

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Vojtech Rušin

K čomu nám slúžia úplné zatmenia Slnka Mesiacom?

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 54 (2009), No. 3, 188--200

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/141906>

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>

K čomu nám slúžia úplné zatmenia Slnka Mesiacom?

Vojtech Rušin, Tatranská Lomnica

Úvod

Úplné zatmenia Slnka Mesiacom sú vzácnym prírodným úkazom, ktorý sa za 100 rokov vyskytne 74–75 krát. Ich vzácnosť a výnimočnosť spočíva v tom, že počas úplných zatmení Slnka sa dá pozorovať najvrchnejšia zložka slnečnej atmosféry — koróna. Počas úplných zatmení koncom 19. storočia bolo objavené hélium, emisné spektrálne čiary vysokoionizovaných prvkov, napríklad železa, čo neskôr viedlo k záveru, že koróna je veľmi horúca. Zo zakrivenia polárnych lúčov bielej koróny začiatkom 20. storočia v blízkosti pólů sa napríklad predpokladala existencia magnetického poľa na Slnku, ktoré E. Hale v roku 1908 po prvýkrát pozorovaním potvrdil. Dokonca aj prvá ejakcia koronálnej hmoty, kométa Kreutzovej skupiny, či overenie všeobecnej teórie relativity sa pozorovali počas úplných zatmení Slnka. Počas zatmení sa hľadala aj hypotetická planéta Vulkan. Dnes sa síce koróna pozoruje nielen zo Zeme, ale aj pomocou prístrojov na umelých družiciach Zeme či kozmických sondách v celom spektre elektromagnetického žiarenia, ale mnohé experimenty s vysokou rozlišovacou schopnosťou sa dajú robiť len počas úplných zatmení. Aké poznatky, hlavne o slnečnej koróne máme dnes, a ktoré otázky sú nezodpovedané, sa pokúsime zodpovedať v tomto článku.

Koróna

Slnečná koróna (obr. 1) — slabé bledomodré svetlo okolo tmavého Mesiaca, začala pútať veľkú pozornosť po úplnom zatmení Slnka 18. júla 1860 v Španielsku, keď na základe fotografických pozorovaní Warren de la Rue a Angelo Secchi, ktorí boli od seba vzdialení 400 kilometrov, prehlásili, že „koróna a protuberancie sú atmosférou Slnka“. Koróna od čias Keplera bola považovaná za atmosféru Mesiaca, i keď isté náznaky jej pozorovaní po roku 1851 (28. júla pás totality prechádzal severnou Európou) naznačovali, že tomu tak nie je.

E. Young a W. Harkness na základe spektrografického pozorovania počas úplného zatmenia Slnka 7. augusta 1869 zistili, že v spektre koróny sa nachádza emisná spektrálna čiara s vlnovou dĺžkou „okolo“ 530 nm, ktorá nemala ekvivalent v Mendelejevovej

RNDr. VOJTECH RUŠIN, DrSc., Astronomický ústav SAV, 059 60 Tatranská Lomnica, Slovensko, e-mail: vrusin@ta3.sk

tabuľke chemických prvkov. Keď sa ani po 25 rokoch nenašiel nijaký chemický prvok, zvolil sa rovnaký postup ako v prípade chemického prvku hélia, ktoré bolo tiež najprv objavené počas úplného zatmenia Slnka 18. augusta 1868 na Slnku J. Janssenom a neskôr pomenované po gréckom bohovi Slnka Hélovi (plynné hélium na Zemi bolo objavené až v roku 1895). Emisná spektrálna čiara, ktorá bola pozorovaná v zelenej oblasti spektra dostala meno „zelená čiara“, ktoré sa používa aj v súčasnosti, a mal ju tvoriť nový chemický prvok — korónium („coronium“). Korónium malo byť ľahšie ako vodík, čo sa však nepotvrdilo.

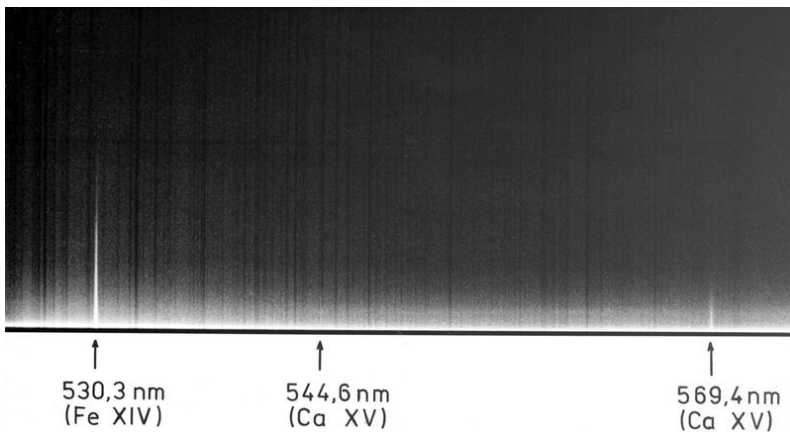


Obr. 1. „Klasická“ biela koróna dňa 1. augusta 2008 na pozorovacom stanovišti v dedine Altaj (Mongolsko). Rubinar 10/1000, EOS D 20, 1/2 s. (M. Druckmüller, P. Aniol, V. Rušin)

Pri určovaní hmotností korónia sa vychádzalo z nasledujúcich predpokladov: (a) prilbicovité lúče koncom 19. a začiatkom 20. storočia sa pozorovali už do vzdialenosti 10 polomerov Slnka (1 polomer = 696 tisíc km); (b) chemické zloženie koróny sa nepoznalo, ale predpokladalo sa, že svieti odrazeným svetlom. Aby takýto korónálny lúč vo svojej základni nebol veľmi jasný a deformovaný pod vplyvom gravitačnej sily Slnka, musel by obsahovať materiál oveľa ľahší ako vodík. Keďže korónálne lúče neboli ani deformované, ani vo svojich základniach extrémne jasné, korónium nemohlo byť ľahšie. Začiatkom 20. storočia fyzika slnečnej koróny prežívala veľkú krízu. Medzitým sa samozrejme už pozorovali ďalšie emisné spektrálne čiary, napríklad spektrálna čiara 637,4 nm, ktoré tiež nemali svoje miesto v Mendelejevovej tabuľke prvkov.

