

FELSŐLÉGKÖRI ELEKTRO-OPTIKAI JELENSÉGEK A KÖZÉPISKOLÁBAN (kiegészítő tananyag)

Takátsné Lucz Ildikó

Budapest II. Kerületi Szabó Lőrinc Általános Iskola és Gimnázium,
ELTE Fizika Doktori Iskola Fizika Tanítása Program PhD hallgatója

A tananyag 10. évfolyamos középiskolás diákok tanításához készített, elsősorban tanároknak szóló segédanyag, elemi megközelítésben tárgyalja a felsőlégköri elektro-optikai jelenségeket. A korábbi évekhez képest az új Nemzeti alaptanterv által meghatározott fizika tantárgy kerettantervében a villámok és a villámvédelem kérdése hangsúlyosabbá vált. [1] A 10. osztályban külön témakör (Szikrák, villámok) foglalkozik a jelenséggel és a hozzá fűződő gyakorlati problémával. A kérdéskör tanítására vonatkozó javaslatokat [2] foglalja össze. A FEOE-k tárgyalására elsősorban e témakör keretein belül kínálkozik lehetőség, azt követően mikor a diákok már megismerkedtek az időben állandó elektromos mező fogalmaival, alapjelenségeivel.

A felsőlégköri elektro-optikai jelenségek vizsgálata túlmutat az alaptantervi követelményeken, így tanórai keretek között kiegészítő anyagként használható. Újszerűsége és látványossága miatt a tanulók fizika iránti érdeklődésének felkeltésére, fenntartására, napjaink tudományos kutatási módszereinek és eredményeinek népszerűsítésére kiválóan alkalmas. Feldolgozása szakkörök, témahetek keretében is történhet.

A diákok körében végzett előzetes felmérés és a tananyag három osztályban (84 fő) tanórai keretek között történt kipróbálása alapján megállapítható, hogy a tanulók nem rendelkeznek korábbi ismeretekkel az adott témakörben. A tudomány új kutatási területei, eredményei, a különböző autentikus internetes források lenyűgöző videófelvételei azonban még a fizika iránt kevésbé érdeklődők figyelmét is megragadták.

A felsőlégköri elektro-optikai jelenségek tárgyalása ismeretanyagában támaszkodik a földrajz és kémia tantárgyakban tanultakra, ezzel elősegíti a tantárgyi integráció megvalósítást és hozzájárul az egységes természettudományos gondolkodásmód kialakításához. A megtekintésre javasolt videók applikációval könnyen szerkeszthetővé tehető, adott pontban megállíthatók, kérdéseket fűzhetünk hozzá, így otthoni feldolgozásra is alkalmassá válnak. Ebben az esetben a tanóra már a látottak, hallottak megbeszélésével, magyarázatával és kiegészítésével indulhat.

A tananyag feldolgozásának mélységét a rendelkezésre álló időkeret, a tanulók előzetes ismeretei és a téma iránt tanúsított érdeklődése egyaránt befolyásolja.

A tananyaghoz készült melléklet tartalmazza a szemléltetésre ajánlott YouTube videók linkjeit, a szerző által a témához készített applikációk elérhetőségeit és az előzetes felmérés kérdéseit.

A tananyag elsősorban tanári háttéranyagként szolgál.

Ajánlott időkeret: 2 óra (2X45 perc)

Szükséges előismeretek:

- a Föld légkörével kapcsolatos alapismeretek
- elektromos állapot, kölcsönhatás töltések között
- elektromos mezőt jellemző fizikai mennyiségek
- elektromágneses hullám fogalma
- atomok, molekulák, ionok gerjesztése

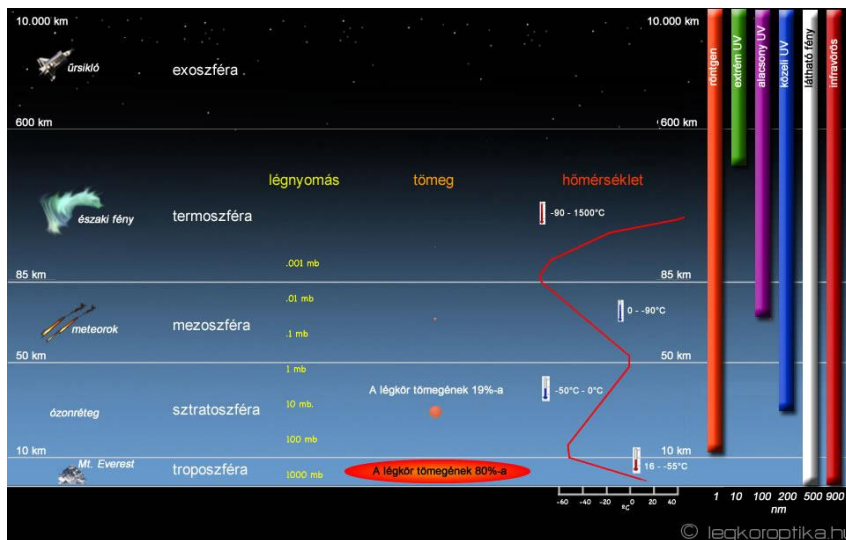
Felső légköri elektro-optikai jelenségek

