

FOTOINDUKÁLT ELEKTRON TRANSZFER FLAVOPROTEINEKBEN

Lukács András
Pécsi Tudományegyetem, Általános Orvostudományi Kar,
Biofizikai Intézet

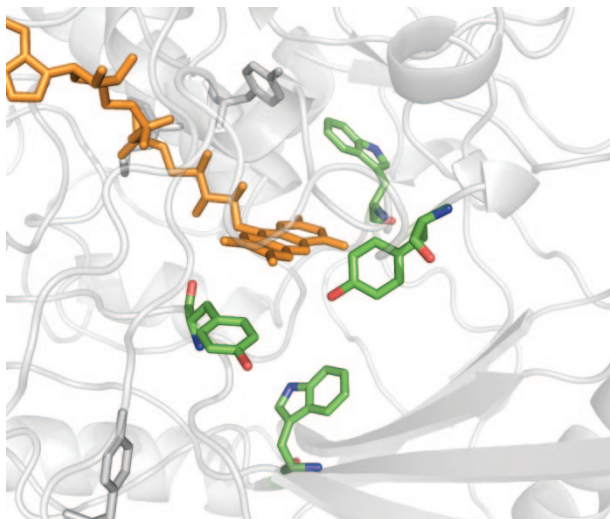
Összefoglalás

A flavoproteinek túlnyomó többségében megfigyelhető a fotoindukált elektron transzfer jelensége, amelynek során az UV/kék fénnel gerjesztett flavin egy elektront von el a környezetétől, aminek következtében a flavin fluoreszcenciája megszűnik. Annak ellenére, hogy ez a jelenség a legtöbb flavoprotein esetében megfigyelhető, csak kivételes esetekben szükséges a fehérje funkciójához. Ezek közé a kivételes esetek közé tartozik több fotoaktív flavoprotein, amelyek a természetben fotoreceptorként működnek. Ebben a munkában a fotoaktív flavoproteinekben lejátszódó elektron transzfer folyamatokat vizsgáltam két fehérjecsalád esetében.

Fotoindukált elektron transzfer

A fotoindukált elektron transzfer jól ismert folyamat a fotokémiában, amelynek során, ha egy molekulát fénnel gerjesztünk, az a környezetéből egy elektront von el. Ez a folyamat gyakori oka a fluoreszcencia megszűnésének vagy más néven kioltásának, sok esetben ugyanis a gerjesztett állapotban levő fluorofór egy elektront von el a környezetéből, aminek következtében megszűnik a gerjesztett állapot, vagyis a fluoreszcencia gyorsabban eltűnik. Ez a folyamat következik be számos flavoprotein esetében, a flavinokra ugyanis általában igaz, hogyha gerjesztett állapotba kerülnek, akkor elektronra van „szükségük”. A folyamat azonban nem csak fehérjékben, hanem még oldatban is megfigyelhető: a flavin-adenin-dinukleotid (FAD) esetében a gerjesztést követően a ribitil lánc végén található adenin gyűrűről egy elektron „ugrik” az izoalloxazin gyűrűre. Ez az oka annak, hogy az FAD esetében két fluoreszcencia élettartam figyelhető meg, egy hosszú 3 ns körüli, illetve egy nagyon rövid 9 ps körüli. A hosszabb élettartam az FAD nyitott, a rövidebbik pedig a zárt konformációjának felel meg (ez utóbbi esetben az adenin közel helyezkedik el az izoalloxazin gyűrűhöz)[1].

A flavoproteinekben lejátszódó elektron transzferről az 1999-es év kémiai Nobel-díj nyertese, Ahmed Zewail számolt be először, aki glükóz oxidázban figyelte meg a jelenséget [2]. Zewail a Nobel-díjat a kémiai reakciók femtoszekundumos spektroszkópiával való tanulmányozásáért kapta, így nem csoda, hogy neki sikerült megfigyelnie a fotoindukált elektron transzfer dinamikáját fehérjékben. Fehérjékben ugyanis ez a jelenség nagyon gyorsan, mondhatni ultra gyorsan megy végbe. Ez az oka annak, hogy a glükóz oxidázt sokszor úgy említik, mint egy olyan flavoprotein, amelyik nem képes fluoreszcenciára. Zewail és Zhong mérései szerint azonban van fluoreszcencia, de csak tranziens módon jön létre, nagyon rövid ideig.