Problém korónia sa podarilo vyriešiť až v 40. rokoch dvadsiateho storočia a pričínili sa o to W. Grotrian a B. Edlén, pričom k identifikácii emisných spektrálnych čiar koróny prispelo už skôr vyriešenie záhadného „nebúlia“, ktoré sa pozorovalo v spektre planetárnych hmlovín a ktorého čiary vyžarovali ionizované prvky kyslíka, dusíka, neónu a pod. a ukazovali tak, že ich výskyt spôsobuje vyššia teplota. Edlén pri svojich pokusoch s elektrickou iskrou vo vákuovom spektrografe (teplota tam bola 5×10^5 K) a Grotrian na základe teoretických výpočtov zistili, že priemerný rozdiel termov železa FeX (9,5338 nm) a FeXI (8,7025 nm), ktoré sa pozorovali v ultrafialovej oblasti spektra,

je veľmi podobný vlnočtu červenej koronálnej čiary 637,4 nm a 789,2 nm. Zhoda nemohla byť náhodná, čo viedlo k záveru, že koronálne čiary vyžarujú vysokoionizované atómy známych chemických prvkov. Na základe izoelektrónovej postupnosti sa prišlo k záveru, že červená spektrálna čiara patrí deväťkrát ionizovanému železu (FeX) a odtiaľ už bol malý skok, aby sa identifikovali ďalšie emisné spektrálne čiary v koróne. Zelená čiara, ktorá patrí Fe XIV (trinásťkrát ionizované železo), bola identifikovaná v roku 1942 [1], kde sa dá detailne zoznamiť s celým postupom riešenia identifikácie emisných čiar koróny. Koróna sa tak stala zrazu veľmi horúcou — od 1 do 5 miliónov K. Jeden problém sa vyriešil a nastal ďalší problém, ktorý spoľahlivo nie je rozriešený ani dnes — mechanizmus ohrevu koróny, keďže fotosféra má teplotu len okolo 5700 K. O vysokej teplote koróny sa spočiatku pochybovalo, ale objav rádiového žiarenia Slnka po druhej svetovej vojne vysokú teplotu koróny potvrdil a dnes to potvrdzujú aj emisné spektrálne čiary koróny pozorované v extrémne ultrafialovej a röntgenovej oblasti spektra.



Obr. 2. Emisné spektrálne čiary koróny vo vizuálnej oblasti spektra. (Archív Astronomického ústavu SAV, Tatranská Lomnica)

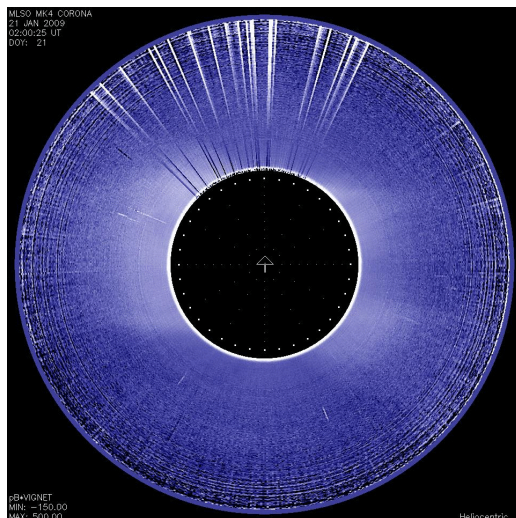
Dnes sa odhaduje, že vo vizuálnej oblasti spektra je okolo 28 emisných čiar. Všetko sú to tzv. zakázané čiary, čo znamená, že k ich emisii dochádza v dôsledku preskoku elektrónov z ich „vybudených“ hladín na základnú dráhu daného elektrónu, obiehajúceho okolo jadra iónu. Takéto stavy môžu nastať len v prostredí nízkej hustoty a vysokej teploty. Dovoľené spektrálne čiary sa nachádzajú v EUV alebo röntgenovej oblasti spektra.

Koncom 50-tych rokov 20. storočia sa dokončila separácia zložiek slnečnej koróny. Dnešné zloženie je nasledovné:

- Emisná koróna (E koróna) — je to vlastné žiarenie koróny. Názov je odvodený z existencie emisných spektrálnych čiar vysokoionizovaných prvkov, napríklad železa, vápnika, niklu a pod.
- Koróna spojitého spektra, elektrónová koróna (K koróna) — jej svetlo vzniká rozptylom žiarenia fotosféry na voľných elektrónoch. Keďže elektróny sa v koróne

pohybujú rýchlo a rôznymi rýchlosťami, absorpčné fotosférické čiary sú rozmazané, strácajú sa. V opačnom prípade by spektrum koróny malo mať podobu spektra fotosféry. Spektrum bielej koróny, ako aj emisnej koróny, je silno polarizované.

- Fraunhoferova koróna alebo prachová koróna (F koróna). Jej svetlo nie je polarizované a spôsobuje ho rozptyl žiarenia fotosféry na prachových časticiach, ktoré sú okolo Slnka a v medziplanetárnom priestore (zodiakálne svetlo je pokračovaním F koróny). Pohyb častíc medziplanetárnej hmoty je pomalý, takže v rozptýlenom spektre sa pozorujú absorpčné čiary fotosféry.



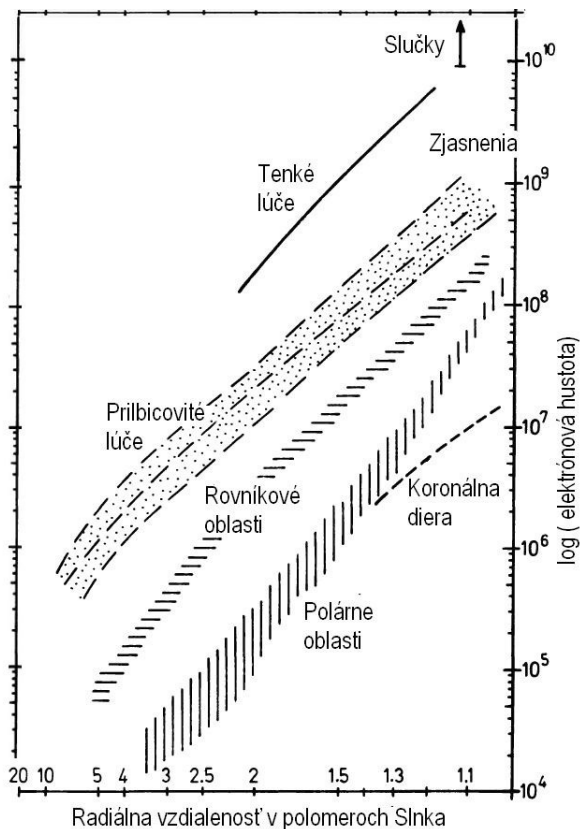
Obr. 3. Biela koróna, veľmi slabo viditeľná okolo rovníka, získaná koronametrom MLSO/HAO/MK4 na Mauna Loa, Havaj. Výrazné radiálne „papršleky“ je chyba merania. (NCAR, HAO, Boulder)

