International Center of Education
www.intercedu.com

Pandémia COVID-19 očami fyziky

Prof. Štefan Luby, DrSc. · **Fyzik** · Slovenská akadémia vied, Bratislava, Slovensko

JUDr. Mgr. Martina Lubyová, PhD. · **Biofyzička, ekonómka a prognostička** · Slovenská akadémia vied, Bratislava, Slovensko

Ing. Richard Heriban, PhD. · **Ekonóm a prognostik** · Slovenská akadémia vied, Bratislava, Slovensko

Abstrakt

Kontrola pandémie COVID-19 musí čerpať z odborných znalostí virológov, epidemiológov, psychológov, ale aj matematikov a iných odborov. Medzi nimi fyzika ponúka svoje vlastné nástroje a teórie, ktoré dokážu vysvetliť mechanizmy šírenia choroby, jej lokalizáciu a potláčanie. Táto práca je založená na predpoklade, že sociálne systémy s ich interakciami sú príliš zložité na to, aby sa dali modelovať jednoduchým spôsobom pomocou priamočiarych analytických modelov. To isté platí pre biologické procesy v živých organizmoch. Preto sa empirické fyzikálne modely často používajú ako užitočné aproximácie, ktoré môžu viesť k hmatateľným výsledkom. V tejto práci využívame fenomenologickú teóriu difúzie, kinetickú teóriu plynov, gravitačný model, analógiu s rekombináciou nosičov náboja v polovodičoch a teóriu perkolácie na skúmanie šírenia pandémie COVID-19 na Slovensku a v jeho susedstve. Výsledky ukazujú, že šírenie choroby je približne také rýchle ako transfer migrantov do Európy v posledných rokoch. Hustota populácie je dôležitým faktorom prenosu ochorenia. Do úvahy však treba brať aj ekonomické faktory, zvyky ľudí, ich obavy z kolapsu zdravotníctva, zadlženosti domácností a pod. Výsledky fyzikálnych riešení sú vo veľkej miere závislé od presných vstupných štatistík a sú ovplyvnené často sa meniacimi opatreniami.

MOTIVÁCIA

Medzinárodné vzdelávacie centrum INTERCEDU venuje okrem iných aktuálnych tém pozornosť aj pandémii COVID – 19, ktorá postihla celý svet. Vo webovom priestore Centra uverejnili v preklade Vyhlásenie k eskalácii pandémie COVID-19 Európskej akadémie vied a umení v Salzburgu [1] a originálny výskum COVID -19 [2], spracovaný popredným slovenským virológom J. Rajčánim. Doplňuje ich článok o šírení ochorenia, ktorý sa opiera o fyzikálne metódy a v prvom skrátenom vydaní bol prezentovaný na konferencie APCOM 2021 [3]. Tým sa vytvára trojuholník poznania pandémie COVOD – 19, ku ktorému prispieva samozrejme aj matematika a štatistické analýzy, história, sociológia a predovšetkým medicína a farmácia.

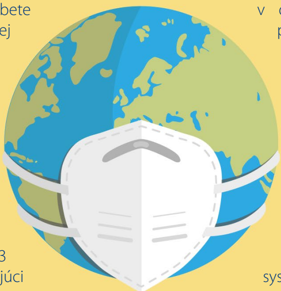
ÚVOD

Tabuľka 1 zhrnuje históriu najväčších pandémií[1] v dejinách. Nie je v nej zahrnutá tuberkulóza, hepatitída B a C, príčinou je nedostatok presných údajov.

Tab. 1 Najväčšie pandémie v dejinách [4] zoradené podľa počtu obetí

Pandémia	Ochorenie	Obdobie	Obete absolútne	Obete globálnej populácie [%]	Lokalizácia
Čierna smrť	čierny mor	1346 – 1353	75 – 200 mil.	17 – 54 %	Európa, Ázia, S. Afrika
Španielska chrípka	chrípka	1918 – 1920	17 – 100 mil.	1 – 5.4 %	Svet
Justiniánsky mor	čierny mor	541 – 549	15 – 100 mil.	7 – 56 %	Európa, Ázia, S. Afrika
HIV/AIDS	HIV/AIDS	1981 – dodnes	40.1 mil. (2021)		Svet
COVID-19	COVID-19	2019 –	7 – 25 mil. (aug. 2022)	0.1 – 0.3 %	Svet
3. morová pandémia	čierny mor	1855 – 1860	12 – 15 mil.		Svet
Cocoliztli epidémia	cocoliztli	1545 – 1548	5 – 15 mil.	1 – 3 %	Mexiko
Antoninský mor	kiahne	165 – 190	5 – 10 mil.	3 – 6 %	Rímska ríša
Epid. ruského týfusu	týfus	1918 – 1922	2 – 3 mil.	0.1 – 0.16 %	Rusko
Cholera	cholera	1846 – 1860	1 mil. +	0.08 %	Svet

[1] Používame terminológiu podľa Encyklopédie Beliana, zv. 4 – epidémia je zvýšený výskyt infekčných ochorení v určitom časovom úseku na ohraničenom území (endémia) alebo celosvetovo (pandémia).



