

INTERFERENCIAMINTÁZATOK
GENERÁLÓ INFORMÁCIÓS
FOLYAMATÁNAK
STATISZTIKAI IDENTIFIKÁCIÓJA

Nádai László

ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA

Tézisek

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
2002

BEVEZETÉS

A FÉNY KETTŐS TERMÉSZETE (hullám vagy részecske) hosszú ideje áll a természettudományos érdeklődés középpontjában. Jó ideig úgy tűnt, hogy a kérdés csak tudománytörténeti jelentőséggel bír, hiszen alkalmas kísérleti elrendezéssel mindkét tulajdonság kimutatható és a kvantumoptika mindkettőt kielégítő módon leírja.

Az elmúlt két évtized látványos lézeres mérés technológiai és részecskefizikai fejlődése azonban lehetővé tette, hogy igen alacsony intenzitású részecskenyalábokkal végezzenek kísérleteket, s ekkor az *Einstein–Podolsky–Rosen-paradoxon*hoz hasonló problémák újra felmerültek, hiszen nem lehetett továbbra is az állítani, hogy „a mérési eredmény statisztikai átlagnak tekinthető”.

Először Einstein, Podolsky és Rosen (1935-ben megjelent, azóta klasszikussá vált cikkükben) mutattak rá arra, hogy a kvantummechanika szokásos interpretációja megengedi bizonyos két-részecskés állapotok létezését, amikor is az egyik (A) részecskén végzett mérés determinálja a másik (B) részecske vonatkozó jellemzőjét. A paradoxon megértéséhez képzeljünk el egy atomot, amely egy időben két elektront (A és B részecskék) bocsát ki úgy, hogy közben az egész rendszer momentuma zérus marad. Várjunk addig, amíg az elektronok jó messzire el nem távolodnak egymástól és csak ekkor végezzünk méréseket. Most, ha például megmérjük az A elektron sebességét, akkor – mivel az összmomentum zérus – máris ismerjük a B elektron sebességét is.

Einstein szerint ha egy változó értékét teljes biztonsággal megállapíthatjuk a részecske megzavarása nélkül, akkor „... létezik a fizikai valóságnak olyan eleme, amely ehhez a fizikai változóhoz tartozik”. Más szóval a B részecskéhez tartozó változónak *ténylegesen ez az értéke*, függetlenül attól, hogy valóban megmérjük vagy sem. (Ezzel szemben a kvantummechanika azt ál-

lítja, hogy bizonyos értelemben *a mérés teremti a valóságot.*) Tekintsünk most egy másik változót, amely az előzőnek kanonikus konjugáltja (az elektron helye), és mérjük meg ennek az értékét az *A* részecskénél. Ekkor – az előző érvek alapján – a *B* részecske vonatkozó konjugált változójának értékét határozhatjuk meg. Igen ám, de a kvantummechanika szerint konjugált változók értékét egy időben teljes pontossággal nem ismerhetjük! (Vö. Heisenberg-féle határozatlansági reláció.) Vagyis a döntés, hogy az *A* részecske konjugált változói közül melyiket mérjük meg, befolyásolja a *B* részecske állapotát, pedig a mérés időpontjában a két részecske tetszőlegesen messzire lehet egymástól, így a rendelkezésre álló csekély idő alatt semmiképpen sem kommunikálhatnak. Ez az ellentmondás vezette Einsteint arra a következtetésre, hogy a kvantummechanika „nem-teljes”.

Ilyesfajta korrelációk létezését azóta kísérleti úton is igazolták (Aspect et al., 1982), és az *Einstein-féle lokalitás* megsértését elméletileg is széleskörben tárgyalták (Bohm, 1952; Bell, 1964; Clauser et al., 1969). A korrelálódást próbálták ún. *rejtett paraméterek* bevezetésével magyarázni (ezek lennének felelősek a kísérlet kimeneteléért), de kimutatható, hogy a nem-lokalitás jelensége alapvető a kvantummechanikában és semmiféle valóságos lokális elmélet nem tud számot adni róla.