Biela koróna, ktorá sa spravidla pri zatmeniach pozoruje najčastejšie, lebo je to najjednoduchšie pozorovanie, je vlastne súhrnom všetkých zložiek. Po objave koronografu B. Lyotom v roku 1930 [2], emisná koróna — pomocou spektrografu alebo úzkopásmových filtrov, sa dá pozorovať z vysokých nadmorských výšok aj mimo úplných zatmení Slnka. Pozorovanie emisných spektrálnych čiar koróny vo vizuálnej oblasti spektra (obr. 2) sa na Slovensku robí na Lomnickom štíte (okrem toho v USA, Ruskej federácii a Japonsku). Jediné pozorovania bielej koróny (obr. 3) na svete pomocou koronografu a polarizácie sa robí na Mauna Loa (Havaj, USA). Kým ale pri pozorovaní emisnej koróny sa pohybujeme v priestorovom rozlíšení okolo jednej oblúkovej minúty, v bielej koróne je to menej.

Základným problémom, prečo nie je možné korónu pozorovať hocikedy, je skutočnosť, že jej svetlo v blízkosti povrchu Slnka je asi milión krát slabšie, ako svetlo fotosféry. So vzdialenosťou od Slnka jej jas prudko klesá a napríklad v dvoch polomeroch Slnka jej pokles voči okraju Slnka je o ďalšie 4 rády nižší. Pribeh elektrónovej

hustoty s výškou pre viaceré koronálne štruktúry, odvodený na základe hydrostatickej rovnováhy, je uvedený na obrázku 4.

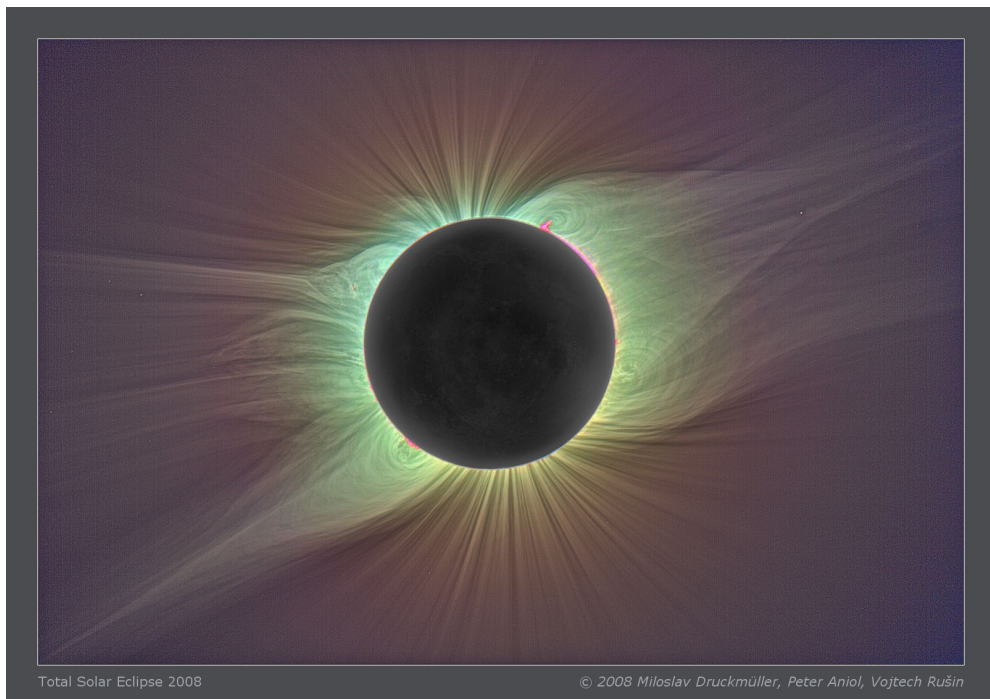
V 60-tych rokoch dvadsiateho storočia sa objavili teoretické úvahy o tom, že v infračervenej oblasti spektra by sa mal zjaviť nadbytok žiarenia, ktorého zdrojom by mala byť reemisia žiarenia fotosféry na prachových časticiach okolo Slnka. Tento nadbytok žiarenia sa pomenoval sa T-koróna: termálna koróna. Očakávaný nadbytok žiarenia v infračervenej oblasti spektra vo výškach okolo 4 polomerov Slnka na vlnovej dĺžke $2,2\ \mu\text{m}$, bol pozorovaný počas úplného zatmenia Slnka 12. novembra 1966 Petersonom [3].



Obr. 4. Priebeh hustoty s výškou v individuálnych štruktúrach koróny. (S. Koutchmy)

Ďalšou zložkou koróny by mala byť S koróna: sublimačná koróna. Mali by ju tvoriť emisné rezonančné spektrálne čiary H a K jedenkrát ionizovaného vápnika (Ca II) s vlnovou dĺžkou okolo 396,9 a 393,4 nm, ktoré by mali vznikáť sublimáciou prachových častíc vo vzdialenostiach asi 20 polomerov Slnka, keď sa po „keplerovských“ dráhach približujú k Slnku [4].

Posledné dve zložky koróny, vo všeobecnosti, nie sú vedeckou obcou veľmi prijímané. Možno sa opakuje stav, aký bol koncom 19. storočia. Trvalo tridsať rokov, kým sa akceptovala myšlienka, že koróna je súčasťou Slnka.

