

populární přednášky o fyzice

- DOSUD VYŠLO**
- Sv. 1, 2 Ju. V. Novožilov: Elementární částice
 - Sv. 3 J. Kvasnica: Struktura atomového jádra
 - Sv. 4 B. Grycz: Čtvrté skupenství hmoty
 - Sv. 5 P. Kratochvíl: Krystaly, jejich vznik a použití
 - Sv. 6 J. Kvasnica: Fyzikální pole
 - Sv. 7 N. D. Morgulls: Termoelektronový měnič energie
 - Sv. 8 B. Ugoršík: Fyzikální elektrotechnika
 - Sv. 9 J. Beneš: Základy autoradiografie
 - Sv. 10 M. Marvan: Záporné absolutní teploty a nové základy termodynamiky

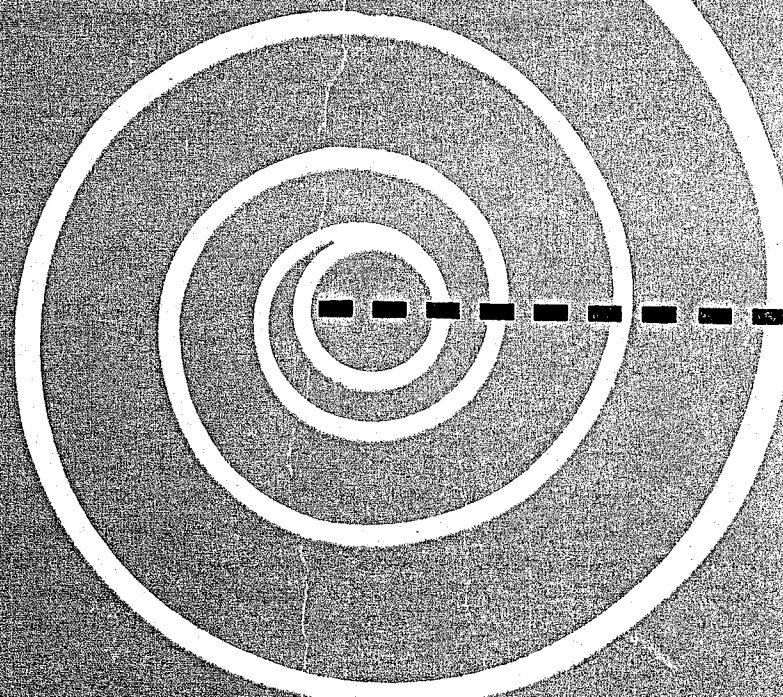
- V TISKU**
- Sv. 11 Z. Vintr: Přeměny atomového jádra

- PRIPRAVUJEME**
- L. Sodomka: Struktura a vlastnosti pevných látek

- V. Malíšek, M. Miler: Vibrační spektroskopie

04 - 033 65
03/5 Kčs 3,—

populární přednášky



o fyzice

10

M. Marvan

**Záporné
absolutní teploty
a nové základy
termodynamiky**

SÚRL

OBSAH

Publikace pojednává o jednom z nejnovějších oborů fyziky — záporných absolutních teplotách. Vysvětluje základní termodynamické věty, jejich vztah k záporným absolutním teplotám a fyzikální podstatu záporných absolutních teplot.

Je určena studujícími na středních a vysokých školách a všem zájemcům o moderní fyziku.

Lektoroval Dr. Vratislav Vyšín

© Milan Marvan, promovaný fyzik, 1965

Redakce teoretické literatury — hlavní redaktor Inž. Vlastimil Čihák

Předmluva	7
Kapitola I. Teplota je, když	9
1,1 Základní vlastnosti teploty	9
1,2 Očíslování teplot. Teplota větší a menší, stav teplejší a studenější	13
1,3 Kritika stupnice rtuťového teploměru a stupnic obdobných	17
1,4 O stupnici někdy neprávem zvané absolutní	18
1,5 Princip způsobu zavedení absolutní teploty	20
1,6 Není pravda, že teplota je mírou intenzity pohybu	24
1,7 Teplota je mírou neuspořádanosti, která připadá na jednotkovou změnu energie	27
Kapitola II. Záporné absolutní teploty	34
2,1 Co je to spin?	34
2,2 Teplota spinového systému	35
2,3 Pochybnosti o možnosti přiřadit teplotu spinovému systému	37
2,4 Je možno teplotu spinového systému měřit?	40
2,5 Teplota a obsazení energetických hladin	41
2,6 První způsob získání záporné absolutní teploty	43
2,7 Kvantový zesilovač	44
Kapitola III. Učebnice tvrdí, že absolutní teplota nemůže být záporná	48
3,1 Princip důkazu	48
3,2 Druhá věta termodynamická a její důsledky	51
Kapitola IV. Nové základy termodynamiky	57
4,1 Kdo má pravdu?	57
4,2 Další překvapení	59
4,3 Perpetuum mobile druhého druhu — a přece se točí!	60
4,4 Nová formulace druhé věty termodynamické	61
Závěr	63
Doporučená literatura	65

PŘEDMLUVA

Paprsky, které přesně odměřují čas, paprsky, které řezou diamant, operují oko, umožňují spojení s vesmírnými loďmi nebo s nebeskými tělesy, paprsky, které budou znamenat převrat v pozemské telekomunikaci, ale i paprsky smrti, vzniklé již dávno ve fantazii spisovatelů, to jsou jen stručná hesla nejsenzačnějších zpráv, které zaplavují tisk celého světa.

Oslnění možnostmi a perspektivami kvantových zesilovačů, které vysílají paprsky těchto podivuhodných vlastností, necháváme často bez povšimnutí sdělení, že podstatou kvantového zesilovače je systém, který má zápornou absolutní teplotu. A přece ještě, řekněme před deseti lety, student, který by tvářil v tvář přísnému učiteli tvrdil, že absolutní teplota může být záporná, uslyšel by asi „laskavou“ radu: „Prostudujte si znovu důkladně některou ze znamenitých učebnic termodynamiky, např. knížku Závěškovu nebo Leontovičovu, tam najdete důkaz o nemožnosti existence záporné absolutní teploty.“ Pravděpodobně by však žádný student netvrdil, že absolutní teplota může být záporná. Ne proto, že studoval důkladně důkazy o nemožnosti záporné absolutní teploty, ale prostě proto, že o teplotě má své představy. Má představu, že absolutní teplota je mírou intenzity pohybu molekul, z nichž se látka skládá, nebo že teplota je úměrná střední kinetické energii těchto molekul. Dále si dobře pamatuje větu: „Těleso se může libovolně ochladit k absolutní nule, ale nuly nemůže dosáhnout.“ „Kdyby teplota byla záporná,“ uvažoval by student, „pak by i kinetická energie byla záporná, což je absurdní.“ „A kdybychom chtěli dosáhnout záporné absolutní teploty, museli bychom napřed dosáhnout teploty absolutní nuly a pak překročit do záporných oblastí teplot.“ Úvahy podobného druhu, ať již jasně vyslovené, nebo jen matně tušené, utvrzovaly v přesvědčení, že absolutní teplota nemůže být záporná.

A přece otevřeme-li učebnici statistické fyziky, napsanou sovětskými fyziky L. Landauem a M. Lifšicem a vydanou r. 1951, dočteme se:

„Tak docházíme k zajímavému závěru, že systém vzájemně působících momentů může mít jak kladnou, tak zápornou teplotu“ (vyložené úvahy pocházejí od L. Landaua, poznámka od L. Landaua a M. Lifšice).

V témže roce byla uveřejněna stručná zpráva E. M. Purcella a R. V. Pounda o experimentálním získání jistých stavů systému nukleárních spinů, které autoři považují za stavy o záporné absolutní teplotě.

Slova, která uvádějí do fyziky záporné absolutní teploty, jsou slova prostá, ale svým významem kacířská. Kacířská v myslích pravověrných vyznavačů termodynamiky; kacířská, ale opřená o vážné argumenty.

Avšak v okamžiku, kdy podlehneme síle těchto argumentů, začne se nám hroutit jeden ze základních pilířů termodynamiky, tzv. druhá věta termodynamická. Hroutí se aspoň v té formulaci, kterou před více než sto lety podal W. Thomson.

Druhá věta termodynamická — podle této formulace — vylučuje možnost existence stroje, který by měnil teplo v práci bez využití tepelného spádu. Kdyby takový stroj existoval, mohli bychom získat veliké množství užitečné práce např. tím, že bychom ochladili všechnu vodu v moři třeba jen o desetinu stupně. Stroj, který by to dokázal, by byl skoro tak užitečný, jako stroj, který by konal práci z ničeho, tj. pracoval by jako perpetuum mobile. Proto se někdy stroji zakázanému větou Thomsonovou říká perpetuum mobile druhého druhu.

Souhlasit s argumenty mluvícími pro existenci záporných absolutních teplot znamená tedy připustit, že v oblasti záporných absolutních teplot existuje perpetuum mobile druhého druhu.

Ocitáme se ve velkém pralese argumentů, v němž musíme najít odpověď na otázku: Přijmout nebo nepřijmout tvrzení o existenci záporných absolutních teplot. A tu s mučivou neodkladností na nás doléhá otázka, co to vlastně teplota je a co je absolutní teplota. Tyto otázky řešíme v první kapitole.

Čtenář, kterému nejde jen o to seznámit se s výsledky současné vědy, ale který jim chce také porozumět, nebude litovat námahy, aby se důkladně zamyslel nad první kapitolou. Čtenář, který je nedočkavý zvědět, co to záporná absolutní teplota je, může si aspoň předběžně přečíst napřed druhou kapitolu.

KAPITOLA I

TEPLOTA JE, KDYŽ...

Úkolem této kapitoly je vyjasnit pojem teploty a absolutní teploty. V okamžiku, kdy nové poznatky se dostávají do rozporu s dosavadními představami, zamýšlíme se nejen nad konečnými definicemi, ale také nad pohnutkami, které k těmto definicím vedly.

Článek první nám ukáže, kdy dvě tělesa mají stejnou teplotu, ale neřekne nám, jak velkou teplotu mají. V následujícím článku je připomenut běžný způsob, kterým přiřazujeme teplotám čísla. Čtenář bude muset věnovat tomuto článku značnou pozornost, aby dobře pochopil rozdíl mezi pojmy „studenější“ a „teplejší“ na jedné straně a teplota „menší“ a „větší“ na straně druhé.

Z kritiky stupnice rtuťového teploměru a stupnic obdobných vyplyne požadavek zavést absolutní teplotu. Ve stručnějších výkladech termodynamiky je běžná definice absolutní teploty na základě vlastností dokonalých plynů. Ukazujeme, že tato definice nesplňuje v plné obecnosti požadavky kladené na absolutní teplotu, a docházíme k obecnější definici.

I v odborných kruzích dosud trvají zastaralé představy o tom, co je teplota z hlediska světa atomů a molekul. Na kritiku těchto názorů navazuje výklad odpovídající současnému správnému pojetí, který je zároveň východiskem pro diskusi záporné absolutní teploty v další kapitole.

1,1 Základní vlastnosti teploty

Možná, že mnoho lidí si láme hlavu tím, co jsou to rádiové vlny. Asi proto, že rádiové vlny nikdo přímo neviděl, neslyšel ani necítil. Avšak zabývat se otázkou, co je teplota, může se zdát na první pohled malicherné. Vždyť každý z nás již od malička rozeznává tělesa teplá od těles studených.

Úkolem fyziky však není studovat působení těles na naše smysly, nýbrž popisovat vlastnosti těles samých v jejich vzájemném působení. I když naše pocity souvisejí se skutečným stavem stu-

dovaných těles, nejsou odrazem jen vlastností těles samých, nýbrž nesou v sobě známky tělesa velmi složitého, totiž známky pozorovatele a jeho momentálního stavu. Můžeme se o tom přesvědčit dnes a denně. V téže místnosti je jednomu teplo, druhému zima. Můžeme konečně připomenout snad již tisíckrát opakovaný návod pokusu, který ukazuje, jak nespolehlivé jsou údaje našich smyslů.

Chceme rozhodnout, zda voda v hrnci, který již dlouho stojí v pokoji, je teplá, nebo studená. Předpokládejme, že napřed rozmačkáme v levé ruce sněhovou kouli, pravou ruku ponoříme do vody, přihřáté na vařiči a potom obě ruce ponoříme do vody, jejíž teplota nás zajímá. Podle výpovědi levé ruky je tato voda teplá, podle výpovědi pravé ruky je studená.

Připomínka, že naše smysly nás klamou, není jedinou kritickou poznámkou k zavedení teploty na základě našich pocitů. Připomínáme k ní ještě dvě. Za prvé můžeme asi právem očekávat, že naše smysly nejsou s to dostatečně jemně rozeznat rozdíly teplot, a za druhé existují tělesa tak teplá nebo tak studená, že se jich bez újmy na zdraví nemůžeme ani dotknout.

Rádiové vlny nevnímáme bezprostředně svými smysly, a přece víme o jejich existenci. A nejen, že víme o jejich existenci, známe je tak dobře, že jich dovedeme používat.

Kdybychom byli bytostmi, které nejsou schopny svými smysly vnímat pocity „teploty“, došli bychom přece jednou k závěru, že existuje tepelné působení a v jistém stadiu rozvoje vědy bychom zavedli teplotu jako charakteristiku stavu látky.

Došli bychom totiž nejdříve k závěru, že četné změny stavu vyšetřovaného systému (tělesa, plynu, kapaliny atd.) nelze vysvětlit změnami působení známých sil nebo změnami působení chemického. Zjistili bychom, že kromě těchto druhů působení *musí existovat ještě další, dosud neprozkoumaný druh působení, který podrobně vyšetříme a nazveme tepelným působením.*

Podstata každého pokusu, který by to dokázal, by byla v tom, že — ačkoliv bychom zkoumaný systém izolovali proti známým silám a proti chemickému působení — přesto by se stav zkoumaného systému měnil. (Pokud by se nám nepodařilo najít izolaci proti některé síle, uspořádali bychom pokus tak, aby se během pokusu tyto síly neměnily.)

Tak např. bychom uzavřeli plyn do nádoby z pevných a chemicky odolných stěn. Pevnost stěn by nám zaručovala, že stav plynu nemůže být ovlivněn změnou vnějších tlaků, chemicky odolné stěny by nám přirozeně vyloučily možnost chemické reakce. Tím, že bychom neposunovali tělesem v gravitačním poli, zaručili

bychom, že se nemění gravitační působení Země na zkoumaný systém atd. Vzhledem ke všem těmto opatřením bychom očekávali, že stav systému se nebude měnit. Ke svému překvapení bychom však zjistili, že tlak plynu je jiný v poledne než o půlnoci, jiný v lednu než v červenci a že se také mění v závislosti na tom, jaké je jeho blízké okolí. I kdyby vzniklo na okamžik podezření, že jsme při daném pokusu zapomněli kontrolovat jistou sílu, ukázalo by se nakonec, že existují případy, kdy příslušné změny nelze vysvětlit změnou silového nebo chemického působení.

Jsmo tedy ve stadiu, kdy jsme se vzdali snahy vysvětlovat všechny změny stavů jako následek změn silového nebo chemického působení. To nové, dosud neprozkoumané působení jsme nazvali *tepelným působením* a rozhodli jsme se je důkladněji prozkoumat.

Prvním užitečným zjištěním by byl poznatek, že existují celkem dobré izolační stěny proti tepelnému působení. Všechny změny stavu systému, který by takovými stěnami byl obklopen, by bylo možno vysvětlit změnami silového nebo chemického působení okolí — tak bychom se přesvědčili, že jsou to skutečně tepelné izolační stěny.

Nyní bychom přistoupili k dalšímu vyšetřování tepelného působení. Položili bychom si asi tuto otázku: Při kterých změnách okolí systém izolovaný proti silovému a chemickému působení mění svůj stav a při kterých změnách nikoliv?

Řekněme, že vyšetřujeme systém *A*, který je v tepelném styku se systémem *B* (tj. tyto systémy nejsou od sebe tepelně izolovány). Systémy *A*, *B* jsou jako celek izolovány proti všem druhům vnějšího působení. Také mezi systémy *A*, *B* vyloučíme možnosti jiného působení než tepelného. Jestliže tyto systémy jsou dosti dlouho pohromadě, dostanou se za určitou dobu do stavu, který se už během další doby nemění — dostanou se, jak říkáme, do *stavu rovnováhy*. Jelikož jsme vyloučili každé jiné působení mezi systémy mimo tepelné, jde tedy o tepelnou rovnováhu mezi systémy *A*, *B*. Nahrádíme-li nyní systém *B* jiným systémem *C* (nebo tímž systémem, ale v jiném stavu), narušíme tím buď původní stav systému *A*, nebo nikoliv. Jestliže tím stav nenarušíme, může být systém *C* právě tak „vhodným okolím“ systému *A* v daném stavu, jako jím byl systém *B*.

Najít společné znaky těch systémů, které mohou být „vhodným okolím“ vyšetřovaného systému v daném stavu, bude základní úkol, který musíme řešit. Najdeme však jeden jediný obecný znak těchto systémů: Tyto systémy po uvedení do tepelného styku jsou také ve vzájemné rovnováze.

Tento poznatek se zpravidla formuluje jako tzv. *nultý zákon termodynamiky*:

Je-li A v tepelné rovnováze s B, B v tepelné rovnováze s C, pak je také A v tepelné rovnováze s C.

Přitom v této větě máme na mysli systémy v daných stavech. Vztah „vzájemné rovnováhy“ má z hlediska čistě logického stejnou vlastnost jako vztah „sourozence“: Jsou-li Petr a Jana sourozenci a Jana a Pavel sourozenci, pak jsou sourozenci také Petr a Pavel.

Vztah sourozenectví nám dovoluje rozřadit všechny lidi na světě na skupiny, v nichž všichni členové jedné skupiny jsou vzájemně sourozenci a nejsou sourozenci lidí, kteří nejsou v této skupině. Jedináček tvoří skupinu o jedné osobě.

Naproti tomu vztah „kamarádství“ nám nedovoluje rozřadit všechny lidi na skupiny, v nichž právě všichni členové jedné skupiny jsou kamarádi. Skutečně: Jsou-li Petr a Jana kamarádi a Jana a Pavel kamarádi, nemusí být ještě Petr a Pavel kamarádi. Nejsou-li opravdu Petr a Pavel kamarádi, nemohou Petr, Pavel a Jana být členy skupiny kamarádů (Petr a Pavel nejsou totiž kamarádi!), ale nemohou tvořit samostatnou skupinu jen Petr a Jana (Jana je kamarádka Pavla) ani Pavel a Jana. Přirozeně netvoří takovou skupinu jen jedna z těchto osob.