A természettudományos szakirodalomban már a 19.sz.végétől említik a felső légkörben megjelenő csodálatos, ám titokzatos fényjelenségeket. Váratlan felvillanásuk és igen rövid élettartamuk miatt észlelésük nagy kiterjedésük ellenére korántsem egyszerű. Az 1990-es évektől kezdődően a nemzetközi szakirodalomban „tranzient luminous events”, azaz átmeneti fénytüneményként vagy röviden TLE néven említik őket. A magyar tudományos szóhasználatban a FEOE, vagyis **Felső légköri Elektro-Optikai Emissziók** összefoglaló név terjedt el. A továbbiakban ezeket a jelenségeket vizsgáljuk meg közelebbről.

A légkörnek a földfelszíntől 50 km-nél távolabb eső tartományát felső légkörnek nevezzük. Ha a hőmérsékleti profilt tekintjük, akkor a felső légkört a mezoszféra (50-85 km), a termoszféra (85-500 km) és az exoszféra (500-10000 km) alkotja. A földi légkörnek azonban ismert egy másik felosztása is, amely a mi esetünkben meghatározó szerepet játszik. Ez pedig nem más, mint a légkör vezetőképesség szerinti tagolása. Ebben az esetben megkülönböztetünk elektrosztatikai tartományt, ahol a levegő szigetelőként viselkedik; illetve olyan réteget, ahol a levegő vezetőképessége ugrásszerűen megnövekszik. Ez a tartomány az ionoszféra.

A légkör alsóbb régióiban a gázok semleges atomok vagy molekulák formájában fordulnak elő, ezért ott a levegő szigetelőként viselkedik. A felszín közelében, a földkéregben található radioaktív anyagok sugárzásának köszönhetően, a levegőben előfordulnak ugyan csekély számban szabad elektronok (1 cm³ levegőben 10 db szabad elektron), de ez önmagában még nagyon kevés ahhoz, hogy a levegő vezetővé váljék.

Az alábbi ábra a Föld légkörének rétegeztségét szemlélteti.



1. ábra A Föld légkörének rétegeztsége

(a kép forrása: <http://legkoroptika.hu/alegkorfelepitesi>)

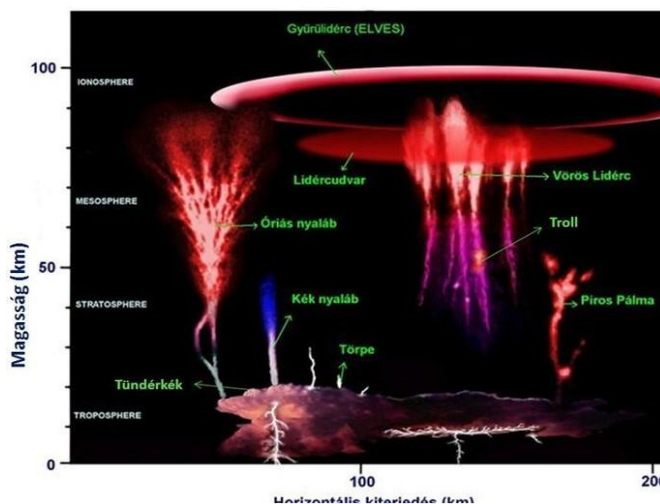
Az ábrán balról jobbra haladva légkör egyes rétegei láthatók a hozzájuk tartozó nyomás- és hőmérséklettartományokkal. Az ábra reprezentálja a légkör tömegének megoszlását a rétegek között, illetve mutatja, hogy a Napból érkező sugárzás a hullámhossz függvényében meddig hatol be a földi légkörbe.

Távolodva a felszíntől a légköri vezetőképesség alakulását a naptevékenységből származó töltött részecskék, valamint a kozmikus sugárzás is jelentősen befolyásolja. Ennek köszönhetően ugrásszerűen megnő a levegőben az ionok és a töltött részecskék száma, ami a vezetőképesség rohamos növekedéséhez vezet.

