

6. O teplotě



*Až hvězdy jedna po druhé pohasnou,
nebude světlo ani teplo.
Tehdy nastane marný boj
proti temné a chladné prázdnotě
řítící se k nám.
Rick Yancey*

Teplotu budu mít jedou provždy spojenou s počátky mé lektor-
ské činnosti. Byla jí totiž věnována má úplně první přednáš-
ka pro veřejnost, která se uskutečnila na petřínské hvězdár-
ně ještě v době mých gymnaziálních studií. Na hvězdárně jsem si
přivydělával jako demonstrátor a mou hlavní činností bylo ukazovat
návštěvníkům krásy noční oblohy. Když jsem byl požádán o přednáš-
ku, docela mě to zaskočilo. Uvědomil jsem si, že vyprávění o teplotě
jako projevu chaotického pohybu atomů a molekul na hodinu a půl
nevystačí, a tak mě napadlo, že budu přednášku prokládat čtením
názorů významných fyziků. Dnes se dá podobná vata udělat snad-
něji – pustí se různá videa k tématu a je to. Nakonec nadešel den D.
Měl jsem neskutečnou trému a klepal se jako ratlík stižený zimnicí.
Na přednášku se dostavilo pět lidí, z toho jeden neduživý stařec
s holí. Aby sál nebyl prázdný, nahnal tam vedoucí dne ostatní demon-
strátory a zaměstnance včetně uklízečky. Po prvních minutách jsem
se kupodivu poněkud uklidnil, tréma lehce polevila a snad se mně
těm lidem podařilo vysvětlit, co si pod pojmem teplota představuje-
me. Přednáška byla ale velmi krátká, proto jsem na závěr návštěvní-
kům nabídl prohlídku kopule. Jenže mezitím se rozpršelo, a tak jsem
ukazoval jen fotografie na stěnách a potom je vzal k nástěnné mapě
hvězdné oblohy. Hovořil jsem o souhvězdích, ukázal jim, jak taková
mapa oblohy funguje a co na ní znamenají různé značky. Barvy
kotoučků hvězd na mapě se mně k tématu přednášky celkem hodily
a publiku jsem vysvětlil, že barva hvězd (jak na mapě, tak na obloze)
souvisí s jejich povrchovou teplotou, zkrátka různě horké hvězdy jsou
různě barevné. V té době už mě vydržel poslouchat jen ten stařík
s holí a nemohl mou první přednášku zakončit lépe. Poklepal hůlkou
o podlahu a skřehotavým hláskem se mě optal: „*Mladíku, to všechno,
co tu vyprávíte, je hezké, ale kde je na té hvězdné mapě Praha?*“

Nyní, po čtyřiceti letech, se znova pokusím vrátit ještě jednou ke stejnému tématu. Vzhůru tedy do chaotického reje atomů a molekul, který se navenek projevuje jako teplota látky, veličina neobyčejně obyčejná.