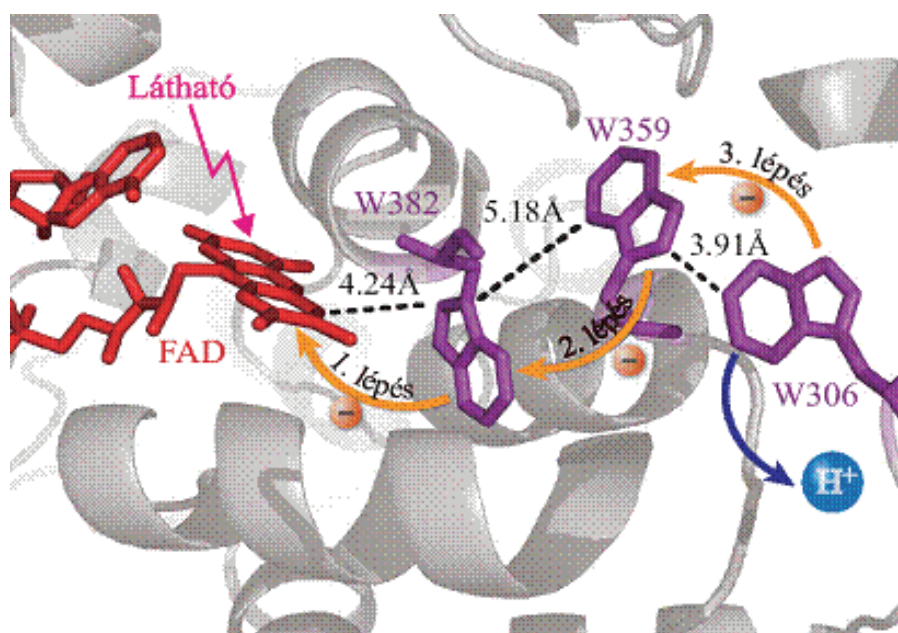
1. ábra. A glükóz oxidáz szerkezete. Az FAD körül (narancs) a potenciális elektron donorok vannak kiemelve. (pdb: 1CF3)

Zewail következtetése szerint a glükóz oxidázban (lásd 1. ábra) valamelyik közeli triptofán az elektron donor, a rövid távolság az oka a hatékony elektron transzfernek és egyben a fluoreszcencia gyors kioltásának is. Nemcsak triptofán lehet azonban elektron donor, hanem például a tirozin is. A flavodoxin esetében egy – ezúttal – az FMN-hez közel elhelyezkedő tirozin az elektron donor. A flavodoxinban ráadásul a fotoindukált elektron transzfer folyamata kevesebb mint 200 fs alatt valósul meg [3, 4], szemben a glükóz oxidázban megfigyelt 30 ps-mal [2, 4].

Érdekes fejlemény, hogy flavoproteinek esetében működik a fordított logika is: ha sikerül „megszabadítani” a flavin környezetét a potenciális elektron donoroktól (elsősorban triptofántól és tirozintól), akkor lehet növelni a fluoreszcencia hatékonyságát. Egy amerikai kutatócsoport a bakteriális MurB enzim módosításával egy flavin alapú (vagyis nem GFP-szerű) fluoreszcens fehérjét hozott létre, amelyet LucY-nak (Lucigen Yellow) neveztek el [5].

Fotoindukált elektron transzfer szerepe a fehérje funkciójában

Ami a fotoindukált elektron transzfer jelenségét még izgalmasabbá teszi az az, hogy bár a glükóz oxidáz vagy a flavodoxin esetében ez nem funkcionális, számos olyan flavoprotein van, amelyek esetében az elektron transzfer kulcsszerepet játszik a funkcióban. Ilyen fehérjék pl. a növények és rovarok cirkadián ritmusának szabályozásában vagy a vándormadarak tájékozódásában kulcsszerepet játszó kriptokrómok, vagy ugyanebbe a fehérjecsaládba tartozó fotoliázok, amelyek a DNS javítást végzik baktériumokban. Mindkét fehérje esetében egy több lépéses elektron transzfer kaszkádra kerül sor, amelyben három közeli triptofán vesz részt. Az külön érdekesség, hogy ez a triptofán motívum jól konzervált a kriptokróm/fotoliáz családban és kiemelt szerepet játszik a fehérjék működésében. Bármelyik triptofán kicserélése megszünteti az elektron transzfert, egyben a fehérje funkcióját is.

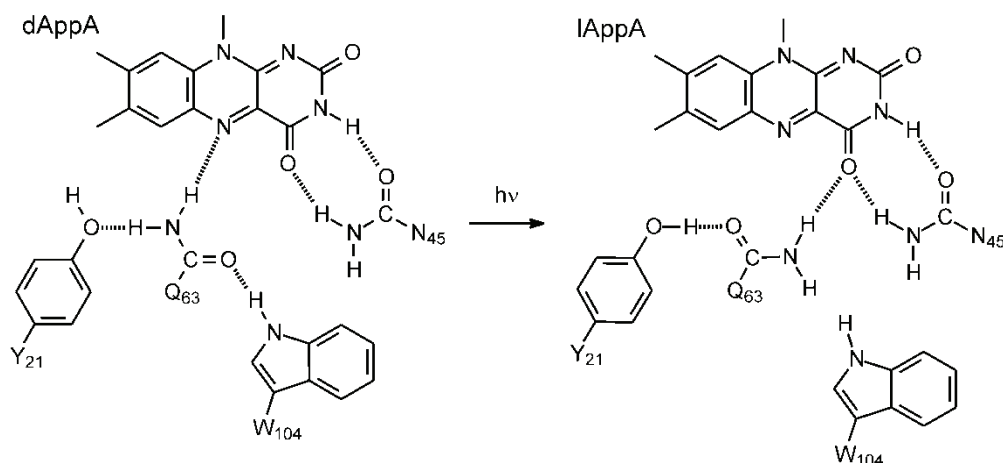


2. ábra. A fotoliázban lejátszódó elektron transzfer kaszkád. (pdb: 1DNP)[6]

