

PhD értekezés tézisei

Magasrendű felharmonikus- és attoszekundumos impulzuskeltés makroszkopikus vizsgálata

Balogh Emeric

Témavezető:

Dr. Geretovszkyné Dr. Varjú Katalin

tudományos főmunkatárs



Fizika Doktori Iskola

Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék

Szegedi Tudományegyetem Természettudományi és Informatikai Kar

Szeged, 2014

Bevezető

A tudomány fejlődésében kiemelkedő szerepet játszik a természet alaptörvényeinek feltárása és minél pontosabb megismerése. A legelső törvények, amelyeket az ember felismert olyan jelenségeket magyaráztak, melyeket érzékszerveinkkel közvetlenül észlelni tudunk. A közvetlen érzékeléshez többek között az szükséges, hogy a folyamatra jellemző időskála az érzékszerveink sebességénél lassabb legyen: másodpercek, percek vagy akár évek alatt játszódjon le. A tudomány egyik legfőbb hajtóeleme az emberi kíváncsiság, ami oda vezetett, hogy megpróbáljunk olyan jelenségeket is megmagyarázni, melyek az emberi szem által közvetlenül nem észlelhető időtartamok alatt mennek végbe.

A gyors folyamatok tanulmányozásához olyan érzékelő berendezéseket kell gyártanunk, amelyek egyrészt képesek érzékelni és időben felbontani ezeket a folyamatokat, valamint képesek információt (pl. fényképet) rögzíteni a folyamat időbeli lefolyásának különböző fázisairól. A fényképezés alapjait képező tudás már a 19-edik század végén az ember rendelkezésére állt, és hamar kifejlesztették azokat az eszközöket, amelyek segítségével az emberi szem számára túl gyors jelenségekről pillanatképeket lehet készíteni. Gyors, egymás utáni pillanatképeket készítve és ezeket lejátszva végül elemezni lehet ezen jelenségek időbeli lefolyását. A pillanatkép készítésekor nagyon fontos, hogy a fényképet rögzítő érzékelőt csak nagyon rövid ideig érje fény, különben a gyors folyamat részletei elmosódnak.

Minél gyorsabb a vizsgálandó folyamat, annál gyorsabb pillanatképet készítő berendezésre van szükség. A mechanikus készülékek időbeli feloldását a mozgó alkatrészek tehetetlensége néhány mikroszekundumra korlátozza ($1 \mu\text{s} = 10^{-6} \text{ s}$). Az elektronikus készülékek akár nanoszekundumos ($1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$) vagy nagyon különleges berendezések pikoszekundumos ($1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$) időskálán játszódó folyamatokat is fel tudnak oldani.

Az ennél is gyorsabb folyamatok feloldását viszont csak optikai eszközökkel lehet megvalósítani, ahol a detektor sokáig készíti a képet, viszont a céltárgyat csak nagyon rövid ideig éri fény, így csak az a pillanat kerül rögzítésre, amikor a céltárgy meg van világítva. Az ilyen eszközök tehát nem gyors detektorokon, hanem nagyon rövid fényimpulzusokon alapulnak. Ezek időbeli feloldását a módusszinkronizált lézerek által keltett ultrarövid impulzusok jelentősen megnövelték, így már az ezredforduló előtt lehetővé vált a femtoszekundumos skálán lejátszódó folyamatok vizsgálata ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$). Mivel 1 fs alatt a fény is mindössze $0,3 \mu\text{m}$ távolságot tesz meg, nyilvánvaló, hogy az

ilyen eszközök ennél apróbb részecskék vizsgálatára alkalmasak. Ebben az idő- és mérettartományban az atomok molekulán belüli mozgása figyelhető meg, például disszociáció, izomerizáció vagy más kémiai folyamatok során, így az ezzel foglalkozó tudományág a femtokémia nevet kapta.

Ezen tudományág megalkotóját, Ahmed Zewailt 1999-ben Nobel díjjal tüntették ki, és a díjátadó ünnepségén kifejtette, hogy szerinte minden alkalommal, mikor az elérhető időfelbontást megnöveljük legalább két vagy három nagyságrenddel, várhatóan olyan jelenségeket fogunk felfedezni, amire előre nem is gondoltunk.

