określonym przez wersor  $\bar{N}_1^0$ , przy czym  $OM = MO'_1$ . Oś optyczna układu *Ob* opisana przez wersor  $\bar{s}^0$  po odbiciu od zwierciadła przyjmie kierunek  $\bar{s}_1^0$  wyznaczony z prawa odbicia (1.46)

$$\bar{s}_1^0 = \bar{s}^0 + \bar{N}_1^0(\bar{s}^0 \bar{N}_1^0 - \bar{s}^0 \bar{N}^0) \quad (5.23)$$

Geometrycznie oznacza to, że  $\bar{s}_1^0$  leży w płaszczyźnie padania utworzonej przez wersory  $\bar{N}_1^0$  i  $\bar{s}^0$ , przy czym zgodnie z uwagami p. 1.4.5 i oznaczeniami na rysunku spełniona jest równość  $i'_{-1} = \pi - i_1$  (z pominięciem znaków kąt padania  $i_1$  równy jest kątowi odbicia  $i'_1$ ).



Rys. 5.15

Niech w przestrzeni przedmiotowej zwierciadła będą dane dwa wektory  $\bar{a}, \bar{b}$  leżące w dowolnej płaszczyźnie i tworzące między sobą kąt  $\alpha$ . Uodowodnione zostanie, że kąt między ich obrazami  $\bar{a}_1$  i  $\bar{b}_1$  danymi przez zwierciadło wynosi również  $\alpha$ .

Kierunki obydwu wektorów muszą spełniać prawo odbicia, przy czym

$$\begin{aligned}\bar{a}^0 \bar{N}_1 &= \cos i_{1a}; & \bar{a}_1^0 \bar{N}_1^0 &= \cos i_{1ra} = -\cos i_{1a} \\ \bar{b}^0 \bar{N}_1 &= \cos i_{1b}; & \bar{b}_1^0 \bar{N}_1^0 &= -\cos i_{1b}\end{aligned}\quad (5.24)$$

gdzie  $i_{1a}$  i  $i_{1b}$  — kąty padania dla kierunku wektorów  $\bar{a}$  i  $\bar{b}$ .

Wtedy przez analogię do wzoru (5.23) oraz po uwzględnieniu zależności (5.24)

$$\begin{aligned}\bar{a}_1^0 &= \bar{a}^0 - 2\bar{N}_1^0 \cos i_{1a} \\ \bar{b}_1^0 &= \bar{b}^0 - 2\bar{N}_1^0 \cos i_{1b}\end{aligned}$$

Po wymnożeniu skalarnym stronami z uwagi na zależność (5.24) ostatecznie pozostanie

$$\bar{a}_1^0 \bar{b}_1^0 = \bar{a}^0 \bar{b}^0 \quad (5.25)$$

Oznacza to, że  $\cos \alpha = \cos \alpha_1$ , co kończy dowód.

Ponieważ kąt między dowolnymi kierunkami w przestrzeni przedmiotowej zwierciadła płaskiego pozostają bez zmiany w jego przestrzeni obrazowej, to kąt prosty między  $s$  a dowolnym wektorem płaszczyzny  $\pi$  zostanie powtórzony w przestrzeni obrazowej i płaszczyzna  $\pi_1$ , będąca obrazem płaszczyzny  $\pi$  musi być prostopadła do kierunku wersora  $s_1^0$ .

