Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

J. Kleczek

Sluneční protuberance

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 3 (1958), No. 2, 181--191

Persistent URL: http://dml.cz/dmlcz/137411

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1958

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

ASTRONOMIE

SLUNEČNÍ PROTUBERANCE

J. Kleczek
Astronomický ústav ČSAV, Ondřejov

V článku je podán přehled dnešních znalostí z fysiky protuberancí. Je určen širšímu okruhu čtenářů. Podrobné údaje o stavbě sluneční atmosféry najde čtenář v článku „Slunce — některé výsledky a problémy jeho výzkumu" v tomto časopise, I (1956), str. 579.

1. Úvod

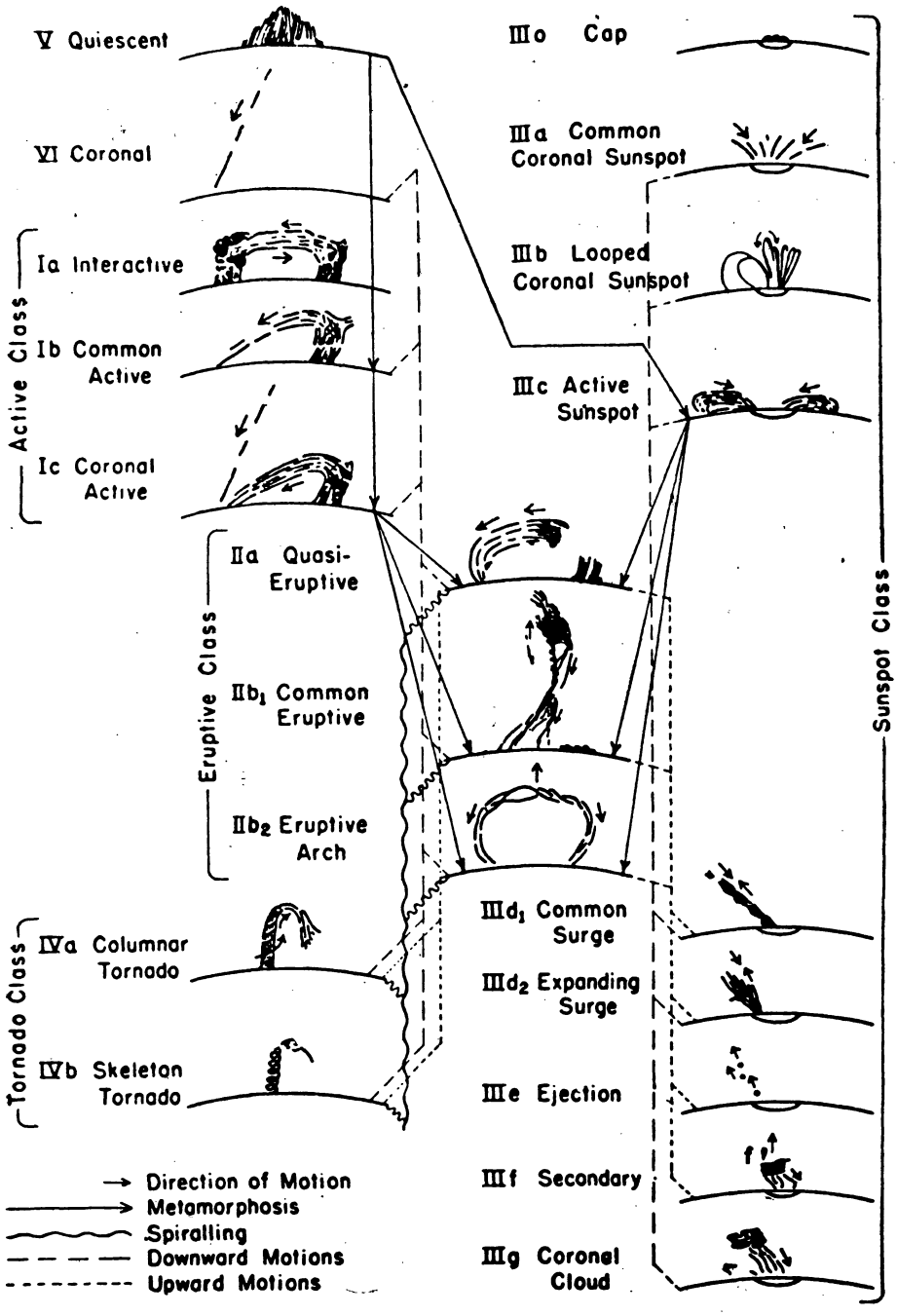
Čtenář bude možná považovat tento úvod za zbytečný. Proč uvádět Slunce, nejběžnější zjev v našem životě? Denně vychází a zapadá, v létě se vyhoupne vysoko nad obzor, kdežto v zimě zůstává většinu času pod obzorem, a pokud vyjde, nevzdaluje se od něho příliš daleko. Určuje rytmus našeho života a je nevyčerpatelnou zásobárnou energie na povrchu Země i druhých planet. Je nezbytné pro život v naší planetární soustavě. Věci nejdůležitější a nejvšednější však často unikají naší pozornosti. Tolik uvádím na svou omluvu, že píši také o poznatcích, s nimiž je čtenář možná již obeznámen.

Sluneční disk se skvrnami, tak jak ho vidíme v dalekohledu, se nazývá fotosféra. Téměř všechno světlo sluneční je vyzařováno fotosférou. Přesněji řečeno, foton, který opouští Slunce, vzniká rekombinací elektronu s neutrálními vodíkovými atomy. Výsledkem je záporný vodík, to je proton se dvěma elektrony. Záporné ionty vodíku zacloňují vhled do hlubších vrstev slunečních, které nazýváme nitrem Slunce. Nad fotosférou se prostírá chromosféra. Sahá do výšky asi šesti tisíc kilometrů a je složena převážně z vodíku a helia. Spojité spektrum chromosféry je zanedbatelné a její emise je převážně v Balmerově serii vodíku. Z chromosféry jsou vyvrhovány některé typy protuberancí. Nad chromosférou je korona, velmi rozsáhlý obal sluneční nesmírně řídkých, žhavých plynů. Možno ji sledovat do výše několika milionů kilometrů nad fotosférou. V klidném stavu mají koronální plyny teplotu kolem milionu stupňů. Protuberance lze považovat za přechodný článek mezi chromosférou a koronou: co do hustoty a teploty připomínají chromosféru, kdežto svou polohou jsou to ryze koronální útvary. Zdá se, jakoby vyrůstaly z chromosféry. První pozorovatelé je také označili latinským slovem *protuberantia* = výčnělek, výrůstek, hrbol. S nepatrnými úpravami pravopisnými a výslovnosti přešlo toto slovo do většiny jazyků. V naší mateřštině je užíváme jako astronomický termín ve tvaru *protuberance*.