Nultý zákon termodynamiky, který nám říká, že vztah vzájemné rovnováhy má obdobné vlastnosti jako vztah sourozenectví, a nikoliv „kamarádství“, vyjadřuje tedy velmi důležitou vlastnost tepelné rovnováhy, která nám dovoluje rozřadit všechny stavy všech systémů na skupiny, z nichž každá obsahuje právě všechny vzájemně tepelně rovnovážné stavy.

Jestliže systémy jsou ve stavech, které patří do jedné skupiny vzájemně rovnovážných stavů, pak budeme říkat, že mají stejnou teplotu.

Můžeme nyní formulovat odpověď na otázku, které stavy mohou být „vhodným okolím“ systému A, jenž je v daném stavu. „Vhodným okolím“ mohou být všechny systémy, které mají stejnou teplotu jako těleso A. Zvolíme-li obráceně za okolí systému A (který není tepelně izolován) systém o jiné teplotě, má to za následek změnu stavu systému A.

Tím jsme dostali odpovědi na položené otázky.

Všimněme si, že takto zavedená teplota souhlasí s nejdůležitějšími poznatky, které získáváme o tělesech na základě smyslového vnímání: *Tělesa, která jsou dostatečně dlouho pohromadě, se jeví stejně teplá.*

1,2 Očíslování teplot. Teplota větší a menší, stav teplejší a studenější

Musíme mít stále na paměti, že pojem teplota nám dosud udává pouze to, zda nějaké stavy mohou být vzájemně tepelně rovnovážné. Pojmy teplota větší a menší nebo teplejší a studenější jsou zatím prázdné pojmy, kterým teprve musíme dát obsah.

O teplotě zatím víme jen tolik, jako kdybychom věděli o lidech jen to, zda jsou, nebo nejsou sourozenci. Abychom o jistých skupinách sourozenců mohli mluvit, musíme si je nějak pojmenovat. Můžeme je např. pojmenovat podle jména a místa narození nejstaršího sourozence nebo můžeme každé skupině přiřadit jisté číslo. Toto očíslování skupin můžeme provést např. podle čísla občanského průkazu nebo třeba podle tělesné výšky nejstaršího sourozence. Volba způsobu očíslování je celkem libovolná až na to, že dvěma různým skupinám musíme přiřadit různá čísla.

Podobně stojíme před úkolem pojmenovat nebo očíslovat skupiny stavů o stejné teplotě čili pojmenovat nebo přiřadit číslo teplotě. Skupinu stavů o jisté teplotě pojmenujeme např. podle charakteristické vlastnosti jednoho člena zmíněné skupiny. Tak můžeme říkat: Tato látka má teplotu tajícího ledu nebo tato látka má teplotu sublimujícího naftalenu atd.

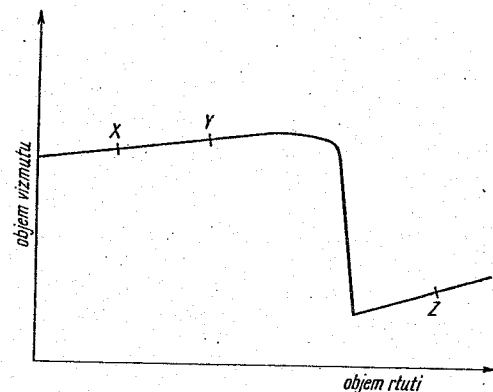
Je však zřejmé, že mnohem praktičtější je přiřadit různým skupinám stavů různá čísla. Nejčastější způsob přiřazení čísel skupinám stavů záleží v tom, že si zvolíme jistou látku a její jistou měřitelnou vlastnost; podle velikosti této vlastnosti očíslováme pak teploty. Tak např. můžeme skupiny stavů očíslovat podle výšky hladiny rtuti, která je v uzavřené trubici, z níž byl vyčerpán vzduch.

Popíšeme nyní poněkud podrobněji tento způsob očíslování. Opatříme značkou a číslem nula polohu hladiny rtuťového sloupce, jestliže rtuť má teplotu tajícího ledu, a číslem sto, jestliže má teplotu vařící vody. Úsečku mezi značkami pojmenovanými 0 a 100 rozdělíme na sto pravidelných dílů a očíslováme 0 až 100. Takto získané dílky nanese na obě strany, tj. nad značku 100 a pod značku 0, a tyto dílky opatříme podle pořadí příslušnými čísly. Podle toho, kterou značku bude hladina rtuti ukazovat, očíslováme teplotu rtuti, a tedy také teplotu všech látek, které jsou s ní v daném stavu v rovnováze.

Za jinou teploměrnou látku místo rtuti můžeme zvolit*) třeba vodík a za teploměrnou vlastnost jeho tlak při konstantním objemu. Nebo můžeme za teploměrnou látku zvolit jistý odporový

*) Přesněji by se mělo říkat „teplotoměrny“, ale bývá zvyk užívat výrazu „teploměrny“.

drát a za teploměrnou vlastnost jeho odpor. Přitom stupnici získáme obdobným způsobem jako u rtuťového teploměru. Přirozeně, že táž teplota bude obecně označena různými čísly v závislosti na použití teploměrné látky a její teploměrné vlastnosti.*)



Obr. 1. Objem rtuti a vizmutu při stejných teplotách (libovolná měřítka)

Zajímavé bude srovnání stupnice rtuťového teploměru se stupnicí odvozenou z roztažnosti např. vizmutu. Vizmut při přechodu z pevného na kapalné skupenství zmenšuje svůj objem (podobně se chová led). Na obr. 1 je při jistých teplotách nanášen na vodorovnou osu objem rtuti, na svislou osu objem vizmutu. Graf můžeme ovšem číst jako závislost objemu vizmutu na teplotě měřené ve stupnici rtuťového teploměru nebo obráceně závislost objemu rtuti na teplotě měřené ve stupnici vizmutového teploměru.

Jestliže teplotu posuzujeme podle velikosti objemu rtuti, je teplota odpovídající bodu Z větší než teploty odpovídající bodům X, Y (neboť v bodě Z je větší objem rtuti než v bodech X, Y). Posuzujeme-li však teplotu podle objemu vizmutu, je teplota odpovídající bodu Z menší než teplota odpovídající bodům X, Y. Zato teplota odpovídající bodu Y je podle obou stupnic větší než teplota odpovídající bodu X.

Jelikož nemáme, aspoň prozatím, žádných principiálních důvodů dávat přednost očíslování teplot podle objemu rtuti před

*) Čtenář musí mít stále na paměti, že diskutujeme o otázce přiřazení čísel teplotám, a nikoliv o otázce konstrukce různých teploměrů. Ve skutečném teploměru může být použito jiné látky než té, které se používalo k definici teplotní stupnice; díky stupnici na takovém teploměru budou však obecně jinak veliké.

očíslováním teplot podle objemu vizmutu, je očíslování teplot celkem náhodné a větší nebo menší číslo nevystihuje žádné obecné vlastnosti všech členů jedné skupiny. Řekneme-li např., že teplota určité lázně podle jisté stupnice je 20 a teplota jiné lázně podle téže stupnice 60, neudávají tato čísla žádný obecný vztah (aspoň pokud vyplývá ze způsobu zavedení stupnice) o těchto lázních, leda to, že nemohou být v tepelné rovnováze.

Hlubší pronikání do problematiky věci nás nutí, abychom pojmy, které na určitém stupni poznání splývají, štěpili na pojmy dva a popř. více. Dříve se nerozlišovalo mezi pojmy teplota větší a těleso teplejší nebo mezi pojmy teplota menší a těleso studenější. Je však účelné tyto pojmy významově rozlišovat.

Pro nás teplota větší a menší bude znamenat jen porovnání velikosti čísel podle zvolené stupnice teplot. Teplota větší a menší nejsou tedy pojmy absolutní, nýbrž závisejí na volbě teploměrné látky a její teploměrné vlastnosti.

Termíny teplejší a studenější si budeme rezervovat pro jakési přirozené pořadí teplot nezávislé na zvolené stupnici (pokud vůbec příroda jistému pořadí dává přednost).

Vraťme se k našemu příkladu, kdy jsme zvolili za teploměrnou látku vizmut a za teploměrnou vlastnost velikost objemu. Řekneme, že bychom kádinku s vizmutem uvedli do tepelného styku plamenem kahanu. Objem vizmutu by napřed povolna rostl, náhle by začal vizmut tát a přitom by prudce zmenšil svůj objem; potom by opět povolna jeho objem rostl. Ačkoliv by teplota posuzovaná podle objemu vizmutu napřed rostla a pak klesala, nikdo by asi nepochyboval o tom, že vizmut přechází ze „studenějšího“ stavu do „teplejšího“. Toto přesvědčení by se nejspíše opíralo o údaje smyslových orgánů. Pojmy „studenější“ a „teplejší“ by měly v těchto výrocích čistě subjektivní charakter. Mají-li být pojmy „teplejší“ a „studenější“ fyzikálními pojmy, musíme je zbavit jejich subjektivního charakteru.

Údaje našich smyslů jsou však cenné v tom, že nás přivádějí na stopu jakéhosi přirozeného pořadí teplot. Podle těchto údajů přechází těleso následkem styku s jediným jiným tělesem (systémem o určité teplotě) vždy buď ze studenějšího stavu do teplejšího, nebo obráceně z teplejšího do studenějšího, nikdy však neprochází střídavě teplejšími a studenějšími stavy. To nás vede k myšlence, že při změnách teplot, které nastávají následkem tepelného styku s jediným tělesem, prochází zkoumaná látka vždy tímž pořadím teplot.

Experimentálně by skutečně bylo možno ověřit:

Všechny látky, které přecházejí z dané teploty (např. z teploty

tajícího ledu) na druhou teplotu (např. teplotu vařící vody), procházejí vždy tímž pořadím teplot.

Je ovšem zřejmé, že v jedné stupnici teplot mohou být teplotám v přirozeném pořadí přiřazena čísla 0, 1, ..., 10, ..., 20, ..., 100, kdežto v jiné stupnici třeba čísla 4, 8, ..., 7, ..., 2, ..., 3. Zmíněné pořadí teplot (nikoliv však pořadí příslušných čísel) je charakteristické pro všechny látky, a budeme je proto považovat za přirozené pořadí teplot.

Abychom se mohli stručně vyjadřovat, která teplota je dál a blíže v daném pořadí, použijeme nyní termínů „teplejší“ a „studenější“, kterých jako fyzikálních termínů nebylo dosud použito. Bude vhodné použít těchto termínů tak, aby se co nejlépe shodovaly se svým běžným významem.

Stačí se nyní dohodnout, že tehdy, když toto přirozené pořadí teplot vyznačíme na přímce tak, že nalevo od teploty vařící vody bude teplota tajícího ledu, potom směr zleva napravo je směr od studenějšího k teplejšímu. V každém konkrétním případě se můžeme ptát, zda stupnice teplot je uspořádána podle velikosti tak, aby teplotě větší odpovídal stav teplejší a teplotě nižší stav studenější. Přirozeně, že se snažíme volit takovou stupnici, aby teplotám větším odpovídal stav teplejší. Musíme však stále mít na paměti, že mezi těmito pojmy rozlišujeme a že by nebyl žádný zázrak, kdyby při dobývání nových oblastí teplot se stalo, že stavům teplejším odpovídají teploty menší (viz též čl. 2,2).

Tvrzení, že těleso při tepelném styku s jiným tělesem prochází jistým „pořadím teplot“, potřebuje ještě malé vysvětlení. Jak bude o tom ještě diskutováno, teplota je vlastnost těles, která jsou ve vnitřní rovnováze. Během změny teploty následkem tepelného styku je těleso v každém okamžiku v nerovnovážném stavu, a nemůžeme tedy mluvit o jeho teplotě. Můžeme si však představit, že po určitých časových intervalech, např. po uplynutí dvou vteřin, tepelný styk přerušíme, vždy počkáme, až se těleso dostane do rovnováhy, a pak změříme jeho teplotu. Řekněme, že zjistíme tuto posloupnost teplot: $a, f, k, n, s, \dots$, atd. Zvolíme-li zmíněný časový interval jednu vteřinu, pak zjistíme posloupnost tohoto typu: $a, b, f, i, k, l, n, p, s, \dots$, atd. Tato posloupnost je hustší, ale pořadí teplot prvního měření zůstalo zachováno. Zmenšováním časového intervalu, během kterého je těleso v tepelném styku s jiným tělesem, pouze libovolně zvětšujeme hustotu posloupnosti. Tím jsme vysvětlili, co rozumíme termínem „pořadí teplot“.

Nakonec poznamenejme, že pojmy teplejší a studenější lze vysvětlit ještě jiným, avšak rovnocenným způsobem:

Těleso, které ztrácí teplo, přechází ze stavu teplejšího do studenějšího; těleso, které získává teplo, přechází ze stavu studenějšího do teplejšího. (Uvažujeme tělesa, nekonající vnější práci).

Tato formulace má ovšem tu nevýhodu, že používá pojmu tepla, který nemusí být každému zřejmý. Odbočovali bychom

příliš od hlavního směru výkladu, kdybychom pojem tepla chtěli vyložit aspoň tak důkladně, jako vykládáme pojem teploty. Spokojíme se s výkladem jen natolik stručným, abychom mohli pochopit souvislost obou definic pojmů „teplejší“ a „studenější“.

Pojem tepla vznikl tehdy, když byla položena otázka, jak se mění teploty různých těles při jejich vzájemném tepelném styku. Ukázalo se, že zákonitost změn teploty těles při tepelném styku lze dobře vysvětlit, když se tělesa přirovnají k nádobám různého tvaru a teplota k výškám hladiny kapaliny uvnitř nádoby. Teploty při tepelném styku těles se chovají podobně jako výšky hladin při přelévání kapaliny z jedné nádoby do druhé. To je ovšem pravda jen tehdy, jestliže teploty měříme ve stupnici uspořádané podle kritéria: větší teplota — tedy teplejší stav. Z této analogie mezi teplotou a výškou hladiny vznikla představa tepla jako kapaliny, která nevzniká ani nezaniká, může se pouze přelévat z jednoho tělesa na druhé (tzv. fluidová teorie). S touto představou vystačíme ovšem jen tehdy, pokud máme na mysli tělesa, jež nevykonávají ani nespotřebovávají žádnou vnější práci. Abychom mohli do své teorie zahrnout jevy doprovázené konáním vnější práce, museli jsme vytvořit novou představu. To, co nevzniká ani nezaniká, nýbrž se nanejdříve přelévá, není kapalina, ale energie. Teplo je energie předávaná tepelným stykem.

Z výkladu je patrné, že těleso, které ztrácí teplo, snižuje teplotu (měřenou ve stupnici uspořádané podle kritéria „větší“, tedy „teplejší“) a obráceně. Můžeme tedy také naopak podle toho, zda těleso ztrácí, nebo získává teplo, usuzovat, zda těleso přechází ze stavu teplejšího na studenější, nebo obráceně.

1,3 Kritika stupnice rtuťového teploměru a stupnic obdobných

V posledním článku jsme se zmínili o jednom způsobu očíslování teplot. Teploty jsme očíslovali podle nějaké měřitelné vlastnosti určité látky, např. podle objemu rtuť.

Hlavní nevýhodou tohoto způsobu očíslování je, že čísla přiřazená jednotlivým teplotám závisí na volbě teploměrné látky a její teploměrné vlastnosti. Závisí tedy na empiricky (tj. zkušeností) zjištěných vlastnostech jednotlivých látek. Proto se těmito stupnicím říká *empirické stupnice* a příslušným teplotám *empirická teplota*.

Empirická stupnice má ještě jednu nevýhodu. Z praktických důvodů se hodí každá látka k očíslování teplot jen v jisté oblasti. Tak např. rtuť používáme jako teploměrné látky jen potud, pokud je v kapalném stavu.

Při odhalování nových a nových oblastí teplot, kterých dříve nebylo dosaženo, stojíme vždy před novým úkolem rozšířit stupnici teplot.

I kdybychom si rozmysleli zmíněné praktické ohledy, zůstává zde vždy nebezpečí, že látka, kterou jsme si zvolili za teploměrnou, nemůže nabývat všech možných teplot.

Ukázali jsme několik nevýhod empirické stupnice teplot. Naši snahou bude najít způsob očíslování, který bude zbaven náhodnosti a který při dobývání nových a nových oblastí teplot nebude nás stavět před úkol dohodnout se o způsobu, jak rozšířit stupnici teplot. Budeme se snažit najít absolutní stupnici teplot.

1.4 O stupnici někdy neprávem zvané absolutní

Jak jsme se již zmínili, rtuťový teploměr se hodí k očíslování teplot jen v té oblasti, při které je rtuť v kapalném skupenství. Mnohem větší oblast teplot lze očíslovat teploměrem plynovým. Plynový teploměr má ještě jednu výhodu. Tato výhoda záleží v tom, že mnoho plynů, tzv. dokonalých plynů, se rozpíná stejným způsobem.

Vysvětlíme nyní podrobněji, co tím myslíme. Budeme se zajímat o závislost tlaku plynu při konstantním objemu na teplotě. Zvolme objemy dokonalých plynů takové, že při teplotě tajícího ledu mají všechny stejný tlak. Potom měňme teploty při konstantním objemu. Experiment ukazuje, že při jakýchkoliv stejných teplotách všech dokonalých plynů jsou jejich tlaky také stejné.

To je ta důležitá vlastnost dokonalých plynů, která ovlivnila rozhodnutí zvolit za základní stupnici teplot stupnici založenou na vlastnostech dokonalých plynů. Jestliže zvolíme stupnici podle vlastností jiného plynu obdobným způsobem, jako jsme zavedli stupnici rtuťového teploměru, pak závislost tlaku všech plynů na teplotě splývá v jedinou přímku, jak ukazuje obr. 2. Opakujeme, že se to týká pokusů, při kterých plyny mají alespoň při jedné teplotě stejný tlak.

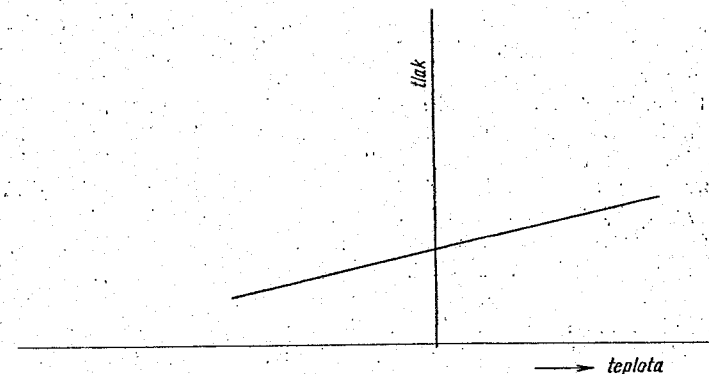
Když nyní podmínky experimentu změníme tak, že při teplotě tajícího ledu mají plyny v různých nádobách různý počáteční tlak, pak závislost tlaku na teplotě je opět přímková, ovšem pro plyny v různých nádobách je směr těchto přímek obecně různý, jak ukazuje obr. 3.