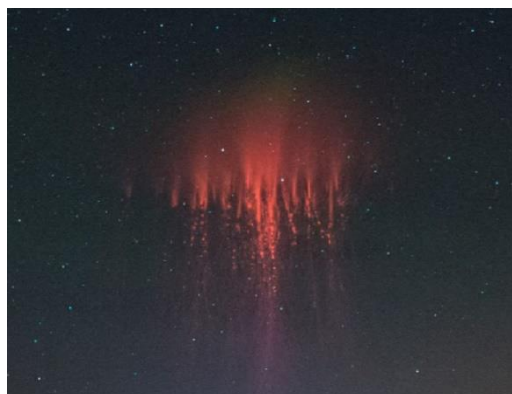
A felső légköri elektro-optikai emissziók, vagy röviden FEOE-k. a zivatarfelhők teteje és az ionoszféra alsó része között jönnek létre. Kialakulásukban meghatározó szerepe van a villámtevékenységek után a felhőkben maradó töltéseknek, illetve a zivatarfelhők töltésmegosztó hatásának.

A tudományos szakirodalomban már több, mint száz éve említést tesznek zivatarfelhők fölött megjelent vörös lidércről. A szemtanúk beszámolóí alapján az első feljegyzés 1885-ben született. A R.M.S Moselle kereskedelmi hajó legénysége észlelte a jelenséget, amikor hajójuk elhagyta a Jamaika partjainál fekvő Kingston kikötőjét.

A következő alkalommal, 1903-ban Calcutta közelében észleltek sárgás fényű, rakéta alakú, felfelé emelkedő kisüléseket. 1936-ban Angliában is megfigyeltek ilyen fénytüneményeket, sőt 1951-ben Malan és Schonland (villámok kutatásával foglalkozó tudósok) már kapcsolatot vélt felfedezni a pozitív lecsapó villámok és a felhőtető fölött létrejövő elektromos kisülések között. A zivatarfelhők fölött kialakuló elektromos optikai jelenségek tanulmányozásában és megértésében jelentős előrelépést a zseniális C.T.R. Wilson gondolatai jelentettek, aki 1925-ben megkísérelt magyarázatot adni ezekre a kisülésekre. Feltételezése szerint a villámkisülések alkalmával a leépülő felhődipólból elektromágneses sugárzás indul ki, amelynek elektromágneses tere kölcsönhatásba lép az ionoszféra alsó rétegével. Ismerve, hogy a levegő átütési szilárdsága a magassággal exponenciálisan csökken, elképzelhetőnek tartotta, hogy ezeket a gázkisülésekre emlékeztető jelenségeket a villám elektromos tere idézi elő. Mivel kézzel fogható bizonyítékok (fotók vagy videók), nem álltak rendelkezésre a FEOE-kal kapcsolatban, ezért a tudományos világ nem mutatott nagy érdeklődést irántuk. A II. Világháború után, mikor megélénkült a légi közlekedés, utasok és pilóták egyaránt egyre gyakrabban számoltak be csodálatos, változatos alakú fényjelenségről, amit ma vörös lidércnek nevezünk. A NASA űrsiklóinak is sikerült megörökítenie néhány ilyen eseményt. Így már valóban az érdeklődés középpontjába kerültek ezek a légköri jelenségek. 1989. július 6-án az



2. ábra **Felsőléggköri elektro-optikai emissziók**
(a kép forrása: Barta V.-Bór J.-Sátori G.:
Felső légköri elektro-optikai emissziók és megfigyelésük
Sopronból)



3. ábra **Medúza alakú vörös lidérc**
A kép forrása:
Harald Edens, Langmuir Laboratory for atmospheric
research

Észak-Amerikai Minnesota Egyetem kutatócsoportja (Winckler, Franz és Nemzek) lefényképezett egy akkor még ismeretlen, ma vörös lidérc néven emlegetett jelenséget. A vörös lidérc (red sprite), akárcsak a gyűrűlidérc (elve) elnevezés W. Lyonstól származik. (Annak ellenére, hogy e szavaknak köznapi jelentése is van, mindkettő betűszó, a „sprite” a **S**tratospheric/**M**esospheric **P**erturbations **R**esulting from **I**ntense **T**hunderstorm **E**lectrification, és az „elve” az **E**missions of **L**ight and **V**LF perturbations from **E**MP events elnevezésből ered.) Walter Lyons a Colorado FMA Kutatóközpont meteorológusa, meteorológiai szempontból vizsgálta ezeket a pillanatszerű felvillanásokat, és 1993 óta készít videó-felvételeket róluk. A kutatómunkában Lee Marshall elektromérnök volt a társa, aki a jelenséghez kapcsolódó elektromágneses hullámok grafikus megjelenítésén dolgozott, sőt ő volt az, aki először rögzítette a sprite-ok és az elve-k „hangját” is.

E rövid történeti bevezető után vegyük sorra ezeket a pillanatszerű, a fényképeken is szemet gyönyörködtető elektromos kisüléseket.

