

Prof. RNDr. Vladimír Bužek, DrSc. **(rozšírený odborný životopis)**

Dátum narodenia: 5. júla 1957

Miesto narodenia: Bratislava, SR

Národnosť: slovenská

Súčasnú zamestnanie:

Vedecký pracovník

Centrum pre výskum kvantovej informácie,
Fyzikálny ústav, Slovenská akadémia vied,
Bratislava

Slovak Academy of Sciences, Bratislava
&

Profesor

Fakulta informatiky, Masarykova univerzita,
Brno, Česká republika



Foto: D.Nagaj

Kontakt:

Centrum pre výskum kvantovej informácie

Fyzikálny ústav

Slovenská akadémia vied

Dúbravská cesta 9

845 11 Bratislava

Tel.: + 421-2-5941 0511

Fax: + 421-2-5477 3463

Mobil: + 421-905-763 453

e-mail: buzek@savba.sk

<http://www.quniverse.sk/buzek/>

Priebeh vzdelania a vedeckej kvalifikácie:

- Prírodovedecká fakulta, Univerzita Komenského, Bratislava 1976-1977;
- Fyzikálna fakulta, Moskovská štátna univerzita, 1977-1982
- RNDr. (1982), Univerzita Komenského, Bratislava
- CSc. (1985) Fyzikálna fakulta, Moskovská štátna univerzita a SÚJV, Dubna (Rusko)
- DrSc. (1991) – Slovenská akadémia vied, Bratislava
- habilitácia (1993) – Univerzita Komenského, Bratislava
- inaugurácia (1994) – Univerzita Komenského, Bratislava

Priebeh zamestnania:

- Fyzikálny ústav SAV Bratislava, (od 1985 - trvá)
- Optics Section, The Blackett Laboratory, Imperial College, Londýn, UK (post-doktorálny pobyt, 1990-1991)
- Katedra optiky, FMFI, Univerzita Komenského, Bratislava, (1992-1999)

- Optics Section, The Blackett Laboratory, Imperial College, Londýn, UK (host'ujúci profesor, 1996-1997)
- Fakulta informatiky, Masarykova universita, Brno, Česká republika (1999-trvá)
- Department of Mathematical Physics, National University of Ireland, Maynooth (host'ujúci profesor, 2002-2003)
- Department of Mathematical Physics, National University of Ireland, Maynooth (honorary adjunct professor, 2003-2009)

Volené členstvá vo vedeckých spoločnostiach a akadémiach:

- člen Slovenskej akademickej spoločnosti (zvolený v roku 2000)
- člen Učenej spoločnosti SAV (zvolený v roku 2003, predseda spoločnosti od 2009)
- Fellow of the Institute of Physics (Veľká Británia) (zvolený v roku 2004)
- Člen korešpondent Rakúskej akadémie vied (zvolený v roku 2006)
- Fellow of the Optical Society of America (zvolený v roku 2008)

Členstvá vo vedeckých spoločnostiach:

- člen Slovenskej fyzikálnej spoločnosti, (od 1985)
- člen the American Physical Society (USA), (od 1993);

Dlhodobejšie študijné a vedecké pobyty v zahraničí:

1984-1992 – International Center for Theoretical Physics (ICTP), Trieste, Italy
 1986-1990 – Joint Institute for Nuclear Research (JINR), Dubna, Russia
 1989-2001 – Optics Section, The Blackett Laboratory, Imperial College, London, UK
 1992 – The Weizmann Institute, Rehovot, Israel
 1993-1995 – Sogang University, Seoul, Korea
 1993-2007 – Hunter College, New York, USA
 1994-1996 – Technical University, Wien, Austria
 1996/98 – Department of Physics, University of Ulm, Germany
 1997 – Institute for Theoretical Physics, University of Innsbruck
 1999 – The Isaac Newton Institute, University of Cambridge, England
 2000 – SOKEN, The Advanced Institute for Postgraduate Studies, Hayama, Japan
 2000 – Department of Physics, University of Queensland, Australia
 2004 – Facultad de Fisica, Pontificia Universidad Catolica de Chile, Chile
 2004 – INAOE, Tanantsintla, Mexico
 2005 – University of Ulm, Germany
 2007 – Macquarie University, Sydney, Australia
 2008 – National University of Singapore

Všeobecné aktivity:

- vedúci oddelenia teoretickej fyziky, Fyzikálny ústav SAV, Bratislava (1988-1990)
- vedecký sekretár Centra elektro-fyzikálneho výskumu SAV, Bratislava (1988)
- člen vedeckej rady Laboratória teoretickej fyziky SÚJV, Dubna, Rusko (1988-1990)
- člen vedeckej rady Fyzikálneho ústavu SAV (1989/90, 1996, 1998-2000, 2007-2008)
- člen Kolégia SAV pre Matematiku, fyziku a informatiku (od 2000)
- člen Komisie pre fyziku grantovej agentúry VEGA (1995–1999)
- člen Akreditačnej komisie, poradného orgánu vlády SR (1999-2002)
- expert pre INTAS Európskej komisie (od 1999)
- člen IST výboru Európskej komisie (2003-2006)
- člen výboru Quantum Electronics and Optics Division, Európskej fyzikálnej spoločnosti (od 2002).
- expert pre 6. RP Európskej komisie (2003-2006)

- člen vedeckej rady ARC Seibersdorf research GmbH (Rakúsko, od roku 2004)
- člen národného výboru International Union for Pure and Applied Physics (od roku 2005)
- člen the EPSRC (Engineering and Physical Sciences Research Council) Peer Review College (od roku 2006)
- expert pre 7. RP Európskej komisie (od roku 2007)
- člen predsedníctva Agentúry na podporu výskumu a vývoja (2005-2007)
- člen the Information Society Technologies Advisory Group (ISTAG) Európskej komisie (2007 - 2009)
- organizátor, resp. člen organizačných a programových výborov cca 40 medzinárodných konferencií

Ocenenia a vyznamenania:

- Cena Ministra školstva (1982)
- Cena SAV pre mladých vedeckých pracovníkov (1987)
- Cena Slovenského literárneho fondu (1989)
- Cena SAV (1993)
- Cena ICO (International Commission for Optics) a Medaila Ernsta Abbeho (1996)
- Ocenenie "vedec roka 1997"
- Cena Literárneho fondu SR za vedecký ohlas v rokoch 1998-2000 (najcitovanejší vedec)
- Ocenenie "vedec roka 2001"
- E.T.S. Walton Award of the Science Foundation of Ireland, Írsko (2002)
- Cena Ministra školstva SR (2003)
- Cena Literárneho fondu SR za vedecký ohlas v rokoch 2001-2003 (najcitovanejší vedec)
- The Humboldt Research Award, Nemecko (2004)
- Werner von Siemens Excellence Award (2005)
- Cena Literárneho fondu SR za vedecký ohlas v rokoch 2004-2006 (najcitovanejší vedec)
- Finalista Descartovej ceny – ako člen výskumného konzorcia QGATES
- Rád Ľudovíta Štúra 1. triedy (2007)
- Cena Literárneho fondu SR za vedecký ohlas v rokoch 2008 (najcitovanejšia práca)
- Hlava roku 2008
- Cena Literárneho fondu SR za vedecký ohlas v rokoch 2007-2009 (najcitovanejší vedec)

Vedecké publikácie a vystúpenia na konferenciách:

Počas mojej vedeckej kariéry som opublikoval **216** prác v medzinárodných vedeckých časopisoch, napísal som a opublikoval 14 kapitol v knihách. Tieto práce boli citované viac ako **6500** krát (H-index = 40). Bol som editorom viacerých špeciálnych čísiel rôznych časopisov. Napríklad, bol som hosťujúcim editorom štyroch špeciálnych čísiel časopisu Acta Physica Slovaca venovaných kvantovej optike a kvantovej informácii. Spolu s Davidom di Vincenzom (z IBM) sme boli editormi špeciálneho čísla Journal of Modern Optics s názvom Physics of Quantum Information (February/March 2000). S Philippeom Grangierom a Paolom Tombesi sme boli editormi špeciálneho čísla European Physics Journal D (February 2005) venovanom kvantovému spracovaniu informácie lapaenými iónmi. V roku 2007 spolu s Jonom Marangosom a Barrym Sandersom sme boli editormi špeciálneho čísla Journal of Modern Optics venovanom Sir Prof. Peter Knight, FRS. V spolupráci s Nini Messinom a Annou Napoli sme pripravili špeciálne číslo European Physics Journal – Special Series (July 2008) venované kvantovej optike. Výsledky svoje práce som prezentoval v pozvaných a plenárnych prednáškach na mnohých medzinárodných konferenciách a kongresoch. V ostatných troch rokoch som mal cca 20 takýchto pozvaných prednášok.

