

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

V. G. Fesenkov

O vývoji hvězd a o vzniku sluneční soustavy

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 4 (1959), No. 4, 480--486

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/137749>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1959

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>

O VÝVOJI HVĚZD A O VZNIKU SLUNEČNÍ SOUSTAVY*)

V. G. FESENKOV

Problém vzniku sluneční soustavy, tj. souhrnu planet určitých fyzikálních vlastností, obíhajících po určitých drahách kolem centrální hvězdy — Slunce, úzce souvisí s daleko obecnějším problémem vzniku a vývoje hvězd.

V naší Galaxii existují objekty značně se navzájem odlišující ve svých fyzikálních vlastnostech: poměrně velmi hmotné hvězdy, které jsou na různých stupních svého vývoje, a na druhé straně plynoprachová mezihvězdná hmota neobyčejně malé hustoty. Dnes můžeme považovat za prokázané, že hvězdy raných spektrálních typů O a B jsou poměrně mladé a že od doby jejich vzniku nás dělí několik miliónů nebo pouze statisíců let. Je pochopitelné, že těmto hvězdám je věnována největší pozornost, neboť vzhledem k ohromnému množství vyzařované hmoty musely vzniknout v současném stadiu vývoje naší Galaxie. Tyto hvězdy jsou nepochybně produktem nahuštění rozptýlené mezihvězdné hmoty, související s plynoprachovými mlhovinami.

Podrobný výzkum mlhovin, který se v poslední době provádí na mnoha observatořích, zejména na Krymské a Alma-Atské astrofyzikální observatoři, ukázal na existenci početných přechodných forem, od rozptýlených oblaků s hustotou řádu 10^{-24} g/cm³, k poměrně zhuštěným, ale drobným globulím, ve kterých můžeme vidět prvotní vývojové stadium vznikajících hvězd.

Značné zhuštění plynoprachové mezihvězdné hmoty se projevuje již v dlouhých, poměrně intenzivních světlých i temných vláknech, která, nehledě na nepatrné prodloužení v radiálním směru, jsou schopna dát takový světelný efekt, jako nepoměrně rozlehlejší oblaka. Hustotu temných vláken je možno odhadnout na 10^{-22} g/cm³. Dále je možné si všimnout četných světlých a temných kondensací téměř kulového tvaru, které často tvoří husté řetízky. V řídých případech můžeme pozorovat tyto husté řetízky i mezi již zcela hotovými hvězdami, které se někdy v takovémto případě rozkládají podél temných vláken.

Nebudeme se zabývat problémem postupného vývoje různých forem galaktických mlhovin. S veškerou pravděpodobností mají při tom velkou úlohu různá silová pole mezihvězdného prostoru: gravitační, radiační a elektromagnetické. Je nepochybné, že existence magnetických polí, souvisejících s polarizací světla v mezihvězdném prostoru, přináší nový faktor, příznivý pro kondensaci, protože nabitě částice se rozkládají podél silokřivek magnetického pole.

Řada autorů, zastávajících názor, že hvězdy vznikají z kompaktních globulí, předpokládá, že tyto globule jsou ve velkém množství zcela náhodně rozptýleny. Podrobné studium této otázky, uskutečněné na Alma-Atské astrofyzikální observatoři na základě materiálu Palomarského atlasu a z originálních negativů, ukázalo, že globule úzce souvisejí s kompaktními temnými mlhovinami. V řadě případů také vytvářejí řetízky nepravidelných, někdy více lomených tvarů.

Po tomto výkladu můžeme vyjít z předpokladu, že hvězdy zpravidla vznikají kondensací hmoty plynoprachových mlhovin. Nutnou podmínkou pro to je dostatečně velká hustota, při které je vznikající kondensace schopna převýšit rozkladné slapové síly galaktického středu nebo jednotlivých v blízkosti

*) В. Г. Фесенков, Об эволюции звезд и происхождении солнечной системы, *Izvestija astrofizičeskogo instituta*, sv. VII, AN KazSSR, Alma-Ata 1958.

procházejících hvězd. Použijeme-li Rocheova kritéria, vidíme, že tato kritická hustota v oblasti našeho Slunce musí dosáhnout 10^{-22} g/cm³. Obdobné hustoty dosahují jednotlivá temná vlákna, rozpadající se na kondensace — globule.

