



**MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ
FAKULTA**
Univerzita Karlova

DISERTAČNÍ PRÁCE

Pavel Brom

**Integrovaný e-learning
v oblasti kvantové fyziky a optiky**

Kabinet výuky obecné fyziky

Vedoucí disertační práce: doc. RNDr. František Lustig, CSc.

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Didaktika fyziky a obecné otázky fyziky

Praha 2018

Prohlašuji, že jsem tuto disertační práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že Univerzita Karlova v Praze má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona.

V Praze dne 31. 7. 2018

Podpis autora

Motto:

„Donner à nos enfants le désir de savoir, éveiller leur curiosité. Les traiter aussi en personnes à part entière, qui comprennent bien plus que ne le croient les adultes. Vous les fortifierez ainsi et ils vous en sauront gré.“

Albert Barillé

„Dávat našim dětem touhu vědět, probudit jejich zvědavost. A také je považovat za samostatné osobnosti, které rozumí mnohem více, než si dospělí myslí. – To je způsob, jak dětem pomáhat stát se silnějšími, a budou vám za to vděčné.“

Citát Alberta Barillého volně z francouzštiny přeložil P. Brom.

⁰Albert Barillé (1920–2011) byl francouzský filmový producent a scénárista, zakladatel produkční společnosti Procidis. Je známý svými řadami vzdělávacích kreslených seriálů pro děti *Byl jednou jeden . . .* (*život, objevitel, vynálezce*, atd.), které byly přeloženy do mnoha jazyků a které upoutaly a ovlivnily i autora. Právě tyto seriály zřejmě vzbudily zájem autora o přírodovědné a technické obory v jeho malém věku.

Rád bych na tomto místě poděkoval školiteli doc. RNDr. Františku Lustigovi, CSc., za jeho ochotu, vstřícnost, sdílené zkušenosti a pomoc při stavbě nových vzdálených experimentů jako i při vypracování této disertační práce. Zvláštní poděkování patří též doc. RNDr. Zdeně Lustigové, CSc., za cenné a velmi inspirativní rady v problematice fyzikálního vzdělávání a pedadogického výzkumu a za plodnou spolupráci při realizovaných společných výzkumech. Dále bych rád poděkoval velkému počtu kolegů a zaměstnanců Katedry didaktiky fyziky i Kabinetu výuky obecné fyziky na MFF UK za odbornou pomoc či rady a za případnou materiální podporu, s jejichž přispěním bylo možné vytvořit nové a zajímavé vzdáleně řízené experimenty pro výuku fyziky.

Na závěr děkuji všem, zejména pak rodině a nejbližším přátelům, za neuctahající podporu, důvěru, trpělivost a vytvořené podmínky, které mi pomohly disertační práci a VŠ studium úspěšně dokončit.

Nově vytvořené vzdálené reálné experimenty a související pilotní výzkum jejich efektivity byly hrazeny z vývojových grantů Fondu rozvoje vysokých škol (grant FRVŠ č. 957/2012) a Nadace ČEZ (grant č. STE 07_11) a z vývojově-výzkumného grantu Grantové agentury Univerzity Karlovy (grant GAUK č. 4466/2011).

Název práce: Integrovaný e-learning v oblasti kvantové fyziky a optiky

Autor: Mgr. Pavel Brom

Vedoucí disertační práce: doc. RNDr. František Lustig, CSc.

Pracoviště: Kabinet výuky obecné fyziky

Abstrakt: Práce se zabývá návrhy, realizací a pilotním výzkumem vzdáleně řízených reálných experimentů využitelných pro úvod do moderní fyziky v rámci strategie výuky zvané integrovaný e-learning. Díky grantové podpoře byly vybudovány nové vzdálené experimenty s inovativními prvky, jako např. modifikovatelnost vzdálené aparatury, design umožňující naměřit nerelevantní hodnoty pro otestování kritického myšlení u studentů aj. Témata experimentů jsou: studium radioaktivity, polarizace světla, vnější fotoelektrický jev a studium spekter. Důraz je kladen na jednoduché naměření a stažitelnost experimentálních hodnot a na jejich následné vědecké zpracování (statistické či pokročilé grafické). Pilotní výzkum se zabývá vytipováním vhodných nástrojů a výzkumných designů a popisuje získané zkušenosti a pozorování z reálného prostředí českých SŠ. Významné poznatky přinesla analýza logů a neformální rozhovor s učiteli a studenty. V závěru práce je diskutována reálná využitelnost vzdálených experimentů ve výuce.

Klíčová slova: vzdáleně řízený experiment, vzdálená laboratoř, zpracování experimentálních dat, výuka fyziky, integrovaný e-learning.

Title: Integrated e-learning in quantum physics and optics

Author: Pavel Brom

Department: Laboratory of General Physics Education

Supervisor: doc. RNDr. František Lustig, CSc., Laboratory of General Physics Education

Abstract: This doctoral thesis concerns the designs, creation, and a pilot survey of real remotely controlled laboratories that can be used for the introduction to modern physics within the integrated e-learning strategy. With grant support four new remote laboratory experiments could be created, featuring some innovations like the possibility to modify experimental setup, and the design allowing to make a mistake and to obtain nonsensical experimental data in order to test students' critical thinking. The new remote experiment topics are: laws of radioactivity, polarisation state of light, photoelectric effect, and the origin of spectral lines. The emphasis is put on easy experimental data acquisition (measurement, record, and download) for further scientific statistical or advanced graphical data processing. The pilot survey aims to select adequate research designs, tools, and data sources and it describes the results and experience from the observation at several Czech secondary schools. The most interesting findings were revealed by action log file analysis and interviews with teachers and students. Finally, real usability of remote laboratory experiments in lessons and physics education is discussed.

Keywords: remotely controlled laboratory, remote experiment, experimental data processing, physics education, integrated e-learning.

Obsah

Úvod	5
1 Historický vývoj a současný stav problematiky	7
1.1 Experiment ve výuce fyziky	7
1.1.1 Vývoj experimentu v historickém kontextu	7
1.1.2 Obecné cíle laboratoří	9
1.1.3 Cíle vzdálených laboratoří	10
1.1.4 Vymezení tématu práce	11
1.2 Výhody a nevýhody experimentů s podporou PC a Internetu	11
1.2.1 Obecné výhody virtuálních a vzdálených laboratoří	11
1.2.2 Specifické výhody vzdálených reálných experimentů	12
1.2.3 Nevýhody virtuálních a vzdálených laboratoří	14
1.3 Nejvýznamnější příklady virtuálních a vzdálených laboratoří	15
1.3.1 Příklady virtuálních experimentů a použité platformy	15
1.3.2 Příklady vzdálených laboratoří ve světě a v ČR	17
1.3.3 Technologie a platformy vzdálených laboratoří	18
1.3.4 Problémy s JRE (2010–2015) a přechod na JavaScript	19
1.4 Hodnocení laboratoří podle technologie	19
1.5 Výzkumy laboratoří s podporou PC, vzdělávací cíle laboratoří	21
1.6 Analýza logovacích souborů	23
1.7 Současné trendy	25
1.7.1 Vývoj počtu vzdálených laboratoří v čase	25
1.7.2 Aktuální trendy ve výuce	25
1.7.3 Postupná integrace	26
1.8 Shrnutí současného stavu a východiska pro tuto práci	27
1.9 Výhody a přidaná hodnota k navrženému řešení nových úloh	29
2 Návrh a stavba nových vzdálených experimentů	33
2.1 Témata a cíle nových experimentů	33
2.1.1 Nové laboratoře pro výuku zákonů a jevů z optiky	33
2.1.2 Nové laboratoře pro úvod do kvantové fyziky	34
2.1.3 Struktura popisu nových vzdálených laboratoří	34
2.2 Studium radioaktivity	36
2.2.1 Existující vzdálené laboratoře k tématu <i>radioaktivita</i>	36
2.2.2 Výchozí stav a motivace pro stavbu vzdáleného experimentu	39
2.2.3 Návrh a realizace vzdáleného experimentu	39
2.2.4 Metodika použití, cíle a možné úkoly pro vzdálené měření	42
2.2.5 Očekávané výstupy při nižším počtu opakování měření	51
2.2.6 Očekávané výstupy při stažení rozsáhlejšího výběru	52
2.3 Polarizace světla	56
2.3.1 Výchozí stav a motivace pro vznik vzdáleného experimentu	56
2.3.2 Vývoj, návrh a stavba vzdáleného experimentu	57
2.3.3 Metodika využití vzdáleného experimentu ve výuce	58
2.3.4 Očekávané výstupy	64
2.4 Vnější fotoelektrický jev	66

2.4.1	Výchozí stav a motivace	66
2.4.2	Vývoj, návrh a stavba vzdáleného experimentu	67
2.4.3	Metodika použití vzdáleného experimentu ve výuce	70
2.4.4	Očekávané výstupy	75
2.5	Studium spekter	79
2.5.1	Motivace pro vznik vzdáleného experimentu	79
2.5.2	Vývoj, návrh a stavba vzdáleného experimentu	79
2.5.3	Metodika využití vzdáleného experimentu ve výuce	81
2.5.4	Možné postupy výkladu	84
2.5.5	Očekávané výstupy	86
3	Pilotní výzkum vzdálených reálných laboratoří	89
3.1	Konstrukční výzkum efektivity vzdálených laboratoří	89
3.1.1	Upravený design výzkumu a formulace hypotéz	89
3.1.2	Diskuse překážek pro výzkum	90
3.2	Analýza logovacích souborů	91
3.2.1	Cíle a plánování pilotního výzkumu s využitím analýzy logů	91
3.2.2	Návrh předzpracování a kódování logů aktivity uživatelů	92
3.2.3	Výsledky analýzy logů aktivity uživatelů	99
3.2.4	Identifikované vzorce chování uživatelů ve vzdálené laboratoři	99
3.2.5	Další pozorování a poznatky z analýzy logů aktivity uživatelů	100
3.3	Neformální rozhovor s uživateli	102
3.3.1	Hodnocení vzdálených laboratoří od učitelů	102
3.3.2	Názory studentů na počítačem podporované experimenty	105
3.3.3	Shrnutí hodnocení uživatelů	106
4	Diskuse a náměty do budoucna	107
4.1	Diskuse výsledků a využitých metod výzkumu	107
4.1.1	Zhodnocení proveditelnosti vybraných technik výzkumu	107
4.1.2	Reflexe zamýšleného designu nových vzdálených úloh	108
4.2	Náměty pro budoucí výzkumy	109
4.3	Náměty pro další rozvoj vzdálených laboratoří	111
	Závěr	113
	Seznam publikací	129
	Seznam použitých zkratk	135
	Přílohy	139
A	Základní příkazy pro grafické zpracování v programu gnuplot	141
A.1	Ověření Poissonova rozdělení	141
A.2	Ověření ochrany vzdáleností	142
A.3	Ověření ochrany stíněním	143
A.4	Přímé grafické zpracování malého výběrového souboru	145
A.5	Grafické zpracování spekter	146
B	Ukázka logovacího souboru	149

Úvod

Tato disertační práce se zabývá strategií výuky fyziky, pro kterou prof. F. Schauer a kol. navrhli označení integrovaný e-learning (INTe-L) [1]. Hlavní motivací pro tuto práci byl pozorovaný rozpor mezi fakty, že na jedné straně je zdůrazňována potřeba zařazovat experiment do výuky fyziky, na straně druhé v některých případech (výuka témat zaměřených na optiku či kvantovou fyziku) se v tradiční výuce experiment mnohdy neprovádí, případně v e-learningové formě výuky reálný experiment zcela chybí. Důvody tohoto stavu jsou detailně rozebrány v rešeršní části v 1. kapitole.

Strategie nazvaná **integrovaný e-learning** (INTe-L) je založena na vhodném kombinování těchto klíčových internetových zdrojů:

- e-texty s potřebnou teorií, instrukcemi pro žáky či studenty apod.,
- simulace neboli též virtuální experimenty a nově navíc
- vzdáleně řízené reálné experimenty.

Tyto prostředky mohou být doplněny o další vhodné (zpravidla multimediální) zdroje, jako např. instruktážní videa, a vše může být zasazeno do LMS [2] prostředí. V motivační části 1. kapitoly shrneme nejdůležitější výhody této strategie, potenciál a perspektivy pro její využití ve výuce přírodovědných a technických oborů, pro kterou jsou splněny všechny základní předpoklady [2]. Již z vymezení zaměření této práce na optiku a kvantovou fyziku vyplývá, že cílovou skupinou jsou studenti středních či vysokých škol. Některé vzdálené experimenty (např. studium radioaktivity a základních způsobů ochrany člověka před ionizujícím zářením, případně polarizace světla z hlediska aplikací) lze zjednodušeně prezentovat již na základní škole. V této práci jsou též popisovány virtuální experimenty (neboli aplety, simulace), které využívají určitý model, případně si uživatel může vybírat z většího počtu předem připravených modelů a srovnávat jejich výstupy. Tvorba modelu (na rozdíl od činnosti zvané *modelování*) není součástí práce studentů se simulací. Po spuštění simulace lze obvykle měnit hodnoty parametrů v daném modelu a pozorovat výsledný efekt těchto změn. Tato práce se nezabývá modelováním fyzikálních jevů v dedikovaných výukových prostředích, jako jsou např. starší program FAMULUS [3], novější volně stažitelné programy Modellus [4] či v současnosti oblíbené modelovací prostředí Easy Java/JavaScript Simulations (EJS,

¹Learning Management System – systém řízení výuky, který řeší organizaci i administrativu výuky a zpřístupňuje výukové materiály studentům.

²Díky projektům zavádění ICT do škol (např. Indoš – Internet do škol) je v ČR od roku 2003 k síti Internet připojena většina základních a středních škol. Učitelé průběžně absolvují školení a kurzy zaměřené na využití výpočetní techniky ve výuce, popř. ve školní administrativě. Využívání ICT ve vzdělávání na jednotlivých školách řídí „ICT koordinátor“.

³Program FAMULUS byl vytvořen doc. L. Dvořákem a kol. pro operační systém MS DOS; na novějších PC jej lze spustit jedině v emulátoru tohoto systému – v tzv. DOSBoxu, viz např. <http://kdf.mff.cuni.cz/~janek/pocitace/famulus.php>.

⁴Freeware Modellus lze stáhnout z jeho domovské stránky <http://www.modellus.pt/index.php/en/>.

EjsS [62]) nebo program DYNAST⁵. Vedle těchto volně stažitelných programů či systémů lze k modelování použít profesionální nástroje, jako např. komerční WolframAlpha, Maple, Mathematica aj. či nekomerční GNU Octave a další.

Díky úspěšným grantovým žádostem je největší pozornost věnována návrhu a stavbě nových vzdálených reálných experimentů, neboť jejich vývoj a realizace byly podpořeny jednak dvouletým grantem GAUK⁶ č. 4466/2011, jednak jednoletým grantem FRVŠ⁷ č. 957/2012, jejichž hlavním řešitelem byl Mgr. P. Brom. P. Brom byl dále klíčovým spoluřešitelem grantu Nadace ČEZ č. STE 07_11 na tvorbu vzdálené laboratoře k tématu radioaktivita (hl. řešitelem byl doc. F. Lustig). Ve všech těchto případech P. Brom navrhl experimenty a zadání úkolů pro vzdálené měření, postavil a zprovoznil měřicí aparaturu a napsal studijní texty. Tyto nové prostředky byly dále podle možností doplněny o vhodné simulace, případně další (zpravidla multimediální) části, jako např. motivační videa, jejichž autorkou byla spoluřešitelka grantu GAUK Mgr. L. Filipenská. Návrh, cíle a realizace nových vzdálených experimentů včetně vývoje potřebné technologie a typických výstupů jsou popsány ve 2. kapitole.

Výzkumná část ve 3. kapitole popisuje pilotní výzkum efektivity vzdálených laboratoří a je především zaměřena na analýzu logů aktivity uživatelů⁸.

Poslední kapitola se zabývá diskusí jednotlivých metod výzkumu, dále diskusí zjištěných výsledků a návrhy k vylepšení současných vzdálených experimentů, případně doporučeními pro další vývojovou či výzkumnou práci.

Práce je psána v češtině z několika následujících důvodů: Kvůli obecně malému povědomí, příp. nízké důvěře a zájmu českých učitelů fyziky o vzdálené experimenty z fyziky je důležitým posláním této práce zpřístupnit a představit problematiku co nejširšímu okruhu českých učitelů napříč generacemi a v nejlepším případě je motivovat k přehodnocení a inovaci svých dosavadních postupů. V neposlední řadě práce usiluje o zmapování a sjednocení české terminologie společně s anglickou terminologií, která je uváděna v závorce či v poznámce pod čarou.

⁵DYNAST (Dynamika a statistika) je software pro výuku i praxi, který na ČVUT vyvinul doc. H. Mann (1936–2016). Nástroj využívá t. č. převratnou myšlenku popisu systémů pomocí grafických modelů, které reprezentují soustavu diferenciálních rovnic.

⁶Grantová agentura Univerzity Karlovy.

⁷Fond rozvoje vysokých škol.

⁸Logy aktivity uživatelů automaticky zaznamenávají postup měření, resp. chování uživatele ve vzdálené laboratoři, a to vždy s časovým razítkem. Umožňují tedy objevit nové kvalitativní i kvantitativní poznatky.

1. Historický vývoj a současný stav problematiky

1.1 Experiment ve výuce fyziky

Pokus neboli experiment je základem přírodovědeckého bádání. Zařazování pokusů a laboratoří je neodmyslitelnou součástí výuky fyziky i dalších přírodovědných a technických oborů, kde je pokus podstatou názorně-demonstrační metody výuky fyziky a plní různé didaktické funkce. Tradičně uváděné funkce jsou např. heuristická či verifikační, motivační, ilustrační, uvádějící problém, aplikační, historická, opakující a prohlubující učivo, kontrolní – viz [2] až [4]. Další autoři zmiňují a využívají funkci relaxační, zejména ve stresových situacích jako např. při zkoušení [5] až [7]. Na rozdíl od pouhého **pozorování** (monitoringu), kdy nejsou záměrně měněny podmínky, **pokus** (experiment) obsahuje cílenou změnu pokud možno jediného parametru za účelem zkoumání závislosti nějaké fyzikální veličiny na tomto měněném parametru.

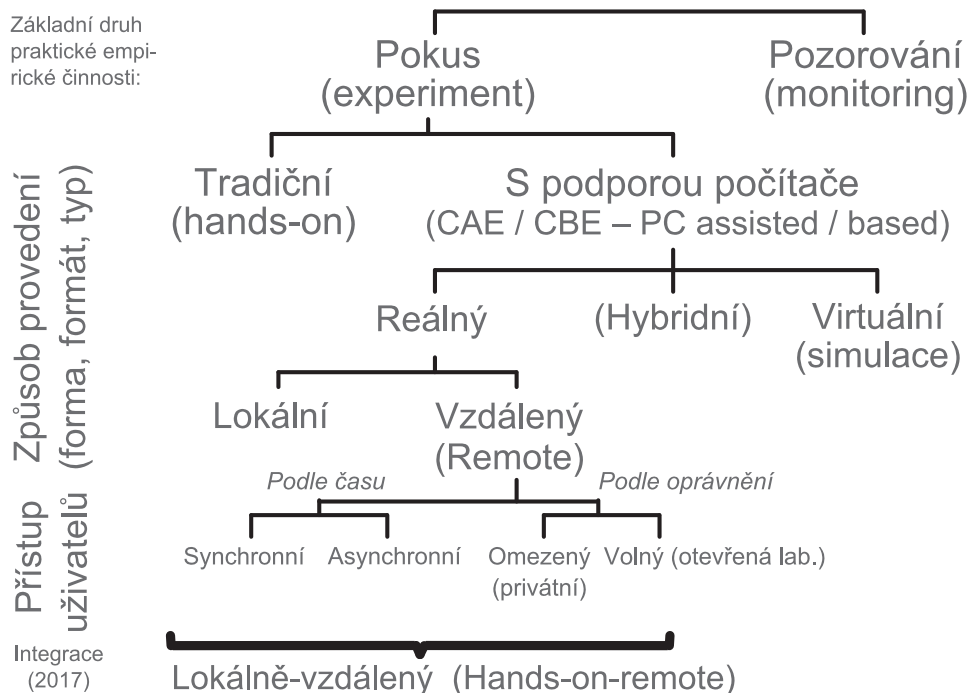
1.1.1 Vývoj experimentu v historickém kontextu

Za otce experimentu ve fyzice, resp. „otce moderní fyziky“ je tradičně považován Galileo Galilei (1564–1642) [8]. Po staletí učitelé zařazovali do výuky tradiční (hands-on) experimenty, ať už ve formě frontálního pokusu či laboratoří. S rozvojem elektroniky a počítačů ve 20. století se objevily tzv. **počítačem podporované experimenty** (CAE – Computer-Aided Experiments, též CBE – Computer-Based Experiments). Dnes se i při tradičních pokusech využívají multimetry s mikroprocesorem a poslední zmíněné dělení přestává být striktní.

V 60. letech 20. století se počítače začaly propojovat prostřednictvím **počítačových sítí**¹. Motivací byla jednak potřeba komunikace a sdílení dat, jednak bylo nutné řešit problém decentralizace počítačové sítě, aby síť zůstala funkční i po výpadku její části. Na přelomu 80. a 90. let 20. stol. Tim Berners-Lee vytvořil soubor komunikačních protokolů TCP/IP a HTTP a naprogramoval prohlížeč webových stránek [11]. Web 1.0 (s atributem *read only – pouze pro čtení*) umožňoval klientským PC typicky pasivní prohlížení stránek s neměnným obsahem, uložených na serverech. Pro výuku fyziky si mohli učitelé a studenti stahovat a využívat tzv. **virtuální experimenty** (též simulace, aplety, fyzlety – fyzikální aplety). W. Christian a M. Belloni rozdělili úlohy využívající fyzlety do tří typů: 1) ilustrace (demonstrace jevů – vhodné jako příprava na praktikum), 2) bádání a 3) problémy [4], [12].

Web 2.0 (s atributy *read & write – čtení & modifikace*) na přelomu miléní přinesl uživatelům možnost aktivně měnit obsah webu. Díky výraznému pokroku ve webových technologiích se konečně podařilo virtuální experimenty doplnit o **reálné vzdáleně řízené experimenty** s širšími možnostmi interaktivity, kdy může uživatel aktivně a poměrně jednoduše měnit podmínky reálně probíhajícího měření. Vzdálené experimenty se začaly budovat v období 1991–2002

¹Např. propojením čtyř amerických univerzit vznikla na podzim r. 1969 síť ARPANET (Advanced Research Projects Agency NETwork). Podrobněji viz např. [9], [10], [30].



Obrázek 1.1: Klasifikace experimentů podle P. Broma s náznakem poslední integrace navržené F. Lustigem na podzim r. 2017 [18]. Obdobnou klasifikaci lze navrhnout i pro pozorování. Ve schématu je vyznačen vztah různých formátů (form, typů) laboratoří. U vzdálených reálných experimentů má smysl rozlišovat přístup podle času a oprávnění. Podrobnější komentář je uveden v podkapitole 1.1.1.

[13] až [16]. Mezi jmenované formy počítačem podporovaných experimentů nakonec patří **hybridy** jednak ve formě simulací pracujících s reálnými experimentálními daty, která se zobrazují podle nastavených parametrů, jednak hybridy využívající předem pořízené videozáběry reálné vzdáleně řízené fyzikální aparatury a zobrazující reálné experimentální hodnoty². Podle přístupu uživatelů má smysl počítačem podporované experimenty dále dělit na **lokální** a **vzdálené**, případně **synchronní** a **asynchronní**³. Tradiční (hands-on) experimenty mají přirozeně povahu lokálního experimentu. U vzdálených reálných experimentů umístěných ve vzdálených laboratořích lze omezit přístup jen pro určitou skupinu uživatelů (např. studenti školy, která experimentální aparaturu provozuje a spravuje). **Ote-**

²Zakladatel a provozovatel komerční služby labsland.com dr. P. Orduña se rozhodl řešit problém nízkého počtu vzdálených laboratoří náhradou živého obrazu vzdálené aparatury předtočenými videozáběry, kdy prostředí uživateli podle nastavených parametrů zobrazuje předem naměřené reálné experimentální hodnoty. Zdroj dat i videozáběrů, tzn. odkaz na původní vzdálenou laboratoř je vždy uveden. Toto náhradní řešení P. Orduña realizuje jen v případech, kdy to nižší počet rozeznatelných reálných kombinací nastavení umožňuje, např. experiment pád po nakloněné rovině v rámci služby [17].

³V synchronním vzdáleném experimentu se změny v nastavení parametrů provádějí prakticky okamžitě, uživatel spouští proces měření a získává experimentální data s minimálním zpožděním. V případě asynchronního měření musí uživatel na provedení experimentu a získání naměřených hodnot čekat delší dobu; experiment z různých důvodů zpravidla spouští a dozoruje fyzická obsluha ve vzdálené laboratoři.

vřené vzdálené laboratoře poskytují vzdálené reálné experimenty jakémukoliv uživateli. V roce 2017 F. Lustig a kol. navrhl a realizoval nový typ **lokálně-vzdáleného experimentu** (hands-on-remote), kdy učitel nebo žák může (např. ve škole) postavit a vyzkoušet reálnou měřicí aparaturu (hands-on) a zároveň mít k ní vzdálený přístup s plnohodnotným řízením (např. pro pozdější pečlivé proměření závislostí ze vzdáleného místa) [18]. Výše popsaná klasifikace experimentů je graficky zpracována na obr. 1.1.

1.1.2 Obecné cíle laboratoří

Hlavním smyslem fyzikálních laboratoří, jak jej formulovala např. Americká asociace učitelů fyziky (AAPT), je jednak hledat, objevovat a formulovat nové fyzikální jevy a zákonitosti, resp. rozhodovat o použitelnosti a věrohodnosti různých fyzikálních teorií a koncepcí a tyto teorie prakticky ověřovat. Vedle tohoto základního poslání laboratoře plní další související cíle [19]:

1. Rozvoj umění experimentovat u studentů včetně uvědomění si významu experimentů pro fyziku.
2. Rozvoj experimentálních a analytických dovedností.
3. Posílení koncepčního učení a osvojení základních konceptů ve fyzice.
4. Pochopení základů fyzikálního poznávání světa, zejména přímým pozorováním, experimentováním a porovnáváním teoretických modelů s výsledky měření.
5. Rozvoj dovednosti spolupracovat (kolaborace) a učit se.

Akreditační komise pro inženýring a technologie ve Spojených státech amerických (ABET – Accreditation Board for Engineering and Technology, [20]) formulovala celkem 13 důležitých cílů laboratoří pro technické vzdělávání (inženýring – viz [21] až [25], [34]):

1. Instrumentace (vybrat a použít vhodný senzor, hardware a software k provedení měření nějaké fyzikální veličiny).
2. Volba modelu (včetně posouzení vhodnosti, realističnosti a případných mezí zvoleného modelu, který dokáže předpovídat výsledky reálných jevů).
3. Návrh, upřesnění a realizace experimentálního postupu s použitými pomůckami a interpretace zjištěných výsledků (tzn. standardní základní součásti protokolu z měření).
4. Analýza experimentálních dat (zahrnuje kritické zhodnocení dat a interpretaci získaných výsledků včetně diskuse jejich spolehlivosti – jedná se o důležitou, avšak pokročilou součást protokolu, se kterou mohou mít např. slabší žáci/studenti obtíže, proto je uvedena zvlášť).
5. Design experimentu, příprava jeho specifických součástí s cílem splnit zadaný výzkumný úkol a související požadavky.

6. Poučení z chyb jakéhokoliv druhu včetně jejich úspěšného včasného odhalení a včetně jejich nápravy.
7. Přiměřená tvořivost a vynalézavost při řešení reálných problémů – jejich předvedení a rozvoj.
8. Psychomotor (žák/student sám sobě dokazuje svou kompetenci ve výběru, modifikaci a obsluze vhodných měřicích přístrojů).
9. Bezpečnost (zodpovědná identifikace rizik pro lidskou obsluhu, poškození měřicích přístrojů i případných rizik pro životní prostředí a tomu odpovídající chování a jednání).
10. Efektivní odborná komunikace (ústní i písemná, ve všech částech a se všemi účastníky).
11. Efektivní a zodpovědná týmová spolupráce (zahrnuje rozdělení a přijetí úkolů, dodržení stanoveného harmonogramu i průběžnou kontrolu a hodnocení postupu).
12. Etické chování a úsilí o maximální objektivnost výsledků a závěrů.
13. Vytvoření osobního citu pro získání spolehlivých dat a formulaci přesvědčivých závěrů.

1.1.3 Cíle vzdálených laboratoří

Vznik laboratoří řízených na dálku byl motivován především několika následujícími důležitými cíli a prostředím s komplikovanými podmínkami:

1. **dostupnost 24/7/365** a související výhody, zejména
2. možnost provést měření v době a nezbytné časové délce **podle individuálních potřeb studenta**, včetně možnosti měření zopakovat (např. při odhalení chyby v postupu apod.) – to umožňuje soustředit pozornost na vlastní experiment a nikoliv pouze na použitou technologii,
3. realizace **sdílení** vytvořených experimentů, které mohou využívat speciálně:
 - (a) **rozvojové země**,
 - (b) **handikepovaní studenti**⁴ a
 - (c) studenti v zemích, kde významnou překážkou pro denní studium jsou zejména **velké vzdálenosti** (typicky např. Austrálie [28]).

Podrobnější diskusi o problematice vzdálených laboratoří včetně výše uvedených i dalších cílů lze nalézt v dedikovaných knihách, jako např. [29] až [31].

⁴Např. projekt PEARL – Practical Experimentation by Accessible Remote Learning, viz [26], [27].

1.1.4 Vymezení tématu práce

Z důvodů široké obsáhlosti tématu experimentu ve výuce fyziky a nepřeborného množství literatury se tato práce v rešeršní části bude zabývat především počítačem řízenými experimenty a relevantními výzkumy jejich efektivity. Jelikož nabídka počítačem podporovaných experimentů dostupných na Internetu se poměrně rychle z různých důvodů mění, jsou zde pro ilustraci uváděny *jen vybrané nejvýznamnější příklady z celého světa*. Další kapitoly se budou zabývat výhradně reálnými vzdáleně řízenými experimenty, které mohou být doplněny vhodnými a doporučenými simulacemi. Z praktických i prostorových důvodů se tato práce omezuje především na otevřené (volně přístupné) vzdálené laboratoře.

1.2 Výhody a nevýhody experimentů s podporou PC a Internetu

1.2.1 Obecné výhody virtuálních a vzdálených laboratoří

Mezi obecné výhody vzdálených i virtuálních laboratoří jistě patří všechny cíle vzdálených laboratoří uvedené v kapitole [1.1.3](#) na str. [10](#), z nichž lze vyzdvihnout především **neomezenou dostupnost** a možnost **naplnění individuálních potřeb studentů** (včetně studentů geograficky rozptýlených či hendikepovaných), dále **pozorovatelnost** (práci studentů v tomto typu laboratoře může pozorovat neomezený počet osob, a dokonce je možné snadno pořídit záznam) a **bezpečnost** [\[32\]](#).

K zásadním **přednostem virtuálních experimentů** patří⁵:

1. **100% a deterministická funkčnost v čase i kvalitě** (za předpokladu úplného odladění apletu – tzn. v ideálním případě simulace je k dispozici a funguje vždy a stejným předvídatelným způsobem).
2. **Názorná vizualizace** fyzikální podstaty jevu (tzn. lze odstranit *černé skříňky* a doplnit vzhled do aparatury, případně graficky zvýraznit podstatné záležitosti či skrýt ostatní rušivé jevy) a **vizuální reprezentace** modelů nepozorovatelných jevů (např. zviditelnění elektronu a jeho pohybu).
3. Možnost **zjednodušení** nebo též **idealizace podmínek** a soustředění se výhradně na zkoumaný fyzikální jev (aplikací jednoduššího modelu či prostým softwarovým vypínačem lze skrýt či úplně odstranit vedlejší efekty, které v reálném experimentu doprovázejí zkoumaný jev a nějak zkreslují reálné experimentálně změřené hodnoty).
4. Možnost **zpomalit/zrychlit čas** reálných fyzikálních dějů v přírodě a umožnit studentům jejich pozorování a zkoumání podle individuálních potřeb.
5. Možnost **rychle změnit podmínky** – tím vším rovněž **udržet pozornost** studentů.

⁵Většina výčtu převzata z [\[89\]](#). Tyto výhody zmiňují často i další autoři.

6. Relativně nízká pořizovací cena (pouze vývoj a naprogramování) a zanedbatelné provozní náklady, nízké nároky na prostor a čas.

U dobře navrženého, naprogramovaného a odladěného apletu nenastanou komplikace typické pro tradiční laboratoře, jako je např. nezdar pokusu z elektrostatiky kvůli vysoké vlhkosti. Součástí kvalitního apletu by měl být promyšlený design experimentu, volba vhodného modelu a míry případného zjednodušení i atraktivní grafické zpracování. Lze naprogramovat prakticky cokoliv, včetně možnosti udělat chybu, zničit aparaturu i podívat se, co se konkrétně děje uvnitř měřicí aparatury. Pokročilejší aplety umožňují uživateli vypínat či zapínat nejrůznější okolnosti či zobrazení (zejména zobrazení grafických závislostí), a někdy dokonce umožňují aktivně měnit uspořádání experimentu – viz např. simulaci elektrických obvodů na obr. 1.6 dále na str. 21 [33], [90].

Speciálním druhem simulací jsou **trenažéry** pro nejrůznější činnosti, které zpravidla vyžadují drahé či jedinečné zařízení nebo jsou spojeny s nějakým druhem nebezpečí (základy ovládání auta v autoškole, řízení letadla, řízení reaktoru apod.). Typické využití virtuálních měření nacházíme např. při **výuce astronomie**, kdy praktikum se simulací šetří drahý čas největších dalekohledů světa ve prospěch vědeckého výzkumu (viz obr. 1.4 dále na str. 16). Navíc právě pro astronomii je v současnosti příznačné, že největší dalekohledy světa, situované na obtížně dostupných místech, jsou řízeny vědci z celého světa vzdáleným způsobem přes Internet.

1.2.2 Specifické výhody vzdálených reálných experimentů

Mezi specifické a unikátní výhody, proč má smysl budovat vzdálené laboratoře, patří především možnost snadno realizovat **pozorování a experimenty závisící na zeměpisné poloze**, resp. pozorování a experimenty týkající se geografických, geofyzikálních, astronomických a astrofyzikálních témat.

S. Gröber navrhl a realizoval **měření tíhového zrychlení** (World pendulum), kdy je více exemplářů stejné měřicí vzdálené aparatury s kyvadlem umístěno na několika školách na různých rovnoběžkách⁶. Zde se pomocí optické závory měří perioda kyvu, z níž lze vypočítat podle teoretických vztahů hodnotu místního tíhového zrychlení; přitom lze započítat korekce na teplotní závislost délky kyvadla a vztlakovou sílu působící na kulaté závaží, případně korekce na větší počáteční výchylku kyvadla. [36], [37] Uživatel může měnit (nastavit) pouze počáteční výchylku, tedy tuto úlohu lze klasifikovat jako experiment. V kontextu úloh v české vzdálené laboratoři by bylo vhodné např. proměřit závislost periody kyvu na délce kyvadla, přičemž cílem by bylo určení hodnoty místního tíhového zrychlení jako parametru v modelové funkci, a to pokročilým grafickým zpracováním.

Jako příklad **pozorování** lze uvést **sledování počasí** či měření slunečního svitu, **monitoring přírodního radiačního pozadí** (např. šíření radioaktivního spadu po havárii jaderného zařízení) [38]. Dále lze navrhnout např. **studium rychlosti šíření a úbytek amplitudy vln** – zejména seismických, případně vln

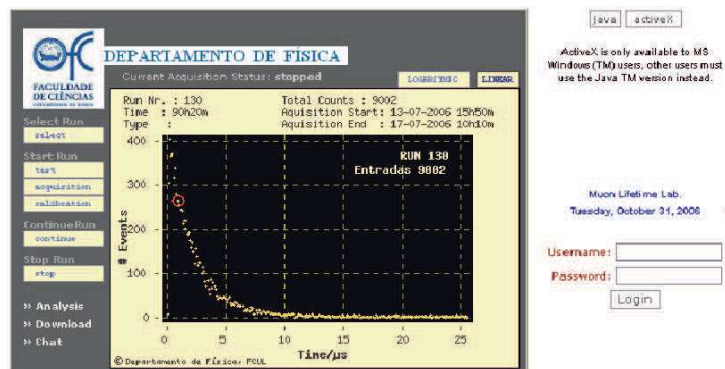
⁶Měření tíhového zrychlení lze provést vzdáleným způsobem např. v těchto městech: Aden (Jemen), Riga (Litva), Hermannsburg (Německo) a Kaisersechs (Německo). Do roku 2016 byl v provozu tento experiment též v Trnavě (Slovensko) [35].

tsunami nebo seiche⁷. Díky existenci různých módů seismických vln by studenti v dedikovaných vzdálených laboratořích mohli dokonce zkoumat a proměřovat **vnitřní strukturu zeměkoule**.

Velmi významnými a nejčastěji zmiňovanými výhodami vzdálených laboratoří jsou možnost realizovat experimenty či pozorování **nebezpečné** (např. měření se silnými zdroji ionizujícího záření, měření při vysokém napětí či při vysokých teplotách či měření na nebezpečných a těžko přístupných místech, jako např. ve vesmíru, v jaderných zařízeních apod.). Příkladem může být vzdálená úloha na Rutherfordův rozptyl⁸ [39] či měření na někdejší tokamaku ÚFP AV ČR s názvem Castor (Czech Academy of Science TORus), nyní umístěném na FJFI ČVUT pod názvem Golem⁸ [40], na němž vzdálené asynchronní měření provedli studenti již z několika evropských států [41], [42].

Vzdáleně řízené laboratoře dále přinášejí zajímavé řešení pro experimenty **komplikované na přípravu**, drahé či z dalších důvodů nedostupné či nepraktické pro tradiční školní výuku. Příkladem mohou být zásadní historické experimenty, které přispěly k posunu fyzikálního poznání světa, jako např. vnější fotoelektrický jev aj. [43], [44], [46].

Nepřetržitý provoz serverů lze v případě vzdáleného reálného experimentu či monitoringu využít k **dlouhodobým automatickým měřením**. Získaná data lze následně zpracovat s využitím statistiky. Příkladem může být vzdálený experiment CRESCERE⁹ zabývající se kosmickými sprškami, při nichž vznikají miony, které mohou při průchodu zemskou atmosférou doletět až k zemskému povrchu, pokud se dříve nerozpadnou, a to díky relativistickému jevu *dilatace času*. Pořízení časového spektra vyžaduje delší dobu měření až okolo 90 h a jeho zpracováním lze určit poločas života mionů τ_μ – viz obr. 1.2 [47].



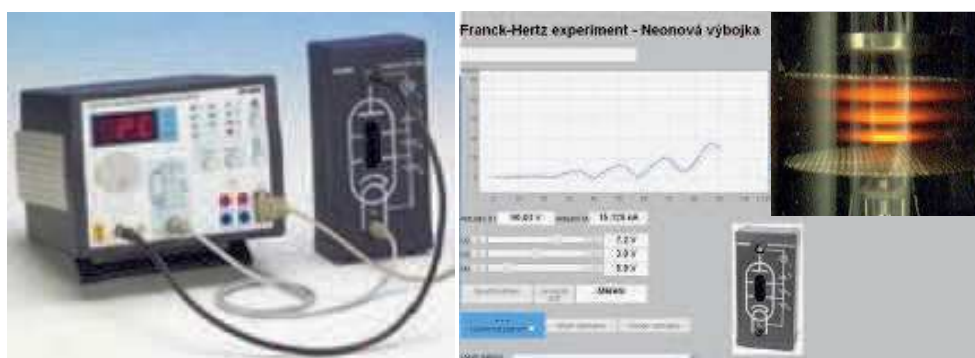
Obrázek 1.2: Uživatelské rozhraní vzdálené laboratoře pro měření doby života mionů, kdy sběr časového spektra vyžaduje měření dlouhé až 90 h. Fitem exponenciální části experimentálně zjištěného rozdělení lze určit poločas života mionů $\tau_\mu = 2,2 \mu\text{s}$. Experiment CRESCERE byl provozován na katedře fyziky Fakulty přírodních věd Lisabonské univerzity v roce 2005 [47].

⁷Seiche je stojaté vlnění na menších uzavřených či částečně uzavřených vodních plochách, např. jezerech, v přístavech apod. Ve fjordech bývají vlny seiche spouštěny např. sesuvem břehu.

⁸<http://golem.fjfi.cvut.cz> [40]

⁹CRESCERE – Cosmic Rays in an European School Environment: a Remote Experiment, <http://crescere.fc.ul.pt> [47].

V některých případech přináší významnou přidanou hodnotu samotná **webkamera** či použité **lepší senzory než lidské oko** při tradičním pokusu. Např. ve vzdálené úloze *Franckův-Hertzův experiment* lze díky webkameře oproti tradičnímu pokusu s aparaturou od firmy Phywe lépe a názorně pozorovat vznik zářivých a tmavých zón v triodě, a to společně s vykreslováním grafu závislosti proudu na napětí – viz obr. 1.3. Nebo při tradičním pozorování spekter prostým okem je vjem člověka omezen pouze na relativně úzký viditelný obor elektromagnetického spektra.



Obrázek 1.3: Sdílení historického Franckova-Hertzova experimentu formou vzdálené laboratoře, využívajícího standardní soupravu od firmy Phywe (vlevo). V tomto případě je trioda naplněna neone. Přidanou hodnotou je současné zobrazení dějů v trubici (díky vyšší citlivosti webkamery než u lidského oka – viz snímek z webkamery vpravo) společně s vykreslováním voltampérové charakteristiky triody do grafu (viz řídicí stránka uprostřed). [48], [49]

1.2.3 Nevýhody virtuálních a vzdálených laboratoří

Kritici simulací neboli virtuálních experimentů (VE) zmiňují nejčastěji několik zásadních nevýhod a rizik [89]:

1. Při měření s aplety si studenti nemohou rozvíjet své experimentální a manuální dovednosti.
2. Měření s aplety neposiluje vjem a hodnocení možných rizik, jinými slovy prováděním VE není student vystaven reálným hrozbám.
3. Dominantním efektem VE je osvojení, jak spustit a ovládat simulaci, resp. jak simulace funguje, a to na úkor pochopení vlastního fyzikálního jevu a podstaty činnosti experimentální aparatury, na které by se měli studenti či žáci primárně zaměřit [50].
4. Nadměrné používání simulací může mít u studentů za následek ztrátu spojení skutečného a virtuálního světa [51].
5. Data ze simulovaných laboratoří nejsou reálná, a proto se studenti nemohou učit pomocí pokusů a omylů a principiálně nemohou objevit zcela nový fyzikální jev [52].

6. Někteří poznamenávají, že náklady na simulaci nejsou nutně nižší než náklady na reálné laboratoře [53]. Realistické simulace vyžadují velké množství času a výdajů na vývoj, a přesto stále mohou selhat ve věrném modelování reality [54].
7. Výuka omezená na simulace může způsobit vznik miskoncepcí u studentů, např. kvůli nevhodné míře zjednodušení.
8. Vedle kvalitních simulací je na Internetu dostupná řada nedomyšlených, či dokonce chybných apletů, které by měly být průběžně odstraněny nebo opraveny.

Další aspekty budou zmíněny v souvislosti s výzkumem efektivity dále v kapitole 1.5 na str. 22.

Ze současných **nevýhod vzdálených laboratoří** lze uvést obecně nízký počet volně přístupných vzdáleně řízených experimentů, dále vysoké nároky na design, stavbu i údržbu vzdálené aparatury pracující non-stop, s čímž souvisí vyšší provozní náklady. Zpočátku byla překážkou i vysoká pořizovací cena, která přirozeně zůstává u profesionálních nebo náročnějších realizací, avšak postupem času se objevují a diskutují i levnější alternativy využívající levné a snadno dostupné komponenty (např. Remduino Lab se senzory platformy Arduino, [55]). Klíčová je přirozeně závislost na **stabilitě a dostatečné rychlosti internetového připojení**. Jako při každém reálném experimentu může dojít nečekaně k poruše či chybě, kterou vzdálený uživatel zpravidla nemůže okamžitě a jednoduše řešit a rychlost nápravy závisí na fyzické obsluze ve vzdálené laboratoři.

1.3 Nejvýznamnější příklady virtuálních a vzdálených laboratoří

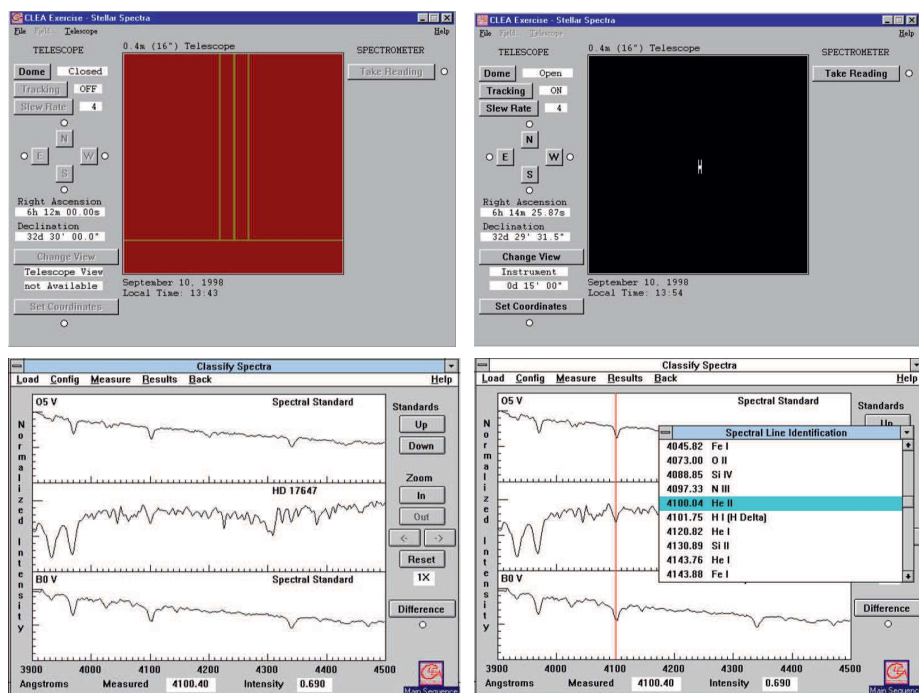
1.3.1 Příklady virtuálních experimentů a použité platformy

Virtuální experimenty jsou přirozeně starší než vzdálené reálné laboratoře a na Internetu lze nalézt nepřeberné množství apletů rozdílné kvality a na nejrůznější témata. Autory prvních apletů byli zpravidla nadšení učitelé či jejich studenti schopní programovat, kteří průběžně vytvářeli virtuální experimenty podle potřeby či jako školní projekt. Brzy se objevily portály a sbírky, které poskytovaly přehledný výběr apletů na jednom místě, jako např. fyzikální aplety W. Fendta¹⁰ z nichž přes 50 do češtiny přeložil M. Panoš¹¹ [56], dále portál Open Source Physics (OSP) [57] aj. Ojedinělý a velmi významný je projekt Coloradské univerzity PhET (Physics Education Technology, [58]), který byl iniciován nositelem Nobelovy ceny Carlem A. Wiemanem. Na vývoji i výzkumu apletů PhET pracuje tým expertů, který zahrnuje pedagogy, programátory a schopné

¹⁰Walter Fendt je SŠ učitel matematiky, fyziky a informatiky v důchodu, působil na Paul-Klee-Gymnasium, Gersthofen (poblíž Augsburgu v Německu).

¹¹Miroslav Panoš je SŠ učitel na Gymnáziu J. Vrchlického, Klatovy.

grafiky. Aplety vyžadují pouze nainstalované prostředí Java Runtime Environment (JRE), mají promyšlený design a vizualizaci, zpravidla umožňují modifikaci experimentálního uspořádání a autoři pod záštitou Coloradské univerzity zaručují jejich trvalou a bezplatnou dostupnost. K těmto apletům navíc na portálu <http://PhET.colorado.edu> existuje sbírka podpůrných návodů a dalších pedagogických materiálů (prezentace, testy, videa, ...) a je zde organizovaná diskuse učitelů využívajících aplety PhET. Významné a kvalitní simulace pro zmíněnou výuku astronomie a astrofyziky poskytuje zdarma např. projekt CLEA¹² – viz ukázka simulace na obr. 1.4 [59]. Nejnovější přehledové studie simulací jsou uvedeny např. v [32], [61].



Obrázek 1.4: Uživatelské rozhraní velmi realistické simulace CLEA na téma spektrální klasifikace hvězd, které navozuje reálný pocit přítomnosti ve vědecké observatoři: vlevo nahoře hlavní řídicí panel dalekohledu při zavřené kopuli a vpravo nahoře při otevřené kopuli po zamíření dalekohledu na hvězdu – následně lze spustit měření v řídicím panelu pro spektrometr; dole ukázka prostředí pro přímé zpracování (klasifikaci) pořízeného spektra – vlevo porovnávání pořízeného spektra se standardy a vpravo identifikace spektrálních čar. Naměřená spektra obsahují náhodný šum a student vždy musí zohlednit poměr signálu k šumu (SNR – Signal-to-Noise Ratio). [60]

Velký počet apletů je naprogramován v jazyce Java. K masovému rozšíření tvorby a využívání JAVA apletů dopomohlo např. relativně jednoduché vývojové prostředí Easy Java/JavaScript Simulations (EJS, EjsS [62]). Další oblíbenou multimediální softwarovou platformou pro interaktivní simulace byl Flash od spo-

¹²Projekt CLEA (Contemporary Laboratory Experiences in Astronomy) obsahuje 16 volně stažitelných simulovaných měření na virtuální observatoři, vyvíjených po 22 let do odchodu autorů do důchodu [59].

lečnosti Adobe, avšak kvůli současným problémům s bezpečností se prohlížeče od tohoto grafického vektorového programu odvracejí a podpora přehrávače Adobe Flash Player, který je nezbytné na PC nainstalovat, bude ukončena v roce 2020 [63]. Je třeba zdůraznit, že tvorba apletu demonstrujícího nějaký fyzikální jev vedle programátorských dovedností vyžaduje od autora-studenta jednak hlubší pochopení fyzikální podstaty jevu, jednak schopnost tento jev matematicky popsat a modelovat. Vlastní tvorbu apletu lze považovat za cennější než pouhou práci s dříve vytvořeným apletem.

1.3.2 Příklady vzdálených laboratoří ve světě a v ČR

Jeden z nejrozsáhlejších přehledů vzdálených laboratoří uvedl např. S. Gröber ve své disertační práci z r. 2011, který čítá přes 300 vzdáleně řízených experimentů [45]. Zřejmě z důvodů finančně i časově náročné údržby vzdálených laboratoří, rychlému pokroku a vylepšování počítačů i operačních systémů včetně zabezpečení, ukončení financování, odchodu autorů do penze apod. se počet vzdálených laboratoří v čase dramaticky mění a obdobné přehledy laboratoří rychle pozbydou platnosti a aktuálnosti. Podobně se v čase mění téma, resp. zaměření laboratoří. Pro ilustraci v roce 2004 bylo k dispozici okolo 70 vzdálených experimentů, z nichž přibližně 70 % bylo volně přístupných a kolem 90 % bylo zaměřeno na inženýring. V roce 2006 se podíl vzdálených laboratoří zaměřených na výuku fyziky zvýšil na cca 30 %, ale z tehdejšího počtu asi 120 vzdálených laboratoří jich bylo volně přístupných už jen 20 %. Nové vzdálené laboratoře byly vybudovány a po určité době udržovány díky finanční podpoře v rámci asi 60 projektů. [72] Snížení počtu otevřených vzdálených laboratoří zřejmě bylo způsobeno i faktem, že se jejich provozovatelé rozhodli omezit přístup ke svým vzdáleným experimentům pouze pro určitou skupinu uživatelů (např. studenty dané školy) a na webových stránkách zpravidla nemají o provozu vlastní vzdálené laboratoře žádnou zmínku. Takovými laboratořemi se tato disertační práce z praktických i prostorových důvodů nezabývá.

V Evropě vznikla jedna z prvních významných otevřených vzdálených laboratoří právě v Německu¹³ www.remote-lab.de. Její experimenty jsou převážně zaměřeny na výuku fyziky a jsou distribuovány na velký počet německých univerzit, příp. středních škol po celé republice, což je zřejmým předpokladem pro jednodušší údržbu a veřejnou dostupnost jednotlivých experimentů. Tvůrcem německé vzdálené laboratoře byla skupina prof. H.-J. Jodla, který kladl důraz na několik důležitých atributů vzdáleně řízených experimentů (RCL – Remotely Controlled Laboratory), jako jsou např. dostatečná robustnost pro nepřetržitý provoz a intuitivní způsob ovládání [73]. První německý vzdálený experiment na téma difrakce elektronů v této laboratoři spustil dr. Daniel Roth v roce 2001. [46] Česká vzdálená laboratoř na UK MFF www.ises.info patří společně s německou mezi nejstarší evropské otevřené vzdálené laboratoře; první demonstrační vzdálenou úlohu *Řízení vodní hladiny* zde uvedl do provozu doc. F. Lustig v roce 2002 [64]. V současnosti naše vzdálená laboratoř nabízí 18 vzdálených experimentů.

Podle nejnovějšího přehledu z roku 2016 čítá světová nabídka asi 60 otevře-

¹³Při aktualizaci webu na jaře 2018 se výrazně snížil počet dostupných vzdálených experimentů, zejména z důvodu vazby elektroniky na operační systém MS Windows XP, jehož tzv. rozšířená podpora skončila v roce 2014 [46].

ných vzdálených reálných experimentů [72], z nichž největší počet (18) nabízí právě český e-Laboratory Project [64]. Mezi další významné otevřené vzdálené laboratoře ve světě patří např. UNILabs¹⁴ [71], Weblab DEUSTO [69], RExLAB¹⁵ [70] a jiné¹⁶. Za pozornost dále stojí projekt Blekingeského technologického institutu ve Švédsku známý pod akronymem VISIR¹⁷ k němuž se připojuje mnoho dalších univerzit [65].

Podobně jako u simulací rovněž vzdálené experimenty jsou zájemcům nabízeny z vytvořených rozcestníků, resp. repositářů, portálů, jako jsou např. stránky eedu.eu [66] či Go-Lab [67]. REMLABNET kromě rozcestníku na jednotlivé vzdálené experimenty řeší navíc problematiku provozu a správy vzdálených laboratoří, a to formou RLMS – Remote Laboratory Management System [68].

V ČR kromě Matematicko-fyzikální fakulty UK v Praze [64] a Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně [68] vzdálené laboratoře provozují a využívají i další univerzity¹⁸ a dokonce i některé střední školy¹⁹.

1.3.3 Technologie a platformy vzdálených laboratoří

Významná část vzdálených laboratoří je postavena na profesionální technologii LabVIEW [77], [78], případně na levnější platformě Arduino (viz [79] až [83]) či FPGA²⁰ [84]. Německé vzdáleně řízené experimenty využívají speciálně vytvořenou elektroniku, jež připomíná současné desky plošných spojů s jednočipem [46]. České a slovenské vzdálené laboratoře jsou ve většině případů založeny na hardwarové platformě ISES (Intelligent School Experimental System, [85]), která pro vzdálené řízení využívala software IWC (ISES Web Control). Tuto platformu

¹⁴UNILabs je síť vzdálených laboratoří sdílených několika španělskými univerzitami, z nichž nejvýznamnější je UNED – Universidad Nacional de Educación a Distancia [71].

¹⁵RExLAB – Remote Experimentation Laboratory, iniciovaná v r. 1997 brazilskou univerzitou Universidad Federal de Santa Catarina en Brasil. Vývojáři se zde zaměřují na tvorbu nízkonákladových vzdáleně řízených experimentů [70], [72].

¹⁶Zatím nevelký počet vzdálených experimentů nabízejí např. skupina kolumbijských univerzit Physilab@b (physilab.ucp.edu.co) a skupina Galileo Group v Argentině (galileo4.unl.edu.ar) [72].

¹⁷Projekt VISIR (Virtual Instrument Systems in Reality) vznikl na švédské vysoké škole BTH ve městě Karlskrona mj. pod vedením I. Gustavssona. Cílem projektu bylo rozšířit koncept online laboratoří na BTH s využitím otevřených technologií, aby se mohly k projektu přidat i další univerzity. Hlavním těžištěm tohoto konceptu bylo doplnění tradičních laboratoří o možnost vzdáleného řízení, aby byly laboratoře přístupné většímu počtu studentů bez ohledu na jejich přítomnost či nepřítomnost ve škole. Pro vzdálené měření je zde charakteristická práce s virtuálním nepájivým polem (openlabs.bth.se). [65]

¹⁸Vzdálené experimenty provozuje např. Pedagogická fakulta Masarykovy univerzity v Brně [74], avšak jejich veřejná dostupnost je nepravidelná; dále např. Pedagogická a Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého v Olomouci [75]. Na Západočeské univerzitě v Plzni bylo vzdálené měření na vlastní platformě řešeno prostřednictvím vzdálené plochy. Vzdáleně řízené experimenty využívá např. Pedagogická fakulta Ostravské univerzity v Ostravě, resp. mnohé další univerzity. Na Slovensku byla do roku 2016 v provozu vzdálená laboratoř na Pedagogické fakultě Trnavské univerzity v Trnavě. Vzdálené experimenty zde také provozuje Fakulta přírodních věd Univerzity Konstantina Filozofa v Nitře. Přehled vzdálených laboratoří na Slovensku je zpracován např. v knize [29].

¹⁹Středoškolské vzdálené experimenty sdílí např. Gymnázium J. Vrchlického, Klatovy, které spustilo první českou středoškolskou vzdálenou laboratoř dne 12. 4. 2011. Vedoucím projektu je dr. Miroslav Panoš. [76]

²⁰FPGA – Field Programmable Gate Array, programovatelné hradlové pole je typ logického obvodu vyrobený tak, aby si jej mohl pro určitou funkci naprogramovat až koncový uživatel.

navrhnul a vytvořil doc. F. Lustig ve spolupráci s programátorem Mgr. J. Dvořákem. IWC byla sada Java objektů, z nichž bylo možné poměrně snadno vytvořit jednoduchou řídicí webovou stránku [16]. Nastavení pokročilejšího řízení či předzpracování hodnot ovšem vyžadovalo hlubší programátorské znalosti a dovednosti. Později začala být výše zmíněná hardwarová a softwarová platforma označována jako iSES (Internet School Experimental Studio). Původní německé i české vzdálené experimenty vyžadovaly k ovládnutí nainstalované prostředí **Java Runtime Environment (JRE)**.

1.3.4 Problémy s JRE (2010–2015) a přechod na JavaScript

Od roku 2010 se však začal projevovat problém se správným načtením všech řídicích modulů (Java objektů). V roce 2013 přestala být platforma JRE pro vzdáleně řízené experimenty prakticky použitelná, mj. kvůli nezbytnému potvrzování bezpečnostních upozornění uživatelem pro každý Java objekt zvlášť (uživatel musel před připojením ke vzdálené aparatuře odklikat typicky 10–20 bezpečnostních upozornění, přesto se mnohdy všechny Java objekty nepodařilo načíst správně). Tým doc. F. Lustiga ve složení Mgr. Jiří Dvořák a Mgr. Pavel Kuriščák vyřešil problém přechodem k platformě JavaScript (JS). Od roku 2015 byly postupně stávající experimenty v české vzdálené laboratoři (postavené na platformě iSES) převedeny na JavaScript a staly se opět funkční s mnohem vyšší spolehlivostí a ovladatelné dokonce i přes mobilní zařízení (tablety, chytré telefony) [86].

