

Válasz Dr. Szipőcs Róbert opponensi véleményére

Köszönöm az opponens munkáját, a dolgozatom gondos átolvasására szánt időt, támogató és elismerő bírálói véleményét és elgondolkodtató kérdéseit. Az észrevételekre és a feltett kérdésekre azok eredeti sorrendjében az alábbiakban válaszolok.

eredményeiről. Az összefoglaló nyelvtani, nyomdai, formai hibát szinte nem tartalmaz, egyedül talán az ábrák minőségén lehetett volna még javítani az összeállítás során. A szöveg, a fogalmazás világos, logikus, még egy nem szakterületen dolgozó kutató számára is szerintem jól követhető. A szövegben található kisebb hibákat, véleményem szerint pontosítandó megfogalmazásokat a bíráló végén tételesen felsorolom.

Köszönöm az opponens által 1. mellékletként csatolt listát a kisebb hibákról. Belátom, hogy minden szándékom ellenére is maradtak a dolgozatban tovább pontosítható megfogalmazások. Szándékom elkészíteni a dolgozat javított verzióját, hogy referenciaként szolgálhasson a tudományterület iránt érdeklődők számára. Ebben ki fogom javítani az opponens által megjegyzett hibákat.

Egy észrevételt tennék a **4.1 tézispontban** említett XUV tartományra tervezett multiréteg tükrök esetében a vonatkozó cikk áttekintése után: én inkább az **XUV diszperzió kompenzáló tükrök** kifejezést használtam volna, mert számomra az ábrák és mérési eredmények alapján nem igazán egyértelmű, hogy a csörpölt tükrökre jellemző aperiodikus szerkezetről lenne szó, én inkább ú.n. „double-stack” tükrökben fellépő rezonanciákból származó fázisfüggvényeket látok az ábrákon, habár a vonatkozó modellszámításokat nem volt lehetőségem reprodukálni a bíráló ideje alatt (ld. még a vonatkozó kérdést a bíráló végén).

Az opponens a technológia abszolút szakértője, észrevételét köszönöm. Az elnevezéssel nem a tükrök rétegstruktúrájának csörpölt voltára, hanem a róla visszaverődött fény csörpjének megváltoztatására utaltunk. Megjegyzem, hogy az attoszekundumos technológiában az impulzusok csörpje nagyrészt a keltési folyamat frekvencia-függéséből, és nem a frekvencia-függő terjedésből (diszperzió) ered.

A **8.2 tézispont** estében referált folyóirat közleménnyel nem alátámasztható az **8.2 tézispont** jelentősége, újdonságtartalma: a **8.2 tézispont** egy egyoldalas, MBI-vel publikált SPIE konferenciakiadványon alapul [T16], én ezt a pontot törölném, vagy összevonnám a **8.1 tézisponttal**.

A [T16]-os publikáció a hivatkozási listában helyesen egy, az Optics Express folyóiratban megjelent cikk (Schuette, 2015), de a dolgozat nyomtatásakor véletlenül egy konferenciakiadványból származó dokumentumot csatoltam helyette.

A tézispontokkal kapcsolatos további megjegyzéseket is köszönöm. Nincs tudomásom egyértelmű, abszolút definícióról / útmutatóról, amely segítené a jelölteket a tézispontok lehető legjobb megfogalmazásában, és a bírálati szakaszban már nincs lehetőség ezeken módosítani.

Összefoglalva a fentieket: véleményem szerint a jelölt 1-7, 11-13 tézispontokban megfogalmazott tudományos eredményei, a jelölt magyar tudományos életben - többek között az ELI Lézerközpont tudományos igazgatójaként - betöltött szerepe bőven elegendő az MTA doktora cím megszerzéséhez, függetlenül a 8-10. tézispontokra vonatkozó megállapításaimtól.