Przy dotychczasowych rozważaniach o przekształceniu kątów między dowolnymi kierunkami przestrzeni przedmiotowej i ich obrazami pominięto zagadnienie zachowania zwrotu kątów. Rozwiązanie jego wymaga umownego przyjęcia znaków tych zwrotów zarówno w przestrzeni przedmiotowej, jak i obrazowej. Zagadnienie to jest szczególnie istotne przy konstrukcji przyrządów optycznych i zostanie rozpatrzone tu w formie opisowej, uwypuklającej zastosowanie praktyczne. Niech w płaszczyźnie  $\pi$  będzie dobrany prostokątny układ współrzędnych  $x, y$  w taki sposób, aby oś  $x$  leżała w płaszczyźnie podania osi optycznej (płaszczyzna zawierająca wersory  $\bar{N}_1^0$  i  $s^0$ ). Ponieważ oś  $y$  jest równoległa do płaszczyzny zwierciadła, to jej obraz  $y_1$  w płaszczyźnie  $\pi_1$  będzie wtedy równoległy do  $y$  i ponadto będzie zachowywał ten sam zwrot w przestrzeni. Oś  $x_1$  i  $x$  będą przeciwnie skierowane względem ich wspólnego śladu  $R$  w płaszczyźnie zwierciadła  $L_1$ . Przyjmuje się, że kąt  $\varphi$  mierzony między dodatnimi zwrotami osi  $x$  i  $y$  [ $|\varphi| = \pi/2$ ] uważany będzie za dodatni, jeżeli w celu pokrycia się zwrotów oś  $x$  ma być obracana zgodnie z ruchem wskazówek zegara.

Przy obserwacji w kierunku przeciwnym do biegu światła (dla płaszczyzny  $\pi$  oko w położeniu  $P$ , dla  $\pi_1$  — w położeniu  $P_1$ ) znaki kątów  $\varphi$  i  $\varphi_1$  są przeciwne ( $\varphi_1\varphi < 0$ ), przy czym  $\varphi_1 < 0$ , natomiast  $\varphi > 0$ . Podobnie przeciwne znaki będą miały te kąty przy ocenie zgodnej ze zwrotem wersorów  $\bar{s}^0$  i  $\bar{s}_1^0$ . Mówi się wtedy, że obraz ma odwrócenie jednostronne. Oznacza to, że zwierciadło płaskie przy zachowaniu stałego kierunku oceny daje różne powiększenia w dwóch przekrojach południkowych ( $\beta_x = -1, \beta_y = 1$ ).

Dobierając różne kierunki oceny np. dla płaszczyzny  $\pi$  z położenia  $P$ , natomiast dla  $\pi_1$  zgodnie z kierunkiem biegu światła (położenie  $P_1'$ ), wówczas znaki obydwu kątów będą zgodne ( $\varphi_1\varphi > 0$ ) i przedmiot dla obserwatora umieszczonego kolejno w  $P$  i  $P_1'$  będzie w jednakowy sposób przekształcony dla obydwu przekrojów. Jest to typowy przypadek obserwacji przy projekcji przez episkop.

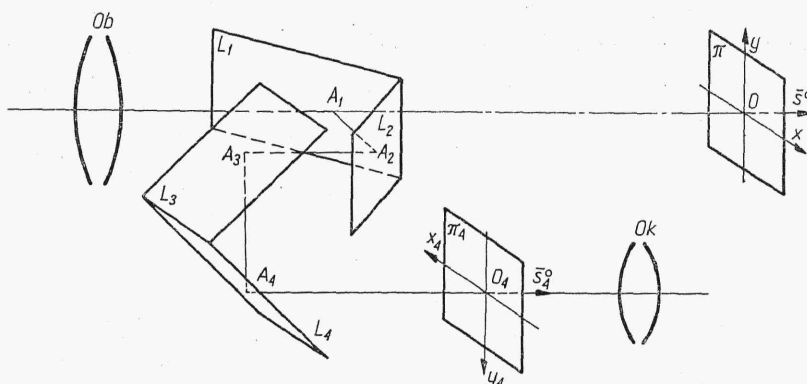
Przez sukcesywne dostawienie następnych zwierciadeł kolejno będzie zmieniał się przy odbiciu znak iloczynu  $\varphi\varphi_i$ , co pozwala na sformułowanie ogólnej reguły dla dowolnej liczby odbić.

