

kde pruh označuje hodnotu středovanou přes čas t . Intenzita polarizovaného záření je I_p , nepolarizovaného I_u , takže celková $I = I_p + I_u$. Stupeň lineární polarizace je definován jako:

$$p \equiv \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I}, \quad (6.146)$$

a stupeň kruhové polarizace:

$$q \equiv \frac{V}{I}. \quad (6.147)$$

Praktické uspořádání pro měření lineární polarizace ukazuje obr. 6.42. Měření stupně polarizace se pomocí dvou půlvlnných destiček a dvojlomného hranolu redukuje na měření minim a maxim intenzity. Klasicky se používá *Nicolův hranol* z kalcitu CaCO_3 , jenž má velmi rozdílné $n_o = 1,658$ a $n_e = 1,486$; sestává vlastně ze dvou hranolů lepených kanadským balzámem ($n = 1,55$, tj. mj. podobné korunovému sklu); na rozhraní tak nastává totální odraz řádné vlny (a měříme jen mimořádnou). Pro měření polarizace kruhové bychom museli uspořádání upravit (viz obr. 6.43).

Pro přístroj X-shooter na VLT, který má pokrývat vpravdě extrémní rozsah $\lambda = 300$ až $2\,900$ nm, kdy už neplatí náš předpoklad o neměnném λ_0 v rovnici (6.139), bylo navrženo uspořádání dosti odlišné. V Cassegrainově ohnisku je kromě Savartovy destičky, sloužící jako polarizátor, předřazena pouze půlvlnná destička, ovšem se sektory proměnné tloušťky (obr. 6.44). Její rotace zajišťuje modulaci, závislou na λ , a demodulaci Stokesových parametrů je nutné provést až výpočtem ex post (Snik a spol. 2012).

Velký pozor se musí dávat na polarizaci vnesenou přístrojem! Tuto musíme buď kompenzovat dalšími optickými členy (propustnými nedvojlomnými skly), nebo se jí úplně vyhnout nepoužíváním šikmých odrazů (tzn. Newtona). Kalibraci je možné provádět pomocí standardních hvězd pro polarimetrii (tab. 6.6).

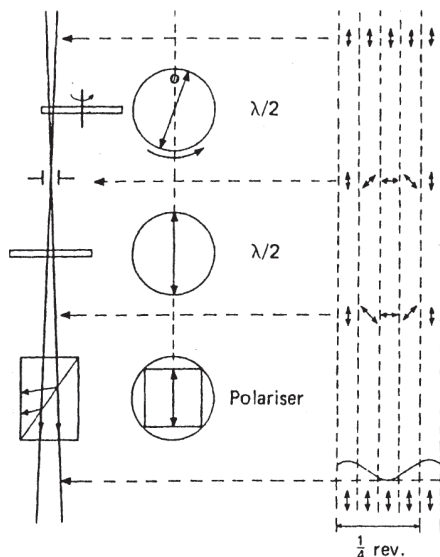
[282] Bracewell R.N. 1962 Radio astronomy techniques, Handbuch der Physik, LIV, ed. Flügge, Springer Verlag, s. 41

[283] Snik F., G. van Harten, R. Navarro, P. Groot, L. Kaper, A. de Wijn 2012 Proc. SPIE, 8446, 25

[284] Walker G. 1987 Astronomical Observations: An Optical Perspective, Cambridge University Press, Cambridge, ISBN 0-521-32587-0

