

# Astrochemie

## Čeští vědci na lovu vesmírných molekul a iontů

Nejstarší ze všech vědeckých disciplín – astronomie – se během posledních desítek let proměnila tak, že by dávní řeční astronomové svou disciplínu rozhodně nepoznali. Jednou z relativně nových odnoží astronomické vědy je studium chemické struktury a chemických procesů, které probíhají v širém vesmíru. Čtenáře jistě potěší, že v tomto oboru – v astrochemii – čeští vědci rozhodně nezaspali.

» Mlhoviny jsou obrovským oblakem chladných plynů a prachu, v nichž probíhá řada chemických reakcí

# emie aneb

FOTO: NASA

## Sílicí levoboček astronomie

Řekne-li se astronomie, ozve se rovnou: fyzika. Rodokmen spojení těchto teoretických disciplín můžeme vystopovat až k řeckému polyhistorovi Aristotelovi a je třeba přiznat, že pevný sňatek astronomie s fyzikou vydržel až do dnešních časů. V 19. století se však astronomii narodil levoboček, který od té doby jen nabývá na síle: astrochemie.

Poznání chemických procesů v kosmu, z něhož bylo možno odvozovat další zákonitosti vedoucí třeba až ke vzniku života, je stále spíše na začátku a představuje proto dnes pro vědce velkou výzvu. Nemalou měrou přispěli k poznání chemie vesmíru i lovci molekul a iontů z Ústavu fyzikální chemie Jaroslava Heyrovského AV ČR v Praze, z laboratoře prof. RNDr. Svatopluka Civiše, CSc., za nímž se 21. STOLETÍ vydalo přímo na jeho pracoviště. Práce současných vědců je však pochopitelně stejně jako v jakémkoliv jiném oboru umožněna tím, že »stojí na ramenou obrů«, tedy vědeckých velikánů minulosti.

### Vše začíná u německého génia

Abychom dobře pochopili, oč se vlastně vědci v dnešních laboratořích snaží, je třeba začít trochou historie. K poznání složení vesmíru učinil nejzásadnější krok vědec, který pracoval již s podstatně vylepšenými optickými zařízeními (dokonce vlastní výroby!). Byl jím německý optik, fyzik a astronom Joseph von Fraunhofer (1787–1826).

Když tento německý génius zaměřil svůj dalekohled (opatřený tzv. difrakční mřížkou) na Slunce, ke svému překvapení zjistil, že svět-

lo, které prošlo čočkami, nebylo zcela spojité, jak jej popisovali klasici optiky Isaac Newton (1643–1727) či Christian Huygens (1629–1695). Při pozorování spektra, promítaného na stínítko pod mikroskopem, objevil Fraunhofer řadu předtím nepopsaných tmavých čar, ne silnějších než lidský vlas.

V roce 1824 měl již k dispozici přesné zaměření 574 předělů ve spektru, z nichž ty nejsilnější označil písmeny abecedy. Dnes jim všichni vědci říkají Fraunhoferovy čáry.

### 21. STOLETÍ dodává:

Čáry ve světelném spektru nepozoroval jako úplně první Fraunhofer. Toto prvenství je třeba přiznat slavnému britskému fyzikovi a chemikovi Williamovi Hyde Wollastonovi (1766–1828), který je pozoroval již o 12 let dříve. Wollastonovou smůlou nebylo to, že viděl čar pouze 7, ale to, že je příliš zbrkle a chybně interpretoval jako rozhraní mezi jednotlivými barvami. Jejich přesný popis proto přinesl vědeckou slávu až Fraunhoferovi.

### Nalezení prvních »otisků prstů«

Vysvětlení, co přesně vlastně ony »tajemné« čáry, připomínající například čárový kód ve

ILUSTRACE: DSPACE.CAM.AC.UK



» Jako první pozoroval linie ve slunečním spektru anglický chemik W. H. Wollaston

