

# A JÉGRÉSZECSKÉK SZEREPE A NEM-INDUKTÍV TÖLTÉSSZÉTVÁLASZTÁSI FOLYAMATOKBAN

## THE ROLE OF THE ICE PARTICLES IN THE NON-INDUCTIVE CHARGE SEPARATION PROCESSES

Kordás Nóra, Ács Ferenc

OMSZ Marcell György Főobszervatórium, 1675 Budapest, Pf. 39., [kordas.n@met.hu](mailto:kordas.n@met.hu)  
ELTE Meteorológiai Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A., [acs@caesar.elte.hu](mailto:acs@caesar.elte.hu)

**Összefoglalás.** Az ún. nem-induktív töltésszétválasztási elmélet a zivatarfelhők töltésszerkezetének és elektromos jelenségeinek kialakulását értelmezi. Az elmélet szerint a töltésszétválasztási folyamatokban a víz fázisátalakulásai, a jégrézecskek zúzmarsodása és olvadása, valamint ütközéseik akár közvetve, akár közvetlenül meghatározó folyamatok (Saunders, 2008). Kiemelendő, hogy e folyamatok skálartartománya széles határok között változik: a molekuláris méretektől ( $10^{-10}$  m) a felhőelemek tipikus méretéig ( $10^{-5}$ – $10^{-4}$  m). Az elmélet megismerésével meggyőződhetünk arról is, hogy a víz s a jég a tűz teremtői.

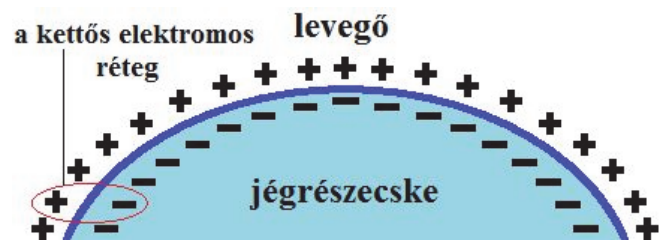
**Abstract.** The non-inductive charge separation theory explains the charge structure and the formation of electrical phenomena of the thunderstorms. In charge separation processes, the phase transitions of water, the accretion and melting of ice particles as well as their collisions are important processes either directly or indirectly (Saunders, 2008). It's to be highlighted, the scale of these processes changes between the molecular scale ( $10^{-10}$  m) and the typical cloud particle scale ( $10^{-5}$ – $10^{-4}$  m). By knowing the theory, it is ascertained that water and ice are the makers of fire.

**Bevezetés** A felhők töltésszerkezete és elektromos folyamatai a meteorológia egyik legismeretlenebb témaköre (Yair *et al.*, 2008). Ennek több oka van, de az egyik alapvető ok az, hogy a termodinamikai meghajtású időjárás és éghajlat függetleneknek tekinthetők a légkör elektromos folyamataitól. Mindezek ellenére a témakör népszerűsége markánsan nő (Yair *et al.*, 2008). A töltésszétválasztási folyamatok elmélete kitüntetett szereppel rendelkezik (MacGorman and Rust, 1998). Mi a nem-induktív típusú töltésszétválasztási folyamatokra összpontosítunk, első sorban azért, mert – a Saunders (2008) tanulmányából is látható módon – az itt lelhető ismeretanyag manapság már óriásira duzzadt. Célunk egy olyan áttekintés bemutatása, melyben a jégrézecskek szerepére világítunk rá a molekuláris méretektől ( $10^{-10}$  m) a felhőelemek tipikus méretéig ( $10^{-5}$ – $10^{-4}$  m) terjedően.

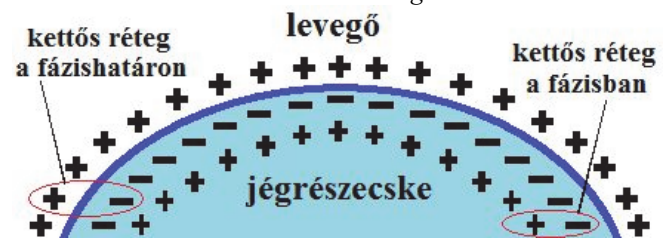
**A fázisátalakulásokkal kapcsolatos molekuláris skálájú töltésszétválasztási folyamatok.** A zivatarfelhőkben a víz több fázisban is megtalálható: a vízgőzmolekulák rendezetlenül mozognak, míg a hidrogénkötéssel egymáshoz kapcsolódó  $H_2O$  molekulák vagy vízcseppeket, vagy jégkristályokat alkotnak. Az egyszerűség kedvéért vizsgáljunk először egy jégrézecskest, melyet levegő vesz körül. A felszínén negatív töltésű  $OH^-$  ionok helyezkednek el (ennek okát a későbbiekben megmagyarázzuk), ahogyan ez az 1. ábrán is látható. A jégrézecske felszínén levő negatív töltések ionizálják a környező levegőt. A negatív töltések közti taszítóerő hatására a negatív ionok (anionok) a jégrézecskestől távol kerülnek, mialatt az ellentétes töltések közti vonzóerő hatására a pozitív kationok pozitív töltésű réteget képeznek a jégrézecske körül. Így alakul ki a jégrézecske-levegő határfelületen az ún. kettős elektromos réteg (www.silver-colloids.com).

