

Rodokmen atomů

Ve velmi raném vesmíru tvořilo hlavní složku světlo a záření vůbec. Z reliktního záření vyplývá, že na jeden proton či neutron tehdy připadalo 100 milionů až 20 miliard fotonů, elektronů nebo neutrin. K přelomu došlo asi při teplotě 3000 K, což je hranice mezi obdobím převládajícího záření a dnešním obdobím převládající látky. Většina tehdejší volné energie se uložila především do protonů a neutronů, souhrnně označovaných jako nukleony, tedy jaderné částice. Tenkrát byl vesmír asi tisíckrát menší než je dnes. Každá částice může vznikat ze záření pouze za určité teploty, která má přesně definovanou matematickou hodnotu, ověřitelnou v urychlovačích. Ta se označuje jako prahová teplota. Elementární částice, ale také atomy a molekuly mají podobný evoluční rodokmen, jaký je znám z vývoje rostlinných a živočišných druhů.

V něm se rozeznává zpravidla pět fází vývoje: 1. kvarková éra; 2. hadronová éra; 3. leptonová éra; 4. éra záření; 5. éra látky. Každá z těchto fází je charakterizována odpovídající teplotou, hustotou a časovým „okénkem“. Čím blíže k okamžiku velkého třesku, tím je vyšší teplota i hustota a časový interval je kratší.

Největší vzdálenost, kam si současná kosmologie troufá nahlédnout, je první mikrosekunda po velkém třesku. Tehdy byl vesmír tak žhavý a hustý, že nejmenší částice hmoty, kvarky a gluony, byly zcela volné a prudce se srážely se všemi částicemi v okolí. Jak již řečeno, tento stav hmoty je označován jako kvark-gluonové plazma. Mělo povahu kapaliny a bylo více než bilion stupňů Celsia horké. Každá částice se s vysokou energií srážela s částicemi jinými a vesmírná „kvarková polévka“ byla chaosem kvarků, gluonů, fotonů, elektronů, neutrin, dalších částic a jejich antičástic.

Ve kvarkové éře se formovaly nejen některé nejjednodušší částice, ale diferencovaly se především samy fyzikální síly. Všechny dnes známé formy základních fyzikálních interakcí (gravitace, silná či slabá jaderná interakce, elektromagnetická síla) tvořily na počátku jakousi výchozí, nediferencovanou supersílu, z níž se teprve postupem času vynořovaly dnes známé formy fyzikálních interakcí. Nejprve se od ostatních nediferencovaných sil oddělila gravitace, a to v čase asi 10^{-43} sekundy. Vznik silné jaderné interakce se datuje do času 10^{-33} sekundy po velkém třesku a oddělení slabé jaderné a elektromagnetické síly se předpokládá v čase 10^{-10} sekundy. V tomto čase se také kvarky začaly stabilně formovat do protonů a neutronů a vývoj vstoupil do hadronové éry. Až do tohoto okamžiku neprobíhala ani tak evoluce látky, jako především zrod základních fyzikálních sil.

Teorie, které se snaží popsat vznik fyzikálních interakcí, nebylo dosud možné v pozemských laboratořích ověřit. Proto mají zatím charakter hypotéz. Označují se jako teorie GUT (Grand Unified Theories – teorie velkého sjednocení).

Čas 10^{-43} sekundy, kdy došlo k oddělení gravitace od ostatních zatím nediferencovaných sil, je označován jako Planckův čas. Do té doby byl ve vesmíru jediný typ interakce, univerzální pro všechny tehdy existující elementární částice. Po tomto okamžiku už zde místo jediné univerzální síly byly dvě: gravitační interakce a síla zbývající, zatím nediferencovaná, která se později vyvinula v silnou a slabou jadernou sílu a v sílu elektromagnetickou.

