

# PÉCSI TUDOMÁNYEGYETEM

Fizika Doktori Iskola



## **Többfotonos adiabatikus átmenetek alkalmazása rubídium atomok koherens gyorsítására**

PhD értekezés tézisei

**Varga-Umbrich Károly**

Témavezető

**Dr. Kedves Miklós Ákos**

tudományos főmunkatárs

Wigner Fizikai Kutatóközpont



Pécs, 2022

# 1. Előzmények

Rezonáns lézersugárzás segítségével nemcsak az atom belső állapota manipulálható. Egy gerjesztés, illetve spontán vagy indukált emisszió az elnyelt vagy kibocsátott fotonlendület miatt az egész atom mozgását is befolyásolja. Ilyen módon az atomok célzottan lassíthatók vagy gyorsíthatók, illetve lehet őket hűteni és csapdázni.

Atomok koherens manipulálása csak indukált folyamatokon keresztül lehetséges (gerjesztés és indukált emisszió) - a spontán emisszió lerombolja a kvantumállapot koherenciáját. Lézerimpulzussal létrehozott indukált folyamatok sokféleképpen használhatóak atomok mozgásának manipulációjára (pl: atomnyalábok eltérítése vagy fókuszálása) és számos esetben lehetőséget nyújtanak az atomi hullámcsomagok koherenciájának megőrzésére. A koherencia megőrzéséhez fontos, hogy a kölcsönhatásban a teljes populáció átvihető legyen, erre egy hatékony és robusztus megoldás az adiabatikus átmenet [1] [2] [3] [4] [5] [6] [7]. Ezek a módszerek gyakran két egymással szemben haladó lézerimpulzust használnak, melyek egymás után kölcsönhatva az atommal (az atom spontán élettartamánál rövidebb időn belül) kényszerítik az atomot populációváltásra (alapállapotból

gerjesztett állapotba és vissza). Egy foton elnyelésével az alapállapotból a gerjesztett állapotba jutó atom a foton lendületét is elnyeli, és  $\hbar k$  impulzust kap. Amennyiben a gerjesztést követően egy másik ellentétes irányú, a gerjesztő impulzushoz hasonló lézerimpulzussal hat kölcsön az atom, akkor indukált emisszió jön létre. Ezáltal a rendszer ismét ugyanabban az irányban még egy  $\hbar k$  impulzust kap. Fontos, hogy addig történjen meg a második nyaláb kölcsönhatása az atomokkal, míg azok gerjesztése számottevően nem csökken a spontán emisszió miatt. Tehát a rendszer így összesen  $2\hbar k$  impulzushoz jut. [8] [9] [10]

Fontos eredményt mutat, amikor a kölcsönhatást végző szembehaladó lézerimpulzusok nem külön-külön, hanem egymással részben átfedve egyszerre hatnak kölcsön az atommal. A szimulációs modellek azt mutatták, hogy az atom a várt  $2\hbar k$  helyett ennek egész számú többszörösét is képes megkapni. [11] [12] [13]. Ez akkor lehetséges, ha a folyamat adiabatikus, amely a kölcsönhatás paramétereire (lézerintenzitás, impulzushossz, frekvenciafutás, impulzusok átfedése, stb.) nézve szigorú specifikációt jelent. A jelenség neve többfotonos adiabatikus átmenet. Az atomok gyorsításának ilyen kompakt módon fontos gyakorlati haszna lehet.

## 2. Célkitűzés

Jelen dolgozatomban atomi kvantumállapotok közötti koherens gerjesztés és adiabatikus populációátvitel megvalósítása és vizsgálata volt a cél. Az átmenetek keltése frekvenciamodulált lézerpulzusokkal történt, melyekben a frekvencia az impulzus alatt távolról indulva átsöpör az atomi átmenet frekvenciáján és okoz adiabatikus populációátvitelt. A lézersugárzás megfelelő paramétereinek eléréséhez és stabilan tartásához egyedi módszereket kellett kidolgozni, amelyek akár más spektroszkópai területen is használhatóak.