Mint láthattuk, ha a jégrézecskek felszínén például negatív töltések vannak, akkor a jégrézecske-levegő határfelületen kettős elektromos réteg alakulhat ki. A fő kérdés a továbbiakban az, hogy mely folyamatok hatására kerülnek negatív (ritkább esetben pozitív) töltések a jégrézecskek felszínére. A nem-induktív elmélet értelmében, a zivatarfelhőkben zajló töltésszétválasztási folyamatokhoz általában fázisátalakulások szükségesek. A depozíció, a fagyás és a kondenzáció exoterm, azaz hő-

felszabadulással járó kémiai folyamatok. Mindhárom fázisváltozás következtében negatív töltések helyezkednek el a jégrézecskek (ill. kondenzáció esetén a vízcseppek) felszínén, valamint kettős elektromos réteg alakul ki ezen hidrometeorok felszíne alatt. Vizsgáljuk részletesebben a depozíció esetén bekövetkező töltésszétválasztási folyamatokat. Depozíció során vízgőzmolekulák épülnek be a jégrézecskek kristályrácsába s eközben a vízgőzmolekulák mozgási energiájának egy része hővé alakul. A felszabaduló látens hő hatására a jégrézecskek egyes hidrogén kötése felszakadnak. Egy-



1. ábra. A jégrézecske-levegő határfelületen kialakuló kettős elektromos réteg



2. ábra. A jégrézecske belsejében és a közvetlen környezetében kialakuló töltésseloszlás

szeresen pozitív töltésű  $H^+$  és egyszerűen negatív töltésű  $OH^-$  ionok keletkeznek. A pozitív ionok mozgékonyabbak, így a jégrézecske belseje felé diffundálnak a látens hő felszabadulással járó hőmérsékleti gradiens hatására, míg az  $OH^-$  ionokat a jégrézecske felszínén tartják a megmaradó kémiai kötéseik (Dash *et al.*, 2001). Mindezek a 2. ábrán is látható töltésseloszlást eredményezik a jégrézecskekben. A szublimáció, az olvadás és a párolgás endoterm, azaz hőelvonással járó kémiai folyamatok. Ezen fázisátalakulások is töltésszétválasztást okoznak. Azonban az exoterm folyamatoktól eltérően a jégrézecskek (ill. ritkább esetben a vízcseppek) felszí-

nén pozitív töltések is előfordulnak, s így a negatív töltések nem kerülnek túlsúlyba.

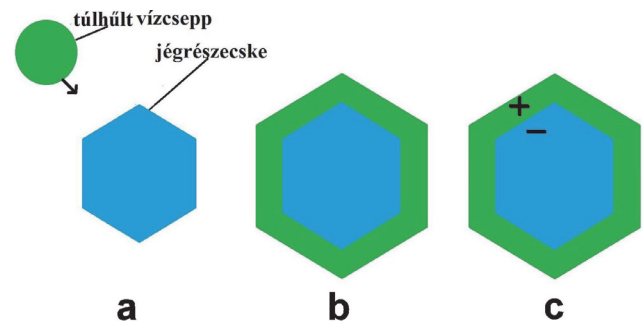
**A hidrometeorokkal kapcsolatos töltésszétválasztási folyamatok.** A jégreszcsékék zúzmarásodásának és olvadásának tipikus skálatartománya  $10^{-6}$ – $10^{-3}$  m. A fázisátalakulások molekuláris skálájúak, hozzájuk képest e skálatartomány makroszkopikusnak tekinthető, annak ellenére, hogy a felhőfizikában a felhőelemekkel kapcsolatos folyamatokat mikrofizikai folyamatoknak nevezük. Ez alapján a továbbiakban a zúzmarásodás és a jégreszcsékék olvadásának hatására bekövetkező töltésszétválasztási folyamatokat is makroskálájú töltésszétválasztási folyamatoknak tekinthetők. Zúzmarásodás során a jégreszecske túlhűlt vízcseppel ütközik, majd a túlhűlt vízcsepp részben (nedves növekedés) vagy teljesen (száraz növekedés) ráfagy a jégreszecske felszínére (Geresdi, 2004). Zúzmarásodáshoz kapcsolódó makroszkopikus skálájú töltésszétválasztási folyamatokhoz sorolhatjuk a Workman-Reynolds-féle fagyási potenciált, az érintkezési potenciált, valamint a Hallett-Mossop féle jégreszecske-képző mechanizmus elektromos jelenségeit. **Workman-Reynolds-féle fagyási potenciál.** Workman és Reynolds már 1950-ben beszámoltak e zúzmarásodás közben észlelt töltésszétválasztási mechanizmusról. Kísérleteikkel igazolták, hogy mialatt a vízcsepp a jégreszecske felszínére fagy elektromos potenciálkülönbség alakul ki a jégreszcsékét borító vízréteg és a jégreszecske felszíne között. A 3.a ábrán a túlhűlt vízcsepp és a jégreszecske ütközése látható, a 3.b ábrán a túlhűlt vízcsepp már vízréteggént borítja be a jégreszecske felszínét. A 3.c ábra a fagyás folyamatában keletkező Workman-Reynolds-féle fagyási potenciált szemlélteti. Fontos kiemelni, hogy több módon jöhet létre potenciálkülönbség a vízréteg és a jégreszecske felszíne között. Johnson et al. (2014) kutatási eredményei azt sugallják, hogy a vízrétegben a pozitív, míg jégreszecske felszínének közelében a negatív ionok a kerülnek többségbe (ahogyan ez a 3. ábrán is látható).