Nejstarší záznam o pozorování protuberancí pochází od švédského astronoma Vassenia z r. 1733. Tehdejšími prostředky bylo možno spatřit protuberance jen při úplném zatmění Slunce, to je tehdy, kdy Měsíc zcela zastíní intensivní fotosféru a korona s protuberancemi vroubí tmavý měsíční disk.

Vassenius se domníval, že protuberance jsou útvary v měsíční atmosféře. Dnes ovšem víme, že Měsíc žádnou atmosféru nemá a v roce 1860, kdy byly poprvé pořízeny fotografické snímky slunečního zatmění, bylo bezpečně prokázáno, že protuberance jsou zářící oblaka v atmosféře sluneční. Velkým pokrokem ve studiu protuberancí bylo použití spektroskopu. Jansen pozoroval při zatmění v r. 1868 v Indii spektrum protuberancí a byl tak překvapen jeho intensitou, že brzy poté zkoušel pozorovat protuberance za denního světla, mimo zatmění. Jemným posouváním dalekohledu mohl zaznamenat tvar a rozměry protuberance. Tímto způsobem byly proměřovány protuberance koncem minulého století. Později nahradil D. Hale pohyb dalekohledu dvěma rotujícími hranolky (Andersenovy hranolky). Takový dalekohled se nazývá spektrohelioskop a umožňuje visuální studování změn v chromosféře a protuberancích. Několik desítek spektrohelioskopů se zúčastňuje sledování Slunce v Mezinárodním geofysikálním roce. Předností spektrohelioskopu je možnost měřit radiální rychlosti protuberancí. K tomuto účelu je před druhou štěrbinou umístěna planparalelní skleněná destička (tak zv. *lineshifter*). Moderní výzkum protuberancí se provádí filmováním na koronografu. Princip protuberanční kinematografie je tento: v ohniskové rovině objektivu koronografu je clona (umělý měsíc), která v obrazu Slunce zastiňuje fotosféru. Je to vlastně napodobení slunečního zatmění. Obraz vyšších atmosférických vrstev (chromosféry, protuberancí a korony) se pak sleduje v další části přístroje: pomocí spektrografu či spektroskopu se studuje výskyt čar protuberancí a na horských observatořích užívají optických filtrů s malou šířkou propustnosti, které jsou naladěny na vlnovou délku některé emisní koronální čáry. Tak lze fotografovat strukturu korony, pokud je složena z iontů Fe XIV (zelená korona, $\lambda = 5303$ A) Fe X (červená korona $\lambda = 6374$ A) nebo velmi žhavé oblasti žluté (emise iontů Ca XV ve vlnové délce 5694 A). Konečně jestliže vybereme vhodným filtrem v obrazu jen záření čáry H_α ($\lambda = 6563$ A), dostaneme obraz protuberancí, který je možno snímat filmovou komorou. Frekvence snímků se volí podle charakteru snímané protuberance (řádově desítky sekund až minuty). Dalekohled bývá někdy pointován fotoelektricky, takže snímání je automatické. Filmy protuberancí pak slouží jako základní materiál při studiu pohybů, vzniku a zániku jednotlivých částí protuberance.

Sluneční protuberance patří k nejpoutavějším zjevům na obloze. To potvrdí každý, kdo je pozoroval spektrohelioskopem, koronografem, nebo kdo viděl Robertsův film „Eruptivní protuberance ze dne 4. června 1946". Její první záběr (viz křídovou přílohu) byl sňat brzy po východu Slunce na vysokohorské observatoři Mt. Climax (Colorado). Obrovský oblouk žhavých plynů se zvedá nad zakřiveným okrajem Slunce. Fotosféra je zakryta umělým měsícem. Bílou tečkou je v prvním snímku vyznačena velikost naší Země. Na snímku pořízeném o půl hodiny později dosáhla protuberance výšky 400.000 km a její vnější okraj je téměř kruhový. Na tomto snímku je dobře zřetelná struktura protuberance, složené z mnoha vláken a proudů s případnými uzly a zhuštěninami. Vlákna připomínají vinutí velké cívky. Z filmu zjistíme, že se protuberance zvedala rychlostí kolem 200 km za vteřinu. Na pozdějších snímcích schází hořejší část oblouku, neboť plyny protuberance byly vyvrženy příliš vysoko (přes milion km) a unikly tak ze zorného pole koronografu. Osud této protuberance názorně ilustruje ohromné síly, které zvedají mnoho miliard tun slunečních plynů proti silné gravitaci sluneční, 27× větší než je gravitace zemská.



Obr. 1. Původní Pettitovo schema klasifikace protuberancí. Výklad jednotlivých typů je v textu našeho článku. Význam symbolů (v levém spodním rohu) je tento: krátká šipka označuje směr pohybu. Dlouhá šipka spojující dva různé typy označuje přeměnu (metamorfosu). Vlnovka od eruptivní skupiny značí, že zbytek eruptivní protuberance dostává rotaci a přechází v tornado. Čárkovaná přímka značí pohyb sestupný, tečkovaná pohyb vzestupný.

2. Třídění protuberancí

Protuberance jsou obrovské útvary a mohou mít nejrozmanitější tvar, pohyb a trvání. Na okraji Slunce proti tmavé obloze se jeví jako zářící oblaka, kdežto na disk se promítají jako tmavé filamenty. Pohlcují totiž chromosférické záření a jejich vlastní intensita je menší než intensita záření chromosféry v čáře $H\alpha$. Zdají se nám tedy v průmětu na chromosféru tmavé. Staří pozorovatelé třídili protuberance do dvou skupin: klidné a eruptivní. Avšak studium protuberančních filmů ukazuje, že takové dělení je nedostatečné. Pettit zavedl obsáhlejší třídění protuberancí [1]. V následující tabulce uvádíme Pettitovu klasifikaci. Jeho termíny se užívají mezinárodně a uvádíme je v závorkách. Původní schema Pettitovo je reprodukováno v obr. 1.