A **vörös lidércek** (red sprites) 50-90 km magasságban, többségében szárazföldek fölött, aktív zivataros területeken fordulnak elő. Ritkábban óceánok és tengerek felett is észleltek vörös lidérceket. Élettartamuk 5-300 ms között változik, átlagosan 98 ms. Általában pozitív felhő-föld villámkisülések után, önállóan vagy csoportosan figyelhetők meg. Mind vízszintes mind függőleges kiterjedésük elérheti akár az 50 km-t is. Alakjuk rendkívül változatos, lefelé és felfelé is terjednek. A lefelé nyúló ágakon időnként fényesebb részek is láthatók, amelyek felfelé mozognak. Ezeket nevezzük trolloknak. A lidércek „feje” vörös, a lefelé nyúló ágakban egyre több kék jelenik meg. Ez az 50 km fölötti tartományban N_2 molekulák, míg az 50 km alattiban a N_2^+ ionok gerjesztésével magyarázható, a színüket a légköri nyomás is befolyásolja. Ennek köszönhetően a vörös lidércek a felső rétegben legintenzívebben a 600-800 nm, míg az alsóban a 450 nm alatti tartományban sugároznak.

Hogyan jönnek létre a vörös lidércek?

A folyamat megértéséhez előbb vizsgáljuk meg a zivatarfelhő töltéseloszlását!

A zivatarfelhőben a jégreszecskek ütközéseik során aprózódnak és töltést nyernek. A folyamat nagyon összetett, több részlete még nem teljesen tisztázott. Az azonban már ismert tény, hogy a részecskek töltésének kialakulása hőmérsékletfüggő. A felhő magasabb régiójában, ahol a hőmérséklet -15°C -nál alacsonyabb, az apróbb részecskek pozitív, míg a nagyobb, nehezebb részecskek negatív töltésűekké válnak. A kisebb, könnyebb részecskéket a felhőben uralkodó légáramlat magával ragadja, és felhőtető felé szállítja. A nehezebb részecskéket lefelé, a felhő közepe felé esnek. A felhő alsó részében, ahol ettől magasabb a hőmérséklet, ott a folyamat ellentétesen zajlik. A nagyobb részecskéket lesznek pozitív töltésűek és a felhő alsó rétege felé esnek, míg a kisebbek negatív töltésűvé válnak és a felhő

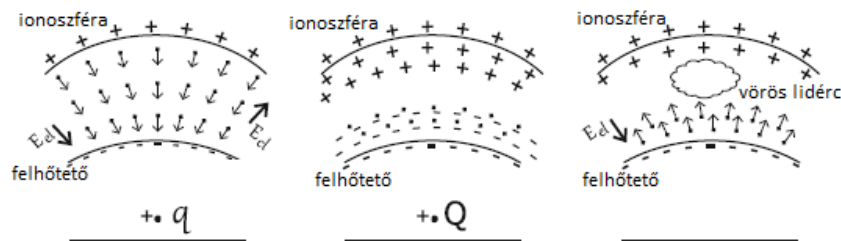


4. ábra A zivatarfelhő töltéseloszlása

A kép forrása:

<https://bit.ly/3eT1gkG>

közepe felé áramlanak. Így jön létre a zivatarfelhő tripólusú töltéeloszlása, amelyet az ábra is szemléltet. Mivel a felhőtető pozitív töltésű ezért a felhő fölötti tartományban olyan elektromos mezőt hoz létre, melynek térerősség vektora felfelé mutat (E_{Cl}). Ez az elektromos mező az ionoszféra alsó része és a felhőtető közötti térrészben található szabad elektronokat lefelé, míg a pozitív töltésű ionokat az ionoszféra felé gyorsítja. Az így létrejött elektromos mező (E_{El}) ellentétes irányú a felhő által létrehozottal. A folyamat addig zajlik, amíg a két elektromos mező ki nem egyenlíti egymást. Eredményeképpen pedig a felhőtető felé vándorló elektronok a felhő tetején vékony negatív réteget hoznak létre. Villámláskor a zivatarfelhő töltésének legnagyobb részét elveszíti, ezért E_{Cl} jelentősen lecsökken, esetleg zérussá is válhat. Így az E_{El} hatására a szabad elektronok a felhő tetejéről az eredeti helyük felé mozognak. Útjuk során a levegő molekuláit ionizálják vagy ionjait gerjesztik és ennek köszönhető a vörös lidérc néven ismert fényjelenség.



5. ábra A vörös lidérc kialakulása
(a kép forrása: V. Cooray *An introduction to lightning*)

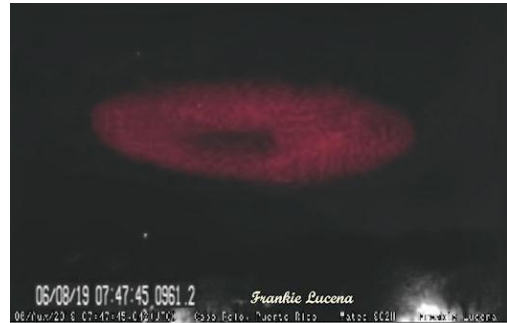
Általában csak nagyon erős villámlás okozhat vörös lidérc felvillanásokat a felső légkörben. Ennek az oka az, hogy csak az erős villámlások tudnak nagy mennyiségű töltést eltávolítani a felhőből.