**Érintkezési potenciál.** Számos kutatás igazolja, hogy zúzmarásodás közben elektromos töltések válnak szét, s ennek következtében negatív töltésűvé válik a jégreszcsékék felszíne. Caranti et al., (1985) kísérletekkel bizonyította, hogy a zúzmarásodó jégreszcsékék felszínén több negatív töltés van, mint a nem zúzmarásodó jégreszcsékék felszínén.

**Hallett-Mossop féle jégreszecske-képző mechanizmus elektromos jelenségei.** Zúzmarásodáskor a *graupel* (durva, nem kristályos jég szem) mellett (a másodlagos kristályképződés, ez esetben ún. Hallett-Mossop jégreszecske-képző folyamat miatt) apró jégzilánkok is képződnek (Saunders, 2008). Hallett és Saunders (1979) vizsgálták a *graupel* és a jégzilánkok elektromos töltését. Úgy vélték, hogy a zúzmarásodás következtében növekvő jégreszcsékék pozitív töltésűek a keletkező jégzilánkok negatív töltéséhez képest. A 4. ábra lépésről lépésre mutatja a Hallett-Mossop féle jégreszecske képző mechanizmust és elektromos jelenségeit a zúzmarásodásból kiindulva (4.a, b és c ábrák). A 4.b ábra a jégreszcsékét és az őt körülvevő vékony vízréteget szemlélteti. Ezen vékony vízréteg általában hirtelen és igen rövid idő alatt

fagy meg (Saunders, 2008). A 4.c ábra élénk kék színnel szemlélteti e fagyott réteget. A gyors fagyás hatására mechanikai feszültség keletkezik a jégreszcsékében. A felgyülemelő feszültség a jégreszecske felszínének töredezését okozza s így a 4.d ábrán is látható apró jégtöredékek, jégzilánkok képződnek (Saunders, 2008). Mint láthattuk, zúzmarásodás során negatív töltésűvé válik a jégreszcsékék felszíne. Értelmezésünk szerint e negatív töltésű jégfelszínről leváló jégzilánkok negatív töltéseket „szállítanak el” a jégreszcsékéről, így a jégreszcsékék felszíne pozitív töltésűvé válik. A jégreszcsékék olvadásakor a jégreszecske felszíne előbb megolvad, majd apró vízcseppek sodródni kezdnek róla (Geresdi, 2004). Dinger és Gunn (1946), Dinger (1964), valamint Drake (1968) kutatásai igazolják, hogy a *graupel* olvadásakor közben makroszkopikus skálájú töltésszétválasztási folyamat lép fel.

**Olvadó *graupel* elektromos töltése.** A jégreszcsékék többsége a zivatarfelhők magasabb régióiban képződik, majd egy meghatározott méret elérése után esni kezdenek (Geresdi, 2004). Esésük közben egyes folyamatok (pl.: depozíció, érintkezési potenciál) hatására a jégreszcsékék felszíne negatív töltésűvé válik. Mikor a negatív



3. ábra: Zúzmarásodó jégreszecske és a Workman-Reynolds féle fagyási potenciál

tív töltésű *graupel*ek elérik a  $0^{\circ}\text{C}$ -os szintet, olvadni kezdenek, s miután teljesen elolvadnak, pozitív töltésű esőcseppekként érik el a földfelszínt (Saunders, 2008).

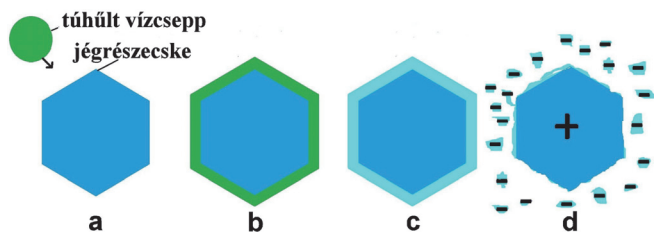
Drake (1968) szerint miközben a *graupel* felszíne megolvad, a *graupel*ben feláramlások jönnek létre. Mikor ezen feláramlások a *graupel* olvadt felszínéhez érnek, az olvadt vízrétegben buborékok pukkadnak ki (4.c ábra). A buborékok kipukkadásakor pedig apró, negatív töltésű vízcseppek jönnek létre (4.d ábra; Drake, 1968).