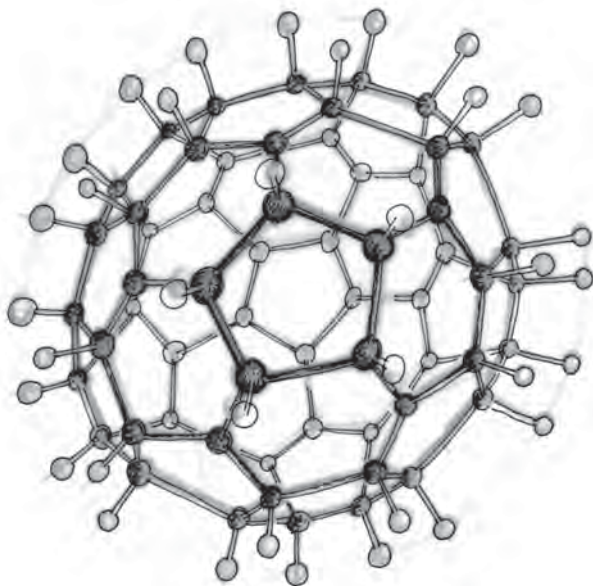
O teplotě

Teplota je mírou chaotického pohybu atomů a molekul. Tuto strohou definici lze rozpracovat metodami statistické fyziky, která se zabývá chováním velkých souborů jedinců. Takovému souboru lze přiřadit střední rychlost – průměrnou hodnotu, se kterou se tito jedinci pohybují. Může jít o průměrnou rychlost proudění řeky nebo o průměrnou rychlost větru. A právě odchylky od této průměrné rychlosti představují chaotickou složku rychlosti, která souvisí s teplotou. Zkrátka odmyslíme-li si uspořádanou složku, pak platí, že čím živěji se pohybují jedinci našeho souboru částic, tím vyšší je jeho teplota. Už z této jednoduché definice jsou patrné dvě zajímavé vlastnosti teploty:

1) pro malé množství jedinců nelze teplotu definovat, neboť nedokážeme pohyb rozdělit na uspořádanou a neuspořádanou složku. Jednomu elektronu či jedinému atomu nelze teplotu přiřadit. Musí jít alespoň o desítky nebo stovky jedinců, jak je tomu například u fullerenu¹, obří kouli z mnoha uhlíkových atomů, které se vůči sobě mohou nejrůznějšími způsoby třepotat a natáčet, a proto není žádný problém definovat chaotickou složku rychlosti.

2) Teplota je tzv. *intenzivní veličina*, která nezávisí na množství látky, ale vypovídá o vlastnostech látky jako takové. Je jedno, zda si natočíte z kohoutku jednu skleničku teplé vody nebo celý kbelík. Teplota bude v obou případech totožná. Právě to ji odlišuje od tepla, druhu energie, jehož velikost závisí na množství látky. K teplu se ale dostaneme až v další kapitole. Podobnými intenzivními veličinami jsou hustota, elektrické pole nebo magnetické pole.

1 **Fullerény** – sférické struktury tvořené atomy uhlíku, rozměr této obří molekuly je kolem 0,7 nm. Nejdůležitější z fullerénů jsou C_{60} , C_{50} a C_{70} obsahujících 60, 50 a 70 atomů uhlíku. Fullerény za normálních podmínek sublimují při teplotách nad 500 °C. Fullerény jsou pojmenovány po americkém architektu Buckminsterovi Fullerovi, který stavěl kopule podobného tvaru.



Fulleren $C_{60}F_{48}$ obsahuje 60 atomů uhlíku, které tvoří povrch koule a z nich trčí do prostoru 48 atomů fluoru. Celkem tato obří molekula obsahuje 1632 protonů a neutronů a lze jí bez problémů přiřadit teplotu.

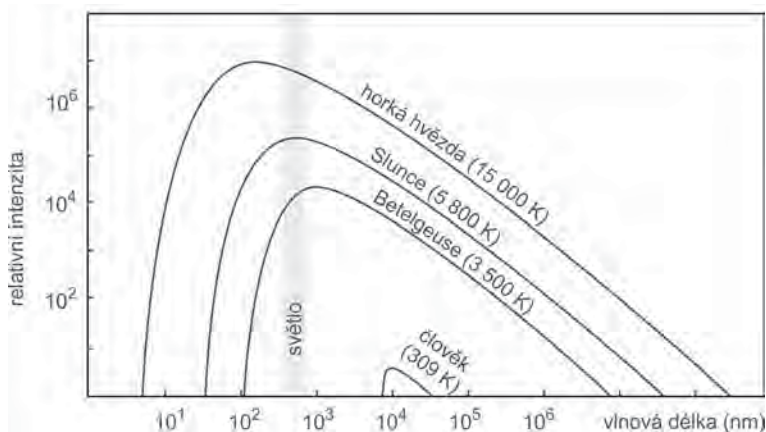
Atomy a molekuly mají vždy nějaký elektrický náboj. Navenek jsou sice elektricky neutrální, ale jejich jednotlivé části náboj mají. A chaoticky se třepotající náboje vytvářejí proměnné magnetické pole. Jak je to možné? Z kapitoly o magnetech už víme, že zdrojem magnetického pole je tekoucí elektrický proud, tedy pohybující se nabitá částice. Pokud se nabitá částice pohybuje chaoticky, vytváří chaoticky se měnící magnetické pole. Takové proměnné magnetické pole je ovšem doprovázeno i proměnným elektrickým polem a to už není nic jiného než elektromagnetická vlna. Každé těleso s nenulovou teplotou je zdrojem elektromagnetických vln. Německý fyzik Wilhelm Wien (1864–1928) zjistil v roce 1893, že čím je těleso teplejší, tím kratší vlnové délky vyzařuje. Ono je to vcelku pochopitelné. Kratší vlnové délky znamenají vyšší frekvenci záření, což odpovídá vyšší energii chaotického reje atomů a molekul. Wienem objevený zákon se dnes nazývá *Wienův posunovací zákon*. Slůvko posunovací by u někoho mohlo evokovat posunování vagónů na