### JAK VYPADÁ MAXWELLOVA DUHA?

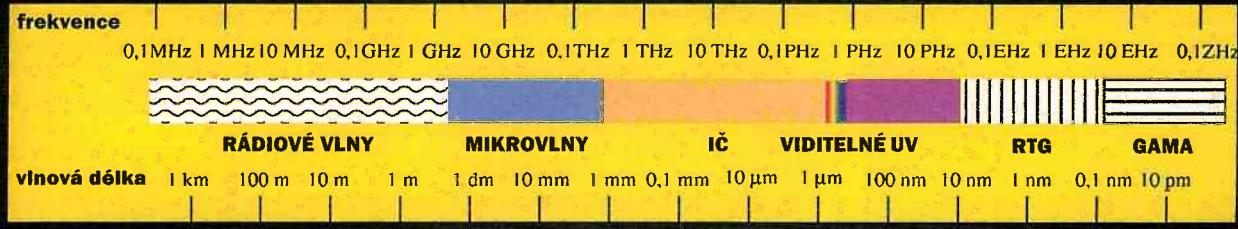
Elektromagnetická interakce se časoprostorem šíří jako vlna, její velikost však může být různá. Díky tomu můžeme mluvit o záření různých vlnových délek a podle toho také označovat jeho různé typy. Když si jednotlivé typy vyjádříme jako

spektrum, vznikne něco, čemu se na počest velkého skotského fyzika Jamese Clerca Maxwella (1831–1879) přezdívá také Maxwellova duha.

Na levém okraji spektra nalezneme záření o největších

vlnových délkách (od stovek metrů po stovky milimetrů), kterému se běžně říká rádiové vlny. Další »část duhy« v oblasti délky vln mezi 10 cm a 1 mm tvoří mikrovlny, využívané např. v mikrovlnné troubě. Následuje infračervené světlo (mezi 1 mm a 1 m) a poté vlny o délce mezi 800–400 nm, které jsou nám

všem neznámější. Tvoří totiž viditelné světlo (každé barvě opět náleží jisté rozmezí v délce vln). Energii, a tedy i vlnovou délku menší než viditelné světlo má pak ultrafialové záření (UV, 400–10 nm), rentgenové záření (10–0,1 nm) a nakonec vysokoenergetické gama záření, využívané např. v tzv. gama nožích. <<



ILUSTRACE: PHYSICS.KENYON.EDU

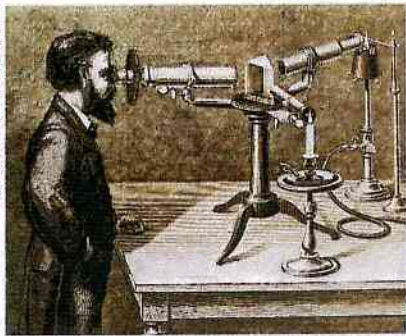
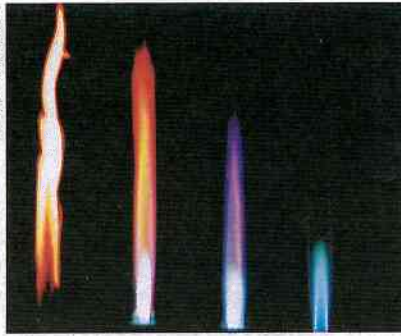


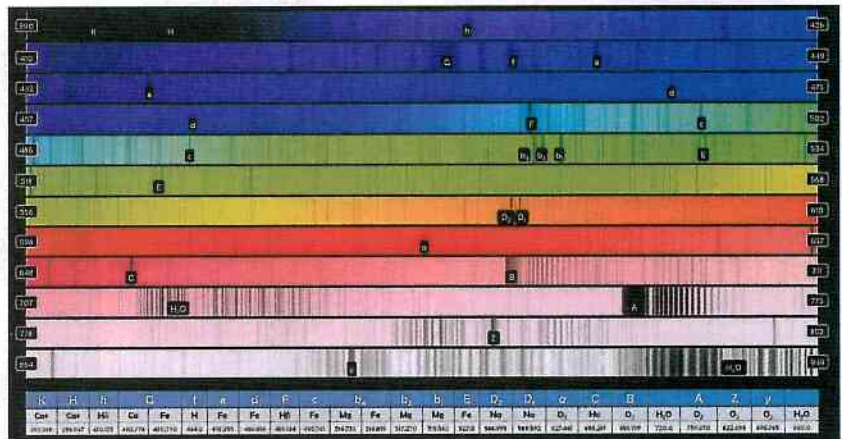
FOTO: WIKIMEDIA.ORG



» Trojramenný spektroskop byl v 19. století jedním ze základních nástrojů analytické chemie

spektru slunečního světla, znamenají, však čekalo na další velikány vědy. Až 30 let po původních Fraunhoferových pokusech s ním přišli další dva Němci: Gustav Robert Kirchhoff (1824–1887) a Robert Wilhelm Bunsen (1811–1899).

