

LUDEK STRAŠAK, LUKAŠ FOJT

# Vliv elektromagnetických polí na bakterie

## 1. Úvod

V jedné z národních pohádek vystupuje známá postava téměř vlasu-prostého Děda Vševěda. Každé dítě v mateřské školce ví, že Děd Vševěd dokázal správně odpovědět na každou otázku, ať se týkala vody z kouzelné studně, zázračných jablek anebo převozníkova pádla. Přes všechny výše zmíněné úspěchy však nepředpokládáme, že by mohl fundovaně a zasvěceně správně odpovědět na otázku, zda má elektromagnetické pole vliv na živé organismy. Myslíme si, že by na důkladnou odpověď padlo mnoho vlasů, a je otázkou, zdali by to nebyla marná investice.

Proto i ve světě současné vědy existuje velké množství výzkumníků, kteří si po vzoru Děda Vševěda rvou vlasy nad výsledky, které přicházejí z celého světa, a snaží se dostat celému problému na kobytku. Protože je však celý problém značně komplikovaný, ani plejáda nejlepších z nejlepších se nedokázala shodnout na nějakém řešení.

Rádi jsme se k této společnosti přidali a snažili se přiložit k už dost kontroverzním výsledkům vlastní údaje o interakcích elektromagnetických polí s bakteriemi. Nebudeme hned na začátku článku předem oznamovat, jak to všechno dopadlo. Prozrazení toho, že elektromagnetické pole ovlivňuje růst bakterií *Escherichia coli* a dalších, necháme až na samotný závěr.

Chtěli bychom na úvod předeslat, že elektromagnetické pole mělo vliv i na nás, autory tohoto pojednání. Elektromagnetické pole umožnilo provádět pokusy do pozdních nočních hodin, udržovat stálou teplotu v termostatu, sterilizovat laboratorní sklo, rozsvěcovat lampu s ultrafialovým zářením, měřit optickou propustnost bakteriální suspenze, zpracovávat údaje na osobním počítači, dopravovat se do laboratoře prostředky městské hromadné dopravy a další činnosti, které si už bez pomoci elektromagnetického pole nedokážeme představit a jsme mu za to vděční. Shrnutí – bez pomoci elektromagnetického pole bychom o jeho vlivu na živé organismy psát nemohli.

## Elektromagnetická pole

Elektromagnetická pole vznikají všude tam, kde se pohybují nabitě částice. Jak už název napovídá, rozlišujeme u nich dvě složky, elektrickou a magnetickou. Obě spolu velice úzce souvisí, magnetické pole vzniká

tam, kde se elektrická složka mění v čase (to je dáno Maxwellovými rovnicemi). Pokud se elektrická, a tedy i magnetická složka mění periodicky, hovoříme o střídavých polích. Ta jsou charakterizována pomocí frekvence, která udává, kolik proběhlo period za jednu sekundu. Za nízkofrekvenční pole jsou považována taková, která mají frekvenci nižší než 1 kHz (existují i „extrémně nízkofrekvenční pole“ s frekvencí nižší než 300 Hz). Tato pole mají ve vakuu vlnovou délku větší než 1000 km. S rostoucí frekvencí rozlišujeme různé typy rádiových vln. Pokud elektrická nebo magnetická složka pole dosáhne svého minima i maxima zhruba 1 000 000 000krát za sekundu, hovoříme o takzvaném GSM pásmu, pásmu, které využívají pro svoje spojení mobilní telefony. Jeho frekvence je v rozsahu  $(0,9-1,8) \cdot 10^9$  Hz. Vlnová délka ve vakuu se rapidně zkrátí na 0,16-0,33 m. Pokud bychom dále zvyšovali frekvenci kmitů složek pole, dospěli bychom přes mikrovlny k infračervenému záření, viditelnému světlu až k ultrafialovému záření, rentgenovému záření a  $\gamma$ -záření.

### Nízkofrekvenční pole

Naše domácnosti, pracoviště a všechna místa, kde se pohybujeme, jsou doslova propletena změtí kabelů vedení elektrické sítě a přístrojů z těchto sítí napájených. V Evropě je obvyklá síťová frekvence 50 Hz. Jak jsme si uvedli výše, tato frekvence patří do kategorie ELF – extremely low field – extrémně nízkofrekvenční elektromagnetické pole. Takové pole má ve vakuu vlnovou délku 6000 km (téměř poloměr zeměkoule) a hloubka průniku do tkáně 225 m. Vlnová délka a hloubka průniku je výrazně vyšší, než jsou rozměry biologických objektů.

