

# Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

---

František Maršík

Rozvinutí Einsteinových myšlenek v současné nerovnovážné termodynamice

*Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, Vol. 25 (1980), No. 2, 65--68

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/139127>

## Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1980

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

na kultúrne, národné a hospodárske zveladenie slovenských vystaňovalcov v USA. Bol neúnavným bojovníkom za slobodné Slovensko v rámci Československej republiky.“

Jozef Murgaš svojou hŕževnatou prácou prispel k rozvoju bezdrôtovej telegrafie, čo uznával aj Edison a Marconi. Jeho dielo je názorným príkladom vplyvu nových možností v Spojených štátoch na vedecký a technický rozlet niektorých slovenských vystaňovalcov.

#### Literatúra

[1] MURGAŠ, J.: *Telegrafovanie bez drôtu*. Tovaryšstvo III (1900), 247.

[2] VODA, J.: *Jozef Murgaš*. Martin, Osveta 1955.

[3] PALIČKÁR, S.: *Rev. Joseph Murgas priest-scientist*. New York 1950.

## Rozvinutí Einsteinových myšlenek v současné nerovnovážné termodynamice\*)

*František Maršík, Praha*

Během svého života Albert Einstein sám několikrát poznamenal, že nevytvořil jen speciální a obecnou teorii relativity, ale že se domnívá, že i jeho práce o kinetické teorii, teorii záření i základech kvantové mechaniky stojí za povšimnutí a diskusi.

Příčinu tak velkého zájmu nejen vědců, ale i veřejnosti o jeho myšlenky týkající se vlastností prostoru a času je možno spatřovat v tom, že tyto dvě fyzikální reality se dotýkají našeho každodenního života. Každý člověk na ně má svůj názor, a výsledky A. Einsteina a filozofické závěry z nich plynoucí proto ve své době a možná i doposud dráždí a zajímají mnoho lidí.

Na rozdíl od toho jsou jeho výsledky v oblasti teorie záření a kvantové mechaniky známy už jen užšímu okruhu vědců, i když právě Nobelova cena za fyziku v r. 1922 mu byla udělena za fotoelektrický jev a jeho ostatní práce v oblasti teoretické fyziky. Důvod byl zřejmě ten, že jeho teorie relativity nebyla ještě obecně přijata, ale naopak se o ní velmi živě diskutovalo. Jeho myšlenky v této „nerelativistické teorii“ však byly právě tak silné a životaschopné, což se ukázalo až v letech 1953–54, kdy J. WEBER, N. G. BA-

---

\*) Předneseno na slavnostním semináři uspořádaném k 100. výročí narození A. Einsteina, který uspořádala Čs. společnost pro mechaniku při ČSAV.

sov a A. M. PROCHOROV popsali poprvé princip molekulárního zesilovače světla, tzv. laseru a J. P. GORDON, H. J. ZEIGER a C. H. TOWNES popsali princip molekulárního zesilovače mikrovlnného záření, tzv. maseru. Oba tyto zesilovače byly založeny na úvahách vyplývajících z kvantové teorie záření. Využily se především pojmy spontánní záření a indukované záření, které byly zavedeny v článku [1]: Za sestrojení laseru dostali N. G. Basov, A. M. Prochorov a C. H. TOWNES Nobelovu cenu.

Podrobněji se zde zmíníme o jiné jeho myšlence, která našla své rozvinutí až přibližně 50 let po své formulaci. Jde o výpočet pravděpodobnosti fluktuace makroskopického systému kolem rovnovážného stavu z hodnot parametrů v rovnovážném stavu. A. Einstein tento výpočet poprvé provedl ve své práci [2]. Vyšel z Boltzmannovy definice a interpretace entropie celého systému (nebo i makroskopicky malého podsystemu v případě lokální termodynamické rovnováhy)

$$S = k \ln W + \text{konst.}$$

Zde  $k = R/N$  je Boltzmannova konstanta a  $W$  je pravděpodobnost mikroskopického stavu s danou hodnotou entropie  $S$ . Pravděpodobnost tohoto mikroskopického stavu je tedy

