

# A FELFEDEZÉSTŐL A KITELJESEDÉSIG – DOPPLER ÉS HUBBLE EMLÉKEZETE –

Szabados László

tudományos tanácsadó, az MTA doktora, MTA Csillagászati Kutatóintézet – szabados@konkoly.hu

Kétszáz éve született és százötven éve halt meg Christian Johann Doppler osztrák matematikus-fizikus, aki megjósolta a fény hullámtermészetéből fakadó furcsa viselkedését – a később róla elnevezett effektust –, és kereken ötven éve halt meg Edwin Powell Hubble amerikai csillagász, akinek a nevéhez köthető a Doppler-effektus talán legismertebb alkalmazása, amely az Univerzum tágulásának felismeréséhez vezetett.

*Egy osztrák matematikus  
beszél a fizikába*

Christian Doppler egy salzburgi kőműves fiaként látta meg a napvilágot. Természetes lett volna, hogy apja mesterségét folytatva a jól menő vállalkozást vigye tovább, ám hamar kiderült, hogy törekeny egészsége miatt az ifjú Dopplernek más mesterséget kell választania. Szerencsére hamar megmutatkozott a matematika iránti fogékonysága, így Dopplert kiköveztet út vezette a matematikus (1825), majd a fizikus-csillagász (1829) egyetemi oklevél megszerzéséhez.

Diplomásként rögtön a bécsi egyetemre került, ahol felsőbb matematikát és mechanikát oktatott. Álláshelye azonban csak ideiglenes volt, így harmincéves fejjel kellett biztos megélhetést jelentő állás után néznie. Akkoriban már pályázati úton választották ki a professzorokat – írásbeli vizsgán elért eredményeik és próbaelőadásokon való szereplésük alapján. Doppler próbálkozásait nem kísérte szerencse. Átmenetileg még

könyvelői állást is elvállalt egy fonalkészítő üzemben. A professzori alkalmassági vizsgákon elszenvedett kudarcok hatására már azt fontolgatta, hogy áttelepül Amerikába, amikor 1835-ben végre elnyert egy technikumi tanári állást Prágában. Az elemi matematika középiskolai oktatása azonban nem elégtette ki, egyetemi katedrára vágyott. Szerencséjére a következő évtől már óraadóként oktathatott a prágai műegyetemen. Sőt, 1837-ben ugyanott megürült egy professzori állás, s bár Doppler azonnal átvette az azzal járó oktatási feladatokat, hivatalosan csak 1841-ben nevezték ki professzorá.

Egyáltalán nem volt könnyű időszak ez Doppler számára, de a jelek szerint tanítványainak sem. A hallgatók ugyanis nehezményezték a vizsgák szigorát, amiért az egyetemi előjárók felelősségre vonták Dopplert, ráadásul újra kellett vizsgáztatnia a több száz hallgatót. A fegyelmi határozatot 1844-ben kényszeredetten visszavonták ugyan, de közben Doppler egészsége annyira megromlott, hogy már nem is tartott egyetemi órákat, sőt egy lehetőséggel élve állást is változtatott.

Így került Selmecbányára, a híres Bányászati és Erdészeti Akadémiára a matematika, fizika és mechanika professzorának. Az 1848-as forradalmat követő bizonytalan politikai helyzet miatt azonban itt sem maradt sokáig. Az addigra megszerzett tekintélye hatására viszont már könnyen talált új állást: a bécsi műegyetemre került, 1850-ben pe-

dig a bécsi egyetem újonnan alapított fizikai intézetének első igazgatójává nevezték ki. Pályafutásának ez volt a csúcspontja.