V Planckově čase byl pohyb kvarků a dalších částic tak bouřlivý, že žádná silná, slabá, elektromagnetická ani gravitační síla je nemohly udržet pohromadě. Ovšem s tím, jak se chaotický pohyb postupně zmenšoval a vesmír začal chladnout, částice se mohly shlukovat a přiřazovat a interakce mezi nimi se mohly specifikovat. Na výši celkové teploty je proto závislý i druh částic, které při takové „prahové teplotě“ mohly vzniknout. V raném vesmíru bylo mnoho takových částic, jejichž prahová hodnota je vyšší než 10^{11} K. Kromě kvarků, antikvarků a gluonů to jsou především elektrony a jejich antičástice – pozitrony, a částice s nulovou klidovou hmotností, jako jsou fotony, neutrino a antineutrino.

Po dalším ochlazení již začala působit silná jaderná interakce mezi kvarky, ty se začínaly sdružovat po dvou či po třech, vytvářely se z nich protony a neutrony i další, vzácnější jaderné částice, všechny označo-

vané jako hadrony. Proto se také mluví o hadronové éře. Při poklesu teploty asi na 10^{13} K se intenzita chaotických interakcí snížila natolik, že kvarky se již jako samostatné částice nedokázaly udržet. Vždy ze tří kvarků se začaly vytvářet stabilnější struktury, především protony a neutrony. Z antikvarků se tvořily antiprotony a antineutrony. V důsledku počátečních fluktuací se v celém vesmíru nahromadilo nepatrně více kvarků než antikvarků a více neutronů než antineutronů. Proto bylo v další vývojové fázi také nepatrně více protonů než antiprotonů a více neutronů než jejich antičástic. Na 100 000 001 protonů připadalo 100 000 000 antiprotonů. Nejinak tomu bylo s neutrony a jejich antičásticemi. Po vzájemném spárování vždy jeden proton či neutron přebýval. Fluktuace v četnosti kvarků a antikvarků tak pokračovala v asymetrii mezi protony a jejich antičásticemi, tak jako mezi neutrony a antineutrony. Asymetrii mezi částicemi a antičásticemi lze pozorovat i v laboratorních podmínkách. Tato fluktuace měla nedozírný význam. Rozhodla o vzniku hmoty v té podobě, jak ji všude ve vesmíru známe. Jiné alternativy byly tehdy odmítnuty.

Jakmile teplota poklesla na 10 bilionů kelvinů (10^{13} K), protony párově anihlovaly s antiprotony za vzniku nesmírného množství energie v podobě fotonů. Podobně tomu bylo s anihilací neutronů a jejich antičástic. Přežily jen ty osiřelé protony a neutrony, na které již jejich antičástice nezbyly.

Do teploty asi pěti miliard kelvinů ($5 \cdot 10^9$ K) prošel raný vesmír fází, která je označována jako éra leptonová. Pro ni je charakteristická aktivita lehkých částic (leptonů). Nejrychlejší a nejpočetnější z nich byly opačně nabitě lehké částice typu elektron – pozitron. Připomeňme si, že elektron je lehká záporně nabitá částice, která tvoří vnější slupky všech atomů a molekul a která způsobuje průtok elektrického proudu. Pozitron je lehká částice o stejné hmotnosti jako elektron, ale má opačný, kladný elektrický náboj. Je tedy antičásticí elektronu. V dnešním světě jsou pozitrony velice vzácné. Vyskytují se v některých typech radioaktivního rozpadu, v kosmickém záření, při výbuchu supernov a lze je též vyrobit v urychlovačích. V raném vesmíru však byl počet elektronů a pozitronů vyrovnaný. Kromě elektronů a pozitronů existovaly v raném vesmíru lehké částice – neutrino. Jsou to nejzáhadnější částice plné překvapení, s téměř nulovou klidovou hmotností a s nulovým elektrickým nábojem. Neutrino reagují tak slabě, že v našich tělech vůbec nezanechávají stopy, třebaže jimi každou sekundu prochází asi

