

A FÉNYELHAJLÁS YOUNG-FÉLE ELMÉLETE ÉS ALKALMAZÁSA AZ ULTRARÖVID FÉNYIMPULZUSOK DIFFRAKCIÓJAKOR – A SZÉLIHULLÁM-IMPULZUS

Major Balázs, Horváth Zoltán, Kovács Attila Pál, Bor Zsolt
Szegedi Tudományegyetem Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék

A fizikai folyamatok egy igen fontos csoportját alkotják a hullámjelenségek, hiszen mind a fény, mind a hang – amelyek az ember számára környezetéről a legfontosabb információközvetítőként szolgálnak – hullámtermészettel bírnak. A hullámtermészet egyik legfontosabb bizonyítéka a hullámok elhajlása, vagy idegen szóval diffrakciója. Ezzel az elnevezéssel hétköznapi értelemben azt a tapasztalást illetjük, hogy a hullámok bejutnak a szabad terjedést gátló akadályok mögé is. Másképp úgy is megfogalmazható, hogy bizonyos esetekben a hullámok egyenes vonalú terjedésétől eltérő viselkedést tapasztalunk annak ellenére, hogy a vizsgált tartományon a hullám terjedési sebessége mindentűn ugyanakkora. A fény(hullámok) esetében ez a jelenség a hétköznapiakban csak ritkán figyelhető meg, hiszen az elhajlás mértéke az „elhajló” hullám hullámhosszának és a diffrakciót okozó tárgy méreteinek viszonyától függ, és a fény néhány száz-nanométeres hullámhosszaihoz mérten a környezetünkben található tárgyak nagyságrendekkel nagyobbak. Optikai tartományban ez a jelenség egy fizikaórai kísérletben akkor demonstrálható, ha egy monokromatikus (egyszínű), párhuzamosított fényel, például egy folytonos üzemi lézerrel egy néhány száz mikrométer átmérőjű kör alakú nyílást világítunk meg. Ekkor nem csak azt tapasztalhatjuk, hogy a rés mögötti ernyő nagyobb területén látunk fényjelenséget, mint maga a rés, de még azt is, hogy az elhajlás eredményeként az ernyőn nem egy fényes, éles határral rendelkező folt jelenik meg, hanem koncentrikus világos és sötét körök váltják egymást. Amennyiben egy, az előzővel komplexen esetet vizsgálunk, és rés helyett egy megfelelő méretű kör alakú „lapot” világítunk meg, akkor a körlap árnyékterének közepén, a kialakuló diffrakciós kép középpontjában világos foltot láthatunk (Poisson–Arago-folt) pont ott, ahol a fény egyenes vonalú terjedését feltételezve legkevésbé várnánk. Mindkét esetben jellemző tehát, hogy a fény az úgynevezett geometriai árnyéktérbe is bejut, ahova a geometriai optika szabályai szerint nem lenne lehetséges. Kicsit hétköznapiabb példákat tekintve, e jelenségnek köszönhető például az, hogy a rádióhullámok azon földrajzi területekre is eljuthatnak, amelyeket a forrást jelentő adótornyoktól

több száz méter magasságú hegyek választanak el. De jól példázza az is, hogy a hajók vagy földrengések által keltett vízhullámok a kikötők és öblök olyan részeibe is behatolnak, amit a gátak vagy (fél)szigetek a hullám forrásától eltakarnak.