Mi okozza a lidércnek lenyúló ágait?

A villámlás által keltett elektromos mező térerőssége nem csak a földfelszíntől való távolságtól, hanem a villámban szállított töltésmennyiségtől is függ. A térerősség különböző töltésmennyiségek esetén más-más magasságban éri el a kritikus értéket és ennek köszönhetően más magasságokban eredményeznek kisüléseket. Így keletkeznek a vörös lidércnek lenyúló ágai. Nagyon intenzív vörös lidérc kisülést követően másodlagos kisüléseket is észleltek már a kutatók. Ezek kis időeltolódással jelentek meg a vörös lidérc fölött és zöld színben pompáztak. Színük a légkörben található oxigén gerjesztett állapotára utal. Nevüket is innét kapták **Green emissions from excited Oxygen in Sprite Tops** vagy röviden **GHOST**.

A lidércudvarok (sprite halok) 70-85 km magasságban megjelenő, korong alakú jelenségek. Óceánok és tengerek felett gyakrabban fordulnak elő, mint szárazföldek fölött. Pozitív és negatív villámkisülések alkalmával is megjelenhetnek. Érdekességként érdemes megemlíteni, hogy a haló középpontja egybeesik az öt kiváltó villám helyzetével. A vörös lidércnekhez hasonlóan legintenzívebben a 600-800 nm tartományban sugároznak. A haló kiterjedése függőlegesen kb. 10 km, vízszintesen akár 100 km is lehet. Megfigyelésüket nehezíti a nagyon rövid élettartamuk, mindössze kb. 1 ms-ig észlelhetők.

A **gyűrűlidércek (elvek)** a legrövidebb életűek, ugyanakkor a leggyakoribb FEOE típus alkotják. Élettartamuk kevesebb, mint 1 ms. Előfordulásuk gyakorisága átlagosan, globálisan 35-70 esemény/perc. (összehasonlításképpen a vörös lidércek előfordulásának gyakorisága átlagosan, globálisan: 0,5-1 esemény/perc, míg a halóké: 4 esemény/perc). A gyűrűlidércek 75-105 km magasságban, pozitív vagy negatív felhő-föld villám fölött egyaránt kialakulhatnak. Gyűrű alakú kisülések, melyeknek átmérője a kiváltó villámok intenzitásától függ, kb. 100-700 km között változik.



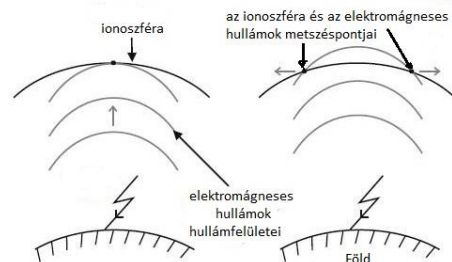
6. ábra **Gyűrűlidérc**

A kép forrása:

Frankie Lucena Spaceweather.com

Miért gyűrű alakú a gyűrűlidérc?

A villámlásról tudjuk, hogy a tér minden irányába fénysebességgel terjedő elektromágneses hullámokat kelt. Továbbá az is ismert, hogy az elektromágneses hullámok vezető közeggel való kölcsönhatásának következtében a vezető közegben áram indukálódik. Ez történik akkor is, amikor a villámlás hatására kialakuló elektromágneses hullámok eléri a 60-90 km magasságban lévő ionoszférát. Az elektromágneses hullámok a villámlásból kiindulva gömbhullámként terjednek. Az ionoszféra eléréséig megtett útjuk hossza függ attól, hogy a villámlás mely pontjából indulnak ki és milyen irányból érkeznek. Az ábra azt az esetet mutatja, amikor ez a megtett út a legrövidebb. Ekkor az elektromágneses hullámok az ionoszférával először közvetlenül a villámlás lecsapási helye fölött találkoznak. Az elektromágneses hullámok és az ionoszféra kölcsönhatása miatt az ionoszférában áram indukálódik. Az elektromos áram az elektronok rendezett mozgása. Ezek az elektronok mozgásuk során ütköznek a levegőben található nitrogén- és oxigén atomokkal. Az ütközések egy része ionizációhoz vezet, másik része pedig ezeket az atomokat gerjeszti. A gerjesztett állapotból az alapállapotba való visszatérés fénykibocsátással jár./eredményez. Az elektromágneses mező az ionoszféra egyre távolabb eső részeivel is kölcsönhatásba lép, így a fényjelenség messzebb lévő területekre is kiterjed. Ezt a mindössze kb. 1 ms-ig tartó fényjelenséget láthatjuk gyűrűlidércként.



