

A VÍZ KÜLÖNLEGES TULAJDONSÁGAI

Tasnádi Péter , Weidinger Tamás 

ELTE Meteorológiai Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A
e-mail: tasi@caesar.elte.hu

Anomalous properties of water

A cikket a szerzők Illy Judit emlékének ajánlják.

Abstract

Water plays a fundamental role in the origination of life on the Earth, so almost every branch of sciences deal with it. Although water is a very common material and exists everywhere on the Earth both its physical and chemical properties are anomalous. That is why water plays a fundamental role in life, in the climate and weather, in the energy budget of the Earth, in the Sea currents, and so on.

In this paper, the anomalous physical properties of the water are summarized, and they are explained on the basis of the structure of the water. The structure of the water is created by the so-called H-bonds that are secondary chemical bonds connecting water molecules. It will be shown that the freezing-, boiling- and critical- point and also the phase transformation heats of the water are higher than the expected ones due to the secondary bonds. Similarly, these bonds are responsible for its high surface tension and the anomalous behavior of its density.

Keywords: anomalous properties of water, specific heat of water, latent heat, freezing and boiling point, H-bond; structure of water and ice

Összefoglalás

A víz a földi élet szempontjából alapvető jelentőségű anyag, a természettudományoknak szinte minden ága foglalkozik vele. Annak ellenére, hogy Földünkön mindenütt jelen van és hétköznapjainkban közönségesnek számító anyag, mind fizikai, mind kémiai tulajdonságai különlegesen. Emiatt játszik alapvető szerepet az élet keletkezésében, a Föld klímájának és a mindennapi időjárásnak az alakulásában, a Föld energiaháztartásában, a tengeráramlásokban és még számtalan egyéb folyamatban.

Ebben a dolgozatban a víz különleges fizikai tulajdonságait foglaljuk össze, a vízmolekulák közötti másodlagos kötések alapján (H-hidak) értelmezzük a víz sajátos tulajdonságait. Megmutatjuk, hogy a víz fagyási és párolgási valamint kritikus hőmérséklete, továbbá fajhője és a latens hő is a vízmolekulák közötti másodlagos kötéseknek köszönhetően magasabbak a vártnál. Ugyancsak a másodlagos kötések miatt nagy a víz felületi feszültsége és viszkozitása is, de sűrűségének anomális viselkedéséért is ezek a kötések a felelősek.

Kulcsszavak: víz szokatlan tulajdonságai, víz fajhője, latens hője, fázisátalakulási hőmérsékletei, H-kötés, víz és jég szerkezete

Bevezetés

A víz minden élőlény számára nélkülözhetetlen, központi szerepet tölt be a természetben, az iparban és mindennapi életünkben. A földi élet szempontjából alapvető jelentőségű anyag, a természettudományoknak szinte minden ága foglalkozik vele. Az élet keletkezésekor az aminosavak a villámok hatására keletkeztek az őslégtérben jelen lévő hidrogén, metán, ammónia, és vízgőz egyesülésével. Az élő szervezetek alkotórészei ugyancsak nagy százalékban vizes oldatok (vér, sejtek).

A víz összetételét kísérletileg *Henry Cavendish* (1731–1810) igazolta a legszebben (ő fedezte fel a hidrogént 1766-ban), a legteljesebb magyarázatot azonban *Antoine Laurent Lavoisier* (1743–1794) adta. Megállapította, hogy ha hidrogént oxigéngázban elégetnek, akkor víz keletkezik minden más termék nélkül. Bebizonyította, hogy a víz tömege a két felhasznált gáz tömegének összegével egyenlő. A víz tehát nem lehet más, mint a hidrogén és az oxigén vegyülete, a hidrogén égésterméke. Később a víz felbontásának egyik módját is felismerte. Izzó vasdarabok között vízgőzt vezetett át, és megállapította, hogy a víz oxigénje a vassal egyesül, a felszabaduló hidrogén pedig eltávozik.

Annak ellenére, hogy a víz Földünkön mindenütt jelen van és mindnyájunk számára ismert, hétköznapjainkban közönségesnek számító anyag, szigorúbb vizsgálatából és más anyagokkal való összehasonlításából kitűnik, hogy tulajdonságai mind fizikai, mind kémiai szempontból különlegesek, s ezeknek a különleges tulajdonságoknak következtében játszik alapvető szerepet az élet keletkezésében, a Föld klímájának és a mindennapi időjárásnak az alakulásában, a Föld energiaháztartásában, a tengeráramlásokban és még számtalan egyéb folyamatban.