A fényelhajlás hullámoptikai leírása – történeti áttekintés

A fényelhajlás jelenségének leírására használt legismertebb elmélet alapjait *Christiaan Huygens* holland fizikus fektette le és publikálta 1678-ban. Huygens gondolatait később *Augustin-Jean Fresnel* francia mérnök egészítette ki az interferencia elméletével, ami a hullámtermészet másik legfontosabb velejárója. Fresnel 1818-ban megjelentetett memoárjában publikálta a kiegészített elmélet azon a formáját, amit ma Huygens–Fresnel-elvnek nevezünk. Ez az elv kimondja, hogy hullámterjedés során a hullámfront minden egyes pontja elemi hullámforrásnak tekinthető, és egy tetszőleges térbeli pontban egy későbbi időpillanatban tapasztalható jelenséget ezen elemi hullámforrások interferenciája határozza meg. Ez a formalizmus – néhány további alapfeltevést bevezetve – minden akkor tapasztalt diffrakciós jelenséget képes volt nemcsak kvalitatív, de kvantitatív módon is megmagyarázni. Ennek köszönhetően néhány évtizeddel később, 1882-ben *Gustav Kirchhoff*nak sikerült az elvet precíz, bár nem teljesen konzisztens matematikai formába önteni.

A Fresnelnek tulajdonított, teljesnek tekintett leírás azonban nem az első volt azon elméletek közül, amelyek az elhajlás jelenségének hullámelméleten alapuló magyarázatát adták. *Thomas Young* angol orvos és fizikus, néhány évvel Fresnel előtt, már 1802-ben publikálta a résen való elhajlásra vonatkozó saját elképzeléseit. Azonban Young megközelítése gyorsan feledésbe merült egyrészt azért, mert kvantitatív leírást nem tett lehetővé, másrészt később, 1819-ben, maga Young is jobbnak tekintette Fresnel teóriáját sajátjáénál. Thomas Young elmélete szerint az elhajlást okozó tárgy mögötti térben tapasztalt jelenségek két forrásból származó hullámok interferenciájaként jönnek létre. Az egyik hullám a résen akadályoztatás nélkül átjutó geometriai hullám, a másik a rés széléről divergáló hullám, amit napjainkban már *szélihullám* elnevezéssel illetnek. Leírása egyébként még *Isaac Newton* azon megfigyelésén alapult, hogy a vizsgálat részét képező rés széle „világít”, és így az a fény forrásaként szolgál. A felvetés matematikai

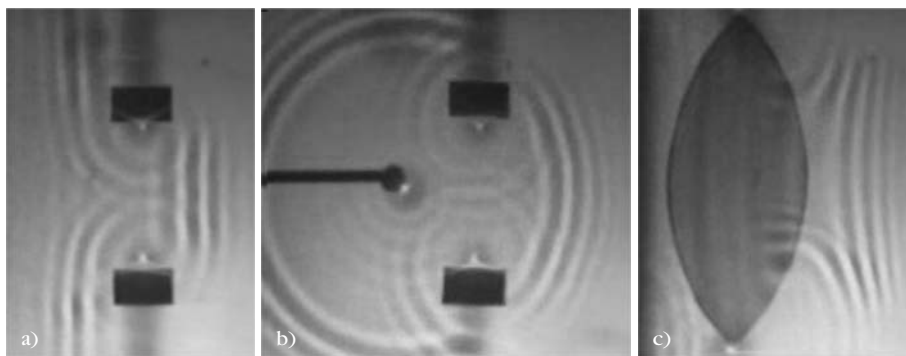
Major Balázs munkája a TÁMOP 4.2.4.A/2-11-1-2012-0001 azonosító számú Nemzeti Kiválóság Program – Hazai hallgatói, illetve kutatói személyi támogatást biztosító rendszer kidolgozása és működtetése országos program című kiemelt projekt keretében zajlott. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

megfogalmazását az elemibbnek tekinthető, zavar nélkül továbbterjedő geometriai hullám tette nehezkessé, hiszen ez a hullámter folytonosságának megszakadását jelenti a geometriai árnyék és fény határán. A parciális differenciálegyenletekkel való matematikai leírásban az ilyen folytonosságbeli szakadások létjogosultságához minden esetben valamilyen fizikai indoklás szükséges, azonban ez esetben ilyen magyarázat nem adható. Így érthető, hogy a matematikai formalizmus kialakítása során Kirchhoff miatt Fresnel megközelítését vette alapul.