Tovább növelve az időfelbontást eljutunk az attoszekundumos tartományig ($1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$) és azokig a részecskékig, amelyek ezen a tartományon mozognak: az elektronokig. Az attoszekundumos skálán lejátszódó folyamatok tehát az elektron mozgásával kapcsolatosak, melyeket elsősorban a fény anyaggal való kölcsönhatása indít útnak. Ilyenek például a fotoionizáció, Auger bomlás, stb. Az ehhez hasonló folyamatok közvetlen, időbontott vizsgálatához attoszekundumos impulzusokra van szükség.

Tudományos előzmények

A Fourier tételt alkalmazva kimutatható, hogy egy 100 as hosszú impulzus előállításához majdnem 20 eV sávzélességű sugárzás szükséges. Mivel a hagyományos, látható vagy infravörös sugárzást kibocsátó lézerek központi hullámhossza 1-2 eV fotonenergiának felel meg, egyértelmű, hogy ezek nem alkalmasak attoszekundumos impulzusok keltésére. Az attoszekundumos tartomány eléréséhez legalább ultraibolya (UV), de lehetőleg extrém ultraibolya (XUV) vagy röntgensugárzás szükséges. Viszont a nagy sávzélesség önmagában nem elegendő rövid impulzusok előállításához. Ahogy a lézereknél is, a különböző frekvenciájú komponensek fázisának szinkronizálásával érhető el, hogy az impulzus a lehető legrövidebbre, a spektrum szélessége által korlátozottan csökkenjen. Ezek alapján nyilvánvaló, hogy az attoszekundumos impulzusok előállításához szélessávú, koherens XUV vagy röntgen-forrásra van szükség. Az XUV és röntgen tartományban koherens, szélessávú és fázisszinkronizált sugárzás forrása a lézerek által, szilárd felületen vagy gázokban keltett magasrendű felharmonikus sugárzás. Mindkét esetben erős, femtoszekundumos, infravörös impulzus kelti a sugárzást, a szilárd felületről visszaverődve, vagy a gázon áthaladva.

A szilárd felületen történő keltésnek az a legfontosabb előnye, hogy a használt lézertér intenzitásának nincsenek jelenleg ismert elvi korlátai, ezért a

keltett sugárzás nagyon intenzív lehet. A hátránya viszont az, hogy eleve csak igen nagy kontrasztú és nagy intenzitású lézerimpulzussal működik, ami tönkreteszi a felületet, ezért minden keltő impulzust „friss” felületre kell irányítani. Ezt általában a felület mozgatásával valósítják meg, ami instabillá teszi a visszavert nyalábot és korlátozza az ismétlési frekvenciát.

A gázokban keltett harmonikusok előnye az alacsony divergencia, jól kontrollálható fázis és jó térbeli koherencia. Ezek az előnyök, a keltő tér korlátozott intenzitása és a folyamat viszonylag alacsony határfoka ellenére, előtérbe helyezik ezt a módszert az attoszekundumos impulzusok keltésében és főként az alkalmazásában, így manapság az attoszekundumos impulzusok keltésének ez a legelterjedtebb módja. Ennek a disszertációnak a témája a magasrendű felharmonikusok (HOH) és attoszekundumos impulzusok keltésének vizsgálata gázokban, elsősorban numerikus módszerekkel. Az dolgozat első részében a folyamat tudományos hátterét mutatom be különös figyelmet fordítva azokra a módszerekre, amelyeket a későbbiek folyamán használni fogok. A második rész az általam elért új tudományos eredményeket foglalja össze.

Magasrendű felharmonikusok keltése gázokban

A magasrendű felharmonikus keltés (HHG) gázokban a következőképpen játszódik le: egy intenzív ($\sim 10^{14}$ W/cm² csúcshintenzitású) ultrarövid impulzust egy, vákuumba helyezett gázcellába vagy gáznyalábba fókuszálunk. A lézerimpulzus általában néhány(tíz) femtoszekundum hosszúságú és infravörös tartományba eső központi hullámhosszal rendelkezik, a gáz pedig rendszerint nemesgáz.