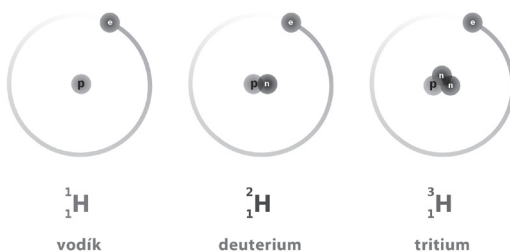
10^{12} neutrín, pocházejících ze Slunce. Spolu s nimi byl vesmír vyplněn fotony všeho druhu, tedy světlem a dalším zářením různého kmitočtu. Všechny tyto částice – elektrony, pozitrony, neutrina a fotony – v prvních fázích vývoje vesmíru neustále vznikaly a vzápětí opět zanikaly. Kosmologie hovoří o procesech kreace a anihilace.

Tento chaotický zrod a zánik lehkých částic se v leptonové éře změnil. Elektrony a pozitrony začaly při teplotě 5.10^9 K vzájemně anihilovat. Měnily se na záření gama, které se na dlouhou dobu stalo hlavní složkou této vývojové fáze vesmíru. Podnětem k anihilaci byla klesající teplota, při níž se elektrony a pozitrony vzájemně ničily rychleji, než stačilo vznikat z fotonů záření. Průměrná hustota hmoty v této fázi poklesla asi na hustotu dnešního stříbra. Záření mělo tehdy ve vesmíru hlavní slovo. Proto je tato vývojová fáze kosmu označována jako éra záření.

Vlivem neustále klesající teploty vesmíru se začaly spojovat protony s neutrony a vytvářely jádra deuteria, těžkého vodíku, jež se, jak bylo řečeno v předcházející kapitole, skládají z jednoho kladně nabitého protonu a z jednoho elektricky neutrálního neutronu. Deuterium se při teplotách nižších než 1 miliarda kelvinů nerozpadá. Intenzivní náhodné srážky deuteria s okolními protony či neutrony vedly ke vzniku ještě těžších jader – především velmi těžkého vodíku (tritia), obsahujícího dva neutrony a jeden proton – nebo jader lehkého helia (tralphia) se dvěma protony a jedním neutronem. Tato složitější jádra, stejně jako jádra deuteria jsou však dosti nestálá a snadno se znovu rozpadají na protony a neutrony. Nejvyšší stabilitu v této fázi projevují jádra normálního helia, složená ze dvou protonů a dvou neutronů.

Ta vznikají srážkou tritia či tralphia s dalším nukleonem. V počátečních fázích atomová jádra vznikat nemohla, protože každý pokus o spojení protonu a neutronu končil nezdarem. Za vysokých teplot je následné srážky s částicemi od sebe opět odtrhly.

Při teplotě miliardy kelvinů, která je dnes dosahována uvnitř nejžhavějších hvězd, nemají už protony a neutrony dostatek energie, aby



Atomové schéma izotopů vodíku

mohly uniknout přitažlivosti silné jaderné interakce. Jádra lehkých prvků, helia a vodíku, si tedy ve své struktuře uchovávají vzpomínku na svou prahovou teplotu a na vývojovou fázi vesmíru, která je zrodila. Vesmír byl na konci této fáze tvořen jaderným materiálem, v němž bylo asi 73 % jader vodíku (převážně deuteria), 23 % jader helia a přibližně stejné množství elektronů. Zbytek tvořila jádra lithia a berylia. Jádra těžších prvků se v této fázi vytvořit nemohla, neboť za daných vysokých teplot by nebyla stabilní.

Zrodem normálního helia o dvou protonech a dvou neutronech se završuje vesmírná etapa nukleosyntézy. Hustota vesmíru v této fázi odpovídala přibližně hustotě dnešní vody. Výsledkem této syntetické fáze byl nejen čtvrtinový podíl jader helia na veškeré látce ve vesmíru, ale také vysoké zastoupení jader vodíku. Na syntetizovaná jádra a na volné protony a neutrony připadal ovšem obrovský počet fotonů, jak to vyplývá ze změřené teploty současného reliktního záření.