A motiváció annak kimutatása, hogy az elméleti modellben számolt különleges adiabatikus jelenség a kísérletek során, hogy valósul meg [11]. A többfotonos adiabatikus átmenet keltés az atom gyorsulását eredményezi, amelynek kísérleti kimutatása, és minél nagyobb impulzusátadás elérése volt a cél.

Magneto-optikai csapdába gyűjtött hideg rubídiumatomokon végeztem a gyorsítási kísérleteket, mérve az atomfelhő elmozdulását. A kapott mérési eredményeket a konkrét kísérleti körülmények számításba vételével készült szimulációkkal próbáltam leírni.

A szükséges nanoszekundumos lézerimpulzusok kivágása egy folytonos üzemű, frekvenciamodulált lézersugárzásból történik. A kivágás a frekvenciafutás megfelelő részén kell történjen. Azért, hogy a kivágás során ne keletkezzen nem kívánt frekvenciamoduláció, a kivágást végző modulátorok nem kívánt hatásainak kimérése, illetve kiküszöbölése figyelmet igényel. Emellett a modulált lézer középfrekvenciájának stabilizálására is szükség lehet a frekvencia fluktuációjának vagy driftjének csökkentésére.

A dolgozat ezt a jelenséget hivatott körüljárni elméleti és kísérleti oldalról, valamint a közben felmerülő problémákat bemutatni és megoldani.

### 3. Tudományos eredmények

1. Egy analóg spektrumanalizátor felhasználásával egyszerű és praktikus módszert dolgoztam ki, amellyel egy frekvenciamodulált diódalézer középfrekvenciájának csúszása és szórása lecsökkenthető. A stabilizálandó és egy referencialézer sugárzásának lebegési jelét a spektrumanalizátoron megjelenítve, a lebegési spektrum tetszőleges oldalsávjának elektronikusan kicsatolt jelére stabilizálható a modulált lézer [S1].
2. Bemutattam, hogy folytonos üzemű lézersugárzásból két különböző típusú Mach-Zehnder amplitúdómodulátorral - megfelelő időzítéssel - kivágható egy néhány nanoszekundumos lézerimpulzus, amely jó kontraszttal rendelkezik és hozzáadott frekvenciamodulációtól mentes. Az így kialakult impulzus frekvenciaparamétereinek nyomon követésére kidolgoztam egy módszert, amelynek lényege, hogy az impulzus mellett folyamatosan felvételre kerülnek a kicsatolt diagnosztikai nyalábok referencialézerrel vett lebegési jelei, amelyekre

matematikai formulát illesztve a keresett paraméterek meghatározhatók [S1].

3. Mageto-optikai csapdába összegyűjtött rubídiumatomokon csörpölt átfedő lézerimpulzus párok segítségével gyorsítási kísérleteket végeztem. Bemutattam, hogy az általam ismertetett kísérleti paraméterekkel a  $2\hbar k$ -t meghaladó átlagos impulzusátadás mérhető. Ez a tény bizonyítja, hogy többszörös fotoncsere megy végbe a kölcsönhatás során [S2].
4. Új, kibővített modellt dolgoztam ki rubídiumatomokon keltett többfotonos adiabatikus átmenet numerikus szimulációjához, mivel a korábbi elméleti modellekkel végzett numerikus szimulációk jelentősen eltértek a kísérleti eredményektől. Ez a modell tartalmaz a kísérlet során nélkülözhetetlen elemeket – a spontán emisszió és visszapumpáló lézerek hatását, valamint az atomok mozgásából adódó Doppler-effektust. Az új modell numerikus megoldásai jól leírják a kísérletben tapasztaltakat [S2].

## 4. Disszertációhoz kapcsolódó publikációk

- [S1]. **K. Varga-Umbrich**, J. S. Bakos, G. P. Djotyan, P. N. Ignácz, B. Ráczkevi, Zs. Sörlei, J. Szigeti and M. Á. Kedves, „Stabilization and time resolved measurement of the frequency evolution of a modulated diode laser for chirped pulse generation,” *Laser Physics*, vol. 26, p. 055006, 2016.
- [S2]. **K. Varga-Umbrich**, J. S. Bakos, G. P. Djotyan, Z. Sörlei, G. Demeter, P. N. Ignácz, B. Ráczkevi, J. Szigeti and M. Á. Kedves, „Coherent manipulation of trapped Rb atoms by overlapping frequency-chirped laser pulses: theory and experiment,” *The European Physical Journal D*, vol. 76, p. 70, 2022.