železnici, zde má ale jiný smysl: se zvýšením teploty se posunuje maximum vyzařování do kratších vlnových délek. Wien dostal za svůj objev Nobelovu cenu za fyziku pro rok 1911.

Horké plazma v nitru hvězd, kde probíhá termojaderná syntéza, vyzařuje v nejtvrděších oborech elektromagnetického spektra – gama a rentgenovém. Povrch hvězd má ale nižší teplotu a vyzařuje na delších vlnových délkách. Nejteplejší hvězdy se nazývají Wolfvyy-Rayetovy hvězdy, jejich povrchová teplota je od 30 000 do 200 000 kelvinů² a vyzařují až v ultrafialové oblasti. Hvězdy s povrchovou teplotou kolem 10 000 kelvinů mají maximum vyzařování v modré barvě, naše Slunce má povrchovou teplotu zhruba 5 800 K a je zdrojem bílého světla s maximem vyzařování na 500 nm. Nejchladnější hvězdy jsou červené. K nim patří například Betelgeuse ze souhvězdí Orion. Její povrchová teplota je „jen“ 3 500 kelvinů a maximum vyzařování je na vlnové délce 830 nm, což je už v infračervené oblasti. Barva hvězd přímo odpovídá jejich povrchové teplotě. Vždy jde jen o barvu odpovídající maximu vyzařování, hvězdy i další objekty září i na kratších a delších vlnových délkách, ale s nižší intenzitou. Světlo hvězd můžeme na jednotlivé barvy rozložit pomocí hranolu nebo spektrální mřížky. Na ještě delších vlnových délkách než hvězdy září hnědí trpaslíci, chladné mlhoviny nebo galaktický prach. Nejchladnější zákoutí ve vesmíru vyzařují v infračerveném a mikrovlnném oboru. Takový elektromagnetický signál ale člověk nedokáže vnímat, a je proto odkázán na různé přístroje.

Jak jsme se již zmínili, každé těleso s nenulovou teplotou vyzařuje elektromagnetické vlny. Například člověk, jehož normální teplota je 36 °C (309 K) vyzařuje maximum elektromagnetického vlnění na vlnové délce 10 mikrometrů, což je dobře patrné na různých infra-

2 **Kelvin** – jednotka absolutní (termodynamické) teploty, která má počátek na teplotě $-273,15$ °C (nejnižší možná teplotě). Jeden stupeň Kelvina je shodný s jedním stupněm Celsia, počátek obou stupnic je ale různý. U teploty vyjadřované v kelvinech nepíšeme stupně. Teplota tuhnutí vody je 0 °C, čemuž odpovídá 273,15 K. V současné soustavě jednotek SI je kelvin definován jako $1/273,16$ díl absolutní teploty trojného bodu vody (teplota 0,01 °C nebo 273,16 K, při níž se voda vyskytuje ve všech třech skupenstvích). Od roku 2018 by měl být kelvin definován zafixováním Boltzmannovy konstanty (tepelné kapacity jednoho vibrujícího oscilátoru).