V období mezi 5.10^9 K a 3000 K měla ještě většina energie ve vesmíru formu záření, a nikoliv látky. Na každý stovební kámen atomu připadalo asi 10 miliard fotonů. Tak jak se protony a neutrony postupně sdružovaly a kombinovaly do jader lehkých prvků, přecházel vesmír z fáze převažujícího záření do fáze převládající látky. Za hranici mezi érou záření a dnešní érou látky je považována vesmírná teplota 4 000 kelvinů. Od té doby se látka ve vesmíru vyvíjí odděleně od elektromagnetického záření, protože ke srážkám částic s fotony téměř přestalo docházet. Vesmír se stával pro záření průhledným a rozsvítil se.

Až do té doby se látka ve vesmíru vyskytovala ve skupenství plazmatu, plného volných elektronů a iontů. Ve stavu plazmatu byl kosmos neprůhledný, neboť elektromagnetické záření včetně světla nemůže plazmatem pronikat příliš daleko, aniž dochází k interakcím. Od té doby, co se zrodily elektricky neutrální atomy, ovlivňuje světlo chování látky jen velmi málo. V éře látky začalo docházet k rekombinaci atomových jader s elektrony a k vytváření atomů, struktur nám známých ze školy. Volné elektrony se přiřazovaly k volným atomovým jádrům a vytvářely atomy vodíku a helia. Teprve v této éře mohla slabá síla překonávat tlak látky a záření a elektrony se mohly zachycovat na orbitalech kolem atomových jader. V té době uplynulo od velkého třesku v našich dnešních mírách více než 300 000 let. Vymizel převažující tlak záření a ke slovu se dostávaly gravitační síly. Pod jejich vlivem se látka začala formovat do shluků a mračen, z nichž později vznikaly hvězdy a galaxie.

Pro posloupnost jednotlivých fází kosmogeneze byla určujícím faktorem klesající teplota od doby velkého třesku. Bylo tomu podobně, jako když z ochlazeného mračka začne pršet nebo když při poklesu teploty pod nulu se voda z kapalného skupenství začne měnit v led. Docházelo k náhlým fázovým přechodům, po nichž vesmír dočasně „zamrzl“. Jeho vývoj neprobíhal rovnoměrně, ale v náhlých skocích. Z počáteční singularity vesmír explodoval nadsvětelnou rychlostí. Tento okamžik exponenciálního „nafouknutí“ označují kosmologové jako inflační rozpínání a kladou je mezi 10^{32} K až 10^{27} K. Po exponenciální fázi se začal vesmír ochlazovat a rozpínání se zpomalilo na současnou rychlost. Ovšem před sebou měl kosmos ještě řadu dalších fázových přechodů, z nich jsme se zmínili především o kvarkové éře, hadronové éře, leptonové éře, éře záření a éře látky.

Po období dlouhých latencí (stází), kdy docházelo jen k plynulému chladnutí a rozpínání, přicházely krátké a bouřlivé okamžiky, v nichž se realizovaly zásadní změny. Vynořovaly se nové a nové vlastnosti hmoty, které s dřívější vývojovou fází spojeny nebyly. Je to zákonitost, s níž se budeme znovu a znovu setkávat na dalších stupních evoluce.

