

# Kettős impulzusok karakterizálása és alkalmazásuk az attoszekundumos fizikában

DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

*Szerző:*

**Gulyás Oldal Lénárd**

*Témavezető:*

**Major Balázs**

TUDOMÁNYOS FŐMUNKATÁRS

Extreme Light Infrastructure - Attosecond Light Pulse Source



FIZIKA DOKTORI ISKOLA

OPTIKAI ÉS KVANTUMELEKTRONIKAI TANSZÉK

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM

TERMÉSZETTUDOMÁNYI ÉS INFORMATIKAI KAR

SZEGED

2021

## Bevezetés

A fény nélkülözhetetlen kísérője életünknek, mégsem érinthetjük meg közvetlenül. A fénynek köszönhetően érzékeljük a tárgyakat, élőlényeket, vagy éppen embertársainkat, más szóval, hogy látunk. A fény az alapvető természeti elemek közé tartozik, akárcsak a víz vagy az oxigén, azonban ez nem lételeme életünknek. A fény valójában elektromágneses sugárzás, amelynek közvetítő részecskéi a fotonok. Az ilyen sugárzásokat legegyszerűbben a közvetítő fotonok frekvenciájával, vagy az ennek megfelelő hullámhosszal jellemezhetjük. Egyszerűen fogalmazva, a széles színeképet lefedő elektromágneses sugárzások más és más „színű” fotonokat jelentenek, amelyek színük alapján különböző alcsoportokba sorolhatók.

Biológiai evolúciója során az emberi szem, pontosabban a retina, oly módon fejlődött, hogy csak bizonyos hullámhossztartományból képes érzékelni a fotonokat. Az elektromágneses színeképe tartományát nevezük „látható fénynek”. Szemünk a látható tartományon kívül eső sugárzásokra teljesen érzéketlen, ami veszélyt is hordozhat magában, mivel olyan sugárzások érhetik szervezetünket, amelyekről nincs tudomásunk. Ilyen sugárzások érkezhetnek a világűrből, például a Napból is, azonban a Föld több mint 10 km vastagságú légköre ezeket a sugárzásokat elnyeli. Az elektromágneses sugárzások széles spektrális tartományt fednek le a néhány pikométer hullámhosszúságú kozmikus és gamma-sugaraktól, a röntgen- és látható sugárzásokon keresztül egészen a méteres hullámhosszúságú rádióhullámokig. Bár szemünk e sugárzások nagy részét nem érzékeli, számos jól ismert alkalmazási területük van. Idesorolhatók az orvosi képalkotó eszközök, a hőkamerák, a vezeték nélküli internethálózatok, vagy éppen a mobiltelefonok, amelyek mindannyiunk életének szerves részét képezik.

Elektromágneses sugárzást kibocsátó eszköz a lézer is, amely elnevezés egy angol mozaikszóiból ivódott be a mindennapi szóhasználatba (Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation – LASER). Bár a lézerek elektromágneses hullámokat bocsátanak ki, sugárzásuk

jellemzői nagyban eltérnek a korábban említett alkalmazásokétól. Emiatt széleskörű felhasználásnak örvendenek: például nyomtatókban, vonalkód leolvasó készülékekben, az autópárházban, vagy akár érrendszeri és látószervi műtétek során hasznosítják őket. A lézerfotonok színe mellett a lézerek a kibocsátott sugárzás időbeli jellemzői alapján is osztályozhatók. Ennek alapján léteznek folytonos hullámot, és impulzussorozat kibocsátó rendszerek. Míg az első csoportba tartozókat fémmegmunkálásra használják leggyakrabban, addig az impulzuszézerek legfőbb alkalmazási területe az ultragyors folyamatok kísérleti tanulmányozása, mivel az impulzusok hossza elérheti a femtoszekundumos nagyságrendet ( $1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$ ). Ez azt jelenti, hogy rendelkezésünkre áll a másodperc egymilliárdod részének az egymilliomod részének megfelelő hosszúságú sugárzás. Ezáltal olyan folyamatok válnak vizsgálhatóvá, mint például a töltésmozgások. Azonban figyelembe véve a fotonok színét is, a sugárzás időbeli hossza nem lehet rövidebb, mint egy teljes optikai ciklus az adott hullámhosszon, ami fizikai korlátot szab a sugárzások minimálisan elérhető időbeli hosszának.