Arthur Fine (1982) azzal oldotta föl az ellentmondást, hogy kimutatta, a gondolatkísérletben szereplő mérőműszerek a gyakorlatban megvalósíthatatlanok, és így a mérések valójában egy statisztikai mintát szolgáltatnak. Ugyancsak ő dolgozta ki a mérések által kapott relatív gyakoriságok és a kvantumállapotok valószínűségei közötti megfeleltetést biztosító ún. *prizma-modellt*.

CÉLKITŰZÉSEK

VIZSGÁLATUNK KÖZÉPPONTJÁBA egy olyan optikai folyamat megfigyelését és modellezését állítottuk, amely *mérhető interferencia-mintzatot* hoz létre, hiszen az interferencia talán a legegyszerűbb olyan – klasszikus módon is értelmezhető – fizikai jelenség, amely ugyanakkor elegendően összetett ahhoz, hogy kvantumoptikai leírásában a Bevezetésben említett problémakör megjelenjen. Nem elhanyagolható szempont az sem, hogy a kísérlet technikailag viszonylag egyszerűen kivitelezhető és a méréshez szükséges műszerek készen megvásárolhatók.

René DESCARTES (1596–1650), a világhírű matematikus és teológus, *Értekezés a módszerről* c. művében négy egyszerű szabályt fogalmazott meg, amelyet mindenkinek követnie kell(ene), aki a (tudományos) igazságot keresi:

Az első, hogy semmit ne fogadjak el igaznak, amit nem evidens módon ismertem meg annak; azaz hogy gondosan kerüljek minden elhamarkodást és elfogultságot és semmivel többet ne foglaljak bele ítéleteimbe, mint ami oly világosan és elkülönítetten áll elmém előtt, hogy nincs okom kétségbe vonni.

A második az, hogy a vizsgálódásaimban előforduló minden problémát annyi részre osszam, ahányra csak lehet és ahányra a legjobb megoldás érdekében szükség van.

A harmadik az, hogy bizonyos rendet kövessék gondolkodásomban, mégpedig olyképp, hogy a legegyszerűbb és legkönnyebben megismerhető tárgyakkal kell kezdenem, hogy aztán lassan, fokozatosan emelkedjem fel az összetettebbek ismeretéhez; s még azok között is fel kell tételezzem bizonyos rendet, amelyek nem magától értetődően következnek egymás után.

Az utolsó pedig az, hogy mindenütt teljes felsorolásokra és általános áttekintésekre törekedjem, s így biztos legyen abban, hogy semmit ki nem hagytam.

Ezen útmutatás alapján a vizsgálatot előzetesen négy lényegi szakaszra bontottuk.

1. Elsősorban is alapos *irodalomkutatás* látszott szükségesnek, hogy a gyengített nyalábokkal végzett interferenciakísérletek eredményeit, illetve a magyarázásaikra kidolgozott elméleteket megismerhessük. Csak ezután javasolhattunk „új” megközelítési módot a látszólagos ellentmondások feloldására.

2. Ezután gondosan meg kellett tervezni a *mérési elrendezést*, amelyet az irányításelméletben szokásos input/output modellfelfogás alapján bontottunk részekre. Eszerint: ki kellett választani egy megfelelő bemeneti jelet szolgáltató fényforrást, ki kellett dolgozni a mérési elrendezés elméleti leírását és be kellett tervezni a megfelelő mérőműszereket.