Možnost experimentu byla přirozeně omezena jen na jistou oblast teplot, v ostatních oblastech si výsledek pokusu pouze domýšlíme. Tento očekávaný výsledek je na obr. 3 znázorněn čárkovaně. Všimněme si, že všechny tyto přímky protínají osu

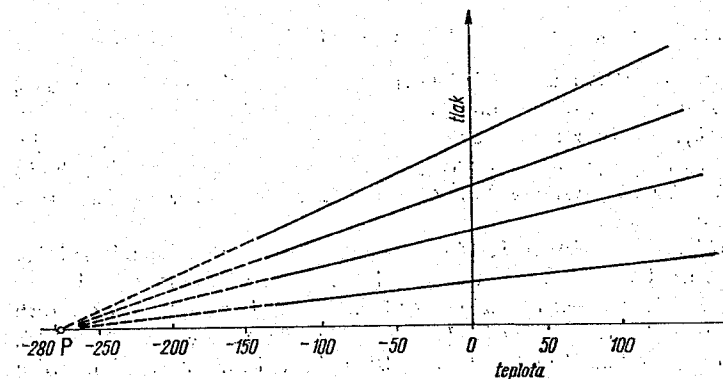
teplot v jediném bodě. To znamená, že všechny plyny mají při této teplotě nulový tlak.

Všechno, co zde bylo řečeno o závislosti tlaku na teplotě, bychom mohli opakovat o závislosti objemu na teplotě při konstantním tlaku. Dokonce při téže teplotě, při které nabýval tlak nulové hodnoty, nabývá také objem nulové hodnoty.

Co by se stalo, kdybychom šli ještě k teplotám nižším, tj. k teplotám vlevo od bodu P (viz obr. 3)? Byl by snad v příslušných experimentech objem záporný? Taková možnost se zdála nesmyslná, a proto byl učiněn předpoklad, že teplota v bodě P je



Obr. 2. Závislost tlaku dokonalých plynů na teplotě (měřené plynovým teploměrem) při stálých objemech



Obr. 3. Závislost tlaku dokonalých plynů na teplotě (měřené plynovým teploměrem) při stálých objemech. Plyny měly při teplotě nula různý tlak

mezni teplota. Tento předpoklad byl v dalším vývoji potvrzen, i když skutečný průběh závislosti tlaku na teplotě při nízkých teplotách je jiný.

Bylo tedy přirozené začít počítat teplotu od tohoto bodu, tj. označit bod P za nulovou teplotu. Díky stupnice byly získány tak, že úsečka mezi teplotou táního ledu a teplotou vaření se vody byla rozdělena na sto stejných dílků. Tak vznikla stupnice někdy zvaná *absolutní* nebo *absolutní plynová stupnice*.

Od absolutní stupnice, jak jsme již o tom mluvili, požadujeme, aby nezávisela na zvláštních málo obecných vlastnostech jednotlivých látek. Ze způsobu, kterým tato stupnice byla zavedena, plyne, že tato stupnice nese známky „absolutnosti“ jen v rámci dokonalých plynů, což je ovšem rámec dost těsný. Tato stupnice je vlastně jedna z empirických stupnic.

Hlavním účelem tohoto článku není polemizovat, zda tato stupnice se má, nebo nemá nazývat absolutní, nýbrž zdůraznit, že termínu „absolutní teplota“ ve fyzikální odborné literatuře a zvláště v souvislosti se zápornou teplotou se vždy užívá v jiném smyslu. V jakém smyslu, to bude vyloženo v příštím článku.

Okolnost, že dvěma stupnicím zavedeným naprosto rozdílným způsobem se říká absolutní, má ovšem hlubší příčiny. Ukazuje se totiž, že v tom oboru, kde se plyny chovají jako dokonalé, obě stupnice splývají, čímž se teprve dodatečně ospravedlňuje pro stupnici plynového teploměru název absolutní. Ve skutečnosti se plyny chovají jako dokonalé jen v určitém oboru, a to ještě jenom přibližně; takže absolutní stupnice zavedená v příštím článku je mnohem obecnější.

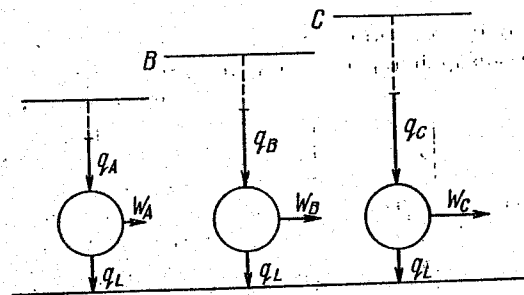
1,5 Princip způsobu zavedení absolutní teploty

Jediný způsob očíslování stupnice teplot, který dosud známe, využívá změn fyzikálních vlastností jistých látek při změně jejich teploty. Tento způsob jsme podrobili kritice. Otázka ovšem je, zda existuje jiná možnost, jak získat teplotní stupnici. Tato možnost se objevila v tom okamžiku, když byla vyslovena tzv. *Carnotova věta*:

Účinnost všech ideálních tepelných strojů závisí jedině na teplotách dvou lázní, s nimiž tepelný stroj pracuje. Přitom tato účinnost nezávisí na vlastnostech pracovní látky stroje (benzínová směs nebo vodní pára atd.).

Podstata každého tepelného stroje je v tom, že stroj odebírá teplo teplejší lázni, část tohoto tepla mění na práci a zbytek odevzdává studenější lázni. Ideálním strojem rozumíme takový

stroj, který pracuje bez tření. U takového stroje si představujeme, že může pracovat *urálně*, tzn.: Koná-li děj v jednom směru, může jej konat i v druhém směru. Ideální stroj je přirozeně pouze idealizací skutečných strojů. Tato idealizace je však oprávněná, neboť si umíme představit, že vhodnými technickými úpravami



Obr. 4. Určení absolutní teploty lázní $A, B, C, \dots$ teplejších, než je lázeň L . Stroje jsou schematicky vyznačeny kroužkem. „Svislé“ šipky znamenají teplo, „vodorovné“ šipky znamenají práci. „Vodorovné“ přímky znázorňují lázně; čím je lázeň teplejší, tím je přímka „výše“ kreslená

by bylo možno dosáhnout, aby skutečný stroj se s libovolnou přesností blížil ideálnímu stroji.

Vraťme se nyní ke Carnotově větě. Jelikož účinnost ideálních tepelných strojů závisí jedině na teplotách lázní, je nasnadě myšlenka očíslovat teploty podle účinnosti tepelných strojů. Zatím nám ovšem vadi, že tato účinnost závisí na dvou teplotách. Tento nedostatek však lehce odstraníme, jestliže si zvolíme jednu lázeň, např. lázeň táního ledu, jako standardní. Tuto lázeň označíme L . Všechny uvažované stroje pak budou pracovat mezi lázní, jejíž teplotu chceme očíslovat, a lázní táního ledu L . Úlohu si rozdělíme na dvě části. V první části zavedeme teplotu lázní teplejších, než je lázeň L . Stroje pracující mezi lázní L a teplejšími lázněmi jsou schematicky znázorněny na obr. 4. Nyní podle toho, jakou účinnost má příslušný stroj, můžeme očíslovat teplotu lázně. Protože účinnost je jednoduchou funkcí poměru tepla přijatého z teplejší lázně a tepla odevzdaného studenější lázni, můžeme teploty očíslovat také přímo podle tohoto poměru.

Hned ukážeme, že účinnost stroje je skutečně jednoduchou funkcí příslušného poměru tepla. Účinnost stroje η je totiž poměr vykonané práce W k teple přijatému z teplejší lázně q_A . Platí tedy

$$\eta = \frac{W}{q_A} \quad (1)$$

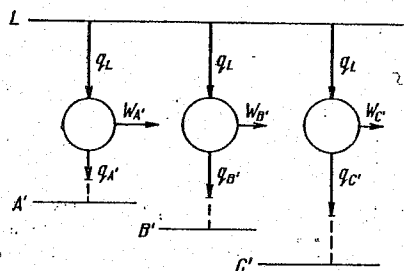
Vykonaná práce je však rozdíl přijatého tepla z lázně A a odevzdaného tepla lázni L , což vyjádříme vztahem

$$W = q_A - q_L. \quad (2)$$

Využitím obou rovnic (1), (2) dostaneme

$$\eta = \frac{q_A - q_L}{q_A} = 1 - \frac{q_L}{q_A}. \quad (3)$$

Vidíme tedy, že skutečně můžeme teploty očíslovat podle poměru příslušných tepel. Za teplotu příslušné lázně si můžeme



Obr. 5. Určení teplot lázní A' , B' , C' , ... studenějších, než je lázeň L . Viz text u obr. 4

zvolit např. přímo poměr tepel q_L/q_A nebo nějakou jednoduchou funkci tohoto poměru.

Zvolit poměr q_L/q_A za teplotu by bylo však nevhodné, protože (jak lze ukázat) tento poměr je tím menší, čím teplejší je lázeň A . Chceme-li, aby teplejšímu stavu odpovídala větší teplota, vezmeme za základ definice teploty poměr tepel q_A/q_L .

Aby se tato stupnice sho-

dovala aspoň v jednom bodě se stupnicí plynového teploměru, vynásobíme tento poměr ještě nějakým číslem a , které určíme za chvíli.

Je tedy definice absolutní teploty libovolné lázně, teplejší než lázně L , dána vztahem:

$$T_A = a \frac{q_A}{q_L}. \quad (4)$$

Úvahy vedoucí k definici absolutní teploty pro lázně teplejší než lázeň L můžeme téměř opakovat pro lázně studenější, než je lázeň L . Do rozpaků můžeme přijít jenom v otázce, zda za základ definice máme vzít opět poměr q_L/q_A , nebo poměr q_A/q_L . Tehdy, když lázeň A' je studenější než lázeň L , je totiž $q_{A'}$ teplo odevzdané studenější lázni, kdežto q_A bylo teplo odebrané teplejší lázni. Pro naše rozhodnutí bude směrodatné to, abychom lázni A a lázni A' , z nichž prvá je teplejší než lázeň L a druhá studenější, nepřisadili stejné číslo. Jelikož $(q_A/q_L) > 1$ (viz obr. 4) a $(q_{A'}/q_L) < 1$ (viz obr. 5), bude náš požadavek splněn, budeme-li definovat teplotu lázně A' (studenější lázně, než je lázeň L) vztahem

$$T_{A'} = a \frac{q_{A'}}{q_L}. \quad (4')$$

Oba výrazy (4), (4') jsou tedy formálně stejné, takže nadále nemusíme tyto dva případy rozlišovat.

Nyní si položíme otázku, jaký je vztah mezi příslušnými teplotami a teplotami dvou libovolných lázní A , B . Pro určitost si myslíme, že lázeň A je teplejší než lázeň tajícího ledu a lázeň B je studenější. Mezi lázni A a L pracuje stroj 1, mezi lázni L a B pracuje stroj 2, který odebírá lázni L právě tolik tepla, kolik tato lázeň přijala od stroje 1. (To lze vždy zařídit.) Teplota lázně A a lázně B je určena vztahy

$$T_A = a \frac{q_{A1}}{q_{L1}}, \quad T_B = a \frac{q_{B2}}{q_{L2}}. \quad (5)$$

Význam symbolů je patrný z obr. 6. Vzhledem k tomu, že

$$q_{L1} = q_{L2}, \quad (6)$$

vyplývá z rovnic (5) vztah

$$\frac{T_A}{T_B} = \frac{q_{A1}}{q_{B2}}. \quad (7)$$

Jelikož spojené stroje 1, 2 si s lázni L nakonec žádné teplo nevyměňují, musí mít podle Carnotovy věty stejnou účinnost, jakou má libovolný stroj pracující mezi lázněmi A , B . Musí tedy také platit

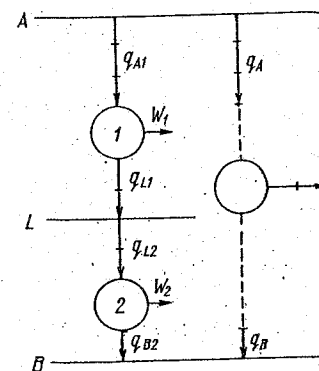
$$\frac{q_{A1}}{q_{B2}} = \frac{q_A}{q_B}. \quad (8)$$

Vezmeme-li v úvahu ještě vztah (8), dostaneme, že poměr teplot lázní A , B se rovná poměru příslušných tepel:

$$\frac{T_A}{T_B} = \frac{q_A}{q_B}. \quad (9)$$

Tento vztah vyjadřuje základní vlastnost absolutních teplot. Teplota lázně A se dá tedy vyjádřit buď podle vztahu (4) jako $T_A = a(q_A/q_L)$, nebo podle vztahu (9) jako $T_A = T_B(q_A/q_B)$. Srovnáním obou výrazů je patrné, že konstanta a má význam teploty tajícího ledu. Tuto teplotu

Obr. 6. K důkazu vztahu $q_A/q_B = T_A/T_B$. Libovolný stroj pracující mezi lázněmi A , B pracuje se stejným výsledkem jako stroje 1 a 2 dohromady



si můžeme označit libovolným číslem. Můžeme si ji označit např. stejným číslem, které udává plynový teploměr, tj. číslem 273,15. Dostáváme tak konečný výraz pro absolutní teplotu:

$$T_A = 273,15 \frac{q_A}{q_L}. \quad (10)$$

Stupnice takto zavedená se nazývá *absolutní*. Nazývá se tak právem, neboť má tyto vlastnosti:

1. nezávisí na empirických vlastnostech látek;
2. je automaticky uspořádána tak, že teplejším stavům odpovídá větší teplota [je-li totiž A teplejší než B , je vzhledem ke vztahu (7) také $T_A > T_B$];
3. poměr teplot vyjadřuje obecnou vlastnost dvou libovolných lázní, které mají dané teploty (touto vlastností je velikost účinnosti libovolného ideálního stroje).

Pozorný čtenář možná postřehl, že jsme zatím neřešili v plném rozsahu, zda definici (4) nemůže být dvěma různým teplotám přiřazeno stejné číslo. Na základě druhé věty termodynamické, o které bude pojednáno později a která je základem pro odvození Carnotovy věty, lze ukázat, že tyto obavy jsou plané.

1,6 Není pravda, že teplota je mírou intenzity pohybu

Zatím jsme studovali vlastnosti těles, aniž jsme se starali, jak tyto vlastnosti souvisejí s chováním atomů nebo molekul, z nichž se tělesa skládají. Představy o atomovém a molekulárním složení látky umožňují ještě hlouběji pochopit, co je teplota.

Názory o tom, jak souvisí teplota se „světem“ atomů a molekul, se přirozeně postupem času upřesňovaly. Základem všech formulací, které jsou dosud vžitě, je tvrzení, že teplota je mírou intenzity pohybu molekul, z nichž se látka skládá. Tato představa, i když měla velký význam v rozvoji fyziky, není již uspokojivá z hlediska současného stavu vědy.

Naznačíme, jak asi tento názor o teplotě vznikl, jak se musel upřesňovat a proč neodpovídá skutečnosti.

Od dob vybudování mechaniky bylo známo, že práce se spotřebuje na změnu kinetické nebo potenciální energie. Kam se však ztratí práce, kterou potřebujeme ke tření dvou těles? Tělesa, jimiž jsme třeli, nezískala ani kinetickou, ani potenciální energii, pokud ovšem každé z těles posuzujeme jako jeden nedílný celek. Přece něco se však s těmito tělesy stalo — tělesa zvětšila svou teplotu.

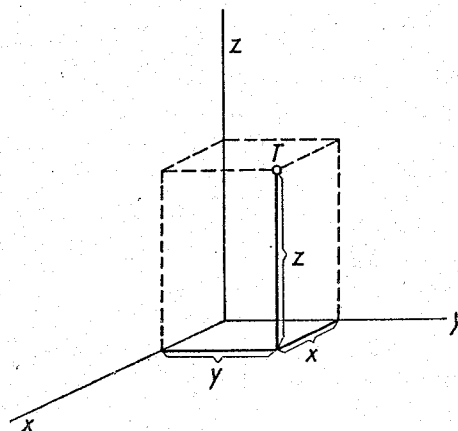
Předpoklad, že látka se skládá z pohybujících se částic (molekul), které se při vyšší teplotě pohybují „silněji“ (intenzivněji) a při nižší teplotě „slaběji“ (méně intenzivněji), umožnil vysvětlit zvyšování teploty následkem tření z jednotného mechanického hlediska. Tak vznikla představa o souvislosti intenzity pohybu s teplotou.

Pojem „silnější“ a „slabší pohyb“ (nebo intenzivnější a méně intenzivní) je však zatím natolik mlhavý, že nám nedovoluje určit číselnou hodnotu teploty. My však známe jistou míru pohybu, je to kinetická (pohybová) energie. Ale kinetická energie každé molekuly se následkem náhodných srážek s jinými molekulami rychle mění. Proto za míru pohybu musíme přijmout jakousi střední energii připadající na jednu molekulu.

Dodáme-li tělesu jistou energii ve formě tepla, projeví se to zpravidla zvětšením teploty; velikost tepla potřebného ke zvýšení teploty o jeden stupeň můžeme měřit. Z těchto měření

lze usoudit, jak závisí střední energie jedné molekuly na teplotě. Prvá měření byla provedena v oblasti teplot blízkých normální teplotě. U plynů o jednoatomových molekulách se ukázalo, že při teplotě T (měřené v absolutní stupnici) připadá na každou molekulu kteréhokoli (jednoatomového) plynu stejný díl energie, a to o velikosti $(3/2)kT$. Přitom k je číslo *stejně pro všechny látky a jejich stavy*.

Uvedená souvislost mezi energií a teplotou je ve shodě s tzv. *ekvipartičním zákonem*, který byl odvozen teoreticky a který zní: *Na každý stupeň volnosti připadá stejný díl energie. Velikost toho dílu je $(1/2)kT$* . Přitom pod počtem stupňů volnosti rozumíme počet údajů, které jsou nutné a které stačí k popsání objektu. Tak např. bod je určen třemi souřadnicemi x, y, z (viz obr. 7), tuhé těleso pěti údaji, neboť kromě polohy těžiště (třemi souřadnicemi) musíme popsat dvěma úhly polohu libovolné úsečky pevně

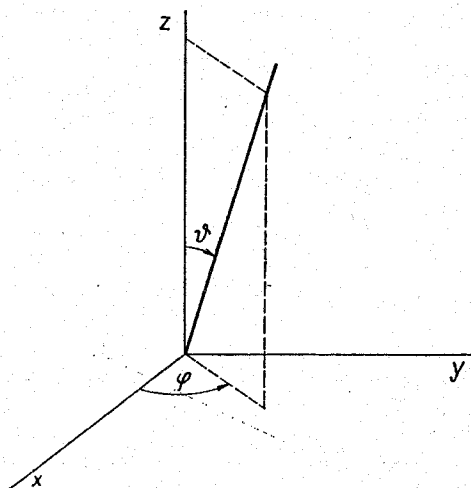


Obr. 7. Volný bod má tři stupně volnosti

spojené s tělesem. (Tyto úhly jsou analogie zeměpisné šířky a délky — viz obr. 8.)