Emiatt a tudósok kidolgoztak egy olyan módszert, az úgynevezett magasrendű felharmonikus-keltést, amellyel az ultraibolya tartományban szélessávú, koherens sugárzás állítható elő. A módszer a femtoszekundumos lézerforrásokat hasznosítja, és a meghajtó lézer sugárzásának nemlineáris frekvenciakonverzióján alapul. Így rövidebb hullámhosszú, azaz nagyobb frekvenciájú sugárzás állítható elő, mint a meghajtó lézeré, így átléphető a látható tartománybeli impulzusok időbeli hosszának korlátja. Ennek köszönhetően attoszekundum ( $1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$ ) hosszúságú impulzusok állíthatók elő, ami utat nyit olyan ultragyors folyamatok vizsgálatához, amelyek *as* időtartam alatt játszódnak le, mint például az elektronmozgások, vagy más atomi és molekuláris folyamatok.

## Tudományos előzmények

A következő fejezetben részletes áttekintést adok a femtoszekundumos lézerimpulzusok legfontosabb jellemzőiről, bemutatok egy lézerimpulzus rekonstruáló módszert, és ismertetem a lézerimpulzusok egyik kísérleti alkalmazását, a magasrendű felharmonikus-keltés folyamatát.

### Ultrarövid lézerimpulzusok leírása

Az ultrarövid lézerimpulzusok matematikai leírása során a Fourier-transzformáció adja meg a kapcsolatot a komplex elektromos tér és a komplex spektrum között. Az egyszerűbb matematikai kezelhetőség érdekében érdemes a spektrális amplitúdót pozitív és negatív frekvenciakomponensekre bontani, valamint az elektromos teret valós összefüggések felhasználásával (valós időfüggő amplitúdó és fázisfüggvény) kifejezni. A spektrális amplitúdó spektrális összetevői leggyakrabban egy jól meghatározott körfrekvencia-érték köré összpontosulnak, amelyet központi körfrekvenciának nevezünk. E körfrekvencia-érték és a komplex időbeli burkoló felhasználásával, ami a valós időbeli burkoló és az időfüggő fázissal írható fel, kifejezhető az elektromos tér. Ezáltal a lézerimpulzus elektromos terének összefüggése olyan alakra hozható, amely matematikailag egyszerűbben kezelhető, és könnyen kiolvashatók az ultrarövid lézerimpulzusokra ható fő fizikai hatások.

Például egy lézerimpulzus időbeli alakjára ható torzító hatások a fázissal vannak szoros összefüggésben. Ezek jellemzéséhez a fázist Taylor-sorba szükséges fejteni a központi körfrekvencia körül, amely sorfejtésben az egyes fázisderiváltak mind különböző impulzustorzító hatást írnak le. Ilyen például a vivő-burkoló fázis (CEP – Carrier-Envelope Phase), ami a burkoló maximuma és az elektromos tér maximuma közötti fáziskülönbséget írja le, és a csoportkésettetés (GD – Group Delay), amely a lézerimpulzust időben eltolja, viszont az alakját nem torzítja. Ezek közé tartozik még a csoportkésettetés-diszperzió (GDD – Group

Delay Dispersion), amely megnyújtja az impulzust és változtatja a pillanatnyi frekvenciát, valamint a harmadrendű diszperzió (TOD – Third-Order Dispersion), aminek legjelentősebb hatása, hogy mellékimpulzusokat eredményez a fő impulzus mellett, csökkenő intenzitással. Ezeket az impulzustorzító hatásokat egy hiteles kísérlet elvégzése előtt mindenképp szükséges meghatározni, különben a kívánt eredmények nem lesznek kimutathatók, vagy eltérő végeredményre juthatunk.