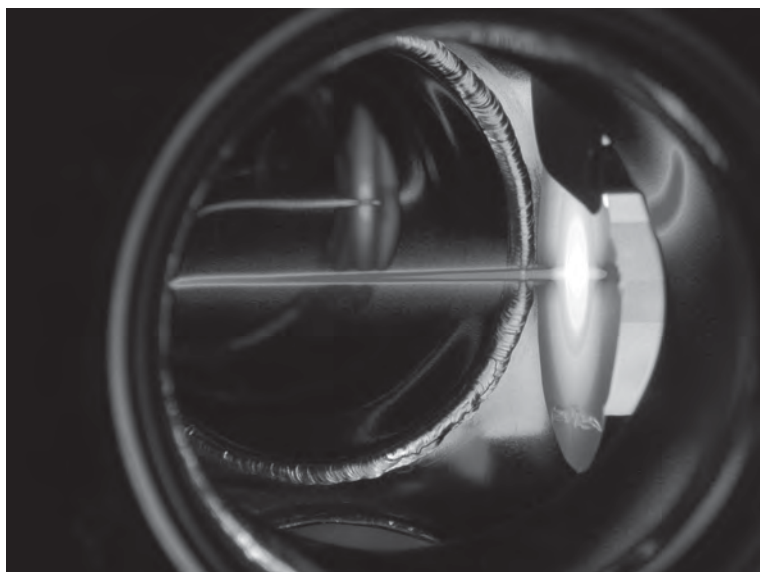


Wienův posunovací zákon. Maximum vyzařování se s teplotou posouvá k delším vlnovým délkám. Zdroj: Addison-Wesley Longman.

kamerách. Vyzařování člověka využívají čidla na zloděje a podobnou verbež. Na 13. snímku barevné přílohy naleznete na záznamu z termokamery svit členů spolku Aldebaran, který vydal tuto knihu. Žáří samozřejmě i mnohem chladnější tělesa, například potraviny v mrazáku nebo sonda ve vesmírném prostoru. Proto jsou některé sondy, kterým by jejich vlastní vyzařování bylo na obtíž, chlazeny kapalným héliem na teplotu několika kelvinů.

Odkud přichází mráz?

Podle známé knížky Zdeňka Mlynáře by měl mráz přicházet z Kremly, nicméně podle fyzikálních zákonů je v Kremly stále ještě poněkud horko. Vkrádá se samozřejmě logická otázka: Jaká je nejnižší možná teplota látky? Na první pohled se zdá, že odpověď je jednoduchá. Se snižováním teploty se zmenšuje chaotický pohyb atomů a molekul. Nejnižší teplota tedy bude stav látky bez chaotického pohybu. Jakýsi klid a mír, při němž se už základní částičky hmoty nepohybují. Má to ale svůj háček. Podle zákonů kvantové teorie to možné není. Představme si, že bychom ochlazovali nějakou krystalickou látku. Při nejnižší možné teplotě by veškerý pohyb ustal a ionty by byly nehybné ve vrcholech krystalické mříže. A to je



Lasarové ochlazování atomů erbia zachycených v elektromagnetické pasti.
Zdroj: NIST.

ten problém. Současně bychom znali jejich polohu (ve vrcholech) i jejich rychlost (nulovou). Takovou situaci ale kvantové zákony mikrosvěta neumožňují. Nikdy nemůžeme současně poznat polohu i rychlost objektu mikrosvěta. Mikrosvět je jakoby kvantově rozmázan a i obyčejný harmonický oscilátor má nejnižší energii nenulovou, tj. vždy vykonává určité základní (tzv. nulové) kmity, které zastavit nelze. Ze stejného důvodu nezůstane ani krystal úplně v klidu, i kdyby byla teplota sebemenší. Ionty budou trochu vibrovat i při nejnižším možném energetickém stavu. Správnější definice nejnižší teploty (tzv. absolutní nuly) by tedy měla být: jde o teplotu, při níž je systém v nejnižším možném energetickém stavu. Pohyb jeho atomů a molekul není nulový, ale nejmenší možný, který připouštějí zákony kvantové teorie³.

3 Obdobná úvaha platí i pro vakuum. To nemůže být nikdy zcela prázdné, protože nemůžeme současně naměřit nulovou hodnotu elektromagnetického pole i jeho hybnosti. Ve vakuu tedy vždy budou přítomné určité základní fluktuace elektromagnetického i dalších polí.