A nemesgáz használatának elsősorban azért van jelentősége, mert ezeknek nagy az ionizációs energiájuk és alacsony a nemlinearitásuk, így az erős lézertér is képes áthaladni rajta elkerülve az önfókuszálást és azt is, hogy a gázatomok teljesen ionizálttá váljanak. A lézertér és a gázatomok kölcsönhatása során páratlan rendű harmonikusok keletkeznek (az atomi rendszerek inverziós szimmetriával rendelkeznek, így páros rendű folyamatok általában nem jelennek meg). Az alacsonyrendű harmonikusok (3, 5, 7, stb.) intenzitása perturbatív törvény szerint csökken így a keltett spektrumot a harmadik harmonikus dominálja. Emiatt a keltett tér femtoszekundum hosszúságú impulzussorozatból áll.

A HOH-k intenzitása azonban közel azonos, ezért az alacsony harmonikusok kiszűrésével az effektív sáv szélesség jelentősen növelhető. Ezt a szűrést általában egy vékony (100-200 nm) fémszűrővel (Al, Zr, stb.) lehet

elvégezni. Az így keletkezett XUV nyalábot attoszekundumos hosszúságú (60-300 as) impulzusok sorozata alkotja.

Egy-atom modell

A HHG folyamatának alapja egyetlen atom szinten könnyen szemléltethető egy félklasszikus modellel. A lézertér a kezdetben alapállapotban lévő elektront optikai ionizáció során a kontinuumba kényszeríti, ahol ez, a lézer elektromos terében gyorsulva eltávolodik az atomtörzstől. Mikor a tér előjelet vált, az elektron visszajuthat az iontörzs közelébe és rekombinálódva az energiája kisugárzódik egyetlen nagyenergiájú foton formájában.

Az elektron pályáját klasszikus Newtoni mechanika törvényei alapján kiszámolva is egyértelművé válik, hogy minden optikai félciklusban két elektrontrajektória-csoport különböztethető meg, melyeket rövid illetve hosszú trajektóriáknak neveznek. A legmagasabb elérhető fotonenergia pedig a keltő tér intenzitásától és hullámhosszától függ és az $I_p + 3,17 U_p$ képlet alapján számolható ki (I_p az ionizációs energiát, míg U_p a ponderomotoros energiát jelöli). Mivel a keletkezett fotonok az elektrontól öröklik tulajdonságaikat, az elektronok visszatérési ideje meghatározza a keltett sugárzás csoportképletetését. A visszatérési időket elemezve kiderül, hogy a rövid trajektóriák pozitív, míg a hosszúak negatív csőrppel rendelkeznek (a vivőfrekvencia időben nő, illetve csökken).

Minél hosszabb az elektron trajektóriája, a keltett sugárzás tulajdonságai annál érzékenyebben változnak a keltő tér alakjától függően. Ez az érzékenység a harmonikusok fázisára is kihat, és az egyik jelentős következménye, hogy a hosszú trajektóriák által keltett sugárzás divergensebb, ezért egy írisszel nagyrészt kiszűrhető.

Egy-atom szinten a keltett HOH sugárzást a Lewenstein integrál segítségével lehet kiszámolni. Ez a Schrödinger egyenlet analitikus egyszerűsítése olyan esetekre, amikor a keltő tér erőssége összemérhető az egyetlen alapállapotú elektronra ható Coulomb tér erősségével, így az ionizáció és rekombináció között (mikor az elektron az iontörzstől távol van) az elektronra ható Coulomb tér elhanyagolható. Az integrál segítségével kiszámolhatjuk az atom lézertér által keltett dipól momentumát bármely pillanatban. Az időfüggő dipólmomentumból ezután megbecsülhetjük a dipólgyorsulást, ami egyben a keltett tér forrása is. Ennek a Fourier transzformáltjából megkapjuk a keltett harmonikus spektrumot,

ami spektrálisan szűrés és inverz Fourier transzformálás után megadja a keltett attoszekundumos impulzusokat.