Köszönöm, hogy kritikai észrevételei mellett is támogató véleményt fogalmazott meg. Remélem, hogy disszertációm olvasóiban a kevésbé jelentősnek ítélt tézispontjaim alapján inkább az a kép alakul ki, hogy a bemutatott munkásságom a teljes tudományterületet lefedi, és kevésbé gondolják azt, hogy felesleges volt némely tézispontot megfogalmazni. A rövid disszertációval az volt a célom, hogy (a publikációkban szereplő technikai részletek mellőzésével) olyan áttekintést adjak, amely a fizikusok szélesebb közössége számára nyújt betekintést a közelmúltban Nobel-díjjal elismert tudományterületbe.

A doktori művel kapcsolatos kérdések

I. A 4.1 tézispontához

Mennyire pontosan sikerült a legyártott XUV tükrök rétegeinek vastagságait beállítani, azokat hogyan a gyártás során hogyan mérték, milyen pontossággal? A hibák mekkora hatással voltak a megtervezett diszperziós függvényre?

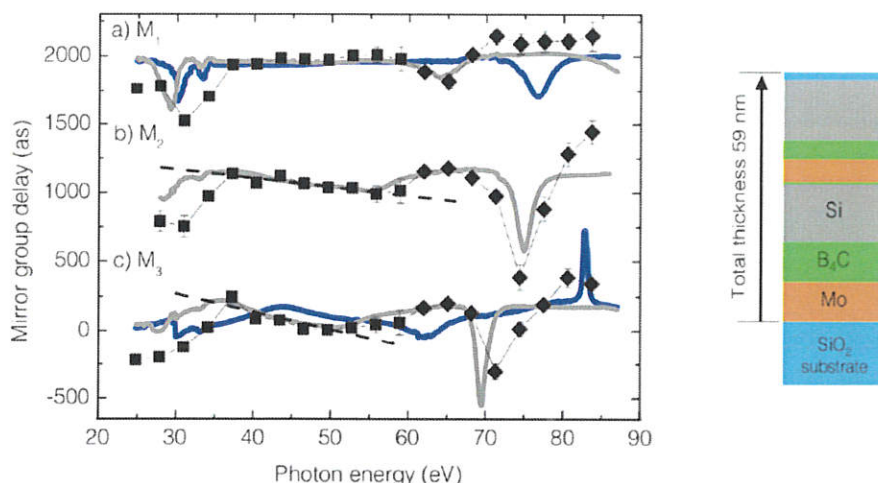
A T4 cikkben a 2.b ábrán a számolt és mért csoportkésleltetés függvény között jelentős eltérés van: a számolt görbén közel állandó a csoportkésleltetés a 30-50 eV-os tartományban, míg a mért értékek nagyjából lineárisan változnak ebben a frekvenciatartományban, lehetővé téve az attoszekundumos impulzusok csörp-kompenzálását. Mitől van ez az eltérés, ami ezt a szerencsés kísérleti eredményt mutatja?

A disszertáció 4.1-es tézispontjához kapcsolódó projektben az XUV többrétegű tükrök tervezéséhez a sáv szélesség és a GDD értékek megadásával, vagyis a tervezési paraméterekkel járultam hozzá. A rétegstruktúrát AS Morlens tervei alapján az együttműködő Charles Fabry de l'Institut d'Optique laboratóriumában készítették. Tudomásom szerint ez volt az első, az attoszekundumos impulzusok csörpjének kompenzálását célzó projekt [Morlens 2006]. Egyeztetéseink során kiderült, hogy a tervezésnél komoly kihívást jelentett a megfelelő rétegszerkezet meghatározása, hiszen az XUV tartományban nem igazán találni „magas” törésmutatójú anyagokat, így a csörpölt tükrök működéséhez szükséges törésmutató-különbséget abszorpció közelében lehetett csak elérni. Ezenkívül a törésmutató-értékek bizonytalansága, az XUV tartomány miatt a rétegek vastagsága és a leválasztás pontatlanságának viszonya jelentették a fő kihívást.