Nízkofrekvenční pole přenáší minimum energie. S živými organismy interagují nepárově, to znamená, jako by působilo magnetické a elektrické pole nezávisle na sobě, každé zvlášť

Z kvantové fyziky je známo, že energie pole závisí na jeho frekvenci  $f$  (energie kvanta  $E=h \cdot f$ ,  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  J.s<sup>-1</sup> – Planckova konstanta). Energie kvanta nízkofrekvenčního elektromagnetického pole je řádově rovna  $\sim 10^{-31}$  J, zatímco energie tepelného šumu se pohybuje řádově v hodnotách  $kT$  ( $k=1,38 \cdot 10^{-23}$  J.K<sup>-1</sup> – Boltzmannova konstanta,  $T$  – absolutní teplota), a to je pro laboratorní teploty  $\sim 10^{-21}$  J. Jak je vidět, energie tepelného šumu je asi o deset řádů vyšší než energie elektromagnetického kvanta o nízké frekvenci. Nemůžeme hovořit o elektromagnetickém záření, protože takové pole nevyzařuje energii, respektive vyzařuje zanedbatelnou energii. Díky nepárovému charakteru nízkofrekvenčních polí a jejich nízkým energiím můžeme u nich používat názvu elektrické a magnetické pole, podle problému, který zkoumáme.

I pro vyšší frekvence polí, jako je například již zmíněné pásmo GSM, je energie pole ( $\sim 2 \cdot 10^{-24}$  J) stále ještě o několik řádů menší než energie tepelného šumu.

## Nízkofrekvenční elektromagnetické pole a jejich vliv na živé organismy

Uměle vytvořená elektromagnetická pole se stala součástí našeho biosystému. Rozšířila se doslova po celé zemi a zaplnila na ní každý volný kout s úmyslem sloužit člověku a jeho blahobytu. Jaký vliv však mají tato pole na živé organismy, které se tak musí vyrovnávat s novým faktorem, jenž může mít dopad na některé biologické funkce? A působí živé organismy na elektromagnetická pole?

Výpočtem lze dokázat, že elektrická složka elektromagnetického pole se v blízkosti tkáně výrazně mění, elektrické pole vně tkáně je asi 300milionkrát větší než ve tkáni. Siločáry magnetického pole jsou potom prakticky kolmé k exponované tkáni. Jinak je tomu s tkání v magnetickém poli. Tkáň má přibližně stejnou permeabilitu jako vzduch a je tak magnetickým polem vnímána. Magnetické pole se tedy v blízkosti tkáně nemění. Může však ve tkáni indukovat elektrický proud, jehož velikost je úměrná magnetické indukci, frekvenci a poloměru exponovaného objektu.

Ze všech uměle vytvořených polí se nejčastěji setkáváme s 50 Hz (v zámoří 60 Hz) poli. Není divu, že se taková pole brzo dostala pod drobnohled vědeckého pozorování.

Problematika vlivu elektromagnetických polí na vše živé je v poli zájmu vědců již po dobu asi 100 let. Vůbec první článek týkající se této problematiky vyšel roku 1905 v časopise Pflügers Archiv. Velký důraz na průzkum elektromagnetických vln a jejich působení je kladen po roce 1945, poté co byly svrženy atomové bomby na dvě japonská města. V dalších letech dochází k rychlému rozvoji elektrických zařízení. Radio-technická zařízení se stávají každodenní součástí života. Jedním z mnoha příkladů je rozvoj radarových systémů, které měly obrovské vyzářovací výkony. Dalším výrazným obdobím zájmu o danou tematiku byla 60. a 70. léta minulého století, kdy se ke slovu dostaly epidemiologické studie o působení elektromagnetických polí na člověka.

Epidemiologické studie zkoumaly především rakovinné efekty nízkofrekvenčních polí. Mnohé z nich našly korelaci mezi bydlením v blízkosti zdroje magnetického pole a zhoubným nádorem, nejčastěji leukemií. Negativní vliv byl pozorován ve Švédsku, v USA, na Novém Zélandu atd. Negativní vlivy polí byly zjištěny i pro vlny v mikrovlnné oblasti spektra. Na druhé straně se objevily práce, které nepotvrzovaly žádné propojení mezi magnetickým polem a rakovinou. V jedné historické srovnávací studii bylo konstatováno, že magnetické pole, kterému jsme vystaveni, se v posledním století mnohonásobně zvětšilo, ale tomuto zvětšení proporcčně neodpovídá zvýšení výskytu rakoviny. Další studie jednak neukazují žádný anebo vykazují nesignifikantní rozdíl v počtu lidí, u kterých byla zjištěna rakovina v exponované a kontrolní skupině, a také napadají některé jiné práce z hlediska výběru statistických dat, určování expozice,

kteře jsou vybraní jedinci vystaveni, anebo ukazují na některé jiné rizikové faktory, které nebyly v pracích zohledněny.