Z dotazníků mj. vyplynulo, že velká část studentů mívá zákaz instalovat na počítač další software, což se týká i JRE. Přechodem na JavaScript byla proto vyřešena i tato komplikace, protože JavaScript, který vyžaduje a využívá knihovnu AJAX²¹ je standardní nainstalovanou součástí všech běžných prohlížečů webovských stránek. Knihovna AJAX je k dispozici i na mnohých chytrých telefonech, z nichž lze vzdálené experimenty rovněž řídit.

Od roku 2015 tedy platforma iSES zahrnuje profesionální hardwarovou stavebnici ISES a softwarovou stavebnici iSES Remote Lab SDK, se kterou je možné nově a navíc používat jiná komerční měřidla, zdroje, multimetry apod., zkrátka laboratorní přístroje připojitelné přes USB nebo přes sériový port RS232 [86].

1.4 Hodnocení laboratoří podle technologie

Vzdálené laboratoře postavené na profesionální platformě LabVIEW vyžadují nainstalovaný LabVIEW Runtime Engine, k čemuž je potřeba administrátorské oprávnění. Společnost National Instruments (NI) však do současnosti nevyřešila některé závažné problémy a omezení²² [88], přesto jsou v současnosti vzdá-

²¹AJAX (Asynchronous JavaScript and XML) je označení pro technologie vývoje interaktivních webových aplikací, které mění obsah stránek bez nutnosti jejich kompletního znovunačítání, a to za pomoci asynchronního zpracování webových stránek pomocí knihoven napsaných v JavaScriptu. Nejdůležitější knihovnou pro vzdálené experimenty je `jQuery`. Výhody a nevýhody jsou popsány v [87]. Podmínkou pro využívání je nainstalovaný moderní webový prohlížeč. [87]

²²Kromě nezbytné instalace prostředí LabVIEW Runtime Engine zatím není možné vzdálený experiment ovládat přes mobilní zařízení ani v několika významných prohlížečích (Google Chrome, Mozilla Firefox, Microsoft Edge). K uživatelskému rozhraní platformy LabVIEW zvanému „Remote Front Panel“ lze v současnosti mít vzdálený přístup jen v těchto prohlížečích: Internet Explorer 5.5 a vyšší, Netscape 4.7 a vyšší a Opera. [88]

lené laboratoře postavené na LabVIEW ve světě nejrozšířenější. LabVIEW totiž poskytuje řadu užitečných nástrojů a filtrů a bývá využíváno pro experimenty zaměřené na elektrotechnické vzdělávání a inženýrské obory. Německé vzdálené experimenty byly založeny na platformě JRE a obdobně přešly na JavaScript. Webkamery v německých vzdálených laboratořích obvykle zachycují pohled na aparaturu a na displej měřicích přístrojů (multimetrů); mají tedy rezervy v digitalizaci naměřených dat a uživatel musí hodnoty opisovat ručně – viz např. obr. 1.5. Otevřené české a slovenské vzdálené laboratoře tradičně využívají český systém iSES (Internet School Experimental Studio), kterým jsou všechna experimentální data i nastavení exportována v digitální podobě a jejich stažení např. do tabulkového procesoru typu MS Excel²³ je velmi jednoduché a rychlé. Na nejnovější platformě iSES vyvinuté doc. F. Lustigem, J. Dvořákem a P. Kuriščákem lze poměrně rychle a snadno postavit a naprogramovat jednoduché i pokročilejší vzdáleně řízené experimenty vyžadující speciální řízení či filtry a předzpracování experimentálních hodnot [86].



Obrázek 1.5: Pohled na vzdáleně řízenou aparaturu v německé vzdálené laboratoři na téma vnější fotoelektrický jev prostřednictvím webkamery. Webkamera zachycuje displej měřicích přístrojů, z nichž je nutné si hodnotu poznamenat ručně. Pod živým obrazem je uveden komentář v německém jazyce, že „voltmetr se zapíná automaticky a zobrazuje napětí ve voltech“ [46].

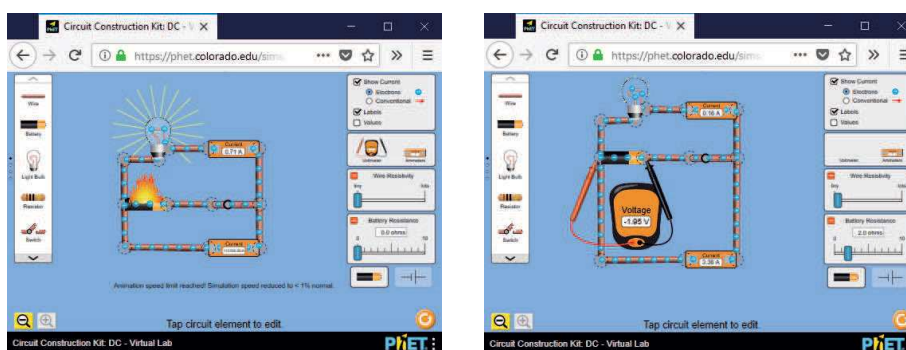
²³Bezplatnou a dobře funkční alternativou k programu MS Excel jsou např. otevřené kancelářské balíky „Open Office“ nebo „Libre Office“ s tabulkovým kalkulátorem „Calc“.

1.5 Výzkumy laboratoří s podporou PC, vzdělávací cíle laboratoří

Během několika let po zprovoznění prvních vzdálených experimentů si výzkumníci začali klást otázky, zda je výuka využívající počítačem podporované experimenty efektivnější než výuka s tradičními experimenty a zda má smysl vynakládat prostředky do budování nových laboratoří tohoto typu. Provedené výzkumy a vědecké diskuse po dlouhou dobu nepřinášely jasnou odpověď a současně se objevila kritika takových výzkumů, např. že pod vlivem počátečního nadšení z nových technologií výzkumníci mohli být pro určitou technologii zaujatí. Zásadní problém však tkví ve faktu, že **neexistují žádná objektivní kritéria** pro hodnocení efektivity laboratoří, případně nelze objektivně určit váhy pro všechna relevantní kritéria. [89] Přesto je dále uvedeno několik povzbuzujících výsledků studií.

Studie efektivity výuky s aplety PhET potvrdily, že tyto simulace významně pozitivně přispívají ke koncepčnímu porozumění. C. Wieman a kol. zkoumal efektivitu 45 fyzikálních interaktivních simulací PhET a jeho studie ukázaly, že např. simulace elektrických obvodů pomáhají studentům k pochopení základních vlastností el. proudu a napětí jako i při stavbě a vysvětlení funkce reálných elektrických obvodů. Tyto aplety dokonce mohou nahradit elektronické praktikum s reálnými přístroji a pomůckami – viz obr. 1.6. Navíc studentům zkracují dobu potřebnou na učení se. [90]

J. R. Brinson analýzou článků z let 2005–2014 dospěl k závěru, že studijní výsledky s ohledem na různé kategorie (znalost, porozumění, výzkumné, praktické a analytické dovednosti, vnímání i sociální a vědecká komunikace) jsou stejně dobré nebo lepší při použití počítačem podporovaného experimentu (vzdáleného nebo virtuálního, které nazývá *netradiční*) ve srovnání s *tradičními* laboratořemi. [91]



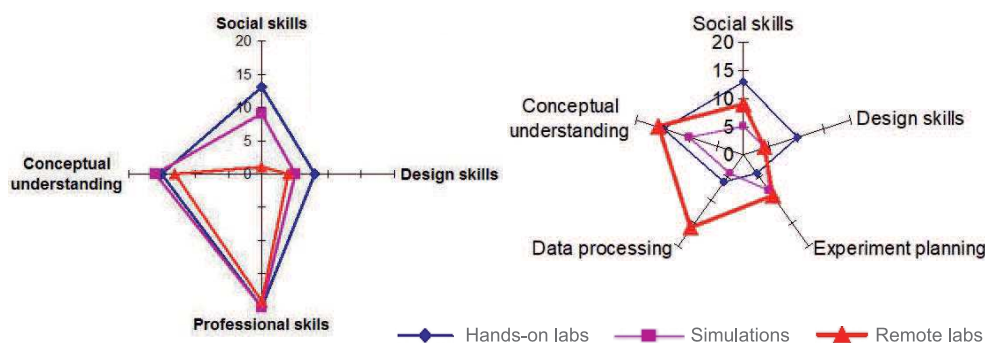
Obrázek 1.6: Interaktivní simulace PhET pro zapojení elektrického obvodu, která může nahradit elektronické praktikum. Případná chyba v zapojení je po sepnutí spínače žákům vhodným způsobem naznačena – viz symbol ohně v obvodu vlevo. Simulace umožňuje značnou modifikovatelnost elektrického obvodu včetně zapojení měřidel – viz údaje na displeji voltmetru a ampérmetru na obr. vpravo. Lze snadno měnit hodnoty parametrů reálných součástek, jako např. vnitřní odpor zdroje i vodičů, a zkoumat jejich vliv na funkci obvodu. [58], [90]

Ž. Gerhátová ve svém konstrukčním výzkumu (design-based research, [92]) zahrnujícím rovněž vývojový výzkum (též konstrukční experiment nebo formativní výzkum [93]) využila techniku paralelních skupin – kontrolní a experimentální. Měřicím nástrojem byly nestandardizované didaktické testy (vstupní a výstupní test neboli pretest a posttest), vytvořené podle všeobecného algoritmu [94]. K vyhodnocení bylo použito standardní statistické testování hypotéz. S ohledem na časovou náročnost pedagogického výzkumu a neochotu škol spolupracovat bylo nutné výzkum provést s dostupným výběrem namísto náhodným, jehož rozsah byl 155 žáků z 9. ročníku ze dvou ZŠ (82+73 žáků). Po zajištění srovnatelných podmínek (např. min. desetiletá praxe učitele) a ověření předpokladů srovnatelných skupin a použitých statistických metod výzkum Ž. Gerhátové potvrdil, že při 5% hladině významnosti je v 9. ročníku na dvou ZŠ výuka tématu *Zdroje energie, druhy energie a jejich využití* formou badatelsky orientované výuky (Inquiry-based Learning) využívající strategii INTe-L s reálnými vzdálenými experimenty účinnější než tradiční forma výuky (encyklopedicko-memorovací). S ohledem na malý rozsah výběrového souboru a neochotu škol spolupracovat bohužel nebylo možné výsledky zobecnit. Podle Ž. Gerhátové i vlastní řešerše jsou výzkumy efektivitivy vzdálených reálných laboratoří (přinejmenším v českém a slovenském prostředí) stále v plenkách. [4]

Rozsáhlejší několikaletý výzkum na vzorku 458 studentů uskutečnili Corter a kol. v letech 2006 a 2007. Tří až čtyřčlenné týmy studentů měly provést stejný typ fyzikálního experimentu (namáhání konzolového nosníku), a to v některém ze tří uvažovaných formátů laboratoře (tradiční, simulované či vzdálené). Výsledky naznačily, že studenti se mohou efektivně učit s využitím všech těchto tří formátů laboratoře. [95]

Z prostudované literatury lze učinit obecný závěr, že využitá forma experimentu ve výuce (tradiční pokus, simulace, vzdálený reálný experiment) nemá zásadní vliv na výsledky vzdělávacího procesu [32], [89]. Respektive u takovýchto výzkumů lze postrádat rozumný smysl, protože každá z forem je primárně vhodná pro naplnění odlišných cílů (viz grafické porovnání naplnění cílů jednotlivých forem laboratoří na obr. 1.7) a má své specifické klady, nedostatky i rizika, zmíněné dříve v odstavcích výhod a nevýhod v části 1.2 od str. 11. Nevýhody a rizika jednotlivých forem výuky lze dostat pod kontrolu jejich vhodnou aplikací při výuce [4]. Volba vhodné formy experimentu zřejmě značně závisí na probíraném tématu, jeho náročnosti a mnoha dalších okolnostech. Podobně i *výsledky provedených studií jsou omezeny a vztaženy pouze na určitá témata* a nelze objektivně porovnávat výsledky studií napříč různými obory a tématy. [89]

Ma a Nickerson ve své komparativní studii z r. 2006 zdůraznili, že výzkumy jsou ovlivněny mnoha faktory, a dokonce i možným zaujetím autora pro určitou technologii. Výstupy výukového procesu jsou vždy výsledkem mnoha vzájemně propojených faktorů, které je třeba při výzkumu přísně izolovat a udržet pod kontrolou, což je však obtížné. Mezi faktory ovlivňujícími účinnost laboratoří jsou mimo jiné komunikace s vrstevníky a učitelem, ale i míra, nakolik studenti věří určité formě laboratoře (pocitů přítomnosti a reality – sense of presence, sense of reality). Míru důvěry určuje zejména uživatelské prostředí (rozhraní). V závěru doporučují **zaměřit výzkum na hybridy laboratoří**, kdy je možné postupně vybudovat a dále předpokládat důvěru studentů ve všechny zmíněné formy laboratoří: tradiční, vzdálené i virtuální. [89]



Obrázek 1.7: Vzdělávací cíle tradičních (Hands-on), simulovaných (Simulations) a vzdálených reálných laboratoří (Remote labs) v grafickém zpracování Z. Lustigové, která doplnila čtyři kritéria autorů Ma a Nickersona o páté – tj. zpracování experimentálních dat [96], [89]. Z prací Z. Lustigové, F. Schauera aj. vyplývá, že velmi významnou předností vzdálených laboratoří pro přírodovědné a technické předměty je možnost **zaměřit výuku na zpracování experimentálních dat**.

1.6 Analýza logovacích souborů

Servery připojující vzdáleně řízené experimenty do sítě Internet (včetně vzdálené laboratoře www.ises.info od jejich počátků) navíc poskytují s jistými omezeními automatický záznam aktivity uživatelů ve vzdálené laboratoři – tzv. logování²⁴. Cenné informace lze tedy získat právě analýzou těchto logů (logovacích souborů). Celý komplexní proces zpracování a analýzy těchto zdrojů se nazývá vytěžování dat ve vzdělávání (Educational Data Mining, EDM).

Data mining jako oblast výzkumu vznikl prakticky společně s rozvojem Internetu a online učení (e-learning, web-based education) na konci minulého století a je především spjat s neustálým rozvojem podnikání přes Internet, pro které představuje cenný nástroj a zdroj informací. Data mining v moderním pojetí zahrnuje sběr dat, porozumění jim a jejich předzpracování, různé metody analýzy dat a vyhodnocení a interpretaci výsledků vedoucí k praktickému využití [97]. Předzpracování a metody analýzy se potřebují vypořádat zejména s neúplnými daty či výskytem chyb v nich neboli s vyšší mírou rozmazanosti a nepředvídatelnosti (fuzziness, unpredictability). Ve vzdělávání se většina zjištění nejčastěji využívá k vylepšení online vzdělávacích systémů a uživatelského rozhraní, avšak vhodnými statistickými a data-miningovými algoritmy lze získat i nové vědecko-výzkumné poznatky v procesu vzdělávání, jako např. k identifikaci modelů učení se, které ovlivňují výsledky a účinnost vzdělávacího procesu. [99]

Data mining ve vzdělávání může pomoci identifikovat různé modely žáků, které zahrnují jednak jejich vstupní vědomosti a zkušenosti, motivaci a chování, jednak jejich zkušenost a spokojenost s online vzdělávacím systémem. Analýzou logů v reálném čase by bylo dokonce možné odhalit, že se student přestal orien-

²⁴Při automatickém logování se zaznamenávají nejdůležitější informace o interakci uživatele s uživatelským prostředím, např. stisknutí tlačítka, nastavení parametru pomocí posuvníku (včetně nastavené hodnoty) v řídicí webové stránce, a to vždy ve spojení s časovým razítkem (aktuálním systémovým časem). Podrobnější popis je uveden ve 3. kapitole.

tovat, a iniciovat pomoc ze strany učitele, případně upravit materiály či postupy používané v online kurzu [98]. Součástí toho je i experimentální ověření, zda je téma prezentováno a vyloženo vhodným způsobem, zda přiměřeně zachází do detailů a zda efektivně využívá nejrůznější podpůrné prostředky (tzv. domain modelling). [99]

Pro efektivní výuku jsou velmi důležité motivační aspekty jako míra zapojení do výuky, zaangažovanost (engagement). Data mining (nejlépe v reálném čase) přináší možnost u žáků/studentů odhalit znechucení výukou (disengagement), při jehož včasné detekci by bylo možné studenty vhodnými prostředky znovu motivovat a vrátit do výuky. [99]

V současné době je ve školním kurikulu požadováno, aby studenti rozuměli základním vědeckým konceptům a metodám včetně významu experimentu ve fyzice, aby rozlišovali mezi závěry založenými na teorii a na výsledcích experimentů a aby rozvíjeli svou schopnost spolupracovat a komunikovat. Jedná se o komplexní a náročné požadavky, při kterých se žáci či studenti běžně dostanou do nejisté či nepřesně definované situace. Obdobně i virtuální a vzdálené reálné laboratoře představují složitější pracovní prostředí, které je rovněž více nepředvídatelné, a to jak pro žáky, tak pro učitele či supervizory online laboratoří, ale rovněž i pro analytiku a vývojáře vzdálených laboratoří – všichni tito účastníci se kontinuálně učí. E-learningové prostředí disponuje spoustou strukturovaných a nestrukturovaných textových informací i diskusními nástroji (online chat apod.). Probíhají zde všechny druhy komunikace:

1. mezi učitelem a žákem/studentem,
2. mezi studenty (vrstevníky),
3. mezi týmem studentů a členem tohoto týmu (vnitrotýmová komunikace),
4. mezi studentem a učebním materiálem (např. ve formě osobních poznámek, komentářů, výpisků apod.).

Ve vzdálené laboratoři bývá situace a praxe odlišná, komunikace a činnost zde bývá omezena na zadání úkolu, nastavení experimentu a provedení měření, záznam a následné zpracování naměřených dat (tzv. web-based instructional design). Chaty, diskusní kluby apod. (synchronní nebo asynchronní) se ve vzdálených laboratořích využívají zřídka²⁵. Jako jediný doklad komunikace, činnosti a postupu zůstává automatický záznam aktivity ve spojení s časovým razítkem. [99]

V rámci rešerše se nepodařilo nalézt relevantní studie vzdálených laboratoří využívající analýzu logů, což naznačuje, že data jsou zpravidla jen shromažďována a zůstávají neanalyzovaná. Literatura je zaměřena především na vývoj a vylepšování příslušných laboratoří a popisuje technicko-inženýrské aspekty. Případné výzkumy se provádějí přímým pozorováním na místě, rozborů protokolů z měření, dotazníkovým šetřením apod. [99]

Z českých autorů se teorií i praktickým využitím analýzy logů zabýval např. J. Valdman (ZČU v Plzni) ve své disertační práci z oboru *informatika*, kde uvádí významné starší články k problematice [100]. Analýza logů se využívala v jiných oborech, jako např. při řízení letů kosmických sond, a to dokonce i za účelem

²⁵Diskusní nástroje jsou k dispozici např. v českém RLMS REMLABNET [68].

automatizace testů a ověřování v reálném čase [101]. V pedagogickém výzkumu byla např. analýza logů využita k ověření vypovídací schopnosti dotazníků [102]. Ve vztahu k tématu této disertační práce se více relevantních studií objevilo až po roce 2014 [103], [104]. Na závěr je třeba upozornit na organizaci educational-datamining.org, která organizuje konference na téma EDM²⁶ po celém světě od r. 2008.

1.7 Současné trendy

1.7.1 Vývoj počtu vzdálených laboratoří v čase

Z prostudované literatury vyplývá, že počet vzdálených laboratoří se mění v čase: v roce 2004 se pohyboval kolem 60, v roce 2006 se navýšil na cca 120 [72], maxima dosáhl okolo roku 2011 (např. v přehledu S. Gröbera je zmíněno přes 300 vzdálených laboratoří [45]) a v současnosti je opět nízký – např. v nabídce nejvýznamnějších rozcestníků jako Go-Lab je uvedeno přes 60 vzdálených laboratoří [67]. F. Lustig a kol. toto pozorování vysvětluje několika fakty [18], [55]:

1. Online vzdálené laboratoře dostupné nonstop jsou časově a zejména finančně náročné na údržbu.
2. Univerzity (popř. střední školy) vlastníci a provozující vzdálené laboratoře omezují z praktických i ekonomických důvodů přístup ke vzdáleným reálným experimentům pouze pro vlastní studenty.
3. Stavba nových vzdálených laboratoří na úrovni je netriviální a drahá.
4. Pozornost vývojářů a článků se zaměřuje na jinou problematiku,

jako zejména využití cloudů (viz [105]–[107]), na masovou výuku²⁷ a na systémy integrující vzdálené laboratoře²⁸ které jsou pro masovou výuku považovány za potřebné. Další trendy ve vývoji vzdálených laboratoří byly zmíněny v části [1.3.2] na str. [17]. Aktuální stav využívání vzdálených laboratoří ve výuce popisuje literatura [72].

1.7.2 Aktuální trendy ve výuce

Další trendy lze pozorovat ve způsobu využití a zapojení vzdálených laboratoří ve výuce, pro kterou jsou stále více příznačné multidisciplinarita a mezipředmětové vazby. Kombinací tradiční (face-to-face, f2f) výuky s e-learningem vznikl tzv. *blended learning* (b-learning). Je to kombinovaná forma výuky zaměřující se na optimální dosažení učebních cílů za pomoci vhodných technologií, které odpovídají učebním stylům učícího se jedince, aby tak došlo k získání adekvátních dovedností správné osoby ve správný čas. Např. první a poslední kurz probíhá formou osobní účasti („f2f“) a ostatní kurzy mohou být e-learningové [108], [109]. S neustálým rozvojem, zlevňováním, a tedy snazší dostupností mobilních zařízení (chytré telefony / smartphony, tablety, notebooky / laptopy) se objevil trend známý pod

²⁶Viz sborníky z konferencí dostupné na www.educationaldatamining.org/conferences.

²⁷MOOLs – Massive Open Online Labs, MOOCs – Massive Open Online Courses [117]

²⁸RLMS – Remote Laboratory Management System, LaaS – Laboratory as a Service [118]

akronymem **BYOD**²⁹ (Bring Your Own Device – přines si své zařízení), který přináší zajímavý způsob využití takových zařízení a čidel v nich integrovaných ve výuce fyziky, ale na druhou stranu znesnadňuje např. zajištění informační bezpečnosti [110]. Nejnovějšími trendy jsou tzv. *prostojobové učení* (downtime learning), jehož cílem je více využít každou volnou chvíli, kdy má člověk své osobní mobilní zařízení u sebe, ke vzdělávacím účelům, a to kdekoliv a kdykoliv (např. při čekání ve frontě, na dopravní prostředek apod., viz [111]–[113]). V souvislosti s prostojobovým učením se dále můžeme setkat s označením *mobilní učení* (m-learning)³⁰ [114] či *všudypřítomné učení* (u-learning, ubiquitous learning), které může být jednoduše vysvětleno jako spojení e-learningu a m-learningu [115], [116]. Kritici těchto fenoménů však upozorňují na některé negativní jevy, jako je např. vzrůstající zájem žáků o neustálou online dostupnost učitele, který si ale chce přirozeně chránit svůj soukromý čas.

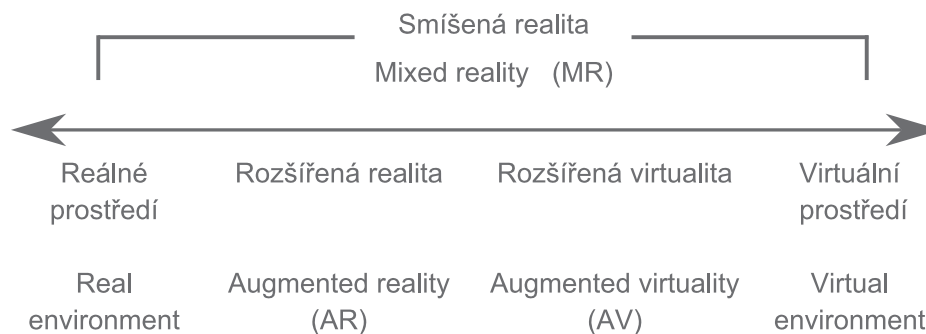
1.7.3 Postupná integrace

Charakteristickým znakem a trendem je též **postupná integrace**, pozorovaná jednak ve využití prostředků, nástrojů, technologií a forem, jednak v uživatelském rozhraní. Integrací různých e-materiálů (e-texty, audio-vizuální zdroje apod.), virtuálních experimentů a reálných vzdáleně řízených experimentů (na jejichž stavbu a provádění byl kladen důraz) vznikl v roce 2009 tzv. **integrováný e-learning (INTe-L)** [1]. Výše uvedené výukové zdroje bývají začleněny do vhodného výukového prostředí (LMS – Learning Management System), které dále nabízí k využívání mj. cloudové úložiště (pro naměřené hodnoty, pro referáty apod.), testy a další komunikační, evaluační, statistické či administrační nástroje. V roce 2017 tuto postupnou integraci završil doc. F. Lustig návrhem a úspěšnou realizací nového typu experimentu **lokálně-vzdáleného (hands-on-remote)**, který umožňuje těžit z výhod všech forem laboratoří: tradičních i vzdálených reálných a díky využívanému připojení k Internetu rovněž virtuálních včetně všech materiálů v e-learningovém prostředí. Podstatou lokálně-vzdáleného experimentu je, že takový experiment postaví učitel nebo žák zpravidla ve škole a že tento experiment je možné řídit jak lokálně, tak současně přes mobilní zařízení vzdáleně (lokálně-vzdálený přístup a řízení, near-remote control). Experiment může zůstat dostupný po skončení výuky přes školní intranet nebo z domova přes Internet (vzdálený přístup a řízení, far-remote control). [18]

Posledním trendem je tzv. **smíšená realita (Mixed Reality, MR)**, jejímž cílem je např. usnadnit studentům orientaci v laboratoři. Za smíšenou realitu lze označit jakoukoliv kombinaci reálného a virtuálního světa, prostředí nebo prvků, která není čistě reálná ani čistě virtuální. Pojem je graficky vysvětlen na obr. 1.8. Reálné prostředí s příměsí virtuálna se nazývá **rozšířená realita** (augmented reality, AR); příkladem může být měření či práce ve skutečné laboratoři, kde se navíc zobrazují virtuální objekty v podobě textové nápovědy, co se na daném místě nachází nebo kam který konektor zapojit, případně vizualizace určitého fyzikálního děje nebo jeho matematických modelů apod. Naopak virtuální prostředí

²⁹Alternativní akronymy „přines si své...“: BYOD – Bring your own device; BYOT – Bring your own technology; BYOP – Bring your own phone; BYOPC – Bring your own personal computer [110].

³⁰M-learning klade důraz na využívání nejrůznějších mobilních zařízení, jako je chytrý telefon, PDA, notebook apod.



Obrázek 1.8: Grafická ilustrace vztahů mezi pojmy *rozšířená realita*, *rozšířená virtualita* a *smíšená realita*. Převzato z [120].

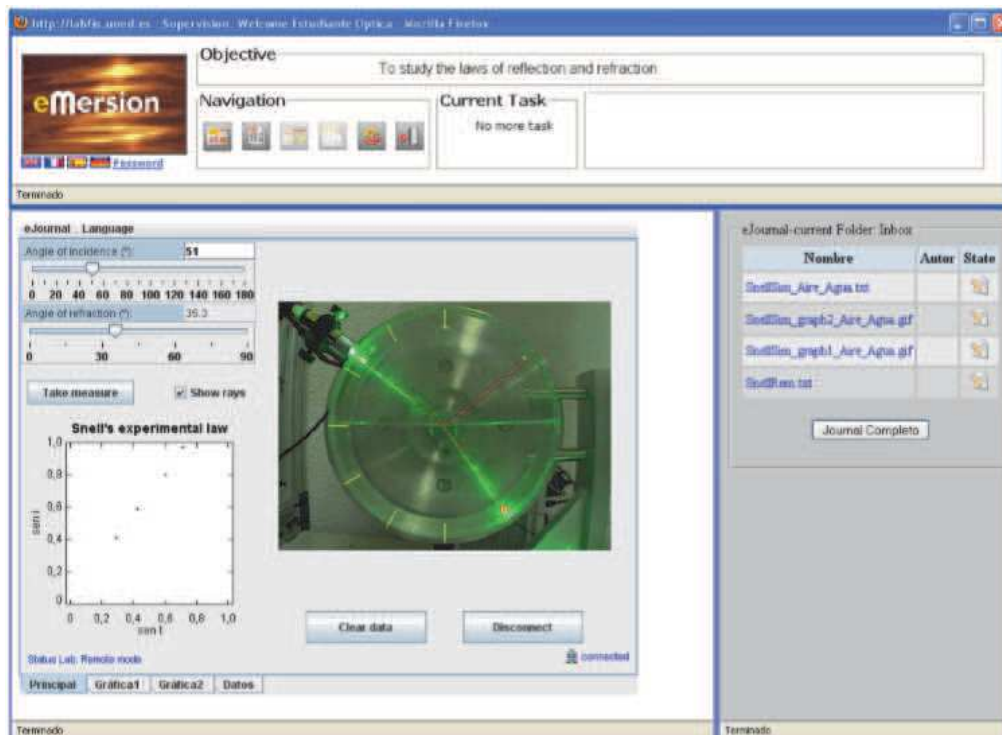
s příměsí reálna se označuje **rozšířená virtualita** (augmented virtuality, AV). Pro ilustraci lze uvést měření v simulovaném prostředí, v němž se však současně objevuje skutečný učitel či spolužáci a mezi všemi zúčastněnými probíhá reálná komunikace. Smíšené realitě se věnují i někteří čeští autoři [119].

K naplnění jednoho z důležitých cílů laboratoří (rozlišování závěrů plynoucích z teorie, resp. z výsledků virtuálního a reálného experimentu) se podařilo **do jednoho uživatelského rozhraní integrovat zobrazení reálných a simulovaných hodnot** pohromadě pro jejich bezprostřední srovnání – viz obr. 1.9 a 1.10.

1.8 Shrnutí současného stavu a východiska pro tuto práci

Poznatky moderní fyziky pronikají do každodenních aplikací (např. CCD čipy využívající vnitřní fotoelektrický jev, lasery, LED zdroje a výbojky, ionizující záření v medicíně, v detektorech požáru atp.) a porozumění jejím základům je považováno za nezbytné. Přesto u výrazného počtu studentů pozorujeme zásadní neznalosti či miskoncepce, např. studenti nerozumějí principu vzniku spekter [147] a fyziku klasifikují jako zajímavý, ale velmi obtížný předmět [123]. Jedno z možných vysvětlení tohoto neporozumění může být omezené nebo zcela chybějící zařazování pokusů do výuky témat moderní fyziky z různých důvodů (materiální vybavení, náročnost finanční či časová – včetně snižování časové dotace pro fyziku, aspekt složitosti přípravy a provádění experimentu). Řešením, které tato práce navrhuje, je vytvoření několika zásadních reálných experimentů z oblasti optiky a kvantové fyziky ovladatelných přes Internet a zasazených do jednoduchého e-learningového prostředí a jejich sdílení přes Internet v otevřené české vzdálené laboratoři www.ises.info. Takové řešení je v souladu s několika body uvedenými v rámcovém vzdělávacím programu pro gymnázia [124].

Jako technologická platforma pro nové vzdálené laboratoře byl vybrán český školní experimentální systém ISES, který obsahuje všechny standardní součásti (řídící a zobrazovací prvky včetně živého obrazu vzdálené fyzikální aparatury a grafického náhledu digitalizovaných experimentálních dat), dále který má ve



Obrázek 1.9: Příklad uživatelského rozhraní španělské vzdálené laboratoře na téma *lom světla (refrakce)*, integrující virtuální a vzdálený reálný experiment, kde je možné bezprostředně porovnat zelené experimentální a červené simulované teoretické hodnoty úhlu lomu paprsku na optickém rozhraní a ověřit tak platnost Snellova zákona v optice. Virtuální ukazatel, který umožňuje odečíst reálně změřené hodnoty úhlů, má oranžovou barvu. [121]

srovnání s ostatními platformami nejvíce výhod a po uživateli nevyžaduje žádné dodatečné instalace softwaru na běžně vybavené PC. Mezi zásadní výhody systému ISES patří zejména **jednoduchý záznam a stažitelnost vlastních experimentálních hodnot** naměřených uživatelem, a to pro jejich následné zpracování např. v běžných tabulkových procesorech. Takové řešení umožní studentům zaměřit se na **vědecké zpracování dat**, zahrnující statistické a pokročilé grafické zpracování hodnot a na diskusi zjištěných výsledků. Grafické a zejména statistické zpracování je ceněná a univerzálně použitelná dovednost i pro ostatní přírodovědné, technické, ale i humanitní obory. Prezentace přesvědčivého grafu, který v referátu umožňuje bezprostřední porovnání vlastních experimentálních hodnot ze vzdáleného experimentu a teoretických hodnot z modelu, dokáže přinést studentovi velké uspokojení, ale i výzvu a poučení. Takové řešení naplňuje všechny body Kellerova motivačního způsobu výuky ARCS³¹ [125], [126]. Dále je navržené řešení v souladu s Harwoodovým modelem pro získání vědeckých informací (2004) – viz obr. 1.11. [4], [127]

³¹Základní pilíře modelu ARCS jsou: Attention – získat pozornost, Relevance – nabýt přesvědčení o významnosti, relevantnosti, Confidence – získat důvěru v technologie, teoretické modely a jejich výstupy, Satisfaction – zažít uspokojení a dobrý pocit z objevu [125].

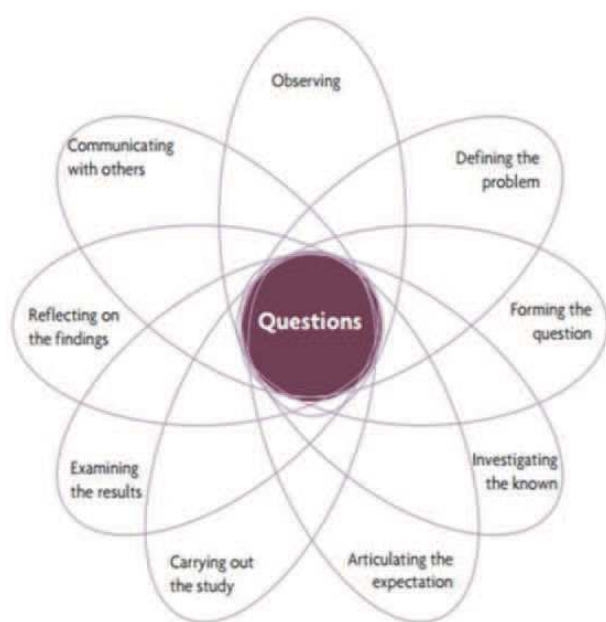


Obrázek 1.10: Pokus o integraci reálných a simulovaných hodnot do jednoho prostředí pro snadné modelování a srovnání v české vzdálené laboratoři (reálná experimentální data lze snadno importovat ze vzdáleného experimentu). Autorem simulačního prostředí „ISES Sim Lab“ byl v r. 2011 student V. Bardiovský. [122]

1.9 Výhody a přidaná hodnota k navrženému řešení nových úloh

Podle [4] a [128] je hypertextový (hypermediální elektronický materiál) v porovnání s klasickou učebnicí snadno inovovatelný (aktualizovatelný) a modifikovatelný, mnohvrstevnatý a snadno integrující více e-zdrojů: reálné vzdálené experimenty, virtuální experimenty (simulace), e-texty a audio-vizuální nahrávky. Dále nabízí možnost náhodně vygenerovat test s okamžitým vyhodnocením a zpětnou vazbou. V neposlední řadě přináší úsporu nákladů na vydání a šetří papír i lesy. Jedná se o zajímavou alternativní formu výuky využívající **moderní technologie** (zejména ve vztahu ke vzdálenému řízení), o nichž by současní žáci a studenti měli *získat alespoň částečné povědomí*. I proto lze očekávat, že se navržená forma výuky využívající vzdálené reálné experimenty stane standardní součástí školního kurikula. (V dnešních běžných aplikacích se setkáváme např. s řízením vytápění anebo zabezpečením nějakého objektu na dálku.)

Je však třeba reagovat na kritiku **laboratoří podle návodu (recipe labs)**, které se týkají tradičních (hands-on) laboratoří a které se v jisté podobnosti přirozeně uplatňují i pro vzdáleně řízené úlohy (web-based instructional design – úkoly pro vzdálený experiment jsou zadány na webové stránce). Žáci či studenti při měření v takové laboratoři obvykle postupují podle návodu s důrazem na jeho svědomité dodržování; přitom se jen malá část žáků spoléhá na vlastní úsudek a vynalézavost. Žáci tedy mohou být v takových laboratořích úspěšní, i když



Questions	Otázky
Observing	Pozorování
Defining the problem	Určení problému
Forming the question	Formulace otázky
Investigating the known	Zkoumání známého
Articulating the expectation	Vyjádření očekávání
Carrying out the study	Realizace zkoumání
Examining the results	Zkoumání výsledků
Reflecting on the findings	Zamyšlení se nad výsl.
Communicating with others	Komunikace s ostatními

Obrázek 1.11: Harwoodův model z roku 2004 pro získání vědeckých informací, který lze podle Ž. Gerhátové realizovat i ve vzdálené laboratoři. Převzato z [4], [127].

nerozumějí tomu, co dělají, a jsou přesytni množstvím informací. [4], [129], [130]

Návrh nových experimentů v rámci této práce by měl **posunout možnosti modifikovatelnosti vzdálené fyzikální aparatury** a zejména principiálně umožnit **naměřit nesmyslné hodnoty**, což by si měl žák či student uvědomit a případně vzdálené měření zopakovat. Svou pozornost by studenti měli **zaměřit na vědecké zpracování vlastních experimentálních dat** a na kvalitní **diskusi získaných výsledků**, postavené nejlépe právě na správném **grafickém či statistickém zpracování**. Díky tomu lze trojúhelníkové schéma strategie integrovaný e-learning, navržené F. Schauerem, M. Ožvoldovou a Ž. Gerhátovou [4], rozšířit na čtyřúhelník – viz obr. 1.12. Základní oporou jsou snadno aktualizovatelné a modifikovatelné e-materiály (obsahující motivaci, potřebnou teorii a návody pro úspěšné zvládnutí vlastní praktické části). Hlavním pilířem studia fyziky má být experiment: nejprve pro nejjednodušší témata tradiční (hands-on), následně vzdálený experiment s aplikací a demonstrací moderních technologií a případně virtuální experiment (aplet, simulace), a to vše k postupnému vybudování důvěry u školáků. Vyvrcholením učení má být *pokus o vědecké zpracování vlastních experimentálně změřených hodnot*³² **diskuse a prezentace výsledků založená na grafickém a statistickém zpracování a na kritickém myšlení.**

Cílem výzkumné části této práce má být v souladu se zadáním pilotní ověření vzdáleně řízených experimentů. Bude proto užitečné získat a popsat zkušenosti jak s tradičním konstrukčním výzkumem, tak s analýzou logů aktivity uživatelů

³²Je možné zpracování hodnot z libovolné formy experimentu – simulace zejména zůstává v záloze pro případ technického problému při reálném měření.

vzdáleně připojených k experimentu, která se v tomto případě nabízí a která bude pro vzdálené experimenty na platformě ISES/Java první svého druhu.



Obrázek 1.12: Znázornění strategie výuky integrovaný e-learning (INTe-L) podle F. Schauera, M. Ožvoldové a Ž. Gerhátové (2010) jako trojúhelník vlevo a podle P. Broma (2010–2018) jako obdélník vpravo, který zdůrazňuje, že studenti poznávají (objevují či ověřují) přírodní fyzikální zákony prostřednictvím vědeckého zpracování vlastnoručně naměřených hodnot. Most zde odpovídá grafu, ve kterém jsou společně uvedeny výsledky měření a modelová funkce a který tedy propojuje teorii a praxi. Zpracování a vyhodnocení výsledků bez důrazu zde prezentovaného zmiňují již Ž. Gerhátová aj. [4]

2. Návrh a stavba nových vzdálených experimentů

2.1 Témata a cíle nových experimentů

Díky přiděleným vývojově-výzkumným grantům od Grantové agentury Univerzity Karlovy (GAUK), Fondu rozvoje vysokých škol (FRVŠ) a Nadace ČEZ bylo možné českou vzdálenou laboratoř na UK MFF rozšířit o čtyři nové vzdáleně řízené úlohy, které jsou podrobně popsány v této kapitole.

2.1.1 Nové laboratoře pro výuku zákonů a jevů z optiky

První vzdálený experiment na téma **radioaktivita**, resp. **ověření základních způsobů ochrany člověka před ionizujícím zářením** může být využit jednak pro úvod do vzdáleně řízených laboratoří, jednak pro úvod do statistického zpracování experimentálních hodnot. V tomto případě si každý žák na ZŠ či student SŠ/VŠ může provést vzdálenou úlohu samostatně a není třeba se obávat kopírování cizích referátů z měření, protože každý uživatel naměří a zpracuje odlišná náhodná data. Důležitým cílem pro žáky má být díky této úloze pochopit obecný význam statistiky pro zpracování fyzikálních měření. Přestože u ionizujícího záření lze za dominantní považovat již částicový charakter záření gama na úkor vlnového charakteru elektromagnetického záření, lze díky této úloze demonstrovat a ověřit platnost zákonů z vlnové optiky, a to **zákon převrácených čtverců** v závislosti intenzity záření na vzdálenosti od zdroje či **Lambertův-Beerův zákon** popisující exponenciální pokles počtu γ -fotonů prošlých stínícím materiálem v závislosti na jeho tloušťce. Součástí úlohy je měření přírodního radiačního pozadí, na němž lze ověřit konstantní úroveň v čase a které lze využít např. k ověření **Poissonova rozdělení** popisujícího řídké jevy. Studenti si mohou vyzkoušet pokročilé grafické zpracování vlastních experimentálních hodnot s různými modelovými funkcemi.

Druhý vzdálený experiment na téma **polarizace světla** přináší možnost prostřednictvím měření identifikovat a rozlišit různé druhy světla (příp. jejich zdrojů) z hlediska polarizace, dále demonstrovat vliv některých optických prvků¹ pomocí nichž lze polarizační stav světla měnit, a v rámci grafického zpracování ověřit platnost **Malusova zákona** pro intenzitu světla prošlého skrz dvojici polarizátorů a efekt tzv. zkřížených polarizátorů. Studenti dostanou příležitost k aplikaci pokročilého grafického zpracování s méně obvyklou modelovou funkcí, s níž jsou spojeny jisté problémy (podrobněji v podkapitole [2.3.4](#) *Očekávané výstupy* na str. [64](#)). V rámci vzdálené úlohy lze studentům a zájemcům poskytnout všechny studijní materiály, které jsou součástí strategie výuky integrovaný e-learning, a to jak pro výklad, tak pro motivaci a pochopení důležitého tématu z vlnové optiky, které má řadu významných aplikací. Z hlediska technologie vzdálených laboratoří může tato úloha demonstrovat širší možnosti modifikovatelnosti vzdáleně řízené aparatury.

¹Zejména polarizátor, ale i běžně nedostupné fázové destičky, které mohou být efektivně sdílené prostřednictvím otevřené vzdálené laboratoře.

2.1.2 Nové laboratoře pro úvod do kvantové fyziky

Další dvě vzdálené úlohy představují významné **historické pokusy** v dějinách fyziky, které přispěly ke zrodu kvantové fyziky: vnější fotoelektrický jev (vnější fotoefekt) a vznik spekter. Obě nové laboratoře mohou kromě demonstrace zmíněných přírodních jevů a studia jejich vlastností naplňovat další fyzikálně vzdělávací a jiné cíle.

Třetí nová úloha na **vnější fotoefekt**, kde je cílem proměření závislosti tzv. brzdného napětí na frekvenci elektromagnetického záření dopadajícího na fotokatodu, vyžaduje aplikaci pokročilého grafického zpracování k ověření platnosti **Einsteinovy rovnice pro vnější fotoefekt** a současně k určení experimentální hodnoty jedné fundamentální přírodní konstanty h (**Planckovy konstanty**) a jedné materiálové charakteristiky (tradičně označované „výstupní práce“). Dále může být tato úloha využita pro uvedení studentů do problematiky šumu ve fyzikálním měření, kdy se měří maličké fotoproudy v řádu pikoampérů až mikroampérů, jednak do práce s chybou měření. Z hlediska technologie vzdáleně řízených laboratoří měla tato úloha za cíl demonstrovat modifikovatelnost zapojení obvodu s využitím desky s 16 relé a realizovat na jedné aparatuře dvě standardní metody experimentálního studia vnějšího fotoefektu² z nichž si mohou studenti či učitelé vybírat.

Nová vzdálená úloha na vnější fotoelektrický jev dále reaguje na kritizované laboratoře podle návodu [129], [130]. Tento vzdáleně řízený experiment byl navržen tak, aby umožnil naměřit i nesmyslné či nerelevantní hodnoty a přiměl studenty ke kritickému myšlení a kritickému zhodnocení naměřených hodnot a zjištěných výsledků.

Čtvrtý nový vzdálený experiment na téma **studium a vznik spekter** ilustruje společně s předchozím smysluplnost počítačem řízeného experimentu, jenž využívá webkameru, resp. vhodný detektor, které jsou citlivější na širší obor vlnových délek než lidské oko. Díky tomu lze zvýšit počet pozorovaných a naměřených spektrálních čar než při tradičním provádění pokusu a kvalitativně ověřit fakt, že **v rámci série intenzita čar klesá s rostoucí frekvencí a energií fotonů**. Navíc je řešen problém s bezpečností, kdy je pro napájení Geisslerových trubic nevyhnutelné použít vysoké napětí. Počítač je i v tomto případě efektivně využit k analýze experimentálních hodnot a zejména k ověření platnosti **Ritzova-Rydbergova kombinačního principu**, kterým lze vznik spekter snadno vysvětlit.

2.1.3 Struktura popisu nových vzdálených laboratoří

Na začátku každé podkapitoly je popsán výchozí stav včetně zmínění, popisu a případného hodnocení jiných otevřených vzdálených laboratoří či simulací k danému tématu. Následně je uvedena motivace pro stavbu nového vzdáleně řízeného experimentu pro naši laboratoř www.ises.info včetně komentáře přidané hodnoty a zdůvodnění zamýšlené odlišnosti od jiných laboratoří.

²Standardní metody ke studiu vnějšího fotoelektrického jevu jsou: nabíjení kondenzátoru na brzdné napětí a zpracování voltampérové (VA) charakteristiky vakuové fototanky. Obě metody jsou detailně a názorně vysvětleny ve studijním e-textu k úloze: <http://www.ises.info/index.php/cs/laboratory/experiment/photoelectric-effect-VA>

Další část *Návrh a stavba...* obsahuje stručně komentovaný návrh a stavbu nové vzdáleně řízené fyzikální aparatury včetně ukázky a popisu řídicí webové stránky, přičemž je snaha dodržet jednotný styl s ostatními staršími vzdálenými experimenty dostupnými na www.ises.info. Zvolené řešení je zde podle potřeby podrobněji odůvodněno.

V následující části *Metodika použití...* jsou nastíněny možné způsoby využití nového vzdáleného experimentu ve výuce a je zde zmíněna nezbytná teorie, ze které jsou uvedeny především potřebné modelové funkce pro navazující zpracování dat. Autor předpokládá, že čtenáři je veškerá podrobná teorie a fyzikální podstata jednotlivých fyzikálních jevů dostatečně známa, proto úplný výklad teorie tato práce neobsahuje; v případně potřeby je čtenář odkázán na e-texty k jednotlivým úlohám, dostupné na www.ises.info.

V poslední části *Očekávané výstupy...* je předvedeno ukázkové **grafické či statistické zpracování experimentálních hodnot** z jednotlivých vzdálených úloh (zpravidla s použitím různého a dobře dostupného softwaru), které ilustruje možnosti i metodiku využití vytvořených vzdálených experimentů ve výuce. Jako dobře dostupný software byl použit jednak tabulkový procesor MS Excel, který je součástí kancelářského balíku Microsoft Office a který je běžně nainstalován na školních i domácích PC. Rovnocennou alternativou by bylo použití neplaceného tabulkového procesoru „Calc“ ve svobodném kancelářském balíku „Open Office“ či „Libre Office“ apod. Vědecké zpracování experimentálních hodnot je předvedeno ve freewaru **gnuplot**, vytvořeném v akademickém prostředí pro účely výuky i vědeckého výzkumu, který lze zdarma stáhnout ze stránek www.gnuplot.info a který se ovládá z příkazového řádku [131]. Základní příkazy a práce s programem **gnuplot** je podrobněji popsána v příloze A od str. [141]. Pro grafické zpracování lze samozřejmě použít i jiný komerční či svobodný software.

Snahou autora bylo především komentovat obtížné části a podrobně interpretovat výsledky zjištěné jak měřením, tak jeho zpracováním.

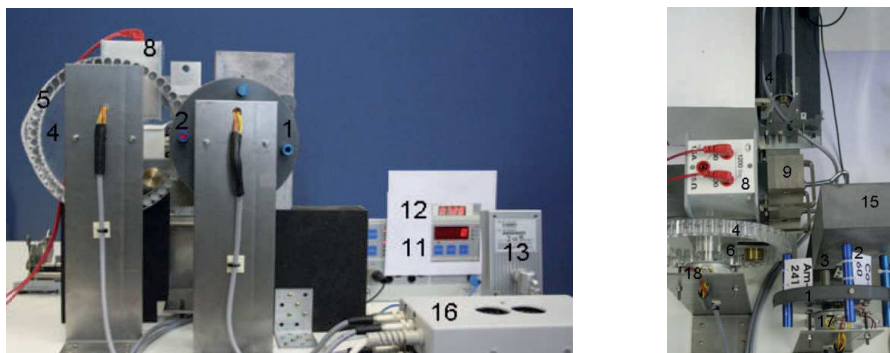
2.2 Studium radioaktivity

2.2.1 Existující vzdálené laboratoře k tématu *radioaktivita*

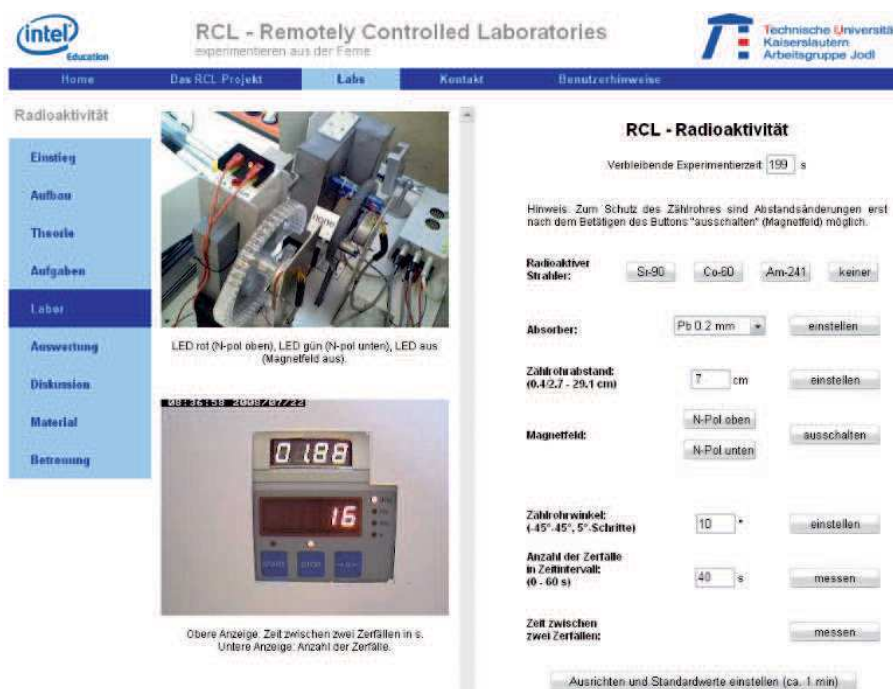
Před tvorbou nového vzdáleně řízeného experimentu pro českou vzdálenou laboratoř na UK MFF mohli uživatelé např. od roku 2006 provádět měření v německé vzdálené laboratoři www.remote-lab.de [46], která umožňovala zkoumat a měřit velký počet různých konfigurací – viz obr. 2.1. Prvním karuselem bylo možné vybrat jeden ze tří zářičů (241-Am jako zdroj částic alfa, 90-Sr jako zdroj záření beta a 60-Co jako zdroj záření gama). Čtvrtá pozice byla prázdná, např. pro účely měření pozadí. Druhým karuselem bylo možné vybrat absorbátor, a to z celkem 46 variant lišících se materiálem (olovo, hliník, železo, nerez a PVC) a s rozdílnými tloušťkami v rozsahu 0,1–9,0 mm. Dále bylo možné nastavit vzdálenost detektoru až do 30 cm, resp. zapnout elektromagnet, jehož magnetické pole ovlivňuje dráhu elektricky nabitých částic (tzn. pouze alfa a beta). K tomu bylo možné nastavit poziční úhel detektoru a zkoumat hustotu rozdělení částic v závislosti na směru letu z magnetického pole, což dále umožňuje ze zakřivení dráhy měřit energii částic. Po nastavení doby měření (max. 60 s) uživatel stisknutím tlačítka nakonec měření spustil a po jeho skončení si musel počet detekovaných částic poznamenat ručně, protože údaj se zobrazoval na displeji, který společně s aparaturou snímala webkamera – viz obr. 2.2 [132].

Dále je na téma radioaktivita na portálu www.golabz.eu k dispozici vzdálený experiment provozovaný Univerzitou v Queenslandu v Austrálii [133]. Ukázka jeho řídicí stránky a náhled aparatury je na obr. 2.3 na str. 38. Uživatel si může vybrat ze tří zářičů („Source“: 60-Co, 90-Sr, 241-Am a žádný zářič – měření pozadí), měnit vzdálenost G-M detektoru od zářiče v rozmezí 15–95 mm („Distance“), nastavit dobu („Duration“) a počet opakování („Trials“) každého měření v rozsazích 1–10 sekund a 1–10× a v případě studia stínících účinků zkoumat vliv různých materiálů s rozdílnými tloušťkami včetně neznámé tloušťky („Absorbers“: žádný, resp. vzduch, papír, hliníkový či olověný list, vrstva hliníkových fólií o celkovém počtu fólií 2^k , $k \in \{0; 1; 2; \dots; 6\}$, tedy počtu v rozsahu 1–64 ks fólie a nakonec silnější hliníkový a olověný disk). Po stisknutí tlačítka „Start Experiment“ je uživatelské nastavení odesláno na server, server po určité době čekání přidělí vzdálenému měření identifikační číslo a plně automaticky provede kompletní měření podle nastavení. Na řídicí webové stránce je zobrazen postup měření a zbývající čas. Náhled z webkamery překvapivě není součástí řídicí webové stránky; pro živý obraz vzdálené aparatury musí uživatel přepnout záložku „Webcam“ v horním menu, čímž se australský experiment liší od ostatních laboratoří. Po skončení měření lze naměřené počty částic ionizujícího záření stáhnout jako *hodnoty oddělené středníkem*³ (CSV soubor – Coma Separated Values) a výsledky jsou uživateli též zobrazeny graficky – viz obr. 2.4 na str. 38. [133]

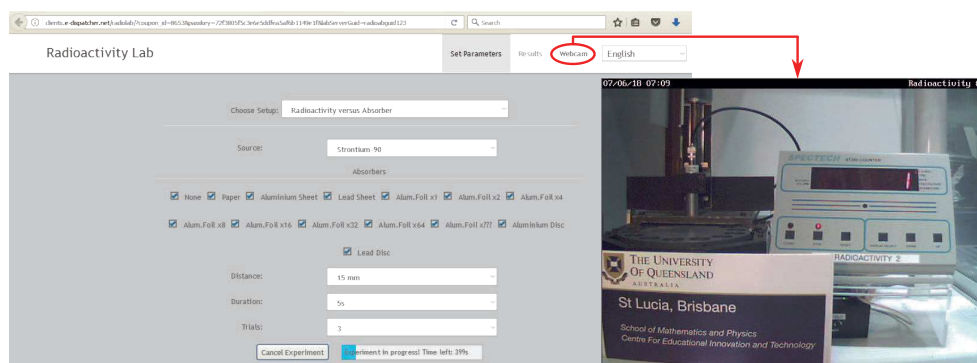
³Podle informací na stránce www.golabz.eu, avšak P. Bromovi se odkaz či tlačítko ke stažení hodnot na stránce nepodařilo najít! V grafickém náhledu se bohužel číselně nezobrazují všechny naměřené hodnoty.



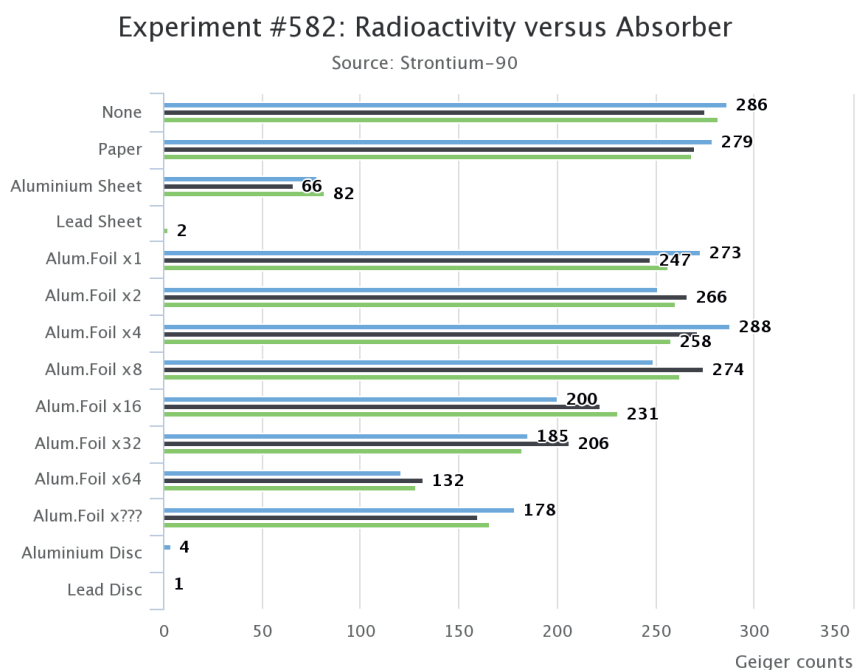
Obrázek 2.1: Studium radioaktivity v německé vzdálené laboratoři – pohled na aparaturu vzdáleně řízeného experimentu zepředu a shora. Karusel se zdroji záření α , β^- a γ (1); tyče se zářiči v karuselu (2); prázdná pozice (3); karusel se 46 absorpčními materiály (4) a vzorky (5); elektromagnet (8) s jádrem (9); Geigerova-Müllerova trubice (10); čítač částic (11); displej zobrazující hodnotu, kterou si uživatel musí ručně opsat (12); webkamera (13); stínění z olova (15); rozhraní (16) a krokové motory obou karuselů (17), (18). Převzato z [132].