Bár Young leírása majd egy évszázadra feledésbe merült, a 19. század végén újból felfigyeltek rá. 1896-ban az akkori Kelet-Poroszországban *Arnold Sommerfeld* egy elektromágneses diffrakációs jelenség szigorúan a Maxwell-egyenleteken alapuló, elektrodinamikailag pontos megoldását adta. Sommerfeld megoldása pedig Young elméletével egybecsengő eredményt mutatott, a kapott megoldás két hullámra volt bontható: egy, a bejövő hullám zavartalan tovaterjedéséből adódó geometriai hullámra és egy, az ernyő széléről származó hullámra. Mivel Sommerfeld levezetése az elektrodinamika alapegyenletein alapult, így megoldásában a geometriai árnyék határán szakadás természetesen nem jelent meg, hiszen az elektromos és mágneses források jelenlétét feltételezte volna, ami a diffrakció jelensége esetén fizikailag nem indokolható. Young elképzelése tehát helyesnek bizonyult, a problémát jelentő „szakadásokat” pedig a számolások alapján a diffrakciót okozó akadályról divergáló szélhullámok „kisimítják” [1]. Ezen felismerés alapján később, a 20. század elején *Wojciech Roubinowicz*, majd a 20. század közepén *Emil Wolf* és munkatársai a Kirchhoff-formalizmusnak is olyan „transzformációt” találtak, amely a hullámter felbontásának azt a formáját adta, ami a Young-elmélet helyességét bizonyította (Marchand–Wolf- és Miyamoto–Wolf-elméletek) [2].

A szélhullám fizikaórai kísérletekben

A Young-féle megközelítés fontosságát Emil Wolf és kollégái már az 1960-as években felismerték. Jelentősége egyszerűségében rejlik: amennyiben az elhajlási jelenségeket és kísérleti megfigyelésüket Young gondolatmenetének ismeretében vizsgáljuk, néhány érdekes megfigyelés olyan egyszerű magyarázatát kaphatjuk, amelyek Fresnel elmélete alapján nehezebben magyarázhatók. A jobb szemléltetés érdekében tekintsünk víz hullámokat és egy rést, azaz két akadályt, amelyek között a hullámok akadályoztatás nélkül továbbjuthatnak (1.a és 1.b ábrák). Young elképzelése szerint ebben az esetben látszólag három hullámforrást figyelhetünk meg: a valódi hullámforrást és a



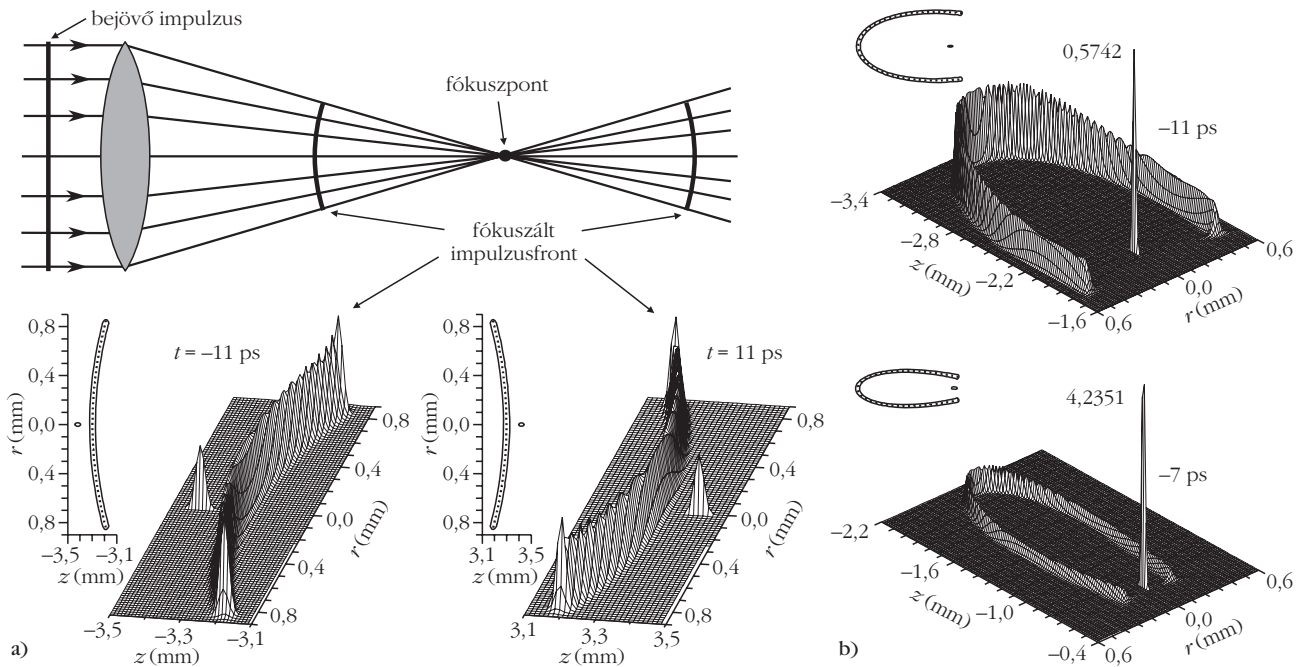
1. ábra. A szélhullámok kísérleti szemléltetése víz hullámok segítségével (a) sík hullámforrás és rés, (b) pontszerű hullámforrás és rés, valamint (c) sík hullámforrás és lencsézó elem használatával. További képek: [3].

