

FIZIKA ÉS KÉPZŐMŰVÉSZET – MŰELEMZÉSEK

FIZIKUS SZEMMEL – 2. rész

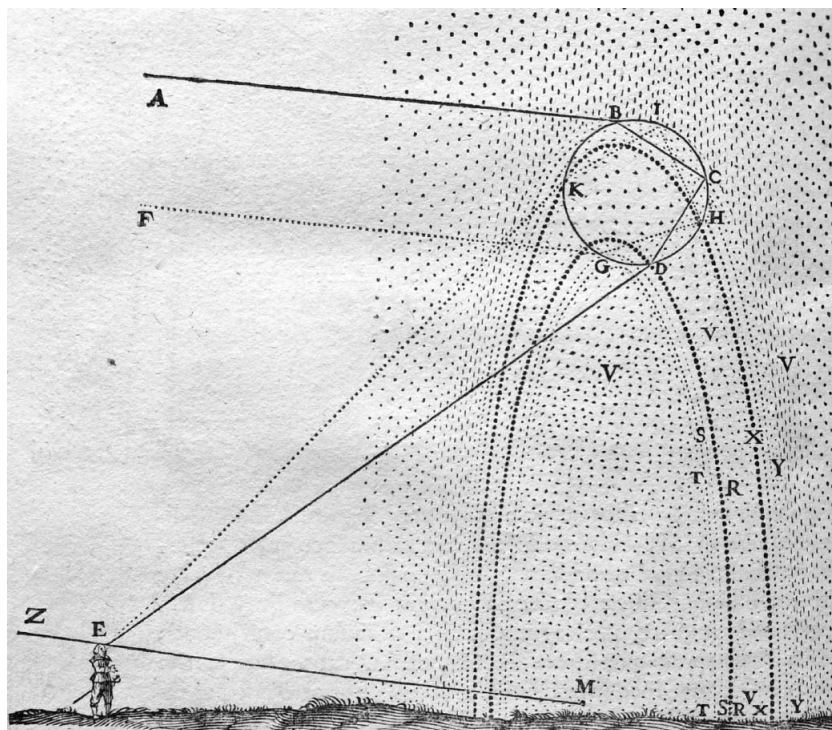
Ujfaludi László
Eszterházy Károly Egyetem, Fizika Tanszék

Színszóródás, szivárvány

A szivárvány az egyik legimpozánsabb légköri optikai jelenség, az – általában nyári záporok idején – aláhulló apró, gömb alakú vízcseppek hozzák létre. Ha a fény mennyisége elegendő és a vízcseppek mérete is megfelelő, akkor egy színes félkört figyelhetünk meg az égbolt Nappal ellentétes pontja körül. A szivárvány íve 42 fokos szöget zár be e ponttal.

Ha a napfény intenzitása megfelelő, a szivárvány elsődleges (fő)ívén kívül egy másodlagos (mellék)ívet is megfigyelhetünk. Ennek színei a főívhez képest fordított sorrendben alakulnak ki. A mellékív halványabb a főívénél, sőt sokszor a láthatóság határa alatt marad. A 28. képen (lásd az első belső borítón¹) mindkét ív jól látható, ezen kívül megfigyelhető az is, hogy a főív alatti terület világos, míg a két ív között sötét sáv húzódik.

Magyarozatával évszázadokon át hiába próbálkoztak a természettudósok. Az első, valóban helytálló magyarázatot René Descartes (1596–1650) adta meg. A *Principia Philosophiae* című könyvében található az az ábra (29. kép), amelyen látható, hogy a Nap felől érkező fénysugarak egy része az esőcseppek



29. kép. A szivárvány keletkezésének magyarázata (Descartes). A főív az esőcseppek belüli egyszeres, a mellékív kétszeres visszaverődéssel jön létre.

egyszeres, más része kétszeres visszaverődést szenved; előbbi az elsődleges, utóbbi a másodlagos szivár-

30. kép. Markó Károly: *Pusztá*. Ezen a festményen is látható a kettős ív, a színek helyes sorrendjében.



¹A cikk második részében több olyan kép szerepel, amelyek fekete-fehér módon egyáltalán nem tudják visszaadni az ismertett jelenség lényegét. Ezért – tekintettel a nyomtatott változatot olvasókra, akiknek csak a folyóirat borítója színes – 13 színes kép az első, illetve a hátsó belső borítón szerepel. Az elektronikus lapra előfizetők megértését megköszönjük.