Môže byť prekvapujúce, že v 21. stor. s vyspelou vedou môže človeka prekvapiť pandémia, ktorá má za následok obete v desiatkach miliónov, na druhej strane percentuálna strata svetovej populácie je malá. To odráža faktor exponenciálne rastúceho počtu obyvateľov Zeme a umožňuje hľadať súvis medzi nezvládnutou pandémiou a takými ďalšími nezvládnutými globálnymi katastrofami, ako je antropologická zložka klimatickej zmeny, strata biodiverzity a pod. Nie je preto čudné, že sa objavujú názory hraničiace s mysticizmom, podľa ktorých je pandémia varovaním prírody človeku [5]. Poukazuje sa na to, že intenzívne farmárstvo, deforestrácia[2] a redukcia biodiverzity uľahčuje prenos vírusov medzi jednotlivými druhmi a na človeka [6]. Do týchto úvah zapadá aj hypotéza Gaia v júli 2022 zosnulého environmentalistu a futurológa, 103 ročného J. E. Lovelocka. Podľa Gaia sa Zem správa ako samo sa regulujúci system [7]. Robiť z týchto úvah vedecké závery je predčasné, ale varovanie tu je.

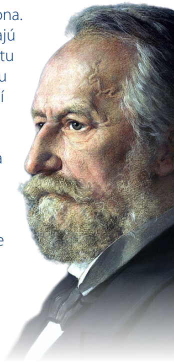
[2] Zánik antického mesta Paestum sa spája s deforestráciou a zmenou v odtoku vody, čo vytvorilo podmienky pre šírenie malárie.

FYZIKÁLNE METÓDY MODELOVANIA SPOLOČENSKÝCH PROCESOV

1. Rozšírené sú aplikácie fenomenologickej teórie difúzie – prvého a druhého Fickovho zákona. Predstavujú jednoduchý opis difúzie bez uvažovania molekulových mechanizmov. Vychádzajú z empirického poznatku, že difúzia v systéme prebieha v smere záporne vzatého gradientu koncentrácie. Zákony sa aplikujú vo fyzike a v technológii materiálov, uplatňujú sa v štúdiu šírenia inovácii [8], zdieľaní technológie obnoviteľných zdrojov energie [9] alebo v mapovaní migračných tokov [10].

2. Užitočná je kinetická teória plynov [11]. Zdieľa sa názor, že vlastnosti veľkého množstva molekúl a správanie sa veľkých komunít majú spoločné črty [12]. Nevyhneme sa pritom zavedeniu virtuálnej „sociálnej" teploty. Francúzsky filozof M. Halowachs sa ňou zaoberal už r. 1830 a A. Lepkowski upozornil na to, že nelineárna termodynamika I. Prigogina pomáha pochopiť spoločenské javy [13]. (Sama termodynamika a jej princípy nachádzajú uplatnenie aj vo formulovaní zákonitostí a v modelovaní dynamiky epidémie, napr. [14]).

3. Ďalším nástrojom je gravitačný model odvodený z Newtonovho gravitačného zákona. Aplikuje sa od začiatku 20. storočia v urbanizačných procesoch [15] i na charakterizovanie migrácie [10, 16].



Adolf Eugen Fick

4. Určitú analógiu šírenia korona-vírusu nájdeme v rekombinácii nosičov náboja v polovodičoch [17].

5. Teória perkolácie je efektívny nástroj na štúdium prenosu patogénov COVID-19 [18]. Operatívne ju aplikovali A. Bonasera a kol. [19, 20]. Uvedieme niektoré ich výsledky.

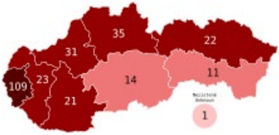
KRÁTKA RETROSPEKTÍVA

Difúzny model sa uplatňuje v prvých týždňoch pandémií, kedy ešte nie sú prijaté lokalizačné a karanténne opatrenia a nie je obmedzený voľný pohyb osôb, ktoré sú prenášačmi nákazy. Aby sme mohli tento model uplatniť, pripomenieme si začiatok celého procesu u nás a v strednej Európe. Môže to byť poučné aj pre históriu.

Prvá vlna nákazy vírusom SARS-CoV-2 na Slovensku začala 6. marca 2020. Opatrenia na kontrolu cezhraničného pohybu boli v strednej Európe zavedené v polovici marca 2020. Situáciu z konca marca zachytáva obr. 1. Začiatkom mája sa situácia dočasne stabilizovala.

Druhá vlna sa prejavila zhoršením situácie medzi 20. augustom a 10. septembrom 2020. Denné prírastky boli okolo 100 s maximom 226. Bratislava a jej 50 km okolie mali na týchto prírastkoch podiel 47 %. Veľký nárast zaznamenali aj iné krajiny. Od 15. septembra do 15. novembra sa situácia dramaticky zhoršila. Prekročili sme denný prírastok 3 000 nakazených. Kritické boli okresy severozápadného Slovenska, kde je ekonomika závislá od zamestnanosti v Českej republike a Poľsku (úloha pendlerov). Potom nastala inverzia, najlepšia situácia bola v Bratislave, kde sa zúročili skúsenosti z predchádzajúcich mesiacov. Počet infikovaných pomocou testov PCR sústredených na podozrivé osoby sa v tretej dekáde novembra pohyboval okolo 20 %. V dôsledku vianočných sviatkov a sezónnych podmienok spomínaná hodnota aj v marci 2021 kolísala okolo 20 % a zlepšenie sme zaznamenali až v polovici apríla, kedy sa počet nakazených znížil na polovicu a reprodukčný faktor R0 sa dostal pod 1. Spokojnosť s priebehom prvej vlny na Slovensku sa vypomstila v druhej vlne. Postavenie Slovenska v strednej Európe bolo v strede poľa (tabuľka 2).

