

A CSÖRPÖLT (LÉZER)IMPULZUS-ERŐSÍTÉS

A 2018. évi fizikai Nobel-díj egyik fele

Börzsönyi Ádám, Nagymihály Roland, Tóth Szabolcs, Osvey Károly
ELI-ALPS, ELI-Hu Nkft., Szeged
SZTE Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék, Szeged

Az első működő lézert *Theodore H. Maiman* mutatta be 1960-ban, amellyel lehetségessé vált magas fokú rendezettséggel bíró, azaz koherens, jól irányítható, kollimált fénynyalábok előállítására. A lézerek kutatása és fejlesztése két fő irányban folytatódott, nevezetesen a folytonos lézerek (optikaiszál-lézerek, diódalézerek) és az impulzusüzemű lézerek felé. Az utóbbiak tették és teszik lehetővé mind az időbontott, ultragyors folyamatok vizsgálatát, mind pedig nagy fókuszált intenzitás elérését. A nagy intenzitással (kezdetben $\sim 10 \text{ GW/cm}^2$) részben ionizációs, részben plazmafizikai kísérleteket lehet elvégezni, illetve rövid időtartamokra olyan extrém körülményeket lehet létrehozni (nyomás, hőmérséklet, elektromos és mágneses tér stb.), amelyek normál földi körülmények közt elképzelhetetlenek.

Számos kutatócsoport versenyzett a legnagyobb fókuszált fényintenzitás eléréseért, amely néhány év leforgása alatt, a hatvanas évek második felére hat nagyságrendet ugrott. A fejlesztések során egyre rövidebb lézerimpulzusokba mind több és több energiát sikerült koncentrálni. A lézerimpulzusokban tárolt energia viszonylag könnyen volt növelhető, azonban az csúcshintenzitás gyorsan elérte azt a szintet, ahol annak további növelése már fizikai korlátokba ütközött. Ekkora térerősség esetén az optikailag átlátszó anyagok törésmutatója függ az intenzitástól, azaz a fénytörés iránya függ a fény erősségétől. Ez a jelen-

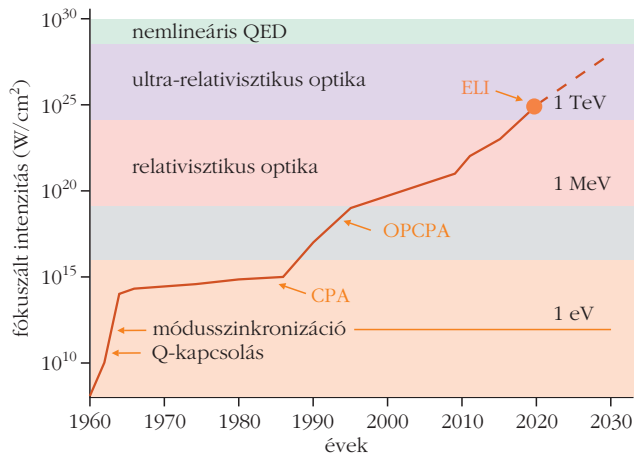
Következő számunkban *Arthur Ashkin*t, a Nobel-díj másik felét elnyerő fizikust és munkásságát mutatjuk be.



Börzsönyi Ádám fizikus diplomáját 2006-ban szerezte a Szegedi Tudományegyetemen. Doktori fokozatát 2013-ban kapta ultrarövid lézerimpulzus-karakterizálás kutatásában elért eredményeiért. 2003 óta az SZTE Optikai és Kvantumelektronikai Tanszéke TeWaTi lézerlaboratórium, majd 2014 óta az ELI-ALPS Lézer Infrastruktúra Osztály kutatója, az Egyciklusú Lézer csoport vezetője. Fő kutatási területei az ultrarövid impulzusok karakterizálása és erősítése, nemlineáris optika, időbontott spektroszkópia.



Nagymihály Roland 2014-ben végzett fizikusként a Szegedi Tudományegyetemen. 2010 óta a TeWaTi lézerlaboratórium, illetve 2014 óta az ELI-ALPS Nagyintenzitású Lézer Csoportjának kutatója és laborvezető-helyettese. Doktori fokozatát 2018-ban kapta a következő generációs titán-zafir alapú lézerek erősítő rendszerek fejlesztésében elért eredményeiért. Fő kutatási területei a nagy átlagteljesítményű ultrarövid lézerimpulzusok erősítése, karakterizálása, valamint a nemlineáris optika.