I hvězdy mají své osudy

Nejstarší hvězdy vznikaly z velkých protogalaktických oblaků z kondenzovaného plynu. V mračkách vodíku a helia se pod tlakem záření objevovaly fluktuace, nestabilní ostrůvky rozdílně zhuštěné látky. Působením gravitace se nakupená hmota smršťovala a zahřívala. Posléze dosáhlo těleso takové hmotnosti, že gravitací způsobený tlak v jeho středu rozpoutal termonukleární reakci. Mezihvězdná hmota, z níž se první hvězdy zformovaly, obsahovala především vodík a helium s malou příměsí deuteria a lithia. Vodík nemůže vzniknout ve hvězdách. Je to primární palivo, které dodává hvězdám zdroj energie a je podmínkou jejich vzniku a existence. Nejstarší hvězdy obsahují dodnes okolo 23 % helia, právě takové množství, které bylo ve vesmíru před vznikem hvězd.

V průběhu jaderné reakce uvnitř hvězd se atomy vodíku spojují a vytvářejí atomy helia. Vodík je palivem, helium popelem, alespoň v této první fázi. Přebytek energie, vyprodukovaný termonukleární reakcí, je z povrchu hvězdy vyzařován jako teplo a světlo. Vnitřní tlak, vznikající jadernou syntézou, vyrovnává působení gravitačních sil a zabraňuje

gravitačnímu kolapsu hvězdy. Stabilitu hvězdy udržuje zpětná vazba: kdykoliv gravitační síla stoupne, zvýší se tlak uvnitř hvězdy a jaderné reakce začnou probíhat bouřlivěji. Produkované teplo a světlo vytlačují látku ze středu hvězdy. Vnitřní rovnováha hvězdy je tak obnovena a udržována. Život hvězdy probíhá mezi termojadernou výhni a gravitací.

Rychlost jaderné reakce v nitru hvězd závisí na jejich velikosti. Hvězdy mnohokrát hmotnější než Slunce spotřebovávají vodík mnohonásobně rychleji, a jsou proto jasnější. Musejí čelit gravitačnímu kolapsu bouřlivější termonukleární syntézou. Hvězdy, které využívají přeměny vodíku na helium, jsou velmi stabilní a dlouhověké. Nazývají se hvězdy hlavní posloupnosti. Helium je ještě stabilnější než vodík a jeho jádra vyhledávají stav s nejvyšší možnou stabilitou.

Při stoupajících teplotách v nitru hvězd dochází ke slučování dalších jader. Těžší heliová jádra, vzniklá přeměnou vodíku, klesají vlivem gravitace do nitra hvězdy, kde se dále zahřívají. Při teplotách přesahujících 100 milionů kelvinů se stanou nukleárním palivem druhé generace. Dochází k takzvané Salpeterově reakci, při níž se tři jádra helia (o dvou protonech) navzájem spojují v jedno jádro uhlíku o šesti protonech. Tato jaderná reakce, která probíhá v nitru hvězd, je zdrojem prakticky veškerého uhlíku ve vesmíru, klíčového biologického prvku. Většina uhlíku vznikla jadernou syntézou v poměrně malých hvězdách – pouze několikrát větších než Slunce – s krátkou životností.

Tím však jaderná alchymie nekončí. Kromě uhlíku vzniká podobným procesem i kyslík, prvek s osmi protony v jádře. Čtvrté heliové jádro se spojí s již vzniklým uhlíkem a vytvoří se jádro kyslíku. Protože kyslíková jádra jsou těžší než jádra ostatních prvků ve žhnoucí hvězdě, klesají do jejího středu a vytvářejí tam nejtěžší pecku. Při teplotě téměř jedné miliardy kelvinů se začne termonukleární reakcí měnit uhlík na kyslík. Když palivo v jádře takové hvězdy vyhořelo, podobá se hvězda obrovské cibuli složené z kyslíkového středu, střední uhlíkové vrstvy a z povrchové vrstvy helia a vodíku. Přetavováním helia na uhlík a kyslík se však už tolik energie nezíská a dohořívající hvězda se dostane do krizového stavu. Takový osud čeká i naše Slunce.

