

# Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

---

Luděk Pekárek

Moderní fyzika a integrační tendence v přírodních vědách

*Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, Vol. 18 (1973), No. 2, 76--89

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/138505>

## Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1973

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>

# Moderní fyzika a integrační tendence v přírodních vědách\*)

*Luděk Pekárek, Praha*

## Úvod

V tomto referátu chceme především poukázat na některé novější aspekty vztahů mezi fyzikou a jinými obory přírodních věd (počítaje v to obory zabývající se živými organismy), a to zvláště se zřetelem na sjednocující tendence vyvolané moderní fyzikou.

Minulé století určilo fyzice přesné hranice působnosti, tak jak si to mnozí z nás ještě pamatují ze střední školy: „fyzika se zabývá jevy, při nichž se podstata látek nemění“. Toto vymezení odlišovalo fyziku především od blízké chemie, u níž se „podstata“ látek měnila, tj. z prvků vznikaly sloučeniny a ze sloučenin prvky nebo jiné sloučeniny. Odlišovalo ji tím spíše od biologie a ostatních věd zabývajících se jevy v živých organismech a jejich společenstvích.

Fyzikové a vůbec přírodovědci starších generací podobné ostré vymezení pro fyziku neproklamovali, naopak, mnohé čistě fyzikální objevy byly učiněny na biologických objektech – ať už to byla pověstná žabí stehýnka při objevení elektřiny, nebo studium vlastností smyslových čidel člověka jako fyzikálních systémů. Poslední jistě souviselo i s tím, že fyzikové byli dlouho odkázáni na registraci jevů prostřednictvím zraku a sluchu.

Moderní kvantová fyzika, atomová i jaderná, učinila uvedenou definici fyziky zcela nepoužitelnou. Některé jevy, kterými se kvantová fyzika zabývá, znamenají změny mnohem podstatnější, než je spojování a přeskupování atomů do různých chemických sloučenin. Odhalením struktury atomu a atomového jádra pronikla fyzika do vlastností látek hlouběji než chemie, která se v zásadě stala aplikovanou fyzikou kvantových elektromagnetických interakcí vnějších elektronů atomové obálky.

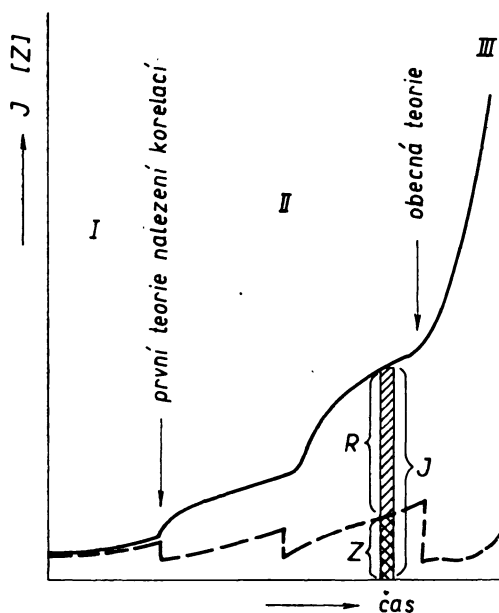
Kromě pohlčení chemie jako samostatné vědní disciplíny (samostatné z principiálního, nikoli metodického nebo organizačního hlediska) zbavila fyzika v důsledku poznání mikrostruktury látek samostatnosti i řadu vlastních podoborů. Některé z nich ztratily ovšem svou samostatnost už dříve. Tak zákony geometrické i vlnové optiky se po vytvoření makroskopické teorie elektromagnetického pole ukázaly být zcela důsledkem vlastností tohoto pole. Podobně zákony termodynamiky vyllynuly z vlastností mechanického pohybu molekul a atomů, zprůměrovaných pro velký počet těchto individuí.

Nacházení vzájemných souvislostí mezi jevy pokládány dříve za nezávislé je ovšem typické pro vývoj jakéhokoli vědního oboru – při stále vzrůstajícím celkovém množství informace se čas od času prudce sníží množství těch dat, která se pokládají za základní,

---

\*) Podle referátu předneseného 2. října 1972 na celostátním sjezdu JČSMF v Měříně.

neodvoditelná, zjištělná v dané době pouze empirickou cestou (obr. 1). Stahování celkové informace do nevelkého množství základních dat, z kterých lze ostatní informace alespoň principiálně získat logickou cestou na základě teorie, je jedním z důsledků tvůrčí činnosti člověka ([1]) a umožňuje i při učení snáze zvládnout rostoucí množství celkové informace.



Obr. 1. Idealizované schéma růstu množství informace  $I$  — plná křivka — a průběh množství základních dat  $Z$  (tj. dat v dané době neodvoditelných teoreticky) — přerušovaná křivka — v závislosti na čase. Rozdíl  $I - Z = R$  je odvoditelná (redundantní) informace.