1. ábra. Lézerek fókuszált intenzitásának fejlődése az 1960-as évektől napjainkig, valamint a várható fejlődés 2030-ig. Az ábra jobb oldalán az adott lézerintenzitással szabad elektronok esetén elérhető ponderomotoros energia látható [1].

ségtérben önfokuszálódást, az időképpen pedig önfázismodulációt idéz elő. Az impulzusok térbeli torzulásai részben erősen lerontják az impulzusok fókuszálhatóságát, azaz egy ponton túl hiába erősítünk tovább, a fókuszbeli térerősség szétterül, a fókuszált intenzitás nem nő tovább. Mindemelllett az optikai erősítőkben fényindukált roncsolódások is keletkezhetnek, amelyek diffrakciós mintázatokat képezve tovább rontják a nyaláb minőségét, ezzel akár az erősítő kritikus meghibásodását is okozva.



Tóth Szabolcs 2012-ben kezdte el kutatói pályáját a Szegedi Tudományegyetem BSC hallgatójaként az Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék TeWaTi lézerlaboratóriumában. Fizikus mesterdiplomáját 2015-ben szerezte meg, azóta a Fizika Doktori Iskola PhD hallgatója, valamint az ELI-ALPS tudományos segédmunkatársa. Kutatási területe a nemlineáris optika, ultrarövid lézerimpulzusok előállítása és erősítése.



Osvey Károly fizikus (1990, József Attila Tudományegyetem, Szeged), a fizikai tudományok kandidátusa (1995), 2011-ben habilitált a Szegedi Tudományegyetemen. 1996-ban docens, 1997-től tanszékvezető-helyettes, majd 2011–13 megbízott vezető. A TeWaTi lézerlaboratórium és kutatócsoport alapítója és vezetője. Az ELI-HU Nkft. kutatási technológiai igazgatója. Fő kutatási területe az ultrarövid lézerimpulzusok előállítása, azok alkalmazása, lézer-anyag kölcsönhatás, nemlineáris optika.

Ezt a problémát éveken keresztül a nyalábok és az erősítő közegek méretének növelésével, illetve a nyalábok több részre osztásával oldották meg. Ennek eredményeképpen az 1980-as évekre a nagy intenzitású lézerimpulzusokat előállító laborok mérete naggyá (tornaterem méretűvé), fenntartása pedig igen költségessé vált. Az 1. ábra hűen szemlélteti azt a folyamatot, ahogyan a nagyintenzitású lézerek fejlődése mintegy két évtized alatt mindössze egy nagyságrenddel nőtt csupán.

A nyolcvanas években természetesen több kutatócsoport dolgozott a kihívás megoldásán. Egy pillanatra idézzük fel az akkori csúcstechnológiát: a legrövidebb, közvetlenül, úgynevezett festéklézerekkel előállított lézerimpulzus ideje akkoriban egynéhány száz femtoszekundum ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$) volt, tipikusan a látható tartományban (500–700 nm). A tipikus nagy lézere erősítők $1 \mu\text{m}$ hullámhossz körül működtek, ahol néhány pikoszekundumos ($1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$) impulzusokat állítottak elő. Az optikai szálon alapuló lézeres kutatások és alkalmazások, elsősorban a telekommunikációs ipar kapcsán ismert volt, hogy időben határos (rövid) lézerimpulzusok több km-es terjedés során – a diszperzió miatt – időben „szétfolynak”, azaz megnyúlnak. Ezen megnyúlás kompenzálása a vevőegység előtt az időegység alatt átvihető információ (impulzusok darabszáma) növelése szempontjából kritikus volt. Több más megközelítés mellett erre Treacy 1969-ben egy optikai rácsokon alapuló megoldást publikált [2]. Mindezek mellett az is ismert volt, hogy a fentebb említett nemlineáris fázismoduláció egy kritikus intenzitás felett, de egy maximumintenzitás alatt az impulzus spektrális kiszélesedését okozza. Ez a kiszélesedés koherens, azaz megfelelő mértékű, ellentétes előjelű diszperzióval rendelkező rendszeren keresztül vezetve az eredetinel időben rövidebb impulzust eredményez [3]. Johnson és társai ezen módon 80-szoros impulzusrövidítést demonstráltak [4], 1984-re elérve az 1 ps-os határt. Hangsúlyozandó, hogy ezen kísérletekben közvetlen erősítés nem történt.