Noha pályafutása során a legtöbb időt a matematika professzoraként töltötte, az utókor nemigen emlékszik a láncörtékekkel és az analitikus geometriával kapcsolatos matematikusi munkásságára – annál ismertebb Doppler, a fizikus. Kortársai szerint nem tartozott a kiemelkedő matematikusok közé, és az 1843-ban Prágában megjelent aritmetika- és algebratankönyvéből is kiviláglik, hogy még a matematika alapkérdéseiben sem mindig igazodott el. Ugyanakkor Doppler fel nem ismert zseni volt, illetve egyvalaki akadt csupán – Bolzano, a híres matematikus –, aki felismerte kortársa zsenialitását. Bolzanót lenyűgözték Doppler eredeti elgondolásai. Doppler nevét is egyik ilyen ötlete alapján ismeri az utókor.

Azon elmélkedve, hogy miért különböző színűek a csillagok, Doppler arra következtetett, hogy a színbeli eltérés oka a csillagok látóirányú mozgása. A fénysugár ugyanis hullám, amely a kibocsátó forrás közeledése esetén összesebb torlódik, azaz megnő a frekvenciája, míg a távolodó csillag sugárzása alacsonyabb frekvenciájú hullámokká húzódik szét. A következtetés helyes, a felismerés zseniális, Doppler magyarázata mégsem aratott osztatlan elismerést. Ennek csak egyik oka volt, hogy állítását nem tudta bizonyítani – a csillagok színképében csak évtizedekkel később sikerült megfigyelni a Doppler-effektust. A szakmai kételyekhez az is hozzájárult, hogy az 1842-ben tartott előadásában Doppler elnagyoltan fogalmazta meg a felismerést. Az effektust egyaránt érvényesnek tekintette a hanghullámokra és a fényre, mondván, hogy mindkettő longitudinális hullámként terjed. Ez utóbbi érv azonban egyszerűen nem igaz, mert a fény (és általában az elektromágneses sugárzás) transzverzális hullámként viselkedik. A Doppler-effektus megfogalmazásakor ráadásul ez már

ismert volt szakmai körökben, Augustin Jean Fresnel (1788-1827) ugyanis már korábban közzétette a fény diffrakciójával kapcsolatos felismerését. Maga Doppler is tudott róla, de nem fogadta el Fresnel eredményét.

Más gyenge pontja is volt Doppler hipotézisének: már a kiindulásnál alaptalan feltevésről élt. Téves ugyanis az az állítás, hogy a csillagok csak az optikai hullámhossztartományban sugároznak. William Herschel (1738-1822) már 1800-ban felfedezte az infravörös sugárzás létét, Johann Wilhelm Ritter (1776-1810) pedig 1801-ben az ibolyántúli sugárzást – mindkettő a Nap (tehát egy csillag) színképének vizsgálata során. Elképzelhető, hogy e felfedezések híre nem jutott el Dopplerhez. Másik feltevése azért helytelen, mert ha a csillagok csak optikai sugarakat bocsátanak ki, akkor ahhoz, hogy a Naphoz hasonlóan sárga csillag fényét vörösnek vagy kéknek lássuk, a csillagnak több tízezer km/s értéket meghaladó sebességgel kell távolodnia, illetve közelednie a megfigyelőhöz viszonyítva. Ez két eltérő színű, de összetartozó csillag, azaz kettőscsillag esetében a mechanika akkor már ismert törvényei szerint is irreális helyzet. A Nap környezetében található csillagok csupán néhányszor tíz km/s sebességgel mozognak a Naphoz viszonyítva.

Tegyük máris hozzá, hogy a 20. század utolsó harmadában viszont rengeteg olyan kozmikus forrást találtak a csillagászok, amelyek százezer km/s értéket meghaladó, olykor a fénysebességet megközelítő sebességgel távolodnak tőlünk. Ezek persze nem a Tejútrendszerhez tartozó csillagok, hanem nagyon távoli extragalaxisok, amelyek létéről Doppler korában nem is tudtak. A hatalmas távolodási sebesség az Univerzum tágulásának következménye, amelyre Edwin Hubble munkásságának kapcsán még részletesen kitérünk.