Třída		
I	Aktivní (active)	Ia Výměnné (interactive) Ib Obyčejné (common active) Ic Koronální (coronal active)
II	Eruptivní (eruptive)	IIa Podobné eruptivní (quasi-eruptive) IIb_1 Obyčejné (common eruptive) IIb_2 Oblouk (eruptive arch)
III	Slunečních skvrn (Sunspot)	III_0 Čepice (cap) IIIa Obyčejné koronální (common coronal Sunspot) IIIb Koronální smyčky (looped coronal Sunspot) IIIc Aktivní (active Sunspot) $IIId_1$ Příboj (common surge) $IIId_2$ Rozpínavý příboj (expanding surge) IIIe Ejekce (ejection) IIIf druhotné (secondary) IIIg koronální mrak (coronal cloud)
IV	Tornado	IVa Tornádový sloup (columnar Tornado) IVb Tornádová kostra (skeleton tornado)
V	Klidné (quiescent)	
VI	Koronální (coronal)	

Klidné, aktivní a eruptivní protuberance jsou vysoké, dlouhé, ale poměrně tenké útvary. Průměrné rozměry uváděné L. d'Azambujou jsou: výška 40.000 km, délka 200.000 km a tloušťka 6.000 km. Klidné protuberance zůstávají dlouhou dobu bez nápadných změn. Někdy dosahují velké délky, až k milionu kilometrů.

Koronální protuberance (VI) vznikají vysoko nad chromosférou v oblasti korony a odtud padají velkými rychlostmi do chromosféry. Některé se tvoří v koroně v blízkosti slunečních skvrn a padají jako déšť nebo smyčky do chromosféry. Skupiny IIIa, IIIb, IIIg a pravděpodobně IIIc jsou také koronálního původu. Protuberance IIIa sestávají z vějíře proudů padajících k jednomu místu, tak zvanému atrakčnímu středu. Ve smyčkách (IIIb) proudí plyny obyčejně dolů v obou ramenech smyčky. Jako kdybychom drželi kus gumové hadice a z obou konců by stále vytékala voda. Teorií vzniku koronálních protuberancí se budeme zabývat později.

Protuberance typu Ia je vlastně dvojice protuberancí, mezi nimiž dochází k plynulé výměně plynů. Trajektorie proudů a uzlů zůstávají nezměněny a k výměně plynů dochází jen po docela určitých drahách. Nevíme dosud, jaká je hybná síla pohybu v těchto protuberancích. Lze však říci, že pohyby netvoří uzavřený okruh.

Obyčejná aktivní protuberance je nejběžnějším typem na Slunci. Má hrubou propletenou strukturu s proudy plynů padajících do chromosféry. Ku podivu není oblast, kam dopadají plyny (atrakční střed), nijak nápadná. Vzrůstá-li činnost protuberance typu Ib, do atrakčního středu proudí mohutné proudy plynů z protuberance a k nim se přidává i protuberance typu VI. Tento aktivní typ Pettit označuje jako Ic. Vzrůstá-li činnost Ic dále, může se celá protuberance nadzvednout, je vtažena do atrakčního středu a zmizí. To jsou protuberance podobné eruptivním (IIa). Obyčejná eruptivní protuberance (IIb_1) a eruptivní oblouk (IIb_2) stoupají a slábnou až do zmizení. Příkladem protuberance typu IIb_1 je snímek Dra H. Otavského, pořízený dne 24. IX. 1956 v Černošicích u Prahy (viz křídovou přílohu). Obyčejně je část materiálu eruptivní protuberance vtažena do atrakčního středu, kdežto větší její část se rozpustí ve vysoké koroně nebo opustí Slunce docela. Eruptivní protuberance najdeme na celém slunečním povrchu, ve všech heliografických šířkách, převažují však v královských pásech. Dráhy eruptivních protuberancí jsou zpravidla přímočaré a jen málo odkloněné od kolmice k povrchu slunečnímu. Eruptivní protuberance je vlastně jenom fází ve vývoji protuberance, která již existovala dříve několik dnů nebo týdnů. Někteří astronomové se domnívají, že je to konečná fáze všech klidných a některých aktivních protuberancí.

Tornado (IV) jsou obvykle menší protuberance, o průměru 5.000—10.000 km a vysoké 25.000 až 100.000 km. Z vrcholu jejich kmene vystupuje sloup plynů, který se zahýbá dolů k chromosféře. Kmen tornada se rychle otáčí a u jedné protuberance tohoto typu byla změřena rychlost na obvodu 54 km za sekundu. Rozpad tornada může proběhnout několikerým způsobem: rychlost otáčení překročí meze stability a protuberance se rozletí odstředivou silou. Nebo se může celý rotující sloupec zvednout a zmizet jako eruptivní protuberance. Konečně mohou plyny z tornada vytéci sloupem vytékajícím z vrcholu kmene. Jemná struktura v tornadu se dá fotografovat jen vzácně, neboť podrobnosti jsou pod rozlišovací mezí našich metod.

Do třetí skupiny III řadí Pettit devět druhů protuberancí s nejrozmanitějšími vlastnostmi. Jejich společným rysem je výskyt v oblasti slunečních skvrn. Roberts však pozoroval některé z uvedených typů mimo sluneční skvrny; tím by byla vlastně popřena všeobecnost předcházející věty. Od dob Pettitovy klasifikace (1943) značně pokročil výzkum lokálních magnetických polí na Slunci, která jsou obecnějším jevem než skvrny. Jen některá magnetická pole na slunečním povrchu jsou provázena výskytem skvrn. Podstatnou roli v životě skvrn a protuberancí hraje magnetické pole. Někdy pozorujeme protuberance typu III v těch místech, kde se za několik dnů později vyvine skupina skvrn, nebo kde ani k vzniku skvrn nemusí dojít. Možná, že jsou skvrny takových lokálních polí skryty pod povrchem fotosféry a protuberance typu slunečních skvrn zůstávají hlavním indikátorem činnosti pod fotosférou.

