

jának tekinthető. A függőlegesen gyorsított inga vezérlése tehát nemlinearitása miatt jelentősen eltér a hagyományos Schrödinger-egyenlettel leírt lineáris vezérlési feladattól. Egy vonás azonban mindenképpen közös: vezérlés csak kvantált értékek mellett lehetséges, de ez az új típusú kvantálás már egészen más jellegű, mint a kvantummechanikai. Ez nem is csoda, hiszen a kvantummechanika alapvetően lineáris elmélet [7].

A következőkben vizsgálandó vízszintesen gyorsított inga egyenlete még határértékben sem kapcsolatos a Schrödinger-egyenlettel, ezért ott még nehezebben megvalósítható vezérlésre számíthatunk csak.

## Irodalom

1. K. J. Aström, K. Furuta: Swing up a pendulum by energy control. *Automatica* 36 (2000) 287–295.
2. H. Su, C. A. Woodham: On the uncontrollable damped triple inverted pendulum. *Journal of Computational and Applied Mathematics* 151 (2003) 425–443.
3. D. J. Acheson: A pendulum theorem. *Proc. Royal Soc. A443* (1993) 239–245.
4. Nagy K.: *Elméleti mechanika*. Tankönyvkiadó, Budapest, 2002.
5. National Instruments LabView: ni.com/labview.
6. Tél A., Tél T.: Egy reménytelennek tűnő vezérlési probléma a klasszikus és modern fizika határán. *Fizikai Szemle* 61/12 (2011) 409–416.
7. Marx Gy.: *Kvantummechanika*. Műszaki Kiadó, Budapest, 1971.
8. N. Rosen, P. M. Morse: On the vibrations of polyatomic molecules. *Phys. Rev.* 15 (1932) 210–217.

# A CIRKULÁRISAN FÉNYPOLARIZÁLÓ SZKARABEUSZOK NEM REAGÁLNAK A CIRKULÁRIS POLARIZÁCIÓRA – II. RÉSZ

## Egy évszázados biooptikai hipotézis cáfolata

Blahó Miklós, Egri Ádám, Horváth Gábor

Környezetoptika Laboratórium, Biológiai Fizika Tanszék, ELTE, Budapest

Hegedüs Ramón

Számítógépes Látás és Robotika Csoport, Gironai Egyetem, Girona, Spanyolország

Kriska György

Biológiai Szakmódszertani Csoport, Biológiai Intézet, ELTE, Budapest

Jósvai Júlia, Tóth Miklós

Növényvédelmi Intézet, Agrártudományi Kutatóközpont, MTA, Budapest

Kertész Krisztián, Biró László Péter

Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet, Természettudományi Kutatóközpont, MTA, Budapest

*Albert Abraham Michelson amerikai fizikus 1911-ben fedezte föl, hogy bizonyos szkarabeusz bogarak fémszínű kitingpáncéljáról visszavert fény balra cirkulárisan poláros. Azóta feltételezték, hogy e bogarak képesek érzékelni a fény cirkuláris polarizációját, amit a fajtársak megtalálásához használnak. E hipotézist ellenőriztük hat kísérletben az Anomala dubia, Anomala vitis, Cetonia aurata és Potosia cuprea szkarabeuszfajok több száz egyedével. Kimutattuk, hogy e bogarak nem vonzódnak a cirkulárisan poláros fényhez a fajtársak vagy a táplálék keresése közben. Azt is megmutattuk, hogy e szkarabeuszok gazdanövényei cirkulárisan polarizálatlan fényt vernek vissza. Mindezzel cáfoltuk azon évszázados hipotézist, hogy a szkarabeuszok kitingpáncéljáról tükröződő fény cirkuláris polarizációja e bogarak vizuális kommunikációját szolgálja. Cikkünk I. részében<sup>1</sup> a szkarabeuszok cirkulárispolarizáció-érzékelésének hipotézisét ismertettük, majd leírtuk e probléma vizsgálatára elvégzett kísérleteinket. Írásunk II. részében a kísérleti eredményeinket mutatjuk be és azokat vitatjuk meg.*

<sup>1</sup> *Fizikai Szemle* 62/7–8 (2012) 217–221.