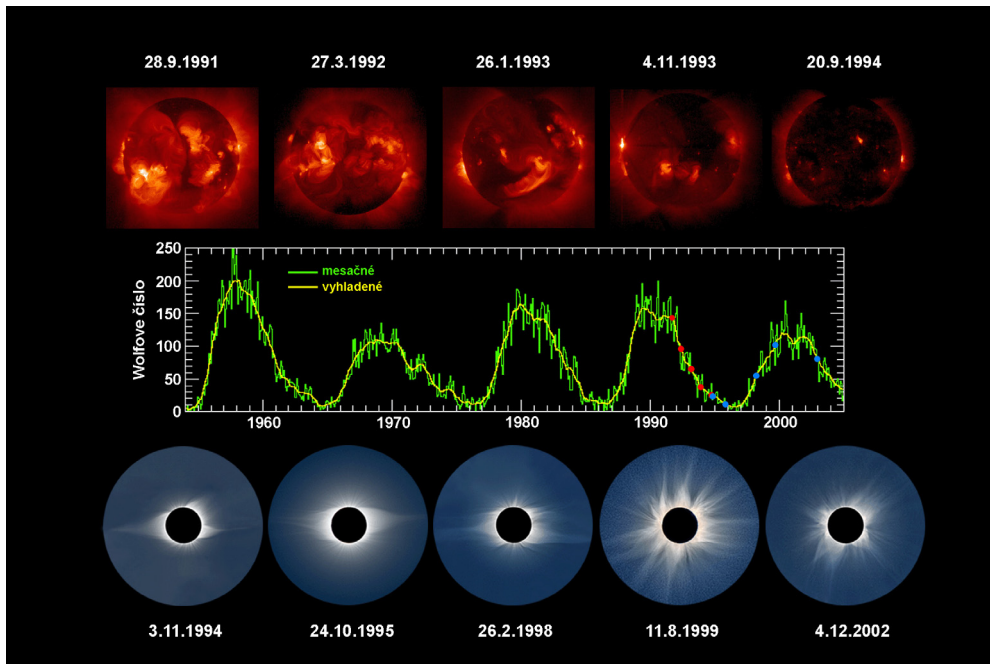


Obr. 5. Biela koróna z 1. augusta 2008 po spracovaní Druckmüllerovou metódou. Výsledný obrázok je zložený z 28 samostatných expozícií. (M. Druckmüller, P. Aniol, V. Rušin).

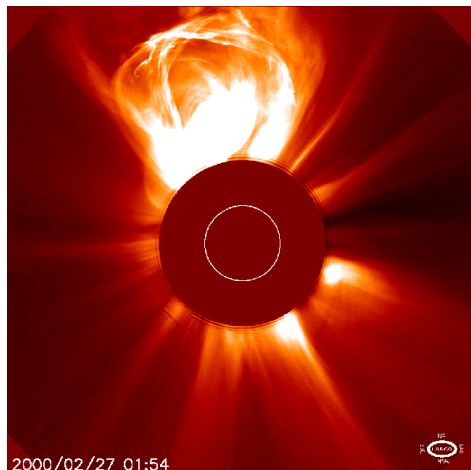
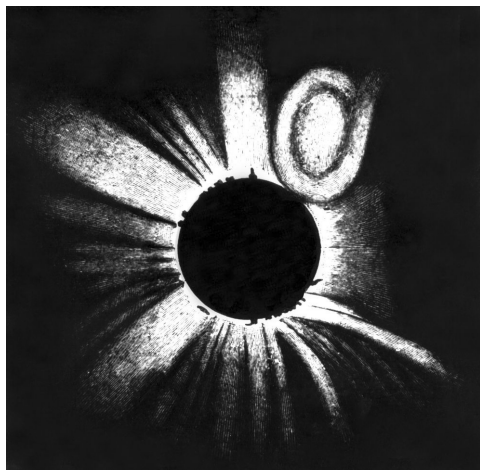
Dlho sa predpokladalo, že biela koróna je sféricko-symetrický útvar. Dnes vieme, že tomu tak zďaleka nie je. Biela, ale podobne aj emisná koróna je mimoriadne štruktúrovaná: od veľkých covitých lúčov, ktorých „nohy“ sú od seba zakotvené aj vo vzdialenosti viac ako 100 tisíc kilometrov, po super tenké ihlicovité, radiálne, ale aj mierne zakrivené lúče o šírke len niekoľko tisíc kilometrov (1–2 tisíc), prípadne aj menej. V základni prilbicovitých lúčov (obr. 5), ktoré sa rozprestierajú nad neutrálnou čiarou, oddeľujúcou veľkoškálové polarity magnetických polí na povrchu Slnka, sa pozoruje protuberancia/filament, a nad ňou koncentrické tmavé a svetlé slučky, ktoré formujú siločiaru neho magnetického poľa, kým siločiaru veľkoškálových polí formujú celý prilbicovitý lúč. Pokračovaním prilbicovitého lúča v heliosfére je tzv. neutrálna vrstva (*neutral sheet*), ktorá oddeľuje opačné polarity magnetického poľa. Veľkoškálové prilbicovité lúče sú s veľkou pravdepodobnosťou zdrojom pomalej zložky častíc v slnečnom vetre, kým otvorené štruktúry — korónálne diery, kde siločiaru magnetického poľa sú otvorené, tvoria zdroj vysokorýchlostných častíc (korónálne diery sú zároveň miesta v slnečnej koróne, kde hustota častíc a teplota je voči svojmu okoliu nižšia). Najnovšie výskumy ukazujú, že okrem klasických prilbicovitých lúčov existujú aj pseudo prilbicovité lúče [5]. To sú také lúče, ktorých „nohy“ sú zakotvené v rovnakej polarite veľkoškálového magnetického poľa, spravidla nad silným magnetickým poľom, alebo, jedna „noha“ takého lúča je „ukotvená“ priamo v tomto silnom magnetickom poli. Z kvalitných zatmeňových snímok bolo zistené, že tenké, radiálne orientované lúče

o šírke asi 5–10 oblúkových sekúnd (alebo aj menej) sa premietajú aj do prilbicovitých lúčoch, čo vyvoláva dojem „strapatej“ koróny.