Egyvalamiben azonban teljesen igaza volt Dopplernek: a fény terjedési sebességének véges értéke miatt a közeledő vagy

távolodó testek színe tényleg megváltozik. Ezt a jelenséget ő maga a fény James Bradley (1693-1762) által 1728-ban kimutatott aberrációja általánosításának tartotta.

A fényre vonatkozó Doppler-effektust a 19. század közepén laboratóriumi eszközökkel azonban nem lehetett igazolni, és akkoriban a csillagászati megfigyelési technika sem érte még el az effektus kimutathatóságához szükséges szintet. Kortársai közül ezért többen is nyíltan kritizálták Doppler elgondolását. Leghevesebb bírálói a magyar Petzval József (1807-1891) és a holland Christophorus Buys-Ballot (1817-1890) voltak. A szakmai nézeteltérésből végül is a fizika került ki győztesen: Buys-Ballot egy furcsa kísérlettel igazolta, hogy a Doppler-effektus hanghullámok esetén tényleg fellép. A hollandus 1845-ben fűvöszenészeket ültetett egy vasúti kocsiba, és a mozgó vonat felől érkező zenei hangok magasságát a pálya mellől figyelő közönség valóban észlelte a hang hirtelen mélyülését abban a pillanatban, amikor az addig közeledő vonat távolodni kezdett.

Doppler híres-hírhedt cikkében a csillagok színváltozásáról értekezett, de hullámhosszról, frekvenciáról vagy spektroszkópiáról nem tett említést. Pedig a színképelemzés akkoriban már bekerült a tudomány eszköztárába. A csillagászati spektroszkópia terén azonban az 1840-es évekig – Joseph Fraunhofer (1787-1826) Nap-észlelésein kívül – nem történt említésre méltó esemény. Fraunhofer még 1817-ben sötét vonalakat figyelt meg a Nap színképében. A Fraunhofer-vonalak közönséges kémiai elemek (kalcium, nátrium, hidrogén, stb.) laboratóriumban is előállítható emissziós vonalainak felelnek meg, de a Nap légkörében (az ottani alacsonyabb hőmérséklet miatt) a vonalak abszorpcióssákká válnak. Azonban akár elnyelési, akár kibocsátási a vonal, hullámhossza alapján egyértelműen azonosítható.

Armand Hyppolite Louis Fizeau (1819-1896) francia fizikus egy 1848-ban tartott előadásában mondta ki elsőként, hogy a csillagok fényében fellépő Doppler-effektust a csillagszínképekben látható spektrumvonalak hullámhossz-eltolódásának mérésével érdemes igazolni. Az akkori kis távcsövekkel és a hozzájuk illesztett kézi spektroszkóppal azonban nem lehetett érdemi mérést végezni a csillagok színképében, ezért nem meglepő, hogy Fizeau ragyogó ötletét csak 1870-ben közölte írásban.

A Doppler-effektus csillaga csak lassan ívelt felfelé. Az ötletadó Doppler pedig nem sokáig élvezhette a bécsi professzorságot. Addig is beteges szervezete gyorsan gyengült. 1852 őszén Velencébe utazott, azt remélve, hogy az enyhébb klímájú városban majd csak rendbe jön, de a hátralevő fél évben ennek éppen az ellenkezője történt. Doppler is a gyönyörű olasz kisváros híres halottai közé tartozik.

#### *A Doppler-effektus kimutatása csillagoknál*

Alighogy 1870-ben Fizeau közzétette több mint két évtizeddel korábban felvetett ötletét, még ugyanabban az évben az olasz Angelo Secchi (1818-1878) rájött arra, hogyan lehet egyszerűen kimutatni a látóvonal menti mozgás által okozott hullámhossz-eltolódást legalább egy csillagnál, a Napnál. A napfoltok mozgásából már régóta tudták, hogy a Nap forog. Secchi ötlete az volt, hogy a forgás által kijelölt egyenlítő két átellenes pontját kell nézni a napkorong peremén, azt, amelyik éppen a Nap látható felére fordul be, és azt, amelyik rövidesen eltűnik a szemünk elől. Ekkor ugyanis a Nap leginkább felénk tartó, illetve távolodó pontját vizsgáljuk. Secchi el is végezte a mérést, amellyel kimutatta, hogy a két színképhez tartozó azonos vonalak hullámhossza kicsit különböző. A Doppler-effektust számszerűen Hermann Karl Vogelnek (1841-1907) sikerült igazolnia

