

Rövid, frekvenciamodulált lézerimpulzus sorozat kölcsönhatása többnívós rendszerekkel

A modern tudományban és technológiában, mint például a kvantumoptikában, kvantum számítógépek területén, atom-interferometriában, nanotechnológiában, a lézeres hűtés és csapdázás esetében, a semleges atomok és molekulák belső- és transzlációs kvantumállapotainak a manipulálásában a lézersugárzásnak széleskörű és ígéretes alkalmazási lehetőségei vannak. Ezek között azok a módszerek, amelyek a fény mechanikai hatását indukált folyamatok, és nem a gerjesztett állapot spontán bomlása során fejtik ki, két okból különösen érdekesek. Egyrészt lehetségessé válik a spontán folyamatok telítődése miatti határnál nagyobb erő fellépése, másrészt megőrizhető segítségével az atomi hullámcsomag koherenciája.

Ennek a pályázatnak a keretében soknívós atomok és frekvencia-modulált, „csörpölt” impulzusok kölcsönhatását tanulmányoztuk. A fő célkitűzésünk olyan új, effektív módszerek kidolgozása volt, amelyekben lézerefény impulzusok koherensen adnak át mechanikai impulzust semleges atomoknak. Ezeket a módszereket kísérletileg alkalmaztuk hűtött és magneto-optikai csapdába fogott rubídium atomok mozgására anélkül, hogy közben fűtöttük volna az atomi sokaságot.

Ahhoz, hogy soknívós atomi rendszerek transzlációs állapotainak a koherens szabályozására effektív módszereket dolgozzunk ki, először az atomi populációk lézERSUGÁRZÁSSAL történő koherens szabályozását és az állapotok koherenciáját kell tanulmányoznunk. Első lépésként rövid, csörpölt lézerimpulzusok és Rb^{85} atomok koherens kölcsönhatását analizáltuk. Ezeknek a vizsgálatoknak a célja olyan effektív, egyszerű és robusztus módszer kidolgozása volt, amelyben a ^{85}Rb atom hiperfinom elektronikus alapállapotaiból a populáció átvihető az atom hiperfinom gerjesztett állapotainak a sokaságára, majd vissza az alapállapotokra csörpölt lézerimpulzus párokkal való kölcsönhatással.

Mivel el akartuk kerülni az atomok fűtését, amit a gerjesztett állapotok spontán bomlása okozhat, olyan (nem átlapoló) impulzuspárokkal dolgoztunk, amelyeknek a hossza, és a párokat formáló impulzusok közötti időtartam sokkal rövidebb, mint az atomi rendszer élettartama. Ennek a módszernek a korábban ismert eljárásokhoz képest az az előnye, hogy nem kell az atomokat először valamelyik alapállapotba pumpálni, mint például a stimulált Raman adiabatikus átmeneten (STIRAP) alapuló folyamatok esetében. Az atom csörpölt lézerimpulzusokkal történő effektív gerjesztése és legerjesztése csaknem érzéketlen folyamat az alapállapotok közötti kezdeti populáció eloszlásra.

A kölcsönhatást viszonylag rövid és viszonylag hosszú impulzusok tartományában vizsgáltuk. A rövid impulzusok esetében az impulzushoz tartozó frekvencialimitált sáv szélesség a hiperfinom nívók távolságának nagyságrendjébe esik vagy meghaladja azt, ezáltal összekeveri a nívókat. Ezt az esetet „szélessávú pumpálásnak” nevezzük. Ezzel ellentétben a rubídium atom két hiperfinom alapállapota fel van bontva a relatív hosszú impulzusok esetében, amikor a frekvencialimitált sáv szélesség viszonylag keskeny. Ezt az esetet „keskenysávú pumpálásnak” nevezzük. [1]

Megmutattuk, hogy a két alapállapotú hiperfinom nívó és a gerjesztett hiperfinom nívók sokasága között effektív populációátvitel valósítható meg csörpölt lézerimpulzusokkal a pumpálás bármelyik tartományában, beleértve a „keskenysávú” és „szélessávú” pumpálás esetét is, és akkor is, ha a lézerimpulzusok elég hosszúak ahhoz, hogy minden működő hiperfinom nívó, beleértve az alap- és gerjesztett nívókat is, fel van oldva.