Nem úgy, mint Jénában. A Friedrich Schiller Universität Berdt Wilhelmi által vezetett kutatócsoportja 1985 áprilisában egy kísérletet publikált [5], amelyben egyetlen optikai szál segítségével egyrészt spektrálisan kiszélesítették a ps-os impulzusokat (nemlineáris fázismodulációval, mint a kortárs kutatócsoportok), valamint egyúttal időben is megnyújtották (lineáris diszperzió). Ezen impulzusokat azután egy erősítőn átvezetve megerősítették, majd a végén egy egyszerű-



Donna Strickland, a Rochesteri Egyetem végzős hallgatója és

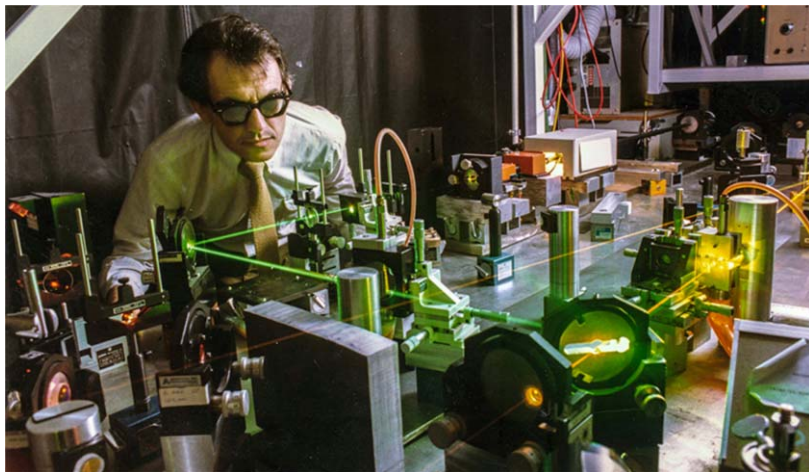


a University of Waterloo Nobel-díjas professzora.

sített rácsos kompresszorral időben összenyomták. Ezzel az eredeti impulzus energiáját 250-szeresre növelték, míg időbeli hosszát egy ps alá vitték (0,7 ps).

Ezzel nagyjából egy időben Gérard Mourou és doktorandusza, Donna Strickland a Rochesteri Egyetemen egy látszólag hasonló kísérletet hajtott végre, azzal a különbséggel, hogy az impulzusokat jelentősen nagyobb nyújtásnak tették ki, és ezzel jóval nagyobb erősítést értek el. Az 1985 decemberében megjelent beszámoló [6] szerint az eredetileg 150 ps-os, 60 nJ energiájú impulzusokat 300 ps-ra nyújtották, sávzélességét pedig egy 1,4 km hosszú optikai szálban megnövelték. Ezt követően az impulzusok energiáját egy regeneratív erősítőben 1 mJ fölé, azaz több, mint tízezerszeresére növelték, ezáltal közel két nagyságrendnyi erősítéssel nagyobb értéket érve el, mint a jénai csoport.

Tudománytörténeti – és most már Nobel-díj történeti – jelentőségű, ahogyan Mourou és Strickland interpretálták kísérletüket, és megfelelő távlatokba helyezték. Felismerték, hogy az eljárás teljesen általánosnak tekinthető, azaz a módszer általánosan alkalmazható bármely rövid impulzus erősítésére, és utat nyithat akár „asztali méretű TW” csúcsteljesítményű impulzusok előállítására képes lézer készítéséhez is.



Gérard Mourou laboratóriumában, 1987-ben és



előadást tart 2018. november 14-én a szegedi ELI-ALPS-ban (fotó: Jacob Péter).