Absolutní nula je u běžných těles něco jako nedostižná chiméra. Třetí věta termodynamická říká, že ji nelze dosáhnout konečným počtem kroků. Těleso můžeme sofistikovaně ochlazovat a absolutní nule se můžeme libovolně přiblížit. Nikdy ji ale u makroskopického systému nemůžeme zcela dosáhnout. Lidé jsou tvorové vynalézaví a umějí dosáhnout i extrémně nízkých teplot za pomoci technologie laserového ochlazování. Tato technika využívá k ochlazování atomů laserového světla s vlnovou délkou nepatrně nižší než je charakteristický elektronový přechod v atomu. Toto „podladění“ laseru má za následek, že atomy v důsledku Dopplerova jevu⁴ absorbují větší množství fotonů, pokud se pohybují směrem ke zdroji (frekvence se „zvýší“ na správnou hodnotu). Při interakci s fotonem atom ztrácí odpovídající hybnost ve směru zdroje světla. Při následném vyzáření fotonu sice hybnost opět získá, ale v náhodném směru, takže po mnoha emisních aktech bude získaná hybnost minimální. Zpravidla se používá šestice laserů ve směru a proti směru tří souřadnicových os. Ať se atom vydá kamkoli, vždy proti němu bude svítit laser se správně posunutou frekvencí, který sníží jeho hybnost. Mnohonásobným opakováním lze shluk atomů ochladit na několik milardtin kelvinu!

Technologii poprvé odzkoušel David Wineland (1944) z amerického Národního institutu pro standardy a technologie (NIST) v roce 1978. V roce 1985 ji dovedli k dokonalosti američtí fyzikové Steven Chu (1948) a William Phillips (1948), kteří dosáhli při přípravě extrémních forem látky nanokelvinových teplot. V roce 1997 byla za tento objev udělena Stevenovi Chuovi a Williamovi Philipsovi Nobelova cena za fyziku. Třetím oceněným byl francouzský fyzik Claude Cohen-Tannoudji (1933), který vysvětlil teoreticky podstatu této revoluční metody. Duchovní otec metody, David Wineland získal toto ocenění až v roce 2012, a to za nedestruktivní měření stavů extrémně ochlazených iontů udržovaných v elektromagnetické pasti.

4 **Dopplerův jev** – změna frekvence vlnění při vzájemném pohybu zdroje a pozorovatele. Přibližuje-li se pozorovatel ke zdroji, naměří vyšší frekvenci, než když se vzdaluje. Může jít o zvukové, elektromagnetické i jakékoli jiné vlnění. Jevo poprvé popsal rakouský matematik a fyzik Christiaan Doppler (1803–1853), který část svého krátkého života strávil jako profesor pražské Polytechniky, předchůdkyni dnešního ČVUT v Praze.

Jaké jsou tedy nejnižší teploty vůbec? Na povrchu Země byla nejnižší teplota naměřena dne 21. července 1983 na antarktické stanici Vostok. Teploměr tehdy ukázal pouhých $-89,2$ °C. Ve vesmíru má nejnižší teplotu reliktní záření z období konce Velkého třesku. Při svém vzniku mělo teplotu několik tisíc kelvinů, dnes je jeho teplota jen 2,73 kelvinu. Jde o teplotu vesmírného pozadí, proto nic přirozené se ve vesmíru vyskytujícího už nemůže být chladnější. Přístroje evropské sondy Planck (2009–2013) umístěné v ohnisku dalekohledu byly chlazeny na desetinu kelvinu. Chlazení bylo čtyřstupňové, poslední stupeň využíval expanzi kapalného hélia protlačovaného skrze kapiláry. Chlazení vydrželo do konce roku 2011. Šlo zatím o nejchladnější přístroj vyslaný do vesmíru. Nejnižší teplotu vůbec lze dosáhnout v laboratořích laserovým ochlazováním, při němž se shluky atomů mohou ochladit až na miliardtinu kelvinu.

A kde je výheň pekelná?

O tom, zda existuje také nějaká nejvyšší možná teplota, se vedou vášnivé spory. Část vědců je přesvědčena, že teplota žádnou horní hranici nemá. Druhá část ale předpokládá, že horní hranicí je tzv. Planckova teplota⁵. Jde o kombinaci gravitační konstanty, Planckovy konstanty a rychlosti světla, která dá veličinu s rozměrem teploty. Planckova teplota vychází 10^{32} K, význam této hodnoty dodnes není jasný. Ti, kteří předpokládají, že jde o nejvyšší možnou hodnotu teploty, ji nazývají *absolutní horko* (analogicky s absolutní nulou).