Jeżeli dla przedmiotu i obrazu przyjęty jest jeden kierunek oceny (zgodnie lub przeciwnie do biegu światła), to przekształcenie przedmiotu w obraz przez układ zwierciadeł płaskich będzie jednakowe dla wszystkich przekrojów południkowych, gdy zachodzi parzysta liczba odbić. Przy różnych kierunkach oceny jest to słuszne dla nieparzystej liczby odbić.

Niech drugie zwierciadło  $L_2$  (rys. 5.15) będzie prostopadłe do  $L_1$  i ponadto niech wersor  $\bar{N}_2^0$  leży na wspólnej płaszczyźnie z wersorami  $\bar{N}_1^0$  i  $\bar{s}^0$ , wówczas krawędź przecięcia obydwu zwierciadeł jest równoległa do osi  $y$  i prostopadła do  $\bar{s}^0$ . Można łatwo wykazać, że wtedy płaszczyzna  $\pi_2$  będąca obrazem  $\pi$  danym przez układ dwóch zwierciadeł jest w przestrzeni równoległa do  $\pi$ . Ponadto obie pary osi są do siebie równoległe, przy czym  $y$  i  $y_2$  mają zwroty zgodne, natomiast  $x$  i  $x_2$  przeciwnie.

Dostawiając drugą taką samą parę zwierciadeł  $L_3$  i  $L_4$  (rys. 5.16) z krawędzią ich przecięcia równoległą do osi  $x$  otrzymuje się w płaszczyźnie  $\pi_4$  całkowicie odwrócony obraz płaszczyzny  $\pi$ , przy czym  $\pi$  i  $\pi_4$  są do siebie równoległe. Układ takich czterech zwierciadeł tworzy układ odwracający znany pod nazwą *Porro I-szego rodzaju*.

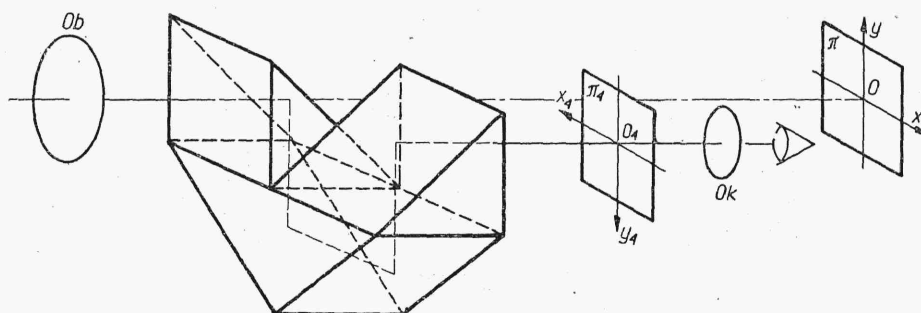
Zazwyczaj obraz dany przez obiektyw tworzy się w przestrzeni pozor-nej zwierciadła  $L_1$ , tak aby płaszczyzna  $\pi_4$  znajdowała się w przestrzeni rzeczywistej  $L_4$ , przy czym oczywiście odległość  $A_1O$  równa jest odległo-



Rys. 5.16

ści  $A_1A_2A_4O_4$ . Dostawiając okular  $Ok$  tak, aby jego oś pokrywała się z osią daną przez wektor  $\vec{s}_4^0$  otrzymuje się lunetę zgodnie z równaniami (5.22), ponieważ  $\beta_{od} = -1$ ,  $G = f'_1/f'_2$ .