A kriptokrómok esetében nagy általánosságban elmondható, hogy a flavin kezdetben oxidált állapotban van. A gerjesztést követően a legközelebb eső triptofánról egy elektron „ugrik” az izoalloxazin gyűrűre, amelynek következtében a flavin redukálódik ($\text{FAD}^{\bullet-}$), a triptofán pedig oxidálódik ($\text{Trp}^{\bullet+}$). (A flavin redox állapotai, de ehhez hasonlóan a triptofán gyökök is, jól megkülönböztethető abszorpciós spektrummal rendelkeznek, amely segít a folyamatok karakterizálásban). A kriptokrómok esetében az elsődleges elektron transzfer lépés nagyon gyors, néhány száz femtoszekundum alatt valósul meg [7]. A fotoliázok esetében a DNS-javítás a flavin teljesen redukált (FADH^-) állapotában valósul meg: a gerjesztést követően egy elektron ugrik a ciklobután pirimidin dimerre, aminek következtében ez a kötés felhasad, ezáltal valósul meg a DNS szál javítása. A fotoliázok esetében érdekes részlet, hogy a tisztítást követően a flavin félig redukált állapotban ($\text{FADH}^{\bullet}$) van, a DNS szál javítására viszont csak abban az esetben kerül sor, ha teljesen redukálódik. Ez szintén fotoindukált elektron transzfer segítségével valósul meg: a gerjesztést követően a flavin egy elektront von el a legközelebbi triptofánról, aminek következtében redukálódik. A töltéshiány 30 ps alatt „végigfut” a triptofánokon, majd 200 ns-mal később sor kerül a deprotonálódásra [8, 9].

Elektron transzfer BLUF-domén fehérjékben

A fotoaktív flavoproteinek különleges családját alkotják a BLUF (Blue light sensing using FAD) fehérjék, amelyek esetében a fényabszorpciót követően a fehérjében strukturális átrendeződés valósul meg szoros összefüggésben a fehérje funkciójával. A legismertebb és legtöbbet vizsgált BLUF domén fehérje a *Rhodobacter sphaeroides*-ben található AppA, amely a transzkripció regulációjában vesz részt [10].



3. ábra. A flavin körüli hidrogénkötés-hálózat átrendeződése a megvilágítást követően (sematikus modell)[11].

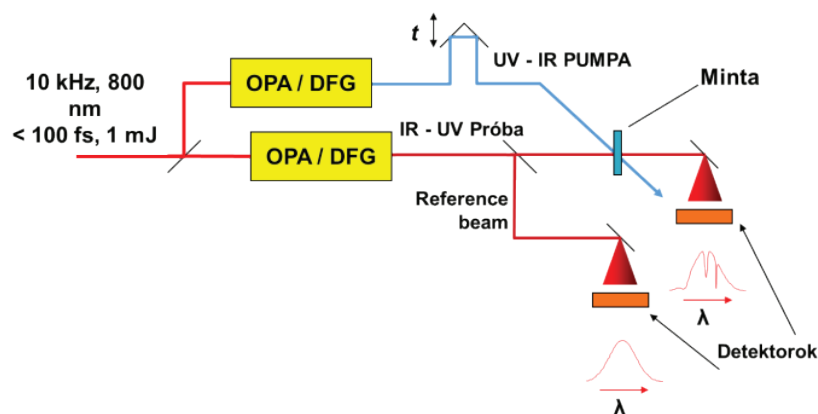
Sötétben az AppA hozzákötődik a PpsR nevű transzkripció antirepresszorhoz, intenzív kék színű fény hatására viszont az AppA-PpsR2 komplex disszociálódik, lehetővé téve a PpsR DNS-hez kötődését és megakadályozva a fotoszintetikus rendszer fehérjeinek bioszintézisét. Az AppA-val kapcsolatos vizsgálatok célja annak megértése, hogy az N-terminálisnál elhelyezkedő BLUF doménben végbemenő fotokémiai folyamatok hogyan vezetnek a C-terminálisnál bekövetkező strukturális változásokhoz, amelyek eredményeképpen a PpsR leválik az AppA-ról.