A „szélessávú” pumpálás esetében, amikor a lézerimpulzus frekvencia sávszélessége meghaladja az alapállapotok közötti frekvencia különbségét, megmutattuk, hogy a populációátvitel az egyes gerjesztett nívókra függ a két alapállapot közötti kezdeti koherenciától. Például a destruktív kvantuminterferencia elronthatja az atomi populációátvitelt azokra a hiperfinom nívókra, amelyekről mindkét alapállapotra van átmenet. Ezzel szemben a populációátvitel növekszik ezekre a nívókra konstruktív interferencia esetében. Fontos azonban megjegyezni, hogy a két alapállapot kezdeti koherenciájától függetlenül van populációátvitel a két alapállapotról a gerjesztett állapotok sokaságára és vissza az alapállapotokra csörpölt impulzusok hatására.

Megmutattuk azt is, hogy effektív populációátvitel történik a „keskenysávú” pumpálás hatására akkor is, amikor az alapállapotú nívók fel vannak oldva, de a gerjesztett nívók nem.

Arra az esetre, amikor a csörpölt impulzusok elég hosszúak ahhoz, hogy minden hiperfinom nívó fel van oldva, a „felöltötött állapotok” analízisét és a Schrödinger egyenlet numerikus szimulációját végeztük el, amellyel megmutattuk, hogy populációátmenet történik a két alapállapotból a gerjesztett állapotokra és vissza az alapállapotokra, amikor a kölcsönhatásra az adiabatikus populációátvitel feltételei teljesülnek [1,2].

A Mathematica program alkalmazásával a 6 db működő átmenet sűrűségmátrix elemeire felírt Bloch egyenlet numerikus megoldásait vizsgáltuk, [1,2].

Az impulzus elég magas Rabi-frekvenciája esetén, valamint az eredetileg alapállapotban lévő ^{85}Rb atomok és a csörpölt lézer-impulzusok közötti kölcsönhatás miatt, az általunk végzett analízis alapján az következik, hogy az összes atom a gerjesztett állapotok között oszlik el, és az alapállapotban egy atom sem marad. Egy második, az atom gerjesztett állapotának idejénél sokkal rövidebb késéssel az atomra ható lézer impulzus visszaviszi az összes atomot az alapállapotába. Ezt hatékonyan lehet felhasználni a rubídiumhoz hasonló atomokból álló nyalábok koherens manipulációjára, pl: az atom az egymással ellenkező irányba haladó csörpölt lézerimpulzus párból a kölcsönhatás után $2\hbar k_p$ -nak megfelelő mechanikai impulzust (a lézer impulzus k_p hullámszámmal rendelkezik) nyel el. Az atomoknak a gerjesztési illetve relaxációs ciklusát megismételve egymással ellenkező irányú lézer-impulzus sorozattal, lehetővé válik a lézertérből mechanikai impulzust effektíven átadni a Rb atomoknak, és ezzel hatékonyan manipulálni az atomnyalábot. Ennek a rendszernek egy fontos előnye, hogy viszonylag nagy mechanikai momentumot lehet átadni a lézertérből elegendően sok kölcsönható lézerimpulzus segítségével az atomoknak. A lézerimpulzusok számát a lézerforrás impulzusainak ismétlődési frekvenciája és az atomok kölcsönhatási térfogaton való áthaladásának ideje határozza meg.

Ahhoz, hogy analizáljuk azokat a hatásokat, amelyek a Raman koherencia fázisát befolyásolják (Ld. [1]-es hivatkozás) a rubídium atom két hiperfinom alapnívója között, részletesebb analízist végeztünk egy egyszerűbb, Λ alakú nívószerkezettel rendelkező háromnívós modellel. (Ld. [3]-as hivatkozás). Ezt az analízist az u.n. “felöltötött állapotok” leírásmódban és a Bloch egyenletek numerikus szimulációjával végeztük.

A kölcsönhatást két tartományban vizsgáltuk:

- A transzformáció-limitált (csörp nélkül) lézer impulzus burkológörbéjének a sávszélessége keskenyebb, mint a két alapállapot közötti frekvencia távolsága (ez a keskenysávú pumpálás esete);
- Ez a sávszélesség nagyobb, mint a frekvencia különbség az alapállapotok között (szélessávú pumpálás esete).