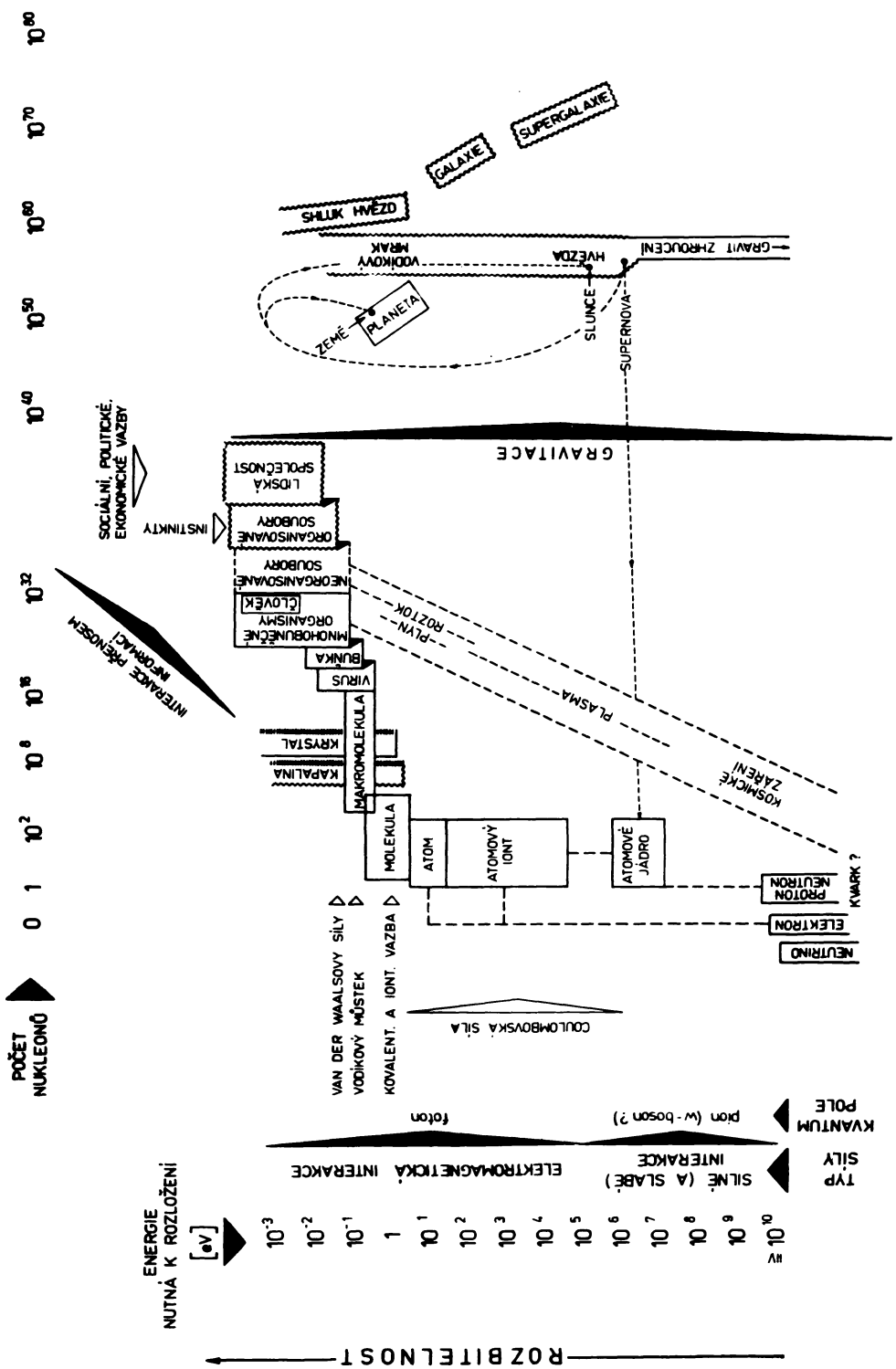
Pouze v počátečním období ryze empirického vývoje I je množství informace a množství základních dat totožné. Nalezení korelace a vypracování teorie vede k náhlému poklesu množství základních dat, po němž následuje urychlený růst celkového množství informace, podněcený teorií — období II. V pokročilém stadiu vývoje oboru — období III je základních dat relativně málo, celkové množství informace zpravidla i nadále prudce roste. Máloukdy však dojde k objevu, který by nebyl vysvětlitelný pouze s použitím dosavadních základních dat a vypracovaných teorií.

Na moderní kvantové fyzice je nové to, že našla částice, z kterých jsou složeny všechny nám dosud známé objekty, počítaje v to živé organismy, a zákony vzájemného působení mezi nimi, které se ukázaly být odlišné od zákonů makrofyziky. Na jejich základě se již podařilo pochopit vlastnosti mnoha složitějších systémů z těchto částic složených, a není zatím znám principiální důvod, pro který by nebylo možné na základě těchto zákonů pochopit vlastnosti i těch systémů, které zatím takto vysvětleny nebyly.

Tento rozdíl mezi současnou a klasickou fyzikou se často málo zdůrazňuje. Nejde o to, že by fyzika tvořila nyní uzavřenou disciplínu, v které nelze již nic principiálně nového objevit. Zvláště v extrémních podmínkách jako jsou interakce elementárních částic při vysokých energiích, chování hmoty v gravitačním kolapsu, vlastnosti symetrie jevů v prostoru a čase je naopak nyní více nepochopených otázek než kdykoli dříve. Avšak základní obraz těch stavů hmoty, které jsou blízké podmínkám na Zemi a v jejím okolí, je dnes nesrovnatelně úplnější, a tím také mnohem jednodušší než kdykoli dříve, neboť fyzika našla jeho společnou podstatu.

Tabulka na str. 78 ilustruje tuto situaci. Jsou v ní zaneseny známé objekty neživé i živé přírody, a to podle své celkové hmotnosti (měřené v počtu nukleonů, tj. protonů a neutronů), která je vynesena na vodorovnou osu, a podle parametru, který jsme nazvali rozbitelností (roste svisle zdola nahoru); je charakterisován množstvím energie (nebo velikostí kvant energie), nutným k rozbití či ireverzibilnímu poškození příslušného ob-

HMOTNOST



## TABULKA PŘÍRODNÍCH OBJEKTŮ

Přírodní objekty, počítaje v to živé bytosti, jsou v tabulce uspořádány podle své hmotnosti (vyjádřené v počtu nukleonů, tj. protonů a neutronů) a rozbitelnosti, charakterizované energií potřebnou k jejich rozkladu. Například pro atom je to ionizační energie, pro molekulu disociační energie, pro krystal teplota tání (v eV, 1 eV  $\sim$  11000 °K) nebo — pro složitou makromolekulu — teplota způsobující nevratnou destrukci. Elementární částice, u nichž není tato energie známa a může být nekonečná, jsou umístěny v nejnižší části tabulky. Živé organismy jsou umístěny na úrovni odpovídající jejich fyzikální rozbitelnosti, avšak vystupují nad rovinu hmotnost—rozbitelnost do třetího rozměru. To má vyjádřit, že mají navíc vnitřní organizaci založenou na přenosu informace, jejíž zničení nebo narušení způsobí smrt živého organismu. (Poznámka: hodnoty hmotnosti a energie potřebné k rozložení je možné v tabulce odečíst jen přibližně, protože velikost rámečků musela být přizpůsobena, aby bylo možno umístit v nich názvy.)

Kosmické objekty, držené pohromadě gravitací, jsou umístěny na úrovni odpovídající energii na nukleon, potřebné k uvolnění atomů nebo molekul z hvězdy nebo planety nebo k uvolnění hvězd z hvězdného shluku nebo z galaxie.

