

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Peter Zamarovský
400 let astronomického dalekohledu

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 54 (2009), No. 2, 94--111

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/141894>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2009

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

400 let astronomického dalekohledu

Peter Zamarovský, Praha

Na cestě astronomie se netyčí bezesporu významnější milník, nežli byl vynález dalekohledu. Hvězdáři přestali být odkázáni jen na studium pohybu nebeských těles a otevřela se jim možnost na nich něco uvidět — i když mezi viděním a pochopením podstaty zela a dosud často zeje propast. Další pro astronomii užitečné vynálezy (fotografie, spektroskopie, radioastronomie atd.) představují většinou už jen vylepšení a doplnění tohoto průlomového vynálezu.

Prehistorie – artefakty

Prehistorie dalekohledu je úzce spojena s historií optiky, jak teoretické, tak i praktické. A praktická optika stála a dodnes stojí především na umění výroby čirého skla a na dovednosti brousit a leštit čočky a zrcadla.

Sklářskou technologii ovládli už staří Egypťané. Jejich skleněné nádoby a ozdoby působí dodnes svou krásou. Sklo je však barevné, plné bublinek a dalších nehomogenit. Z hlediska praktické optiky byl použitelnější horský křišťál a další průhledné polodrahokamy (beryl). Už v období Staré říše je uměli Egypťané brousit a leštit. Vyráběli z nich šperky a také lupy. Toto umění ovládali i staří Asyřané. Křišťálovou čočku z doby kolem 3000 př. n. l. našel roku 1850 Layard v Nimrudu¹). Dnes je vystavena v Britském muzeu. Historik Giovanni Pettinato z Římské univerzity se dokonce domnívá, že tato čočka mohla být součástí teleskopu. Svou domněnku zakládá na asyrských zobrazeních planety Saturn jako boha ovinutého hady. Had však býval v Asýrii oblíbeným motivem a nemusíme si ho proto vysvětlovat jako obraz Saturnova prstence. Navíc nevalná optická kvalita zmíněné čočky činí hypotézu profesora Pettinatiho nepravděpodobnou. Spíše tedy šlo o ozdobu či zvětšovací sklo — obě funkce se samozřejmě nevylučují. Další plankonvexní čočka se našla v Asyrském legendárním městě Ninive²) (7. stol. př. n. l.). Pozůstatky čoček se prý našly i v jeskyni v pohorí Ida na Krétě (asi 5. stol. př. n. l.).

¹) Hlavní město Asýrie na západním břehu Tigridu, dnes severozápadní Irák.

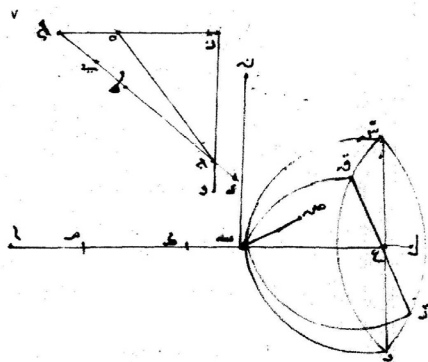
²) V Bibli zmiňované „hříšné“ město na východním břehu Tigridu cca 30 km severně od Nimrudu. Nyní nese jméno Mosul.

Písemné zprávy

Popis „zapalujícího sklíčka“ nalezneme v Aristofanově komedii *Oblaky* (423 př. n. l.). O čtyři století později se Seneca mladší (4 př. n. l. – 65 n. l.) a Plinius starší (23 n. l. – 79 n. l.) zmiňují o lupách, které používali rytci v Pompejích. Oba autoři také zaznamenali, že jako čočka působí i baňka naplněná vodou — zvětšuje obraz předmětů umístěných těsně za ní. Sluneční paprsky soustředěné baňkou mohou dokonce zapálit oheň, a to přesto, že voda sama je studená.

I „zapalující lžičky“ — tedy konkávní zrcadla — byly v antice všeobecně známé. Pomocí nich rozdělávaly posvátný oheň kněžky ve Vestiných chrámech. Olympijský oheň se tak rozněcuje dodnes.³⁾

Značné popularity se dočkal příběh, podle kterého Archimédés (287 až 212 př. n. l.) nechal zapalovat soustředěnými slunečními paprsky římské loď obléhající jeho rodné Syrakúsy. Několik stovek lučištníků prý nastavilo své vyleštěné měděné štíty tak, aby se odražené světlo soustředilo do jednoho místa na římské lodi. Loď v ohnisku záhy vzplála. Tato historka je však pravděpodobně produkt pozdější fantazie, protože se o ní nejstarší historici nezmiňují. Uvádějí ji až v 6. stol. n. l. byzantští historici Didymos a Anthemios z Thalleis. Tento údajný Archimédův vynález inspiroval k četným pokusům. V roce 1973 byl dokonce s úspěchem vyzkoušen. Sluneční paprsky odražené od 130 poměděných zrcadel 1,7 m × 0,6 m zapálily během několika minut dřevěnou loď ve vzdálenosti 100 m. Traktát *O zapalujících zrcadlech a čočkách* sepsal na konci desátého století perský matematik Ibn Sahl. Popisuje v něm i zákon lomu světla, dnes



لانه ان مائه عليها سطح مستوي غيره فلان هذا السطح يتقطع سطحه بوتر
ع نقطة ت تلابد من ان يتقطع احد خطي ب ن من فليكن ذلك
الخط م م و الفصل المشترك بين هذا السطح وبين سطح قطع ق ر
خطا ب ت فلان هذا السطح ياتر من سطح م م على نقطة ت فخط
م ت يقطع ق ر عند ر على نقطة ت وكذلك خط م م و هذا حال
فلا ياتر سطح م م على نقطة ت سطح مستوي غيره سطح ب ن م م

Ibn Sahlův manuscript popisující lom světla

³⁾ Konkávní zrcadla byla známá i ve staré Číně. Popisuje je například legendární filosof Mozi (4. stol. př. n.l.).

známý jako Snellův zákon, a vypočítává tvary optických ploch čočky.⁴⁾ V letech 1011 až 1021 Ibn al-Haytham (známý jako Alhazen) sepisuje *Knihu optiky*. Popisuje v ní i „*cameru obscuru*“, která zobrazuje předměty pomocí spojné čočky — tedy předchůdce fotografické komory.⁵⁾ Alhazenovu práci vysoce cenil i Isaac Newton.

Prvé zmínky o přístroji, který bychom už mohli považovat za dalekohled, uvádí oxfordský renesanční učenec, biskup Robert Grosseteste (asi 1175–1253). Ve svém spise *O duze* píše „Optika umožňuje, aby se malé vzdálené věci jevily veliké, jak chceme. . . “. Teleskop popisuje i jeho žák Roger Bacon. Podle matematika, přírodovědce a známého esoterika Johna Deea a astronoma Thomase Diggesse používal dalekohled už Thomasův otec Leonard Digges v letech 1550–1570. Sestrojil prý jak čočkový, tak i zrcadlový dalekohled. Nezávisle to potvrzuje i William Bourne (kolem roku 1580). Šlo nejspíš jen o pokusné modely, které se bohužel ani v nákresu nedochovaly. Už před rokem 1574 popisuje dalekohled i ottomanský astronom Taqi al-Din. Ve svém dopise zmiňuje teleskop také neapolský renesanční polyhistor Giambattista della Porta. To se psal rok 1586. Zmínky o dalekohledu zahrnul do své *Přírodní magie*, speciální pojednání *De telescopiis* však už nedokončil.