3. A fizikában szokásos gyakorlat szerint mindezidáig csak korrelációk, koincidenciák, esetleg (első- vagy magasabbrendű) momentumok mérésére történt kísérlet, ezért ki kellett dolgozni a fotonbecsapódási folyamat irányításelméleti modelljét. Ez nyilvánvalóan újszerű megközelítést igényelt, hiszen az interferenciakép nem értelmezhető mindössze néhány foton regisztrálása után. A fotodetektor-mátrix elemei közötti sztochasztikus összefüggések feltárásához a modern valószínűségelméletben jólismert ún. *kettős sztochasztikus Poisson-folyamatok* elméletét kívántuk alkalmazni. Menetközben felmerült egy gyakorlati probléma (a mintavételi idő megválasztása kritikus, hisz túl kevés becsapódás esetén a korrelációk értéke gyakorlatilag zérus, túl sok foton esetén viszont mindent kiátlagolunk), melynek megoldása rámutatott a folyamat lényegét képező *ön-hasonlóságra* (fraktalitásra).

4. Végezetül, már jóelőre fel kellett készülnünk arra, hogy a modellezés során óhatatlanul el kell majd hanyagolnunk bizonyos (esetleg lényegi) jellemzőket. E modellezési feltevések természetesen befolyásolják a kapott eredmények pontosságát és behatárolják a modell érvényességi körét. Ezért gondosan fel kellett jegyeznünk mindent, ami a modell fejlesztését és a további kutatómunkát segítheti.

ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

A KUTATÓMUNKA SORÁN ELÉRT új tudományos eredmények rövid összefoglalását adjuk az alábbiakban, a disszertáció vonatkozó fejezeteinek megjelölésével.

1. TÉZIS (3.3. és 7.2. fejezetek). *Javasoltam az interferenciamintázatok kialakulásának kettős sztochasztikus Poisson-folyamatokkal történő modellezését.*

Annak ellenére, hogy régóta ismert tény: a fotonbecsapódási folyamat Poisson-statisztikát követ (Mandel, 1958), mindezidáig nem történt meg az interferenciamintázatok kialakulási folyamatának egységes valószínűségelméleti paradigmába történő beágyazása. Kvantumoptikai számítások és statisztikai elemzés alapján javasoltam a vektorértékű kettős sztochasztikus Poisson-folyamatmodellt.

2. TÉZIS (4.3. fejezet). *Új módszert dolgoztam ki félvezető lézerdiodák frekvenciastabilitásának növelésére.*

Javasoltam, hogy az interferenciamintázat előállításához szükséges koherens fényt a szokásos gáz-, illetve szilárdtestlézerek helyett félvezető lézerdiodák segítségével állítsuk elő. Ennek előnyei: jóval alacsonyabb költségek, a kisebb méretből eredő egyszerű installáció és a közvetlen szabályozás lehetősége. A lézerdiodák hátránya, hogy relatíve inkoherens fényforrások. Javasoltam tehát, hogy a szokásos passzív frekvenciastabilizálás (ld. Ohtsu, 1992) mellett aktív visszacsatolással növeljük a fény koherenciáját és kidolgoztam az ehhez szükséges LQ szabályozókört.

3. TÉZIS (5.1–3. fejezetek). *Megterveztem az interferenciamintázatok időbeli kialakulásának regisztrálását lehetővé tevő mérési elrendezést.*

Amennyiben az interferenciamintázat megfigyelésére szolgáló ernyőt fotodetektorokból álló mátrixszal helyettesítjük, lehetővé válik a mintázat időbeli evolúciójának nyomonkövetése. A mérési elrendezés elemei: nagyérzékenységű fotodetektortömb, jelalakformáló és mintavételező hardvereszközök, és az összehangolt működést biztosító szoftverrendszer.

4. TÉZIS (6.4. fejezet). *Megállapítottam a vizsgált fotonbecsapódási folyamat statisztikus modellezés szempontjából optimális mintavételi idejét.*

A mintavételi idő megválasztása kulcsfontosságú a modellezés szempontjából: ha túl rövid a detektor kiolvasási ideje, akkor a kevés becsapódás miatt a korrelációk értéke gyakorlatilag zérus, túl hosszú intervallum esetén viszont már csak az átlagos képzet regisztráljuk. A pont-fraktál fogalmát felhasználva megállapítottam, hogy amennyiben az ön-hasonlóság igazolható, akkor az idősor visszatérési ideje dimenzióelemzéssel meghatározható (Lo-vejóy et al., 1987). Ezek után a mérési adatok statisztikai elemzésével kimutattam a fraktalitást és meghatároztam az optimális mintavételi időt.