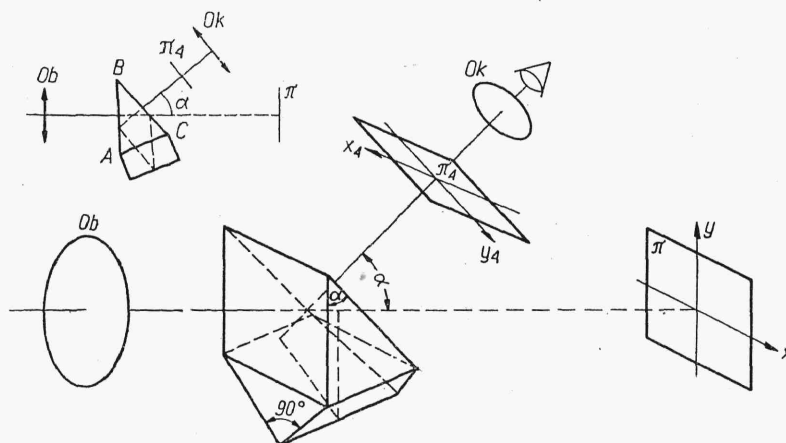
Ogólnie biorąc, z uwagi na błędy montażowe zwierciadła nie będą wzajemnie do siebie prostopadłe; ich krawędź przecięcia również będzie tworzyła z wektorem  $\vec{s}^0$  pewien kąt różny od  $\pi/2$ , stąd płaszczyzna  $\pi_4$  nie musi być wtedy równoległa do  $\pi$  i osie układów współrzędnych mogą być względem siebie obrócone. Poza tym występuje równoczesne przemieszczenie się płaszczyzny  $\pi_4$  w przestrzeni. Analiza wpływu obrotów i położenia poszczególnych zwierciadeł na położenie i orientację płaszczyzny obrazu jest dość złożona. Komplikuje zagadnienie fakt, że zwykle, z uwagi na łatwiejsze mocowanie, w miejsce układów zwierciadeł stosuje się układ pryzmatów z całkowitym wewnętrznym odbiciem. Dopiero zastosowanie rachunku macierzowego [2], [3] pozwala tu na pewne uporządkowanie rozważań.



Rys. 5.17

Na rys. 5.17 i 5.18 przedstawiono przykłady pryzmatycznych układów odwracających, pierwszy znany pod nazwą *Porro II-go rodzaju*, natomiast drugi — *pryzmatu Schmidta*. Pierwszy składa się z trzech pryzmatów prostokątnych wzajemnie sklejonnych. Podobnie jak dla układu *Porro I*

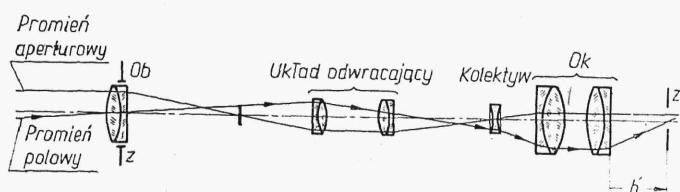
płaszczyzna obrazowa  $\pi_4$  układu odwracającego jest równoległa do płaszczyzny  $\pi$ , (tzn. płaszczyzny obrazu danego przez obiektyw) i przesunięta w przestrzeni. Przyrząd *Schmidta* składa się również z czterech płaszczyzn odbijających, przy czym w zależności od doboru kąta  $\alpha$  w pryzmacie uzyskuje się różne pochYLENIA między płaszczyzną obrazu  $\pi_4$  i przed-



Rys. 5.18

miotu  $\pi$ . Kąt  $\alpha$  nie może być zbyt mały, gdyż na płaszczyznach oznaczonych na górnej części rysunku przez  $AB$  i  $BC$  musi zachodzić całkowite odbicie. Zwykle dobiera się  $\alpha = 45^\circ$ .

Znacznie wygodniejsze pod względem montażowym niż odwracające układy pryzmatyczne są układy soczewkowe, gdyż nie wprowadzają one skręcenia obrazu i poza tym stosunkowo łatwo jest w nich zapewnić wspólną oś wszystkim elementom optycznym. Poważną ich wadą jest wydłużenie przyrządu i dlatego mają zastosowanie tylko tam, gdzie istnieje tego potrzeba, a więc w układach peryskopowych, kiedy źrenicę wejściową przyrządu należy umieścić na dość znacznych odległościach od obserwatora. Na rys. 5.19 podano przykład zastosowania takiego układu w lune-



Rys. 5.19

cie myśliwskiej. Układ pryzmatów w tym przypadku mimo skrócenia lunety spowodowałby wzrost jej poprzecznych wymiarów, a tym samym ograniczenie pola widzenia myśliwego. Ujemny kolektyw pozwala uzyskać odpowiednio dużą odległość  $b'$  źrenicy wyjściowej  $Z'$  od ostatniej powierzchni oku'aru, konieczną z uwagi na możliwość mechanicznych uszkodzeń oka w czasie strzału.