## A szkarabeuszok nem reagálnak a cirkuláris polarizációra

A *Cetonia aurata* aranyos rózsabogarak kitingpáncélja BCP-fényt, míg az alattuk lévő *Epipremnum* levelek cirkulárisan polarizálatlan fényt vernek vissza. A *Potosia cuprea* rezes rózsabogár, az *Anomala dubia* és az *Anomala vitis* cserebogarak kitingpáncélja szintén BCP-fényt ver vissza. A *Cetonia*, *Potosia* és *Anomala vitis* teljesen fekete BC polárszűrőn át nézve, továbbá az *Anomala dubia* a barna szárnyfedőtől eltekintve szintén fekete BC polárszűrőn keresztül. Másrészt viszont e szkarabeuszok optikai környezetében előforduló növények (galagonya: *Crataegus monogyna*, vadrózsa: *Rosa canina*, fekete nyár: *Populus nigra*, platán: *Platanus acerifolia*, lisztes berkenye: *Sorbus aria*, mezei juhar: *Acer campestre*, kislevelű hárs: *Tilia cordata*, madárberkenye: *Sorbus aucuparia*, vadcserecsnye: *Prunus avium*, ecetfa: *Rhus typhina*, mezei szil: *Ulmus campestris*, japánakác: *Sophora japonica*, szelídgesztenye: *Castanea sativa*, közönséges nyír: *Betula pendula*) által visszavert fény cirkulárisan polarizálatlan.

1. táblázat		
A 2. kísérletben a balra cirkulárisan poláros (BCP) vagy a jobbra cirkulárisan poláros (JCP) fényingert választó <i>Cetonia aurata</i> szkarabeuszok száma három különböző képinger esetén, napos vagy borult időben.		
	BCP fényinger	JCP fényinger
1. képinger: <i>Cetonia aurata</i> egy galagonya ( <i>Crataegus monogyna</i> ) virágon		
Összesen 196: 100 ♀ + 96 ♂	94 bogár S: 34, AS: 27, B: 33 M: 59, R: 35	102 bogár S: 33, AS: 29, B: 40 M: 62, R: 40
2. képinger: galagonya ( <i>Crataegus monogyna</i> ) levelek és virágok		
Összesen 141: 73 ♀ + 68 ♂	67 bogár S: 34, AS: 33 M: 39, R: 28	74 bogár S: 39, AS: 35 M: 48, R: 26
3. képinger: virágzó galagonya ( <i>Crataegus monogyna</i> ) bokor		
Összesen 131: 69 ♀ + 62 ♂	67 bogár S: 23, AS: 17, B: 27 M: 37, R: 30	64 bogár S: 26, AS: 19, B: 19 M: 40, R: 24
Teljes 468: 242 ♀ + 226 ♂	228 bogár S: 91, AS: 77, B: 60 M: 135, R: 93	240 bogár S: 98, AS: 83, B: 59 M: 150, R: 90

**Rövidítések:**

♀: nőtény

♂: hím

S: a bogarak választása a teszt doboz napos felére esett.

AS: a bogarak választása a teszt doboz nappal átellenes felére esett.

B: a teljesen borult ég miatt a teszt dobozt egyenes égboltfény világította meg.

M: a bogár mászott.

R: a bogár repült.

**Megjegyzés:** A statisztikai elemzés szerint a különbségek nem szignifikánsak.

Az 1. kísérletben összesen 61 (ebből 40 mászott, 21 repült) *Cetonia aurata* választotta az LCP, míg 59 (42 mászott, 17 repült) a BCP fényingert. E kis különbség statisztikusan nem szignifikáns ( $\chi^2 = 0,033$ ,  $df = 1$ ,  $p = 0,86$ ). A *Cetonia aurata* e kísérletben adott reakciója a véletlenszerű választásnak felel meg a BCP és JCP fényingerek között.