Hans Lippershey ve své optické dílně

⁴⁾ Čočka s kulovými plochami je sice nejsnáze vyrobitelná a běžná, trpí ale (stejně jako kulové zrcadlo) sférickou vadou.

⁵⁾ Někdy se pod termínem „*camera obscura*“ míní dírková komora.

Galileův dalekohled

Na přelomu šestnáctého a sedmnáctého století přechází mlhavá prehistorie dalekohledu už v dokumentovanou historii. Dne 2. října 1608 se pokouší holandský brusič čoček Hans Lippershey (někdy uváděn jako Johan Lipperhey) patentovat dalekohled. Patent byl ale zamítnut — přístroj je prý již znám. Parlament však Lippersheye vybídl, aby zkonstruoval dalekohled binokulární. Lippershey tedy nebyl první, kdo dalekohled zkonstruoval, byl však první, kdo si plně uvědomil jeho význam pro námořnictvo a armádu. Už za dva týdny hlásí vynález dalekohledu i Jacob Metius z Alkmaaru (Jacob Adriaanszoon).⁶⁾ Mezi další vynálezce dalekohledu se řadí optik Sacharias Janssen z Middelburgu, který už nabízel své dalekohledy na frankfurtském veletrhu. V dubnu 1609 se objevily třikrát zvětšující dalekohledy v brýlařství v Pont Neuf u Paříže.



Brýlaři, 1582

Za pár měsíců se zpráva o pozoruhodném „přibližujícím přístroji“ dostala i do Itálie. A nejen zpráva, do Itálie bylo dovezeno i několik dalekohledů. Když se Galileo o vynálezu doslechl, uvědomil si, že může dobře posloužit i hvězdářům. A tak na začátku roku 1609 si podle holandského popisu vyrábí přístroj vlastní. Začátkem léta měl už v rukou dalekohled 3× zvětšující. Na výrobu čoček použil sklo z benátských skláren na ostrově Murano, které se vyznačovalo vysokou kvalitou. Svůj přístroj nazýval „cannocchiale“⁷⁾ nebo latinsky „perspicillum“. Název „telescopium“ navrhl až Galileův přítel Federico Cesi, kterému v dubnu 1611 Galileo dalekohled předvedl.⁸⁾

⁶⁾ Bylo to právě v den narození Evangelisty Torricelliho.

⁷⁾ Italsky to znamená kukátko, dnes též námořnický dalekohled.

⁸⁾ Stalo se tak prý 14. dubna 1611 – téměř přesně 350 roků před legendárním Gagarinovým letem. Federico Angelo Cesi (výslovnost „češi“, 1585–1630) byl italský přírodovědec a zakladatel Accademia dei Lincei („Akademie rysů“, rys – symbol ostrého zraku).

Galileův dalekohled byl stejného typu jako Lippersheyův. Sestával z plankonvexní spojné čočky a plankonkávni rozptylky. Tyto čočky zasadil Galilei do olověné trubky⁹⁾, pozdější dalekohledy měly už tubus dřevěný nebo z navinutého papíru vztuženého vlepenými špejlemi. Povrchy některých luxusnějších kusů (především darů vlivným osobám) nechal polepit kůží se zlatým potiskem. Galilei vyrobil dalekohledů několik. Průměry zachovaných objektivů byly 51 mm, 26 mm, 37 mm a 58 mm. Aby omezil optické vady, zaclonil čočky papírovou clonkou na 26 mm, 11 mm, 16 mm a 38 mm. Dalekohledy zvětšovaly 14×, 20× a 34× a byly poměrně dlouhé, ohnisková vzdálenost objektivů činila 1327 mm, 956 mm a 1689 mm. Zorné pole však bylo velmi úzké, například 14× zvětšující dalekohled obsáhl úhel jen čtvrt stupně, tj. polovinu měsíčního kotouče. (Tomu odpovídá subjektivní zorný úhel 3,5 stupně.) Obraz navíc lemovaly barevné kontury, důsledek chromatické vady čoček.



Galileovy dalekohledy

Galileo neudával zvětšení svých dalekohledů v lineární škále, jak je zvykem dnes. Užíval plošného zvětšení, které vyjadřuje, kolikrát se zvětší zdánlivá plocha pozorovaného objektu, tedy druhé mocniny zvětšení lineárního. (Na tento trik dnešní obchodníci nepřišli.)

Když Galilei namíří svůj dalekohled k obloze, nestačí se divit. Objevuje skoro vše, co se dá takovým na dnešní dobu dosti primitivním přístrojem uvidět. Na Měsíci pozoruje krátery a uvědomuje si, že jeho povrch se podobá pozemským horám a mořím (jak se už před dvěma tisíciletími domníval Řek Anaxagorás z Klazomen). Planeta Venuše jeví fáze, podobně jako náš Měsíc. Všimá si i podivného tvaru planety Saturn, podrobnosti ale už není jeho dalekohled schopen rozlišit.

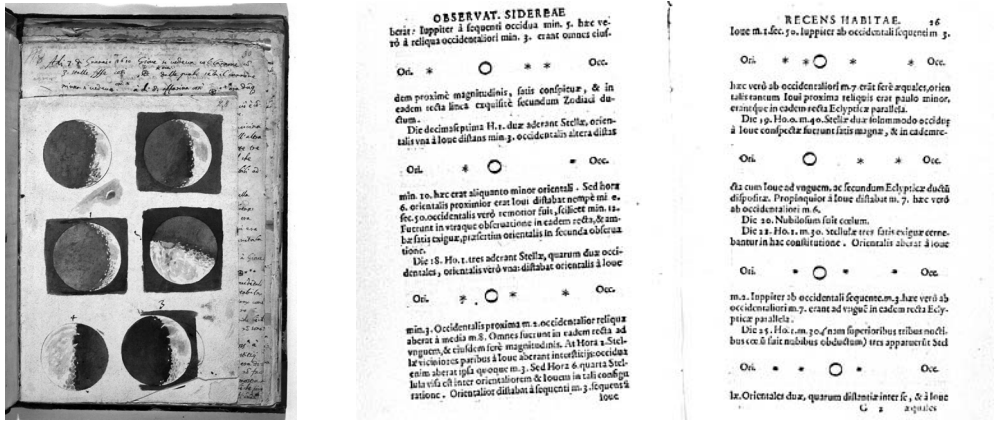
Galilei se domníval, že těsně u kotoučku Saturnu se nacházejí na protilehlých stranách dvě hvězdičky, jakoby nějaké rohy. Takto je Saturn zachycen i na freskách v pražském Valdštejnském paláci. Jeho výzdobou byl totiž pověřen Giovanni Pieroni, který byl Galileiho žákem. Saturnův prstenec rozpoznal až Holanďan Christian Huygens (1629–1695), to však byl Galileo už třináct let po smrti.

Když Slunce rudlo u obzoru, spatřil Galilei na jeho kotouči skvrny a z jejich pohybu usoudil na rotaci Slunce.¹⁰⁾ Mléčnou dráhu rozložil Galileiho dalekohled na množství drobných hvězd. Naše Galaxie tedy není mrakem, jak se všeobecně soudilo. Galilei tak potvrdil dva tisíce let starou domněnku Démokritovu. (Objev hvězdné struktury

⁹⁾ Tento nezvyklý konstrukční materiál zvolil Galileo asi proto, že byl běžně dostupný. Veškeré vodovodní instalace se dělávaly z olověných trubek.