Obrázek 2.2: Studium radioaktivity v německé vzdálené laboratoři – řídicí webová stránka vzdáleně řízeného experimentu. Uživatel si může vybrat jeden ze tří zářičů nebo prázdnou pozici k proměření pozadí, absorbátor, dále nastavit vzdálenost GM detektoru, orientaci magnetického pole (nebo jej vypnout), poziční úhel detektoru ke studiu vychýlení částic prošlých magnetickým polem a dobu měření. Po nastavení parametrů výše tlačítkem „Ausrichten/Einstellen“, což trvá asi 1 minutu, se měření spustí tlačítkem „messen“ [132].



Obrázek 2.3: Vzdálený experiment *Radioaktivita* poskytovaný Univerzitou v Queenslandu na portálu Go-Lab. Vlevo řídicí webová stránka pro výběr požadovaných měření a nastavení parametrů (rozbalovací nabídka či zaškrtnutí). Po odeslání nastavení je vzdálenému měření přiděleno identifikační číslo, měření provede server automaticky a přitom informuje o zbývající době měření – viz vlevo dole. Pohled z webkamery není přímou integrovanou součástí řídicí stránky, pro živý obraz aparatury (vpravo) musí uživatel přepnout na záložku „Webcam“ v horním menu, vyznačenou červeně. [133]



Obrázek 2.4: Vzdálený experiment *Radioaktivita* poskytovaný Univerzitou v Queenslandu na portálu Go-Lab – grafický náhled změřených hodnot. Plně automatizované měření, kdy měření každé kombinace bylo opakováno třikrát, trvalo asi 8 minut. [133]

2.2.2 Výchozí stav a motivace pro stavbu vzdáleného experimentu

Pro tradiční školní laboratoře např. se soupravou GAMABETA je povoleno používat jen slabé zdroje ionizujícího záření. Kvůli tomu bývá měření zdlouhavé, jednotvárné a nudné. Ve vzdálené laboratoři je možné používat **silnější zdroje** a zkrátit tak dobu měření. Jelikož měřicí server běží nepřetržitě, je možné jej využít k **dlouhodobému automatickému měření** za účelem získat *rozsáhlý výběrový soubor*, na kterém lze kromě vlastních studovaných fyzikálních jevů demonstrovat **základní poznatky ze statistiky**.

Cílem projektu v české vzdálené laboratoři, podpořeného grantem Nadace ČEZ č. STE 07_11⁴ bylo poskytnout uživatelům příležitost ověřit **základní způsoby ochrany člověka před ionizujícím zářením**, tzn. zkrácením doby expozice, vzdáleností od zdroje ionizujícího záření a stíněním. Narozdíl od německého vzdáleného experimentu je zde upřednostněn nižší počet kombinací experimentálního uspořádání, který přispívá ke zkrácení celkové doby vzdáleného měření a umožňuje přímé zaměření pozornosti na zkoumání základních fyzikálních závislostí, popsanych v teorii, resp. odvozených ve vytvořeném studijním e-textu intuitivně na středoškolské úrovni.

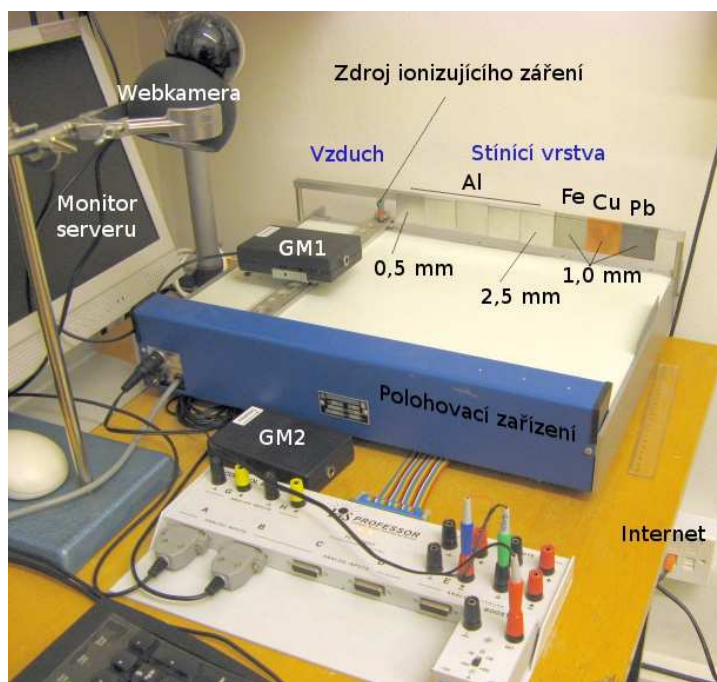
2.2.3 Návrh a realizace vzdáleného experimentu

Původní měřicí aparatura využívala analogový X-Y zapisovač - viz obr. 2.5. Avšak jeho chod nebyl hladký a bezproblémový, proto autor navrhnul robustní řešení postavené na kazetovém systému CS-12⁵ a krokových motorech řízených digitální elektronikou. Díky tomuto řešení je zajištěna **dlouhodobě spolehlivá reprodukovatelnost všech poloh** a minimální potřeba údržby. P. Brom navrhnul a sestavil řídicí elektroniku využívající kvalitní průmyslové komponenty pro nepřetržitý provoz (řídicí karty pro krokové motory CD20/30M od fy Microcon, s.r.o.) a optické závory podle vlastního řešení - viz obr. 2.6. Aparatura využívá nově vyvinutý silnější **školní demonstrační zdroj záření** (DZZ) s Americiem 241, aktivitou 300 kBq a energií fotonů γ 60 keV (záření α je odstíněno plastovým krytem hlavičky z výroby), díky němuž lze zkrátit dobu měření např. ve prospěch získání rozsáhlejšího statistického souboru, případně zařadit experiment do výukové hodiny. Pro efektivní zařazení experimentu do výuky bylo přidáno tlačítko automatického proměření dané závislosti: učitel zvolí dobu měření⁶ a po stisknutí

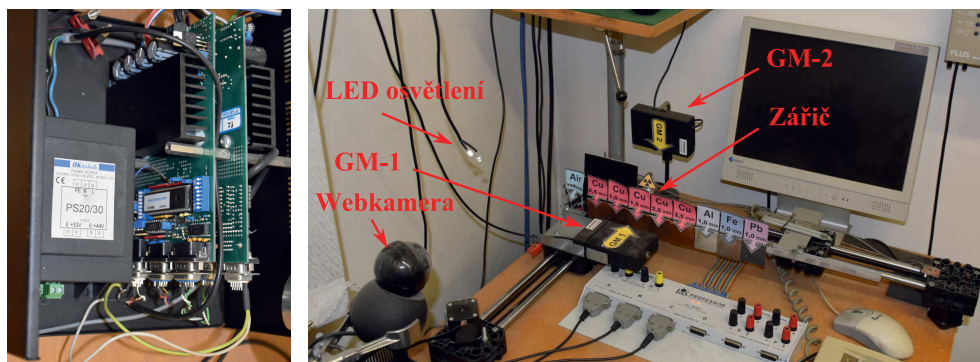
⁴Hlavním řešitelem grantu Nadace ČEZ byl doc. F. Lustig. P. Brom byl autorem nové robustní aparatury, e-textů a navrhnul a formuloval zadání úloh. Pro ověření Lambertova-Beerova zákona bylo původně použito pět hliníkových destiček s tloušťkami v rozsahu 0–2,5 mm (viz obr. 2.5 na str. 40).

⁵Cassette System CS-12 obsahuje univerzální dvoudílné kazety, což jsou plastové přesně odlité párové díly, umožňující připojit krokový motor a řemenici pro standardní ozubený řemen T2.5 šířky 6 mm, dále broušené tyče s průměrem 12 mm, které jsou využity jednak pro zpevnění aparatury, jednak jako dráha pro posuvný vozík jezdící po třech lineárních kuličkových ložiscích; kazety se dají spojovat vzájemně pomocí šroubů a umožňují jednoduše upevnit další přípravky nezbytné pro experiment, a to včetně optické závory sloužící k počáteční či průběžné kalibraci pozice - viz nabídka dodavatele <https://cnc.inshop.cz/kazetovy-system2/>.)

⁶Pro nastavenou délku každého měření 10 s trvá kompletní automatické proměření závislosti necelých 5 minut, pro délku jednotlivých měření 30 s je celková doba do 14 minut a s 60s měřeními je proměření závislosti dokončeno za 27 minut plus cca 20 s na změny konfigurace.



Obrázek 2.5: Původní vzdáleně řízená aparatura k úloze *Studium radioaktivity* v české vzdálené laboratoři využívající analogový X-Y zapisovač.

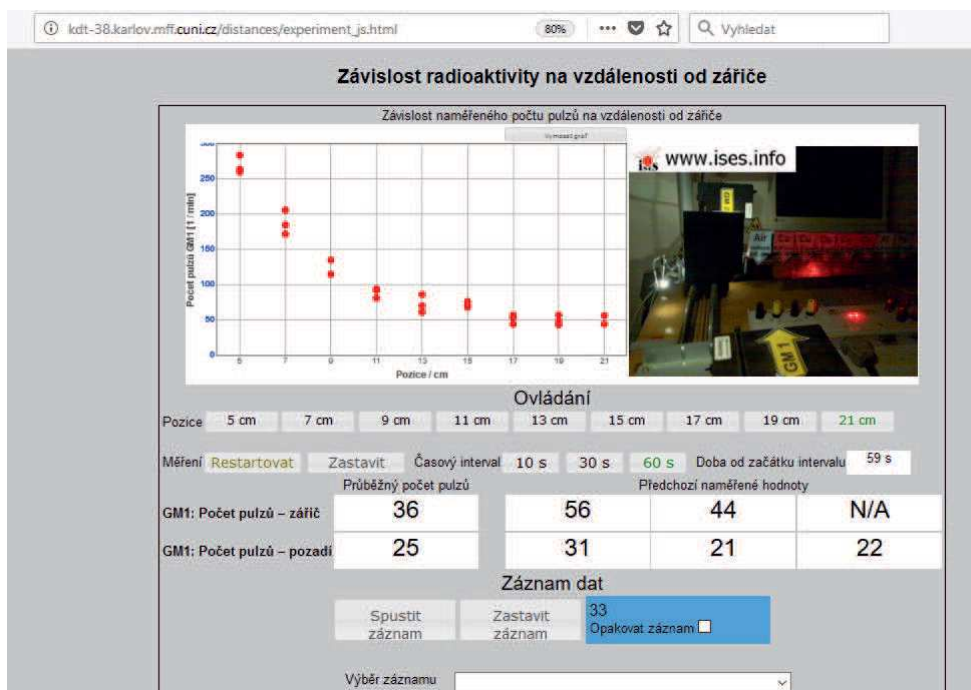


Obrázek 2.6: Nová robustní vzdáleně řízená aparatura k úloze *Studium radioaktivity* v české vzdálené laboratoři navržená a postavená autorem. Vlevo detail průmyslových řídicích karet pro krokové motory, vpravo pohled na mechaniku a další komponenty (dva G-M čítače, zdroj záření označený standardním symbolem, panel ISES Professional aj.). Aparatura musí být v noci pro webkameru nasvícena pomocí LED.

tlačítka START bude každý bod experimentální závislosti proměřen třikrát, což stačí k orientačnímu odhadu úrovně i variability – viz obr. 2.7. Na jejich základě lze učinit alespoň kvalitativní závěry k účinnosti příslušného způsobu ochrany před ionizujícím zářením.

Na jedné vzdáleně řízené experimentální aparatuře lze realizovat čtyři různé laboratoře:

V automatickém provedení se měření každého z devíti možných bodů opakuje třikrát.



Obrázek 2.7: Řídicí webová stránka vzdáleného experimentu pro ověření ochrany vzdáleností. Graf poskytuje náhled výsledků z automaticky provedeného měření.

1. Studium přírodního radiačního pozadí – ověření konstantnosti⁷ popisných statistik (aritm. průměru a směrodatné odchylky) v čase a ověření Poissonova rozdělení.
2. Ochrana vzdáleností – úbytek počtu detekovaných částic s rostoucí vzdáleností od zářiče.
3. Ochrana stíněním – úbytek počtu detekovaných částic s rostoucí tloušťkou stínící vrstvy a doplňkově porovnání stínících účinků různých materiálů při stejné tloušťce.
4. Stažení hodnot z dlouhodobého automatického měření – uživatel si vybere období a požadovanou závislost⁸.

Každá varianta má svou vlastní řídicí webovou stránku, která obsahuje pouze nezbytně nutné ovládací a zobrazovací prvky – některé jsou společné, jako např. nastavení doby každého měření (na výběr: 10 s; 30 s; 60 s), tlačítka „Start“ pro spuštění měření, případně „Stop“ pro ukončení měření, rovněž jsou společná tlačítka pro záznam, výběr a stažení naměřených hodnot. Liší se tlačítka pro nastavení proměnného parametru podle typu zkoumané závislosti, tzn. buď nastavení pevných vzdáleností detektoru GM-1 od zářiče v rozsahu 5–21 cm, anebo výběr různých stínících destiček s rozdílnými tloušťkami v rozmezí 0–2,5 mm

⁷Při poločasu přeměny ^{241}Am cca 433 let zatím nelze pozorovat exponenciální pokles aktivity zářiče, avšak za několik let by se mohl projevit pokles účinnosti G-M trubice, který je rovněž exponenciální funkcí času.

⁸Délkou období i volbou filtru je určen rozsah výběrového souboru nadále značený N .

s krokem 0,5 mm (materiálem je měď), případně různých materiálů při stejné tloušťce 1,0 mm (vzduch, měď, hliník, nerez, olovo). Tyto nové laboratoře jsou vhodně doplněny starším vzdáleným monitoringem přírodního pozadí v různých místech Evropy⁹ jehož úroveň je možné porovnávat. Doc. F. Lustig zde dokonce pozoroval rychlost šíření nepatrného radioaktivního spadu mezi evropskými státy po incidentu v jaderné elektrárně Fukušima dne 11. 3. 2011 [134]. Všechny výše zmíněné nové úlohy jsou přístupné z hlavního rozcestníku:

http://kdt-38.karlov.mff.cuni.cz/choice_cz.html.

2.2.4 Metodika použití, cíle a možné úkoly pro vzdálené měření

Vzdálenou úlohu ke studiu radioaktivity lze využít k několika důležitým účelům a její zařazení do výuky lze vhodným způsobem zkombinovat s lokální demonstrací radioaktivity, pokud je škola vybavena nějakým zdrojem ionizujícího záření a detektorem. Bez pochyby zde existuje větší počet možných scénářů a vhodných postupů, které závisejí na rozhodnutí učitele, na vybavení školy, na časové dotaci i zájmu žáků. Následující výčet možností představuje jeden z návrhů postupu a předpokládá, že učitel nemá k dispozici G-M detektor či nový detektor MX-10 [135] ani žádný školní či přírodní zdroj záření a chce tématu věnovat 1–2 hodiny.

Obvyklým začátkem je burza nápadů (brainstorming), co se žákům vybaví, když se řekne *radioaktivita*. Nato lze navázat diskusí bezpečnostních rizik a praktických způsobů ochrany člověka před ionizujícím zářením. Po zmínce ochrany vzdáleností nebo stíněním se může učitel okamžitě přihlásit k danému vzdálenému experimentu (je-li volný nebo má-li rezervovaný čas¹⁰), pro vyšší interaktivitu a věrohodnost může tlačítkem nastavit polohu, kterou si žáci sami zvolí, dále nastavit dobu každého měření 10 s a spustit automatické proměření dané závislosti tlačítkem na stránce zcela dole; to bude v takovém případě dokončeno do 5 minut. (Případně může stisknout tlačítko pro start záznamu naměřených hodnot.) Během automatického měření by se měl s žáky věnovat všem následujícím tématům ve vhodném pořadí (viz též náhled kompletní řídicí stránky na obr. 2.8 na str. 45):

1. Popis aparatury, která využívá: školní zdroj záření označený standardním žluto-černým symbolem, G-M čítač jako detektor včetně vysvětlení jeho funkce, která vyžaduje vysoké napětí, a základní uspořádání experimentu (vozik čítače GM-1, který mění vzdálenost detektoru od zářiče, příp. druhý vozík, který mezi zářič a detektor vkládá různé stínící materiály). S použitým zářičem (Americium-241, aktivita 300 kBq, energie γ -fotonů 60 keV) k rychlé demonstraci stačí nastavit délku každého měření 10 s.

⁹Přírodní radiační pozadí je monitorováno v těchto městech: Praha, Olomouc, Brno, Benešov, Nitra; Trnava (do r. 2016) a Sofie (do r. 2015).

¹⁰Pokud není experiment volný, lze se přihlásit na stránku pro stažení naměřených hodnot z dlouhodobého měření, a tyto hodnoty zpracovat - viz další odstavce v této podkapitole a ukázka zpracování na obr. 2.8, 2.12 či 2.15 & 2.16. Žáci si přitom mohou zvolit počáteční datum (některý žák např. zvolí den, jiný určí měsíc a třetí rok). Pro případ nečekaného výpadku serveru lze doporučit si nějaký výběr stáhnout předem a připravit si jeho zpracování např. v programu MS Excel. V případě funkčnosti serveru lze namísto předem stažených dat snadno vložit jiná data a Excel výsledky okamžitě přepočítá – kvalitativní závěry by přitom měly zůstat stejné.

2. Popis dalších prvků na řídicí webové stránce: Zobrazuje se historie tří posledních měření, a to ze dvou identických G-M čítačů. Je vhodné aktivizovat žáky otázkou, proč se používají dva detektory – jeden pohyblivý (**GM-1**) a druhý pevný (**GM-2**), a tím uvést existenci **přírodního radiačního pozadí**, které má původ v kosmickém záření i v radioaktivních přeměnách v zemské kůře. Na toto přirozené pozadí jsou organismy na zeměkouli zvyklé. V grafu se zobrazuje náhled všech naměřených počtů částic pouze ze zkoumané závislosti, bez hodnot pozadí, a to od okamžiku stisknutí tlačítka „Start“.
3. První naměřené hodnoty zřejmě vykazují nějaký **rozptyl**, čímž lze uvést problematiku s charakterem radioaktivní přeměny jakožto **náhodného jevu**.
Opět lze žáky aktivizovat otázkou, *jak lze učinit na základě měření závěry, když pokaždé naměříme jinou hodnotu?* Žáci by v tomto kroku měli pochopit, že pro formulaci kvalitativních závěrů je potřeba každé měření náhodného jevu **několikrát zopakovat** (v automatickém proměření se pro úsporu času opakuje pouze 3×) a hodnoty statisticky zpracovat. Učitel připomene vztah pro výpočet **aritmetického průměru** a zdůrazní, že veškeré závěry nečiníme pro jednotlivá vybraná měření, ale právě pro průměrné hodnoty z většího počtu měření¹¹. Průměry popisují typickou úroveň s určitou chybou, kterou lze odhadnout nejlépe pomocí výběrové směrodatné odchylky¹², jejíž vztah učitel rovněž připomene¹³.
4. Podle časové dotace na téma *radioaktivita* lze dále ukázat druhou závislost a diskutovat a komentovat účinnost jednotlivých způsobů ochrany člověka před ionizujícím zářením např. takto: Základní způsoby jsou minimalizace doby vystavení se účinkům škodlivého záření a zdržování se v co možná největší vzdálenosti od silnějšího zdroje, což můžeme obvykle sami ovlivnit; nemáme-li takovou možnost¹⁴, zbývá třetí účinný způsob ochrany stíněním, který je závislý na tloušťce stínící vrstvy. Na základě srovnávacího měření je nejlepším stínícím materiálem olovo – v tomto případě je výsledek měření na úrovni přírodního pozadí.
5. V rámci hodiny a podle dalších potřeb lze žáky podrobněji seznámit se způsobem ovládání vzdálených laboratoří www.ises.info a případně jim předvést statistické a grafické zpracování v některém tabulkovém procesoru (např.

¹¹Později na VŠ se studenti dozvědí, že průměr je nejjednodušším *bodovým odhadem* neznámé střední hodnoty v základním souboru.

¹²Výběrová směrodatná odchylka neboli směrodatná odchylka výběrového souboru je na kalkulačce nejčastěji značena s_X (sample – výběrový soubor), $X_{\sigma_{n-1}}$, s' apod. Na VŠ se studenti dozvědí, že se jedná o nevychýlený odhad variability nějaké proměnné X na základě výběru ze základního souboru. Je proto vhodné každý výsledek statistického zpracování uvádět ve formě $(\overline{\{X\}} \pm s'_X) \cdot [X]$, kde pruh „ $\overline{\{X\}}$ “ značí aritmetický průměr z naměřené číselné velikosti „ $\{ \dots \}$ “ nějaké veličiny X , „ s'_X “ výběrovou směrodatnou odchylku a „ $[\dots]$ “ správnou jednotku.

¹³Žáci by měli pochopit význam statistiky a jejích základních pojmů včetně použití. Na větším výběrovém souboru lze snadno např. demonstrovat konvergenci aritmetických průměrů k očekávané hladké závislosti a zmenšování směrodatné chyby – viz ukázky zpracování na obr.

2.8 | 2.16 na str. 45 | 55

¹⁴Např. při lékařské diagnostice nás může lékař vyzvat k oblečení těžké vesty s olověnými pláty, která bude během ozáření chránit ostatní důležité orgány v našem těle.

programy „MS Excel“ nebo „Open Office Calc“). Pro statistické zpracování lze využít automaticky naměřené hodnoty přímo z vyučovací hodiny nebo z dlouhodobého měření – učitel by měl tedy podle potřeby předvést způsob záznamu měření (zaznamenávají se všechny hodnoty od okamžiku stisku tlačítka „Start záznamu“ do stisknutí tlačítka „Stop záznamu“), jednoduché stažení hodnot po výběru záznamu či období pomocí tlačítka „Export jako HTML tabulka“ i jejich vložení do tabulkového procesoru pomocí standardních klávesových zkratk **Ctrl+A** (All – označit všechny hodnoty po kliknutí v nově otevřeném okně s naměřenými hodnotami¹⁵), **Ctrl+C** (Copy – zkopírovat do schránky) a **Ctrl+V** (Vložit na místo aktivní buňky¹⁶).

6. Do další hodiny si mohou žáci zkusit provést vzdálené měření a zejména vyzkoušet si statistické zpracování. Každý žák si může zpracovat vlastní jedinečné hodnoty odlišné od ostatních, což lze snadno zajistit např. nastavením jiného počátečního dne, které může odpovídat např. pořadí žáka nebo které učitel přidělí podle nějakého tajného klíče, aby např. mohl prověřit, že žáci dospěli ke stejným a správným výsledkům, pokud zpracovávali stejné hodnoty. Při další hodině lze žáky upozornit, že přestože každý z nich zpracoval odlišné experimentální hodnoty, průměry jsou již podobné v rámci chyby měření. Pro tento domácí úkol jsou vhodné jak vyhodnocení úrovně pozadí, tak obě studované závislosti (na vzdálenosti i tloušťce stínící vrstvy). Viz též ukázky zpracování na obr. 2.8–2.16 na str. 45–55.

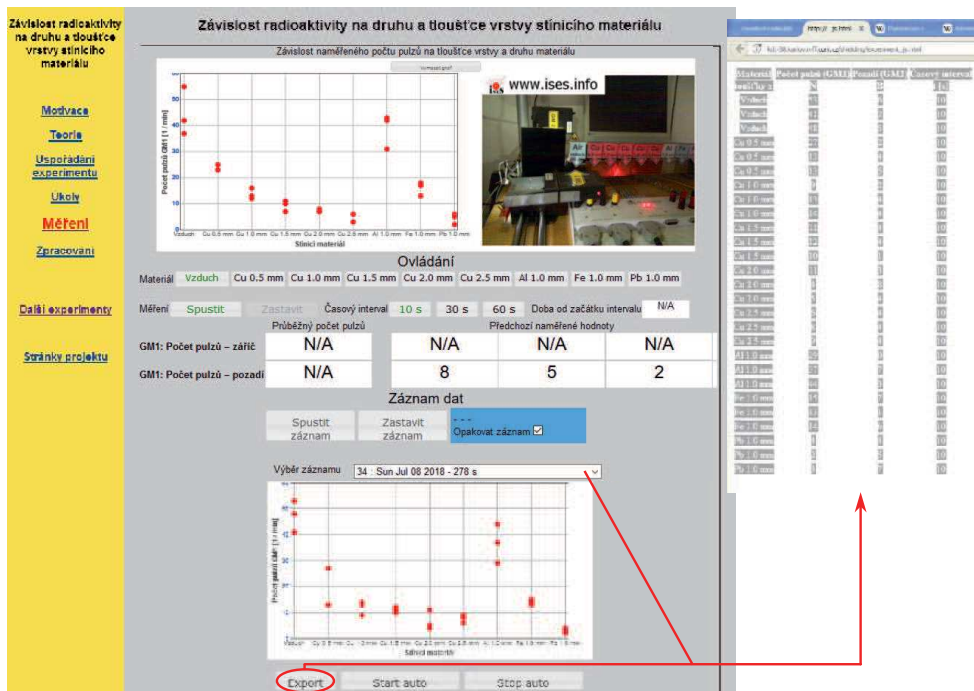
Studenti SŠ nebo VŠ, kteří již znají základy statistického zpracování, se mohou soustředit na pokročilé grafické zpracování dat, které poskytne spolehlivější a přesvědčivější ověření základních způsobů ochrany člověka před ionizujícím zářením, případně na další pojmy ze statistiky, jako je **četnost** absolutní n_i a relativní p_i , **histogram** a konkrétní statistická **rozdělení četnosti** (Poissonovo rozdělení jakožto zobecněné binomické rozdělení, Gaussovo neboli normální rozdělení atd.).

Jediná experimentální aparatura umožňuje ověřit všechny základní způsoby ochrany před ionizujícím zářením:

1. **Dobou expozice** – triviální; uživatel může nastavit dobu jednotlivých měření: 10 s, 30 s nebo 60 s a ověřit, že počet detekovaných částic, resp. průměr z několika opakovaní měření je přímo úměrný nastavené době měření (s ohledem na náhodnou chybu při měření, kterou je třeba rovněž odhadnout nejlépe výběrovou směrodatnou odchylkou).
2. **Vzdáleností od zářiče** – uživatel může pomocí tlačítka nastavit max. devět předem definovaných diskrétních a dobře reprodukovatelných vzdáleností čítače GM-1 od zdroje (mezi nimiž je pouze vzduch), a to v rozmezí 5 až 21 cm s krokem 2 cm a ověřit zákon převrácených čtverců, tzn. úbytek

¹⁵Naměřené hodnoty se zobrazí v novém okně prohlížeče po stisknutí tlačítka „Export“; k tomu je nezbytné v prohlížeči povolit vyskakovací okna – zpravidla při prvním použití tlačítka „Export“.

¹⁶Naměřené hodnoty jsou serverem uspořádány do tabulky, první hodnota vlevo nahoře bude ve vybrané aktivní buňce a další hodnoty se správně automaticky vloží do dalších buněk směrem napravo a dolů od aktivní buňky. V prvním řádku je vždy uveden popis sloupců včetně jednotky, který je vhodné zkopírovat společně s hodnotami.



Obrázek 2.8: Úplná řídicí webová stránka vzdálené laboratoře *Studium radioaktivity* pro ověření ochrany stíněním. K předvedení v rámci vyučovací hodiny byla nastavena délka každého měření 10 s a použito tlačítko „Start auto“, které v tomto případě proměří celou závislost automaticky do 5 minut. Naměřené hodnoty byly zaznamenány tlačítkem „Spustit záznam“ a předtím bylo zrušeno zaškrtnutí políčka pro přepis aktuálního záznamu. Po ukončení záznamu tlačítkem „Zastavit záznam“ se zobrazí náhled změřených hodnot a lze je stáhnout v novém vyskakovacím okně (viz vpravo) po stisknutí tlačítka „Export“.

počtu detekovaných fotonů s druhou mocninou vzdálenosti od bodového zdroje. Tato úloha poskytuje prostor pro cennou diskusi – viz ukázka grafického zpracování na obr. 2.9, 2.11 a 2.15 na str. 48, 51 a 54.

3. **Stíněním** – uživatel může proměřit max. šest experimentálních bodů závislosti počtu detekovaných gama fotonů na tloušťce stínící vrstvy v rozsahu 0 až 2,5 mm a porovnat ji s modelovou exponenciální funkcí, případně porovnat stínící účinky různých materiálů (měď, hliník, železo, olovo) při stejné tloušťce 1 mm. Měření této závislosti se provádí výhradně při nejkratší možné vzdálenosti čítače GM-1 od stínících destiček, kdy jsou experimentální hodnoty zatíženy nejmenší relativní chybou, protože střední hodnota počtu detekovaných fotonů γ má nejvyšší dosažitelnou úroveň. Proložení průměrných hodnot modelovou exponenciální funkcí s ohledem na chybu obvykle vychází pěkně, což může být pro studenty motivující a uspokojující. Viz ukázka grafického zpracování na obr. 2.8, 2.10 a 2.16 na str. 45, 49 a 55.

V případě fronty uživatelů je délka měření omezena na max. 10 minut. Alternativou je stažení automaticky naměřených hodnot, což prakticky představuje

přírodní zdroj náhodných čísel s Poissonovým rozdělením, a to v libovolně zvoleném období, tzn. stažení statistického souboru s volitelným rozsahem výběru. V době, kdy k aparatuře není připojen žádný uživatel, měřicí server provádí automatické měření pro získání dlouhodobé statistiky, a to tak, že je cyklicky proměřováno všech 17 možných pozic (konfigurací) čítače GM-1 obou výše zmíněných závislostí; společně s tím je zaznamenáván počet částic pozadí z čítače GM-2. Délka všech těchto měření je 60 s. Pokud se k experimentu připojí vzdálený uživatel, automatický cyklus je přerušen a po uvolnění aparatury měřicí server automaticky opět naváže od posledního nedokončeného minutového měření.

Experimentální hodnoty z **dlouhodobého automatického měření** lze využít v různých situacích a k mnoha různým účelům:

1. Ověření Poissonova rozdělení pro řídké jevy (zde radioaktivní přeměna) se střední hodnotou λ (standardně značenou též $E(X)$ – Expected value, střední hodnota), která číselně odpovídá i rozptylu $D(X)$ (Dispersion, rozptyl) náhodné veličiny X ; obě tyto charakteristiky popisují úroveň a variabilitu naměřeného počtu částic za určitý časový interval, zpravidla za 1 minutu,

$$E(X) = \lambda, \quad D(X) = \lambda. \quad (2.1)$$

Pro relativní četnost rozdělení jednotlivých naměřených počtů částic x za minutu v případě Poissonova rozdělení platí:

$$P(x) = \frac{\lambda^x}{x!} e^{-\lambda}. \quad (2.2)$$

2. Ověření centrální limitní věty, kdy **součty** určitého počtu naměřených hodnot (a vhodně normované, s libovolným rozdělením) konvergují k normálnímu rozdělení pro velký rozsah výběru.
3. Demonstrace konvergence průměrů k očekávané teoretické závislosti, kterou lze popsat pomocí hladké modelové funkce, a to nejlépe při větším rozsahu výběrového souboru.
4. Ilustrace významu statistického zpracování pro fyziku, významu popisných statistik polohy (úrovně) i variability a význam opakování měření, má-li zkoumaný jev náhodný charakter;
5. Pokročilé grafické zpracování závislosti počtu částic na vzdálenosti od zářiče d (distance), kdy však v kratších vzdálenostech od zářiče modelová funkce (zákon převrácených čtverců) pro naměřený počet částic (γ -fotonů) za jednotku času

$$f(d) = \frac{K}{d^2} + B, \quad (2.3)$$

nevystihuje dobře experimentální hodnoty (průměry) – to poskytuje prostor pro cennou diskusi výsledků¹⁷.

¹⁷Zde je důvodem nesplnění předpokladu odvození modelové funkce (bodový charakter zdroje) – viz grafické zpracování na obr. 2.15 na str. 54.

6. Pokročilé grafické zpracování závislosti počtu částic na tloušťce stínící vrstvy t (thickness, tloušťka) s modelovou funkcí

$$f(t) = Ce^{-At} + B, \quad (2.4)$$

kdy narozdíl od předchozího případu modelová funkce velmi dobře vystihuje experimentální hodnoty (průměry); **parametry** C a K jsou konstanty úměrné aktivitě zářiče a účinnosti G-M detektoru, A je tzv. lineární součinitel zeslabení úměrný tzv. polovrstvě absorpce pro daný materiál a B je ve všech případech konstantní úroveň přírodního pozadí (Background) vztažená ke stejnému časovému intervalu. Součástí grafického zpracování je určení optimálních hodnot těchto všech parametrů.

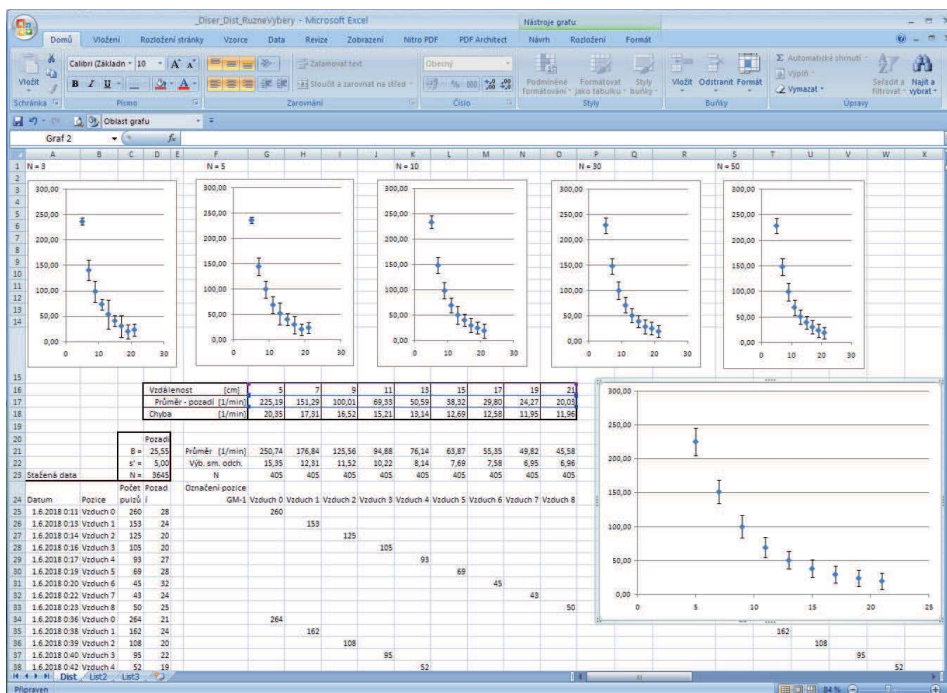
Nový vzdálený experiment ke studiu radioaktivity přináší i další praktické výhody a možnosti:

- Zadání domácího úkolu, kdy lze jednoduše identifikovat opsané žákovské práce díky náhodné povaze radioaktivní přeměny (grafy se liší na první pohled); lze např. přiřadit žákům či skupinám rozdílná počáteční data, přičemž velikost výběru si žáci mohou zvolit sami.
- Díky automatickému dlouhodobému měření a volnému přístupu k naměřeným hodnotám prakticky nehrozí nesplnění úkolu z důvodu tvorby fronty a nedostupnosti řízení vzdáleného experimentu.
- Dlouhodobé měření lze využít jako přírodní zdroj náhodných čísel.

Díky předem připravenému zpracování většího počtu automaticky naměřených hodnot v tabulkovém procesoru typu MS Excel lze žáky a studenty ve vyučovací hodině seznámit s významem statistického zpracování a demonstrovat jim smysl většího počtu opakování měření. Pro vyšší interaktivnost je vhodné přihlásit se k měřicímu serveru vzdálené úlohy *Studium radioaktivity – stažení automaticky naměřených hodnot ze všech experimentů!* Lze nechat jednoho žáka zvolit rok počínaje r. 2014, jiného žáka libovolný měsíc v roce a dalšího žáka libovolný den jako počáteční datum měření ve výběrovém souboru. Dále učitel může nastavit konečné datum, aby celé období trvalo cca jeden týden¹⁸, a dokonce může zvolit některý filtr pouze na požadovanou závislost. Po stisknutí tlačítka „Zobrazit hodnoty v novém okně/Export dat“ a nezbytné době čekání na dokončení přenosu dat lze kliknout do tohoto vyskakovacího okna s hodnotami¹⁹ a pomocí klávesových zkratk **Ctrl+A**, **Ctrl+C** a **Ctrl+V** vložit všechny hodnoty do tabulkového procesoru do správných buněk. Excel přepočítá všechny statistiky podle předem připravených vzorců a aktualizuje grafy. Příklad možného výstupu je uveden na obrázcích [2.9](#) pro ověření *ochrany vzdálenosti* a [2.10](#) pro ověření *ochrany stíněním*.

¹⁸Stažení příliš rozsáhlého výběrového souboru může trvat neúměrně dlouho či ztroskotat na nějaké chybě při přenosu dat. Proto je vhodné jej předem vyzkoušet; týdenní období je optimální, poskytuje stovky až tisíce experimentálních hodnot – záleží na náhodě, kolik uživatelů se v daném období přihlásilo ke vzdálené úloze a dočasně blokovalo automatické měření. V případě technických obtíží lze slepit dohromady několik menších výběrových souborů, tzn. několik celodenních měření. Je doporučeno si velký výběr stáhnout v předstihu a případně libovolně vybírat z tohoto lokálního souboru.

¹⁹Někdy je třeba nová vyskakovací okna v prohlížeči povolit!

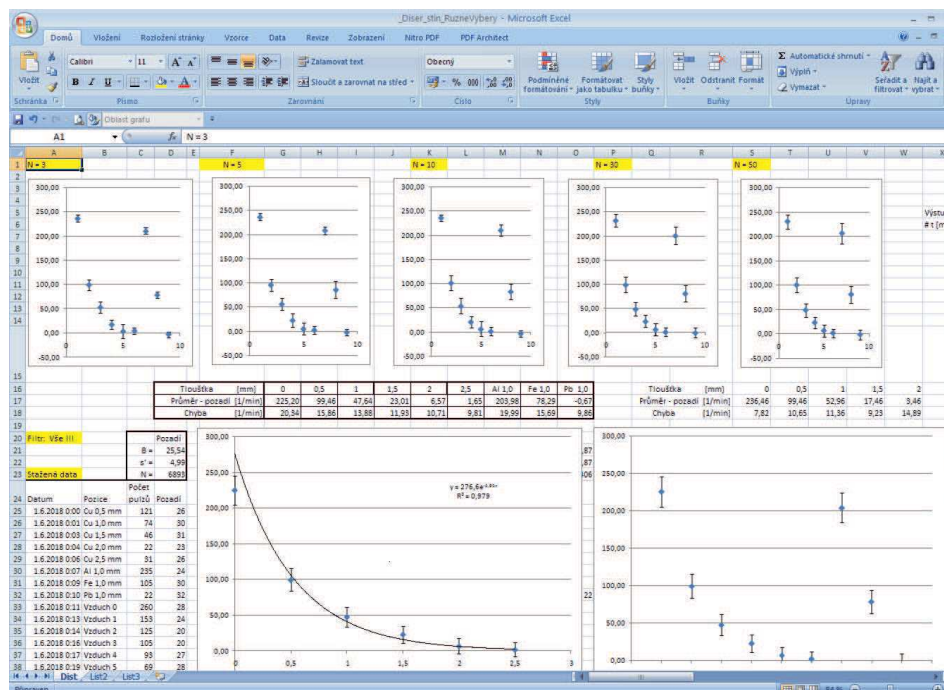


Obrázek 2.9: Ukázka zpracování velkého výběrového souboru v Excelu s cílem ilustrovat význam statistického zpracování, díky němuž lze ověřit účinnost *ochrany vzdáleností* s vyšší spolehlivostí. Pro malé rozsahy výběru $N < 5$ jsou průměry značně rozptýlené a rovněž chybové úsečky mají rozdílné délky. Pro střední rozsahy výběru $10 < N < 30$ začínají být přesnosti měření jednotlivých bodů závislosti srovnatelné a je patrné, jak pro větší rozsah výběru $N > 50$ průměry konvergují k očekávané hladké závislosti, kdy se lze spočtenými průměry pokusit proložit modelovou funkcí [2.3], resp. [2.5] – viz též grafické zpracování na obr. [2.15] na str. [54].

Pro velmi malé rozsahy výběru $N \in \{3; 4; 5\}$ je patrný velký rozptyl délek chybových úseček i spočtených průměrů kolem očekávané hladké závislosti, přesto i v těchto případech statistické zpracování poskytuje cenné informace. Rozsahy $N \in \{10; \dots; 30\}$ přinášejí podstatně uspokojivější výsledky. Pro rozsahy $N \in \{50; \dots; 100\}$ jsou již délky chybových úseček ve všech bodech závislosti dobře srovnatelné a průměrné hodnoty (možná na pár výjimky, protože průměr je citlivý na případné odlehlé hodnoty v souboru) zkonvergovaly k očekávané hladké závislosti. Pro větší rozsahy $N > 100$ začínají spočtené výběrové průměry velmi dobře zviditelňovat průběh hladké funkce (i když délka chybových úseček se již výrazně nezkracuje, tedy přesnost měření se nezlepšuje, nicméně pro větší N se zvyšuje spolehlivost závěrů) a právě těmito spočtenými charakteristikami úrovně se lze pokusit proložit vhodně vybranou modelovou funkcí, s odůvodněnými obecnými parametry.

- Odůvodnitelné parametry modelové funkce [2.3] pro ověření zákona převrácených čtverců:

$$f(d) = \frac{K}{(d - D)^2} + B \quad (2.5)$$



Obrázek 2.10: Ukázka zpracování velkého výběrového souboru v Excelu s cílem ilustrovat význam statistického zpracování, díky němuž lze s vyšší spolehlivostí ověřit účinnost *ochrany stíněním*. Pro malé rozsahy výběru $N < 5$ pozorujeme značný rozptyl jednáků spočtených výběrových průměrů, jednáků délek chybových úseček, vypovídajících o přesnosti měření. Pro střední rozsahy výběru $10 < N < 30$ začínají být přesnosti měření jednotlivých bodů závislosti srovnatelné a je patrné, jak pro větší rozsah výběru $N > 50$ průměry konvergují k očekávané hladké závislosti. Pokud od spočtených průměrů odečteme průměrnou úroveň pozadí, lze program MS Excel nechat přidat „spojnici trendu“. Výsledek však není příliš uspokojivý – MS Excel lze dobře využít k lineárnímu fitu, nelze jej však doporučit pro jiné modelové funkce. Spočtenými průměry lze s velkým úspěchem proložit modelovou funkcí 2.4 např. ve freewaru *gnuplot* – viz grafické zpracování na obr. 2.16 na str. 55.

- K ... Konstanta úměrná součinu aktivity zářiče a účinnosti detektoru.
- D ... Parametr pro opravu měření vzdálenosti mezi zářičem a detektorem (proměnná d může být přesně měřena mezi vnějšími kryty zářiče i detektoru; to však principiálně nezohledňuje skutečnou polohu terčíku s radioaktivním izotopem ani přesnou polohu G-M trubice v detektoru). Parametr má stejnou jednotku jako proměnná d .
- B ... Konstantní úroveň pozadí (může být odhadnuta zvlášť nebo zároveň s ostatními parametry příkazem *fit* v programu *gnuplot*).
- Odůvodnitelné parametry modelové funkce 2.4 (Lambertův-Beerův zákon):

$$f(t) = Ce^{-At} + B$$

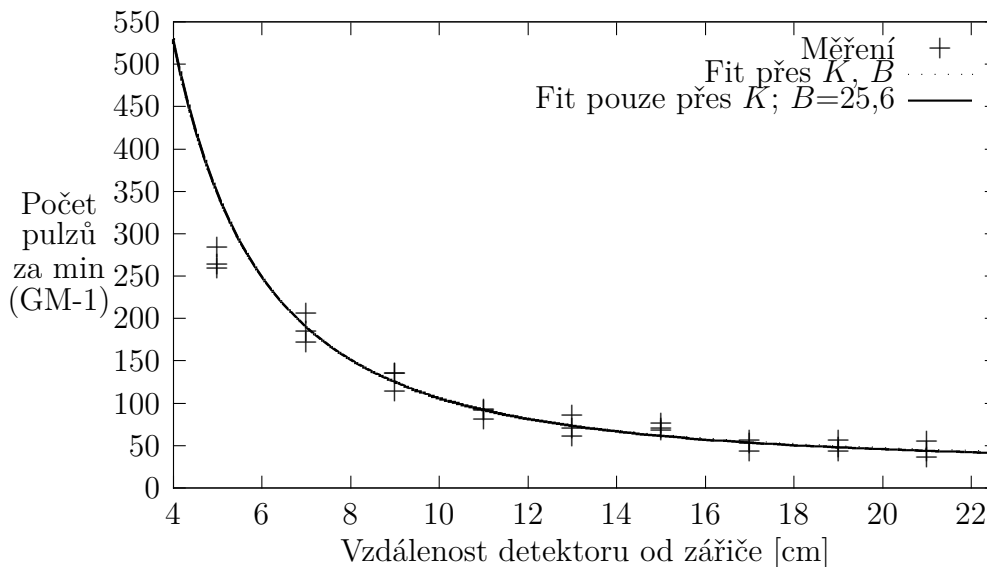
- C ... Konstanta úměrná součinu aktivity zářiče a účinnosti detektoru.

- A ... Parametr zvaný *lineární součinitel zeslabení*, který je materiálovou charakteristikou kovu použitého pro stínicí destičku.
- B ... Konstantní úroveň pozadí (může být odhadnuta zvlášť nebo zároveň s ostatními parametry příkazem `fit` v programu `gnuplot`).

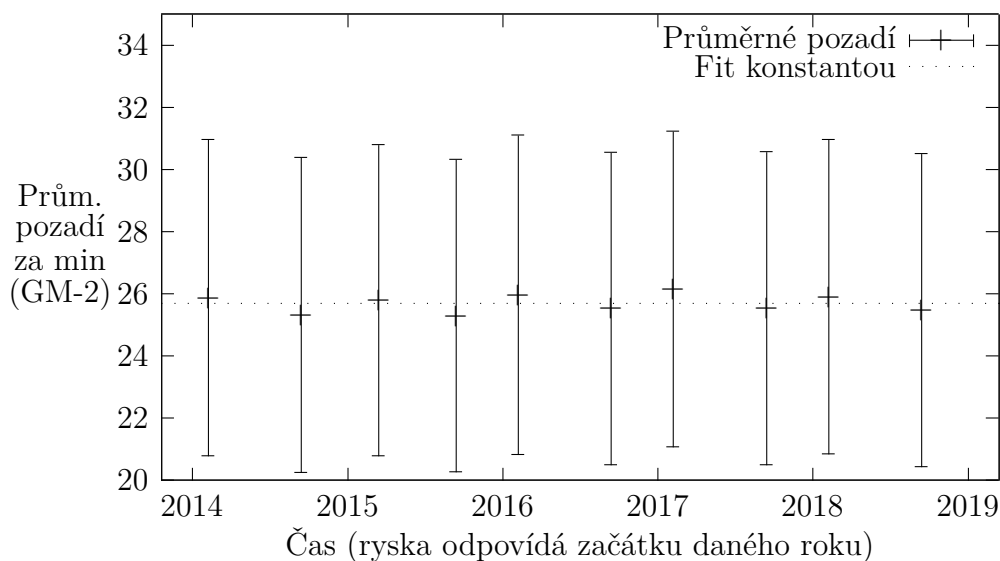
Ve všech případech je nezbytné kriticky zhodnotit výsledné hodnoty parametrů určených při grafickém zpracování, a to např. příkazem `fit` v programu `gnuplot`. Tento nástroj s hodnotami parametrů zároveň určí tzv. *chybu fitu* těchto parametrů. Aby procedura příkazu `fit` zkonvergovala, někdy je nutný **počáteční odhad hodnot parametrů** (např. oprava skutečné vzdálenosti zářiče a detektoru se reálně může pohybovat okolo $D = 1$ cm; z měření GM-2 lze dále odhadnout $B = 25$ min^{-1} .)

2.2.5 Očekávané výstupy při nižším počtu opakování měření

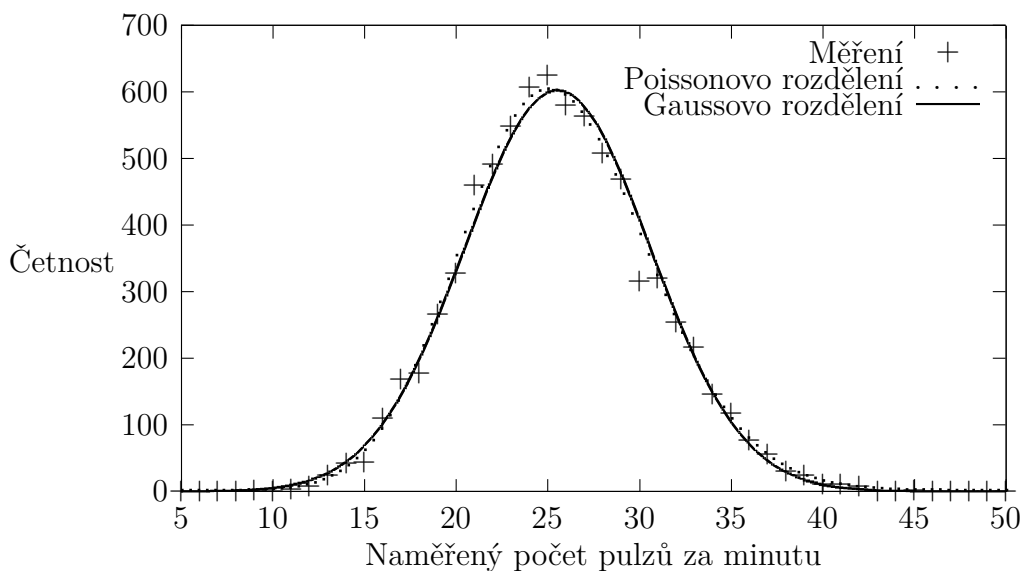
V případě menšího rozsahu výběru můžeme přehledně pozorovat a upozornit žáky na **rozptyl** naměřených hodnot kolem očekávané hladké teoretické závislosti [2.3], popř. [2.4] – viz ukázky zpracování naměřených hodnot pomocí různých programů na obrázcích [2.11] a [2.12]. Při statistickém zpracování malého výběrového souboru budou i průměrné hodnoty více rozptýlené kolem modelové funkce, a to zpravidla v mezích určených výběrovou směrodatnou odchylkou – viz chybové úsečky v grafu na obr. [2.12].



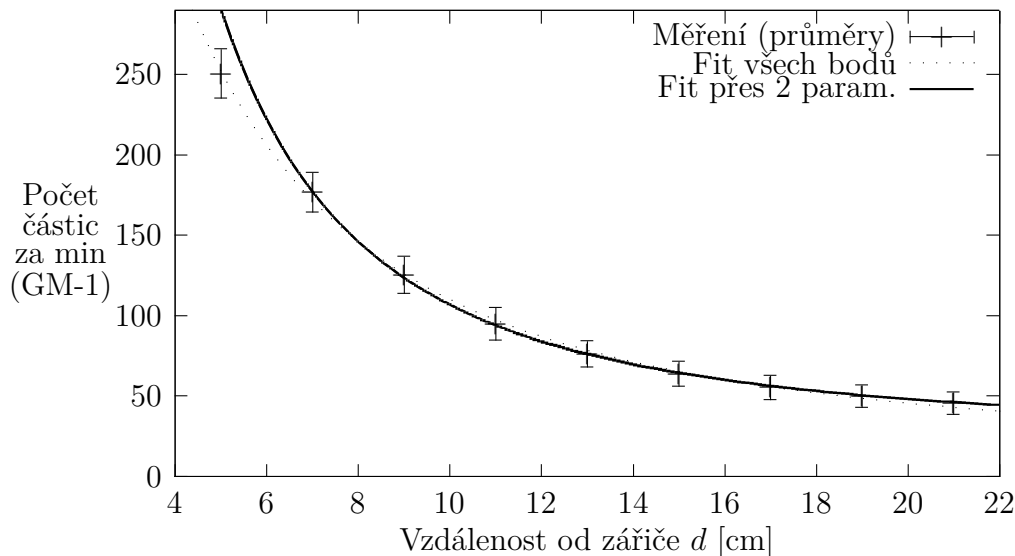
Obrázek 2.11: Grafické zpracování automatického měření závislosti počtu částic na vzdálenosti od zářiče a ověření zákona převrácených čtverců, a to při malém počtu opakování měření ($N = 3$). Modelová funkce [2.3] byla proložena všemi body kromě prvního, který výsledný fit značně zkresluje. Nelze očekávat, že tento bod bude ležet na modelové funkci, protože uspořádání pokusu nesplňuje předpoklady odvození modelové funkce – zdroj záření nelze v blízké vzdálenosti považovat za bodový. Hodnoty parametrů včetně chyb určených příkazem `fit` v programu `gnuplot` jsou: $K \doteq (7,86 \pm 0,34) \cdot 10^3$ částic/min (rel. chyba fitu 4,3 %), $B \doteq (28,0 \pm 3,3)$ částic/min (rel. chyba fitu pozadí 11,5 % je zde vyšší kvůli malému počtu hodnot, avšak v rámci chyby odpovídá úrovni pozadí 26 ± 6), $K_{B \text{ fixované}} \doteq (8,07 \pm 0,21) \cdot 10^3$ částic/min (rel. chyba 2,6 %). Nezbytné příkazy a práce s programem `gnuplot` jsou podrobněji popsány v příloze [A] od str. [141].



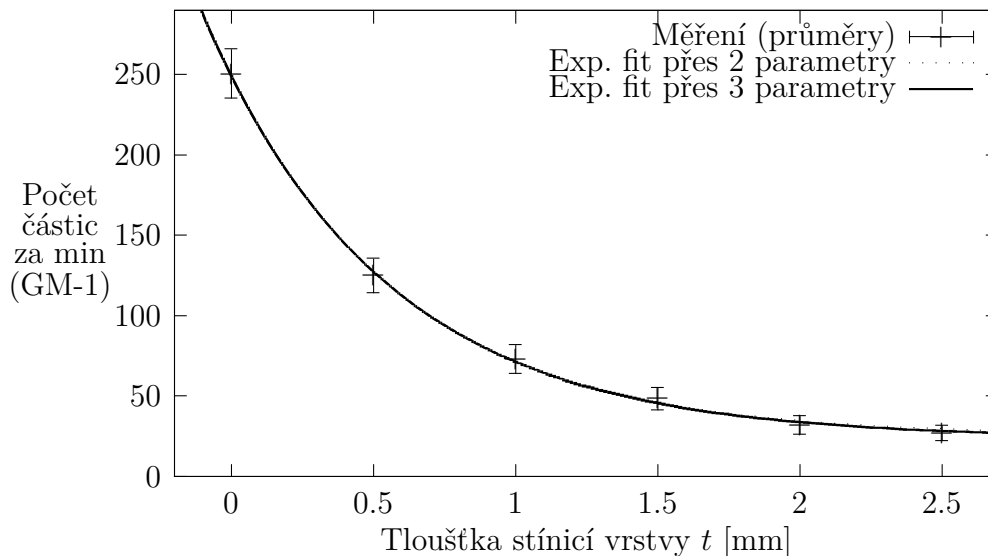
Obrázek 2.13: Ověření konstantní úrovně pozadí. Každý průměr a výběrová směrodatná odchylka byly spočteny z velkého výběru o rozsahu přibližně 8700 hodnot. Směrnice lineárního fitu přímkou byla určena programem `gnuplot` ($0,009 \pm 0,034$) $\text{min}^{-1}/\text{půlrok}$, což odpovídá konstantní úrovni pozadí v čase. Úroveň přírodního pozadí s chybou fitu je $(25,7 \pm 0,1) \text{ min}^{-1}$ (rel. chyba fitu 0,4 %). Absolutní chyba jednotlivých průměrů je $\pm 5 \text{ min}^{-1}$ (rel. asi 20 %). Grafické zpracování naznačuje, že by průměrné hodnoty v zimním období mohly vycházet nepatrně vyšší než v teplé části roku, což lze vysvětlit např. teplotní závislostí účinnosti G-M detektoru, ale takové závěry nejsou zatím spolehlivé pro malý počet pozorování.



Obrázek 2.14: Ověření Poissonova rozdělení pro velký rozsah výběru ($N = 7630$). Naměřené hodnoty pozadí pochází z osmidenního automatického měření v období 10.–17. 6. 2018. Parametry Poissonova a Gaussova rozdělení jsou: střední hodnota $\lambda = \mu \doteq 25,556$; směrodatná odchylka $\sigma = \sqrt{\lambda} \doteq 5,055$, čímž je navíc ověřena platnost vztahu [2.1](#). Viz též příloha [A](#) od str. [141](#).



Obrázek 2.15: Velmi spolehlivé ověření zákona převrácených čtverců ve vzdálené laboratoři it Studium radioaktivity – ochrana stíněním, a to v automatickém režimu. Experimentální data byla stažena jako rozsáhlý výběrový soubor s rozsahem $N = 405$ (sedmidenní měření 1.–6. 6. 2018 s filtrem „Závislost na vzdálenosti“). Fit všech bodů závislosti není uspokojivý, což poskytuje prostor pro diskusi, jež může být zajímavá a podnětná pro nadané studenty. Po vynechání prvního bodu lze ostatní body velmi dobře proložit modelovou funkcí 2.5 na str. 48; její graf prochází téměř středem všech chybových intervalů (kromě prvního bodu v nejkratší vzdálenosti – důvodem je nebodový charakter zdroje záření, pro jaký byla modelová funkce odvozena). Hodnoty parametrů přesnějšího fitu přes 2 parametry s chybami fitu jsou: $K \doteq (10, 2 \pm 0, 3) \cdot 10^3 \text{ min}^{-1}$ (rel. chyba fitu 3 %) a rozumná hodnota opravy měření vzdálenosti d vyšla $D \doteq -(1, 18 \pm 0, 12) \text{ cm}$ (rel. chyba fitu 10 %). Nezbytné příkazy a práce s programem `gnuplot` jsou podrobněji popsány v příloze A od str. 141.



Obrázek 2.16: Velmi spolehlivé ověření Lambertova-Beerova zákona pro exponenciální pokles počtu částic naměřeného v automatickém režimu vzdálené úlohy *Studium radioaktivity – ochrana stíněním*. Velká spolehlivost je důsledkem většího rozsahu výběrového souboru ($N = 406$) i použití pokročilého grafického zpracování, kdy modelová funkce 2.4 prochází všemi experimentálními body závislosti s ohledem na chybu měření, vyznačenou chybovými úsečkami. Optimální hodnoty parametrů určené příkazem `fit` v programu `gnuplot` včetně chyb jsou: $C \doteq (225 \pm 3) \text{ min}^{-1}$ (rel. chyba fitu 1,3 %), $A \doteq (1,56 \pm 0,07) \text{ mm}^{-1}$ (rel. chyba fitu 4,5 %) a pro úroveň pozadí $B \doteq (24 \pm 3) \text{ min}^{-1}$ (rel. chyba fitu 13 %). Drobné odchylky středů chybových intervalů od průběhu modelové funkce lze vysvětlit zejména výrobními nepřesnostmi v tloušťce stínících destiček (plechů), které známe s reálnou přesností $\pm 0,1$ mm. Nezbytné příkazy a práce s programem `gnuplot` jsou podrobněji popsány v příloze A od str. 141.