Objekty, které mají charakter individuí (např. atom, molekula, kapalina, krystal, planeta, hvězda, galaxie; člověk; organizované společenství) jsou uzavřeny v rámečcích z nepterusovaných čar — přítmých, mají-li pevnou strukturu (např. krystal nebo molekula), a zvlhňných, jestliže jejich složky mění vzájemnou polohu (např. kapalina, hvězda, galaxie). Systémy velkého počtu na sebe působících individuí bez vzájemné vazby (plazma, plyn, neorganizované soubory živých individuí) jsou umístěny mezi čárkovanými přímkami.

V tabulce jsou rovněž vyznačeny interakce vedoucí ke vzniku individuí. Jsou to čtyři fyzikální síly a pro živé bytosti ještě interakce založené na přenosu informací.

S rostoucí hmotností rozbitelnost individuí vzrůstá (v celkové tendenci) od elementárních částic k makromolekulám a krystalům, což je důsledek nasycování sil: v nejkřehčích fyzikálních jedincích působí elektromagnetická interakce již jen svými slabými zbytky jako jsou síly Van der Waalsovy a podobné síly. Gravitační se nenasycuje a velmi husté hvězdy nebo objekty s ohromnou hmotností mají rozbitelnost opět nízkou.

Vývoj objektů přírody lze v tabulce snadno sledovat. V kosmickém měřítku došlo asi před  $5 \cdot 10^9$  lety ke gravitačnímu smišťování vodíkového mrazu obohaceného zbytky supernovy, a tím vzniklo Slunce a Země. V mikroskopickém měřítku se atomová jádra (obsažená ve zbytcích supernovy) všech prvků, počítaje v to nejtěžší radioaktivní prvky, obalila elektrony a vytvořila atomy, a časový vývoj sledoval v podstatě posloupnost individuí, která v jedné větvi končí krystaly a kapalinami, v druhé živými organismy s člověkem a jeho společností na současném vrcholu.

jektu. Živá individua a jejich soubory jsou v tabulce umístěny podle stejných souřadnic, ale navíc vystupují nad rovinu hmotnost-rozbitelnost, přičemž třetí rozměr (výška nad touto rovinou) charakterizuje kvalitativní odlišnost organizovanosti živých soustav od soustav neživých. V tabulce se rozlišují individua (elementární částice nebo systémy vázaných částic tvořící jádro, atom, molekulu apod., případně živí jedinci) a soustavy individuí navzájem nevázaných (plyn, plazma, neorganizované soubory živých jedinců). Parametr rozbitelnosti se vždy týká příslušných individuí.

V tabulce jsou rovněž vyznačeny čtyři známé typy fyzikálních interakcí. Zatím není známo, zda slabé interakce (odpovědně např. za  $\beta$ -rozpad) mohou samy o sobě dát vznik vázaným stavům. Ostatní tři typy fyzikálních interakcí (sil) mohou vázat částice a dávají tak vznik složitějším fyzikálním (a chemickým) individuím.

V tabulce je rovněž vyznačena další forma interakcí, spočívající na přenosu informace. Je specifická pro živé jedince a jejich soustavy. V analogii s čistě fyzikálními silami tvoří i vázané systémy z živých individuí. Přenos informací je však v těchto případech vždy zprostředkován elektromagnetickou interakcí, ať už ve formě zvukových signálů (šíření je umožněno srážkami molekul vzduchu, v jejichž podstatě je elektromagnetické vzájemné působení), pachů (tj. vypouštění specifických molekul registrovaných citlivými zpravidla vysoce specifickými čidly), světelných signálů, tepla, dotyků apod. Nejde tedy o nový typ interakcí, který by byl nezávislý na existenci interakcí známých z moderní fyziky.

To, že je možné objekty přírody vůbec seřadit do podobné tabulky, je přímý důsledek objevů kvantové fyziky. Klasická fyzika makroskopických těles, stejně jako naše přímá smyslová zkušenost, nedosahují hranice, za kterou vlastnosti tělesa začínají výrazně záviset na jeho absolutní hmotnosti.\*) I nejmenší přímo pozorovatelná tělesa obsahují velké množství atomů, jsou tedy soustavami velkého počtu částic a pro jejich pohyb platí zákony makroskopické mechaniky. Pokles rozbitelnosti těles se zmenšováním jejich hmotnosti se projevuje teprve u makromolekul, molekul, atomů a jader. V oblasti působení elektromagnetických sil souvisí s tím, že u složitějších individuí se uplatňují jen slabší zbytky elektromagnetických interakcí. Jaderné síly mají krátký dosah a u těžkých jader je soudržnost nukleonů snižována elektrostatickým odpuzováním. Rozbitelnost jader a atomů (charakterizovaná u atomů ionizačním potenciálem) není ovšem monotónní funkcí hmotnosti, ale má oscilující průběh. To je známo i z Mendělejevovy tabulky. V tabulce není tato „jemná struktura“ závislosti hmotnost-rozbitelnost vyznačena a je uveden pouze celkový trend.

Že pokles rozbitelnosti s poklesem hmotnosti individua závisí na konkrétních vlastnostech elektromagnetických a jaderných sil, je zřejmé z opačného směru této závislosti u velkých kosmických individuí – hvězdokupy, galaxie a supergalaxie. Ta jsou držena pohromadě gravitačními silami, které nejeví saturaci, a větší celky mohou mít větší pevnost než celky menší. Soustava uvnitř Schwarzschildova poloměru (černá díra a také pravděpodobně naše metagalaxie) má rozbitelnost nulovou – dokonce ani fotony nemohou z této oblasti uniknout. Také tato závislost rozbitelnosti na celkové hmotnosti –

---

\*) Přesto to byl právě zakladatel klasické fyziky NEWTON, kdo předpověděl existenci elementárních částic a sil držících je pohromadě ve složitějších celcích ([2], viz také [3]); žádný přímý důkaz této hypotézy neexistoval ovšem v Newtonově době.

opačná než u mikročástic — se projevuje až za hranicemi naší přímé smyslové zkušenosti, v tomto případě směrem k hodnotám hmotnosti kosmických měřítek.

V závislosti hmotnost-rozbitelnost existuje tedy široké plató, širší než je přímý dosah našich smyslů, kde vlastnosti těles — pevných látek, kapalin — nezávisí na jejich absolutní hmotnosti. Zjištění, že velmi malé částice se chovají jinak, než odpovídá naší smyslové zkušenosti s makroskopickými tělesy, je výlučně výsledkem vědeckého poznání zprostředkovaného složitou experimentální technikou, jakou lidstvo nemělo nikdy dříve k dispozici. Přizpůsobení teorie k novým poznatkům, vytvoření kvantové mechaniky a její aplikace je dílem první poloviny tohoto století. Postavení fyziky v poměru k ostatním vědám, změněné těmito novými poznatky, se dosud nestabilizovalo.