6.12 Aktivní a adaptivní optika

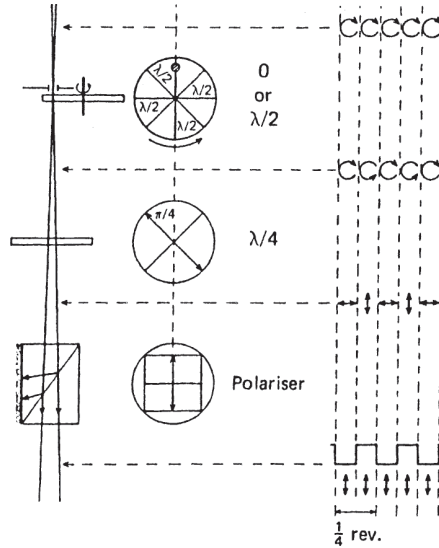
Zásadním omezením starších dalekohledů byly (i) deformace primárního zrcadla způsobované především gravitací, sofistikovanému mechanickému uložení navzdory; (ii) tepelná roztažnost a velká tepelná setrvačnost téhož; (iii) neklid vzduchu nad dalekohledem. Tyto jevy lze dnes potlačit elektromechanicky, pomocí aktivní optiky (i a ii) a adaptivní optiky (iii).



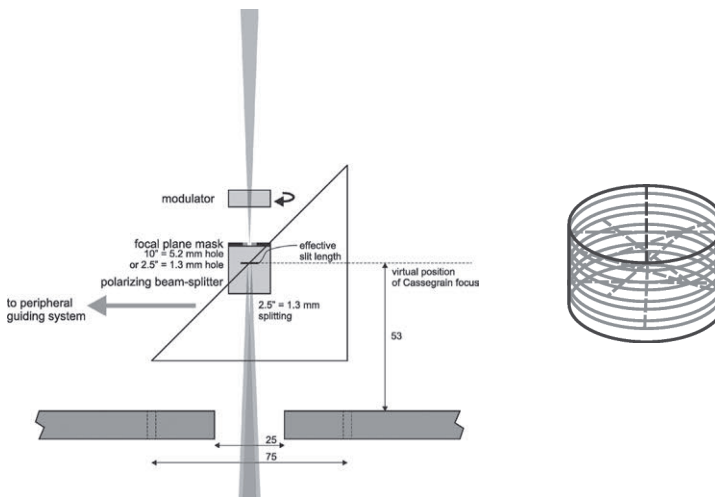
Obrázek 6.42: Uspořádání pro měření stupně lineární polarizace; vpravo je vždy vidět probíhající změny polarizace v čase, během otáčení první destičky. Konvergentní svazek, v tomto případě lineárně polarizovaný, přichází zhlury. Prochází nejprve *rotující* půlvlnnou destičkou, pak otvorem v ohniskové rovině, kterým vybíráme zajímavý zdroj, fixní půlvlnnou destičkou se svislou orientací osy (obě jsou analyzátoři) a nakonec dvojlomným hranolem (obvykle označovaným jako polarizátor), za kterým už následuje pouze afokální detektor (fotonásobič). Vidíme, že polarizace vždy zůstává lineární, první destička pouze průběžně mění její orientaci, druhá ji pouze převrací podle vertikální osy, hranol propouští pouze vertikálně orientovanou vlnu, což mění intenzitu $I(t)$ na časové škále P otáčení destičky (nikoli na $1/f$ záření). Protože první destička se točí harmonicky, i časový průběh odpovídá harmonické funkci. Měřením minima a maxima obdržíme stupeň lineární polarizace jako $p = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$. Převzato z Walker (1987), resp. Bracewell (1962).

označení	spektrální typ	V mag	p %	Ψ °
HD 204827	B0V	7,9	5,6	60
HD 183143	B7Ia	6,9	6,1	0
HD 160529	A2Ia	6,7	7,2	20
β Cas	F2IV	2,2	0,009	32
γ Lep A	F6V	3,6	0,005	130