2.3 Polarizace světla

2.3.1 Výchozí stav a motivace pro vznik vzdáleného experimentu

V dnešní době se nejen ve vědeckých laboratořích²⁰, ale i v každodenním životě prakticky využívá polarizační stav světla. Mezi nejběžnější aplikace patří např. polarizační brýle a filtry²¹ a zobrazovací jednotky LCD²². Studenti by tedy měli rozumět základním principům funkce takových součástí a měli by znát základní stavy polarizace světla²³, která souvisí s charakterem světla jakožto příčného elektromagnetického vlnění. Pro výuku (výklad, demonstraci či laboratorní práci) lze v tomto případě efektivně využít různé prostředky:

- e-texty pro výklad teorie a základních pojmů,
- motivační videa pro ukázkou praktických aplikací v každodenním životě,
- aplety pro názornou ilustraci a získání lepší představy a
- vzdálený reálný experiment pro praktické ověření všech poznatků²⁴.

Smyslem nového vzdáleného experimentu je pomocí měření určit polarizační stav světla, dále pomocí různých optických prvků tento stav změnit a změnu vždy prostřednictvím měření ověřit. Konkrétním jednodušším cílem může být např. ověření Malusova zákona pro dvojici polarizátorů.

Z hlediska technologie vzdálených laboratoří je smyslem nové úlohy jednak rozšířit a demonstrovat možnosti modifikovatelnosti vzdálené aparatury (zde fyzické zařazování různých optických prvků do dráhy světla a měnicích jeho polarizační stav), jednak propojit všechny výše zmíněné e-prostředky a zpřístupnit je na jednom místě, případně v LMS prostředí. Zájemci si dokonce mohou otestovat

²⁰Optoelektronika a spintronika jsou moderní rozvíjející se obory, které mají perspektivu rozšířit a vylepšit vlastnosti současné elektroniky, a to díky využití světla či spinu elektronů při zpracování informace, kdy stávající elektronika produkuje zbytečně mnoho joulovského tepla. Např. spinově polarizovaný elektrický proud lze generovat působením kruhově polarizovaného světla.

²¹Polarizační filtr, resp. polarizátor je optický prvek, který propouští pouze světlo v definovaném polarizačním stavu; využívá se např. před objektivy fotoaparátů, kdy blokuje odlesky částečně polarizovaného světla v důsledku fyzikálního jevu polarizace odrazem a rovněž přispívá k věrnějšímu podání barev.

²²LCD – Liquid Crystal Display, displej z kapalných krystalů je zobrazovací jednotka využívající dvojici zkřížených polarizátorů. Bez přivedeného napětí plynule se měnící orientace krystalů umožní průchod polarizovaného světla skrz celou soustavu, naopak přivedené el. napětí změní orientaci krystalů a průchod světla je zablokovan dvojicí zkřížených polarizačních fólií.

²³Nepolarizované světlo je charakteristické zcela náhodně orientovanými rovinami polarizace vektoru elektrické intenzity E , jinými slovy všechny roviny polarizace jsou stejně pravděpodobné; částečně polarizované světlo je složeno ze světla nepolarizovaného i polarizovaného; rozlišujeme tyto základní druhy polarizace světla: lineární, kruhová levotočivá a pravotočivá a nejobecnější eliptická.

²⁴Vzdálený experiment může pro sdílení využít kvalitnější a dražší komponenty – profesionální polarizační filtry. Student nemusí řešit mechanické problémy spojené s přesným nastavením a odečítáním úhlu natočení polarizátoru ani stavbu netriviální aparatury, kdy se měří intenzita světla prošlého skrz dvojici polarizátor–analyzátor. Analyzátor je rovněž polarizační filtr, a to s možností přesného nastavení a odečtení úhlu orientace roviny propustnosti.

efekt dalších a běžně nedostupných optických prvků, jako jsou např. půlvlnné a čtvrtvlnné fázové destičky²⁵. V neposlední řadě lze v rámci měření porovnávat světlo z různých zdrojů z hlediska polarizace²⁶.

Vyšším cílem nové laboratoře pro studenty je vyzkoušet si pokročilé grafické zpracování s méně obvyklou modelovou funkcí 2.7 pro intenzitu světla prošlého analyzátořem.

V rámci rešerše se nepodařilo nalézt žádnou vzdálenou laboratoř k tomuto tématu. Bylo však možné využít dříve vytvořené interaktivní aplety jiných autorů [137], které názorně ilustrují základní druhy plně polarizovaného světla a pomáhají studentům k pochopení principu, jak připravit kruhově polarizované světlo z lineárně polarizovaného pomocí čtvrtvlnné fázové destičky – viz ukázka na obr. 2.20. [137], [138].

2.3.2 Vývoj, návrh a stavba vzdáleného experimentu

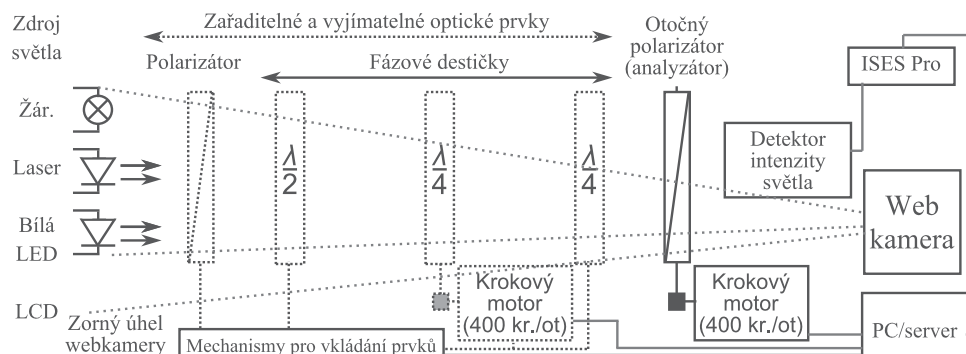
Vzdáleně řízená fyzikální aparatura ke studiu a modifikaci polarizačního stavu světla vyžadovala vývoj přesných mechanismů: jednak mechanismu otočného analyzátořu s přesně nastavitelným úhlem natočení, jednak mechanismů umožňujících zařadit optický prvek do dráhy světla nebo jej vyjmout. Z důvodu omezeného rozpočtu nebylo možné pořídit profesionální laboratorní vybavení; proto autor navrhl vlastní mechanismus s třecími spojkami pro lehčí prvky a mechanismus pro vkládání těžších prvků do optické dráhy. Oba mechanismy využívají levné servomotorky na stejnosměrné napětí (DC) s převodovkou do pomala, a tedy s dostatečně velkým momentem a jsou dostatečně robustní. K těmto mechanismům byla vytvořena řídicí elektronika využívající jednak dvojici optických závor na obou koncových dorazech, jednak dvoupólové relé v kombinaci s dvoupólovým páčkovým přepínačem; relé fyzicky přepíná stav podle pokynů vzdáleného uživatele (tzn. zařadit/vyřadit optický prvek), páčkový přepínač může k okamžité změně stavu v případě potřeby použít fyzická obsluha u vzdálené aparatury (servisní, havarijní či testovací účely).

Pro otočný mechanismus analyzátořu i čtvrtvlnné fázové destičky byl využit krokový motor SX17-0402-09 s 400 kroky na otočku hřídele (jiné typy mají zpravidla jen 200 kroků/otočku); to díky použití ozubeného převodu umožňuje dosáhnout nejmenšího kroku v nastavení úhlu přibližně 0,129deg (jedné otočce analyzátořu o 360deg odpovídá přesně 2800 kroků), což je pro vzdělávací účely dostatečná přesnost a navíc ji lze zvýšit použitím statistického a grafického zpracování. Krokové motory jsou řízeny osvědčenými průmyslovými kartami CD20M s kontrolerem M1486 od firmy Microcon, s.r.o. Pro konstrukci přesného mechanismu analyzátořu byly zakoupeny profesionální komponenty určené pro astronomickou techniku. Díky velkému průměru analyzátořu (2 palce, tj. cca 5 cm) lze vzdálenému uživateli poskytnout pohled webkamerou přímo v optické ose aparatury, jaky kdyby se sám díval skrz všechny optické prvky, tzn. z místa detektoru intenzity prošlého světla, a přímo vizuálně pozoroval vliv některých zařazených

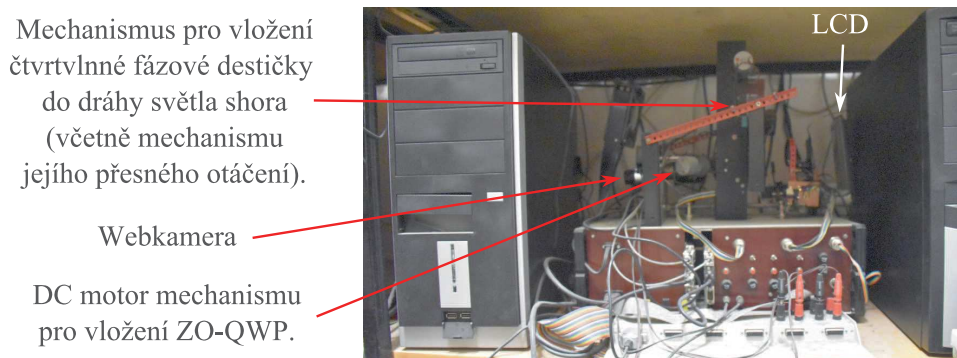
²⁵QWP – Quarter-Waveplate, čtvrtvlnná fázová destička mění lineární polarizaci na kruhovou a využívá se k přípravě kruhově polarizovaného světla, případně dále ke generaci spinově polarizovaného proudu.

²⁶Např. bílá LED produkuje nepolarizované světlo, červená laserová dioda je zdrojem částečně polarizovaného světla.

optických prvků, zatímco funkce jiných prvků se projeví jedině až při měření. Schéma uspořádání nového vzdáleného experimentu je uvedeno na obr. 2.17. Aktuální pohled na vzdáleně řízenou aparaturu, umístěnou v zatemněném prostoru pod stolem, uvádí obr. 2.18.



Obrázek 2.17: Schéma uspořádání vzdáleně řízeného experimentu *Polarizace světla*.



Obrázek 2.18: Aktuální snímek vzdáleného experimentu *Polarizace světla* s orientačními popisky některých částí. Vzdáleně řízená aparatura musí být umístěna v zatemněném prostoru pod stolem, neboť světlo z okolí by ovlivnilo výsledky měření intenzity světla prošlého všemi optickými prvky v jeho dráze.

2.3.3 Metodika využití vzdáleného experimentu ve výuce

V současné době se na **střední škole** probírají jevy související s polarizací světla většinou pouze kvalitativně. Kvantitativní ověření závislostí je využitelné až na VŠ; mohou si jej však vyzkoušet všichni studenti s hlubším zájmem o fyziku, kteří uvažují o budoucím VŠ studiu příslušného zaměření. Má-li učitel k dispozici polarizátor či polarizační fólii, je rozhodně vhodné nové fyzikální jevy demonstrovat s těmito reálnými pomůckami a pokud možno nechat studenty si jevy ověřit vlastnoručně. Po doporučeném předchozím vyzkoušení lze však dobře využít i nově vytvořené e-prostředky, např. v tomto pořadí [138]:

1. K upoutání pozornosti studentů lze pustit **krátká motivační videa** dostupná na webových stránkách k experimentu [139]. Videa jsou uvedena ve dvojicích, z nichž jedno prezentuje nějaký jev a druhé podává ve vloženém okně vysvětlení (tzn. otáčení polarizačního filtru připojeného k objektivu fotoaparátu nebo kamery, kterou bylo první video zaznamenáno). Témata videí jsou:

- Spočítání ryb ve vodě, kdy kvůli odrazu světla od vodní hladiny pořádně nevidíme do hloubky. Odražené světlo je však částečně nebo úplně polarizované a lze ho zablokovat polarizačním filtrem. Ve vodě najednou spatříme mnohem více ryb než na začátku!
- Nastínění principu funkce LCD monitoru např. u notebooku.
- Pohled skrz okno rušený odraženým světlem od skla, které lze opět zablokovat vhodně natočeným polarizačním filtrem. Použití polarizačního filtru tedy poskytuje lepší obraz, a dokonce i věrnější podání barev.

Výše zmíněná videa poslouží jako **úvod k polarizátoru** (polarizační fólii) a jeho jistě zajímavým možnostem praktického využití.

2. K oživení výkladu je dále možné připojit se ke vzdálenému experimentu na téma *Polarizace světla* a popsat uspořádání experimentu: Webkamerou se díváme skrz polarizátor, kterým je možné plynule otáčet dokola (manuálně nebo automaticky s krokem 10deg). Přitom můžeme pozorovat a komentovat změny. Zároveň se v reálném čase do grafu zakresluje okamžitá intenzita světla naměřená detektorem umístěným hned vedle objektivu webkamery. Do optické dráhy lze dále vkládat vybrané optické prvky a pozorovat jejich vliv na světlo. Obdobně lze prostřednictvím polarizátoru zkoumat různé zdroje světla.

3. Můžeme si např. nechat z vnějšku osvětlit displej malé meteorologické stanice v zorném poli webkamery. Při otáčení analyzátoru zobrazené údaje mizí a znovu se objevují, a to celkem dvakrát za jednu otočku analyzáto-rem, zatímco tělo stanice je vidět neustále – viz obr. 2.19. Funkce tzv. LCD displeje je tedy založena na polarizovaném světle a lze ji případně podrobněji vysvětlit s použitím názorného obrázku (nebo zadat referát do příští hodiny). Navíc však displej hýří všemi duhovými barvami, což je důsledek vlivu různého mechanického napětí v materiálu na index lomu a optické vlastnosti tohoto materiálu, kterým polarizované světlo prochází²⁷.

4. V dalším kroku je vhodné postupně zapínat a polarizátorem zkoumat různé zdroje světla:

- Intenzita světla produkovaného bílou LED se při otáčení analyzáto-rem nemění. Bílá LED je tedy zdrojem nepolarizovaného světla, které tímto můžeme uvést. Všechny roviny polarizace světla jsou stejně pravděpodobné, tzn. pro všechny úhly natočení analyzátru naměříme stejnou hodnotu intenzity světla.

²⁷Obdobný jev lze pozorovat např. lokálně se dvěma polarizátory a průhledným plastovým pravítkem mezi nimi, které jemně ohýbáme.



Obrázek 2.19: Pohled na vzdáleně řízenou aparaturu experimentu *Polarizace světla* z webkamery umístěné v optické ose. Hned před kamerou je otočný polarizátor (tzv. analyzátor). Při osvětlení LCD displeje údaje na něm zobrazené mizí (viz obr. vlevo) a znovu se objevují (viz obr. napravo), jak se analyzátor otáčí, a duhovým zbarvením se projevuje mechanické napětí v průhledném krytu displeje. Pro orientaci jsou označeny různé zdroje světla, které lze v úloze zkoumat z hlediska polarizace, a další optické prvky, které lze zařadit do optické dráhy nebo je vyjmout (např. druhý polarizátor a čtvrtvlnná fázová destička „ $\lambda/4$ “). 138

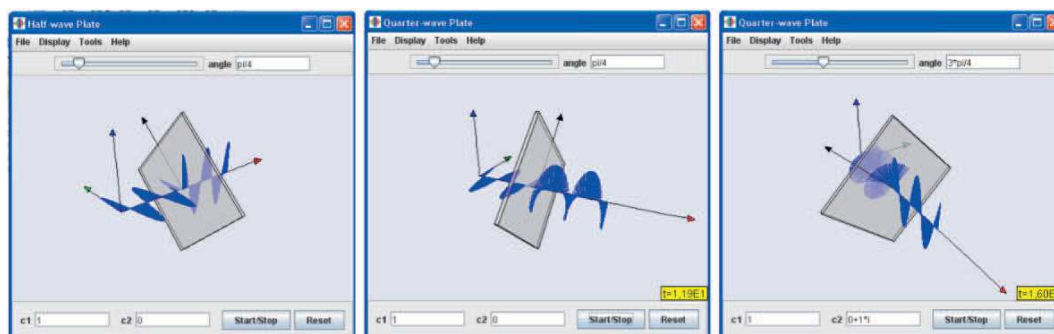
- Obdobně při zkoumání světla z obyčejné žárovky pozorujeme téměř konstantní závislost intenzity světla. Drobné odchylky lze zdůvodnit faktem, že světlo musí nevyhnutelně projít skrz skleněnou baňku, přičemž se zároveň může na rozhraní odrážet, a proto dochází k jeho částečné polarizaci odrazem, jak bylo předtím demonstrováno ve videu s oknem nebo tradičním pokusem. Jinak je rozžhavené vlákno žárovky zdrojem nepolarizovaného světla. Na tomto nebo případně na dalším pozorování lze uvést částečně polarizované světlo.
 - U červené laserové diody je pozorované zvlnění závislosti větší. Červená laserová dioda je tedy příkladem zdroje intenzivního a **částečně polarizovaného světla**.
5. Případně lze zapnout více světelných zdrojů současně a **ověřit aditivnost intenzity světla** – signály jednotlivých zdrojů se prostým způsobem sčítají.
 6. Pro přípravu **zcela polarizovaného světla** lze využít a do optické dráhy vložit druhý polarizátor. K tomu je vhodné použít právě červený laser s největší intenzitou světla i dobře definovanou vlnovou délkou. Na změřené závislosti intenzity světla $I(\alpha)$ lze kvantitativně ověřit tzv. **Malusův zákon pro dvojici polarizátorů**

$$I(\alpha) = I_{\max} \cos^2 \alpha, \quad (2.6)$$

kde α je v tomto případě úhel sevřený rovinami propustnosti obou polarizátorů. Amplituda vektoru elektrické intenzity světla prošlého analyzátozem je úměrná kosinu úhlu, jak lze ukázat v geometrickém rozboru pro průchod světla dvěma polarizátory. Intenzita světla, která je intuitivně úměrná

energii přenášené světlem, je však úměrná kvadrátu amplitudy²⁸. Proto je ve vzorci typický kvadrát kosinu. V tomto kroku je vhodné vysvětlit princip funkce polarizační fólie, která propouští pouze takové světlo, kdy vektor elektrické intenzity kmitá pouze v určité rovině (tzv. rovině propustnosti polarizátoru). Je to dáno strukturou opticky propustného materiálu. V ostatních případech elektromagnetická vlna rozkmitá elektrony, jimž fotony předají svou energii a zaniknou, čili světlo polarizované v jiných rovinách nemůže projít skrz polarizátor, bude absorbováno. V tomto případě lze tedy pozorovat **efekt zkřížených polarizátorů**, kdy $\cos \alpha = \cos 90 \text{ deg} = 0$ a skrz druhý polarizátor již neprojde žádné světlo.

7. Pro *názornější představu* jevu polarizace světla lze využít **doporučené interaktivní aplety**, ve kterých je kmitání vektoru elektrické intenzity znázorněno a kde je rovněž možné snadno otáčet polarizátorem a příp. jinými optickými prvky a pozorovat jejich vliv na polarizační stav světla [137]. S použitím těchto apletů lze nakonec názorně uvést **kruhově polarizované světlo** (levotočivé i pravotočivé), případně nejobecnější **eliptickou polarizaci** a vysvětlit způsob jejich přípravy z lineárně polarizovaného světla pomocí vhodného natočení tzv. **čtvrtvlnné fázové destičky**. Viz ukázka apletů na obr. 2.20.



Obrázek 2.20: Ukázka doporučených interaktivních apletů k úloze *Polarizace světla*: Nalevo je znázorněna funkce půlvlnné fázové destičky, která otáčí rovinu lineárně polarizovaného světla o 90 deg. Uprostřed a napravo je demonstrována funkce čtvrtvlnné fázové destičky (QWP – Quarter-Waveplate), která při vhodném úhlu natočení dokáže lineárně polarizované světlo změnit na levotočivé nebo pravotočivé kruhově polarizované světlo, resp. naopak. Fázovou destičkou lze jednoduše otáčet pomocí myši a aplet názorně ukazuje chování vektoru intenzity elektrického pole ve zpomaleném čase pro všechny druhy polarizace světla včetně nejobecnější eliptické. Myší lze rovněž měnit směr úhlu pohledu, což ve směru šíření světla umožňuje prohlédnout si vlastní polarizační elipsu či její speciální případy (úsečku pro lineárně polarizované světlo a kružnici pro kruhovou polarizaci). [137]

²⁸Podobně např. v mechanice je celková mechanická energie kmitavého pohybu úměrná kvadrátu amplitudy výchylky z rovnovážné polohy.

Měření polarizačního stavu světla (tzn. určení všech parametrů polarizační elipsy) je předmětem pro VŠ přírodovědného či technického zaměření. Nejobecnější modelová funkce pro měřenou závislost intenzity světla $I(\alpha)$ prošlého analyzátozem má tvar

$$I(\alpha) = I_{\max} \cos^2(\alpha - \alpha_{\max}) + I_{\min} \sin^2(\alpha - \alpha_{\max}), \quad (2.7)$$

kde proměnná α je nastavený úhel orientace roviny propustnosti analyzátozem definovaný v souřadném systému měřicí aparatury a v rámci grafického zpracování je třeba určit hodnoty těchto tří parametrů: I_{\max} a I_{\min} , označujících maximální a minimální hodnotu intenzity světla prošlého analyzátozem v naměřené závislosti, a třetím parametrem je α_{\max} popisující úhel natočení hlavní osy polarizační elipsy v uvažovaném laboratorním souřadném systému²⁹. Při tomto směru natočení analyzátozem ($\alpha = \alpha_{\max}$) tedy naměříme maximální hodnotu intenzity světla.

Modelová funkce 2.7 však přináší několik praktických problémů, na které mohou VŠ studenti a ostatní zájemci narazit. Pro hodnoty hledaných parametrů požadujeme rozumné podmínky:

$$I_{\max} \geq I_{\min}, \quad (2.8)$$

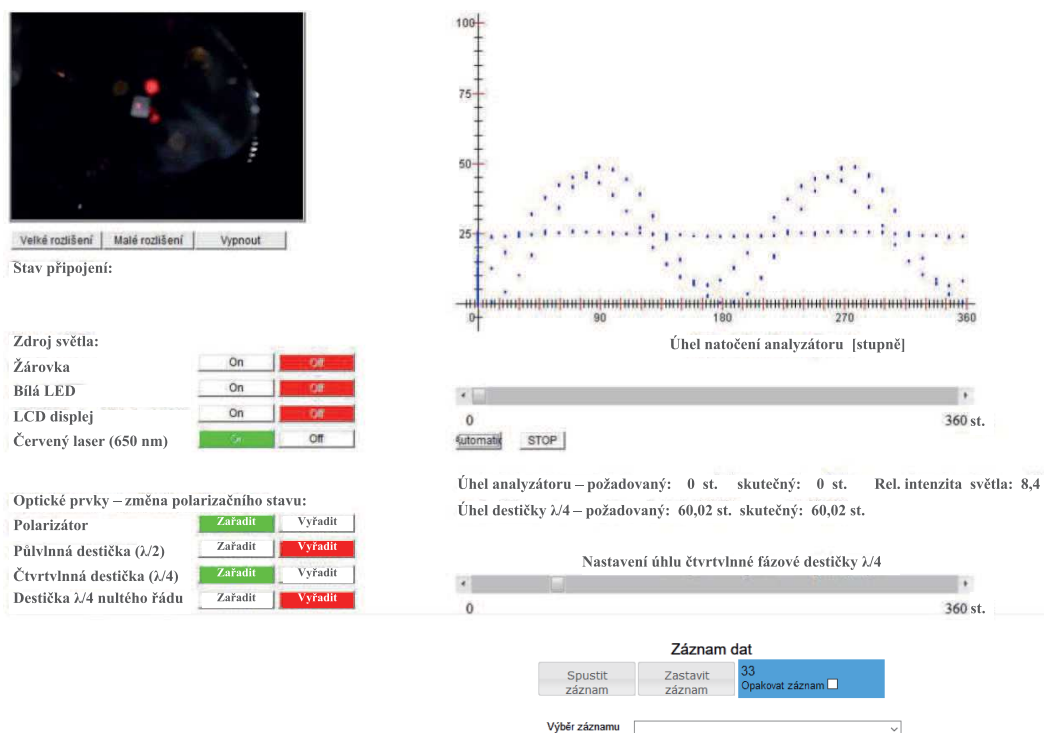
$$\alpha_{\max} \in [0; 180 \text{ deg}). \quad (2.9)$$

Při prokládání experimentálních bodů modelovou funkcí 2.7 může např. příkaz `fit` v programu `gnuplot` zkonvergovat tak, že $I_{\max} < I_{\min}$; v takovém případě lze hodnoty těchto parametrů jednoduše prohodit a současně posunout určenou hodnotu parametru α_{\max} o ± 90 deg tak, aby jeho hodnota ležela v požadovaném intervalu podle podmínky 2.9. Důvodem je, že oba parametry vystupují v předpisu modelové funkce 2.7 symetricky u kvadrátů goniometrických funkcí, které mají stejný argument a vzájemně jsou posunuté právě o 90 deg (směr posunutí zde kvůli kvadrátům nehraje roli). [136]

Ze zjištěných hodnot parametrů I_{\max} , I_{\min} a α_{\max} lze kvalitativně i kvantitativně určit tzv. polarizační stav světla a transformovat jej do různých bází – příslušné transformační vztahy i středoškolské odvození modelové funkce 2.7 je uvedeno např. v bakalářské práci autora [136]. Pro zajímavost lze úlohu doplnit *problémovým příkladem* k zamýšlení se nad kvalitativním řešením, případně ke kvantitativní analýze, např. jak se změní intenzita paprsku světla procházejícího skrz dva zkřížené polarizátory, vložíme-li mezi ně navíc třetí polarizátor, a to v závislosti na jeho orientaci?

Vyvrcholením samostatné laboratorní práce studentů se vzdáleným experimentem má být **příprava kruhově polarizovaného světla** a ověření tohoto výsledku měřením – viz ukázka řídicí webové stránky na obr. 2.21. To zahrnuje výběr nejsilnějšího zdroje lineárně polarizovaného světla, tzn. červeného laseru se zařazeným polarizátorem. Lineární polarizaci je nyní vhodné ověřit měřením, že skutečně $I_{\min} = 0$. Po zařazení čtvrtvlnné fázové destičky „ $\lambda/4$ “ do dráhy laserového paprsku při nějakém natočení nejspíš získáme obecně elipticky polarizované světlo, což lze zjistit jedině prostřednictvím měření. Studenti by se měli pokusit měnit úhel natočení čtvrtvlnné fázové destičky a vždy zopakovat měření (případně stisknout tlačítko pro vymazání grafu) tak, aby změřená závislost byla

²⁹Pouze pro kruhově polarizované světlo nemá parametr α_{\max} smysl, resp. může nabývat libovolné hodnoty. V literatuře se tento parametr obvykle značí ψ .



Obrázek 2.21: Ukázka řídicí stránky vzdáleného experimentu *Polarizace světla* s vydařenou přípravou kruhově polarizovaného světla, kterou lze realizovat ve vzdálené laboratoři s nejsilnějším zdrojem světla – červeným laserem. Po zařazení polarizátoru získáme lineárně polarizované světlo, jemuž odpovídá naměřená závislost $I(\alpha) \in [0; I_{\max}]$. Lineárně polarizované světlo lze zařazením čtvrtvlnné fázové destičky změnit při jejím speciálním úhlu natočení změnit na kruhově polarizované světlo, jemuž odpovídá naměřená konstantní závislost (s jistou nedokonalostí). V ostatních případech vznikne obecně elipticky polarizované světlo (viz třetí signál mezi oběma zmíněnými s obecně nenulovou hodnotou I_{\min}). [138]

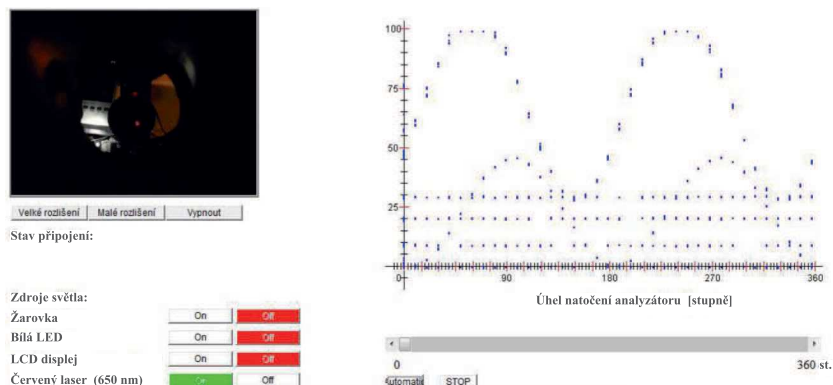
co možná nejlépe konstantní funkcí. Předtím je velmi vhodné, aby se studenti seznámili s principem účinku čtvrtvlnné fázové destičky v doporučeném apletu. Prakticky lze ideálního stavu s reálnými nedokonalými optickými prvky dosáhnout jen velmi obtížně. Nejlepší pokus autora o přípravu kruhově polarizovaného světla ve vzdáleně řízené laboratoři je zachycen na obr. 2.21. [138]

Poslední optický prvek, tzv. čtvrtvlnná fázová destička nultého řádu (ZO-QWP, Zero-Order-Quarter-Waveplate) převede kruhově polarizované světlo zpět na lineárně polarizované. Podle orientací rovin tohoto lineárně polarizovaného světla (s nižší hodnotou I_{\max} kvůli částečné absorpci světla při průchodu větším počtem optických prvků v cestě) a původní lineární polarizace na vstupu lze určit poslední čtvrtý parametr popisující polarizační stav světla – tzv. *točivost* se dvěma možnými hodnotami (tzn. *levotočivé* nebo *pravotočivé* kruhově či elipticky polarizované světlo).

Zadání nejruznějších úkolů pro studenty s kvalitativními či kvantitativními odpověďmi lze najít na webových stránkách k úloze vytvořených autorem [139].

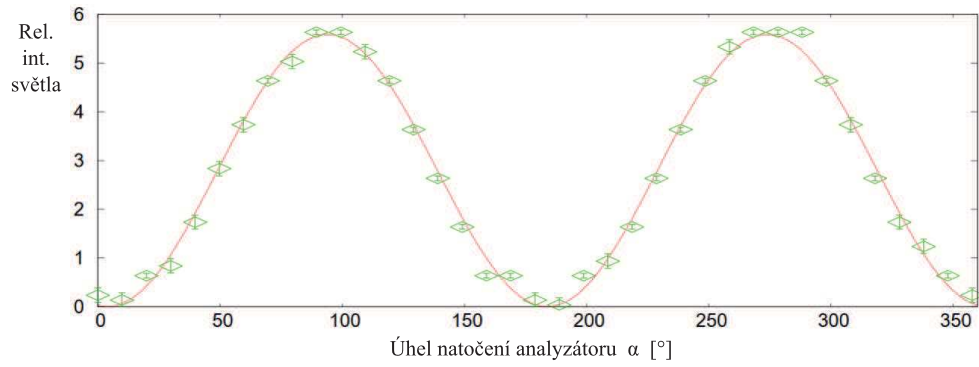
2.3.4 Očekávané výstupy

Ve vzdálené laboratoři pro studium *polarizace světla* mohou zájemci zkoumat různé světelné zdroje z hlediska polarizace světla, které tyto zdroje produkují. Možnosti a získané výsledky prezentuje obrázek [2.22](#).



Obrázek 2.22: Ukázka řídicí webové stránky vzdáleného experimentu *Polarizace světla*, kde lze zkoumat, proměřovat a porovnávat kvalitu světla z různých světelných zdrojů z hlediska polarizace. Pro bílou LED naměříme konstantní závislost, která zde odpovídá nepolarizovanému světlu, neboť všechny náhodné roviny polarizace fotonů mají stejnou pravděpodobnost. Téměř konstantní závislost obdržíme i pro žárovku, jejíž rozřhavané vlákno rovněž produkuje nepolarizované světlo, avšak jeho odrazy na skleněné baňce dochází k částečné polarizaci odrazem. Červená laserová dioda je zdrojem částečně polarizovaného světla. Ve vzdálené laboratoři je dále předvedena aditivita intenzity světla, kdy se naměřené signály prostým způsobem sčítají.

Studenti SŠ se zájmem o fyziku a optiku a studenti souvisejících oborů na VŠ mohou ve vzdáleně řízeném experimentu se snadno stažitelnými experimentálními hodnotami ověřit např. platnost Malusova zákona [2.6](#) pro intenzitu světla prošlého skrz dvojici polarizátorů – viz grafické zpracování naměřené závislosti na obr. [2.23](#).



Obrázek 2.23: Ukázka grafického zpracování závislosti naměřené intenzity světla prošlého skrz dva polarizátory, kde s druhým polarizátorem (tzv. analyzátozem) postupně otáčíme. Experimentální hodnoty byly proloženy příkazem `fit` v programu `gnuplot` modelovou funkcí $I(\alpha) = I_{\max} \cos^2(\alpha - \alpha_{\max})$, která plyne z rovnice 2.7 pro $I_{\min} = 0$ (tzn. efekt *zkřížených polarizátorů*) a je zobecněním vztahu 2.6.

2.4 Vnější fotoelektrický jev

2.4.1 Výchozí stav a motivace

Před stavbou nového vzdáleného experimentu na UK MFF byla k dispozici aparatura ke studiu vnějšího fotoefektu od firmy Phywe, sdílená od r. 2005 v německé otevřené vzdálené laboratoři [140], [141]. V tomto případě se měří velikost brzdného napětí na vakuové fotonce Phywe, ke které je připojen kondenzátor. Tato standardní metoda experimentálního studia vnějšího fotoelektrického jevu se nazývá *nabíjení kondenzátoru na brzdné napětí*. Hodnota brzdného napětí je měřena voltmetrem prostřednictvím vysokoimpedančního operačního zesilovače a je zobrazena na displeji voltmetru, který snímá webkamera – viz obr. 1.5 na str. 20. Uživatel si tedy musí hodnoty brzdného napětí poznamenávat ručně.

Smyslem nového experimentu je vylepšit starší německý vzdálený experiment v mnoha ohledech: jednak realizovat **dvě standardní metody** zkoumání vnějšího fotoelektrického jevu (vedle nabíjení kondenzátoru na brzdné napětí rovněž studium voltampérové charakteristiky vakuové fotonky – tzn. demonstrovat modifikovatelnost vzdálené aparatury), jednak digitalizovat experimentální hodnoty pro následné statistické a grafické zpracování. Měření malých fotoproudů je totiž zatíženo šumem a díky digitalizaci hodnot lze tuto úlohu dále využít pro uvedení problematiky **šumu ve fyzikálních měření** a zavedení tzv. poměru signálu k šumu³⁰ (SNR – signal-to-noise ratio). Pokročilé zpracování experimentálních hodnot vyžaduje použití statistiky na vhodně vybranou oblast dat, kdy lze napětí na kondenzátoru považovat za ustálené, a podobně i experimentální body závislosti $U_0(f)$ lze prokládat modelovou funkcí jen v určitém intervalu, kvůli existenci prahové nebo též mezní hodnoty frekvence světla f_m . Nejdůležitějším cílem grafického zpracování je nakonec určení experimentální hodnoty **Planckovy konstanty** h a materiálové charakteristiky odpovídající výstupní práci a související s mezní frekvencí f_m . Dalším cílem je doplnit experimentální aparaturu o **zdroj záření s podprahovou frekvencí**, a to k ověření prahové povahy vnějšího fotoefektu. V neposlední řadě je snahou odladit měřicí aparaturu tak, aby se experimentální hodnota Planckovy konstanty v rámci chyby měření blížila tabelované hodnotě této fundamentální přírodní konstanty³¹.

Nejdůležitějším vzdělávacím cílem nové vzdálené laboratoře je poskytnout školám významný historický experiment, který vedl ke vzniku kvantové fyziky, ale který se na SŠ zpravidla neprovádí (drahé vybavení, složitost odladění), přičemž si studenti či učitelé mohou vybrat ze dvou standardních metod zkoumání:

1. Jednodušší metodou je **nabíjení kondenzátoru na brzdné napětí**.
2. Více komplexní úloha **studium voltampérové charakteristiky vakuové fotonky** je vhodná především pro studenty elektrotechnických oborů.

³⁰SNR – signal-to-noise ratio, poměr signálu k šumu byl pro zjednodušení náročného tématu z e-textu vypuštěn. Jeho zavedení je ponecháno na rozhodnutí učitele.

³¹V mnohých laboratorních měřeních včetně studia vnějšího fotoefektu lze zpravidla experimentálně určit hodnotu poměru h/e , kde h je Planckova konstanta a e je velikost náboje elektronu. Historicky se o první vyčerpávající experimentální prozkoumání fotoelektrického jevu a o přesné proměření Planckovy konstanty, resp. poměru h/e zasloužil Robert A. Millikan. Podrobně je historie objevu a zkoumání vnějšího fotoelektrického jevu zpracována např. v bakalářské práci H. Martináskové [142].

Design této vzdáleně řízené úlohy umožňuje naměřit nesmyslné či pro vyhodnocení nepoužitelné výsledky (např. při opomenutí vybití kondenzátor před začátkem dalšího měření), případně je vhodný pro badatelsky orientovanou výuku s možností realizovat netradiční způsob zpracování hodnot³². Kvantová fyzika patří k důležitým, avšak obtížnějším tématům pro studenty a zařazení významných historických experimentů do výuky může významně přispět k lepšímu pochopení problematiky. **Pokročilé grafické zpracování** má být v tomto případě využito ke splnění tří zásadních úkolů:

1. Ověření platnosti Einsteinovy rovnice pro vnější fotoefekt – tzn. všechny experimentální body nad prahovou frekvencí musí v rámci chyby měření ležet na přímce.
2. Ověření prahové povahy vnějšího fotoefektu – tzn. některý bod s nižší frekvencí³³ na výše uvedené přímce neleží.
3. Vyhodnocení experimentální hodnoty Planckovy konstanty a „výstupní práce“ včetně odhadu chyby výsledků.

Vlastní měření i zpracování naměřených hodnot poskytuje **velký prostor pro kritické zhodnocení přesnosti měření** a pro cennou **diskusi výsledků** – podrobněji je problematika rozebrána v částech *Metodika použití...* a *Očekávané výstupy...*

2.4.2 Vývoj, návrh a stavba vzdáleného experimentu

Pro stavbu³⁴ nové vzdálené laboratoře k tématu *vnější fotoefekt* bylo použito toto nezbytné vybavení: vakuová fotonka³⁵ a dodávaný vysokoimpedanční operační zesilovač (staršího typu) ze školní soupravy od firmy Phywe. Kvůli omezenému rozpočtu bylo nutné najít levnější rtuťovou výbojku pokud možno s větším příkonem, než poskytovala originální a nákladná výbojka ze soupravy Phywe. Jako zdroj spektrálních čar byla doktorandem vytipována snadno dostupná průmyslová rtuťová výbojka s příkonem 125 W, která je vhodná pro nepřetržitě běžící

³²Talentovaní studenti se např. mohou zamyslet nad způsobem vyhodnocení velikosti brzdného napětí z voltampérových charakteristik včetně možné chyby měření. Nebo např. studiem časové závislosti napětí na kondenzátoru jak s vybitím, tak bez vybití kondenzátoru a při vhodném postupu měření lze omezit hodnotu brzdného napětí z obou stran.

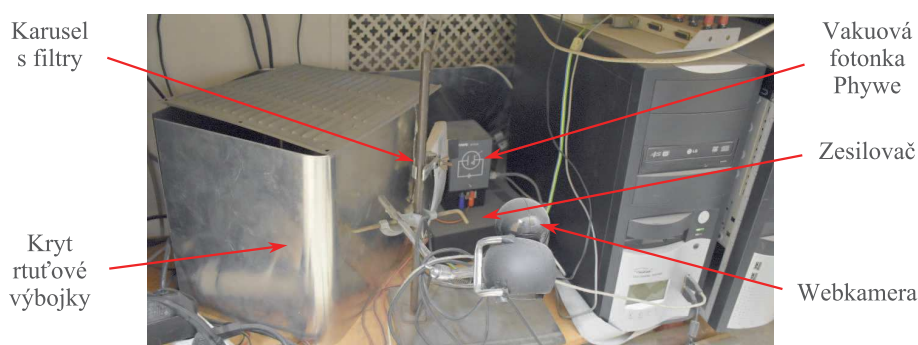
³³Na rozdíl od německého vzdáleného experimentu v české laboratoři www.ises.info je k dispozici alespoň jedna podprahová frekvence odpovídající infračervenému světlu o vlnové délce 940 nm.

³⁴Nový vzdálený experiment byl postaven a odladěn doktorandem v jeho prvním roce studia. Většina pomůcek byla předtím opatřena školitelem: vakuová fotonka od fy Phywe, sada pěti přesných interferenčních filtrů pro výběr jednotlivých spektrálních čar rtuti, laboratorní karusel od fy Thorslab, vysokoimpedanční operační zesilovač od fy Phywe (starší typ) určený pro tento experiment, PC/server a měřicí systém ISES Pro. Výběr těchto pomůcek nemohl doktorand ovlivnit. Další kus vakuové fotonky Phywe, originální rtuťovou výbojku včetně zdroje ze stejné soupravy Phywe pro srovnávací měření a vývojové účely dočasně laskavě zapůjčil konzultant prof. F. Schauer (Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně).

³⁵Vakuová fotonka Phywe má výrobcem deklarovaný materiál fotokatody Cs-Sb (cesium-antimon) a je určena pro obor vlnových délek světla 185–650 nm. Při napětí 15 V dosahuje temný proud hodnoty 2,0 pA. Kapacita fotonky je asi 2 pF. Výstupní práce má hodnotu v intervalu 1,6–1,65 eV. [144], [145]

vzdálený experiment včetně snadné možnosti výměny. Další nezbytnou pomůckou byla tlumivka pro tuto výbojku a sada pěti přesných interferenčních filtrů, které vyberou určitou spektrální čáru z emisního spektra rtuti. Výměnu filtrů zajišťuje laboratorní karusel firmy ThorsLab, připojitelný k PC přes USB port.

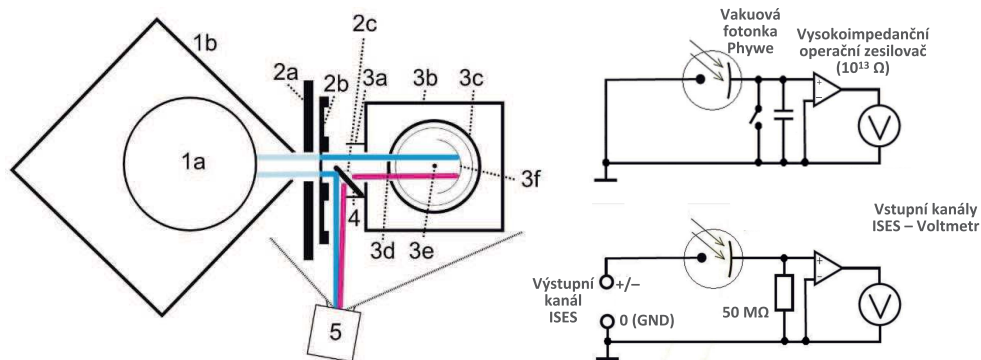
Vysokoimpedanční operační zesilovač byl doktorandem upraven na sledovač. Rtuťová výbojka vyzařuje čáry s modulací intenzity světla na dvojnásobku síťové frekvence. Pro účely studia voltampérové charakteristiky bylo proto nutné vyřešit **problém s aliasingem** při frekvenci signálu 100 Hz, a to návrhem a realizací jednoduchých RC filtrů, dále volbou vhodné vzorkovací frekvence i způsobem předzpracování hodnot. Pro naměření VA charakteristiky zde důležitou roli hraje též luminofor na vnitřní straně skleněné baňky rtuťové výbojky; při odstranění této baňky nebylo možné experimentální hodnoty použít ke zpracování kvůli jejich značnému zkreslení aliasingem a aparaturu by bylo nutné pečlivě zakrýt kvůli produkci intenzivního ultrafialového světla na úkor chlazení, což je v rozporu s požadavkem na nepřetržitý provoz vzdáleného experimentu. Pomocí zmíněných RC filtrů lze nastavit kompromisní hodnotu poměru signálu k šumu při dostatečné úrovni signálu. Aktuální snímek vzdálené aparatury je uveden na obr. 2.24, uspořádání je podrobně popsáno v obr. 2.25.



Obrázek 2.24: Aktuální snímek vzdáleně řízené aparatury v úloze *Vnější fotoelektrický jev*. Uspořádání aparatury je podrobně popsáno ve schématu na obr. 2.25.

Pro realizaci vzdáleného měření pomocí dvou standardních metod (nabíjení kondenzátoru a VA charakteristika vakuové fotonky) byl využit měřicí systém ISES Professional a deska s 16 relé. Výstupním kanálem panelu ISES Professional lze přímo nastavit napětí na fotonce. Využití všech 16 relé umožňuje změnit zapojení elektrického obvodu s fotonkou, vysokoimpedančním operačním zesilovačem a s voltmetry včetně správného uzemnění, a to pro měření oběma metodami na jediné měřicí aparatuře! Zjednodušené schéma zapojení je uvedeno na obr. 2.25. Při studiu VA charakteristiky může uživatel nastavit tři různá zesílení fotoproudu³⁶. Při největším zesílení je patrný **parazitní jev** – fotoefekt na anodě způsobený jistým množstvím světla odraženého od velké plochy fotokatody – viz obr. 2.29 dále na str. 76. Vnější fotoelektrický jev lze demonstrovat

³⁶Vysokoimpedanční operační zesilovač měří buď napětí přímo na kondenzátoru, nebo měří napětí na sadě rezistorů, odkud lze ze znalosti napětí a hodnoty elektrického odporu v řádu desítek megaohmů vypočítat velikost fotoproudu podle Ohmova zákona.



Obrázek 2.25: Schéma uspořádání (vlevo) a zjednodušená schémata zapojení el. obvodu pro nový vzdálený experiment *Vnější fotoefekt*. Vpravo nahoře je schéma pro metodu měření *nabíjení kondenzátoru na brzdné napětí*, vpravo dole pro *studium VA charakteristiky vakuové fotonky*. Legenda k uspořádání aparatury:
 1 – zdroj světla (1a – rtuťová výbojka 125 W; 1b – kryt a stínítko výbojky).
 2 – výběr vlnové délky monochromatického světla dopadajícího na fotokatodu (2a – stínítko filtrového kola; 2b – otočný karusel s filtry kromě zakryté pozice „0“; 2c – vysoce svítivá infračervená LED 940 nm s širším úhlem vyzařování).
 3 – vakuová fotonka Phywe (3a – boční stínítko; 3b – kryt; 3c – vnitřní stínítko fotonky se dvěma okénky; 3d – stínítko anody mezi dvěma vstupními okénky pro světlo; 3e – anoda v ose symetrie fotokatody; 3f – fotokatoda).
 4 – bílá destička pro odraz světla do webkamery pro kontrolu vzdál. uživatelem.
 5 – webkamera (mírně zkresluje barvy a je citlivá i mimo viditelný obor spektra).

při nejmenším, případně středním zesílení fotoproudu, kdy jsou parazitní jevy nepatrné a nekomplikují kvalitativní závěry. Avšak právě díky parazitnímu jevu lze demonstrovat další jev *nasycení fotoproudu*, který pro fotokatodu nastává při podstatně větších hodnotách napětí³⁷. Typické výsledky měření i jeho zpracování jsou uvedeny v části *Očekávané výstupy*. Přímý odkaz na řídicí webovou stránku, resp. na hlavní rozcestník je:

<http://kdt-29.karlov.mff.cuni.cz/>.

³⁷Srovnávací měření VA charakteristiky použité vakuové fotonky Phywe bylo provedeno standardním laboratorním pikoampérmetrem Keithley 6487 s integrovaným řízeným zdrojem napětí. Díky jeho většímu rozsahu napětí se podařilo pozorovat a ověřit nasycení fotoproudu až v řádu několika desítek voltů. Zahrnutí tohoto pozorování do vzdálené úlohy by neúměrně zkomplikovalo návrh aparatury a významně by prodloužilo dobu vzdáleného měření. Shodou okolností lze však pozorovat jev *nasycení fotoproudu* při parazitním fotoefektu na anodě. VA charakteristika naměřená novou vzdáleně řízenou aparaturou je kvalitativně stejná jako charakteristika naměřená přístrojem Keithley. Jistý posun charakteristiky ve směru osy napětí nehraje významnou roli pro určení experimentální hodnoty Planckovy konstanty a příslušné zkreslení hodnoty výstupní práce zde není podstatné řešit. Při precizním zaměření a přímém osvětlení *anody* červeným laserovým paprskem se podařilo pozorovat nasycení fotoproudu jak pro fotoefekt na původní fotokatodě, tak pro fotoefekt na anodě, jehož hodnota nasyceného fotoproudu byla v tomto případě asi 2–3× větší než pro původní fotokatodu s velikou plochou. Tím lze prezentovanou interpretaci výsledků s *parazitním fotoefektem na anodě* považovat za experimentálně ověřenou.

2.4.3 Metodika použití vzdáleného experimentu ve výuce

E-texty ke vzdálené úloze na vnější fotoelektrický jev poskytují studentům a učitelům na výběr jednak ze dvou možných postupů výkladu a experimentálního studia: heuristický či verifikační postup, jednak lze vybírat ze dvou standardních metod měření: nabíjení kondenzátoru na brzdné napětí nebo studium voltampérové charakteristiky vakuové fotonky. Metody jsou podrobně a názorně vysvětleny ve studijních e-textech³⁸

Metoda **nabíjení kondenzátoru** je celkově jednodušší, neboť obnáší přímé určení hodnot brzdného napětí v závislosti na vlnové délce, resp. frekvenci monochromatického světla dopadajícího na fotokatodu. Hodnotu brzdného napětí lze s nějakou chybou nejrychleji odhadnout pohledem na údaj napětí zobrazený číselně na řídicí webové stránce (a to po jeho relativním ustálení, kdy lze kondenzátor považovat za maximálně nabitý). Při pečlivějším postupu je třeba zaznamenat časovou závislost napětí měřeného na kondenzátoru, kdy pozorujeme vlastní děj nabíjení kondenzátoru. Učitel by měl studentům připomenout, že **záznam měření** logicky probíhá od okamžiku stisknutí tlačítka „Start záznamu“ do okamžiku stisknutí tlačítka „Stop záznamu“. Navíc může studentům napovědět, že nemá smysl nahrávat časovou závislost od začátku, ale je užitečné stisknout tlačítko „Start záznamu“ až chvíli (např. 10–15 s) po **spuštění měření jiným tlačítkem „Start“**, tedy v nějakém okamžiku, jakmile se tempo růstu napětí zpomalí, resp. napětí lze považovat za ustálené. Bude zaznamenán velký počet hodnot, jenž je úměrný délce záznamu. Naměřené hodnoty vykazují značný šum, protože kondenzátor je nabíjen maličkým fotoproudem³⁹ a nevyhnutelně dochází k samovybíjení a úniku elektronů (jednak ve fotonce samotné, jednak při zesílení signálu operačním zesilovačem s obrovským vstupním odporem $10^{13} \Omega$). Opět může učitel studentům napovědět (nebo to musí studenti vymyslet sami), že naměřené hodnoty *relativně ustáleného* napětí je třeba snadno stáhnout do Excelu a **zprůměrovat** a k tomu je navíc potřebné **odhadnout možnou chybu měření**, a to na základě pozorovaného rozptylu hodnot, ale i s ohledem na případnou tendenci dalšího růstu napětí (matematicky by ustálení napětí nastalo za nekonečně dlouhou dobu). Experimentální určení brzdného napětí je třeba takto provést pro 3 až ideálně 5 dostupných frekvencí f , resp. vlnových délek λ . Při osvětlení fotokatody infračervenou LED (940 nm) k žádnému nabíjení nedochází, napětí na kondenzátoru zůstává nulové, fotoefekt tedy pro podprahové frekvence světla nenastává – viz ukázka řídicí webové stránky na obr. 2.26 včetně komentářů.

Druhá metoda **studium voltampérové charakteristiky vakuové fotonky** je více komplexní a vhodná především pro studenty elektrotechnických oborů, pro které je znalost VA charakteristik různých elektrosoučástek zásadní. Samozřejmě je využitelná i např. pro studenty ve volitelném semináři z fyziky na gymnáziu. Tato metoda nevyhnutelně obnáší záznam VA charakteristiky, ve které pozorujeme nejdříve konstantní část a poté objev a nárůst fotoproudu od určité hodnoty napětí, jež právě odpovídá brzdnému napětí $U_0(f)$ pro určitou frekvenci f světla aktuálně dopadajícího na fotokatodu. Podstatou metody je **odečtení hod-**

³⁸<http://www.ises.info/index.php/cs/laboratory/experiment/photoelectric-effect-VA>

³⁹Fotonku nelze považovat za tzv. „tvrdý zdroj“ el. proudu jako např. nabitý akumulátor, novou baterii apod. Proto pozorovaná časová závislost není nutně typickou závislostí exponenciální: $U(t) = U_0(1 - e^{-t/\tau})$, kde t je čas a τ charakteristická časová konstanta, jakou bychom jistě naměřili s „tvrdým zdrojem“.

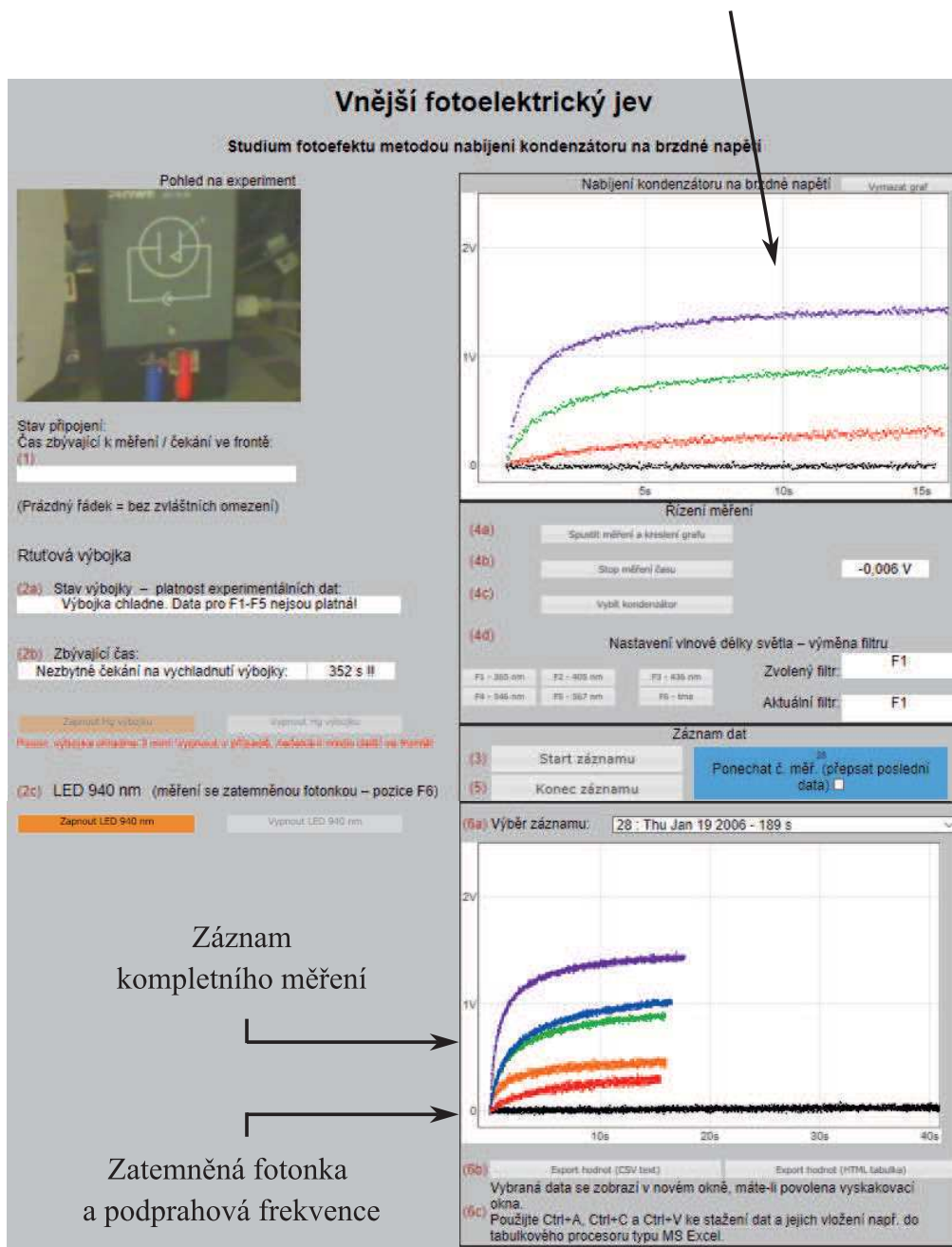
noty z grafu VA charakteristiky. Úkol však komplikuje parazitní fotoefekt na anodě, na kterou dopadá menší část světla odraženého od velké plochy fotokatody. Proto konstantní část VA charakteristiky probíhá nikoliv na nulové hodnotě fotoproudu, ale v nižších záporných hodnotách a prakticky zde pozorujeme jev *nasyčení fotoproudu*. Druhou komplikací je dříve zmíněný **šum**. Naměřený signál je součtem vnějšího fotoefektu na fotokatodě i na anodě. Pokud budeme druhý ze signálů považovat za zanedbatelný oproti prvnímu, pak lze doporučit určit hodnotu brzděného napětí jako **průsečík VA charakteristiky s vodorovnou osou napětí na fotonce U** . Kvůli šumu a rozptylu hodnot i v tomto případě je nutné odhadnout možnou chybu měření, kterou lze doporučit bezpečně navýšit právě kvůli zmíněnému problému s parazitním jevem. Hodnoty brzděných napětí lze tedy určit s možnou relativní chybou měření okolo 10 %, příp. větší. Při osvětlení fotokatody infračervenou LED (940 nm) zůstává hodnota fotoproudu prakticky na nule, fotoproud se neobjeví. Stejný výsledek bude naměřen s neosvětlenou a zcela zakrytou fotonkou. Ve skutečnosti má lineární VA charakteristika v těchto dvou případech nepatrnou kladnou směrnici, na základě které lze odhadnout míru úniku elektronů v samotné fotonce – viz ukázka řídicí webové stránky na obr. 2.27 včetně komentářů.

Při **heuristickém postupu**, který připomíná historickou cestu k objevení a experimentálnímu zkoumání pozoruhodných vlastností vnějšího fotoelektrického jevu, je nejprve potřeba zařadit vzdálený experiment včetně jeho zpracování, tzn. experimentálně naměřené hodnoty brzděného napětí zpracovat ve formě grafu lineární závislosti velikosti brzděného napětí na frekvenci monochromatického světla dopadajícího na fotokatodu $U_0(f)$. V grafu je třeba ukázat tzv. **mezní frekvenci f_m** jako průsečík přímky s vodorovnou osou frekvence f . Následně lze studentům vysvětlit, že podstatou experimentu je měření **maximální kinetické energie** elektronů právě vylétávajících z fotokatody, jež je úměrná hodnotě brzděného napětí a nemůže být záporná. Nakonec zmíníme Einsteinovo vysvětlení vnějšího fotoefektu a je vhodné studenty upozornit, že tzv. **výstupní práce** v grafu odpovídá vzdálenosti průsečíku experimentální přímky se svislou osou (napětí), kterou měříme od vodorovné osy (frekvence) – viz též obr. 2.30 dále na str. 77.