Az említett projektben végül három különböző rétegszerkezetű tükrök tervezése és gyártása valósult meg, amelyeket mind RABITT módszerrel karakterizáltunk. A széles sávú XUV tükrök gyártására vonatkozó kezdeti próbálkozás csak részben volt sikeres, mindössze egy tükrönél tapasztaltuk, hogy elég jó reflexióval és közel lineáris GD-görbével rendelkezik – ezek a mérések kerültek be a publikációba. Az opponens észrevétele, amely szerint szerencse is

kellett ahhoz, hogy az impulzusok csőrpijét kompenzálai tudjuk, jogos, ugyanakkor ez nem kisebbíti az eredmény jelentőségét.

GDD-kompenzáló többrétegű tükröket a későbbiekben több kutatóhelyen is készítettek, egyre javuló eredménnyel. Két publikációból illusztrálom, hogy a tervezési és mért GDD egyezésével milyen eredményeket értek el: az 1. ábrán [Bourassin-Bouchet, 2011] és az 1. táblázatban [Hofstetter 2011].



1. ábra: Három különböző diszperzió-kompenzáló XUV tükör (M_1 - M_3) csoportkésleltetésének tervezési (folytonos vonalak) és mért (szimbólumok) értékei. (A szürke vonal 42° -os, a kék vonal $52,5^\circ$ -os, a mérések 42° -os beesési szögre vonatkoznak.) [Bourassin-Bouchet, 2011]

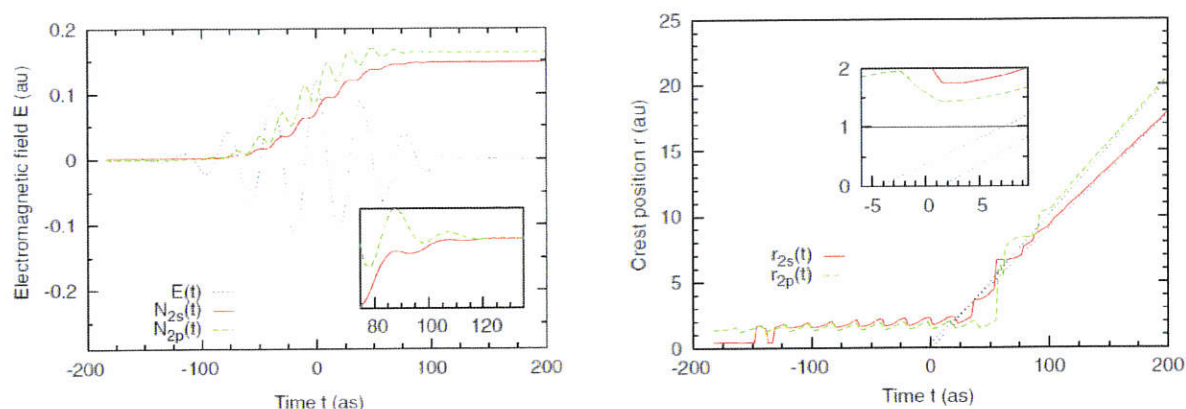
	Positive <i>GDD</i> mirror	Zero <i>GDD</i> mirror	Negative <i>GDD</i> mirror
<i>GDD</i> design goal	$D_{(+)} = 19.5 \times 10^3 \text{ as}^2$	$D_{(0)} = -0.5 \times 10^3 \text{ as}^2$	$D_{(-)} = -14 \times 10^3 \text{ as}^2$
<i>FROG</i> retrieved <i>GDD</i>	$D_{(+)} = 16 \times 10^3 \text{ as}^2$	$D_{(0)} = 1.5 \times 10^3 \text{ as}^2$	$D_{(-)} = -7.5 \times 10^3 \text{ as}^2$
<i>FROG</i> retrieved pulse duration (Fourier limit)	$\tau_{(+)} = 280 \text{ as}$ (200 as)	$\tau_{(0)} = 170 \text{ as}$ (165 as)	$\tau_{(-)} = 200 \text{ as}$ (175 as)