1872-ben, amikor a hullámhossz-eltolódás alapján számított forgási sebességet összevetette a napfoltok mozgásából kapott tengelyforgási idővel.

Távolabbi csillagoknál nem a forgás hatását, hanem a Naphoz viszonyított térbeli mozgás látóirányú komponensét kellett kimutatni (hiszen a csillagok pontszerűeknek látszanak). Ehhez pontos mérésre volt szükség, amelyet attól kezdve lehetett végrehajtani, amikor a színeképet fotólemezen is meg tudták örökíteni. Ez ugyancsak az 1872. év egyik fontos csillagászati előrelépése volt. Maga Vogel több száz csillag színeképet vette fel az elkövetkező években, és ötvenegy csillagra sikerült megmérnie a Doppler-efektust is. Az ő nevéhez fűződik az egyik legelső spektroszkópiai kettőscsillag felfedezése is. Az ilyen csillagok színeképeben periodikusan változik a vonalak hullámhossza, mivel a páros mindkét csillaga kering a rendszer közös tömegközéppontja körül.

A 20. század elejére az évszázadokon át szinte csak Európára koncentráltó csillagászat kétpólusúvá vált, az Amerikai Egyesült Államok néhány évtized alatt csillagászati nagyhatalommá lépett elő, s ez elsősorban új, nagy távcsövek létesítésével magyarázható. Különösen nagy előrelépést jelentett a 2,5 méter átmérőjű tükröt tartalmazó Hooker-teleszkóp elkészítése (1917) a kaliforniai Mount Wilson obszervatóriumban.

#### *Az Univerzumról alkotott kép kitérítője*

Az 1889-ben, a Missouri állambeli Marshfieldben született Edwin Powell Hubble iskolás korában rengeteget olvasott, de még több időt szentelt a sportolásnak: atletizált, futballozott, kosárlabdázott. Sportbeli képességeit jelzi, hogy chicagói középiskolásként megdöntötte az Illinois államban érvényes magasugrócsúcsot. Igazgatója 1908-ban így búcsúzott a végzős diáktól: „Edwin Hubble, négy éven át figyeltelek, de soha nem láttalak tíz percnél tovább tanulni.” Majd egy kis

hatásszünetet követően az igazgató a chicagói egyetemre szóló ösztöndíjat nyújtott át Hubble-nak.

Az egyetemista Hubble-t már megérintette a fizika, mert – ugyan csupán ösztöndíjnak kiegészítésére – abban a laboratóriumban asszisztenskedett, amelyet Robert Millikan (1868-1953), a későbbi Nobel-díjas vezetett. Továbbra is a sport érdekelt, a korábban is művelt sportágak mellett, de néha azok helyett az ökölvívás. Az egyetemi baccalaureus fokozat megszerzése után (1910) Rhodes-ösztöndíjjal a híres oxfordi Queens College-ba került, joghallgatónak. Diplomáját megszerelve (1913) el is helyezkedett a jogi pályán (más forrás szerint tanári állást vállalt – Hubble fiatal éveire vonatkozóan nem ez az egyetlen bizonytalanság), de hamar rájött, hogy nem ez érdekli, mert a szíve a csillagászat felé húzta. 1914-ben visszatért a chicagói egyetemre, hogy doktori fokozatot szerezzen – csillagászatból.