Při **verifikačním postupu** je vhodné stručně popsat historickou cestu a vysvětlit Einsteinovo zdůvodnění fotoefektu včetně Einsteinovy rovnice pro vnější fotoefekt a následně teorii ověřit ve vzdálené laboratoři.

Pro oba zmíněné postupy je **na začátku třeba popsat experimentální uspořádání experimentu** i zvolenou metodu měření. V případě volby *studia VA charakteristiky vakuové fotonky* je výhodné použít **interaktivní simulaci** pro vnější fotoelektrický jev z projektu PhET [58] – viz obr. 2.28. Tato zpracovaná simulace poskytuje vzhled do vakuové fotonky, vizualizuje děje i modely částic (elektronů a fotonů), což má za cíl záměrně akcentovat *korpuskulární charakter světla*. Kromě názorného pozorování vlastních dějů ve fotonce a efektu, jak napětí přiložené na fotonku ovlivňuje pohyb elektronů vyražených z fotokatody, může současně student při změnách příslušných parametrů sledovat vykreslování nejdůležitějších závislostí $I(U)$ či $U_0(f)$, kde I je fotoproud, U je napětí na vakuové fotonce a $U_0(f)$ označuje velikost brzděného napětí, které závisí na frekvenci f monochromatického elektromagnetického záření dopadajícího na fotokatodu. Simulace PhET tedy názorně ilustruje a vysvětluje způsob měření maximální ki-

Nabíjení kondenzátoru na brzdné napětí (časová závislost)
při osvětlení fotokatody světlem s různou frekvencí f .




Obrázek 2.26: Ukázka řídicí webové stránky pro demonstraci a vzdálené proměření historického experimentu *vnější fotoelektrický jev* metodou nabíjení kondenzátoru na brzdné napětí. Učitel a uživatel má k dispozici 5 frekvencí, kdy nastává fotoefekt, a jednu tzv. podprahovou frekvenci, kdy žádné nabíjení nepozorujeme podobně jako při zatemněné fotonce (tzn. napětí zůstává nulové).

VA charakteristiky se protínají, protože se liší intenzity jednotlivých spektrálních čar rtuti.

Vnější fotoelektrický jev
Volt-ampérová charakteristika vakuové fotonky

Pohled na experiment – kontrolka pro LED 940 nm
Poznámka: Kamera zkontroluje barvy



Stav připojení
Čas číselník k měření / sekunda ve frekvenci:

(Prázdný řádek = bez omezení; odpojení po 3 min neaktivity.)

Rtuťová výbojka

Stav výbojky – platnost experimentálních dat:
Výbojka je zapnuta. Data jsou platná.

Zbývající čas:
Výbojka bude automaticky vypnuta za: 59323 s !!

Vypnout Hg výbojku

Pozn: výbojka zintarňuje 3 min výbojku v efektivitě, horková (1-1000 stat) ve vlně

LED 940 nm (měření se zatemněnou fotonkou – pozice F6; příp. test kamery)

Zapnout LED 940 nm Vypnout LED 940 nm

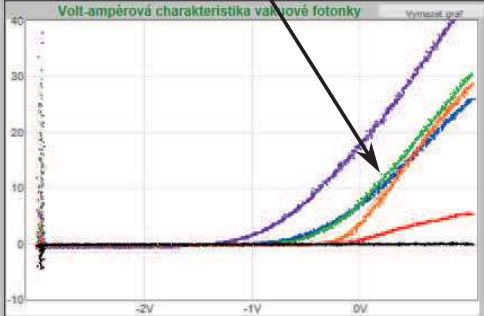
Zesílení! (Doporučeno velké zesílení)

Malé Střední Velké zesílení

Měření s rezistorem:
100 megaohmů

[Popis a návod](#) (Stará verze v AJ)
[Sdílejší text and úkoly](#)

Volt-ampérová charakteristika vakuové fotonky Vymazat graf



Rízení napětí na fotonce

Ručná: (Rychlá změna způsobi větší kum) -2,976 V
Automaticky: -0,354 pA

START (Opatření) STOP

Změna vlnové délky – výběr filtru

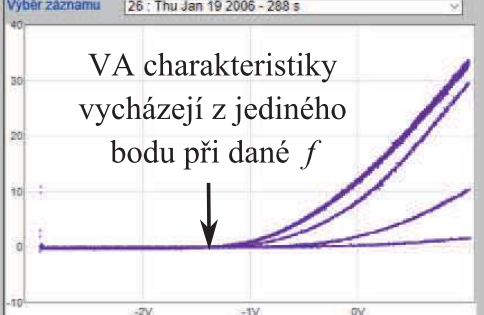
F1 – 365 nm	F2 – 405 nm	F3 – 438 nm	Zvolený filtr: F6
F4 – 546 nm	F5 – 567 nm	F6 – 610 nm	Aktuální filtr: F6

Záznam měření s grafickým zobrazením a exportem dat (graf níže)

Ponechat č. měř. Start záznamu Stop záznamu

Výběr záznamu: 26: Thu Jan 19 2006 - 288 s

VA charakteristiky vycházejí z jediného bodu při dané f

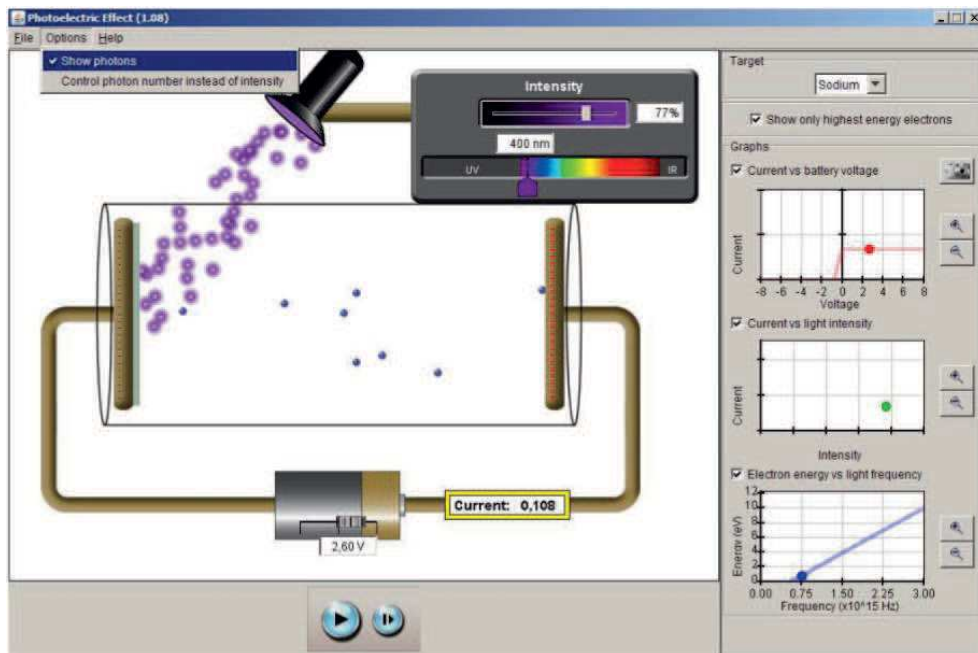


Export hodnot (CSV text) Export hodnot (HTML tabulka)

(Data se zobrazí v novém okně, pokud Vás prohlížeč podle nastavení blokuje vyskakovací okna, zkuste opakovaně kliknout se stisknutou klávesou [CTRL]. Přenos dat může trvat až desítky sekund.)
Ke stažení lze využít [CTRL+A], [CTRL+C], [CTRL+V].

Záznam opakovaného měření při $\lambda = 365$ nm při zahřívání výbojky

Obrázek 2.27: Ukázka řídicí webové stránky pro demonstraci a vzdálené proměření historického experimentu *vnější fotoelektrický jev*, a to proměření volt-ampérových (VA) charakteristik vakuové fotonky při osvětlení fotokatody monochromatickým světlem o různé frekvenci f . Učitel a uživatel má k dispozici 5 frekvencí, kdy nastává fotoefekt, a jednu tzv. podprahovou frekvenci, kdy se žádný fotoproud neobjeví podobně jako při zatemněné fotonce (tzn. fotoproud prakticky zůstává nulový, pouze při velkém zesílení lze grafickým zpracováním záznamu měření vyhodnotit velikost tzv. temného proudu).



Obrázek 2.28: Simulace z projektu PhET pro ilustraci a výklad metody zkoumání i pozoruhodných vlastností *vnějšího fotoelektrického jevu*. Změnou napětí na fotonce lze názorně ovlivňovat pohyb elektronů vyražených z fotokatody. Současně je možné s pozorováním jevů zapnout vykreslování grafů nejdůležitějších závislostí a případně použít tlačítko pro tvorbu snímku těchto grafů pro porovnání v případě změny nastavení parametrů. Dále lze v zaškrtačím políčku zapnout či vypnout zobrazení pomalejších elektronů. Navíc lze v zobrazeném menu zapnout zobrazení fotonů a zdůraznit tím korpuskulární charakter světla. [58]

netické energie elektronů. Konkrétní příklady postupu výkladu jsou naznačeny v e-textech k této vzdálené úloze. E-text k metodě nabíjení kondenzátoru odpovídá verifikačnímu postupu, naopak e-text pro studium VA charakteristiky je blízký heuristickému postupu.

Literatura dále zmiňuje **problém s nepřesností** v tradičním výkladu výstupní práce, kdy je skutečný vztah prahové frekvence a výstupní práce poněkud komplikovanější – při přesném rozboru je totiž nezbytné uvážit takzvané *kontaktní potenciály* [143]. Výklad pojmu výstupní práce se po zvážení nakonec drží zjednodušené verze v učebnicích z těchto důvodů:

1. Další komplikace již tak obtížného tématu by mohla být kontraproduktivní.
2. Jedním z cílů vytvořených e-textů je přiblížit studentům historický sled objevů a interpretací experimentálních výsledků; v počátcích nebyla problematika tzv. kontaktního potenciálu řešena.
3. Záměrem autora je co možná nejkratší délka studijního e-textu s teorií.
4. Pozornost je věnována grafickému zpracování dat, kde lze veškerou netriviální interpretaci pojmu výstupní práce zahrnout do jediného parametru

(absolutního členu v modelové funkci), který je pro jednoduchost na základě historického postupu přímo ztotožněn s výstupní prací.

Vhodným řešením formulace v e-textu může být zmínka problému s kontaktními potenciály v poznámce pod čarou.

Jedním z důležitých cílů nové vzdálené laboratoře na téma *vnější fotoelektrický jev* je, aby si studenti vyzkoušeli **statistické a grafické zpracování měření**. Navíc si studenti v rámci tohoto tématu vyzkouší práci s velkými či malými řády (to znamená práci s tzv. **semilogaritmickým tvarem** zápisu reálných čísel) a získají zkušenost s **vhodnou volbou jednotky** a samozřejmě si procvičí převody jednotek. Je nezbytné studenty upozornit, že zejména pro grafické zpracování v Excelu je třeba frekvenci počítat v **petahertzích** ($[f] = \text{PHz} = 10^{15} \text{ Hz}$), brzdné napětí ve voltech ($[U_0] = \text{V}$) a obě tyto jednotky používat v popiskách os grafu i v tabulce se zpracovanými naměřenými hodnotami. Jinak by mohl mít Excel problém s malým řádem směrnice přímký A a přesnost určení této směrnice by byla malá! Je třeba studentům zdůraznit, že aplikace statistického zpracování zde pomáhá řešit problém s šumem. Pro statistické i grafické zpracování lze využít běžný tabulkový procesor typu MS Excel (případně jiný vědecký software jako např. **gnuplot**, ale i lepší vědecké kalkulátory s lineární regresí), neboť modelovou funkcí pro naměřenou velikost brzdného napětí $|U_0(f)|$ je jednoduchá lineární závislost se dvěma neznámými parametry – směrnici A ($[A] = \text{V/PHz}$) a absolutním členem B ($[B] = \text{V}$):

$$|U_0(f)| = \frac{h}{e} \cdot \frac{c}{\lambda} - \frac{W}{e} = \frac{h}{e} \cdot f - \frac{W}{e} = A \cdot f + B, \quad (2.10)$$

odkud porovnáním jednotlivých členů plynou vztahy pro výpočet experimentální hodnoty Planckovy konstanty h i materiálové charakteristiky „výstupní práce“ W (s uvedenými správnými a vhodnými jednotkami)

$$h_{[\text{Js}]} = \frac{10^{-15} \text{ PHz}}{\text{Hz}} \cdot e_{[\text{C}]} \cdot A_{[\text{V/PHz}]}, \quad (2.11)$$

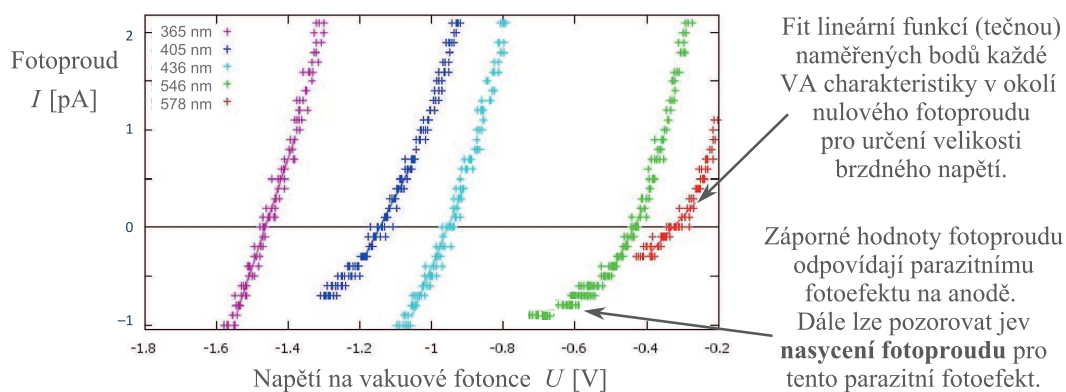
$$W_{[\text{J}]} = -eB, \quad W_{[\text{eV}]} \equiv -B, \quad (2.12)$$

kde $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ je velikost náboje elektronu a potom coulomb-volt rozměrově odpovídá jednomu joulu a Hz^{-1} jedné sekundě v jednotce Planckovy konstanty h . [7](#)

2.4.4 Očekávané výstupy

Ukázka grafického zpracování naměřených VA charakteristik, kde je podstatné pouze menší okolí okolo nulové hodnoty fotoproudu (tzn. okolo průsečíku VA charakteristiky s vodorovnou osou napětí), je uvedena na obr. [2.29](#).

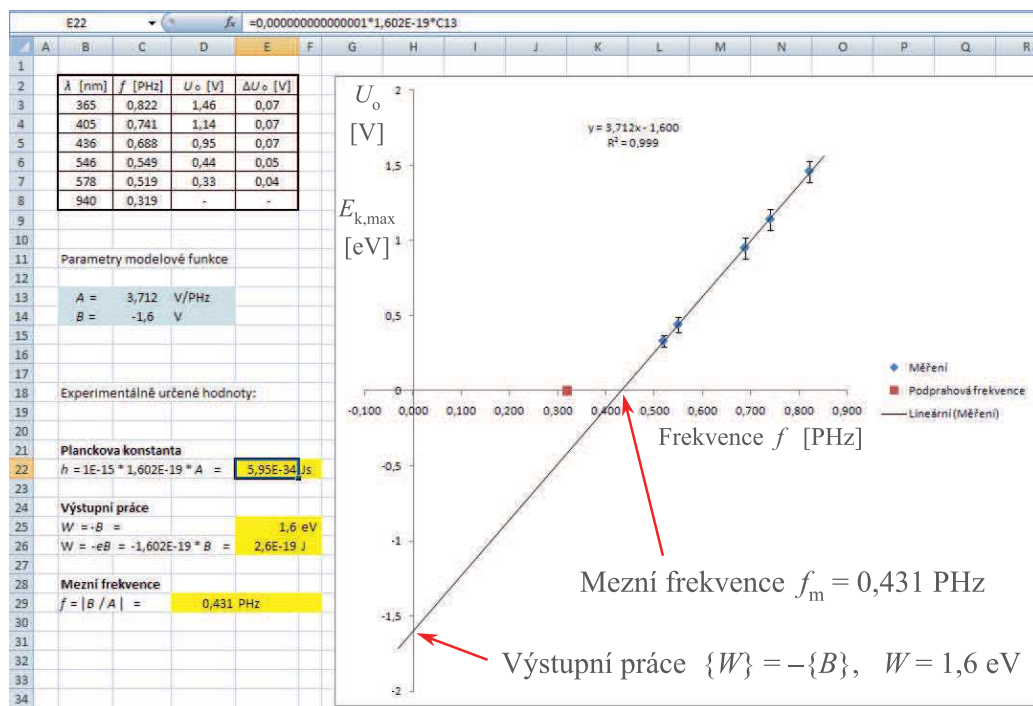
Z obou metod měření nabíjení kondenzátoru i *VA charakteristiky* lze na základě doporučeného postupu, který byl podrobně popsán v předchozí části *Metodika...*, získat prakticky stejné hodnoty brzdného napětí U_0 v závislosti na frekvenci záření f dopadajícího na fotokatodu. Typické výsledky včetně možné relativní chyby měření okolo 10 % (viz zdůvodnění šumem a vlivem *parazitního fotoefektu na anodě* na str. 71) jsou shrnuty v tabulce 2.1. Ukázkové zpracování tohoto měření v programu MS Excel je uvedeno na obr. 2.30. Nezbytné nastavení v různých dialogových oknech programu MS Excel (zde ve verzi 2007) je zachyceno na obr. 2.31.



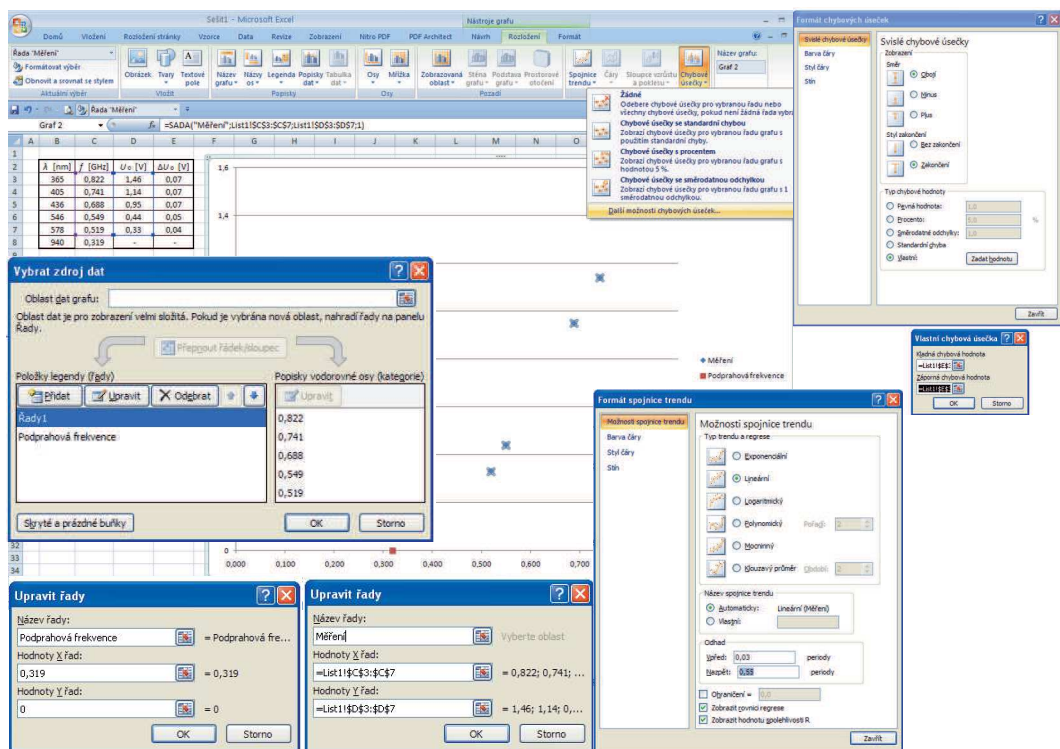
Obrázek 2.29: Ukázka aplikace grafického zpracování naměřených voltampérových charakteristik vakuové fotonky, kdy je měření malých fotoproudů nevyhnutelně zatíženo šumem. Naměřenými body v okolí nulového fotoproudu (zde předpokládáme objev a nárůst fotoproudu, jenž má pro vnější fotoefekt na fotokatodě oproti parazitnímu fotoefektu na anodě o několik řádů vyšší úroveň) byly proloženy lineární funkce, tzn. tečny k VA charakteristikám v těchto průsečících s vodorovnou osou napětí, aby z x -ových souřadnic průsečíků tečen s vodorovnou osou mohly být vyhodnoceny velikosti brzdného napětí pro jednotlivé frekvence (resp. vlnové délky) monochromatického světla dopadajícího na fotokatodu. Od velké plochy fotokatody se nevyhnutelně odráží malá část světla a způsobuje parazitní fotoefekt na anodě, pro který můžeme v záporných hodnotách fotoproudu pozorovat jev **nasycení fotoproudu**. Pro měření a vyhodnocení VA charakteristik je vhodné nastavit nejvyšší úroveň zesílení fotoproudu.

Tabulka 2.1: Naměřené hodnoty brzdného napětí ze vzdálené úlohy *Vnější fotoefekt*

λ nm	f 10^{15} Hz	U_0 V
365	0,822	$1,46 \pm 0,07$
405	0,741	$1,14 \pm 0,07$
436	0,688	$0,95 \pm 0,07$
546	0,549	$0,44 \pm 0,05$
578	0,519	$0,33 \pm 0,04$
940	0,319	–



Obrázek 2.30: Ukázkové grafické zpracování výsledků ze vzdáleného měření úlohy *Vnější fotoelektrický jev* v programu MS Excel včetně nejdůležitějších komentářů ke grafu. Experimentálně určená hodnota Planckovy konstanty s rel. chybou 10 % je v tomto případě $h_{exp} \doteq (6,0 \pm 0,6) \cdot 10^{-34}$ Js. S ohledem na skutečnost, že všechny experimentální body s výjimkou podprahové frekvence leží na přímce odpovídající modelové funkci 2.10, podařilo se Einsteinovo vysvětlení včetně prahové povahy fotoefektu experimentálně ověřit. Měření je však zatíženo systematickou chybou okolo 10 %, protože experimentální hodnota se liší od tabelované hodnoty $h_{tab} \doteq 6,63 \cdot 10^{-34}$ Js. Zdroje systematické chyby lze určit jen s obtížemi; jedním z nich může např. být parazitní jev pozorovaný na obr. 2.29, dále temný proud uváděný výrobcem [145] apod. Hodnota výstupní práce je $W \doteq (1,6 \pm 0,2)$ eV, která se dobře blíží hodnotám uváděným v literatuře pro materiál fotokatody Cs-Sb 1,6–1,65 eV [144].



Obrázek 2.31: Ukázka různých dialogových oken v programu MS Excel (2007) pro pokročilé optimální nastavení grafu, a to za účelem grafického zpracování vzdáleného měření v úloze *vnější fotoelektrický jev*. Názvy dialogových oken z levého dolního do pravého horního rohu jsou: „Vybrat zdroj dat“ a 2× „Upravit řady“, kde lze nastavit vhodný popis ke grafu; dále „Formát spojnice trendu“, „Vlastní chybová úsečka“ a „Formát chybových úseček“. Pro zobrazení a nastavení chybových úseček je třeba kliknout do grafu na některý bod a v horním menu se přepnout na záložku „Rozložení“, kde lze příslušnou možnost najít. Po dokončení nastavení chybových úseček budou zobrazeny chybové úsečky pro obě osy. Jednoduchým kliknutím myši na x -ovou chybovou úsečku a stisknutím klávesy „Del“ lze x -ové chybové úsečky snadno smazat, protože díky použití interferenčních filtrů známe vlnové délky monochromatického světla s vysokou přesností.

2.5 Studium spekter

2.5.1 Motivace pro vznik vzdáleného experimentu

Smyslem čtvrté nové vzdálené aparatury bylo umožnit proměření dalšího významného pozorování v historii fyziky, které vedlo ke zrodu kvantové fyziky. Studenti zpravidla mají při školní výuce možnost si nějaká spektra prohlédnout (např. sluneční spektrum, spektrum klasické žárovky a běžné rtuťové zářivky, někdy dokonce i spektrum vodíku a dalších plynů, je-li škola vybavena sadou tzv. Geisslerových trubic a zdrojem vysokého napětí), ale to pouze kvalitativně bez podrobnějšího proměřování. Při tomto vizuálním pozorování jsou studenti omezeni citlivostí lidského oka na relativně úzký obor vlnových délek v rozsahu orientačně 380–750 nm [149]. V případě vzdáleně řízeného měření lze využít citlivost sdíleného spektrometru v podstatně širším spektrálním oboru vlnových délek, a tedy student má možnost proměřit více experimentálních bodů, než kolik jich lze pozorovat prostým okem. Vzdálený experiment rovněž řeší problém s nutností používat zdroj vysokého napětí pro Geisslerovy trubice plněné vodíkem.

Stavba nového vzdáleného experimentu byla motivována rovněž posledními alarmujícími výsledky pedagogických výzkumů v oblasti výuky kvantové fyziky, realizovanými t. č. doktorandkou Lanou Ivanjekovou a kol. na amerických a evropských studentech⁴⁰ [146]. Kurikula středních i vysokých škol jsou v obou zemích srovnatelná a kladou důraz na správné porozumění principu vzniku čárových spekter, což je klíčová prerekvizita pro pochopení kvantové mechaniky i měření v astrofyzice. Čtyřletý výzkum prověřoval u více než 1000 studentů úvodního kurzu fyziky znalosti a pochopení faktu, že vznik čárových spekter je spojen s přeskoky elektronů mezi diskrétními hladinami energie v atomech, i schopnost studentů přiřadit k danému spektru správný zdroj světla. Většina studentů si podle této studie mylně spojuje vznik spektrální čáry pouze s jednou energetickou hladinou. Pouhých 20–30 % studentů rozumí faktu, že čárové spektrum produkují jen některé typy světelných zdrojů. O obtížnosti tohoto tématu pro studenty i učitele svědčí i pozdější studie [147], [148].

Z výše uvedených důvodů byla stavba této nové vzdálené úlohy podpořena rozvojovým grantem Fondu rozvoje vysokých škol č. 4466/2012, s P. Bromem jako jeho hlavním řešitelem.

2.5.2 Vývoj, návrh a stavba vzdáleného experimentu

Princip vzniku čárových spekter lze kvantitativně ověřit prakticky jen na nejjednodušších kvantových systémech, jakým je nejlehčí atom vodíku (protium) obsahující jeden elektron a jediný proton. Kvůli omezenému rozpočtu projektu a distribuci spektrálních čar, resp. jejich tzv. sérií⁴¹ v širokém rozsahu vlnových délek bylo nevyhnutelné omezit měření na jedinou sérii. Celá Lymanova série⁴²

⁴⁰Výzkum L. Ivanjekové probíhal na studentech úvodních kurzů jednak na Univerzitě v Záhřebu, Chorvatsko, jednak na Univerzitě ve Washingtonu, Seattle, USA [146].

⁴¹Série spektrálních čar se vždy váže k určité energetické hladině, mezi kterou a vyššími hladinami dochází k přeskokům elektronů spojeným s vyzářením/pohlcením kvanta elektromagnetického záření, jež pozorujeme jako charakteristickou emisní/absorpční spektrální čáru.

⁴²Lymanova série vzniká při přeskoku elektronů mezi základní energetickou hladinou atomu vodíku –13,6 eV a vyššími hladinami. Čáry leží v rozmezí 121,6 nm (Lyman alfa) až 91,2 nm

leží v ultrafialovém (UV) oboru spektra a bylo by nezbytné vyšší rozlišení spektrometru pro identifikaci většího počtu čar než tradičně značené čtyři [150]. Celá Paschenova série⁴³ leží v infračervené (IČ, IR – infra-red) oblasti spektra a čáry mají poměrně malou intenzitu podobně jako u dalších sérií (Brackettova či Pfundova série). Nejvhodnější volbou pro vzdálený experiment z hlediska praktického i historického je tedy proměření čar Balmerovy série, která je spojena s přeskoky elektronů mezi druhou a vyššími energetickými hladinami v atomu vodíku – viz tabulka 2.2.

Tabulka 2.2: Vlnové délky čar Balmerovy série ve vakuu (převzato z [152])

Přechod $n \rightarrow 2$	Značení	Vlnová délka [nm]	Energie [eV]	Barva
3 → 2	H _α	656,3	1,89	červená
4 → 2	H _β	486,1	2,55	azurová
5 → 2	H _γ	434,0	2,86	modrá
6 → 2	H _δ	410,2	3,03	fialová
7 → 2	H _ε	397,0	3,13	UV
8 → 2	H _ζ	388,9	3,19	UV
9 → 2	H _η	383,5	3,23	UV
∞ → 2	hrana Balmerovy série	364,6	3,40	UV

Srdcem fyzikální aparatury k proměření spektrálních čar Balmerovy série je spektrometr, který musí měřit v rozsahu vlnových délek orientačně 350–800 nm s nejhorším rozlišením cca 2 nm. To umožní identifikovat alespoň pět spektrálních čar Balmerovy série a ověřit, že jiné čáry se v této části spektra a v nejbližším okolí Balmerovy série nenacházejí. V rámci rozpočtu a pro případné další aplikace byl doktorandem vybrán kompaktní spektrometr od firmy Ocean Optics USB2000+ s následující konfigurací: sběrná čočka, optické vlákno, difrakční mřížka 300 vrypů/mm, kolimační čočka, detektor ILX–511B s filtrem 350–1000 nm, šířka vstupní apertury 10 μm. Teoretická rozlišovací schopnost této sestavy je podle dodavatele 1,5 nm. Spektrometr je připojen k měřicímu serveru přes sériový port RS232. Řídicí webová stránka ve verzi pro VŠ umožňuje nastavit integrační dobu a standardní součástí praktika může být též *kalibrace měřidla*. Ve SŠ verzi je celé měření plně automatizované včetně kalibrace vlnové délky, ale musí být nevyhnutelně provedeno dvakrát při nastavení různé integrační doby (3 ms a 300 ms), což souvisí s důležitým poznatkem, že intenzita spektrálních čar v rámci série klesá s rostoucí vlnovou délkou, protože klesá pravděpodobnost přeskočení elektronu s rostoucí vzdáleností energetických hladin.

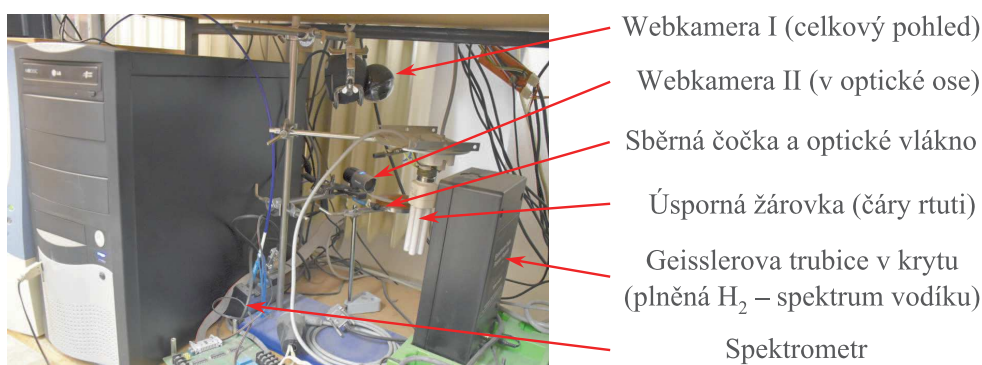
Základními zdroji světla bude jednak úsporná žárovka vyzařující charakteristické spektrální čáry rtuti, kterou lze použít ke kalibraci vlnové délky či pro

(hrana Lymanovy série) a byly poprvé pozorovány Theodorem Lymanem v letech 1906–1914 [150].

⁴³Paschenova série vzniká při přeskočení elektronu mezi 3. energetickou hladinou a vyššími. Čáry se nacházejí v rozmezí vlnových délek 820,1–1874,5 nm a byly poprvé identifikovány německým fyzikem Friedrichem Paschenem v r. 1908 [151].

srovnání spekter, jednak Geisslerova trubice naplněná vodíkem. Do budoucna je v plánu přidat další Geisslerovy trubice plněné jinými plyny a aparaturu doplnit mechanismem s otočným zrcátkem, které vybere některý ze světelných zdrojů. Uživatel má k dispozici živý obraz ze dvou webkamer: první webkamera umístěná v blízkosti optické osy poskytuje kontrolu výběru správného zdroje a jeho zapnutí, druhá webkamera zabírá celkový pohled na vzdáleně řízenou aparaturu. Celkový pohled na novou vzdáleně řízenou aparaturu je uveden na obr. 2.32. Příímý odkaz na řídicí webovou stránku je:

http://kdt-41.karlov.mff.cuni.cz/index_js.html.



Obrázek 2.32: Aktuální pohled na nový vzdálený experiment *Studium spekter* s popisky nejdůležitějších komponent. Vzdáleně řízená aparatura musí být umístěna v zatemněném prostoru pod stolem, aby do sběrné čočky nevniklo světlo z klasických rtuťových zářivek ve vzdálené laboratoři.

Tento vzdálený experiment byl od počátku doplněn velmi kvalitní interaktivní simulací z projektu Kansaské státní univerzity „Visual Quantum Mechanics“^[44]. Naneštěstí pro práci s apletem bylo nutné nainstalovat přehrávač Adobe Shockwave Player, protože tato simulace byla vytvořena v grafickém vektorovém programu Adobe Flash. Jeho podpora má být ukončena v roce 2020 a většina prohlížečů již nyní omezuje jeho využívání [63]. Ukázka apletu je uvedena na obr. 2.37 dále na str. 88. Jiný aplet na téma *model atomu vodíku* nabízí projekt PhET^[45] [58].

2.5.3 Metodika využití vzdáleného experimentu ve výuce

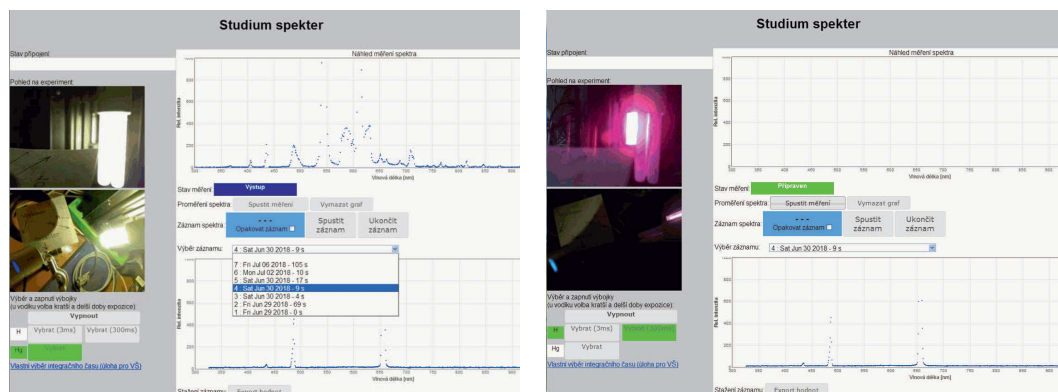
Vzdáleně řízené měření spekter je pro studenty SŠ, resp. pro učitele plně automatizované, a tedy velmi jednoduché. Po přihlášení se k měřicímu serveru a získání řízení je na začátku třeba vybrat světelný zdroj – např. úspornou žárovku na úvod a potom Geisslerovu trubici plněnou vodíkem (někdy je nutné čekat až desítky sekund na vznik výboje a rozsvícení trubice; světelné zdroje by se proto neměly zbytečně rozsvěcovat ani zhasínat, např. čeká-li další uživatel ve frontě). V případě vodíku je vhodné nejdříve zvolit kratší dobu integrace, a to stisknutím

⁴⁴<https://web.phys.ksu.edu/vqm/software/online/vqm/html/h2spec.html>

⁴⁵<https://phet.colorado.edu/en/simulation/legacy/hydrogen-atom>

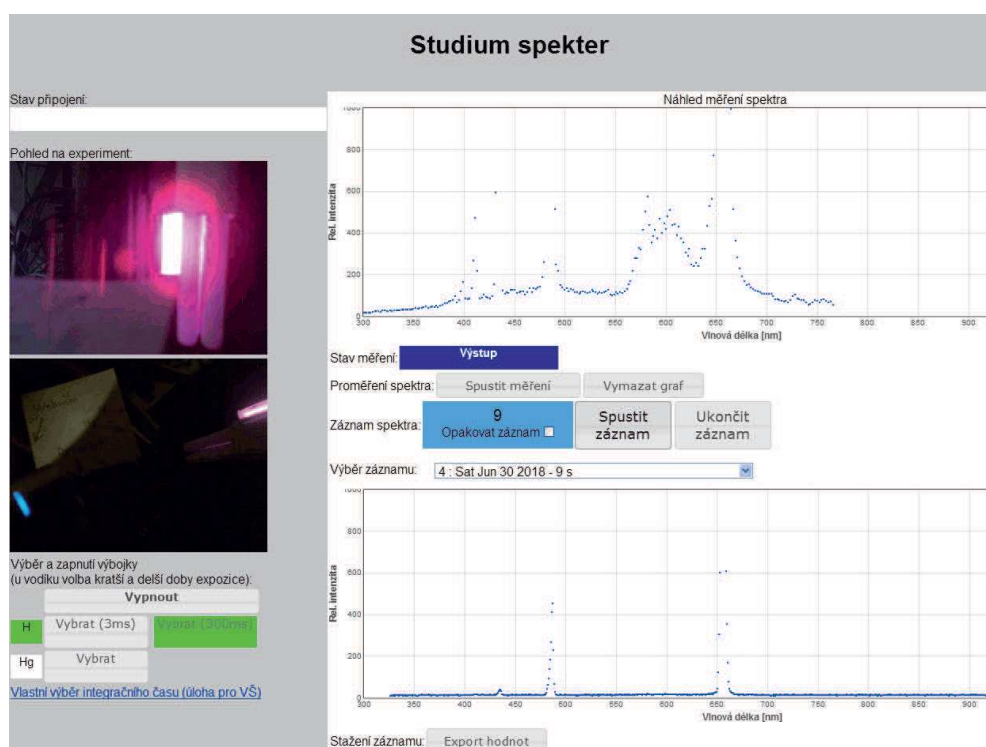
tlačítka „H – 3 ms“. Automatické měření se ve všech případech spustí tlačítkem „Start“ a po uplynutí několika sekund začne export naměřených hodnot, které se vykreslí do velkého okna grafu – viz možný vzhled řídicí webové stránky na obr. 2.33. Přeje-li si uživatel data **zaznamenat a stáhnout** pro další zpracování, pak je nutné navíc použít tlačítka „Spustit záznam“ a „Ukončit záznam“⁴⁶. Podle potřeby lze náhled měření smazat tlačítkem „Vymazat graf“, běžně se však výstupy měření ponechávají pro možnost porovnání. Ve **spektru úsporné žárovky** lze identifikovat několik jasných emisních čar rtuti, ale rovněž menší signál pocházející od vrstvy luminoforu na vnitřní straně trubic úsporné žárovky. Právě luminofor určuje kvalitu světla poskytovaného úspornou žárovkou. Naopak ve **spektru vodíku** s kratší dobou integrace (3 ms) lze spatřit pouze tři vrcholky odpovídající spektrálním čarám H_α až H_γ . Jejich intenzita se směrem zprava doleva snižuje. Napravo žádný další významný signál není, lze však očekávat, že směrem nalevo by se mohly vyskytovat další čáry... V tomto okamžiku je vhodné studenty aktivizovat otázkou, *co je potřeba udělat, abychom spatřili tyto případně slabší čáry?* Očekávanou odpovědí je *prodloužit dobu měření*, jinými slovy *prodloužit dobu integrace (nasčítávání) signálu*, a to alespoň o dva řády. Po stisknutí tlačítka „H – 300 ms“ a zopakování měření budou v získaném signálu původní pozorované čáry *přeexponované*, avšak podle předpovědi se v oblasti nalevo od nich objeví

⁴⁶Záznam měření logicky probíhá v celé době počínaje stisknutím tlačítka „Spustit záznam“ až do stisknutí tlačítka „Ukončit záznam“. Díky tomu není nutné zaznamenat celé spektrum, ale jen jeho požadovanou část např. pro snazší a rychlejší zpracování. Dokonce lze stáhnout větší počet záznamů a např. hodnoty zprůměrovat, ale pro účely úlohy to není nezbytné; signál se může lišit jen nepatrně, resp. prakticky je pokaždé stejný. Při maximálně pečlivém postupu by bylo navíc potřeba změřit pozadí (tedy se všemi světelnými zdroji vypnutými) a tento signál od naměřeného spektra odečíst.



Obrázek 2.33: Řídicí webová stránka vzdálené úlohy *studium spekter* se dvěma webkamerami. Horní živý obraz pochází z webkamery umístěné poblíž optické osy vedle vstupní sběrné čočky, níže je celkový živý pohled na aparaturu z druhé webkamery. Vlevo nahoře právě probíhá výstup měření spektra úsporné žárovky s výraznými emisními čarami rtuti. Vlevo dole bylo pro srovnání ve starších záznamech nalezeno spektrum s nejjasnějšími čarami vodíku (integrační doba 3 ms). Vpravo je proto aparatura připravena k proměření spektra vodíku při delší době integrace (300 ms) – viz stisknuté zelené tlačítko. Výsledek tohoto měření je detailně uveden na obr. 2.34.

další 2–3 čáry, jejichž intenzita světla systematicky klesá. Ve vzdálené laboratoři je tedy možné pozorovat **5 až 6 spektrálních čar Balmerovy série vodíku** – viz ukázka řídicí webové stránky na obr. 2.34 s oběma naměřenými spektry pohromadě. Je vhodné v rámci hodiny provést společně záznam spektra, které si později studenti mohou stáhnout a zpracovat. Cílem je **určit vlnové délky 4 až 5 emisních čar Balmerovy série vodíku**. Naměřená spektra (tzn. závislost relativní intenzity světla na vlnové délce) lze snadno stáhnout do počítače a zaměřit se na jejich **zpracování**, především na tvorbu grafu, speciálně výsek a zvětšení vybraných částí grafu, z nichž se studenti mohou pokusit určit vlnové délky čar a vyzkoušet si odhad nejistoty (chyby) tohoto určení. V tabulkovém procesoru



Obrázek 2.34: Řídicí webová stránka pro vzdálené měření Balmerovy série spektrálních čar vodíku, a to při dvou různých integračních dobách (3 ms a 300 ms). Při kratší době integrace budou pozorovatelné (zprava doleva) tři nejjasnější čáry H_{α} , H_{β} a H_{γ} – viz dříve naměřené spektrum ze záznamu zobrazené v dolním grafu. Při 100× delší době integrace (viz horní graf) se zviditelní další dvě až tři čáry. U pozorovaných 5 až 6 čar Balmerovy série se můžeme přesvědčit, že jejich intenzita (měřená v relativních jednotkách) systematicky zprava doleva klesá. V případě záznamu měření lze při zpracování určit vlnové délky až pěti nejjasnějších čar Balmerovy série; u šestého profilu s nepatrnou intenzitou již není jisté, zda se jedná o jednu čáru nebo zda je signál součtem více čar apod. – rozlišovací schopnost spektrometru je omezená. Jiné čáry se ve spektru nenacházejí. Slabý parazitní signál mezi H_{α} a H_{β} , pozorovatelný až při delší době integrace, má zcela odlišný charakter: Je mnohem širší než běžné spektrální čáry a jeho intenzita neodpovídá trendu v rámci série. Pravděpodobně je způsobem interakcí elektronů ve výboji se skleněným vnitřním povrchem Geisslerovy trubice.

typu **MS Excel** lze označit do bloku malou oblast hodnot kolem každé spektrální čáry a nechat tuto část zobrazit v grafu. Ke zpracování lze rovněž použít vědecký freewareový program **gnuplot**, v němž lze dvojným kliknutím pravého tlačítka myši označit a zvětšit okolí vybrané čáry⁴⁷. Po umístění kurzoru myši na vybraný bod grafu lze v levém dolním rohu grafického okna programu **gnuplot** odečíst polohu kurzoru, tzn. aktuální vlnovou délku.

Pro určení vlnové délky i přesnosti měření lze využít např. polohy obou inflexních bodů⁴⁸ a maximální intenzity v pozorovaném profilu čáry. Přitom je třeba zohlednit i teoretickou rozlišovací schopnost spektrometru asi 1,5 nm, a však rozbořením celého naměřeného profilu čáry lze dosáhnout nejlepší přesnosti měření i pouhý 1 nm, rozhodně ne nižší. Rozumná velikost **možné chyby měření**, zohledňující i nepřesnost kalibrace spektrometru zvláště u okrajů měřitelné oblasti spektra, může být ± 2 nm.

2.5.4 Možné postupy výkladu

Také případě tohoto historického pozorování lze uplatnit dva možné postupy: heuristický či verifikační. Má-li učitel k dispozici reálné pomůcky, je vhodné začít s tradičním lokálním pozorováním spekter s využitím těchto pomůcek⁴⁹ obvykle bez možnosti odečítat vlnové délky. Proto v následujícím kroku může být využit vzdálený experiment podle předchozího podrobného komentáře – viz též obr. 2.34. Jakmile mají studenti k dispozici vlastní experimentálně určené vlnové délky z Balmerovy série, případně nalezené v seriózním zdroji na Internetu, další scénář se může lišit podle zájmu a schopností studentů: Studenti si v rámci zpracování mohou vyzkoušet náročnější heuristický⁵⁰ či přímočarý a mnohem snazší verifikační postup.

Také v případě **verifikačního postupu** je vhodné zmínit historickou cestu a uvést jména fyziků, kteří se o nové poznatky zasloužili a jejichž jména se objevují v názvech. První čtyři čáry Balmerovy série leží ve viditelném oboru a jejich vlnové délky byly poprvé empiricky popsány švýcarským matematickým fyzikem Johannem Jakobem Balmerem v roce 1885 – viz tzv. Balmerův vzorec

$$\lambda = B \frac{n^2}{n^2 - m^2} = B \frac{n^2}{n^2 - 2^2}, \quad (2.13)$$

kde přirozené číslo $n > 2$ značí pořadí vyšší energetické hladiny, výchozí hladina

⁴⁷Klávesa „u“ v aktivním grafickém okně programu **gnuplot** vrátí náhled na celý graf (un-zoom, odzoomování grafu).

⁴⁸Vzdálenost inflexních bodů se někdy používá pro určení tzv. *šířky čáry*. Označením „FWHM“ (Full Width at Half Maximum) se rozumí vodorovná vzdálenost mezi body, které v naměřeném spektru mají poloviční signál, než je maximum signálu u dané čáry. Chybový interval by měl minimálně odpovídat takto určené šířce čáry.

⁴⁹Pomocí školního spektrometru či např. podomácku zhotoveného CD spektrometru je vhodné nechat studenty prohlédnout si sluneční spektrum, dále jemu podobné spojité spektrum klasické žárovky. Jiný charakter mají spektra rtuťové zářivky či různých úsporných žárovek, příp. sodíkové výbojky.

⁵⁰Heuristický postup se pokoušela uplatňovat Z. Koupilová s využitím funkce *Řešitel* v programu MS Excel, který umožňuje realizovat pokročilé grafické zpracování s libovolnou modelovou funkcí v tomto softwaru (jedná se o zcela ekvivalentní postup, vyžadující pokročilejší znalost programu MS Excel) [155]. Jiná možnost s využitím grafického zpracování v programu **gnuplot** je nastíněna v závěru této v části na str. 85 a v další části *Očekávané výstupy*. Na závěr tohoto zvoleného postupu by měl učitel připomenout historii, která je zde rovněž uvedena.

$m = 2$ je pevně stanovena a hodnota Balmerovy konstanty je $B = 364,50682 \text{ nm}$. Tento vztah zobecnil, resp. přepsal do vhodnějšího tvaru⁵¹ již r. 1888 (avšak bez žádného fyzikálního zdůvodnění) švédský fyzik Johannes (Janne) Robert Rydberg, jehož vztah platí pro všechny vlnové délky čar pozorovaných ve spektru atomu vodíku

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{4}{B} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) = R_{\text{H}} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (2.14)$$

kde $n > 2$ a $R_{\text{H}} = 10\,973\,731,57 \text{ m}^{-1}$ je velikost tzv. Rydbergovy konstanty pro jádro vodíku (H) [152]. O první fyzikální, i když nepřijaté zdůvodnění vzorce [2.14] se pokusil švýcarský teoretický fyzik Walther Ritz v roce 1908. Na počest obou fyziků se vztah [2.15]

$$\frac{1}{\lambda} = RZ^2 \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right), \quad (2.15)$$

nazývá **Ritzův-Rydbergův kombinační princip** a platí pro další vodíkopodobná jádra. λ zde značí vlnovou délku emisní/absorpční spektrální čáry ve vakuu, $R = 1,0973731569 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$ je Rydbergova konstanta pro daný prvek, Z je protonové číslo daného jádra a n_1, n_2 ($n_1 < n_2$) jsou kvantová čísla hladin, mezi nimiž k přeskoku elektronu dochází [153], [154]. Správné teoretické objasnění přinesl až kvantověmechanický model atomu vodíku dánského fyzika Nielse Bohra z roku 1913. Jeho stručný výklad včetně veškerých odvození je zpracován v e-textech ke vzdálené úloze⁵²

Při verifikačním postupu, kdy studenti dopředu znají správný Balmerův vztah [2.13], je snadné správnost tohoto vzorce graficky či numericky ověřit. Zároveň sami studenti mohou získat zpětnou vazbu, zda nejistotu v určení vlnové délky nepřecenili či nepodcenili. Užitečné příkazy pro program `gnuplot` jsou pro případné použití uvedeny v příloze [A.5] od str. [146].

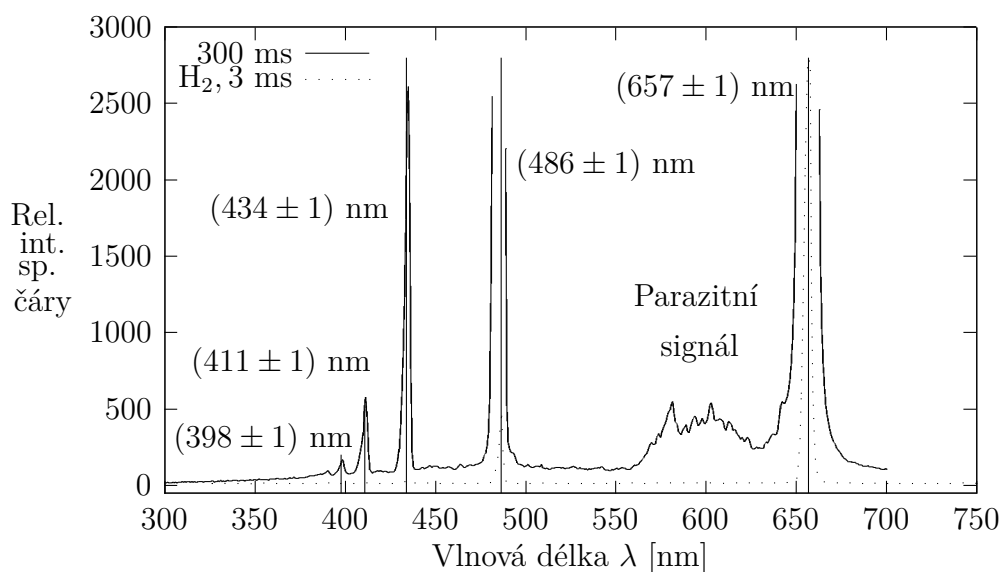
V případě zvolení **heuristického postupu** bude zpracování jistým „matematickým dobrodružstvím“. K tomu studenti využijou a zopakují si vlastnosti všech elementárních funkcí. Nejprve je třeba vytipovat vhodné funkce. Na základě pohledu na graf lze vyloučit lineární funkci. Zvláštní kapitolou jsou polynomy, kdy nemá dobrý smysl 5 experimentálními body prokládat polynom vyššího než řekněme 3. stupně. Pokusem proložit všechny body grafem klesající exponenciální funkce by studenti měli dojít k závěru, že exponenciála není vhodný model; přesnost měření vlnových délek by měla dovolit tuto funkci vyloučit. Dále lze vyzkoušet lineární lomenou funkci. Hyperbola podobně jako exponenciála má totiž vodorovnou asymptotu, která může mít fyzikální souvislost s existencí pozorované hrany Balmerovy série kolem 365 nm. Výsledek grafického zpracování pomocí programu `gnuplot` je uveden na obr. [2.36] (viz též komentář k obrázku). Od hyperboly, která překvapivě dobře vystihuje danou závislost, je potom krůček k racionálním lomeným funkcím, mezi které patří i správný Balmerův vzorec [2.13]. Učitel by měl buď hned, nebo po prvních neúspěšných pokusech hledání správné modelové funkce studentům napovědět očíslovat si experimentálně určené čáry počínaje indexem 3.

⁵¹Klíčová byla převrácená hodnota vlnové délky, která odpovídá tzv. *vlnovému číslu*, tzn. ve spektroskopii počtu period vlnění na jednotkové délce a která je úměrná frekvenci f a tedy i energii E světelného kvanta $\frac{1}{\lambda} = \frac{f}{c} = \frac{E}{hc}$, kde h je Planckova konstanta a c rychlost světla ve vakuu.

⁵²<http://www.ises.info/index.php/cs/laboratory/experiment/spectra>

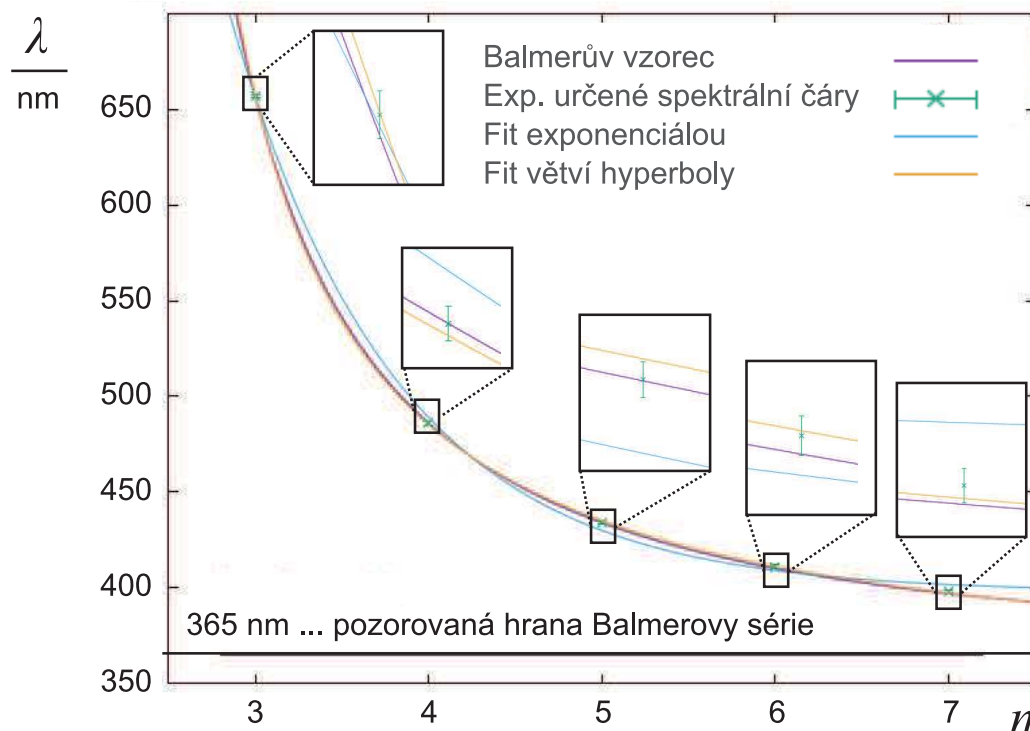
2.5.5 Očekávané výstupy

Grafické zpracování spektra v programu `gnuplot` včetně odečtených poloh spektrálních čar Balmerovy série je uvedeno na obr. 2.35. V rámci uvedené chyby měření všechny hodnoty odpovídají tabelovaným hodnotám (viz tab. 2.2 na str. 80); chyba měření by mohla být případně ještě více a bezpečně nadsazena.

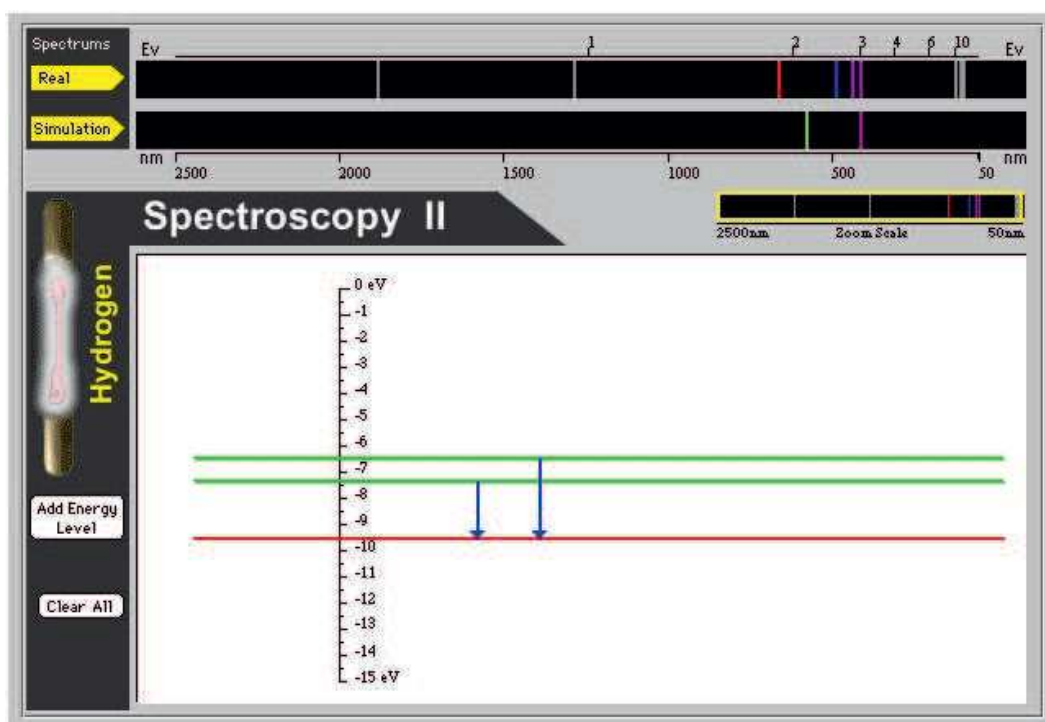


Obrázek 2.35: Experimentální určení vlnových délek Balmerovy série ze vzdál. měření programem `gnuplot`. S ohledem na rozlišovací schopnost spektrometru i přesnost kalibrace je chyba a nejistota odečtu minimálně ± 1 nm. Do společného grafu jsou vynesena dvě měření při různých integračních dobách 3 ms a 300 ms. Při krátké době integrace vyniknou tři nejsilnější čáry, při delší době jsou pozorovatelné ostatní slabší čáry, dokonce lze vytušit existenci 6. spektrální čáry, i když se značně nejistým odečtem vlnové délky. Další čáry se ztrácí v šumu. Z obou grafů je zřejmý pokles intenzity čar v rámci série, jinde je signál prakticky nulový (resp. na úrovni šumu) s výjimkou jistého parazitního signálu, který má oproti čarám zcela odlišný charakter – to poskytuje prostor pro diskusi. S ohledem na chybu měření výsledky odpovídají tabelovaným hodnotám – viz tabulka 2.2 na str. 80.