## 5. Egyéb publikációk és szabadalmak

- [K1]. M. Aladi, J. Bakos, I.F. Barna, A. Czitrovszky, G. Djotyan, P. Dombi, D. Dzsotjan, I. Földes, G. Hamar, P. Ignácz, M. Kedves, A. Kerekes, P. Lévai, I. Márton, A. Nagy, D. Oszetzky, M. Pocsai, P. Rácz, B. Ráczkevi, J. Szigeti, Zs. Sörlei, R. Szipöcs, D. Varga, **K. Varga-Umbrich**, S. Varró, L. Vámos, Gy. Vesztergombi, „Pre-excitation studies for rubidium-



plasma generation”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, vol. 740, p. 203, 2014.

[K2]. G.P. Djotyan, J.S. Bakos, M.Á. Kedves, B. Ráczkevi, D. Dzsotjan, **K. Varga-Umbrich**, Zs. Sörlei, J. Szigeti, P. Ignác, P. Lévai, A. Czitrovsky, A. Nagy, P. Dombi and P. Rác, „Real-time interferometric diagnostics of rubidium plasma,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, vol. 884, p. 25, 2018.

[K3]. G.P. Djotyan, J.S. Bakos, P. Ignác, M.Á. Kedves, B. Ráczkevi, N. Sándor, Zs. Sörlei, J. Szigeti, **K. Varga-Umbrich** „Koherens kontroll fázismodulált rövid lézerimpuzusokkal: alkalmazása magasabbrendű harmonikusok keltésnél és részecskegyorsításnál,” *Kvantumelektronika 2014: VII. szimpózium a hazai kvantumelektronikai kutatások eredményeiről. Helyszín: Budapest, Magyarország*, 187p. pp. 66-67. 2014.

[P1]. G.P. Djotyan, J.S. Bakos, G. Demeter, Zs. Sörlei, D. Dzsotjan, N. Sándor, M.Á. Kedves, B. Ráczkevi, **K. Varga-Umbrich**, „Coherent control of quantum states:

From atoms to high-order harmonics generation and acceleration of particles” *Wigner 111 Symposium* (2013)

[P2]. M. Aladi, J. Bakos, I.F. Barna, A. Czitrovsky, G. Djotyan, P. Dombi, D. Dzsotjan, I. Földes, G. Hamar, P. Ignácz, M. Kedves, A. Kerekes, P. Lévai, I. Márton, A. Nagy, D. Oszetzky, M. Pocsai, P. Rácz, B. Ráczkevi, J. Szigeti, Zs. Sörlei, R. Szipöcs, D. Varga, **K. Varga-Umbrich**, S. Varró, L. Vámos, Gy.Vesztergombi, „The Wigner RC contribution to the CERN AWAKE experiment” *Wigner 111 Symposium* (2013)

[P3]. M. Aladi, J.S. Bakos, I.F. Barna, A. Czitrovsky, G.P. Djotyan, P. Dombi, P.N. Ignácz, M.A. Kedves, I. Márton, A. Nagy, D. Oszetzky, M.A. Pocsai, P. Rácz, B. Ráczkevi, J. Szigeti, Zs. Sörlei, D. Varga, **K. Varga-Umbrich**, L.Vámos, „Experimental Studies for Rubidium-Plasma Generation by Femtosecond Laser Pulses” *2nd European Advanced Accelerator Concepts Workshop* (2015)

[P4]. G.P. Djotyan, M. Á. Kedves, B. Ráczkevi, **K. Varga-Umbrich**, J.S. Bakos, Zs. Sörlei, J. Szigeti, P. N. Ignácz, P. Lévai, I.F. Barna, A. Czitrovsky, P. Dombi, P. Rácz,

„Laser plasma source at Wigner Research Center for Physics” *ELI workshop* (2015)

[SZ1]. **K Varga-Umbrich**, B Jatekos, J.S. Gal, „*Dual purpose 3D image sensor integrated into automotive wing mirrors*”, DE102019211033A1; publikálva: 2021.01.28.