### **Klasická fyzika a živé systémy**

Existuje velmi mnoho příkladů použití klasické fyziky pro popis či vysvětlení některých jevů v živých systémech. V principu triviální je například použití zákonů hydrodynamiky při popisu proudění krve v cévách, zákonů mechaniky pro popis pohybu savců, plazení hadů, letu ptáků atd. ([4], [5], [6]). Složitost praktické aplikace spočívá v těchto případech ve složitosti mechanické stavby živého individua, a také ve složitosti aplikace vnitřních sil, které jsou rozloženy prakticky spojitě po těle individua a časově i prostorově koordinovány z nervového centra. Přesné zjištění a detailní popis těchto sil — (pravých stran příslušných rovnic) naráží na velké obtíže, stejně jako přesné vystižení (v čase proměnných) mechanických vlastností těla živého jedince. Tam, kde je příslušná aproximace dostatečně přesná, byl vždy získán dobrý souhlas teorie se skutečností. O oprávněnosti této aplikace makroskopické fyziky na živé systémy nelze pochybovat. Přes značnou rozpracovanost této aplikace se jí — ke škodě fyziky — málo využívá při vyučování mechanice na všech stupních vzdělávání.

Hlubší a méně nesporný charakter má využívání analogií mezi neživými a živými soustavami například při popisu chování systémů s velkým počtem individuí.

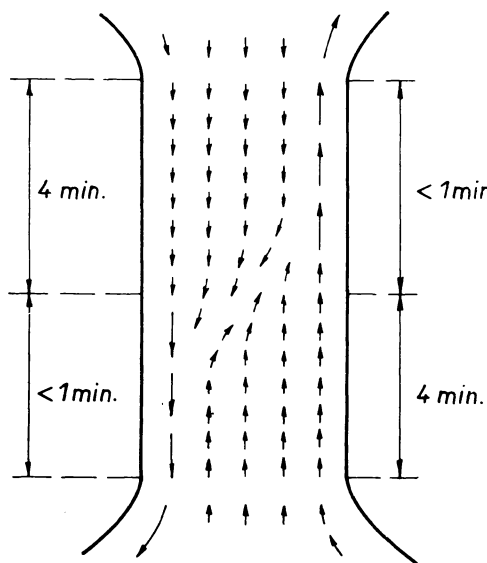
Je známo, že systémy s velkým počtem individuí mají často velmi jednoduché vlastnosti, a to i tehdy, jsou-li individua sama složitá jak co do struktury, tak i co do vlastností. Pro ilustraci uveďme zajímavý a současně fenomenologicky jednoduchý jev s tak složitými individui jako je člověk. Pokud je nám známo, nebyl dosud popsán ani kvantitativně vysvětlen.

V létě a na podzim roku 1968 — jak dobře znají všichni Pražané — byly pro stavbu podchodu uprostřed Václavského náměstí uzavřeny všechny přechody a chodci obcházeli křížovátku průchody v sousedních domech. V době silného provozu se každý chodec, který procházel z horní části Václavského náměstí do Vodičkovy ulice (nebo obráceně), stal svědkem nebo — řečeno přesněji — spolutvůrcem zajímavého jevu. Provoz chodců v obou směrech byl zhruba stejný a nejužší část průchodu do Vodičkovy ulice, dlouhou zhruba 40 metrů, procházel každý asi 5 minut. Z toho přes čtyři minuty trvalo, než se dostal do poloviny délky průchodu. Druhou polovinu prošel již za necelou minutu.

Geometrická konfigurace obou protisměrných proudů chodců, jaká se při tom vytvořila, je znázorněna na obr. 2. Směr šipek znázorňuje směr chůze. Proud chodců vstupu-

jících do průchodu zabíral téměř celou jeho šířku, uprostřed délky průchodu se zúžil a končil úzkým proudem, kterým chodci vycházeli po jednom a poměrně rychle. Je pozoruhodné, že popsaná situace vznikala zcela spontánně, udržovala se beze změny a opakovala v jiných dnech bez zřejmého rozdílu. Ani při značném přebytku těch, kteří se nemohli k průchodu dostat, propustnost tohoto „úzkého místa“ už nestoupala.

I když počet chodců prošlých za minutu je zřejmě větší, než kdyby oba proudy byly zcela promíchány (takový případ by byl typický pro částice plynu), je přece jen daleko od nejvyšší dosažitelné propustnosti. To je patrné z jednoduché úvahy: kdyby se místo popsaného proudění vytvořily dva nezužující se proudy v každém směru, pohybující se rychlostí stejnou jako jediný vystupující proud podle obr. 2, stoupla by propustnost více než dvojnásobně. Toho by se dalo dosáhnout buď „direktivně“ příslušnou instruktáží chodců a jejím disciplinovaným plněním, nebo rozdělením průchodu podélnou přepážkou na dvě jednosměrné části.



Obr. 2.  
Schematické znázornění situace v přeplněném průchodu.

Jednotliví chodci jsou vyznačeni šipkami, délka šipek charakterizuje přibližně rychlost usměrněného pohybu.

Popsaný jev dvou proudů lidí procházejících zúženým místem připomíná svou jednoduchostí a reprodukovatelností čistě fyzikální jevy. Je však zřejmé, že důležitou roli v něm hrají tak nefyzikální vlastnosti individuí, jako je subjektivní snaha každého chodce průchodem projít a návyk vyhýbat se doprava. To je podstatný rozdíl proti příkladům aplikace klasické fyziky při proudění krve v cévách či mechanických pohybech živočichů. Na druhé straně se přímo nabízí analogie s jevy v proudícím plynu nebo kapalině a jejich vystižením kinetickou teorií. V obou případech — u lidí i u atomů (molekul) — se projevují ve výsledném jevu pouze některé velmi jednoduché společné vlastnosti individuí, zatímco řada dalších vlastností se vůbec neuplatní.