7. ábra

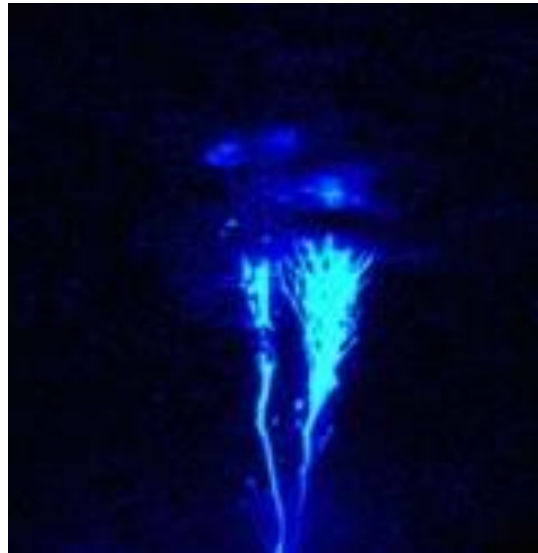
A villámlásból kiinduló elektromágneses hullámok és az ionoszféra találkozása

(az eredeti kép forrása:

V.Coaray An introduction to lightning)

A **kék nyalábok (blue starters, blue jets)** közös jellemzője, hogy megjelenésük nem köthető egyedi villámtevékenységhez, kialakulásukban a töltésszétválasztó folyamatok a meghatározóak. A töltésszétválasztás határozza meg azt, hogy az adott nyaláb milyen magasra tud emelkedni, továbbá a színük árnyalatát is. A világosabb nyalábok esetén intenzívebb a

töltésszétválasztás. A kék nyalábok a zivatarfelhő szűk tartományából, a felhő tetejéről (kb. 15-18 km magasról) indulnak ki és legfeljebb kb 40 km-t emelkednek felfelé, az ionoszféra felé. Emelkedési sebességük kb. 10^5 m/s. A 10 km-nél kisebb hosszúságú kék nyalábokat, kis kék nyaláboknak (blue starters), míg az ennél hosszabbakat egészen a 40 km-es hosszúig közönséges kék nyaláboknak (blue jet) nevezzük. A nyalábok általában ferde helyzetűek, végük tölcsérszerűen kiszélesedik és elhalványodik. Átlagos élettartamuk 200-300 ms Kék színüket annak köszönhetik, hogy a felhő tetejéből felfelé induló pozitív elővillámban a szabad elektronok a N_2^+ ionokat gerjesztik.



8. ábra **Kék nyaláb**

A kép forrása: <https://bit.ly/2Jf9m85>

A trópusi **óriás nyalábok (gigantic jets)** megjelenésükben a kék nyalábokhoz hasonlóak, de a felhő tetejétől egészen az ionoszféráig nyúlnak. Emelkedési sebességük szintén 10^5 m/s nagyságrendbe esik. Míg a kék nyalábok pozitív töltésűek, így pozitív töltést szállítanak a felső légkör felé, ezzel szemben az óriás nyalábok negatív töltésű kisülések. Ezeket nem felhő–föld villám váltja ki. Számos elmélet létezik, amely ezeknek a kisüléseknek a természetét magyarázza. A legújabb modellek szerint az óriás nyalábok akkor jönnek létre, amikor a zivatarfelhő felső pozitív töltéscentrumának vonzó hatására a középen elhelyezkedő negatív tartományból töltések szakadnak ki és indulnak el felfelé, a pozitív tartomány felé. A kiszabaduló töltések először semlegesítik a felhő felettük elhelyezkedő pozitív részét, majd áttörik a teljes tartományt és a felhőtető fölé magasodnak. Ahhoz, hogy ez bekövetkezhesen a kiindulási negatív centrumban a töltéssűrűségnek sokkal nagyobbak kell lenni, mint az ellentétes töltésű pozitív tartományban.

Az óriás nyalábok megfigyelése különös eseménynek számít, mert a kialakulásukhoz szükséges feltételek a természetben csak nagyon ritkán adóttak. Az óriás nyalábok jellemzően negatív töltést szállítanak az ionoszféra felé, ennek ellenére 2010. aug. 12-én a kínai Sárga folyó fölött kialakult viharban a becslések szerint 89 km magasságig emelkedő, pozitív töltésű óriás nyalábot észleltek. A kutatók elemezték a vihar meteorológiai paramétereit. Megállapították,



9. ábra **Az óriás nyaláb kialakulása**

A kép forrása:

Dr. Tony Phillips: *Close Encounter with a Gigantic Jet*

hogy tipikus nyári viharról volt szó, ezért még keresik a rendellenes viselkedés magyarázatát. Az óriás nyalábok különlegessége, hogy úgy látszik, mintha a felhőtetőből indulnának ki (valójában nehezen megfigyelhető magjuk ez alatt található) a nyaláb tetőhöz közeli részbe fehér, majd kékre vált, elérve a kb. 80 km-es magasságot a teteje vörös lesz, akárcsak egy vörös lidérc (10. ábra).