Kde ale v přírodě nalezneme skutečně velké teploty? Na povrchu Země byla nejvyšší teplota naměřena dne 10. července 1913. Bylo to ve východokaliifornském Údolí smrti. Toto údolí je vyplněné solným jezerem Badwater, které leží 86 metrů pod úrovní moře. Nejvyšší teplota 56,7 °C ve stínu byla naměřena na ranči Greenland (55 metrů pod úrovní moře, 36°27'S, 116°51'Z). V roce 1922 byla v Libyi naměřena teplota 58 °C. Tým expertů Mezinárodní meteo-

5 **Planckovy škály** – charakteristické hodnoty veličin získané kombinací fundamentálních konstant (gravitační konstanty, Planckovy konstanty a rychlosti světla). Planckova délka vychází 10^{-35} m, Planckův čas 10^{-43} s, Planckova energie 10^{19} GeV a Planckova teplota 10^{32} K.

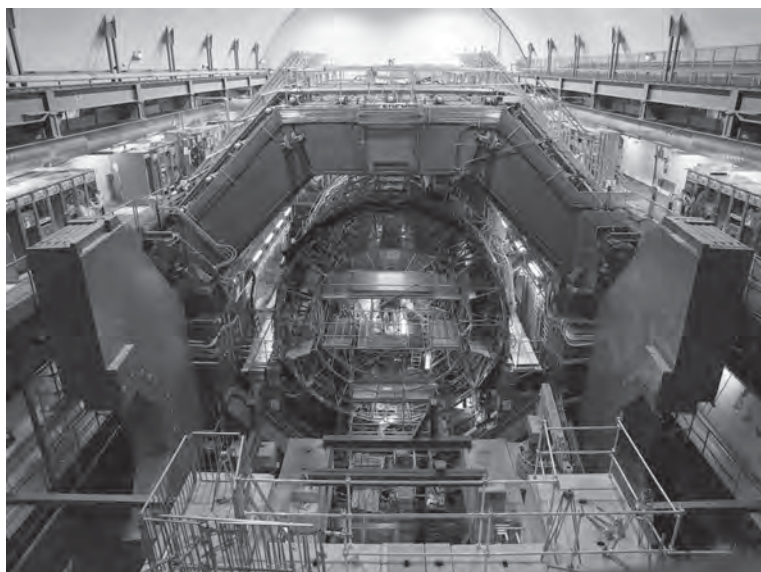
rologické organizace tento rekord v roce 2012 označil za nedůvěryhodný a neuznal ho. Mapu průměrné teploty na Zemi naleznete na 12. obrázku barevné přílohy.

Země má nejteplejší vnitřní jádro, jehož teplota se odhaduje na 5 700 K, což znamená, že je žhavé téměř jako povrch Slunce. Ve vesmíru je nejvyšší teplota v nitrech hvězd. Teplota slunečního jádra se odhaduje na 15 milionů kelvinů. V jádrech obřích hvězd může být teplota mnohonásobně vyšší. Typ fúzních reakcí, které probíhají v nitrech hvězd výrazně závisí na teplotě. Při vyšších teplotách se fúzních reakcí zúčastňují i větší atomová jádra, například uhlík, dusík nebo kyslík.