Je přirozeně pochopitelné, že jestliže kdekoli došlo k dostatečnému zhuštění hmoty, musí se tato kondensace nutně dále vyvíjet směrem ke stále většímu zhušťování v důsledku ztráty energie při ochlazování prachovými částicemi, které do ní vnikají. Tento proces ochlazování byl důkladně popsán Van de Hulstem. Prachové částice se srážejí s molekulami plynu a získávají od nich část kinetické energie. Probíhá tak určité zahřívání a poté vyzařování tepelné energie formou infračerveného záření, které téměř není pohlcováno plyno-prachovým prostředím. Pozorovaná příměs pevných prachových částic v poměrném množství 1% celkové hmoty je vzhledem k ostatní plynné hmotě zcela dostačující k tomu, aby zajistila rychlé ochlazení a tím nakonec kontrakci v globuli.

Je možno předpokládat, že výsledkem takového nezvratného procesu musí být vždy vznik jediného tělesa — hvězdy? To závisí na tom, zda zásoba rotační energie, kterou má poměrně řídká globule, nepřesáhne hodnotu, nutnou k zachování rovnováhy konečného produktu kondensace — hvězdy. Viděli jsme, že prvotní podmínky pro kondensaci jsou určovány její hustotou při dostatečně nízké teplotě. Konečnou podmínkou je stabilita — rovnováha při vzniku hvězdy, tj. dostatečně malý rotační moment, který musí být soustředěn v jednom tělese, otáčejícím se kolem určité osy a u kterého odstředivá síla na rovníku nutně musí být menší, než síla gravitační. Ze splnění první podmínky nevyplývá přirozeně splnění podmínky druhé. Výsledný rotační moment představuje danou veličinu a nemůže být změněn procesem kondensace.

Poincaré ve svých známých statích o kosmogonii ukázal, že k tomu, aby celkový geometrický rotační moment odpovídal podmínkám rotační rovnováhy vznikající hvězdy, je třeba téměř úplné kompenzace rotačních momentů jednotlivých částic vstupujících do soustavy prvotní globule. Zpravidla se ukazuje, že druhá podmínka není splněna a celá hmota smršťující se globule se nemůže spojit v jednu hvězdu bez narušení své rotační rovnováhy. V důsledku toho jsou ojedinělé hvězdy, jak je známo, v naší Galaxii poměrně řídkým zjevem. Většinou se vytvářejí dvojhvězdy nebo vícenásobné hvězdné soustavy, ve kterých rotační moment prvotního oblaku není představován pouze rotací jednotlivých složek, ale především jejich vzájemným oběžným pohybem. Osamělá hvězda, jakou je např. i naše Slunce, může vzniknout pouze ve výjimečném případě. A stejně tak při vzniku osamělé hvězdy můžeme těžko očekávat, že veškerá hmota globule se spojí do jediného centra kondensace. Určitá část této hmoty, pokud bude mít dostatečnou zásobu rotační energie, může zůstat v rozptýleném stavu v určité vzdálenosti od středu.

Pozorujeme-li dále proces takové kondensace, můžeme vidět, že jednotlivé částice prvotní globule víc a více v důsledku vzájemných srážek vyrovnávají svoje rotační momenty, které získávají stejný smysl a směr. Částice se zápornými momenty se spojují s kladnými a soustřeďují se v centru. Vzdálené částice, obíhající přibližně po kruhových drahách, mají zároveň vždy i velký rotační moment. Je nutno přihlídnout k tomu, že centrální jádro, postupně se tvořící v procesu kondensace, sestává z částic, které přišly jen velmi málo do styku s nejbližšími částicemi o velkém rotačním momentu. Jak již dávno ukázal Poincaré, je podobná kondensace nezbytně provázána značným zploštěním celé globule vzhledem k výsledné rovině největšího rotačního mo-