A *graupel* olvadásakor bekövetkező töltésszétválasztást következőképpen magyarázhatjuk. A *graupel* negatív töltésű felszíne megolvad, majd a buborékok kipukkanásának hatásaként keletkező kicsiny vízcseppek negatív töltéseket visznek magukkal, így a *graupel* pozitív töltésűvé válik.

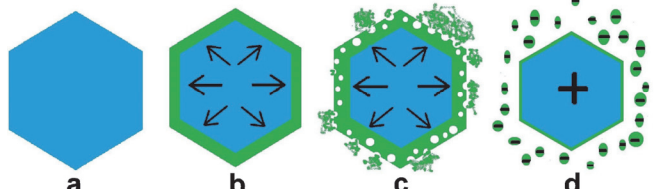
**A jégreszcsékék ütközésével bekövetkező töltésszétválasztási folyamatok.** Az egymásnak ütköző jégreszcsékék felszínén, a korábbiakban bemutatott töltésszétválasztási jelenségek hatására, elektromos töltések helyezkednek el. A következőkben a diszlokációs töltésszétválasztásra, a jégreszcsékék termoelektromos jelenségeire, valamint a Dashelmélettel leírt és az ütközésekkel keletkező töltésszétválasztásra, végül az ütközések egyik kísérőjelenségére, a jégreszcsékék töredezésére térünk ki.

**Diszlokációs töltésváltoztatás.** A jégkristályok hexagonális kristályrácsában különféle szerkezeti hibák, lyukak, ún. diszlokációk találhatóak. A diszlokációk mozognak és mozgásuk során pozitív töltéseket szállítanak (Keith and Saunders, 1990). A diszlokációk pozitív töltései vonzzák a jégreszecskeben lévő negatív ionokat, így a diszlokációkat általában negatív töltésű ionok veszik körül (Saunders, 2008). A jégkristály/*graupel* ütközésekkor fellépő tömegtranszport is tartalmaz negatív ionokkal övezett pozitív töltésű diszlokációkat (Saunders, 2008), így a diszlokációs töltésváltoztatás is szerepet játszik a jégreszecske ütközésekor zajló töltésszállításban (Keith and Saunders, 1990).

**Jégreszecskek termoelektromos jelenségei.** Termoelektromos jelenségnek nevezzük a valamilyen hőmérsékletkülönbség hatására kialakuló elektromos áram jelenséget az érintkező közegek határán. Mivel a különböző szerkezetű jégreszecskek között is vannak hőmérsékletkülönbségek, ezért e jégreszecskek érintkezési felületén is felléphet ez a jelenség. Latham and Mason (1961) szerint a jégkristályok és *graupel*ek ütközése során tapasztalhatunk termoelektromos jelenség alapú töltésszállítást. A zúsmarásodás hatá-



4. ábra: Zúsmarásodás, Hallett-Mossop-féle jégreszecske-képző mechanizmus és e folyamat hatására kialakuló töltéseloszlás.

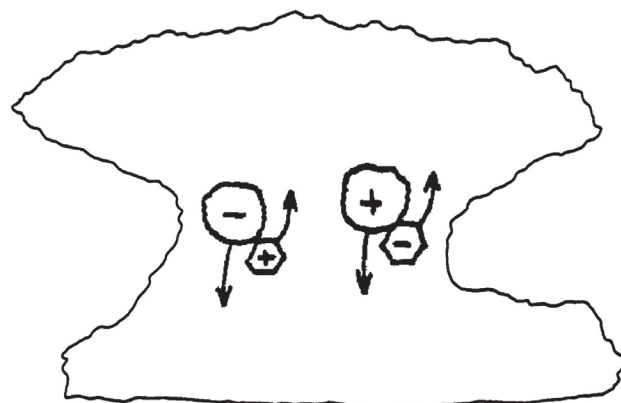


5. ábra: A *graupel* olvadása és hozzá kapcsolódó elektromos jelenség

sára a melegebb felszínű *graupel*ről „mozgékony”, pozitív töltésű kationok szállítódnak a hidegebb felszínű jégkristályra. Így az ütközést megelőző állapotához képest a *graupel* negatív, míg a jégkristály pozitív töltésűvé válik (Latham és Mason, 1961).