V kinetické teorii plynů nehraje roli struktura atomů či molekul, možnost vzbuzení do vyšších elektronových stavů, vlastnosti spekter atd. Případné individuální rozdíly mezi

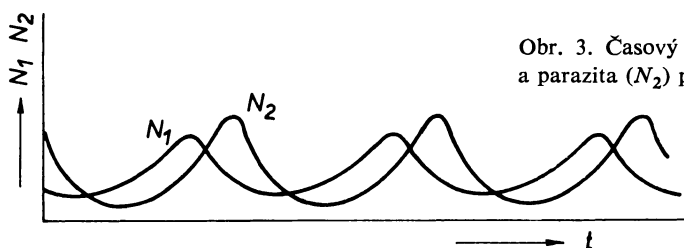


atomy či molekulami (jde-li o směs různých plynů) se zpravidla projevují jen v hodnotách průměrů příslušných veličin.

U jevu s procházejícími lidmi se neprojevují jejich individuální rozdíly (v rozměrech, fyzické síle, povaze, vzdělání), stejně jako se neuplatňuje ani většina jejich společných vlastností – třeba schopnost dorozumívat se řečí, konkrétní způsob přemísťování apod. To ukazuje na možnost použití obdobných matematických modelů i metod pro takové soustavy mnoha živých individuí. V tomto případě však již nejde o využití existující fyzikální teorie k vysvětlení jevů týkajících se živých systémů, tím méně o redukování těchto jevů na problémy kinetické teorie fyzikálních systémů velkého počtu částic.

Zatímco vlastnosti atomů a molekul, které vstupují jako empirické parametry do kinetické teorie plynů, vyplývají z kvantové teorie, souvisí mnohé vlastnosti živých individuí, které vystupují v teoriích jejich souborů, se specifickými procesy v živých systémech. Nejsou tedy na vlastnosti atomů a molekul napojeny přímo, nýbrž přes složitou hierarchii individuí (makromolekula, buňka) a jejich vzájemné působení.

Na rozdíl od uvedeného příkladu s průchodem, kde se přes neorganizovanost souboru uplatňuje vědomí, existuje řada jednodušších jevů v systémech mnoha živých jedinců, kde jsou příslušné matematické modely (a tedy i teorie) formálně totožné s modely fyzikální a chemické kinetiky. Patří sem například velmi rozsáhlý soubor populačních problémů, jako je šíření a vzájemné ovlivňování množství jedinců různých druhů. Nejznámější z nich, časový průběh četnosti individuí typu parazit – hostitel (obr. 3), byl zpracován již v roce 1920 (viz [6]); v moderní době byl aplikován na velký počet navzájem se požíra-



Obr. 3. Časový průběh četnosti hostitele ( $N_1$ ) a parazita ( $N_2$ ) podle [6].

jících, překážejících si i symbiotizujících druhů především v oceánech, kde jsou k matematickému modelování s použitím počítačů nejpříznivější podmínky ([7]). Přesto, že zakladatelé těchto teorií ([6]) je nazývali fyzikální biologii, je dnes pro tento přístup běžnější název matematická biologie, který také lépe odpovídá skutečnosti, že jde o využití analogie s fyzikální a chemickou kinetickou teorií s formálně shodným matematickým popisem a nikoli o bezprostřední použití fyzikální teorie na biologické objekty.

Matematické modely organizovaných systémů živých individuí ([8]) jako jsou – vedle lidských společenství – různé hmyzí pospolitosti i skupiny vyšších živočichů nemají již ani vzdálenou analogii s fyzikálními systémy popisovanými kinetickou teorií. Společným znakem těchto soustav je vzájemný přenos informací mezi individuí, který má v některých případech i charakter příkazů jednoho nebo několika vybraných individuí. Výměna informací ovlivňuje jednání individuí. Z takového souboru vzniká nové individuum (či jednotka), jehož složky nejsou drženy pohromadě fyzikálními silami,

nýbrž přenosem informací při působení instinktů (příp. vědomí) a přírodního výběru.

Mnohá složitě organizovaná společenství živých jedinců jsou známa již dlouho — jako pospolitosti včel, mravenců, vlnčí smečky, ptačí kolonie apod. Výměna informací se však v posledních desetiletích nachází i v méně nápadných souborech — u ryb, delfínů, velryb, řady druhů hmyzu apod., takže zcela neorganizovaných souborů živých jedinců je zřejmě méně, než se předpokládalo dříve. Ostatně třeba i tak obecný a běžně pozorovaný jev, jako je shlukování komárů do malých hejn, jeví vedle nerovnoměrného rozdělení těchto jedinců v prostoru (které samo o sobě svědčí o vzájemném působení obdobným přitažlivosti ve fyzice) i velmi zřetelné známky koordinace pohybu mezi jednotlivými komáry ve shluku. To je dobře patrné na současném stoupání a klesání mnoha jedinců, nápadně odlišném od chaotického pohybu typického pro navzájem nezávislá individua. Tato koordinace je nesporně důsledkem vzájemného přizpůsobení směru vlastního letu na základě získání informace o směru letu jiných jedinců. Přes podstatně rozdílný charakter vzájemného působení má i tento jev určitou vnější obdobu ve vzniku usměrněného makroskopického pohybu částic například při působení elektrického pole (vytvářeného často samotnými částicemi) v plazmatu, při kterém dochází rovněž ke korelaci pohybu mnoha částic souboru, případně ke vzniku zhustků a makroskopických proudů.

Přístup, který jsme až dosud probírali při popisu vlastností a chování souborů mnoha individuí — živých či neživých — má při všech rozdílech jedno společné: Vychází ze znalostí vlastností individuí, které se uplatňují v jejich souboru, aniž tyto vlastnosti vysvětluje. Přitom zpravidla záměrně vybírá pro model souboru jen část vlastností individuí; jiné, o nichž se předpokládá, že nejsou pro chování souboru důležité, nebere vůbec v úvahu. Vlastnosti individuí vystupují v těchto teoriích jako základní data (neodvoditelné informace). V termínech teorie sítí a systémů jsou tato individua pro teorii černými krabičkami, o kterých je známo, jak se v podmínkách, které se v souboru mohou vyskytnout, chovají. Není však nic známo o příčinách tohoto chování, nebo — pokud jsou tyto příčiny přece jen známy — teorie se o ně nezajímá. Zajímá ji pouze vstup a výstup černé krabičky, a vzájemné propojení krabiček mezi sebou — v našem případě vzájemné působení neživých či živých individuí v souboru.