1. táblázat: Három különböző diszperzió-kompenzálásra tervezett tükör GDD-je: az első sorban a tervezési, a második sorban a mért értékek. [Hofstetter 2011]

2. Az összefoglalóban említett „Wigner-késleltetés”, vagy „fotoionizációs lépés késleltetés”-sel kapcsolatban a kérdéseim: Tudtak-e illet a RABITT technikával mérni, az hogyan viszonyult az elméletileg megjósolt eredményekhez, illetve itt találkoztak-e a sok vitát kiváltó szuperluminális terjedés jelenségével, lehet-e erről valamit a méréseik ismeretében mondani?

A fotoionizáció pillanatnyi volta az attoszekundumos mérés technika fejlődésével kérdőjeleződött meg, hiszen lehetővé tette e folyamat időbeli vizsgálatát. Az első mérési eredményt a Krausz-csoport [Schultze 2010] publikálta: neonatomok 2p és 2s pályáról történő ionizációja között 21 ± 5 as különbséget mértek attoszekundumos sávkamera módszerrel. Röviddel ezután L’Huillier csoportja [Klünder 2011] RABITT módszerrel argon ionizációja

esetén a 3s és 3p pályák között közel 100 as különbséget talált. A tulajdonképpen fáziskülönbséget meghatározó mérési eredmények értelmezéséhez – a Wigner által rugalmas szórásra bevezetett fázis-deriváltat, a Wigner-késleltetést használták [Wigner 1955].



2. ábra: Neon fotoionizációjának időbeli lefolyása a 2s és 2p pályákról. (a) Az ionizáló XUV tér és a kontinuum elektron hullámcsoportok normái. (b) A 2s és 2p elektroncsomagok hullámhegyeinek pozíciója. Az impulzus távozása utáni elektronpozíciókra illesztett egyenes visszavetítésével az elektronok látszólagos keletkezési időkülönbségét figyelhetjük meg a betétabrán. [Kheifets 2023]

A 2. ábra – [Kheifets 2023] alapján – a neonatomok 2s és 2p pályáról történő ionizációja esetén a TDSE megoldásával meghatározott hullámfüggvény-paramétereket mutatja. A 2.a ábrából láthatjuk, hogy a 2s és 2p állapotokból induló elektronok hullámfüggvényének pozitív energiás (kontinuum) része egyszerre kezdenek fejlődni, és az XUV impulzust követően ugyanakkor fejeződnek be, nincs számottevő késleltetés a két elektron között. A 2.b ábra ezen kontinuum hullámcsoportok maximumainak haladását mutatja. Az XUV impulzust követően, amikor a hullámcsoportok kialakulása befejeződött, egyenes vonalú egyenletes mozgást figyelhetünk meg. Az elektronok késleltetésének mérésekor e szabad állapotokat hasonlítjuk össze, vagyis az egyenes pályák visszavetítésével kapott tengelymetszetet tekintjük az elektronok születési pillanatának. Ebben a példában a 2s elektron pályája -4 as, a 2 p elektron pályája látszólag $+2$ as-nál metszi a tengelyt. Ugyanakkor, [Kheifets 2023]-et idézve, egyrészt nincs valódi késleltetés a két elektron születése között (lásd 2. a ábrát), másrészt a pályák visszavetítésével nyert eredmény egy gondolat kísérlet, amiben a pályák látszólagos eredetét időben visszafelé, az atom és az XUV impulzus nélkül terjedtetve vizsgáljuk. Továbbá megállapíthatjuk, hogy mindkét elektron az XUV impulzus időtartama alatt jött létre (ami ebben a példában kb. 100 as), a negatív késleltetés az impulzus csúcsához viszonyítva értendő, tehát az eredmények értelmezéséhez nincs szükség a fény superluminális terjedésére.