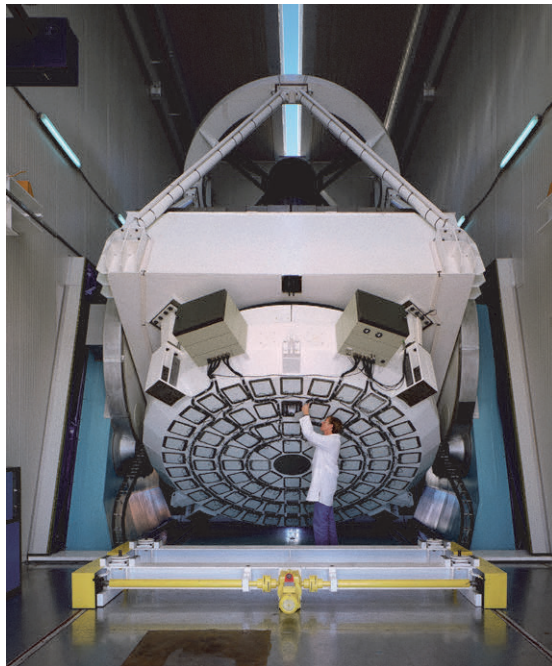
Tabulka 6.6: Vybrané standardní hvězdy pro polarimetrická měření. Pro každou hvězdu je uveden její spektrální typ, zjevná hvězdnou velikost V v oboru V , stupeň p lineární polarizace a polarizační úhel Ψ . Vidíme, že stupně polarizace nejsou nijak vysoké, dosahují nejvyš procenta a pro některé hvězdy jen tisícin %.



Obrázek 6.43: Uspořádání pro měření stupně kruhové polarizace. Za štěrbinou v ohniskové rovině je umístěna rotující půlvlnná destička s osou svislou, ovšem dělená na sektory. Zařazení sektoru vždy způsobuje otočení smyslu kruhové polarizace. Čtvrtvlnná destička pootočená o 45° mění polarizaci na lineární horizontální nebo vertikální. Dvojlomný hranol s osou svislou pak propouští pouze vertikální složku, což způsobuje změny intenzity se schodovitým průběhem. Stupeň kruhové polarizace lze spočítat jako $q = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$. Převzato z Walker (1987).



Obrázek 6.44: Polarimetr X-shooter pro VLT; vlevo schéma, vpravo detail modulátoru. Konvergentní svazek přichází shora a prochází rotující půlvlnnou destičkou se sektory proměnné tloušťky (modulátorem) a Savartovou destičkou. Tato je složena se dvou destiček dvojlomného materiálu, přičemž obě mají osy skloněné 45° k normále a 90° navzájem. Za ní dochází k interferenci řádného a mimořádného svazku, což vytváří interferenční proužky, jejichž viditelnost určuje (modulované) Stokesovy parametry. Demodulaci je potřeba provést výpočtem. Převzato ze Snik a spol. (2012).



Obrázek 6.45: Aktivní optika dalekohledu NTT na observatoři La Silla. Převzato z <http://www.eso.org/public/images/esopia00042teles/>.

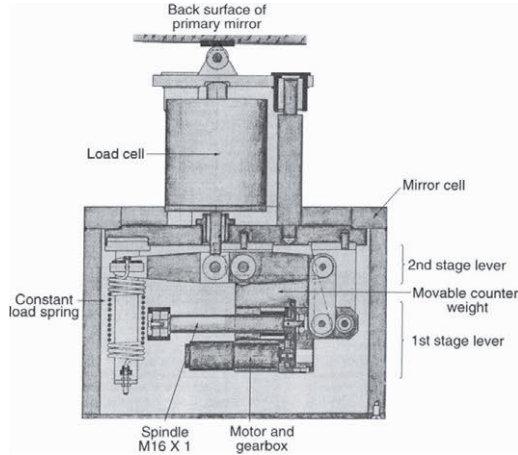
6.12.1 Aktivní optika

Aktivní optický systém tvoří relativně tenké a málo hmotné zrcadlo. Na jednu stranu je sice náchylné ke zmiňovaným deformacím působením gravitace a uložení, ale ty se kompenzují pomocí aktuátorů na spodní straně zrcadla. Na druhou stranu se zároveň řeší problém s tepelnou roztažností. Napomáhá tomu menší tepelná setrvačnost, případně ventilační systém.

Aktivní systém musí pomocí senzorů zjišťovat polohu částí zrcadla a zároveň pomocí aktuátorů upravovat tvar, s frekvencí řádově 1 Hz. Prvním dalekohledem s aktivní optikou byl NTT na La Silla (obr. 6.45, 6.46).