Recenzent pre medzinárodné vedecké časopisy:

- Physical Review Letters
- Physical Review A
- Physics Letters A
- Journal of Modern Optics
- Quantum and Semiclassical Optics
- Europhysics Letters
- Journal of Physics A
- Journal of Optical Society of America B
- Optics Express
- Physica Scripta
- Optics Communications
- The European Journal of Physics D
- Optics Letters
- Annales Henri Poincare
- Nature
- Journal of Physics B

Editor a člen redakčných rád::

- Acta Physica Slovaca (editor)
- Journal of Modern Optics, published by Taylor & Francis Ltd. (London)
- Journal of Egyptian Mathematical Society
- Journal of Optics B: Quantum and Semiclassical Optics
- Central European Journal of Physics (editor)
- Acta Physica Hungarica: Quantum Electronics (honorary editor)
- Physical Review A
- European Journal of Physics D (editor)
- Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics

Vedecké projekty a granty:

V priebehu rokov som bol hlavným riešiteľom 5 vedeckých projektov grantovej agentúry VEGA.

Tri ostatné projekty boli:

- Reconstruction of states of quantum systems (1996-1998)
- Optimal manipulations with quantum information (1999-2001)
- Programmable quantum processors (2002-2005)

Spolu s profesorom Markom Hillerym (Hunter College, City University New York) sme boli riešiteľmi dvoch grantových projektov National Science Foundation (U.S.A.):

- Higher-order squeezing and interferometry (1993-1996)
- Processing and Transmission of Quantum Information (1999-2002)

Spolu s profesorom Petrom Knightom (Imperial College, Londýn) som bol riešiteľom projektu Royal Society:

- Quantum copying and state measurement (1997-1999)

A ďalšie dva projekty sme mali z agentúr the UK Science and Engineering Research Council (1990-1991) a the Engineering and Physics Sciences Research Council.

V 5. Rámcovom programe moja skupina vo Fyzikálnom ústave SAV participovala v 5 EU výskumných projektoch (EQUIP, QUBITS, QUEST, QGATES and QUPRODIS):

- Entanglement in Quantum Information Processing and Communication (EQUIP)
- Quantum based information processing and transfer with single atoms and photons (QUBITS)
- Quantum entangled states and trapped particles (QUEST)
- Quantum properties of distributed systems (QUPRODIS)
- Quantum gates and elementary scalable processors using deterministically addressed atoms (QGATES)
- Moja skupina bola členom siete excelentnosti QUIPROCONE.

V 6. Rámcovom programe moja skupina vo Fyzikálnom ústave SAV participovala v 4 EU výskumných projektoch (CONQUEST, ERA-Pilot QIST, QAP, QUROPE) a projekte INTAS (QIT):

- Bol som koordinátorom RTN Marie Curie projektu CONQUEST (2.3 mil EUR)
- Bol som koordinátorom INTAS projektu Quantum information technologies
- Bol som členom riadiaceho výboru projektu ERA-Pilot QIST
- Spolu s profesorom Jason Twamley (v tom čase National University of Ireland, Maynooth) som v úlohe vedeckého koordinátora pripravil integrovaný projekt QAP (Quantum applications). Po mnou vedených negociáciách získal projekt, v ktorom je 40 partnerských organizácií (včítane firiem Toshiba a HP), viac ako 10 mil EUR. V súčasnosti spolu s profesormi Ian Walmsley (Oxford University) a Martin Plenio (Imperial College) tento projekt koordinujeme.

V 7. Rámcovom programe moja skupina vo Fyzikálnom ústave SAV participuje v troch EU projektoch (HIP, Q-ESSENCE a QUIE2T):

- Hybrid Information Processors (HIP)
- Quantum Interfaces, Sensors and Communications using Entanglement (Q-ESSENCE)
- Quantum Information Entanglement-Enabled Technologies (QUIE2T) – koordinátor

Vedecký školiteľ:

Bol som školiteľom ašpirantov a doktorandov: Dr. Le Hong Lan (1989), Prof. Ing. Igor Jex, DrSc. (1990), Dr. Gabriel Drobny (1997), Dr. Martin Konôpka (1998), Dr. Branislav Hladký (1999), Dr. Radoslav Derka (2000), Dr. Marek Šašura (2003), Dr. Mário Ziman (2003), Dr. Peter Štelmachovič (2003), Dr. Martin Plesch (2004), Dr. Jan Bouda (2005), Dr. Jozef Košík (2007) Dr. Michal Sedlák (2009), Dr. Daniel Reitzner (2010) a Dr. Marián Roško (2010) V súčasnosti školím doktorandov Peter Rapčan a Tomáš Rybar. Pôsobil som ako školiteľ špecialista PhD študentov Dr. Min Gyu Kim (spolu s Prof. M.S.Kim, 1998), Dr. Martti Havukainen (spolu s Prof. Stig Stenholm, 2000), Dr. Christoph Simon (spolu s Prof. Anton Zeilinger, 2000) a Dr. Adam Brazier (spolu s Prof. P.L.Knight, 2005). Počas mojich pobytov v Imperial College som spolupracoval pri výchove troch PhD študentov - Dr. Wai Lai (1992), Dr. Antonio Vidiella-Barranco (1992) a Dr. Hector Moya-Cessa (1993).

Vedecké záujmy:

Moje výskumné aktivity a záujmy sa dajú rozdeliť do piatich navzájom súvisiacich skupín:

- Kvantové spracovanie informácie – univerzálne optimálne manipulácie s kvantovou informáciou (napr., univerzálne kvantové zariadenia ako sú kvantové klonery resp. univerzálne NOT hradlá)
- Rekonštrukcia kvantových stavov a procesov – rekonštrukcia stavov kvantových systémov z neúplných experimentálnych dát (s využitím metód maximálnej entropie a Bayseovej metódy kvantovej inferencie), rekonštrukcia Liouvillianov a CP superoperátorov.
- Dynamika otvorených kvantových systémov – stochastické kvantovanie, kvantová dekoherencia, neklasické efekty v kvantovej optike, popis dynamiky otvorených kvantových systémov metódami kvantovej teórie informácie.
- Kvantové previazanie v mnohočasticových systémoch – popis kvantových korelácií a ich vlastnosti v mnohočasticových systémoch, generovanie kvantového previazania.
- Kvantové protokoly pre bezpečnú komunikáciu – využitie kvantových mnohočasticových korelácií pre bezpečnú komunikáciu (kvantové zdieľanie tajomstva, kvantový hlasovací protokol).