Přirozená tendence vývoje vědního oboru, v které se obráží tvůrčí činnost člověka a jeho snaha po poznání a současně uspořádání poznatků zvyšováním přebytečnosti (redundance) informace a snižováním počtu základních (neodvoditelných) informací, se projevuje v rozbírání (nebo aspoň ve zprůhledňování stěn) černých krabiček. Tím se nachází jejich vnitřní struktura a zjišťuje se, že jsou složeny z jiných, menších a zpravidla jednodušších černých krabiček, navzájem mezi sebou propojených.

Do objevení kvantových jevů a formulace kvantové fyziky se menším jednotkám, z nichž se větší celky skládaly, přisuzovaly stejné fyzikální vlastnosti jako makroskopickým tělesům. Pokusy vysvětlit vlastnosti atomů tímto způsobem však selhaly, jak je dobře známo, a vyvolaly vznik kvantové fyziky. Není divu, že i pokusy vysvětlit jevy v buňkách a vůbec živých systémech tak, že se pro ně používaly zákony klasické fyziky, nebyly zcela úspěšné. Příkladem je teorie procesů v buňce a buněčného dělení ([5]), založená pouze na rovnicích difúze a reakční kinetiky. Tato teorie nacházela sice řešení odpovídající například protahování buňky a jejímu rozdělení a má svou cenu dodnes svými energetickými úvahami o stabilitě metabolizujících systémů. Nikdy však nedosáhla kvan-

titativního souhlasu s pozorováními. Nesouhlas teorií založených na klasické fyzice s biologickým experimentem podpořil skeptický postoj k zásadní použitelnosti zákonů fyziky vůbec pro vysvětlení podstaty jevů v živých systémech. Takový postoj však ztrácí opodstatnění, jestliže připustíme, že se v procesech probíhajících v živých organismech projevují podstatnou měrou kvantové jevy: ty klasická fyzika nevystihuje ani v neživých systémech.

Přesto nebyly možnosti přímé aplikace klasické fyziky na biologické objekty dosud plně využity, a stejně tak lze čekat další pokrok při využívání analogie mezi systémy s velkým počtem neživých individuí a využití podobnosti matematických metod jejich popisu. Otázka úspěšnosti či neúspěšnosti této aplikace však není totožná s otázkou, zda či do jaké míry jsou zákony fyziky použitelné pro vysvětlení samotné podstaty jevů v biologických objektech.

### **Předurčenost a alternativnost struktur**

Vlnový charakter částic, z nichž jsou fyzikální individua složena, způsobuje podstatné omezení ve vytváření různých struktur z vázaných elementárních částic. Obrazců stojatého vlnění je omezené množství, a trvale se může zpravidla udržet pouze stav vlnění s nejnižší energií. Výsledkem tohoto kvantového jevu je, že jednoduchá fyzikální individua nemají možnost tvořit alternativní struktury. Atom vytvořený z jednoho určitého souboru elementárních částic – například z 8 elektronů, 8 protonů a 8 neutronů – má vždy jen jednu a touž strukturu (pro uvedený příklad je to atom kyslíku  $^{16}_8\text{O}$ ), pokud bereme v úvahu pouze stabilní strukturu základního stavu s nejnižší energií. Růst složitosti struktury s růstem počtu nukleonů v jádře a elektronů v atomu se projevuje pouze stále jemnějším energetickým spektrem fyzikálního individua, a tedy růstem jeho citlivosti k vnějšímu působení v tom smyslu, že na ně reaguje přechodem do některého z vyšších energetických stavů, a tedy i dočasnou změnou své struktury. Růst citlivosti individua je současně provázen růstem jeho rozbitelnosti.

Jednoznačná předurčenost struktury jader, atomů a molekul má své pokračování i u krystalů: u dokonale rostlého a přesně periodického krystalu je jeho struktura dána přesným opakováním jedné a téže elementární buňky v prostoru. Takové krystaly se vyskytují zřídka a jen v omezených rozměrech. Odchylky od přesné periodičnosti, vznikající spontánně nebo vytvářené záměrně, vedou k rozsáhlé alternativnosti struktur a vlastností reálných krystalů, rozšířené ještě o změny struktury s teplotou (v podstatě vyšší energetické stavy), které mají často charakter přechodů z jedné stabilní konfigurace do druhé.

Alternativnost struktur se vyskytuje i u větších molekul. Molekuly s počtem atomů řádu desítek mají zpravidla jen několik málo alternativ ve struktuře, což se projevuje známým jevem chemické izomerie. U makromolekul s  $10^4$  a více atomy je množství různých struktur charakterizováno čísly řádu  $10^{100}$ , a je zřejmé, že ani v celé naší metagalaxii nemohlo dojít za dobu její existence ke vzniku (byť jen dočasnému) všech možných struktur velkých makromolekul ani při podmínkách pro jejich vznik optimálních.

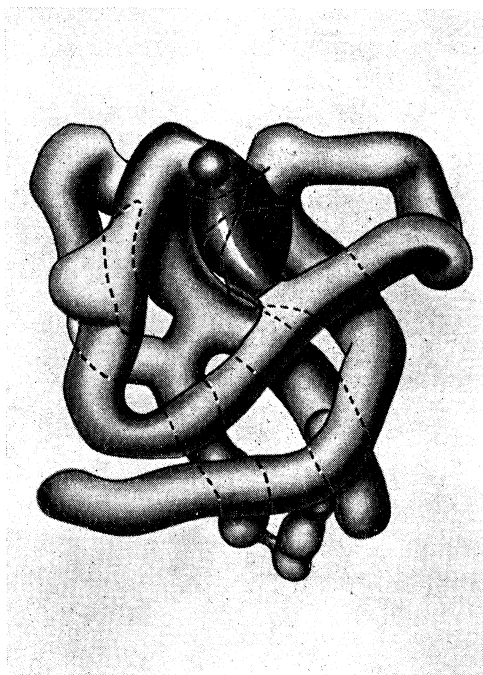
Rozdíl mezi předurčeností struktur atomů a malých molekul a velkou volností struk-

tur makromolekul má pro úvahy o použitelnosti fyzikálních zákonů v živých soustavách velký význam. Jednoduchá fyzikální individua nemohou ve své struktuře (v základním stavu) nést jakoukoli informaci – například o způsobu, jakým vznikly – a pouze krátkodobě mohou odrážet ve svém vzbuzeném stavu vnější energetické působení (třeba absorpci fotonu), a vznikají také zcela spontánně.