¹⁰⁾ Galilei pozoroval a zakreslil i planetu Neptun. Nevšiml si ale, že jde o planetu, a tak nemůžeme tvrdit, že Neptun objevil.

cizích galaxií pak přináležejí Edwinu Hubbleovi. To se však už psala dvacátá léta minulého století.) Nejznámějším Galileovým astronomickým objevem byla soustava čtyř Jupiterových měsíčků (při prvních pozorováních viděl jen měsíce tři), zmenšená to podoba sluneční soustavy. První kresba Jupiterovy měsíční soustavy nese datum 7. leden 1610. Měsíce pojmenoval po svých mecenáších „hvězdami Medicejskými“. Dnes používaná jména pocházejí od německého astronoma Simona Maria (1573–1624). Názvy prvních tří měsíců Io, Europa a Kallistó (Callisto) nám připomínají milenky nejvyššího boha Dia — Jupitera, Ganymed byl jeho oblíbeným číšníkem.



Galileovy kresby Měsíce a zákresy poloh měsíčků Jupitera

Jupiterovy měsíce obíhají mnohem rychleji než náš Měsíc a Galilei si uvědomil, že představují jakési „kosmické hodiny“. Navrhl je proto využívat k určování času při námořní navigaci.¹¹⁾ Tato metoda se však ukázala jako nepraktická. Objevila se ale ještě zásadnější námitka — Galileovy „kosmické hodiny“ se z neznámých důvodů asi o 20 minut periodicky zpožďovaly a předcházely. (Tento jev byl v roce 1676 vysvětlen konečnou rychlostí šíření světla a oběhem Země a Jupitera kolem Slunce. Zásahu na tom měli Dán Olaf Rømer a Holanďan Christian Huygens.)

V březnu 1610 shrnul Galilei výsledky svých teleskopických pozorování v tenkém spisku *Sidereus nuncius*, tedy *Hvězdný posel*. Jeden výtisk poslal i Johannovi Keplerovi do Prahy.

Jak jsme se už zmínili, Galileiho dalekohled měl četné optické vady. Na to poukazyvali i Galileovi protivníci: „Jak máme věřit tomu, co v dalekohledu vidíme, když dalekohled přidává falešné barvy tam, kde zjevně nejsou? Není lepší spolehnout se na neozbrojené oko?“

Mezi první odpůrce dalekohledu (i samotného Galilea) se zařadil i Martin Horký, rodnák ze středočeských Lochovic. V roce 1610 pobýval v Bologni jako asistent astronoma Giovanniho Antonia Maginiho. Byl přítomen návštěvě Galileiho, který tu předváděl svůj přístroj. O dalekohledu Horký poznamenává: „Na zemi to funguje zázračně, ale na

¹¹⁾ Přesné určování času potřebné pro navigaci tenkrát představovalo veliký problém.

nebesích klame tím, že se hvězdy jeví dvojitě.“ (Onu „dvojitost“ pak Horký paradoxně dokumentuje na pozorování hvězdy Mizar, která je ale ve skutečnosti vícenásobnou hvězdou.) Magini i Horký zaujali k novému přístroji skeptické stanovisko a Jupiterovy měsíce považovali za optický klam. Horký ve své horlivosti dokonce sepsal pamflet zpochybňující Galileiho pozorování.¹²⁾ Nezůstal však jen na věcné úrovni. Galileiho obvinil, že o oněch „skvrnách u Jupitera“, „fiktivních planetách“ referuje pouze z lačnosti po penězích. Po této blamáži Magini Horkého ze svého domu vykázal. Horký se ale nevzdal a napsal list Keplerovi do Prahy. Popsal v něm, jak Galileiho přístroj „podvádí“, nicméně připojuje dodatek, že dalekohled si „tajně otiskl do vosku“, aby si podle toho vyrobil lepší. Kepler zareagoval ráznými slovy a od protigalileovského spisku se distancoval.

Avšak ani konkurence za Kanálem nezhálela. Začátkem léta 1609 konstruuje britský matematik a astronom Thomas Harriot¹³⁾ 6× zvětšující dalekohled a v červenci téhož roku na základě teleskopických pozorování poprvé zakresluje povrch Měsíce. (Tato pozorování předchází pozorování Galileiova.) V prosinci 1610 pak zakresluje skvrny na Slunci. Pozornost věnuje též Jupiterovým měsícům. Harriotova pozorování se však našla až v učencově pozůstalosti (v roce 1784).

Keplerův dalekohled

Galileiho typ dalekohledu má tu nepříjemnou vlastnost, že s rostoucím zvětšením rychle ubývá velikost zorného pole. Zmenšuje se nejen objektivní zorný úhel (což je pochopitelné), ale klesá i subjektivní zorné pole — jednoduše řečeno, okulár je rozptylka a ta zmenšuje obraz objektivu, který zorné pole ohraničuje. Pro větší zvětšení se proto moc nehodí. Navíc ho není možné doplnit záměrnou značkou nebo stupnicí k měření úhlových vzdáleností a velikostí nebeských objektů. (Galilei si dopomáhal tak, že po straně tubusu dalekohledu umístil jakési úhломěrné zařízení, které současně pozoroval druhým okem.) Z těchto důvodů představoval Keplerův návrh nového typu dalekohledu výrazné zlepšení.

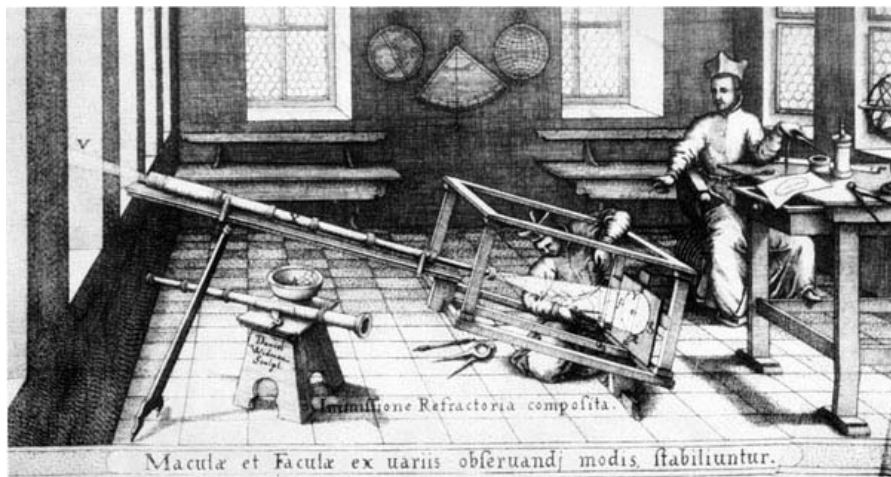
Kepler byl ale spíše teoretik než praktický pozorovatel. (Souviselo to patrně s jeho špatným zrakem.) Nicméně o optiku se zajímal a myšlenka dalekohledu ho zaujala. V srpnu 1610 mu půjčil dalekohled hannoverský kurfiřt Arnošt Bavorský, a tak se mohl na vlastní oči přesvědčit o existenci Jupiterových měsíčků. Ještě předtím, než zdokonalil dalekohled, popsal v roce 1604 ve své *Astronomia pars optica* dírkovou komoru.¹⁴⁾ Vzhledem k velmi malé světelnosti svého „objektivu“ je dírková komora v astronomii dobrá jen na jednu věc — na promítání obrazu Slunce. Pro tento účel ji Kepler použil při slunečním zatmění v roce 1604 a při pokusu o sledování přechodu Merkura před Sluncem v roce 1607. Merkur sice vidět nebylo, na povrchu Slunce byly ale objeveny skvrny.