Obr. 1 Distribúcia 267 infikovaných osôb na Sloensku 27. 3. 2020. Aj keď počty sú z hľadiska štatistiky malé, sú náznaky šírenia nákazy z Rakúska, Českej republiky a pozdĺž hlavnej dopravnej infraštruktúry vedúcej Považím. (https://www.dnes24.sk/)



Krajina	Počet infikovaných na 1 mil.	Smrteľné prípady [%]
Rakúsko	64 253	1,68
ČR	147 796	1,77
Maďarsko	75 518	3,29
Poľsko	68 753	2,27
Slovensko	68 118	2,88
Ukrajina	43 025	2,02

Tab. 2. Situácia v strednej Európe 12. 4. 2021 [21]

DIFÚZIA V ŠTÚDIU DYNAMIKY EPIDÉMIE

Dva základné typy difúzie v tuhých látkach, napr. v polovodičoch, sú

a) difúzia z časovo konštantného, teda neobmedzeného zdroja prímesí na povrchu,

b) difúzia z konečného zdroja prímesí na povrchu, ktorý sa postupne vyčerpá a dopanty sa prerozdelia v objeme polovodiča.

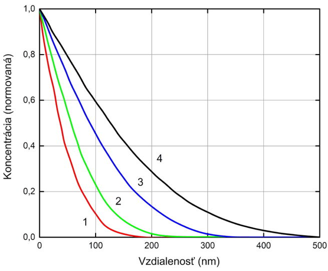
Naše modelovanie sa opiera o prvý typ, lebo vírus sa reprodukuje s faktorom RO spravidla väčším ako 1. Potom z tzv. 2. Fickovho zákona pre jednorozmený prípad (vo smere x) dostaneme riešenie

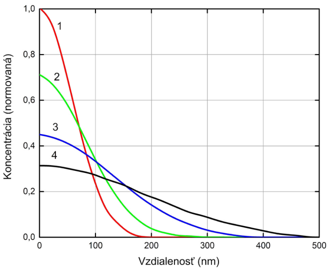
$$N\,(x,t) = N_p\ \mathrm{erfc}\ [x/\ 2(\mathrm{D}t)^{0.5}] \qquad (1)$$

kde N je koncentrácia prímesí v mieste x a v čase t, N_p je koncentrácia na povrchu, v našom prípade v primárnom ohnisku alebo na hranici štátu, D je koeficient difúzie a erfc je komplementárna funkcia chýb. Difúzna vzdialenosť je

$$L = 2\sqrt{\mathrm{D}t} \qquad (2)$$

Príklady difúznych profilov sú v obr. 2.





Obr. 2 Difúzne profily bóru v kremíku pri teplote difúzie 1100 °C. Krivky 1 – 4 zodpovedajú trvaniu difúzie 1, 2, 5 a 10 min. Vľavo difúzia z neobmedzeného a vpravo z konečného zdroja prímesi [10].

Problémom modelovania na Slovensku na začiatku pandémie boli – našťastie – nízke počty nakazených, ktoré nás v prepočte *per capita* kládli na poprednú pozíciu v EÚ. Základná izotermálna difúzia v gradiente koncentrácie stimulovaná tzv. konfiguračnou hnacou silou predpokladá totiž gradient koncentrácie ako spojitú funkciu, čo v tomto prípade nie je celkom splnené. Za zmienku stojí, že v prípade profilov ad a) nová prímes môže rozdelenie pôvodných prímesí prekryť. Situácia pripomína vlnu cunami v plytkej vode, ktorá zaplavuje pobrežné oblasti. Naopak, pri type b) dochádza k prerozdeleniu prímesí v objeme materiálu, ktoré výsledné rozdelenie ovplyvňujú len čiastočne.

Vykonali sme výpočty difúzneho koeficientu na začiatku prvej vlny v okolí Bratislavy a okolia (obr. 1). Hodnota D z (2) bola 12 km^2/deň. (Túto jednotku sme zaviedli v [10] pri riešení difúzie migrantov. Koeficient v polovodičoch je vyjadrený v jednotkách cm^2/s.) Rýchly rast počtu infikovaných v druhej vlne v severozápadných okresoch Slovenska svedčí o vzkriesenie difúzneho transportu. Ak zoberieme do úvahy vzdialenosti medzi príslušnými slovenskými lokalitami a českými a poľskými destináciami, dostaneme D = 27 km^2/deň. Pre porovnanie, koeficienty difúzie pre rôzne historické presuny obyvateľstva sú nasledovné:

Presun	Difúzny koeficient [km^2/deň]
Zlatá horúčka v Kalifornii	1370
Osídlenie Sibíri po Bajkalské jazero	142
Migrácia do Európy v r. 2013 [10]	52
Presun Maďarov do Karpatskej kotliny	9

Podobnosť medzi migráciou a šírením pandémie COVID – 19 vyplýva zo skutočnosti, že v oboch prípadoch sa uplatnili podobné transportné mechanizmy.

PREDSTAVY ODVODENÉ Z KINETICKEJ TEÓRIE PLYNOV

Nerovnomerné rozšírenie nákazy, príklad ktorého je na obr. 1 a ktoré vzniklo cezhraničnou difúziou, sa neskôr zmení na mozaiku viac alebo menej postihnutých regiónov. Súvisí to s lokálne reprodukovanou nákazou, príkladom čoho bola u nás situácia v osadách. Možno tu uvažovať v kontexte kinetickej teórie plynov, keď hľadáme analógiu medzi pohybom molekúl ideálneho plynu a ľudí. Základný vzťah teórie

$$\langle mv^2/2 \rangle = 3kT/2 \qquad (3)$$

dáva do súvisu strednú kinetickú energiu translačného pohybu molekúl plynu $\langle mv^2/2 \rangle$ s jeho teplotou T (termodynamickou teplotou v Kelvinovej stupnici.) Hmotnosť molekuly je m, v je rýchlosť a k – Boltzmannova konštanta [11]. Najpravdepodobnejšia rýchosť molekúl je:

$$v_p = \sqrt{\frac{2kT}{m}} \qquad (4)$$

Predstavujeme si, že vírus sa zdieľa lokálne pohybom a stretnutiami – vo vyjadrení molekulárnej teórie zrážkami – osôb. Teplotu plynu môžeme personifikovať s "teplotou" spoločenského prostredia. Tu možno uvážiť viacero podôb tejto teploty.