Zcela opačná je situace u makromolekul: náhodné (spontánní) vytvoření makromolekuly zcela určité struktury z daného souboru atomů má velmi malou pravděpodobnost, a tak složité makromolekuly, jako jsou molekuly deoxyribonukleové kyseliny s určitým pořadím čtyř různých bází nebo specifické bílkovinné molekuly dnes známých živých organismů vznikají pouze tak, že v systému, kde jejich syntéza probíhá, je vedle dostatečného počtu menších molekul, tvořících stavební jednotky, uložena informace určující postup této syntézy.

Molekulární biologie, která je vlastně přímým prodloužením kvantové mikrofyziky do oblasti živých systémů, určila strukturu řady makromolekul důležitých pro funkci živých organismů, a v posledních letech zjistila i způsob, jakým jsou uloženy informace k syntéze makromolekul bílkovin v buňce. Detailní struktura je sice zatím známa jen pro malý počet molekul bílkovin, avšak obecný obraz jejich struktury i řetězu procesů, kterými se přenáší informace od molekul nukleových kyselin až ke struktuře bílkovin, byl v zásadě pochopen (viz např. [9]).

Žádný z procesů, zatím nalezených v souvislosti s ukládáním informace a jejím přenosem při výstavbě molekul bílkovin v buňkách, nevybočuje z možností fyzikálního popisu



Obr. 4. Prostorová struktura molekuly myoglobinu. Primární struktura (sled aminokyselin) ani sekundární struktura (šroubovice) nejsou rozlišeny; je patrna pouze terciární struktura, vzniklá bočními vazbami mezi určitými aminokyselinami řetězce. Podle Kendrewa [11].

(případně chemického popisu, jehož podstatou jsou ovšem kvantové elektromagnetické interakce). Naopak, zjišťují se zajímavé a zpravidla málo zdůrazňované analogie s mikrofyzikou právě pokud jde o předurčenost či omezenost struktur. Je například známo, že informace uložená v makromolekule deoxyribonukleové kyseliny (DNK) určuje pouze primární strukturu, tj. pořadí 20 různých aminokyselin v lineárním řetězu molekuly bílkoviny. Přitom právě sekundární a terciární struktura bílkovin, tj. jejich prostorová struktura souvisí se specifickými funkcemi různých bílkovin v organismu a je velmi různorodá – některé molekuly mají tvar blízký kulovému, jiné jsou plošné, jiné tvoří dlouhá vlákna apod. Na přirozenou otázku, kde získá molekula bílkoviny informaci o tom, jakou prostorovou konfiguraci má její řetěz vytvořit, dávají biochemické pokusy nyní již téměř s jistotou odpověď, že pořadí aminokyselin v řetězu je samo o sobě dostatečné k tomu, aby v daných podmínkách, tj. při určité teplotě a pH prostředí zaujala molekula bílkoviny právě jediné zcela určité prostorové uspořádání. To se vytváří spontánně pomocí vazeb mezi částmi lineárního řetězu aminokyselin, slabších, než jsou vazby mezi aminokyselinami řetězce. Prokazují to i pokusy s reverzibilní denaturací molekul bílkovin, které při změně pH roztoku mohou ztratit svůj tvar, avšak znovu ho získají při vnoření do původního prostředí.

Spontánní vznik a jednoznačnost prostorové struktury makromolekuly bílkoviny při určitém sledu aminokyselin je jevem velmi podobným spontánnímu vzniku jednoznačné struktury atomu či malé molekuly. Jediný rozdíl je v principiální volnosti postupného sledu a výběru 20 různých aminokyselin v lineárním řetězci molekuly: tato rozsáhlá volnost musí být – pro vznik zcela určité molekuly – odstraněna, a to se děje uplatněním informace předávané několikastupňově od molekuly DNK způsobem známým dnes již podrobně až do molekulárních procesů. Při vytváření membrán a vláken fungují zase molekuly bílkovin jako základní stavební kameny, které se spolu váží již velmi slabými zbytky elektromagnetických sil. Prostorové uspořádání atomů v bílkovinných molekulách, jejich specifický tvar i místa na jejich povrchu schopná vázat se s odpovídajícím místem na sousední molekule určují strukturu takové nové jednotky podobně jako vlastnosti atomu (nebo elementární buňky) určují strukturu krystalu. I struktura tkání složených z buněk je podobným způsobem určena tvarem buněk a vlastnostmi kohezních mezibuněčných sil – nejslabších zbytků elektromagnetických interakcí, které jsou ještě s to při teplotě kolem 300 °K tvořit další jedince z navzájem vázaných jednotlivých buněk. Teprve v posledních letech se začínají zkoumat analogie seskupování makromolekul a buněk se vznikem krystalů. Některých kvantitativních výsledků se již dosáhlo při studiu přechodu šroubovice – klubko u molekuly DNK ([10]). Ta se v této teorii uvažuje jako neperiodický jednorozměrný krystal, jehož elementárními buňkami jsou nepravdělně se opakující čtyři známé báze (adenin, thymin, guanin a cytosin) s korelačním číslem rovným dvěma, takže každá báze má vždy pouze dva sousedy. Přechod spirála – klubko odpovídá tání obyčejného krystalu.

U některých makromolekul – zvláště těch, které hrají roli enzymů – se projevuje určitá tolerance ve struktuře, která spočívá v tom, že pouze část povrchu molekuly plní specifickou funkci, např. při syntéze jiných molekul, a na jiných částech molekuly nezáleží. Různé molekuly mohou tak mít pro určitou syntézu stejný účinek. U vyšších organismů jsou v částech specifických bílkovinných molekul, nevýznamných pro jejich hlavní

funkci, strukturálně zakotveny znaky o příslušnosti molekuly určitému individu. Ty způsobují mj. známou neslučitelnost tkání různých individu téhož druhu, vedoucí například k obtížím při transplantacích u vyšších živočichů a člověka.