6.12.2 Adaptivní optika

Nejjednodušším systémem adaptivní optiky je zrcadlo provádějící náklon a úklon (angl. tip-and-tilt), které vyrovnává pohyby hvězdy v ohniskové rovině. Je velmi dobře použitelný pro malé apertury (do 15 cm), u kterých lze předpokládat rovinnou vlnoplochu na vstupu a posun stejným směrem v celém zorném poli. Odpovídá vlastně skládání obrázků pořízených s krátkou expozicí „na hvězdu“. U velkých apertur se zařazuje také jako předstupeň pro plnou adaptivní optiku.



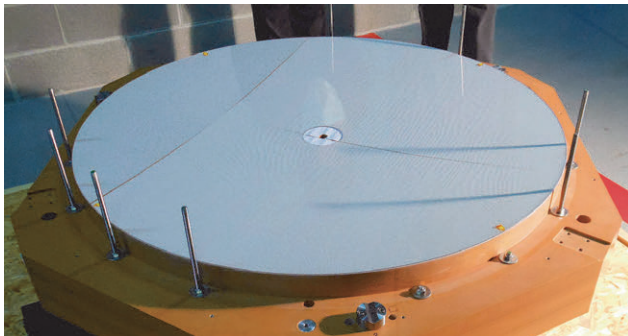
Obrázek 6.46: Schéma aktuátoru použitého na dalekohledu NTT. Motor přes převodovku a šroubovnici pohybuje s protizávazím, které svojí tíhou přes páku ovlivňuje sílu působící na zrcadlo. Převzato z Wilson (2007).

Pro korekci tvaru vlnoplochy je potřeba deformovatelné velmi tenké zrcadlo (obr. 6.47), schopné měnit tvar s frekvencí 100 až 1000 Hz. Bývá buď segmentové, nebo monolitické. Aktuátory mohou být připevněny k zrcadlu, případně k membráně, nebo jsou podložky magnetické; vyvíjejí se i mikrostroje nanesené přímo na zrcadle (MEMS).

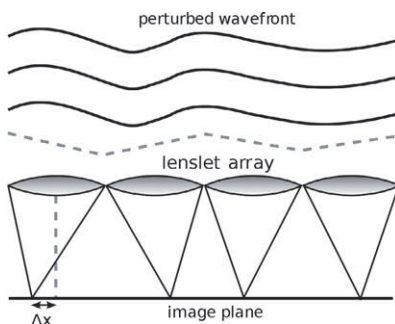
Počet aktuátorů M je rozhodující parametr; obvykle $M > N$, kde N označuje nejvyšší řád Zernikého polynomu, který je zařízení ještě schopno kompenzovat. Rozhodující jsou však korekce nízkých řádů. Důležitými parametry jsou i vzájemná vzdálenost, maximální posunutí, případné vazby a hystereze.

Shackův–Hartmannův senzor vlnoplochy. Tvar vlnoplochy se nejčastěji měří pomocí Shackova–Hartmannova senzoru (obr. 6.48). Jde o pole čoček, soustřeďujících světlo z různých částí apertury do ohniskové roviny, ve které se měří posuny Δx , Δy obrazů *téže* hvězdy, které se posléze promítnou do pohybů aktuátorů. V systému s otevřenou smyčkou probíhá měření před korekcí vlnoplochy. U uzavřené smyčky po korekci, což má velkou výhodu v jen malých posunech (Δx , Δy).

Pro měření je nezbytná krátká expoziční doba, čili jasná hvězda v poli. To omezuje použití pouze na objekty v okolí ($\simeq 1'$) jasných hvězd. Alternativně je možné vytvořit v atmosféře umělou hvězdu, a to excitací atomů sodíku sodíkovým laserem, s $\lambda = 589 \text{ nm}$, ve výškách okolo 100 km (tj. na rozhraní mezoféry a termosféry). Druhou možností je využívat Rayleighova rozptylu paprsku, do výšky 20 km. Nevýhodou je ovšem, že nekorigujeme celou atmosféru.



Obrázek 6.47: Tenké zrcadlo pro adaptivní optiku VLT. Má průměr 1120 mm, tloušťku pouhé 2 mm. Převzato z <http://www.eso.org/public/images/ann14010a/>.



