

olyan festményt találtunk (belőlük itt csak egyet mutatunk be a *12. ábrán*), ahol a vízfelület sötét foltját nem lehet e triviális visszaverődésekkel magyarázni, hanem csakis a Brewster-féle sötét folttal tudjuk értelmezni.

Végül megemlítjük, hogy érdemes lenne tanulmányozni a halevő vagy más gázló madarak zsákmányszerzési viselkedését, például gémek sekély vizekbeli vadászását alacsony napmagasságok mellett abból a szempontból, hogy északi/déli irányban gyakrabban próbálkoznak-e halat elkapni, mivel ekkor – a Brewster-féle sötét foltnak köszönhetően – könnyebben látnak a vízfelszín alá [17].

A FIZIKA TANÍTÁSA

KEVÉSSÉ ISMERT DEMONSTRÁCIÓS KÍSÉRLETEK CSEPPFOLYÓS NITROGÉNNEL

Medvegy Tibor

Pannon Egyetem, Fizika és Mechatronika Intézet

Légkörünk 78 V/V%-át nitrogén teszi ki, ezért joggal nevezhetjük hétköznapi anyagnak. Azonban cseppfolyós halmazállapotában igen különlegessé és érdekessé válhat a fiatalok számára. A folyékony nitrogén ezért a tudománynépszerűsítő kísérleti előadások egyik, szinte elhagyhatatlan kelléke, amelynek felhasználásával számos látványos és tanulságos kísérlet végezhető el. Cikkemben olyan, kevésbé közismert, cseppfolyós nitrogént alkalmazó kísérleteket mutatok be, amelyek igen hasznosnak bizonyultak a fizika iránti érdeklődés felkeltésére és a tudománynépszerűsítésre egyaránt. Az interneten – természetesen – e témában számos kísérletleírás és videó lelhető fel, néhány ajánlott weblap az irodalomban megtalálható [1, 2].

A biztonság

Cseppfolyós nitrogént alkalmazó kísérleteink során legfontosabb tényező a biztonság, ezért nagyon fontos fokozott óvatossággal kezelni ezt az anyagot. Az esetleges fröcsköléssel járó kísérletek során mindig viseljük védőszemüveget és megfelelő védőkesztyűt, valamint ügyeljünk arra, hogy pusztán kézzel ne érintsük meg a folyékony nitrogén hőmérsékletére hűtött kísérleti eszközeinket! A kísérleti bemutatókat csak jól szellőző helyen végezzük, és mindig tartsuk szem előtt a hallgatóság biztonságát!

Irodalom

14. Painting of Edouard Vuillard (1897) entitled 'The Ferryman' (Musée D'Orsay, Paris). [https://www.google.hu/search?q=Edouard+Vuillard+\(1897\):+The+Ferryman&client=firefox-b\&source=lnms\&tbn=isch\&sa=X\&ved=0ahUKEwj3Ma7xIJSAhXGiiwKHAdHD6MQ\AUICCgB\&biw=1024\&bih=644\#imgrc=VT3VBxnm8DRo6M](https://www.google.hu/search?q=Edouard+Vuillard+(1897):+The+Ferryman&client=firefox-b\&source=lnms\&tbn=isch\&sa=X\&ved=0ahUKEwj3Ma7xIJSAhXGiiwKHAdHD6MQ\AUICCgB\&biw=1024\&bih=644\#imgrc=VT3VBxnm8DRo6M)
15. Coulson K. L.: *Polarization and Intensity of Light in the Atmosphere*. Deepak Publishing (1988)
16. Horváth G., Barta A., Hegedüs R.: Chapter 18. Polarization of the sky. In: G. Horváth (editor): *Polarized Light and Polarization Vision in Animal Sciences*. Springer: Heidelberg, Berlin, New York (2014) 367–406.
17. Pye D.: *Polarised Light in Science and Nature*. Institute of Physics Publishing: Bristol, Philadelphia (2001)