Ebben a dolgozatban a víz különleges fizikai tulajdonságait foglaljuk össze, elemezzük a víz szerkezetét és értelmezzük a belőle adódó sajátos tulajdonságokat. Az anomális tulajdonságokat *Chaplin* [1 – www1.lsbu.ac.uk] honlapja alapján foglaljuk össze és felhasználjuk *Tasnádi & Illy* (2018) kéziratot, valamint *Weidinger & Tasnádi* (2015) cikkét. *Chaplin* a víz hetvennégy anomális tulajdonságát ismerteti, közülük itt csak azokat emeljük ki, amelyek a légköri és óceáni folyamatokban fontos szerepet játszanak. Megmutatjuk, hogy a víz fázisátalakulási hőmérsékletei és kritikus hőmérséklete, valamint különböző halmazállapotaiban fajhője és a latens hő is a vízmolekulák közötti másodlagos kötéseknek köszönhetően magasabbak a vártnál. Ugyancsak a másodlagos kötések miatt nagy a víz felületi feszültsége és viszkozitása is, de sűrűségének anomális viselkedéséért is ezek a kötések felelősek.

A víz különleges szerkezete

A víz összetétele

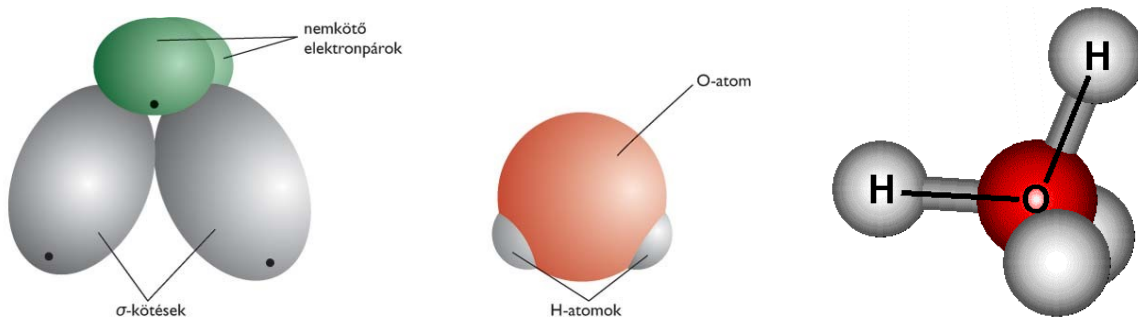
Mint ahogy a hidrogénnek és az oxigénnek is vannak izotópjai, a vízmolekulában a hidrogén hatféle (H_2 , HD, D_2 , HT, T_2 , DT), az oxigén háromféle (^{16}O , ^{17}O , ^{18}O) izotópváltozatban vehet részt, így összesen tizennyolc féle vízmolekula létezik. A víz nagyrészt H_2O összetételű, de például minden ötezredik vízmolekula HDO felépítésű. Szoros értelemben a deutérium-oxidot (D_2O) nevezzük nehézvíznek, tágabb értelemben pedig a víznek minden olyan változatát, amelynek a molekulái a hidrogénnek vagy az oxigénnek valamelyik nehéz izotópját tartalmazzák. A természetes vizek elektrolízisekor a nehézvíz a maradékban halmozódik fel, ami lehetővé teszi elkülönítését (Nyilasi, 1976).

A nehézvíz szerkezete megegyezik a H_2O molekuláéval. Mint ahogy azonban molekuláinak tömege nagyobb, ezért fizikai állandói eltérnek. Például a D_2O összetételű nehézvíz fagyáspontja $+3,8\text{ }^\circ\text{C}$, forráspontja $101,43\text{ }^\circ\text{C}$, sűrűsége $+4\text{ }^\circ\text{C}$ -on $1,11\text{ g cm}^{-3}$. Az

izotóphatások nemcsak fizikai, de élettani szempontból is fontosak. A nehézvízben például nem csíráznak ki a növényi magvak, elpusztulnak benne a halak. A viszonylag kevés nehézvizet tartalmazó vízben is sokkal nehezebben élnek a növények és az állatok.