Typ III_0 je pouze zvednutá oblast fotosféry. K nadzvednutí dochází v důsledku vnitřního tlaku, jak tomu nasvědčují časté surge, které z typu III_0 unikají. Typ III_s (*surge* — vyslov sördž) je vyvrhován velkými rychlostmi z oblasti slunečních skvrn. Protuberance tohoto typu dosahují výšky až

100.000 km a poté se rozpustí nebo vrací zpět po téže dráze. Malý surge trvá asi 10 minut, velký až 1 hodinu. Surge je jediným typem protuberancí, u něhož byla pozorována srážka s jinou protuberancí. Je zajímavé, že při srážce obou plynných kolosů dochází k pružnému odrazu. I jiným typem IIId je neviditelný surge. Na jeho existenci usuzujeme z efektů, kterými je doprovázen jeho vznik: rostoucí vyvýšenina na slunečním okraji, která náhle praskne, působí silným dojmem, že bylo vyvrženo obrovské množství neviditelných plynů. Neviditelných proto, že jejich teplota je příliš vysoká. „Neviditelný" u protuberancí značí „nezářící v čáře $H\alpha$". Jsou-li totiž vodíkové atomy ionisovány vysokou teplotou, nemohou zářit v $H\alpha$, to jest nemohou v nich nastávat přeskoky elektronu z třetí hladiny do hladiny druhé.

Pettitova klasifikace je převážně popisná: udává tvar protuberance v určitý okamžik. Avšak typ V se může změnit v typ IB nebo Ic, ten opět může přejít v eruptivní protuberanci (typ II) a zbytky takové eruptivní protuberance mohou rychle rotovat jako tornado atd. Právě tento genetický moment Pettitova klasifikace nevystihuje. Menzel a Evans zavedli nové třídění protuberancí, které vystihuje nejen jejich anatomii, nýbrž i fysiologii. Podrobněji o této klasifikaci pojednává článek [2]. Ve světové literatuře se však převážně dosud užívá klasifikace Pettitovy. Hovořili jsme o ní v našem článku jednak z tohoto důvodu, jednak proto, že je v ní zachycena ohromná pestrost ve tvaru protuberancí.

3. Fysikální vlastnosti protuberancí

Co do polohy jsou protuberance koronálními útvary. Jejich teplota je však značně nižší než teplota korony. Hustota protuberancí je naopak o několik řádů vyšší než hustota okolní korony.

Klidné protuberance setrvávají bez větších změn po celé dny i týdny v horké koroně. Tutéž klidnou protuberanci je někdy možno sledovat po několik měsíců. Eruptivní protuberance bývají naopak ve velmi prudkém pohybu. Některé protuberance jsou velmi jasně viditelné v integrálním světle, jiné jsou tak slabé, že se o jejich existenci dovídáme jen tehdy, promítají-li se na jinou jasnou protuberanci [3]. Vedle obrovských protuberancí o délce či výšce několika statisíců kilometrů nacházíme *spikule* s rozměry udávanými v tisících kilometrech. Dříve byly počítány spikule k jemné struktuře chromosféry, dnes je přiřazujeme do protuberancí. Za dobrých pozorovacích podmínek je vidíme jako drobné výběžky z chromosféry. Připomínají obilné klasy zmítané větrem. Odtud pochází také jejich název (spikule = klásek). Průměrná výška spikulí nad fotosférou je 7.000 km. Výjimečně lze pozorovat i spikuje vysoké 10.000 km. Obvykle stoupá spikule konstantní rychlostí do maximální výšky, kde se náhle zastaví, rozpustí nebo začne klesat zpět. Klesá-li spikule zpět do chromosféry, její sestupná rychlost je konstantní a rovná se rychlosti výstupné. Životní doba spikují je kolem 2 minut. Pokud jde o jejich heliografické rozložení, jsou rozsety po celém povrchu slunečním. Mají rozhodující význam pro zahřívání korony. Přenášejí totiž energii ze slunečního nitra do korony. Nejen energii, ale též plyny, které se potom ve formě koronálních protuberancí vracejí zpět k chromosféře. Tento koloběh plynu chromosféra → →korona → koronální protuberance → chromosféra uspokojivě vysvětluje řadu otázek z fysiky protuberancí a korony.

Pozoruhodné jsou pohyby protuberancí: přesto, že se odehrávají v silném gravitačním poli Slunce, nenacházíme v nich složku volného pádu. Ve většině

případů zůstávají rychlosti konstantní. Tu a tam vidíme náhlý vzrůst rychlosti, avšak zcela jiné povahy, než bychom čekali od vlivu gravitace. Zdá se, jako by gravitace zůstávala zanedbatelná v porovnání s těmi silami, které uživují pohyb protuberancí. Není dosud bezpečně známo, jaké jsou to síly, i když víme, že magnetohydrodynamické síly jsou jednou z nejdůležitějších složek, ne-li nejdůležitější vůbec.

Pečlivé sledování pohybu protuberancí je nejspolehlivější způsob určení velikosti, změn a podstaty oněch sil. Dnes se tento průzkum děje filmováním protuberancí na koronografu a proměřením takto získaného filmu. Studium pohybu protuberancí tímto způsobem je však kusé, neboť určuje toliko průmět pohybů protuberance do roviny kolmé k zornému paprsku. Pro skutečný prostorový pohyb — a jen takový nám dá správný obraz o hledaných silových polích — je ještě navíc třeba znát třetí, radiální složku pohybu. D. E. Billings a J. C. Pecker [4] ji odvozují teoreticky pomocí zjednodušujících předpokladů z pohybu dvojrozměrného, zjištěného na filmu. Mac Math určoval radiální složku zvláštním spektrografem. Na ondřejovské hvězdárně jsme určovali radiální složky v pohybu protuberancí visuálně, ve spektrohelioskopu.