Mi több, egy új nevet, „fázismodulált impulzus erősítés” (chirped pulse amplification, CPA) adtak az eljárásnak, amit egyébként az általánosítás során a radar-technológiára vezettek vissza. A Bell Laboratórium-ból eredő „chirp” kifejezés (*chirp*, ami magyarul csicseregést jelent) a radarimpulzus fázisának modulálását, azaz a frekvencia időbeli folytonos változtatását jelenti [7], és az akusztikai analógiában madárfüttyre emlékeztető hanghullámra utal. Optikai impulzusban is létrehozható ez a csőrp, azaz fázismoduláció, például, ha az egyes frekvenciakomponensek különböző terjedési sebességgel rendelkeznek, vagy különböző hosszúságú utakat futnak be a terjedés során. Előbbi a természetben adott, hiszen a törésmutató hullámhosszfüggése, azaz a normál diszperzió miatt a „vörös” spektrális komponensek sebessége nagyobb a „kék” komponenseknél. Ennek fordítottját, azaz a kék komponensek gyorsabb terjedését a látható tartományban nem a sebességek különbségével, hanem a terjedési utak különbözőségével lehet elérni – mint például a Treacy-féle kompresszorban [2]. A fázismodulációval akár több ezerszeres időbeli nyújtás is elérhető, amivel az impulzusok csúcsteljesítménye arányosan lecsökken. Ennek köszönhetően az erősítés során elkerülhető az önfokuszálódás és a

roncsolódás, de akár öt-hat nagyságrenddel is növelhető az impulzusenergia. Az erősítést követően a nyújtási szakaszban alkalmazottal azonos nagyságú, de ellentétes előjelű fázismoduláció bevezetésével nyerjük vissza a kiindulási impulzushosszat. Eredményül egy időben rövid, nagy energiájú és nagy csúcsteljesítményű lézertimpulzus keletkezik.

Napjainkban a nagyintenzitású ultrarövid impulzuserősítő rendszerek szinte kizárólag a CPA-technológián, illetve annak továbbfejlesztett változatain alapulnak [8]. Sőt, Gérard és Donna azon felismerését, hogy a módszer nem függ az erősítő közegtől, illetve az impulzus generálásától, néhány éven belül további fejlesztésekkel teljesen bizonyították. Mára nem csak szilárdtest lézertörőket (Nd:YAG, Nd:üveg, Ti:zafir stb.), hanem szállezet erősítőket is használnak, nem beszélve a lézertörés egy szélessávú, és termikus hatásoktól mentes alternatívájaként szolgáló úgynevezett optikai parametrikus erősítésről (Optical Parametric Chirped Pulse Amplification, OPCPA). Az érdekesség kedvéért jegezzük meg, hogy ezzel a módszerrel a CPA megjelenése után bő tíz évvel sikerült áttörni a TW határt [9].

A modern, 10 TW és még nagyobb csúcsteljesítményű lézertörőknél elengedhetetlen az impulzus időbeli tisztaságának biztosítása, azaz az időbeli jel-zaj arány legalább nyolc nagyságrenddel keresztül való biztosítása. Ezt az úgynevezett kettős CPA (DCPA) [10], illetve egy további változata, a negatív-pozitív csőrpölt impulzuserősítés (NPCPA) [11] alkalmazásával lehet elérni, mikor két egymást követő CPA-fokozat között lehetőség van nemlineáris folyamatokon alapuló impulzuskondicionálásra, például időbeli tisztításra és az impulzusidő további csökkentésére.

A kanadai születésű Donna Strickland a fizikai Nobel-díjak történetében mindössze a harmadik nő *Marie Curie* és *Maria Goepfert-Mayer* után. Jelenleg a University of Waterloo-n vezetett kutatócsoportjával ultrarövid impulzusok multifrekvenciás Raman-keltésén keresztül történő előállításával, két hullámhosszon működő középínfravörös szállezetek fejlesztésével és az öregszeműség (presbyopia) kezelésére szolgáló, szemlencséiben előállított mikrobuborékok keltésének kutatásával foglalkozik. Doktori címét CPA első megvalósítására és többfoton-ionizációs alkalmazására építve a University of Rochesteren, a Laboratory for Laser Energetics intézetben szerezte.