A vízmolekula

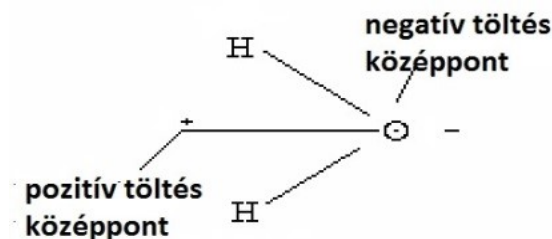
A továbbiakban a víz legegyszerűbb alakjával, a H_2O -val foglalkozunk. A vízmolekula központi atomja az oxigén, a periódusos rendszer nyolcadik eleme (8 elektronnal és protonnal, 16-os tömegszámmal). Az oxigén elektronszerkezete elvileg például $1s^2 2s^2 2p_x^2 2p_y^1 2p_z^1$ lehetne és a hidrogénatomok a $2p_y$ és $2p_z$ pálya elektronjaihoz csatlakozva hozhatnának létre kovalens kötést. Azonban nem ez történik! A vízmolekulában az oxigénatom tetraédres szimmetriájú, úgynevezett sp^3 hibridállapotba kerül, azaz a $2s$ és a három $2p$ pályából négy egyenrangú elektrópálya keletkezik. A négy pályán összesen nyolc elektron fér el, kettőhöz a hidrogénatomok csatlakoznak σ -kötéssel, kettőn pedig nemkötő elektrópár helyezkedik el. (Bodor, 1968).



1. ábra: A vízmolekula négy elektrópárja, az oxigén és a hidrogén atomok elhelyezkedése (104° -os szög).

Figure 1: Four electron pairs of water molecule, position of the oxygen and the hydrogens (104° angle).

Mivel az oxigén elektronegativitása nagy, az elektrónburok erősen az oxigén mag felé húzódik. A tetraédres szerkezet is kissé torzul, az oxigén nem pontosan a tetraéder középeré kerül, hanem kissé közelebb lesz a nemkötő elektrópárokhoz. Emiatt a hidrogénatomok kötési szöge a tetraédres kötésből következő $109,5$ fok helyett csak 104 fok körüli (1. ábra). Az elektróneloszlás a kötés jellegén is változtat, tiszta kovalens kötés helyett az oxigén és hidrogén között ionos és kovalens kötés keveréke alakul ki.



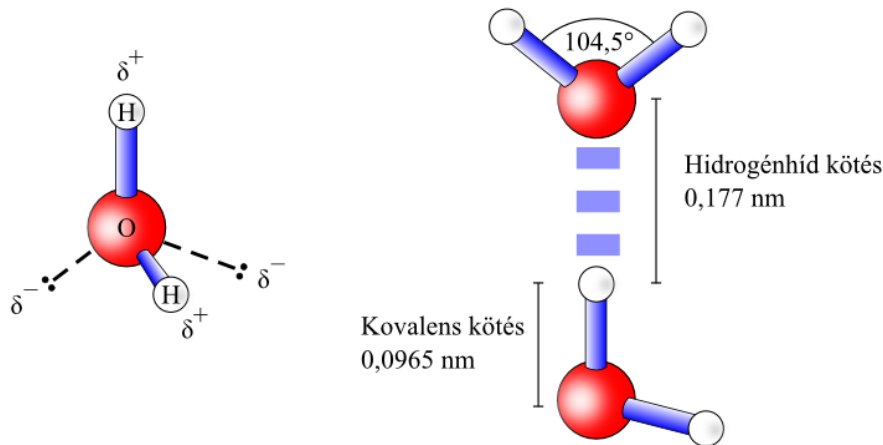
2. ábra: A dipólus szerkezetű vízmolekula.

Figure 2: The dipole structure of the water molecule.

A V alakú vízmolekula pozitív és negatív töltésközéppontja nem ugyanoda esik, ezért a molekulának viszonylag nagy elektromos dipólmomentuma van: $\mu = 6,17 \cdot 10^{-30}$ C m. A dipól jelleg végeredményben annak a következménye, hogy a molekula egyik oldalán a nemkötő elektronpárok erős negatív, a másik oldalon pedig az elektronegativitástól szinte teljesen megfosztott hidrogénatomok protonjai erősen pozitív töltést mutatnak (2. ábra).