Az óriás nyalábról először az Arecibo Observatory kutatói készítettek felvételt az óceán fölött kialakult viharban. A jelenség mindössze 1 s-ig tartott és kb. 50 000 m/s sebességgel tört a magasba. Elérve a 160 000-270 000 m/s-os sebességet két ágra osztódott, majd tovább emelkedett az ionoszféráig kb. 2 000 000 m/s sebességgel, ahol rendkívül fényes jelenség formájában széteszlott. Ezt követően 2002 júliusában Tajvanon (szintén tenger felett), 2010-ben Kínában egy szárazföldi vihar alkalmával, majd 2014-ben Argentína Entre Rios tartományában észleltek hasonló jelenségeket. 2016-ban, a véletlennek köszönhetően, egy kínai fotós a Perzsa meteorák fényképezése közben készített nagylátószögű képet egy óriás nyalábról. Az óriás nyalábok kutatásában az áttörést Chris Holmes repülőgép-pilóta videó felvételei jelentik. 2019. 10.25-én a Mexikói öböl (Yucatan félsziget) fölött repült 10700 m magasságban, amikor egy szupercellában kialakuló villámtevékenységről készített felvételeket. A videóban rengeteg vörös lidércet és a felhőtető fölé emelkedő nyalábot örökített meg. A felvétel pillanatképei alapján a kutatók nyomon követhették az óriás nyalábok kialakulásának folyamatát. Eszerint a nyalábokban először a viszonylag hidegebb kék szálak emelkednek fel, majd a felhőtetőből kiindul egy sokkal lassabban mozgó, fehér, forró vezetési csatorna. Holmes felvételei alapján egyértelműen megállapítható, hogy az óriás nyalábok még azelőtt eléri az ionoszférát mielőtt ez a villámcsatorna elhagyja a felhőtetőt. Ebből a kutatók arra következtettek, hogy a zivatarban sokkal erősebb elektromos mező alakulhat ki, mint azt valaha is feltételezték. Az óriás nyalábokkal kapcsolatban még számos nyitott kérdés vár válaszra.

Egyéb felső légköri kisülések: Tündérek (Pixies) Trollok (Trolls) és Törpék (Gnomes)

https://www.youtube.com/watch?v=nN2ohgVHpDI&ab_channel=PaulMSmith

Élettartamuk néhány 100 ms. A Tündérek (Pixies) csoportosan előforduló, mozdulatlan felfénylések a 15-18 km magasságban lévő felhőtetőn. Nevüket onnét kapták, hogy a fotókon mindössze 1-1 pixel felvillanását okozzák.



A Trollok (Transient Red Optical Luminous Lineament), 60-70 km magasságban figyelhetők meg, a vörös lidércek lenyúló ágain haladnak felfelé kb.150 km/s sebességgel.

A Törpék (Gnomes) a zivatarfelhő üllő alakú tetejéről felfelé mutató, apró, rendkívül fényes, túske formájú kisülések. Csak néhány mikrosekundumig tartanak, legfeljebb 200 m szélesek, és 1 km hosszúak. Színük nem ismert, mivel eddig csak fekete-fehér felvételeken figyelték meg őket.

IRODALOMJEGYZÉK:

- [1] Magyar Közlöny **2020. január 31. 17. száma p 382-391**
<https://magyarkozlony.hu/dokumentumok/3288b6548a740b9c8daf918a399a0bed1985db0f/megtekintes> (2021.01.06.20:23)
- [2] Takátsné Lucz I., Tasnádi P., Villámok az új Nemzeti alaptanterv tükrében, Fizikai Szemle, 2021, elfogadva, megjelenés alatt
- [3] Toynbee, H., and T. Mackenzie, Meteorological phenomena, Nature, 33, 245, 1886.
- [4] Carrie Herzog, Sprites and Elves in the Atmosphere , <https://bit.ly/2TeDntZ> (2020.05.18.)
- [5] Vernon Cooray, An introduction to lightning, Springer, 2015, pages 349-358
- [6] P. Tasnádi, J. Illy, Víz a légkörben és a talajban, Kézirat
- [7] Oscar A. van der Velde 1, Joan Montanyà1, Jesús A. López1 & Steven A. Cummer 2, Gigantic jet discharges evolve stepwise through the middle atmosphere NATURE COMMUNICATIONS | (2019) 10:4350 | <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12261-y> | www.nature.com/naturecommunications
- [8] Craig J. Rodger, Red sprites, upward lightning, and VLF Reviews of Geophysics 37 , 3 / August 1999, pages 317-336
- [9] Bór József Villámkiszülésekhez társuló felsőlégköri elektro-optikai emissziók és Schumann-rezonancia tranziensek vizsgálata, 2010
- [10] Dr. Tony Phillips: Close Encounter with a Gigantic Jet <https://bit.ly/2AFUzCt> (2020.05.18)