Prehľad niektorých z najdôležitejších vedeckých výsledkov

Počas mojej vedeckej kariéry som sa venoval viacerým problémom kvantovej teórie poľa, kvantovej optiky a kvantovej teórie informácie. Svoj vedecký výskum som začal analýzou stochastického kvantovania v zakrivených hybnostných priestoroch (pod vedením mojho školiteľa prof. Vladimíra Georgieviča Kadyševského). Paralelne s týmto som sa počas vedeckej aspirantúry pod vedením profesora Vladimíra Ivanoviča Grigorijeva venoval problémom kvantového (mikroskopického) popisu šírenia svetla v dielektrikách. Na popis som použil model kryštalickej mriežky v uzloch ktorej sú lokalizované dvoj-hladinové atómy interagujúce s kvantovým elektromagnetickým poľom. Pri vytváraní modelu som vychádzal z Leeovho modelu. Tento výskum, výsledky ktorého tvorili základ mojej dizertačnej práce, neskôr prirodzeným spôsobom vyústil do môjho záujmu o kvantovú optiku, v ktorej sa využívajú veľmi podobné modely na popis interakcie svetla s atómami umiestnenými v rezonátoroch (tzv. Jaynes-Cummingsov model). Prvé kvantovo-optické problémy som začal riešiť v roku 1988. V tomto čase sa problematike kvantovej optiky na Slovensku nikto nevenoval. Šťastnou súhrou okolností som mal možnosť od roku 1989 spolupracovať so Sir Prof. Peter Knight, FRS v Imperial College v Londýne (najprv ako postdoc a neskôr ako hosťujúci profesor v jeho skupine). Táto spolupráca trvá už dvadsať rokov. Iba o niečo kratšie spolupracujem s profesorom Markom Hillerym z Hunter College of the City University of New York. Výsledkom oboch týchto spoluprác ako aj mojich ďalších výskumných aktivít boli práce, ktoré dosiahli medzinárodný ohlas. Konkrétne:

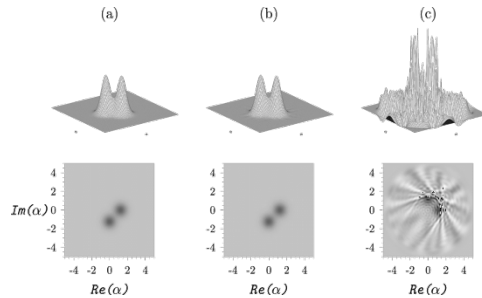
Kvantová optika:

- Môj počiatočný záujem o kvantovú optiku bol motivovaný predovšetkým možnosťou využiť algebraický formalizmus na popis kvantových stavov svetla a ich interakciu s atomárnymi systémami. Zaviedol som mnohé neklasické stavy svetla so špecifickým kvantovými vlastnosťami (patriace do triedy tzv. „squeezeovaných“ stavov s redukovanými kvantovými fluktuáciami) – vid'. V.Bužek: "SU(1,1) squeezing of SU(1,1) generalized coherent states." *J. Mod. Opt.* **37**, 303 (1990) [citované 85 krát]; F.A.M. de Oliveira, M.S.Kim, P.L.Knight, & V.Bužek: "Properties of displaced number states." *Phys. Rev. A* **41**, 2645 (1990) [citované 150 krát]; V.Bužek & Tran Quang: "Generalized coherent state for bosonic realization of SU(2) Lie algebra." *J. Opt. Soc. Am. B* **6**, 2447 (1989) [citované 65 krát], V.Bužek, I.Jex & Tran Quang: "k-Photon coherent states." *J. Mod. Opt.*, **37**, 159 (1990) [citované 40 krát]; A.D.Wilson-Gordon, V.Bužek, & P.L.Knight: "Statistical and phase properties of displaced Kerr states." *Phys. Rev. A* **44**, 7647 (1991) [citované 40 krát]; V.Bužek, A.D.Wilson-Gordon, P.L.Knight, & W.K.Lai: "Coherent states in a finite-dimensional basis: Their phase properties and relation to coherent states of light." *Phys. Rev. A* **45**, 8079 (1992) [citované 70 krát], alebo V.Bužek: "Dynamics of a q-analogue of the quantum harmonic oscillator." *J. Mod. Opt.* **38**, 801 (1991) [citované 40 krát].
- Po týchto počiatočných výskumoch som sa snažil pochopiť pôvod neklasických vlastností kvantových stavov svetla. Vysvetlenie som našiel v kvantovej interferencii medzi koherentnými stavmi vo fázových priestoroch. Spolu s kolegami sme dokázali, že vznik neklasických vlastností svetla (napr. redukcia kvantových fluktuácií) má svoj pôvod v kvantovej interferencii medzi koherentnými komponentmi, superpozície ktorých tvoria kvantové stavy svetla. Inými slovami neklasické vlastnosti svetla sa dajú interpretovať ako dôsledok kvantovej interferencie medzi koherentnými stavmi svetla, ktoré sú reprezentovateľné ako „body“ kvantového fázového priestoru. S pomocou formalizmu Wignerových funkcií sme dokázali, prečo sú kvantové efekty silne potláčané vplyvom termálnych rezervoárov. Výsledky sme publikovali v viacerých prácach. Napríklad, v práci V.Bužek, A.Vidiella-Barranco, & P.L.Knight: „Superpositions of coherent states. Squeezing and dissipation.“ *Phys. Rev. A* **45**, 6570 (1992) [citované 270 krát] sme dôsledne analyzovali kvantovú štatistiku tzv. Schrodingerových mačiek, t.j. superpozície dvoch mezoskopických koherentných stavov svetla. Výsledky našej teoretickej analýzy boli neskôr mnohokrát potvrdené v experimentoch [napríklad, vid'. nedávnu prácu S.Haroche et al.: „Reconstruction of non-classical cavity field states with snapshots of their decoherence“ *Nature* **455**, 510 (2008), resp. S.Haroche et al.: „Schrodinger cat states and decoherence studies in cavity QED“ *Eur. J. Phys. D* **159**, 19 (2008)