A 2. kísérletben (1. táblázat), amikor egy galagonya virágán lévő *Cetonia aurata* képe volt a teszt doboz ablakában (1. inger), 94 *Cetonia aurata* választotta a BCP, míg 102 a JCP fényingert. A galagonya levelét és virágát (2. inger), valamint a virágzó galagonyabokrot (3. inger) mutató színes képeknél a BCP és JCP fényingert választó *Cetonia* rózsabogarak száma 67 és 74, illetve 67 és 64 volt. Mindösszesen a BCP fényingert 228-szor, a JCP-t pedig 240-szer választották e bogarak. E különbségek egyike sem szignifikáns. A hat főszektor egyike sem volt kitértetett. A teszt doboz Nap felőli oldalát (mikor az ég felhőtlen volt) valamivel többször választották (189), mint a másik, Nappal ellentétes felét (160), de statisztikusan még e különbség sem szignifikáns ( $\chi^2 = 2,41$ ,  $df = 1$ ,  $p = 0,12$ ). A fényingereket a *Cetonia* rózsabogarak gyakrabban közelítették meg mászva (285), mint repülve (183).

Nagyon hasonló eredmények adódtak a *Potosia cuprea*, *Anomala dubia* és *Anomala vitis* esetében is

2. táblázat		
A 2. kísérletben a balra cirkulárisan poláros (BCP) vagy a jobbra cirkulárisan poláros (JCP) fényingert választó <i>Potosia cuprea</i> , <i>Anomala vitis</i> és <i>Anomala dubia</i> szkarabeuszok száma a 3. képinger (virágzó galagonyabokor színes fényképe) esetén.		
faj (100 egyed)	BCP fényinger	JCP fényinger
<i>Potosia cuprea</i> 52 ♂ + 48 ♀	50 M: 35, R: 15	50 M: 37, R: 13
<i>Anomala vitis</i> 100 ♂	51 M: 32, R: 19	49 M: 31, R: 18
<i>Anomala dubia</i> 100 ♂	48 M: 30, R: 18	52 M: 32, R: 20

**Rövidítéseket** lásd az 1. táblázatnál!

**Megjegyzés:** A statisztikai elemzés szerint a különbségek nem szignifikánsak.

3. táblázat		
A 3. kísérletben a balra cirkulárisan poláros (BCP) fényt visszaverő, közvetlenül látható, azonos fajú szkarabeusztetemetek vagy a jobbra cirkulárisan poláros (JCP) fényű, síktükörben látható, azonos fajú szkarabeusztetemetek választó <i>Cetonia aurata</i> , <i>Potosia cuprea</i> , <i>Anomala vitis</i> és <i>Anomala dubia</i> szkarabeuszok száma.		
faj (100 egyed)	BCP szkarabeusztetem (közvetlenül látható)	JCP szkarabeusztetem (síktükörből látható)
<i>Cetonia aurata</i> 50 ♂ + 50 ♀	48 M: 44, R: 4	52 M: 46, R: 6
<i>Potosia cuprea</i> 52 ♂ + 48 ♀	51 M: 45, R: 6	49 M: 34, R: 15
<i>Anomala vitis</i> 100 ♂	50 M: 41, R: 9	50 M: 35, R: 15
<i>Anomala dubia</i> 100 ♂	46 M: 30, R: 16	54 M: 42, R: 12

**Rövidítéseket** lásd az 1. táblázatnál!

**Megjegyzés:** A statisztikai elemzés szerint a különbségek nem szignifikánsak.

(2. táblázat): a BCP/JCP fényingert választók száma 50/50 (*Potosia*), 48/52 (*Anomala dubia*) és 51/49 (*Anomala vitis*) volt. E különbségek egyike sem szignifikáns. A teszt doboz egyik szektora sem volt kitértetett és a bogarak mind a három fajnál inkább mászva közeledtek (*Potosia*: 72, *Anomala dubia*: 62, *Anomala vitis*: 63) a fényingerek felé, mint repülve (*Potosia*: 28, *Anomala dubia*: 38, *Anomala vitis*: 37).

A 3. kísérletben (3. táblázat) a BCP/JCP-fényűnek látszó szkarabeusztetemek választási aránya 48/52, 51/49, 46/54 és 50/50 volt rendre a *Cetonia*, *Potosia*, *Anomala dubia* és *Anomala vitis* fajoknál. Ezen arányok statisztikailag nem szignifikánsan térnek el az 50/50%-tól. A szkarabeuszok megint a mászást preferálták (*Cetonia*: 90, *Potosia*: 79, *Anomala dubia*: 72, *Anomala vitis*: 76) a repüléssel szemben (*Cetonia*: 10, *Potosia*: 21, *Anomala dubia*: 28, *Anomala vitis*: 24).