- Je to teplota charakterizujúca mechanický pohyb a jeho rýchlosť a odvodenú frekvenciu "zrážok". Rastie počas víkendov a sviatkov, pri udalostiach typu svadieb, pohrebov, pri poradách a p.
- Iný typ teploty vyjadruje temperament daného etnika. (Teplejšia klíma = emocionálnejší ľudia je predpoklad, ktorý vyslovil už r. 1748 Montesquieu [23]). Možno, že s tým súviseli na začiatku pandémie väčšie problémy v južnej Európe, osobitne v Taliansku.

• Tretí typ teploty súvisí s ekonomickou silou krajiny, obchodom a inými profesionálnymi aktivitami. Môže to vysvetliť prekvapujúce problémy ekonomicky vysoko rozvinutých krajín.

Kinetická teória plynov nás nabáda znižovať spoločenskú teplotu Lokalizácia má svoj význam, znižuje však kvalitu života, môže byť vyvážená depresiami, znižovaním imunity a i. Ignorovanie lokalizačného režimu otvorí však dvere difúznemu šíreniu nákazy na väčšie vzdialenosti.

APLIKÁCIA GRAVITAČNÉHO MODELU

Gravitačný model je analógiou Newtonovho gravitačného zákona. V spoločenských systémoch sa adaptuje na geografické či demografické účely a zapisuje sa v logaritmickej forme, napr. [24]

$$\log F_\mathrm{d} = \mathrm{a} \,.\, \log P_1 + \mathrm{b} \,.\, \log P_2 - \mathrm{c} \,.\, \log r + \mathrm{d} \,.\, \log X \qquad (5)$$

kde F_d je demografická sila, ktorá meria sociálnu interakciu, napr. migračný tok, P_1, P_2 sú početnosti populácie v interagujúcich centrách, veličina X vyjadruje ďalšiu premennú, ako HDP, zamestnanosť a a, b, c, d sú fitovacie konštanty, pričom $c \geq 0$. Gravitačný model zavádza do štúdia procesov vzdialenosť medzi interagujúcimi subjektmi. V ďalšom sa pokúsime odhadnúť jej vplyv, ktorý je v šírení nákazy určujúci a prejavuje sa v stanoveniach bezpečnej vzdialenosti, izolovaní nakazených, karanténe potenciálnych šíriteľov či eliminovaní prenosových „pascí", o ktorých sa zmienime neskôr.

V našom príklade model aplikujeme na porovnanie situácie v Bratislave a v metropolách Viedeň, Praha, New York (tabuľka 4). Predpokladáme, že potenciál nákazy je úmerný početnosti populácie P a nepriamo úmerný strednej vzdialenosti L medzi občanmi, avšak v tomto prípade mocninovo s exponentom α, teda $\approx P/L^\alpha$. Uvažujeme rozdelenie občanov v uzloch štvorcovej siete. Potom $L = 1/(\sigma)^{0.5}$, kde σ je plošná hustota obyvateľstva v meste. V ďalšom ju vyjadríme ako bezrozmernú veličinu L_1 normalizovanú na dĺžku 1 m, pretože bezpečná vzdialenosť sa spravidla stanovuje ako 2 m. Počet nakazených N potom vyjadríme vzťahom

$$\log N = \mathrm{K} + \log P - \alpha \log L_1 \qquad (6)$$

kde K je konštanta úmernosti ktorá vyplynie z fitovacieho procesu.

Tab. 4 Infikovanie občanov a súvisiace demo- a geografické veličiny, 5. – 6. 5. 2020. (Údaje pochádzajú z internetových stránok miest a národných máp šírenia pandemie, napr. [21].)

Mesto	P (2019)	σ [km^{-2}]	L_1	N (5. -6. 5. 2020)	N/P
Bratislava	437 725	1 190,5	29,0	206	$4{,}4.10^{-4}$
Viedeň	1 897 776	4326	15,2	2204	$1{,}2.10^{-3}$
Praha	1 294 513	2582	19,7	1782	$1{,}4.10^{-3}$
New York City	8 399 000	10 715	9,7	181 034	$2{,}1.10^{-2}$

Model aplikujeme na niekoľko kombinácií miest Bratislava, New York, Praha a Viedeň. Do (6) dosadíme pre zvolenú dvojicu jej údaje, čím dostaneme dve rovnice o dvoch neznámych K a α. Výsledky sú v tabuľke 5.

Tab. 5 Exponent α a konštanta K pre štyri kombinácie miest z tabuľky 4.

Kombinácia	Exponent α	Konštanta K
Bratislava – Viedeň	1,4	-1,29
Batislava - Praha	2,8	0,70
Bratislava – New York	3,4	1,85
Praha – New York	4,0	2,30

Z hodnôt α vidieť, že vplyv hustoty osídlenia je značný a bezpečné vzdialenosti treba dodržiavať.