V oblasti pólů Slnka, hlavne okolo minima slnečnej aktivity, sa pozorujú klasické polárne lúče s hrúbkou okolo 10 tisíc kilometrov (15 oblúkových sekúnd), ktoré na zatmeňových záberoch siahajú až do výšky troch–štyroch polomerov Slnka. Z ich sklonu sa odvodila dĺžka dipólu celkového magnetického poľa Slnka, ktoré v prvom priblížení má dipólový charakter — minimálne v minime cyklu; v maxime cyklu podľa všetkých náznakov má kvadrupólový charakter. Je paradoxné, že hoci všetky štruktúry koróny formuje magnetické pole Slnka, priamo v slnečnej koróne ho nemôžeme merať. V porovnaní s povrchom Slnka je slabé (predpokladá sa, že je v intervale hodnôt 10^{-4} T až 10^{-3} T), pološírka emisných spektrálnych čiar je široká — okolo $0,9 \text{ \AA}$, takže na jeho meranie sa nedá použiť rozštep spektrálnych čiar (Zeemanov jav). Aj z tohoto dôvodu sa hľadajú emisné spektrálne čiary v infračervenej oblasti spektra koróny, pretože rozštep stúpa so štvrtou mocninou vlnovej dĺžky, a ako ukázal Judge [6], k najintenzívnejším by mali patriť: [Fe XIII] $1,0747$ a $1,0798 \text{ \mu m}$; [Si X] $1,43 \text{ \mu m}$; [Si IX] $2,58$ a $3,93 \text{ \mu m}$; [Mg VIII] $3,03 \text{ \mu m}$; and [Mg VII] $5,50$ a $9,03 \text{ \mu m}$. Kým čiary Fe XIII sa dári vcelku dobre pozorovať aj mimo úplných zatmení, pokusy pozorovať ďalšie emisné čiary v čase zatmení nie sú až také úspešné. Ich pozorovanie je dôležité aj preto, že v horúcej koróne sa pozoruje aj „chladná“ zložka, pričom koexistencia „horúcej“ a „chladnej“ koróny sa ťažko vysvetľuje. Zatmeňové pozorovania, robené na základe farby koróny, nevedú k jednoznačným záverom o existencii „chladnej“ koróny.



Obr. 6. Variabilita tvaru bielej koróny (dole), priebeh Wolfowho čísla (stred) a röntgenovej koróny z družice Yohkoh (hore). (Yohkoh, P. Rapavý a V. Rušin)



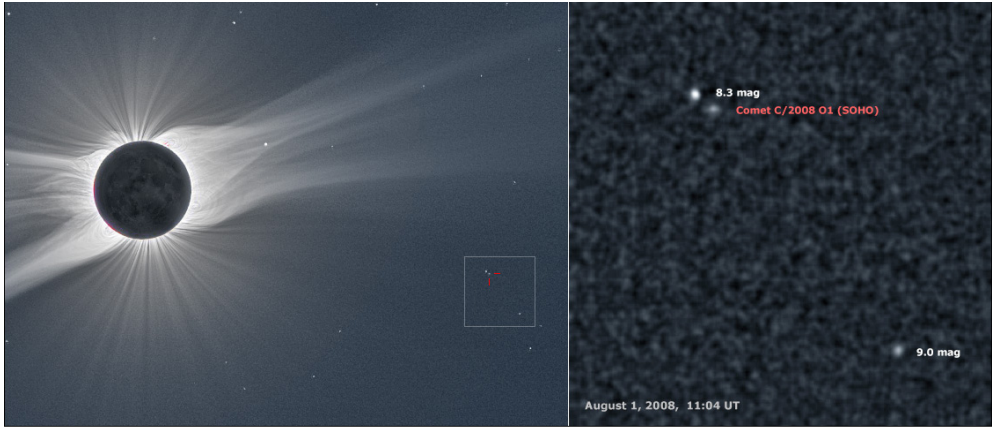
Obr. 7a,b. Ejekcia koronálnej hmoty. Vľavo je nákres CME z roku 1860, vpravo z kozmickej sondy SOHO. (ESA/NASA/SOHO/C2)

Z uvedeného vyplýva, že štruktúra koróny nám poskytuje informácie aj o rozdelení magnetického poľa v koróne.

Dlhodobé pozorovania bielej koróny ďalej ukázali, že jej variabilita s cyklom slnečnej aktivity sa mení a dá sa vyjadriť koeficientom sploštenia, ktorý navrhol Ludendorff a nesie jeho meno. Koeficient sploštenia sa určuje z izofót, ktoré v čase okolo maxima sú okolo tmavého mesačného disku takmer kruhové (koeficient sploštenia je nulový), kým v čase minima sú silne eliptické — hustota častíc nad pólmi je minimálne o jeden rád nižšia ako nad rovníkom (pozri obr. 4) a hodnota koeficientu je okolo 0,3.

Z vyššie uvedeného vyplýva, že celkový vzhľad bielej koróny sa s fázou cyklu slnečnej aktivity mení (obr. 6), ale ako sa jednotlivé koronálne lúče tvoria, akú majú životnosť, nie je známe.

V poslednom období, na základe počítačového spracovania snímok bielej koróny Druckmüllerovou metódou [7], sa dajú získať extrémne kvalitné snímky bielej koróny, ktoré prinášajú svoje ovocie. Takto napríklad v roku 2006 bol na základe pozorovaní bielej koróny od Nigeru po Turecko pozorovaný výtrysk lúča v polárnej oblasti s rýchlosťou asi 70 km s^{-1} . Niečo podobné sa pozorovalo z družíc [8], ale toto bolo prvé pozorovanie v bielej koróne zo Zeme. Dá sa predpokladať, a nielen z tohoto zatmenia, že máloškálová dynamika nebude pre bielu korónu ničím výnimočným. Pri inom zatmení sa zistilo, že jasné štruktúry bielej koróny sú temer identické s tými, ako sa pozorujú v spektrálnych čiarach extrémne ultrafialovej oblasti spektra [9]. Výnimočnosťou Druckmüllerovej metódy je aj to, že pri vhodne zvolenom pozorovacom programe a kvalitnom počasí počas úplného zatmenia sa prilbicovité štruktúry identifikovali až vo vzdialenosti 20 polomerov Slnka, čo vlastne dokáže len C3 koronograf na kozmickej sonde SOHO. Iným dôkazom vysokej citlivosti Druckmüllerovej metódy je identifikácia plošného, intenzitne veľmi slabého útvaru počas úplného zatmenia v roku 2006 nad severným pólom Slnka. Tento útvar podľa svojho vzhľadu bol pomenovaný „záclona“ [10]. Žiaľ, doteraz sa nepodarilo vysvetliť, či je to ejekcia koronálnej hmoty