Prostorové rychlosti a z nich odvozená zrychlení nám mohou prozradit mnoho o struktuře lokálních magnetických polí v koroně, tedy tam, kam nezasahuje měření slunečním magnetografem. Z fotometrie snímků lze určit hustotu a prostorový rozsah protuberancí. Odtud vypočteme celkovou jejich hmotu. Součin hmoty a zrychlení je podle třetího Newtonova principu síla. Dosud ji nikdo neurčoval, ale musí to být síly obrovské. Představme si menší eruptivní protuberanci o hmotě několika milionů tun, která v málo minutách dosáhne rychlosti sta kilometrů za vteřinu.

Nejrychlejší protuberanci dosud zaznamenanou zjistil D. H. Menzel 10. února 1956 [5]. Byl to surge, který dosáhl vzestupné rychlosti 1130 km za vteřinu. Pohyboval se tedy mnohem rychleji než je úniková rychlost ze Slunce (617 km/sec.) Plyny z této protuberance unikly z gravitačního působení Slunce a vzniká otázka, zda Slunce tímto způsobem může ztrácet svou hmotu ve větším měřítku. Fesenkov se dokonce domnívá, že korpuskulární záření — které může mít formu eruptivní protuberance nebo surge — mělo rozhodující vliv na vývoj našeho Slunce v jeho raném stadiu. V současné době je však ztráta korpuskulárním zářením poměrně malá, jak ukázal E. R. Mustěl.

Velká rozmanitost ve tvaru, pohybech a trvání protuberancí se projevuje také v jejich teplotě a hustotě. V protuberancích není termodynamická rovnováha. Nemůže tam být již z toho prostého důvodu, že záření, jemuž je protuberance vystavena, pochází jednak z fotosféry o teplotě 6.000 °K, jednak je to intensivní ultrafialové záření a paprsky X z vysoké chromosféry a korony, tedy záření odpovídající vysokým teplotám kolem milionu stupňů.

Teplotu protuberancí lze určit z jejich záření několika způsoby. V případě termodynamické rovnováhy by všechny způsoby vedly k téže teplotě. V protuberancích však dostaneme různou teplotu podle toho, kterého zákonu záření k měření použijeme. Hovoříme pak o teplotě ionisační, teplotě buzení, kinetické teplotě elektronů atd. Miss Conway určila kinetickou teplotu iontů z profilů čar na 13—18.000 °K [6]. P. ten Bruggencate odvodil pro teplotu elektronů 4.000 °K a pro kinetickou teplotu atomů 13.000 °K [7]. I. Cholodnyj srovnáním heliových a vodíkových par (vyloučení turbulence) dostal $T_{kin} =$ = 11.800 °K [8]. Podle heliových čar $T_{buz} = 5—7$ tisíc stupňů. Bohužel,

není vždy uvedeno, u jakého typu protuberance bylo provedeno měření. Teploty, jak potvrzují měření intensit spektrálních čar, se mění od protuberance k protuberanci a uvnitř téže protuberance od místa k místu. Tak na př. okraje protuberancí mají nižší teplotu než jádro [9]. Pro teplotu protuberancí AS v aktivních oblastech Billings a Zirin naměřili kinetickou teplotu přes 100.000 °K.

Podobně určení hustoty značně kolísají, od 10^{11} částic atomů v 1 cm³ do 10^{13} cm^{-3}. Koelbloedova a Veltmanova určení hustoty $3 . 10^{10}$ elektronů/cm³ se vztahují na klidné protuberance a mohou být — pro neurčitost sklonu k zornému paprsku — podceněna [10]. Jinak můžeme o hustotě říci, stejně jako o teplotě, že závislost na typu protuberancí je dosud neznáma. Také časové změny hustoty uvnitř téže protuberance nebyly dosud studovány.

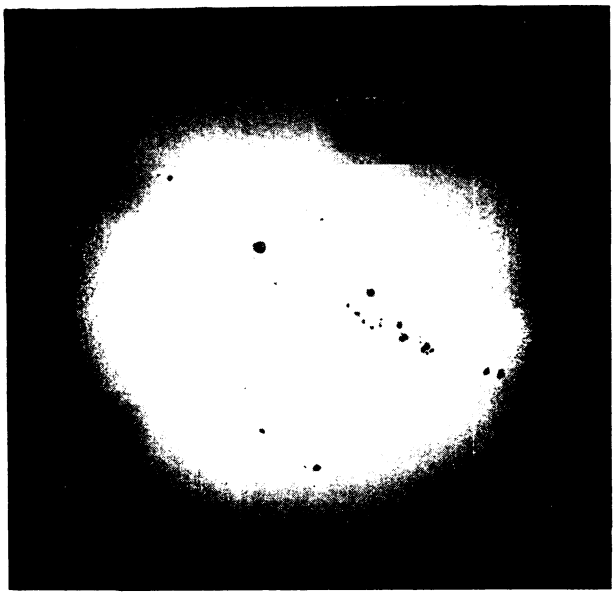
Spektrum protuberancí sestává v emisních čar. Již při prvních pozorováních protuberancí rozšířenou štěrbinou zjistili pozorovatelé dva různé typy protuberancí. První nazvali klidnými čili vodíkovými, druhý typ nazvali eruptivním čili kovovým. U každého typu první název se vztahuje k pohybu, druhý název ke spektru. Hlavním rysem spektra klidné protuberance je Balmerovská serie vodíku a čára D_3 helia. Důležitost čar H a K ionisovaného vápníku ve spektru protuberancí zůstávala po delší dobu nevyjasněnou. Čáry neutrálního helia λ 6678 a λ 7065 je těžko spatřit, a proto klidné protuberance byly nazývány také protuberancemi vodíkovými.

Kovové protuberance jsou toliko u slunečních skvrn. Jsou velmi aktivní a patří do nich především skupina označená později Pettitem jako *surge*. V jejich viditelném spektru jsou především tyto čáry: b skupina hořčíku a železa, železné čáry $\lambda\lambda$ 4923, 5018, 5234, 5276, 5316, 5362, 6678; D_1 a D_2 sodíku, jakož i heliové čáry $\lambda\lambda$ 5015, 6678 a 7065. Proto byly tyto protuberance nazvány kovovými. Spektrum protuberancí se tak stává kriteriem, je-li protuberance nad sluneční skvrnou nebo mimo aktivní oblasti. Fysikálně není rozdíl mezi kovovými a vodíkovými protuberancemi dosud ještě vysvětlen. Je však pravděpodobné, že kovové protuberance se liší od vodíkových jen větší hustotou a větším počtem zářících atomů. Ve spektrech klidných protuberancí, získaných při slunečním zatmění, lze totiž nalézt i čáry kovových protuberancí. Jsou ovšem tak slabé, že je lze pozorovat jen při slunečním zatmění. Ve zcela výjimečných případech byly pozorovány protuberance ve spojitém spektru. Studium tohoto rozptýleného spojitého spektra nám dává informace o hustotě elektronů v protuberancích.