- a referencie tam uvedené]. Medzi naše ďalšie práce venované kvantovej interferencii vo fázových priestoroch patria V.Bužek & P.L.Knight: "Quantum interference, superposition states of light and nonclassical effects." *Progress in Optics XXXIV* (North-Holland, Amsterdam, 1995, pp.1-159) [citované 230 krát]; V.Bužek & P.L.Knight: "The origin of squeezing in a superposition of coherent states." *Opt. Commun.* **81**, 331 (1991) [citované 80 krát]; W.K.Lai, V.Bužek & P.L.Knight: "Nonclassical fields in a linear directional coupler." *Phys. Rev. A* **43**, 6323 (1991) [citované 40 krát] a M.S.Kim & V.Bužek: "Schrodinger cat states at finite temperature: Influence of a finite-temperature heatbath on quantum interferences." *Phys. Rev. A* **46**, 4239 (1992) [citované 65 krát]. Za tieto výsledky mi v roku 1996 bola udelená the International Commission for Optics (ICO) Prize a the Ernst Abbel Medal. Sumár niektorých z týchto výsledkov sa nachádza v kapitole P.L.Knight & V.Bužek: "Squeezed states: Basic principles." v knihe *Quantum Squeezing* (Springer-Verlag, Berlin, 2004, pp. 3—32).
- V kontexte mojich výskumov neklasických efektov v kvantovej optike som sa začal zaoberať aj interakciou svetla s atómami (iónmi) interagujúcimi so svetelnými poľami v kvantových rezonátoroch. Výsledky tohto výskumu boli publikované vo viacerých prácach, napr. V.Bužek: "Jaynes-Cummings model with intensity-dependent coupling interacting with Holstein-Primakoff SU(1,1) coherent state." *Phys. Rev. A* **39**, 3196 (1989) [citované 80 krát]; V.Bužek: "Light squeezing in the Jaynes-Cummings mode with intensity-dependent coupling." *J. Mod. Opt.* **36**, 1151 (1989) [citované 30 krát]; V.Bužek & I.Jex: "Dynamics of a two-level atom in a Kerr-like medium" *Opt. Commun.* **78**, 425 (1990) [citované 90 krát] a V.Bužek, H.Moya-Cessa, P.L.Knight, & S.J.D.Phoenix: "Schrodinger cat states in the resonant Jaynes-Cummings model: Collapse and revival of oscillations of the photon number distribution." *Phys. Rev. A* **45**, 8190 (1992) [citované 205 krát]. Práve táto posledná práca poslúžila ako teoretický základ pre unikátne experimenty [viď. S.Haroche et al.: „Observing progressive decoherence of the meter in a quantum measurement.“ *Phys. Rev. Lett.* **77**, 4887 (1996) a S.Haroche et al.: „Reversible decoherence of a mesoscopic superposition of field states.“ *Phys. Rev. Lett.* **79**, 1964 (1997), viac v knihe S.Haroche & J.-M.Raimond: *Exploring the Quantum* (Oxford Univ. Press, Oxford, 2006)]. Ďalšie naše výsledky boli publikované v V.Bužek, P.L.Knight, & I.K.Kudryavtsev: "Three-level atoms in phase-sensitive broad-band correlated reservoirs." *Phys. Rev. A* **44**, 1931 (1991) [citované 60 krát]; W.K.Lai, V.Bužek, & P.L.Knight: "Dynamics of a three-level atom in a two-mode squeezed vacuum." *Phys. Rev. A* **44**, 6043 (1991) [citované 25 krát]; Tran Quang, P.L.Knight, & V.Bužek: "Quantum collapses and revivals in an optical cavity." *Phys. Rev. A* **44**, 6092 (1991) [citované 45 krát]; V.Bužek & B.Hladký: "Macroscopic superposition states of light via two-photon resonant interaction of atoms with cavity field." *J. Mod. Opt.* **40**, 1309 (1993) [citované 40 krát]. Detailne sme tiež po prvý krát analyzovali interakciu dvojhladinového atómu ochladeného do základného vibračného stavu s jedným módom elektromagnetického poľa v rezonátore V.Bužek, G.Drobny, M.S.Kim, G.Adam, and P.L.Knight: "Cavity QED with cold trapped ions." *Phys. Rev. A* **56**, 2352 (1997) [citované 65 krát]. Ďalej sme analyzovali generovanie kvantového previazania medzi lapenými iónmi M.Šašura & V.Bužek: "Multiparticle entanglement with quantum logic networks: Application to cold trapped ions." *Phys. Rev. A* **64**, 012305 (2001) [citované 20 krát] a M.Šašura & V.Bužek: "A tutorial review: Cold trapped ions as quantum information processors." *J. Mod. Opt.* **49**, 1593 (2002) [citované 30 krát].

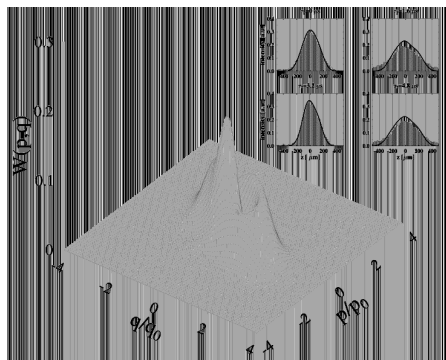
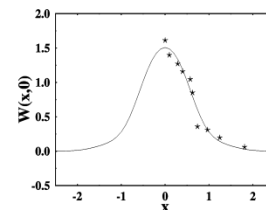
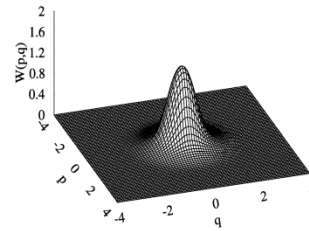
Kvantová teória merania:

- Paralelne s prácou venovanou vysvetleniu vzniku neklasických vlastností svetla som sa venoval aj problémom merania a detekcie týchto neklasických vlastností. Berúc do úvahy, že väčšina meraní neposkytuje úplnú informáciu o meranom systéme, začal som sa systematicky venovať problémom rekonštrukcie a odhadu stavov kvantových systémov z neúplných experimentálnych dát. Výsledkom tohto výskumu bolo, že som ukázal ako efektívne použiť Jaynesov princíp maximálnej entropie (MaxEnt princíp) na rekonštrukciu Wignerových funkcií kvantových stavov svetla v situáciách keď je k dispozícii iba časť informácie o týchto stavoch.



Obr. 1. Rekonštrukcia Wignerových funkcií pomocou MaxEnt princípu: na obrázku (a) je Wignerová funkcia zmesi dvoch koherentných stavov, ktorý je rekonštruovaný z veľmi malého počtu tomografických dát (spolu iba 75 „bodov“ – pre každú z 5 rotovaných kvadrátúr je nameraných iba 15 hodnôt). Na obr. (b) je výsledok rekonštrukcie pomocou MaxEnt a na obr. (c) je rekonštrukcia pomocou pattern functions. Rozdiel v kvalite je päť rádov. V.Bužek, G. Drobný, & H.Wiedemann: “Quantum tomography of Wigner functions from incomplete data,” ICO (Series in Optical Sciences vol.7, Springer-Verlag, Berlin,1999), p.54 – 74

Detaily v G.Drobný & V.Bužek: “Reconstruction of motional states of neutral atoms via MaxEnt principle.” *Phys. Rev. A* **65**, 053410 (2002) a V.Bužek: “Quantum tomography from incomplete data via MaxEnt principle.” in *Quantum Estimations: Theory and Experiment* (Springer-Verlag, Berlin, 2004, pp. 189 – 234).



Obr. 2. Rekonštrukcia Wignerovej funkcie vibračných stavov neutrálnych atómov v optických pasciach.

Obr. 3. Rekonštrukcia Wignerových funkcií rezonátorového elektromagnetického poľa z experimentu v experimente S.Haroche et al. Rekonštrukcia je prevedená z iba 10 nameraných hodnôt WF vo fázovom priestore. V.Bužek: “Quantum tomography from incomplete data via MaxEnt principle.” in *Quantum Estimations: Theory and Experiment* (Springer-Verlag, Berlin, 2004, pp. 189 – 234).

- Nami navrhnutú metódu sme použili pri analýze dát z dvoch experimentov v École Normale Supérieure v Paríži. Jeden z experimentov robila skupina pod vedením Prof. Serge Haroche – tu sa rekonštruoval kvantový stav svetla v optickom rezonátore - pozri V.Bužek: “Quantum tomography from incomplete data via MaxEnt principle.” in *Quantum Estimations: Theory and Experiment* (Springer-Verlag, Berlin, 2004, pp. 189 – 234). V druhom experimente pod vedením Prof. Christophe Salomon sa merali vibračné stavy neutrálnych atómov v optických pascách. Výsledky našej rekonštrukcie týchto stavov sú publikované v práci G.Drobný & V.Bužek: “Reconstruction of motional states of neutral atoms via MaxEnt principle.” *Phys. Rev. A* **65**, 053410 (2002)]. Naša rekonštrukčná schéma je nesmierne efektívna, v niektorých prípadoch je až o päť rádov lepšia ako štandardné (napr. „pattern-function“) rekonštrukčné metódy. Hlavné výsledky boli publikované v V.Bužek, G.Adam, & G.Drobný: “Reconstruction of Wigner functions on different observation levels.” *Ann. Phys. (N.Y.)* **245**, 37 (1996) [citované 50 krát] a V.Bužek, G.Adam, & G.Drobný: “Quantum state reconstruction and detection of quantum coherences on different observation levels.” *Phys. Rev. A* **54**, 804 (1996) [citované 35 krát]. V práci nad problémom kvantových meraní a rekonštrukciou kvantových stavov pokračujem de facto až dodnes. Jedným z problémov, ktorý som v tomto kontexte riešil bola úloha o meraní Husimiho (Q-) funkcie v tzv. zovšeobecnených meraniach kedy sa súčasne merajú dve kanonicky konjugované premenné – vid'. V.Bužek, C.Keitel, & P.L.Knight: “Sampling entropies and operational phase-space measurement I: General