Epidemiologické studie naznačily, že LF MF (low frequency magnetic fields) mohou být člověku nebezpečná. Nejednotnost jejich výsledků způsobila, že účinky LF MF začaly být lépe a podrobněji studovány na molekulární a buněčné úrovni.

Vědci zkoumali buňky, tkáně a organismy, nejdříve zjišťovali vliv magnetických a elektromagnetických polí na životaschopnost zkoumaného objektu a změnu jejich biologických vlastností. Podobně jako u epidemiologických studií byly nalezeny pozitivní i negativní výsledky, přibližně v poměru 1:1. Pokračovalo se ve studiu na molekulární úrovni. Bylo zjištěno, že magnetické pole může měnit aktivitu některých enzymů, především Na,K-ATPázy, který pomáhá udržovat iontový gradient mezi buňkou a jejím okolím, a dále ornithin-dekarboxyláza (ODC), který se uplatňuje při syntéze spermidinu a sperminu, které regulují syntézu DNA. Zvýšená aktivita enzymu ODC doprovází také nádorové bujení. Byla též pozorována zvýšená indukce proteinů hsp. V mikrovlnné oblasti je jednou z nejlépe sledovaných hematoencefalická bariéra (ochraňuje savčí mozky před potenciálně nebezpečnými složkami) a její propustnost. Bylo zjištěno, že po expozici 2450 MHz polem dojde k její zvýšené propustnosti například pro albumin.

Protože elektrické i magnetické pole vzniká tam, kde se pohybuje nabitá částice, je také pečlivě zkoumán transport iontů v magnetickém poli, především pak pohyb vápníkových iontů. Na jeho koncentraci závisí některé proteiny, zvláště pak kalmodulin, který má schopnost aktivace nebo inaktivace enzymů. Jeho množství také ovlivňuje imunitní systém. Z různých výsledků vyplývá, že elektromagnetické pole působí zřejmě na membrány, zvláště na iontové kanály v nich. Propustnost těchto kanálků je pravděpodobně řízena elektrickým napětím, a tak přiložené vnější pole by mohlo ovlivňovat tok iontů membránami a způsobovat biologické změny v molekule.

Dosavadní výzkum přinesl celou řadu dat, které jsou však dost kontroverzní. Není výjimkou ani stejný exponovaný objekt, stejné magnetické pole a různý výsledek. Důsledným srovnáváním byly zjištěny různé podmínky expozice, různé buněčné kmeny, nestejný postup při expozici, jiné geometrické uspořádání expozice. I přesto však existují tzv. replikační pokusy, kdy se vědecký tým snaží postupovat přesně podle instrukcí jiného týmu, který uveřejnil nějaký významný závěr. V mnohých případech dopadl replikační pokus přesně obráceně než originální pokus. Setkáváme se i s výsledky z replikačních pokusů, které jsou doslova kuriózní. Například při zjišťování vzniku zlomů řetězců DNA v krysích mozcích po expozici mikrovlnným polem aktéři replikačního pokusu usoudili, že sledované častější zlomy jsou způsobeny nesprávným usmrcením krys po expozici (udušením).

## Naše výsledky

Přestože se objevují stále nové pokusy objasnit mechanismus působení elektromagnetických polí na organismy, nepodařilo se zatím dospět k jednoznačnému výsledku. I díky kontroverznosti publikovaných experimentálních dat je nutné, aby se dále prováděly pokusy za jasně stanovených biologických a fyzikálních podmínek. Mezi biologické materiály, které se ukazují jako vhodné pro pokusy s elektromagnetickými poli, patří všechny jednobuněčné organismy, především pak bakterie a kvasinky. V našich pokusech jsme pracovali s třemi typy bakterií: s běžně dostupnými bakteriemi *Escherichia coli*, s jim podobnými *Leclercia adecarboxylata* (gramnegativní) a konečně s bakteriemi *Staphylococcus aureus* (grampozitivní). Zkoumali jsme jejich schopnost tvořit kolonie – tedy jeden ze základních projevů života bakterií – v závislosti na různých parametrech magnetické expozice – na době působení magnetického pole (0-24 min), na amplitudě magnetické indukce (0-20 mT), na frekvenci magnetického pole (5 Hz – 20 kHz), na homogenitě magnetického pole (solenoid s jádrem, solenoid bez jádra, válcová cívka). Objevili jsme, že počet bakterií schopných tvořit kolonie (CFU – Colony Forming Unit) klesá s rostoucí dobou expozice přibližně exponenciálně, pokles původní hodnoty CFU u nejsilnějšího magnetického pole činil po 12 minutách asi 50% oproti neexponované kontrolní kultuře. Množství CFU klesá i s rostoucí magnetickou indukcí. Co se týká frekvenční závislosti, k poklesu počtu CFU došlo prakticky u všech zkoumaných frekvencí, ale nebyla objevena žádná závislost typu rostoucí frekvence – rostoucí počet CFU apod. V některých pracích se vyskytuje tzv. „window effect“, kdy se zkoumaná biologická vlastnost při určité frekvenci prudce mění, aby se u další frekvence poslušně vrátila k obvyklé hodnotě. My jsme nic takového nepozorovali.