Total Solar Eclipse 2008

© 2008 Miloslav Druckmüller, Peter Aniol, Vojtech Rušin

Obr. 8. Kométa Kreutzovej skupiny, pozorovaná 1. augusta 2008. (M. Druckmüller, P. Aniol, V. Rušin)

alebo nárazová vlna po erupciách, alebo je to niečo, čo sme doteraz nepozorovali. Proti ejejkcii koronálnej hmoty alebo nárazovej vlny svedčí skutočnosť, že výška „záclony“ voči povrchu Slnka sa v priebehu 64 minút nezmenila.

Viac informácií o výskume snečnej koróny, či už počas úplných zatmení Slnka Mesiacom alebo mimo zatmení sa dá nájsť v [11], [12] a [13].

Zatmenia: kométy a ejejkcie koronálnej hmoty

Úplné zatmenia Slnka sa do histórie zapísali aj prvým pozorovaním kométy Kreutzovej skupiny a to pri zatmení Slnka v roku 1898, ako aj prvým pozorovaním ejejkcie koronálnej hmoty (CME) — pri zatmení 1860 v Torreblanca (obr. 7a), ktorý zakreslil nemecký astronóm W. Tempel [14]. Druhý CME v čase zatmenia bol pozorovaný 16. februára 1980 a jeho polohu vo výške asi 6 polomerov Slnka sme identifikovali na základe pozorovania bielej koróny v Indii [15]. Jeho prvá poloha bola pozorovaná v Afrike a pri porovnaní s pozorovaním v Indii bolo zistené, že jeho projektovaná rýchlosť bola 650 km s^{-1} , a radí sa k priemerným rýchlostiam CME, ako boli určené na základe mnohých pozorovaní zo SOHO (SOlar and Heliospheric Observatory). Dnes pomocou kozmickej sondy SOHO sa kométy Kreutzovej skupiny, podobne aj CME, bežne pozorujú — v čase maxima asi 6 krát denne, v minime asi jeden prípad za deň. Počet komét Kreutzovej skupiny presiahol číslo viac ako 2000.

Za zmienku stojí ešte skutočnosť, že Druckmüllerova metóda spracovania obrazov je mimoriadne citlivá, o čom svedčí fakt, že na snímkach bielej koróny z 1. augusta 2008 bola na základe pozorovaní v okolí Novosibírsk (Ruská federácia) a Altaja (Mongolsko) s časovým rozdielom 19 minút, identifikovaná aj kométa Kreutzovej skupiny (obr. 8) s magnítudou len okolo 10.

Zatmenia: Vulkan a všeobecná teória relativity

Úplné zatmenia Slnka poskytli aj príležitosť pre výskumy, ktoré bezprostredne nesúvisia s pozorovaním koróny počas úplných zatmení, ale pri zatmeniach sa takéto experimenty robili. V podstate to boli dva druhy experimentov:

(1) hľadanie malej, hypotetickej planéty Vulkan. Vulkan mal byť k Slnku bližšie ako Merkúr a jeho existenciou sa malo dať vysvetliť stáčanie perihélia Merkúra — okolo 43 oblúkových sekúnd za storočie. Túto hypotézu predložil francúzsky matematik J. Le Vernier, ktorý ju v definitívnej verzii publikoval v roku 1859. Na základe denných pozorovaní viacerých astronómov amatérov tej doby, ktorí údajne pozorovali prechod Vulkana aj popred slnečný disk, Le Vernier vypočítal, že Vulkan by sa mal nachádzať vo vzdialenosti asi 21 miliónov kilometrov od Slnka (0,14 astronomickej jednotky = AU) s dobou obehu 19 dní a 17 hodín a sklonom 8 stupňov k ekliptike. Pri pozorovaní zo Zeme jeho najväčšia elongancia nemala byť väčšia ako 8 stupňov. Neskoršie, denné aj zatmeňové hľadania hypotetickej planéty Vulkan neboli jednoznačne potvrdené. Hypotetická planéta sa nenašla ani pri experimente z roku 1973, ktorý robili aj naši kolegovia v Nigeri. Dnes sa všeobecne predpokladá, že vo vzdialenosti okolo 0,1 AU by sa mohli nachádzať, možno aj dočasne, malé asteroidy s priemerom do 60 km, ale pozorovania nič také nepotvrdzujú. Stáčanie perihélia Merkúra vysvetlila až všeobecná teória relativity, ktorú v roku 1915 publikoval Albert Einstein a je spôsobená gravitačným poľom Slnka.

(2) Ako je známe, v roku 1905 A. Einstein, najväčší fyzik všetkých čias, nositeľ Nobelovej ceny z roku 1921 za objav fotoelektrického efektu a za zásluhy o rozvoj teoretickej fyziky, predložil špeciálnu teóriu relativity, ktorú neskôr rozšíril a zovšeobecnil. Od roku 1915 ju poznáme pod menom všeobecná teória relativity. Obe teórie zásadným spôsobom ovplyvnili vývoj astronómie, astrofyziky a fyziky vôbec, a sú základom modernej kozmológie a relativistickej astrofyziky. Základom všeobecnej teórie relativity je tzv. princíp ekvivalencie, ktorý hovorí, že gravitačné a zotrvačné sily majú rovnakú fyzikálnu podstatu a riadia sa rovnakými fyzikálnymi zákonmi. Podľa tejto teórie hmotné telesá spôsobujú zakrivenie okolitého priestoročasu, preto všetko, čo bude prechádzať v dostatočnej blízkosti okolo ľubovoľného hmotného telesa, pohybuje sa po zakrivenej dráhe. Veľkosť zakrivenia závisí od hmotnosti pôsobiaceho telesa.