A fázisillesztés feltételei

Mivel a HOH keltés folyamata kevesebb mint egy optikai ciklus alatt lejátszódik, és az atomok közötti távolság jelentősen nagyobb mint az elektron maximális kitérése, az elektron fázisát nem befolyásolják külső hatások (pl. ütközések) csak az iontörzs és a keltő elektromos tér tulajdonságai. Ennek eredménye, hogy a HHG egy koherens folyamat és a keltett sugárzás örökli a keltő lézertér tulajdonságait. A koherens folyamatokra jellemzően a keltett fotonok száma a kölcsönható részecskék számának négyzetével arányosan nőhet, amennyiben sikerül biztosítani, hogy a mérési ponton a részecskék által keltett sugárzások erősítsék egymást, vagy más szavakkal, hogyha a fázisillesztés feltételei biztosítottak.

A fázisillesztést befolyásolja a lézertér és a harmonikus tér fázissebességei közti különbség, és a lézertér intenzitásának térbeli eloszlása. Mivel a keltett harmonikusok a keltésre használt gázatomok ionizációs energiájánál nagyobb fotonenergiával rendelkeznek, a fázissebességük ebben a közegben nagyobb mint c . A keltő IR sugárzás frekvenciája viszont a legerősebb abszorpciós vonalak alatt helyezkedik el, így a fázissebessége mindig alacsonyabb mint c . Ennek következtében a fázisillesztés feltétele alapesetben nem teljesül.

A HHG során azonban mindenképp keletkeznek szabad elektronok is. A szabad elektronok alaptulajdonsága ez erős, negatív polarizálhatóság, így ezek jelentősen növelik az elektromágneses sugárzás fázissebességét. A szabad elektronok okozta törésmutatóváltozás (plazma-törésmutató) arányos a szabadelektron-sűrűséggel és négyzetesen nő a sugárzás hullámhosszával. Ennek következtében az IR tér fázissebességét jelentősen befolyásolja a gáz nyomása és az ionizációs fok, viszont az utóbbi az XUV fázissebességére alig gyakorol hatást.

Csupán az eddig említett hatásokat figyelembe véve az IR és XUV sugárzás fázissebessége összehangolható az ionizációs fok szabályozásával, amit a lézerpulzus hossza és intenzitása határoz meg. Mivel úgy a plazma, mint a semleges atomok okozta törésmutatóváltozás egyenesen arányos a részecskesűrűséggel, a megfelelő ionizáció mellett a fázissebességek megegyeznek, függetlenül a gáz nyomásától.

A fókuszált lézernyaláboknál a tér fázissebességét azonban befolyásolja a fókusz közelében fellépő fázisugrás is (Gouy fázis). Ez egy nyomástól független tagot hoz be a fázisillesztés egyenletébe, így a fázisillesztés egy adott fókuszálás és

ionizációs fok mellett csak jól meghatározott nyomáson teljesülhet. A helyzetet tovább bonyolítja a trajektória hosszától függő atomi fázis is, ami miatt a keltett harmonikus fázisa függővé válik a lézertér intenzitásától. Ez a tag növeli a keltett nemlineáris polarizáció effektív fázissebességét a fókusz előtt és csökkenti a fókusz után. Ennek a hatása viszonylag kicsi a rövid trajektóriák esetén, ezért sok fázisillesztési modellben elhanyagolják. Ez azzal indokolható, hogy adott fókuszálás mellett általában a Gouy fázisugrás sokkal nagyobb mértékű fázissebesség-változást okoz, így az dominálja a fázisillesztés feltételeit.

A fentiek alapján elmondhatjuk, hogy adott fókuszálás mellett a keltő tér Gouy fázisa okozta fázissebességnövekedés csak akkor kompenzálható, hogyha a keltő gázban a törésmutatóból adódó fázissebesség az IR térre alacsonyabb, mint az XUV-ra. Ez csak egy adott ionizációs fok alatt valósítható meg, ami határt szab a keltésre használt impulzus intenzitásának. Ez a határ az impulzus hosszától, központi frekvenciájától és az adott gáz tulajdonságaitól függ. Összességében elmondható, hogy a leggyakrabban használt 800 nm-es hullámhosszú, néhányciklusú impulzusokkal, argonban a legnagyobb megengedett IR intenzitás hozzávetőlegesen 70 eV energiájú fotonok keltésére elegendő, míg neonban ez a határ 120 eV környékén húzódik. Ezek az értékek azonban csak gyenge fókuszálás mellett közelíthetők meg a gyakorlatban használt gáznyomások mellett, az erősebb fókuszálás alacsonyabbra viszi a határokat.