Nejvyšší teplota dosažená v laboratoři je 2×10^{12} kelvinů. Tato teplota je více než stotisíckrát vyšší než teplota nitra Slunce a bylo jí dosaženo poprvé v částicovém centru CERN v roce 2000. Cílem experimentu bylo vytvořit pralátku, která byla ve vesmíru v průběhu Velkého třesku. Od roku 1994 se o to pokoušela v komplexu CERN řada vědců. Nakonec se jim to podařilo. Urychlené jádro olova nastřelili vysokou rychlostí na jiné, statické jádro. Uvolněná energie zahřála oblast srážky na 2 biliony kelvinů a stlačila na dvacetinásobek hustoty atomového jádra. Srazivší se neutrony a protony se rozmělnily na kvarkové-gluonové plazma – žhavou kouli složenou z kvarků⁶ a gluonů⁷. Obdobná forma látky byla ve vesmíru v časech kratších než jedna mikrosekunda a právě z ní postupně vznikaly neutrony a protony. Proto se cernskému experimentu začalo říkat Malý třesk. V současnosti je příprava této pralátky s teplotou několika bilionů kelvinů možná jen na dvou místech na světě. Prvním je detektor ALICE na největším urychlovači světa LHC (*Large Hadron Collider*) v komplexu CERN v blízkosti švýcarské Ženevy. Druhým jsou detektory Phoenix a Star na urychlovači RHIC (*Relativistic Heavy Ion Collider*) v Brookhavenské národní laboratoři na Long Island ve Spojených státech.

6 **Kvarky** – částice, z nichž jsou tvořeny větší částice, kterým říkáme hadrony. Hadrony dále dělíme na baryony složené ze tří kvarků (například protony a neutrony) a na mezony tvořené kvarkem a antikvarkem (například piony).

7 **Gluony** – polní částice silné interakce, které spojují kvarky do větších celků, například neutronů a protonů a které jsou zodpovědné i za soudržnost atomového jádra. Název vznikl z anglického slova glue (lepídlo, pojivo).



Detektor Alice na urychlovači LHC v částicovém středisku CERN v blízkosti Ženevy. Jde o jedno ze dvou míst na světě, kde je možné dosáhnout při srážce těžkých jader (zde jader olova) teploty několika bilionů kelvinů a připravit pralátku, která byla ve vesmíru v časech kratších než jedna mikrosekunda. Zdroj: CERN.

Na počátku Velkého třesku byla nepochybně ještě vyšší teplota, snad mohla dosáhnout i Planckovy teploty 10^{32} kelvinů. Ale tak extrémní situaci v laboratoři zopakovat nedovedeme. Rozhodně tato teplota ale nebyla nekonečná, jak se píše v některé literatuře. Nekonečné teplotě a hustotě na počátku by zabránily kvantové procesy. Vznik vesmíru je stále zahalen tajemstvím a vše, co si o původu vesmíru myslíme, jsou zatím jen nepodložené hypotézy. Lidé jsou ale mimořádně zvědaví a možná jednou přijdou na kloub i záhadě původu světa kolem nás.

Víte, že

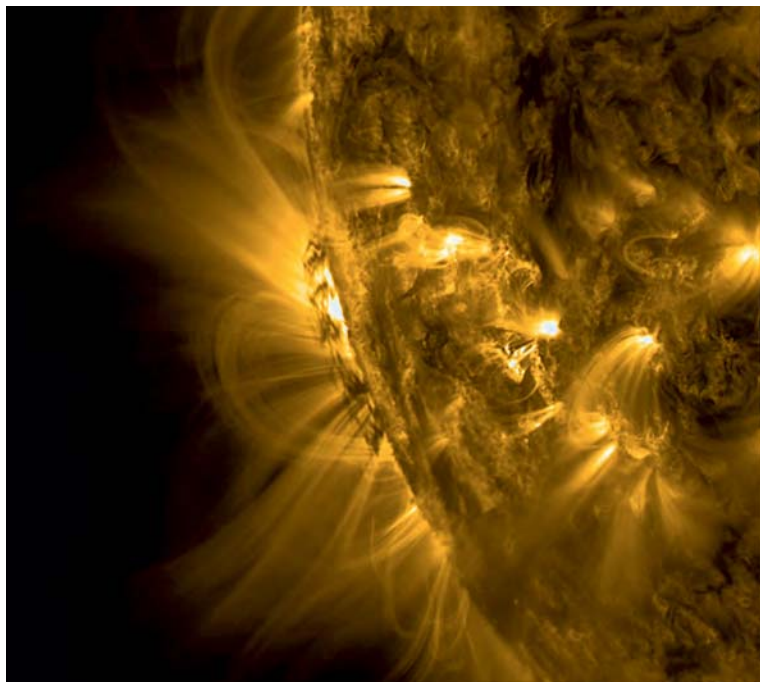
■ Víte, že celé jméno Wilhelma Wiena, který objevil posunovací zákon, je Wilhelm Carl Werner Otto Fritz Franz Wien? Nesnažte se ho zapamatovat, ani autor této knihy nezná jméno tohoto vynikajícího fyzika nazpaměť.