Tlak protuberancí. Stabilitu klidných protuberancí vysvětlují Zanstra a Kiepenheuer rovností tlaku v koroně a v protuberancích [11]. Pro tlak plynu p (v dynech na cm²) platí

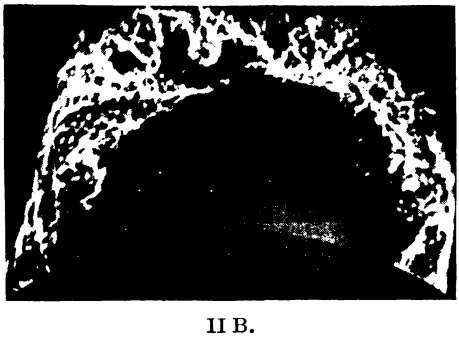
$$p = nkT ,$$

kdež k je Boltzmannova konstanta ($1{,}38 . 10^{-16}$), n je počet částic v kubickém centimetru a T je absolutní teplota. Snadno se přesvědčíme o rovnosti tlaků sami, dosadíme-li do hořejší rovnice za teplotu korony 10^6 °K, za hustotu korony $n_k = 10^8$ cm^{-3}, teplotu protuberance $T_p = 10^4$ °K a hustotu protuberance $n_p = 10^{10}$ cm^{-3}. Jestliže však uvážíme některá novější měření T_p a n_p v protuberancích typu slunečních skvrn ($10^4 - 10^5$ °K, $10^{11} - 10^{13}$ cm^{-3}), musí podle hořejší rovnice tlak plynů protuberancí značně převyšovat tlak okolní korony.



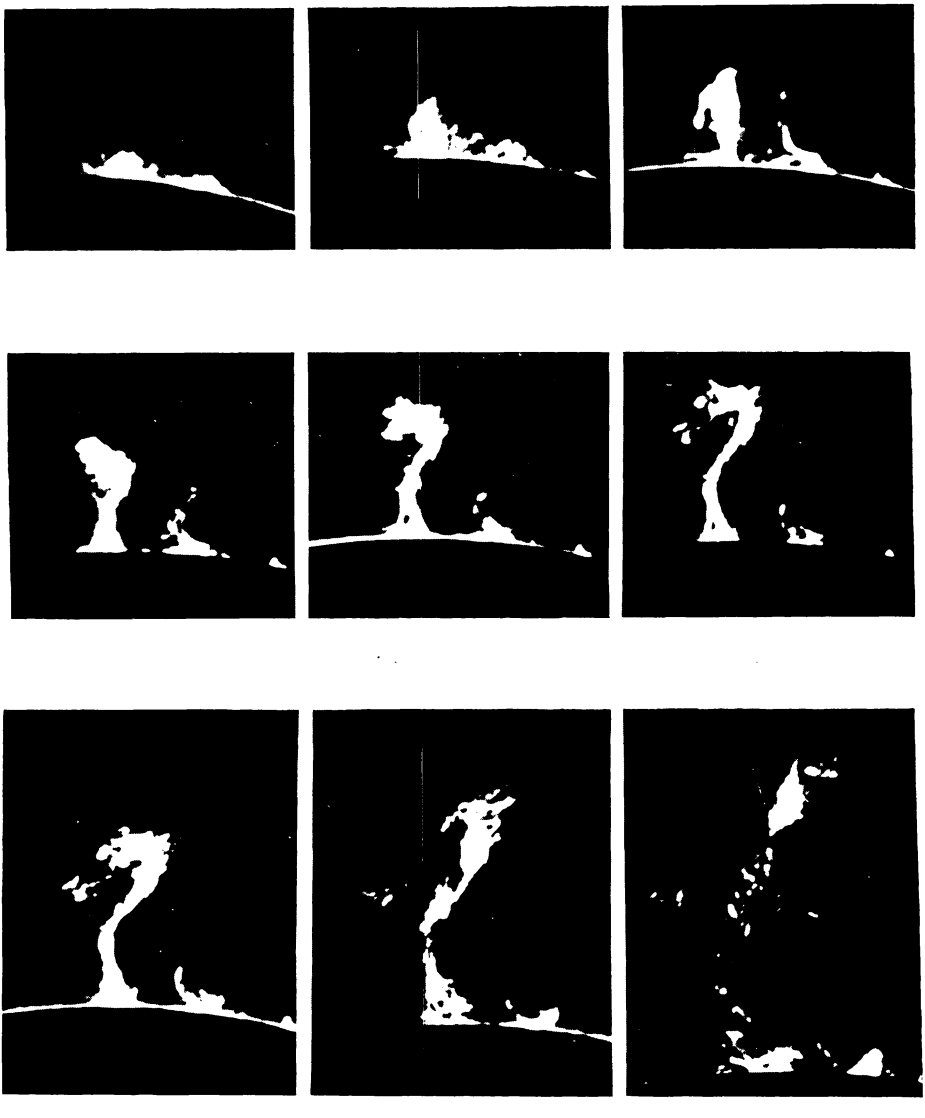
I. Snímek sluneční fotosféry z období maximální sluneční činnosti (14. VIII. 1947). Skvrny se vyskytují ve dvou pásech kolem rovníku (t. zv. královské pásy). Na tyto pásy jsou vázány protuberance typu slunečních skvrn. Ztmavění fotosféry je způsobeno poklesem teploty směrem z nitra k povrchu. Ve středové části fotosféry totiž vidíme do větší hloubky, to jest do teplejších vrstev. Čím dále k okraji, tím je větlo z vyšších, chladnějších vrstev. Tento velmi dobrý snímek pořídil amatér J. Spott z lidové hvězdárny v Plzni.

II A.