A keskenysávú pumpálás esetében találtunk egy újfajta módszert a populáció átvitelre *egyetlen* frekvencia modulált lézer impulzussal a Λ alakú háromnívós rendszer két metastabil (alap) nívója között oly módon, hogy a populáció átvitel közben az atom nem gerjesztődik jelentős mértékben. A folyamat fizikájának a lényege, hogy az alapállapotok u.n. „sötét”

szuperpozícióját állítjuk elő a lézerimpulzussal, megfelelően nagy lézer csúcsintenzitással. Ez az effektus játszódik le, amikor a lézer impulzus csúcsértékéhez tartozó Rabi-frekvencia nagyobb, mint a Λ atom alapnívói közötti frekvencia különbség. A frekvencia csörp ideje alatt a lézer impulzusnak először azzal az átmenettel kell rezonanciába kerülnie, amelyik arról a nívóról indul, amelyiken a kiinduláskor az atomok elhelyezkednek, és ezután a második, kezdetben betöltetlen átmenettel.

Mivel az atom gerjesztése elhanyagolhatóan kicsi a keskenysávú frekvencia-csörpölt impulzussal való kölcsönhatás közben, az ilyen impulzus abszorpció nélkül haladhat keresztül a Λ atomok sokaságán. A numerikus számolások (Matlab program használatával) azt mutatják, hogy a frekvencia csörpölt impulzusok viszonylag hosszú távolságon terjedhetnek az atomok sokaságában anélkül, hogy az impulzus alakja változna. A Rb-atom Λ -atomnak feleltethető meg – két alapállapottal, ill. a gerjesztett hiperfinom nívók egyikével. Analizáltuk a frekvenciamodulált lézerimpulzus terjedését ilyen Λ -atomok együttesén át. Mivel az impulzus nem gerjeszti az atomokat, lehetséges a lézerimpulzus veszteségmentes terjedése. A terjedés numerikus szimulációjából azt kaptuk, hogy a terjedés e módja elegendően nagy intenzitású frekvenciamodulált lézerimpulzusok esetén válik lehetővé. A folyamat fizikájának lényege, hogy a lézerimpulzus vezető frontja a Λ -atom két alapállapotának sötét szuperpozícióját állítja elő, melynek következtében az atom kölcsönhatása a lézerimpulzussal megszűnik. Így az impulzus nagy távolságokat tehet meg energiavesztés nélkül. Az effektust *elektromágneses önindukált átlátszóságnak* neveztük el, (Ld. [4]-es hivatkozás).

A rendszer viselkedése alapvetően különböző a fentiekől a szélessávú pumpálás esetében: A lézer impulzus szétválasztja az alapállapotok „fényes” és „sötét” szuperpozíciójához tartozó populációkat azáltal, hogy a „fényes” szuperpozícióhoz tartozó populációkat átviszi a gerjesztett állapotba. Például, ha az atom kezdetben az egyik alapállapotban van, és az átmeneti dipólmomentum egyenlő a két alapállapotra, az atomok fele gerjesztett állapotba kerül, a másik fele egyenlő arányban oszlik meg a két alapállapot között. A következő, az előzővel megegyező tulajdonságú lézerimpulzus az összes atomot abban az alapállapotban gyűjti össze, amelyik kezdetben üres volt. Az eredmény tehát az, hogy két egymást követő lézer impulzus a Λ -atom teljes populációját átviszi az egyik alapállapotból a másikba. A szélessávú pumpálás esetében a kölcsönhatás eredménye attól függ, hogy milyen volt a Raman koherencia kezdeti fázisa a két alapállapot között. Ebből az következik, hogy atomi nyalábosztók és eltérítők készíthetők frekvencia csörpölt lézerimpulzusok sorozatával való kölcsönhatás alapján, attól függően, hogy milyen az alapállapotok közötti Raman koherencia, (Ld. [3]-as hivatkozás).