A fent említett impulzustorzító hatások mellett számos kísérleti alkalmazás során megjelenhetnek úgynevezett kettős impulzusok is, amelyek olykor pozitív, olykor negatív hatással vannak egy adott kísérlet végkimenetelére. Matematikai szempontból az egy impulzusra vonatkozó összefüggések alkalmazhatók rájuk. Kettős impulzusok esetében az alkotó impulzusok spektrális interferenciája miatt a spektrális amplitúdó változik a két impulzus közötti késleltetés változtatásával. Emellett, ha a késleltetés nagysága az impulzus időbeli hosszával összemérhető, akkor az impulzusok között nem csak spektrális, hanem időbeli interferencia is megfigyelhető, ami összetett intenzitáseloszlást eredményez az elektromos térerősségben.

Ilyen és hasonló intenzitáseloszlások időbeli burkolójának meghatározásához számos impulzusrekonstruáló módszer áll rendelkezésre. Közülük a legelterjedtebbek a frekvenciabontott optikai kapuzás (FROG – Frequency Resolved Optical Gating), a spektrális fázisinterferometria az elektromos tér közvetlen visszanyeréséhez (SPIDER – Spectral Phase Interferometry for Direct Electric field Reconstruction) és az önreferenciás spektrális interferometria (SRSI – Self-Referenced Spectral Interferometry) technikák. Ezek közül az SRSI módszert ismertetem részletesen a következő szakaszban, mivel az SRSI technika részletesebb bemutatása nélkülözhetetlen az eredményeim maradéktalan megértéséhez.

## **Önreferenciás spektrális interferometria**

Az önreferenciás spektrális interferometria olyan impulzuskaraktizálási módszer, ami az ismeretlen impulzus méréséhez szükséges refe-

renca-impulzust leggyakrabban keresztpolarizált hullám (XPW – Cross-Polarized Wave) keltésével állítja elő. Az XPW egy harmadrendű, frekvencia-megőrző, nemlineáris folyamat, ami különösen érzékeny a keltő impulzus polarizációs állapotára, ezért a mérési elrendezésnek tartalmaznia kell egy bemeneti polarizátort, ami biztosítja a lineáris polarizációt. A méréshez szükséges két impulzust egy kettőstörő ömlesztett kvarclemes állítja elő, ami után az impulzusok egymásra ortogonálisan polarizáltak, és  $\tau$  késleltetés lép fel közöttük. Terjedési irányuk kollineáris. Ezután az XPW referencia-impulzus keltése egy  $BaF_2$  kristályban történik a p-polarizált hullámmal, míg az s-polarizált hullám változatlanul keresztülhalad a kristályon. Ezt követően egy kimeneti polarizátor biztosítja, hogy a mérendő és a referencia-impulzusok azonos polarizációs állapottal rendelkezzenek. Végül a két impulzus interferencia-mintázatát, azaz a spektrális interferogramot egy széles spektrális sáv- szélességű spektrométerrel rögzítjük, amely interferogram magában hordozza az ismeretlen impulzus rekonstrukciójához szükséges információt.

A spektrális interferogram kiértékelésének első lépése, hogy inverz Fourier-transzformáljuk a kapott jelet. Ezáltal megkapjuk az időbeli interferogramot, ami három, jól elkülöníthető csúcsból áll. Egy a 0 fs késleltetésnél, és további egy-egy a pozitív és negatív  $\tau$  késleltetési értékeknél adódik. Numerikusan szűrve a 0 fs és  $+\tau$  késleltetéseknél megjelenő jelet, és egyenként Fourier-transzformálva őket, mind a mérendő, mind a referencia-impulzus spektrális amplitúdója felírható a kapott jelek felhasználásával egy-egy analitikus formulában. Azonban az impulzusok maradéktalan időbeli rekonstrukciójához szükség van a spektrális fázisok meghatározására is, amit egy iterációs algoritmus segítségével nyerhetünk ki a spektrális interferogramból. Az algoritmus bemeneti változói a korábban megkapott spektrális amplitúdók. Továbbá a kezdeti fázisra szükséges egy becslést adni, ami szintén megtehető az interferogram tanulmányozásával. Az algoritmus minden ciklusban enyhén módosítja a bemeneti fázist, ami konvergál a végső fázishoz, majd néhány iterációt követően a végső spektrális fázis kinyerhető, ami szükséges az

impulzus teljes időbeli rekonstrukciójához.