Kvázi-fázisillesztés

A fázisillesztési határ feletti harmonikusok hatékonyan kelthetők kvázifázisillesztés (QPM) segítségével. HOH-k esetén a QPM megvalósítható például a keltett harmonikusok fázisának modulálásával, amit egy gyenge, a lézertől független, külső tér hoz létre. Ez a következőképpen képzelhető el: a keltett harmonikusok a fázissebességkülönbségek miatt csak egy korlátozott távolságon belül interferálnak konstruktívan. Ezután a hossz után a külső tér megváltoztatja a keltett harmonikusok trajektóriáját úgy, hogy π fázisugrást idézzen elő, így a következő térrészben ismét konstruktív interferencia jön létre. A következő cellarész végén a tér megszűnik, ismételen π fázisugrást okozva a keltett harmonikusoknál és a folyamat periodikusan ismétlődik, lehetővé téve, a részleges konstruktív interferenciát hosszú gázcellák esetén is.

Az ilyen típusú QPM azon a megfigyelésen alapszik, hogy egy gyenge külső tér a térerősséggel egyenesen arányosan modulálja a HOH-k fázisát így a fázismoduláció alakja követi az asszisztáló tér alakját. A fentebb leírt QPM megvalósítható például periodikus sztatikus elektromos tér jelenlétében, amely

négyszögjelszerűen modulálja a keltett HOH-k fázisát. Hasonló módon szinuszos tér is képes QPM-et létrehozni. Ez megvalósítható például egy, a keltő lézertérrel szemben, vagy arra merőlegesen haladó, aránylag gyenge elektromágneses hullámmal.

Háromdimenziós, numerikus modell

A HHG folyamán fellépő makroszkopikus hatások tanulmányozását az eddig összegzett, egydimenziós modellek jelentősen megkönnyítik, viszont a pontos leíráshoz háromdimenziós, numerikus modellek szükségesek. Az általunk használt modell, a hullámegyenlet megoldásán alapszik, paraxiális közelítésben.

A korábban említett Lewenstein integrál jól leírja a HOH keltés folyamatát, azonban a levezetésénél alkalmazott közelítések miatt nem alkalmas a gázatomok nemlineáris polarizációjának számolására alacsony frekvenciákon. A HOH keltés erőssége viszont nagyságrendekkel alacsonyabb a perturbatív folyamatok erősségénél, ezért a lézertér közegben való terjedése és a HOH keltés szétválasztható.

Ezek alapján a lézertér terjedése perturbatív szinten kezelhető, amennyiben figyelembe vesszük a keletkező plazma hatását. Ez megoldható az időfüggő ionizáció és az ehhez kapcsolódó időfüggő törésmutató kiszámolásával. Mivel ezek a mennyiségek nemlineárisan függenek a keltő tér erősségétől, a hullámegyenletet iteratív módon kell megoldani minden lépésben. A gázcella bemeneténél a teret egy Gaussz nyalábbal közelítve írjuk le, innen pedig a hullámegyenlet megoldásával propagáltatjuk tovább.

Az így kapott lézertérből a cella minden pontjában kiszámoljuk az egy-atom választ a Lewenstein integrált használva, majd megoldjuk a hullámegyenletet a harmonikus térre, az így kapott egy-atom választ tekintve a sugárzás forrásának, valamint az abszorpciót figyelembe véve. A dolgozat további részében kapott eredmények eléréséhez, a fentebb összefoglalt modelleket és módszereket alkalmaztam.

Eredmények

T1.a A THz tér jelenlétében keltett magasrendű felharmonikus tulajdonságainak vizsgálatával kimutattam, hogy a THz impulzus jelenléte jelentősen megnöveli az elérhető levágási energiát, csökkenti az impulzusok GDD-jét, valamint felerősíti a rövid trajektóriákból származó sugárzást a hosszúakhoz képest. A trajektóriák hosszának változása mellett az ionizáció pillanatában jelen

levő - az eltolódott ionizációs idők miatt - erősebb elektromos tér is hozzájárul a rövid trajektóriák felerősödéséhez.