**Dash-elmélet.** A Dash-elmélet alatt Mason és Dash (2000), Dash et al. (2001), Dash and Wettlaufer (2003) tanulmányaiban foglaltakat értjük. Ezen, napjainkban széleskörűen elfogadott és alkalmazott elmélet részletesen, számszerűen tárgyalja a jégreszecskek ütközése előtt, az ütközések során, valamint az ütközéseket követően történő nem-induktív töltésváltoztatási mechanizmusokat. A jégreszecskek ütközésekor bekövetkező töltésváltoztatást döntően befolyásolja az ütközést megelőző depozíciós növekedésük, ill. szublimációjuk (Dash et al., 2001). A gyors depozíciós növekedés hatására egyrészt érdekessé válik a jégreszecskek felszíne, másfelől mivel rövid idő alatt nagyszámú vízgőzmolekula csapódik be a jég kristályrácsába, ezért e terhelés sok helyütt felszakítja a vízmolekulák kémiai kötéseit. Ionizáció megy végbe, amely  $\text{OH}^-$  egyszeresen negatív töltésű ionokat (anionokat) és  $\text{H}^+$  egyszeresen pozitív töltésű iono-

kat (kationokat) eredményez. Az anionok a megmaradó hidrogénkötéseik hatására a jégreszecskek felszínén maradnak, míg a „mozgékony” kationok a jégreszecske belseje felé indulnak. A jégreszecskek felszíne az előbbieik hatására negatív, míg a belső tartományuk pozitív elektromos töltésűvé válik, így ún. kettős elektromos töltésű réteg alakul ki rajtuk (Dash et al., 2001). A depozíciós növekedés hatására a jégreszecskek felszínén elhelyezkedő negatív töltések mennyisége arányos a depozíciós növekedés mértékével (Dash et al., 2001). Fizikai szempontból két jégreszecske ütközése rugalmatlan ütközésnek számít, tehát az ütközésben résztvevő részecskék mozgási energiájának egy része hővé alakul. Ezen hő (és a felszabaduló depozíciós hő) hatására a két jégreszecske ütközésekor határfelületi olvadás megy végbe, mielőtt a mozgási energia megmaradó részének következtében szét pattannának (Dash et al., 2001). Az ütközés alatt végbemenő olvadás hatására, ha rövid időre is, folyadék réteg alakul ki a jégreszecskek között. Ezen folyadék réteg fontos szerepet tölt be az ütközéskor végbemenő töltésváltoztatásban (5. ábra) és a tömegáramlásban (Dash et al., 2001). Fontos megjegyezni, hogy az ütközések időtartama, általában, igen rövid, kb. 0,1 ms



6. ábra: A zivatarfelhőkben a jégreszecskek ütközései és az ütközések során tapasztalható különböző töltésváltoztatási folyamatok (Saunders, 2008)

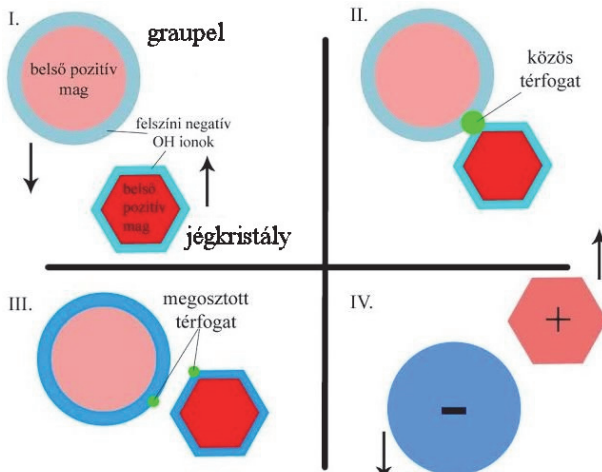
(Dash et al., 2001). Ez idő alatt – az esetek döntő többségében – csak a jégreszecskek felszínén lévő hidroxid-ionok diffundálnak az olvadékvízbe, mivel a pozitív kationok túl messze vannak, mélyebben a jégreszecskek belsejében (Dash et al., 2001). Mason és Dash (1999) leírásához hasonlóan, tekintjük az alacsony hőmérsékletű, depozíciós növekedésű, jelentős felszíni hidroxid-ion sűrűségű jégreszecskek és a magasabb hőmérsékletű, szublimáló, csekély hidroxid-ion sűrűségű jégreszecskek közötti ütközéseket. Ezen ütközéskor a depozíciós növekedésű jégreszecske felszíne kevésbé, a szublimáló jégreszecske felszíne nagyobb mértékben olvad meg. Az olvadt folyadékban a felszíni töltéssűrűség különbség kiegyenlítődik, majd a részecskék szét pattannak (Dash et al., 2001).

Mivel a depozíciós jégreszecske hidroxid-ionok távoznak, ezért a szét pattanást követően, az ütközést megelőző állapotához képest pozitív töltésűvé válik a felszíne. A szublimáló jégreszecske ütközés során hidroxid-ionok érkeznek, így az ő felszíne a szét pattanást követően, az ütközést megelőző állapotához képest negatív elektromos töltésűvé válik (Dash et al., 2001). Két depozíciós



jégrézecske ütközésekor a gyorsabban növekvő (a nagyobb depozíciós növekedésű) jégrézecskeről (mivel ő kezdetben több negatív töltéssel rendelkezik) szállítodnak el a negatív töltések (hidroxid-ionok), így pozitív töltésűvé válik (Dash *et. al.*, 2001).