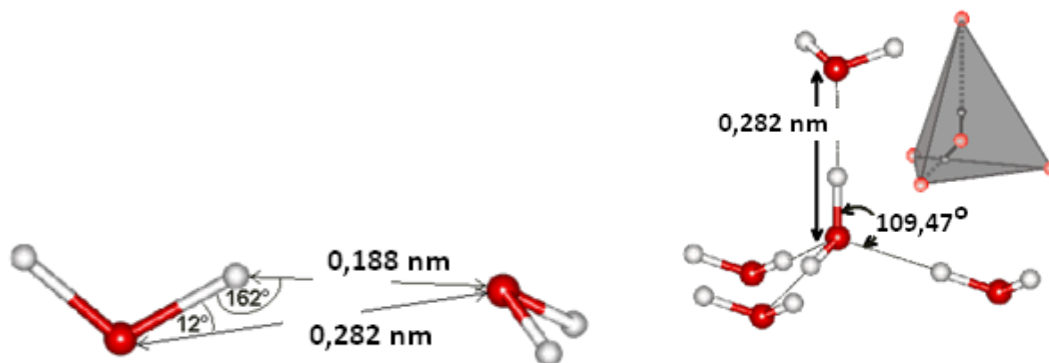
A hidrogénhíd-kötés

A dipólus szerkezet aszimmetrikus töltéseloszlása miatt a vízmolekulák könnyen kapcsolatba léphetnek egymással, az egyik molekula nemkötő elektronpárja és egy másik molekula hidrogén magja (a proton) között kémiai kötés alakulhat ki. Ez a hidrogénkötésnek (hidrogénhidnak) nevezett kötés csak annyiban különbözik az oxigénatomot „saját” hidrogénjével összekapcsolótól, hogy a kötéstávolság sokkal nagyobb és így a kötési energia sokkal kisebb. (3. és 4. ábra). A hidrogénhidak viszonylag erős kapcsolatokat hozhatnak létre a vízben, ugyanakkor mégsem állandósulnak, időről időre felbomolhatnak, és újra alakulhatnak (Marx, 1978).



3. ábra: A poláros vízmolekula (bal oldalon) és a hidrogénkötés kötéstávolsága (jobb oldalon), ami nagyobb, mint a kovalens kötésénél.

Figure 3: Electrical polarization of water molecule (left) and the H- and covalent- bond length. (The latter is longer).

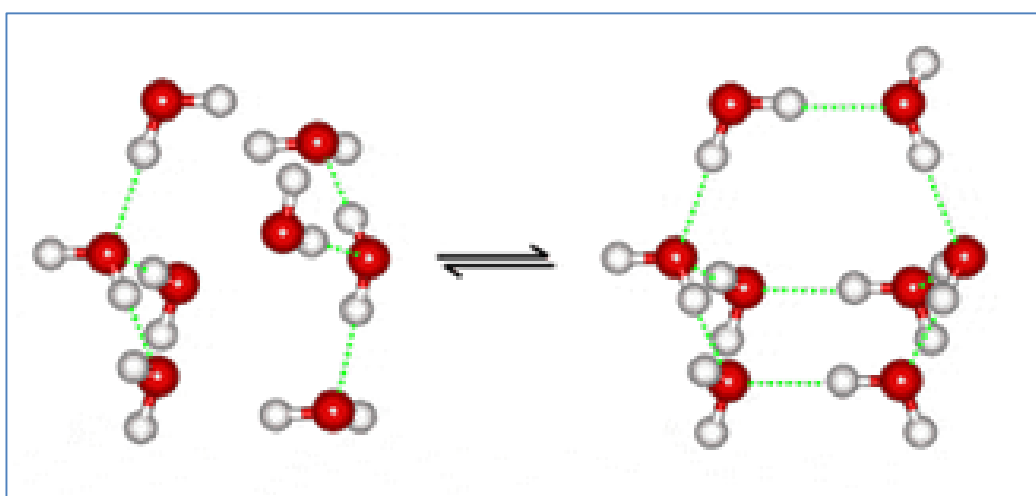


4. ábra: A tetraéderes szerkezetet kialakító hidrogénkötés.