Tato práce se nezabývá **heuristickým postupem** využívajícím funkci *Řešitel* v programu MS Excel podle Z. Koupilové [155]. V našem přístupu lze vhodně vybrané elementární funkce s obecnými parametry testovat s využitím pokročilého grafického zpracování – viz graf na obrázku 2.36 včetně komentáře.



Obrázek 2.36: Grafické ověření Ritzova-Rydbergova kombinačního principu programem `gnuplot` (viz též příloha A.5 od str. 146). Experimentálně určenými body byl proložen graf funkce odpovídající Balmerovu vzorci 2.13, kde n je **vhodně zvolený index** (tzn. počítané pořadí od šikvně zvoleného počátku) spektrální čáry v rámci série. Důvodem pro takovou volbu indexu n může být divergence poblíž svislé asymptoty. Pro srovnání byl proveden pokus všemi body proložit další vhodné elementární funkce (zejména které mají vodorovnou asymptotu odpovídající pozorované a vyznačené hraně *Balmerovy série*), jako klesající exponenciálu $f_1(x) = A_1 e^{-B_1} + C_1$ nebo větví hyperboly v I. kvadrantu $f_2(x) = \frac{A_2}{x - B_2} + C_2$. Optimální hodnoty parametrů A, B, C byly určeny příkazem `fit` v programu `gnuplot`. Pro hyperbolu bylo nezbytné odhadnout počáteční hodnoty, např. $A_2 = 1000, B_2 = 2,5, C_2 = 360$, aby fit zkonvergoval. S ohledem na chybu měření lze konstatovat, že body určitě neleží na exponenciále. Lineární lomená funkce překvapivě vyhovuje mnohem lépe, avšak s výjimkou 3. bodu, jehož chybovými úsečkami větví hyperboly neprochází. Každý z rámečků zachycuje detailní zvětšený pohled na okolí jednotlivých naměřených bodů, kudy procházejí grafy vybraných a výše upřesněných modelových funkcí.



Obrázek 2.37: Interaktivní simulace z projektu Kansaské státní univerzity „Visual Quantum Mechanics“ k vysvětlení původu spekter, která byla k novému vzdálenému experimentu od počátku doporučována. Aplet dostupný na stránkách projektu <https://web.phys.ksu.edu/vqm/software/online/vqm/html/h2spec.html> však může mít potíže s funkčností, protože byl vytvořen v grafickém vektorovém programu Adobe Flash, jehož podpora má být ukončena v roce 2020 a jehož využívání již v současnosti většina prohlížečů omezuje [63]. Vyžaduje nainstalovaný přehrávač Adobe Shockwave Player. Hned pod apletem je na webové stránce v angličtině uveden postup a návod: 1) Pozorování skutečného spektra vodíku s viditelnými spektrálními čarami ve správných barvách a ostatními čarami mimo viditelný obor spektra v šedé barvě. 2) Přidání energetických hladin pomocí tlačítka „Add Energy Level“ a manipulace s nimi pomocí myši. 3) Znázornění přeskočků elektronu mezi vybranými hladinami opět tažením pomocí myši, což způsobí objev nové spektrální čáry v modelovém spektru s odpovídající vlnovou délkou. Pokud student při tažení čáry myši uvolní tlačítko mimo energetickou hladinu, spektrální čára se neobjeví, protože takový přeskok elektronu není dovolen! 4) Posouvání jednotlivých energetických hladin pomocí myši, čímž lze vymodelovat reálné pozorované spektrum. Tento úkol není jednoduchý, ale velmi názorně ukazuje souvislost vzhledu spektra se soustavou dovolených energetických hladin. 5) Pro přesné modelování spektra lze využít prvek „Zoom scale“ (upravit měřítko, resp. přiblížení). 6) V posledním kroku je popsána možnost smazat jednotlivé energetické hladiny či přeskočky jejich označením myši a stisknutím klávesy „Del“. Studenti jsou upozorněni na komplexní provázání jevů, že smazáním určité energetické hladiny rovněž zmizí všechny spektrální čáry odpovídající přeskokům z této hladiny, resp. na tuto hladinu.

3. Pilotní výzkum vzdálených reálných laboratoří

Pro účely pilotního výzkumu vzdálených laboratoří je potřeba zajistit spolehlivou identifikaci uživatelů. Proto byly vybrané vzdálené experimenty doplněny o přístup přes unikátní heslo¹, které měl každý student přidělené jedinečným způsobem a s jehož pomocí lze jednotlivé studenty identifikovat. Toto řešení současně zabraňuje přístupu ostatním neznámým uživatelům, kteří nejsou zahrnuti do výzkumu, a tedy nezabírají čas vzdálené úlohy na úkor zkoumaných subjektů.

3.1 Konstrukční výzkum efektivity vzdálených laboratoří

Po fázi plánování, která zahrnuje návrh výzkumu včetně vhodných měřicích nástrojů a formulace hypotéz a která je podrobněji popsána dále v podkapitole [3.1.1](#), byl předpokládán test proveditelnosti na malém vzorku. Tento test odhalil závažné problémy a překážky pro následnou realizaci tohoto typu výzkumu na větším vzorku. Zkušenosti z testovací fáze jsou popsány v následujících podkapitolách a bohužel nebylo možné výzkum upravit ani přeplánovat tak, aby nebyla dotčena jeho interní validita a spolehlivost výsledků.

3.1.1 Upravený design výzkumu a formulace hypotéz

Pro pilotní výzkum efektivity byl původně namísto realizace s klasickou kontrolní a experimentální skupinou navržen upravený výzkumný design prohozených replik [\[157\]](#) se dvěma srovnatelnými paralelními skupinami (switching replications), absolvujícími témata z moderní fyziky (radioaktivita, úvod do kvantové fyziky a studium spekter). Ve školním kurikulu zpravidla zbývá pro tyto kapitoly omezený čas, proto alternativní forma výuky s podporou PC je v tomto případě vhodná a smysluplná. Současně předpokládáme, že pořadí zařazení těchto témat ve výuce není rozhodující, protože mezi učivem zřejmě neexistuje žádná návaznost a témata lze probrat v libovolném pořadí. Pro vyloučení faktoru vlivu docela nového prostředí je důležité, aby se obě skupiny před experimentální částí měly možnost seznámit se vzdáleným měřením obecně, dále se způsobem ovládní vzdáleně řízené fyzikální aparatury i se základy pokročilého grafického a statistického zpracování dat. K tomuto účelu měla být s jistými výhodami využita vzdálená úloha „Studium radioaktivity“, nadále značená „X_{RA}“. „X“ ve standardní notaci značí aplikaci předmětu výzkumu na experimentální skupinu (tzv. treatment); zde se aplikací X rozumí především *provedení vzdáleného reálného experimentu*. V klasickém konstrukčním výzkumu je aplikace X provedena pouze na experimentální skupinu – viz tab. [3.1](#). Zde v upraveném designu výzkumu požadujeme aplikaci X na obě skupiny, aby mohl být vyloučen vliv faktoru *téma experimentu* na zkoumaný efekt.

¹Autorem modulu umožňujícího přístup přes unikátní heslo byl Mgr. Pavel Kuriščík.

Tabulka 3.1: Standardní design výzkumu s kontrolní a experimentální skupinou

R	O	X	O
R	O		O

Vysvětlivky: R – random assignment, náhodný výběr;
 O – observation, měření, test; X – treatment, aplikace
 předmětu výzkumu; převzato z [156].

Po ověření předpokladu srovnatelných skupin (standardní značení je „O“ – Observation, pozorování, měření na vzorcích) formou *testu a dotazníku na vzdálené měření* měla první skupina provést vzdálenou úlohu „Studium vnějšího fotoelektrického jevu“, nadále značenou „X_{FE}“, zatímco druhá skupina měla absolvovat tradiční výklad tohoto tématu. Po prohození replik měla první skupina absolvovat tradiční výklad tématu *spektra*, zatímco druhá skupina měla provést vzdálenou úlohu „Studium spekter“, značenou „X_{SP}“. Probrání obou témat mělo být zakončeno stejným testem v obou skupinách, a to současně ve stejné době. Následně měly být provedeny dvouvýběrové testy **hypotézy**, zda *studenti absolvující vzdálené měření „X“ dosáhli statisticky významně vyššího počtu bodů v testu než studenti absolvující tradiční výklad tématu*. Nejvhodnější možný postup konstrukčního výzkumu je naznačen ve schématu v tab. 3.2. Je vhodný v případě omezeného rozsahu výběru, počítá s faktem, že studenti neznají možnost provést některá měření formou vzdáleně řízeného experimentu, a usiluje o maximální kontrolu nad různými faktory. Jeho nevýhodou je poněkud nestandardní pořadí učiva, i když přípravné téma *Radioaktivita* lze vyložit tradičním způsobem před ostatní náročnější látkou a teprve později zadat vzdálené měření např. za domácí úkol a jako opakování. V případě přístupu k dostatečně velkému počtu studentů by bylo možné využít i sofistikovanější postupy, jako např. Solomonův čtyřvýběrový design [158].

Tabulka 3.2: Upravený design výzkumu s prohozenými replikami

R	Sp	O	X _{RA}	O	X _{FE}	O
R	Fe	O	X _{RA}	O	X _{SP}	O

R – náhodný výběr; Sp, Fe – tradiční výklad tématu *spektra* a *fotoefekt*;
 O – měření, test; X_{RA} – provedení vzdálené úlohy *Studium radioaktivity*;
 X_{FE} – provedení vzdálené úlohy *Vnější fotoefekt*; X_{SP} – provedení vzdálené
 úlohy *Studium spekter*; zpracováno s využitím [156], [157].

3.1.2 Diskuse překážek pro výzkum

Navržený pilotní výzkum efektivity vzdálených experimentů však vedle zmíněných překážek² narazil na další zásadní problémy technického či organizačního charakteru, které v prostudované literatuře nebyly zmiňovány:

²Neexistence standardních kritérií pro měření efektivity výuky, chybějící vhodné didaktické testy.

- Již při úvodním vzdáleném měření úlohy *Studium radioaktivity* se docela náhodně projevovaly technické problémy se správným načítáním všech JAVA objektů v řídicí webové stránce, které jsou nezbytné pro vzdálené ovládání aparatury i pro vlastní měření. Nebylo v silách organizátorů zajistit 100% funkčnost webových technologií, a to především na domácích PC.
- Vzdálené měření proto bylo prakticky možné realizovat pouze v omezeném čase na školních počítačích, ale i na těchto stanicích zmíněný problém nastával, i když v menší míře. Přestože je v takovém případě možná vizuální kontrola, že dotyční studenti skutečně fyzicky provádějí vzdálené měření, nemohou využívat ostatní výhody vzdálených experimentů.
- Jiné problémy souvisely s organizací času na vzdálené měření, protože vzdálená aparatura je pouze jediná a možnost vzdáleného řízení má vždy nejvýše jeden uživatel (resp. jediná IP adresa).
- Většina studentů zpravidla odložila vlastní měření na poslední chvíli, což způsobilo tvorbu front na řídicím serveru v posledním dnu před termínem odevzdání, přestože studenti byly v dostatečném (dvoutýdenním) předstihu na tvorbu front upozorněni.

Organizátor nechtěl výzkum komplikovat dalšími faktory, jako je např. úspěšná práce se systémem rezervace času, a proto v případě úlohy *Studium radioaktivity* studenti čekající ve frontě krátce před termínem odevzdání dostali možnost stáhnout a zpracovat starší automaticky naměřená data, kde zmíněná omezení nejsou.

Pro lepší pochopení chování studentů ve vzdálené laboratoři byly dále zkoumány automatické logy aktivity na měřicím serveru.

3.2 Analýza logovacích souborů

3.2.1 Cíle a plánování pilotního výzkumu s využitím analýzy logů

V rámci pilotního výzkumu vzdáleně řízených experimentů volně dostupných v otevřené vzdálené laboratoři na UK MFF www.ises.info byly analyzovány logy aktivity z let 2011–2012. Vedle neznámých uživatelů zde vzdálené měření postupně uskutečnilo 77 studentů z 5 tříd, resp. z volitelných seminářů a cvičení z fyziky, a to ze 3 středních škol³, jejichž učitelé fyziky byli osloveni a požádáni o spolupráci. Studenti dostali za úkol provést vzdálené měření na téma *vnější fotoelektrický jev*, a to metodou podle svého výběru (jednodušší *nabíjení kondenzátoru na brzdné napětí* nebo více komplexní *studium VA charakteristiky vakuové fotonky*). Měli postupovat podle návodu a instrukcí na webových stránkách k danému experimentu (web-based instructional design), splnit zadané úkoly, zpracovat a odevzdat standardní protokol z fyzikálního laboratorního měření včetně uvedení údaje, v jaký den (datum) a čas se ke vzdáleně řízené aparatuře přihlásili,

³Gymnázium Dr. J. Pekaře v Mladé Boleslavi, Palackého 211 (2 třídy); Osmileté gymnázium v Mladé Boleslavi, Palackého 191 (2 třídy), Gymnázium v Praze 9, Špitálská 2 (1 třída).

což umožnilo studenty identifikovat, resp. spárovat záznam aktivity s odevzdaným protokolem. Kvůli omezené hodinové dotaci na výuku fyziky bohužel nebylo možné vzdálené měření takto zadat a realizovat i pro další témata, nicméně některé studenty česká vzdálená laboratoř zaujala a dobrovolně zpracovali i jinou úlohu⁴, zejména na téma *radioaktivita a způsoby ochrany člověka před ionizujícím zářením*.

Výzkumný tým ve složení P. Brom, doc. Zdena Lustigová a doc. F. Lustig se zajímal především o detekci znechucení (disengagement) a identifikaci jeho možných příčin, jako např. zmatení uživatelským prostředím nebo studijním textem, nutností čekat ve frontě nebo na výsledek apod. Cílem tohoto pilotního výzkumu tedy bylo jednak ověřit použitelnost analýzy logů aktivity k výše uvedeným účelům, jednak *získat zpětnou vazbu* pro případné vylepšení e-textů či uživatelského rozhraní (řídící webové stránky vzdáleného reálného experimentu), kterou nelze nebo jen s obtížemi získat tradičními technikami. Z analýzy logů aktivity bylo možné odhalit další poznatky, jako např. identifikovat různé vzorce chování studentů ve vzdálené laboratoři (behavioral patterns), různé vzorce řešení problémů (problem solving patterns), a to s použitím techniky modelování uživatelů (user modelling). [99]

3.2.2 Návrh předzpracování a kódování logů aktivity uživatelů

Logovací soubor na každém řádku obsahuje jednoduchý záznam jednotlivých významných událostí. Ukázka logu je uvedena v příloze B od strany 149. Na začátku každého řádku je uveden systémový čas aktuálně nastavený na serveru⁵. Následuje přednastavený textový popis události s případným uvedením parametru; přehled všech zaznamenávaných událostí a jejich případných parametrů je uveden dále. Původní logovací soubor je tedy příliš rozsáhlý a nepraktický pro vědecké analýzy. Je potřebné jeho předzpracování a výrazné zkrácení (např. z původní velikosti stovky až tisíce megabajtů na desítky kilobitů). Předzpracování může současně zahrnovat i **základní klasifikaci jednotlivých událostí**, popsanou v následujících odstavcích.

Pro předzpracování původního rozsáhlého logovacího souboru má smysl definovat několik standardů:

- Jeden řádek předzpracovaného logu odpovídá jedné souvislé interakci uživatele s řídicí webovou stránkou (session) včetně případného počátečního čekání na převzetí vzdáleného řízení (remote control).
- Každý řádek předzpracovaného logu obsahuje:
 1. identifikaci uživatele (IP adresa, popř. její překlad do textové URL adresy pomocí příkazu `nslookup`),
 2. systémové datum a čas přihlášení k měřicímu serveru,
 3. dále pro výzkumné účely celkovou dobu relace v sekundách (tzn. od přihlášení do odhlášení),

⁴Např. za účelem vylepšení klasifikace na konci pololetí.

⁵Systémový čas není synchronizován s veřejnou časovou službou, nicméně pro krátkodobé vzdálené měření v řádu minut až hodin je jeho přesnost dostačující.

4. identifikaci uživatele v původním logovacím souboru (tj. referenční ID číslo uživatele přidělené serverem, user ID⁶) a nakonec
 5. identifikátor varianty úlohy (tzn. metody měření, řídicí webové stránky apod.) vybrané uživatelem a
 6. zbytek řádku představuje **v podobě kódovaného řetězce úplný záznam aktivity uživatele** až do jeho odhlášení (včetně okolností a případného čekání ve frontě).
- V záznamu aktivity uživatele namísto absolutního systémového času má smysl vypočítat a uvádět dobu, která uplynula mezi okamžiky po sobě jdoucích událostí. Tento časový údaj se uvádí ve složených závorkách „{...}“ výhradně v jednotkách sekundy a je definován takto: Necht U_1 , resp. U_2 jsou dvě po sobě jdoucí události (včetně veškerých svých případných parametrů), které nastaly v okamžicích T_1 , resp. T_2 . Potom je pro každou dvojici po sobě jdoucích událostí definována číselná velikost časového intervalu $\Delta T = T_2 - T_1$, který je v předzpracovaném logu uveden takto⁷:

„... * U_1 { ΔT }* U_2 ...“

Zpravidla tedy lze tvrdit, že aktivita započatá událostí U_1 (např. stisknutím nějakého tlačítka) a ukončená událostí U_2 (např. stisknutím jiného tlačítka) trvala celkem ΔT sekund.

- Pro snazší čitelnost a přehlednost je vhodné jednotlivé události v předzpracovaném logu oddělovat, respektive uvozovat unikátním znakem. Pro oddělení, resp. uvození **okolností** byl zvolen znak dvojtečka „:“, pro ostatní události znak hvězdička „*“.
- Součástí záznamu aktivity uživatele je jednoduchá základní klasifikace událostí, která se značí velkými písmeny:
 1. „S“ označuje jakékoliv nastavení parametrů a experimentální aparatury (Settings, nastavení),
 2. „M“ označuje událost přímo spojenou se vzdáleným měřením (Measurement, měření), která současně není nastavením, a nakonec
 3. „P“ označuje událost související s následným zpracováním dat (Processing), což zahrnuje především porřízení vlastního záznamu naměřených hodnot (record) a stažení dat (download).
- Po základní klasifikaci události vyjádřené velkým písmenem následuje unikátní malé písmeno, které specifikuje druh události, a případné **parametry uvedené v kulatých závorkách** „(...)“. V některých případech hodnota parametru přímo odpovídá identifikátoru ID automaticky přidělovanému

⁶Identifikační číslo uživatele (User ID) platí jako unikátní pořadové číslo pro určitou jednorázovou relaci určité IP adresy uživatele až do okamžiku restartu serveru, kdy se číslování opět resetuje a začíná od jedné.

⁷Při analýze předzpracovaných logů je třeba ošetřit případ výskytu nějakého parametru v kulatých závorkách či okolnosti uvozené dvojtečkou v řetězci aktivity. V předzpracování musí být ošetřen přechod systémového času přes půlnoc.

serverem, jindy nastavené hodnotě parametru v relativních jednotkách, kterou je potřeba přepočítat (přemapovat) na předdefinovaný rozsah hodnot v reálných fyzikálních jednotkách. Pokud hodnota parametru přímo specifikuje určitou událost (typicky „1“ pro zapnutí a „0“ pro vypnutí něčeho), potom není uvedena v závorce a je součástí specifikační části řetězce začínající **malým písmenem**.

- Různé události musí být značeny různým písmenem a zavedení tohoto značení včetně případného parametru a jeho jednotky je závislé na tématu vzdáleného experimentu, a to s několika výjimkami, které lze považovat za společné pro všechny vzdálené úlohy postavené na platformě iSES – viz úplný přehled v tabulkách [3.3](#)–[3.5](#) na stranách [95](#)–[97](#).

Tabulka 3.3: Kódování důležitých okolností a podmínek vzdáleného měření

Metoda měření nebo varianta vzdálené úlohy zvolená uživatelem (na začátku řetězce popisujícího aktivitu uživatele, v tomto případě v rámci vzdálené úlohy <i>vnější fotoelektrický jev</i>):	
0	Volt-ampérová charakteristika vakuové fotonky.
1	Nabíjení kondenzátoru na brzdné napětí.
Okolnosti, podmínky vzdáleného měření (uvozené, oddělené znakem dvojtečka „:“)	
:A(0)	Uživatel byl k měřicímu serveru přihlášen sám (Alone). V tomto případě neměl omezený čas na měření a byl omezen pouze časovým limitem neaktivity (standardní timeout je 3 minuty), aby zbytečně neblokoval přístup dalším případným zájemcům. Stavový řádek je v tomto případě prázdný.
:W(<i>n</i>)	Uživatel nebyl k serveru přihlášen sám, jeho pořadové číslo v okamžiku přihlášení bylo $n + 1$. Bylo nutné čekat (Waiting) ve frontě na dokončení měření n předchozích uživatelů, tj. v případě úlohy vnější fotoefekt max. $n \times 12$ minut – tento údaj se uživateli zobrazuje ve stavovém řádku na řídicí webové stránce. (Parametr n je specifikován v každém záznamu aktivity.)
:Q	Kdykoliv během vzdáleného měření (s možností řízení experimentu) se k serveru přihlásil další zájemce. Od tohoto okamžiku měl aktuálně měřící uživatel omezený čas na dokončení svého měření, tzn. v případě úlohy na vnější fotoefekt 12 minut/osobu. Ve stavovém okně se zobrazí zbývající čas k dokončení relace. Řetězec „:Q“ se tedy může objevit kdykoliv a kdekoliv v záznamu aktivity a značí vznik fronty zájemců (Queue).
Ukončení relace (vždy uvedené na konci řetězce se záznamem aktivity a uvozené znakem „*“):	
*X	Běh serveru byl přerušen nestandardním způsobem (log nebyl řádně ukončen).
*D	Uživatel zavřel okno prohlížeče, tzn. použil standardní způsob k odhlášení od serveru (Disconnection), který je uveden v pokynech ke vzdálenému měření (neuzavřením okna prohlížeče může po dobu timeoutu blokovat přístup pro další zájemce).
*T	Řízení experimentu bylo automaticky ukončeno serverem a uživatel byl odhlášen z důvodu vypršení časového limitu pro neaktivitu (Timeout). Standardní limit je 3 minuty.

⁸Během zahřívání výbojky postupně roste intenzita světla; tuto skutečnost lze využít k ověření významného poznatku, že hodnota brzdného napětí nezávisí na intenzitě světla dopadajícího na fotokatodu.

Tabulka 3.4: Klasifikace a specifikace aktivity uživatele při vzdáleném měření

Řetězce znaků a příp. parametrů popisující aktivitu uživatele	
(řetězec každé události je vždy uvozen znakem hvězdička „*“). Základní klasifikace aktivity je vyjádřena velkým písmenem. Další specifikace je uvedena malými písmeny a závisí na tématu a příp. variantě vzdálené úlohy.	
*S...	Uživatel změnil nastavení vzdáleně řízené fyzikální aparatury (Settings):
*Sv1	Uživatel zapnul rtuťovou výbojku (je nutné čekat asi 4 minuty na zahřátí výbojky) ⁸ .
*Sv0	Uživatel vypnul rtuťovou výbojku (výbojka chladne a po dobu 3 min ji nelze znovu zapnout) ⁹ .
*Sl1	Uživatel zapnul infračervenou LED ¹⁰ .
*Sl0	Uživatel vypnul infračervenou LED.
*Sf(<i>m</i>)	Uživatel zařadil interferenční filtr a vybral tím vlnovou délku záření dopadajícího na fotokatodu. Parametr <i>m</i> označuje filtr: 0–365nm, 1–405nm, 2–435nm, 3–546nm, 4–568nm, 5 – zakrytá fotonka k proměření temného proudu (Leakage current) nebo pro měření s infračervenou LED.
*Sr(<i>x</i>)	Uživatel změnil zesílení fotoproudu zařazením některého rezistoru, který specifikuje parametr <i>x</i> v jednotkách MΩ (dostupné rezistory: 10 MΩ, 50 MΩ, 100 MΩ, tzn. nejmenší, střední a největší zesílení).
*M...	Uživatel provedl vzdálené měření (Measurement) V případě vzdálené úlohy <i>vnější fotoefekt</i> jsou další specifikace „...“ následující:
*Ma1	Uživatel spustil automatické proměření VA charakteristiky ¹¹ .
*Ma0	Uživatel ručně zastavil automatické proměření VA charakteristiky, než bylo serverem automaticky dokončeno. (Automatické dokončení se v řetězci neuvádí.)
*Mv(<i>u</i>)	Uživatel změnil napětí na fotonce manuálně pomocí posuvníku. Novou nastavenou hodnotu napětí specifikuje parametr <i>u</i> v relativních jednotkách (hodnoty parametru $-1000 \div 1000$ odpovídají reálnému napětí na fotonce v rozsahu $-3 \div +1$ V). Tuto položku považujeme za podstatnou část měření, resp. sledujeme uživatelem zvolenou techniku (manuální/automatické proměření VA charakteristiky); nejedná se tedy o nastavení!
*Mc	Uživatel spustil měření metodou <i>nabíjení kondenzátoru</i> (Charging).
*Md	Uživatel vybil kondenzátor, což je nezbytné před dalším měřením při jiné frekvenci záření (Discharging).

⁸Nastavená doba na vychladnutí výbojky má zamezit jejímu zbytečnému zapínání a vypínání a tím prodloužit její životnost; uživatelé jsou na tento fakt upozorněni na řídicí webové stránce a rovněž jsou požádáni, aby nevypínali výbojku, pokud ve frontě čekají další zájemci.

¹⁰Infračervená LED osvětluje fotokatodu zářením s vlnovou délkou 940 nm, tedy s podprahovou frekvencí a slouží k ověření prahové povahy fotoelektrického jevu. Navíc ji lze využít k ověření funkčnosti webkamery a odhadu případného časového zpoždění - rozsvítí se kontrolka. Rozšiřuje možnosti měření i interaktivnosti vzdálené aparatury.

¹¹Doporučené spuštění automatického měření zajistí plynulou změnu napětí na fotonce, čímž

Tabulka 3.5: Klasifikace pokročilé aktivity uživatele týkající se zpracování dat

*P...	Uživatel provedl úkon nezbytný pro následné zpracování naměřených hodnot (Processing). Následující kódování není závislé na tématu vzdálené úlohy.
*Pr(<i>ID</i>)	Uživatel stisknul tlačítko pro zahájení záznamu naměřených hodnot (Record). Parametr <i>ID</i> představuje automaticky přidělené a zvyšované identifikační číslo, resp. pořadí záznamu, pod kterým bude záznam veřejně dostupný. (Pořadí ID se automaticky zvyšuje, pokud je tato možnost v řídicí webové stránce zaškrtnuta, jinak se poslední záznam automaticky přepíše ¹² .)
*Ps(<i>ID</i>)	Uživatel stisknul tlačítko pro ukončení záznamu naměřených hodnot (Stop record). Následně se uživateli zobrazil grafický náhled posledních naměřených hodnot, které mohou být veřejně dostupné pod pořadovým číslem <i>ID</i> ¹³ .
*Pd(<i>ID</i>)	Uživatel stáhnul naměřené hodnoty uložené a veřejně dostupné pod pořadovým číslem <i>ID</i> ¹⁴ (Download)

pomůže k rychlému naměření poměrně hladké VA charakteristiky. Automatické proměření v celém rozsahu $-3 \div +1$ V trvá přibližně 40 s.

¹²Nelze přepisovat starší záznamy experimentálních hodnot stejného ani jiných uživatelů. Výchozí nastavení počítá s přepisováním posledního záznamu (volba není zaškrtnuta), aby bylo šetřeno s pamětí, protože se předpokládá opakování měření, dokud není uživatel s výsledkem spokojen, a kdy nepovedené pokusy nebudou využity.

¹³Záznam měření bude veřejně dostupný, pokud uživatel nezopakuje měření při správně zaškrtnuté volbě přepisování posledního záznamu. Dostupnost záznamu platí do okamžiku restartu serveru, případně do vyčerpání paměti, kdy se ztratí nejstarší záznamy.

¹⁴Je tedy principiálně možné odlišit případy, kdy uživatel stáhne svá nebo cizí naměřené hodnoty, a to jak poslední naměřená, tak starší, neboť do nejbližšího restartu serveru je jedinečný identifikátor *ID* spojen s určitou IP adresou. Stažení starších a nejspíš cizích dat je možné i v situaci, kdy uživatel čeká ve frontě, což je možné do restartu serveru, kdy se veškeré záznamy měření ztratí. Jednoznačnost identifikace vlastních nebo cizích naměřených hodnot je prakticky limitována využíváním IP adresy; nerozliší tedy případy, kdy např. na jednom školním PC provádí vzdálené měření více studentů.

Ukázku předzpracovaného logu uvádí tabulka 3.6. V této ukázce můžeme sledovat práci uživatele s IP adresou 81.25.16.87¹⁵, který se k měřicímu serveru přihlásil v neděli 17. 4. 2018 v 18 h 37 min. Jeho relace od přihlášení až do odhlášení trvala 1035 s, tzn. 17 min 15 s. V původním logovacím souboru má identifikační číslo 4 „ID(4)“. Uživatel si pro studium vnějšího fotoelektrického jevu zvolil

Tabulka 3.6: Ukázka předzprac. logu aktivity ve vzdálené lab. *vnější fotoefekt*

81.25.16.87	17.4.2011	18:37:29	1035 s	ID(4)
0:W(1){88}*Sv1{23}*Sv1{10}*Sr(100){71}*Sl1{1}*Sl0{4}*Sl1{7} *Mv(-12.16){0}*Mv(-445.85){0}*Mv(-477.93){0}*Mv(-1000.00){1} *Mv(-1000.00){4}*Ma0{160}*Sf(0){1}*Sf(1){3}*Sf(0){10}*Ma1{46} *Pr(1){9}*Ma1{43}*Sf(1){3}*Ma1{43}*Sf(2){3}*Ma1{44}*Sf(3){3} *Ma1{42}*Sf(4){3}*Ma1{43}*Sf(5){8}*Sl0{5}*Ma1{44}*Ps(1){0} *Pd(1){12}*Pd(1)*D				

Legenda kódování viz tabulky 3.3-3.5 na stranách 95-97.

metodu VA *charakteristika vakuové fotonky* (0) a musel po dobu 88 s čekat ve frontě, než přebíral řízení vzdálené aparatury. 23 s po převzetí řízení opakovaným stisknutím tlačítka úspěšně zapnul rtuťovou výbojku „Sv1“ a 10 s poté nastavil maximální zesílení fotoproudu „Sr(100)“, tzn. zařadil rezistor 100 MΩ. Následně pravděpodobně přemýšlel déle než 1 min (71 s), než zkusil zapnout „Sl1“ a vypnout „Sl0“ infračervenou LED. Po ponechání infračervené LED zapnuté pomocí posuvníku měnil napětí na vakuové fotonce, čímž de facto zahájil měření. Toto své měření chtěl ukončit stisknutím tlačítka „STOP“ pro automatického proměření VA charakteristiky „Ma0“, aniž by ovšem toto měření spustil vedlejším tlačítkem „START“. Přitom zároveň v grafu pozoroval, že fotoproud zůstal nulový pro všechny nastavené hodnoty napětí. Následně 2 min 40 s (tj. 160 s) nejspíš přemýšlel, než zkusil výměnu filtru, a tedy změnu vlnové délky světla dopadajícího na fotokatodu. Po několika výměnách filtrů „Sf(. . .)“ (nejspíš testování nebo krátká fáze hraní si) spustil automatické proměření VA charakteristiky tlačítkem „START“ „Ma1“, které trvá asi 40 s, a krátce po jeho dokončení konečně stisknul tlačítko pro zahájení záznamu měření „Pr(1)“. 9 s poté správně nechal poslední automatické měření zopakovat, aby bylo zaznamenáno. Následně postupoval velice rychle a efektivně, tzn. opakovaně zařazoval další dostupné filtry „Sf(index filtru)“ a bez zbytečného prodlení spouštěl a využíval automatické měření „Ma1“. Po proměření VA charakteristik se všemi dostupnými filtry s indexy 0–4 student provedl automatické měření dokonce i při zatemněné fotonce (viz index filtru 5 včetně vypnutí infračervené LED „Sl0“ a poslední spuštění automatického měření „Ma1“). Na konci svého vzdáleného měření student ukončil jeho záznam „Ps“, který byl nadále dostupný pod pořadovým číslem ID=1 (a doplněný aktuálním systémovým datem a časem), a bez prodlevy si vlastní naměřené hodnoty stáhnul „Pd(1)“, protože ID číslo staženého záznamu experimentálních dat je totožné (resp. jiný starší záznam v tuto dobu nebyl k dispozici). Zobrazení a stažení dat

¹⁵Poskytovatel připojení a uživatel v tomto případě pochází z Mladé Boleslavi.

patrně neproběhlo okamžitě, proto student po 12 s čekání stisknul tlačítko pro export dat podruhé a nakonec se standardním způsobem odhlásil.

3.2.3 Výsledky analýzy logů aktivity uživatelů

Z celkového počtu 613 přihlášení k měřicímu serveru pro experiment vnější fotoelektrický jev se v období první poloviny roku 2011 pouze 155 záznamů týkalo zkoumané skupiny. Pokud bychom definovali jednu uživatelskou relaci (session) jako chronologickou sérii připojení k serveru z určité IP adresy, a to v rámci jednoho dne, a zvolili maximální dobu nečinnosti 15 minut (900 s) mezi takovými po sobě jdoucími připojeními, potom by počet relací ve zkoumaném období a pro zkoumané skupiny klesl na pouhých 56. Jelikož očekávaný počet relací byl zhruba o 20 vyšší, lze se domnívat, že někteří ze studentů si nevěděli rady anebo nechtěli či zapoměli provést vzdálené měření, i když v podmínkách školní výuky nelze vyloučit případ, že se u jednoho školního PC (jediná IP adresa) krátce po sobě vystřídal více různých studentů. Z uvedených počtů jen 15 studentů provedlo vzdálené měření (tzn. v záznamu aktivity se objevil řetězec „*M...“) a případně stažení experimentálních dat (řetězec „*P...“).

Podstatná většina záznamů aktivity byla prázdná, což lze vysvětlit technickými problémy, kdy se nepodařilo načíst všechny řídicí JAVA objekty a uživatel tedy nemohl jakkoliv ovládat vzdálenou fyzikální aparaturu. Dále byly pozorovány značné rozdíly v celkové délce jednotlivých přihlášení, a to v rozmezí několika sekund až jedné hodiny, což však nevypovídá nic o smysluplnosti vzdáleného měření! Průměrná délka počítaná ze všech připojení byla 54,7 s, zatímco průměrná délka smysluplných postupů měření byla určena na 756,2 s (přes 12,5 min). Studenti ze zkoumané skupiny se pokoušeli připojit ze 43 různých IP adres, tzn. nejspíš např. jeden školní počítač využil větší počet studentů než jeden. Studenti preferovali provést vzdálené měření v pozdějších odpoledních anebo večerních hodinách a několik výjimek splnilo úkol dokonce až po půlnoci – viz rozložení intervalových četností na obr. [3.1](#).

3.2.4 Identifikované vzorce chování uživatelů ve vzdálené laboratoři

Uživatel A s IP adresou 88.102. . . se k serveru připojoval opakovaně a musel čekat ve frontě zájemců (řetězec „:W“). Nakonec se rozhodl stáhnout cizí dříve naměřené hodnoty (řetězec „Pd(ID)“, kdy pořadové číslo záznamu *ID* patří uživateli s jinou IP adresou).

Uživatel B s IP adresou 81.25. . . nejdříve dne 11. 4. 2011 zkoumal VA charakteristiku vakuové fotonky. Dne 17. 4. 2011 uživatel B získal řízení experimentu po pouhých 88 s čekání ve frontě. Na začátku jen krátce prozkoumával uživatelské rozhraní nebo si *hrál* a následně provedl smysluplné, poměrně efektivní a rychlé proměření šesti VA charakteristik při různých frekvencích záření, které dokončil za 17 min 15 s stažením vlastního záznamu experimentálních hodnot.

Naopak předzpracovaný log z IP adresy 81.25.16.87 ze dne 11. 4. 2011 odpovídá zcela jinému vzorci chování. Celá uživatelská relace trvala asi 63 minut, z toho 2447 s (tj. cca 40 minut) uživatel strávil zřejmě *hraním si* s tlačítky včetně příp. spuštění měření. Tento uživatel se přihlásil k serveru okolo 20 h a se štěstím

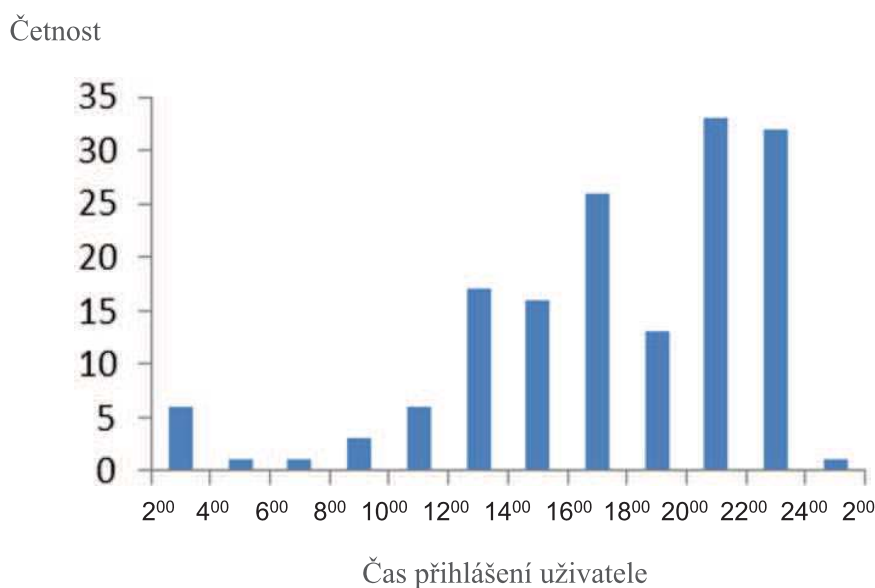
byl jediný zájemce v tento čas, proto nebyl omezen v čase, pouze 3minutovým limitem neaktivity. Záznam aktivity tohoto uživatele představuje jeden z nejdelších záznamů, avšak nelze v něm najít smysluplný cílevědomý postup vzdáleného měření.

3.2.5 Další pozorování a poznatky z analýzy logů aktivity uživatelů

Studenty lze ve vzdálené laboratoři rozdělit na „ranní ptáčata“, kteří na základě doporučení provedli měření včas a snažili se splnit všechny důležité úkoly, a „sovy/odkladače“, které odložily / kteří nechali měření na poslední chvíli, kvůli vytvořené frontě nemohli naměřit vlastní hodnoty, a proto nakonec stáhli a zpracovali cizí naměřené hodnoty, a to zpravidla bez kritického zhodnocení jejich kvality a spolehlivosti. Ačkoliv na původních experimentech založených na JRE bývalo veřejně dostupných až 200 záznamů měření, druhý typ studentů si vybíral zpravidla z posledních tří cizích záznamů měření.

Ačkoliv studenti odevzdali na první pohled pečlivě vypracované referáty (protokoly) z měření, skutečnost zjištěná na základě analýzy logů vypadá odlišně. S použitím technik vytěžování dat ve vzdělávání (EDM) jsme objevili několik zajímavých poznatků:

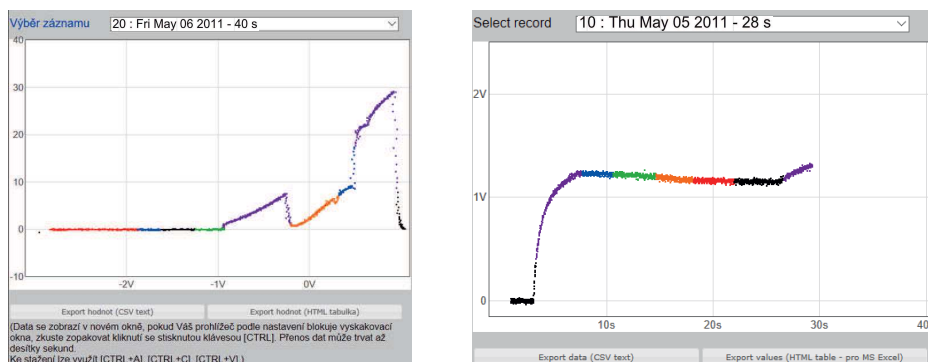
- Ačkoliv jsou vzdálené laboratoře otevřené jakýmkoliv SŠ studentům, převažující většina není schopna řádně provést vzdáleně řízený experiment bez předchozích zkušeností a tréninku. Pokud jsou studenti k tomu donuceni, zpravidla nepředvedou smysluplný postup měření nebo si pouze *hrajou*.
- Při vzdáleném měření často pozorujeme **fázi hraní** v různé délce trvání



Obrázek 3.1: Intervalové rozdělení četností času přihlášení uživatelů k měřicímu serveru pro vzdálenou úlohu *vnější fotoelektrický jev*. [99]

a tato fáze má zřejmě důležitý význam pro úspěšné dokončení vzdáleného měření. Pouze ti studenti, kteří si alespoň chvíli „hráli“, byli schopni správně, resp. smysluplně nastavit experiment a spustit vzdálené měření, případně pořídit záznam experimentálních hodnot (viz ukázky hry na obr. 3.2). Nakonec tito studenti nějaké reálné naměřené hodnoty stáhli, a to jak vlastní, tak překvapivě i cizí.

- Studenti projevují poměrně vysokou důvěru v jakákoliv dostupná (tzn. cizí) naměřená data, aniž by se sami pokusili o jejich naměření.
- Studentům **schází důvěra ve vlastní naměřená data**, což může být obecně spojeno s aktuální změnou vzdělávacího paradigmatu (např. namísto individuální práce a zodpovědnosti práce ve skupině) nebo např. s chybějícím dohledem učitele, který může správnost postupu studentům průběžně potvrzovat. Studenti nejsou zvyklí na jistý stupeň nepředvídatelnosti a nejistoty v jiném typu prostředí – vzdálené laboratoře.



Obrázek 3.2: Ukázky záznamů vzdáleného měření úlohy *vnější fotoelektrický jev*, kde lze pozorovat fázi hraní uživatelů. V levém obrázku si uživatel zvolil studium VA charakteristiky vakuové fotonky, v pravém obrázku metodu nabíjení kondenzátoru na brzdné napětí, kdy však systematicky nepoužívá tlačítko pro vybití kondenzátoru. Oba uživatelé při jednom měření mění frekvenci monochromatického světla dopadajícího na fotokatodu (různým frekvencím odpovídá v grafu různá barva bodů), tedy takový záznam měření je pro zpracování zcela nepoužitelný. Hra však může mít důležitý význam pro seznámení se s uživatelským rozhraním a se všemi dostupnými funkcemi včetně záznamu měření. Dále lze v dnešní době běžně pozorovat, že někteří studenti pro vzdálené měření preferují verzi řídicí webové stránky v angličtině.

3.3 Neformální rozhovor s uživateli

Pro získání zpětné vazby od uživatelů a zmapování jejich názorů na vzdáleně řízené experimenty bylo v rámci pilotního výzkumu vzdálených laboratoří provedeno několik neformálních rozhovorů, a to jednak s 10 středoškolskými učiteli ze tří středních škol (z nichž někteří působí částečně i na VŠ), jednak s 20 studenty z těchto SŠ, kteří vzdálené měření absolvovali v rámci výběrového semináře a cvičení z fyziky, případně v rámci běžné hodiny fyziky (s cílem vylepšit si klasifikaci z předmětu fyzika provedením dobrovolného úkolu). Aby respondenti nebyli svázáni žádnou formální strukturou a mohli sdělit především své první dojmy, které rovněž ovlivňují jejich postoj k vzdáleným reálným experimentům, byl zvolen neformální rozhovor s následujícími obecnějšími návodnými otázkami:

- Zaujala Vás možnost zkoumat některé fyzikální jevy prostřednictvím vzdáleně řízených experimentů?
- Má podle Vás smysl budovat vzdálené laboratoře, případně na jaká témata?
- Jak se Vám se vzdálenými experimenty pracovalo? Jak dobře jste se orientoval(a) na webových stránkách?
- Využil(a) jste další e-learningové zdroje, jako např. e-texty, simulace, videonávody, motivační videa apod?
- Máte nějaké návrhy pro změnu a vylepšení stávajících vzdálených experimentů?

P. Brom v úvodu přátelského rozhovoru respondentům sdělil, že rozhovor je zcela anonymní, že ho zajímá skutečný názor uživatelů na počítačem podporované experimenty a že cílem je zmapovat jak kladné, tak záporné a případně neutrální postoje k této alternativní formě výuky. Respondenti byli ochotní rozhovoru věnovat značně rozdílnou dobu v rozmezí jedné minuty až jedné hodiny (zejména s ohledem na jejich jiné aktuální pracovní vytížení i na charakter jejich osobnosti), mnozí se v průběhu rozhovoru krátce zamysleli, a dokonce své názory mírně přehodnotili, poupravili či upřesnili. Zvláště někteří učitelé v diskusi kritizovali současný stav výuky fyziky ve škole (SŠ nebo VŠ) a zasadili své odpovědi do širšího kontextu.

P. Brom si v průběhu rozhovoru heslovitě poznamenával klíčová slova, případně přesné citace výpovědi (které jsou dále uvedeny v uvozovkách). Rozhovor probíhal zpravidla o přestávkách přímo v budově školy a nejčastěji trval v rozmezí 2–4 minut. Několik delších rozhovorů se podařilo realizovat po skončení školní výuky v daný den. Někteří studenti měli problém svůj názor jasně formulovat a P. Brom jim zpravidla nechtěl s formulací pomáhat, aby je neovlivnil, resp. studenti nebyli ochotní v takových případech rozhovoru věnovat více času. P. Brom se dále snažil odezírat z mimiky i gestikulace ve snaze zjistit reálný postoj daného respondenta, i když skutečné důvody nebyly identifikovány či objasněny.

3.3.1 Hodnocení vzdálených laboratoří od učitelů

Tři z deseti učitelů ve věku 30 až 60 let, kteří jsou ve škole značně oblíbení, prezentovali svůj v zásadě negativní postoj k experimentování ve virtuálním prostředí

(simulace i vzdálené reálné laboratoře). Tito pedagogové jsou zarytými zastánci tradičních pokusů, při jejichž provádění občas využívají PC a standardní měřicí systémy jako Vernier či ISES. Tito učitelé kladou důraz na lokální provedení i na možnost „sáhnout si na pomůcky a experimentální vybavení“. Jeden z těchto učitelů, který působil v Praze na PORG a v současnosti v Mladé Boleslavi, uvedl, že „nevidí např. žádný rozdíl mezi prováděním vzdáleného experimentu či simulace a puštěním videozáznamu reálného pokusu“; vzdálené experimenty apod. „nemá rád a vadí mu na nich virtuálně“. Po zmínění několika specifických výhod (viz část 1.2 od str. 11) P. Bromem a krátkém zamyšlení tento učitel připustil, že „pro některá témata vzdáleně řízené experimenty dávají smysl – např. zákony radioaktivity, příp. pokud je experimentální vybavení finančně nedostupné pro školu“. Jeden z deseti učitelů zaujal neutrální postoj, nebyl ochotný se zamyslet nad hodnocením vzdálených laboratoří s odůvodněním, že „vzdáleně řízené experimenty momentálně neuspokojují žádnou jeho potřebu“. Šest z deseti učitelů hodnotilo vzdálené experimenty pozitivně, a to s rozdílnou mírou nadšení.

Jedna SŠ učitelka z Prahy, která vzdělává i budoucí pedagogy na VŠ (MFF UK), s oblibou využívala vzdálenou úlohu ke studiu radioaktivity, případně na vnější fotoelektrický jev, a to během tří let po zahájení spolupráce s P. Bromem. Vzdálená laboratoř jí pomohla vyřešit problém s absencí kvůli její účasti na zahraniční konferenci; namísto zrušení výuky tedy zadala úkol provést vzdálené měření a následně vypracovat a odevzdat standardní protokol. K tomuto řešení napomohl příznivý počet studentů ve skupině 3 až 12 a fakt, že se jednalo o VŠ studenty oboru *informatika*, kteří se zajímali o fyziku a předmět si zapsali dobrovolně. Většina z nich přitom z fyziky nematurovala. Studenti vzdálenou úlohu zvládli vesměs úspěšně a v jednom roce čtyři studenti z pěti si u závěrečné zkoušky sami vybrali téma jaderná či atomová fyzika, pátému studentu byla tato otázka zadána zkoušejícím: čtyři z těchto pěti studentů byli napoprvé klasifikováni známkou výborně, jeden student (který si téma vybral sám) známkou dobře. V posledních dvou letech vzdálený experiment učitelka nevyužila, protože výběrový předmět se pro nezájem neotevřel, resp. protože se podařilo do Interaktivní fyzikální laboratoře na UK MFF pořídit nový detektor částic MX-10 a byl upřednostněn tradiční lokální experiment s tímto detektorem [135]. Učitelka zdůraznila, že vzdálené měření je založeno na důvěře studentů. Úloha na vnější fotoefekt je vhodná do výběrového semináře a učitelka aktivně využívá simulaci PhET k tomuto tématu. Rovněž kladně hodnotí úlohu na spektra, avšak kvůli omezenému času v semestrální výuce a následnému zkouškovému období studenti ve výběrovém semináři zpravidla nestíhají vzdálený experiment na spektra provést. Díky rozhovoru učitelku nově zaujala možnost stáhnout si data z dlouhodobého měření a např. zpracováním hodnot pozadí ověřit Poissonovo rozdělení. Od příštího akademického roku tedy počítá s opětovným využíváním vzdálené úlohy ke studiu radioaktivity a oceňuje dostupnost takovýchto experimentálních dat na Internetu i jejich relativně jednoduchou stažitelnost. Dále z rozhovoru vyplynula nutnost občas zopakovat propagaci vzdálené laboratoře a případných nových úloh; učitelka zpravidla nenapadne revidovat a aktualizovat si stav dostupných úloh samostatně.

Jiná učitelka na mladoboleslavské SŠ ráda při výkladu v hodině využívá vzdálený experiment na radioaktivitu, zejména tlačítko pro automatické proměření, v jehož průběhu novou látku vyloží a popíše experiment; nakonec komentuje experimentálně určené hodnoty, které jsou znázorněny v přehledném grafu na řídicí

webové stránce. Učitelka využívá všechny vytvořené úlohy a příležitostně podle času zadává studentům domácí úkol, zejména vyhodnocení úrovně přírodního pozadí včetně určení směrodatné odchylky. Možnost stažení větších výběrových souborů z dlouhodobého měření ji zaujala, avšak pravděpodobně ji v praxi nevyužije. Podle její zkušenosti se vzdáleně řízený experiment na radioaktivitu studentům v kvartě osmiletého studia líbil a odůvodňuje to zejména využitím počítače: „Kde je PC, je to moderní. . . “ Zajímavé je, že vzdálený experiment zařazuje i do **hodiny matematiky**, která má větší časovou dotaci než fyzika, a to při výkladu statistického zpracování.

Další SŠ učitelka z Mladé Boleslavi ocenila existenci vzdálených experimentů na témata, kdy pořízení potřebných pomůcek přesahuje finanční možnosti školy, a uvedla zajímavou poznámku, že je lze využít pro „samostatnou laboratorní práci studentů až ve třetím ročníku, kdy jsou studenti schopni samostatně sestudovat teorii, provést vzdálené měření a vypracovat standardní protokol z laboratorní práce“. K tomu jsou potřeba návody na provedení vzdáleného experimentu a případně i zpracování. Do úlohy na polarizaci by ocenila přidat *Brewsterův úhel*, jinak lze stávající experiment využít pouze pro formulaci kvalitativních závěrů; kvantitativní ověření jde nad rámec současných osnov a v případě volitelného semináře a cvičení z fyziky nelze stihnout ověření většiny probíraných vztahů. Vzdálené měření hodnotí jako vhodnou alternativní a zajímavou formu výuky, která může zpestřit tradiční hodiny fyziky.

Jiná zkušená SŠ učitelka z Mladé Boleslavi v důchodovém věku projevila nadšení ze všech nově vytvořených vzdálených laboratoří a ocenila přidanou hodnotu pro daná témata, jako např. „větší počet čar Balmerovy série i zjevný pokles jejich intenzity v rámci série“. Pochválila rovněž stručně vysvětlenou teorii vzniku spekter a celý nový experiment zhodnotila jako „fantastický“. Vzdálené měření vnějšího fotoefektu oběma standardními metodami je podle jejího názoru „úžasné a proveditelné na SŠ“. Tato učitelka dále pečlivě prostudovala všechny úlohy k tématu *radioaktivita*. Pochválila „perfektně formulovanou a přehledně zpracovanou“ motivaci i teorii ke všem třem úlohám, ze které pouze ověření Poissonova rozdělení není na SŠ využitelné. Z úlohy *měření radiačního pozadí* však vyzdvihla „skvěle formulovaný závěr“. Jako „výborné a zcela dostupné středoškolákům se zájmem o fyziku (tzn. do semináře)“ hodnotí zpracování výsledků a diskusi, a to u všech třech úloh. Zajímavé a povzbudivé byly následující závěrečné poznámky:

- „Kvalitativní demonstrace ochrany vzdáleností s použitím vzdálené laboratoře by byla ideální pro použití i v běžné výuce, ale vzhledem k časopresu se nestíhá.“
- „I když na školách obvykle je souprava GAMA-BETA, určitě by se pokusy stihly předvést maximálně jako kvalitativní závislosti. Kvantitativní zpracování a grafy jsou proto výrazným přínosem využití vzdáleného experimentu.“
- „Měření radiačního pozadí ani se soupravou GAMA-BETA není v takovém rozsahu proveditelné ve škole, takže přínos vzdálené laboratoře je nesporný.“

Smysluplné využití vzdálených laboratoří tato učitelka vidí ve volitelném semináři a cvičení z fyziky, avšak bylo by potřebné celkově navýšit hodinovou dotaci

na výuku fyziky (v současnosti 2 hodiny týdně v 1. až 3. ročníku), a to ve prospěch laboratorních prací, kdy by získala čas uvést studenty do problematiky, do vzdáleného měření a nakonec jim poskytla zpětnou vazbu včetně komentáře nejčastějších odborných či formálních chyb v protokolech. Učitelka kritizovala současný stav výuky fyziky takto: „Za jeden rok je potřeba probrat témata elektřina a magnetismus, optika, atomová fyzika, relativita a kvantová fyzika“. Podle jejího komentáře „právě pokusy z moderní fyziky nelze stihnout v rámci laboratorních prací a zbývající možnosti jsou prezentovat je v semináři, případně zadat formou domácího úkolu“. Stávající řídicí webové stránky nových vzdálených experimentů zhodnotila jako „přiměřené“ a zdůraznila roli učitele, který by měl studenty do problematiky moderní fyziky i do vzdáleného měření vždy uvést. Proto by ocenila doplnění návodů, resp. metodických listů především pro učitele, které by však mohli použít i vážní zájemci o fyziku k samostatnému prostudování.

3.3.2 Názory studentů na počítačem podporované experimenty

Zhruba jedna třetina z dotázaných 20 studentů zhodnotila vzdálené měření strohým pozitivním komentářem, že měření bylo „dobré“ nebo „zajímavé“. Někteří nebyli ochotni poskytnout podrobnější komentář, část z těchto studentů zaujala především *možnost ovládat nějaké zařízení na dálku přes Internet* a vzdálené měření vnímali jako poučné, obohacující zpestření výuky fyziky. Otázkou zůstává, zda se takové hodnocení týká vlastních fyzikálních jevů, anebo spíš technologie vzdálených laboratoří. Více než polovina oslovených studentů zmínila obecnou „složitost, obtížnost fyziky“ a naznačila, že se při vzdáleném měření „trápila“ podobně jako při běžné výuce, a potřebovala radu či pomoc spolužáků, případně učitele (nebyl-li k dispozici ochotný chytrý spolužák). Zpravidla se tito slabší studenti cítili ztracení jak při spuštění vzdáleného experimentu, tak simulace. Tři studenti z dotázaných zmínili, že je při vzdáleném měření *vnějšího fotoefektu* obtěžovalo „dlouhé čekání na zahřátí výbojky“ (4 minuty). Jeden z těchto studentů čekal ve frontě a prý nějaký uživatel před ním výbojku vypnul (tzn. čekání až 7 minut, z toho 3 minuty na vychladnutí).

Naopak naprosto jiné a velmi povzbuzující hodnocení vyjádřil omezený počet studentů s hlubším zájmem o fyziku, kteří si zpravidla vybrali fyziku jako volitelný seminář. Tito studenti především velmi ocenili *jednak možnost získat nějakou experimentální zkušenost se složitými fyzikálními jevy z moderní fyziky, jednak pochopili grafické zpracování dat jako cenný nástroj i dovednost* a kvitovali možnost si grafické zpracování poměrně snadno vyzkoušet. Pouze jednotlivci zmínili, že se tato dovednost vyžaduje mj. při zpracování praktických experimentálních úloh z Fyzikální olympiády (FO) [159]. Tito studenti hodnotili českou vzdálenou laboratoř jako „velmi obohacující“ a naplnili v podstatě většinu záměrů autora P. Broma. Navíc uvedli své přesvědčení o tom, že „grafické zpracování určitě využijou při vypracování úloh FO“, dále „při řešení úloh Fyzikálního korespondenčního semináře (FYKOS)“ a podobných soutěží i „při plánovaném budoucím studiu na VŠ“.

3.3.3 Shrnutí hodnocení uživatelů

Názory uživatelů na vzdáleně řízené experimenty z řad učitelů i studentů se značně liší a odrážejí jednak obecný postoj studentů k fyzice, jednak jejich důvěru v technologii a vztah k virtuálnímu prostředí. Většině oslovených studentů virtuální prostředí nevadí, díky každodenní práci s mobilními zařízeními, hraním her apod. jsou na něj zvyklí. Někteří z nich dokonce oceňují použití oblíbeného počítače a Internetu také při výuce a využívají to jako argument pro rodiče, aby jim dovolili na Internetu a PC pracovat¹⁶. Někteří učitelé považují masivní budování vzdálených laboratoří za zbytečné a kritizují nezdravou interakci studentů s virtuálním prostředím včetně vzdáleně řízených experimentů. Pro pečlivě vybraná témata jsou však ochotni připustit výjimku. Většina dotázaných pedagogů i studentů hodnotí vzdálené laboratoře jako alternativní, obohacující a zpestřující formu výuky fyziky.

Rovněž se liší názory uživatelů na stávající podobu webových stránek – studijních **e-textů** i vlastních **řídících stránek** jednotlivých experimentů. Pro autora je na základě zpětné vazby velmi obtížné najít kompromis, které další informace a pokyny kromě vlastních řídících a zobrazovacích prvků uvést na řídicí stránku, aby ve výsledku nebyla přeplněna a nezhorsila se celková přehlednost stránky. Na jedné straně mnozí respondenti kritizují nepřehlednost stránek (řídících i studijních e-textů), na druhé straně požadují sepsání podrobných návodů, avšak mnozí z nich přesto pečlivě nečtou všechny e-texty (které jsou podle přesvědčení autora maximálně stručné), nejsou ochotni se nad vzdáleným měřením, nad úkoly a cíli měření hlouběji zamyslet, resp. věnovat tomu všemu svůj drahocenný čas. Zřejmě i z důvodu omezeného času mnozí studenti se soustředili pouze na splnění úkolu, tedy na vzdálené měření a jeho zpracování formou standardního protokolu, a nevyužili další podpůrné zdroje jako simulace, videonávody či zevrubné pročítání e-textů. Raději se obrátili na chytrého spolužáka, případně na učitele, aby jim pomohl úkol co nejrychleji splnit. **Nadaným studentům** obvykle stačilo provést vlastní vzdálený experiment a předtím si přečíst stručnou teorii z e-textů, odkud jim bylo vše včetně úkolů a postupu jasné.