Még doktori értekezésén dolgozott, amikor állást ajánlottak neki a Mount Wilson obszervatóriumban. Micsoda lehetőség! Hubble táviratilag választott Georg Ellery Hale-nek (1868-1938), az akkori igazgatónak: „Ajánlatát sajnos nem fogadhatom el. A háborúba megyek.” 1917-et írtak akkor... Hubble 1919 nyarán tért vissza az I. világháborúból, s amint leszerelt, azonnal a Mount Wilson obszervatóriumba sietett. Kutatói pályáján aztán mindvégig hű maradt ehhez az intézményhez, amely az 1940-es évek végétől az akkortól legnagyobb, ötméteres Palomar-hegyi távcső gazdája is volt – csak a II. világháború idején töltött újabb katonai szolgálata vonta el átmenetileg a tudománytól.

Kutatói pályájának első évtizedében elért felfedezéseivel Hubble alapjaiban változtatta meg a Világegyetemről alkotott képet. Galilei óta nem következett be ehhez fogható fejlődés a csillagászatban ilyen rövid idő alatt, ráadásul egyetlen személy munkássága folytán. Itt nem is tudjuk áttekinteni

Hubble valamennyi hozzájárulását a kozmosz megismeréséhez, csak azokkal foglalkozunk, amelyek a Doppler-effektus csillagászati alkalmazásával kapcsolatosak, vagy elvezettek ahhoz.

Hubble az 1920-as évek közepén ismerte fel, hogy a világ nem ér véget a Tejútrendszer határainál. A 2,5 méteres távcsövel ugyanis sikerült csillagokra bontania néhány spirálködöt (közte a legközelebbit, az Androméda-ködöt). Hogy ezek a csillagrendszerek a Tejútrendszer megfelelői, azaz szomszédos galaxisok, azt úgy sikerült bizonyítania, hogy távolságjelző csillagokat talált bennük. Ilyen távolságindikátorok a cefeida típusú változócsillagok, amelyek sajátregzést végezve radiálisan pulzálnak, s eközben periodikusan változtatják fényességüket. Ezen oszcilláció természetéből következik, hogy a pulzáció periódusa a csillag méretétől, s azon keresztül a sugárzási teljesítményétől függ. A periódus és az abszolút fényesség közötti kapcsolat ismeretében (amit tejútrendszerbeli cefeidákkal lehet kalibrálni) a mérésekből meghatározott látszó fényességből és a pulzáció periódusából kiszámítható a cefeida, illetve az őt tartalmazó extragalaxis távolsága.

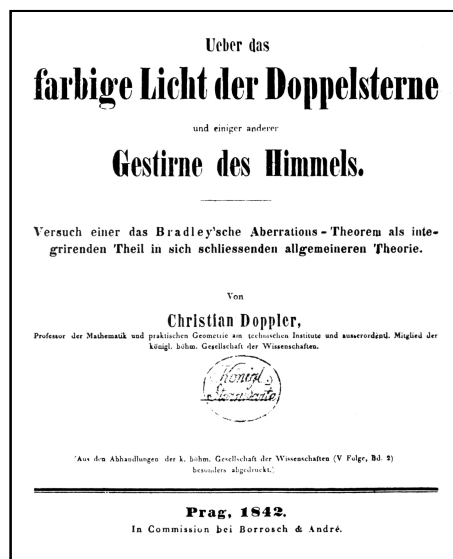
A világ ismert határai egy csapásra az addiginak sokszorosára tágtak ezzel a felismeréssel. De Hubble azt is kimutatta, hogy az Univerzum nemcsak átvitt értelemben tágul.