Figure 4: H-bonding with the tetrahedral structure.

A víz klaszteresedése

A vízben a kovalens kötés kötési energiája 492 kJ mol^{-1} , a hidrogénhídé $23,3 \text{ kJ mol}^{-1}$, a szokásos másodlagos kémiai kötéseké pedig $5,5 \text{ kJ mol}^{-1}$. A hidrogénhidak tehát nagyjából 50-szer gyengébbek, mint a valódi kémiai kötések, de nagyjából 5-ször olyan erősek, mint a másodlagos kémiai kötések. Érdeemes még figyelembe venni, hogy a hidrogénhidak kötési energiája körülbelül 10-szer akkora, mint a termikus fluktuációké 25°C -on. Így, a vízmolekulák hidrogénkötésekkel lazán összekapcsolódó, ikozaédes szimmetriájú kisebb-nagyobb, lokalizált halmazokat, más szóval klasztereket alkotnak. A hidrogénkötések azonban a termikus mozgás eredményeképpen hol felbomlanak, hol újraalakulnak, így a klaszterek szerkezete és mérete sem állandó. Az ikozaédes szerkezet termikus fluktuációk során változik, így kísérleti úton nem követhető nyomon, azonban molekuladinamikai szimulációkkal modellezhető. (Lásd például a következő szakdolgozatot: Ormándi (2014)).



5. ábra: H-kötések változása a molekulák termikus mozgása miatt.

Figure 5: Change of H-bonds due to thermal motion.

Az 5. ábra vízmolekulából kialakuló csoportosulást és a csoportok átrendeződését szemlélteti. A hidrogénhidak feltételezése jelentősen segített a víz szerkezetéből fakadó anomális tulajdonságainak értelmezésében. Létezésük kézzelfogható bizonyítása azonban csak 2013-ban sikerült, amikor Zhang et al. (2013) kontaktus nélküli atomerő-mikroszkóp (NC-AFM) segítségével a 8-hydroxyquinolin vegyületben a valódi térben felvették a hibrid állapot elektronsűrűségének az eloszlását (6. ábra.)