rés két szélét. Az 1. ábrán látható, hogy az egyszerű hullámkádban végzett kísérlet során éppen ez tapasztalható mind sík- (1.a ábra), mind pontszerű hullámforrás (1.b ábra) esetén: az akadály széleiről, mint pontszerű forrásokból, kört formázó hullámfrontú szélhullámok indulnak ki. Amennyiben a látható elhajlási jelenséget Fresnel elméletével próbálnánk elemezni, sokkal nehezebben lehetne kikövetkeztetni, hogy miért ilyen a hullámter megjelenése.

A szélhullámok természetesen nem csak egy egyszerű nyíláson/apertúrán való áthaladás esetén jelennek meg. Mivel a fókuszáláshoz használt lencsék maguk is apertúraként viselkednek, a lencse széleiről is szélhullámok indulnak ki. Ahogy az a víz hullámok elhajlását szemléltető kísérleteket bemutató 1.c ábrán is látható, egy a kád aljára helyezett lencse alakú üveglap fókuszáló elemként működik, hiszen a víz kisebb mélysége okán a víz hullám terjedési sebessége az üveglap felett a kád többi részében tapasztaltnál kisebb értékű. E „lencse” széle, ahogy Young elmélete sugallja, körhullámok forrásaként szolgál.

A szélhullám-elmélet megjelenése napjaink fizikai kutatásaiban

Az eddigiek alapján felmerülhet az a gondolat, hogy Young elméletének vizsgálata lezártnak tekinthető, hiszen létjogosultsága már évtizedekkel ezelőtt bebizonyosodott, és Fresnel elméletével összevetve nem hordoz sok újdonságot. Ez azonban tévedés, ugyanis a szélhullám-elmélet az utóbbi években is jelentős érdeklődésre tart számot. Ennek magyarázata, hogy a Young-elméletből könnyen kikövetkeztethető szélhullámok jelenléte nem csak a fizikaórai kísérletekben mutatható ki, de akár az ultrarövid lézerpulzusok esetén is megfigyelhető, amelyek jelenleg sok fizikai kutatás fontos eszközét jelentik, és a Szegedi Tudományegyetemen (SZTE) is kiemelt kutatási témát jelentenek. A korábban példaként felhozott fókuszálás esete azért is érdekes, mert az ultrarövid fényimpulzusok esetében a szélhullám jelenlétére éppen a fókuszálás vizsgálata hívta fel a figyelmet. Ugyanis a több mint egy évtizeddel ezelőtt az SZTE Optikai és Kvantumelektronikai Tanszékén végzett, Kirchhoff