Ujfaludi László fizikus, az Eszterházy Károly Egyetem (EKE) professzor emeritusa. Közel két és fél évtizedes kutató-fejlesztő tevékenység (VIDEOTON, TUNGSRAM, VITUKI) után 1990-től az EKE Fizika Tanszékének oktatója. Alapítása (2006) óta vezeti az egri Varázstorony planetáriumát. Másfél évtizede foglalkozik a „két kultúra”, ezen belül elsősorban a fizika és a képzőművészet kapcsolatával. E témakörben számos tanulmányt publikált és több konferencia-előadást tartott.



31. kép. Tyndall-sugarak a felhők résein át.



32. kép. Tyndall-sugarak a fák lombjai között. A sugarak oldalról jönnek, ezért nincs távlati rövidülés.

vány ívét képezi. Ugyanitt található a leírás Descartes üvegprizmával végzett kísérletéről is, amelyben a napfényt sikerült a szivárvány színeire felbontania. (Az idézett könyv megtalálható az egri Főegyházmegegyei Könyvtárban, ebből lett kimásolva a 29. kép.)

Szivárvány meglehetősen ritkán fordul elő festményeken. *Markó Károly* (1793–1860) *Puszta* című festményén (30. kép) kettős szivárvány látható, amelynek ábrázolása teljesen megfelel az elmondottaknak.

Tyndall-szórás

Gomolyfelhős időben gyakran megfigyelhető, hogy az égbolt Nap felőli oldalán a felhők pereméről vagy réseiből kiindulva világos és sötét sávok váltakoznak, néha párhuzamosan, de legtöbbször legyezőformát alkotva. Ezek a Tyndall-sugarak,² magyarázata, hogy a felhő által árnyékolt területekről nem érkezik hozzánk szórt fény, ezért ott sötétebb, míg ahová akadálytalanul eljut a fény, ott világosabb sávokat látunk (31. kép).

Ugyanez a jelenség erdőben is gyakran megfigyelhető (32. kép), itt a fák közt átszüremlő fénysávok láthatók; a világos sávok nyilvánvalóan a levelek hézagain áthaladó fény útját jelzik.

Fontos megjegyezni, hogy mivel a Tyndall-szórás a Nap párhuzamos sugarai idézik elő, a létrejött sugárnyalábok minden esetben párhuzamosak, csak a perspektíva miatt rövidülnek – látszólag (gondoljunk a párhuzamos vasúti sínek látszólagos összetartására!). Másrészt a jelenség létrejöttéhez a levegőben aeroszol (vízpára, köd vagy por) jelenléte szükséges, mivel ennek részecskéin szóródik a napfény.

Az ifjabb *David Teniers* (1610–1690) *Parasztok a kocsmá előtt* című festményén (33. kép) a 31. képéhez hasonló sugárnyalábokat örökített meg; festményein viszonylag gyakori a Tyndall-sugarak megjelenése.



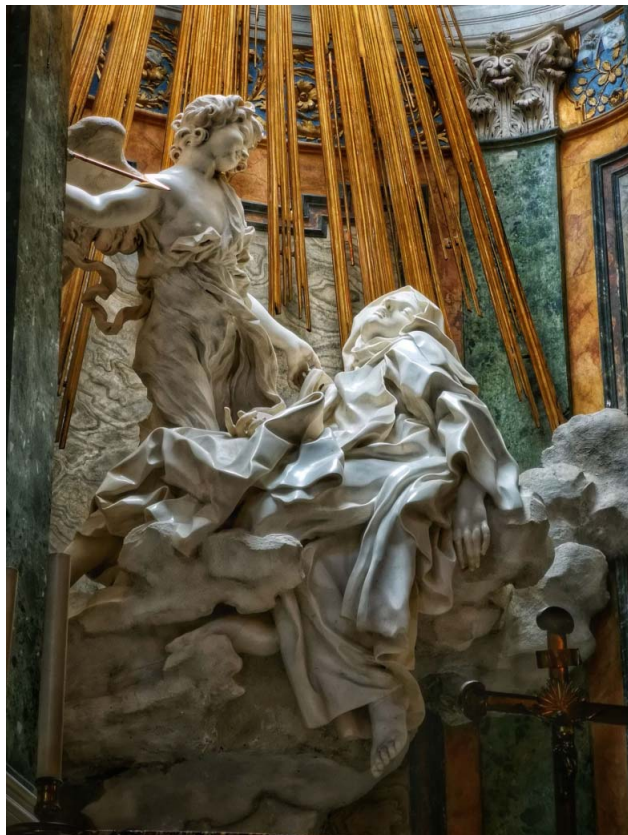
33. kép. Teniers: *Parasztok a kocsmá előtt*. A távolban a felhőkön át itt is Tyndall-sugarak.