Pokud jednoatomovou molekulu považujeme za hmotný bod, pak má zřejmě tři stupně volnosti. Podle ekvipartičního teorému je tedy skutečně energie připadající na jednu molekulu třikrát $(1/2)kT$, což souhlasí s experimentem.

V tomto stadiu znalostí bychom mohli tvrdit: *Teplota je úměrná střední kinetické energii připadající na jeden stupeň volnosti.* Nebo



Obr. 8. Poloha tělesa při upevněném těžišti je určena dvěma úhly

bychom se mohli vyjádřit takto: *Teplota je střední kinetická energie připadající na jeden stupeň volnosti.*

Tyto věty jsou velmi názorné, a proto jsou často základem pro objasnění pojmu teploty z hlediska molekulárního. Bohužel však nejsou obecně správné.

Abychom ukázali první chybu, odhadněme střední energii připadající na jednu dvouatomovou molekulu. Dvouatomová molekula, pokud může měnit vzdálenost mezi jednotlivými atomy, má 6 stupňů volnosti, neboť každý atom je určen třemi souřadnicemi. Budeme tedy očekávat, že střední energie připadající na dvouatomovou molekulu bude šestkrát $(1/2)kT$. Pokusy však ukazují, že hodnota této energie je sedmkrát $(1/2)kT$. V čem je chyba?

Snadno pochopíme, že energie dodaná systému se může projevit

nejen jako kinetická energie molekul, ale i jako potenciální energie. Výpočty potvrzují, že zvýšení teploty se projeví nejen ve zvýšení kinetické, ale i potenciální energie. Můžeme tedy objasnit výsledek pokusu s dvouatomovým plynem tak, že dvouatomová molekula má při dané teplotě nejen kinetickou energii $6(1/2)kT$, ale ještě potenciální energii o velikosti $(1/2)kT$.

Vezmeme-li v úvahu, že k teplotě přispívá také potenciální energie, zdá se, že můžeme původní „definici“ teploty jen málo opravit: *Teplota je úměrná průměrné celkové energii* (tj. součtu kinetické a potenciální energie), *připadající na jeden člen ve výrazu pro energii.* Teoretický rozbor by však ukázal, že na jeden člen potenciální energie připadá při teplotě T energie $(1/2)kT$ jenom tehdy, mají-li síly vzájemného působení mezi atomy jen zcela určitý charakter. Jestliže je charakter těchto sil jiný, připadá na tento člen jiný příspěvek než zrovna $(1/2)kT$. Nemůžeme tedy předem odhadnout, jaká je závislost mezi teplotou a energií.

To je nejdůležitější bod naší kritiky: *Teplota a energie na sobě závisí, ale pro každou látku je tato závislost jiná.* Jestliže tuto závislost pro danou látku neznáme, pak nemůžeme ze znalosti energie vypočítat teplotu. Energie a teplota jsou dvě samostatné charakteristiky stavu látky.

Abychom ještě více zdůraznili tato fakta, připomeneme, že ekvipartiční zákon je správný jen při dostatečně vysokých teplotách, což se experimentálně projeví tím, že při nízkých teplotách není energie úměrná teplotě. Teoreticky se neplatnost ekvipartičního zákona nedá vysvětlit na základě staré Newtonovy mechaniky. Teprve kvantová mechanika, která se stala mocným nástrojem pro řešení problémů ve světě atomů a molekul, umožnila nám učinit správné předpovědi i v oblasti nízkých teplot. Na základě této nové mechaniky lze odhadnout, že při teplotě blízké absolutní nule je energie pevné látky úměrná T^4 , kdežto energie elektronového plynu T^2 . Vidíme, že moderní teorie předpovídá ještě větší rozmanitost závislostí energie na teplotě.

Vidíme tedy, že naše snaha pochopit teplotu z hlediska molekulárního zatím nevedla k cíli.

1.7 Teplota je mírou neuspořádanosti, která připadá na jednotkovou změnu energie

Při naší snaze pochopit, co je to teplota z hlediska molekulárního, dostali jsme se do slepé uličky. Abychom z ní našli východisko, musíme si znovu uvědomit nejdůležitější vlastnost teploty: Dvě tělesa A , B , která jsou v tepelném styku, mají stejnou teplotu,

jsou-li v tepelné rovnováze. Přitom jsme mlčky předpokládali, že o jediné teplotě celého tělesa A můžeme mluvit tehdy, když je toto těleso ve vnitřní rovnováze. Vidíme tedy, že přijít na to, co je teplota, znamená především zkoumat, co znamená z mikroskopického hlediska stav, který považujeme za rovnovážný. Je všeobecně známo, že těleso, které je izolováno od okolí, samovolně přechází do jistého stavu, ve kterém setrvává tak dlouho, pokud se nezmění působení okolí. To je *stav rovnováhy*. Proč při daném okolí (např. při daném objemu nádoby) má jistý stav přednost před všemi ostatními?

Dříve než odpovíme definitivně na tuto otázku, provedme tento pokus: Do krabice dáme šest mincí. Krabici rádně protřepeme, hlavně ve svislém směru, aby se mince co nejvíce převracely. Pak spočítejme, kolik mincí padlo na rub. Uvidíme, že nejčastěji se vyskytne případ, že na rubu bude právě polovina mincí a že nejméně často nastane případ, kdy všechny mince jsou obráceny jedním směrem. Jak vysvětlíme okolnost, že případ, kdy stejný počet mincí padl na rub jako na líc, nastává nejčastěji?

Kdybychom házeli mnohokrát jednou mincí do výše, padl by rub a líc přibližně stejně často. Každá strana mince má stejnou pravděpodobnost, že padne. Mějme nyní 6 mincí: a, b, c, d, e, f . Případ, kdy jedna mince padne na rub, lze uskutečnit šesti různými způsoby: buď padne na rub a , nebo b , nebo c , nebo d , nebo e , nebo f . Kdežto případ, že právě dvě mince padnou na rub, lze uskutečnit 15 různými způsoby, z nichž pro ilustraci ukážeme aspoň několik způsobů:

$(a, b), (a, c), \dots, (a, f), (b, c), (b, d), \dots$

Proto budeme očekávat, že případ, kdy padnou dvě mince na rub, bude častější než případ, že padne jedna mince na rub. Budeme očekávat, že se to stane častěji v poměru čísel $15 : 6$, provedeme-li velký počet pokusů. Případ, kdy mince budou ukazovat ve stejném počtu rub jako líc, bude nejčastější, neboť ze všech možných případů jej lze realizovat největším počtem způsobů, v našem případě 20 způsoby. Případ, kdy čtyři mince padnou na rub, je totožný s případem, kdy dvě mince padnou na líc, což je zase stejně časté jako případ, kdy na rub padnou dvě mince. Máme tedy pro něj opět 15 způsobů, jak jej realizovat.

Jestliže budeme mít v krabici ne 6 mincí, ale 50 mincí, pak nejen že případ, kdy stejný počet mincí padne na rub i líc, bude nejčastější, ale bude mnohem, mnohem častější než případy ostatní. Případ rovnoměrného rozložení 50 mincí na rub i líc lze realizovat

asi desettisíckrát větším počtem způsobů než případ, kdy 10 mincí padne na rub a zbývajících 40 na líc.

Při protřepávání krabice jsme nahodile obraceli polohy mincí. Molekuly plynu provádějí také náhodné přemístování. Následkem srážek si také náhodně předávají impulsy, a tedy náhodně mění rychlosti.

Řekněme, že stav plynu charakterizujeme při daném objemu tlakem. Tlak není nic jiného než impuls předávaný molekulami stěně. Stejného tlaku lze dosáhnout buď tím, že několik molekul bude mít veliké rychlosti a ostatní hodně malé, nebo tím, že většina molekul bude mít prostředně velké rychlosti. Každý stav lze tedy realizovat mnoha různými způsoby. Počet způsobů, kterým lze daný stav realizovat, se nazývá *termodynamická váha stavu*. Budeme ji označovat písmenem w .

Jelikož počet molekul v nádobě je obrovský, má případ rovnoměrného rozložení molekul nesrovnatelně větší termodynamickou váhu než případ větší nerovnoměrnosti rozložení. Proto systém prakticky celou dobu pozorování je ve stavu největší termodynamické váhy. Je jen nepatrná pravděpodobnost, že se systém z tohoto stavu vychýlí.

Přechod izolovaného systému z nerovnováhy do rovnováhy je vlastně přechodem ze stavu o malé termodynamické váze do stavu o váze největší. Docházíme tak k důležitému tvrzení: *Stav rovnováhy je stavem, který má největší termodynamickou váhu.*

Nám však půjde hlavně o to vyjádřit podmínku vzájemné rovnováhy dvou těles A, B .

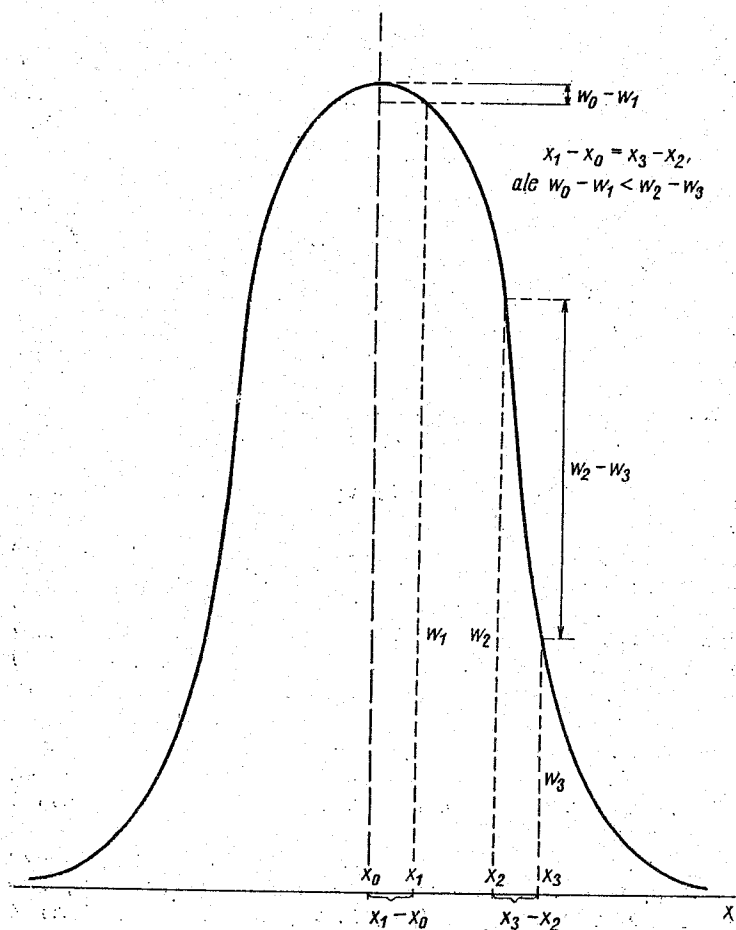
Vraťme se proto k pokusům s mincemi. Tentokrát mějme dvě krabice A, B a v každé z nich nechť je 6 mincí. Jaká je termodynamická váha stavu, který záleží v tom, že v první krabici padne jedna mince na rub a v druhé dvě mince na rub? Hledaný stav první krabice lze uskutečnit šesti různými způsoby. Každému z těchto způsobů realizace stavu mincí v krabici A odpovídá 15 možných dvojic mincí, které mohou být na rubu v krabici B . Je tedy celkový počet způsobů, kterým lze uskutečnit, aby v krabici A byla jedna mince na rubu a v krabici B dvě mince na rubu, šestkrát patnáct způsobů čili 90 způsobů. Číslo 90 je hledaná termodynamická váha.

Hledejme nyní obecně termodynamickou váhu určitého stavu systému, jestliže se systém skládá z dvou těles A, B : Každý stav složeného systému záleží v tom, že v jistém stavu je těleso A a v jistém stavu těleso B . Označme termodynamické váhy stavů w_A , jde-li o těleso A , a w_B , jde-li o těleso B . Hledaná termodyna-

mická váha w_{AB} stavu složeného systému je potom dána vztahem

$$w_{AB} = w_A \cdot w_B. \quad (11)$$

Jestliže si znázorníme, jak závisí termodynamická váha izolovaného systému na stavu (pro jednoduchost znázorňujeme stav jedním parametrem), dostaneme křivku podle obr. 9. Z obrázku je patrné, že při malém vychýlení systému z rovnováhy se termo-



Obr. 9. Při dostatečně malých změnách parametru x se pravděpodobnost — v okolí své maximální hodnoty (rovnováha) — prakticky nemění

dynamická váha skoro nemění. Avšak stejně malá změna stavu jinde než v okolí rovnováhy vede k podstatně větším změnám. Lze tedy podmínku rovnováhy formulovat takto: „Jestliže při dostatečně malých změnách stavu se termodynamická váha nemění, pak systém je ve stavu rovnováhy.“

Aby se tedy neměnila termodynamická váha systému složeného ze dvou podsystémů A , B , musí se termodynamická váha stavu podsystému A tolikrát zvětšit, kolikrát se zmenšila termodynamická váha podsystému B .

Často místo termodynamické váhy zavádíme entropii S jednoduchým vztahem

$$S = k \ln w \quad (12)$$

(kde k je univerzální, na látce nezávislá konstanta). Vidíme, že roste-li termodynamická váha, roste také entropie. Tedy právě tak jako termodynamická váha nabývá i entropie izolovaných systémů v rovnováze maxima. Při dostatečně malých změnách stavu v okolí rovnováhy se také entropie nemění.

V „řeči entropie“ zní vztah (11):

$$S_{AB} = S_A + S_B, \quad (13)$$

kde $S_{AB} = k \ln w_{AB}$, $S_A = k \ln w_A$, $S_B = k \ln w_B$.

Jestliže se při malých změnách stavu složeného systému $A + B$ entropie nemění, pak je to jen následkem toho, že entropie podsystému B se o tolik zmenšila, o kolik se zvětšila entropie podsystému A nebo obráceně.

I v případě, že systém složený z podsystémů A , B je v rovnovážném stavu, přechází neustále alespoň malé množství energie z jednoho podsystému na druhý.

V případě rovnováhy se nemůže celková energie libovolně rozložit mezi podsystémy. Podsystémy A , B mohou mít jen takové energie U_A , U_B , aby při přechodu malé části energie z podsystému B na podsystém A byl pokles entropie jednoho podsystému kompenzován vzrůstem entropie druhého podsystému. Znázorníme graficky závislost entropie na energii pro dva systémy A , B a ke křivkám vyjadřujícím tuto závislost sestrojme řadu tečen.

Jestliže systém A má energii U_A , již odpovídá tečna t_A , může systém B být v rovnováze se systémem A jen tehdy, má-li energii, již odpovídá tečna t_B rovnoběžná s tečnou t_A . Skutečně, jestliže tečny t_A , t_B mají stejný směr, pak při přechodu energie ΔU ze systému B na systém A se entropie systému B zmenší o ΔS_B a o tentýž díl se zvětší entropie systému A (znakem Δ jsme označili malou změnu; např. ΔU je malá změna energie U).

Jelikož směr tečny je určen její směrnici, tj. tangentou úhlu mezi tečnou a osou, na niž jsme nanášeli energii, je podmínka rovnováhy vyjádřena vztahem

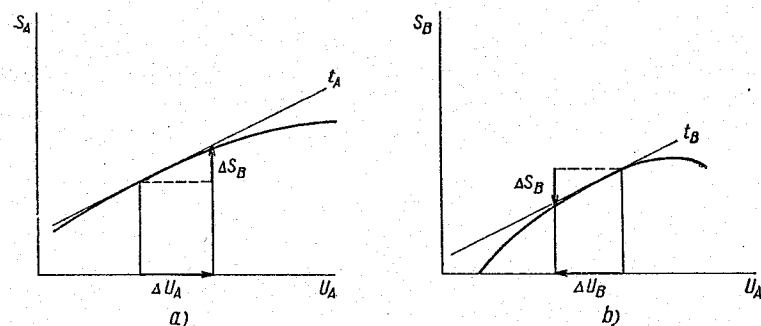
$$\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \beta \quad (14)$$

(viz obr. 10). Jelikož však $\operatorname{tg} \alpha = \Delta S_A / \Delta U_A$, $\operatorname{tg} \beta = \Delta S_B / \Delta U_B$, dostaneme podmínku rovnováhy ve tvaru

$$\frac{\Delta S_A}{\Delta U_A} = \frac{\Delta S_B}{\Delta U_B} \quad (15)$$

Jinými slovy: Dvě tělesa A, B mají stejnou teplotu právě tehdy, platí-li vztah (15). Má tedy výraz $\Delta S / \Delta U$ nejdůležitější vlastnost teploty. Docházíme k důležitému tvrzení: *Teplota je změna entropie připadající na jednotkovou změnu energie.*

Abychom toto tvrzení mohli vyjádřit v názornější formulaci, objasníme ještě, že entropie je mírou uspořádanosti nebo lépe



Obr. 10. Podmínky rovnováhy dvou systémů A, B v tepelném styku

neuspořádanosti systému. Systém mincí pokládáme za uspořádaný, jestliže všechny leží na rubu nebo všechny leží na lici. Otočíme-li jednu minci, narušíme poněkud pořádek. Za nejdokonalejší chaos, tj. největší neuspořádanost, považujeme, když polovina mincí má jednu polohu a druhá polovina druhou polohu. Jelikož zároveň se vzrůstem neuspořádanosti roste termodynamická váha, a tedy také entropie, považujeme entropii za míru neuspořádanosti systému. Můžeme tedy sice méně přesně, ale zato názorněji formulovat:

Teplota je mírou změny neuspořádanosti systému připadající na jednotkovou změnu energie.

Nakonec ještě poznamenejme, že výraz $\Delta S / \Delta U$ souvisí dokonce

jednoduchým vztahem s absolutní teplotou; výraz $\Delta S / \Delta U$ se totiž rovná převrácené hodnotě absolutní teploty $1/T$ ($\Delta S / \Delta U = 1/T$). Použijeme-li dosti známé věty, že entropie tepelně izolovaného systému se při vratném ději nemění, pak tento vztah snadno dokážeme.