2. ábra. A szélhullám-impulzus megjelenése homogén, intenzitáseloszlású femtoszekundumos impulzus fókuszálásakor. (a) Jól látható, hogy a szélhullám-impulzus a fókuszpont előtt a geometriai impulzus mögött, míg a fókuszpont után a geometriai impulzus előtt halad. (b) A szélhullám jelenlétére a fókuszálás során befűződő impulzusfrontot létrehozó kromatikus hiba vizsgálata hívta fel a figyelmet [4].

formuláin alapuló számítások, amelyek femtoszekundumos lézerpulzusok fókuszálására irányultak, első ránézésre meglepő eredményre vezettek [4] és számos, a tanszékhez kötődő fontos kutatási eredményt indukáltak. A meglepő jelenség az volt, hogy egy homogén intenzitáseloszlású nyaláb leképezési hibáktól (aberrációktól) mentes, ideális lencsével történő fókuszálásakor a geometriai optikával összhangban lévő impulzusfront mögött az optikai tengelyen egy másik impulzus is megjelent, amelynek időbeli lefutása megegyezett a geometriai impulzussal (2. ábra).

A meglepő második impulzus tulajdonságait megvizsgálva később kiderült, hogy az nem lehet más, mint a nyílás széleiről elhajló hullámok interferenciájának eredménye, azaz a szélhullámok ilyen formában történő megjelenése. Így kapta az új impulzus a „szélhullám-impulzus” elnevezést, és így adódott a felfedezés, ami ebben az esetben az elhajlás Young-elméletére terelte a figyelmet.

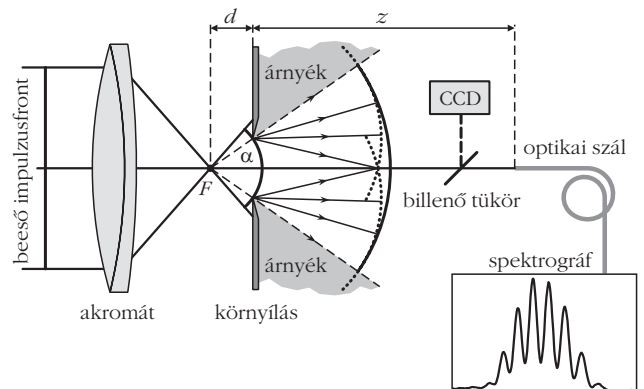
Kicsit belemélyedve a szélhullám-impulzus jellemzőibe, először furcsa tulajdonságra figyelhetünk fel. A 2.a ábrán jól látható, hogy a fókuszpont után a szélhullám-impulzus már a geometriai impulzusfront előtt halad, szemben a fókuszpont előtti esettel, amikor a geometriai impulzus mögött található. Ez arra enged következtetni, hogy a szélhullám-impulzus a fókuszponton való áthaladás során megelőzi a fénysebességgel haladó geometriai impulzust. Valóban, a számítások megmutatták, hogy a szélhullám-impulzus sebessége az optikai tengely mentén a $c/\cos\alpha$ összefüggés szerint változik, ahol c a fénysebesség és α az a szög, ami alatt az optikai tengely adott pontjából a lencse széle látszik. Ez azt jelenti, hogy (egyetlen háttérset kivételével) a szélhullám-impulzus végig a

fénysebéségnél nagyobb sebességgel halad. Habár ennek hallatán elsőre kételkedhet az ember a számolás helyességében, könnyen belátható, hogy ez nem sérti a speciális relativitáselmélet axiómáit. Ugyanis a szélhullám-impulzus a rés széleiről terjedő hullámok konstruktív interferenciájának eredményeként jön létre, és ezek az interferáló hullámok mind fénysebességgel terjednek. Az, hogy az interferencia miatt kialakuló szélhullám-impulzus a fénysebéségnél gyorsabban halad, csak abból adódik, hogy a konstruktív interferencia helye ilyen módon változik.

A szélhullám-impulzus kísérleti demonstrálása

Young elméletének ultrarövid impulzusok fókuszálási modelljében történő megjelenése után a kísérleti demonstrálás sem váratott magára sokáig. Bár az első,

3. ábra. A szélhullám-impulzus kimutatásához használt kísérleti elrendezés [5].