mentu. Rovníková rovina rotace centrálních částí globule však nemusí odpovídat výsledné rovině rotace okrajových částí; naopak mezi nimi může být i značný rozdíl. To odpovídá i známému faktu, že rovina slunečního rovníku, která nepochybně souvisí s výslednou společnou rovinou pohybu planet, je k ní přesto nakloněna v nevelikém úhlu 6° . Jestliže by byla hmota, ze které vznikly planety, zachycena Sluncem z vnějšího prostředí, nebo kdyby se od něho byla oddělila v jeho rovníkové rovině, nemohl by být, jak je zřejmé, ani tento malý rozdíl vysvětlen. Kondensace prvotní globule musela v důsledku jejího postupného ochlazování dospět s velkou pravděpodobností nejen k vytvoření centrálního zhuštění, ale i k rozptýlení určitého množství hmoty do okolního prostředí, hmoty, která byla dostatečně vzdálena a zhuštěna ve společné rovině rotace soustavy.

Tato rozptýlená hmota, tvořená plyny s příměsí pevných prachových částic, které nacházíme ve všech kosmických mračcích, byla stavebním materiálem pro vznik planet v naší sluneční soustavě. V každém případě, všechny současné kosmogonické hypotézy vycházejí z předpokladu, že planety vznikly z hmoty, rozptýlené v okolním prostředí vznikajícího Slunce.

Byly uvedeny některé důvody, nasvědčující tomu, že rozptýlená hmota v protoplanetárním oblaku se musela formovat a dále vyvíjet v přirozeném procesu vzniku a vývoje samého Slunce, které nemohlo obsáhnout celou rotační energii prvotní globule. Vyskytly se však i jiné názory na původ protoplanetárního oblaku. Tak např. O. J. Šmidt v SSSR a Edgeworth v Anglii vypracovali hypotézu, že protoplanetární mračno mohlo být zachyceno Sluncem v době jeho průchodu některou galaktickou plynoprachovou mlhovinou.

Je možno považovat za prokázané, že jednotlivé části mlhoviny mohou být za určitých okolností zabrzděny a zachyceny Sluncem, ale je značně nepravděpodobné uvažovat o zachycení rozsáhlé mlhoviny, jejíž hmota, srovnatelná s hmotou Slunce a při obvyklé hustotě 10^{-24} g/cm³, by musela na vzdálenost 500 parseků tvořit kolem Slunce oblak o průměru 36', což převyšuje zdánlivý průměr Měsíce. Kromě toho zachycení takového oblaku při jediném průchodu nedostačuje, je třeba i jeho značné kondensace, takové, která je charakteristická pro protoplanetární oblak těsně před vznikem planet. Předpokládaná hustota protoplanetárního oblaku může být určena podmínkou, že se jeho minimální hmota rovná celkové hmotě všech existujících planet a že jeho objem odpovídá elipsoidu rotace a rozměru, který odpovídá dráze Plutona, a jehož poměr polární ku rovníkové ose se rovná přibližně 0,001. V prostoru tohoto elipsoidu by se musely umístit současné planetární dráhy i při svých sklonech vzhledem k dráze Jupitera. Hustota tohoto oblaku nemůže být konstantní; musí se měnit se vzdáleností od Slunce. Jestliže předpokládáme, že této hustoty ubývá podle Rocheova kritéria, tj. nepřímo úměrně s třetí mocninou vzdálenosti, znamená to, že ve vzdálenosti Země od Slunce dosahuje hustota řádu 10^{-8} g/cm³.

Přes možnou volnost při volbě různých předpokladů pro uvedené výpočty je zřejmé, že hustota protoplanetárního prostředí musí být řádově o mnoho větší než hustota normálních galaktických plynoprachových oblaků. Proces kondensace v chladnoucí a smršťující se globuli postupně probíhat mohl, nemohl však probíhat v okolí žhavé hvězdy, která jistým způsobem zachytila část okolní hmoty. Kromě toho je ještě nutno přihlídnout k tomu, že průchody Slunce mračny mezihvězdné hmoty jsou ve skutečnosti dosti obvyklým zjevem.