5. TÉZIS (8.5. fejezet). *Kidolgoztam az optimális lineáris szűrését biztosító algoritmust vektorértékű kettős sztochasztikus Poisson-folyamatokra.*

Mivel a kutatás célja az interferenciamintázatok generáló információs folyamatok statisztikai identifikációja volt, ki kellett dolgozni a beágyazott intenzitásfolyamat optimális szűrését biztosító módszert. Ezt – a folyamat linearitását feltételezve – a Kalman–Bucy-szűrő alkalmazásával érhetjük el, ezért levezettem ennek algoritmusát vektorértékű kettős sztochasztikus Poisson-folyamatokra.

AZ EREDMÉNYEK ÉRTELMEZÉSE ÉS HASZNOSÍTÁSA

A BEÁGYAZOTT INTENZITÁSFOLYAMATOK statisztikai identifikációja érdekes eredményre vezetett: annak ellenére, hogy az interferenciakép különböző pontjain elhelyezett detektorok által regisztrált becsapódási idősorok között bizonyos értelemben semmi különbség nem tehető (kereszt spektrumuk azonosan zérus), a szűrt intenzitásfolyamatok már szignifikánsan különböznek egymástól.

Az eredmény első része nem különösebben meglepő, a kvantumoptikai szemlélet alapján ezt is vártuk. Az intenzitásfolyamatok szeparálhatósága viszont annál inkább elgondolkodtató, és érdekes párhuzam vonható a Fine-i gondolatvilággal: esetleg elképzelhető, hogy a statisztikai minta időbeli evolúciója valamiféle információt tartalmaz az eredeti sokaságra vonatkozóan.

Ennek a – valószínűségi mintázatokot tartalmazó – ún. *harmadik világnak* a gondolatát Karl Popper (1972), a világhírű tudományfilozófus vetette fel először. A mintázatok objektivitása és autonómiája talán választ adhat a kvantummechanikai világejtelenítés által felvetett filozófiai problémák egy részére, melyeket az Einstein, Podolsky és Rosen által felvetett paradox gondolat kísérlet fogalmazott meg először. Természetesen ez messze túlmutat a disszertáció keretein, de a 9. fejezetben megpróbáltam az interferenciakísérletek Popperiánus értelmezését tömören összefoglalni.

Jóval gyakorlatiasabb alkalmazást kínál a félvezető lézerdiodák frekvenciastabilizálását biztosító algoritmus. Ennek ipari keretek között történő bevezetésére jelenleg is folyik kutatómunka (Nádai, 2001).

HIVATKOZÁSOK

- Aspect, A., J. Dalibard, and G. Roger: 1982, 'Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analyzers'. *Phys. Rev. Lett.* **49**(25), 1804.
- Bell, J.: 1964, 'On the Einstein-Podolsky-Rosen paradox'. *Physics* **1**(3), 195.
- Bohm, D.: 1952, 'A suggested interpretation of the quantum theory in terms of „hidden” variables: Part I'. *Phys. Rev.* **85**, 166–179.
- Clauser, J., M. Horne, A. Shimony, and R. Holt: 1969. *Phys. Rev. Lett.* **23**, 880.
- Fine, A.: 1982, 'Some local models for correlation experiments'. *Synthese* **50**, 279.
- Lovejoy, S., D. Schertzer, and A. Tsonis: 1987. *Science* **235**, 1036.
- Mandel, L.: 1958. *Proc. Phys. Soc.* **72**, 1037.
- Ohtsu, M.: 1992, *Highly Coherent Semiconductor Lasers*. Norwood, MA: Artech House.
- Popper, K. R.: 1972, *Objective Knowledge: An Evolutionary Approach*. Oxford: Clarendon Press. Revised ed. in 1983.