¹²⁾ *Brevissima peregrinatio contra Nuncium Sidereum* (Modena, 1610).

¹³⁾ Říká se, že to byl on, kdo také přinesl z Ameriky do Británie brambory.

¹⁴⁾ A zavedl zde pojem „focus“, tj. ohnisko.

Vylepšení astronomického dalekohledu navrhl Kepler ve své *Dioptrice* (1611) tak, že rozptylnou čočku v okuláru nahradil čočkou spojnou. Výhodou této konstrukce bylo větší zorné pole a možnost umístit do zorného pole záměrný nitkový kříž nebo měřítko na určování úhlových rozměrů pozorovaných těles. Dalekohled se potom hodil i jako doplněk přístrojů pro poziční astronomii. Nevýhoda, zejména pro pozemská pozorování, spočívala v převráceném obraze.¹⁵⁾ Kepler dalekohled sice vymyslel, avšak není známo, že by jej vskutku sestrojil. Keplerův typ dalekohledu konstruuje až v roce 1630 jezuita Christopher Scheiner (1575–1650) a Maria Šírek (Schyrleus, Schyrl, Schyrle) z Rheity (1597–1660).¹⁶⁾ To však bylo až v roce Keplerovy smrti.



Christopher Scheiner se svým přístrojem na promítání obrazu Slunce, 1626

Scheiner se zasloužil o další významné zlepšení astronomických přístrojů tím, že spolu s Heveliem sestrojil roku 1638 první paralakticky montovaný dalekohled. Byl to speciální dalekohled na pozorování Slunce projekcí a měl průměr objektivu 6 cm. Paralaktická neboli ekvatoreální montáž dalekohledu spočívá v tom, že jedna osa rotace je rovnoběžná s osou zemskou. Směřuje tedy k Polárce. Takto je možné snadno eliminovat otáčení nebeské sféry. (U větších přístrojů se tak děje pomocí hodinového stroje.)

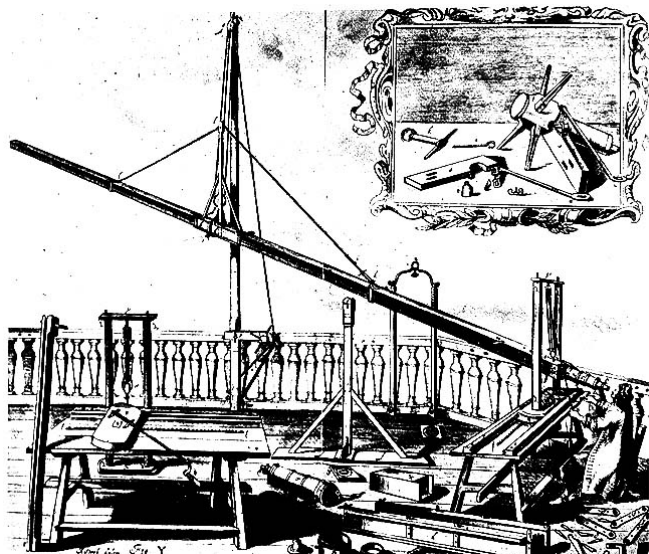
Sluneční skvrny se poté staly jedním z hlavních objektů teleskopických pozorování. Sleduje je Harriot v Anglii (prosinec 1610), Johannes Fabricius ve Frísku¹⁷⁾ (prosinec 1610), Galilei ve Florencii (květen 1611) i Scheiner (březen 1611) v nynější polské Nyse.

¹⁵⁾ Kepler vymyslel i čočkový převraccí systém — obraz je promítnut spojnou čočkou a pozoruje se další spojkou. Vzhledem ke značným optickým vadám se tento terestrický dalekohled zprvu neujal. Dnes tento optický systém využívá zejména „námořnický“ typ dalekohledu.

¹⁶⁾ Od Šírka pocházejí i názvy „objektiv“ a „okulár“.

¹⁷⁾ Dnes severozápadní Německo a severní Holandsko.

Vzhledem k tomu, že vliv optických aberací (především nejvíce rušící barevné vady) se sníží, když se při daném průměru čočky zvětší její ohnisková vzdálenost, začaly se stavět velmi dlouhé dalekohledy. Příkladem může být teleskop Jacoba Hevelia, který měřil 45 metrů (průměr objektivu jen asi 8 cm). O praktickém využití těchto monster lze však pochybovat.



Dvacetimetrový Heveliiův dalekohled

Achromatický dalekohled

Průlomem astronomické optiky (vlastně celé technické optiky) byl vynález achromatické čočky, tj. optické soustavy, jejíž barevná vada je potlačena. Sestává zpravidla ze dvou čoček — optických členů, které bývají někdy stmeleny kanadským balzámem (zejména u menších průměrů), jindy je mezi nimi mezera („vzduchový achromát“). Achromatickou čočku vynalezl v roce 1733 Chester Moore Hall. Jeden optický člen je vyroben z korunového skla s nižší disperzí¹⁸⁾ a druhý optický člen (s nižší optickou mohutností) je ze skla s disperzí větší. Takovýmto sklem je sklo flintové.¹⁹⁾ Rozklad světla se tím vyruší. Princip kompenzace barevné vady teoreticky odvodil Leonard Euler (1747)²⁰⁾ a první achromatickou čočku vyrobil John Dollond (1757). Tím vyvrátil Newtonův omyl týkající se nemožnosti odstranit barevnou vadu čoček. Královská společnost za to odměnila Dollonda medailí.

¹⁸⁾ Disperzí se myslí relativní rozdíl lámavosti pro světlo dvou rozdílných vlnových délek.

¹⁹⁾ Flintová skla obsahují olovo a bývají proto těžká a nažloutlá. Do roku 1886 se v optice používaly pouze tyto dva typy skel: korunové a flintové. Dnes mají optici k dispozici stovky druhů optického skla.

²⁰⁾ Euler uvažoval kombinaci skla a vody.

Mezi astronomy vypuklo nadšení: se zdokonalujícím se dalekohledem půjde neomezeně zvyšovat zvětšení a na našem nejbližším vesmírném sousedu uvidíme snad i Měsíčkany.

Naděje na vysoká zvětšení se však nenaplnila. Zatímco běžným mikroskopem můžeme užít zvětšení i více než tisícinásobné, u dalekohledu se musíme spokojit se zvětšením maximálně několikasetnásobným. I kdyby byl dalekohled dokonale zbaven všech optických vad, jeho zvětšení je omezeno třemi faktory. Především žijeme na dně vzdušného moře. Masy teplejšího a chladnějšího vzduchu se neustále promíchávají, a tak je atmosféra nehomogenní z hlediska hmotnostní i optické hustoty. Obraz se proto neustále chvěje a rozostřuje. Dalším omezením je nedostatek světla. Při vysokém zvětšení obraz tmavne, a tak pro méně jasné objekty používají astronomové raději zvětšení nižší. Konečně použitelné zvětšení omezují vlnové vlastnosti světla. Geometrická optika neplatí přesně. Bod se optickou soustavou nezobrazí jako bod, ale jako „rozptylový kroužek“ — ploška obklopená soustřednými kruhy (rozložení světla vystihuje Besselova funkce).