Jejich společný epochální objev vzešel z na první pohled nesouvisejících experimentů. Nejprve společně zapalovali jednotlivé tehdy známé prvky a měřili vlnovou délku světla, kterou plamen vydával. Pozoruhodná věc se přihodila, když Kirchhoff nechal skrze plamen kahanu sycený sodíkem procházet sluneční světlo. Tmavá čára (kterou Fraunhofer označil písmenem D) ještě více ztmavla. Pro Kirchhoffa šlo o jasný důkaz toho, že sodík »pozřel« sluneční světlo přesně v místě »čáry D«. Tuto čáru proto mohou vědci používat jako jednoznačný podpis či »otisk prstů«, jímž sodík vždy prozradí svou přítomnost.



SCHEMA: WIKIMEDIA.ORG

» Ve viditelné části spektra slunečního záření je patrna řada čar zvaných Fraunhoferovy čáry

Jak funguje »molekulární vysílačka«?

S postupujícím prohlubováním našich znalostí o fyzikálních zákonitostech, které vládou světu atomů a molekul, přišli vědci ještě s dalším způsobem, jak mohou molekuly prozradit svou přítomnost v kosmu. Tento druhý princip, který využívá takzvaného »emisního spektra«, bychom mohli nazvat »principem vysílačky«.

Logika je v podstatě obrácená, než je tomu u »principu síta«. Atomy či molekuly fungují přímo jako vysílačky záření, které mohou přístroje na Zemi přímo zachytit. Jak je to ale možné?

Vše funguje díky energii dodané z okolních hvězd. Když molekula zachytí energii vyzářenou z hvězdy, rázem vyskočí do tzv. excitovaného stavu. Ovšem v tom jí není příliš »dobře« a záhy se vrací zpět do stavu původního. (Odborníci přímo říkají, že molekula chce »relaxovat«.) Při návratu zpět však zase energii dodanou od hvězdy vyzáří zpět do kosmu. A právě toto záření dokážou dnes vědci zachytit, změřit a v řadě případů i přiřadit konkrétní látce.

Slunce a mraky v roll nepřítel

Takové vyzáření energie se projeví tak, že atom skutečně »zasvítí«. Vyzářený foton, tedy částice elektromagnetického záření, lze totiž popsat prostřednictvím frekvence a vlnové délky spadající do oblasti tzv. viditelného světla.

Na tento typ záření, který je v praxi jednou ze součástí tzv. »Maxwellovy duhy«, jsou vyladěny naše světločivné orgány (oči), a proto je nám přirozeně nejbližší. Pozorování v této části elektromagnetického spektra má však také řadu nevýhod.

První a nejvýznamnější z nich je to, že viditelné světlo má pro pozorovatele na Zemi dva významné »nepřátele«. Jsou jimi na jedné straně Slunce, na druhé straně vodní páry (»mraky«) a řada dalších plynů, které v nižších koncentracích putují atmosférou. Slunce totiž viditelné světlo z hvězd »přesvítí«, a pozorování jsou tedy možná pouze v noci. Pozorovatelé musejí mít ovšem také štěstí na oblohu bez mráčku – vodní páry viditelné světlo do značné míry absorbují.

ILUSTRACE U FOTO 21

PÓLY SKRYTÉ V MOLEKULÁCH

Jednou z nejlépe zmapovaných sloučenin, které se ve vesmíru vyskytují, je prajednoduchá sloučenina se vzorcem CO, tedy oxid uhelnatý (viz schéma). A proč mají vědci tak dobře zmapován výskyt právě této látky? Oxid uhelnatý (a pochopitelně i řadu jiných látek) lze totiž dobře odhalit pomocí rádiových vln. Tato molekula má totiž poměrně silný elektrický dipól.



Co přesně se za spojením slov elektrický dipól skrývá?

