

SZÍNES KÍSÉRLETEK EGYSZERŰEN

Zátonyi Sándor
Békéscsaba

Newton 1666-ban végzett kísérletei óta tudjuk, hogy a Nap fénye összetett, prizmával a szivárvány színeire bontható (1. ábra) [1]. Newton részletes kísérletekkel igazolta azt is, hogy az így kapott színek tovább már nem bonthatók, ezért ezeket *elemi színeknek* nevez-

zük [2, 3]. (Az elemi szín további elnevezései: spektrumszín, egyszínű fény, monokromatikus fény). Newton elvégezte a fordított kísérletet is: a színek gyűjtőlencsével, illetve prizmával egyesítve újra fehér fényt kapott. Azt is felismerte, hogy ha két vagy több elemi színt egyesít, akkor valamilyen *összetett szín* keletkezik, amely prizmával újra felbontható.

Jelen írás a 2017. évi, gödöllői fizikatanári ankéton első díjat kapott műhelyfoglalkozása alapján készült.



Záttonyi Sándor 1977-ben a szegedi József Attila Tudományegyetem matematika-fizika szakán, 1988-ban a debreceni Kossuth Lajos Tudományegyetem számítástechnika szakán szerzett középiskolai tanári oklevelet. Pályája során mindvégig Békéscsabán dolgozott, 2014-től nyugdíjas. Több fizika tankönyv szerzője, társszerzője. Több mint tíz éve üzemelteti a fizika tanításával és tanulásával foglalkozó *FizKapu* honlapot. A fizikatanári ankétok rendszeres résztvevője.

Későbbi kutatások megállapították, hogy a fény elektromágneses hullámként terjed. A monokromatikus fény egy jól meghatározott frekvenciájú elektromágneses hullámként írható le, a fény színe a hullám frekvenciájától függ.

Az ember színlátásáról

Az emberi szem csak az olyan fényt képes érzékelni, amelynek frekvenciája $4,3 \cdot 10^{14}$ Hz és $7,9 \cdot 10^{14}$ Hz között van. A fénytanban azonban a frekvencia he-



1. ábra. A fehér fény felbontása prizmával.¹

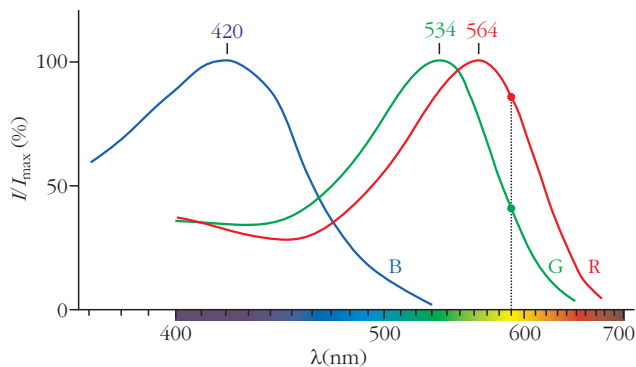
lyett többnyire a vákuumban (\approx levegőben) mérhető hullámhosszal jellemzik a monokromatikus fényt. Az ember tehát csak az olyan fényt látja, amelynek hullámhossza 380 nm és 700 nm között van, számos állatfaj azonban az ennél rövidebb, illetve hosszabb hullámhosszúságú fényt is érzékeli. A továbbiakban csak az emberi látással foglalkozunk.

A szem ideghártyájában (retinájában) található érzékelősejtek két nagy csoportja a *pálcikák* és a *csapok*. A színeket a csapokkal érzékeljük, a pálcikák csak a fény erősségét detektálják. A csapok a pálcikáknál sokkal kevésbé érzékenyek, ezért gyenge megvilágításnál, amikor már csak a pálcikák működnek, nem látjuk a színeket.

A színérzékelést végző csapok háromfélék, és mindhárom fajta csap a látható fény más-más hullámhossztartományát képes elnyelni és ingerületté alakítani. Fontos tény azonban, hogy *a csap által létrehozott ingerületet csak az elnyelt fény erőssége határozza meg, az ingerület nem tartalmaz információt a hullámhosszról.*

A 2. ábra azt mutatja, hogy a különféle csapok miként nyelik el a különféle hullámhosszúságú fényt. Látható, hogy a háromféle csap rendre a 420 nm, az 534 nm és az 564 nm hullámhosszúságú fényt nyeli el legjobban, ezekre a legérzékenyebbek. A továbbiakban a háromféle csapot az egyszerűbb szóhasználat érdekében vörös, zöld és kék csapnak nevezzük annak megfelelően, hogy a színek mely tartományára a legérzékenyebbek. Ezekre a színekre utal az angol/német eredetű R-G-B, (red/rot – green/grün – blue/blau) jelölés is.