Barevná vada však není ani u achromatické čočky zlikvidována beze zbytku. (Jeden z důvodů je ten, že spojná a rozptylná čočka jsou navzájem posunuty, dále průběh disperze se u jednotlivých skel neshoduje.) Důsledkem toho je malá zbytková sekundární barevná vada.²¹⁾ Potlačit onu sekundární barevnou vadu je možné opět prodloužením ohniskové vzdálenosti čočky — objektivu.²²⁾

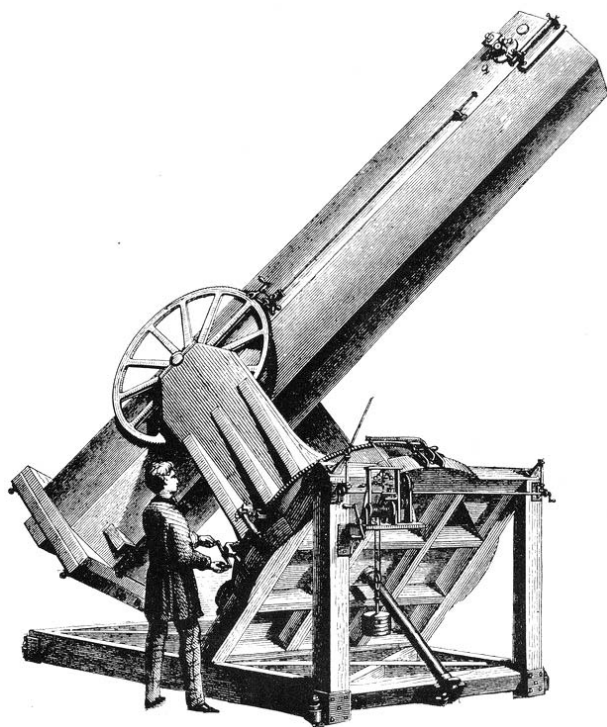
Světelností objektivu (správnější název je „relativní otvor“) rozumíme poměr jeho průměru k ohniskové vzdálenosti. Tento termín je znám především z fotografické techniky. Na základě povrchní analogie panuje někdy mezi amatéry názor, že světelnější objektiv dá jasnější obraz v okuláru. To však u dalekohledu neplatí. Jas výsledného obrazu závisí (kromě propustnosti optiky) jen na poměru průměru objektivu a zvětšení. Nejvyššího jasu se dosáhne, pokud použijeme takové zvětšení, při kterém výstupní pupila dalekohledu (daná jako poměr průměru objektivu a zvětšení) je shodná (nebo větší), než je vstupní pupila oka. Ta bývá kolem 4 mm (uvádí se, že se pohybuje mezi 2 – 8 mm). Při vyšších zvětšeních bývá obraz v dalekohledu temnější.

Typická světelnost objektivů velkých astronomických dalekohledů bývá kolem 1:15. A tak v druhé polovině 19. století nastává druhé období „dlouhých dalekohledů“. Jde často o impozantní přístroje montované na ekvatorální (paralaktické) montáži ukryté pod mohutnými kopulemi hvězdáren.

Bylo vyvinuto několik typů paralaktických montáží, nejčastější jsou tzv. německá (s protizávažím) a vidlicová (zejména pro zrcadlové dalekohledy). Menší dalekohledy užívaly azimutální montáže se svislou a vodorovnou osou. U ní je sledování pohybu nebeské klenby složitější, protože se dalekohledem musí otáčet v obou osách, navíc nerovnoměrným pohybem. V posledních letech se ujímá azimutální montáž i pro větší (a velké) dalekohledy. Problém nerovnoměrného otáčení řeší počítač.

²¹⁾ Zatímco primární barevná vada se projevuje modrými a červenými okraji kontrastních předmětů v zorném poli, sekundární dává většinou okraje zelené a fialové.

²²⁾ Lze také použít vícečočkové konstrukce, což je nákladnější a odrazy na povrchu čoček snižují kontrast obrazu. V dnešní době se pro tento účel rozmáhá použití speciálních skel s velmi nízkou disperzí.



Ekvatoriálně montovaný reflektor, Marseilles, 1873

Nezlepšují se jen objektivy, ale i okuláry. Zatímco u Galileova dalekohledu vystačíme s jednoduchou rozptylnou čočkou, pro Keplerův typ dalekohledu se postupně vyvíjejí složitější soustavy. Jejich cílem je zlepšit kvalitu zobrazení, zvětšit zorné pole a případně i zvětšit vzdálenost výstupní pupily, abychom nemuseli oko tisknout příliš blízko k dalekohledu. V roce 1650 konstruuje Christiaan Huygens (1629–1695) dvoučočkový okulár. Sestává ze spojných ploskovypuklých čoček, z nichž první (s delším ohniskem) leží ještě před ohniskovou rovinou objektivu. Okulár ze dvou stejných spojek vynalézá roku 1783 Jesse Ramsden. Oba typy se hojně rozšířily, Huygensův okulár se používá dodnes (i když hlavně u mikroskopů, značí se písmenem „H“). V roce 1849 nahradil Carl Kellner oční čočku Ramsdenova okuláru tmeleným achromatickým dubletem. Toto provedení okuláru je dodnes časté (i u mikroskopů, kde se značí „O“ jako ortoskopický okulár). „Pravý ortoskopický“ okulár s vynikajícími vlastnostmi (ale s poměrně malým zorným polem) navrhl v roce 1880 Ernst Abbé pro firmu Zeiss. Jen s drobnými obměnami se používá dodnes. Další konstrukce pocházejí od George Simona Plössla (1860). Jeho okulár je ze dvou stejných achromatických čoček, přivrácených vypuklou stranou k sobě, je kvalitní a přitom laciný. Erfle pak vyvinul (původně pro vojenské účely) širokoúhlý okulár se zorným polem cca 65 stupňů. Dnes máme k dispozici už nepřehlednou řadu různých typů okulárů.

Čočkové dalekohledy si získaly oblibu zejména mezi pozorovateli planet a Slunce. Poskytují kvalitní kontrastní obrazy s prokreslenými detaily, jsou navíc mechanicky

stabilní, málo citlivé na teplotní výkyvy a vyžadují jen minimální údržbu.²³) Největší čočkové objektivy se přiblížily svým průměrem jednomu metru. Nicméně astronomové touží po stále větších dalekohledech, po objektivěch soustřeďujících více světla. (Podle hesla „průměr ničím nenahradíš“.) Další zvětšování čoček však naráží na značné technologické problémy. Je obtížné vyrobit kvalitní desky skla (zejména flintového na rozptylky achromatického dubletu). Sklo bývá v takto velikých kusech nehomogenní a nedostatečně průzračné (nažloutlé), kvality velkého objektivu proto znehodnocuje absorpce světla. Navíc aby se udržela sekundární barevná vada objektivu na nízké úrovni, musí mít velký objektiv nízkou světelnost, tedy velkou ohniskovou vzdálenost. Dalekohledy jsou tedy dlouhé, těžké a vyžadují masivní drahou montáž a velkou nákladnou kupoli. Objevují se problémy s tečením skla (sklo je vlastně amorfní podchlazená velmi viskózní kapalina). Důsledkem těchto potíží bylo to, že růst průměrů čočkových dalekohledů se zastavil na velikosti asi 1 m. Většina objektivů je však mnohem menších, objektivy nad 30 cm se považují už za veliké. (Zrcadlový objektiv tohoto průměru vlastní i mnoho amatérů.) Další rozvoj se proto začal ubírat cestou dalekohledů zrcadlových.