Cseppfolyós nitrogén viselkedése szobahőmérsékletű környezetben

Normál légköri nyomáson a cseppfolyós nitrogén forráspontja $-195,8\text{ °C}$, ezért szobahőmérsékletű környezetben állandó forrásban van. Ezt a tulajdonságát egy üvegedénybe töltve mutathatjuk meg nagyobb közönségnek, azonban az egyszerű főzőpohár elpattanhat a hirtelen hőhatástól, illetve, amennyiben egyszerű üvegedényben tároljuk a folyékony nitrogént, akkor annak külső – immár hideg – falára a levegő páratartalma hamar kicsapódik, átlátszatlanná téve azt. A legjobb megoldás a duplafalú – falai között vákuumot tartalmazó – üvegedény (ez a Dewar-edény) alkalmazása, amelynek külső falára még cseppfolyós nitrogén tárolása mellett sem azonnal fagy ki a levegő páratartalma. Ezen edényben jól megfigyelhetjük a nitrogén



Medvegy Tibor a Pannon Egyetem Fizika és Mechatronika Intézetének oktatója. A Szegedi Tudományegyetemen 2010-ben szerzett fizikatanári diplomát, jelenleg az ELTE Fizika Tanítása Doktori Program doktorjelöltje. Kutatási területei a különleges anyagok és a multimédiás eszközök fizikaoktatásban való felhasználási lehetőségeinek vizsgálata, valamint az elektro- és magnetoreológiai folyadékok szenzor- és aktuátorteknikában való alkalmazási lehetőségeinek fejlesztése.

folyamatos forrását, valamint láthatjuk, hogy vízszere-
n átjáró és színtelen (1. ábra).

A szobahőmérsékleten tartott cseppfolyós nitrogén
folyamatos forrásával kapcsolatosan számos érdekes
kísérlet végezhető el.

- *Oxidáció és a nitrogén*

A nitrogén a levegőben molekuláris (N_2) alakban ta-
lálható, amelyben a két atomot háromszoros kovalens
kötés köt össze. Oxidáció szempontjából inert, nem
táplálja az égést. Egy nagyobb szájú, cseppfolyós ni-
trogént tartalmazó edénybe égő gyertyát eresztve be-
mutatható, hogy a folyamatos forrás során képződő
hideg – ezáltal normál légköri nyomáson sűrű – ni-
trogéngáz kitölti az edényt egészen annak szájáig, onnan
pedig a szájon átbukva lefelé süllyed. A sűrű ni-
trogéngáz kiszorítja az égéshez nélkülözhetetlen oxi-
gént, ezáltal a gyertya lángja az edény szájának vona-
lában azonnal kialszik.

- *Folyékony nitrogén forró vízbe öntve*

Cseppfolyós nitrogént alkalmazó kísérleteink során a
nitrogént tároló edényből kibugyogó „fehér füst” a
hallgatóság soraiban sokszor azt a tévképzetet kelti,
hogy ilyen esetben a nitrogéngázt látják. Természe-
tesen a gáz halmazállapotú nitrogén – csakúgy, mint a
levegő, amelynek nagy részét kiteszi – teljesen átlát-
szó. A megfigyelt fehér „füst” nem más, mint a levegő-
ből a hideg hatására kicsapódó pára. Ezt bemutathat-
juk például úgy, hogy az edénybe fújunk és ekkor –
úgy, mint télen – meglátszik a leheletünk kicsapódó
páratartalma. A másik lehetőség, hogy nagyobb meny-
nyiségű cseppfolyós nitrogént egy-két méter magas-
ságból egy lavórnyi forró vízbe öntünk. Ez felkavarja a
vizet és a hirtelen, nagy mennyiségben elforró ni-
trogén lehűti a forró víz fölötti levegőt, ezáltal egy na-
gyobb ködpamacst hoz létre.

- *Folyékony nitrogén mosogatószeres vízbe öntve*

Egy fél literes PET-palackban pár deciliternyi mosoga-
tószeres vizet készítsünk, majd egy kevés cseppfolyós
nitrogént öntsünk rá! Megfigyelhetjük, hogy a folyé-
kony nitrogén a víz felszínén marad, ugyanis sűrűsége
 $0,808 \text{ g/cm}^3$ – kisebb a vízénél. Enyhe rázás hatására a
víz felső rétege és a nitrogén összekeveredik, az utóbbi
heves buborékképződés közepette elforr. A nitrogén-
gáz felfújja a képződő buborékokat, így a hab a palack
összeszűkülő száján át akár több méterre is kilőhet.