Szegeden végzett kísérleti eredmények csak közvetettek voltak, egyértelmű bizonyítékait jelentették a homogén intenzitáseloszlású nyalábok résen történő elhajlásakor megjelenő szélhullám-impulzusnak.

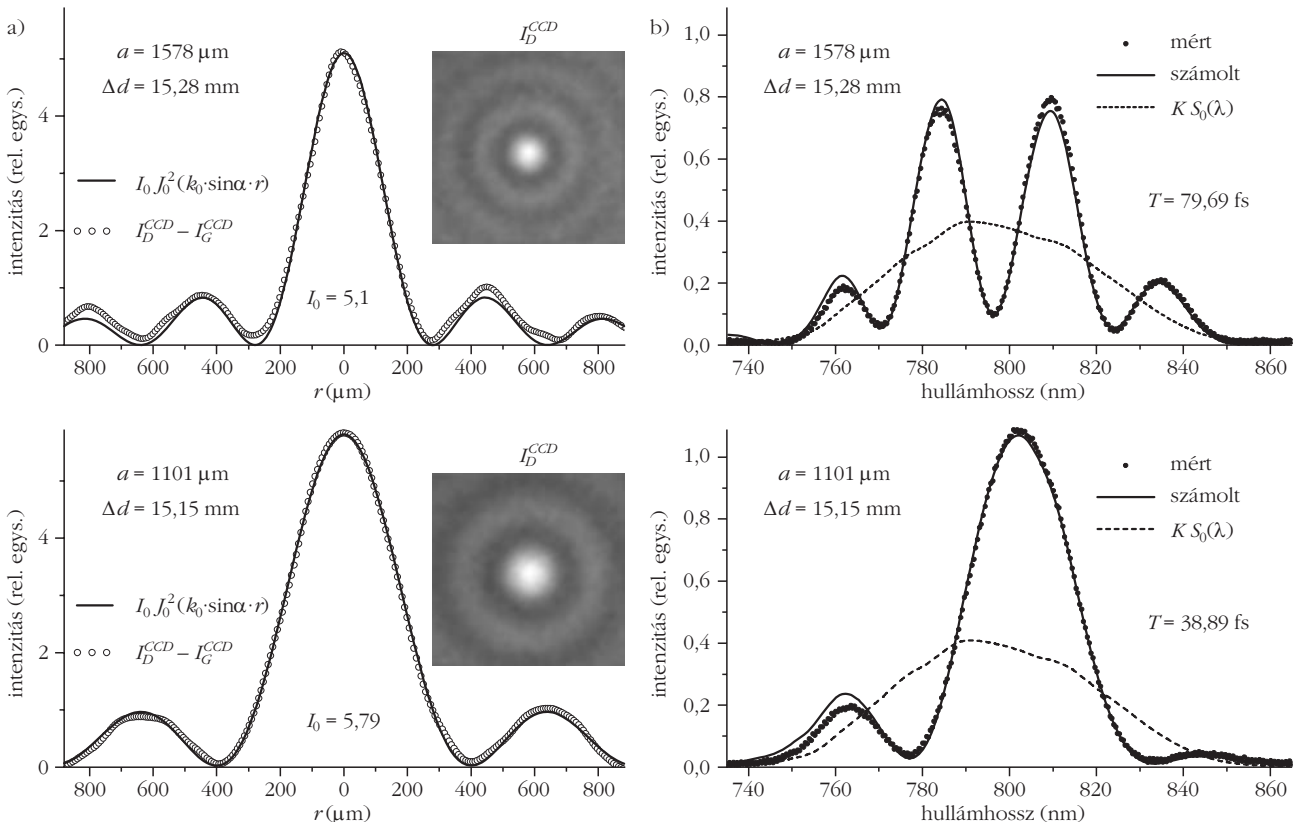
A 3. ábrán látható kísérleti elrendezéssel egy divergens gömbhullám elhajlását egy optikai szál spektrográffal és CCD-kamerával vizsgáltuk. A kísérlet során az optikai szál belépési síkját eltolóval mozgattuk az optikai tengely mentén. A korábbi elméleti leírásnak megfelelően a 4.a ábrán látható, CCD-kamerával készített felvételek már utaltak a szélhullám jelenlétére, hiszen azokon a homogén háttérre ráakadó nulladrendű Bessel-függvény négyzetével (J_0^2) leírható gyűrűrendszernek megfelelő intenzitáseloszlás látható. Ez egyértelmű jele annak, hogy két különböző forrásból származó hullám interferenciájáról van szó. A szélhullám-impulzus egy másfajta kimutatása a spektrográfós mérésekkel történt. Ahogy a 4.b ábrán is látható, a spektrális mérések a fényforrás spektrumának modulációját mutatták (az ábrán a fényforrás spektruma szagatott vonallal van ábrázolva, a modulált spektrumot pedig pontok jelölik). A spektrális moduláció annak a jele, hogy két, időben egymást követő impulzus halad a mérési pont helyén, azaz az optikai tengely mentén. A moduláció periódusa a követési távolsággal áll összefüggésben: minél ritkább a moduláció, időben annál közelebb vannak egymáshoz az impulzusok. Az egyes helyeken a két impulzus közötti időközés eltérő, így a spektrum modulációja változik a szál mozgásakor. A 4.a és 4.b ábrák grafikonjain látható folytonos vonallal