Vliv magnetického pole je také kmenově závislý, podle našich výsledků magnetické pole nejvíc ovlivnilo *Escherichie*, nejméně potom *stafylokok*.

Kromě měření počtu CFU jsme zkoušeli, jak se bakteriofág BF 23 pomnožuje na bakteriích *E.coli*. Bakteriofág, který ničí bakteriální buňky, se na bakteriích vystavených magnetickému poli pomnožoval asi třetinově proti jeho množení na kontrolní neexponované kultuře. Je zajímavé, že magnetické pole, které bakterie zabíjí, je současně chrání před nepřátelsky naladěným bakteriofágem.

U bakteriofága jsme zůstali i v dalším pokusu, kdy jsme zkoumali, zda dochází k indukci bakteriofága v lyzogenním kmeni magnetickým polem. Teď česky: Po vniknutí fága do bakterie se může stát, že se fágový chromozóm začlení do chromozómu bakteriální buňky a dál se dělí jako jeho součást do jejího potomstva. Taková buňka se nazývá lyzogenní. Bakteriofág se může z lyzogenní buňky uvolnit buď spontánně, nebo indukci nějakým vnějším zásahem, obvykle např. ozářením ultrafialovým svět-

lem, my jsme zkoušeli působit magnetickým polem. Nebudu vás napínat dlouho; fága se nám nepodařilo indukovat ani u lyzogenního kmene *E.coli*, ani u *L.adecarboxylata*. Znamená to, že magnetické pole nenarušilo DNA exponovaných bakterií a s největší pravděpodobností na nukleovou kyselinu nepůsobí. Podobný výsledek jsme získali u pokusů, u kterých jsme kombinovali expozici magnetickému poli a UV záření. Je známé, že ultrafialové záření ničí DNA exponovaných bakterií. Z našich experimentů jsme odvodili, že oba fyzikální faktory na bakterie působí, přičemž cílem působení je u každého faktoru jiný receptor, čili jsme znovu potvrdili, že magnetické pole nepůsobí na DNA exponovaných bakterií.

Zkoumali jsme také, jak se mění metabolismus bakteriální kultury po magnetické expozici. Metabolismus celé kultury klesá přesně podle toho, jak narůstá počet buněk zabitých magnetickým polem. Magnetické pole tak zřejmě nemá vliv na metabolismus bakterií samotných, metabolismus bakteriální kultury je potom určen pouze množstvím živých buněk v ní.

## Závěr

Jak jsme již uvedli, ve výzkumů interakcí bakterií a magnetických polí se dosahuje rozporuplných výsledků.

Výsledky pokusů uvedené v této práci podporují názor o inhibičním působení magnetických polí na bakterie. Všechny pokusy jsou popsány tak, že se dají nezávisle opakovat. Rozhodující pro všechny pokusy v oblasti elektromagnetických polí a živých organismů je totiž jejich reproducibilita. Ve výsledcích mohou rozhodovat i maličkosti týkající se expozice, použitých bakteriálních kmenů či způsobu kultivace.

Naše práce není schopna odpovědět na to, jakým mechanismem působí magnetické pole na bakterie. Na tuto otázku by mohla více odpovědět spolupráce s molekulárními biology.

Závěrem bychom rádi zopakovali, že v našem konkrétním experimentálním uspořádání magnetické pole působilo na růst bakterií *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* a *Leclercia adecarboxylata*. Výsledky podobných experimentů jsou velice kontroverzní. Je docela dobře možné, že se jinému vědeckému týmu podaří naměřit zcela odlišné výsledky. Vinu bychom v tomto případě nehledali v konkurenčním vědeckém týmu, ale spíš v bakteriích samotných. Zapomněli jsem totiž uvést jednu z jejich nejdůležitějších vlastností. Jsou nevyzpytatelné!