PUBLIKÁCIÓK JEGYZÉKE

- Joó, I., J. Bokor, V. P. and L. Nádai: 1996a, 'A new approximation method for transfer function estimation using its values in discrete points on the boundary of the unit circle'. Research report, Automation and Control Research Institute of the Hungarian Academy of Sciences, Budapest, Hungary.
- Joó, I., L. Kóczy, and P. V. L. Nádai: 1997a, 'On control of non-smoothing systems'. In: P. Gabko (ed.): *Proc. Workshop AUTOMATION 2001*. Vienna, Austria, p. 285. (abstract).
- Joó, I., L. Palkovics, P. Várlaki, and L. Nádai: 1997b, 'Identifiability of vibrating membranes and plates with restrained controls'. In: *Proc. 11th IFAC Symposium on System Identification*. Kitakyushu, Japan, pp. 153–158.
- Joó, I., P. Várlaki, and L. Nádai: 1996c, 'Riesz bases in control theory (Controlling an oscillating string)'. In: P. Gabko (ed.): *Proc. Workshop on Advanced Control Systems*. Vienna, Austria, pp. 201–205.
- Kóczy, L., P. Várlaki, and L. Nádai: 1998, 'Fuzzy system identification method for cognitive and decision processes'. In: *IEEE System, Man and Cybernetics*. San Diego, USA.
- Kóczy, L. T., P. Várlaki, L. Kunsági, and L. Nádai: 1995, 'Fuzzy linguistic expert systems and models'. In: *Proc. Conference on Operation Research*. Balatonkenese, Hungary, pp. 26–27. (in Hungarian).
- Nádai, L.: 1992, 'Effect of ultrashort light pulse on thin optical layer'. In: *Proc. Students' Conference at TUB*. Budapest, Hungary. (in Hungarian).
- Nádai, L.: 1993, 'Effect of ultrashort light pulse on thin optical layer'. In: *Proc. Hungarian Students' Conference*. Kecskemét, Hungary, p. 180. (in Hungarian).
- Nádai, L.: 1994a, 'Assuring Frequency Stability of Semiconductor Lasers by Control Methods'. Master's project, Technical University of Budapest, Department of Telecommunications and Telematics. (in Hungarian).

- Nádai, L.: 1994b, 'Optimal frequency stabilization of semiconductor lasers'. Research report, Automation and Control Research Institute of the Hungarian Academy of Sciences, Budapest, Hungary. (in Hungarian).
- Nádai, L.: 1995a, 'Photo-multipliers'. Research report, Dept. of Telecommunications and Telematics, Technical University of Budapest, Budapest, Hungary. (in Hungarian).
- Nádai, L.: 1995b, 'Structure and parameter identification for the dynamic model of the integrated laser system establishing optimal control'. In: E. Halász (ed.): *Proc. Conference of Ph.D. Students*. Budapest, Hungary, pp. 39–40.
- Nádai, L.: 1996a, 'An introduction to qualitative physics'. Technical report, LAAS–CNRF, Toulouse, France.
- Nádai, L.: 1996b, 'An introduction to qualitative physics'. In: E. Halász (ed.): *Proc. Conference of Ph.D. Students*. Budapest, Hungary, pp. 31–32.
- Nádai, L., Z. Papp, J. Bokor, and P. Várlaki: 1995a, 'On optimal frequency stabilization of semiconductor lasers'. In: J. Shinar (ed.): *Proc. 10th IFAC Workshop on Control Applications of Optimization*. Technion, Haifa, Israel.
- Nádai, L., Z. Papp, and P. Várlaki: 1995b, 'Identification and control for optimal frequency stabilization of semiconductor lasers'. In: P. Gabko (ed.): *Proc. Workshop on Automation and Control Engineering in Higher Education*. Vienna, Austria.
- Nádai, L.: 2001, 'Semiconductor Laser Applications'. *Contract between the author and FETI Ltd.*
- Nádai, L.: 2002, 'Modelling photon counting experiments using fuzzy logic controller'. *Journal of Advanced Computational Intelligence*, Fuji Technology Press. (accepted for publication)
- Michelberger, P., L. Nádai, P. Várlaki, I. Joó: 2002, 'Riesz bases in control theory'. *Periodica Polytechnica*, Budapest University of Technology and Economics. (accepted for publication)
- Palkovics, L., I. Joó, P. Várlaki, and L. Nádai: 1996, 'On controllability of road vehicle vibrating membranes'. In: I. Zobory (ed.): *Proc. 5th Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies*. Budapest, Hungary.
- Papp, Z. and L. Nádai: 1993, 'Numerical study of influence of ultrashort light pulse on thin optical layer'. In: *Topical Meeting 'Education and Training in Optics'*. Pécs, Hungary.