### 5.2.5. Lornety

Układ dwóch lunet przystosowanych do obserwacji dwuoczonej nazywany jest *lornetą*. Układ taki w porównaniu z lunetą, poza tym, że zwiększa wygodę obserwacji, zachowuje, a nawet zwielokrotnia, możliwości oceny przestrzennego rozmieszczenia elementów w polu widzenia obserwatora.

Granicznemu kątowi  $\Delta w_g$  widzenia stereoskopowego obserwatora (p. 4.3) w przestrzeni przedmiotowej lornety odpowiada kąt  $\Delta w_g/G$ . Ponieważ środkami perspektywy obu lunet są środki źrenic wejściowych, to oznaczając ich odległość zwaną *bazą przyrządu* przez  $b_l$ , zgodnie z wyrażeniem (4.7), promień widzenia stereoskopowego przy obserwacji przez lunetę wynosi

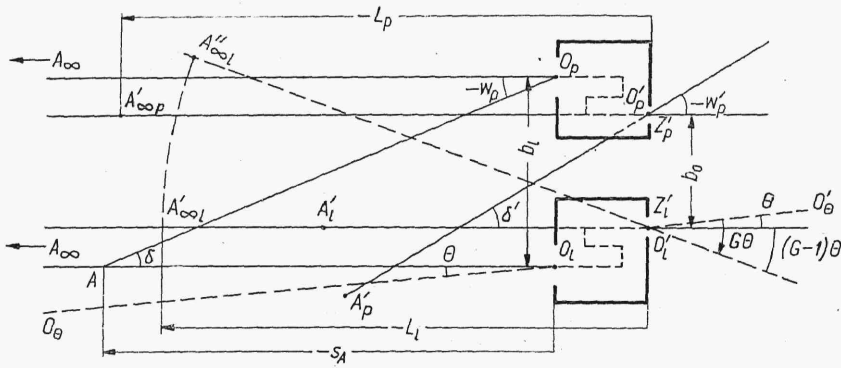
$$D_{gl} = \frac{b_l G}{\Delta w_g} \quad (5.26)$$

Wprowadzając pojęcie *współczynnika plastyczności lunety*  $P_l$  z definicji równego stosunkowi promieni widzenia stereoskopowego przy patrzeniu przez lornetę i bez przyrządu, to zgodnie z zależnościami (5.26) i (4.7)

$$p_l = \frac{D_{gl}}{D_g} = \frac{b_l G}{b_0} \quad (5.27)$$

Zwiększając odpowiednio bazę  $b_l$  przyrządu i jego powiększenie  $G$  można wielokrotnie zwiększyć promień widzenia stereoskopowego człowieka, co zostało wykorzystane do budowy przyrządów pozwalających na pomiar odległości (dalmierze stereoskopowe).

Przestrzeń przedmiotowa lornety jest przekształcana przez dwa układy niezależnie dla lewego i prawego oka, w związku z czym obie przestrzenie obrazowe lunety muszą być odpowiednio wzajemnie zorientowane oraz powinny mieć tę samą metrykę przekształcenia. Łączy się to z koniecznością spełnienia dodatkowych warunków wiążących parametry lunet oraz ustalających wzajemne ich położenie.



Rys. 5.20

Niech będzie dana lorneta z układami odwracającymi pryzmatycznymi schematycznie pokazana na rys. 5.20.

Ponieważ rozstawienie oczu zależnie od obserwatora może zmieniać w granicach 56—74 mm stąd w każdym przyrządzie binokularowym ist-