Obrázek 6.48: Shackův–Hartmannův senzor vlnplochy. Převzato z http://en.wikipedia.org/wiki/Adaptive_optics.

Zernikeho polynomy. Pro popis deformací vlnplochy (zrcadla) je možno použít ortogonální Zernikeho polynomy, definované na jednotkovém kruhu (obr. 6.49):

$$Z_n^m = R_n^m(\rho) \cos(m\phi), \quad (6.148)$$

$$Z_n^{-m} = R_n^m(\rho) \sin(m\phi), \quad (6.149)$$

$$R_n^m(\rho) = \sum_{k=0}^{\frac{n-m}{2}} \frac{(-1)^k (n-k)!}{k! \left(\frac{n+m}{2} - k\right)! \left(\frac{n-m}{2} - k\right)!} \rho^{n-2k} \quad (6.150)$$

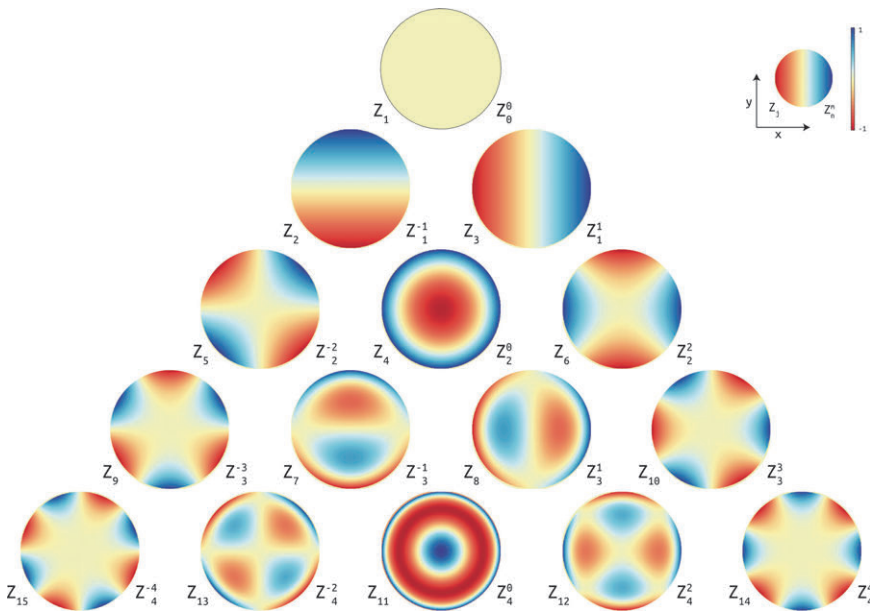
pro $n - m$ sudé, $R_n^m = 0$ pro $n - m$ liché. Pro změřenou vlnplochu, resp. všechna $(\Delta x, \Delta y)$, lze provést rozvoj do Zernikeho polynomů a interpretovat jednotlivé členy podle tab. 6.7.

[285] Wilson R.N. 2007 Reflecting Telescope Optics I: Basic Design Theory and its Historical Development, Springer, Berlin, ISBN 978-3-540-40106-7

[286] Zernike polynomials, in Wikipedia 2016 http://en.wikipedia.org/wiki/Zernike_polynomials

n	m	pojmenování
0	1	píst
1	1	tip (laterální poloha ve směru x)
1	-1	tilt (laterální poloha ve směru y)
2	0	rozostření
2	-2	šikmý astigmatismus
2	2	vertikální astigmatismus
3	-1	vertikální koma
3	1	horizontální koma

Tabulka 6.7: Interpretace Zernikeho polynomů pro účely popisu deformací zrcadla a korekcí jednotlivých aberací. Podle [286].



Obrázek 6.49: Zernikeho polynomy do řádu $n = 4$ a stupně $m = \pm 4$. Barevně je vyznačena hodnota Z_n^m v intervalu $(-1; 1)$ v závislosti na polárních souřadnicích (ρ, φ) . Převzato z http://en.wikipedia.org/wiki/Zernike_polynomials.