Gérard Mourou francia fizikus a nagyintenzitású ultrarövid impulzusok előállításának fáradhatatlan úttörője. A Rochesterben eltöltött évek után a Univer-

sity of Michigan professzora volt 16 éven keresztül. 2005-ben visszatért Európába, és az ENSTA Laboratoire d'Optique Appliquée igazgatójaként dolgozott. Ebben az időben kezdeményezte az Extreme Light Infrastructure (ELI) program elindítását, amelynek köszönhetően a nemzetközi tudományos közösség – Csehország és Románia mellett – a Magyarországon létrehozott új lézeres kutatóintézetet, a szegedi ELI-ALPS-szal gazdagodott [12]. Itt jegyezzük meg, hogy a Szegedi Tudományegyetem Optikai és Kvantumelektronikai Tanszékén a cikk szerzői alapították 1998-ban és működtették a szintén CPA/OPCPA-technológián alapuló TeWaTi lézert és laboratóriumot [13]. Gérard Mourou jelenleg a párizsi École Polytechnique-en alapított International Center for Zetta-Exawatt Science and Technology (IZEST) intézet vezetője, amelynek célja a lézeres technológia az ELI-projekten túli távlati irányainak kijelölése.

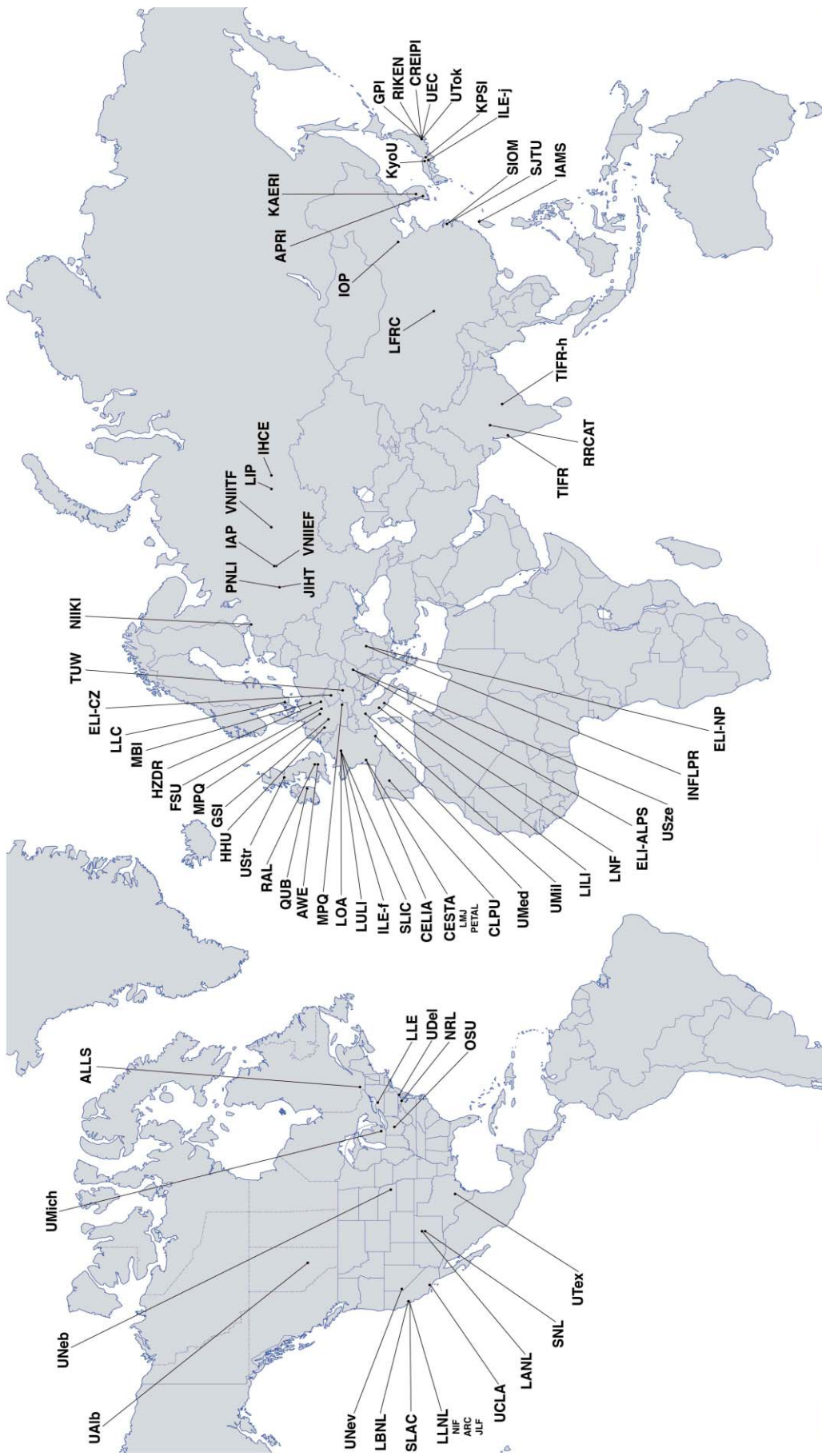
Strickland és Mourou rövid impulzusok erősítését leíró interpretációja, a CPA-módszer, és döntően az azt követő néhány évben általuk elért technológiai áttörés, a TW-os csúcsteljesítmény esetén módon való elérése [14] azután döntően meghatározta az összes, nagy intenzitású, ultrarövid impulzusokat alkalmazó tudományág fejlődését. A CPA-technológiára vezethető vissza például a lézeres részecskegyorsítás, az orvosi szemműtétek, az iparban az anyagmegmunkálás, az erős terek fizikájának és az attoszekundumos impulzusok előállításának terén elért eredmények jelentős része. A mai modern rövid impulzusú lézeres kutatóintézetek semelyike sem lenne elképzelhető a CPA-technológia nélkül. Strickland és Mourou harminc évvel ezelőtti jóslata mára megvalósult, napjainkban a legintenzívebb impulzusok csúcsteljesítménye immáron a 10 petawatt kategóriába esik. A lézerek töretlen technológiai fejlődését és ezzel együtt a kísérletekben és alkalmazásokban való elterjedését az első belső borítón látható PW-osztályú intézetek számosságára is kiválóan szemlélteti [15].