Mnohé z uvedených příkladů vlastností makromolekul a složitějších struktur nejsou ještě přijaty jako platné zcela obecně. Do všech detailů struktury se podařilo vedle molekul nukleových kyselin proniknout zatím jen u malého počtu bílkovinných makromolekul. Uvedli jsme je zde v prostém výčtu, a ani jsme se nezabývali obtížností experimentálního výzkumu složitých molekulárních a buněčných struktur či jejich metabolismu. Co je z hlediska sjednocování různých oborů přírodních věd v uvedeném výčtu podstatné, je zřejmá vzájemná návaznost ve sledu struktur od nejjednodušších částic, které vždy patřily fyzice, až po makromolekuly a živé organismy, jejichž vlastnosti zkoumá chemie a biologie. Rovněž stejná podstata vzájemného působení (společné jsou především elektromagnetické interakce), které se uplatňuje jak u fyzikálních, tak u chemických a biologických individu, ukazuje na možnost úplného popisu všech těchto struktur zákony kvantové fyziky. Skutečnost, že živé organismy a složité molekuly důležité pro životní pochody vznikají v dnes známých případech pouze reprodukcí s uplatněním genetické informace, je nutným důsledkem nesmírné rozmanitosti struktur, kterou makromolekuly mohou principiálně nabývat: spontánní vznik jedné určité velké makromolekuly, obdobný spontánnímu vzniku jader, atomů a malých molekul, má pravděpodobnost prakticky nulovou.

K úplné spojitosti sledu individu v tabulce na str. 78 chybí pouze konkrétní znalost procesů a příslušné pravděpodobně velmi jednoduché struktury, které vytvořily první úspěšnou informaci o stavbě individu schopných reprodukce a dalšího vývoje. Jakmile se podaří způsob vzniku nejprimitivnějších organismů najít – ať už experimentální nebo teoretickou cestou – bude sled individu od elementárních částic až po člověka spojitý a zmizí i poslední pochybnosti o použitelnosti zákonů moderní fyziky pro biologické objekty.

Jednoznačnost a alternativnost struktur individu může – pokud bychom vůbec pokládali za důležité hledat a definovat hranice mezi fyzikou, chemií a biologií – sloužit k modernímu vymezení působnosti fyziky a ostatních oborů přírodních věd. Zatímco společně všem těmto oborům je složení příslušných individu z elementárních částic při působení (nejvýše) čtyř typů fyzikálních sil, lze spatřovat podstatnou rozdílnost v tom, že

- a) struktura fyzikálních individu je v jejich nejnižším energetickém stavu určena jednoznačně pouze ze zákonů fyzikální interakce;
- b) chemická individua mohou mít při stejném složení strukturu základního stavu různou a tato struktura je pak závislá i na způsobu, jakým individuum vznikalo;
- c) biologická individua mají kromě toho ve své struktuře uloženou úplnou informaci o způsobu reprodukce své struktury a jsou schopna tuto strukturu reprodukovat.

## **Extrémní stavy hmoty**

Příslušnost fyziky pro zkoumání vlastností látek v podmínkách podstatně odlišných od těch, které známe nebo můžeme uskutečnit na Zemi, není dnes předmětem sporů.

Pro stavy látek při teplotě blízké absolutní nule (příslušná individua patří do nejhornější části tabulky), je současný stupeň znalostí elementárních částic a jejich interakcí s největší pravděpodobností již dostatečný pro úplné vysvětlení pozorovaných jevů. Astrofyzika, astronomie, kosmologie jsou nesporně částmi — i když velmi rozsáhlými — současně fyziky. Integrace těchto oborů v rámci fyziky byla již přirozeným vývojem uskutěčněna, a rozhodující měrou k tomu přispěla, vedle obecné teorie relativity, právě jaderná fyzika a fyzika elementárních částic.

Směrem k vysokým energiím interakcí (spodní okraj tabulky) se naopak řada pozorovaných jevů — například spektra hmotností nestabilních částic nebo chování částic při energetických srážkách — nedaří vysvětlit na základě současných znalostí. Zde se kupí nové, zatím neodvoditelné informace, a hlubší souvislosti se teprve hledají. Snaha po sjednocení popisu a interpretace vlastností hmoty se zde dostala zatím nejdále v pokusech o jednotnou formulaci teorie elementárních částic a jejich vzájemného působení (nejznámější jsou Heisenbergovy pokusy o teorii univerzálního silového pole), zatím však nedosáhla uspokojivých výsledků.

## Závěr

Ukázali jsme na malém počtu vybraných příkladů, jak se stále více stírají hranice mezi fyzikou a ostatními obory přírodních věd. Fyzika jako obor, který se zabývá nezákladnějšími zákonitostmi hmoty — má v přírodních vědách výjimečné postavení právě tím, že po objevení elementárních stavebních jednotek hmoty a zákonů jejich vzájemného působení lze čím dál tím více odvozovat vlastnosti i velmi složitých struktur a zákonitosti jejich pohybu a vzájemného působení právě z vlastností elementárních částic a jejich vzájemného působení. Tato skutečnost se v dohledné době sotva výrazně projeví na konkrétní práci v řadě různých specializací přírodních věd. Je však pozoruhodným dokladem pokroku našeho vědeckého poznání a povzbuzením k využití pro úsporné i uspořádané sdělování a získávání vědomostí o světě, jehož jsme součástí.

## Literatura

- [1] L. BRILLOUIN, *Science and Information Theory*; New York, 1956.  
— *Scientific Uncertainty and Information*, New York, 1964.
- [2] I. NEWTON, *Optics*, vyd. B. Cohen, New York 1952, str. 400.
- [3] V. F. WEISKOPF, *Kvantová teorie a elementární částice*; Pokroky MFA, 13 (1968), 135.
- [4] E. J. CASEY, *Biophysics*. Reinhold Publ. Corp., New York, 1962.
- [5] R. N. RASHEVSKI, *Mathematical Biophysics*, Dover Publications, Inc., New York, 1960.
- [6] A. J. LOTKA, *Elements of Mathematical Biology*, Dover Publications, Inc., New York, 1956.  
(První vydání v r. 1925 mělo název *Elements of Physical Biology*.)
- [7] *Theoretical and Mathematical Biology*. Vyd. T. H. WATERMAN, H. J. MOROWITZ. Blaisdell Publishing Co, New York, 1965.
- [8] *Voprosy bioniki*. Moskva, 1967, nakl. Nauka. Pod redakcí M. G. GAAZE-RAPPOPORTA.
- [9] M. V. VOLKENŠTEJN, *Molekuly i žizň*. Izd. Nauka, Moskva 1965.
- [10] A. A. VEDENOV, A. M. DYCHNE, M. D. FRANK-KAMENĚCKIJ. *Uspěchi fiz. nauk* 105 (1971), 479.
- [11] J. C. KENDREW et al., *Nature*, 190 (1961), 666.