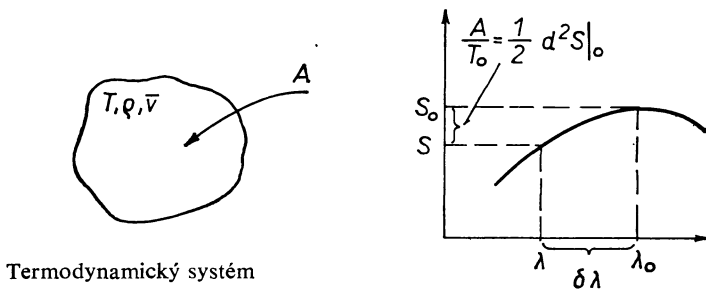
$$W = \text{konst } e^{S/k} = e^{(S-S_0)/k}, \quad (1)$$

když konstanta byla vyjádřena pomocí předpokladu, že pravděpodobnost rovnovážného stavu s entropií  $S_0$  je rovna 1. Rozdíl entropie si Einstein představil jako funkci makroskopických parametrů  $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$ , kde např.  $\lambda_1$  je teplota  $T$ ,  $\lambda_2$  hmotnostní hustota  $\rho$ ,  $\lambda_3, \lambda_4, \lambda_5$  jsou složky vektoru unášivé rychlosti  $\mathbf{v}$ , atd. Entropii lze potom rozvinout do Taylorovy řady kolem rovnovážného stavu (označeno indexem „0“)

$$S = S_0 + dS|_0 + \frac{1}{2} d^2S|_0 + \dots \quad (2)$$

A. Einstein si interpretoval rozdíl entropie (při konstantní vnitřní energii systému a teplotě systému rovné rovnovážné teplotě  $T_0$ ) jako mechanickou práci dodanou systémem z vnějšku. Potom lze psát

$$S - S_0 = \int_{eq} dS = \frac{A}{T_0}. \quad (3)$$



Obr. 1. Fluktuace  $\delta\lambda$  makroskopických (i mikroskopických) parametrů termodynamického systému jsou vyvolány mechanickou energií  $A$  dodanou do systému z vnějšku. Systém pak není izolovaný, a fluktuace jeho entropie snižují.

Množství mechanické práce  $A$  vychýlí systém z rovnovážného stavu – viz obr. 1. Její velikost lze nejuvhodněji určit ze vztahu (2). Z porovnání výrazů (2) a (3) vyplývá, že vnější práce  $A$  (dělená rovnovážnou teplotou  $T_0$ ) je rovna druhému diferenciálu entropie  $\frac{1}{2}d^2S_0$ .  $dS_0 = 0$ , protože v rovnováze dosahuje entropie svého extrému (maxima). Potom pravděpodobnost fluktuace stavu systému podle vztahu (1) je

$$W = e^{(1/2k) d^2S|_0}, \quad (4)$$

kde veličina  $d^2S|_0 < 0$ , protože jde o maximum. Lze ji vyjádřit jako součet kvadrátů makroskopických parametrů  $\lambda_i$ . Tak např. pro termodynamický systém popsaný parametry  $T, \varrho, \mathbf{v}$  platí [3], [4]

$$d^2S|_0 = -\frac{M}{T} \left[ \frac{c_V}{T} (dT)^2 + \frac{\varrho}{\chi} \left( d\frac{1}{\varrho} \right)^2 + (d\mathbf{v})^2 \right] < 0. \quad (5)$$

Dosazením do vztahu (4) lze nalézt přímo střední hodnotu fluktuací příslušných makroskopických parametrů tohoto normálního rozdělení. V podstatě zde jde o časovou střední hodnotu, přestože se čas explicitně v žádném z uvedených výrazů nevyskytuje. Střední hodnota fluktuací teploty je  $k T^2/M c_V$ , kde  $c_V$  je specifické teplo jednotky hmotnosti systému při konstantním objemu a  $M$  je celková hmotnost systému. Podobně pro fluktuaci hustoty a kinetické energie platí  $k T \chi/\varrho M$  a  $k T/M$ . Veličina

$$\chi = -\varrho \left[ \frac{\left( \partial \frac{1}{\varrho} \right)}{\partial p} \right]$$

je koeficient izotermické stlačitelnosti, na němž silně závisí fyzikální vlastnosti systémů v okolí fázových přechodů a kritických stavů,  $p$  je statický tlak.