A kriptokróm/fotoliáz esetében megismert működés nyomán logikus előfeltevés, hogy a fotoindukált elektron transzfernek a BLUF domén fehérjék esetében is funkcionális feladata van. Ebből kiindulva az amszterdami egyetem kutatói arra következtettek, hogy vagy a flavin közeli Y21-es tirozin, vagy a W104-es helyzetű triptofán az elsődleges elektron donor. A holland kutatók az Y21-es tirozint fenilalaninra cserélték (Y21F), aminek következtében azt tapasztalták, hogy a mutánsban nem jön létre az a közel 10 nm-es vörös eltolódás a kék fény megvilágítást követően, mint a vad típusú fehérjében, vagyis a fehérje többé nem fotoaktív. A Kennis-csoport kiterjedt kísérleteket végzett egy másik BLUF domén fehérjén (PixD), amelyek alapján azt a hipotézist állították fel, hogy a BLUF domén fehérjékben az elektron transzfer az az elsődleges lépés, amely a világos állapot megvalósulásához vezet [12].

Ezzel párhuzamosan saját eredményeink azt bizonyították, hogy az FAD körüli hidrogénkötés-rendszer átrendeződése esszenciális a fehérje funkciójának megvalósításában (a mechanizmus egyszerűsített sémája a 3. ábrán látható) [13]. Ha az FAD körüli hidrogénkötés-rendszer átalakul (Q63E és Q63L mutánsok esetében), akkor a fehérje ebben az esetben sem fotoaktív. A glutamin kulcsszerepének leírása mellett, saját (UV/látható) tranziens abszorpciós méréseink ugyanakkor nem igazolták azt, hogy a sötét állapotban levő AppA-ban a megvilágítást követően FAD gyök intermedierek jelennének meg. A fotoindukált elektron transzfer szerepének vizsgálata érdekében kiterjedt spektroszkópai vizsgálatokat végeztünk.

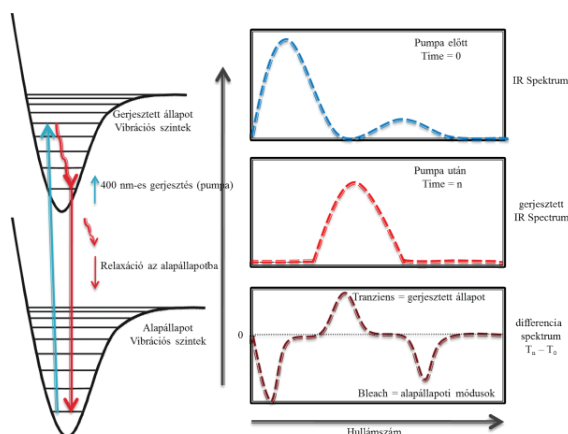
Tranziens infravörös abszorpciós spektroszkópia

Tekintettel arra, hogy a fotoindukált elektron transzfer a fotoaktív flavoproteinekben nagyon gyorsan megy végbe, a folyamatok karakterizálásához ultragyors spektroszkópiát alkalmaztunk, méghozzá annak is egy speciális (és meglehetősen költségigényes) fajtáját, a tranziens infravörös spektroszkópiát. Az alábbiakban ismertetett méréseket a Ruherford Appleton Laboratory, Central Laser Facility Lasers for Sciences nevű kutatóintézet ULTRA nevű berendezésén végeztük el [14]. Az ULTRA központi eleme egy 10 kHz-es ismétlési frekvenciával működő lézer a francia Amplitude nevű cégtől, amely 100 femtoszekundumos hosszúságú és 1 mJ energiájú impulzusokat bocsát ki. A pumpa és próba impulzusokat a litván Light Conversion nevű cég frekvencia konvertáló berendezése (OPA: Optical Parametric Amplifier) hozza létre. A rendszer „szeme” – és egyben legköltségesebb tartozéka – a két higany-kadmium-tellurium (MCdTe) detektor, amelyek segítségével az abszorpcióváltozást mérjük.



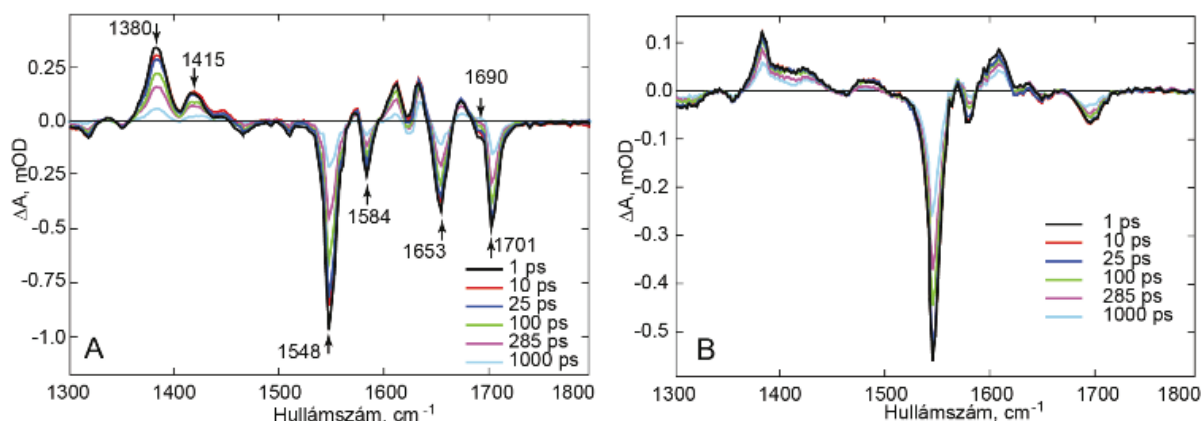
4. ábra. A tranziens infravörös abszorpciós spektroszkópiai rendszer. Egy ún. pumpa-próba módszer, vagyis először gerjesztjük a mintát (ez a pumpa), majd egyre növekvő késleltetéssel világítjuk át a próba nyalábbal. Ez alapján idő függvényében számolható az abszorpcióváltozás.