T1.b Megvizsgáltam a folyamat során jelentkező makroszkopikus hatásokat és kimutattam, hogy ezek lehetővé teszik a hosszabb infravörös impulzusokkal (8, 10 vagy akár 12 fs) való izolált attoszekundumos impulzusok keltését. Ezekben az esetekben az egy-atom modellek impulzussorozatot jósolnak, viszont a makroszkopikus- fázisillesztési - hatások meggátolják az impulzusok felerősödését a lézertér egyes félciklusaiban.

Kimutattam továbbá, hogy a keltés során a sugárzás megtisztul a hosszú trajektóriákból származó komponensektől, aminek hatására a keltett attoszekundumos impulzus hossza is lerövidül. Ez ígéretessé teszi a vizsgált módszert izolált attoszekundumos impulzusok hatékony keltéséhez. Igazoltam, hogy a paraméterek (mint pl. gáznymomás, lézertenzitás) megfelelő megválasztásával és a spektrális szűrés hangolásával rövid izolált attoszekundumos impulzusok kelthetők utólagos impulzuskompresszió nélkül is.

T2.a Vizsgáltam a fókuszálási hatások szerepét a THz tér jelenlétében keltett HOH-k fázisillesztésére, valós, kísérletileg igazolt THz impulzusok paramétereit használva. Kimutattam, hogy a limitált THz impulzusenergia ellenére, a legintenzívebb izolált attoszekundumos impulzus relatív gyenge fókuszálás mellett hozható létre. Ezt a hatást elsősorban a hosszú hullámhosszú tér erős fókuszálása által okozott fázisillesztés-romlásnak tulajdonítottam.

T2.b Kimutattam, hogy az asszisztáló tér alkalmas arra, hogy a fázisillesztést szelektíven javítsa rövid vagy hosszú trajektóriák esetén. A szelektíót a lézer és asszisztáló tér közötti időkésleltetés változtatásával lehet elérni és ezzel a keltett impulzus GDD-jének előjele is változtatható.

T3.a Előterjesztettem egy – további optimalizálásban alkalmazható – modellt, amely a Lewenstein integrál korlátolt időtartományon való alkalmazásán alapul. Makroszkopikus számolásokat alkalmazva kimutattam, hogy ez a modell részben alkalmas az attoszekundumos impulzusok keltésénél jelentkező makroszkopikus hatások előrejelzésére. Értelmeztem a duplaimpulzus-keltés két különböző mechanizmusát (egymás utáni félciklusokból, valamint rövid-hosszú trajektóriapárokból keletkezhetnek duplaimpulzusok).

T3.b Makroszkopikus számolásokkal modelleztem az optimalizált lézerterek által keltett attoszekundumos impulzusok tulajdonságait és kimutattam, hogy az egy-atom szinten elért impulzusrövidülés makroszkopikus környezetben is megmarad. Kimutattam továbbá, hogy Gausszos keltő nyaláb használatakor a harmonikus nyaláb térbeli szűrése elengedhetetlen a rövid attoszekundumos

impulzusok előállításához. Ezen felül, a számolásaim azt mutatják, hogy a rövid és hosszú trajektóriárokából keltett duplaimpulzusok megvalósítása, a hatékonyság szempontjából előnytelen makroszkopikus paraméterek megválasztása mellett lehetséges.

T4.a Kidolgoztam egy módszert, amely segítségével a gyenge asszisztáló tér által okozott fázismoduláció amplitúdója meghatározható a keltő és asszisztáló tér valamint az elektron-trajektóriák paramétereinek függvényében. Tárgyaltam az összefüggéseket azon esetek között, mikor az asszisztáló és keltő tér hullámhossza megegyezik, és mikor ezek különbözőek és kimutattam, hogy a fázismoduláció amplitúdója a két esetben hasonló módszerrel számolható ki, mindössze egy korrekciós faktor bevezetése szükséges, mely a két tér relatív hullámhosszával jellemezhető.