Pro názornost si představme tyčový magnet. Každý má dva

magnetické póly – severní a jižní. (Toho, že se naše Země chová jako obří magnet, využívá např. orientace prostřednictvím kompasu.) Trochu podobně jako magnet se vlastně chovají i molekuly – jen mají na obou pólech rozložen náboj elektrický (tedy kladný a záporný pól).

Molekuly s výrazněji nesymetrickým rozložením náboje nazývají vědci molekulami polárními, molekuly bez takového dipólového momentu jsou molekulami nepolárními. Molekuly s elektrickým dipólem je možné nalézt právě díky pozorování v oblasti rádiových vln a mikrovln.

Vůči těm, kterým dipól chybí (jako je např. velmi hojný iont vodíku H<sub>3</sub><sup>+</sup>), jsou však rádiové teleskopy zcela slepé, a je proto třeba je hledat v jiných částech spektra »Maxwellovy duhy«.

Síto z částic

Kirchhoff a Bunsen nevědomky objevili jeden ze dvou principů, které astronomové a astrochemici používají k pátrání po látkách ve vesmíru dodnes. Tento princip, který spočívá na pozorování tzv. »absorpčního spektra«, bychom mohli nazvat »principem síta«.

Představte si pro názornost následující situaci – na jedné straně máme zdroj záření (např. hvězdu), na druhé straně pak měřicí přístroje, které záření zaznamenávají.

Mezi zdrojem a měřicím přístrojem je však ještě něco dalšího, co si můžeme představit

právě jako síto. Tímto sítem může být prakticky cokoliv, co se nachází mezi oběma koncovými body, například mezihvězdná hmota. Atomy, molekuly či ionty, které se v mezihvězdné hmotě vyskytují, jakoby »pozřou« světlo z hvězdy a k nám už pustí jen »prosáté« světlo. Výsledek bychom mohli přirovnat ke stínům, které by na Zemi vrhalo síto postavené proti Slunci. Správné určení toho, jaká molekula stála světlu v cestě, je stejné jako s čarou »D« ve výše zmíněném případě se sodíkem. Stačí vědět, jakou část spektra daná látka pohltí.

### Další části »duhy«

K pozorování proto astronomové a astrochemici využívají i jiné části »Maxwellovy duhy«, které skvěle doplňují pozorování ve viditelném spektru. Pozorování v této části spektra má pro vědce i řadu dalších výhod, než je »jen« to, že nemusejí čekat na příhodné pozorovací podmínky.

„Pro astrochemická pozorování je mnohem výhodnější oblast mikrovln. Atmosféra Země je pro ně propustná 24 hodin denně,“ vysvětluje prof. Svatopluk Civiš, který současně přednáší astrochemii na Přírodovědecké fakultě UK v Praze. Výhodou oblasti mikrovln je také to, že vědci mohou jejich

Konečně poslední důležitou metodou sloužící k propátrávání kosmických dálav je tzv. rotačně-vibrační spektroskopie. „Tato metoda umožňuje odhalit příslušné molekuly v infračerveném spektru, a to tak, že registruje natahování a smršťování vazeb mezi atomy,“ popisuje podstatu této metody profesor Civiš.

### Hledání překladového slovníku

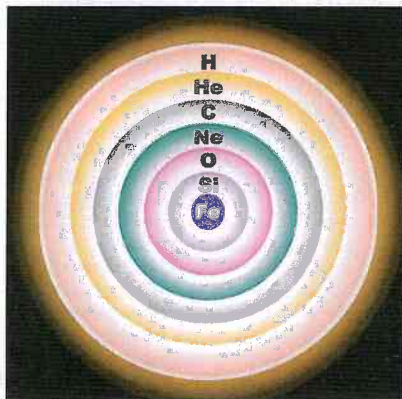
Správné určení toho, jaké látky patří pohlavně či naopak vyzářené světlo, není nijak snadnou záležitostí a stojí za ním obrovské množství práce celých generací vědců v laboratořích. Po pionýrských výzkumech



» Vodní páry v atmosféře pohlcují jisté oblasti »Maxwellovy duhy« a pro spektroskopickou astronomii a astrochemii tak představují nepříjemnou komplikaci

prostřednictvím registrovat tzv. »rotační spektrum« molekul. Každá molekula totiž ve volném prostoru rotuje ve třech dimenzích. Rotace se dá zachytit v oblasti rádiových vln a mikrovln a popsat kvantovými stavy.