William Turner (1775–1851) *Tájkép az Arundel-i kastéllyal* című festményén (34. kép) széles szivárvány látható, amely a vízben is tükröződik; a szivárvány igen közel van, íve egészen a kastély elé húzódik.

34. kép. Turner: *Tájkép az Arundel-i kastéllyal*. Szivárvány közepén és egy Tyndall-nyaláb nyomai balra – a kettő együtt lehetetlen.



²*John Tyndall* (1820–1893) író fizikus, glaciológus, hegymászó, feltaláló és filozófus.



35. kép. Bernini: Szent Teréz látomása. A fénysugárdárdák itt is a Tyndall-sugarakat idézik.

dik. Az ilyen széles szivárvány ritka, akkor fordul elő, ha az esőzóna széle, ahol a szivárvány képződik, közel áll a megfigyelőhöz.

Érdekes művészettörténeti tény, hogy vázlatkönyvében Turner a kastély fölötti égbolton eredetileg egy Tyndall-sugárnyalábot ábrázolt, a festményen ez később – valószínűleg a kedvezőbb hatás érdekében – átalakult szivárvánnyá. A szivárványtól kissé balra azonban a Tyndall-sugarak nyomai jól kivehetően ottmaradtak, ami fizikai képtelenség, hiszen a szivárvány és a Tyndall-sugarak az égbolt két ellentétes oldalán képződnek. (Ez a kis malőr természetesen semmit nem von le Turner művészi nagyságából, csak arra figyelmeztet, hogy a természet „műalkotásait” nem lehet önkényesen megváltoztatni.)

A festők nyilvánvalóan sokszor megfigyelték ezt a ritka, különleges égi tüneményt és – legalábbis a középkor és a reneszánsz idején – gyakran megjelenítették képeiken, elsősorban misztikus jelenések hatásának fokozására. (Magyarország egyes vidékein, amint azt egy természetfotóostól megtudtam, a népnyelv Mária-sugaraknak nevezi a jelenséget, világos utalással egyes Szűz Mária ábrázolásokra.)

Hasonló sugaras fénnyaláb jelenik meg sokszor a Szentlélek (galamb) alatt, így például *Filippo Lippi* (1406–1469) *A gyermek Jézus imádása az erdőben* című képén, valamint *Jacopo Tintoretto* (1518–1594) néhány képén a Szentlélekkel együtt, de néha attól függetlenül. *Giovanni Bernini* (1598–1680) *Szent Teréz látomása* című szoborcsoportján (35. kép) a Tyn-

dall-sugarakhoz hasonló ragyogó fénydárdák a jelenet mágikus hatását fokozzák. Valamennyi egyházi és világi tárgyú ábrázolás valószínű alapélménye a természetben megfigyelt Tyndall-szórás jelensége.

Additív, szubtraktív színkeverés

A fehér fény színekre bontásával ellentétes művelet a színkeverés. Ha három alapszín: kéket, zöldet és vöröset egymásra vetítünk (például három különböző projektorral), fehéret kapunk, ezt nevezik a fizikában additív színkeverésnek; ha viszont egy kék, egy sárga és egy vörös színszűrőt egymásra helyezünk, fekete folt keletkezik, ez a szubtraktív színkeverés. Megfigyelhetjük, hogy a két kép közepén, az átfedésekben a másik színkeverés szűrőinek alapszínei jönnek létre (36. kép, lásd az első belső borítón). A különböző színű festékek keverésekor (pigment színkeverés) a szubtraktív színkeverésnek megfelelő eredményt kapjuk.

Edvard Munch (1863–1944) *Lányok a hídon* című festményén (37. kép, lásd az első belső borítón) a három távolabbi ruha színe a három alapszín: piros, zöld és kék; a hozzánk legközelebbi lány ruhája pedig fehér – ez pontosan megfelel az additív színkeverés színeinek. Ilyen mértékű egybeesés valószínűleg nem véletlen, feltehető, hogy Munch mélyebben foglalkozott a színek elméletével.

Színkörök, hideg-meleg színek

A 19. század második felében az optikai kutatás tisztázta a látás fiziológiájának egyes részleteit. A szivárvány színeit színkörökkel ábrázolták és ezek segítségével szemléltették színlátásunk sajátosságait. A 38. kép (lásd az első belső borítón) a leginkább elterjedt Ostwald-féle színkört mutatja. Az egyes színekben lévő szám a szín rendjét mutatja. A sárga, a vörös és a kék elsőrendű színek – egy talpára állított egyenlő oldalú háromszöget alkotnak. Kiegészítve őket a narancs, zöld és ibolya másodrendű színekkel, amelyek az elsőrendű három szín keverékszínei – egy hatszöget kapunk. A harmadrendű színek (számozásuk a kör egyes szeleteiben) az első- és másodrendű színek keverékszínei, ezért ezekből 6 van. Az Ostwald-féle színkör így összesen 12 színt tartalmaz.