A 4. kísérletben a szexferomonnal ellátott csapdák nagy számú *Anomala dubia* és *Anomala vitis* bogarat fogtak, szignifikánsan többet, mint bármely más csap-

4. táblázat		
A 4. kísérletben használt, <i>Anomala vitis</i> / <i>dubia</i> tetemekkel ellátott, vagy szexferomont kibocsátó, vagy üres csapdák által fogott <i>Anomala vitis</i> és <i>Anomala dubia</i> szkarabeuszok száma.		
csali	<i>Anomala vitis</i>	<i>Anomala dubia</i>
<i>Anomala dubia</i> tetemek	1 (♂)	0
<i>Anomala vitis</i> tetemek	1 (♂)	0
szexferomon	867 (♂)	381 (♂)
üres	0	1 (♂)
<i>p</i> -érték	0,0002	0,0002

Rövidítéseket lásd az 1. táblázatnál!

Megjegyzés: A *p*-értékek a Kruskal–Wallis statisztikai tesztre vonatkoznak.

5. táblázat		
A 4. kísérletben használt, <i>Cetonia aurata</i> tetemekkel ellátott, vagy virágillatot árasztó, vagy üres csapdák által fogott <i>Cetonia aurata</i> és <i>Potosia cuprea</i> szkarabeuszok száma.		
csali	<i>Cetonia aurata</i>	<i>Potosia cuprea</i>
<i>Cetonia aurata</i> tetemek	0	0
vonzó virágillat	415 (205♀+210♂)	47 (24♀+23♂)
üres	0	0
<i>p</i> -érték	< 0,0001	< 0,0001

Rövidítéseket lásd az 1. táblázatnál!

Megjegyzés: A *p*-értékek a Kruskal–Wallis statisztikai tesztre vonatkoznak.

da (4. táblázat). Csak 1-1 *Anomala vitis* egyedét fogott az *Anomala vitis*, illetve *Anomala dubia* szkarabeusztetemeket tartalmazó csapda, míg az üres csapdák nem fogtak semmit. Az *Anomala dubia* fogása is nagyon hasonló képet mutatott: a szexferomonon csapda nagy számú egyedét, míg a másik két csapda egyetlen, vagy egyetlen egyedét sem fogott (4. táblázat). A virágillattal csalogatott csapdák is szignifikánsan több *Cetonia aurata* és *Potosia cuprea* egyedét fogtak, mint a *Cetonia*-tetemekkel ellátott vagy az üres csapdák (5. táblázat).

Az 5. kísérletben a négy vizsgált szkarabeuszfaj egyike sem részesítette előnyben a BCP és a lineárisan poláros fényinger egyikét sem (6. táblázat). A tapasztalt nagyon kis különbségek egyike sem volt szignifikáns. Hasonló a helyzet a 6. kísérletben, ahol mind a négy szkarabeuszfaj gyakorlatilag fele-fele arányban választotta a BCP és a polarizálatlan fényingert, és a különbségek itt sem voltak szignifikánsak (7. táblázat). Az 5. és 6. kísérlet eredménye megerősítette azt a következtetésünket, hogy a *Cetonia aurata*, *Potosia cuprea*, *Anomala vitis* és *Anomala dubia* szkarabeuszok nem vonzódnak a BCP-fényhez sem a táplálék, sem pedig a fajtársak keresésekor.

Az 1. ábra szerint a balra cirkulárisan polarizáló *Anomala vitis*, *Anomala dubia* és *Cetonia aurata* bogarak kitinpáncéljának visszaverődési spektruma

6. táblázat		
Az 5. kísérletben a balra cirkulárisan poláros (BCP) vagy a teljesen lineárisan poláros (TLP) fényingert választó <i>Cetonia aurata</i> , <i>Potosia cuprea</i> , <i>Anomala vitis</i> és <i>Anomala dubia</i> szkarabeuszok száma.		
faj (100 egyed)	BCP fényinger	TLP fényinger
<i>Cetonia aurata</i>	50 (M: 48, R: 2)	50 (M: 47, R: 3)
<i>Potosia cuprea</i>	52 (M: 51, R: 1)	48 (M: 46, R: 2)
<i>Anomala vitis</i>	52 (M: 52, R: 0)	48 (M: 48, R: 0)
<i>Anomala dubia</i>	45 (M: 45, R: 0)	55 (M: 55, R: 0)

Rövidítéseket lásd az 1. táblázatnál!