A spektrum alakját illetően az 5. ábra ad eligazodást: azok a csúcsok, ahol a mintának volt abszorpciója a gerjesztést megelőzően is, negatív előjellel jelennek meg a spektrumban (ezeket a szaknyelv „bleach”-ként nevezi), azok a csúcsok viszont, amelyek a gerjesztést követően jöttek létre pozitívak lesznek (ez utóbbiakat tranzienseknek vagy indukált abszorpciónak hívjuk).



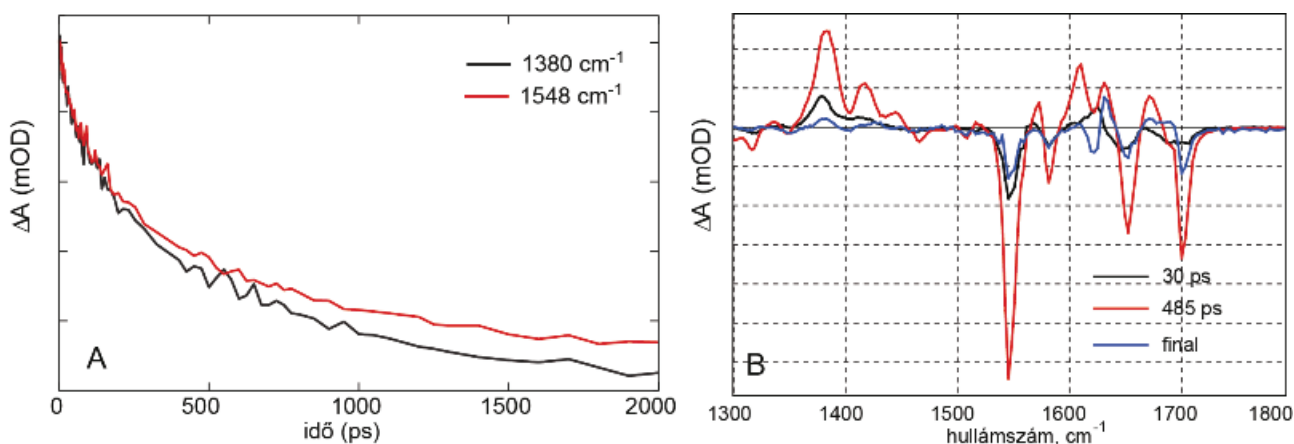
5. ábra. Az abszorpcióváltozás modellje.

Korábbi munkánk során megállapítottuk, hogy melyek azok a frekvenciák, amelyek markerként szolgálnak az FAD semleges és gyök állapotainak azonosításához [4]. Ezek ismeretében méréseket végeztünk a sötét (dAppA) és világos (lAppA) állapotú fehérjén, valamint az Y21 mutáns on. Az alábbi ábrán a vad típusú AppA esetében mért infravörös tranziens abszorpciós spektrumok láthatóak – 1 ps és 1 ns között –, amelyeket túlnyomórészt az FMN karakterisztikus frekvenciái uralnak. Az összehasonlítás kedvéért a jobboldalon az FMN TRIR spektrumai láthatóak azonos késleltetési időknél.



6. ábra. A) AppA és B) FMN tranziens infravörös spektrumai különböző késleltetési időknél.