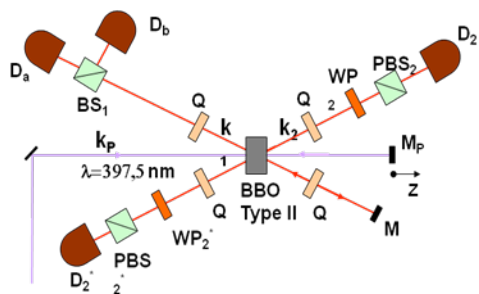
- formalism.” *Phys. Rev. A* 51, 2575 (1995) [citované 80 times] a V.Bužek, C.Keitel, & P.L.Knight: “Sampling entropies and operational phase-space measurement II: Decay of quantum coherences.” *Phys. Rev. A* 51, 2594 (1995) [citované 35 krát].
- Prirodzeným pokračovaním práce nad MaxEnt princípom bola snaha o rekonštrukciu stavov kvantových systémov založených na meraniach konečných súborov rovnako pripravených stavov. Tu sme rozpracovali kvantovú verziu Bayesovej inferencie, na ktorej sme založili nový rekonštrukčný algoritmus a rozpracovali sme metódu pre určovanie optimálnych meraní. Hlavné výsledky boli publikované v práci R.Derka, V.Bužek, & A.Ekert: “Universal algorithm for optimal state estimation from finite ensembles.” *Phys. Rev. Lett.* 80, 1571 (1998) [citované 160 krát]. Ďalej sme analyzovali ako sa dá klasická informácia čo najefektívnejšie kódovať do stavov kvantových systémov a navrhli sme koncept optimálnych kvantových hodín - V.Bužek, R.Derka, & S.Massar: “Optimal quantum clocks.” *Phys. Rev. Lett.* 82, 2207 (1999) [citované 20 krát]. Hlavné výsledky sú zhrnuté v dvoch kapitolách v knihách: V.Bužek & R.Derka: “Quantum observations” in *Coherence and Statistics of Photons and Atoms* (John Wiley & Sons, New York, 2001, pp. 198–261) a V.Bužek: “Quantum tomography from incomplete data via MaxEnt principle.” in *Quantum Estimations: Theory and Experiment* (Springer-Verlag, Berlin, 2004, pp. 189 – 234).
 - Práca nad návrhom efektívnych metód rekonštrukcie kvantových stavov nadobudla nový rozmer, keď sme začali analyzovať možnosti rekonštrukcie kvantových procesov z korelačných meraní na vstupe a výstupe kvantových zariadení. Ukázal som ako sa dajú efektívne rekonštruovať Liouvillove superoperátory popisujúce kvantovú dynamiku – V.Bužek: “Reconstruction of Liouvillian superoperators.” *Phys. Rev. A* 58, 1723 (1998) [citované 15 krát] a neskôr v práci M.Ziman, M.Plesch, V.Bužek, & P.Štelmachovič: “Process reconstruction: From unphysical to physical maps via maximum likelihood.” *Phys. Rev. A* 72, 022106 (2005) sme ukázali ako sa v prípade neúplných dát môže aplikovať princíp maximálnej pravdepodobnosti. Prehľad tejto metódy je zhrnutý v kapitole V.Bužek, M.Ziman, & M.Plesch: “Optimal approximation of non-physical maps via Maximum Likelihood” in *Advances in Information Optics and Photonics* (SPIE Press, 2008, pp. 513-532).

Univerzálne kvantové zariadenia – kvantový kloner a iné:

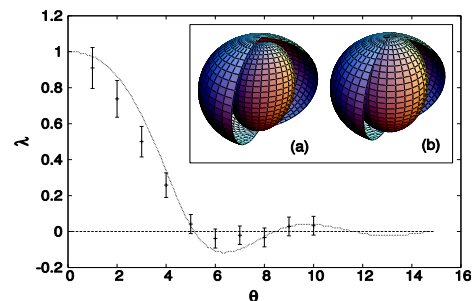
- Môj záujem o optimálne merania kvantových systémov ma priviedol k výskumu možnosti klonovania (kopírovania) kvantovej informácie. Je to viac ako dvadsať rokov, čo William Wootters and Wojciech Zurek dokázali, že informácia, ktorá je zakódovaná v jednej kópii kvantového systému sa nedá presne kopírovať (klonovať). Toto tvrdenie je obsahom tzv. Wootters-Zurekovej teóremy. Príčinou nemožnosti presne klonovať kvantovú informáciu je linearita kvantovej mechaniky. Ak by takéto presné klonovanie bolo možné potom by kvantová mechanika umožňovala superluminálnu komunikáciu (t.j. komunikáciu s rýchlosťami väčšími ako je rýchlosť svetla vo vákuu). Napriek tomu, že Wootters-Zurekovej teóremy o nemožnosti klonovania kvantovej informácie bola všeobecne známa, nikto si nepoložil triviálne otázky: Ak sa kvantová informácia nedá klonovať presne, dá sa klonovať aspoň približne? A ako úspešne? A dá sa každá informácia klonovať s rovnakou presnosťou? Akú úlohu zohráva naša apriórna vedomosť o kvantovom stave pri klonovaní? Spolu s Markom Hillerym sme si položili tieto otázky a výsledkom bola séria prác o optimálnom klonovaní kvantovej informácie, resp. optimálnych kvantových kloneroch: V.Bužek & M.Hillery: “Quantum copying: Beyond the no-cloning theorem.” *Phys. Rev. A* 54, 1844 (1996) [citované 510 krát]; V.Bužek, S.Braunstein, M.Hillery, & D.Bruss: “Quantum copying: A network” *Phys. Rev. A* 56, 3446 (1997) [citované 130 krát], V.Bužek & M.Hillery: “Universal optimal cloning of qubits and quantum registers.” *Phys. Rev. Lett.* 58, 5003 (1998) [citované 110 krát]; M.Hillery & V.Bužek: “Quantum copying: Fundamental inequalities.” *Phys. Rev. A* 56, 1212 (1997) [citované 60 krát]; V.Bužek, V.Vedral, M.Plenio, P.L.Knight, & M.Hillery: “Broadcasting of entanglement via local copying.” *Phys. Rev. A* 55, 3327 (1997) [citované 70 krát]. Tieto práce iniciovali ďalší výskum možností optimálneho klonovania stavov rôznych fyzikálnych systémov – veľmi dôsledný prehľad výskumných aktivít a dosiahnutých výsledkov sa nachádza v práci V.Scarani *et al.*: “Quantum cloning.” *Rev. Mod. Phys.* 77,

1225 (2005). Populárny úvod do problematiky kvantového klonovania je v prezentovaný v V.Bužek & M.Hillery: "Quantum cloning." *Physics World* **14**, No. 11, p. 25 (2001) (vid'. tiež webovu stránku časopisu *Physics World* <http://physicsweb.org/articles/world/14/11/9>). Práca venovaná problémom kvantového klonovania bola v roku 2000 zaradená Ústavom vedeckých informácií (Institute for Scientific Information – vydavateľ *Current Content* a prevádzkovateľ databáz *web of knowledge* a *web of science*) medzi desať „najhorúcejších“ problémov vo fyzike (vid'. *Science Watch* **11**, No. 4 July/August 2000 resp. http://www.sciencewatch.com/july-aug2000/sw_july-aug2000_page1.htm). Prvá experimentálna realizácia toho čo je dnes známe ako Bužek-Hilleryho kvantový kloner skupinou Prof. D.Bowmestera bola v roku 2002 zaradená britským Institute of Physics medzi *highlights of physics* (vid'. <http://physicsworld.com/cws/article/news/16606#10>). Za prácu o kvantových kloneroch mi bola udelená the E.T.S.Walton Prize of the Science Foundation of Ireland a the Alexander von Humboldt Prize v Nemecku (v oboch prípadoch som bol prvým slovenským recipientom takýchto prestížnych cien).