Z rozhovorů vyplynulo prakticky jediné realizovatelné doporučení, aby byly vzdálené experimenty doplněny o metodické listy. Ty lze vypracovat až po nějakém časovém odstupu a s využitím získaných zkušeností. Je to právě učitel, kdo může většinu studentů uvést do problematiky a pomoci jim zvládnout vzdálené měření a splnit požadované úkoly včetně grafického zpracování, případně pomoci najít chybu. V metodickém listu by proto měly být zmíněny právě nejčastější chyby studentů, kterých se při vzdáleném měření či jeho zpracování dopouštějí, a to v závislosti na konkrétním tématu experimentu. Nadaní studenti jsou schopni stávající vzdálené laboratoře zvládnout samostatně a stačí jim zpravidla zpětná vazba od učitele k vypracovanému protokolu z měření.

¹⁶Na základě výpovědí oslovených studentů mnozí rodiče často dětem přístup na PC a Internet zakazují, značně omezují a využívají zákaz jako jediný účinný trest za nějaký prohřešek svých dětí či naopak povolení jako silnou motivaci pro splnění nějakého úkolu. Toto jednání rodičů lze vysvětlit také jejich obavou z nezdravé přemíry virtuálního prostředí, které jsou děti vystaveny.

4. Diskuse a náměty do budoucna

4.1 Diskuse výsledků a využitých metod výzkumu

4.1.1 Zhodnocení proveditelnosti vybraných technik výzkumu

V rámci pilotního výzkumu vzdálených experimentů v české vzdálené laboratoři www.ises.info bylo vyzkoušeno několik metod a byla testována jejich reálná proveditelnost.

Na začátku studia se doktorand pokusil o standardní konstrukční výzkum efektivity vybraných vzdálených experimentů, pro který navrhnul upravený kvaziexperimentální design využívající prohozené repliky (switching replications), a to pro náročnější témata z moderní fyziky, kdy je možné nějaký efekt přidané hodnoty vzdáleného měření v porovnání s tradičním výkladem očekávat (*studium radioaktivity* pro úvod do vzdáleného měření a dále témata *spektra* a *vnější fotoefekt* pro techniku prohozených replik). Tento výzkum byl mj. podpořen vývojově-výzkumným grantem GAUK č. 4466/2011. Avšak již v rámci pilotního provedení na menším dostupném výběru (tzn. před aplikací na větší výběr) se projevil zejména technické problémy, které doktorand v laboratoři na fakultní počítačové síti nepozoroval a nebylo v jeho silách je vyřešit. Zcela nepředvídatelné a nespolehlivé načítání všech nezbytných JAVA objektů v řídicí webové stránce neumožnilo studentům řádně se připojit k měřicí aparatuře a provést vzdálené měření. Tímto technickým problémem až později (mj. na základě rozhovorů se studenty i učiteli) doktorand vysvětlil pozorovaný a značně velký počet předzpracovaných logů aktivity s překvapivě *zcela prázdným řetězcem aktivity* (nemohl-li uživatel vzdálenou aparaturu ovládat, nemohla být zaznamenána žádná jeho aktivita). To je zásadní **faktor**, který by ovlivnil **interní validitu** jakýchkoliv závěrů takového výzkumu.

Omezenému počtu studentů se však podařilo připojit (zejména na školních, ale i domácích PC) a provést vzdálené měření. Práce těchto studentů mohla být sledována prostřednictvím záznamů – tzv. logů aktivity automaticky prováděných měřícím PC/serverem. Analýza logů aktivity přinesla zajímavé poznatky o chování studentů ve vzdálené laboratoři, popsané v části [3.2.3](#) od str. [99](#). Obecným problémem této metody výzkumu je **anonymita**. Přestože byly studentům zapojeným ve výzkumu doktorandem přiděleny jednoznačné identifikační údaje pro přihlášení se k serveru vzdáleně řízeného experimentu a podařilo se spárovat odevzdané protokoly se zpracovanými záznamy aktivity, nemůžeme mít naprosto spolehlivou a nezpochybnitelnou informaci o tom, jaký uživatel (nebo dokonce skupina uživatelů) u PC seděl a vzdálené měření provedl. Díky analýze logů aktivity se podařilo identifikovat několik vzorců chování studentů ve virtuálním vzdělávacím prostředí a tato zjištění byla publikována v recenzovaných časopisech. Analýza logů aktivity uživatelů se tedy v rámci pilotního výzkumu vzdálených laboratoří ukázala jako nejvýznamnější zdroj nových poznatků a rovněž pro relativně nižší náročnost provedení ji lze pro budoucí výzkumy doporučit přinejmenším jako do-

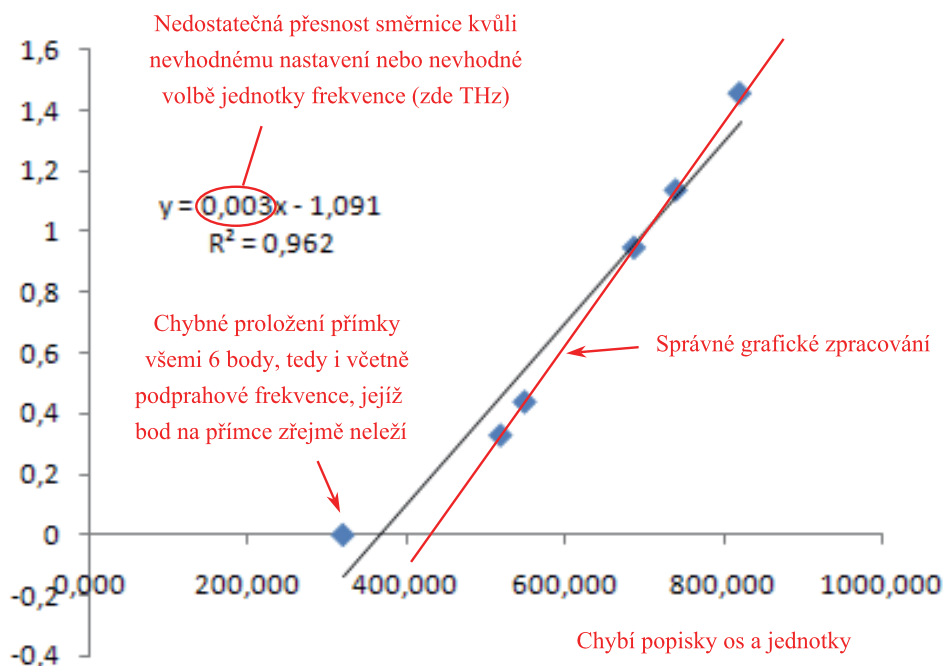
plňující a podpůrný zdroj informací. Doktorand pro účely analýzy logů navrhnul systém předzpracování rozsáhlých logovacích souborů, který přímo zahrnuje základní klasifikaci jednotlivých činností (tzn. úkony spojené jednak s *nastavením* experimentu, jednak s *měřením* a nakonec se *zpracováním* výsledků měření).

Pro získání dalších a pokud možno neanonymních informací se navíc doktorand pokusil o **dotazníkové šetření**. Problémy pro dotazníková šetření však jsou značně omezený čas ve výuce, neochota učitelů ztrácet čas dotazníky na úkor řádné výuky, a dokonce i vypovídací hodnota dotazníků je nevalná. Doktorand i ve značně omezeném počtu realizací dotazníkové šetření pozoroval, že významná část respondentů mnohdy není samostatně schopna formulovat svůj postoj a názory, při vyplňování dotazníku se zřejmě vzájemně radí nebo přímo opisují odpovědi spolužáků (značná část odpovědí se naprosto shodovala u žáků, kteří seděli vedle sebe). Pro získání nových kvalitativních poznatků a zpětné vazby k vytvořeným vzdáleným laboratorím se proto doktorand rozhodl pro formu **neformálního rozhovoru** jednak se studenty, jednak s učiteli, kdy předpokládal větší kontrolu nad spolehlivostí dat (zejména využití mimiky, gestikulace, pohybu očí a dalších aspektů nonverbální komunikace). Doktorand díky praktickým zkušenostem dospěl k přesvědčení, že klasická dotazníková šetření či ankety bývají pro většinu respondentů spíše *obtěžující* (z různých důvodů jako aktuální vytížení jinými povinnostmi, antipatie k fyzice, neochota či lenost vytvořit si a formulovat svůj názor apod.), proto zvolil formu neformálního rozhovoru s příslibem anonymity s cílem zjistit „první a nejsilnější dojmy“ a skutečný názor studentů i učitelů na vzdáleně řízené laboratoře. Při rozhovoru se doktorand snažil být maximálně pasivní a nijak neovlivňovat názor respondentů. Obecným problémem ankety je ochota či neochota respondentů odpovídat a skupina respondentů v žádném případě **nepředstavuje reprezentativní vzorek populace**. Proto nelze zjištěné poznatky zejména kvantitativně zobecňovat. Nicméně pro kvalitativní pilotní výzkumy s cílem orientačně zmapovat nové prostředí je využití ankety opodstatněné a lze jen doporučit pečlivé zvážení konkrétní formy, délky, obsahu a způsobu provedení ankety.

4.1.2 Reflexe zamýšleného designu nových vzdálených úloh

Zamýšlený design vzdálených experimentů, které by měly uživatelům poskytnout jistou volnost a zejména **prostor pro chyby**, tzn. umožnit naměřit i nesmyslné hodnoty, se osvědčil. Např. jednomu studentovi, který měl zájem o fyziku a vybral si náročnější úlohu, se nedařilo uspokojivě proložit naměřenou závislost exponenciální funkcí (přiznal, že si pořádně nepřečetl návod). Při konzultaci s učitelem si sám uvědomil, že zapomněl odečíst pozadí a poučil se z této chyby, protože po opravě experimentálních hodnot fit modelovou funkcí již byl přesvědčivý. Jelikož to i správně v diskusi zdůvodnil („ $C \cdot e^{-A \cdot x} + B \neq D \cdot e^{-E \cdot x}$ – exponenciální funkce takovou vlastnost nemá“ – pro nenulové parametry A až E – pozn. autora), byl nakonec za protokol učitelem odměněn známkou jedna. Dva studenti přišli za učitelem s otázkou, proč v některých případech časová závislost nabíjení kondenzátoru byla klesající narozdíl od jiných? Po návodné otázce učitele („Proč ostatní časové závislosti začínají právě v nule?“) dokázali tito studenti sami odpovědět, protože na začátku byl kondenzátor vybitý, a vzápětí si uvědomili svou chybu, že v daných případech zapomněli před měřením kondenzátor vybit a reálně namě-

řené závislosti jim již byly zcela jasné, což jeden ze studentů komentoval slovy: „Tak to je fakt reálný měření, který se neoblafné!“ Na obr. 4.1 jsou zachyceny další příklady chyb při zpracování měření vzdálené úlohy na *vnější fotoelektrický jev*.



Obrázek 4.1: Ukázka chybného studentského grafického zpracování měření ze vzdálené úlohy *vnější fotoelektrický jev*. Student(ka) ve svém protokolu ze vzdáleného měření uvedl(a) graf vytvořený v programu MS Excel hned s několika nejčastějšími chybami, popsány učitelem – viz komentáře v grafu červeně. Přestože experimentální hodnota Planckovy konstanty shodou náhod (tj. díky malé přesnosti směrnice a jejímu zaokrouhlení na jedinou platnou číslici) vyšla typicky správně, učitel nemohl akceptovat argumentaci studenta(ky) v diskusi a závěru, že „grafickým zpracováním se podařilo ověřit platnost Einsteinovy rovnice pro vnější fotoefekt“.

4.2 Náměty pro budoucí výzkumy

Výzkum efektivitu alternativní formy výuky, jakou představují i reálné vzdáleně řízené laboratoře, je úkol vhodný raději pro **větší výzkumný tým** než pro jednotlivce. V současnosti zásadním problémem takových výzkumů je omezenost zdrojů a technická i finanční náročnost na údržbu vzdáleně řízených laboratoří. Proto lze s pochopením přijmout fakt, že počet tzv. otevřených laboratoří ve světě je v současnosti značně omezený a že vlastníci vzdálených laboratoří blokují přístup k nim jen pro omezenou skupinu uživatelů, případně je transformují na komerční službu.

Z rešerše starších a podstatně rozsáhlejších výzkumů vyplynulo, že studenti se mohou efektivně učit ze všech tří formátů laboratoří: tradičních, vzdálených

i simulovaných. Zřejmě nedává smysl zavádět formát vzdálených laboratoří na všechna možná témata fyzikálních experimentů a zkoumat jejich efektivitu. V odůvodněných případech, jako jsou zejména vybraná témata a relevantní experimenty z moderní fyziky, by však provedení takového výzkumu mohlo přinést zajímavé a významné výsledky. Je však nezbytné zabezpečit proveditelnost tohoto typu výzkumu, např. podle upraveného návrhu výzkumného designu s prohozenými replikami popsaného v této práci. To pro realizaci rozsáhlejšího výzkumu obnáší:

- Zajištění a ověření funkčnosti a spolehlivosti vzdálených experimentů. (Po přechodu od Java Runtime Environment k platformě JavaScript a postupným přebudování původních vzdálených laboratoří na tuto platformu může být tento požadavek již zajištěn.)
- Ideálně **navýšení počtu** identických vzdáleně řízených experimentů na více než jeden, protože v tomto případě neexistuje záloha – alternativa.
- Doplnění vzdálených laboratoří o **systém rezervace času měření**, který by mohl vyřešit pozorovaný a závažný **problém s tvorbou front** (zejména před termínem odevzdání) a včas realizovat preventivní opatření, aby bylo tvorbě front při omezeném počtu vzdálených laboratoří zabráněno a aby studenti mohli vzdálené měření řádně provést a v případě potřeby své měření zopakovat. V rezervačním systému by tedy měly být řešeny i **časové rezervy** pro takové případy a větší počet identických vzdálených laboratoří by tomu napomohl.
- Průběžnou revizi e-textů nejlépe týmem expertů a obecně průběžné vylepšování virtuálního prostředí vzdálené laboratoře podle zpětné vazby uživatelů i podle výsledků výzkumu – zejména analýzy logovacích souborů.

Ze zkušeností vlastních i jiných autorů (např. výzkum Ž. Gerhátové [4]) však překážkou pro takové výzkumy bývá současná **neochota škol spolupracovat**.

Práce autorů Ma a Nickersona doporučuje „zaměřit výzkumy na hybridy laboratoří“. Zejména pro experimenty z elektřiny a magnetismu, případně i pro jiná vybraná a realizovatelná témata by bylo zajímavé podrobit výzkumu efektivitu tzv. **lokálně-vzdálené experimenty** [18] navržené a poprvé realizované F. Lustigem a kol. v roce 2017 [18], [55]. Takový formát řeší některé zmíněné nevýhody vzdálených laboratoří a může být snadno dostupný značně většímu počtu škol, pokud poběží na mládeži relativně oblíbené platformě Arduino.

Standardní konstrukční výzkum efektivitu je vhodné doplnit **analýzou logů aktivity uživatelů**, kdy by měla být zajištěna spárovatelnost nejlépe s odevzdanými protokoly. Právě z analýzy logů lze získat cenné informace o reálném chování žáků ve virtuálním prostředí, které by mohly pomoci stávající vzdálené laboratoře podle potřeby upravit a vylepšit. Dalším vhodným nástrojem a zdrojem informací mohou být **případové studie** prováděné přímo při vzdáleném měření studentů.

¹Lokálně-vzdálený experiment je současně lokální, tedy učitel nebo žáci jej připravují a provádějí tradičním způsobem (hands-on) a zároveň k němu mohou žáci či studenti ve třídě přistupovat vzdáleně přes svá mobilní zařízení, případně i později po skončení výuky, a to např. za účelem podrobného proměření a zpracování nějaké fyzikální závislosti, pro prezentaci své práce vrstevníkům apod.

4.3 Náměty pro další rozvoj vzdálených laboratoří

Na základě dosavadních zkušeností z provozu a z výzkumu není reálné ani smysluplné další rozšiřování vzdálené laboratoře www.ises.info o nové experimenty. Autor zastává názor, že **téma vzdálené úlohy musí být pečlivě vybráno a zváženo**. Může-li se některý experiment ve škole provádět tradičně s lokálními pomůckami, pak je spíš zbytečné nabízet jej formou vzdálené laboratoře. Mělo by však smysl zduplikovat stávající vytížené experimenty, jednak pro účel zálohy² jednak pro zajištění hladkého průběhu výzkumů a zejména rovněž pro jejich další vývoj a vylepšování³.

Provedený pilotní výzkum v podobě rozhovorů upozornil např. u vzdálené úlohy **vnější fotoefekt** na problém dlouhé doby čekání na zahřátí rtuťové výbojky, ale také na občasné zaseknutí karuselu s filtry, které obvykle může vyřešit jen fyzická obsluha ve vzdálené laboratoři. Zde by se např. nabízelo vylepšení vzdálené úlohy v podobě náhrady rtuťové výbojky i karuselu s filtry laserovými ukazovátkami, která prakticky fungují okamžitě a přinášejí i další možnosti měření při vyšších intenzitách světla dopadajícího na fotokatodu – zejména pro podprahové frekvence, kdy (v souladu s historickým zjištěním) ani vyšší intenzita světla nezpůsobí vnější fotoelektrický jev. Problém s chlazením u některých novějších typů laserových ukazovátek se přitom nezdá být překážkou, protože vzdálené měření s jednou vlnovou délkou trvá obvykle 40 s. Omezení délky měření v těchto případech (za účelem pauzy pro vychladnutí) naopak může být pro uživatele poučné. Autor dokonce pomýšlí na další posunutí technologií vzdáleně řízených laboratoří, aby si vzdálený uživatel mohl elektrický obvod zapojit sám. V takovém případě je však potřeba zajistit, aby nedošlo k poškození součástek fatální chybou v zapojení (to se týká zejména zkratování svorek zdroje).

Ke vzdálenému experimentu na téma **studium spekter** lze přidat další vhodné světelné zdroje, jejichž spektra by bylo možné zkoumat a vzájemně porovnávat. K tomuto experimentu by bylo užitečné vytvořit simulaci v jiném programu než Adobe Flash, podobnou interaktivnímu apletu od Kansaské státní univerzity na obr. [2.37](#) na str. [88](#).

Softwarové vybavení naší vzdálené laboratoře je třeba co možná nejdříve doplnit o **rezervační systém času měření** pro jednotlivé uživatele⁴, což bylo zdůvodněno v předchozí části [4.2](#) na str. [110](#).

²Pokud je některý učitel zvyklý nějaký experiment efektivně využívat např. pro demonstraci ve vyučovací hodině, potom jistě ocení spolehlivější dostupnost vzdálené laboratoře v podobě dalších záloh. V případě nespolehlivé dostupnosti a funkčnosti vzdálené laboratoře lze očekávat **odrazení učitelů** od používání těchto e-prostředků. Dostatečnou robustnost vzdáleně řízených experimentů zdůrazňoval i zakladatel německé vzdálené laboratoře prof. H.-J. Jodl [73](#).

³Obvykle nákladné pomůcky pro vzdálené experimenty bývají na fakultním pracovišti k dispozici v jediném exempláři a pro případné pokusy o vylepšení vzdálené aparatury by bylo nutné nepřetržitý provoz vzdálené laboratoře přerušit, a to s vědomím jistého rizika poškození a následné nedostupnosti. Takové počínání není motivující ani pro provozovatele vzdálené laboratoře, ani pro její věrné uživatele. Zřejmě proto se i v naší vzdálené laboratoři prakticky držíme hesla: „Dokud zařízení funguje, je nejlepší na něj nesahat.“ Rovněž v případě poruchy je vhodné mít další funkční exemplář pro možnost srovnávacích měření a pro usnadnění opravy.

⁴Autoři rezervačního systému by měli uvážit **přednostní právo** na rezervaci času měření zejména pro učitele, kteří plánují vzdálený experiment prezentovat v určitém čase v průběhu vyučovací hodiny.

Měřicí servery v současném stavu mají omezenou kapacitu paměti pro uchování záznamů měření jednotlivých uživatelů. Tyto záznamy jsou uchovávány jednak v omezeném počtu nejnovějších, jednak do okamžiku restartu měřicího serveru. Vhodným řešením by proto bylo doplnění vzdálené laboratoře o **cloudové úložiště**, kde by uživatelé mohli mít uchované a dostupné záznamy svých měření, ale i další dokumenty a učební materiály (např. vypracované protokoly z měření, prezentace k tématu, odkazy na další zdroje jako simulace či e-texty apod.). Tyto služby by mohly být součástí komplexního systému pro správu výuky (**LMS** – Learning Management System), který může obsahovat další nástroje, jako např. klasifikaci, diskusní fórum, nástěnku aj. Pro velkou vzdálenou laboratoř, jakou je www.ises.info, by mělo smysl vybudovat systém pro správu vzdálených experimentů (**RLMS** – Remote Laboratory Management System) s autodiagnostikou jednotlivých úloh. Všechny tyto problémy jsou úspěšně řešeny např. v české vzdálené laboratoři REMLABNET (viz [68], [106], [118]).

V neposlední řadě by bylo užitečné upravit aplikaci **MeasureServer** (měřicí server), která obstarává veškerou komunikaci mezi PC/serverem a vlastní vzdáleně řízenou fyzikální aparaturou a současně zajišťuje logování aktivity uživatelů, aby **automaticky prováděla předzpracování logů** a jejich ukládání např. v podobě a rozsahu, jak bylo navrženo v této disertační práci (viz část 3.2 od str. 91). Taková úprava aplikace na straně serveru by jednak umožnila přímou čitelnost logů (srov. předzpracovaný záznam aktivity v tabulce 3.6 na str. 98 a ukázkou z původního logovacího souboru v příloze B od str. 149), jednak by výrazně usnadnila budoucí vývojově-výzkumnou činnost a pomohla k průběžnému vylepšování stávajících vzdálených úloh, zejména řídicích webových stránek a studijních e-textů pro jednotlivé vzdálené experimenty.

Závěr

V rámci vývojové práce a díky grantové podpoře se podařilo vybudovat čtyři nové vzdáleně řízené experimenty, které jsou podrobně popsány ve 2. kapitole. Součástí práce dále byla tvorba kompletních studijních e-textů ke všem novým úlohám, které zahrnují motivaci, úvod, fyzikální základ (teorii), zadání úkolů, návody k provedení a případně doporučenou vhodnou simulaci. Zde popsané nové vzdálené úlohy byly vytvořeny a zveřejněny v letech 2010–2012. Dokonce druhý exemplář vzdáleného experimentu *Studium radioaktivity* byl vyroben naším pracovištěm a dodán pro vzdálenou laboratoř na Univerzitě T. Bati ve Zlíně [160]. Přímé odkazy na řídicí webovou stránku a na příslušné studijní e-texty jsou shrnuty v tabulce 4.1.

Tabulka 4.1: Přímé odkazy na řídicí webovou stránku nově vytvořených vzdálených reálných experimentů (1. odkaz) a na příslušné studijní e-texty (2. odkaz).

Studium radioaktivity a základní způsoby ochrany člověka před ionizujícím zářením
http://kdt-38.karlov.mff.cuni.cz/choice_cz.html
http://www.ises.info/index.php/cs/laboratory/experiment/radioactivity
Polarizace světla
http://kdt-35.karlov.mff.cuni.cz/
http://www.ises.info/index.php/cs/laboratory/experiment/polarisation-light-univ
Vnější fotoelektrický jev
http://kdt-29.karlov.mff.cuni.cz/
http://www.ises.info/index.php/cs/laboratory/experiment/photoelectric-effect-VA
Studium spekter
http://kdt-41.karlov.mff.cuni.cz/index_js.html
http://www.ises.info/index.php/cs/laboratory/experiment/spectra

Pilotní výzkum efektivity vzdálených laboratoří měl za cíl mj. v praxi vyzkoušet různé druhy výzkumu: konstrukční výzkum, neformální rozhovor s učiteli a studenty a zejména analýzu logů aktivity uživatelů při vzdáleném měření, která byla pro vzdálenou laboratoř www.ises.info na platformě ISES/Java první svého druhu.

Konstrukční výzkum i přes nezdár způsobený technickými problémy (které autor nemohl ovlivnit) odhalil několik potenciálních překážek, zejména tvorbu front studentů před termínem odevzdání (při omezeném počtu vzdáleně řízených experimentálních aparatur), což vyžaduje dobře organizovat čas měření a případně rozdělit studenty do skupin, a to např. prostřednictvím rezervačního systému. Výzkumníci zpravidla narážejí na malou ochotu škol spolupracovat a potýkají se s problémy interní validity výsledků, které kvůli omezení na dostupný výběr většinou nelze zobecnit a které jsou vztaženy pouze na dané podmínky a téma experimentu. Vzdálené laboratoře v současné podobě nejsou připravené na masové nasazení; důvodem je zejména malý počet a nutnost dlouhodobé údržby. Vhodným řešením může být německý model vzdálené laboratoře, kde jsou jednotlivé vzdáleně řízené experimenty rozmístěny na různých školách.

Rozhovory s učiteli a studenty ukázaly, že vzdálené laboratoře popsané v této práci má smysl budovat zejména pro studenty s vážným zájmem o fyziku a technické obory, kterým umožňují získat cenné experimentální poznatky i osvojit si důležité nástroje a postupy při vědeckém zpracování vlastních naměřených hodnot. Jelikož procento potenciálních nadaných studentů pro technické obory v populaci je obecně nízké, mohl by být pro jejich potřeby stávající počet vzdálených laboratoří dostačující.

Na základě získaných zkušeností lze pro výuku přírodovědných a technických předmětů ve škole doporučit kombinovat všechny tradiční strategie pro zařazení experimentů do výuky, a to s následujícími preferencemi: tradiční (hands-on) pokusy pro jednoduchá témata (k nimž lze snadno opatřit nezbytné pomůcky), názorné simulace k pochopení fyzikální podstaty jevu a jeho zkoumání či měření a konečně vzdálené reálné experimenty pro vybraná témata (nebezpečné, nákladné, náročné na přípravu, závislé na zeměpisné poloze – např. tíhové zrychlení, včetně monitoringu radiačního pozadí, počasí a slunečního svitu). Využívání vzdálených experimentů ve výuce předpokládá u uživatelů jisté dovednosti (obsluha PC, elementární porozumění síti Internet a komunikaci přes web, případně znalost technologie vzdáleného řízení). Tyto dovednosti je vhodné u začínajících žáků nejprve postupně vybudovat na jednodušších tématech experimentů, případně lze vyzkoušet poslední trend lokálně-vzdálené experimenty (hands-on-remote experiments).

Vzdálené experimenty by měly být do výuky zařazeny i z důvodu demonstrace moderních technologií – především možnosti řízení a/nebo sledování nějakého zařízení na dálku (s praktickým využitím např. regulace vytápění na chatě, zabezpečení objektu apod.). Než se tento typ experimentování rozšíří, jedná se o zajímavou a zpestřující alternativní formu výuky.

V této práci byl kladen důraz na snadnou stažitelnost experimentálních hodnot pro následné statistické či grafické zpracování a kritické zhodnocení zjištěných výsledků. Tuto dovednost lze využít v širokém spektru oborů lidské činnosti. Proto všechny formy experimentů včetně vzdáleně řízených laboratoří mají své opodstatnění i místo ve školních osnovách a mají potenciál školáky oslovit a zaujmout.

Všechny nové laboratoře na témata moderní fyziky (tj. studium radioaktivity, vnější fotoefekt a studium spekter) jsou od okamžiku zveřejnění do současnosti volně přístupné na webových stránkách www.ises.info a uživatelé na SŠ i VŠ, tzn. učitelé a studenti se zájmem o přírodovědné a technické obory velmi ocenili jejich přidanou hodnotu. Experiment *vnější fotoelektrický jev* byl oceněn za nejlepší posterovou prezentaci na mezinárodní konferenci GIREP-ICPE-MPTL⁵ 2010. Naše vzdálené experimenty dále získaly mezinárodní ocenění GOLC Award 2016⁶ v kategorii *vzdáleně řízená laboratoř* a zaznamenávají přístupy nejen z ČR, ale i ze zahraničí.

⁵Groupe International de Recherche sur l'Enseignement de la Physique (Mezinárodní výzkumná skupina pro výuku fyziky), International Conference on Physics Education (Mezinárodní konference pro výuku fyziky), Multimedia in Physics Teaching and Learning (Multimédia ve výuce fyziky) – spojená konference tří organizací se konala 22.–27. 8. 2010 v Remeši, Francie.

⁶Cena Global Online Laboratory Consortium 2016 byla udělena na 13. mezinárodní konferenci IEEE REV 2016 (Institute of Electrical and Electronics Engineers; konference Remote Engineering & Virtual Instrumentation se konala 24.–26. 2. 2016 v Madridu. Viz příloha [C](#) na str. [151](#)).

Seznam použité literatury

- [1] SCHAUER, F. et al. *Integrated e-learning – new strategy of the cognition of real world in teaching physics*. In AUNG, W. et al. (eds.) *Innovations 2009: World Innovations in Engineering Education and Research*, iNEER, Potomac, MD, U.S.A. 2009. Str. 119–136. ISBN: 978-0-9741252-9-9. [online] http://www.ises.info/old-site/clanky_pdf/Schauer_INTEL_fin.pdf [cit. 20. 7. 2018]
- [2] KAŠPAR, E. a kol. *Didaktika fyziky – obecné otázky*. SPN, Praha 1978.
- [3] PRŮCHA, J., WALTEROVÁ, E., MAREŠ, J. *Pedagogický slovník*. 4. aktualizované vyd. Portál, Praha 2003. ISBN 80-7178-722-8.
- [4] GERHÁTOVÁ, Ž. *Energia v přírodovednom vzdelávaní prostredníctvom bádateľskej orientovanej výučby a vzdialeného experimentu*. Habilitačná práca. Hradec Králové 2015.
- [5] THOMSEN, C., SCHEEL, H., MORGNER, S. *Remote Experiments in Experimental Physics*. Proceedings of the ISPRS E-Learning 2005, June 1–3, Potsdam, Germany, June 2005.
- [6] SCHAUER, F., LUSTIG, F., OŽVOLDOVÁ, M. *Remote scientific experiments across Internet: photovoltaic cell characterization*. In AUER, M. (ed.) *Proceedings of ICL2006 (Interactive Computer Aided Learning)*, Villach, September 27–29 2006. Kassel university press, 2006. ISBN: 978-3-89958-195-9.
- [7] BROM, P., LUSTIG, F. *Remote Experiments for Teaching Quantum Physics within the Integrated e-Learning Strategy*. In KAMINSKI, W., MICHELINI, M. (eds.) *Proc. of selected papers of the GIREP-ICPE-MPTL International Conference – Teaching and Learning Physics Today: Challenges? Benefits?* August 22–27, Reims, France, 2010. Università degli Studi di Udine, Italy, 2014. Str. 808–816. ISBN: 978-88-97311-32-4. [online] http://iupap-icpe.org/publications/proceedings/GIREP-ICPE-MPTL2010_proceedings.pdf [cit. 20. 7. 2018]
- [8] *Wikipedie – Galileo Galilei*. [online] https://cs.wikipedia.org/wiki/Galileo_Galilei [cit. 20. 7. 2018]
- [9] *Wikipedie – ARPANET*. [online] <https://cs.wikipedia.org/wiki/ARPANET> [cit. 20. 7. 2018]
- [10] LEINER, B. M. et al. *Brief history of the internet*. Internet Society, 1997. [online] <https://www.internetsociety.org/internet/history-internet/brief-history-internet/> [cit. 20. 7. 2018]
- [11] *Wikipedie – World Wide Web*. [online] https://cs.wikipedia.org/wiki/World_Wide_Web [cit. 20. 7. 2018]
- [12] CHRISTIAN, W., BELLONI, M. *Physlet Physics: Interactive Illustrations, Explorations, and Problems for Introductory Physics*. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ 2004. ISBN: 978-0131019690.

- [13] AKTAN, B., BOHUS, C., CROWL, L., SHOR, M. H. *Distance Learning Applied to Control Engineering Laboratories*. IEEE Transactions on Education. Vol. 39. No. 3. August 1996. pp. 320–326.
- [14] HENRY, J. et al. *Laboratories without borders*. 1995–2010. [webová prezentace a rozcestník na vzdálené laboratoře online] <http://chem.engr.utc.edu/> [cit. 20. 7. 2018]
- [15] SCHUMACHER, D. *Student Undergraduate Laboratory and Project Work*. Editorial to the special issue. Eur. J. Phys. Vol. 28. No. 5. 2007.
- [16] SCHAUER, F., LUSTIG, F., DVORAK, J., OZVOLDOVA, M. *An easy-to-build remote laboratory with Data Transfer Using the Internet School Experimental System*. Eur. J. Phys. Vol. 29. 2008. Str. 753–765. [online] http://www.ises.info/old-site/clanky_pdf/Lustig_a_kol_casopis_ejp8_4_010_2008.pdf [cit. 20. 7. 2018]
- [17] ORDUÑA, P. *Labs Land – Real laboratories, on the Internet*. [online] <https://labsland.com/> [cit. 20. 7. 2018]
- [18] LUSTIG, F., BROM, P., KURIŠČÁK, P., DVOŘÁK, J. „Hands-on-Remote“ *Laboratories*. Proceedings of the 15th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV 2018), March 21–23 2018, University of Applied Science Düsseldorf (HSD), Germany, 2018. Str. 446–455. [online] http://www.ises.info/old-site/clanky_pdf/Hands-on-remote_Laboratory_REV2018_1201.pdf [cit. 20. 7. 2018]
- [19] AMERICAN ASSOCIATION OF PHYSICS TEACHERS (AAPT). *The Goal of Introductory Laboratories*. [online] <https://www.aapt.org/Resources/policy/goaloflabs.cfm> [cit. 20. 7. 2018]
- [20] AMERICAN BOARD FOR ENGINEERING AND TECHNOLOGY (ABET). [online] <http://www.abet.org/> [cit. 20. 7. 2018]
- [21] ROSA, A. J. *The challenge of instructional laboratories in distance education*. ABET Annual Meeting, Baltimore, ABET, 2003.
- [22] MOST, K. R., DEISENROTH, M. P. *ABET and Engineering Laboratory Learning Objectives: A Study at Virginia Tech*. Proceedings of the 2003 American Society for Engineering Education, 2003. [online] <https://peer.asee.org/engineering-laboratory-learning-objectives-a-study-at-virginia-tech.pdf> [cit. 20. 7. 2018]
- [23] GUSTAVSSON, I. a kol. *On Objectives of Instructional Laboratories, Individual Assessment, and Use of Collaborative Remote Laboratories*. IEEE Transactions on learning technologies. Vol. 2. No. 4. 2009. [online] <http://ieeexplore.ieee.org/document/5291686/> [cit. 20. 7. 2018]
- [24] FEISEL, L. D., ROSA, A. J. *The Role of the Laboratory in Undergraduate Engineering Education*. J. Eng. Education. Vol. 94. 2005. Str. 121–130.

- [25] LOWE, D., MURRAY, S., LINDSAY, E., LIU, D., BRIGHT, C. *Reflecting Professional Reality in Remote Laboratory Experiences*. Proc. Int'l Conf. Remote Eng. and Virtual Instrumentation (REV '08), 2008.
- [26] SCANLON, E., COLWELL, Ch., COOPER, M., DI PAOLO, T. *Remote experiments, re-versioning and re-thinking science learning*. Computers & Education, 43, 2004. Str. 153–163. [online] www.elsevier.com/locate/compedu [cit. 20. 7. 2018]
- [27] COOPER, M. *Remote laboratories in teaching and learning – issues impinging on widespread adoption in science and engineering education*. International Journal of Online Engineering. Vol. 1. 2005. Str. 43–64.
- [28] *NetLab*. University of South Australia (UniSA). [vzdálená laboratoř online] <http://netlab.unisa.edu.au> [cit. 20. 7. 2018]
- [29] OŽVOLDOVÁ, M., SCHAUER, F. *Remote Laboratories: in Research-based education of real world phenomena*. Series: *Spectrum Slovakia* (Book 8). Peter Lang AG, Frankfurt, 2016. ISBN: 978-3-631-66394-3.
- [30] SCHAUER, F., OŽVOLDOVÁ, M., GERHÁTOVÁ, Ž., TKÁČ, L. *Vzdialené laboratória pri disseminácii vedeckých poznatkov*. Trnavská univerzita, Trnava 2013. ISBN: 978-80-8082-770-0.
- [31] AZAD, K. M. A., AUER, M. E., HARWARD, V. J. *Internet Accessible Remote Laboratories: Scalable E-Learning Tools for Engineering and Science Disciplines*. IGI Publishing Hershey, PA, USA, 2011. ISBN: 978-1-61350-186-3.
- [32] HERADIO, R., DE LA TORRE, L., GALAN, D., CABRERIZO, F. J., HERRERA-VIDEVA, E., DORMIDO, S. *Reflecting Professional Reality in Remote Laboratory Experiences*. Computers & Education, 98, 2016. Str. 14–38. [online] www.elsevier.com/locate/compedu [cit. 30. 3. 2018]
- [33] WIEMAN, C. E., ADAMS, W. K., PERKINS, K. K. *PhET: Simulations that enhance learning*. Science. Vol. 322. Iss. 5902. 2008. Str. 682–683.
- [34] BALAMURALITHARA, B., WOODS, P. C. *Virtual Laboratories in Engineering Education: The Simulation Lab and Remote Lab*. Multimedia University, 63100 Cyberjaya, Malaysia. Received 9 April 2007; accepted 29 August 2007.
- [35] OŽVOLDOVÁ, M. *Integrovaný e-learning na katedre fyziky PdF TU*. In SCHAUER, F. a kol. *Učiteľ prírodných vied pre tretie tisícročie*. Trnavská univerzita, Trnava 2011.
- [36] GRÖBER, S. *Aufgabensammlung zum RCL „Weltpendel“*. Technische Universität Kaiserslautern, září 2008. [online] http://rcl-munich.informatik.unibw-muenchen.de/worldpendulum/docs/material_Aufbauanleitung.pdf [cit. 20. 7. 2018]
- [37] GRÖBER, S., VETTER, M., ECKERT, B., JODL, H. J. *World Pendulum – a distributed Remotely Controlled Laboratory (RCL) to measure the*

- earth's gravitational acceleration depending on geographical latitude.* Eur. J. Physics, 28, 3, 2007. Str. 603–613. [online] [rcl-munich.informatik.unibw-muenchen.de/worldpendulum/docs/A_distributed_Remotely_Controlled_Laboratory_to_measure_g_EJP_3-28\(2007\).pdf](http://rcl-munich.informatik.unibw-muenchen.de/worldpendulum/docs/A_distributed_Remotely_Controlled_Laboratory_to_measure_g_EJP_3-28(2007).pdf) [cit. 20. 7. 2018]
- [38] LUSTIG, F., DVOŘÁK, J. *Meteorologická stanice v Praze.* [vzdálená laboratoř dostupná online] <http://www.ises.info> [cit. 20. 7. 2018]
- [39] GRÖBER, S., VETTER, M., ECKERT, B., JODL, H. J. *Experimenting from a distance in case of Rutherford scattering.* Eur. J. Phys. 31, 4, 2010. Str. 727–733. [online] rcl-munich.informatik.unibw-muenchen.de/worldpendulum/docs/Experimenting_from_a_distance_in_case_of_Rutherford_scattering.pdf [cit. 20. 7. 2018]
- [40] *Školní tokamak Golem.* FJFI ČVUT, Praha. [online] <http://golem.fjfi.cvut.cz> [cit. 20. 7. 2018]
- [41] FYZIKÁLNÍ PRAKTIKUM FJFI ČVUT. *Vysokoteplotní plazma na tokamaku GOLEM.* FJFI ČVUT, Praha. [zadání úlohy praktika II dostupné online] <http://golem.fjfi.cvut.cz/wiki/TrainingCourses/KFpract/15/Basics/uloha13A.pdf> [cit. 20. 7. 2018]
- [42] SVOBODA, V., JEX, I. *Tokamak GOLEM se vydává do světa.* PT, FJFI ČVUT, Praha. [online] http://jaderka.fjfi.cvut.cz/uploaded/files/ptgolem_0.pdf [cit. 20. 7. 2018]
- [43] GRÖBER, S., VETTER, M., ECKERT, B., JODL, H. J. *Experimenting from a Distance – Remotely Controlled Laboratory (RCL).* Eur. J. Physics 28, Special issue, 2007. Str. S127–S141. [online] [http://rcl-munich.informatik.unibw-muenchen.de/docs/Experimenting_from_a_distance_EJP_Special_issue_28\(2007\).pdf](http://rcl-munich.informatik.unibw-muenchen.de/docs/Experimenting_from_a_distance_EJP_Special_issue_28(2007).pdf) [cit. 20. 7. 2018]
- [44] GRÖBER, S., VETTER, M., ECKERT, B., JODL, H. J. *Remotely controlled laboratory: aims, examples, experiences.* Am. J. Phys., 76, Special issue, 2008. Str. 374–378. [online] [http://rcl-munich.informatik.unibw-muenchen.de/docs/Remotely_controlled_laboratories-Aims_examples_and_experiences_AJP_special_issue_76\(2008\).pdf](http://rcl-munich.informatik.unibw-muenchen.de/docs/Remotely_controlled_laboratories-Aims_examples_and_experiences_AJP_special_issue_76(2008).pdf) [cit. 20. 7. 2018]
- [45] GRÖBER, S. *Table of worldwide RCLs.* Technische Universität Kaiserslautern, 2011. [příloha k disertační práci, online] http://rcl-munich.informatik.unibw-muenchen.de/docs/Table_of_worldwide_RCLs.pdf [cit. 20. 7. 2018]
- [46] JODL, H. J. a kol. *Remotely Controlled Laboratories – RCLs.* Technical University of Kaiserslautern, Department of Physics, Německo, od r. 2002. [hlavní stránka projektu a rozcestník na německé vzdálené laboratoře, online] <http://rcl-munich.informatik.unibw-muenchen.de>, <http://www.remote-lab.de> [cit. 20. 7. 2018]

- [47] SANTOS, J. et al. *The CRESCERE Muon's Lifetime Experiment*. Current Developments in Technology-Assisted Education, 2006. Str. 1322–1326. [online] <https://www.physics.rutgers.edu/grad/506/muon/1322-1326.pdf> [cit. 20. 7. 2018]
- [48] *Frankův-Hertzův pokus*. In JANEČEK, I., KALUS, R., HŘIVŇÁK, D. *Kvantová, atomová a jaderná fyzika – multimediální učební text*. Katedra fyziky Přírodovědecké fakulty Univerzity v Ostravě. [online] http://artemis.osu.cz/mmfiz/am/am_1_5_2.htm [cit. 20. 7. 2018]
- [49] *Vzdálený experiment Franckův-Hertzův pokus*. Pedagogická fakulta Masarykovy univerzity v Brně. [online] <http://147.251.192.82> [cit. 30. 3. 2018]
- [50] MCLELLAN, H. *Situated Learning Perspectives*. Educational Technology, Englewood Cliffs, NJ, 1995.
- [51] MAGIN, D. J., KANAPATHIPILLAI, S. *Engineering students' understanding of the role of experimentation*. European J. Eng. Education 25, 4, 2000. Str. 351–358.
- [52] GRANT, A. *The effective use of laboratories in undergraduate courses*. Int. J. Mechanical Eng. Education, 23, 2, 1995. Str. 95–101.
- [53] CANIZARES, C. A., FAUR, Z. T. *Advantages and disadvantages of using various computer tools in electrical engineering courses*. IEEE Trans. Education 40, 3, 1997. Str. 166–171.
- [54] PAPATHANASSIOU, A., OSTER, J., BAIER, P. W. *A novel simulation concept of reduced computational cost for TD-CDMA mobile radio systems with adaptive antennas*. In *Proceedings of the Vehicular Technology Conference (VTC 1999), Fall*. Amsterdam, the Netherlands, 1999. Str. 218–222.
- [55] BROM, P., LUSTIG, F., KURIŠČÁK, P., DVOŘÁK, J. *DIY „Hands-on-remote“ experiment in physics with Arduino*. Proceedings of the 15th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV 2018), March 21–23 2018. University of Applied Science Düsseldorf (HSD), Germany, 2018. Str. 617–624. [online] http://www.ises.info/old-site/clanky_pdf/Lustig_DIY_Hands-on-remote_experiment_REV2018_1239.pdf [cit. 20. 7. 2018]
- [56] FENDT, W. *Fyzikální JAVA aplety*. Do češtiny přeložil M. Panoš. [online] <http://www.walter-fendt.de/ph14cz/> [cit. 20. 7. 2018]
- [57] CHRISTIAN, W. a kol. *Open Source Physics Project*. Davidson College, North Carolina, USA. [online] <https://www.compadre.org/osp/> [cit. 20. 7. 2018]
- [58] WIEMAN, C., PERKINS, K. a kol. *Physics Education Technology*. University of Colorado in Boulder, Boulder, Colorado, USA. [Aplety PhET dostupné online] <https://phet.colorado.edu/> [cit. 20. 7. 2018]
- [59] MARSCHALL, L. A. a kol. *Project CLEA*. Dept. of Physics, Gettysburg College, Gettysburg, Pensylvánie,

- USA. [Aplety pro výuku astronomie dostupné online] <http://www3.gettysburg.edu/~marschal/clea/CLEAhome.html> [cit. 20. 7. 2018]
- [60] MARSCHALL, L. A. a kol. *The Classification of Stellar Spectra – Student Manual*. Dept. of Physics, Gettysburg College, Gettysburg, Pennsylvania, USA. [návod k apletu pro výuku astronomie dostupný online] http://www3.gettysburg.edu/~marschal/clea/clea_products/manuals/Specr_sm.pdf [cit. 20. 7. 2018]
- [61] POTKONJAK, V., GARDNER, M. et al. *Virtual laboratories for education in science, technology, and engineering: A review*. Computers & Education, 95, 2016. Str. 309–327. [online] www.elsevier.com/locate/compedu [cit. 20. 7. 2018]
- [62] ESQUEMBRE, F., CLEMENTE, F. J. G. a kol. *Easy Java Simulations*. Universidad de Murcia, Murcia, Španělsko. [Prostředí EJS dostupné online] <http://www.um.es/fem/Ejs/> [cit. 20. 7. 2018]
- [63] *Adobe Flash*. [online] https://cs.wikipedia.org/wiki/Adobe_Flash [cit. 20. 7. 2018]
- [64] LUSTIG, F., SCHAUER, F., DVOŘÁK, J., BROM, P. *e-Laboratory Project*. [česká vzdálená laboratoř dostupná online] <http://www.ises.info/> [cit. 20. 7. 2018]
- [65] GUSTAVSSON, I. et al. *The VISIR project – an Open Source Software Initiative for Distributed Online Laboratories*. Presented at REV 2007, Porto. [online] <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:bth-9135> [cit. 20. 7. 2018]
- [66] LUSTIG, F., SCHAUER, F., DVOŘÁK, J., BROM, P. [rozcestník na vzdálené laboratoře, online] <http://www.eedu.eu/> [cit. 20. 7. 2018]
- [67] *Go-Lab Project*. [vzdálené laboratoře online] <http://www.golabz.eu/> [cit. 20. 7. 2018]
- [68] SCHAUER, F., LUSTIG, F., OŽVOLDOVÁ, M. a kol. *REMLABNET*. [online] <http://www.remlabnet.eu> [cit. 20. 7. 2018]
- [69] *WebLab Deusto*. [online] <https://weblab.deusto.es/weblab/> [cit. 20. 7. 2018]
- [70] *Remote Experimentation Laboratory RExLAB*. Universidad Federal de Santa Catarina, Brazil. [online] <http://relle.ufsc.br/>, <http://rexlab.ufsc.br> [cit. 20. 7. 2018]
- [71] *UNILabs*. [online] <http://unilabs.dia.uned.es/> [cit. 20. 7. 2018]
- [72] MATARRITA, C. A., CONCARI, S. B. *Remote laboratories used in physics teaching: a state of the art*. Proceedings of the REV 2016. 13th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation. Madrid. Spain. 2016. Str. 376–381.

- [73] ECKERT, B., GRÖBER, S., JODL, H.-J. *Distance Education in Physics via Internet*. American Journal of Distance Education, 23, 3, 2009. Str. 125–138. [online] http://rel-munich.informatik.unibw-muenchen.de/docs/Distance_education_in_physics_via_internet_AJDE_3-23%282009%29.pdf [cit. 20. 7. 2018]
- [74] *Virtuální prohlídka pracoviště konstrukce vzdálených experimentů*. Pedagogická fakulta Masarykovy univerzity v Brně. [online] <https://www.online.muni.cz/virtualni-prohlidky/pedagogicka-fakulta/pracoviste-konstrukce-vzdaleny-ch-experimentu> [cit. 20. 7. 2018]
- [75] LÁTAL, F., ŘÍHA, J. a kol. *Vzdáleně ovládaná laboratoř*. Katedra experimentální fyziky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého Olomouc. 2011–2018. [online] <http://ictphysics.upol.cz/remotelab/> [cit. 20. 7. 2018]
- [76] PANOŠ, M. a kol. *Remote-LAB GymKT – Vzdálená internetová laboratoř GymKT*. Gymnázium J. Vrchlického, Klatovy, 2011–2018. [online] <http://remote-lab.fyzika.net> [cit. 20. 7. 2018]
- [77] KO, C. C., CHEN, B. M. et al. *Development of a web-based laboratory for control experiments on a coupled tank apparatus*. Education, IEEE Transactions on Education. Vol. 44. Iss. 1. 2001. Str. 76–86. [online] <https://ieeexplore.ieee.org/document/912713> [cit. 20. 7. 2018]
- [78] BAUER, P. et al. *Survey of distance laboratories in power electronics*. Proceedings of the Power Electronics Specialists Conference (PESC 2008), June 15–19 2008. IEEE. 2008. Str. 430–436.
- [79] KALUZ, M., CIRKA, L., VALO, R., FIKAR, M. *ArPi Lab: A Low-cost Remote Laboratory for Control Education*. In *IFAC Proceedings Volumes*. Vol. 47. Iss. 3. 2014. Str. 9057–9062. ISSN: 1474-6670. ISBN: 978-3902823625. [online] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016430430> [cit. 20. 7. 2018]
- [80] SOBOTA, J., PIŠL, R., BALDA, P., SCHLEGEL, M. *Raspberry Pi and Arduino boards in control education*. In *10th IFAC Symposium Advances in Control Education*, 7–12. University of Sheffield, Sheffield, UK. [online] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667015340684> [cit. 20. 7. 2018]
- [81] GARCÍA-ZUBIA, J., ANGULO, I., HERNÁNDEZ, U., ORDUNA, P. *Plug&play remote lab for microcontrollers: WebLab-Deusto-pic*. In *7th European Workshop on Microelectronics Education*, 28–30. Budapest, Hungary. [online] <https://morelab.deusto.es/media/publications/2008/conferencepaper/plugplay-remote-lab-for-microcontrollers-weblab-deusto-pic.pdf> [cit. 20. 7. 2018]
- [82] SUWONDO, N., SULISWORO, D. *Hands-on Learning Activity Using an Apparatus for Transient Phenomena in RC Circuit Based on Arduino UNO R3-LINX-Labview*. iJOE. Vol 13. No. 1. 2017. Str. 116–124. [online] <http://online-journals.org/index.php/i-joe/article/view/6317> [cit. 20. 7. 2018]

- [83] CVJETKOVIC, V. M., STANKOVIC, U. *Arduino Based Physics and Engineering Remote Laboratory*. iJOE. Vol 13. No. 1. 2017. Str. 87–105. [online] <http://online-journals.org/index.php/i-joe/article/view/6375> [cit. 20. 7. 2018]
- [84] TOYODA, Y., KOIKE, N., LI, Y. *An FPGA-based remote laboratory: Implementing semi-automatic experiments in the hybrid cloud*. Proceedings of the 13th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV), Madrid, 2016. Str. 24–29.
- [85] SCHAUER, F. et al. *ISES – Internet School Experimental System for computer based laboratories in physics*. In AUNG, W. et al. (eds.) *Innovations 2009: World Innovations in Engineering Education and Research*, iNEER, Potomac, MD, U.S.A. 2009. Str. 109–118. ISBN: 978-0-9741252-9-9. [online] http://www.ises.info/old-site/clanky_pdf/Schauer_ISES_fin.pdf [cit. 20. 7. 2018]
- [86] LUSTIG, F., DVORAK, J., KURISCAK, P., BROM, P. *Open modular hardware and software kit for creations of remote experiments accessible from PC and mobile devices*. iJOE. Vol. 12. Iss. 7. 2016. Str. 30–36. ISSN: 1868-1646. [online] <http://online-journals.org/index.php/i-joe/article/view/5833> [cit. 20. 7. 2018]
- [87] *Wikipedie – AJAX*. [online] <http://cs.wikipedia.org/wiki/AJAX> [cit. 20. 7. 2018]
- [88] *Why Do I Get a Missing Plugin Error When Loading a Remote Front Panel? – Additional information*. National Instruments. [online] <http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/151BE12C055F57CE86257043006CB4B3> [cit. 20. 7. 2018]
- [89] MA, J., NICKERSON, J. V. *Hands-On, Simulated, and Remote Laboratories: A Comparative Literature Review*. ACM Computing Surveys. Vol. 38. No. 3. Article 7. September 2006. [online] <https://web.stevens.edu/jnickerson/ACMComputingSurveys2006MaNickerson.pdf> [cit. 20. 7. 2018]
- [90] PERKINS, K. K., ADAMS, W. K., DUBSON, M., FINKELSTEIN, N., RAID, S., WIEMAN, C. E. *PhET: Interactive simulations for teaching and learning physics*. The Physics Teacher. Vol. 44. Iss. 1. January 2006. Str. 18–23.
- [91] BRINSON, J. R. *Learning outcome achievement in non-traditional (virtual and remote) versus traditional (hands-on) laboratories: A review of the empirical research*. Computers & Education, 87, 2015. Str. 218–237. [online] [eee.elsevier.com/locate/compedu](http://www.elsevier.com/locate/compedu) [cit. 20. 7. 2018]
- [92] REEVES, T. C. *Enhancing the Worth of Instructional Technology Research through Design Experiments and Other Development Research Strategies*. In *International Perspectives on Instructional Technology Research for the 21st Century*, a Symposium sponsored by SIG/Instructional Technology at the Annual Meeting of the American

- Educational Research Association. New Orleans, LA, USA, 2000. [online] <http://treeves.coe.uga.edu/AERA2000Reeves.pdf> [cit. 20. 7. 2018]
- [93] TRNA, J. *Konstrukční výzkum (design-based research) v přírodovědných didaktikách*. Scientia in educatione, 2, 1, 2011. Str. 3–14. ISSN: 1804-7106.
- [94] HRMO, R., KUNDRÁTOVÁ, M., TINÁKOVÁ, K., VAŠKOVÁ, L. *Didaktika technických predmetov*. STU, Bratislava 2005. ISBN: 80-227-2191-3.
- [95] CORTER, J. E., ESCHE, S. K., CHASSAPIS, C., MA, J., NICKERSON, J. V. *Process and learning outcomes from remotely-operated, simulated, and hands-on student laboratories*. Computers & Education, 57, 2011. Str. 2054–2067. [online] www.elsevier.com/locate/compedu [cit. 20. 7. 2018]
- [96] LUSTIG, F., LUSTIGOVÁ, Z., NOVOTNÁ, V., MALČÍK, M. *The role of E-labs in promoting the conceptual understanding of science students*. The New Educational Review. Vol. 30. No. 4. 2012. Str. 56–69 [online] http://www.educationalrev.us.edu.pl/dok/volumes/tner_4_2012.pdf [cit. 20. 7. 2018]
- [97] CHAPMAN, P., CLINTON, J. et al. *CRIPS-DM 1.0: Step by Step Data Mining Guide*. CRISP-DM Consortium, 2000. [online] <https://www.the-modeling-agency.com/crisp-dm.pdf> [cit. 20. 7. 2018]
- [98] CASTRO, F., VELLIDO, A., NEBOT, A., MUGICA, F. *Applying Data Mining Techniques to e-Learning Problems*. In JAIN, L. C. et al. (eds.) *Evolution of Teaching and Learning Paradigms in Intelligent Environment*. Springer 2007. Str. 183–221. ISBN: 978-3-540-71974-8. [online] <http://sci2s.ugr.es/keel/pdf/specific/capitulo/ApplyingDataMiningTechniques.pdf> [cit. 20. 7. 2018]
- [99] LUSTIGOVÁ, Z., BROM, P. *Educational Datamining in Virtual Learning Environments*. International Journal of Advanced Corporate Learning (iJAC). Vol. 7. Iss. 1. 2014. Str. 39–42. ISSN: 1867-5565. [online] <http://online-journals.org/index.php/i-jac/article/download/3557/3056> [cit. 20. 7. 2018]
- [100] VALDMAN, J. *Log File Analysis – PhD Report*. University of West Bohemia in Pilsen, Pilsen, 2001. [online] <https://www.kiv.zcu.cz/site/documents/verejne/vyzkum/publikace/technicke-zpravy/2001/tr-2001-04.pdf> [cit. 20. 7. 2018]
- [101] BARRINGER, H., GROCE, A., HAVELUND, K., SMITH, M. *Formal Analysis of Log Files*. Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication. Vol. 7. No. 11. November 2010. Str. 365–390.
- [102] URHAHNE, D., JESCHKE, J., KROMBASS, A., HARMS, U. *The validation of questionnaire data on interest in animals and plants with log files*. Zeitschrift für Pädagogische Psychologie, 18, 2004. Str. 213–219.
- [103] CUADROS, J., ARTIGAS, C., GUITART, F., MARTORI, F. *Analyzing a Virtual-Lab Based Contextualized Activity from Action Logs*. 4th World Conference on Educational Technology Researches, WCETR-2014, Procedia – Social and Behavioral Sciences, vol. 182, 2015. Str. 441–447.