MELLÉKLET:

ajánlott videók:

https://www.youtube.com/watch?v=zaA8nT4qqM8&ab_channel=SciNews

FEOE-k

<https://www.youtube.com/watch?v=ATmpgZoMRM0>

vörös lidércek és halók

https://www.youtube.com/watch?v=rBgNwoMQpQQ&ab_channel=FrankieLucena

kék nyalábok és óriás nyalábok

https://www.youtube.com/watch?v=ZMc0_k6CKd0&ab_channel=FrankieLucena

óriás nyalábok

https://www.youtube.com/watch?v=zLYPKuoxH1c&ab_channel=WilliamNguyen-Phuoc

kék nyalábok (lassított felvétel)

https://www.youtube.com/watch?v=nN2ohgVHpDI&ab_channel=PaulMSmith

törpék és tündérek

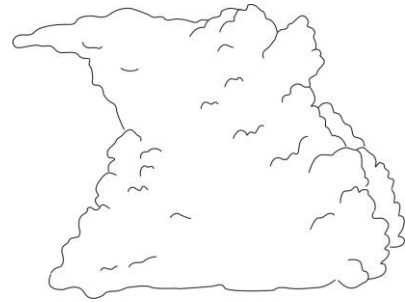
játékos applikációk:

<https://learningapps.org/display?v=pc8wiufj520> – kép és leírás párosítása

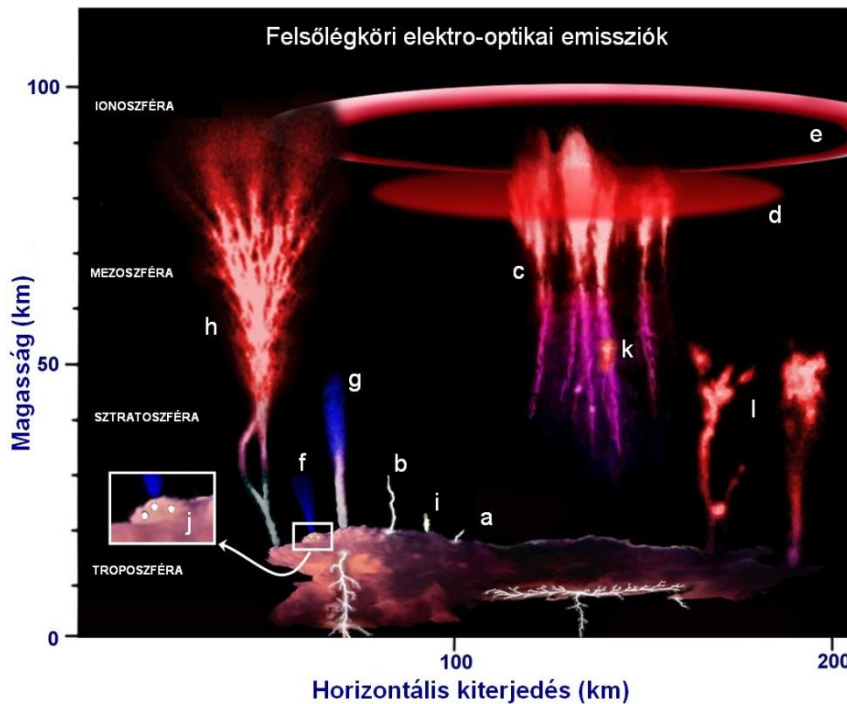
<https://learningapps.org/display?v=phnonjydt20> - keresztrejtvény

Előzetes kérdőív:

- Hogyan nevezzük a légkör legnagyobb vezetőképességű rétegét?
.....
- Jelöld a rajzon a zivatarfelhő töltéseloszlását!



- Tudod-e, mit nevezünk felső légkörnek?
.....
- Hallottad-e a FEOE elnevezést? Ha igen, mit jelent ez a mozaikszó?
.....
- Tudod-e, ki volt az a skót Nobel-díjas fizikus, aki a légköri elektromos kisüléseket vizsgálva megjósolta a felső légkörben a viharfelhők fölött létrejövő káprázatos jelenségeket?
.....
- Szerinted mi lehet az oka annak, hogy csak 1989-ben fedezték fel ezeket a jelenségeket?
.....
.....
- Az űrhajósok és a repülőgép-pilóták a felső légkörben kiterjedt fénytűneményeket észleltek. Hallottál róluk? Nevez meg néhányat!



a.)	
b.)	
c.)	
d.)	
e.)	
f.)	
g.)	
h.)	
i.)	
j.)	
k.)	
l.)	

- Szerinted mi okozza a vörös lidércek vörös, illetve a kék nyálábok kék színét?
.....
.....