- Výskum kvantových klonerov nás neskôr priviedol ku konceptu univerzálnych optimálnych kvantových strojov, t.j. zariadení pomocou ktorých sa aspoň približne dajú implementovať operácie, ktoré v ich presnej forme kvantová mechanika zakazuje. Typickým príkladom je naša práca o optimálnom univerzálnom NOT hradle, ktoré optimálne „preklápa“ kvantové bity (qubity). Presné (perfektné) univerzálne kvantové NOT hradlo neexistuje (dôsledok Wignerovej teóremy). Spolu s Markom Hillerym sme si opäť položili otázku – Ako vyzerá približne optimálne univerzálne kvantové NOT hradlo? Výsledkom našej práce bol návrh približného optimálneho kovariantného (univerzálného) NOT hradla – vid'. V.Bužek, M.Hillery, & R.Werner: "Optimal manipulations with qubits: Universal NOT gate." *Phys. Rev. A* **60**, R2626 (1999) [citované 140 krát] a P.Rungta, V.Bužek, C.M.Caves, M.Hillery, & G.J.Milburn: "Universal state inversion and concurrence in arbitrary dimensions." *Phys. Rev. A* **64**, 042315 (2001) [citované 170 krát].



Obr. 4. Experimentálna schéma realizácie univerzálného U-NOT hradla. Kvantové bity sú kódované v polarizačných stavoch fotónov. Detaily experimentu sú v F.DeMartini, V.Bužek, F.Sciarrino, & C.Sias: "Experimental realization of the quantum universal NOT gate." *Nature* **419** No. 6909, 815 (2002).



Obr. 5. Výsledok aproximácie nefyzikálneho zobrazenia – nelineárnej rotácie polarizácie pomocou metódy maximálnej pravde-podobnosti. M.Ziman, M.Plesch, V.Bužek, & P.Štelmachovič: "Process reconstruction: From unphysical to physical maps via maximum likelihood." *Phys. Rev. A* **72**, 022106 (2005) a V.Bužek, M.Ziman, & M.Plesch: "Optimal approximation of non-physical maps via Maximum Likelihood" in *Advances in Information Optics and Photonics* (SPIE Press, 2008, pp. 513-532).

- V spolupráci so skupinou Prof. Francesca DeMartini takéto hradlo bolo experimentálne implementované - F.DeMartini, V.Bužek, F.Sciarrino, & C.Sias: "Experimental realization of the quantum universal NOT gate." *Nature* **419** No. 6909, 815 (2002) [citované 75 krát]. Táto práca bola v roku 2002 zaradená britským Institute of Physics do zoznamu *highlights of optics* - <http://physicsweb.org/article/news/6/12/14#10>. V širšom kontexte fundamentálnych štúdií o vlastnostiach kvantových systémoch bola táto práca tiež komentovaná v CERN Courier <http://cerncourier.com/main/article/43/2/11>. Iným príkladom univerzálnych kvantových strojov je tzv. kvantový entangler, ktorý sme

zadefinovali a analyzovali v práci V.Bužek & M.Hillery: “Optimal manipulations with qubits: Universal quantum entanglers” *Phys. Rev. A* **62**, 022303 (2000) [citované 30 krát]. Prehľad o univerzálnych kvantových strojoch možno nájsť v kapitole V.Bužek: “Optimal manipulations with quantum information: Universal quantum machines” *NATO Advanced Study Institute on Quantum Communication and Information Technologies* (Kluwer, Dordrecht, 2003, pp. 47 – 84).

Kvantové korelácie:

- Popri práci nad univerzálnymi kvantovými zariadeniami som sa venoval aj niektorým problémom kvantovej kryptografie – bezpečnému prenosu informácie pomocou kvantového previazania. Konkrétne, spolu s Markom Hillerym sme navrhli prvý a do dnes de facto jediný dôsledne mnoho-užívateľský kvantový kryptografický protokol, tzv. quantum secret sharing (kvanové zdieľanie tajomstva) – vid'. M.Hillery, V.Bužek, & A.Berthiaume: “Quantum secret sharing.” *Phys. Rev. A* **59**, 1829 (1999) [**citované 480 krát**]. Tento protokol bol úspešne implementovaný vo viacerých experimentoch. Nedávno sme navrhli nový mnoho-účastnícky kvantový protokol, ktorý má uplatnenie pri hlasovaní (tzv. *quantum voting*). Úlohu kvantových korelácií v komunikačných protokoloch sme analyzovali v práci M.Ziman & V.Bužek: “Correlation-assisted quantum communication.” *Phys. Rev. A* **67**, 042321 (2003) a bezpečnosť v privátnych kvantových komunikačných kanáloch sme vyšetrovali v práci J.Bouda & V.Bužek: “Security of the private quantum channel” *Journal of Modern Optics* **50**, 1071 (2003). Dôsledky nemožnosti superluminálnej komunikácie prostredníctvom kvantových korelácií sme študovali v práci C.Simon, V.Bužek, & N.Gisin: “The no-signaling condition and quantum dynamics.” *Phys. Rev. Lett.* **87**, 170405 (2001).
- Popri štúdiu využitia kvantových korelácií (tzv. kvantového previazania) pre účely bezpečnej komunikácie, som analyzoval aj možnosti generovania kvantového previazania vo fyzikálnych systémoch. Predovšetkým som sa zaoberal kvantovými koreláciami v mnohočasticových systémoch. Jednou zo špecifických otázok, na ktorú som hľadal odpoveď bola: Aké je ohraničenie na mieru dvojčasticového previazania v mnohočasticových systémoch? Túto otázku sme zodpovedali v práci M.Koashi, V.Bužek, & N.Imoto: “Entangled webs: Tight bound for symmetric sharing of entanglement.” *Phys. Rev. A* **62**, 050302R (2000) [citované 60 krát]. Nové ohraničenia na mnohočasticové kvantové previazanie sme prezentovali v prácach M.Plesch & V.Bužek: “Entangled graphs: Bipartite entanglement in multi-qubit systems.” *Phys. Rev. A* **67**, 012322 (2003) a M.Plesch & V.Bužek: “Entangled graphs II: Classical correlations in multi-qubit entangled systems” *Phys. Rev. A* **68**, 012313 (2003). Analýzu ohraničení na mieru previazania v bipartitných systémoch, ktoré sa rozpadávajú pod vplyvom termálnych rezervoárov sme prezentovali v práci D.McHugh, M.Ziman, & V.Bužek: “Entanglement, purity, and energy: Two qubits versus two modes” *Phys. Rev. A* **74**, 042303 (2006). S pomocou algebraických metód sme reprezentovali triedu ne-Gaussových bimodálnych stavov svetla vo formálne Gaussovom tvare čo nám umožnilo zaviesť po prvý krát nevyhnutné i postačujúce podmienky neseparovateľnosti aj pre ne-Gaussové stavy D.McHugh, M.Ziman, & V.Bužek: “When non-Gaussian states are Gaussian: Generalization of nonseparability criterion for continuous variables” *Phys. Rev. A* **74**, 050306 (2006). Vlastnosti bimodálnych previazaných stavov sme študovali v práci A.Sen, U.Sen, C.Brukner, V.Bužek, & M.Zukowski: “Entanglement swapping of noisy states: A kind of superadditivity in nonclassicality” *Phys. Rev. A* **72**, 042310 (2005).
- Pri štúdiu kvantového previazania bimodálnych stavov svetla sme dokázali zaujímavú vlastnosť: pomocou pasívnych optických elementov (napr. deliča zväzkov) sa dajú transformovať jedno-modové neklasické stavy svetla (v danom prípade stlačené stavy s redukovanými fluktuáciami v jednej z kvadrátúr) na bimodálne previazané stavy: M.S.Kim, W.Son, V.Bužek, & P.L.Knight: “Entanglement by a beam splitter: Nonclassicality as a prerequisite for entanglement.” *Phys. Rev. A* **65**, 032323 (2002) [citované 110 krát]. Pri štúdiu kvantových korelácií v mnohočasticových fyzikálnych systémoch sme našli zaujímavú vlastnosť základného stavu systému dvoj-hladinových atómov interagujúcich s jedným modom elektromagnetického poľa. Dokázali sme, že so zmenou väzbovej konštanty takýto základný stav vykazuje náhle zmeny bipartitného