PODOBNOSŤ S REKOMBINÁCIOU NOSIČOV NÁBOJA V POLOVODIČOCH

Pre funkciu polovodičových súčiastok je významná generácia párov elektrón-diera absorpciou fotónov. Elektróny a diery sa po čase zase spoja – rekombinujú [17]. V polovodiči ako GaAs s tzv. priamou pásovou štruktúrou prebieha radiačná bimolekulárna rekombinácia. Dochádza pritom k emisii žiarenia – napr. ako v LED svietidlách. V najviac používanom polovodiči – v kremíku s nepriamou pásovou štruktúrou prebieha neradiačná rekombinácia s uvoľnením fotónu aj fonónu – tepelného kvanta. Túto sprostredkujú pasce v polovodiči. Je to tzv. Shockley-Read-Hallov mechanizmus. Pasce sa vytvoria dotovaním alebo sú to defekty kryštálovej mriežky.

Táto pasáž poukazuje na to, že nestačí, aby sme vylúčili „bimolekulárne" interakcie, teda aby sa ľudia v dopravných prostriedkoch alebo supermarketoch nedotýkali. Treba sa vyhnúť prenosu vírusu prostredníctvom pasce – predmetu z kovu, plastu alebo iného materiálu, na ktorom vírus ulpje na určitý čas. Hovoríme o perzistencii, vybrané výsledky podľa [25] sú v tabuľke 6. Dôležité sú v našom prípade obaly potravín. Zabalené predmety mohli vziať do ruky zákazníci, ktorí ich nekúpili a urobili z nich infikované "pasce" v skutočnom zmysle slova.

Prenosom bimolekulárneho typu sa bránime rúškami, respirátormi, vzdialenosťou. Prenosu cez pasce sa bránime rukavicami, najlepšie jednorázovými, ktoré dostaneme priamo v obchode. Nezaškodí obaly potravín doma dezinfikovať.

Tab. 6 Perzistencia SARS-CoV-2 na niektorých povrchoch [25]

Prostredie, materiál	aerosól	plast	oceľ-nerez	meď	kartón
Perzistencia CoV-2 [h]	3	72	48	4	24

Pozn.: pri medi a kartóne sa po uvedenom čase nezistila prítomnosť vírusu. Pri ďalších materiáloch bol pokles 500 až 1300 násobný a v aerosóle 6-násobný.

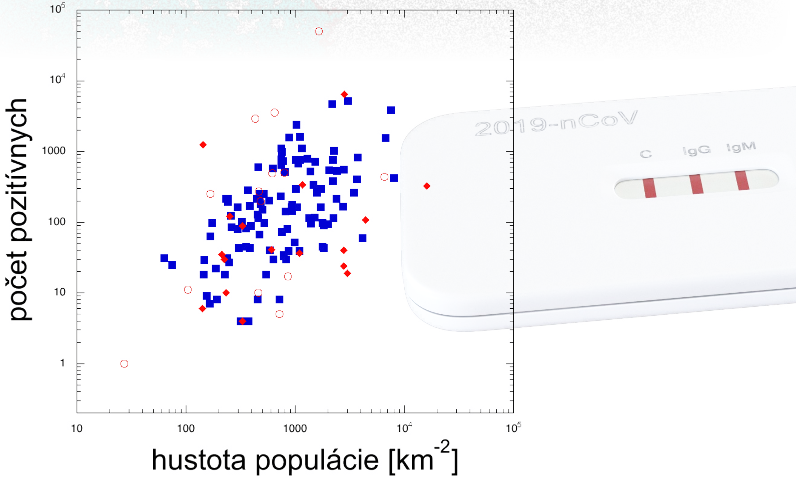
POZNATKY Z TEÓRIE PERKOLÁCIÍ

V inžinierskych disciplínach perkolácia opisuje prietok či presakovanie kvapaliny cez porézne médium, napr. v geológii. V matematike a fyzike študuje vytváranie konektivity v modeloch náhodných systémov alebo sietí. Pod perkolačným prahom rozumieme kritickú hodnotu pravdepodobnosti obsadenia pozícií (alebo väzieb) v takom systéme, pri ktorom konektivita (perkolácia) vznikne. Teória perkolácií zahrnuje teda vplyv priestorovej distribúcie subjektov a je prirodzeným nástrojom na štúdium šírenia epidémií a úrovní epidemického prahu [18, 26, 27]. Potenciál teórie perkolácií v šírení patogénov dokummentujú Washburne et al. [18]. Táto práca z r. 2019 však pandémiu COVID-19 ešte nezachytila. Pravdepodobnosť prenosu patogénu modeluje v trojuholníku pokrytia obyvateľstva vakcináciou, hustoty obyvateľstva a environmentálnych rizík, napr. prenosy infikovaným hmyzom.

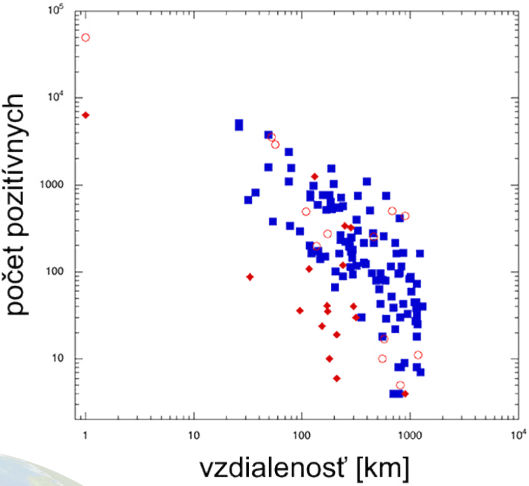
V súvislosti s pandémiou COVID-19 bola teória perkolácií pohotovo použitá v [19, 20]. V [19] sa skúma rast zárodku nákazy a jeho šírenie v závislosti od hustoty populácie σ. Základný vzťah má tvar

$$\rho = \sigma / x \qquad (7)$$

kde ρ je faktor šírenia do vzdialenosti x. Kritickú hodnotu hustoty populácie uvádzajú 1000/km^2. Vybrané výsledky sú v obr. 3, 4.



