

Przyrównując $\Delta\delta$ do zera i rozwiązując układ równań otrzymuje się warunek podobny do warunku achromatyzacji układu dwóch soczewek

$$\delta_1 = \delta \frac{\nu_1}{\nu_1 - \nu_2} \quad (2.113a)$$

$$\delta_2 = -\delta \frac{\nu_2}{\nu_1 - \nu_2} \quad (2.113b)$$

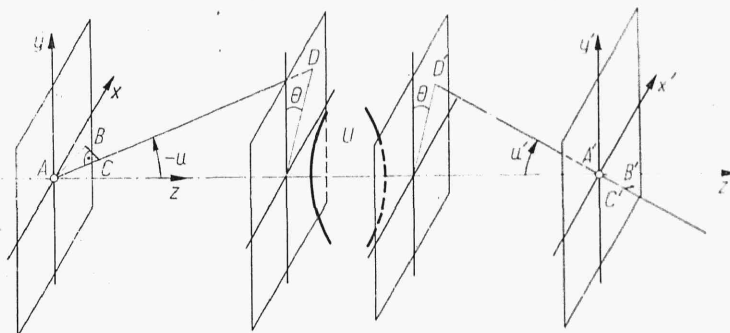
Realizację klina achromatycznego pokazano na rys. 2.86.

Podobnie jak dla układów soczewkowych można tu również rozpatrywać zagadnienie korekcji chromatyzmu wtórnego.

2.6.3. Stygmatyczne odwzorowanie elementu przestrzennego

Na zakończenie rozważań dotyczących aberracji układu optycznego zostaną wyprowadzone ogólne prawa przekształceń dla układów rzeczywistych, które na podstawie własności przekształceń dla danego punktu przestrzeni pozwolą sądzić o przekształceniu w jego punktach sąsiednich.

Niech osiowy punkt A będzie odwzorowany stygmatycznie przez układ optyczny U i niech A' będzie obrazem tego punktu (rys. 2.87). Powstaje



Rys. 2.87

pytanie, jakie warunki należy spełnić, aby sąsiedni punkt B również spełnił wymagania przekształcenia stygmatycznego? Aby wyznaczyć te warunki zakłada się w punktach A i A' układy współrzędnych prostokątnych, przy czym osie z i z' pokrywają się z osią optyczną, a płaszczyzny yz z płaszczyzną $y'z'$. Bez utraty ogólności rozważań można założyć, że sąsiedni punkt B leży poza osią optyczną w płaszczyźnie yz i jeżeli punkt B' jest jego obrazem stygmatycznym, to z uwagi na obrotową oś symetrii musi on leżeć w płaszczyźnie $y'z'$.

Z warunku stygmatyczności drogi optyczne między punktami A i A' oraz B i B' są stałe i niezależne od wybranego promienia (p. 2.1.2). Niech $ADD'A'$ będzie dowolnym promieniem przechodzącym przez układ. Prowadząc z punktów B i B' prostopadłe BC i $B'C'$ do promienia, z uwagi na małe odległości można uważać, że BC i $B'C'$ są geometrycznymi czołami fali związanymi z promieniem ADA' i droga optyczna $[BB']$ równa jest drodze $[CC']$ branej po wspomnianym promieniu. Wtedy

$$[BB'] - [AA'] = [BB'] - [ADA'] = [CDC'] - [ADA'] = n'AC' - nAC = I$$

gdzie: n i n' — współczynniki załamania przestrzeni przedmiotowej i obrazowej.

Odległość AC można zapisać wektorowo za pomocą iloczynu skalarnego

$$AC = \overline{AB} \cdot \overline{AC^0}$$

gdzie: $\overline{AC^0}$ jest wersorem kierunku promienia AD . Ponieważ kosinusami kierunkowymi $\overline{AC^0}$ zgodnie z rysunkiem będą $\sin u \sin \Theta$, $-\sin u \cos \Theta$ i $\cos u$ oraz współrzędnymi punktów $A(0, 0, 0)$ i $B(0, y, z)$, to rozwijając iloczyn skalarny na składowe pozostanie

$$AC = -y \sin u \cos \Theta + z \cos u$$

Analogiczne wyrażenie można napisać dla odcinka $A'C'$ i podstawiając do wzoru na różnicę dróg I otrzymuje się

$$I = (n'z' \cos u' - nz \cos u) - (ny' \sin u' - ny \sin u) \cos \Theta \quad (2.114)$$

Wielkość I jako różnica dróg optycznych między punktami BB' i AA' , przy zachowaniu warunku stygmatyczności dla punktów B i B' musi być niezależna od wybranego promienia, a więc niezależna od Θ i u .

Rozpatrując zjawisko najpierw dla osi y ($z = z' = 0$) będzie $I_y = - (n'y' \sin u' - ny \sin u) \cos \Theta$.