Megjegyzés: A statisztikai elemzés szerint a különbségek nem szignifikánsak.

7. táblázat		
A 6. kísérletben a balra cirkulárisan poláros (BCP) vagy a polarizálatlan fényingert választó <i>Cetonia aurata</i> , <i>Potosia cuprea</i> , <i>Anomala vitis</i> és <i>Anomala dubia</i> szkarabeuszok száma.		
faj (100 egyed)	BCP fényinger	polarizálatlan fényinger
<i>Cetonia aurata</i>	49 (M: 49, R: 0)	51 (M: 51, R: 0)
<i>Potosia cuprea</i>	47 (M: 47, R: 0)	53 (M: 53, R: 0)
<i>Anomala vitis</i>	53 (M: 53, R: 0)	47 (M: 47, R: 0)
<i>Anomala dubia</i>	52 (M: 52, R: 0)	48 (M: 48, R: 0)

Rövidítéseket lásd az 1. táblázatnál!

Megjegyzés: A statisztikai elemzés szerint a különbségek nem szignifikánsak.

(merőleges beesés mellett) egyetlen csúccsal rendelkezik a zöld tartományban (*Anomala vitis*: 562 nm, *Anomala dubia*: 614 nm, *Cetonia aurata*: 574 nm). A *Potosia cuprea* visszaverődési spektrumának két csúcsa van: az elsődleges csúcs a vörösben (670 nm) és a másodlagos csúcs a zöldben (549 nm). Az egycsúcsos spektrumok fémes zöld színt kölcsönöznek e bogaraknak, míg a kétcsúcsos spektrum a *Potosia cuprea* rezes-barnás színéhez vezet.

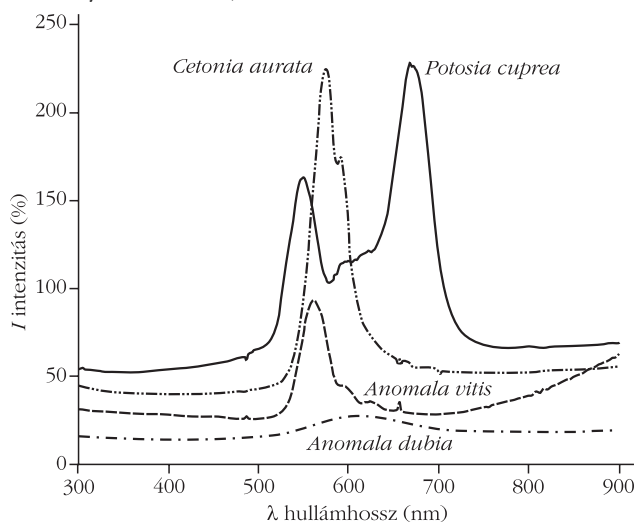
## A kísérleti eredmények megvitatása

A vizsgált szkarabeuszfajok természetes optikai környezetében a legerősebb CP fényforrás e szkarabeuszok BCP-fényt visszaverő kitinpáncélja, mivel növényi környezetük gyakorlatilag cirkulárisan polarizálatlan. Ezért a cirkulárispolarizáció-érzékelés a kitinpáncélról visszavert BCP-fény keresésével elvben segíthetne a fajtársak megtalálásában. Azonban a kísérleteink szerint – annak ellenére, hogy a vizsgált szkarabeuszfajok kitinpáncélja a spektrum látható tartományában BCP-fényt ver vissza – a *Cetonia aurata*, *Potosia cuprea*, *Anomala vitis* és *Anomala dubia* szkarabeuszok az általunk tesztelt körülmények között (táplálék és fajtársak keresése közben) nem vonzódnak a CP-fényhez.