Azonban ez az iteratív algoritmus pontatlanul nyeri vissza a kettős impulzus struktúrához tartozó spektrális fázist, mivel ebben az esetben a fázis hirtelen fázisugrásokat, vagy akár szakadásokat tartalmaz azoknál a pontoknál, ahol a spektrális amplitúdó zérusra csökken a két impulzus spektrális interferenciája miatt. Ez nem folytonos spektrális fázist eredményez, amelynek meghatározása kihívást jelent a fázist kinyerő iteratív algoritmus számára.

## **Magasrendű felharmonikus-keltés**

Ahogy az már a Bevezetés részben említettem, a magasrendű felharmonikusok keltéséhez (HHG – High-order Harmonic Generation) femtoszekundum hosszúságú impulzusokat kibocsátó lézereket alkalmaznak. A folyamat során a meghajtó lézer sugárzásának nemlineáris frekvenciakonverziója történik, ezáltal szélessávú, koherens, extrém ultraibolya sugárzás állítható elő. Az előállított sugárzás spektrumában a keltő lézer spektrumának páratlan számú többszörösei jelennek meg a folyamat szimmetria-tulajdonságai miatt. Ezeket a spektrális csúcsokat nevezzük harmonikusoknak, amelyek a spektrumban egyenlő, adott fotonenergiával jellemezhető távolságra helyezkednek el egymástól. Távolságuk a keltő lézer központi frekvenciájának kétszerese, ezért a harmonikusok központi fotonenergiája nem változtatható önkényesen és egyszerűen, mivel ezt a tulajdonságot a meghajtó lézer határozza meg.

A HHG folyamatot legegyszerűbben a háromlépcsős modell segítségével érthetjük meg. A modell három egyszerű lépésben írja le a harmonikusok keltésének folyamatát: (1) Első lépésben a feltételezett atomi Coulomb-potenciál alakját az erős lézertér oly módon torzítja, hogy az addig kötött, azaz egy potenciálvölgyben elhelyezkedő elektron képes alagutazás útján szabaddá válni. Ezáltal az elektron mozgására az atomi potenciál már nincs hatással, a mozgást csak a lézer elektromos tere befolyásolja. (2) A lézertér az elektront gyorsítja, és mozgása során energiát nyer a tértől. A tér irányának megfordulásával az elektron mozgása az ionizált mag felé irányul. (3) A maghoz közeledve az elektron újra

egyesül az ionizált atommaggal, majd ezzel egyidejűleg a lézer terétől szerzett többletenergiát egy nagy energiájú ultraibolya foton formájában kisugározza. Ez a három lépés a meghajtó lézertér minden félciklusában megtörténik, amelyek végeredménye a szélessávú extrém ultraibolya sugárzás. A HHG folyamat legfőbb tulajdonságai a háromlépcsős modellel jól szemléltethetők, és a harmonikus spektrum főbb jellemzői egyszerűen magyarázhatók. A harmonikus-keltés alaposabb vizsgálatához azonban kvantummechanikai megközelítés szükséges.

Ahhoz, hogy a kvantummechanikai hatásokat tárgyalni tudjuk, az időfüggő Schrödinger-egyenletet kell megoldani. Azonban ennek numerikus megoldása nem egyszerű, a számolás még egydimenziós modellt feltételezve is rendkívül időigényes. A számolások jelentősen egyszerűsíthetők az úgynevezett erős tér közelítés alkalmazásával, ami a következő feltételezéseket jelenti: (i) A lézer-anyag kölcsönhatás során a gerjesztett állapotok hozzájárulása elhanyagolható, és csak az atom alapállapota játszik szerepet az ionizációs folyamatban. (ii) Az alapállapotú elektronok energiaszintjének populációja kimeríthetetlennek tekinthető. (iii) A kiszakított elektron szabad részecskeként vizsgálható, és csak a lézertér hat a mozgására. A Coulomb-potenciál hatása ekkor elhanyagolható. E közelítéseket alkalmazva analitikusan felírható az egyatomi dipól spektrum, amelyet Lewenstein és munkatársai vezettek be először, ezért Lewenstein integrálnak nevezünk. A Lewenstein integrál könnyen kiszámítható, így a HHG folyamat a kvantummechanikai jelenségek figyelembevételével is tanulmányozható.