Největší prakticky užívaný čočkový objektiv byl vyroben v roce 1897 pro Yerkesovu hvězdárnu v Chicagu. Měl průměr 101,6 cm. Vyrobil ho Alvan Clarke, který už předtím vyrobil řadu vynikajících objektivů. Mezi jinými i objektiv o průměru 20 cm, který později zakoupil Vojtěch Šafařík a slouží ve slunečním oddělení ondřejovské hvězdárny dodnes. Asi žádný jiný technický výrobek není schopen podávat tak špičkový výkon i ve stáří sto padesáti let.

Zrcadlový dalekohled

Zrcadlový dalekohled — reflektor — se od dalekohledu čočkového — refraktoru — liší tím, že jako objektiv užívá duté zrcadlo (resp. soustavu zrcadel). Na rozdíl od čoček zrcadla netrpí chromatickou vadou (o které se myslelo, že je nejen neodstranitelná, ale ani nezeslabitelná). Dají se vyrobit v mnohem větším průměru než čočky. Nevýhodou je složitější a na seřizování náročnější konstrukce, protože obraz vzniká ve stejném poloprostoru, jako je pozorovaný objekt. Další nevýhodou bývala nízká odrazivost kovových zrcadel, a tedy vysoké ztráty světla.

Zrcadlový dalekohled konstruoval už zmíněný Leonard Digges. Další zprávy uvádějí italského mnicha a profesora římské jezuitské koleje Niccollu Zucchiho (1586–1670). Roku 1616 se Zucchi pokusil sestrojít zrcadlový dalekohled s bronzovým vydutým zrcadlem. Toto zrcadlo bylo mírně skloněno, aby hlava pozorovatelova neclonila přicházející paprsky. Výsledek však zklamal a Zucchi se vrátil k čočkovým objektivům. (Jeden ze svých čočkových dalekohledů věnoval Zucchi prý Keplerovi, který v něm zájem o astronomii před léty probudil.) Zucchiho dalekohledy musely být už poměrně

²³) U zrcadlových dalekohledů způsobuje zaclánění sekundárního zrcátka větší difrakční (ohybové) efekty a v důsledku toho je obraz poněkud méně kontrastní. Pro stejné rozlišení detailů je u zrcadlového dalekohledu potřeba jedenapůl až dvojnásobný průměr objektivu.

výkonné, protože Zucchi jimi objevil pruhy na Jupiteru (17. květen 1630) a skvrny na Marsu (1640). Tyto útvary Galileo svým „perspicilliem“ neviděl. Svou knihou *Optica philosophia experimentalis et ratione a fundamentis constituta* (1652–1656) inspiroval Isaaca Newtona a Jamese Gregoryho.



Schéma Gregoryho dalekohledu

Roku 1663 navrhl Gregory zrcadlový dalekohled s primárním dutým paraboloidickým zrcadlem a sekundárním dutým elipsoidickým zrcadlem. Paraboloidické zrcadlo bylo provrtané a před ním bylo upevněno malé elipsoidické tak, aby ohniska zrcadel splývala. Obraz se pak vytváří v druhém ohnisku elipsoidického zrcadla, kde se pozoruje spojnou čočkou. Konstrukce je však dosti náročná, a tak funkční model zhotovil až roku 1674 známý britský fyzik Robert Hooke, první v praxi použitelný dalekohled pak roku 1721 John Hadley. Gregoryho typ dalekohledu se užívá poměrně málo.²⁴⁾ Na rozdíl od oblíbenějšího Cassegrainova typu je Gregoryho dalekohled o trochu delší a poskytuje vzpřímený obraz.



Schéma Newtonova dalekohledu

Mezitím roku 1668 Isaac Newton vyrobil první funkční model jednoduchého zrcadlového dalekohledu, dnes známého pod jeho jménem. Do dráhy paprsků odražených dutým zrcadlem (spíše zrcátkem, mělo průměr jen 35 mm) vložil poblíž horního konce tubusu malé sekundární zrcátko, které odrazilo paprsky kolmo ven do okuláru. Ohnisková rovina a tudíž i okulár jsou u horního konce, což je u malých dalekohledů z ergonomických důvodů výhodné. Newtonův typ dalekohledu se dodnes hojně užívá v profesionální i amatérské astronomické praxi. Získáme jím „nejvíc muziky za nejméně peněz“.

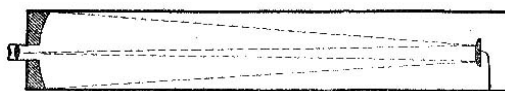


Schéma Cassegrainova dalekohledu

Devět let po Gregorym, v roce 1672, sestrojil francouzský mnich Laurent Cassegrain²⁵⁾ dalekohled podobné konstrukce. Duté elipsoidické sekundární zrcadlo

²⁴⁾ V posledních letech vyrábějí některé firmy z bývalého Sovětského svazu modifikace tohoto typu jako malé turistické dalekohledy.

²⁵⁾ O jeho identitu se vedly donedávna spory, proto najdeme jiné křestní jméno nebo jiné povolání (často sochař).

nahradil vypuklým (hyperboloidickým) zrcátkem, které leží před ohniskem primárního zrcadla a vrhá paprsky zpět provrtaným primárem. Výhodou je kratší délka a lepší korekce mimoosových vad. I tento typ dalekohledu se hojně do dneška užívá.



Původní Newtonův dalekohled (1668)

Za zmínku stojí ještě konstrukce Williama Herschela (1738–1822). Herschelova konstrukce dalekohledu vycházela ze staršího nápadu sklonit primární zrcadlo. Tak bylo možné pracovat jenom s jedním odrazem světla, což bylo při nízké odrazivosti tehdejších zrcadel (ne více než 50 %) významné.²⁶⁾ Další výhodou Herschelova typu dalekohledu je, že zrcadlo není zacláněno sekundárním zrcadlem. Systém však pracuje s paprsky, které svírají s optickou osou zrcadla (osou paraboloidu) poměrně veliký úhel. Optické vady jsou proto značné. Jde v první řadě o tzv. komu, která způsobuje, že bodová hvězda se zobrazí s jakýmsi ohonem jako kometa. Tyto vady se dají snížit velkou ohniskovou vzdáleností, tj. malou světelností zrcadla.²⁷⁾ Takovýto dalekohled je ale velmi dlouhý a nepraktický.²⁸⁾