Jak je známo, střední vzdálenosti mezi galaktickými mlhovinami jsou asi 50 parseků. Slunce, pohybující se pekuliární rychlostí 20 km/sec, může proletět vzdálenost mezi těmito mlhovinami za pouhých 2,5 miliónů let. Tento časový interval je celkem nicotný ve srovnání se stářím sluneční soustavy. A i kdyby při některém z četných průchodů Slunce galaktickými mlhovinami došlo k zachycení části oblaku, při dalším z průchodů by Slunce tuto zachycenou hmotu opět ztratilo vlivem vzájemného působení obou oblaků. Pro srovnání uvádíme, že při srážce galaxií dochází k naprosté ztrátě difusní mezihvězdné hmoty, i když se u hvězd samých porušení rovnováhy prakticky neprojevuje. Vzhledem ke všem uvedeným příčinám nelze předpokládat, že protoplanetární oblak mohl být zachycen z okolního prostředí. To je však pouze nepřímý důkaz ve prospěch hypotézy, že protoplanetární oblak se mohl vytvořit pouze v procesu vzniku samého Slunce a současně s ním.

A tak máme právo vycházet z předpokladu, že počáteční hmotné prostředí, ze kterého vznikly dnešní planety, tvořilo více nebo méně zhuštěný disk s hustotou o mnoho řádů vyšší než normální plynoprachové mlhoviny, a že ve středu tohoto disku bylo centrální zhuštění — budoucí Slunce — bez zdrojů jaderné energie a tudíž i nízké teploty. Centrální jádro, stejně jako ostatní část protoplanetárního oblaku, se dále smršťovalo a zvětšovalo svoji hustotu. Jak mohly vzniknout z tohoto oblaku planety?

Je třeba poznamenat, že protoplanetární oblak byl vždy v plynném stavu s nevelkou příměsí pevných částic. To vyplývá nepochybně ze skutečnosti, že velké planety naší sluneční soustavy, zejména Jupiter, jsou složeny v podstatě z lehkých plynů, které v podmínkách protoplanetárního oblaku nemohy přejít do pevného skupenství, např. zmrznutím na prachových částicích. Jak ukazují souhlasná zjištění Browna, Ramseye, Fesenkova a Masevičové, skládá se Jupiter z 80% z vodíku, z 15% z helia a jen 5% tvoří těžší prvky. Množství vodíku, které vstupuje do různých molekulárních sloučenin, je vždy menší ve srovnání s těžšími prvky. Je zřejmé, že minimální teplota protoplanetárního oblaku, nezávisle na stavu centrálního jádra, nemohla být nižší než nejmenší teplota, se kterou se vůbec v naší Galaxii setkáváme. A mimo hranice Galaxie studovat naši sluneční soustavu nemůžeme. Jak je známo, tato nejmenší teplota není nižší než 20—30 °K, což značně převyšuje bod tuhnutí vodíku a zejména helia.

V takovém případě není možné pochybovat, že vznik planet podobných Jupiteru nemohl proběhnout jakýmkoli spojováním jednotlivých pevných částic při jejich nepružných srážkách. Tyto planety musely vzniknout v procesu v mnohém podobném vzniku hvězd, tj. další kondensací zhuštěnin hmoty, které však se vyvíjely ve značně hustším prostředí v poměrně nevelké vzdálenosti od středu přitažlivosti, centrálního jádra — budoucího Slunce. Slapové síly Slunce zde byly o mnoho větší než síly galaktického středu a podmínky rovnováhy pro planetární kondensace byly proto značně nepříznivější.

Použijeme-li Rocheova kritéria pro sluneční soustavu, vidíme, že kritická hustota na dráze Země, při níž se náhodně vytvořivší zhuštěniny hmoty mohou dále vyvíjet, tzn. zůstat v rovnováze vzhledem k rozkladným slapovým silám Slunce, musí dosáhnout hodnoty nejméně 10^{-8} g/cm³, což o jeden až dva řády převyšuje náš dřívější odhad, založený na celkové hmotě planet, známé v současném době. Kromě toho je přirozené předpokládat, že nejdříve vznikly vzdálenější planety, pro něž bylo splnění podmínek rovnováhy nejpříznivější. Z tohoto důvodu je rovněž možné stanovit i zákon vzdáleností planet. Je

nutno pouze vycházet z toho, že při rozmístění planet musel být dodržen princip „nejmenšího odporu“, protože nejen Slunce, ale i sousední již dříve vzniklá planeta mohla působit na nově se tvořící planetu slapovými silami a narušovat její stabilitu.