SCHEM: UCLA.EDU



» Složení hvězdy je možné odhalit pomocí světla, které vydává

výše zmíněných německých velikánů se vědci totiž museli vrhnout na vytvoření toho, co bychom mohli nazvat »překladovým slovníkem«. Takový slovník se skládá z katalogu, který byl zatím z drtivé většiny vypracován v pozemských laboratořích.

Aby totiž mohli vědci nalézt atom, molekulu či iont ve vzdáleném vesmíru, musejí nejprve vědět, jak přesně na ně působí nejrůznější typy elektromagnetických vln.

Spektra látek je pak třeba nejen přesně změřit, ale také dokázat rozpoznat, o jaké látky jde. S takovými úkoly si poradí už jen velmi subtilní matematický aparát kvantové mechaniky. <

FOTO: ARCHIV S. CIVIŠE



» K zachycování záření z vesmíru slouží teleskopy, umístované často ve značných nadmořských výškách

ILUSTRACE: THERESIENTEARTH.COM

FOTO: WORDPRESS.COM



» Na zemský povrch dopadá elektromagnetické vlnění, vysílané z milionů nejrůznějších zdrojů

# My všichni jsme z hvězd...

Jedním z největších objevů fyziky 20. století bylo, že mezi fungováním vesmíru a fungováním živého světa existuje řada velmi důležitých analogií. Ano, živí tvorové jsou jistě podstatně složitější než jsou na neživá. I neživý svět však podobně jako ten živý prošel dějinami, na jejichž počátku stály formy jednoduché a na konci velmi komplexní.

**S**pektroskopické metody založené na pečlivé analýze záření, které přichází z kosmu, jsou naším hlavním zdrojem poznatků o tom, z čeho se vlastně vesmír skládá. Znáčná část těchto poznatků se týká »horké« astrofyziky a astrochemie, tedy částí studujících složení různých typů hvězd v různých oblastech a v jejich nejtěsnějším okolí.

Když se tyto poznatky vhodně zkombinují s tím, co o kosmu říkají modely fyziků, kteří spíše než v laboratorních pracujících u tabulí a obrazovek počítačů, začíná se vědcům odvíjet fantastický příběh evoluce vesmíru do slova před očima.

## Vesmír se buduje

Ty nejpodstatnější věci pro budoucnost se odehrály během první vteřiny. Během ní se vesmír rozepjal jako rychle nafouknutý balonek. Aby vše fungovalo tak, jak to známe dnes, muselo proběhnout několik zásadních dějů. Mezi ně patří vytvoření elementárních subatomárních částic, oddělení 4 základních sil přírody (silné a slabé interakce, elektromagnetismu a gravitace) či převládnutí hmoty nad antihmotou.

Došlo také k nastavení základních fyzikálních konstant, tedy jakýchsi základních pravidel hry, bez nichž by nikdy nemohl vzniknout řád, jež obdivují generace přírodovědců.

## První »součástky« chemie

Pro chemika, či ještě lépe astrochemika, jsou tím nejdůležitějším produktem raných stadií vesmíru (asi 3.–20. minuta po »velkém třesku«) první stabilní atomy.

## VELKÉ NEZNÁMÉ V PRVCÍCH

**T**ým profesora Civiše se v současné době věnuje rozšiřování poznatků i v oblasti »horké« astrofyziky a astrochemie. „I profesionálního chemika občas zarazí, že v poznacích o tak »známých« věcech, jako jsou vlastnosti atomů prvků, může existovat řada mezer,“ vysvětluje prof. Civiš. Tyto mezery jsou například v chování atomů, jejichž elektrony se nacházejí ve vysoce nabitěm, tzv. Rydbergově stavu. V takovém stavu lze atomy spatřit například ve slunečním spektru. Pozorování něčeho takového však rozhodně nejsou jednoduchá.