## Eredmények

I. Egy korábban kifejlesztett femtoszekundumos impulzuskaraktizálási módszert, az SRSI technikát fejlesztettem tovább oly módon, hogy rekonstruálhassuk a femtoszekundumos kettős impulzusokat. Megmutattam, hogy az időbeli interferogram manipulálásával egy korrekciós tagot kaphatunk a spektrális fázis pontosabb meghatározásához. A ki-



nyert fáziskorrekción tag és az eredeti algoritmussal kapott fázis kombinálásával egy pontosabb spektrális fázis nyerhető a teljes impulzusrekonstrukcióhoz. A javított módszer pontosságát szimulációkon keresztül ellenőriztem, valamint sikeresen rekonstruáltam a kísérleti úton elő- állított kettős impulzusok időbeli alakját. Továbbá meghatároztam az eredeti algoritmus és a javított módszer által szolgáltatott eredmények eltérését a várt spektrális fázistól, amellyel kvantitatív módon megmutattam a technika javulásának mértékét széles amplitúdótartományt vizsgálva [T1].

**II:** Elméleti síkon vizsgáltam a kettős impulzus struktúra hatását a magasrendű felharmonikus-keltés folyamatára. Javasoltam ezen elektromos tér felhasználását a magasrendű felharmonikusok spektrális jellemzőinek szabályozására. A számolásokkal bemutattam, hogy a harmonikusok központi fotonenergiája közvetlenül hangolható, és hogy az energia-hangolási tartomány szélesedik növekvő harmonikus renddel. Ezenkívül megmutattam, hogy a keltett felharmonikusok spektrális beszűkülése elérhető a két interferáló meghajtó impulzus közötti késleltetés növelésével is [T2].

**III:** Sikeresen állítottam elő kísérletileg kettős impulzusokat nem kollimált elrendezésben egy egyedi gyártású osztó-késleltető elem felhasználásával. Megmutattam, hogy az előállított elektromos térrel generált magasrendű felharmonikusok öröklik a keltő lézer spektrumának központi körfrekvenciájának változásait, ezáltal a magasrendű felharmonikusok központi fotonenergiája szabályozható a két meghajtó lézermimpulzus közötti késleltetés változtatásával. Bemutattam, hogy egyes felharmonikusok hangolási tartománya elérheti a meghajtó lézertér fotonjainak fotonenergia-értékét. Ezenkívül a méréseimmel kimutattam, hogy a keltő lézer késleltetésfüggő spektrális sáv szélessége megjelenik a generált magasrendű felharmonikusok spektrális sáv szélességének alaku-

lásában. A méréseimmel rávilágítottam arra, hogy a lézerforrásból származó egyetlen impulzus spektrális alakjától függetlenül a generált harmonikusok spektrális jellemzői kettős impulzusok alkalmazásával szabályozhatók [T3].