A színek térhatása (chromostereopsis)

A színekhez virtuális hőérzet is társul, így például a vöröset és a narancsot meleg, a kéket hideg színnek tartják. Ez valószínűleg abból az ősi tapasztalatból következik, hogy a tűz vörös és meleg, a kék ég és a víz pedig hideg. A 38. kép az Ostwald-féle színkör segítségével a hideg-meleg színeket is szemlélteti; a leghidegebb és a legmelegebb színek azok, amelyek a ferde átlótól a legtávolabb vannak, tehát a kék és a vörös.

Közvetlen érzékelési tapasztalat, hogy a meleg színű tárgyakat közelebbinek, a hideg színűeket távolabb lévőknek érezzük ugyanolyan távolság esetén is; a jelenséget a fiziológiában *chromostereopsis*-nak nevezik. Figyeljük meg a 39. kép (lásd az első belső borítón) színeit. A vörös betűk és a vörös háttér mintha előre nyomulna, a kék betűk és a kék háttér pedig hátra húzódnak látszik.

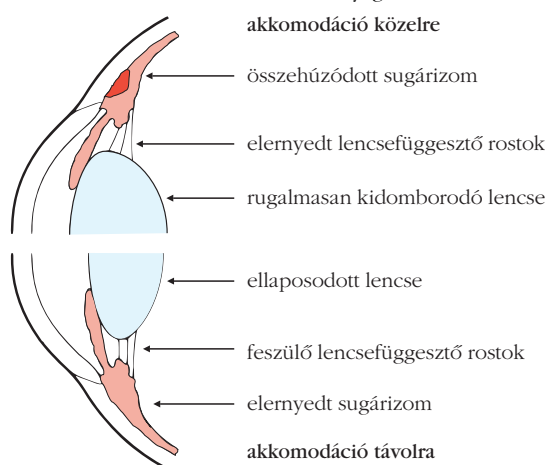
A közlekedési lámpák színe is a chromostereopsis jelenségén alapszik. A pirosat közelebbinek érezzük – ez, mint egy tiltó kéz emelkedik ki környezetéből, a zöld lámpa ellenben – távolabbinak tűnve – szabad átjárást sugall. Másrészt viszont azért történt így a színek megválasztása, mert a rövid hullámhosszú fény – a kék és a zöld – ködben elnyelődik és így láthatatlanná válik, míg a piros ekkor is jól látszik (az autók hátsó lámpái és ködlámpái is ezért pirosak). Valójában mindkét magyarázat helytálló és a két hatás egymást erősíti.

A színek térhatásának alapja az, hogy az optikai lencse (és a szemlencse) a különböző színeket különböző mértékben törli meg: legkevésbé a vöröset, legjobban a kéket (40. kép, lásd az első belső borítón). Szemlencsénk a sugárizom segítségével képes görbületét változtatni (ezt nevezik akkomodációnak). Ha most feltételezzük, hogy a 40. képen a kék szín látszik szemünkben élesnek, akkor ahhoz, hogy a vörös legyen éles, a szemlencse domborulatának növekednie kell (szemünknek erősebben kell akkomodálni). A domborulat növekedése viszont pontosan megfelel a közeli tárgyakhoz való akkomodációnak (41. kép). Ez okozza, hogy a vörös színű tárgyakat közelebbinek, a kék tárgyakat pedig távolabbinak érzékeljük.

Színekhez társított hőmérséklet-képzeteink megtevesztők, a sugárzások fizikájából ugyanis tudjuk, hogy a kék szín energiája a legnagyobb, a vöröse a legkisebb. A legforróbb kék csillagok felszíni hőmérséklete 20–25 ezer K, míg a vörös csillagoké csak 3–5 ezer K.

A meleg és a hideg színek említett távolságérzékeltető illúzióját a festők – ösztönösen vagy tudatosan – régóta felhasználták. A modern festészetben pedig

41. kép. A szemlencse alakváltozása (akkomodációja) közelre és távolra nézéskor. A műtétellel beültetett műanyaglencse ezt nem tudja.



(mivel a hagyományos perspektívaábrázolás gyakorlatilag teljesen megszűnt) gyakran a színeket használják a távlatok érzékeltetésére.