A 2. ábrán látható grafikonról leolvasható például, hogy a vörös csapok az 564 nm hullámhosszúságú fényre a legérzékenyebbek, de az 500 nm-es fénynek már csak az 50 százalékát nyelik el. Ilyen fény hatásá-



2. ábra. Az emberi szem csapjainak fényelnyelése.

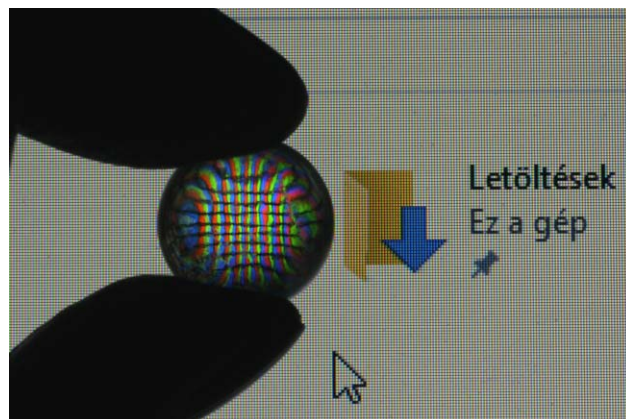
ra tehát ugyanolyan, de 50 százalékkal gyengébb ingerület keletkezik a vörös csapokban.

Ha a szembe 590 nm hullámhosszúságú fény jut, akkor a kék csapok nem nyelik el ezt a fényt, ezért nem is küldenek ingerületet az agyba. A fény a vörös és zöld csapokban a 2. ábrán bejelölt mértékben nyelődik el, és ennek megfelelő ingerületet küld az agyba. Az agy ezen ingerületeknek megfelelően sárgának észleli az 590 nm hullámhosszúságú fényt. Ha azonban egyszínű vörös és zöld fénysugarak olyan keveréke jut a szembe, amelyek a vörös, illetve zöld csapokat az előbbivel azonos mértékben ingerlik (és a kék csapokban nem keltenek ingerületet), akkor agyunk az előbbivel azonos sárga szint észlel.

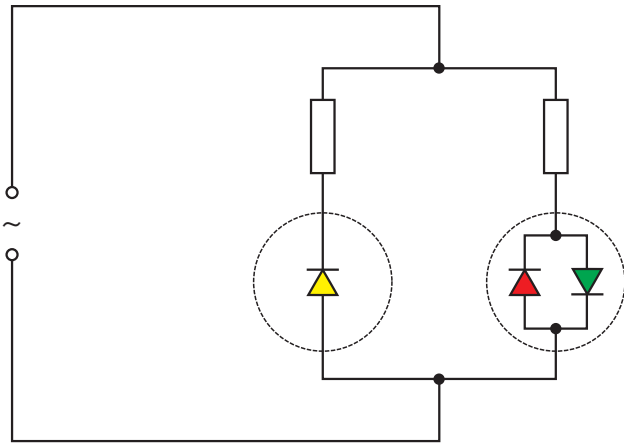
Az additív (összeadó) színkeverés

Az előbbihez hasonló a helyzet, ha több egyszínű fény, illetve a színek egyes tartományainak keveréke jut a szembe: a színek keverékét az agy egyetlen színeként észleli. Ezt a fajta színkeverést, amelynél a különböző színű fényeket egyesítjük, *additív színkeverésnek* (összeadó színkeverésnek) nevezzük. A tapasztalatok szerint monokromatikus vörös, zöld és kék fény megfelelő arányú additív keverésével tetszőleges szín kikeverhető. Additív színkeveréssel működnek a színes tévék, monitorok és a különféle elektronikai eszközök színes kijelzői is.

3. ábra. Egy számítógép képernyőjének vörös, zöld és kék képpontjai egy üveggolyón át nézve.