- [104] DAS, S., SCHAUER, F., OZVOLDOVA, M. *Educational data mining from action LOG files of intelligent remote laboratory with embedded simulations in physics teaching I*. [Připraveno k publikaci 2018.]
- [105] HENKE, K., VIETZKE, T., HUTSCHENREUTER, R., WUTTKE, H. D. *The remote lab cloud "GOLDi-labs.net"*. Proc. of the 13th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV), Madrid, 2016. Str. 37–42. ISBN: 978-1-4673-8245-8.
- [106] SCHAUER, F., OZVOLDOVA, M., GERZA, M., KRBECEK, M., BENO, P., KOMENDA, T., DAS, S., ARCHIBONG, M. I. *REMLABNET IV – LTI federated remote laboratory management system with embedded multiparameter simulations*. iJOE. Vol. 13. No. 10. 2017. Str. 103–113. [online] <http://online-journals.org/index.php/i-joe/article/view/7802> [cit. 20. 7. 2018]
- [107] SALIAH-HASSANE, H. et al. *Lab@Home: Remote laboratory evolution in the cloud computing era*. American Society for Engineering Education, 2011. Str. 22.995.1–13. [online] http://r-libre.telug.ca/1048/1/R-Libre_Saliah-Hassane_et_al_lab-home-remote-laboratory-evolution-in-the-cloud-computing-era.pdf [cit. 20. 7. 2018]
- [108] KOPECKÝ, K. *E-learning (nejen) pro pedagogy*. Hanex, Olomouc, 2006. ISBN: 80-85783-50-9.
- [109] *Wikipedie – Blended learning*. [online] https://cs.wikipedia.org/wiki/Blended_learning [cit. 20. 7. 2018]
- [110] *Wikipedia – Bring your own device*. [online] https://en.wikipedia.org/wiki/Bring_your_own_device [cit. 20. 7. 2018]
- [111] GROOM, D. *The Downtime Learner Theory*. Publikováno na webu 2011. [online] <https://deangroom.wordpress.com/2011/04/14/the-downtime-learner-theory> [cit. 20. 7. 2018]
- [112] VÁLEK, J., SLÁDEK, P. *Downtime learning – a way to increase the effectiveness of the learning process?*. R&E-SOURCE, Open Online Journal for Research and Education, Special Issue no. 4, December 2015. ISSN: 2313-1640.
- [113] SLÁDEK, P., VÁLEK, J., KREJČÍ, J. *Prostojové učení jako výuková metoda pro generaci Z*. In *9. didaktická konference s mezinárodní účastí*, 2015. ISBN: 978-80-210-7814-7.
- [114] *Wikipedia – M-learning*. [online] <https://en.wikipedia.org/wiki/M-learning> [cit. 20. 7. 2018]
- [115] CASEY, D. *u-Learning = e-Learning + m-Learning*. In RICHARDS, G. (Ed.) *Proceedings of E-Learn: World Conference on E-Learning in Corporate, Government, Healthcare, and Higher Education 2005*. Chesapeake, VA: Association for the Advancement of Computing in Education (AACE), 2005. Str. 2864–2871.

- [116] YAHYA, S., ARNIZA AHMAD, E., ABD JALIL, K. *The definition and characteristics of ubiquitous learning: A discussion*. International Journal of Education and Development using Information and Communication Technology (IJEDICT), 6, 2010. Str. 117–127.
- [117] SALZMANN, Ch., FIGUET, Y., GILLET, D. *MOOLs for MOOCs, a first edX scalable implementation*. Proceedings of the REV 2016. 13th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation, Madrid. Spain 2016. Str. 240–245. ISBN: 978-1-4673-8245-8.
- [118] SCHAUER, F., KRBECEK, M., BENO, P., GERZA, M. et al. *REMLABNET – open remote laboratory management system for e-experiments*. Proceedings of the REV 2014. Porto. Portugal. ISBN 978-1-4799-2025-9.
- [119] KOMENDA, T., SCHAUER, F. *REMLABNET – User Experience and Mixed Reality Continuum*. iJOE. Vol. 14. No. 2. 2018. Str. 38–47. [online] <http://online-journals.org/index.php/i-joe/article/view/7651/4813> [cit. 20. 7. 2018]
- [120] *Wikipedia – Mixed Reality*. [online] https://en.wikipedia.org/wiki/Mixed_reality [cit. 20. 7. 2018]
- [121] DE LA TORRE et al. *The Virtual and Remote Laboratory for Snells Law at the FisL@bs Portal*. In KAMINSKI, W., MICHELINI, M. (eds.) *Proc. of selected papers of the GIREP-ICPE-MPTL International Conference – Teaching and Learning Physics Today: Challenges? Benefits?* August 22–27, Reims, France, 2010. Università degli Studi di Udine, Italy, 2014. Str. 627–633. ISBN: 978-88-97311-32-4. [online] http://iupap-icpe.org/publications/proceedings/GIREP-ICPE-MPTL2010_proceedings.pdf [cit. 20. 7. 2018]
- [122] BARDIOVSKÝ, V., LUSTIG, F. *Kmity na pružině. Simulační prostředí „ISES Sim Lab“*. MFF UK, Praha, 2011. [online] <http://www.ises.info/index.php/en/laboratory/experiment/natural-and-driven-oscillations/simulation> [cit. 20. 7. 2018]
- [123] HÖFER, G., PŮLPÁN, Z., SVOBODA, E. *Výuka fyziky v širších souvislostech – Názory žáků – Výzkumná zpráva o výsledcích dotazníkového šetření*. Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň, 2005. [online] https://kdf.mff.cuni.cz/vyzkum/materialy/vyuka_fyziky_v_sirsim_souvislostech.pdf [cit. 30. 3. 2018]
- [124] JEŘÁBEK, J. a kol. *Rámcový vzdělávací program pro gymnázia (RVP G)*. Výzkumný ústav pedagogický v Praze, 2007. ISBN: 978-80-87000-11-3. [online] <http://www.msmt.cz/vzdelavani/skolstvi-v-cr/skolskareforma/ramcove-vzdelavaci-programy> [cit. 20. 7. 2018]
- [125] KELLER, J. M. *Development and Use of the ARCS Model of Instructional Design*. Journal of Instructional Development. Vol. 10. No. 2. 1987. Str. 2–10. [online] <http://dx.doi.org/10.1007/BF02905780> [cit. 20. 7. 2018]

- [126] *ARCS Model of Motivational Design Theories (Keller)* [online] <https://www.learning-theories.com/kellers-arcs-model-of-motivational-design.html> [cit. 20. 7. 2018]
- [127] HARWOOD, W. *Activity model for scientific inquiry*. The Science Teacher. Vol. 71. No. 1. 2004. [online] https://www.researchgate.net/publication/234650066_An_Activity_Model_for_Scientific_Inquiry [cit. 20. 7. 2018]
- [128] AGH, P. *Efektívne využívanie počítačových systémov z Internetu vďaka znalosti princípov*. Konference Infovek 2000. Publ. 2001. Str. 128–135.
- [129] JOHNSTONE, A. H. *Chemistry teaching – science or alchemy?*. Journal of Chemical Education, 74, 1996. Str. 262–268.
- [130] DOMIN, D. S. *A Review of Laboratory Instruction Styles*. Journal of Chemical Education, 76, 1999. Str. 543–547.
- [131] WILLIAMS, T., KELLEY, C. *gnuplot homepage*. [online] <http://www.gnuplot.info> [cit. 20. 7. 2018]
- [132] GRÖBER, S., VETTER, M., ECKERT, B., JODL, H. J. *Experimente zur Radioaktivität - als Remotely Controlled Laboratory (RCL)*. PdN-PhiS, 59, 2, 2010. Str. 44–48 [online] [http://rcl-munich.informatik.unibw-muenchen.de/docs/Experimente_zur_Radioaktivitaet_als_RCL_PdN-PhiS_2-59\(2010\).pdf](http://rcl-munich.informatik.unibw-muenchen.de/docs/Experimente_zur_Radioaktivitaet_als_RCL_PdN-PhiS_2-59(2010).pdf) [cit. 20. 7. 2018]
- [133] ZUTIN, D. *Radioactivity Lab – Remote Lab*. University of Queensland, Austrálie. [online] <https://www.golabz.eu/lab/radioactivity-lab> [cit. 20. 7. 2018]
- [134] *Wikipedie – Havárie elektrárny Fukušima I*. [online] https://cs.wikipedia.org/wiki/Havárie_elektrárny_Fukušima_I, https://cs.wikipedia.org/wiki/Jaderná_elektrárna_Fukušima_I [cit. 20. 7. 2018]
- [135] VÍCHA, V. *Vizualizace radioaktivity pro sekundu s detektorem MX-10*. In VOCHOZKA, V. (ed.) *Veletrh nápadů učitelů fyziky 19*, sborník z konference konané v r. 2014 v Chebu. Vydala ZČU, Plzeň, 2015. Str. 186–191. ISBN: 978-80-261-0439-1.
- [136] BROM, P. *Bakalářská práce – Polarizace světla a její ovlivnění optickými prvky*. UK MFF, Praha, 2006.
- [137] SIMOV, K., CHRISTIAN, W. *Aplety k tématu polarizace světla*. Open Source Physics Project (OSP). [online] <http://www.ises.info/index.php/cs/laboratory/experiment/polarisation-light-univ/simulation> [cit. 20. 7. 2018]
- [138] BROM, P., LUSTIG, F. *Integrated e-learning and the opportunity for anyone to explore the nature of polarization of light*. In LINDELL, A., KÄHKÖNEN, A.-L., VIIRI, J. *Proc. GIREP-EPEC Conference 2011, Physics Alive*. August 1–5 2011, Jyväskylä, Finland. Uni-

- versity of Jyväskylä, Finland, 2011. ISBN: 978-951-39-4801-6. Str. 167–172. [online] <https://jyx.jyu.fi/bitstream/handle/123456789/49276/1/978-951-39-4801-6.pdf> [cit. 20. 7. 2018]
- [139] BROM, P. *Polarizace světla – Návod ke vzdálené laboratoři*. UK MFF, Praha, 2011. [online] <http://www.ises.info/index.php/cs/laboratory/experiment/polarisation-light-univ> [cit. 20. 7. 2018]
- [140] GRÖBER, S., VETTER, M., ECKERT, B., JODL, H.-J. *Das Photonenmodell des Lichts – Eine Lerneinheit mit Lernzirkeln und einem Remotely Controlled Laboratory (RCL)*. PdN-PhiS, 56, 2, 2007. Str. 12–19. [online] [http://rcl-munich.informatik.unibw-muenchen.de/docs/Das_Photonenmodell_des_Lichts-Eine_Lerneinheit_mit_Lernzirkeln_und_RCL_PdN-PhiS_2-56\(2007\).pdf](http://rcl-munich.informatik.unibw-muenchen.de/docs/Das_Photonenmodell_des_Lichts-Eine_Lerneinheit_mit_Lernzirkeln_und_RCL_PdN-PhiS_2-56(2007).pdf) [cit. 20. 7. 2018]
- [141] GRÖBER, S., ECKERT, B. a kol. *Photoelectrical effect – RCL*. University of German armed forces, Munich, 2005. [online] <http://rcl-munich.informatik.unibw-muenchen.de/eng/load-fotoeffekt.htm> [cit. 20. 7. 2018]
- [142] MARTINÁSKOVÁ, H. *Bakalářská práce – Fotoelektrický jev*. Přírodovědecká fakulta MU, KOF, Brno, 2005.
- [143] WONG, D., LEE, P., SHENGHAN, G., XUEZHOU, W., QI, H. Y., KIT, F. S. *The photoelectric effect: experimental confirmation concerning a widespread misconception in the theory*. Eur. J. Phys. 32, 2011. Str. 1059–1064.
- [144] CAULFIELD, H. J., CHAPMAN, R. A. *Cesium–Antimony Films in Equilibrium with Cesium Vapor*. Journal of Applied Physics. Vol. 37. Iss. 13. December 1966. Str. 4927–4935. [online] <https://doi.org/10.1063/1.1708167> [cit. 20. 7. 2018]
- [145] *Katalog Phywe – Photocell for h-determination, with housing*. [online] <https://www.phywe.com/en/catalog/product/view/id/11074/s/photocell-for-h-determination-with-housing/category/12681/> [cit. 20. 7. 2018]
- [146] IVANJEK, L., MCDERMOTT, L., SHAFFER, P., PLANINIC, M. *Identifying student difficulties with atomic spectra*. In TASAR, M. F. (ed.) *Book of abstracts, World conference on physics education*. WCPE, July 1–6 2012. Gazi Universitesi, Ankara, 2012. Str. 407.
- [147] IVANJEK, L., SHAFFER, P. S., MCDERMOTT, L. C., PLANINIC, M., VEZA, D. *Research as a guide for curriculum development: An example from introductory spectroscopy. I. Identifying students difficulties with atomic emission spectra*. Am. J. Phys., 83, 85, 2015.
- [148] IVANJEK, L., SHAFFER, P. S., MCDERMOTT, L. C., PLANINIC, M., VEZA, D. *Research as a guide for curriculum development: An example from introductory spectroscopy. Addressing students difficulties with atomic emission spectra*. Am. J. Phys., 83, 171, 2015.

- [149] *Wikipedie – Barevné spektrum*. [online] https://cs.wikipedia.org/wiki/Barevné_spektrum [cit. 20. 7. 2018]
- [150] *Wikipedia – Lyman series*. [online] https://en.wikipedia.org/wiki/Lyman_series [cit. 20. 7. 2018]
- [151] PASCHEN, F. *Zur Kenntnis ultraroter Linienspektren*. *Annalen der Physik*, 27, 1908. Str. 537–570.
- [152] *Wikipedia – Balmer series*. [online] https://en.wikipedia.org/wiki/Balmer_series [cit. 20. 7. 2018]
- [153] *Wikipedia – Rydberg formula*. [online] https://en.wikipedia.org/wiki/Rydberg_formula [cit. 20. 7. 2018]
- [154] *Wikipedia – Rydberg-Ritz combination principle*. [online] https://en.wikipedia.org/wiki/Rydberg-Ritz_combination_principle [cit. 20. 7. 2018]
- [155] KOUPILOVÁ, Z. *Kvantová fyzika středoškolsky a aktivně*. [online] <http://kdf.mff.cuni.cz/~koupilova/kvantovka.php> [cit. 20. 7. 2018]
- [156] *Changing minds – Design notation*. [online] http://changingminds.org/explanations/research/design/design_notation.htm [cit. 20. 7. 2018]
- [157] *Changing minds – Switching Replications design*. [online] http://changingminds.org/explanations/research/design/switching_replications.htm [cit. 20. 7. 2018]
- [158] *Changing minds – Solomon Four-Group design*. [online] <http://changingminds.org/explanations/research/design/solomon.htm> [cit. 20. 7. 2018]
- [159] VYBÍRAL, B. *Knihovnička FO – Zpracování dat z fyzikálních měření*. [online] <http://fyzikalniolympiada.cz/texty/mereni.pdf> [cit. 20. 7. 2018]
- [160] KRBECEK, M., DAS, S., SCHAUER, F., OZVOLDOVA, M., LUSTIG, F. *Radiation Remote Laboratory with two level diagnostics*. *Proceedings of the 15th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV 2018)*, March 21–23 2018, University of Applied Science Düsseldorf (HSD), Germany, 2018. Str. 71–78.

Seznam publikací

Výběr publikací relevantních k tématu této práce

- [1] LUSTIG, F., BROM, P., KURIŠČÁK, P., DVOŘÁK, J. „Hands-on-Remote“ Laboratories. In AUER, M. E., LANGMANN, R. (eds.) *Smart Industry & Smart Education*. Proc. of REV 2018. Part of the Lecture Notes in Networks and Systems book series (LNNS, volume 47). Springer, Cham, 2019. Str. 118–127. ISBN: 978-3-319-95678-7. [online] www.doi.org/10.1007/978-3-319-95678-7_13 [cit. 20. 7. 2018]
- [2] BROM, P., LUSTIG, F., KURIŠČÁK, P., DVOŘÁK, J. *DIY „Hands-on-remote“ experiment in physics with Arduino*. Proceedings of the 15th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV 2018), March 21–23 2018. University of Applied Science Düsseldorf (HSD), Germany, 2018. Str. 617–624. [online] http://www.ises.info/old-site/clanky_pdf/Lustig_DIY_Hands-on-remote_experiment_REV2018_1239.pdf [cit. 20. 7. 2018]
- [3] LUSTIG, F., DVORAK, J., KURISCAK, P., BROM, P. *Open modular hardware and software kit for creations of remote experiments accessible from PC and mobile devices*. iJOE. Vol. 12. Iss. 7. 2016. Str. 30–36. ISSN: 1868-1646. [online] <http://online-journals.org/index.php/i-joe/article/view/5833> [cit. 20. 7. 2018]
- [4] LUSTIG, F., DVORAK, J., BROM, P. *Simple modular hardware and software kit for creations of remote experiments accessible from PC and mobile devices*. In AUER, M. E. (ed.) *Proceedings of the 13th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation*. REV, Feb 24–26 2016, Madrid. IEEE, New York, 2016. Str. 406–408. ISSN: 2330-9997. ISBN: 978-1-4673-8246-5.
- [5] LUSTIG, F., KURIŠČÁK, P., BROM, P. *Building your own remote experiment controlled by a mobile or touch enabled device*. In KAPOUNOVÁ, J. (ed.) *Proc. of the Information and Communication Technology in Education Conference*. ICTE, Rožnov pod Radhoštěm September 15–17 2015. Ostravská Univerzita, 2015. Str. 88–95. ISBN 978-80-7464-763-5.
- [6] LUSTIGOVÁ, Z., BROM, P. *Educational Datamining in Virtual Learning Environments*. International Journal of Advanced Corporate Learning (iJAC). Vol. 7. Iss. 1. 2014. Str. 39–42. ISSN: 1867-5565. [online] <http://online-journals.org/index.php/i-jac/article/download/3557/3056> [cit. 20. 7. 2018]
- [7] LUSTIGOVÁ, Z., NOVOTNÁ, V., BROM, P. *Detecting disengagement of online students through log files analysis*. In *Proc. of the International Conference The Future of Education*. Florence, Italy, June 12–13 2014. Vyd. libreriauniversitaria.it edizioni, Padova, 2014. Str. 137-140. ISBN: 978-88-6292-499-3.

[8] BROM, P. *Pretest and the verification of measurement tools for a pilot survey of the effectiveness of a remote laboratory experiment*. In KAPOUNOVÁ, J., KOSTOLÁNYOVÁ, K. (eds.) *Proceedings of the Information and Communication Technology in Education Conference*. ICTE, Rožnov p. R., September 13–15 2011. University of Ostrava, 2011. ISBN 978-80-7368-979-7.

[9] BROM, P., LUSTIG, F. *Integrated e-learning and the opportunity for anyone to explore the nature of polarization of light*. In LINDELL, A., KÄHKÖNEN, A.-L., VIIRI, J. *Proc. GIREP-EPEC Conference 2011, Physics Alive*. August 1–5 2011, Jyväskylä, Finland. University of Jyväskylä, Finland, 2011. ISBN: 978-951-39-4801-6. Str. 167–172. [online] <https://jyx.jyu.fi/bitstream/handle/123456789/49276/1/978-951-39-4801-6.pdf> [cit. 20. 7. 2018]

[10] BROM, P., LUSTIG, F. *Využití metody integrovaného e-learningu pro úvod do kvantové fyziky*. In ULRICH, M., ZATLOUKAL, K. (eds.) *Alternativní metody výuky 2011: 9. ročník mezinárodní konference – Sborník příspěvků*. AMV, PřF UK, Praha 28. 4. 2011. Gaudeamus, Univerzita Hradec Králové, 2011. ISBN 978-80-7435-104-4.

[11] BROM, P., LUSTIG, F. *Remote Experiments for Teaching Quantum Physics within the Integrated e-Learning Strategy*. In KAMINSKI, W., MICHELINI, M. (eds.) *Proc. of selected papers of the GIREP-ICPE-MPTL International Conference – Teaching and Learning Physics Today: Challenges? Benefits?* August 22–27, Reims, France, 2010. Università degli Studi di Udine, Italy, 2014. Str. 808–816. ISBN: 978-88-97311-32-4. [online] http://iupap-icpe.org/publications/proceedings/GIREP-ICPE-MPTL2010_proceedings.pdf [cit. 20. 7. 2018]

Výběr dalších publikací autora

[12] KUCERA, M., BROM, P. *Magneto-optical properties of nano-crystalline cubic and tetragonal copper ferrite thin films*. *Journal of Applied Physics*. Vol. 117. Iss. 17. 2015. Str. 17B738-1–4. [online] https://www.researchgate.net/profile/Miroslav_Kucera2/publication/276087138_Magneto-optical_properties_of_nano-crystalline_cubic_and_tetragonal_copper_ferrite_thin_films/links/55f92cfa08aeba1d9f18294d.pdf [cit. 20. 7. 2018]

[13] BROM, P. *Řešení experimentální úlohy III.E – Papír*. In KOLÁŘ, K. a kol. (eds.) *Fyzikální korespondenční seminář – XXIV. ročník – 2010/11*. Matfyzpress, Praha, 2011. Str. 79–82. ISBN: 978-80-7378-187-3. [online] <https://fykos.cz/ulohy/rocenky> [cit. 20. 7. 2018]

Seznam obrázků

1.1	Klasifikace experimentů podle P. Broma s poslední integrací	8
1.2	Portugalská vzdálená laboratoř pro studium mionů	13
1.3	Sdílení vzdáleně řízené aparatury pro Franckův-Hertzův experiment	14
1.4	Realistická simulace CLEA na téma <i>Spektrální klasifikace hvězd</i> .	16
1.5	Německá vzdál. úloha <i>vnější fotoefekt</i> s opisováním hodnot ručně .	20
1.6	Interaktivní simulace PhET pro zapojení elektrického obvodu . . .	21
1.7	Vzdělávací cíle tradičních, simulovaných a vzdálených laboratoří .	23
1.8	Vztah pojmů <i>rozšířená realita a virtualita a smíšená realita</i>	27
1.9	Španělská vzdál. laboratoř s integrací simulace (<i>refrakce</i>)	28
1.10	Integrace reálných a simulovaných hodnot v jediném prostředí (ČR)	29
1.11	Harwoodův model z roku 2004 pro získání vědeckých informací . .	30
1.12	Původní a doplněné znázornění strategie výuky <i>integrovány e-learning</i>	31
2.1	Německý vzdálený experiment k tématu <i>radioaktivita</i>	37
2.2	Řídicí stránka německého vzdál. experimentu <i>radioaktivita</i>	37
2.3	Australský vzdálený exp. <i>Radioaktivita</i> na portálu Go-Lab	38
2.4	Ukázka měření ze vzdál. exp. <i>Radioaktivita</i> na portálu Go-Lab . . .	38
2.5	Původní vzdáleně řízená aparatura k úloze <i>Studium radioaktivity</i> .	40
2.6	Nová vzdáleně řízená aparatura k úloze <i>Studium radioaktivity</i> . . .	40
2.7	Řídicí webová stránka vzdál. exp. pro ověření ochrany vzdáleností	41
2.8	Úplná řídicí stránka vzdál. lab. pro ověření ochrany stíněním . . .	45
2.9	Zpracování velkého výběru pro ověření <i>ochrany vzdáleností</i> v Excelu	48
2.10	Excelovské zpracování velkého výběru pro ověření <i>ochrany stíněním</i>	49
2.11	Zpracování automatického proměření experimentu <i>ochrana vzdáleností</i>	51
2.12	Zpracování automatického měření úlohy <i>ochrana stíněním</i> v Excelu	52
2.13	Ověření konstantní úrovně pozadí	53
2.14	Ověření Poissonova rozdělení pro velký rozsah výběru ($N = 7630$)	53
2.15	Spolehlivé ověření zákona převrácených čtverců díky vzdál. lab. .	54
2.16	Spolehlivé ověření Lambertova-Beerova zákona v úloze <i>radioaktivita</i>	55
2.17	Schéma uspořádání vzdáleně řízeného exp. <i>Polarizace světla</i>	58
2.18	Aktuální snímek vzdáleně řízené aparatury pro úlohu <i>Polarizace světla</i>	58
2.19	Pohled na experiment <i>Polarizace světla</i> z webkamery v optické ose	60
2.20	Ukázka doporučených apletů k úloze <i>Polarizace světla</i>	61
2.21	Ukázka řídicí stránky vzdál. úlohy <i>Polarizace světla</i> s přípravou CP	63
2.22	Ukázka exp. studia světla z různých zdrojů v úloze <i>Polarizace světla</i>	64
2.23	Ověření Malusova zákona grafickým zpracováním vzdáleného měření	65
2.24	Aktuální snímek vzdáleně řízené aparatury v úloze <i>Vnější fotoefekt</i>	68
2.25	Uspořádání a schéma el. obvodu vzdál. exp. <i>Vnější fotoefekt</i>	69
2.26	Řídicí webová stránka vzdál. úlohy <i>vnější fotoefekt</i> – nabíjení kondenzátoru	72
2.27	Řídicí webová stránka vzdál. úlohy <i>vnější fotoefekt</i> – VA charakteristika	73
2.28	Simulace PhET pro ilustraci a výklad vlastností <i>vnějšího fotoefektu</i>	74
2.29	Ukázka graf. zpracování VA charakteristik z úlohy <i>vnější fotoefekt</i>	76

2.30 Ukázkové grafické zpracování <i>vnějšího fotoefektu</i> v Excelu	77
2.31 Nastavení Excelu pro zpracování vzdál. měření <i>vnějšího fotoefektu</i>	78
2.32 Aktuální pohled na vzdáleně řízenou aparaturu k úloze <i>Spektra</i> . .	81
2.33 Řídicí stránka vzdálené úlohy <i>studium spekter</i>	82
2.34 Řídicí webová stránka pro vzdálené měření Balmerovy série čar vodíku	83
2.35 Určení vlnových délek Balmerovy série ze vzdál. měření	86
2.36 Grafické ověření Ritzova-Rydbergova kombinačního principu . . .	87
2.37 Interaktivní simulace k vysvětlení původu spekter	88
3.1 Intervalové rozdělení četností času přihlášení uživatelů k serveru .	100
3.2 Ukázky hry uživatelů v záznamech měření v úloze <i>vnější fotoefekt</i>	101
4.1 Ukázka chybného grafického zpracování vzdál. měření <i>fotoefektu</i> .	109

Seznam tabulek

2.1	Naměřené hodnoty brzdného napětí ze vzdálené úlohy <i>Vnější fotoefekt</i>	77
2.2	Vlnové délky čar Balmerovy série ve vakuu	80
3.1	Standardní design výzkumu s kontrolní a experimentální skupinou	90
3.2	Upravený design výzkumu s prohozenými replikami	90
3.3	Kódování důležitých okolností a podmínek vzdáleného měření . .	95
3.4	Klasifikace a specifikace aktivity uživatele při vzdáleném měření .	96
3.5	Klasifikace pokročilé aktivity uživatele týkající se zpracování dat .	97
3.6	Ukázka předzprac. logu aktivity ve vzdálené lab. <i>vnější fotoefekt</i> .	98
4.1	Přímé odkazy na nové vzdálené experimenty a studijní e-texty . .	113

Seznam použitých zkratek

ARCS	Attention, Relevance, Confidence, Satisfaction (Kellerův motivační způsob výuky).
BYOD (aj.)	Bring your own device/technology/phone/PC, přines si své zařízení/techniku/telefon/počítač.
CLEA	Contemporary Laboratory Experiences in Astronomy (projekt; soubor apletů pro výuku astrofyziky).
CP	Circular polarization, kruhově polarizované světlo.
DC	Direct current, stejnosměrný (el. napětí, proud).
DPS	Deska plošných spojů.
DZZ	Demonstrační zdroj záření (školní demonstrační zdroj ionizujícího záření).
EDM	Educational Data Mining, vytěžování dat ve vzdělávání.
EJS (EjsS)	Easy Java/JavaScript Simuations (vývojové prostředí apletů).
f2f	Face-to-face, tváří v tvář, osobně (výuka s osobní účastí).
FPGA	Field-Programmable Gate Array, programovatelné hradlové pole (druh integrovaného el. obvodu).
GND	Ground, potenciál země, uzemnění.
HW	Hardware (soubor fyzického zařízení, pevného vybavení).
INTe-L	Integrated e-Learning, integrovaný e-learning (strategie výuky).
ISES	Intelligent School Experimental System (hardwarová platforma pro vzdálené i lokální experimenty).
iSES	Internet School Experimental Studio (měřicí systém; soubor vzdálených experimentů).
IWC	ISES Web Control (software pro vzdálené řízení experimentu na platformě ISES).
JRE	Java Runtime Environment (software, prostředí pro spuštění JAVA apletů).
JS	JavaScript (programovací jazyk).
LaaS	Laboratory as a service, laboratoř jako služba.
LCD	Liquid crystal display, displej z kapalných krystalů (zobrazovací jednotka využívající polarizaci světla).
LED	Light emitting diode, svítící dioda.
LMS	Learning management system, systém řízení výuky.
LP	Linear polarization, lineárně polarizované světlo.

MFF UK	Matematicko-fyzikální fakulta Univerzity Karlovy.
MOOC(s)	Massive online open course(s), online přístupný otevřený kurz pro masovou výuku.
MOOL(s)	Massive online open laboratory(ies), online přístupná otevřená laboratoř pro masivní výuku.
MR	Mixed reality, smíšená realita.
OSP	Open Source Physics (projekt; soubor apletů).
PC	Personal computer, osobní počítač.
PhET	Physics Education Technology (projekt; soubor interaktivních apletů).
QWP	Quarter waveplate, čtvrtvlnná fázová destička (optický prvek; průchod světla zpozdí jednu bázi o $\lambda/4$).
RC	Resistor-capacitor, rezistor a kondenzátor zapojený v sérii (RC člen v el. obvodu).
RCL	Remotely controlled laboratory, vzdáleně řízený experiment.
RLMS	Remote laboratory management system, systém správy vzdálené laboratoře.
RVP	Rámcový vzdělávací program.
SDK	Software Development Kit, softwarová vývojová stavebnice (zde vývoj vzdálených experimentů).
SNR	Signal-to-noise ratio, poměr úrovně signálu k úrovni šumu.
SW	Software, programové vybavení počítače nebo el. zařízení.
ŠVP	Školní vzdělávací program.
URL	Uniform Resource Locator, jednotná adresa zdroje (řetězec znaků s danou strukturou, specifikující umístění zdroje v síti Internet).
USB	Universal Series Bus, univerzální sériová linka (druh portu počítače).
VA	Voltampérová (VA charakteristika, závislost proudu součástkou na přiloženém napětí).
VE	Virtual Experiment, virtuální experiment (aplet, simulace).
VŠ	Vysoká škola; vysokoškolský.
ZOQWP	Zero-Order Quarter Waveplate, čtvrtvlnná fázová destička nultého řádu (spec. optický prvek typu retardér – viz též QWP).
ZŠ	Základní škola; základníškolský.

Přílohy

A. Základní příkazy pro grafické zpracování v programu gnuplot

V této příloze jsou uvedeny základní příkazy pro vědecký freeware `gnuplot` [131], který lze volně stáhnout z domovské stránky <http://www.gnuplot.info> např. jako zip soubor. Takto program nevyžaduje instalaci ve smyslu změn v operačním systému, a tedy není nutné administrátorské oprávnění. Po rozbalení souboru zip najdeme v adresáři `bin` spustitelný soubor `wgnuplot.exe` a spustíme jej. Program se ovládá z příkazového řádku. Adresář `bin` je v tomto případě *pracovním adresářem*, v němž se budou hledat všechny datové soubory a kam budou ukládány příp. výstupy prostřednictvím příkazu `print`. Pracovní adresář lze změnit příkazem `cd 'C:\PlatnaCesta\NovyPracovniAdresar\'` (`cd` – change directory), resp. zjistit příkazem `pwd` (print working directory). Veškerá nastavení a poslední příkaz pro vykreslení grafu lze uložit příkazem `save 'JmenoScriptu.gp'`. Tento uložený soubor vykonatelných příkazů pro program `gnuplot` (nazývaný „script“) lze v textovém editoru snadno upravovat a kdykoliv později znovu spustit z příkazového řádku zadáním `load 'JmenoScriptu.gp'`. Přípona `*.gp` je nepovinná, ale vhodná, případně lze použít příponu `*.txt` pro snazší otevření a úpravy scriptu.

V následujícím přehledu jsou uvedeny nejdůležitější příkazy pro pokročilé grafické zpracování výsledků měření včetně ukázky a popisu souborů s experimentálními daty. Příkazy jsou maximálně zjednodušené (neobsahují nastavení značek, barev, formátování pro výstup do \LaTeX u atp.) a s jejich pomocí se lze pokusit provést grafické zpracování dat s libovolně zvolenou modelovou funkcí. Příkaz `set fit errorvariables` na začátku umožní uživateli zjistit optimální hodnoty parametrů v modelové funkci včetně tzv. *chyby fitu*. Příkazy `set ...` provádějí vhodná nastavení (např. `key` pro legendu, `label` pro popisky os grafu aj.). Příkaz `JmenoFunkce(x)=...` definuje modelovou funkci s obecně pojmenovanými parametry a nejdůležitější příkaz `fit` provede proložení experimentálních bodů zadanou modelovou funkcí včetně určení optimálních hodnot obecných parametrů, které jsou uvedeny za klíčovým slovem `via` a vzájemně oddělené čárkou. Klávesami s šipkou lze listovat v historii zadaných příkazů a příkaz `fit` lze rychle přepsat na `plot`, mezi `JmenoFunkce(x)` a jméno datového souboru vepsat čárku a smazat klíčové slovo `via` včetně parametrů uvedených za ním, čímž se okamžitě vykreslí graf pro posouzení správnosti grafického zpracování. Viz příklady zadání jednotlivých příkazů dále a příp. manuály, tutoriály apod. na webu [131]. Pro zobrazení nápovědy k nastavení jednotlivých příkazů lze zadat `help NazevPrikazu`, případně příkaz `test`. Příkaz `help expressions` zobrazí nápovědu k zadání jednotlivých operací a předdefinovaných matematických funkcí (v angličtině). Pro urychlení práce postačí do příkazového řádku zadávat jednoznačný začátek názvů příkazů i jejich přepínačů. Viz též příklady v nápovědě vyvolané příkazem `help`.

A.1 Ověření Poissonova rozdělení

V souboru `poissongauss.txt` s výsledky měření (zpracovanými např. v programu MS Excel) jsou uvedeny v 1. sloupci naměřený počet částic za minutu a ve druhém sloupci zjištěná absolutní četnost. `gnuplot` zná funkci $\Gamma(x)$, pomocí které

lze vyčíslit hodnotu faktoriálu ve vzorci 2.2 na str. 46 pro pravděpodobnostní funkci Poissonova rozdělení. Platí: $\Gamma(n) = (n - 1)!$, tedy $n! = \Gamma(n + 1)$. Zde funkce $p(x)$, resp. $g(x)$ značí absolutní četnosti podle Poissonova, resp. Gaussova rozdělení, které získáme vynásobením pravděpodobnostní funkce rozsahem výběrového souboru N .

```
set key right top
set xlabel "Naměřený počet pulzů za minutu"
set ylabel "Absolutní četnost"
N=7630
sigma=5.0553
lambda=25.556
p(x)=N*exp(-lambda)*lambda**x/gamma(x+1)
g(x)=N/sigma/sqrt(2*3.141592654)*exp(-(x-lambda)**2/(2*sigma**2))
plot "poissongauss.txt" u 1:2 title "Měření", p(x) with
  dots title "Poissonovo rozdělení", g(x) title "Gaussovo rozdělení"
```

Grafický výstup je uveden na obr. 2.14 na str. 53.

A.2 Ověření ochrany vzdáleností

Experimentální hodnoty včetně chyby (tzn. výběrové průměry a výběrové směrodatné odchylky vyhodnocené předtím v programu MS Excel) se načítají ze souboru `dist.txt`, který může vypadat např. takto:

#	d [cm]	Průměr [1/min]	Chyba [1/min]	N
5	250.74	15.35	405	
7	176.84	12.31	405	
9	125.56	11.52	405	
11	94.88	10.22	405	
13	76.14	8.14	405	
15	63.87	7.69	405	
17	55.35	7.58	405	
19	49.82	6.95	405	
21	45.58	6.96	405	

V prvním řádku jsou popisky sloupců včetně jednotky – komentáře, příp. neplatné vyřazené body za znakem `#` program `gnuplot` nečte. V 1. sloupci je vzdálenost od zářiče, ve 2. sloupci výběrové průměry, ve 3. sloupci chyba měření a pro informaci ve 4. sloupci rozsah výběrového souboru. Sloupce mohou být odděleny buď mezerou, nebo tabulátorem (po prostém překopírování hodnot v označených buňkách do textového souboru). Desetinná čárka musí být pro program `gnuplot` nahrazena tečkou – lze použít v menu „Úpravy“ („Edit“) funkci „Nahradit“ („Replace“).

Následuje přehled základních příkazů pro proložení naměřených bodů teoretickou závislostí 2.5 v programu `gnuplot`. Funkcemi $f(x)$ a $g(x)$ příkaz `fit` prokládá všechny experimentální body kromě prvního ($d = 5$ cm), kdy není splněna podmínka bodového charakteru zdroje záření pro odvození modelové funkce 2.5; příkaz `fit` proto zohledňuje pouze body v intervalu $x \in (6; 22)$ cm. Funkcí

$h(x)$ se nakonec pro srovnání prokládají všechny naměřené body včetně prvního. Příkaz `plot` vykreslí naměřené hodnoty a grafy všech definovaných modelových funkcí do společného grafu – viz graf na obr. 2.15 na str. 54. Pomocí následujících příkazů je možné optimální hodnoty parametrů (pro zjednodušení bez jednotek) určené příkazem `fit` uložit do textového souboru ve formátu

Parametr = optimální střední hodnota \pm chyba fitu (relativní chyba v %)

```
set fit errorvar
set key right top
set xlabel "Vzdálenost od zářiče d [cm]"
set ylabel "Počet částic za minutu (GM-1)"
Bg=25.54
f(x)=A/((x-C)**2)+B
g(x)=D/((x-E)**2)+Bg
h(x)=F/((x-G)**2)+H
B=25
C=1
A=8000
D=8000
E=1
F=8000
G=1
H=25
fit [6.:22.] f(x) "dist.txt" u 1:2 via A,B,C
fit [6.:22.] g(x) "dist.txt" u 1:2 via D,E
fit h(x) "dist.txt" u 1:2 via F,G,H
plot [4:22] [0:290] "dist.txt" u 1:2:3 w yerrorbars title
    'Měření (průměry)', h(x) title 'Fit všech bodů',
    g(x) title 'Fit přes 2 param.'
```

```
set print "dist_fit.txt"
print "Výsledky fitu funkcemi   f(x)=A/((x-C)**2)+B - bez 1. bodu"
print "                               g(x)=D/((x-E)**2)+Bg - bez 1. bodu"
print "                               h(x)=F/((x-G)**2)+H - všechny body"
print "Bg = ", Bg
print " "
print "C = ", C, " +/- ", C_err, " (", C_err/C*100, " %)"
print "A = ", A, " +/- ", A_err, " (", A_err/A*100, " %)"
print "B = ", B, " +/- ", B_err, " (", B_err/B*100, " %)"
print "D = ", D, " +/- ", D_err, " (", D_err/D*100, " %)"
print "E = ", E, " +/- ", E_err, " (", E_err/E*100, " %)"
print "F = ", F, " +/- ", F_err, " (", F_err/F*100, " %)"
print "G = ", G, " +/- ", G_err, " (", G_err/G*100, " %)"
print "H = ", H, " +/- ", H_err, " (", H_err/H*100, " %)"
set print
```

A.3 Ověření ochrany stíněním

Experimentální hodnoty včetně chyby (tzn. výběrové průměry a výběrové směrodatné odchylky vyhodnocené předtím v programu MS Excel) se načítají ze souboru `stin.txt`, který může vypadat např. takto:

```

# t [mm] Průměr [1/min] Chyba [1/min] N
0 250.74 15.35 405
0.5 125.00 10.87 406
1.0 73.18 8.89 406
1.5 48.55 6.94 407
2.0 32.11 5.71 407
2.5 27.19 4.82 406

```

V prvním řádku jsou popisky sloupců včetně jednotky – komentáře, příp. neplatné vyřazené body za znakem # program `gnuplot` nečte. V 1. sloupci je tloušťka stínící měděné destičky, ve 2. sloupci výběrové průměry, ve 3. sloupci chyba měření a pro informaci ve 4. sloupci rozsah výběrového souboru. Sloupce mohou být odděleny buď mezerou, nebo tabulátorem (po prostém překopírování hodnot v označených buňkách do textového souboru). Desetinná čárka musí být pro program `gnuplot` nahrazena tečkou – lze použít v menu „Úpravy“ („Edit“) funkci „Nahradit“ („Replace“).

Následuje přehled základních příkazů pro proložení naměřených bodů teoretickou závislostí [2.4](#) v programu `gnuplot`. Pro modelovou funkci $f(x)$ příkaz `fit` hledá optimální hodnoty všech tří parametrů, pro funkci $g(x)$ pouze dvou parametrů, úroveň pozadí je známá. Oba tyto postupy jsou správné a rovnocenné, výsledné optimální hodnoty odpovídajících si parametrů se mohou nepatrně lišit a pravděpodobně se bude lišit přesnost jejich určení. Příkaz `plot` vykreslí naměřené hodnoty a grafy všech definovaných modelových funkcí do společného grafu – viz graf na obr. [2.16](#) na str. [55](#). Pomocí následujících příkazů je možné optimální hodnoty parametrů (pro zjednodušení bez jednotek) určené příkazem `fit` uložit do textového souboru ve formátu

Parametr = optimální střední hodnota \pm chyba fitu (relativní chyba v %)

```

set fit errorvar
set key right top
set xlabel "Tloušťka stínící vrstvy t [mm]"
set ylabel "Počet částic za min (GM-1)"
Bg=25.54
f(x)=C*exp(-A*x)+B
g(x)=D*exp(-E*x)+Bg
B=25
C=8000
A=1
D=8000
E=1
fit f(x) "stin.txt" u 1:2 via A,B,C
fit g(x) "stin.txt" u 1:2 via D,E
plot [-0.2:2.7] [0:290] "stin.txt" u 1:2:3 w yerrorbars
    title 'Měření (průměry)',
    g(x) title 'Exp. fit přes 2 parametry',
    f(x) title 'Exp. fit přes 3 parametry'
set print "rash_fit.txt"
print "Výsledky fitu funkcemi f(x)=C*exp(-A*x)+B"

```



```

print "                                g(x)=D*exp(-E*x)+Bg"
print "Bg = ", Bg
print " "
print "C = ", C, " +/- ", C_err, " (", C_err/C*100, " %)"
print "A = ", A, " +/- ", A_err, " (", A_err/A*100, " %)"
print "B = ", B, " +/- ", B_err, " (", B_err/B*100, " %)"
print "D = ", D, " +/- ", D_err, " (", D_err/D*100, " %)"
print "E = ", E, " +/- ", E_err, " (", E_err/E*100, " %)"
set print

```

A.4 Přímé grafické zpracování malého výběrového souboru

Malý výběrový soubor, jako např. přímý export naměřených hodnot z řídicí webové stránky, lze rovněž graficky zpracovat pomocí programu `gnuplot` bez potřeby provádět předzpracování v Excelu. Experimentální hodnoty z automatického proměření závislosti (v každé pozici se měření opakuje třikrát) se načítají ze souboru `autodist.txt`, jehož začátek může vypadat např. takto:

```

#Pozice d [cm] Počet pulzů (GM1) Pozadí (GM2) Časový interval [s]
5 284 28 60
5 264 18 60
5 260 20 60
7 172 39 60
7 185 23 60
7 206 30 60
9 135 26 60
9 135 26 60
atd. ...

```

V prvním řádku jsou popisky sloupců včetně jednotky – komentáře, příp. neplatné vyřazené body za znakem `#` program `gnuplot` nečte. V 1. sloupci je vzdálenost detektoru GM-1 od zářiče, ve 2. sloupci naměřený počet částic pohyblivým detektorem GM-1, ve 3. sloupci naměřený počet částic pozadí statickým detektorem GM-2 – obě tato měření jsou vztažena ke zvolenému časovému intervalu, který je pro informaci uveden ve 4. sloupci. V tomto případě není třeba řešit problémy s desetinnou tečkou/čárkou. Příkaz `fit` určí optimální hodnoty parametrů v modelové funkci [2.4](#) na str. [47](#). Vzhledem k velmi malému rozsahu výběrového souboru není vhodné uvažovat modelovou funkci [2.5](#) se třemi parametry. Funkce $f_b(x)$ má známou a zadanou hodnotu přírodního pozadí a optimalizuje se pouze parametr Kb . Pro modelovou funkci $f(x)$ se optimalizují oba parametry současně – koeficient K i úroveň pozadí B . Příkaz `plot` vykreslí všechny naměřené hodnoty a grafy obou definovaných modelových funkcí do společného grafu – viz obr. [2.11](#) na str. [51](#). Pomocí následujících příkazů je možné nalezené optimální hodnoty parametrů (pro zjednodušení bez jednotek) uložit do textového souboru s názvem `autodist.txt` ve formátu

Parametr = optimální střední hodnota \pm chyba fitu (relativní chyba v %)

```

set fit errorvariables
set key right top
set xlabel "Vzdálenost detektoru od zářiče d [cm]"
set ylabel "Naměřený počet částic (GM-1)"
f(x)=K/x**2+B
fit [6:22] f(x) "autodist.txt" u 1:2 via K,B
fb(x)=Kb/x**2+25.556
fit [6:22] fb(x) "autodist.txt" u 1:2 via Kb
plot [4:22.6] "autodist.txt" u 1:2 title "Měření",
      f(x) title "Fit přes 2 param.",
      fb(x) title "Fit pouze přes K; B=25,6"
set print "autodist_res.txt"
print "Výsledky fitu funkcemi: f(x)=K/x**2+B,fb(x)=Kb/x**2+25.556"
print "K = ", K, " +/- ", K_err, " (", K_err/K*100, " %)"
print "B = ", B, " +/- ", B_err, " (", B_err/B*100, " %)"
print "Kb = ", Kb, " +/- ", Kb_err, " (", Kb_err/Kb*100, " %)"
set print

```

A.5 Grafické zpracování spekter

Výsledky měření lze na řídicí webové stránce vzdáleného experimentu vyexportovat a jednoduše přepíchnout do textového souboru. Začátek takového souboru je uveden v ukázce níže. Pro program gnuplot je nezbytné nahradit desetinnou čárku tečkou, a to např. pomocí funkce „Nahradit“ („Replace“) v menu „Úpravy“ („Edit“) v textovém editoru.

```

# Pořadí bodu  Vlnová délka  Rel. intenzita  Délka integrace  Zdroj
#              [nm]              [ms]
0 278.2  0 300 H
1 279    0 300 H
2 279.7  0 300 H
3 280.5  0 300 H
4 281.2  0 300 H
5 281.9  0 300 H
6 282.7  0 300 H
7 283.4  0 300 H
8 284.1  0 300 H
9 284.9  0 300 H
10 285.6  0 300 H
11 286.4  0 300 H
12 287.1  0 300 H
13 287.8  3 300 H
14 288.6  0 300 H
15 289.3  0 300 H
16 290    2 300 H
17 290.8  2 300 H

```

V prvních dvou řádcích je uveden popis sloupců a příslušných jednotek. Pořadí bodu se využívá pro kalibraci vlnové délky spektrometru, která je ve SŠ verzi

provedena (viz 2. sloupec). V dalším sloupci jsou naměřené hodnoty intenzity světla v relativních jednotkách a v posledních sloupcích je pro informaci upřesněna nastavená integrační doba (v milisekundách) a zdroj světla („H“ – vodík, „Hg“ – úsporná žárovka, v jejíž trubici jsou zdrojem intenzivních spektrálních čar atomy rtuti).

Následujícími příkazy pro program `gnuplot` byla ve společném grafu zobrazena obě naměřená spektra vodíku při krátké a delší době integrace (3 ms, resp. 300 ms). Experimentální hodnoty se načítají ze souborů `h3.txt` a `h300.txt`. Navíc byly pomocí příkazů `set arrow` a `set label` přidány popisky identifikovaných čar (odečtené vlnové délky) i parazitního signálu.

```
set key left top
set xlabel "Vlnová délka [nm]"
set ylabel "Rel. intenzita sp. čáry"
set arrow 1 from 657,-50 to 657,2800 nohead
set label 1 "(657 +/- 1) nm" at 550,2600 rotate by 0
set arrow 2 from 486,-50 to 486,2800 nohead
set label 2 "(486 +/- 1) nm" at 495,2100 rotate by 0
set arrow 3 from 434,-50 to 434,2800 nohead
set label 3 "(434 +/- 1) nm" at 325,1800 rotate by 0
set arrow 4 from 411,-50 to 411,500 nohead
set label 4 "(411 +/- 1) nm" at 315,800 rotate by 0
set arrow 5 from 398,-50 to 398,200 nohead
set label 5 "(398 +/- 1) nm" at 305,300 rotate by 0
set label 7 "Parazitní" at 560,1250 rotate by 0
set label 8 "signál" at 575,900 rotate by 0
plot [250:750] [-50:*] "h300.txt" u ($2):($3<2800?$3:1/0) w lines
        title 'H, 300 ms', "h3.txt" w lines title 'H, 3 ms'
```

Jelikož max. měřitelná hodnota relativní intenzity světla je 2800, je využit ternární operátor „(podmínka?hodnota_pravda:hodnota_nepravda)“ a neplatný výraz $1/0$, které zajistí, že v příslušných intervalech nebudou sousední body spojeny úsečkou (zde totiž naměřená rel. intenzita dosahuje mnohem vyšších hodnot). V grafu zobrazeném příkazem `plot` pomocí programu `gnuplot` lze snadno odečíst vlnové délky spektrálních čar včetně odhadu možné chyby měření. Grafický výstup včetně dalších komentářů je uveden na obr. 2.35 na str. 86.

Pro grafické zpracování a ověření Ritzova-Rydbergova kombinačního principu pomocí programu `gnuplot` lze odečtené vlnové délky čar uložit do nového textového souboru `ritz.txt` např. s následujícím obsahem.

```
# Lambda [nm]   Error nm   n>2
657 1 3
486 1 4
434 1 5
411 1 6
398 1 7
```

V prvním sloupci je vlnová délka v nanometrech, ve druhém sloupci je odhad možné chyby měření ve stejné jednotce, v grafu vyznačené délkou chybové úsečky (`yerrorbar`), a ve 3. sloupci je doporučený vhodně zvolený index (pořadí čáry)

$n > 2$. (Uživatel při heuristickém přístupu samozřejmě může zkoušet volit si indexy jiným způsobem.) Pomocí následujících příkazů se lze experimentálními body pokusit proložit různé vhodné modelové funkce, vybrané z elementárních funkcí s obecnými parametry. Modifikátor u 3:1:2 (using) specifikuje, že x -ové hodnoty se načítají ze 3. sloupce, y -ové hodnoty z prvního a délka kladné i záporné chybové úsečky ze 2. sloupce.

```
set key right top
set ylabel "Vlnová délka [nm]"
set xlabel "Index čáry n>2"
set arrow 1 from 2.8,364.6 to 7.2,364.6 nohead
set label 1 "Hrana Balmerovy série" at 2.8,400 rotate by 0
```

```
balmer(x)=364.507*x*x/(x*x-4)
```

```
texp(x)=EA*exp(-EB*x)+EC
fit texp(x) "ritz.txt" u 3:1 via EA, EB, EC
```

#Final set of parameters		Asymptotic Standard Error	
#=====		=====	
#EA	= 5878.43	+/- 1152	(19.6%)
#EB	= 1.04089	+/- 0.06778	(6.512%)
#EC	= 397.597	+/- 4.393	(1.105%)
#EA=5878.43			
#EB=1.04089			
#EC=397.597			

```
thyp(x)=HA/(x-HB)+HC
HB=2.5
HA=1000
HC=360
fit thyp(x) "ritz.txt" u 3:1 via HA, HB, HC
```

#Final set of parameters		Asymptotic Standard Error	
#=====		=====	
#HA	= 258.367	+/- 8.642	(3.345%)
#HB	= 2.17551	+/- 0.02257	(1.037%)
#HC	= 343.688	+/- 2.235	(0.6504%)
#HA=258.367			
#HB=2.17551			
#HC=343.688			

```
plot [2.5:7.5] [350:700] balmer(x) title 'Balmerův vzorec',
"ritz.txt" u 3:1:2 w yerrorbars title 'Exp. určené spektr. čáry',
texp(x) title 'Fit exponenciálou',
thyp(x) title 'Fit větví hyperboly'
```

Za znakem # je pro úplnost uveden výstup příkazu fit s nalezenými optimálními hodnotami obecných parametrů včetně určené chyby fitu. Grafický výstup je zobrazen na obr. 2.36 na str. 87.

B. Ukázka logovacího souboru

Ukázka z původního logu aktivity uživatelů ze vzdáleného měření

Uživatel, který se přihlásil k serveru v pondělí 10. 1. 2011 v 19:54 h, si vybral metodu měření *studium voltampérové (VA) charakteristiky vakuové fotonky* a zpočátku využíval ruční měření, tzn. nastavoval hodnoty napětí ručně, a to zpravidla pomocí tlačítka pro změnu napětí na fotonce o konstantní krok, které se nachází na kraji posuvníku. Po necelých 3 minutách měření tzv. temného proudu při zatemněné fotonce, což je výchozí nastavení pro každého nově přihlášeného uživatele, zapnul infračervenou LED s podprahovou frekvencí a spustil záznam měření, který měl identifikační číslo 1, neboť byl měřicí server předtím restartován. Uživatel opět zvolil ruční měření a ve 20:05 h změnil filtr, čímž byla změněna frekvence monochromatického světla dopadajícího na fotokatodu. Rtuťová výbojka zůstala zapnutá po předchozím uživateli, proto s ní v této ukázce není spojen žádný záznam aktivity. Po ručním proměření VA charakteristiky ve 20:08 h ukončil záznam měření a vzápětí si tento záznam stáhnul stisknutím tlačítka pro export dat. Následně měnil napětí na fotonce s nepravidelným krokem přímo pomocí posuvníku. Po zahájení druhého záznamu ve 20:10 h byla ukázka logu ukončena, uživatel v měření pokračoval dál.

```
(10.1.2011 at 19:54:5) Users 27 connection closed
(10.1.2011 at 19:54:8) Server stoped
(10.1.2011 at 19:54:26) Server started
(10.1.2011 at 19:54:38) User connected from:195.113.33.238 Using ID:1
(10.1.2011 at 19:54:38) User 1 sets device ID:"VACHarakteristika_voltage_mv_output" to value:0.000000
(10.1.2011 at 19:54:39) User 1 sets device ID:"VACHarakteristika_mode" to value:0.000000
(10.1.2011 at 19:54:43) User 1 sets device ID:"VACHarakteristika_vypnout_lampu" to value:1.000000
(10.1.2011 at 19:55:36) User 1 sets device ID:"VACHarakteristika_zapnout_lampu" to value:1.000000
(10.1.2011 at 19:55:50) User 1 sets device ID:"VACHarakteristika_voltage_mv_output" to value:-62.125000
(10.1.2011 at 19:55:50) User 1 sets device ID:"VACHarakteristika_voltage_mv_output" to value:-635.703125
(10.1.2011 at 19:55:50) User 1 sets device ID:"VACHarakteristika_voltage_mv_output" to value:-984.496094
(10.1.2011 at 19:55:50) User 1 sets device ID:"VACHarakteristika_voltage_mv_output" to value:-1000.000000
(10.1.2011 at 19:55:51) User 1 sets device ID:"VACHarakteristika_voltage_mv_output" to value:-1000.000000
(10.1.2011 at 19:56:1) User 1 sets device ID:"VACHarakteristika_SetResistanceInMegaOhm" to value:100.000000
(10.1.2011 at 19:56:54) User 1 sets device ID:"VACHarakteristika_zapnout_LED940nm" to value:1.000000
(10.1.2011 at 20:1:0) User 1 started recording of experiment 1
(10.1.2011 at 20:1:6) User 1 sets device ID:"VACHarakteristika_voltage_mv_output" to value:-980.000000
(10.1.2011 at 20:1:11) User 1 sets device ID:"VACHarakteristika_voltage_mv_output" to value:-960.000000
(10.1.2011 at 20:1:16) User 1 sets device ID:"VACHarakteristika_voltage_mv_output" to value:-940.000000
(10.1.2011 at 20:1:21) User 1 sets device ID:"VACHarakteristika_voltage_mv_output" to value:-920.000000
(10.1.2011 at 20:1:27) User 1 sets device ID:"VACHarakteristika_voltage_mv_output" to value:-900.000000
(10.1.2011 at 20:1:32) User 1 sets device ID:"VACHarakteristika_voltage_mv_output" to value:-880.000000
(10.1.2011 at 20:1:37) User 1 sets device ID:"VACHarakteristika_voltage_mv_output" to value:-860.000000
(10.1.2011 at 20:1:43) User 1 sets device ID:"VACHarakteristika_voltage_mv_output" to value:-840.000000
(10.1.2011 at 20:1:48) User 1 sets device ID:"VACHarakteristika_voltage_mv_output" to value:-820.000000
(10.1.2011 at 20:1:53) User 1 sets device ID:"VACHarakteristika_voltage_mv_output" to value:-800.000000
(10.1.2011 at 20:1:58) User 1 sets device ID:"VACHarakteristika_voltage_mv_output" to value:-780.000000
(10.1.2011 at 20:2:3) User 1 sets device ID:"VACHarakteristika_voltage_mv_output" to value:-760.000000
(10.1.2011 at 20:2:9) User 1 sets device ID:"VACHarakteristika_voltage_mv_output" to value:-740.000000
(10.1.2011 at 20:2:14) User 1 sets device ID:"VACHarakteristika_voltage_mv_output" to value:-720.000000
(10.1.2011 at 20:2:20) User 1 sets device ID:"VACHarakteristika_voltage_mv_output" to value:-700.000000
(10.1.2011 at 20:2:25) User 1 sets device ID:"VACHarakteristika_voltage_mv_output" to value:-680.000000
(10.1.2011 at 20:2:31) User 1 sets device ID:"VACHarakteristika_voltage_mv_output" to value:-660.000000
(10.1.2011 at 20:2:36) User 1 sets device ID:"VACHarakteristika_voltage_mv_output" to value:-640.000000
(10.1.2011 at 20:2:41) User 1 sets device ID:"VACHarakteristika_voltage_mv_output" to value:-620.000000
(10.1.2011 at 20:2:46) User 1 sets device ID:"VACHarakteristika_voltage_mv_output" to value:-600.000000
(10.1.2011 at 20:2:52) User 1 sets device ID:"VACHarakteristika_voltage_mv_output" to value:-580.000000
(10.1.2011 at 20:2:57) User 1 sets device ID:"VACHarakteristika_voltage_mv_output" to value:-560.000000
(10.1.2011 at 20:3:3) User 1 sets device ID:"VACHarakteristika_voltage_mv_output" to value:-540.000000
(10.1.2011 at 20:3:8) User 1 sets device ID:"VACHarakteristika_voltage_mv_output" to value:-520.000000
(10.1.2011 at 20:3:14) User 1 sets device ID:"VACHarakteristika_voltage_mv_output" to value:-500.000000
(10.1.2011 at 20:3:20) User 1 sets device ID:"VACHarakteristika_voltage_mv_output" to value:-480.000000
(10.1.2011 at 20:3:26) User 1 sets device ID:"VACHarakteristika_voltage_mv_output" to value:-460.000000
(10.1.2011 at 20:3:32) User 1 sets device ID:"VACHarakteristika_voltage_mv_output" to value:-440.000000
(10.1.2011 at 20:3:37) User 1 sets device ID:"VACHarakteristika_voltage_mv_output" to value:-420.000000
(10.1.2011 at 20:3:42) User 1 sets device ID:"VACHarakteristika_voltage_mv_output" to value:-400.000000
(10.1.2011 at 20:3:48) User 1 sets device ID:"VACHarakteristika_voltage_mv_output" to value:-380.000000
```


C. Mezinárodní ocenění

Mezinárodní ocenění GOLC Award 2016
v kategorii *vzdálená laboratoř*