Ennek egyik tipikus példája *Paul Gauguin* (1848–1903) Pont-Avenben festett *Látomás prédikáció után* című képe (42. kép, lásd az első belső borítón), amelyen áhítatosan imádkozó breton asszonyok vízióját örököltette meg: Jákob harcát az angyallal (ez volt a prédikáció tárgyául szolgáló bibliai fejezet). A látomás narancsvörös háttérben jelenik meg; a meleg háttérszín következtében a távoli jelenetet sokkal közelebbinek érezzük.

Raoul Dufy (1877–1953) textilmintának készült kompozícióján (43. kép, lásd a hátsó belső borítón) a vörös rózsák szinte „előre ugranak” a kép síkjából, a kékeszöld és zöld levelek és a sötétkék háttér pedig, kékségük arányában egyre hátrább húzódnak látszanak.

Kiegészítő színek

Az Ostwald-féle színkörben (38. kép) egymással szemközt (180°-ra) elhelyezkedő színeket kiegészítő vagy komplementer színeknek nevezzük, ezek a következők:

sárga–ibolya	sárgászöld–vörösesibolya
vörös–zöld	kékeszöld–vörösesnarancs
kék–narancs	kékesibolya–sárgásnarancs

A kiegészítő színek egymás hatását felerősítik, ezt a festők már korábban is kihasználták a fokozott színélmény elérése céljából, de szigorú következetességgel csak az impresszionisták festészetében terjedt el. A pipacsos mező fényképe (44. kép, lásd a hátsó belső borítón) kitűnően illusztrálja a kiegészítő színek intenzív egymásra hatását: lent a fű zöldje és a virágok piros foltjai, fent a narancsos látóhatár és a kék ég képez élénk komplementer színpárt.

Érdekes fiziológiai jelenség, hogy hosszú idejű monokromatikus (egyszínű) fényinger után szemünkben a kiegészítő szín utóképe jelenik meg (utófénylés). Például, ha hosszú ideig tartózkodunk a napon, majd egy sötétebb helyiségbe megyünk, egy ideig mindent kékes árnyalatban látunk. A jelenség a szemünkben lévő színérzékelő csapok ingerlésével kapcsolatos: ha például a narancsszint érzékelő csapok kapnak erős ingert (például amikor a napon tartózkodunk), akkor annak megszűnte után a kékre érzékeny csapok aktivitása nő meg.

Impresszionizmus, posztimpresszionizmus

Az impresszionista festők forradalmian új módszereket vezettek be képeik kidolgozásánál: a szabad ég alatt festettek (korábban a műtermi festés dominált), ezáltal erőteljes fényhatásokat értek el, továbbá széles ecsetvonásokkal dolgoztak, így a látványnak csak a leglényegesebb elemeit jelenítették meg.

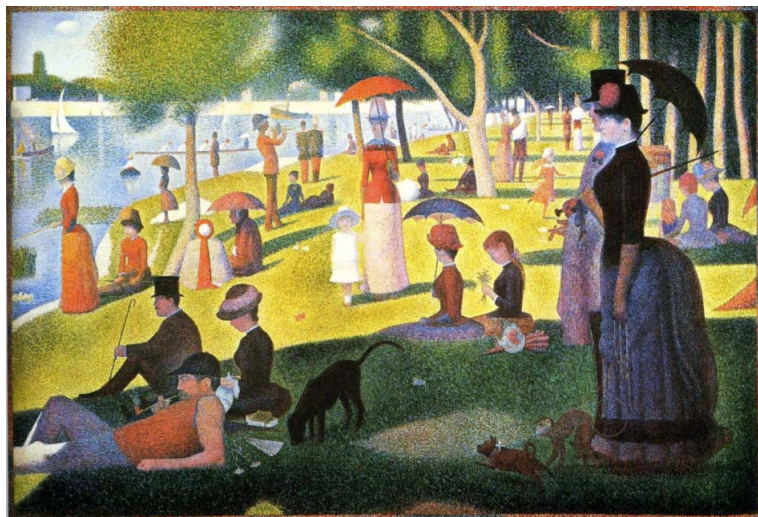


45. kép. Monet: *Fürdőzők La Granouillere-nél*. A mozgalmra jellemző széles ecsetvonásokkal.

Claude Monet (1840–1926) *La Grenouillere* (45. kép) és az *Impresszió – napfelkelte* (46. kép, lásd a hátsó belső borítón) című alkotásai szemléltetik az impresszionista stílus két fő alapvonását: a széles ecsetvonásokat és a kiegészítő színek mesteri alkalmazását (az utóbbi kép címe később az egész festői stílus névadója lett).