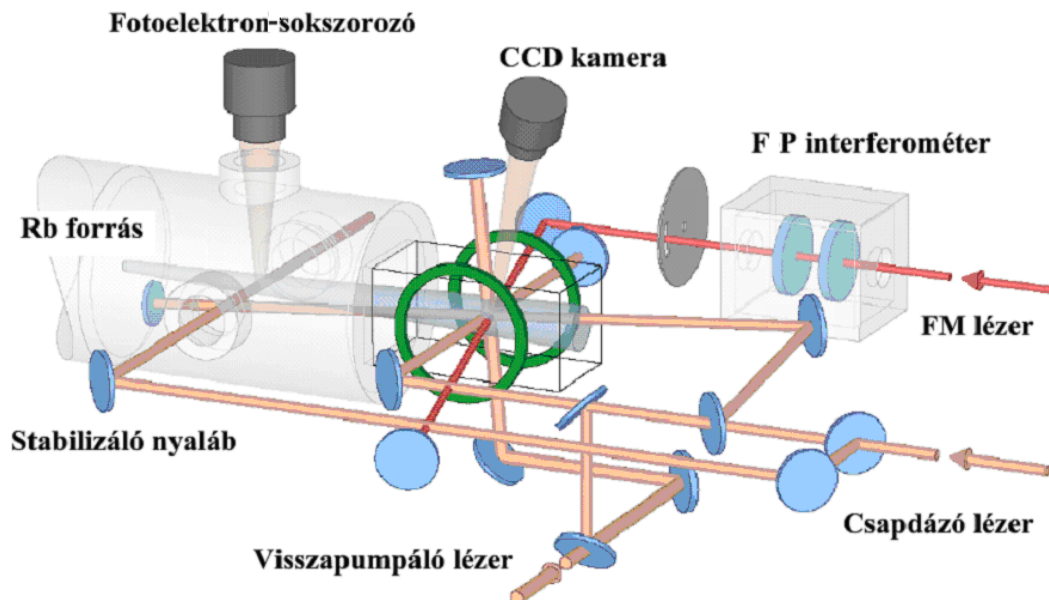
Az elméletünk eredményeinek ellenőrzéséhez kísérleteket végeztünk (lásd [1-3]-as hivatkozást), ^{85}Rb és ^{87}Rb -atomok viselkedését vizsgáltuk lineárisan csörpölt lézerimpulzusok által keltett térben.

A rubídium atomok $5S_{1/2}$ - $5P_{3/2}$ hiperfinom energiaszint rendszere volt a minta, amin tanulmányoztuk a kvantumállapotokat. Mivel a vizsgálataink fő célja csörpölt impulzusokkal való kölcsönhatás alapján atomi nyalábeltérítő és nyalábosztó készítése, olyan feltételekre alapozott modellt kerestünk, ahol a lehető legnagyobb mechanikai impulzust lehet átadni az atomoknak egymással szemben haladó lézer-impulzus párral [2,5]. Megjegyezzük, hogy a két ellenkező irányban haladó és az atomi közegben nem átlapoló lézer impulzus által átadható legnagyobb impulzus értéke $2\hbar k$, (egy foton impulzusának a kétszerese, ahol k a lézerfény hullámszáma), ez akkor következik be, ha az egyik lézerimpulzus teljes mértékben gerjeszti az atomokat, a szemben haladó pedig legerjeszti ugyanazokat az atomokat. Ld. [1]-es hivatkozás.

Laboratóriumunkban ^{85}Rb atomokat magneto-optikai módszerrel csapdáztunk. A csapda optikai elrendezése látható az 1. ábrán, kiegészítve az atomok manipulációjára használt további lézerrel. A keskenysávú, külső rezonátoros félvezető lézer fényét teleszkóppal és kompenzáló prizmapárral 1 cm átmérőjű, kör keresztmetszetű sugárrá formáltuk, majd nyalábosztó tükrökkel három, kb. azonos intenzitású nyalábra osztottuk. A lézer