previazania medzi atómami – tieto zmeny sú veľmi podobné kvantovým fázovým prechodom práve pre tie hodnoty väzbovej konštanty kedy vákuový stav systému vykazuje nestabilitu - vid'. V.Bužek, M.Orszag, & M.Rosko: "Instability and entanglement of the ground state of the Dicke model." *Phys. Rev. Lett.* **94**, 163601 (2005) [citované 15 krát]. Vzťah medzi mierou kvantového previazania a fázovými prechodmi v Isingovom modeli s transversálnym magnetickým poľom sme analyzovali v práci P.Štelmachovič & V.Bužek: "Quantum information approach to the Ising model." *Phys. Rev. A* **70**, 032313 (2004) [citované 30 krát].

Kvantová dekoherencia a dynamika otvorených kvantových systémov:

- Pochopenie dekoherencie je jedným z kľúčových problémov nielen v kvantovej teórii informácie, ale v celej kvantovej teórii. Podľa jedného z pohľadov je hranica medzi kvantovým a klasickým svetom definovaná práve procesmi dekoherencie (vid'. napríklad V.Bužek, A.Vidiella-Barranco, & P.L.Knight: „Superpositions of coherent states. Squeezing and dissipation.“ *Phys. Rev. A* **45**, 6570 (1992) [citované 270 krát] a M.S.Kim & V.Bužek: "Schrodinger cat states at finite temperature: Influence of a finite-temperature heatbath on quantum interferences." *Phys. Rev. A* **46**, 4239 (1992) [citované 65 krát]). V našom výskume sme sa venovali aj popisu dynamiky otvorených kvantových systémov a procesu dekoherencie z pohľadu kvantovej teórie informácie. Konkrétne, použili sme metódy kvantovej teórie informácie na popis „transferu“ informácie z otvoreného kvantového systému do prostredia V.Scarani, M.Ziman, P.Štelmachovič, N.Gisin, & V.Bužek: "Thermalizing quantum machines: Dissipation and entanglement." *Phys. Rev. Lett.* **88**, 097905 (2002) [citované 25 krát]; M.Ziman, P.Štelmachovič, V.Bužek, M.Hillery, V.Scarani, & N.Gisin: "Diluting quantum information: An analysis of information transfer in system-reservoir interactions." *Phys. Rev. A* **65**, 042105 (2002) [citované 20 krát] a M.Ziman, P.Štelmachovič, & V.Bužek: "Description of quantum dynamics of open systems based on collision-like models." *Open Sys. Inf. Dyn.* **12**, 81 (2005). Analyzovali sme tiež vplyv dekoherencie na kvantovú interferenciu veľkých molekúl. Výsledky tohto výskumu, ktorý napomáha určiť hranice medzi klasickým a kvantovým správaním mezoskopických objektov sme publikovali v práci M.Hillery, L.Mlodinow, & V.Bužek: "Quantum interference with molecules: The role of internal states." *Phys. Rev. A* **71**, 062103 (2005). V práci P.Štelmachovič & V.Bužek: "Dynamics of open quantum systems initially entangled with environment: Beyond the Kraus representation." *Phys. Rev. A* **64**, 062106 (2001) [citované 35 krát] sme skúmali vplyv počiatočných kvantových korelácií medzi otvoreným kvantovým systémom a jeho prostredím na dynamiku daného systému. Úplne nový prístup (založený na Milburnovej rovnici) k ponímaniu úlohy kvantovej dekoherencie v dynamike kvantových systémov sme prezentovali v práci H.Moya-Cessa, V.Bužek, M.S.Kim, & P.L.Knight: "Intrinsic decoherence in atom-field interaction." *Phys. Rev. A* **48**, 3900 (1993) [citované 75 krát]. Dokázali sme, že diskretnosť časového vývoja na veľmi malých časových škálach môže mať za dôsledok úplné potlačenie efektov asociovaných s kvantovou interferenciou.

Kvantové algoritmy:

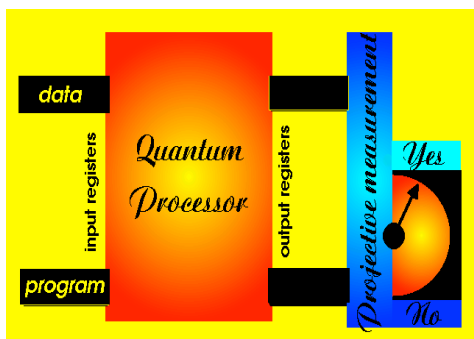
- Ďalšou triedou úloh, ktorým sme sa venovali bola analýza kvantových kráčaní (kvantová verzia klasických náhodných kráčaní). Tento výskum bol robený s nádejou, že sa nám podarí nájsť nové kvantové algoritmy. Konkrétne, zovšeobecnil sme rozptylový model kvantových kráčaní na prípad kvantových kráčaní na hyperkockách J.Košík & V.Bužek: "Scattering model for quantum random walk on hypercube" *Phys. Rev. A* **71**, 012306 (2005). Aj v prípade kvantových kráčaní sme analyzovali úlohu disipácií na prechod medzi kvantovým a klasickým správaním v náhodných kráčaníach J.Košík, V.Bužek, & M.Hillery: "Quantum walks with random phase shifts" *Phys. Rev. A* **74**, 022310 (2006). V ďalšej práci sme dokázali, že kvantová verzia Parrondovej hry sa dá realizovať ako kvantové kráčanie J.Košík, J.Miszczak, & V.Bužek: "Quantum Parrondo's game with random strategies" *J. Mod. Opt.* **54**, 2275 (2007). Tiež sme ukázali ako sa dá efektívne implementovať vyhľadávanie na grafoch pomocou kvantových kráčaní - D.Reitzner, M.Hillery, E.Feldman, & V.Bužek: "Quantum searches on highly symmetric graphs" arXiv:0805.1237. Príkladom aplikácie kvantových algoritmov je aj štúdium grupových automorfizmov – vid'. M.Bonanome, M.Hillery, & V.Bužek: "Application of quantum

algorithms to the study of permutations and group automorphisms" *Phys. Rev. A* **76**, 012324 (2007), alebo odhad vlastných stavov a vlastných hodnôt neznámych kontrolovaných unitárnych operácií vid'. M.Hillery & V.Bužek: "Singlet states and the estimation of eigenstates and eigenvalues of an unknown Controlled-U gate." *Phys. Rev. A* **64**, 042303 (2001).