T4.b Elemeztem a kvázi-fázisillesztési módszerek hatékonyságának sávzélességét, és kidolgoztam egy közelítő, analitikus képletet ennek a meghatározására. Kimutattam, hogy fázismoduláció trajektóriafüggése nem korlátozza jelentősen a sávzélességet, olyan esetekben, mikor a QPM módszer nagyszámú periódusra alkalmazott. Ezekben az esetekben a sávzélesség független az asszisztáló tér alakjától. Kimutattam, hogy a trajektóriák közti interferencia jelentősen befolyásolja a kvázi-fázisillesztés hatékonyságának finomszerkezetét. Tárgyaltam az asszisztáló tér optimális nyalábkeresztmetszetét és rámutattam, hogy ez különbözik rövid és hosszú trajektóriák esetén. A rövid trajektóriák kvázi-fázisillesztésénél előny, hogy a keltés abban az esetben optimális, mikor az asszisztáló és keltő tér nyalábkeresztmetszete közel azonos.

T4.c Egy-dimenziós modellt használva kiszámoltam, hogy a lézertérre merőlegesen terjedő tér alkalmas a harmonikusok keltés hatékonyságának növelésére, a fázisillesztési határnál magasabb fotonenergiájú harmonikusokra is. Kiszámoltam a használandó THz tér optimális amplitúdóját, mely alapján 3D modellszámolások igazolták a THz terek kvázi-fázisillesztésének hatékonyságát. Egy esettanulmányban több mint két nagyságrendnyi hatékonyságnövekedést mutattunk ki a levágási fotonenergia környéki harmonikusokra. Csörpölt THz-es impulzusok használatával további növekedést lehet elérni.

T5 Részt vettem egy kísérletsorozatban mely során attoszekundumos csoportképletetés változását mértük a keltő gázcellában uralkodó nyomás függvényében. Azt találtuk, hogy a nyomás növekedésével az attoszekundumos impulzussorozat csoportképletetése csökken, melyet egy egy-dimenziós modellszámolás is alátámaszt. Ez alapján kimutattuk, hogy az attoszekundumos pumpa-próba kísérletekben, a képletetés stabilitásának megőrzése érdekében, az optikai úthossz mellett, a keltő cellában a gáznyomást is állandóan kell tartani.

Publikációk

A tézispontokhoz kapcsolódó, referált folyóiratokban megjelent

publikációk listája:

[T1.a] E. Balogh, J. A. Fülöp, J. Hebling, P. Dombi, Gy. Farkas, K. Varjú, *Application of High Intensity THz Pulses for Gas High Harmonic Generation*, Central European Journal of Physics **11**, 1135 (2013)

[T1.b] E. Balogh, K. Kovacs, P. Dombi, J.A. Fulop, G. Farkas, J. Hebling, V. Tosa, and K. Varju, *Single attosecond pulse from terahertz-assisted high-order harmonic generation*, Physical Review A **84**, 023806 (2011)

[T2] Emeric Balogh, Katalin Kovács, Valer Toşa and Katalin Varjú, *A case study for terahertz-assisted single attosecond pulse generation*, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **45**, 074022 (2012)

[T4] Katalin Kovács, Emeric Balogh, János Hebling, Valer Tosa, and Katalin Varjú, *Quasi-phase-matching high-harmonic radiation using chirped THz pulses*, Physical Review Letters **108**, 193903 (2012)

[T5] D. Kroon, D. Guénot, M. Kotur, E. Balogh, E. W. Larsen, C. M. Heyl, M. Miranda, M. Gisselbrecht, J. Mauritsson, P. Johnsson, K. Varjú, A. L'Huillier, and C. L. Arnold, *Attosecond pulse walk-off in high-order harmonic generation*, Optics Letters **39**, 2218, (2014)

A tézispontokhoz kapcsolódó konferenciakiadvány:

[T4] K. Kovács, E. Balogh, J. Hebling, V. Toşa, and K. Varjú, *Quasi-phase-matching high-harmonics with THz assistance*, AIP Conference Proceedings **1462**, pp. 41-44 (2012)

Elbírálás alatt levő publikációk:

[T3] E. Balogh, B. Balazs, V. Tosa, E. Goulielmakis, P. Dombi, and K. Varju. *Genetic optimization of attosecond pulse generation in light-field synthesizers*, elbírálás alatt

[T4] E. Balogh and K. Varjú. *Quasi-phase-matched high-order harmonic generation by low-intensity assisting fields: field strength scaling and bandwidth*, elbírálás alatt