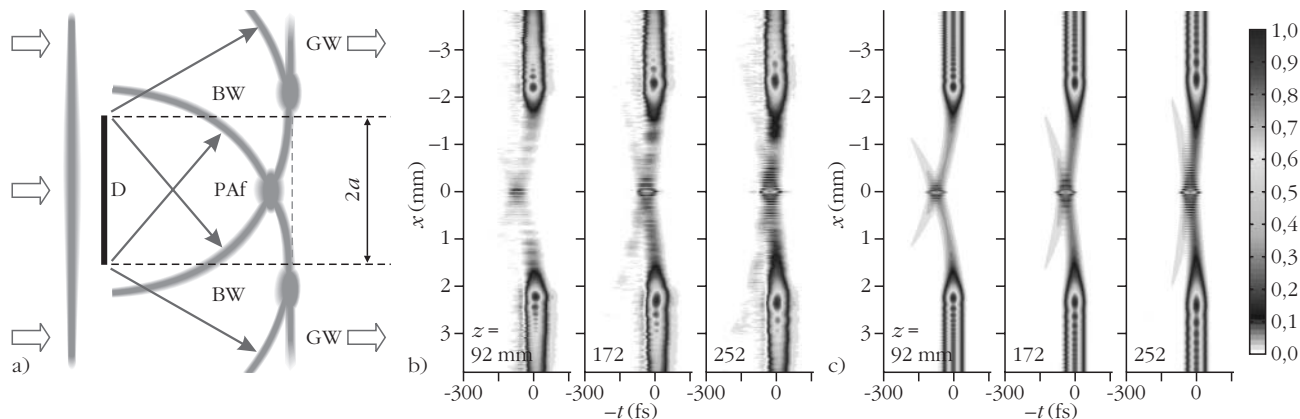
ábrázolt görbék a kísérleti paraméterekkel végzett számolások eredményei, amelyek a mérési eredményekkel igen jó egyezést mutattak.

A szélhullám-impulzus kimutatása azonban nem csak közvetett módon lehetséges. Egy néhány évvel ezelőtt, Rick Trebino és munkatársai által kifejlesztett mérési módszer képes az elektromos térerősség nagy tér- és időbeli felbontású vizsgálatára [6]. A módszerben rejülő lehetőségek egyik első demonstrálása éppen a Young-elmélet különböző diffrakációs jelenségekben való megjelenésének vizsgálata volt. Az 5. ábrán például egy kör alakú lapon történő elhajlás kísérleti eredményei láthatók. A mérések az optikai tengelyre merőleges síkokban, az elhajlást okozó akadálytól mért különböző távolságokban történtek. A kísérlet körszimmetriája miatt a vizsgálat csak egyetlen térbeli dimenzióra szorítkozott.