Představme si vratný stroj, který odnímá lázni A teplo, koná práci a zbytek tepla odvádí lázni B . Výraz pro změnu entropie systémů A, B můžeme z důvodu, který bude patrný za chvíli, psát formálně takto:

$$\Delta S_A = \frac{\Delta S_A}{\Delta U_A} \Delta U_A, \quad \Delta S_B = \frac{\Delta S_B}{\Delta U_B} \Delta U_B, \quad (16)$$

neboť výrazy $\Delta U_A, \Delta U_B$ se mohou vykrátit. Ale ztráta energie lázně A není nic jiného než ztráta tepla — q_A a zisk energie lázně B je přivedené teplo q_B . Můžeme tedy vztahy (16) přepsat takto:

$$\Delta S_A = -\frac{\Delta S_A}{\Delta U_A} q_A, \quad \Delta S_B = \frac{\Delta S_B}{\Delta U_B} q_B. \quad (17)$$

Jelikož celý systém (dvě lázně plus stroj) je tepelně izolován a stroj koná děj vratný, musí být podle věty, kterou jsme před chvílí citovali, celková změna entropie tohoto složeného systému nulová. To znamená, že ztráta entropie jednoho systému je kompenzována přírůstkem entropie v druhém systému ($\Delta S_A = -\Delta S_B$). Vzhledem k tomuto vztahu a vzhledem ke vztahu (17) dostáváme

$$\frac{\Delta S_A}{\Delta U_A} = \frac{q_B}{q_A} \cdot \frac{\Delta S_B}{\Delta U_B} \quad (18)$$

Protože poměr příslušných tepel q_B/q_A je určen poměrem teplot T_B/T_A , jak byla o tom zmínka v čl. 1,7, musíme považovat výrazy $\Delta S_A / \Delta U_A, \Delta S_B / \Delta U_B$ za převrácené hodnoty absolutních teplot:

$$\frac{1}{T_A} = \frac{\Delta S_A}{\Delta U_A}, \quad \frac{1}{T_B} = \frac{\Delta S_B}{\Delta U_B} \quad (19)$$

Tyto vztahy jsme právě hledali.

*) Bezprostředně je patrné, pouze to, že poměr na levé straně rovnice (18) je roven poměru T_B/T_A . Abychom dospěli ke vztahům (19), musíme si uvědomit, že teplota tělesa A nemůže záviset na stavu tělesa B a obráceně.

ZÁPORNÉ ABSOLUTNÍ TEPLoty

Četné magnetické vlastnosti látek jsou způsobeny složitým vzájemným působením jakýchkoli elementárních magnetů.

Termodynamika, jejíž doménou byly kdysi převážně plyny, stává se den ze dne užitečným nástrojem v oblastech, o nichž zakladatelé termodynamiky neměli ani tušení.

Roku 1939 H. B. G. Casimir a F. K. Du Pré poprvé použili termodynamiky na popis chování souboru spinů, poprvé přiřadili teplotu systému, který není souborem částic. Od té doby uplynulo víc než deset let, než bylo konstatováno, že teplota spinového systému může být záporná.

Uznat existenci záporné absolutní teploty je jen logickým důsledkem předpokladu, že spinovému systému můžeme přiřadit teplotu. Proto této otázce věnujeme náležitou pozornost.

2,1 Co je to spin?

Představme si magnetku ve vnějším magnetickém poli. Magnetka zaujímá polohu ve směru intenzity vnějšího magnetického pole. Jestliže se snažíme magnetku z této polohy vychýlit, magnetka se tomu brání. Dáme-li do téhož místa jinou magnetku, brání se změně polohy buď více, nebo méně, popř. stejně. Mírou toho, jak se magnetka brání vychýlení z rovnovážné polohy v daném magnetickém poli, je tzv. *magnetický moment*: Brání-li se magnetka hodně, je magnetický moment velký, brání-li se málo, je magnetický moment malý. Magnetický moment magnetky závisí na tom, z jakého je magnetka materiálu, jakým způsobem a kdy byla zmagnetována a jaký je její geometrický tvar. Chceme-li vystihnout, jak se magnetka brání změně polohy i při jiné než rovnovážné poloze, je výhodné si představit magnetický moment jako šipku, která je pevně spojena s magnetkou. Velikost této šipky představuje velikost magnetického momentu. V rovnovážné poloze magnetky míří tato šipka ve směru intenzity magnetického pole.

Je známo, že smyčka, kterou prochází elektrický proud, chová se v magnetickém poli jako magnetka. Protože si elektrický proud představujeme jako proud elektricky nabitých částic, můžeme říci, že nabité částice, které se pohybují po uzavřené křivce, mají jistý magnetický moment.

Atom si představujeme jako jádro, kolem něhož obíhají po určitých drahách záporně nabitá částice — elektrony. Musí tedy tyto elektrony vykazovat jistý magnetický moment. Velkým objevem atomové fyziky je však zjištění, že elektrony a jiné částice mají ještě vlastní magnetický moment, který nesouvisí se zmíněným momentem způsobeným pohybem nabitých částic po uzavřené dráze. Zpočátku se vědci domnívali, že tento vlastní moment souvisí s otáčením částice kolem vlastní osy, a nazvali tento moment *spinem* (spin znamená anglicky víření, točení, vrteno atd.). Později se ukázalo, že tato představa je nepřesná, ale název zůstal. Někdy se výraz spin ponechává pro mechanický moment, ale my ho budeme užívat ve významu, který jsme uvedli.

Částice jako elektrony, ale i jádra mají svůj vlastní magnetický moment — spin —, právě tak, jako mají svou hmotu, náboj atd.

Spin se však přece chová poněkud jinak, než se chová magnetický moment obyčejné magnetky. Chování spinu lze popsat jen složitějším matematickým aparátem kvantové mechaniky. Pro naše účely vystačíme však se zjednodušenou představou, do které sice zahrneme pro nás důležité rysy kvantové mechaniky, ale která neodpovídá skutečnosti v plné obecnosti. Podle této představy *nemůže spin zaujímat libovolný směr vzhledem k intenzitě vnějšího magnetického pole, nýbrž jen směry určité*. Tak např. spin elektronu může mířit jen buď proti směru vnějšího pole, nebo ve směru vnějšího pole.

2,2 Teplota spinového systému

Představme si systém složený ze samých spinů ve vnějším magnetickém poli. Spiny si znázorníme šipkami (viz obr. 11).

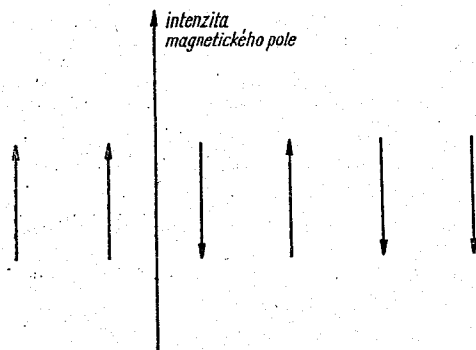
Rekneme, že tyto šipky mohou nabývat dvou poloh: ve směru intenzity vnějšího pole a proti směru intenzity. Abychom určili absolutní teplotu spinového systému, musíme znát — jak je patrné z čl. 1,7 — závislost entropie na energii. Směrnice tečny ke křivce, která znázorňuje tuto závislost, je převrácená hodnota teploty.

Výpočet entropie S se redukuje na výpočet termodynamické váhy w , neboť jak jsme se zmínili v čl. 1,7, je $S = k \ln w$.

Tento úkol je však obdobný, jako určit termodynamickou váhu

stavu systémů mincí. Tak jako mince měly dvě možné polohy, má spin dvě možné orientace. Z makroskopického hlediska je stav spinového systému určen počtem spinů, které mají jistý směr.

Pro jednoduchost si představme šest spinů. Stav, který záleží v tom, že všechny spiny míří ve směru vnějšího pole, lze uskutečnit jedním způsobem; stav, který záleží v tom, že právě jeden spin míří proti směru pole, lze uskutečnit zřejmě šesti způsoby.



Obr. 11. Schéma spinů ve vnějším magnetickém poli

Při dalším zvyšování počtu spinů mířících v požadovaném směru vždy o jeden spin dostaneme postupně tyto termodynamické váhy: 15, 20 a opět 15, 6, 1. Termodynamická váha, a tedy i entropie napřed roste a pak opět symetricky klesá.

Jelikož však na každé otočení spinů proti směru intenzity pole potřebujeme vynaložit práci, zvyšuje se při každém otočení spinů energie systému. Závislost entropie na energii má tedy pro náš systém charakter vyznačený na obr. 12. Protože napravo od maxima je směrnice tečny ke křivce záporná, tj. $(\Delta S/\Delta U) < 0$, je také $(1/T) < 0$, z čehož plyne $T < 0$. Příklad, kdy větší počet spinů míří proti směru pole než ve směru pole, je tedy případ záporné absolutní teploty.

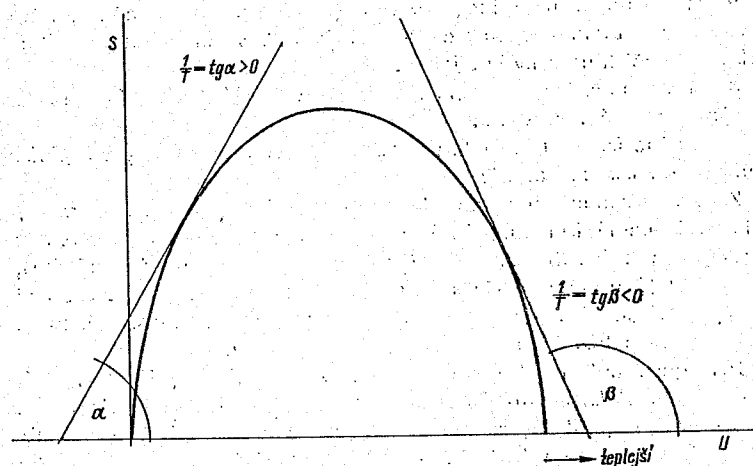
Jak je z grafu (obn. 12) patrné, mají stavy, kterým odpovídá záporná absolutní teplota, větší energii než stavy, kterým odpovídá kladná teplota. Ve smyslu čl. 1, 3 jsou tedy stavy o záporné absolutní teplotě teplejší než stavy o teplotě kladné, neboť zvětšování energie je ekvivalentní přivádění tepla. Jestliže si seřadíme absolutní teploty podle pořadí od studenějších stavů k teplejším, dostaneme toto pořadí: 0, 1, 2, ..., 100, 200, ..., 1 000, ..., ∞ ; $-\infty$, ..., -1 000, ..., -200, ..., -2, -1, 0. Nekonečná tep-

lota odpovídá případu, kdy právě polovina spinů míří proti směru pole.

Kdo dobře promyslel článek 1,2, tomu je zřejmé, že na samém faktu, že stavu teplejšímu odpovídá nižší hodnota čísla přiřazená jisté teplotě, není nic divného. Svědčí to spíš o tom, že stupnice, o které jsme se domnívali, že přiřazuje teplejším stavům vyšší teplotu, zklamala naše očekávání při dobývání nových oblastí teplot.

Ukázali jsme, že systém spinů může nabývat záporné absolutní teploty. V tomto směru má systém spinů celkem výjimečné postavení. Toto výjimečné postavení je v tom, že pro systém spinů existuje jistá nejvyšší (konečná) energie, kterou systém může získat. (Blíže si to objasníme v čl. 2,3.)

Takovou vlastnost nemá např. atomová mřížka. Pohybovou energii mřížky můžeme neomezeně zvětšovat. Proto teplota ato-



Obr. 12. Závislost entropie na energii u spinového systému

mové mřížky nemůže být záporná. Mřížka však tvoří jakési okolí systému spinů. Aby mohl mít systém spinů zápornou absolutní teplotu, musí být teplota spinového systému různá od teploty okolí.

2,3 Pochybnosti o možnosti přiřadit teplotu spinovému systému

Byli jsme dosud zvyklí mluvit o teplotě pevného tělesa, plynu atd. Pevné těleso i plyn je souborem jistých částic — např. molekul. Teplota tedy byla dosud vždy vlastností souboru částic.

Spin však není částice, nýbrž vlastnost částice. Soubor spinů je tedy mnohem abstraktnější pojem než soubor částic. Souboru spinů jsme přiřadili teplotu podle toho, kolik spinů mělo tu nebo onu orientaci. To se až nápadně podobá tomu, jako kdybychom „souboru orientací mincí“ přiřadili teplotu podle toho, kolik mincí je rubem vzhůru. Přitom teplota „souboru orientací mincí“ není totéž jako teplota každé mince zvlášť. Je skutečně možno přiřadit „souboru orientací mincí“ teplotu?

Dřív než na tuto otázku odpovíme, vrátíme se k názornějším případům. Lze vůbec každému souboru částic přiřadit teplotu? Abychom pochopili, proč to vždy nejde, uvedeme několik až úmyslně přehnaných příkladů.

1. Představme si soubor atomů kyslíku, přičemž zvláštností tohoto souboru je to, že každý atom z tohoto souboru je v jiném městě republiky.

2. Mysleme si neionizovaný plyn, např. vodík v nádobě. Za soubor vezmeme všechny elektrony jednotlivých atomů vodíku, které krouží kolem svých jader.

3. Mysleme si hromadu písku, přičemž každé zrnko písku je od jiných tepelně izolováno.

Je možno těmto souborům částic přiřadit teplotu, popř. teplotu různou od teploty okolí?

Začněme rozбором posledního příkladu týkajícího se hromady písku. Zkusme tělísko, které v jistém svém stavu je v tepelné rovnováze s jedním zrnkem (po uvedení do tepelného styku), nemusí být v tepelné rovnováze s jiným zrnkem písku. Jinými slovy, vzájemná rovnováha dvou těles závisí v našem případě na místě, na kterém se uskutečnil tepelný styk.

Při vyslovení nultého zákona termodynamiky (viz 1,1, připomínáme: Petr a Jana jsou sourozenci atd.), který byl základem pro definici teploty, jsme však mlčky předpokládali, že na místě tepelného styku nezáleží. V této větě není totiž nikde zmínka o způsobu tepelného styku.

Hromadě písku v našem příkladě nemůžeme přiřadit teplotu (aspoň ne pro celý soubor jedinou), protože rovnováha s jiným tělesem závisí na místě tepelného styku.

První podmínkou toho, aby jednotlivé části souboru měly ve všech místech stejné tepelné vlastnosti, je, aby jednotlivé části souboru na sebe dostatečně působily. Je to první podmínkou pro to, aby se systém mohl dostat do vnitřní rovnováhy. I když však vzájemné působení částic souboru existuje, nemusí se ještě soubor dostat do vnitřní rovnováhy. Může se totiž stát, že tendence souboru dostat se do rovnováhy je narušována silným působením

okolí. Celá záležitost je tedy vlastně otázkou poměru sil mezi jednotlivými částicemi souboru z jedné strany a mezi částicemi a okolím z druhé strany. Aby soubor částic mohl přejít do vnitřní rovnováhy, musí být vzájemné působení částic podstatně větší, než je vzájemné působení systému a okolí. Tyto podstatné vlastnosti nejsou splněny v našich třech příkladech. To je také důvod, proč těmto souborům nemůžeme přiřadit teplotu.

Jestliže si však myslíme elektronový plyn, který prochází atomovou mřížkou kovu, můžeme tomuto souboru přiřadit samostatnou teplotu, neboť elektrony vzájemně na sebe působí silněji, než působí navzájem elektron a atomová mřížka.

Vnější projevem velkého vzájemného působení částic je to, že soubor obsahující tyto částice se dostane rychle do vnitřní rovnováhy. Vnější projevem slabého působení systému a jeho okolí je to, že systém a okolí se dostávají do vzájemné rovnováhy pomalu. Jestliže systém přechází rychle do vnitřní rovnováhy a teprve pomalu se vyrovnává s okolím, pak můžeme tomuto systému přiřadit teplotu různou od teploty okolí.

Rozřešili jsme otázku, kdy souboru částic je možno přiřadit teplotu popř. různou od teploty okolí. Vraťme se k otázce abstraktnějších souborů, jako je např. „soubor orientací mincí“.

Všimněme si, že když jsme mluvili o souboru částic, např. v čl. 1,6, pak jsme mluvili o tom, jak třeba potenciální energie přispívá k teplotě. A když jsme definovali teplotu v čl. 1,7, zajímala nás jenom souvislost energie s entropií. Zdá se tedy oprávněný další krok k zobecnění pojmu teploty. Teplota už není vlastnost souboru částic, ale vlastnost jistého druhu energie, které částice nesou.

Protože žádná energie nezávisí na způsobu orientací mincí, mohli bychom asi těžko mluvit o teplotě „souboru orientací mincí“. Spin však je nositelem energie (na orientaci spinu závisí energie); můžeme tedy mluvit o teplotě souboru spinů (přesnější by bylo mluvit o teplotě přiřazené jistému druhu energie související s orientací spinů), ovšem za stejných podmínek, jako můžeme nebo nemůžeme mluvit o teplotě souboru částic.

Nyní dostaly naše pochybnosti o možnosti přiřadit teplotu spinovému systému formu jasné a konkrétní otázky:

Má systém spinů tendenci přejít do vnitřní rovnováhy za dobu podstatně kratší, než přejde do rovnováhy s okolím?

R. V. Pound a E. M. Purcell ukázali, že systém spinů jader sloučeniny LiF přejde do vnitřní rovnováhy asi během stotisíciny vteřiny, kdežto do rovnováhy s okolím asi během desítek vteřin nebo několika minut. Poměr mezi těmito dobami je asi takový, jako kdyby

někaké těleso přešlo do vnitřní rovnováhy během několika vteřin, kdežto do rovnováhy s okolím během roku nebo spíše několika desítek let. Je zřejmé, že tyto poměry jsou ještě mnohem výhodnější, než bývá v běžných případech, kde se nerozpakujeme mluvit o teplotě.

Příznivé podmínky pro možnost zavedení absolutní teploty nemusí být u každého spinového systému. Nám však šlo spíše o to, abychom ukázali, že existuje aspoň jeden systém, kterému můžeme přiřadit zápornou absolutní teplotu.

2.4 Je možno teplotu spinového systému měřit?

Zdá se, že nejpřesvědčivější argument, který by prokázal, že naše úvahy jsou správné, by byl, kdybychom teplotu spinového systému uměli přímo měřit. Zatím jsme však uvedli návod, jak teplotu vypočítat, pokud víme, kolik spinů míří ve směru intenzity pole. Zjistit, kolik spinů má příslušnou orientaci, je úkol, který dovedeme řešit. Víme totiž, jak se bude chovat elektromagnetická vlna vyslaná na systém v závislosti na tom, kolik spinů má příslušnou orientaci.

Změřit teplotu spinového systému je totéž, jako změnit teplotu systému, který je s ním v rovnováze. Jestliže se dostane spinový systém do rovnováhy s okolím, pak stačí změnit teplotu krystalu obyčejným teploměrem, který má absolutní teplotní stupnici. Pokusy nasvědčují, že naměřená a vypočtená hodnota jsou stejné.