Další osudy hvězd tohoto typu závisejí na jejich hmotnosti. Hvězdy řádově velikosti Slunce se začnou rozpínat v důsledku stále stoupajícího vnitřního tlaku. Jak hvězda roste, její povrch se stále více ochlazuje. Taková chladná obrovská hvězda se v astronomii označuje jako „červený obr“. Červeným obrem se podle předpovědi astronomů má na

přechodnou dobu stát i Slunce. Za největšího rozpětí při pohledu ze Země zaplní polovinu oblohy. Vnější vrstvy Slunce pohltní Merkur i Venuši a veškerý život na Zemi bude dávno minulostí.

Červený obr se posléze ochladí tak silně, že se hvězda začne opět smršťovat. Vnitřní teplota však už nedosáhne takové výše, aby znovu zapálila termonukleární oheň z těžších prvků. Výsledkem tohoto procesu bude hvězda asi o průměru naší Země, označovaná jako „bílý trpaslík“. Bílí trpaslíci jsou přestárlé hvězdy a představují nejobvyklejší stadium hvězdného vývoje. Mívají v průměru několik tisíc kilometrů a jejich hustota je fantastická. Předchozí ionizace hvězdného plazmatu zbavila atomy iontových obalů. Pod nesmírným tlakem se atomová jádra mohou navzájem dotýkat. Pro názornost se můžeme vrátit k našemu podobenství misky s pomerančí a tenisovými míčky, kolem níž ve vzdálenosti stovek metrů bzučí banánové mušky – elektrony. Představme si, kolik našich „misek“ – natěsnaných protonů a neutronů – by se vešlo do prostoru mezi jádrem a drahami „mušek“, které v panice odletěly. Hmotnost uvnitř bílých trpaslíků činí několik tisíc tun na krychlový centimetr. Bílí trpaslíci vysílají záření díky nahromaděnému teple, a nikoliv v důsledku termonukleární reakce. Nadále však setrvávají jako potenciální termonukleární bomby, neboť si uchovávají nevyhořelé termonukleární palivo. To může explodovat teprve po přísunu dodatečné hmoty z druhé hvězdy binárního systému.

Veliké hvězdy, o více než osminásobné hmotnosti Slunce, mají trochu odlišnou životní dráhu. Při pokračujícím gravitačním smršťování a dalším vzestupu teplot začne probíhat termonukleární reakce uhlíku a kyslíku, které se mění na ještě těžší prvky: neon, hořčík, křemík a síru. Obdobné procesy v těch největších hvězdách končí tvorbou argonu, vápníku, titanu, vanadu, chromu, manganu, kobaltu, niklu a železa. Také tyto prvky jsou uvnitř hvězdy uspořádány podle své hmotnosti jako slupky cibule. Jádro takové „cibule“ je železné, protože slučováním atomů železa, ani jejich rozbitím již nelze získat žádnou energii. Železo je konečným „popelcem“ termojaderných syntéz. energii lze získat slučováním lehčích jader až po železo nebo rozbíjením těžších jader až k železu. Železo má ze všech prvků vůbec nejpevněji vázané jádro.

Konec je dramatický. S vyhasínáním jaderných reakcí se hvězda začne pod tlakem gravitace smršťovat. Jádro hvězdy imploduje a oproti normální látce zhustí svou hmotnost více než biliardkrát (10^{15}). Potlačená energie hvězdy se uvolní obrovskou kosmickou explozí, označovanou

jako výbuch supernovy. Výbuch odmrští do vesmíru všechny vnější vrstvy umírající hvězdy se všemi produkty termonukleárních reakcí až po železo. Obrovská energie, která se při tom uvolní, svou září překoná záření celé galaxie. Supernova vyzáří za několik dní tolik energie, kolik Slunce za miliardu let. Za posledních tisíc let zaznamenali astronomové výbuchy supernov v letech 1006, 1054, 1572, 1604 a 1987. Explózi v roce 1572 zaznamenal tehdy čtyřiadvacetiletý dánský astronom Tycho de Brahe. Poslední opravdu jasný výbuch supernovy se udál v Magellanově mračnu v blízkosti naší Mléčné dráhy a moderními prostředky byl dobře zdokumentován. Kdo by chtěl zaznamenat výbuch supernovy v naší Mléčné dráze, musel by čekat několik století. Kdo by však měl možnost sledovat tisíce galaxií, spatřil by několik desítek supernov za jediný rok. Existují tedy dva typy explodujících supernov. Zatímco první vzniká termonukleární explózí bílých trpaslíků, druhá je výsledkem gravitačního zhroucení masivní hvězdy.