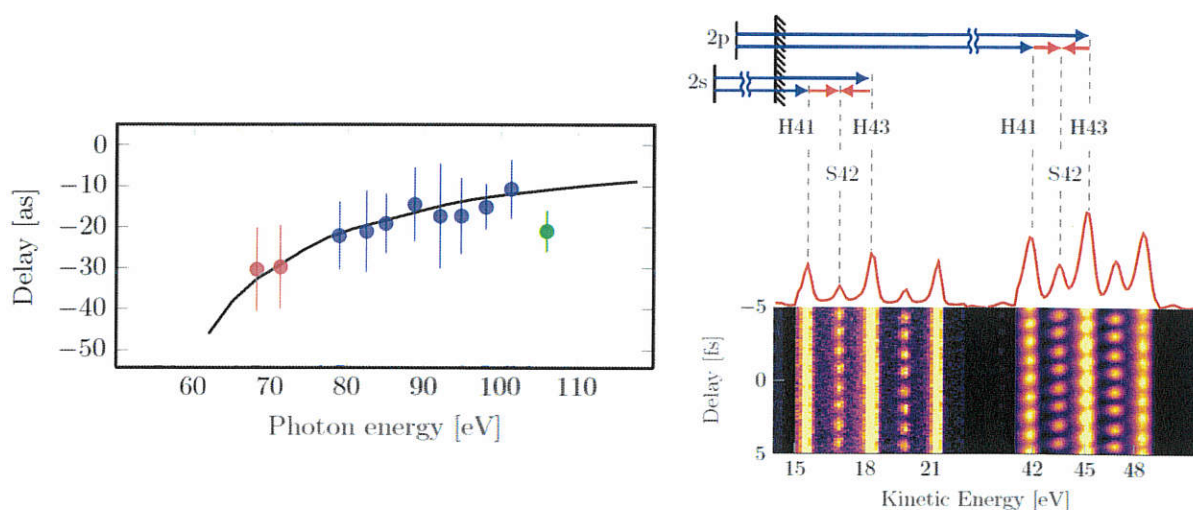
Az attoszekundumos kísérletekben a már említettek szerint nem időkésleltetést, hanem a Wigner-fázis különbségét mérjük. Ehhez – az eredetileg XUV impulzusok karakterizálására kifejlesztett – IR-XUV keresztkorrelációs elrendezéseket használjuk. A disszertációm 6.3-as fejezetében röviden ismertetem a RABITT mérés technika alkalmazását fotoionizációs késés mérésére. A RABITT technika az XUV impulzus által kiváltott ionizáció során a különböző energiájú elektronok relatív késleltetését méri, ami három tagból ered: $\tau_{XUV} + \tau_W + \tau_{cc}$.

- A τ_{XUV} tartalmazza az ionizációt kiváltó XUV impulzus komponensek relatív késleltetését;

- τ_W vel jelöljük a Wigner-késleltetést, amit a fotoionizációs lépés késleltetésének tekintünk;
- τ_{cc} az elektronnak a lézertérrel és a Coulomb-térrel való kölcsönhatásából adódó késés, ami a lézertér által indukált, kontinuum állapotok közötti átmenetnek felel meg.

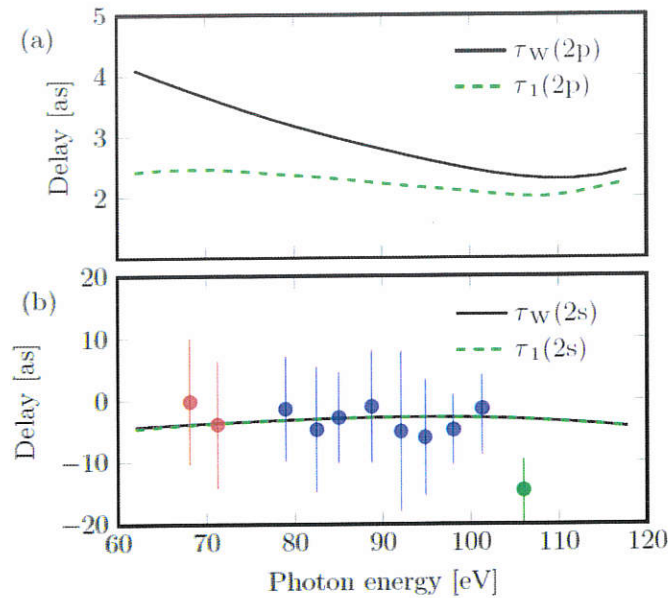
Fontos megjegyezni, hogy nem abszolút, hanem relatív késleltetés meghatározására van lehetőségünk, ezért a fotoionizációs késleltetést célzó mérések mindig különböző ionizációs átmenetek időkülönbségét határozzák meg.