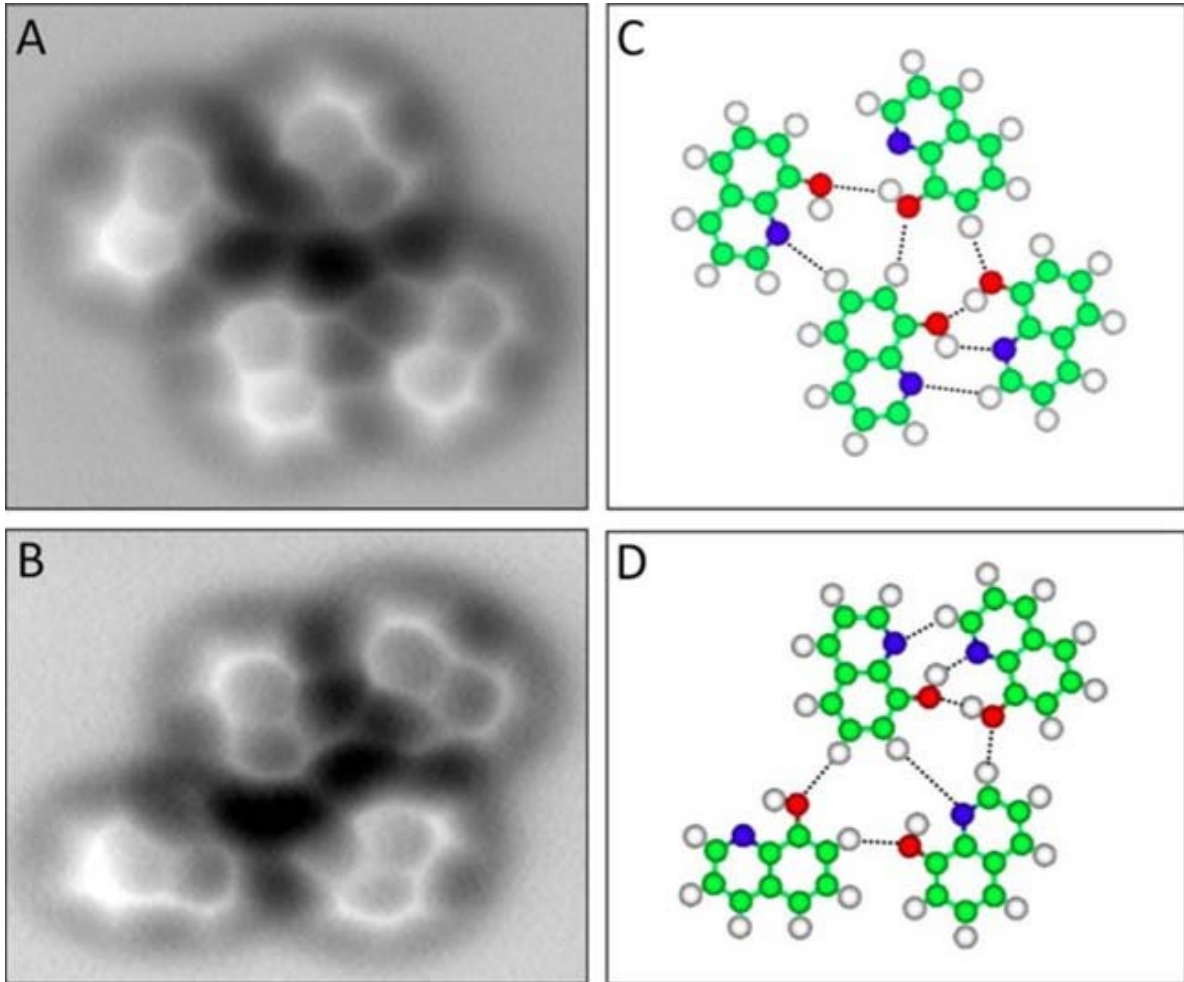
A víznek számos különleges tulajdonsága van, emiatt sok területen felhasználható mind az épített, mind pedig a természetes környezetünkben. Ezek a tulajdonságok a vízmolekulák együttesének tulajdonságai, ezért értelmezésük csakis a molekulák között ható erők, a másodrendű kötések figyelembevételével lehetséges.

A jég szerkezete

Ha a víz megfagy, akkor a jégkristályban az egyes oxigénatomokat négy másik oxigénatom veszi körül tetraédes szimmetriában. Az oxigének távolsága $27,6 \text{ nm}$, közöttük egy-egy hidrogénatom van, amely mindkét oxigénatomhoz kapcsolódik, az egyikhez erősebben (kovalens kötéssel), a másikkal gyengébben (hidrogénhíddal). Ennek megfelelően a jégkristályban a hidrogénatommag távolsága az egyik oxigénatom magjától $10,1 \text{ nm}$, a másiktól $17,5 \text{ nm}$. A jégben tehát minden oxigénatom két hidrogénatommal szoros, kettővel

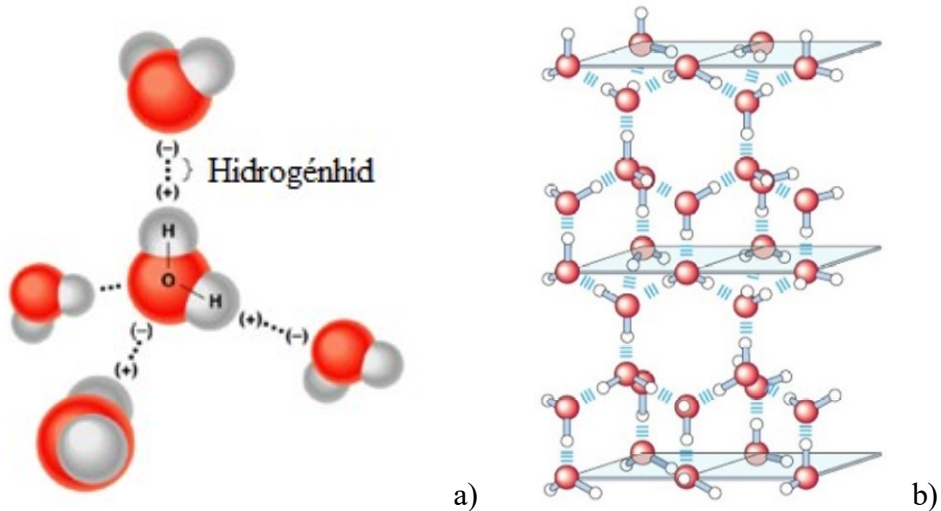
pedig lazább kapcsolatban áll. Ahogyan azt a 7. ábrán is látjuk, a jégkristály egészét kémiai kötések hálózata köti össze (lásd külön is a 7a ábrát).