Kvalitativní prověření závislosti středních hodnot fluktuací na stavu systému můžeme nepřímo provést kdykoliv, podíváme-li se na mléčné zabarvení vody při jejím uvádění do varu nebo na modrou oblohu. Tím současně ověříme i platnost vztahů (4) a (5) a správnost Einsteinových úvah. Při pozorování vody těsně před bodem varu zjistíme, že silně rozptyluje světlo. Dochází k opalescenci. Opalescence je způsobena tím, že fluktuace hustoty elementárního objemu vody (menšího či srovnatelného s vlnovou délkou světla) silně vzrostou neboli koeficient izotermické stlačitelnosti  $\chi \rightarrow \infty$ . Dochází tak i k fluktuaci indexu lomu světla v příslušném elementárním objemu a to má za následek silný rozptyl světla. Právě tak i modrá barva oblohy je způsobena fluktuacemi hustoty vzduchu ve vyšších vrstvách atmosféry. Nejvíce se rozptyluje ta část dopadajícího elektromagnetického záření, která má nejkratší vlnovou délku  $\lambda$ . Koeficient rozptylu světla je úměrný  $1/\lambda^4$ . Z viditelného spektra je to právě modré světlo.

Po 50 letech od tohoto Einsteinova výsledku (4) si I. PRIGOGINE a P. GLANSORFF povšimli, že je možno výrazů pro fluktuace (4) a (5) použít přímo k popisu makroskopických termodynamických systémů daleko od termodynamické rovnováhy. Prohlásili nerovnost

$$d^2S|_0 < 0 \quad (6)$$

za předpoklad termodynamické stability a považovali ji za Ljapunovovu funkci, která zajišťuje termodynamickou stabilitu celého systému. Při porušení této nerovnosti dochází v systému k prudké změně jeho fyzikálních vlastností i struktury.

I. Prigogine navíc ukázal, že formálním řešením Liouvilleovy rovnice lze nalézt veličinu, která má prakticky stejné vlastnosti jako veličina  $d^2S|_0$ . K tomu, aby platila nerovnost (6), je však třeba zavést předpoklad nazývaný disipativní podmínka. Tento předpoklad souvisí s porušením invariance systému vůči změně běhu času  $t \rightarrow -t$ . Je tedy hranicí, od kdy se systém samovolně nemůže vrátit do původního (výchozího) stavu. Že je tato podmínka splněna v systémech, jejichž podsystemy (atomy, molekuly) na sebe působí elektromagnetickými a mechanickými silami, se velmi pravděpodobně podaří dokázat. Nedaří se však splnění disipativní podmínky dokázat pro kosmické systémy, kde na sebe působí podsystemy (planety, hvězdy, galaxie) především gravitačními silami. Důvod je asi ten, že elektromagnetické síly se vzájemně stíní (ruší), takže jejich dosah není nekonečný a mechanické síly se předávají přímým dotykem. Gravitační působení má naopak nekonečný dosah a nikterak se neruší.

Termodynamiku, která vychází z předpokladu (6) lze aplikovat i na biologické systémy, které jsou tak daleko od termodynamické rovnováhy, že tam dosavadní formulace termodynamiky nepostačovala [5]. Za tyto nové výsledky dostal I. Prigogine v roce 1977 Nobelovu cenu za chemii.

Předcházející úvahy měly ukázat, jak hluboké souvislosti lze objevit správnou analýzou věcí a jevů každodenního života. Zde bylo jen naznačeno, že např. existuje souvislost mezi modrou barvou jasné oblohy a fyzikálně chemickými pochody, které mají už vlastnosti procesů probíhajících v jednoduchých živých organismech [5].

Proto nezbyvá, než si přát alespoň trochu vidět svět očima Alberta Einsteina a umět tak jako on číst v nekonečné knize přírody.

## Literatura

- [1] A. EINSTEIN: *Strahlung-Emission und -Absorption nach der Quantentheorie*. Verhandl. Dtsch. Phys. Ges. 18 (1916), 318—323.
- [2] A. EINSTEIN: *Theorie der Opalescenz von homogenen Flüssigkeiten und Flüssigkeitgemischen in der Nähe des kritischen Zustandes*. Ann. Phys. 33 (1910), 1275—1298.
- [3] P. GLANDSDORFF, I. PRIGOGINE: *Thermodynamic theory of structure, stability and fluctuations*. Wiley, London, 1971.
- [4] L. D. LANDAU, E. M. LIFŠIC: *Statističeskaja fizika*. Izdatělstvo Nauka, Moskva, 1964.
- [5] G. NICOLIS, I. PRIGOGINE: *Self-organization in nonequilibrium systems*. Wiley, New York, 1977.

---

Člověku, který objevil myšlenku dovolující udělat další, třeba jen nepatrný krůček do hloubek dávných tajů přírody, přísluší veškeré uznání. Jestliže při tom cítí nejpřímnější podporu, při-

zeň a uznání svých současníků, pak se mu dostává zřejmě více štěstí, než vůbec může unést.

*Albert Einstein*