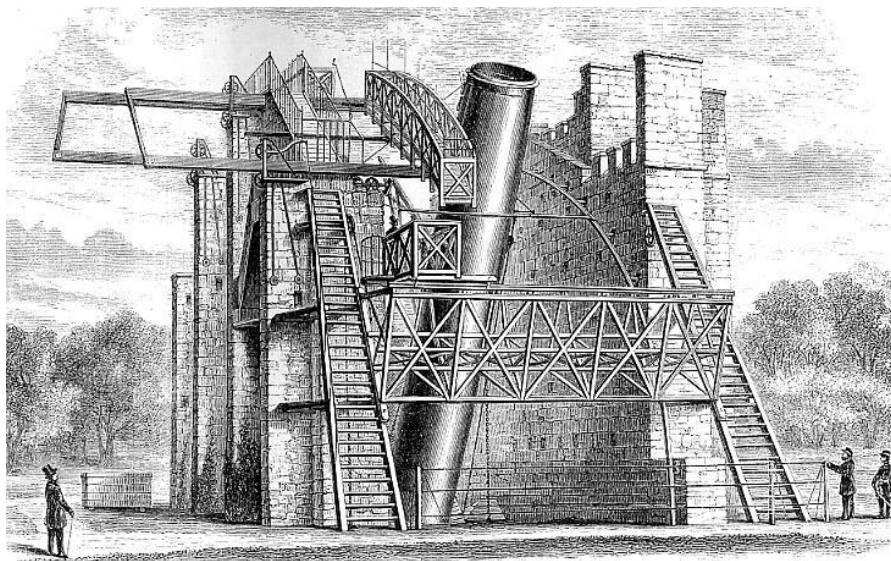
²⁶⁾ Užívání skleněných chemicky postříbřených zrcadel pro optické účely se datuje až od roku 1857. Stříbro však brzy tmavne a zrcadlo se musí často přestříbřovat. Dnes se proto zrcadla pokrývají vakuově nanesenou vrstvou hliníku.

²⁷⁾ U světelného zrcadla je velikost kvalitního zorného pole velmi malá. Například u paraboloidického zrcadla o světelnosti 1:4,5 (takové je např. na Ondřejovském dvoumetrovém dalekohledu) činí průměr kvalitně vykresleného pole necelé 2 cm!

²⁸⁾ Lze také použít korekční čočky a zrcadla. To se ale už dostáváme do jednadvacátého století, kde byly varianty tohoto typu dalekohledu rozpracovány zejména nadšenými amatéry. (například: <http://bhs.brook12.wv.us/homepage/alumni/dstevick/weird.htm>)

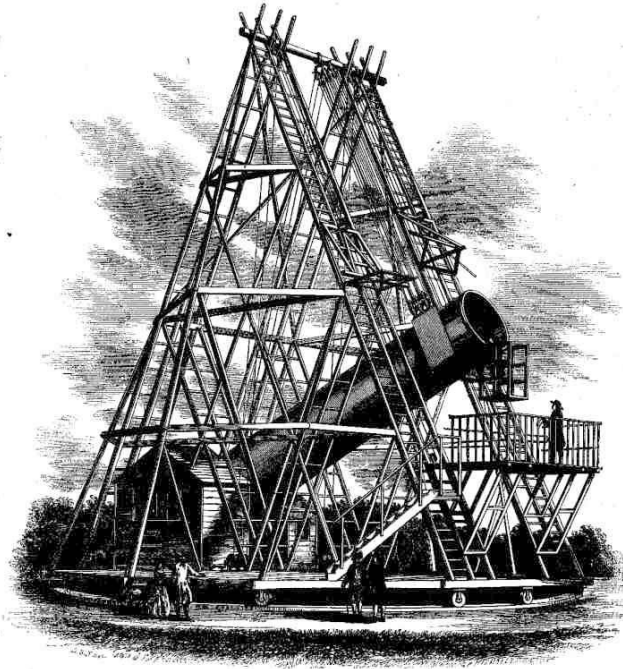
Veliké historické zrcadlové dalekohledy

Mezi nejvýznamnější výrobce astronomických zrcadlových dalekohledů patřil William Herschel. Za svůj život vybrousil na tisíc zrcadel a zhotovil na čtyři stovky dalekohledů. Roku 1789 dokončil zrcadlový dalekohled o průměru zrcadla 1,26 m a hned první noc jím objevil další měsíc Saturnu. Dalekohled měl ohniskovou vzdálenost (a tedy i délku) 13 m. Byl postaven v městečku Bath v Anglii. Naposledy se ho užívalo v roce 1815, v roce 1839 byl zničen. Avšak už předtím postavil Herschel menší teleskop o průměru zrcadla 47 cm a ohnisku 7 m, který se dostal až do jižní Afriky. V letech 1834–1838 jím studoval Williamův syn John Herschel objekty jižní oblohy. Nejmohutnější dalekohled sestrojil lord Rosse (1845–1878). Nazval ho po legendární mořské obludě „Leviathan“. Měl zrcadlo o průměru 1,83 m a stál v Birr Castle v Irsku. Sloužil až do roku 1878, v roce 1908 byl poškozen a o devadesát let později opět restaurován. Poslední zrcadlový dalekohled s kovovým zrcadlem představuje teleskop v australském Melbourne. Měl zrcadlo o průměru 1,22 m a byl v provozu mezi lety 1878–1889.

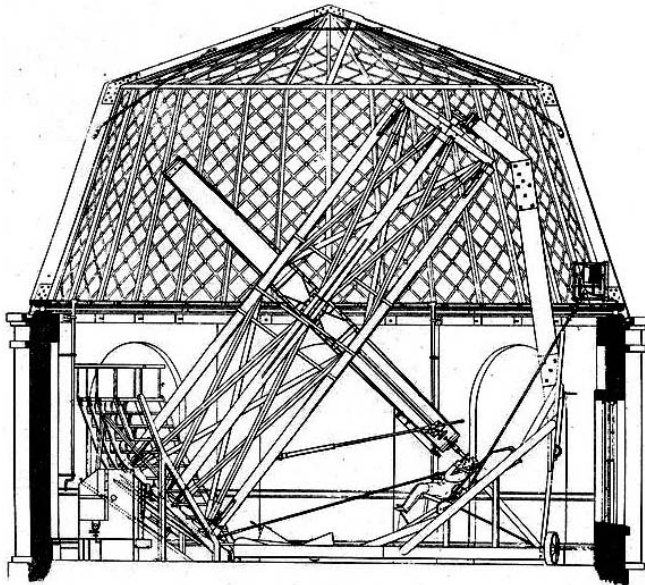


Leviathan lorda Rosse (1845)