„Pro spektra těchto atomů v infračervené oblasti je naše atmosféra nepropustná, neboť je pohlcuje voda a oxid uhličitý. Proto dnes využíváme data, která poskytl kanadský satelit, který několik let měřil mimo jiné i sluneční spektrum. Naše laboratorní měření v infračervené oblasti spektra už vedla k identifikaci řady dosud neznámých spektrálních linií (čar) takto vybuzených atomů ve slunečním spektru,“ pochvaluje si profesor Civiš. <<

Na úplném počátku dokonce nelze ještě hovořit ani o atomech, ale spíše o jejich jádrech, v nichž se zkombinovaly protony a neutrony (tzv. primordiální nukleosyntéza). Podle současných poznatků se vesmír na svém úplném začátku zase až tak úplně nevytáhl – všeho všudy vyprodukoval jen 8 typů atomů.

K dispozici byl vodík ve všech třech izotopech (tedy kromě vodíku  $^1\text{H}$  ještě deuterium a tritium), dva izotopy helia  $^4\text{He}$  a  $^3\text{He}$ , a nakonec i něco málo kovů: lithium  $^6\text{Li}$  a berylium  $^7\text{Be}$  a  $^8\text{Be}$ .

>> Mlhoviny jsou velkou »porodnicí« hvězd. Hvězdy vznikají zhuštěním plynů a prachu díky gravitační interakci.

Tritium a oba izotopy berylia jsou navíc velmi nestabilní, takže se záhy rozpadly na některé z jednodušších a stabilnějších atomů. Po několika letech od svého prvopočátku tak vesmír obsahoval pouze 5 typů atomů.

## Balíčky energie plující samostatně vesmírem

S tak prostinkou sadou atomů by vesmír těžko doklopýtal nejen ke složitým živým tvorům, ale i řadě podstatně jednodušších reakcí, které neustále probíhají v mezihvězdném prostoru. K tomu »potřeboval« i další prvky, které dnes dokážeme tak krásně srovnat do Mendělejevovy tabulky. Tyto prvky se však musely nejprve »upéct« ve vesmírných pecích, jímž běžně říkáme hvězdy.

Abychom však nepředbíhali. Zatím máme vesmír naplněn jen obrovským množstvím těch nejjednodušších atomů, často spíše dokonce jen jejich jader. Každý z nich je však jakýmsi »balíčkem« energie, která do něj byla vložena díky »velkému třesku«. Některým z nich se již podařilo této energii zbavit a rozpadnout se na atom jednodušší a stabilnější. Stabilní atomy si však nesou energii dost na to, aby ji mohly investovat do další tvorby vesmíru. Jak tuto uloženou energii uvolnit?

## Klíček k atomové energii?

K tomu, aby se podařilo atomy »odemknout« a poslat jejich energii a částice dál do oběhu, je třeba ještě dalšího »kouzelného klíčku«. Tím je sice relativně slabě působící, pro následující dění ovšem nesmírně důležitá síla přírody – gravitace.

Gravitace (pochopitelně kromě mnohého dalšího) způsobila to, že se mračna tvořená izotopy vodíku a helia začala pomalu, ale jistě smršťovat. (Dlužno podotknout, že stále začínají. Tento proces, i když s již bohatší sadou »součástek«, probíhá na nejrůznějších částech vesmíru i v momentě, kdy čtete tyto řádky.)

rá se do okolí vyzáří v podobě tepla, nejrůznějších typů záření a proudů subatomárních částic. Tato energie se uvolňuje díky tomu, že se jádra lehčích prvků (vodík, deuterium, helium) spojí a vytvoří tak prvky těžší.

Energie, která se při těchto fúzích vyzáří, ještě více násobí už tak dost pekelné pod-

### »Drobky« po gigantických vesmírných explozích

K tomu, aby se syntéza prvků dokázala »přehoupnout« přes železo, je paradoxně třeba toho, aby hvězda »zemřela«.

Takový hvězdný výbuch je znám jako exploze supernovy. Jasně zářící supernovou se

ILUSTRAČE: NASA

» Exploze supernovy dodávají do koloběhu vesmíru prvky těžší, než je železo



Čím větší »kupa« atomů, tím větší má gravitaci a tím více dalších částic na sebe z okolního vesmíru nabaluje. Díky tomu ovšem v nitru koule, která se pomalu stává hvězdou, stále stoupá teplota a tlak.

Jednotlivé atomy a celá jádra se k sobě nakonec přiblíží natolik, že přitažlivá síla mezi nimi zvítězí nad odpuzováním dvou stejných pólů – jádra jsou totiž díky protonům všechna nabitá kladně. Souhra těchto extrémních podmínek vede nakonec k nastartování jednoho z nejdůležitějších procesů v kosmu – termojaderné fúze.