A 4. kísérletről látszik, hogy a vizuális jelek – beleértve a szkarabeusztestetek által visszavert BCP-fényt is – a vizsgált szkarabeuszfajoknál nem idéztek elő vonzó hatást, annak ellenére, hogy a vizsgált bogarak nagy egyedszámban voltak jelen a kísérleti helyszínen – ezt mutatja a szexferomont (*Anomala vitis* és *dubia*) és virággillatot (*Cetonia* és *Potosia*) árasztó csapdák nagy fogásszáma. A 4. kísérlet alapján úgy tűnik, hogy a szkarabeuszok fajtársaikat a szagok segítségével, nem pedig vizuális jelek (például a kitinpáncélról visszavert CP-fény) alapján találják meg. Jól ismert jelenség [1], hogy az *Anomala dubia* és *Anomala vitis* szexferomonjai kis mértékben egymást is vonzzák. Hasonlóképpen ismert a *Cetonia* és *Potosia* vonzódása a kísérletben alkalmazott virággillatokhoz [2, 3].

Ha a vizsgált szkarabeusz bogarak szag alapján találnak egymásra, akkor ehhez vizuális jelekre nincs szükségük. Megjegyzendő viszont, hogy a feromonok használata nem feltétlenül zárja ki a vizuális jelek szerepét, ami számos faj esetében ismert [4]. Véleményünk szerint a szkarabeuszok kitinpáncéljáról visszavert fény cirkuláris polarizációja csak mellékterméke a kitinpáncél csavart (helikális) nanoszerkezetének. Szerintünk a kitinpáncél csavart struktúrájának elsődleges célja a mechanikai és/vagy kémiai hatásokkal (mechanikai nyomással és/vagy sav-lég okozta sérülésekkel) szembeni ellenálló képesség növelése lehet és nem a BCP-fény keltése vizuális kommunikáció céljára. Az itt bemutatott kísérleteink fényében a szkarabeusz-kitinpáncél cirkuláris polarizációjának optikai szerepe nagyon valószínűtlen, az említett mechanikai és kémiai feltételezés pedig a jövőben kísérletileg ellenőrizendő. Az is tisztázatlan kérdés még, hogy a kitinpáncélnak a kizárólag csak a szkarabeuszoknál megjelenő [5], s a koleszterikus folyadék-kristályoké-

1. ábra. Az *Anomala vitis*, *Anomala dubia*, *Cetonia aurata* és *Potosia cuprea* szkarabeuszok fémes BCP-fényt tükröző kitinpáncéljának visszaverődési spektruma merőleges visszaverődés esetén. A visszavert fény *I* intenzitásának mérésakor a mérőműszer fehér, difúz visszaverődési standardja jelentette a referenciaállandót. Az *I*-értékek akkor lehetnek nagyobbak 100%-nál, ha a vizsgált felszín több fényt tükröz vissza, mint a referenciaállandó.



hoz hasonló szerkezete miatt tér el ilyen nagy mértékben más fémfényű bogarakétól.

A szkarabeuszok pozitív reakciójának, azaz a BCP-fényhez való vonzódásának hiánya magyarázható lenne a kísérletekben használt egyedek motivációjának (táplálék- és fajtárskeresés) hiányával is. Azonban ez több okból is igen valószínűtlen: (1) Az 1. kísérletben használt *Cetonia aurata* bogarakat közvetlenül a kísérletet megelőző napon, rajzáskor gyűjtöttük be, és nehezen képzelhető el, hogy másnapra elvesztették volna a táplálék- és fajtárskeresési motivációjukat. (2) A 2., 3., 5. és 6. kísérletben a tesztdobozban használt szkarabeuszokat szintén a kísérleteket megelőző napokon gyűjtöttük be, a bogarakat a kísérletek előtt 6 órán át egy külön edényben éhezettük, s minden egyedet csak egyszer teszteltünk. E körülményekkel minimalizáltuk annak lehetőségét, hogy a bogarak elveszítsék motivációjukat a táplálék és fajtársak keresésére. (3) A 4. kísérletet a terepen végeztük, motívált, röpködő szkarabeuszokkal. (4) Az 1., 2., 3., 5. és 6. kísérletben a szkarabeuszok gyakorta repültek a vizuális ingerek felé (1–3. táblázat), ezzel mutatva aktivitásukat, motivációjukat. Továbbá, a vizsgált szkarabeuszegyedek szemlátomást párzási hangulatban voltak, mert mind a négy faj befogott egyedei folyamatosan párosodtak, vagy erre tettek kísérletet.