Az opponens első kérdését [Isinger 2017] publikációja alapján, az ott bemutatott konkrét eredmények segítségével válaszolom meg. Ebben a munkában is neonatomok 2s és 2p állapotból történő fotoionizációjának időkülönbségét mérték RABITT módszerrel, akárcsak a Krausz-csoport első ilyen kísérletében. Mivel e két átmenethez különböző az ionizációs potenciál (~27 eV), a fotoelektronok energiája alapján tudjuk őket elkülöníteni, és mérni a két átmenet közötti késleltetés különbségét. Az eredmények a 3. ábrán láthatók. Mivel mindkét állapotból ugyanaz az XUV impulzus hozza létre az ionizációt, a különbséghez a $\tau_W + \tau_{cc}$ komponensek járulnak hozzá.



3. ábra: Fotoionizációs késleltetés különbsége, neon 2s és 2p állapotból ($\tau_W^{2s} + \tau_{cc}^{2s} - \tau_W^{2p} - \tau_{cc}^{2p}$). (a) Mérési eredmények: a negatív értékek azt jelzik, hogy a 2p ionizáció később következik be. A szimbólumok mérési eredmények (piros és kék: RABITT mérés, zöld: sávkamera mérés), a folytonos vonal többletest perturbációszámításból eredő számításos értékeket jelöl. (b) A RABITT mérés elve. [Isinger 2017]

Abszolút késleltetésre vonatkozó információt csak indirekt módon kaphatunk, ha a $\tau_W^{2s} + \tau_{cc}^{2s} - \tau_W^{2p} - \tau_{cc}^{2p}$ különbségben bizonyos tagokat számolással kellően megbízhatóan meg tudunk határozni. A τ_{cc} érték 10 eV fölötti tartományban igen pontosan meghatározható [Ossiander 2016, Dahlström 2013, Nagele 2011]. Ha emellett a τ_W^{2p} értéket TDSE számolásokból vezetjük le, akkor a mérési eredményekből τ_W^{2s} származtatható, amint ez a 4. ábrán is látható.



4. ábra: Abszolút Wigner-késleltetési értékek. (a) A modellszámítás eredménye 2p állapotból, illetve (b) 2s állapotból történő ionizáció esetében (τ_W a fény polarizációs irányában mérhető késleltetés, τ_1 a kibocsátási szögre integrált késleltetés értékei). (b) A szimbólumok a 3. ábrán bemutatott mérési eredményeknek felelnek meg, amennyiben azokból kivonjuk a számolt τ_{cc}^{2s} , τ_W^{2p} és τ_{cc}^{2p} értékeket. [Isinger 2017]

Mindezekből azt a következtetést vonhatjuk le, hogy a különböző pályákról ionizált elektronok között egy látszólagos késleltetés figyelhető meg, ami kísérletileg és elméleti számításokkal is ugyanazt a hibahatáron belüli eredményt adja.