■ Víte, že nejčastěji používané teploměry využívají k měření teploty změnu objemu rtuti nebo lihu s teplotou? Existují ale i jiné teploměry, například bimetalové, v nichž se teplota měří zkroucením dvojice spojených plíšků s různou roztažností. Častá jsou také různá elektronická čidla, která na změnu teploty reagují měnícím se elektrickým odporem, a tím tekoucím elektrickým proudem.

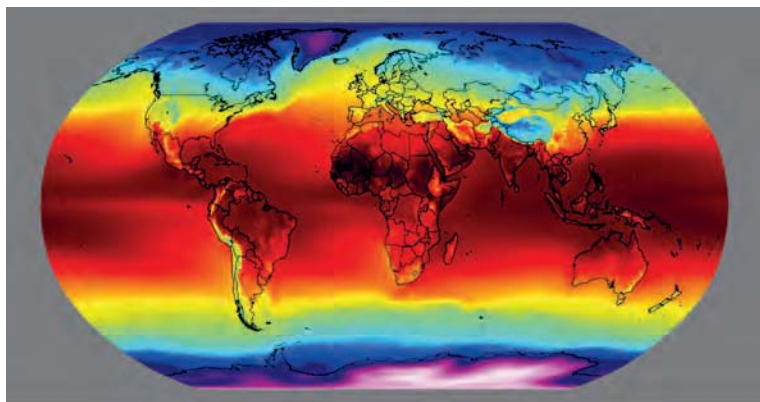
■ Víte, že při extrémně nízké teplotě obsazují částice s poločíselným spinem kvantové stavy postupně? Je to důsledkem tzv. Pauliho vylučovacího principu, podle kterého se dvě takové částice nemohou nacházet ve stejném stavu. Elektrony proto obsazují hladiny v atomárním obalu jeden za druhým, což vede k různým vlastnostem různých prvků.

■ Víte, že při extrémně nízkých teplotách obsazují částice s celočíselným spinem stejný kvantový stav? Vytvářejí přitom tzv. Boseho-Einsteinův kondenzát (BEC), při němž se všichni jedinci chovají jako jeden jediný makroskopický celek. Nejznámějšími příklady BEC kondenzátu jsou supravodivé nebo supratekuté látky.

Poučení na závěr: Ať je teplo jako v pekle či mráz jako na Sibíři, stále jde o slabý odvar teplotních extrémů, na které můžeme narazit ve vesmíru. A možná bude hůř. Pokud je správný scénář tepelné smrti vesmíru, bude teplota neustále klesat, až se veškerá krása vůkol rozplyne v mrazivé temnotě. Proto užijeme života, dokud v nás krev kolotá.



Obr. 11. Slunce v ultrafialové oblasti. Svítící elektrony zviditelňují průběh siločar magnetického pole. Zdroj: SDO, březen 2013.



Obr. 12. Průměrná teplota Země. Zdroj: Robert Rohde / NOAA / UEA.



Obr. 13. Sdružení Aldebaran zobrazené termokamerou ve washingtonském Národním muzeu letectví a kosmonautiky (Smithsonian National Air and Space Museum) v roce 2013.



Obr. 14. Kupa galaxií ve Vlasech Bereniky nemá v rovnováze pohyb galaxií s jejich potenciální energií. Jednotlivé galaxie se zde pohybují navzájem příliš rychle, než aby je dokázala pohromadě udržet jen látka, kterou vidíme. Fritz Zwicky z toho vyvodil, že zde musí být ještě nějaká další látka, která zabrání rozlétnutí galaxií od sebe, a nazval ji temnou hmotou. Zdroj: Schulman Telescope.



Obr. 15. Obří proudy plazmatu vyvrhované ze Slunce při přepojení magnetických siločar jsou doprovázeny pohyby nabitých částic vytvářejících gigantické elektrické proudy. Zdroj: Solar Dynamics Orbiter, 31. srpna 2012.