Obr. 3 Počet pozitívnych prípadov COVID-19 (20. 3. 2020) v závislosti od hustoty populácie. Znázornené sú provincie v Taliansku (plné štvorčeky), Južnej Kórei (plné kosoštvorce) a v Číne (krúžky), [19], kredit A. Bonasera.



COVID-19
CORONAVIRUS
Positive
Negative

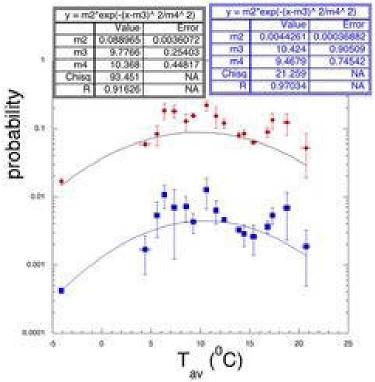
Obr. 4 Počet pozitívnych prípadov COVID-19 (20. 3. 2020) v závislosti od vzdialenosti od centra infekcie. Znázornené sú provincie v Taliansku (plné štvorčeky), Južnej Kórei (plné kosoštvorce) a v Číne (krúžky). Centrum nákazy bolo lokalizované vo Wuhane, Čína, v Daegu, Južná Kórea a medzi mestami Bergamom a Bresciou v Lombardii, neďaleko Milána, Taliansko, [19], kredit A. Bonasera.

V [19] nájdeme aj vzťahy pre dosiahnutie saturácie nákazy, ktorá nevylučuje jej opätovné vzplanutie. Priebeh COVID-19 nezávisí iba od hustoty populácie, ale aj okrajových podmienok, akou je ostrovný charakter štátu – Japonsko, kde navyše obmedzili turizmus. Ak s odstupom času, po piatich mesiacoch (20. 8. 2020) porovnáme pomery v porovnateľných štátoch kategórie G7, teda v Japonsku a Nemecko, vidíme veľké rozdiely: Japonsko počet nakazených 57 550, počet úmrtí 1 128, Nemecko 229 700 resp. 9 314.

Práca [20] sa koncentruje na Taliansko a prichádza s námetom presunov obyvateľstva, najmä z krajín Lombardia, Liguria, Piemont, March do prírodných rezortov, ktoré boli vtedy – na jar – prázdne. Nedošlo k tomu, zrejme aj vlastná doprava je z hľadiska nákazy ohrozujúca.

Keď porovnáme výpočty v tejto kapitole s našimi úvahami v časti o gravitačnom modeli, vidíme analógiu vo význame hustoty obyvateľstva, dokonca kvantitatívne podobnej, okolo 1 000/km^2 a viac, ku ktorej sme dospeli iným postupom (tabuľka 4).

Posledný výsledok sa týka vplyvu teploty prostredia, teda sezónnosti na šírenie nákazy [28], obr. 5. Použili sa údaje z USA. Je zrejmé, že pravdepodobnosť šírenia nákazy je najväčšia okolo 10 °C.



y = m2*exp(-(x-m3)^2/m4^2)		
	Value	Error
m2	0.088965	0.0036072
m3	9.7766	0.25403
m4	10.368	0.44817
Chisq	93.451	NA
R	0.91626	NA

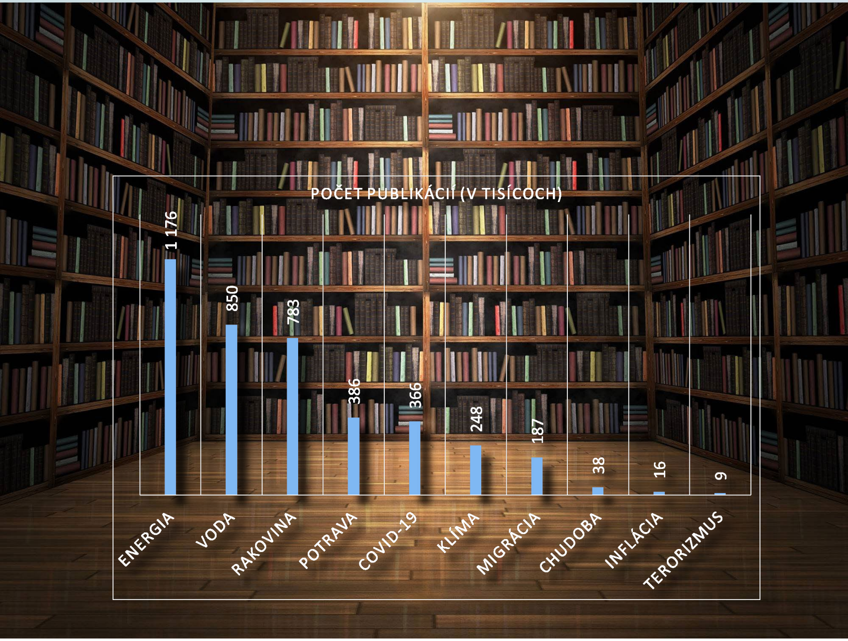
y = m2*exp(-(x-m3)^2/m4^2)		
	Value	Error
m2	0.0044261	0.00036882
m3	10.424	0.90509
m4	9.4679	0.74542
Chisq	21.259	NA
R	0.97034	NA

Obr. 5 Pravdepodobnosť nákazy – červené body a úmrtia – modré body vs. priemerná teplota v štátoch USA začiatkom mája 2020. Zatiaľ čo na severe, v okolí jazier, ešte mrzlo, na juhu už teplota dosiahla okolo 20 °C. Fitovacie parametre sú v tabuľkách, [28], kredit A. Bonasera.