Hivatkozások:

[Bourassin-Bouchet, 2011] C. Bourassin-Bouchet, Z. Diveki, S. de Rossi, E. English, E. Meltchakov, O. Gobert, D. Guenot, B. Carre, F. Delmotte, P. Salieres, and T. Ruchon, *Control of the attosecond synchronization of XUV radiation with phase-optimized mirrors*, OPTICS EXPRESS **19**, 3809 (2011)

[Dahlström 2013] JM Dahlström, D Guénot, K Klünder, M. Gisselbrecht, J Mauritsson, A L'Huillier, A Maquet, R Taïeb, *Theory of attosecond delays in laser-assisted photoionization*. Chem. Phys. **414**, 53–64 (2013)

[Hofstetter, 2011] Michael Hofstetter, Martin Schultze, Markus Fieß, Benjamin Dennhardt, Alexander Guggenmos, Justin Gagnon, Vladislav S. Yakovlev, Eleftherios Goulielmakis, Reinhard Kienberger, Eric M. Gullikson, Ferenc Krausz, and Ulf Kleineberg, *Attosecond dispersion control by extreme ultraviolet multilayer mirrors*. OPTICS EXPRESS **19**, 1767 (2011)

[Isinger 2017] M Isinger, RJ Squibb, D Busto, S Zhong, A Harth, D Kroon, S Nandi, CL Arnold, M Miranda, JM Dahlström, E Lindroth, R Feifel, M Gisselbrecht, and A L'Huillier, *Photoionization in the time and frequency domain*. Science **358**, 6365, 893-896 (2017)

[Kheifets 2023] Anatoli S Kheifets: *Wigner time delay in atomic photoionization*. J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **56** 022001 (2023)

[Klunder 2011] K Klunder, J M Dahlström, M Gisselbrecht, T Fordell, M Swoboda, D Guénot, P Johnsson, J Caillat, J Mauritsson, A Maquet, R Taïeb, and A L'Huillier, *Probing Single-Photon Ionization on the Attosecond Time Scale*. Phys. Rev. Lett. **106** 143002 (2011)

[Morlens, 2006] A.-S. Morlens, R. L'opez-Martens, O. Boyko, Ph. Zeitoun, Ph. Balcou, K. Varjú, E. Gustafsson, T. Remetter, A. L'Huillier, S. Kazamias, J. Gautier, F. Delmotte, and M.-F. Ravet, *Design and characterization of extremeultraviolet broadband mirrors for attosecond science*. Opt. Lett. **31**, 1558–1560 (2006).

[Nagele 2011] S Nagele, R Pazourek, J Feist, K Doblhoff-Dier, C Lemell, K Tőkési and J Burgdörfer, *Time-resolved photoemission by attosecond streaking: extraction of time information*. J. Phys. **B 44**, 081001 (2011)

[Ossiander 2016] M. Ossiander, F. Siegrist, V. Shirvanyan, R. Pazourek, A. Sommer, T. Latka, A. Guggenmos, S. Nagele, J. Feist, J. Burgdörfer, R. Kienberger & M. Schultze, *Attosecond correlation dynamics*. Nature **13**, 280 (2016)

[Schultze 2010] M Schultze, M Fiess, N Karpowicz, J Gagnon, M Korbman, M Hofstetter, S Neppl, AL Cavalieri, Y Komninos, Th Mercouris, CA Nicolaides, R Pazourek, S Nagele, J Feist, J Burgdörfer, AM Azzeer, R Ernstorfer, R Kienberger, U Kleineberg, E Goulielmakis, F Krausz, VS Yakovlev, *Delay in photoemission*. Science **328**, 1658 (2010)

[Schuette 2015] B Schuette, P Weber, K Kovács, E Balogh, B Major, V Tosa, S Han, MJJ Vrakking, K Varjú, A Rouzee, *Bright attosecond soft X-ray pulse trains by transient phase-matching in two-color high-order harmonic generation*. Optics Express **23**; 26; 33947 (2015)

[Wigner 1955] Eugene P. Wigner: *Lower Limit for the Energy Derivative of the Scattering Phase Shift*. Phys. Rev. **98** 145–7 (1955)

Szeged, 2025. november 10.


Dr. Geretovszkyné Dr. Varjú Katalin