## Összefoglalás

A bogarak Scarabaeidae családjá Rutalinae alcsaládjának *Anomala vitis* és *Anomala dubia* fajainál, valamint Cetoniinae alcsaládjának *Cetonia aurata* és *Potosia cuprea* fajainál, amelyek páncélja balra cirkulárisan poláros fényt ver vissza, nem találtunk kísérleti bizonyítékot arra, hogy a cirkulárisan poláros fényre bármiféle viselkedési választ (például vonzódást) adnának. A kitinpáncél fénypolarizáló tulajdonságaiban a nemek között nem volt különbség. Úgy tűnik, hogy a szkarabeuszok esetén a fajtársak megtalálásában a szagok nagyobb jelentőséggel bírnak, mint a vizuális jelek. Mivel a szkarabeuszok látórendszerének alapvető anatómiai és optikai tulajdonságai megegyeznek [6], ezért eredményeink minden bizonnyal általánosíthatók a többi szkarabeuszfajra is. A jövőben azonban fontos lenne további szkarabeuszfajok cirkulárispolarizáció-érzékelését is vizsgálni, hogy még általánosabb érvényű kijelentéseket tehesünk a szkarabeuszok cirkulárispolarizáció-látásával vagy polarizációvakságával kapcsolatban.

## Köszönetnyilvánítás

Horváth Gábor köszöni a német Alexander von Humboldt Alapítvány nagyértékű műszeradományát. Hegedüs Ramón hálás az Európai Unió két éves Marie Curie IEF kutatói ösztöndíjért.

## Irodalom

1. Tóth, M.; Leal, W. L.; Szarukán, I.; Lesznyák, M.; Szöcs, G.: 2-(E)-Nonen-1-ol: male attractant for chafers *Anomala vitis* Fabr. and *Anomala dubia* Scop. (Coleoptera: Scarabaeidae). *Journal of Chemical Ecology* 20 (1994) 2481–2487.

2. Tóth M., Imrei Z., Szarukán I., Voigt E., Schmera D., Vuts J., Harmincz K., Subchev M.: Gyümölcs-, illetve virágkárokat okozó cserebogárfélék kémiai kommunikációja: egy évtized kutatási eredményei. *Növényvédelem* 41 (2005) 581–588.
3. Vuts, J.; Imrei, Z.; Tóth, M.: New co-attractants synergizing attraction of *Cetonia aurata aurata* and *Potosia cuprea* to the known floral attractant. *Zeitschrift für angewandte Entomologie* 134 (2010) 9–15.
4. Christensen, T. A. (ed.): *Methods in Insect Sensory Neuroscience*. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, USA, 2005.
5. van de Kamp, T.; Greven, H.: On the architecture of beetle elytra. *Entomologie Heute* 22 (2010) 191–204.
6. Gokan, N.; Meyer-Rochow, V. B.: Morphological comparisons of compound eyes in Scarabaeoidea (Coleoptera) related to the beetles' daily activity maxima and phylogenetic positions. *Journal of Agricultural Science* 45 (2000) 15–61.

## KOZMIKUS SUGÁRZÁS EXTRÉM ENERGIÁKON – II. RÉSZ

Kövesi-Domokos Zsuzsa

Department of Physics and Astronomy  
The Johns Hopkins University  
Baltimore, USA

*A cikk első része<sup>1</sup> leírta az extrém energiájú kiterjedt légizáporok alapvető tulajdonságait és a detektálás két fontos módszerét felszíni zápor- és fluoreszcens detektorokkal. A fluoreszcens detektorok és a hibrid (kombinált felszíni zápor- és fluoreszcens) detektorok jelentősek mind a primér részecske azonosításában, mind az energiabecslés javításában. Hangsúlyoztuk az extrém energiájú kozmikus sugárzás jelentőségét a részecskefizikai kutatásban, minthogy ez az energiataromány még a legnagyobb működő gyorsítóval (LHC) sem érhető el.*