### Popel s číslem 26

Termonukleární fúze je skutečným motorem vesmíru. Na jedné straně uvolňuje energii, kte-

mínky v nitru hvězd a jádra již vzniklých prvků mohou fúzovat dále a dále. Tento proces má však jednoznačný strop.

Počet protonů v jádrech prvků, které dokáže hvězda takto »vyrobit«, se zastaví na čísle 26. Pod tímto číslem najedeme v Mendělejevově tabulce prvků železo. Železo je tedy jakýmsi »popelem« všech termonukleárních reakcí, které v nitru hvězd probíhají. Bedlivý čtenář si však jistě všiml dvou velkých problémů, které nyní vystávají. Kde se berou těžší prvky, tedy takové, které jsou v Mendělejevově tabulce až za železem? A jak se vlastně stane, že se prvky dostanou »do oběhu« tak, aby se mohly stát součástí např. našich vlastních těl?

vesmírné těleso stane buď tak, že zažehne rychlou termonukleární fúzi a vzplane. Takovou hvězdou však může být jen bílý trpaslík.

Druhá z možných cest ke vzniku supernovy vede přes »vyhoření«. Hvězdě dojde »palivo« pro fúzování a pod tíhou vlastní gravitace se zhroutí. Při těchto gigantických explozích panují tak extrémní podmínky, že stačí i k vytvoření podstatně hmotnějších prvků, než je železo (známy jsou i případy, kdy supernova takto »uvaří« i kalifornium s protonovým číslem 98!). Výbuch je pak všechny rozmetá do okolního vesmíru, kde pak další miliony let čekají, než je gravitace opět svede dohromady.

### Babičky, matky a dcery zabydlené na obloze

První vesmírné hvězdy mohly obsahovat jen těch několik prvků, které zde zůstaly po velkém třesku. Vesmír je však v prakticky neustálém pohybu a místo starších »továren« na nové prvky tak postupně zaujímají »továrny« nové.

„Naše Slunce je zástupcem již třetí generace hvězd. Jako takové obsahuje i řadu těžších prvků, jejichž přítomnost nám prozradí právě spektroskopické metody. Jako první přišel s tímto objevem vlastně již sám zakladatel spektroskopie Fraunhofer,“ poukazuje na dlouhou tradici své disciplíny Svatopluk Civiš.

Tyto prvky si Slunce přineslo z doby svého vlastního zrodu, kdy sbíralo materiál z popela vybuchlé supernovy. Z mezihvězdného prachu se nakonec vytvořil i protoplanetární disk, z něhož se zformovaly i planety včetně Země.

Bez velké nadsázky lze tedy říci, že nejen Země, ale i vše živé na ní, včetně nás samotných, je vlastně »vyrobeno z hvězd«.

## OBÁLKY HVĚZD: JEDINEČNÉ CHEMICKÉ LABORATOŘE

Hvězdy nejsou ve valně většině tvořeny ničím jiným než **vysoce energetizovanými atomy** či spíše jejich menšími stavebními díly. Po nějaké komplexnější chemii, která by zahrnovala tvorbu víceatomových molekul, ani vidu, ani slechu. Tedy – až na jednu výjimku. Tou sice není přímo hvězda, ale takzvaná »**obálka hvězdy**« (angl. *circumstellar envelope*). Tyto obálky **neobestírají zdaleka každou hvězdu** – vyskytují se pouze



v okolí hvězd z tzv. asymptotické větve obrů a červených veleobrů, bohatých na uhlík a kyslík.

Hvězdná obálka pak představuje prostředí uni-

kátní po fyzikální i chemické stránce. **Fyzikální jedinečnost** je dána velkými rozdíly (gradienty) teplot a tlaků v jednotlivých oblastech obálky a přítomností velkého množství záření. **Chemická**, která je na ni navazaná, spočívá ve výskytu ve vesmíru nebývalé velkého množství sloučenin. Chemickému světu zde vládou sloučeniny s relativně dlouhými uhlíkatými řetězci a prvky, jako je křemík, hořčík, sodík či hliník. <<

ILUSTRAČE: ROCHESTERLEDU