- *Szappanbuborék-fújás*

Szappanos vagy mosogatószeres víz segítségével vé-
kony hártát vonhatunk egy edény szájára, amelybe
előzetesen vizet, majd arra pár csepp nitrogént töltöt-
tünk. Az elforró nitrogén felfújja a buborékot, aminek
belsejében a víz és a hideg nitrogéngáz miatt átlátszat-
lan köd jön létre (2. ábra). Igen látványos, ahogy a
buborék kipukkanásakor a köd még egy pillanatig
megtartja a formáját. Érdekes minél szélesebb szájú
edényt használni, illetve a mosogatószeres vízzel elő-
zetesen bekenni az edény száját. A kezdeti hártát



1. ábra. Cseppfolyós nitrogén Dewar-edényben.

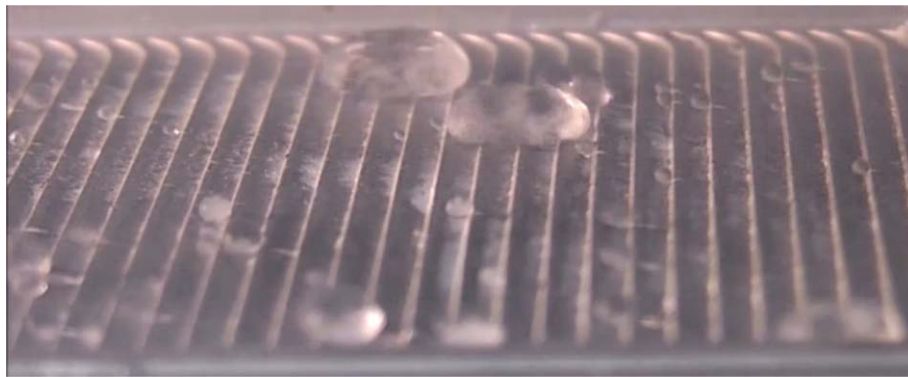
például egy hosszú, mosogatószeres vízbe mártott
szövetcsíkkal vihetjük fel.

- *Légágyú készítése*

Légágyú készítése házilag igen egyszerű, egy na-
gyobb tartályra, rugalmas oldalfalra és egy szűk, kör
keresztmetszetű nyílásra van szükségünk. E célra akár
egy 1,5 literes PET-palack is tökéletesen megfelel. A
palack oldalát picit összenyomva levegő áramlik ki az
üveg száján, és egy önmagába visszaforduló gyűrűt
képez, amely az edény szájára merőleges irányban
egyben maradva távolodik az „ágyútól”. Ezzel a mód-
szerrel távolról elfújható például egy gyertya lángja is.
A keletkező gyűrű szemléltetésére a palackba egy

2. ábra. Szappanbuborék-fújás nitrogénnel.





3. ábra. A „lépcsőmászó” nitrogéncseppek.

gén hirtelen, nagy nyomása ki-nyomja a vizet a palack száján, és a palack az előzőhöz hasonlóan elrepül. Amennyiben a palack száját a másik tenyerünkhöz szorítjuk, miközben fejfelé lefelé fordítjuk, a kilövés magassága növelhető.

- *Leidenfrost-effektus*
– a lépcsőn felfelé lépegető nitrogéncsepp

Egy megfelelően kialakított, fűrészfogminta profilú felüle-

teven a Leidenfrost-effektusnak köszönhetően a cseppek mindig egy bizonyos – a mintázat által meghatározott – irányba kezdenek gyorsulni. A jelenség hatására a cseppek pár fokos dőlésszögű lejtőn akár felfelé is képesek haladni [3]. A magyarázat a cseppekből távozó gázáram felület általi irányítottsága. A felület alakjának kialakítása következtében a gáz a csepp alól egy meghatározott irányba távozik, ezáltal azzal ellenkező irányban hajtva a cseppet (3. ábra).