¹ A cikkben szereplő valamennyi fénykép nagy felbontású, színes változata, valamint a témához kapcsolódó további fényképek elérhetők a FizKapu honlap *FizFotó* rovatában, a *FÉNYTAN* témakörnél [8].



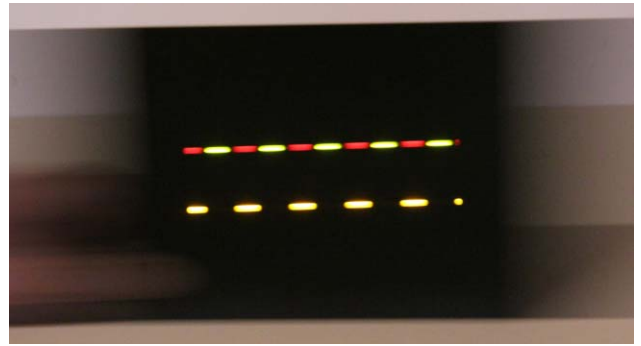
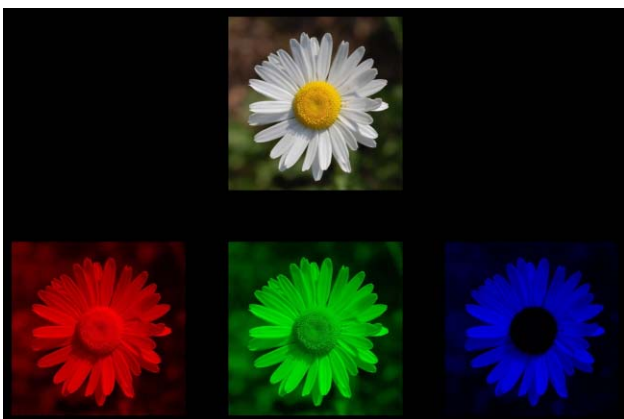
4. ábra. A kísérletben használt sárga, illetve vörös-zöld világítódioda kapcsolása.

A számítógépek színkezelése legegyszerűbben egy rajzolóprogram segítségével szemléltethető. Például a Windows operációs rendszer részét képező Paint programban a „Színek szerkesztése” ikonra kattintva egy-egy 0–255 közötti értékkel adhatjuk meg a használni kívánt szín vörös-zöld-kék (RGB) összetevőjét. Ennek megfelelően a 255-255-0 a sárga, a 0-255-255 a cían, a 255-0-255 a bíbor, a 255-255-255 a fehér, a 0-0-0 pedig a fekete színt határozzák meg.

A televízió vagy számítógép képernyőjének vörös-zöld-kék képpontjai jól láthatók, ha a képernyőt egy kellően nagy nagyítású gyűjtőlencsén át nézzük. Ehhez egyszerű nagyítóként helyezünk egy 1-2 cm átmérőjű, színtelen üveggolyót a képernyő felületére (3. ábra). Fehér felületnél mindhárom alapszín képpontjai teljes fényerővel világítanak, de például sárga felületnél csak a vörös és a zöld képpontok fénylenek, a kéknek teljesen sötétek. A kísérlethez használható üveggolyó hobbi- vagy játékboltokban, illetve internetes áruházakban viszonylag olcsón beszerezhető.

A vörös és zöld fény additív keverése egyszerűen bemutatható két világítódioda (LED) segítségével. Néhány forintért kaphatók sárga, valamint vörös-zöld LED-ek. A vörös-zöld LED valójában egy vörös és egy zöld világítódiodát tartalmaz, amelyek ellentétes irányban, egymással párhuzamosan vannak kapcsolt-

6. ábra. Színes kép, valamint vörös, zöld és kék összetevői.



5. ábra. A LED-ek fénye mozgásuk közben.

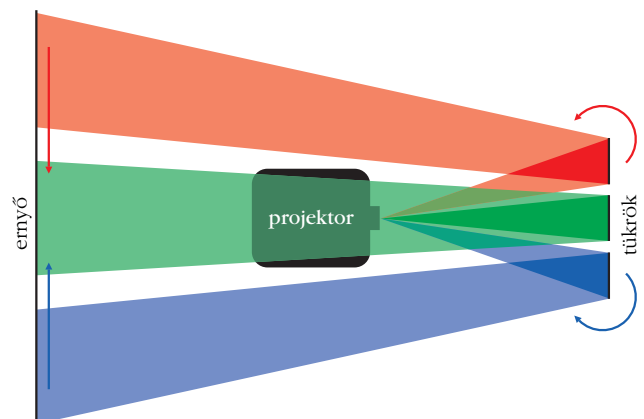
va. A feszültség polaritásától függően vagy a vörös, vagy a zöld dióda világít.