- Papp, Z., P. Várlaki, and L. Nádai: 1997, 'Wave packet model and Mach-Zehnder type interferometers'. In: *Conference on Locality and Causality in Quantum Optics and Cosmology*. Toronto, Canada.
- Papp, Z., P. Várlaki, and L. Nádai: 1998, 'Wave packet model and Mach-Zehnder type interferometers'. In: G. Hunter, S. Jeffers, and J.-P. Vigié (eds.): *Causality and Locality in Modern Physics*, Fundamental Theories of Physics. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, pp. 373–382.
- Penninger, A., L. Kóczy, P. Várlaki, and L. Nádai: 1998, Stochastic and fuzzy decision models in energetics'. In: *3rd World Automation Congress*. Anchorage, USA.
- Várlaki, P. and L. Nádai: 1995, 'Expert investment decision models using subjective learning algorithms'. In: N. Kasabov (ed.): *Proc. 2nd International Two-Stream Conference on Artificial Neural Networks and Expert Systems (ANNES '95)*. Dunedin, New Zealand.
- Várlaki, P. and L. Nádai: 1996, 'Qualitative modelling of vehicle vibrating structures'. In: L. T. Kóczy (ed.): *Proc. Symposium on Qualitative System Modelling, Qualitative Fault Diagnosis and Fuzzy Logic and Control*. Budapest, Hungary.
- Várlaki, P., L. Palkovics, and L. Nádai: 1997a, System identification of vibrating membranes with restrained control'. In: P. Gabko (ed.): *Proc. Workshop AUTOMATION 2001*. Vienna, Austria, pp. 217–224.
- Várlaki, P., Z. Papp, L. Nádai, and I. Joó: 1998a, Stochastic control model for H-atoms (Non-radiating solution of the classical Bohr model). In: *3rd APCCM*. Tunhuang, China.
- Várlaki, P., Z. Papp, L. Szeidl, and L. Nádai: 1998b, 'Probabilistic models for measures of dependence in quantumoptical measurements'. In: *3rd World Automation Congress*. Anchorage, USA.
- Várlaki, P., L. Szeidl, and L. Nádai: 1997b, 'A new approach for calculating the measures of dependence for interference statistics'. In: *Proc. DIMACS Workshop on Statistical Physics Methods in Discrete Probability, Combinatorics and Theoretical Computer Science*. Princeton, NJ.
- Várlaki, P., L. Szeidl, and L. Nádai: 1997c, New stochastic approach for measuring and controlling photon statistics'. In: P. Gabko (ed.): *Proc. Workshop AUTOMATION 2001*. Vienna, Austria, pp. 253–256.
- Várlaki, P., G. Terdik, and L. Nádai: 1995, 'On problem of stochastic bilinear realization'. In: C. Kwong (ed.): *Mini Symposium at the Chinese University of Hong Kong*. Shatin, NT, Hong Kong.