ten a Leidenfrost-effektusnak köszönhetően a cseppek mindig egy bizonyos – a mintázat által meghatározott – irányba kezdenek gyorsulni. A jelenség hatására a cseppek pár fokos dőlésszögű lejtőn akár felfelé is képesek haladni [3]. A magyarázat a cseppekből távozó gázáram felület általi irányítottsága. A felület alakjának kialakítása következtében a gáz a csepp alól egy meghatározott irányba távozik, ezáltal azzal ellenkező irányban hajtva a cseppet (3. ábra).

- *Hosszú cső folyékony nitrogénbe merítése*

Egy hosszú, egyenes fémcsővet a cseppfolyós nitrogént tároló edényünkbe merítve (úgy, hogy az egyik vége még kilógjon abból) azt tapasztaljuk, hogy a nitrogén szökőkútszerűen fröcsköl ki a cső felső végén. A jelenség oka az, hogy a cső a nitrogénnel kontaktusba lépve azt azonnal intenzív forrásra készíti. A bemelegítéskor a csőbe kerülő folyékony nitrogént az alatta is képződő nitrogéngáz a cső felső vége felé hajtja, és ezért jön létre a nitrogén-szökőkút. Vigyázzunk, mindig viseljünk megfelelő védőfelszerelést, és sohase irányítsuk emberre a csövet!

- *Légpárnás kréta*

A kréta porózus szerkezete lehetővé teszi, hogy az előzetesen cseppfolyós nitrogénbe mártott kréta, a kivétel után sík felületre helyezve szinte teljesen sűrűlódásmentesen mozoghasson az adott felületen. Ennek oka, hogy a számos lyukon egyszerre kiáramló nitrogéngáz a kréta alatt légpárnát hoz létre. A kísérlet pezsgőtablettával is elvégezhető, azonban a tablettá tömörebb, ezért a hatás nem olyan tartós.

- *Rakétaépítés – vízzel, illetve nitrogénnel*

A cseppfolyós nitrogén remekül használható rakétaépítéshez is. Mindössze némi nitrogénre és egy PET-palackra lesz szükségünk. A kísérletet kétféle módon is elvégezhetjük. 1) Pár deciliter nitrogént töltünk a palackba, majd gumidugóval lezárjuk azt. A gumit a kezünkbe fogva a palackot fejfelé tartva a növekvő nyomás előbb-utóbb kilövi a rakétát a kezünkéből. A nyomás az edény száján át kinyomja a cseppfolyós nitrogént, így a lendületmegmaradás értelmében a palack az ellenkező irányba gyorsul. 2) Másik lehetséges elrendezésben a palackunkat harmadáig töltjük vízzel, majd egy kevés (körülbelül fél deciliter) nitrogént öntünk rá. A palackot megfordítva a vízzel keveredő, felforró nitro-

Gázok hűtése cseppfolyós nitrogénnel

Az itt következő kísérletek során a nitrogént, mint hűtőközeget alkalmazzuk, gázokat hűtünk le és azok viselkedését figyeljük meg.

- *Héliummal töltött lufi hűtése*

Egy héliummal töltött lufi hűtésével bemutatható, hogy a héliumos lufi nem minden körülmény között repül. A lufi rugalmas fala miatt a benne található gáz nitrogénnel való hűtése során is közel állandó, légköri nyomású marad, azonban sűrűsége eközben a többszörösére is nőhet. A lehűtő, ezáltal összezsugorodott és sűrű héliumgázzal teli lufi nem lebeg, azonban amint visszanyeri eredeti hőmérsékletét, lassan ismét kevésbé sűrűvé válik az őt körülvevő levegőnél és felszáll.

- *Lezárt alumíniumdoboz hűtése*

Üres, vékony falú alumíniumdobozt fejfelé egy gumilapra helyezve, majd a doboz alján lévő mélyedésbe cseppfolyós nitrogént öntve bemutatható, hogy a hűtés hatására lecsökkenő belső légnyomás miatt a külső légnyomás lassan összeroppantja a dobozt.