## Saját publikációk

T – az értekezéshez szorosan kapcsolódó publikációk

O – további tudományos publikációk

- [T1] **L. Gulyás Oldal**, T. Csizmadia, P. Ye, N. G. Harshitha, M. Füle, and A. Zaïr, “Double-pulse characterization by self-referenced spectral interferometry,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 115, no. 5, p. 051106, 2019. DOI: [10.1063/1.5089959](https://doi.org/10.1063/1.5089959).
- [T2] **L. Gulyás Oldal**, T. Csizmadia, P. Ye, N. G. Harshitha, A. Zaïr, S. Kahaly, K. Varjú, M. Füle, and B. Major, “Generation of high-order harmonics with tunable photon energy and spectral width using double pulses,” *Phys. Rev. A*, vol. 102, p. 013504, 2020. DOI: [10.1103/PhysRevA.102.013504](https://doi.org/10.1103/PhysRevA.102.013504).
- [T3] **L. Gulyás Oldal**, P. Ye, Z. Filus, T. Csizmadia, T. Grósz, M. De Marco, Z. Bengery, I. Seres, B. Gilicze, P. Jójárt, K. Varjú, S. Kahaly, and B. Major, “All-optical experimental control of high-harmonic photon energy,” *Phys. Rev. Applied*, vol. 16, p. L011001, 2021. DOI: [10.1103/PhysRevApplied.16.L011001](https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.16.L011001).
- [O1] P. Ye, T. Csizmadia, **L. Gulyás Oldal**, H. N. Gopalakrishna, M. Füle, Z. Filus, B. Nagyillés, Z. Divéki, T. Grósz, M. Dumergue, P. Jójárt, I. Seres, Z. Bengery, V. Zuba, Z. Várallyay, B. Major, F. Frassetto, M. Devetta, G. D. Lucarelli, M. Lucchini, B. Moio, S. Stagira, C. Vozzi, L. Poletto, M. Nisoli, D. Charalambidis, S. Kahaly, A. Zair, and K. Varjú, “Attosecond pulse generation at eli-alps 100 khz repetition rate beamline,” *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, vol. 53, no. 15, p. 154004, 2020. DOI: [10.1088/1361-6455/ab92bf](https://doi.org/10.1088/1361-6455/ab92bf).
- [O2] D. You, K. Ueda, M. Ruberti, K. L. Ishikawa, P. A. Carpeggiani, T. Csizmadia, **L. Gulyás Oldal**, H. N. G. Sansone, P. K. Maraju, K. Kooser, C. Callegari, M. D. Fraia, O. Plekan, L. Giannessi, E. Allaria, G. D. Ninno, M. Trovò, L. Badano, B. Diviacco, D. Gauthier, N. Mirian, G. Penco, P. R. Ribič, S. Spampinati, C. Spezzani, S. D. Mitri, G. Gaio, and K. C. Prince, “A detailed investigation of single-photon laser enabled auger decay in neon,” *New J. Phys.*, vol. 21, no. 11, p. 113036, 2019. DOI: [10.1088/1367-2630/ab520d](https://doi.org/10.1088/1367-2630/ab520d).
- [O3] T. Grósz, A. P. Kovács, K. Mecseki, **L. Gulyás**, and R. Szipőcs, “Monitoring the dominance of higher-order chromatic dispersion with spectral interferometry using the stationary phase point method,” *Opt. Commun.*, vol. 338, pp. 292–299, 2015, ISSN: 0030-4018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2014.10.047>.

- [O4] T. Grósz, **L. Gulyás**, and A. P. Kovács, "Advanced laboratory exercise: Studying the dispersion properties of a prism pair," in *ETOP 2015 Proceedings*, Optical Society of America, 2015, TPE32. [Online]. Available: <http://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=ETOP-2015-TPE32>.

## Konferencia előadások

\* Bemutató szerző; OP – Szóbeli előadás; PP – Poszter előadás

- [OP1] P. Ye, **L. Gulyás Oldal\***, T. Csizmadia, Z. Filus, T. Grósz, P. Jójárt, I. Seres, Z. Bengery, B. Gilicze, S. Kahaly, K. Varjú, and B. Major, "High-flux, 100-khz attosecond pulse train source driven by a high average-power laser beam," in *Frontiers in Optics + Laser Science*, Online, 2021.
- [OP2] **L. Gulyás Oldal\***, P. Ye, Z. Filus, T. Csizmadia, T. Grósz, M. De Marco, and B. Major, "Spectrally tunable attosecond pulse generation," in *Conference on Lasers and Electro-Optics/Europe – European Quantum Electronics Virtual Conferences*, Online, 2021.
- [OP3] P. Ye, **L. Gulyás Oldal**, T. Csizmadia, Z. Filus, T. Grósz, M. De Marco, P. Jójárt, I. Seres, Z. Bengery, Z. Várallyay, B. Gilicze, S. Kahaly, K. Varjú, and B. Major\*, "High-flux attosecond source at 100 khz repetition rate," in *Conference on Lasers and Electro-Optics/Europe – European Quantum Electronics Virtual Conferences*, Online, 2021.
- [OP4] T. Csizmadia\*, P. Ye, **L. Gulyás Oldal**, Z. Filus, T. Grósz, P. Jójárt, I. Seres, Z. Bengery, Z. Várallyay, B. Gilicze, S. Kahaly, K. Varjú, B. Major, and M. Füle\*, "Firstly commissioned secondary source of eli-alps: The hr ghhg gas beamline," in *7th ELI-ALPS User Workshop*, Szeged, Hungary, 2019.
- [PP1] **L. Gulyás Oldal\***, P. Ye, Z. Filus, T. Csizmadia, T. Grósz, M. De Marco, Z. Bengery, I. Seres, B. Gilicze, P. Jójárt, K. Varjú, S. Kahaly, and B. Major, "All-optical control of high-harmonic photon energy," in *Frontiers in Optics + Laser Science*, Online, 2021.
- [PP2] **L. Gulyás Oldal\***, P. Ye, T. Csizmadia, T. Grósz, Z. Filus, and B. Major, "Generation of high-order harmonics with tunable photon energy and spectral width using double pulses," in *ELI Summer School*, Szeged, Hungary, 2020.
- [PP3] **L. Gulyás Oldal\***, T. Csizmadia, P. Ye, N. G. Harshitha, A. Zaïr, and M. Füle, "High-harmonic generation in gaseous medium by double pulse forms," in *7th International Conference on Attosecond Science and Technology*, Szeged, Hungary, 2019.