teljesítménye 20 mW, 780 nm hullámhosszúság környezetében széles frekvenciatartományban hangolható. Ezeket a nyalábokat három, egymásra merőleges térkoordináta irányából arra a pontra irányítottuk, ahol elektro-mágneses tekerccsel anti-Helmholz-konfigurációban kialakított kvadrupól mágneses tér zéró térerősségű helye van. A mágneses tér gradiense kb. 30 Gauss/cm. Ezt a pontot a vákuumrendszerben az atomsugár iránya is keresztezi. Mindhárom lézernyaláb a kereszteződés után egy-egy tükörrel önmagába visszafordul. A lézernyalábokat $\lambda/4$ -es retardáló lemezekkel σ^+ , σ^- polarizációjú párokká formáltuk. A lézer frekvenciáját stabilizáltuk az $F=3 \rightarrow F'=4$ átmenet rezonanciája alatt néhány természetes sávszélességnyi frekvenciára, az atomsugarat a merőlegestől néhány fokkal eltérő szöggel keresztező, a lézertől kicsatolt gyenge nyaláb fluoreszcencia fényének felhasználásával. Ennek a stabilizáló nyalábnak az atomsugár tengelyével bezárt szöge határozza meg, hogy mennyivel hangoltuk az átmenet alá a lézer fényét, a mozgó atomokon történő Doppler-eltolódást figyelembe véve.

Az alkáli atomok hiperfinom spektrumszerkezete miatt a kísérletekben a csapdázó lézer mellett még egy lézere van szükség. Az atomok ugyanis a gerjesztett állapotból az alkáli atomokra jellemző mindkét alapnívóra le tudnak bomlani, emiatt hamar kikerülnek a kölcsönhatásból, vissza kell pumpálni őket a kiinduló nivóra. A ^{85}Rb esetében az optikai pumpálást végző lézernak a frekvenciája 3 GHz-cel magasabb a hűtő lézer frekvenciájánál. A visszapumpáló lézer fényét hozzákevertük a csapdázó nyalábok egyikéhez. A kialakult csapda fluoreszcencia fényét leképeztük egy képerősítőre, ennek kimeneti oldalát digitális CCD kamerával figyeltük meg, jelét PC vezérléssel elektronikusan rögzítettük és feldolgoztuk. A csapdázott atomok kb. 1mm átmérőjű gömb alakú térfogatban gyűltek össze. A fluoreszcencia jel kalibrálásából számolva kb. $10 \mu\text{K}$ hőmérsékletű, 10^7 darab atomot tudunk összegyűjteni, 500 ms csapda élettartammal. Az így nyert csapdázott atomokat világitottuk meg a kísérleti munka során a csörpölt impulzusokkal, és az indítható kamera segítségével rögzítettük a mérések során az atomfelhő elmozdulását a lézerimpulzusok hatására. Az így rögzített adatok feldolgozása után megkaptuk az elmozdulás mértékét egyirányú megvilágítás és egymással szemben haladó lézerimpulzus pár hatására, a lézerimpulzusok paramétereinek a függvényében, amelyekre szintén digitális adatgyűjtő és feldolgozó rendszert fejlesztettünk ki.



1. ábra: Magneto-optikai csapda kísérleti összeállítása

A kölcsönhatást létrehozó, egymással szemben haladó, frekvenciamodulált impulzuspárokat amplitúdó- és frekvenciamodulált lézerdióda fényéből a rubídium atom átmenetén maximális áteresztésű, rezonanciára hangolt Fabry-Perot interferométerrel alakítottuk ki.

Kísérleti berendezésünk segítségével vizsgáltuk, hogy az egymással szemben haladó impulzuspárok különböző méretű időbeli átfedése, a frekvencia-csörp sebessége hogyan befolyásolja az impulzusátadás határfokát, mekkora átfedés és csörp-sebesség optimális, figyelembe véve a kísérleti körülményeket ahhoz, hogy az atomoknak a legnagyobb mértékű impulzust lehessen átadni. Az elméleti tárgyalásban figyelembe vettük a gerjesztett rubídium atomoknak a lézer impulzus hatása alatt bekövetkező spontán relaxációját, (az élettartam 27 nsec, az impulzusok hossza a kísérleti körülményeink között 5 nsec), valamint a kísérletben alkalmazott másik, az ú.n. visszapumpáló lézer hatását, amelyik arra a célra szolgál, hogy visszajuttassa azokat az atomokat, amelyek spontán relaxációval „megszöknek” a vizsgált átmenetről a másik alaphívóra. Így a leírás messzemenőig figyelembe veszi a valós kísérleti viszonyokat, Ld. [2,5] hivatkozás.