- *Főtt tojás bejuttatás szűk szájú lombikba*

Jól ismert kísérlet, hogy egy égő papírdarabot egy Er-lenmeyer-lombikba dobunk, majd a lombik szájára egy megpuccolt főtt tojást helyezünk. Az üvegben lévő meleg levegő a tűz kialvása után lehűl, nyomása lecsökken, ezért a szűk nyíláson át beszippantja a tojást. A kísérlet folyékony nitrogénnel is elvégezhető, ekkor a lombik szájára helyezzük a tojást, majd a lombikot nitrogénnel kezdjük hűteni. A végeredmény azonos.



4. ábra. „Emlékező műanyag” melegedése.

- *Fénycső hűtése*

A fénycsövek, illetve kompakt fénycsövek olyan higanygőzt tartalmazó gázkisülési csövek, amelyek a gázkisülés UV-sugárzását az üveg belső felületére felvitt fényporral látható fénnyé alakítják. A fénycsövek folyékony nitrogénbe merítésével elérhető, hogy a bennük lévő higanygőz az oldalfalakon kondenzálódva ne legyen képes részt venni a kisülésben, ezért a fénycső elhalványodik, illetve – az alacsonyabb nyomás miatt – a begyújtási idő is megnövekszik.

Hétköznapi anyagok a cseppfolyós nitrogén hőmérsékletén

A jól ismert kísérleteken túl, amelyekben például gumilabdát, vagy éppen virágot merítünk cseppfolyós nitrogénbe, számos más kísérletet is elvégezhetünk hétköznapi anyagainkkal ezen a hőmérsékleten.

- *Szappanbuborék fagyasztása*

Nagyon szép látványt nyújt, amikor egy szappanbuborék megfagy. A kísérlethez a buborékot nem szabad a folyékony nitrogénbe helyezni, hiszen ekkor azonnal kipukkan. Ellenben a cseppfolyós nitrogén fölött lévő hideg nitrogéngázzal könnyen lehűthetjük a buborékunkat. Problémát okozhat, hogy a zárt buborékban a levegő is lehűl, és ezáltal nyomása csökken. Ekkor a külső légnyomás összeroppantja a vékony jégbuborékot, de egy szívószállal kis nyílást – amelyen át kiegyenlíthető a nyomás – képezve elkerülhetjük ezt a hatást. Egy alul már megfagyott, de felül kipukkant buborék remek csónakot alkot. A ropant könnyű félgömb formájú jégbuborék a sűrű nitrogéngázon „úszni” képes.

- *Sejtmodell viselkedése*

Az emberi test fagyasztással való hibernálásakor a sejtek víztartalmának megfagyása során képződő jégkristályok szétroncsolják a sejteket. Ez a folyamat sajnos lehetetlenné teszi egy ilyen eljárás túlélését. Ezt a jelenséget egy modellkísérlettel mutathatjuk be. Töltünk kevés vizet egy lufiba, majd légmentesen zárjuk le. Lufinkat dobjuk cseppfolyós nitrogénbe, közben ügyeljünk arra, hogy a lufit a kísérlet teljes idejében ellepje a nitrogén (a víz magas fajhője miatt ilyenkor nagy mennyiségű nitrogén forr el, ezt a mennyiséget pótolnunk kell, hogy a nitrogén végig ellepje a lufit). Először a lufi, illetve a víz külső rétege fagy meg, ké-

sőbb a belső részek is megfagynak, ami a térfogat növekedésével jár. A lufi fagyott anyaga, illetve a külső jégburok egy idő után nem képes elviselni a fellépő mechanikai feszültséget, ezért szétptattan.

- *Világító rúd melegítése-hűtése*

Az úgynevezett világító rudakban, egy kémiai reakcióban (difenil-oxalát és hidrogén-peroxid) keletkező instabil molekula (1,2-dioxietán-dion) bomlásakor felszabaduló energiát a rúdban található festékmolekulák abszorbeálják, majd fény formájában emittálják. A reagensek egyike a rúd műanyag csövén belül egy üvegcsőben található, ennek eltörésével indulhat meg a reakció. A kémiai reakciók sebessége sok esetben erősen hőmérsékletfüggő, ezt mutathatjuk be azáltal, hogy egy világító rudat megtörünk, majd azt folyékony nitrogénnel hűtjük, illetve meleg vízzel melegítjük. A rúd fényereje függ a hőmérsékletétől.