**A jégfelszín töredezése és elektromos jelenségei.** A jégrézcskék ütközésének eddigi tárgyalása során, részben szándékosan, elhanyagoltuk azt a tényt, hogy az egymásnak ütköző jégrézcskék felszíne az ütközés során széttöredezik és a képződő jégtöredékek elektromos töltéssel rendelkeznek (Saunders, 2008). Ha adott egy jégrézecske, melynek felszínén elektromos töltések vannak, és ha ütközik egy másik jégrézcskével, melynek felszínén szintén töltések vannak, akkor e jégrézcskék ütközése során töltésszállítás alakul ki, miközben a felszínük is töredezik. Nyilvánvaló, hogy a keletkező jégtöredékek is, nagy eséllyel elektromos töltéssel fognak rendelkezni. Bár akad még megválaszolatlan kérdés a jégrézcskék töredezésének elektromos jelenségeivel kapcsolatban, a Saunders- féle (2008) cikk alapján



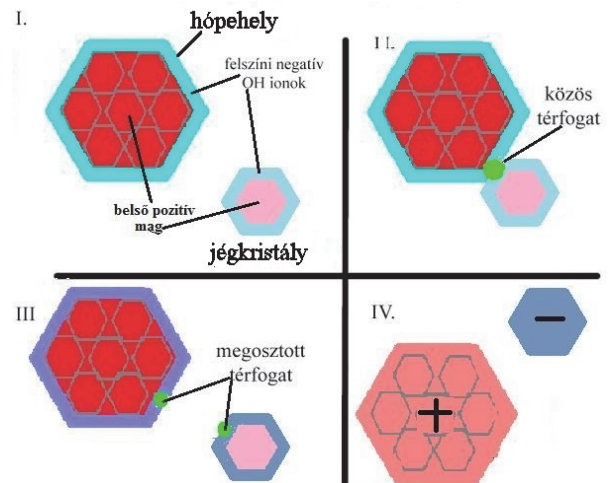
1. ábra: A jégkristály/graupel ütközések töltésváltási folyamatai (Mona, 2011)

elmondható, hogy a depozíciós növekedésű és a szublimáló jégrézcskék közötti ütközések során keletkező jégtöredékek elektromos töltése aszerint alakul, hogy melyik jégrézcskeről váltak le. A depozíciós növekedésű jégrézcskeről levált jégtöredékek töltése a depozíciós jégrézcske töltésével, míg a szublimáló jégrézcskeről levált jégtöredékek töltése a szublimáló jégrézcske töltésével megegyező.

**A zivatarfelhők nem-induktív töltésváltási mechanizmusa.** Eddig a jégrézcskével kapcsolatos töltésváltási folyamatokról beszéltünk a molekuláris skálától a felhőelemek skálájáig terjedően. A következőkben azt taglaljuk, hogy az eddig tárgyalt töltésváltási folyamatok hogyan alakulnak a zivatarfelhőkben, mert ezeket többnyire laboratóriumi körülmények között vizsgálták. A zivatarfelhőkben a felhőfizikai folyamatok egész sora zajlik: a legtöbb hidrometeor képződése, átalakulása vagy fogyása, a jégrézcskék mindhárom típusú növekedése (depozíció, zúsmarásodás, ütközéses növekedés), szublimációja, valamint olvadása (Geresdi, 2004). A nem-induktív elmélet szerint a jégrézcskék ezen felhőfizikai folyamatai töltésváltást eredményeznek. Számos cikk egyetért abban, hogy a molekuláris, valamint a makroszkopikus skálájú nem-induktív töltésváltási fo-

lyamatok, bár hozzájárulnak a zivatarfelhők töltésszerkezetének kialakulásához, önmagukban nem magyarázzák a megfigyelt töltéseloszlást. Igen sok kutatás igazolja (Takahashi, 1978; Jayaratne, 1981; Saunders *et al.* 2006), hogy a jégrézcskék ütközései során zajló töltésváltás határozza meg a zivatarfelhők elektromos jelenségeit.

A kutatások során egyes esetekben azt tapasztalták, hogy a jégkristály/graupel ütközések alkalmával a graupel negatív töltésűvé, míg a jégkristály pozitív töltésűvé válik az ütközés előtti állapothoz képest, ahogyan az a 6. ábra bal oldalán is látható. A 6. ábra jobb oldalán ábrázolt másik esetben, a jégkristály/hópehely ütközés alkalmával, a jégkristályok felszínén negatív, míg a hópehely felszínén pozitív töltéseket észleltek az ütközés előtti állapothoz képest (Saunders, 2008). Ezen egymásnak látszólag ellentmondó eredményekből Takahashi (1978) és Jayaratne (1981) arra a következtetésre jutottak, hogy a környezeti feltételek (hőmérséklet és a cseppfolyós víztartalom) nagyban befolyásolják az ütközések során tapasztalható töltésváltás-