A frekvencia-modulált lézerimpulzusok rubídium atomokkal való kölcsönhatásának numerikus modellezése alapján megállapítottuk, hogy a maximális mechanikai impulzusátadás időben átlapoló impulzusok esetében akkor következik be, ha a frekvencia változása elég gyors ahhoz, de még az adiabatikus tartományon belül marad, hogy az első impulzus az atomot teljes mértékben gerjeszteni tudja még azelőtt, hogy az atom legerjesztését végző, szembehaladó lézerimpulzus elérné az atomot [2,5].

A Rb-atomok lézerimpulzusokkal való kölcsönhatási idejének megnövelése érdekében magneto-optikai csapdát (MOT) használtunk, [2,5] mellyel összegyűjtöttük a MOT potenciálvölgyének mélységénél kisebb mozgási energiával rendelkező atomokat. Ennek segítségével sikerült nyalábeltérítőt készítenünk a Rb-nyaláb manipulálására, illetve csapdázására, valamint az atomfelhő gyorsítására és hűtésére [2,5]. Megmértük a MOT-ban összegyűjtött ^{85}Rb atomoknak az egymással ellentétes irányban terjedő, frekvenciamodulált lézerimpulzusok sorozatainak hatására bekövetkezett térbeli elmozdulását, a sorozat hosszának és a frekvencia csörp-sebesség függvényében. A mérési eredményeket összevetettük a számítógépes szimuláció eredményeivel, ld. [5]. A kölcsönhatás során az $5^2\text{S}_{1/2}\text{F}=3$ alap- és az $5^2\text{P}_{3/2}\text{F}'=2,3,4$ gerjesztett nívók között felváltva történik adiabatikus gerjesztés és legerjesztés. A ^{85}Rb -atomok elmozdulásának kiszámítása a MOT-ban fellépő súrlódási és visszatérítő erők figyelembevételével történik. Az ellentétes irányba haladó impulzus-sorozatok alkalmazása tette lehetővé számunkra az előzőleg a MOT-ban csapdázott, illetve lehűtött Rb atomfelhő koherens gyorsítását. Az ilyen gyorsítás egyik fontos specialitása, hogy az atomfelhő a folyamat során nem melegszik fel számottevően. Ilyen rendszereket lehet felhasználni intenzív, előre meghatározott transzlációs sebességű, u.n. koherens „mono-kinetikus” atomforrás gyanánt.

Míg a fentebb tárgyalt adiabatikus követés esetén a mechanikai impulzus, amelyet az egymással ellentétes irányokban terjedő impulzuspár az atomnak átad $2\hbar k$, az impulzusátadás hatékonysága igen alacsonynak tűnik, ha az átadott impulzus mértékét összehasonlítjuk a nagy intenzitású impulzuspár által hordozott mechanikai impulzus nagyságával. Felmerül a kérdés, hogy lehet-e és hogyan lehet ezt a hatékonyságot növelni, azaz egy szembehaladó fényimpulzus párból a $2\hbar k$ -nál több mechanikus impulzust átadni. Az egyik felmerülő lehetőség arra, hogy az átadott impulzus nagyobb legyen, mint $2\hbar k$, ha az egymással szembe haladó csörpölt impulzuspár tagjai *részben átfedik* egymást. Ez szerepel a [6]-os hivatkozásban ismertetett számításainkban: egy kétnívós atom nyerhet $2n\hbar k$ impulzust, ahol $n = 1,2,\dots$ a lézerimpulzusok intenzitásának és a köztük levő késési időnek a függvényében. Az ilyen kölcsönhatások fontos specialitása, hogy a lézertér diszperziós hatása az atomok sebességére sokkal kisebbnek mutatkozik az egymást *részben átfedő* impulzusok esetében, mint az átfedés nélküli esetben. Az atom a lézer-párral történő kölcsönhatás után az alapállapotában marad, ami azt bizonyítja, hogy a gerjesztett állapot spontán bomlása által okozott koherencia romlásra kevésbé érzékeny a folyamat.