Zo všeobecnej teórie relativity okrem iného vyplýva, že zakrivenie svetelného lúča pri jeho prechode v tesnej blízkosti Slnka bude okolo 1,75 oblúkovej sekundy, kým z klasickej Newtonovej teórie to malo byť len 0,87 oblúkovej sekundy [16] a [17]. Výpočty previedol sám Einstein, ktorý ako prvý na takéto zakrivenie svetelného lúča poukázal. Veľkosť zakrivenia v tom čase sa mohla dať overiť len pri úplnom zatmení Slnka Mesiacom. Polohy hviezd na snímkoch, ktoré sa počas zatmenia nachádzali v blízkosti Slnka, by v porovnaní s ich polohami na snímkoch, ktoré boli urobené mimo zatmenia, boli posunuté zhruba o 1,75 oblúkových sekúnd smerom od centra Slnka.

Einstein listom požiadal o preverenie svojich výpočtov amerického astrofyzika G. E. Haleho, objaviteľa mnohých astronomických zariadení, okrem iného, aj spektroheliografu a spektrohelioskopu, magnetického poľa na Slnku a riaditeľa hvezdárne na Mount Wilson, či by mohol tento efekt pri najbližšom úplnom zatmení Slnka zmerať. Hale však jeho žiadosť zdvorilo zamietol. Takýto experiment je značne náročný, pretože pozorovanie Slnka pri zatmení sa musí robiť ďalekohľadom s dostatočne dlhým ohniskom, aby bola veľká rozlišovacia schopnosť. Zorné pole oblohy, do ktorého sa premietalo Slnko počas úplného zatmenia sa muselo fotografovať neskôr v noci, najlepšie o pol roka neskôr. Okrem toho, na exponovanej snímke počas úplného zatmenia Slnka sa popri bielej koróne musia nachádzať aj hviezdy, čo znamená, správne odhadnúť expozíciu. Pri značnej variabilite svetla koróny medzi minimom a maximom slnečnej aktivity je to dosť problematické. V „preexponovanej“ koróne by svetelné stopy hviezd zanikli, pri krátkej expozícii by sa na fotografickom materiále vôbec nemuseli objaviť. Polohy hviezd na oboch platniach sa musia veľmi presne zmerať. Rozdiel v polohe hviezdy medzi normálnou nočnou polohou a „zatmeňovou“, je efekt všeobecnej teórie relativity.

Preveriť správnosť Einsteinových výpočtov o zakrivení svetelného lúča v blízkosti Slnka sa chceli pokúsiť nemeckí vedci. Zorganizovali výpravu za zatmením Slnka, ktoré nastalo 21. augusta 1914. Na ruskom území boli zadržaní a internovaní asi jeden mesiac. Zatmenie nečakalo, a tak sa nijaký experiment neuskutočnil.

Riskantný experiment s ohybom svetla počas úplného zatmenia Slnka sa pokúsil urobiť mladý a vynikajúci anglický fyzik a astronóm, sir A. S. Eddington. So svojím „relativistickým“ experimentom sa vybral pozorovať úplné zatmenie Slnka na ostrov Principe (západne od Afriky), ktoré nastalo 29. mája 1919. Eddington a jeho spoločník E. T. Cottingham tvorili jednu skupinu. Druhá dvojčlenná skupina, C. Davidson a A. Crommelin, sa vybrala pozorovať rovnaké zatmenie do Brazílie, na pozorovacie stanovište Sobral. Kým počasie v Sobrale bolo dobré, Eddingtonovi nebolo veľmi priaznivo naklonené. Ráno v deň zatmenia pršalo a Slnko cez mraky začalo byť viditeľné až po prvom kontakte (Mesiac už bol „nasuntý“ na Slnko). Mladý, ambiciózný Eddington aj cez tenkú vrstvu mrakov urobil z úplného zatmenia 16 záberov. Po pol roku svoj experiment zopakoval. Dňa 6. novembra 1919 na zasadnutí Kráľovskej astronomickej spoločnosti v Londýne bolo oznámené, že odchýlka svetelného lúča pomocou dvoch experimentov v blízkosti slnečného okraja bola nameraná s hodnotami $1,61 \pm 0,30$ (Principe) a $1,98 \pm 0,12$ oblúkových sekúnd (Sobral) [18]. Opakované premeravanie polôh hviezd na platniach zo Sobralu, ktoré bolo robené v roku 1979 potvrdilo správnosť nielen pôvodnej hodnoty zo „4-inch lens“ experimentu, teda $1,98$ oblúkových sekúnd, ale pre druhý experiment „astrophographic lens“ sa namerala odchýlka $1,55 \pm 0,34$, kým jeho pôvodná hodnota bola „len“ $0,93$ oblúkových sekúnd [19]. Einsteinova všeobecná teória relativity dopadla na výbornú a aj vďaka médiám si začala raziť cestu do vedeckého a laického sveta. Dnes o správnosti všeobecnej teórie relativity, ktorá zmenila fyziku, nik nepochybuje.

Záver

Mohlo by sa zdať, že o slnečnej koróne všetko vieme. Žiaľ, nie je tomu tak. Popri neurčitom meraní stupňa polarizácie, najmä v emisnej koróne, dopĺňovaní hmoty do koróny, tvorbe veľkoškálových prilbicovitých štruktúr, za najväčší problém súčasnej astrofyziky sa pokladá mechanizmus ohrevu koróny. Koróna má veľmi vysokú teplotu, 1–5 miliónov K, kým povrch Slnka len 5700 K. Čo teda ohrieva korónu na tak vysokú teplotu? V súčasnosti sa predpokladajú minimálne 4 mechanizmy ohrevu: (1) akustické (zvukové) vlny, ktoré generuje konvektívna zóna, (2) Alfvénove vlny alebo (3) iné typy vln, ktoré generujú magnetické polia. Štvrtým typom by mali byť nanoerupcie, pri ktorých sa uvoľňuje asi 6×10^{17} W energie. Termín nanoerupcia bol zavedený Parkerom [20], ako možný mechanizmus pre ohrev koróny, avšak doteraz nanoerupcie neboli pozorované [21]. Nanoerupcia, podobne ako erupcia, je výsledkom rekonexie magnetických polí veľmi malých rozmerov s krátkym časovým trvaním. Mali by sa vyskytovať permanentne po celom povrchu Slnka. Svoju úlohu pri ohreve koróny by mala zohrať aj disipácia elektrických prúdov v koróne, spojená s rekonexiou magnetických polí (napr. [13]). Keďže koróny sa pozorujú aj u iných typov hviezd, napr. [22], [23], problematika ich výskumu je oveľa širšia, nielen so Slnkom spojená.