Ve výhni exploze supernov vznikají některé těžší prvky, než je železo – zlato, olovo, thorium nebo uran. Proto se těžké prvky v přírodě vyskytují jen ve stopovém množství. Existují ovšem ještě další způsoby, jak vznikají vzácnější prvky. Baryum a vizmut se například rodí zachycováním neutronů v červených obrech. Lithium, berylium a bor jsou v celém vesmíru vzácnými prvky. Byly přeskočeny, když hvězdy prováděly syntézu uhlíku. Ale později se rodily rozpadem těžších prvků.

Expandující supernova zcela nezaniká. Zbude z ní rychle rotující malé těleso o průměru pouhých 20 až 100 km, které se skládá převážně z neutronů, a proto je označováno jako „neutronová hvězda“. Hustota látky v něm dosahuje stovek milionů tun na jeden krychlový milimetr, ještě mnohem více než u bílého trpaslíka. Zatímco v bílých trpaslících jsou nakupena atomová jádra, v neutronových hvězdách se na sebe tísní volné neutrony z atomových jader, promísené s volnými protony a elektrony. Pokud gravitační smršťování původně obrovských hvězd pokračuje dále, dojde ke gravitačnímu kolapsu tělesa, které se mění v „černou díru“. Naproti tomu u hvězd s menší hmotností se smršťování zastaví dříve. V nitru hvězdy se stabilizuje takzvaný degenerovaný elektronový plyn, složený z izolovaných atomových jader a elektronů. Zrodí se nám již známý bílý trpaslík s povrchovou teplotou okolo 10 000 K. Dalším chladnutím dospěje vývoj do konečného stadia, k prakticky neviditelnému černému trpaslíku.

Popsané hvězdy první generace jsou vlastně dílnami na jadernou

syntézu těžších prvků. Velký třesk zrodil v podstatě jen vodík a helium. Teprve výbuchy supernov obohatily vesmírný prostor o další prvky Mendělejevovy soustavy. Vytvářejí se nová galaktická mračna, v nichž se kromě plynu objevuje i hvězdný prach a kompaktní hmota. Z takových oblaků se potom formují hvězdy druhé a třetí generace, které již obsahují větší procento těžších prvků. Také naše Slunce a celá sluneční soustava vznikly z hmoty, která byla chemicky obohacena předcházejícími generacemi hvězd. Výbuchy supernov jsou hlavním, ale nikoliv jediným zdrojem těžších prvků ve vesmíru. Dalším zdrojem může být jejich unikání v podobě „hvězdného větru“.

Odkud berou astronomové s takovou určitostí údaje o složení hvězd? Ještě před 200 lety August Comte vyjádřil skeptický názor, že se nám chemické složení hvězd nikdy nepodaří zjistit. Ale nevyplácí se být prorokem. Spektrální analýza záření hvězd nám s velkou spolehlivostí určí složení atomů, z nichž se konkrétní hvězda skládá.

Až dosud jsme hovořili o tak hmotných vesmírných tělesech, která jsou vzhledem ke své velikosti schopna zažehnout termonukleární reakci a změnit se ve hvězdy. Ale jaký je osud těles menších, která nedocílí potřebné teploty, jaká je uvnitř vodíkové bomby? Takové útvary slabě žhnou v pásmu infračerveného spektra a říká se jim „hnědí trpaslíci“. Jejich povrchová teplota bývá 500 až 700 °C. Ještě menší kosmická tělesa řadí astronomové k planetám. Ve sluneční soustavě je to Jupiter, ale mimo sluneční soustavu jsou také známa chladná tělesa až desetkrát hmotnější než Jupiter.