Egy fekete farostlemezbe, egymástól 2-3 cm távolságra fúrjunk két akkora lyukat, mint amekkora a LED-ek átmérője. Az egyikbe egy sárga, a másikba egy vörös-zöld világítódiodát ragasszunk, és a világítódiodákat a 4. ábrának megfelelően 5 V-os váltakozó feszültségre kapcsoljuk. A kísérletben mindkét LED fényét sárgának látjuk. A vörös-zöld világítódioda ugyanis fél perióduson át vörös, majd fél perióduson át zöld fényt bocsát ki. A LED fénye így a vörös és a zöld csapokat is ingerli, de szemünk nem képes az 50 Hz frekvenciájú villogás észlelésére. Ha a farostlemez gyorsan mozgatjuk, akkor a sárga LED szaggatott sárga vonalként látszik, a vörös-zöld LED-et viszont szaggatott vörös-zöld vonalként látjuk (5. ábra). Ugyanis, amikor a vörös-zöld LED mozog, akkor az ideghártyán a vörös fény máshol ingerli a vörös csapokat, és máshol a zöld csapokat, így szaggatott vörös-zöld vonalat látunk.

Az additív színkeverés látványosan szemléltethető egy projektorral és három tükörrel is. Ehhez egy digitális fénykép vörös-zöld-kék (RGB) összetevőit egyetlen képen egymás mellé illesztjük (6. ábra). (Az RGB összetevőkre bontáshoz például az ingyenesen letölthető, magyar nyelvű menüvel is rendelkező XnView program használható.)

Ezt a képet egy projektorral három síktükörre vetítjük úgy, hogy az egyes összetevők külön-külön tükörre essenek (7. ábra). A tükörök megfelelő beállításával a vörös-zöld-kék összetevők az ernyőn egyesíthetők.

7. ábra. Additív (összeadó) színkeverés projektorral.





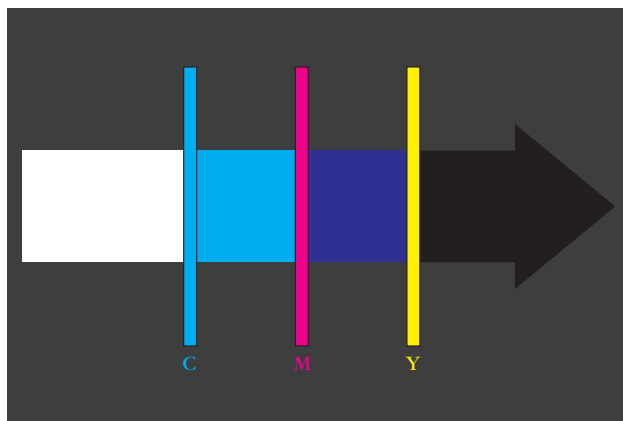
8. ábra. Additív (összeadó) színkeverés CD-tokokkal.

Az összeadó színkeverés eredményeként így újra kialakul az eredeti színes kép. A kísérlet részletes leírása megtalálható a *FizKapu* honlapon [4]. E kísérlet előnye, hogy az egész osztálynak egyszerre bemutatható, de projektorra van szükség hozzá.