Az extragalaxisok színeképe az őket alkotó milliárdnyi csillag spektrumának együttese. Az Univerzum leggyakoribb elemére, a hidrogénre jellemző színképvonalak minden galaxis spektrumában feltűnnek, de a csillagrendszerek mozgása miatt fellépő Doppler-effektus hatására ezek a vonalak nem a laboratóriumi hullámhosszuknál figyelhetők meg. Számos galaxis látóirányú sebességét meghatározva Hubble 1929-ben figyelte fel arra, hogy minél messzebb van egy galaxis, annál nagyobb sebességgel távolodik tőlünk. Ez a felfedezés a modern kozmológia kezdetének számít, és az azóta más megfigyelési

tényekkel is alátámasztott *ősrobbanás* egyik észlelési bizonyítéka. Ha a világ egy szingularitásból keletkezett az ősrobbanással, és azóta tágul, akkor megfelelően nagy térbeli skálán minden alkotóeleme távolodik a tőle távol levő összes kozmikus objektumtól. A Hubble által felfedezett összefüggés – a Hubble-törvény – szerint a galaxisok tőlünk való távolsága és távolodási sebessége között egyenes arányosság áll fenn. Az arányossági tényező az ún. Hubble-állandó, amelynek értéke mai ismereteink szerint kb. 70 km/s/megaparszek (1 parszek = 3,26 fényév). (A Hubble-törvény a gravitációsan kötött rendszereken belül, például a Naprendszerben, a Tejútrendszerben, de még az egy rendszert képező galaxishalmazokban sem érvényesül.)

A Hubble-állandó értékéből kiindulva meghatározható az Univerzum kora, a Hubble-idő is, vagyis hogy mennyi idővel ezelőtt történt az ősrobbanás. Az Univerzum kialakulása, fejlődése pedig érthető módon a tudomány egyik legfontosabb kérdése. Maga Hubble azonban nem foglalkozott saját kutatási eredményeinek e témára gyakorolt hatásával.

Hubble nevéhez még számos eredmény fűződik, egyebek között ő alkotta meg a ga-



laxisok osztályozási rendszerét is. Az alapjaiban ma is használatos morfológiai felosztásban három fő típus szerepel: a spirális, az elliptikus és a szabálytalan galaxisok. Bár a legnagyobb tudományos elismerést, a Nobel-díjat nem kapta meg, Hubble-t minden idők legnagyobb csillagászaik között tartják számon.

### *Doppler-effektus nagyban és kicsiben*

Tekintsük át röviden, hogy másfél évszázaddal Doppler és fél évszázaddal Hubble halála után milyen kutatások épülnek a Doppler-effektus vizsgálatára!

Ma már olyan egészen távoli extragalaxisok színeke is vizsgálható, amelyek hatalmas sebességgel távolodnak tőlünk. Kis sebességek esetén – nagyjából a fénysebesség egy tizedéig – a Doppler-effektus miatt kialakuló hullámhossz-eltolódás ( $\Delta\lambda$ ) – amit távolodás esetén *vöröseltolódás*nak szokás nevezni, és a csillagászatban  $z$ -vel jelölnek – egyenesen arányos a látóirányú sebességgel ( $z = \Delta\lambda/\lambda = v/c$ , ahol  $c$  a fény terjedési sebessége vákuumban). Nagy sebességek-nél relativisztikus effektusok lépnek fel, amelyekről a vöröseltolódás és a távolodási sebesség közötti kapcsolat bonyolultabb ( $z = [(c + v)/(c - v)]^{1/2} - 1$ ). A relativisztikus hatás egyik érdekes következménye az is, hogy ha egy test a látóvonalra merőlegesen mozog, akkor is nő az általa kibocsátott sugárzás hullámhossza (transzverzális Doppler-effektus). Egy másik hatás az ún. gravitációs vöröseltolódás, amelynél a sugárzást kibocsátó test tömege miatt nő a kibocsátott sugárzás hullámhossza (a tömegvonzás miatt lecsökken a testről távozó foton energiája, tehát ennek a relativisztikus hatásnak nincs köze a Doppler-effektushoz). Az ezredfordulón megfigyelt legnagyobb vöröseltolódások már meghaladják a  $z = 6$  értéket. Ez tehát nem hatszoros fénysebességgel távolodó forrást jelent, de a fénysebességet alaposan megközelítő mozgásra utal. A fény véges terjedési sebessége miatt viszont ezeket a nagyon

távoli extragalaxisokat olyanoknak látjuk, amilyenek a most felfogott sugárzás kibocsátásakor, azaz tízmilliárd évnél is régebben voltak. De azt, hogy a látható fényben hogyan néztek akkor ki, azt most az infravörös tartomány vizsgálatából tudhatjuk meg – ugyancsak a Doppler-effektus által.