ŠIRŠIE SÚVISLOSTI PANDÉMIE COVID-19 NA SLOVENSKU

Uspokojivé výsledky prvej vlny na Slovensku môžu súvisieť s disciplínou obyvateľstva, ktorá vyplývala z jeho obáv. Išlo zadlženosť nášho zdravotníctva aj domácností. V tom čase sme mali menej nakazených na obyvateľa ako západoeurópske krajiny. Druhá vlna bola beh na dlhšiu trať, ktorý závisel od vládnych opatrení, geografickej polohy, testovania, organizácie karantény, zdravotníctva, používania internetu, odolnosti priemyslu. Neuspokojivé výsledky strednej Európy (tabuľka 2), najmä v Českej republike, Maďarsku a na Slovensku, súvisia aj s ich umiestnením na európskej dopravnej križovatke. Dobré výsledky sa dosahujú v okrajových regiónoch Európy, ako je Škandinávia a malé ostrovné štáty. Na Slovensku tiež nie je dostatočná počítačová gramotnosť staršej generácie. Nesystémové opatrenia viedli ku konfliktom a únave obyvateľstva a mali za následok zbytočné straty na životoch. Pandémia COVID-19 je komplexný globálny problém (tabuľka 1), v ktorom dominuje očkovanie. Žiaľ, očakávaná nadobudnutá imunita jednotlivou vakcináciou sa nedosiahla a bolo potrebné opakovanie dávok. Európska komisia by mala pracovať na štandardizácii postupov boja proti tejto katastrofe na základe skúseností jednotlivých krajín.

Záverom uvedieme význam, ktorý veda a spoločnosť venuje pandémii COVID-19 v porovnaní s inými globálnymi problémami. Výsledky sú v tabuľke 7. COVID-19 sa podľa počtu vedeckých publikácií nachádza na piatom mieste za energiou, vodou, rakovinou a potravinami.



Obr. 6 Počty publikácií podľa databázy SCOPUS v období 2019 – 25. 9. 2022, v nadpise, abstrakte alebo kľúčových slovách ktorých sa objavil príslušný ukazovateľ, napr. energia.

ZÁVER

Aplikácia vybraných fyzikálnych teórií a modelov na šírenie vírusu SARS-CoV-2 prináša nasledujúce ponaučenia. Difúzny mechanizmus vedie k pomerne rýchlemu šíreniu choroby. Potvrdzuje to odhadovaný koeficient difúzie ≥ 12 km2/deň. Kinetická teória plynov naznačuje, že je potrebné udržiavať nízku „virtuálnu teplotu“ sociálneho systému. Teplota môže súvisieť s národným temperamentom jednotlivých etnických skupín alebo národov. Z gravitačného modelu vyplýva ponaučenie, že infekčnosť prudko rastie, ak sa zmenšuje stredná vzdialenosť medzi obyvateľmi v obytných štvrtiach. Náš model naznačuje rast až vo štvrtej mocnine. Analógia s rekombináciou nosičov náboja v polovodičoch poukazuje na nebezpečenstvo, ktoré predstavujú stacionárne pasce. Umožňujú šírenie vírusu aj vtedy, keď veľká vzdialenosť medzi osobami vylučuje možnosť priameho prenosu. Výpočty založené na teórii perkolácie sú v súlade so zisteniami gravitačného modelu. Ukázalo sa tiež, že virus sa šíri najrýchlejšie pri teplote okolo 10 oC, čo naznačuje sezónny charakter pandémie. Na druhej strane veľké reprodukčné schopnosti nových mutácií vírusu spôsobujú, že sezóny už nebudú take dôležité ako doteraz [29].

LITERATÚRA

[1] K. Mainzer, A. Oennerfors, G. Schiepeok at al., Vyhlásenie k eskalácií pandémie COVID-19, 2022 (Statement on the Escalating COVID-19 Pandemic, 2021), www.intercedu.com.