Végezetül engedje meg a Tisztelt Olvasó, hogy a Donna és Gérard Nobel-díjához vezető fenti tudománytörténeti anizix kapcsán *Szent-Györgyi Albert* szavait idézzük: „Látni, amit mindenki lát, és gondolni, amit még senki sem gondolt.”

Irodalom

1. G. Mourou, T. Tajima, S. V. Bulanov, *Rev. Mod. Phys.* 78 (2006) 309.
2. E. B. Treacy: Optical Pulse Compression With Diffraction Gratings. *IEEE J. Quant-Elect.* 5 (1969) 454.
3. B. Nikolaus, D. Grischkowsky, *Appl. Phys. Lett.* 43 (1983) 228.
4. A. M. Johnson, R. H. Stolen, W. M. Simpson, *Appl. Phys. Lett.* 44 (1984) 729.
5. T. Damm, M. Kaschke, F. Noack, B. Wilhelm, *Opt. Lett.* 13 (1985) 176.
6. D. Strickland, G. Mourou: Compression of Amplified Chirped Optical Pulses. *Opt. Commun.* 56 (1985) 219.
7. J. R. Klauder, A. C. Price, S. Darlington, W. J. Albersheim: The Theory and Design of Chirp Radars. *Bell System Technical Journal* 39 (1960) 745–808.
8. C. Danson, D. Hillier, N. Hopps, D. Neely: Petawatt class lasers worldwide. *High Power Laser Science and Engineering* 3 (2015) e3.
9. I. N. Ross, J. Collier, P. Matousek, C. Danson, D. Neely, R. M. Allott, D. Pepler, C. Hernandez-Gomez, K. Osvay, *Appl. Opt.* 39 (2000) 2422.
10. M. P. Kalashnikov, E. Risse, H. Schönnagel, W. Sandner: Double chirped-pulse-amplification laser: A way to clean pulses temporally. *Opt. Lett.* 30 (2005) 923.
11. M. P. Kalashnikov, K. Osvay, I. M. Lachko, H. Schönnagel, W. Sandner: Broadband Amplification of 800-nm Pulses With a Combination of Negatively and Positively Chirped Pulse Amplification. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electr.* 12 (2006) 194.
12. S. Kühn, M. Dumergue, S. Kahaly, S. Mondal, M. Füle, T. Csizmadia, B. Farkas, B. Major, Z. Várallyay, E. Cormier, M. Kalashnikov, F. Calegari, M. Devetta, F. Frassetto, E. Månsson, L. Poletto, S. Stagira, C. Vozzi, M. Nisoli, P. Rudawski, S. Maclot, F. Campi, H. Wikmark, C. L. Arnold, C. M. Heyl, P. Johnsson, A. L'Huillier, R. Lopez-Martens, S. Haessler, M. Bocoum, F. Boehle, A. Vernier, G. Iaquaniello, E. Skantzakis, N. Papadakis, C. Kalpouzos, P. Tzallas, F. Lépine, D. Charalambidis, K. Varjú, K. Osvay, G. Sansone: The ELI-ALPS facility: the next generation of attosecond sources. *J. Phys. B: At., Mol. Opt. Phys.* 50 (2017) 132002.
13. www.tewati.hu
14. P. Maine, D. Strickland, P. Bado, M. Pessot, G. Mourou: Generation of Ultra High Peak Power Pulses by chirped pulse Amplification. *IEEE J. Quant. Electr.* 24 (1988) 398.
15. <https://www.icuil.org>