A minél nagyobb vöröseltolódások kimutatása iránti vágy nem öncélú; így juthatunk egyre közelebb az Univerzum múltjának megértéséhez, hisz a legelsőként kialakult kozmikus struktúrák a legnagyobb vöröseltolódású képződmények között keresendők.

A másik véglet, a minél kisebb Doppler-effektus kimutatása ugyancsak jellemző napjaink csillagászatára. A parányi Doppler-effektus az idegen csillagok körül keringő bolygók kimutatására alkalmas. A jelenség ugyanaz, mint a kettőscsillagoknál, de a bolygó kis tömege miatt az anyacsillag alig mozdul el a rendszer tömegközéppontjához képest. Míg Hubble idejében a színeképvonalak Doppler-eltolódásából 1-2 km/s pontossággal lehetett meghatározni a csillagok látóirányú sebességét, addig mára különleges spektroszkópai technikákat alkalmazva már néhány méter/másodperc a detektálva pontossága. A látóirányú sebesség mérésének pontosságát azonban nem lehet minden határon túl növelni. A csillagok fizikai tulajdonságai és a csillaglégrétegben zajló folyamatok (turbulencia, konvekció, oszcillációk, stb.) kiszélesítik és eltorzítják a színeképvonalakat. 1995 óta így is több mint száz bolygó létét tudták közvetve kimutatni más csillagok körül, de ezek mindegyike óriásbolygó, amelyek tömege a Jupiteréhez hasonló. A csillagászok célja pedig a Föld típusú bolygók felfedezése. Úgy tűnik, hogy ilyeneket nem a Doppler-effektus által fognak találni.

### *Doppler-effektus a Földön és a Föld körül*

Doppler a csillagászatból merítette felfedezésének ötletét, és a Doppler-effektus a csillagászatban futotta be a legnagyobb karri-

ert, de számos más területen is alkalmazzák, és nem csak kutatási célokra.

A *Doppler-hűtést* a kísérleti fizikusok alkalmazzák atomok hőmozgásának lassítására, amit megfelelően hangolt lézerefénnyel érnek el. Az 1980-as évek közepén kidolgozott eljárással 240 milliomod K hőmérsékletre sikerült hűteni bizonyos atomokat, s ezért Steven Chu (sz. 1948) és William Phillips (sz. 1948) amerikai valamint Claude Cohen-Tannoudji (sz. 1933) francia fizikus Nobel-díjat is kapott (1997).

A hanghullámokkal, pontosabban az ultrahanggal kapcsolatos Doppler-effektuson alapul a szív- és érrendszeri betegségek diagnosztikájában alkalmazott eljárás, a *Doppler-ultraszonográfia*. A kibocsátott ultrahang visszaverődik a véráram alakos elemeiről, s a visszaszórt hullámok Doppler-eltolódása

nemcsak a véráram létét és irányát jelzi, hanem a vér áramlásának sebessége is meghatározható a jel elemzéséből.

*Doppler-követés* a neve a mesterséges holdak pályájának meghatározására szolgáló módszernek, amelyet a mesterséges hold fedélzetén kibocsátott stabil frekvenciájú rádiójel észlelt frekvenciaeltolódására alapoznak.

S hogy végül teljesen visszazökkenjünk a hétköznapi földi valóságba: az országutak, autópályák mentén végzett radarkontroll a megengedett haladási sebesség túllépésének kimutatására szintén a Doppler-effektuson alapul.

---

Kulcsszavak: *Doppler-effektus, hullámhossz, frekvencia, vöröseltolódás, Hubble-állandó, kozmológia*