Na základě představy o teplotě spinového systému dovedeme také vypočítat, jak se bude měnit teplota spinového systému, jestliže budeme měnit vnější pole. Ukazuje se, že při dostatečně pomalém zmenšování intenzity magnetického pole se spinový systém ochlazuje, čehož se již dávno využívá k získávání nízkých teplot.

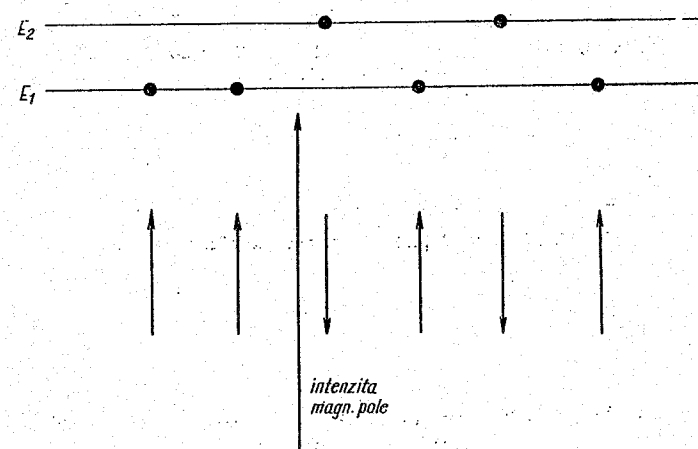
V tomto článku jsme měli na mysli zatím jen kladné teploty spinového systému. Potíž s přímým měřením teploty vzniká, když systém má zápornou absolutní teplotu. Tato potíž záleží v tom, že atomová mřížka, kterou můžeme pokládat za okolí spinového systému, nemůže nikdy nabývat záporných absolutních teplot. V tomto případě má okolí a systém jinou teplotu. Touto okolností jsou značně omezeny možnosti přímého měření teploty. Existuje však přece jeden experiment, který potvrzuje naše představy o záporné absolutní teplotě spinového systému. Krystal sloučeniny LiF má dva druhy jader, jeden druh patří lithiu, druhý fluóru. Ukazuje se, že se může zvlášť mluvit o spinovém systému jader Li a zvlášť o spinovém systému jader F. Pokus nasvědčuje, že když

vypočtené hodnoty obou systémů teplot jsou stejné, pak jsou oba systémy v rovnováze. Má tedy vypočtená hodnota aspoň základní vlastnost teploty.

2.5 Teplota a obsazení energetických hladin

Mnohé otázky se stávají názornějšími, jestliže si stavy zobrazujeme obsazením energetických hladin.

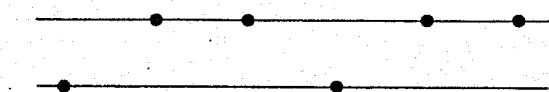
Představme si spin, který může mít ve vnějším poli dvě možné orientace. Je-li orientován ve směru intenzity vnějšího pole, má nižší energii E_1 , je-li orientován obráceně, má vyšší energii E_2 .



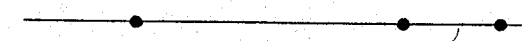
Obr. 13. Spiny a jejich energetické zobrazení

Spin může tedy nabývat dvou možných hodnot energie. V dolní části obr. 13 jsou šipkami naznačeny polohy jednotlivých spinů vzhledem k vnějšímu poli. V horní části obrázku jsou dvě čáry znázorňující energetické hladiny, přičemž vzdálenost hladin odpovídá v jistém měřítku rozdílu energií $E_2 - E_1$. Jestliže spin má jistou energii, je to vyznačeno tečkou na příslušné hladině (viz obr. 13). Jelikož při záporných absolutních teplotách míří většina spinů proti směru vnějšího pole, znamená to, že při záporných teplotách bude vyšší hladina hustěji obsazena než nižší (viz obr. 14). Jestliže obě hladiny jsou obsazeny stejným počtem bodů, odpovídá to teplotě ∞ (viz obr. 15), jestliže jsou všechny body na vrchní hladině, znamená to teplotu 0, ke které se blížíme ze strany záporných teplot, tedy označenou -0 (viz obr. 16).

Ovšem případ dvouhladinového systému je zvláště jednoduchý. Představme si nyní, že spin může nabývat tři poloh, kterým odpovídají tři hladiny energie, např. $E_1 = 1$, $E_2 = 2$, $E_3 = 3$ (v jistých jednotkách). Řekněme, že systém je energeticky izolován a má celkovou energii $E = 12$. Jednotlivé makroskopické stavy se liší podle toho, kolik spinů má příslušnou orientaci, čili podle toho, kolika body jsou obsazeny jednotlivé hladiny v energetickém schématu. Obrázek 17 ukazuje všechny možné makroskopické



Obr. 14. Záporná absolutní teplota dvouhladinového systému v energetickém zobrazení



Obr. 15. Absolutní teplota ∞ v energetickém zobrazení



Obr. 16. Absolutní teplota -0 („méně nula“) dvouhladinového systému v energetickém zobrazení

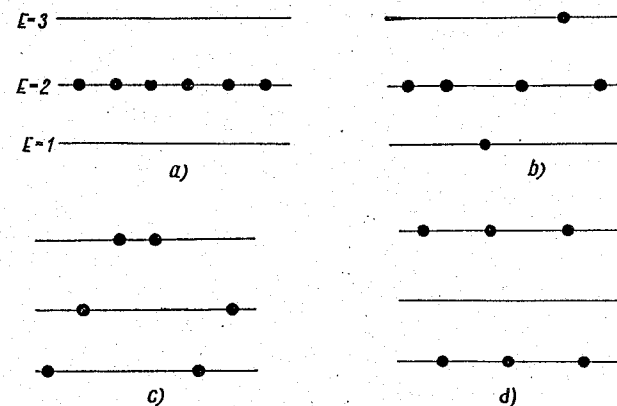
stavy systému šesti spinů, při kterých je celková energie systému $E = 12$. Každý z těchto makroskopických stavů může být realizován jedním nebo více způsoby podle toho, které spiny mají příslušnou orientaci. První případ lze uskutečnit jedním způsobem, druhý 30 způsoby a poslední 90 způsoby. Poslední případ je zřejmě nejpravděpodobnější.

Je-li spinů hodně a existuje-li mezi spiny větší působení, než je působení s okolím, dostane se systém za určitou dobu do nejpravděpodobnějšího stavu, který je v tomto případě stavem rovnovážným.

Tříhladinový systém se podstatně liší od dvouhladinového. Zatímco v dvouhladinovém systému může každému rozložení bodů v energetickém schématu odpovídat teplota, u tříhladinového odpovídá teplota v nejlepším případě jen nejpravděpodobnějšímu

rozložení bodů (viz obr. 17), neboť jenom tomuto rozložení může odpovídat stav rovnováhy.

Nakonec si vysvětlíme, které systémy nemohou nabývat záporných teplot. Záporná teplota je vždy spojena s tím, že vyšší hladiny jsou více obsazeny než nižší. U systémů, které mají nějakou nejvyšší energetickou hladinu, nezbyvá při zvyšování energie nic jiného, než obsazovat vrchní energie. Takové systémy mohou tedy nabývat záporných absolutních teplot. Avšak u souboru částic, které mnoho získávat libovolně velkou energii, taková nutnost nenastává. V tomto druhém případě je nejpravděpodobnější rozdělení částic na energetických hladinách takové, že vyšším hladinám odpovídá menší obsazení.



Obr. 17. Možné makroskopické stavy tříhladinového systému o celkové energii $E = 12$

2,6 První způsob získání záporné absolutní teploty

Princip metody, kterou byla poprvé získána záporná absolutní teplota, je velmi snadno pochopitelný, i když metoda sama je experimentálně dosti náročná.

Jak víme, záporná teplota neznámá nic jiného, než že většina spinů je orientována proti intenzitě vnějšího pole. Jestliže směr intenzity velmi rychle obrátíme, spiny zachovají svou orientaci, zato intenzita pole bude nyní opačná. Po technické stránce je nejobtížnější, aby změna pole byla provedena řádově za desetiny mikrosekundy.

Jelikož se dnes záporných absolutních teplot využívá v kvanto-

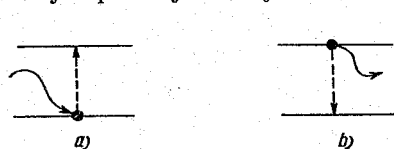
vých zesilovačích, jak o tom bude zmínka v příštím článku, bylo vypracováno mnoho metod, jak záporné absolutní teploty získávat. Čtenář, který by se chtěl o tom blíže poučit, najde podrobnější informace v pracích pojednávajících o kvantových zesilovačích (laserech a maserech).

2.7 Kvantový zesilovač

Když E. M. Purcell a R. V. Pound vytvořili stavy se zápornou absolutní teplotou, pravděpodobně netušili, že mají princip přístroje, který se během deseti let stane jednou z největších senzací moderní vědy.

Nebudeme podrobně popisovat funkci a použití těchto přístrojů, kvantových zesilovačů, nýbrž se spokojíme s uvedením hlavních principů.

Tyto přístroje zesilují elektromagnetickou vlnu jisté frekvence.



Obr. 18. Při přechodu „zdola nahoru“ se elektromagnetická vlna pohltí a při opačném přechodu se vyzáří

Abychom to pochopili, znázorníme si opět spinový systém v energetickém spektru (obr. 18). Při změně orientace spinu přechází obrazně řečeno spin z jedné energetické hladiny na druhou, tzn. že buď energii získává, nebo ztrácí. V případech, které nás tady zajímají, se ztráta energie

spinového systému projeví ve vyzáření elektromagnetické vlně, jejíž frekvence je vždy úměrná rozdílu energií obou hladin

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h} \quad (1)$$

(kde h je tzv. Planckova konstanta).

Spin může přecházet z horní hladiny na dolní buď samovolně, nebo pod vlivem dopadající elektromagnetické vlny, pokud tato vlna má frekvenci danou také vztahem (1). Naproti tomu k přeskoku z nižší hladiny na vyšší nemůže dojít samovolně. V tomto případě se děje přeskok jen pod vlivem dopadající vlny [o frekvenci dané opět vztahem (1)]. Při tomto přeskoku dochází k pohlcení elektromagnetického záření.

Jestliže tedy na spinový systém dopadá elektromagnetická vlna dané frekvence, nastávají dva vzájemně protichůdné jevy: pohlcování záření následkem přeskoků spinů z nižší hladiny na vyšší a vyzáření energie následkem přechodu systému z vyšší

hladiny na nižší. Podle toho, který z těchto jevů převládá, se výsledek jeví buď jako zeslabení dopadající vlny, nebo jako zesílení.

Jistý spin pod vlivem dopadajícího záření může, ale nemusí změnit svou orientaci, tj. může nebo nemusí přeskočit z jedné energetické hladiny na druhou. My nemůžeme říci, zda daný spin změní, nebo nezmění pod vlivem jistého dopadajícího záření svou orientaci, můžeme v nejlepším případě odhadnout, jaká je pravděpodobnost, že tuto orientaci změní. Ostatně nás ani tak dalece nezajímá, který spin změní orientaci, nýbrž, kolik spinů přejde v energetickém zobrazení shora dolů a kolik opačně.

Abychom situaci lépe pochopili, představme si, že se ptáme, kolik jablek a kolik švestek spadne pod vlivem jistého krupobití v daném městě. My nemůžeme říci, která jablka spadnou a které švestky spadnou, ale podle vyzrálosti plodů, podle jejich polohy v koruně, podle jejich velikosti atd. můžeme odhadnout, který plod má větší pravděpodobnost spadnout než druhý. Abychom tento příklad co nejvíce přiblížili případu, který nás vlastně zajímá, předpokládejme, že zmíněná pravděpodobnost je pro všechny vyšetřované plody stejná. (Je stejná pro všechna jablka i pro všechny švestky.)

Spadne víc švestek nebo jablek? Každý jednotlivý kus ovoce má stejnou pravděpodobnost spadnout. Je-li v daném městě na stromech více jablek než švestek, spadne více jablek, v obráceném případě více švestek.

Jednomu druhu ovoce odpovídá v našem případě jedna orientace spinu, druhému opačná. Spiny obou orientací mají totiž stejnou pravděpodobnost změnit pod vlivem daného záření svou polohu. Naším krupobitím je dopadající elektromagnetická vlna, kterou si ostatně také můžeme představit jako proud fotonů.

Je tedy zřejmé: Bude-li v energetickém zobrazení převyšovat počet spinů na vyšší hladině počet na hladině nižší, budou pod vlivem dopadajícího záření přechody shora dolů hojnější než obrácené. To se musí projevit tím, že dopadající vlna se zesílí.

Jelikož systémy se zápornou absolutní teplotou mají vyšší hladiny více obsazeny než nižší, zesilují dopadající záření. Přitom však není podmínkou zesilování, aby příslušný systém byl v dostatečné vnitřní rovnováze, není tedy nutno, aby mu bylo možno přiřadit teplotu. Skutečně mnohé typy kvantových zesilovačů neobsahují systémy se zápornou absolutní teplotou, ale nerovnovážné stavy systému. Přesto je možné, že pojem záporné absolutní teploty může být užitečný i zde. Výbušný motor pracuje také s látkami, které nejsou během procesu v tepelné rovnováze.

Chceme-li však vystihnout např. hranice možné účinnosti tohoto motoru, s výhodou používáme představ ideálního tepelného stroje, u kterého je tepelná látka v každém okamžiku v rovnováze. Podobně může být užitečné vyšetřovat kvantový zesilovač jako systémem se zápornou teplotou.

Již jsme se zmínili, že *kromě vynucených přechodů* může docházet k *samovolnému přechodu* z vyšší hladiny na nižší, tzn. k *samovolnému vyzařování*. Samovolné vyzařování bylo principem všech dosud známých zdrojů záření (tepelné záření, luminiscence atd.). Samovolné vyzařování se podařilo v kvantovém zesilovači potlačit na nejmenší míru, takže naprosto převládajícím jevem je právě vynucené záření.

Při samovolném vyzařování vysílají jednotlivé atomy elektromagnetické vlny náhodně v různých okamžicích. Toto záření je vlastně jakýmsi shlukem vln. Podobá se vlnění, které vznikne na vodní hladině, když jsme na ni rozhodili hrst kamínků.

V běžných úvahách v geometrické optice tuto složitou strukturu vlnění zanedbáváme, a proto z nich také není patrné, proč optickými zařízeními nelze získat libovolně úzký paprsek. Kdybychom tuto složitou strukturu záření vzali v úvahu, viděli bychom, že jsou hranice omezující možnost soustředit paprsek.

Paprsek vycházející z kvantového zesilovače se mnohem víc podobá ideálně pravidelné vlně. Je to způsobeno tím, že jednotlivé elementární zdroje (např. atomy) nevysílají záření náhodně, ale na „povel“, který dostanou od dopadající vlny.

Paprsek vysílaný z kvantového zesilovače lze soustředit do tak úzkého svazku, že by vytvořil na Měsíci světelnou skvrnu o polooměru pouhých tři kilometrů. V takto úzkém svazku je energie zkoncentrována na malý prostor, takže tento paprsek je schopen „navrtat“ diamant nebo jiný materiál. Této vlastnosti se také dá využít v chirurgii. Vznikly také představy o možnosti využít těchto paprsků jako „paprsků smrti“, které by buď nahrazovaly lehké zbraně, nebo by dokonce zasahovaly citlivá místa raket. Ve střízlivějších úvahách se však poslední možnost pokládá za značně fantastickou.

Jak známo, přenášení slova nebo obrazu na dálku záleží v tom, že se moduluje nosná elektromagnetická vlna. Na nosnou vlnu se „zapiše“ řada informací, které se v přijímači dešifrují. Nosná vlna z obyčejných zdrojů má, jak už bylo řečeno, mnohem více nepravidelností než vlna z kvantového zesilovače. Lze tedy na vlnu z kvantového zesilovače „napsat“ víc informací než na vlnu z obyčejných zdrojů, tak jako křídou napíšeme víc informací na hladkou tabuli než na hrubou zeď. To je jedna z okolností, kvůli

které dáme při přenášení zpráv přednost takové pravidelné vlně.

Vzhledem k tomu, že paprsek vycházející z kvantového zesilovače má velmi přesnou frekvenci (tzn. že počet kmitů za jednotku doby je dán velmi přesně), může se takového paprsku použít k odměřování času.

Tím jsme vyjmenovali nejdůležitější možnosti využití kvantových zesilovačů. Přitom jsme se nezmnili o mnoha dalších možnostech ve vědeckém výzkumu, v měřicí technice atd.

Podle toho, v které oblasti frekvencí kvantový zesilovač pracuje, nazývá se maser nebo laser. Jsou však běžné i další názvy.

UČEBNICE TVRDÍ, ŽE ABSOLUTNÍ TEPLOTA NEMŮŽE BÝT ZÁPORNÁ

V minulé kapitole jsme sledovali argumenty, které nás přesvědčovaly, že existuje záporná absolutní teplota. Ať jsou tyto argumenty jakkoliv vážné, je podezřelé, že jsou v rozporu s tvrzením učebnic termodynamiky, aspoň těch, které byly vydány před rokem 1951. Jsou snad v těchto učebnicích nějaké logické chyby nebo nějaké špatné předpoklady? Nebo jsou důkazy v učebnicích správné, ale argumenty uváděné v minulé kapitole nepřesvědčivé?

Dříve než dáme na tyto otázky odpověď, měli bychom zopakovat hlavní myšlenky důkazů uváděných v učebnicích. V učebnicích se tradují v podstatě dva typy důkazů.

Pokud jde o první typ důkazu, bude čtenář odkázán na to, aby uvěřil, že v tomto důkaze je docela obyčejná chyba ze základů vyšší matematiky. Tato chyba se do důkazu vloudila tím, že byl k jistým účelům odvozen vzorec, kterého teprve později bylo použito k důkazu o nezápornosti teploty. Při odvozování tohoto vzorce se však mlčky předpokládalo, že teplota je kladná, takže byl vlastně veden důkaz v kruhu. (Pro ty, kteří znají základy vyšší matematiky: Bylo použito vztahu $\int (1/T) dT = \ln T$, což platí, jen když $T > 0$; obecně platí $\int (1/T) dT = \ln |T|$.) Je vidět, že se nemusí vyplatit používat vzorce bez znalosti všech předpokladů, za kterých platí.

Podstata důkazu druhého typu je vyložena v následujících dvou článcích.

3.1 Princip důkazu

Absolutní teplotu lázně A jsme definovali vztahem $T_A = 273,15 q_A/q_L$. Celý důkaz o nezápornosti absolutní teploty se opírá o tvrzení, že písmena q_A , q_L znamenají čísla kladná.