Slnečná koróna je horúci, dynamický objekt, ktorý cez slnečný vietor zasahuje ďaleko za obežnú dráhu našej Zeme. Zem sa nachádza v slnečnej koróne a je „obklopená“ siločiarami magnetických polí zo Slnka, ktoré so sebou ťahajú častice slnečného vetra. Dá sa len veriť, že koordinované pozorovania koróny zo Zeme, družíc či kozmických sond, nám pomôže „odhaliť“ v krátkej dobe všetky jej tajomstva a prispieť tak k lepšiemu poznaniu nielen fyziky Slnka ale aj jeho vplyvov na Zem, ktoré sa dnes robí v rámci medzinárodného programu „Kozmické počasie“.

Pozorované polohy pásov totality v historickom kontexte môžu byť napomocné pre štúdium rotácie Zeme [24].

PodĎakovanie. Práca na tomto článku bola čiastočne podporená Slovenskou grantovou agentúrou VEGA č. 7012 „Výskum magnetických polí v slnečnej koróne a ich odozvy v heliosfére“ a Agentúrou na podporu výskumu a vývoja, projekt LPP-0146-06 „Stretnutia s vesmírom“. Ďakujem veľmi pekne členom redakčnej rady PMFA za plodnú diskusiu, ktorá pomohla vylepšiť obsah článku, a kolegovi P. Bendíkovi za úpravu obrázkov do žiadanej formy časopisu.

L i t e r a t ú r a

- [1] EDLÉN, B.: *Die deutung der emissionslinien im spectrum der sonnenkorona*. Z. Astrophys. 22 (1942), 30–64.
- [2] LYOT, B.: *Étude de la couronne solaire en dehors des éclipses*. Z. Astrophysik 5 (1932), 73–95.
- [3] PETERSON, A. W.: *Experimental detection of thermal radiation from interplanetary dust*. Astrophys. J. 148 (1967), L37–L39.
- [4] GULYAEV, R. A., SHCHEGLOV, P. V.: *Interferometric observations of emission features in the F-corona*. Contr. Astron. Skalnaté Pleso 28 (1999), 237–242.

- [5] WANG, Y. M., SHEELEY, N. R., RICH, N. B.: *Coronal pseudostreamers*. *Astrophys. J.* 658 (2007), 1340–1348.
- [6] JUDGE, P. G.: *Spectral lines for polarization measurements of the coronal magnetic field. I. Theoretical intensities*. *Astrophys. J.* 500 (1998), 1009–1022.
- [7] DRUCKMÜLLER, M., RUŠIN, V., MINAROVJECH, M.: *A new numerical method of total solar eclipse photography processing*. *Contr. Astron. Obs. Skalnaté Pleso* 36 (2006), 131–148.
- [8] GABRIEL, A. H., BELY-DUBAU, F., LEMAIRE, P.: *The contribution of polar plumes to the fast solar wind*. *Astrophys. J.* 589 (2003), 623–634.
- [9] PASACHOFF, J. M., KIMMEL, S. B., DRUCKMÜLLER, M., RUŠIN, V., SANIGA, M.: *The April 8, 2005, eclipse white-light corona*. *Solar Physics* 238 (2006), 261–270.
- [10] PASACHOFF, J. M., DRUCKMÜLLER, M., RUŠIN, V., SANIGA, M.: *Fine structures in the white-light solar corona at the 2006 eclipse*. *Astrophys. J.* 665 (2007), 824–829.
- [11] RUŠIN, V., RYBANSKÝ, M.: *Slnecná koróna*. VEDA, vydavateľstvo SAV, Bratislava 1990.
- [12] GUILLERMIER P., KOUTCHMY S.: *Total eclipses, science, observations, myths and legends*. Springer — Praxis Seties in Astronomy, Praxis Publishing Ltd, Chichester, Anglicko, 1999.
- [13] GOLUB, L., PASACHOFF, J. M.: *The solar corona*. Cambridge University Press, Cambridge 2009, v tisku.
- [14] EDDY, J. A.: *A nineteenth-century coronal transient*. *Astron. Astrophys.* 34 (1974), 235–240.
- [15] RUŠIN, V., RYBANSKÝ, M.: *Structure of the solar corona during the solar eclipse of 1980 February 16*. *Bull. Astron. Inst. Czechosl.* 34 (1983), 257–264.
- [16] EINSTEIN, A.: *Über den Einfluß der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes*. *Ann. Phys.* 340 (1911), 898–908.
- [17] EINSTEIN, A.: *Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie*. *Ann. Phys.* 354 (1916), 769–822.
- [18] DYSON, F. W., EDDINGTON, A. S., DAVIDSON, C. R.: *A determination of the deflection of light by the sun's gravitational field, from observations made at the total eclipse of May 29, 1919*. *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A*, 220 (1920), 291–333.
- [19] KENNEFICK, D.: *Testing relativity from the 1919 eclipse – a question of bias*. *Physics Today*, March 2009, 37–42.
- [20] PARKER, E. N.: *Magnetic Neutral Sheets in Evolving Fields – Part Two – Formation of the Solar Corona*. *Astrophys. J.* 264 (1983), 642–647.
- [21] ASCHWANDEN, M. J.: *An Observational Test That Disproves Coronal Nanoflare Heating Models*. *Astrophys. J.* 672 (2008), L135–136.
- [22] SCHMITT, J. H. M. M., WICHMANN, R.: *Ground-based observation of emission lines from the corona of a red-dwarf star*. *Nature*, Volume 412 (2001), Issue 6846, 508–510.
- [23] PARKER, E. N.: *The origins of the stellar corona, In Solar and stellar coronal structure and dynamics*. Proceedings of the Ninth Sacramento Peak Summer Symposium (ed. R.C. Altrock), Sunspot, NM, Aug. 17–21, 1987, Sunspot, NM, National Solar Observatory, 1988, 2–17.
- [24] RUŠIN, V.: *Slnko — naša najbližšia hviezda*. VEDA, vydavateľstvo SAV, Bratislava, 2005.