Je zajímavé, že tento proces vzniku planet, analogický procesu vzniku hvězd, avšak probíhající v daleko nepříznivějších podmínkách — v blízkosti bouřlivě se vyvíjejícího hvězdného tělesa, Slunce — vyžaduje, aby počáteční hmoty planet byly značně větší než jaké jsou hmoty planet v současné době.

Zastavme se na chvíli u této hypotézy:

1. Slapové působení mezi planetami, nezbytné pro vysvětlení známého zákona jejich vzdálenosti od Slunce, vyžaduje, aby hmoty planet v době vzniku byly značně větší než hmoty současné. Zvláště je to nutné předpokládat u planet typu Země, jejichž hmoty jsou v současné době celkem nepatrné. A právě pro tyto planety je nutný zvláštní rozbor celého problému.

2. Již dříve bylo ukázáno, že celková hustota protoplanetárního oblaku musí být přibližně o jeden až dva řády vyšší, než jakou by nám dala celková hmota všech planet sluneční soustavy. Odtud vyplývá, že hned po vzniku planet musela značná část hmoty protoplanetárního oblaku i samých planet, jak se lze domnívat, uniknout do okolního prostoru.

3. Současný stav velkých planet zřetelně závisí na jejich hmotě. Jak je známo, větší planety se odlišují i větším množstvím vodíku. Např. Jupiter, jak již bylo dříve uvedeno, se z velké části skládá z vodíku, zatím co Uran s daleko menší hmotou, ačkoli je vzdálenější, se liší převahou helia ve své atmosféře a poměrné množství vodíku je u něho daleko menší.

4. Dissipace (únik) hmoty planet v protoplanetárním stadiu vývoje souhlasí rovněž s představou o makroprocesu jejich vzniku, kdy chybí vnitřní zdroje energie. V důsledku dostatečně rychlé přeměny energie potenciální v kinetickou, tj. v molekulární pohyb, zvyšuje se značně teplota planet podle známých zákonů termodynamiky. Např., při vzniku plynné koule, skládající se z jednoatomových částic, připadá polovina přeměněné energie na zahřívání; to by pro případ Jupitera představovalo teplotu až 50.000° . Zvýšení teploty planety značně zvyšuje únik jejích povrchových vrstev.

Existují určitě nepřímé důkazy o dissipaci i u hmot planet typu Země. Takovým nepřímým důkazem dissipace hmoty naší Země od dob jejího vzniku je zejména existence její družice — Měsíce.

Je možno vycházet ze všeobecně platného názoru, že Měsíc byl ve své dávné minulosti daleko blíže naší Zemi než v současné době, nikdy s ní však netvořil jedno těleso. Vzdálenost a oběžný rotační moment našeho Měsíce se i nyní zvětšuje vlivem slapového tření. Na základě toho můžeme předpokládat, že Země vznikla současně s Měsícem jako jakási dvojplaneta, a v tomto smyslu je zajímavou anomálií ve sluneční soustavě. Je zde možno připustit domněnku, že vznik takové dvojplanety probíhal v důsledku týchž dynamických příčin, které podmiňují i vznik dvojhvězd. Dvojhvězdy, jak bylo výše uvedeno, vznikají ze dvou blízkých středů kondensace, jako důsledek toho, že jejich celkový rotační moment nemůže pro splnění podmínek rovnováhy být vázán na jednu jedinou hmotu hvězdného charakteru.

Ukazuje se jako přirozený předpoklad, že příčinou existence Měsíce jako odděleného samostatného tělesa byla také potřeba zbavit hmotu vznikající Země přebytečného rotačního momentu a tím zajistit její stabilitu. Avšak

v takovém případě je nutné předpokládat, že rotační moment systému Země—Měsíc byl v minulosti mnohem větší než v současné době. Dnešní hodnota rotačního momentu není opravdu překážkou spojení obou těles v jedno stabilní těleso. Kdyby se hmota Měsíce s celou zásobou svého rotačního momentu, především oběžného, spojila s hmotou Země v jedno těleso, zkrátila by se doba rotace naší planety na 4,4 hodiny, tzn. asi pětkrát. Mezní doba rotace, při které se již porušuje rovnováha, je přibližně 1,3 hodiny. Z toho vyplývá, že počáteční rotační moment Země musel být nesrovnatelně větší než je dnes. A úbytek rotačního momentu samozřejmě není možný bez odpovídajícího úbytku hmoty.