- *Kén színváltása*

A kénnek számos allotróp módosulata ismert. Ezek egyike a cseppfolyós nitrogén segítségével bemutatható. A kén egy részét borítsuk ki egy tálcára, a másik részét pedig egy kémcsőben (ne zárjuk le!) hűtsük le. A kémcső tartalmát borítsuk a szobahőmérsékletű sárga színű kén mellé és hasonlítsuk össze színüket. A $-195,8$ °C hőmérsékletre hűtött kén fehér színű, azonban ahogyan melegszik, egyre inkább visszanyeri eredeti sárga színét.

- *Emlékező műanyag készítése*

Az alakemlékező anyagok működését könnyen bemutatathatjuk egy egyszerű befőttes gumival is, amennyiben deformált állapotban tartva cseppfolyós nitrogénnel hűtjük azt. Amíg a folyékony nitrogén hőmérsékletén van, a deformációja a kiváltó hatás elmúltával sem áll helyre, azonban amikor emeljük hőmérsékletét, visszanyeri eredeti formáját (4. ábra).

Fémek és félvezetők viselkedése a cseppfolyós nitrogén hőmérsékletén

A kísérletek következő témája a fémek és félvezetők viselkedése extrém hidegben. Az itt következő kísérletek során a nitrogént továbbra is hűtőközegként alkalmazzuk, fémeket és félvezető eszközöket hűtünk a folyékony nitrogén hőmérsékletére és megfigyeljük azok viselkedését.

- *Bimetall melegítése-hűtése*

A bimetallszalagok két különböző lineáris hőtágulási együtthatójú fémlemez összeszegecselésével állíthatók elő. Az azonos hosszúságú, különböző anyagi minőségű fémek melegítés hatására különböző mértékben tágnak, a szegecselés miatt a fémek egy körív formájában meghajlanak úgy, hogy a külső köríven az a fém helyezkedik el, amelyiknek nagyobb a lineáris hőtágulási együtthatója. Ez a kísérlet hűtéssel is megvalósítható, azonban ebben az esetben természetesen az ellenkező irányba görbül a bimetallszalag. Amennyiben a szalag egyik végét a hűtés után rögtön melegíteni kezdjük, akár S-alakban is meggörbíthetjük azt.

- *Gravesande-készülék hűtése*

A Gravesande-készülék egy fémgolyóból és egy vele azonos anyagi minőségű, a golyó átmérőjénél éppen egy picivel nagyobb belső átmérőjű gyűrűből áll. Azonos hőmérsékleten a golyó éppen átfér a gyűrűn, azonban a golyó melegítésekor annak anyaga csekély mértékben kitágul, így a lyukon már nem fér át. A gyűrű melegítésével, ha a két fém azonos hőmérsékletre kerül, immár ismét átfér a golyó. A kísérlet a fémek hűtésével is bemutatatható, a cseppfolyós nitrogénbe mártott gyűrűn – annak összehúzódása miatt – a szobahőmérsékletű golyó nem fér át, azonban a golyó hűtésével ismét visszaállnak a méretarányok. A golyó hűtésével és a gyűrű egyidejű melegítésével még nagyobbá tehetjük a méretkülönbségeket.

- *Hőkereszt hűtése*

A hőkeresztel az anyagok különböző hővezetési tényezőjét mutathatjuk be. A kereszt közepén elhelyezkedő csomópontból indulnak ki az egyenlő méretű, de különböző anyagú pálcák. A csomópontot melegítve azt tapasztalhatjuk, hogy a pálcák végére helyezett viaszgolyók egymás után leolvadnak. Természetesen a nagyobb hővezetési tényezőjű pálcáknál hamarabb, míg az alacsony hővezetési tényezőjű anyagúak esetén később következnek be. Ezt a kísérletet hűtéssel is elvégezhetjük, a csomópontra egy fémedényt helyezve, majd abba cseppfolyós nitrogént töltve hűthetjük a csomópontot. A pálcák végeire cseppentett egy-egy csepp víz megfagyása a pálcák hővezetési tényezőjének nagyság szerint csökkenő sorrendjében következik be.