Hvězdy mají tendenci navzájem se sdružovat. Více než polovina hvězd, které v noci vidíte na obloze, jsou ve skutečnosti dvojhvězdy, které krouží kolem sebe. Také „nova“ (na rozdíl od supernovy) bývá nejčastěji dvojhvězda, která se náhle jasně rozzářila. Jedním jejím členem je bílý trpaslík, který odčerpává ze své doprovázející družky palivo tak dlouho, až stoupající tlak a teplota zažehne termonukleární reakci. Nova se jasně rozzáří a celý cyklus se může vícekrát opakovat.

Všechny hvězdy, které vidíme prostým okem na severní i jižní obloze, patří do jediné obrovské vesmírné soustavy označované jako Mléčná dráha – naše galaxie. Obsahuje asi 200 miliard hvězd a vznikla rotací kulovité hvězdokupy. Jak se rotace zvyšovala, galaxie se smršťovala, až vytvořila plochý disk se spirálovými rameny, která vybíhají ze středu soustavy. Je tak obrovský, že Slunce jej od svého vzniku oběhlo teprve osmnáctkrát, ačkoliv se řítí kolem jeho centra rychlostí kolem 200 km

za sekundu. Celá soustava rotuje kolem předpokládané obří černé díry. Rotace udržuje stabilitu galaxie. Jinak by se vlivem gravitace zhroutila do svého středu a změnila se v černou díru.

Galaxií je ve vesmíru nepředstavitelné množství. Bez dalekohledu však můžeme ze Země zahlédnout pouze tři. Na severní obloze Velkou spirální galaxii v Andromedě (M31) a dvě galaxie na obloze jižní – Velké a Malé Magellanovo mračno. Našemu oku se ovšem jeví jako malé oblačky. Stovky, až tisíce galaxií se shlukují do útvarů zvaných kupy galaxií a ty pak vytvářejí supergalaxie. O jejich objev se zasloužil Hubbleův vesmírný teleskop, který zjistil množství galaxií tam, kde pozemské dalekohledy ukazovaly jen vesmírnou prázdnotu. Počet zachycených galaxií se počítá na desítky miliard a v každé z nich se předpokládá průměrně sto miliard hvězd.

Také jednotlivé druhy hvězd mají svou taxonomii, podobně jako rostliny, živočichové či prvky Mendělejevovy tabulky. Řád do zdánlivého chaosu vnesl v roce 1905 dánský chemik Ejnar Hertzsprung. Tehdy mu bylo 32 let. Napadlo ho roztřídit hvězdy podle svítivosti a povrchové teploty. Na vodorovnou osu vynesl povrchovou teplotu hvězdy, na svislou její zářivý výkon porovnaný se svítivostí Slunce. Vyšel mu jednoduchý, ale přesvědčivý diagram. Hertzsprung publikoval svůj objev v málo čteném časopise, a proto článek zapadl. Teprve po osmi letech jeho diagram potvrdil, rozvedl a upřesnil americký astronom Henry Russell. Dnes se tento nejvýznamnější astronomický diagram nazývá Hertzsprungův-Russellův diagram.

Naprostá většina hvězd se v něm vyvíjí po hlavní křivce, což je úhlopříčka směřující z levého horního rohu do pravého rohu dolního. Počáteční hmotnost hvězdy je základním parametrem, který určuje její polohu na hlavní posloupnosti. Naše Slunce se nachází asi v polovině této diagonály. Nad hlavní posloupností leží přibližně vodorovná větev veleobrů, pod ní ostrůvek obrů a pod hlavní posloupností se nachází ostrov bílých trpaslíků.