A 19. század vége felé néhány francia festő, elsőként George Seurat (1859–1891) és Paul Signac (1863–1935) az akkoriban már kimerülő félben lévő impresszionizmus módszerein úgy kívántak túlélni, hogy képeiket színes pontokból rakták össze. Az eljárás pointillizmus néven terjedt el a köztudatban, ők maguk divizionizmusnak nevezték. A pontok színárnyalatainak előállítását az optikai színkeverés tudományos eredményeire alapozták és csaknem kizárólag alapszínekkel dolgoztak. (Ennek megfelelően például egy zöld színű festékpont egy kék és egy sárga, egy lila színfolt egy vörös és egy kék szoros egymásmellettségéből jön létre stb.).

48. kép. Seurat: *Vasárnap délután Grand Jatte szigetén* – a pointillizmus alapműve. A Párizs melletti egykor oly mozgalmas sziget ma érdektelen senkiföldje.



A divizionizmus módszere (először a festészet történetében) teljes mértékben a korabeli természettudomány eredményein alapult. Valamivel korábban jelent meg Hermann Ludwig von Helmholtz (1821–1894) alapvető műve a látás fiziológiájáról; francia nyelven Michel Eugène Chevreul (1786–1889) színelméleti könyve, majd az amerikai Ogden Rood fizikus (1831–1902) hasonló tárgyú könyvének francia kiadása lett Seurat és Signac legfőbb forrásműve. A pointillisták Chevreul 72 színből álló színkörének (47. kép, lásd a hátsó belső borítón) színeit használták.

Chevreul és Rood is utal arra, hogy a színek különböző hullámhosszakon lépnek be a szemünkbe és csak a retinán keverednek össze. Rood, aki maga is amatőr festő volt, kísérletei nyomán rájött, hogy a vásznon alapszínekből egymás mellé tett két festékpont sokkal fényesebbnek hat, mint az azokból a palettán kikevert színfolt. Ezért azt tanácsolta a festőknek, hogy kevert színek helyett tiszta színekből egymás mellé rakott színfoltokkal dolgozzanak. Chevreul színelméleti könyve és Rood gyakorlati utasításai alapján készült Seurat *Vasárnap délután Grande Jatte szigetén* című festménye (48. kép), amelyet a pointillista mozgalom alapművének tekintenek.

A Grande Jatte sziget a Szajna jobb partja közelében; akkoriban „a szerelem szigete”, itt sétálgattak a fiatal párok, itt ismerkedhettek az „aranyifjak” a „félvilági” nőkkel. (Érdeemes megfigyelni, hogy a kép közepén feltűnő fehér foltot képez egy kislány ruhája; lehet, hogy ez finom utalás tanítómestere Chevreul színkörére, amelynek közepe szintén fehér?) Ez a gondosan kimunkált festési módszer több fényt kívánt bevinni a festménybe, egyúttal az impresszionisták ösztönös színkezelésének tudományosan megalapozott alternatíváját kínálta. A pointillizmus másik reprezentánsa Signac *Kikötő naplementekor* című alkotása (49. kép,

lásd a hátsó belső borítón) szintén a mozgalom nevezetes alkotásai közé tartozik.

Seurat és Signac nyomán több impresszionista festő átvette e technikát, még van Gogh is festett néhány pointillista képet, és az akkor már híres Camille Pissarro (1830–1903) és mások is csatlakoztak a mozgalomhoz, amely később posztimpresszionizmus néven vonult be a művészettörténetbe.

Moduláció – Cézanne

Paul Cézanne (1839–1906) nem volt forradalmár alkat, inkább csendes, visszahúzó személyiség. Mégis az ő életműve lett a modernizmus egyik alapköve, sokan őt tekintik a 20. századi modern művészet előfutárának. Képein mesterien alkalmazta az egymás melletti kiegészítő színek már em-



51. kép. Cézanne: *A Sainte-Victoire hegy*. A „műzeumok örök művészetét” tekintette ars poeticájának.

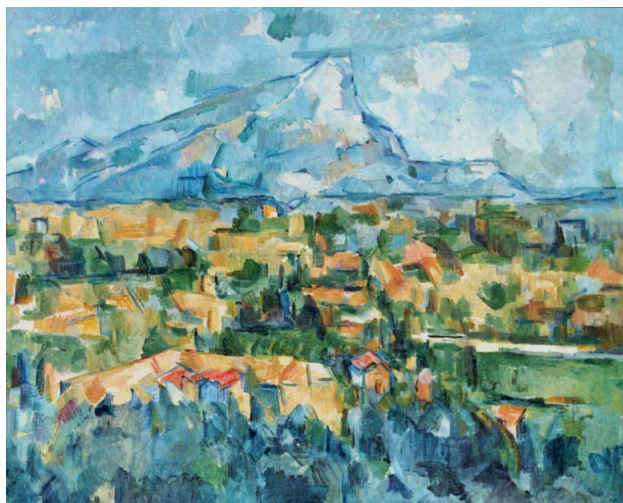
lített, dinamikus hatást kiváltó módszerét. Ennek sorozatos alkalmazását szimultán kontrasztok módszerének, más néven modulációnak nevezik. Csendéletei és tájképei ettől lettek hihetetlenül mozgalmassak, sőt plasztikusak, helyenként szinte reliefszerűek.