- *Örvényáramok bemutatása – mágnes a rézcsőben*

Amennyiben egy függőlegesen álló nem ferromágneses vezető csővön – például réz- vagy alumíniumcsővön – egy erős mágnesrudat ejtünk keresztül, azt tapasztaljuk, hogy a csőhöz képest mozgó mágnes miatt örvényáramok indukálódnak mind a mágnes felett, mind alatta. Az örvényáramok iránya alul és felül ellentétes, ezek mágneses tere a Lentz-törvény értelmében alul taszító erőhatást fejt ki a mágnesre, felül pedig vonzó. Ennek következtében a nehézségi gyorsulás ellenében az örvényáramok lassítják a mágnes zuhanását. Mérjük meg a csővön való áthaladás idejét, majd hűtsük le a csövet folyékony nitrogén segítségével. A kísérletet megismételve azt tapasztal-

juk, hogy az áthaladási idő a többszörösére növekedett. A jelenség magyarázata, hogy a cső elektromos vezetőképessége a hőmérséklet-változás hatására lényegesen megnőtt, ezáltal ugyanaz a mágneses hatás erősebb örvényáramot képes indukálni a csőben.

- *Örvényáramok bemutatása – Lentz-ágyú*

Egy hosszú vasrúd egyik végére tekercset csévélve, majd a tekercsre váltakozó feszültséget kapcsolva úgynevezett Lentz-ágyúhoz juthatunk. A vasrúd szabad végére egy vezető anyagból készült gyűrűt húzunk, az elektromágnes bekapcsolásakor a rúdban hirtelen változó mágneses tér alakul ki, ennek hatására a gyűrűben örvényáram indukálódik. A gyűrűben folyó örvényáram mágneses tere és a rúd mágneses tere – a Lentz-törvény értelmében – taszítják egymást. Egy könnyebb gyűrű akár le is repülhet a rúdról. Figyeljük meg, hogy ágyúnk milyen magasra repíti a gyűrűt, majd a gyűrűt merítsük cseppfolyós nitrogénbe. A kísérletet ezután a hűtött gyűrűvel megismételve azt tapasztaljuk, hogy ágyúnk a gyűrűt többszörös magasságba képes fellőni. A kilövés magasságának növelését a tekercs hűtésével is elérhetjük.

- *Villanykörte izzószála folyékony nitrogénben*

Egy egyszerű villanykörte üvegburkolatát eltávolítva, majd izzószálát feszültség alá helyezve a szál pár pillanat alatt elég. A körtében eredetileg megtalálható védőgáz oxigénmentes volt, ezért az izzásban lévő szál oxigén hiányában nem oxidálódhatott, nem éghetett el. Ha az üvegburkolat nélküli izzószálát cseppfolyós nitrogénbe merítjük, és így helyezzük feszültség alá, a szál szépen világít (5. ábra). A cseppfolyós nitrogénben a védőgázéhoz hasonló oxigénmentes állapotban a szál sokkal tovább képes világítani. (Megjegyzem, hogy egy kevés oxigén mindig kondenzálódik a cseppfolyós nitrogénben, ezért percek után a szál mégiscsak eloxidál.) A világító izzószál a forrásban lévő nitrogénen belül igen látványos, érdemes elsötétítet-

5. ábra. Villanykörte izzószála cseppfolyós nitrogénben.



ni a termet, illetve duplafalú üvegedényben tárolt nitrogénben elvégezni a kísérletet.

- **Fényemittáló dióda hűtése**

Egy teljesen más elven működő világítótesttel szintén kísérletezhetünk. Vörös vagy narancssárga fényemittáló dióda a cseppfolyós nitrogénbe merítésekor – ha közben folyamatosan világít – megváltoztatja színét. Előbb sárgássá, majd zölddé válik a kibocsátott fény.