- [PP4] T. Csizmadia\*, **L. Gulyás Oldal**, P. Ye, N. G. Harshitha, M. Füle, and A. Zaïr, "Microscopic analysis of the intensity and wavelength dependence of quantum path interferences in high-order harmonic generation," in *7th International Conference on Attosecond Science and Technology*, Szeged, Hungary, 2019.
- [PP5] N. G. Harshitha\*, T. Csizmadia, P. Ye, M. Füle, **L. Gulyás Oldal**, E. Constant, and A. Zaïr, "Characterisation of attosecond pulse train using windowed rabbitt technique," in *7th International Conference on Attosecond Science and Technology*, Szeged, Hungary, 2019.
- [PP6] Z. Filus\*, T. Csizmadia, M. Füle, **L. Gulyás Oldal**, N. G. Harshitha, P. Ye, B. Nagyillés, Z. Divéki, T. Tímár-Grósz, M. Dumergue, A. Zaïr, S. Kahaly, and K. Varjú, "High harmonic generation gas cell for high repetition rate secondary sources," in *7th International Conference on Attosecond Science and Technology*, Szeged, Hungary, 2019.
- [PP7] M. Füle\*, P. Ye, T. Csizmadia, N. G. Harshitha, **L. Gulyás Oldal**, B. Nagyillés, Z. Divéki, T. Tímár-Grósz, M. Dumergue, Z. Filus, P. Jójárt, I. Seres, V. Zuba, Z. Bengery, M. Devetta, F. Frassetto, B. Moio, M. Lucchini, M. Nisoli, L. Poletto, S. Stagira, C. Vozzi, G. Sansone, K. Osvay, S. Kahaly, K. Varjú, and A. Zaïr, "First attosecond beamline operational at eli-alps," in *7th International Conference on Attosecond Science and Technology*, Szeged, Hungary, 2019.
- [PP8] T. Csizmadia\*, **L. Gulyás Oldal**, P. Ye, N. G. Harshitha, M. Füle, and A. Zaïr, "Double pulse characterisation by self-referenced spectral interferometry," in *ELI Summer School*, Szeged, Hungary, 2018.
- [PP9] **L. Gulyás Oldal\***, T. Csizmadia, P. Ye, N. G. Harshitha, M. Füle, and A. Zaïr, "Double pulse characterisation by self-referenced spectral interferometry," in *Erice Attosecond School - The Frontiers of Attosecond and Ultrafast X-ray Science*, Erice, Sicily, Italy, 2019.
- [PP10] N. G. Harshitha\*, T. Csizmadia, **L. Gulyás Oldal**, P. Ye, M. Füle, K. Varjú, G. Sansone, and A. Zaïr, "Characterisation of attosecond pulse train using rabbitt method," in *Laser Plasma Summer School*, Salamanca, Spain, 2018.