### Anomális záporok és fizika a Standard Modellen túl

A múlt század kilencvenes éveiben, az extrém energiatarományban a fluxusadatok legnagyobb részét az AGASA-detektor adta. A spektrum legmeglepőbb két tulajdonsága az volt, hogy nem mutatta a várt *GZK-levágást* és még  $E > 10^{20}$  eV fölött is 11 záport figyeltek meg. A Fly's Eye korai adatai további 5 eseménnyel támogatják. Ezeket nevezzük anomális záporoknak. A *GZK-levágás* fizikájához (pion fotokeltés) semmilyen kétség sem fért, minthogy ezt a folyamatot a múlt század ötvenes éveitől laboratóriumi kontrollált körülmények között sokszor kimérték. Ebből következett, hogy vagy a *GZK-gömbön* belül keletkeznek a protonok, vagy a záport kezdeményező részecske akadálytalanul keresztülutazik a mikrohullámú háttérsugárzáson, de a levegőmaggal – a protonhoz hasonlóan – erősen hat kölcsön. Minthogy a csillagászok kifogytak a nagy fluxusú vagy nagy számú „extrém” forrásokból, a részecskefizikusok léptek akcióba. Két csoportba sorolhatjuk az elméleti elgondolásokat: csak a Standard Modellt használó és az azon lényegesen túllépő magyarázatokat.

#### Z-robbanás

A Standard Modellen túl csak azt kell feltenni, hogy a neutrínók tömeggel rendelkeznek, ami kísérletileg jól

igazolt tény. A Világmindenség bármely részéről érkező extrém,  $E \approx 10^{23}–10^{24}$  eV (!) energiájú neutrínók rezonanciában keltenek egy semleges, gyenge bozont a  $Z^0$ -t, amikor a neutrínó-háttérsugárzás egy neutrínójával ütköznek a *GZK-gömbön* belül. A  $Z^0$  bomlásból átlagosan csak 2 nukleon, de körülbelül 20 gamma-foton (több extrém energiájú is) és nagyon sok lepton keletkezik. A bomlásból származó protonok keltik az „anomális” záporokat. Ez a modell, bár nagyon takarékos az alapvető kölcsönhatási modellben, de minden másban a praktikusnak elfogadott lehetőségek határán kívüli körülményeket követel. Természetesen a döntő szót itt is csak a kísérleti-megfigyelési eredmények adhatják. Két kísérlet is sikerrel adott felső korlátot ezen rendkívüli energiájú neutrínók fluxusára. Ezek a korlátok már szinte kizárták a Z-robbanást, mint az anomális záporok forrását. Az Auger Observatórium és a Teleszkóprendszer eredményeiből rövidesen láthatjuk, hogy ez a folyamat lényegében nem adhat járulékot az extrém energiájú fluxushoz.

#### Topológiai defektusok és szupernehéz sötét anyag

A *Nagy Egyesítés Elméletek* (Grand Unified Theory vagy GUT) a Standard Modell háromféle mértékinvariáns kölcsönhatását (gyenge, elektromágneses és erős) és a sokféle kvarkot, leptont próbálják egy egységes elméletté összehozni. (Emlékezzünk, hogy az első ilyenfajta egyesítés a 19. század végén az elektromos és mágneses jelenségek összekapcsolása volt *Maxwell* egyenleteiben. A Standard Modellen az elektromágneses és gyenge kölcsönhatások egyesültek és a részecskék is családokba rendeződtek.) Közvetlenül az Ősrobbanás után a Világegyetem a GUT alapján működött: minden kölcsönhatás erőssége egyforma volt. Ahogy a Világegyetem hűlni kezdett, a kölcsönhatások erőssége szétvált. Ez az átmenet nem egyformán folyt le mindenütt és úgynevezett topológiai hibahelyek keletkeztek, amelyek metastabilak, de élettartamuk akár a Világegyetem mai korához (körülbelül 13 milliárd év) hasonlítható. A korai GUT-korszakból hasonló élettartamú nehéz marad-

<sup>1</sup> *Fizikai Szemle* 62/7–8 (2012) 234–239.