Projektor nélkül, akár tanulókérséletként is elvégezhető a következő kísérlet: egy hordozható számítógép (laptop) képernyőjét állítsuk függőleges helyzetbe, és jelenítsünk meg rajta egy olyan képet, mint az előző kísérletben! A vízszintes billentyűzetre fektessünk egy farostlemezt! Bontsunk szét három CD-tokot, és a felső (CD-t nem tartalmazó) részekből távolítsuk el a CD-borítót! Ezeket féligáteresztő tükröként használjuk a kísérletben. (Természetesen üveg- vagy plexilap is használható, de a CD-tok fedőlapja a kiálló nyúlványok miatt egyszerűbben rögzíthető.) A farostlemezre szigetelőszalaggal ragasszuk fel a három fedőlapot úgy, hogy azok síkja függőleges legyen, és 45 fokot zárjon be a képernyő síkjával (8. ábra)! A fedőlapok függőleges élei olyan távolságra legyenek egymástól, mint amekkora távolsággal az egyes színösszetevők elvannak tolvá egymáshoz képest! Az utolsó fedőlapba, a borító helyére helyezzünk egy fekete kartont! A három féligáteresztő tükrök az egyes összetevőkről kiinduló fényt a képernyővel párhuzamos irányba veri vissza. Ebből az irányból, néhány méter távolságból nézve a három kép fedésbe kerül egymással, és az összeadó színkeverés eredményeként most is az eredeti színes képet látjuk. A kísérletről készített videó *Additív színkeverés CD-tokokkal* címen elérhető a *FizKapu* honlapon [5].

A szubtraktív (kivonó) színkeverés

Ha valamilyen összetett (többnyire fehér) fény egy olyan átlátszó anyagon (színszűrőn) halad át, amely egy vagy több elemi színt vagy elemi színek egyes tartományait részben vagy egészben elnyeli, akkor a szűrőre beeső és a szűrőn átjutó fény színe általában eltér egymástól. Ilyenkor a beeső fényből a szűrő bizonyos színeket eltávolít, ezért ezt a fajta színkeverést *szubtraktív színkeverésnek* (kivonó színkeverésnek) nevezzük (9. ábra). A tapasztalatok szerint fehér fényből a



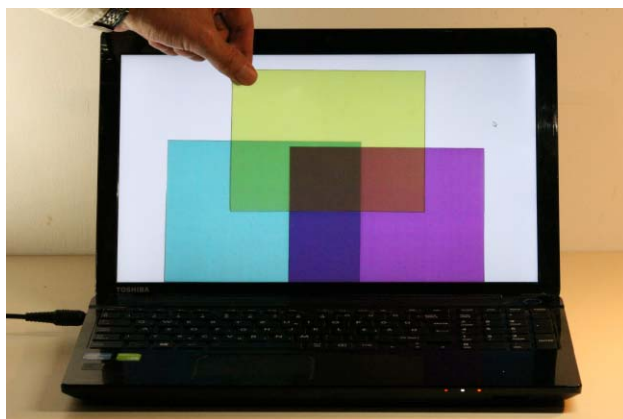
9. ábra. A szubtraktív (kivonó) színkeverés elve.

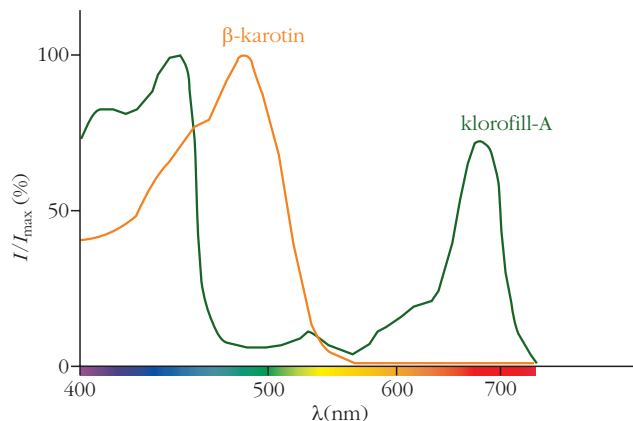
cián, bíbor és sárga szűrők megfelelő alkalmazásával tetszőleges szín előállítható. Ezt a fajta színkeverést az alapszínek angol elnevezése alapján (cyan-magenta-yellow) CMY színkeverésnek nevezik (cyan-magenta-yellow). Kivonó színkeverést használnak például a hagyományos filmre történő színes fényképezésnél és a színes nyomtatásnál is. (Nyomtatásnál fekete festéket is használnak, e színkeverés jelölése CMYK.)