[2] J. Rajčáni, F. Bánáti, K. Szenthe et al., Infekcia koronavírusom, www.intercedu.com.
[3] M. Lubyová, Š. Luby COVID-19 Pandemic: Lessons from physics, AIP Conf. Proc 2411, 2021, 090002.
[4] https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_epidemics.
[5] J. Weckert, Is COVID-19 a message from nature? Nanoethics 14, 2020, 129 – 133.
[6] R. K. Plowright, P. Eby, P. J. Hudson et al., Ecological dynamics of emerging bat virus spillover, Proc. R. Soc. B 282, 2015, 2014 – 2124.
[7] https://en.wikipedia.org/wiki/Gaia_hypothesis.
[8] E. Rogers, Diffusion of innovations, 5th edition, Simon&Schuster, New York, 2003.
[9] K. Usha Rao, V. V. N. Kishore, A review of technology diffusion models with special reference to renewable energy technologies, Renew. and Sust. Energy Rev. 14, 2010, 1070 – 1078.
[10] Š. Luby, Present migration flows into Europe in terms of diffusion theory and gravity model, AIP. Proc. 1996, 2018, 020028-1 – 9.
[11] R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands, Feynmanove prednášky z fyziky, 2. diel, Bratislava, Alfa 1982, s. 239 – 258.
[12] M. Patriarca, A. Chakrabortiu, arXiv:1305.0768v3[physics-socph], 2017.
[13] htttp://www.eoht.info/page/Encyclopedia+of+Human+Thermodynamics.
[14] M. Koivu-Jolma, A. Annila, Epidemic as a natural process, Mathematical Biosciences, 299, 2018, s. 97 – 102.
[15] E. H. Fouberg, A. B. Murphy, H. J. de Blij, Human Geography, People, Place and Culture, J. Wiley and Sons, Hoboken, NJ, 2012.
[16] T. Afifi, K. Warner, The impact of environmental degradation on migration flows across countries, Working Paper No. 5, United Nation University, Bonn, Germany, 2008, 25 p.
[17] I. Ruge, Halbleiter-Technologie, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin 1984, S. 2018.
[18] A. D. Washburne, D. E. Crowley, D. J. Becker, K. R. Manlove, M. L. Childs, R. K. Plowright, Percolation models of pathogen spillover, Phil. Trans. R. Soc. B 374, 2019, 0331.
[19] A. Bonasera, S. Zhang, Chaos, percolation and coronavirus spread, Front. Phys. 8, 2020, 171 – 178.
[20] A. Bonasera, G. Bonasera, S. Zhang, Chaos, percolation and the coronavirus spread: The Italian case, Eur. Phys. J. Plus 135, 2020, 453 –1 –12.
[21] https://www.worldmeters.info/coronavirus/, updated April 12, 2021.
[22] Š. Luby, Modelovanie migračných tokov do Európy a ich súvis s klimatickou zmenou, Životné prostredie 53(2), 2019, 116 – 122.
[23] J. W. Pennebaker, B. Rimé, V. E. Blankenship, Stereotypes of emotional expressiveness of Northerners and Southerners: A cross-cultural test od Montesquieu's hypotheses, J. Personality and Soc. Psychology 70, 1996, 372 – 380.
[24] M. J. Greenwood, Modeling migration, Encyclopaedia of Social Measurement, Elsevier Inc., 2005, Vo. 2, p. 725 – 734.
[25] N. van Doremalen, T. Bushmaker, D. H. Morris et al., Aerosol and surface stability of SARS-CoV-2 as compared with SARS-CoV-1. N. Engl. J. Med. 382, 2020, 1564 – 1567.
[26] P. Grassberger, On the critical behavior of the general epidemic process and dynamic percolation, Matemat. Biosciences 63, 1983, 157 – 172.
[27] R. Parshani, S. Carmi, S. Havlin, Epidemic threshold for the susceptible-infectious-susceptible model on random networks, Phys. Rev. Lett. 104, 2010, 258701.
[28] H. Zheng, A. Bonasera, Chaos, percolation and the coronavirus spread: A two-step model, Eur. Phys. J. Plus 135, 2020, No. 799 24 s.
[29] R. Kollár, honline.sk, 19. 8. 2022.

POĎAKOVANIE

Oceňujeme podporu vedeckej grantovej agentúry VEGA, Bratislava, grant 2/0156/20. Š. Luby ďakuje za diskusiu a poskytnutie obrázkov A. Bonaserovi z INFN Catania, Taliansko.

Prof. **Štefan Luby,** DrSc.

je vedúci vedecký pracovník Fyzikálneho ústavu SAV a profesor fyziky na Slovenskej technickej univerzite v Bratislave. Venoval sa polovodičom, tenkým vrstvám kovov, silicidov a odporových materiálov, justovaniu rezistorov a spoľahlivosti integrovaných obvodov. V oblasti výskumu elektromigrácie založil vedeckú školu. V súčasnosti sa zaoberá nanovedou a nanotechnológiou so zameraním na nanočastice, multivrstvy, grafén, superkryštály a aplikácie týchto štruktúr. Venuje sa aj modelovaniu spoločenských javov, ako je migrácia obyvateľstva, šírenie chorôb a pod. pomocou fyzikálnych metód a teórií. Svoj výskum vykonával na Slovensku a na univerzitách a výskumných centrách v Nemecku, Taliansku, USA, Japonsku a Grécku. Jeho publikačná činnosť zahŕňa viac ako 400 prác, 15 kníh a kapitol, 9 patentov a 18 kníh literatúry faktu. Získal doktoráty honoris causa, ceny a medaily v Nemecku, Japonsku, Maďarsku, Českej republike a na Slovensku.

JUDr. Mgr. **Martina Lubyová,** PhD.

je slovenská biofyzička, ekonómka a prognostička. Zastávala rôzne odborné a výskumné pozície v OECD v Paríži, v Tinbergenovom ústave v Amsterdame a na Univerzite Toyama, kde získala štipendium Japan Intellectual Exchange Fellowship. Bola riaditeľkou subregionálneho úradu Medzinárodnej organizácie práce pre východnú a strednú Áziu a po návrate na Slovensko sa stala riaditeľkou Prognostického ústavu a neskôr spoluzakladateľkou Centra sociálnych a psychologických vied SAV. Je držiteľkou titulu PhD v odboroch štatistika a ekonómia. Vyučovala štatistiku na Ekonomickej univerzite v Bratislave a viedla 15 doktorandských a diplomových prác. Publikovala takmer 130 prác a výstupov zameraných najmä na aplikáciu štatistických metód na široké multidisciplinárne spektrum tém od trhu práce a ekonomiky, nanoetiky a nanotechnológií, prognózovania, modelovanie migračných tokov, šírenie pandémií, a pod.

Ing. **Richard Heriban,** PhD.

je ekonóm a prognostik, vedecký pracovník Prognostického ústavu Centra spoločenských a psychologických vied Slovenskej akadémie vied, kde zároveň zastáva funkciu vedeckého tajomníka. Venuje sa výskumu trhov práce a migrácie.