II B.

II. A, B. Dvě kopie z Robertsova filmu eruptivní protuberance ze 4. června 1946. Tmavý oblouk dole je umělý měsíc koronografu, který zakrývá fotosféru, Na prvním snímku je bílým kotoučkem znázorněna poměrná velikost naší Země. Tento snímek byl pořízen v 16^h03^m světového času, druhý v 16^h51^m.



III. Eruptivní protuberance ze dne 24. IX. 1956. Tyto záběry jsou kopiemi zdařilého filmu, pořízeného naším amatérem Dr. H. Otavským, přístrojem, který sám konstruoval. Rychlost posoudí čtenář z připsaných časů. Poloměr zastíněné fotosféry je sedmset tisíc kilometrů.

Naskýtá se přirozeně otázka, čím je tato převaha tlaku v protuberanci kompensována, tak, aby se protuberance nerozletěla do okolní korony. Jak jsme se již dříve zmínili, protuberance typu slunečních skvrn (AS v klasifikaci Menzela a Evanse) vznikají v silném magnetickém poli. Je-li intensita magnetického pole H, potom je tlak magnetických siločar p

$$p = \frac{H^2}{8\pi},$$

takže stačí, aby intensita vně protuberance byla o $1{,}5 \times 10^2$ gausů větší než v protuberancích, aby se vyrovnal tlakový nepoměr $1 : 10^3$. Připomeňme při této příležitosti, že ve skvrně samé dosahuje intensita až několika tisíců gausů a protuberance — vzhledem k rozměrům skupin skvrn (10^5 km) — vznikají v poměrně malých výškách, $20-50 \times 10^4$ km. Vysoký tlak protuberancí tak, jak jej zjišťují někteří autoři, nemusí tedy být ve sporu se stabilitou protuberancí.

4. Kondensace protuberancí z korony

Vznik protuberancí AS. Přesto, že se nakupilo o protuberancích mnoho pozorovacího materiálu, patří protuberance dosud k nejméně známým zjevům na Slunci. Příčinu je třeba spatřovat v tom, že chování ionisovaných plynů pod vlivem mechanických elektrických a magnetických sil je velmi komplikované. Teorie protuberancí, které byly vytvořeny, se zabývají proto každá zcela speciálním problémem a celý komplex zbývajících otázek nechávají nepovšimnut. Podle Cowlinga nejdůležitějším problémem, který je třeba především objasnit, je tvoření uzlů nad skupinami skvrn [12]. Podstatnou úlohu na jejich tvoření má magnetické pole. Nejen u protuberancí typu slunečních skvrn (AS), ale u všech typů vůbec.

Pozorování svědčící pro vznik některých typů protuberancí z korony. Při východu nebo při západu velké skupiny skvrn bývají pozorovatelé svědky velmi rychlého vytvoření protuberance typu AS. V místech, kde nebylo ani potuchy po emisi čáry $H\alpha$ se za necelou minutu vytvoří veliká, intensivně zářící protuberance. Vzniká silný dojem, že tyto intensivně zářící plyny se kondensují z okolní korony. Stejným dojmem působí i filmy z Lyotova a Robertsova koronografu: mnohé protuberance se tvoří kondensací korony.

Na snímcích korony získaných při zatmění jsou v koroně v blízkosti klidných protuberancí tmavé rozsáhlé oblasti, obklopené jasnými oblouky. Pozorování koronografem potvrzují mnohem početnějšími příklady takové tmavé prostory (dómy) obklopující klidné protuberance. Dómy ukazují na to, že vzrůst hustoty protuberancí je způsoben na účet okolní korony. Pokles jasu v dómech o 10—20% znamená, že prostor kolem protuberance v síle $0{,}1\,R_\odot - 0{,}2\,R_\odot$ je prakticky bez plynů. V období maxima sluneční činnosti se protuberance vyskytují ve vysokých šířkách, kdy je hustota korony i nad vysokými šířkami dostačující. Také kolísání počtu protuberancí, může být způsobeno kolísáním hustoty koronálních plynů.

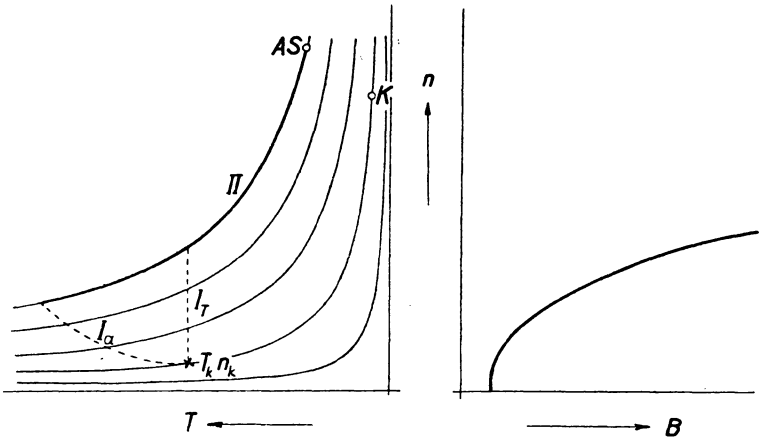
Zmizení klidných protuberancí a jejich objevení za několik dnů na stejném místě a v tomtéž tvaru, ukazují, že tvar, rozměry, struktura a poloha protuberance jsou určeny již dříve před jejím objevením v čáře $H\alpha$. Magnetické pole představuje pravděpodobně kostru protuberance, na níž visí její zářící plyny.

Některé koronální protuberance setrvávají dlouho beze změn, přesto že jejich plyny stále odtékají do chromosféry. Dlouhodobou existenci těchto

protuberancí nelze vysvětlit jinak, než stálou kondensací okolní korony. Koronální plyny přecházejí do stavu protuberance a kompensují tak vzniklé ztráty.

Tání protuberancí, které bylo pozorováno sovětskými expedicemi za slunečním zatměním v r. 1936, je opačným procesem ke kondensaci.