A PW-osztályú lézertípusok elhelyezkedése



ALLS	Advanced Laser Light Source	Vienna	IMSB	Max Planck Institute of Experimental Physics	Taipei	ITP	Research Center for Applied Technology	UMich	University of Michigan	Moscow
APRI	Advanced Photon Research Institute	Osaka	ILF	Institute of Applied Physics	Biology-Nanogond	ISOT	Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics	UMinn	University of Minnesota	Moscow
ASE	Atomic Weapons Establishment	Orkney	LAP	Laboratoire National d'Optique	Lasnik	ISOM	Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics	UMich	University of Michigan	Moscow
CESTA	Centre de Recherches Scientifiques et Techniques d'Applique	Strasbourg	LFP	Laboratoire National d'Optique	Lasnik	SLC	Songjiang Institute of Optics and Fine Mechanics	UMich	University of Michigan	Moscow
ELI-ALPS	Extreme Light Infrastructure Advanced Light Pulse Source	Budapest	LULI	Laboratoire pour l'Utilisation des Lasers Intenses	Lasnik	TRIP	Tsinghua University	UIowa	University of Iowa	Moscow
ELI-CZ	Extreme Light Infrastructure Advanced Light Pulse Source	St. Radegund	MPD	Max Planck Institute for Quantum Optics	Lasnik	TFR	Tsinghua University	UIChC	University of Chicago	Moscow
FSU	Frederick Seitz Institute	Urbana	NSL	National Science Institute	Lasnik	TIFR	Tata Institute of Fundamental Research	UIChS	University of Chicago	Moscow
FSU	Frederick Seitz Institute	Urbana	PNLI	Petermann Laboratory	Lasnik	UAB	University of Alberta	UIChM	University of Chicago	Moscow
HHU	Humboldt-Universität	Dresden	RFNC	Russian Federal Nuclear Center	Lasnik	UCLA	University of California Los Angeles	UTex	University of Texas	Moscow
HNIL	Humboldt-Universität	Dresden	RRCAT	Raja Ramanna Centre for Advanced Technology	Lasnik	UCI	University of California	UTok	University of Tokyo	Moscow
HNIL	Humboldt-Universität	Dresden	RRCAT	Raja Ramanna Centre for Advanced Technology	Lasnik	UCI	University of California	UTok	University of Tokyo	Moscow
HNIL	Humboldt-Universität	Dresden	RRCAT	Raja Ramanna Centre for Advanced Technology	Lasnik	UCI	University of California	UTok	University of Tokyo	Moscow
HNIL	Humboldt-Universität	Dresden	RRCAT	Raja Ramanna Centre for Advanced Technology	Lasnik	UCI	University of California	UTok	University of Tokyo	Moscow

forrás: <https://www.icuill.org>