Az ábrákon jól látható, hogyan halad a geometriai impulzus által el nem érhető tartományban, az optikai tengely mentén, a szélhullámok interferenciájaként létrejövő impulzus. A kísérleti és számolási eredmények ez esetben is szép egyezést mutattak, és az ábrák jól szemléltetik, hogy fokozatosan miként éri utol a szélhullám-impulzus a geometriai impulzusfrontot. Az 5. ábrán látható kísérlet egyébként a monokromatikus hullámoknál megfigyelhető Poisson–Arago-foltnak is megfelelője, hiszen a szélhullám-impulzus miatt az optikai tengelyre merőleges síkokban a körlap árnyékterének közepén fényjelenség tapasztalható. A méréseket környítés esetében is elvégezték. Sőt bonyolultabb esetekben, annulá-

4. ábra. Az (a) és (b) ábrák két-két kísérleti eredményt mutatnak. Az (a) jelű ábrákon az optikai tengelyre merőleges síkban készített CCD-kamerás felvétel látható két különböző esetben, a (b) jelű ábrákon pedig az optikai tengelyen mért spektrum [5].





5. ábra: A körlapon történő elhajlás kísérleti vizsgálata. Az (a) ábra szemlélteti a kísérlet sematikus vázlatát, a geometriai hullám (GW), a szélhullám (BW) és a Poisson–Arago-folt (PAf) megjelenését a D körlemezen való elhajlás során. A (b) ábrán a mért, míg a (c) ábrán számolt térerősség időbeli lefutása látható három különböző, az optikai tengelyre merőleges síkban [6].

ris rések, valamint összetettebb résformáknál is ellenőrizték az elmélet helyességét. A számolási és kísérleti eredmények minden esetben szép egyezést mutattak, és példázták a hullámtermészet talán legfontosabb bizonyítékát, a hullámok elhajlása jelenségét.

Konklúzió

A felvázolt elméleti és kísérleti eredmények mind egyértelműen demonstrálják, hogy Young fényelhajlással kapcsolatos elmélete teljes mértékben megállja helyét. Bár Fresnel megközelítése szélesebb körben alkalmazható az elhajlási jelenségek tárgyalásakor, bizonyos esetekben Young megközelítésével a tapasztalatok könnyebb interpretációja adódik, és matematikai kezelése is egyszerűbbé válik (felületi integrálok helyett elégséges a rés pereme mentén értelmezett vonalintegrálok kiszámítása). A bemutatott eredmények nem csak a hullámtermészet egy szép példáját mutatják, de ezek alapján levonható az a következtetés is, hogy Fresnel

és Young elmélete teljes mértékben ekvivalens. Tehát végső soron egyik elmélet sem tekinthető a másikkal szemben felsőbbrendűnek, és ez az eset jól mutatja, hogy pusztán az első nehézségek miatt nem feltétlenül elvetendő egy-egy új megközelítés.

Irodalom

1. A. Rubinowicz: Thomas Young and the Theory of Diffraction. *Nature* 180 (1957) 160–162.
2. E. W. Marchand, E. Wolf: Boundary Diffraction Wave in the Domain of the Rayleigh–Kirchhoff Diffraction Theory. *J. Opt. Soc. Am.* 52 (1962) 761–763.
3. További képek és videók hasonló kísérletekről az SZTE OKT munkatársai által készített digitális tananyagokban: <http://titan.physx.u-szeged.hu/~ophome/optics/indexh.html>
4. Horváth Zoltán: *Femtosekunderumos fényimpulzusok fókuszálása*. Kandidátusi értekezés, JATE Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék, Szeged, 1997.
5. Z. L. Horváth, J. Klebniczki, G. Kurdi, A. Kovács: Experimental investigation of the boundary wave pulse. *Opt. Commun.* 239 (2004) 243–250.
6. P. Saari, P. Bowlan, H. Valtna-Lukner, M. Löhmus, P. Piksarv, R. Trebino: Basic diffraction phenomena in time domain. *Opt. Express* 18 (2010) 11083–11088.