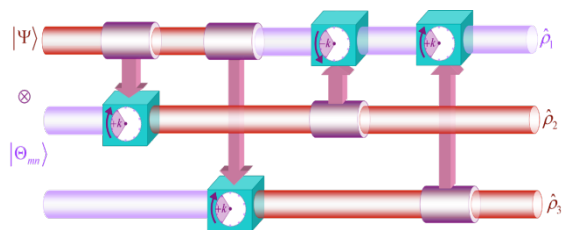
Programovateľné kvantové procesory:

- V celkovom kontexte môjho výskumu (vid'. vyššie) som celkom prirodzeným spôsobom dospel k problému programovateľných kvantových procesorov. Konkrétne, keď sme po prvý krát navrhli kvantovú logickú sieť pre kvantový kloner uvedomil som si, že počiatkový stav dvoch ancilárnych systémov (ktoré umožňujú implementovať úplne pozitívne zobrazenie asociované s procesom klonovania) špecifickým spôsobom ovplyvňuje dynamiku nášho kvantového systému. Dokázali sme, že kvantová logická sieť pre kvantové klonovanie môže slúžiť na distribúciu kvantovej informácie – ako sa informácia distribuuje, to závisí od stavov ancilárnych systémov V.Bužek, M. Hillery, & R.Bendik: "Controlling the flow of information in quantum cloner: Asymmetric cloning." *Acta Phys. Slov.* **48**, 177 (1998) [citované 30 krát] a S.L.Braunstein, V.Bužek, & M.Hillery: "Quantum information distributors: Quantum network for symmetric and asymmetric cloning in arbitrary dimension and continuous limit." *Phys. Rev. A* **63**, 052313 (2001). Na základe týchto výsledkov sme boli schopní navrhnúť model implementácie zovšeobecnených meraní Hisimiho-Q funkcie M.Roško, V.Bužek, P.R.Chouha, & M.Hillery: "Generalized measurements via programmable quantum processor." *Phys. Rev. A* **68**, 062302 (2003). Odtiaľto už viedla krátka cesta ku konceptu programovateľných meracích zariadení – vid'. M.Dusek & V.Bužek: Quantum multimeters: A programmable state discriminator." *Phys. Rev. A* **66**, 022112 (2002). V týchto prácach sme po prvýkrát zaviedli pojem programovateľného kvantového procesora, t.j. kvantového zariadenia, ktoré má dva vstupné registre – jeden, reprezentujúci kvantové dáta a druhý, kvantový program. V závislosti od stavu kvantového registra kvantový procesor implementuje špecifickú transformáciu na kvantových dátach. Týmto sme de facto vytvorili model kvantového „programovania“, ktorý otvára nové možnosti manipulácie s kvantovou informáciou. Detailne sme analyzovali rôzne aspekty tohto nového prístupu ku kontrole dynamiky kvantových systémov, kedy kontrola je definovaná exkluzívne stavom programového registra (t.j. interakcia medzi dátovým a programovými registrami je „fixovaná“ procesorom ako takým a menia sa iba stavy programového registra). Je dôležité zdôrazniť, že kvantová teória vylučuje existenciu deterministického univerzálneho programovateľného procesora konečných rozmerov. Nám sa podarilo konštruktívne dokázať, že takýto programovateľný procesor v pravdepodobnostnom zmysle existuje – vid'. M.Hillery, V.Bužek & M.Ziman: "Probabilistic implementation of universal quantum processors." *Phys. Rev. A* **65**, 022301 (2002) [citované 30 krát]; V.Bužek: "Optimal manipulations with quantum information: Universal quantum machines" *NATO Advanced Study Institute on Quantum Communication and Information Technologies* (Kluwer, Dordrecht, 2003, pp. 47 – 84); M.Hillery, M.Ziman, & V.Bužek: "Implementation of quantum maps by programmable quantum processors." *Phys. Rev. A* **66**, 042302 (2002) [citované 15 krát]; M.Ziman & V.Bužek: "Realization of unitary maps via probabilistic programmable quantum processors." *International Journal of Quantum Information* **1**, 527 (2003); M.Hillery, M.Ziman, & V.Bužek: "Improving performance of probabilistic programmable quantum processors." *Phys. Rev. A* **69**, 042311 (2004); V.Bužek, M.Ziman, & M.Hillery: "Probabilistic programmable quantum processors." *Fortschr. Phys.* **52**, 1056 (2004); A.Brazier, V.Bužek, & P.L. Knight: "Probabilistic programmable quantum processors with multiple copies of program state." *Phys. Rev. A* **71**, 032306 (2005); V.Bužek, M.Ziman, M.Hillery, & M.Roško: "Programmable quantum processors." *Quantum Information Processing* **5**, 313-420 (2006). Schematicky je programovateľný kvantový procesor vyobrazený na Obr.6. Tu je dôležité zdôrazniť, že procesor, je „fixované“ zariadenie (popísané unitárnou operáciou pôsobiace na tenzorovom súčine Hilbertových priestorov

dátového a programového registrov. Samotný procesor je reprezentovaný sekvenciou štyroch kontrolovaných rotácií (viď. Obr. 7).



Obr.6. Schematický model programovateľného kvantového procesora s dvomi vstupnými registrami – dátovým registrom a programovým registrom. Samotný procesor je doplnený meraním programového registra – operácia, ktorá sa realizuje na dátach závisí (náhodne) od výsledku merania programového registra. Samotný programovateľný procesor je reprezentovaný sekvenciou štyroch kontrolovaných rotácií



Obr.7. Kvantová logická sieť implementujúca programovateľný kvantový procesor – tento pozostáva z jednoduchej sekvencie štyroch kontrolovaných rotácií v počítačovej báze. Línia na vrchu schémy korešponduje dátovému registru a ďalšie dve línie v logickej sieti reprezentujú programový register

- Koncept programovateľných kvantových procesorov sme použili na hlbšie pochopenie toho ako sa dajú realizovať zovšeobecnené kvantové merania – viď M.Ziman & V.Bužek: “Realization of POVMs using measurement-assisted programmable quantum processors.” *Phys. Rev. A* **72**, 022343 (2005). Ďalej sme v sérii článkov rozvinuli model programovateľných meraní implementujúcich jednoznačnú identifikáciu a komparáciu kvantových stavov ako aj koncept kvantového hľadania v kvantovej databáze – viď. J.A.Bergou, V.Bužek, E.Feldman, U.Herzog, & M.Hillery: “Programmable quantum-state discriminators with simple programs.” *Phys. Rev. A* **73**, 062334 (2006); M.Sedlák, M.Ziman, O.Přibyla, V.Bužek, & M.Hillery: “Unambiguous identification of coherent states: Searching a quantum database” *Phys. Rev. A* **76**, 022326 (2007) a M.Sedlák, M.Ziman, V.Bužek, & M.Hillery: “Unambiguous comparison of ensembles of quantum states” *Phys. Rev. A* **77**, 042304 (2008).

Niektoré referencie na moju prácu v encyklopédiách a knihách:

- *Encyklopaedia Beliana* (2 zväzok)
- *Kto je kto v SAV* (Veda, Bratislava, 2000)
- D. Janiakova: *Kedy, ak nie teraz* (Veda, Bratislava, 2001)
- Š.Luby: *Moji intelektuáli* (Veda, Bratislava, 2003)
- T.Čorná: *Rozhovory* (Petit Press, 2006)

Viac informácie je k dispozícii na <http://www.quniverse.sk/buzek>