2. ábra: A jégkristály/hópehely ütközések töltésváltási folyamata

tást. Emellett általánosan elfogadott megállapításnak számított az, hogy az ütközések alkalmával a gyorsabb depozíciós növekedésű jégfelszín pozitív elektromos töltésűvé válik, míg a szublimáló jégfelszínre negatív töltések kerülnek (Saunders, 2008). A kutatások eredményeire Baker *et al.* (1987) adott részletes magyarázatot. Baker *et al.* (1987) szerint az ütköző jégrézcskék egymáshoz viszonyított (azaz relatív) diffúziós növekedési mértéke határozza meg a töltésváltást. Ez az ún. relatív diffúziós növekedési mérték elmélete, mely előírja, hogy a jégrézcskék ütközésekor a gyorsabb diffúziós növekedésű jégfelszín válik pozitív töltésűvé az ütközés előtti állapotához képest. Az alábbiakban a zivatarfelhők hőmérsékletének és cseppfolyós víztartalmának figyelembevételével, a Dash-elmélet és a relatív diffúziós növekedési mérték elmélet segítségével próbáljuk részletesen megmagyarázni a jégkristály/graupel és a jégkristály/hópehely ütközések töltésváltási folyamatát. A zivatarfelhők alacsonyabban fekvő részeiben magasabb a hőmérséklet és nagyobb a cseppfolyós víztartalom. Ezen feltételek mellett a jégkristály/graupel ütközések és a hozzájuk kapcsolódó töltésváltási folyamatok valósulnak meg. A jégkristály/graupel ütközések esetén a magasabb hőmérsékletek miatt nagy a jégkristályok feletti túltelítés, így a jégkristályok felszínén a depozíciós növeke-

dés nagyobb mértékű, mint a *graupel*ek felszínén. A Dash-elmélet értelmében a jégkristályok intenzív depozíciós növekedésének hatására magas a felszíni OH<sup>-</sup> ion koncentráció (ezt élénk, világos kék színnel érzékeltetjük a 7. ábrán). A *graupel* felszínén (a kisebb mértékű depozíciós növekedés miatt) kisebb az OH<sup>-</sup> ion koncentráció (ezt sötétebb, szürkés-kék kék színnel szemléltetjük a 7. ábrán). Jégkristály-*graupel* ütközések során a közös térfogatban a töltéssűrűség-különbség kiegyenlítődik, majd a relatív diffúziós növekedési mérték elméletnek megfelelően, az ütközést követően a jégkristály pozitív töltésűvé, míg a *graupel* negatív töltésűvé válik. A zivatarfelhők magasabban elhelyezkedő tartományokban alacsonyabb a hőmérséklet, mint az előbbi esetben, ennek megfelelően a felhő cseppfolyós víztartalma is kisebb az előző esetéhez képest. Ezen környezeti feltételek mellett a jégkristály/hópehely ütközések és a hozzájuk kötődő töltésszétválasztási mechanizmus valósul meg. A jégkristály/hópehely ütközések során lejátszódó töltésszétválasztást az előbb mondottak alapján a 8. ábrán a következőképpen jellemezhetjük. Itt hangsúlyozzuk, hogy a jellemzés az analógiából indul ki, és nem a kísérleti eredmények leírását adja, szemben a 7. ábrával, mely megfigyelésekkel igazolható. A hópehelyek depozíciós és ütközési növekedési mértéke – feltételezésünk szerint – nagyobb, mint a jégkristály depozíciós növekedési mértéke. Így, Dash et al. (2001) alapján a hópehelyek felszíni OH<sup>-</sup> ion koncentrációja magasabb (melyet a 8. ábra élénk kék színnel érzékeltet), mint a jégkristályoké. A jégkristály/hópehely ütközés alkalmával ezen koncentrációkülönbség kiegyenlítődik, s a relatív diffúziós növekedési mérték elmélet értelmében az ütközést követően a hópehely pozitív, míg a jégkristály negatív töltésűvé válik, mint ahogy azt a 8. ábra is mutatja. Legvégül hangsúlyozzuk még egyszer, hogy a 8. ábra csak egy értelmezési keret, alapjait a hópehelyekre és a jégkristályokra vonatkozó telítési gőznyomás-értékek közötti viszony határozza meg, mely igen sok tényezőtől függ, függhet.