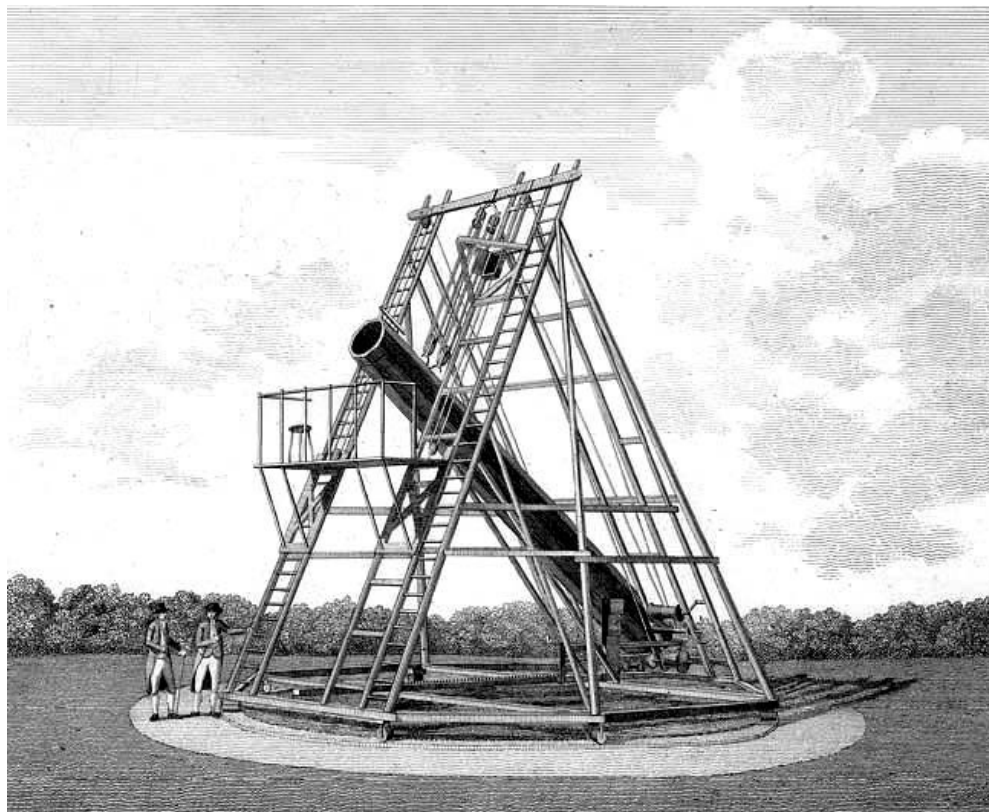
Už na začátku dvacátého století jsme svědky mohutného rozmachu astronomie i astronomických přístrojů. Mezi nejpozoruhodnější historické „kousky“ patří bezesporu tzv. Hookerův reflektor na kalifornské hoře Mt. Wilson (dokončen 1917). Jeho zrcadlo má průměr 100 palců, tj. 2,5 m. Právě tímto přístrojem objevil roku 1924 Hubble hvězdnou strukturu cizích galaxií a o pět let později spolu s Miltonem Humasonem rozpínání vesmíru. Stručný přehled nejzajímavějších historických reflektorů bych zakončil legendárním Halovým Mt. Palomarským pětimetrem, který byl dobudován v roce 1948. Jeho spuštění byl osobně přítomen i Edwin Hubble a po mnoho desetiletí to byl největší a nejprestižnější dalekohled na světě.



Dalekohled Williama Herschela s ohniskem 40 stop, tj. 12 m, kovové zrcadlo průměru 120 cm, postaven ve Slough (1785–1789)



Ekvatoreálně montovaný refraktor o průměru objektivu 30 cm na observatoři v Cambridgi, podle návrhu Airyho (1835)



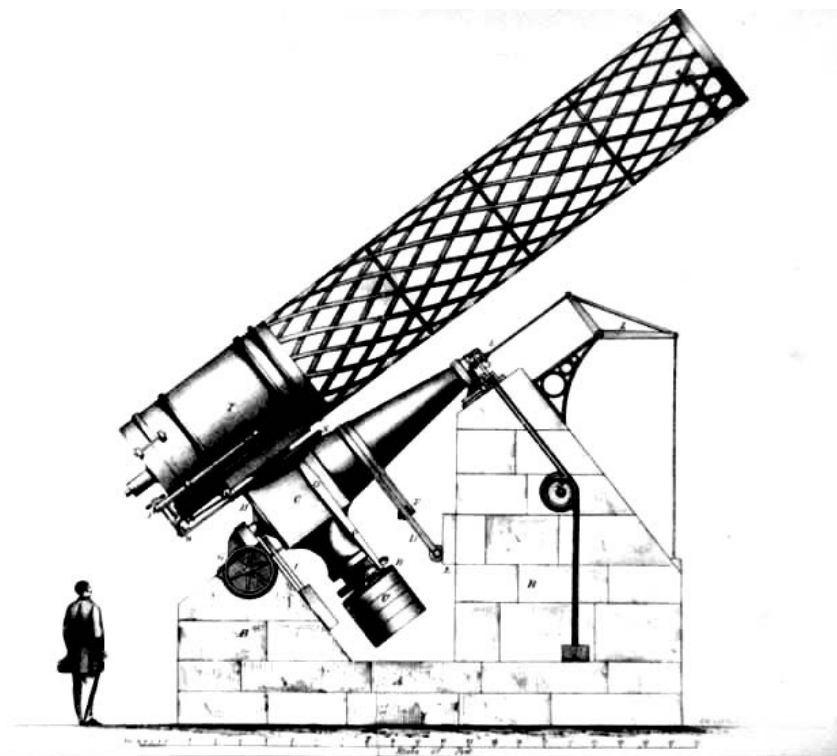
Velký Herschelův teleskop s průměrem zrcadla 1,24 m (1789)

Katadioptrické systémy

S novou myšlenkou přichází v roce 1930 Bernhard Schmidt.²⁹⁾ Jeho vynález kombinuje zrcadlo dalekohledu s čočkovou optikou. Schmidtova komora se skládá ze světelného kulového zrcadla, před kterým je umístěna tenká mírně asféricky zprohýbaná skleněná korekční deska kompenzující optické vady zrcadla. Schmidtův systém dosahuje (ve srovnání s tradičním paraboloidickým zrcadlem) velkého dobře zkorigovaného zorného pole při vysoké světelnosti. (Pole je však sklenuté.) Schmidtovy „širokoúhlé“³⁰⁾ fotografické komory sehrály v astronomickém výzkumu významnou roli. Trochu jiný způsob odstranění aberací kulového zrcadla navrhl v roce 1941 Rus D. D. Maksutov. Místo asférické korekční desky používá menisku (prohnuté čočky o nulové optické mohutnosti) s kulovými plochami. Později byly tyto tzv. katadioptrické soustavy zkombinovány s tradičními systémy. Vznikl tak katadioptrický (Schmidtův nebo Maksutovův) „cassegrain“, „newton“ a dokonce i „gregory“ a „herschel“. Schmidt-Cassegrainův dalekohled se pro svou malou délku a vysoký výkon při rozumné ceně

²⁹⁾ Bernhard Schmidt (1879–1935) byl estonsko-švédský optik působící v Německu.

³⁰⁾ Zde se „širokoúhlostí“ myslí zorné pole několika stupňů.



Velký zrcadlový dalekohled observatoře v Melbourne
(1868, zničen při požáru v lednu 2003)

stává nejoblíbenějším amatérským dalekohledem v USA. Tyto katadioptrické systémy nacházejí využití i mezi menšími profesionálními přístroji (do cca 40 cm průměru).

Vývoj astronomických dalekohledů se samozřejmě nezastavil. Stavějí se stále větší a výkonnější přístroje. Mohutná primární zrcadla se dnes vyrábějí z jednotlivých segmentů. Pomocí interferometrické metody se skládají obrazy z jednotlivých dalekohledů, aktivní optikou se omezuje vliv turbulencí atmosféry, klasické fotografické materiály se nahrazují CCD snímači atd. Ale to už končí historie a začíná současnost.