A jelenség magyarázata, hogy a félvezetők hűtésekor a tiltott sáv kissé kiszélesedik, ezáltal a kibocsátott fény hullámhossza csekély mértékben megnő (6. ábra) [4]. Az előző kísérlethez hasonlóan ezt is érdemes elsötétített teremben, illetve duplafalú üvegedényben tárolt nitrogénben elvégezni.



6. ábra. Narancssárga LED fényváltozása a hűtés során.



Gázok hűtése cseppfolyós nitrogénnel

Cseppfolyós nitrogén segítségével képesek vagyunk folyékony oxigént előállítani. A következő témánk a folyékony oxigén előállításával, és az azzal elvégezhető kísérletekkel foglalkozik.

- **Cseppfolyós oxigén előállítása**

Normál légköri nyomáson a cseppfolyós oxigén forráspontja $-182,95\text{ }^{\circ}\text{C}$, tehát csaknem $13\text{ }^{\circ}\text{C}$ -kal magasabb a nitrogén forráspontjánál. Egy, a cseppfolyós nitrogén hőmérsékletére hűtött felületen a levegő oxigénje ugyanúgy képes kondenzálódni, ahogy a vízpára kondenzálódik a fürdőszoba hűvös csempéjén a zuhanyozás után. Egy legömbölyített aljú fémedénybe (vagy például egy teáskannába) folyékony nitrogént töltve azt tapasztaljuk, hogy az edény külső felén folyadékréteg képződik, és lecsapog annak aljáról (7. ábra). Ezt a folyadékot egy kívülről hűtött edényben – például egy nitrogénnel teli pohárba állított kémcsőben – felfoghatjuk.

- **A folyékony oxigén paramágnesessége**

A cseppfolyós oxigén erősen paramágneses, relatív permeabilitása 1,0036 ezért a mágnes mindkét pólusa gyengén vonzza. Egy erős neodímium mágnesre, vagy két mágnespófa közé folyékony oxigént öntve e tulajdonsága bemutatható, hiszen az oxigéncsepp a mágnespófa között marad. A kísérletet nitrogénnel megismételve azt tapasztaljuk, hogy – az oxigénnel ellentétben – a nitrogén elfolyik a mágnespófa közül.

- **Égő anyag cseppfolyós oxigénbe merítése**

Amennyiben a már ismertetett módon sikerült pár köbcentiméternyi folyékony oxigént összegyűjteni, öntsük azt át egy előzetesen lehűtött fémedénybe, vagy olvasztótégelybe, majd dobjunk bele egy izzásban lévő fadarabkát. A fadarabot a Leidenfrost-effektus megvédi a gyors lehűléstől, a forrásban lévő oxigén pedig erősen táplálja a fadarab égését. Ezt a kísérletet is elsötétített teremben érdemes elvégezni.

- **Folyékony oxigénnel átitatott anyagok égése**

Ha a folyékony oxigénnel átitatott vattát meggyújtjuk, akkor az úgynevezett lőgyapothoz hasonlatos intenzitással ég el.

- **Acélgyapot égése oxigéndús környezetben**

A vékony acélszalakból álló acélgyapotot meggyújtva, majd azt cseppfolyós oxigént tartalmazó edénybe helyezve az acél olyan intenzitással ég el, hogy egy része megolvad. Vigyázzunk, ezt a kísérletet üvegedényben elvégezve, edényünk – a hősokk következtében – minden bizonnyal el fog pattanni!

Irodalom

1. Jefferson Lab – Frostbite Theater: <https://education.jlab.org/frost>
2. Cryofab – Fun with Liquid Nitrogen: <https://www.cryofab.com/news/cryogenic-links-round-up/fun-with-liquid-nitrogen-2016>
3. H. Linke és mtsai.: Self-Propelled Leidenfrost Droplets. *Physical Review Letters* (2006) 154502.
4. Ch. Kittel: *Introduction to Solid State Physics*. J. Wiley & Sons, New York (1986) 185.

7. ábra. Cseppfolyós oxigén kondenzációja.