Az impresszionizusból kiábrándulva eltökölte, hogy olyan festészetet teremt, amely „a műzeumok örök művészetét” idézi. Tudományos pontossággal dolgozott: csendéleteinek tárgyait (gyümölcsök, korsók, terítők) hosszas műgonddal állította össze (50. kép, lásd a hátsó belső borítón).

A legtalálóbban talán Egon Friedell (1868–1938) jellemzi Cézanne csendéleteit *Az újkori kultúra története* című, lebilincselően izgalmas könyvében: „Cézanne számára múlt volt már az impresszionizmus is. Ő már újra látomást fest, a platóni eszmét, de olyasvalakiként, aki végigjárta az egész impresszionizmust, s vissza- és lenéz rá. Sohasem benyomásokat fest, nem egyes tárgyak képmásait festi, hanem mindig csak a tárgyat, mint olyat, a világ minden korszójának, naranccsának és fájának summázatát. Ebből, hihetné az ember, csak absztraktum marad meg; s ami létrejön, az mégis abszolút konkrét. Cézanne tehát, mondhatni, »realista«, de nem az újkori, szenzualista értelemben, hanem a középkori realizmus – »universalia sunt realia«: »valós az, ami egyetemes« – jegyében.”

Emberalakok nélküli tájképei „örök tájak”, de mégsem élettelenek: a hideg és a meleg színek sorozatos váltakozása különös, vibráló hatást kelt, általa élővé válik a táj. A lakása közelében lévő Sainte-Victoire hegyet számtalan változatban megfestette (51. kép) különböző évszakokban, különböző látószögekből, különböző időjárási helyzetekben, akár csak a híres japán festő, *Kacusika Hokuszi* a japánok szent hegyét, a Fujit, vagy Monet a roueni katedrálisat.

Élete vége felé geometrikus alakzatok jelennek meg festményein, „a természetet kockákkal, hengerekkel, kristálylapokkal kell kifejezni” írja ekkortájt egyik levelében. A Sainte-Victoire hegyről készült utolsó alkotásai e geometrikus szemlélet jegyeit hordozzák (52. kép).



52. kép. Cézanne: *A Sainte-Victoire hegy*. Itt már az egyszerű geometriai idomokkal való ábrázolás lett az ideálja.

Egyes művészettörténészek szerint e technika végletekig történő továbbvitele vezetett a 20. század elején az avantgárd egyik jellegzetes irányzatához, a *Picasso* és *Braque* nevével fémjelzett kubizmushoz.

Atomok és térelmélet – festészeti analógiák

A pointillizmus és van Gogh kései képei bizonyos értelemben a figurális festői kifejezés két szélső határa. Egyik a kép teljes atomizálását (lásd például a 48.

53. kép. Van Gogh: *Provence-i út éjjel*. Képek, ahol minden áramlik és örvénylik – van Gogh utolsó éveinek technikája.



képet), a másik a van Gogh kései alkotó korszakára jellemző „áramvonalas” festészet, amelynek egyik tipikus darabja az *Út Provence-ban éjjel* című alkotás (53. kép); ez a festési mód a képelemek nagyívű összefogását tekinti alapelvnek. Metafizikai értelemben ez a két irányzat úgy viszonyul egymáshoz, mint az analízis és a szintézis. A 19. század vége felé, tehát Seurat és van Gogh alkotói időszakában kezd a fizikában tért hódítani az atomi szemléletmód és ennek mintegy ellenpólusa, *James Clerk Maxwell* (1831–1879) elektromágneses térelmélete. A pointillizmus természettudományos megfelelője az atomizmus, a van Gogh-i nagy ívű „áramvonalas” festészeté pedig az elektrodinamikai elmélet.