Az elméletet igazolandó, megmértük az előzőleg lehűtött ill. MOT csapdába zárt ^{85}Rb atomfelhő elmozdulását egy kb. 5000 impulzuspárból álló, egymással ellentétes irányba haladó csörpölt impulzus sorozattal való kölcsönhatás után.

A kísérleti elrendezésünkben, az ellentétes irányban terjedő lézerimpulzusok a MOT-nak azon részén, ahol a Rb-atomok találhatóak, nem különültek el teljesen, hanem részben átlapolták egymást. Míg két különálló (nem átlapolódó) lézerimpulzus az atomnak maximálisan $2\hbar k$ mechanikai impulzust adhat át, egészen más a helyzet, ha az ellentétesen terjedő impulzusok átlapolódnak és állóhullám jön létre. Ekkor ugyanis az átlapolódó, egymással ellentétes irányban terjedő lézerimpulzusok által létrehozott állóhullámban többfotonos virtuális abszorpciós és stimulált emissziós folyamatok lépnek fel, melyek a $2\hbar k$ -t jelentősen meghaladó mechanikai impulzustranszfert eredményezhetnek [6,7]. Az atomfelhő kísérletileg megfigyelt elmozdulása jó egyezést mutatott az elméleti előjelzéssel a viszonylag lassú, és a viszonylag gyors frekvenciaváltozások esetében is. A két tartomány között a kísérleti elmozdulás kisebbnek mutatkozott az elméletileg előrejelzettnél. Ennek oka valószínűleg a sok hiperfinom energianívó szerepe a Rb atomban, amelyet a kétnívós atomot feltételező elmélet nem vett figyelembe [6].

Ez az eredmény igen fontos nagy eltérítési és nyalábosztási szögek eléréséhez atomi nyalábosztókban és – eltérítőkben is. A kísérleti eredmények arról tanúskodnak, hogy a lézerimpulzus csúcsintenzitásának és a modulációs (csörp) sebességnek léteznek optimális értékei, melyeknél a Rb-atomok elmozdulása maximális.

Hivatkozások

- [1]. G.P. Djotyan, J.S. Bakos, G. Demeter, P.N. Ignacz, M.A. Kedves, Zs. Sörlei, J. Szigeti, Z.L. Toth, „Coherent population transfer in Rb atoms by frequency-chirped laser pulses”, Phys. Rev. A , 68 (5): Art. No. 053409 (2003).
- [2]. G.P. Djotyan, J.S. Bakos, G. Demeter, P.N. Ignacz, M.A. Kedves, Zs. Sörlei, J. Szigeti and Z.L. Tóth, “Coherent interaction of frequency-modulated laser pulses with Rb atoms”. Acta Phys. Hung. B 20/3–4 167–176 (2004).
- [3]. G.P. Djotyan, J.S. Bakos, Zs. Sörlei, “Coherent control of atomic quantum states by single frequency-chirped laser pulses” Phys.Rev.A, 70, 063406 (2004).
- [4]. G.P. Djotyan, J.S. Bakos, G. Demeter, Zs. Sörlei, D. Dzsotjan and J. Szigeti. “Coherent Control of Quantum States By *Single* Frequency-Chirped Laser Pulses and Electromagnetically *Self-Induced* Transparency” Proc.of Int. Conf. CLEO/EQEC, Munchen, June 12-17,2005.
- [5]. J.S. Bakos, G.P. Djotyan, P.N. Ignacz, M. Á Kedves, M. Serényi, Zs. Sörlei, J. Szigeti and Z. Tóth: Interaction of frequency modulated light pulses with rubidium atoms in a magneto-optical trap, Eur. Phys. J. D v. 39, 59-66 (2006).
- [6]. G. Demeter, G. P. Djotyan, Zs. Sörlei, and J. S. Bakos. Mechanical effect of retroreflected frequency-chirped laser pulses on two-level atoms. Phys. Rev. A **74**, 013401 (2006).
- [7]. J.S. Bakos, G.P. Djotyan, G. Demeter, P.N. Ignacz, M. Á Kedves, Zs. Sörlei, J. Szigeti: Manipulation of cold Rb atoms by counter-propagating partially overlapping frequency-chirped laser pulses. Technical Digest of FRISNO-9 conference, Les Houches, France, 11-16 February 2007, p. Mo-P8.