V poslední době se kondensací protuberancí zabývají dvě práce. Kieppenhahn a Schlüter studují rovnovážné magnetické pole, v němž se mohou po dlouhou dobu udržet klidné protuberance [13]. Otázku ochlazení a zhuštění koronálních plynů do stavu protuberance se zabýval Kleczek [14]. Přitom vyšlo najevo, že se musí koronální plyny nejprve zahřát, aby se mohly v rozumné době ochladit. *Kondensací protuberance* typu slunečních skvrn rozumíme přechod plynů ze stavu korony ($T_k = 1{,}000.000$ °K, $n_k = 10^8$ cm^{-3}) do stavu



Obr. 2. Schematické znázornění kondesace protuberance z korony. Na svislé ose je hustota (počet částic v jednom cm^3), na vodorovné ose vlevo je teplota T. Stav korony je vyznačen bodem ($T_k n_k$), stav klidné protuberance bodem K. Protuberanci typu slunečních skvrn odpovídá bod AS. Komprese koronálních plynů představuje první fázi kondensace protuberancí typu slunečních skvrn. Úsečka I_T označuje isotermickou kompresi, I_a pak adiabatickou kompresi. Mezi těmito limitními případy probíhá skutečná komprese plynů. V pravé polovině je schematicky znázorněna energie vyzářená za jednu vteřinu jedním cm^3 (označená B) v závislosti na hustotě n. Lze dokázat, že $B \sim n^2$. Je zajímavé, že na teplotu T je B daleko méně citlivější. Ochlazení isobarické — to je pokles teploty při konstantním tlaku — je znázorněno křivkou II. Čím je isobara, po níž probíhá chladnutí, vyšší, tím je chladnutí rychlejší. Proto musí krátkodové protuberance typu slunečních skvrn chladnout při větších tlacích, do nichž je dostává komprese I.

protuberance ($T_p = 10.000 - 50.000$ °K, $n_p = 10^{11} - 10^{13}$ cm^{-3}). Začáteční bod kondensace je v obrázku 2 vyznačen (T_k, n_k), konečný stav protuberance je znázorněn bodem AS. Kondensace je tedy přechod ($T_k n_k$) $\rightarrow S$. Naskýtá se ovšem otázka, jak tento přechod probíhá. Dá se ukázat, že musí nejprve dojít ke kompresi koronálních plynů (vzrůstu tlaku a hustoty), po níž následuje ochlazení. V našem diagramu bude se bod, znázorňující stav kondensujícího plynu, pohybovat nejprve doleva nahoru a potom doprava (bude chladnout). Jen tímto způsobem se dá vysvětlit rychlý a krátkodobý zrod protuberancí u slunečních skvrn. Další oporou tohoto výkladu kondensace je pozorování: protuberance typu slunečních skvrn bývají často doprovázeny emisí žluté koronální čáry, o níž bylo dokázáno, že je emitována z oblastí o teplotě 2 a půl milionu stupňů [15].

Pokud jde o kondensaci klidných protuberancí, nasvědčují pozorování tomu, že je to proces pozvolný, dlouhodobý. Tuto skutečnost dobře vysvětluje předpoklad, že kondensace probíhá po rovnoramenné hyperbole, na níž leží bod $(T_k n_k)$. Rovnoramenná hyperbola v našem stavovém diagramu představuje isobaru. Jak již bylo řečeno, tlak v koroně, ale klidné protuberanci je přibližně rovný. Bod K, který odpovídá stavu klidné protuberance, leží tedy na stejné isobaře jako stav korony. Také tato skutečnost nasvědčuje tomu, že předpoklad isobarické kondensace pro klidné protuberance se nebude příliš odchylovat od skutečnosti.

Závěr

V článku jsme viděli, že je mnoho otázek, na něž není dosud odpovědi, nebo takových otázek, na něž máme jen odpověď nejistou. Je třeba více pozorování protuberancí, pozorování účelných. Pokus a pozorování, pokud mají mít význam pro výzkum, jsou otázkou položenou přírodě.

V naší zemi je amatérská astronomie na vysoké úrovni i ve fotografii sluneční fotosféry a protuberancí. Na lidových hvězdárnách i v domovech amatérů nacházíme mimo jiné též protuberanční dalekohledy. Snímky jimi pořízené dosahují často takové kvality, že o některé z nich píší zahraniční odborníci. Kopie jejich denních snímků slouží mnohdy za podklad mezinárodních slunečních map vydávaných ve Freiburgu. Některé další dalekohledy ke sledování protuberancí se buď staví nebo jsou v plánu. Chtěl bych říci těm, kteří jimi pozorují nebo budou pozorovat, že jednotlivý snímek hezké protuberance je sice působivý, ale k výzkumu protuberancí je zapotřebí: a) systematické sledování změn v protuberanci, b) sledovat též slabé, nenápadné, malé protuberance, c) mít program, byť i skrovný a časově omezený.

LITERATURA

[1] E. Pettit: Contributions from the Mt. Wilson Observatory No 679, 1943.
[2] J. Kleczek: *Sluneční protuberance*, Pokroky M, F a A, I, č. 2, str. 169, (1956).
[3] Y. Öhman: Astrophysical Journal 114 (1951), 367.
[4] D. E. Billings, J. C. Pecker: Comtes rendus 238 (1954), 1690.
[5] D. H. Menzel et al.: Astronomical Journal 61 (1956), 186.
[6] Miss Conway: Contribution Dunsink Obs. No 3 (1952).
[7] P. ten Bruggencate: Atti di Convegno Volta, Roma 1953, 163.
[8] Ivanov — Cholodnyj: Izvestija Krymskoj astr. obs. XV (1955), 69.
[9] B. Severnyj: Izv. Kr. astr. obs. XII (1954), 33.
[10] D. Koelbloed, W. Veltman: K. Akad. Weten. Amstredam 54 (1951), 468.
[11] H. Zanstra: Observatory 67 (1947), 10.
K. O. Kiepenheuer: *The Sun*, editor G. Kuiper, Chicago 1953, 429.
[12] T. G. Cowling: *The Sun I*, Chicago 1953. Editor G. Kuiper.
[13] R. Kippenhahn, A. Schlüter: Zeitschrift für Astrophysik 43 (1957) 36.
[14] J. Kleczek: Bull. Astronom. Institutes Czechoslovakia 8 (1957), 120.
[15] J. Kleczek: Bull. Astronom. Institutes Czechoslovakia 8 (1957), 68.