**Konklúzió.** Megannyi kérdést boncolgatva meggyőződhetünk, hogy a Földön a víz és a jég a tűz teremtője. A zivatarfelhőkben a víz mindhárom fázisban jelen van. A molekuláris skálájú (10<sup>-10</sup> m) fázisátalakulások, valamint a már makroszkopikus skálájának (10<sup>-6</sup>-10<sup>-3</sup> m) tekinthető zúzmarásodás és a *graupel* olvadása közvetetten töltésszétválasztási folyamatokat eredményez. Ezen töltésszétválasztási mechanizmusok hatására a jégreszcsek felszínére elektromos töltéssel rendelkező ionok kerülnek, kialakítva e részecskék elektromos töltésszerkezetét. E töltések térben is elkülönülnek a jégreszcsek ütközése során (Saunders, 2008). A zivatarfelhők töltésszerkezete első közelítésben elektromos dipólusként vagy tripólusként jellemezhető. Mindkét közelítés lényege az, hogy a földfelszíntől távolodva a zivatarfelhőkben egymástól ellentétes és elkülönülő elektromos töltésű tartományok találhatók: magasabban a pozitív, míg alacsonyabban a negatív töltések tartománya. Ha a töltéstartományok közötti potenciálkülönbség, akár a felhőn belül, vagy kívül, nagyobb egy bizonyos – feltehetően változó – küszöbértéknél villámlás jön létre (Mona, 2011), ami a tűz teremtője. Az ősidőkben, mikor az emberek még nem tudtak tüzet gyújtani, az észlelt villámok és a hatásukra keletkező tüzek alázatot és tiszteletet parancsoltak. Ezt mutatja, hogy a görög mitológiában Zeusz a villámlás istene is.

## Irodalom

- Baker, B., Baker, M. B., Jayaratne, E. R., Latham, J. and Saunders, C., 1987: The Influence of Diffusional Growth Rates On the Charge Transfer Accompanying Rebounding Collisions Between Ice Crystals and Soft Hailstones. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 113, 1193–1215.
- Caranti, J. M., Illingworth, A. J. and Marsh, S. J., 1985: The charging of ice by differences in contact potential. *J. Geophys. Res.* 90, 6041–6046.
- Dash J. G. and Wettlaufer J. S., 2003: The surface physics of ice in thunderstorms. *Can. J. Phys.* 81, 64–70.
- Dash, J. G., Mason, B. L. and Wettlaufer J. S., 2001: Theory of charge and mass transfer in ice-ice collisions. *J. Geophys. Res.* 106, 395–401.
- Dinger, J. E. and Gunn, R., 1946: Electrical effects associated with a change of state of water. *Terr. Magn. Atmos. Electr.* 51, 477
- Dinger, J. E., 1964: Electrification Associated with the Melting of Snow and Ice. *JAS*, 22, 162–166.
- Drake, J. C., 1968: Electrification accompanying the melting of ice particles. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 94, 176–191
- Geresdi, I., 2004: *Felhőfizika*. Dialóg Campus Kiadó, Budapest-Pécs. pp. 272
- Hallett, J. and Saunders, C., 1979: Charge Separation Associated with Secondary Ice Crystal Production. *JAS* 36, 2230–2235.
- Jayaratne, E. R., 1981: Laboratory studies on thunderstorm electrification. *Ph.D. Thesis*. The University of Manchester, Manchester.
- Johnson, T. A., Park, A., Hand, K. P., 2014: The Workman-Reynolds Effect: An Investigation of the Ice-Water Interface of Dilute Salt Solutions. *45<sup>th</sup> Lunar and Planetary Science Conference*
- Keith, W. D. and Saunders, C., 1990: Further laboratory studies of the charging of graupel during ice crystal interactions. *Atmospheric Res.* 25, 445–464.
- MacGorman, D. R. and Rust, W. D., 1998: *The Electrical Nature of Storms*. University Press, New York, Oxford, pp. 422
- Mason, B. L. and Dash J. G., 2000: Charge and mass transfer in ice-ice collisions: Experimental observations of a mechanism in thunderstorm electrification. *J. Geophys. Res.* 105, 185–191.
- Mason, B. L. and Dash, J. G., 1999: *Ice Physics in the Natural Environment*. Springer-Verlag, New York. pp. 355
- Mason, B. L., Latham, J., 1961: Generation of Electric Charge Associated with the Formation of Soft Hail in Thunderclouds. *Proc. R. Soc.* 260, 537–549.
- Mona, T., 2011: A villámgyakoróság parametrizálása. *Szakdolgozat*, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest (témavezető: Ács Ferenc). pp. 30
- Saunders, C., 2008: Charge Separation Mechanisms in Clouds. *Space Sci Rev.* 137, 335–353.
- Saunders, C., Bax-Norman, H., Emersic, C., Avila, E. E. and Castellano, N. E., 2006: Laboratory studies of the effect of cloud conditions on graupel/crystal charge transfer in thunderstorm electrification. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 132, 2653–2673.
- Takahashi, T., 1978: Riming Electrification as a Charge Generation Mechanism in Thunderstorms. *JAS* 35, 1536–1548.
- Workman, E. J. and Reynolds, S. E., 1950: Electrical phenomena occurring during the freezing of dilute aqueous solutions and their possible relationship to thunderstorm electricity. *Phys. Rev.*, 78, 254–259.
- [www.silver-colloids.com/Tutorials/Intro/pcs17A.html](http://www.silver-colloids.com/Tutorials/Intro/pcs17A.html)
- Yair, Y., Fischer, G., Simoes, F., Renno, N. and Zarka, P., 2008: Updated Review of Planetary Atmospheric Electricity. *Space Sci. Rev.*, 137, 29–49.