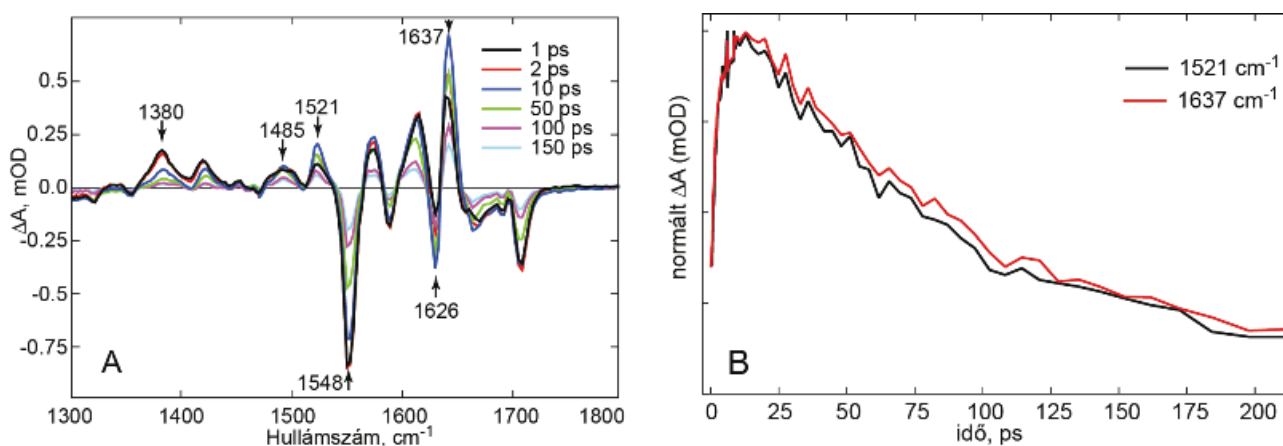
Az ábrán jól látható, hogy az FMN és az AppA TRIR spektruma a legtöbb helyen átfed: a két legnagyobb frekvenciájú csúcs a flavin C2 (1652 cm^{-1}) atomjánál, illetve C4 (1701 cm^{-1}) atomjánál található karbonilcsoport rezgésétől származik. Az 1548 cm^{-1} -nél, illetve 1584 cm^{-1} -nél található módusok pedig a flavin izoalloxazin gyűrűjének rezgései. Az 1380 cm^{-1} és 1415 cm^{-1} -nél található módusok a flavin gerjesztett állapotának rezgései – mivel mindkét spektrumban megtalálható – amelyet a gerjesztett állapot markereként használtunk.



7. ábra. A) A gerjesztett állapot és az alapállapot abszorpciójának relaxációja. B) Különböző időállandókhöz tartozó spektrumok (DAS=Decay Associated Spectra).

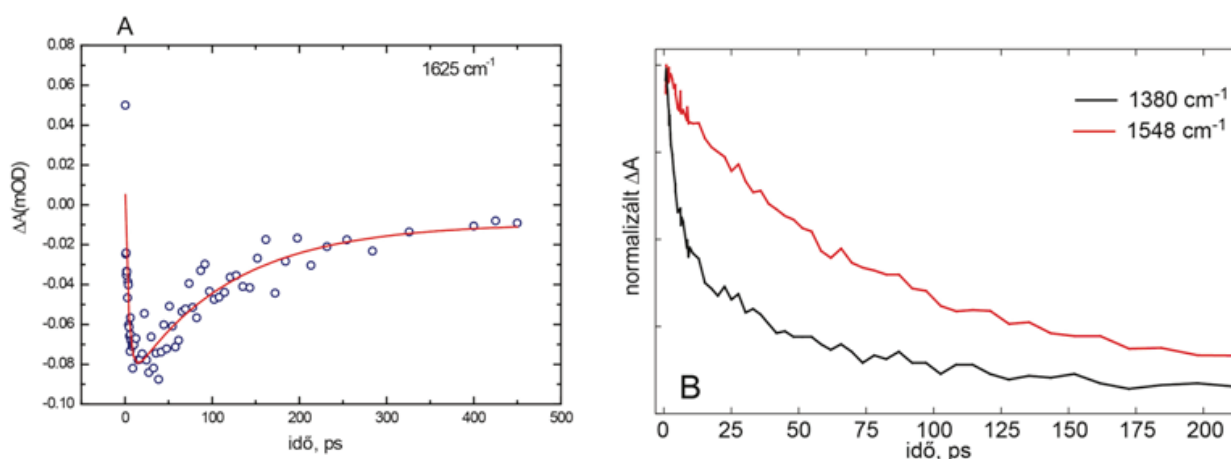
A 7.A ábrán látható a gerjesztett állapot abszorpciójának, illetve az alapállapot abszorpciójának a relaxációja vad típusú (egyben sötét állapotban levő) AppA esetében, amely egészen a hosszú késleltetési időig jól együtt fut. Ha a gerjesztést követő időknél jelentős különbség mutatkozna, azt jelentené, hogy a gerjesztést követően létrejött egy intermedier állapot. A 7.B ábrán látható a vad típusú sötét állapotú AppA méréseken végzett globális illesztés eredménye, amely egy heterogén mintegy 30 és 500 ps-os relaxációs fázis létezését támasztja alá.

Tekintettel arra, hogy a sötét állapoton végzett mérések során az FAD gyök állapotainak ($\text{FAD}^{\bullet-}$ vagy $\text{FADH}^{\bullet}$) megjelenésére nem utalt semmilyen jel, létrehoztuk az Y21W mutánst, amelynek során az eredeti tirozint triptofánra cseréltük. Előfeltevésünk szerint – mivel a töltésszétválasztás szabad energiája jóval negatívabb a triptofán esetében – ilyen módon felerősíthető ugyanis az elektron transzfer.



8. ábra. A) Y21W TRIR spektrumok különböző késleltetéseknél. B) az 1521 cm^{-1} és 1637 cm^{-1} módusok kinetikája.