Irodalom

- Renati Descartes: *Principia Philosophiae*. Elzevirios, Amstelodami, 1656.
 Mario de Micheli: *Az avantgardizmus*. Képzőművészeti Alap Kiadóvállalata, 1978.
 Hajo Düchting: *Georges Seurat – The master of pointillism*. Taschen, London, 2000.
 Egon Friedell: *Az újkori kultúra története. VI. köt. Imperializmus és impresszionizmus*. Holnap Kiadó, Budapest, 1994.
 Kepes György: *A világ új képe a művészetben és a tudományban*. Corvina, Budapest, 1979.
 Németh Lajos: *A művészet sorsfordulója*. Ciceró Kiadó, Budapest, 1999.
 Herbert Read: *A modern festészet*. Corvina, Budapest, 1965.
 Ujfaludi László: *A szépség rejtett dimenziói – Fizika és képzőművészet. Acta Academia Agriensis, Sectio Pericemonologica, Vol. XXXVI*. Eger, 2009.

GRAVITÁCIÓRÓL KÖZÉPISKOLÁBAN – MÁSKÉNT

Kiss Miklós

Gyöngyösi Berze Nagy János Gimnázium

Két pont között távolságot mérhetünk térben és időben. A Föld felszínének két tetszőleges pontja között különböző távolságok vannak, mégis az idő, ami alatt az egyik pontból eljutunk a másikba, lehet ugyanannyi. A kérdés kicsit élesebb megfogalmazásban: lehet-e olyan vasutat építeni a Földön, amelynek működtetéséhez – legalábbis elvileg – nem kell energia, és a menetidő bármely két állomás között megegyezik?

A kérdés annyiban is aktuális, hogy mostanában sokat hallani a Hyperloopról, mint nagyon gyors közlekedési lehetőségéről. Hyperloop esetén az utasok vagy az áru szállítása vákuumcsőben halad, zárt kapuszulákban történne nagy sebességgel. A hajtást lineáris motor biztosítaná. A gravitációs megoldás azonban alapjaiban más lenne.

Amiről írunk, pillanatnyilag csak egy érdekes, elvi lehetőség. Nem tudhatjuk, hogy mikor lesz realitása. Ami itt és most igazán fontos benne, az a fizika.

Amit mindenki ismer, a gravitáció a Föld felszínének közelében, vagyis az ebből adódó gravitációs gyorsulás ($g \approx 9,81 \text{ m/s}^2$). Az már ritkább, hogy ezt összekössük a gravitációs térerősséggel,

$$g = \frac{F}{m} = 9,81 \frac{\text{N}}{\text{kg}} = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2},$$

ami fontos lépés a mélyebb megértés irányában.

Hogyan csökken a g a Föld felszínétől távolodva, és a nehezebb kérdés, hogyan változik a gravitáció a Föld belsejében. Amíg a Maxwell-törvények szerves részét képezték a középiskolás fizikatananyagnak [1], addig a sztatikus elektromos mező és a gravitációs mező közötti matematikai analógia alapján *Gauss* törvényét felhasználva könnyen meg tudtuk válaszolni a kérdést. Az analógiát persze most is felhasználhatjuk [2], szakkörön, emelt szintű csoportban nem lehet akadály.

Nézzük *Newton* gravitációs törvényét és a *Coulomb*-törvényt tömegpontokra és pontszerű töltésekre, azoktól r távolságra:

$$F_{\text{Newton}}(r) = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}, \text{ illetve } F_{\text{Coulomb}}(r) = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2}.$$

Csak az erők nagyságát írtuk fel. Mindkettő középiskolai tananyag. Az analógia nyilvánvaló: az erő a két jellemző mennyiség (gravitáló tömeg, illetve elektromos töltés) szorzatával egyenesen, a távolság négyzetével fordítottan arányos.

Ahogy említettük, az elektromosságban mindig, a gravitáció esetében csak gyakran beszélünk a térerősségről:

$$E(r) = k \frac{Q}{r^2} \text{ és } g(r) = \gamma \frac{M}{r^2}.$$

Itt a tömeget is nagybetűvel írtuk, kiemelve a „forrást”, az elektromos mező forrása a töltés, a gravitációs mezőt a gravitáló tömeg hozza létre. (*Eötvös Loránd* vizsgálatai alapján a gravitáló tömeg arányos a tehetetlen tömeggel és így mindkettőt ugyanazzal az egységgel, a kilogrammmal mérhetjük.)



Kiss Miklós a Gyöngyösi Berze Nagy János Gimnázium matematika-fizika és számítástechnika tanára, a gimnázium napórájának tervezője, készítője. PhD fokozatát fizikából szerezte, kutatótanár. 27 éve szervezi a Mikola-verseny gyöngyösi döntőjét, a feladatkitűző bizottság tagja, a döntő méréseinek készítője. A Bugát Pál Természettudományi Vetélkedő zsűrijének tagja. Ericsson-, Mikola- és MTA Pedagógus Kutatói Pályadíjas. Tanít a BERZELAB-ban, a Berze Természettudományos Önképzőkör egyik szervezője.