Pod písmenem, které označuje teplo, můžeme mít na mysli dvě různé veličiny. V prvním případě je to veličina vždy kladná, v druhém případě buď veličina kladná, nebo záporná podle toho, zda systém teplo přijímá, nebo odevzdává.

Označme malým písmenem q teplo v prvním významu, tj. pod písmenem q si myslíme vždy kladné číslo (v krajním případě číslo rovné nule). Velkým písmenem Q označíme teplo v druhém významu. Vztah mezi těmito dvěma veličinami je dán tímto pravidlem:

Je-li q teplo přijaté, je $Q = q$, a tedy $Q > 0$.

Je-li q teplo odevzdané, je $Q = -q$, a tedy $Q < 0$.

Máme-li na mysli stroj, který teplejší lázni odnímá teplo q_A a studenější lázni odevzdává teplo q_L (viz např. obr. 4), je výraz pro práci v prvé symbolice $W = q_A - q_L$, kdežto v druhé symbolice $W = Q_A + Q_L$. V čl. 1,5 jsme však užili pro práci prvního výrazu; měli jsme tedy v tomto článku pod písmeny q_A , q_L na mysli čísla kladná. Mají tedy všechny lázně znaménko stejné jako znaménko teploty tajícího ledu. Považujeme-li definitoricky teplotu tajícího ledu za kladnou, je také kladná teplota všech ostatních lázní. Tím je důkaz proveden, ovšem jenom tehdy, je-li oprávněn mlčky učiněný předpoklad, že jediným možným typem vratného stroje pracujícího mezi dvěma lázněmi je stroj, který — pracuje-li v jednom směru — odnímá teplo teplejší lázni, část tohoto tepla předává studenější lázni a zbytek přeměňuje v práci (viz např. obr. 4).

Abychom ukázali, že předpoklad o existenci pouze tohoto typu stroje je podstatný pro důkaz o nezápornosti absolutních teplot, myslíme si aspoň na chvíli, že mohou existovat jiné typy strojů. Představme si, že existuje stroj, který odnímá teplo jak teplejší, tak studenější lázni a koná kladnou práci. Je-li lázeň A teplejší a lázeň L studenější, je vykonaná práce $W = q'_A + q'_L$. Veličina q'_A je teplo přijaté tímto uvažovaným strojem z lázně A , veličina q'_L je příslušné teplo přijaté z lázně L . Rozumíme-li pod účinností právě vyšetřovaného stroje poměr vykonané práce a tepla přijátého z teplejší lázně, je účinnost takového stroje dána vztahem

$$\eta' = \frac{W}{q'_A} = \frac{q'_A + q'_L}{q'_A} = 1 + \frac{q'_L}{q'_A}. \quad (1)$$

Vidíme, že vztah mezi účinností a příslušným poměrem tepel je u stroje tohoto typu jiný než u běžného stroje, pro jehož účinnost platí

$$\eta = \frac{W}{q_A} = \frac{q_A - q_L}{q_A} = 1 - \frac{q_L}{q_A}. \quad (1')$$

Existence dvou rozdílných vztahů mezi účinností a příslušným poměrem tepel způsobuje, že původní definice absolutní teploty je nepoužitelná. Abychom mohli totiž pokládat definici teploty

$T_A = 273,15 \, q_A/q_L$ za oprávněnou, musíme mít zaručenu platnost těchto dvou vět:

Věta 1. Mají-li lázně A , A' stejnou teplotu (rozuměj empirickou), pak $q_A/q_L = q_{A'}/q_L$.

Věta 2. Mají-li lázně A , B různou teplotu, pak $q_A/q_L \neq q_B/q_L$. (Symboly q_L , q'_L , $\bar{q}_L$ znamenají různá tepla přijatá nebo odevzdaná lázni L .)

První věta nám zajišťuje, aby dvěma lázním o stejné empirické teplotě byla přiřazena stejná absolutní teplota. Druhá věta je nutná k tomu, aby dvěma lázním o různých empirických teplotách byly přiřazeny také různé absolutní teploty.

Správnost věty 1 je v podstatě zaručena Carnotovou větou, která tvrdí, že účinnost všech vratných strojů pracujících mezi týmiž lázněmi je stejná. Správnost věty 2 nemáme zatím zaručenu, ale zpravidla se pokládá za samozřejmé, že vedle Carnotovy věty platí také její protějšek:

Mají-li lázně A , B různou teplotu, pak účinnost stroje, který pracuje mezi lázněmi A a L , a stroje, který pracuje mezi lázněmi B a L , je různá.

Na první pohled by se mohlo zdát, že tato věta nám zaručí platnost věty 2. Ve skutečnosti však z nerovnosti $\eta \neq \eta'$ neplyne nerovnost příslušných poměrů tepel, neboť vztah mezi účinností a příslušným poměrem tepel není jednoznačný. Platí totiž buď vztah (1), nebo (1'). Vyjádříme-li však účinnost v symbolice velkých písmen (viz str. 49), dostaneme pro oba typy strojů shodný tvar:

$$\eta = 1 + \frac{Q_L}{Q_A}, \quad \eta' = 1 + \frac{Q'_L}{Q_A}. \quad (2)$$

Nemůžeme, jak jsme ukázali, zaručit platnost věty 1 a věty 2, ale zdají se oprávněné obdobné věty, v nichž místo q_L/q_A vystupují Q_L/Q_A apod.

Za předpokladu, že existují jiné typy strojů, než se běžně uvažuje, je tedy původní definice teploty nepoužitelná. Je však možno použít obdobné definice

$$T_A = -273,15 \frac{Q_A}{Q_L}. \quad (3)$$

V případě, že mezi lázněmi A a L pracuje tepelný stroj běžného typu, je tato definice shodná s původní definicí, neboť $Q_A/Q_L = -(q_A/q_L)$.

Nyní přicházíme k důležitému bodu celého výkladu. Co znamená $T_A < 0$?

Tato nerovnost znamená $Q_A/Q_L > 0$; čili stroj, který pracuje mezi lázněmi A , L , odnímá teplo z obou lázní nebo oběma lázním

teplo odevzdává. Skutečnost, že tento stroj neexistuje, znamená, že neexistují záporné absolutní teploty.

Ukázali jsme, že jádrem celé problematiky je otázka, které typy strojů mohou v přírodě existovat. Ukáže-li se, že jediným vratným typem stroje pracujícím mezi dvěma lázněmi je běžný typ, pak je náš původní důkaz o nezápornosti absolutní teploty správný.

Tato otázka se řeší na základě tzv. druhé věty termodynamické, která je také základem pro odvození Carnotovy věty, popř. jejího protějšku (viz str. 50).

3.2 Druhá věta termodynamická a její důsledky

Náš první úkol je rozhodnout, které typy tepelných strojů majících k dispozici dvě tepelné lázně mohou v přírodě existovat.

Abychom na žádný typ stroje nezapomněli, najdeme si napřed všechny logické možnosti typů strojů, pokud neodporují zákonu zachování energie.

Jeden typ stroje budeme pokládat za různý typ od jiného typu, jestliže se jeho schéma liší aspoň ve směru jedné šipky, popř. chybí-li v jednom typu příslušná šipka vůbec. Všechny možných různých typů strojů, které neodporují zákonu zachování energie, je 12. Schémata těchto strojů jsou vyznačena v tab. 1. Ve stejném řádku jsou vždy zakresleny stroje, které se od sebe liší tím, že právě všechny šipky míří vzájemně opačně. Může-li stroj, který pracuje v jednom směru, také pracovat v druhém směru, potom se takový stroj nazývá, jak jsme se již zmínili, stroj vratný. Může-li tedy stroj pracovat obráceně než stroj vyznačený ve stejném řádku, pak je to vratný stroj.

Všimněme si aspoň některých typů strojů vyznačených ve zmíněné tabulce. Stroj typu 1a je idealizací obyčejného tepelného motoru, stroj 1b pracuje jako chladnička. (Všimněme si, že chladnička musíme dodávat práci.) Stroj typu 0a můžeme snadno realizovat, neboť jej představuje každé těleso. Každým tělesem můžeme totiž přenášet teplo z teplejší lázně na studenější. Prohlédneme si nyní poslední dva řádky naší tabulky. Tam jsou vyznačeny stroje, které, ačkoliv mají k dispozici dvě lázně, využívají jen jedné z nich. První stroj v předposledním řádku získává teplo z teplejší lázně a veškeré je přeměňuje v práci, proto jsme tento stroj označili písmeny TP (Teplo-Práce). Chceme-li vyznačit, které z lázní stroj používá, dáme do závorky za symbol stroje symbol příslušné lázně, např. $TP(A)$. Potom první stroj v posledním řádku je stroj $TP(B)$. Druhé stroje v předposledním a posledním řádku přeměňují veškerou práci v teplo, a proto jsou označeny PT

Tabulka 1

Všechny myslitelné typy strojů, které mají k dispozici dvě tepelné lázně a vyhovují zákonu zachování energie. Horní čára znamená teplejší, dolní studenější lázeň. Kroužek znázorňuje stroj. „Svislé“ šipky znázorňují teplo a „vodorovné“ práci

Typ stroje	Schéma stroje		Poznámka
	a	b	
0			0a: Vedení tepla z teplejší lázně na studenější 0b: Vedení tepla ze studenější lázně na teplejší bez dodávání práce
1			1a: Obyčejný motor 1b: Obyčejná chladnička
2			Stroje pracující mezi zápornými teplotami (viz kap. III)
3			Stroje, které by pracovaly mezi kladnou a zápornou teplotou
TP(A) PT(A)			TP: Přímá přeměna tepla v práci (perpetuum mobile II. druhu) PT: Přímá přeměna práce v teplo (tření)
TP(B) TP(A)			TP: Přímá přeměna tepla v práci (perpetuum mobile II. druhu) PT: Přímá přeměna práce v teplo (tření)

(Práce-Teplo). Podobně za symbol stroj *PT* můžeme připojit symbol lázně. „Stroje“, které třením mění práci v teplo, jsou stroje typu *PT*.

Nyní si položíme otázku, které z těchto strojů jsou možné.

S. Carnot si představoval teplo jako kapalinu a tepelný stroj podobně jako mlýnské kolo, které je poháněno spádem vody. Tak jako mlýnské kolo potřebuje spád vody, tak podle Carnota potřebuje tepelný stroj spád tepla. Kdyby teplo bylo skutečně kapalinou, pak by veškeré teplo přešlo z horní lázně na dolní (z teplejší na studenější) a navíc by se konala práce. My však dnes víme, že práce se získává na újmu jistého tepla, takže tyto Carnotovy představy jsou neudržitelné. Přes tyto špatné předpoklady došel Carnot k závěru o účinnosti tepelných strojů, které byly praxí potvrzeny.

Tento rozpor řešili R. Clausius a W. Thomson nezávisle na sobě, ale takřka současně. Oba došli k závěru, že Carnotovy úspěšné výsledky neplynou z žádné tehdejší teorie a že je třeba vyslovit nový zákon.

R. Clausius učinil předpoklad, že teplo nemůže bez přivádění vnější práce přecházet z tělesa studenějšího na teplejší, a ukázal, že tento předpoklad stačí k dokázání Carnotovy věty o účinnosti strojů. V naší terminologii Clausiova věta zní: *Neexistuje stroj typu 0b*.

Se stejným úspěchem vyslovil W. Thomson větu, která vyjadřuje, že neexistuje stroj, jenž by trvale měnil veškeré teplo získané z jedné lázně v práci, aniž by se část tepla přenášela na studenější lázeň. V našem označení zní *Thomsonova věta* takto: *Neexistuje stroj typu TP*.

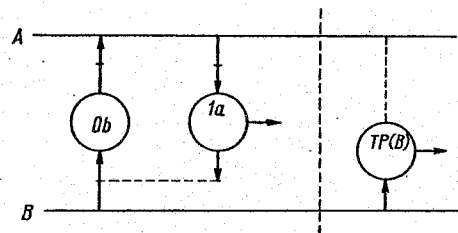
Obě věty považujeme jen za dvě různé formulace jediného zákona — druhé věty termodynamické. Četné důsledky plynoucí z této věty nebyly po celých sto let v rozporu s praxí.

Protože v další kapitole vzniknou pochybnosti, zda věta Clausiova i Thomsonova vyjadřují jedno a totéž (jsou ekvivalentní), zopakujeme často uváděné důkazy. Abychom dokázali, že obě věty vyjadřují totéž, dokážeme, že z neplatnosti jedné věty plyne neplatnost druhé věty a obráceně. Je to běžný důkaz metodou sporu.

Předpokládejme, že napřed neplatí věta Clausiova. Existuje tedy stroj typu *0b*. Vložme tedy kromě tohoto stroje mezi dvě lázně ještě stroj typu *1a*, jenž odebere z teplejší lázně právě to teplo, které tam přivedl první stroj (viz obr. 19). Výsledný efekt je, že lázeň teplejší si nevyměňuje žádné teplo, lázeň studenější teplo ztratila a stroj vykonal práci. Toto zařízení (spojení obou

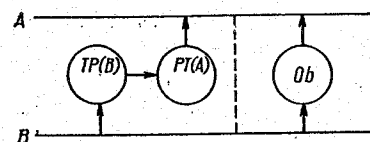
strojů) pracuje vlastně jako stroj typu TP . To by však znamenalo, že neplatí ani Thomsonova věta, což jsme měli dokázat.

Nechť nyní neplatí Thomsonova věta, to znamená, že existuje stroj typu TP . Můžeme nyní práci vyrobenou strojem $TP(B)$

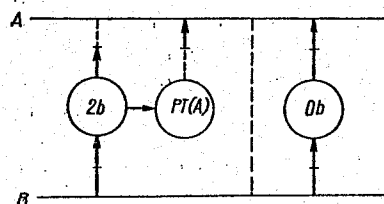


Obr. 19. Z neplatnosti Clausiovy věty plyne neplatnost věty Thomsonovy
Stroje $0b$ a $1a$ spojené podle obrázku jsou ekvivalentní stroji $TP(B)$

přeměnit (např. třením) v teplo dodané teplejší lázni. Schematicky přeměna práce v teplo je vyznačena strojem PT (viz obr. 20). Spojení těchto dvou strojů je zařízení, které odebírá studenější lázni teplo



Obr. 20. Z neplatnosti Thomsonovy věty
plyne neplatnost věty Clausiovy



Obr. 21. Stroj typu $2b$ odporuje Clausiově větě

Zbývá nám prozkoumat otázku, zda mohou existovat vratné stroje typu 2 a typu 3.

Spojíme-li stroj $2b$ se strojem $PT(A)$ tak, jak ukazuje obr. 21, vede to zřejmě ke sporu s Clausiovou větou. Neexistuje tedy stroj

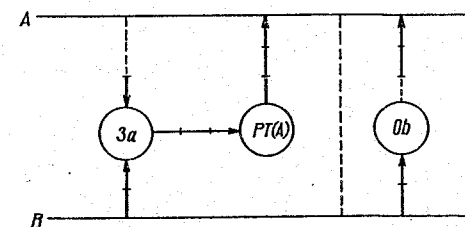
a celé je předává teplejší lázni. Přitom není třeba přivádět vnější práci, a je to tedy stroj typu $0b$. Z neplatnosti Thomsonovy věty jsme dokázali existenci stroje $0b$ čili neplatnost Clausiovy věty.

V těchto dvou krocích jsme tedy dokázali ekvivalenci obou vět.

Ať vezmeme kteroukoliv z těchto vět za základ, rozhodně nemohou existovat vratné stroje zobrazené v prvním, předposledním a posledním řádku. Tím jsme dostali zároveň aspoň částečnou odpověď na otázku, které vratné stroje nejsou možné.

typu $2b$, a tedy pokud existuje stroj typu 2, pak není vratný. Podobně spojením stroje $3a$ se strojem $PT(A)$ dojdeme ke sporu s Clausiovou větou, jak je patrné z obr. 22. Neexistuje tedy vratný stroj typu 3.

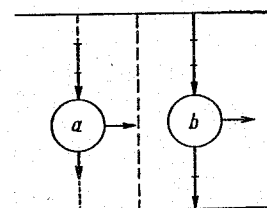
Jediným možným vratným strojem je tedy stroj typu 1. Z tohoto hlediska jsou předpoklady posledního článku zřejmě správné.



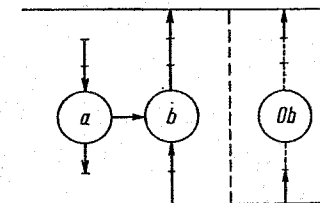
Obr. 22. Stroj typu $3a$ odporuje Clausiově větě

Nyní nám zbývá dokázat Carnotovu větu, kterou jsme již dříve vyslovili: Účinnost všech vratných strojů, pracujících mezi týmiž lázněmi, je stejná.

Na obr. 23 jsou vyznačeny dva stroje typu 1, o nichž budeme předpokládat, že jsou vratné. Nechť oba stroje konají stejnou



Obr. 23. Stroj a má větší účinnost než stroj b



Obr. 24. K důkazu Carnotovy věty

práci (to jde vždy zařídit). Stroj a , jak je patrné z obrázku, má větší účinnost než stroj b , neboť na stejně velkou práci potřebuje méně tepla. Nechme nyní stroj b pracovat vratně a nechť přijímá právě tu práci, kterou stroj a vyrobil. Je vidět (viz obr. 24), že spojení obou strojů představuje stroj typu $0b$, a je tedy v rozporu s Clausiovou větou. Podobně lze dokázat, že stroj b nemůže mít menší účinnost než stroj a . Zbývá jediná možnost: Oba stroje mají stejnou účinnost.

Čtenář by asi snadno dokázal také větu obrácenou: Jestliže lázně A, B mají různou teplotu, pak stroje pracující mezi lázněmi A, L a lázněmi B, L mají různou účinnost.

Ukázali jsme tak, že předpoklady, z nichž jsme dokázali nezápornost absolutní teploty v minulém článku, vyplývají z obecně uznávané druhé věty termodynamické.

4,1 Kdo má pravdu?

Stojíme před velikým rozhodnutím. Musíme zvážit všechny argumenty a říci s konečnou platností: Může být absolutní teplota záporná nebo nemůže?

Hned v první kapitole jsme vysvětlili, že vžitě představy o teplotě jako veličině úměrné kinetické energii jsou zastaralé. Tím jsme se také zbavili první překážky, která by nám mohla bránit uznat existenci záporných teplot.

Argument, který se opíral o nemožnost dosáhnout absolutní nuly, není zřejmě také závažný. Jestliže si znázorníme absolutní teplotu spinového systému v závislosti na energii, dostaneme křivku nakreslenou na obr. 25. Místo energie bychom mohli na tuto osu nanášet teplotu uspořádanou podle kritéria: teplejší, tedy větší. Z obr. 25 je dobře patrné, že získat zápornou absolutní teplotu neznamena překročit nulovou teplotu směrem ke studenějším stavům, nýbrž překročit teplotu nekonečnou směrem k teplejším stavům. Je to výsledek nečekaný, ale musíme se s ním smířit.