Jeżeli I_y ma być niezależne od Θ to musi być

$$\frac{n \sin u}{n' \sin u'} = \frac{y'}{y} = \beta \quad (2.115)$$

niezależnie od rozpatrywanego kąta u ($\beta = y'/y$ powiększenie poprzeczne układu). Jest to *warunek sinusów Abbego*. Mówi on, że jeżeli dla punktu A układ nie ma aberracji sferycznej, to w bezpośrednim sąsiedztwie tego punktu w kierunku prostopadłym do osi jest zachowany warunek stygmatyczności. Łatwo sprawdzić, że zależność (2.115) jest spełniona w przestrzeni przysioowej, gdyż $\sin u / \sin u' = u / u' = 1/\gamma$. Ponieważ z aberracji połowych dla małych kątów pola największy wpływ ma aberracja komy (zależy od pierwszej potęgi kąta pola), to zachowanie warunku sinusów świadczy o skorygowaniu tej aberracji w tym obszarze. W ten sposób wyznaczając przebieg promieni dla środka pola można ocenić jakość odwzorowania dla małych kątów pola widzenia. Układy, które mają skorygowaną aberrację sferyczną i spełniają warunek sinusów (2.115) (skorygowana koma) nazywają się *układami aplanatycznymi* (patrz p. 2.3.1).

Przechodząc do punktów B leżących na osi optycznej ($y = 0$) otrzymuje się

$$I_z = n'z' \cos u' - nz \cos u$$

Wartość I_z musi być niezależna od kąta u , to znaczy musi mieć tę samą wartość i dla małych kątów u i u' , wtedy

$$I_z = n'z' \cos u' - nz \cos u = n'z' - nz$$

a więc musi być spełnione

$$\frac{n \sin^2 \frac{u}{2}}{n' \sin^2 \frac{u'}{2}} = \frac{z'}{z} = \alpha \quad (2.116)$$

niezależnie od rozpatrywanego kąta u (α — powiększenie podłużne układu). Jest to *warunek Herschela*. Mówi on, że jeżeli dla punktu A układ nie ma aberracji sferycznej, to w bezpośrednim sąsiedztwie tego punktu wzdłuż

osi optycznej zachowany jest warunek stygmatyczności (brak aberracji sferycznej). Warunek ten jest spełniony w przestrzeni przyosiowej, gdyż dla małych kątów u jest $\alpha = (n/n') u^2/u'^2 = (n/n') 1/\gamma^2$.

Jeżeli zachowane byłyby jednocześnie warunki *Abbego* i *Herschella* wtedy stygmatycznie byłaby odwzorowana pewna przestrzeń wokół punktu A . Ponieważ $\alpha = \beta^2 n'/n$, to podstawiając warunki (2.115) i (2.116) musi być wtedy spełnione

$$\frac{\sin^2 \frac{u}{2}}{\sin^2 \frac{u'}{2}} = \frac{\sin^2 u}{\sin^2 u'}$$

Warunek ten jest zachowany poza przestrzenią przyosiową tylko dla $u = \pm u'$, wtedy z (2.115) $\beta = \pm n/n'$ i $\gamma = \pm 1$. A więc stygmatycznie odwzorować można elementy przestrzeni tylko wtedy, gdy spełniony jest warunek układu idealnego (p. 2.2.4).

2.7. Zjawiska energetyczne. Fotometria

Dotychczasowe rozważania własności układów optycznych ograniczały się tylko do zagadnień geometrycznych. Promień wychodzący ze źródła odpowiednio odchylany przez układ optyczny zostawiał ślad w płaszczyźnie obrazu. Ale jak wiadomo z p. 1.4.2 kierunek rozchodzenia się promieni świetlnych pokrywa się z kierunkiem rozchodzenia się energii, a więc określonemu pękowi promieni w danym przedziale czasu można przyporządkować pewną porcję energii, która przeniesiona do przestrzeni obrazowej zostanie pochłonięta przez odbiornik, wywołując w nim właściwą mu reakcję. Aby jednoznacznie scharakteryzować przedmiot, jako zbiór źródeł światła, nie wystarczy podać rozmieszczenia punktów świecących, ale trzeba jeszcze określić ich moc promieniowania, charakterystykę kierunkową rozchodzenia się energii, a także jej rozkład widmowy. Z każdego punktu przedmiotu leżącego w polu widzenia układu zostanie przeniesiona do przestrzeni obrazowej pewna część energii wysyłanej przez to źródło, która ogólnie biorąc będzie funkcją parametrów układu, położenia punktu w przestrzeni oraz jego charakterystyki emisyjnej. Układ optyczny oprócz omawianego poprzednio przekształcenia geometrycznego dokonuje przekształcenia energetycznego. Schemat blokowy takiego przekształcenia pokazano na rys. 2.88. Przedmiot może być ciałem świecącym lub oświetlanym, ale to w niczym nie zmienia istoty zagadnienia, gdyż dochodzi tylko dodatkowe przekształcenie energii dokonywane przez układ oświetlający i przedmiot.



Rys. 2.88

Układ optyczny wywiera dwojaki wpływ na promieniowanie docierające do niego z przedmiotu. Po pierwsze wyznacza dla danego punktu przedmiotu stożek przenoszonego pędu promieni i jego kształt w prze-