A 8.A ábrán jól látható, hogy a sötét állapotú AppA-hoz képest a mutánsban három intenzív csúcs (1521 cm^{-1} , 1626 cm^{-1} , 1637 cm^{-1}) jelent meg, amely 100 ps-on belül változik. Az 1626 cm^{-1} és 1637 cm^{-1} -nél megfigyelt csúcsok kinetikája gyakorlatilag megegyezik. Korábbi munkánk [4] alapján az 1521 cm^{-1} -es csúcs az $\text{FADH}^{\bullet}$ és $\text{FAD}^{\bullet-}$ gyök, az 1626 cm^{-1} -es és 1637 cm^{-1} -es csúcs vagy triptofán, vagy tirozin gyök rezgési módusai. A 9.A ábrán látható kinetikából arra lehet következtetni, hogy a gerjesztést követően mintegy 30 ps alatt egy állapot eltűnik, az újonnan létrejött pedig néhány 100 ps alatt relaxálódik. Ez a kinetika nagy valószínűséggel a semleges triptofán „eltűnését” és a triptofán gyök kialakulását mutatja. A 8.B ábrán jól látható eltérés mutatkozik a flavin gerjesztett állapotának (1380 cm^{-1}) valamint a bleach relaxációja között. Tekintettel arra, hogy a gerjesztett állapot gyorsabban relaxálódik, arra tudunk következtetni, hogy – amint ez várható is volt – itt már megfigyelhető egy intermedier állapot kialakulása.



9. ábra. A) Az Y21W kinetikája 1625 cm⁻¹-nél. B) Az Y21W kinetikája 1380 cm⁻¹ és a fő bleach 1548 cm⁻¹ esetében (az összehasonlíthatóság érdekében ez utóbbit pozitív előjellel ábrázoltuk).

Az Y21W mutáns esetében a triptofán gyök megjelenése közvetlen módon is észlelhető volt látható tranziens abszorpció segítségével. Mivel a TrpH^{•+} 560 nm körüli abszorpciós maximummal rendelkezik, ezért ennek a gyöknek a megjelenése könnyedén megfigyelhető volt [15].

Annak érdekében, hogy a flavin rezgéseit elkülönítsük a fehérje módusoktól, ¹³C jelölést hajtottunk végre [15]. Ennek során a fehérje összes szén atomját – kivétel a flavin kromofór – ¹³C izotópra cseréltük, így egyértelművé vált, hogy mely módusok tartoznak a fehérjéhez (leginkább a flavin körüli aminosavakhoz), illetve melyek az FAD-hez. Amint az várható volt, az FAD izoalloxazin gyűrűjének két fő módusa (1548 cm⁻¹) változatlan maradt, az 1700 cm⁻¹-es módus mindössze négy cm⁻¹-es eltolódást mutatott, aminek az oka a C4=O karbonilcsoport és egy közeli aminosav közötti hidrogénkötés megerősödése lehet. Az 1521 cm⁻¹-nél megfigyelt módus nem tolódott el, ami egyértelműen azt mutatja, hogy ez a csúcs az FAD gyök állapotának egyik rezgési módusa. Az 1626 cm⁻¹-es csúcs teljes, az 1637 cm⁻¹-es csúcs részleges eltolódása az alacsonyabb frekvenciák felé arra utal, hogy ezek a módusok a fehérjéhez tartoznak és várhatóan a triptofán gyök állapotának megjelenését mutatják. Az 1637 cm⁻¹-es csúcs csak részlegesen mozdul el a ¹³C jelölés következtében, ami arra utal, hogy ez a csúcs az FAD-hez is köthető.

Következtetések és tervek

Tranziens abszorpciós kísérleteink azt igazolták, hogy az AppA fotoaktivációja sok más fotoaktív fehérjétől eltérően nem fotoindukált elektron transzfer segítségével valósul meg [15]. A szintén BLUF fehérjecsaládba tartozó fehérjéken (PixD) végzett kísérleteink során viszont a fotoindukált elektron transzfer egyértelműen megfigyelhető volt. Jövőbeli kísérleteink annak a megértésére irányulnak, hogy a többi BLUF domén fehérje esetében az elektron transzfer az elsődleges oka-e a fotoaktivációnak vagy csak egy a gerjesztést követő „melléktermék”, és a fotoaktiváció az AppA-hoz hasonlóan a hidrogénkötés-hálózat átrendeződésének következménye.

További kísérleteket végzünk majd annak megértésére, hogy bár W104-es triptofán mutációja nem befolyásolja a fotoaktivitást, a triptofánnak más aminosavra való cserélése jelentősen felgyorsítja a világos állapotból a sötét állapotba való visszatérést, amely a vad típusú AppA esetében mintegy 30 perc.