Jiným důkazem dissipace hmoty Země je složení její atmosféry, a to zejména přítomnost těžkých inertních plynů, jako kryptonu a xenonu, které v ní musely zůstat z prvotního plynného oblaku. Nelze přirozeně pochybovat, že současná atmosféra je druhotného původu a že z prvotní atmosféry zůstaly pouze nepatrné zbytky, zastoupené především inertními plyny. Je však těžké si představit, že by tyto plyny mohly dissipovat i při vysoké teplotě zemského povrchu, kterou také můžeme těžko předpokládat. Spíše je pravděpodobnější předpokládat, že byly strženy daleko lehčími, ale o mnoho hojnějšími plyny, jako vodíkem a heliem, které na počátku existence Země tvořily hlavní část její prvotní atmosféry. Je také možné, že tento proces dissipace v hranicích vnitřní části protoplanetární mlhoviny začal ještě dříve než tvoření planet, takže Země nedostala již dostatečné množství těchto prvků, v podstatě nevstupujících do chemických sloučenin.

Vznik planet zemského typu je v důsledku nutných neurčitostí ve vztahu vývoje Slunce a obklopujícího je plynoprachového oblaku těžko řešitelným problémem. Není vyloučena možnost, že v době vzniku těchto planet vývoj centrálního jádra dospěl už tak daleko, že se jádro fakticky změnilo ve svítilici hvězdu, jejíž záření bylo podporováno gravitační kondensací (další kontrakcí). Taková hvězda by musela zahřívat části protoplanetárního oblaku ve svém nejbližším okolí, což by vytvářelo další těžkosti pro kondensaci. Je možné, že do počáteční doby vzniku planet zemského typu se v protoplanetárním prostředí vytvořily již složité shluky, které postupně narůstaly následkem vzájemných srážek. V žádném případě nelze pochybovat o tom, že formování planet zemského typu bylo velmi složité a těžko by mohlo být znázorněno jakýmkoli jediným fyzikálním schématem.

Současné výzkumy meteoritů umožňují do určité míry osvětlit stadium vývoje sluneční soustavy ještě před vznikem planet. Struktura meteoritů ukazuje, že musely vzniknout uvnitř daleko větších těles, kde se mohla postupně vytvořit při nevelkém gradientu přitažlivé síly jejich krystalická struktura. O tom např. jasně svědčí Widmannstättenova struktura železných meteoritů. Meteority musely pak být náhle uvolněny v důsledku nějaké katastrofy, např. silným nárazem při srážce těles, jakými jsou asteroidy apod. Tomu nasvědčují často pozorované Neumannovy linie. Klasifikace železných meteoritů ukazuje, že taková tělesa, ze kterých vznikly meteority, nebyla pouze dvě, ale že jich bylo daleko větší množství. Palasity musely vzniknout v prostředí s nevelkým gradientem přitažlivé síly a s dostatečně velkou teplotou, která stačila k roztažení železito-niklové hubky, v jejichž pórech se nacházela méně tavitelná zrna olova. Tak zvané polymiktní brekciové meteority, skládající se ze složitého konglomerátu hranatých úlomků, musely být slisovány hned po procesu rozpadu, a to opět mohlo probíhat uvnitř největších těles asteroidních rozměrů.

To ukazuje, že procesy aglomerace s následujícím rozpadem probíhaly několikrát, v žádném případě pouze jednou.

Konečně chondrity — nejpočetnější třída meteoritů, charakteristická četnými chondrulemi, jen málo souvisejí s obklopujícím je prostředím soustavy, ve které se nalézají; zachycují v sobě předplanetární stav prvotní mlhoviny, obklopující Slunce. V současné době je těžké učinit závěr, zda tyto zvláštnosti meteoritů charakterisují pouze oblast asteroidů nebo také celou oblast, ve které probíhal vznik planet zemského typu. V každém případě, četná fakta, získaná prakticky v poslední době, umožňují přiblížit se správnému řešení problému planetární kosmologie.

Přeložili Dana Kohoutková a Luboš Kohoutek