Nakonec nám zbývají argumenty nejvážnější, které se opírají přímo o definici absolutní teploty, jak jsme podrobně rozebírali v kap. III.

Jestliže však znova důkladně prohlédneme, co jsme vlastně dokázali, ukáže se, že jsme přece nechali otevřená zadní vrátka, kudy se nám záporná absolutní teplota může vloudit.

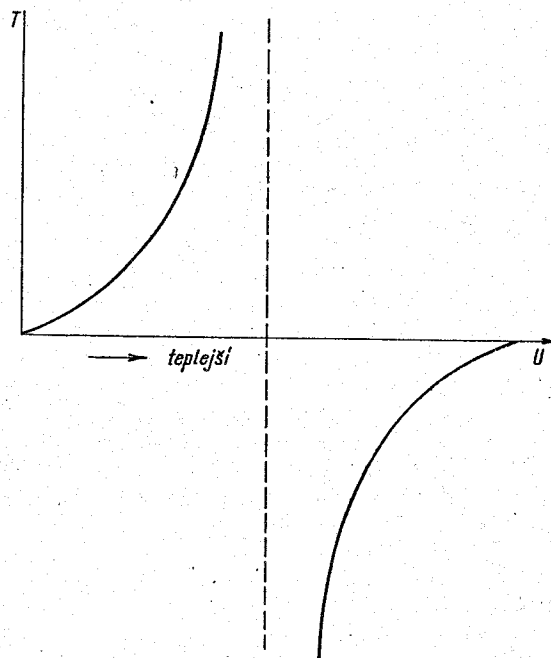
K tomu, abychom mohli určit teplotu jisté lázně, musíme ji spojit vratným strojem s lázní o teplotě tajícího ledu. My jsme mlčky pokládali za samozřejmé, opírajíce se o dosavadní zkušenosti, že libovolnou lázeň lze spojit vratným strojem s lázní tajícího ledu.

Co když však skutečně existují lázně, které nelze spojit vratným strojem s naší standardní lázní? V tomto případě naše definice absolutní teploty $T_A = -273,15 Q_A/Q_L$ (viz čl. 3, 1) nám neumožňovala tuto teplotu určit.

Přesně vzato bylo tedy v kap. III dokázáno: *Buď umíme abso-*

lutní teplotu jistě lázně určit, pak je kladná, anebo ji určit nedovedeme.

Představme si nyní, že máme opravdu dvě skupiny lázní. Všechny lázně jedné skupiny lze vzájemně spojit vratným strojem, ale nelze spojit vratným strojem dvě lázně, z nichž každá je v jiné skupině. V tomto případě můžeme určit absolutní teplotu vzhledem



Obr. 25. Vztah mezi absolutní teplotou a uspořádáním stavů podle kritéria teplejší, studenější u spinového systému

k jisté standardní lázni příslušné skupiny, ale nemůžeme vzájemně porovnávat teploty dvou lázní, z nichž každá patří do jiné skupiny

Je to asi tak, jako kdyby existovaly dvě planety osídlené rozumnými bytostmi a každá planeta měla svůj „metr“. Na každé planetě mohou změřit délky svým metrem, ale číselné hodnoty těchto měření nám neumožňují srovnávat velikosti předmětů na dvou různých planetách. K tomu, aby byl zaveden jeden „metr“, je napřed třeba najít spojení obou planet.

I v našem případě je třeba překlenout propast mezi dvěma skupi-

nami lázní, které nelze spojit vratnými tepelnými stroji. My jsme ji však už překlenuli. Udělali jsme to v tom okamžiku, když jsme ukázali, jak teplota souvisí se světem atomů a molekul prostřednictvím entropie. Entropii nějakého tělesa, chápanou jako míru neuspořádanosti, můžeme totiž určit nezávisle na tom, zda toto těleso lze spojit vratným strojem. Tohoto pojetí teploty bylo skutečně využito při určování teploty spinového systému.

Logický rozpor mezi tvrzením kap. II o existenci záporné absolutní teploty a kap. III o její neexistenci vznikl tím, že jsme použili dvou různých definic absolutní teploty:

1. „Statistické“ — která se opírá o pojem entropie jako míry neuspořádanosti.
2. „Termodynamické“ — která byla zavedena na základě účinnosti vratných strojů.

Obě definice jsou však rovnocenné jen tehdy, jestliže těleso, jehož teplotu určujeme, lze spojit vratným strojem se standardní lázní. Jestliže pro dané těleso takový stroj neexistuje, pak je termodynamická definice — jak jsme se již o tom zmínili — nepoužitelná. Ale jenom o „termodynamické“ teplotě jsme dokázali, že nemůže být záporná.

Vzdáme-li se tedy předpokladu: „Všechny lázně lze spojit vratným strojem se standardní lázní“, pak sám fakt, že teplota je záporná, neodporuje dosud uznávaným zákonům termodynamiky.

4.2 Další překvapení

Můžeme si představit, že máme dvě skupiny „vzájemně nespojitelných“ lázní — jednu skupinu o kladných teplotách, druhou o záporných teplotách. Pro každou skupinu lázní platí obyčejné zákony termodynamiky. Taková představa nemůže vést k žádným logickým rozporům.

Rozpor však může vzniknout — a také vzniká — jestliže o lázních, které mají záporné absolutní teploty, předpokládáme více než jenom to, že mají zápornou absolutní teplotu.

Roku 1956 N. F. Ramsay poprvé na tyto rozpory poukázal, a aby je odstranil, navrhl novou formulaci druhé věty termodynamické.

Zdrojem potíží není to, že absolutní teplota je záporná, nýbrž to, jakým způsobem je velikost této teploty uspořádána vzhledem ke kritériu: studenější — teplejší. Skutečně. Mějme dvě lázně A, B o záporných absolutních teplotách, z nichž lázeň A je teplejší než lázeň B. Nechť např. absolutní teplota lázně A je $T_A = -100^\circ$

a absolutní teplota lázně B je $T_B = -200^\circ$ (viz obr. 25). Absolutní teploty lázní A , B jsou vázány vztahem

$$\frac{q_A}{q_B} = \frac{T_A}{T_B}. \quad (1)$$

V našem příkladě je $T_A/T_B = -100/-200 = 1/2$. Je tedy $q_A < q_B$. Stroj, pro nějž platí vztah (1) a poslední nerovnost, je zřejmě vratným strojem typu 2 (viz tab. 1). Existuje-li vratný stroj typu 2, pak také musí existovat stroj, který odebírá teplo lázni o záporné absolutní teplotě a celé je mění v práci (stroj TP v tab. 1), čili existuje perpetuum mobile druhého druhu. K tomuto závěru dojdeme snadno, představíme-li si, že teplo, které přivádí stroj $2b$ (viz tab. 1) na teplejší lázeň, odvádíme zpět vodivou tyčí do studenější lázně.

V návalu prvé radosti bychom si mohli myslet, že jsme dokázali existenci perpetua mobile druhého druhu. Avšak existence perpetua mobile druhého druhu je v přímém rozporu s Thomsonovou formulací druhé věty termodynamické a druhá věta termodynamická byla podkladem pro oprávněnost vztahu (1).

Kdyby však oprávněnost vztahu (1) plynula také z jiných předpokladů než z Thomsonovy formulace druhé věty termodynamické, pak bychom skutečně existenci perpetua mobile druhého druhu v oblasti záporných teplot mohli pokládat za prokázanou.

Myšlenka existence perpetua mobile druhého druhu je natolik lákavá, že stojí za to, abychom z toho hlediska prozkoumali naše dosavadní zkušenosti se zápornými absolutními teplotami.

4.3 Perpetuum mobile druhého druhu — a přece se točí!

Naše zkušenosti se zápornými absolutními teplotami jsou mimo jiné zkušenostmi s kvantovými zesilovači. Popíšme jeho práci z termodynamického hlediska. V kvantovém zesilovači se „ochlazuje“ spinový systém a na úkor tohoto „ochlazování“ se vysílá velmi uspořádaná elektromagnetická vlna, kterou snadno můžeme přeměnit v práci. Kvantový zesilovač (nebo generátor) představuje tedy z hlediska termodynamického perpetuum mobile druhého druhu.

Na první pohled by se mohlo zdát, že byl splněn dávný sen, vytvořit perpetuum mobile, aspoň perpetuum mobile druhého druhu. Vada je ovšem v tom, že v přírodě nemáme žádnou zásobu lázni o záporné absolutní teplotě, nýbrž si je naopak musíme pracně opatřovat.

Je jasné, že z energetického hlediska nemůže být výnosné

napřed práci spotřebovat na získání teplé lázně (tj. lázně o záporné absolutní teplotě) a pak zase z lázně odebrat teplo a přeměnit je v práci.

Vypadá to tak, jako kdyby příroda s námi zlomyslně žertovala. Napřed řekne vážným hlasem: „Človče, toužil jsi po perpetuu mobile — aspoň po perpetuu mobile druhého druhu, tady je máš!“ A hned poté dodá: „Potřebnou tepelnou lázeň si ovšem sežeň, jak chceš.“

I když kvantový zesilovač jako perpetuum mobile druhého druhu nemá žádnou praktickou cenu, má skutečnost o existenci perpetua mobile pro termodynamiku vážné důsledky.

4.4 Nová formulace druhé věty termodynamické

Jsme nuceni ustoupit, musíme se vzdát druhé věty termodynamické v té formulaci, ve které se tvrdí, že neexistuje perpetuum mobile druhého druhu, což je v naší terminologii stroj — TP (Thomsonova formulace). Zřeknout se však vůbec druhé věty termodynamické by znamenalo zřeknout se pojmu absolutní teploty a také se zřeknout celého základu současné termodynamiky. To bychom udělali jen tehdy, kdybychom byli k tomu přinuceni novými fakty.

Prozkoumejme však reálnou situaci. Nelze zachránit druhou větu termodynamickou aspoň ve formulaci Clausiově (neexistuje stroj Ob — viz tab. 1)? Jinými slovy připouštíme současně, že platí Clausiova věta a že v oblasti záporných absolutních teplot existuje stroj typu 2. Je zřejmé, že kdyby v oblasti záporných absolutních teplot bylo vždy možno práci přeměnit v teplo, pak by Clausiova věta neplatila (viz čl. 3,2).

Vzdáme-li se tedy předpokladu, že vždy jde měnit práci v teplo, zachováme Clausiovu větu i pro oblast záporných absolutních teplot. Dosavadní, ovšem nepříliš bohaté zkušenosti svědčí, že skutečně nemůžeme v oblasti záporných absolutních teplot přímo měnit práci v teplo. Docházíme tak k závěru, že teorie bude ve shodě s novými i starými zkušenostmi, když přijmeme za základ tato tvrzení:

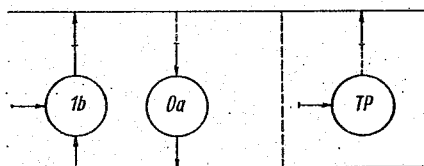
1. Clausiova věta platí ve všech oblastech teplot.
2. V oblasti kladných absolutních teplot nemůžeme veškeré teplo odebírané jedné lázni přeměnit v práci (neexistuje stroj TP).
3. V oblasti záporných teplot nelze veškerou práci přeměnit v teplo dodávané jediné lázni (neexistuje stroj PT).

Okolnost, že jsme uznali obecnou platnost Clausiové věty, ale neuznali platnost věty Thomsonovy, svědčí o tom, že neuznáváme

tyto věty za ekvivalentní, přesto že jsme v čl. 3,2 dokázali jejich ekvivalenci. Prohlédneme-li si však důkladně důkaz, který jsme provedli, zjistíme, že jsme tam užili těchto dvou předpokladů:

1. Vždy lze přeměnit práci v teplo (tj. existuje stroj TP).
2. Existuje stroj Ib .

Z nové formulace druhé věty termodynamické je patrné, že v oblasti záporných absolutních teplot jsou tyto předpoklady nesprávné. První předpoklad je přímo v rozporu s novou formulací druhé věty termodynamické a nesprávnost druhého předpokladu se snadno dokáže. Stroj Ib nemůže v oblasti záporných teplot existovat; kdyby existoval, mohli bychom vodivou tyčí (stroj $0a$)



Obr. 26. Při záporných absolutních teplotách neexistuje stroj Ib

nahradiť teplo odebírané ze studenější lázně teplem z teplejší lázně (viz obr. 26), což vede k rozporu s tvrzením o neexistenci stroje PT v oblasti záporných absolutních teplot.

Z hlediska nové formulace druhé věty termodynamické se jeví

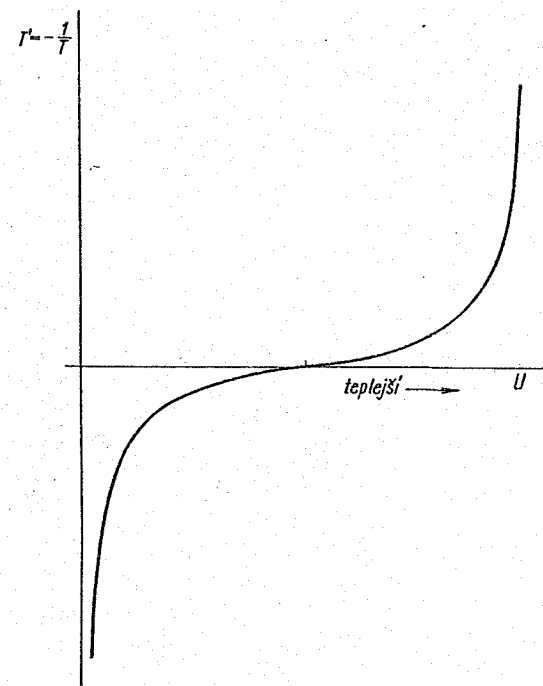
v novém světle otázka přechodu mezi kladnou a zápornou teplotou.

Když jsme vycházeli ze staré formulace druhé věty, řekli jsme, že k zavedení záporných absolutních teplot je nutný předpoklad: Existují lázně, které nelze spojit vratným strojem s lázní teploty tajícího ledu. Takový předpoklad nyní nutný není. Skutečně můžeme připustit, že mezi lázní o záporné teplotě a kladné teplotě existuje vratný stroj typu 3 (viz tab. 1); takový stroj není v rozporu s novou formulací druhé věty. To ovšem neznamená, že tvrdíme, že takový stroj může skutečně existovat. Jak ukázal r. 1962 H. G. Schöpf, jsou vážné důvody pro pochybnost o existenci takového stroje. Ostatně všechny dosavadní přechody mezi kladnou a zápornou teplotou byly nevratné.

ZÁVĚR

Záporné absolutní teploty, které zpočátku pobouřily naši mysl, staly se přirozenou součástí přebudované termodynamiky. Stará termodynamika neztratila nic na své ceně, ale její základy byly natolik pozměněny, že je schopna zahrnout nové jevy.

Stavy, kterým přiřazujeme zápornou absolutní teplotu, nebyly nikdy dříve z hlediska termodynamického vyšetřovány. Když jsme chtěli být důslední při definici absolutní teploty a když jsme chtěli



Obr. 27. Vztah mezi teplotou $-1/T$ a uspořádáním stavu podle kritéria studenější, teplejší u spinového systému

nově objeveným stavům též přiřadit absolutní teplotu, museli jsme těmto stavům přiřadit zápornou absolutní teplotu.

Vznikla tak zdánlivě paradoxní situace, při které stavy o záporné absolutní teplotě jsou teplejší než stavy o kladné teplotě. Jelikož teplota větší a menší je z logického hlediska něco jiného než těleso teplejší a studenější, je skutečně tento paradox jen zdánlivý. Přesto to však neodpovídá obvyklému chápání pojmu teplota větší a menší. Tento nedostatek můžeme však snadno odstranit tím, že pozměníme definici absolutní teploty. Můžeme např. zavést novou teplotu T' , která souvisí s absolutní teplotou dosud uvažovanou T vztahem $T' = -1/T$. V tomto případě by všechny dosavadní kladné teploty byly záporné a všechny dosavadní záporné teploty kladné. Dosavadní teplotě absolutní nuly by odpovídala teplota $-\infty$ a teplotě ∞ by odpovídala teplota 0. Uspořádání teplot od studenější k teplejší podle nové definice je pro spinové systémy naznačeno na obr. 27. V tomto případě je opět celá stupnice uspořádána tak, že teplejším stavům odpovídá větší teplota.

Ať již je však název jakýkoliv, jisté je, že stavy, kterým říkáme stavy o záporné absolutní teplotě, představují novou oblast, kterou jsme zařadili do rámce termodynamiky. Aby se nám to podařilo, museli jsme poopravit dosavadní základy termodynamiky.

Složitá a nikdy neukončená je cesta, po které kráčí člověk sbírající střípky poznání, z kterých sestavuje mozaiku jako obraz světa. Někdy se mu zdá, že již obraz zná, že už potřebuje najít jen několik málo střípků a obraz bude hotov. Najednou se objeví něco, co do koncepce obrazu nezapadá. Nezbývá než obraz poopravit.

DOPORUČENÁ LITERATURA

Z termodynamiky:

Záviška, F.: Termodynamika. Praha, Přírodovědecké nakladatelství JČMF 1950.

Hála, Ed. — Reiser, A.: Fysikální chemie I. Praha, Nakladatelství ČSAV 1960.

O spinech:

Novožilov, J. V.: Elementární částice. SNTL, populární přednášky sv. 1/2, 1961.

Kvasnica, J.: Struktura atomového jádra. SNTL, populární přednášky sv. 3.

O kvantových zesilovačích a generátorech:

Basov, N. G. — Krochin, O. N. — Popov, J. M.: Generátory a zesilovače světla, Dvacáté století, kniha o vědě, technice a kultuře, str. 113, 1962—1963. Orbis (překlad z ruštiny).

Singer, J. R.: Bezšumové zesilovače (masery). Praha, SNTL 1963 (překlad z angličtiny).

Žďánský, K.: Masery založené na elektronové paramagnetické resonanci v pevných látkách. = „Pokroky matematiky, fyziky a astronomie“, roč. VI, 1961, čís. 3: str. 137.

Schawlow, A.: Optical Masers.

Vogel, S. — Dulberger, L.: Laser: Devices and Systems. (Obě publikace jsou u nás dostupné ve sborníku *Šavlov, A. — Fogel, C. — Dalberdžer, L.:* Optičeskie kvantovyje generatory (lazery). Moskva, Inoizdat 1962.)

Pátek, K.: Lasery — kvantové generátory světla, Praha, SNTL 1964.