[SZ2]. G. Friedmann, K.E. Horvath, **K. Varga-Umbrich**, „*Special light guide for illuminated rotary knob*”, DE102019209504A1; publikálva: 2020.12.31.

[SZ3]. **K. Varga-Umbrich**, B. Jatekos, „*Image generator unit quasi 3D laser projector-based head-up display system*”, DE102018211533A1; publikálva: 2020.01.16.

[SZ4]. **K. Varga-Umbrich**, Sz. Gemesi, B. Csato, „*Design holes as optical elements in the light guide to improve the light distribution*”, DE102018211527A1; publikálva: 2020.01.16.

[SZ1]. M. Baki, **K. Varga-Umbrich**, „*Method and device for determining an optical impairment of a camera*” DE102019218450A1; publikálva: 2021.06.02.

## 6. Hivatkozások

- [1] N. V. Vitanov, T. Halfmann, B. W. Shore and K. Bergmann, "Laser - Induced Population Transfer By Adiabatic Passage Techniques," *Annual Review of Physical Chemistry*, vol. 52, p. 763, 2001.
- [2] K. Bergmann, H. Theuer and B. W. Shore, "Coherent population transfer among quantum states of atoms and molecules," *Rev. Mod. Phys.*, vol. 70, p. 1003, 1998.
- [3] M. M. T. Loy, "Observation of population inversion by optical adiabatic rapid passage," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 32, p. 814, 1974.
- [4] J. S. Melinger, S. R. Gandhi, A. Hariharan, D. Goswami and W. S. Warren, "Adiabatic population transfer with frequency-swept laser pulses," *J. Chem. Phys.*, vol. 101, p. 6439, 1994.
- [5] B. Shore, "Picturing stimulated Raman adiabatic passage: a STIRAP tutorial," *Adv. Opt. Photon.*, vol. 9, p. 563, 2017.

- [6] B. M. Sparkes, D. Murphy, R. J. Taylor, R. W. Speirs, A. J. McCulloch and R. E. Scholten, "Stimulated Raman adiabatic passage for improved performance of a cold-atom electron and ion source," *Phys. Rev. A*, vol. 94, p. 023404, 2016.
- [7] B. W. Shore, K. Bergmann, A. Kuhn and J. Oreg, "Laser-induced population transfer in multistate systems: A comparative study," *Phys. Rev. A*, vol. 45, p. 5297, 1992.
- [8] A. Goepfert, I. Bloch, D. Haubrich, F. Lison, R. Schütze, R. Wynands and D. Meschede, "Stimulated focusing and deflection of an atomic beam using picosecond laser pulses," *Phys. Rev. A*, vol. 56, p. 3354, 1997.
- [9] J. S. Bakos, G. P. Djotyan, P. N. Ignácz, M. A. Kedves, M. Serényi, Z. Sörlei, J. Szigeti and Z. Tóth, "Interaction of frequency modulated light pulses with rubidium atoms in a magneto-optical trap," *Eur. Phys. J. D*, vol. 39, p. 59, 2006.
- [10] I. Nebenzahl and A. Szőke, "Deflection of atomic beams by resonance radiation using stimulated emission," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 25, p. 327, 1974.

- [11] G. Demeter, G. P. Djotyan, Z. Sörlei, J. Szigeti and B. J. S., "Mechanical effect of retroreflected frequency-chirped laser pulses on two-level atoms," *Phys. Rev. A*, vol. 74, p. 013401, 2006.
- [12] G. Demeter and G. P. Djotyan, "Multiphoton adiabatic passage for atom optics application," *Optical Society of America*, vol. 26, p. 867, 2009.
- [13] G. Demeter, "Quantum control of multilevel atoms with rotational degeneracy using short laser pulses," *Phys. Rev. A*, vol. 82, p. 043404, 2010.