Irodalomjegyzék

- [1] Chosrowjan, H., Taniguchi, S., Mataga, N., Tanaka, F., Visser, A.W.G. (2003) The stacked flavin adenine dinucleotide conformation in water is fluorescent on picosecond timescale. *Chem Phys Lett*, **378**: 354–358.
- [2] Zhong, D., Zewail, A.H. (2001) Femtosecond dynamics of flavoproteins: charge separation and recombination in riboflavine (vitamin B2)-binding protein and in glucose oxidase enzyme. *Proc Natl Acad Sci USA*, **98**: 11867–72.
- [3] Mataga, N., Chosrowjan, H., Shibata, Y., Tanaka, F. (1998) Ultrafast Fluorescence Quenching Dynamics of Flavin Chromophores in Protein Nanospace. *J Phys Chem B*, **102**: 7081–7084.
- [4] Lukacs, A., Zhao, R.-K., Haigney, A., Brust, R., Greetham, G.M., Towrie, M. et al. (2012) Excited state structure and dynamics of the neutral and anionic flavin radical revealed by ultrafast transient mid-IR to visible spectroscopy. *J Phys Chem B*, **116**: 5810–8.
- [5] Auldridge, M.E., Cao, H., Sen, S., Franz, L.P., Bingman, C.A., Yennamalli, R.M. et al. (2015) LucY: A Versatile New Fluorescent Reporter Protein. *PLoS One*, 10 e0124272.
- [6] Lukács András (2007) Funkcionális fehérjedinamikai vizsgálatok fluoreszcencia és femtoszekundumos időfelbontású tranziens abszorpciós spektroszkópiai módszerekkel. *PhD értekezés*.
- [7] Brazard, J., Usman, A., Lacombe, F., Ley, C., Martin, M.M., Plaza, P. et al. (2010) Spectro-temporal characterization of the photoactivation mechanism of two new oxidized cryptochrome/photolyase photoreceptors. *J Am Chem Soc*, **132**: 4935–45.
- [8] Lukacs, A., Eker, A.P.M., Byrdin, M., Villette, S., Pan, J., Brettel, K. et al. (2006) Role of the middle residue in the triple tryptophan electron transfer chain of DNA photolyase: ultrafast spectroscopy of a Trp-->Phe mutant. *J Phys. Chem B*, **110**: 15654–8.
- [9] Lukacs, A., Eker, A.P.M., Byrdin, M., Brettel, K., Vos, M.H. (2008) Electron hopping through the 15 Å triple tryptophan molecular wire in DNA photolyase occurs within 30 ps. *J Am Chem Soc*, **130**: 14394–5.
- [10] Lukács András (2014) Fénnyel hajtott fehérjék. *Biokémia*, **XXXVIII**: 50–56.

- [11] Anderson, S., Dragnea, V., Masuda, S., Ybe, J., Moffat, K., Bauer, C. (2005) Structure of a novel photoreceptor, the BLUF domain of AppA from *Rhodobacter sphaeroides*. *Biochemistry*, **44**: 7998–8005.
- [12] Bonetti, C., Mathes, T., van Stokkum, I.H.M., Mullen, K.M., Groot, M.-L., van Grondelle, R. et al. (2008) Hydrogen bond switching among flavin and amino acid side chains in the BLUF photoreceptor observed by ultrafast infrared spectroscopy. *Biophys J*, **95**: 4790–802.
- [13] Lukacs, A., Haigney, A., Brust, R., Zhao, R.-K., Stelling, A.L., Clark, I.P. et al. (2011) Photoexcitation of the blue light using FAD photoreceptor AppA results in ultrafast changes to the protein matrix. *J Am Chem Soc*, **133**: 16893–900.
- [14] Greetham, G.M., Burgos, P., Qian, C., Clark, I.P., Codd, P.S., Farrow, R.C. et al. (2010) ULTRA: A unique instrument for time-resolved spectroscopy. *Appl Spectrosc*, **64**: 1311–1319.
- [15] Lukacs, A., Brust, R., Haigney, A., Laptanok, S.P., Addison, K., Gil, A. et al. (2014) BLUF domain function does not require a metastable radical intermediate state. *J Am Chem Soc*, **136**: 4605–15.



Lukács András a Budapesti Műszaki Egyetemen szerzett mérnök-fizikus diplomát 1997-ben. 1999-2002 között a PTE ÁOK Biofizikai Intézetében volt Ph.D. hallgató, 2003-2005 között az R&D Ultrafast Lasers spin-off cégnél dolgozott, 2005-2006 között Marie Curie Ph.D. hallgató volt a franciaországi Ecole Polytechnique, Laboratoire d'Optique et Biologie kutatóintézetében. 2007-ben szerzett Ph.D. fokozatot a Pécsi Tudományegyetem Általános Orvostudományi Karán. 2007-2009 között az Ecole Polytechnique, Laboratoire d'Optique et Biologie kutatóintézetében volt posztdoktorális kutató, 2009-2011 között a University of East Anglia vegyész karán dolgozott tudományos főmunkatársként. 2011 óta újra a PTE ÁOK Biofizikai Intézetében dolgozik. Kutatási területe a fotoaktív fehérjék funkcionális dinamikájának vizsgálata ultragyors spektroszkópai módszerekkel. A tavalyi évben Bolyai János ösztöndíjat, valamint OTKA kutatási pályázatot nyert el.