A szubtraktív színkeverés – megfelelően nagy méretű cián, bíbor és sárga színszűrővel – demonstrációs kísérletként is könnyen bemutatható. Ilyen színszűrőket legegyszerűbben színes lézernyomtatóval készíthetünk. Egy rajzolóprogrammal A4-es lapra cián téglalapot rajzoljunk úgy, hogy a margó a lehető legkisebb legyen! Ezt a „képet” átlátszó írásvetítő fóliára nyomtaszuk ki (vagy egy gyorsnyomdában nyomattassuk ki)! (A nyomtatáshoz speciálisan lézernyomtatókhoz gyártott fólia kell, a hagyományos fólia tönkretetheti a nyomtatót.) Az így kapott szűrő kicsit világos, de félbehajtva már megfelelő fedettségű a kísérletekhez. Ugyanígy készíthetjük el a bíbor és sárga szűrőt is.

Fényforrásként a számítógép képernyője használható, ha azon egy fehér „képet” jelenítünk meg. A képernyőre helyezett, és egymást részben fedő szűrőkkel egyszerűen szemléltethető a kivonó keverés: például a cián-bíbor kéket, a cián-sárga zöldet, a bíbor-sárga vöröset, a három szűrő együttesen pedig feketét ad (10. ábra).

10. ábra. Szubtraktív (kivonó) színkeverés fóliákkal.





11. ábra A β -karotin és a klorofill-A fényelnyelése.

A testek színe

Az, hogy egy testet milyen színűnek látunk, függ a megvilágító fény hullámhossz-összetételétől (spektrumától) és attól is, hogy a test a ráeső fényből milyen színeket nyel el, illetve melyeket ver vissza. Fehér fényvel történő megvilágításkor a tárgyakat a szokott színűeknek látjuk: például a sárgarépat narancssárgának, a falevelet zöldnek. E színekért elsősorban a sárgarépában található β -karotin, illetve a falevélben található klorofill-A a felelős. E két anyag elnyelési görbéje a 11. ábrán látható. (A grafikon a *Wikimedia Commons* egyik ábrája alapján készült [6].)

Megfigyelhető, hogy a karotin nem nyeli el (azaz visszaveri) a vörös-narancs-sárga tartomány nagy részét, a színek további részét viszont szinte teljesen elnyeli. Emiatt a sárgarépat fehér fényben narancssárgának látjuk. A kék fényvel megvilágított sárgarépa azonban sötétnek, a vörössel megvilágított viszont világosnak látszik, összhangban a karotin elnyelési görbéjével.

A klorofill elnyelési görbéjéből megállapítható, hogy a klorofill visszaveri a zöld-sárga tartomány nagy részét, viszont elnyeli a látható színek többi részét. A falevelet ezért fehér fényben a róla visszavert színek keverékeként zöldnek látjuk. Vörös vagy kék fényben azonban a falevél sötétnek, zöld fényben pedig világosnak tűnik.



12. ábra. Sárgarépa, zöld levél és muskátli vörös fényben.

Mindezek könnyen ellenőrizhetők, akár tanulóki-sérlettel is. Az okostelefonokra letölthető olyan alkalmazás (applikáció), amellyel a telefon kijelzője tetszőleges színűre állítható. (Például a magyar nyelvű menüvel is rendelkező *Physics Toolbox* alkalmazás *Szín-generátor* funkciója e célra jól használható [7].) Egy teljesen elsötétített helyiségben a mobiltelefon kijelzőjével különféle tárgyakat (sárgarépa, narancs, paradicsom, falevél, különféle színű virágok) világítsunk meg, és figyeljük meg, mely színeket vernek vissza, illetve melyeket nyelnek el! A 12. ábrán sárgarépa, levél és piros muskátli látható vörös fényben.

Ugyanez a kísérlet projektor segítségével demonstrációs kísérletként is elvégezhető, de csak akkor, ha teljesen elsötétíthető a terem. Az esetleg bejutó kevés fény ugyanis jelentősen megzavarja a kísérletet.

Irodalom

- https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Színészóródás_prizmán1.jpg
- Simonyi K.: *A fizika kultúrtörténete*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 2011.
- I. Newton: *Opticks*. Royal Society, London, 1704. Digitalizált változat: <https://archive.org/stream/opticksortreatisnewt#page/n95/mode/2up>
- http://www.fizkapu.hu/fiztan/cikkek/c_15_003.pdf
- <http://www.fizkapu.hu/fizfilm/fizfilm6.html>
- https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lichtabsorbtion_eines_buchenblattes.svg
- <https://www.vieyrasoftware.net>
- <http://www.fizkapu.hu/fizfoto/fizfoto6.html>