A jég hexagonális elrendezésű lapjai azonban molekuláris szinten nem síkfelületek, és a hexagonális szimmetria is torzul. Előbbit az oxigénatomok körüli térbeli tetraédes kötéselrendeződés, utóbbit a kovalens kötések és a hidrogénhid kötések eltérő kötéshossza okozza. Ezért nevezik a jég szerkezetét kvázihexagonálisnak.



6. ábra: Elektroneloszlás NC-AFM kontrasztja (A és B) és a megfelelő atomszerkezet (C és D) sematikus képe (piros oxigén, zöld szén, kék nitrogén üres hidrogén, a pontozott vonalak jelzik a H-kötéseket).

Figure 6: NC-AFM contrast of the electron distribution (A and B) and the schematic picture of the atomic structure corresponding to them (C and D) (red, green, blue and white circles indicate oxygen, carbon, nitrogen and hydrogen atoms, respectively. dashed lines indicate hydrogen bonds).

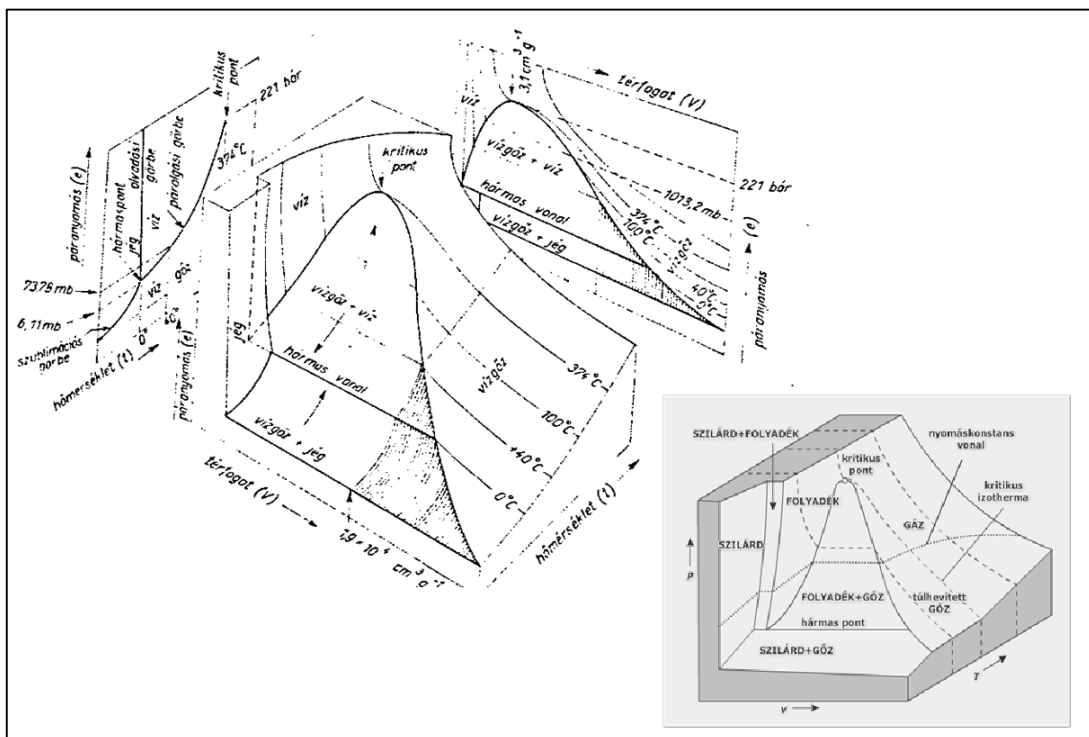


7. ábra: a) Tetraédes szimmetria oxigénatom körül,
b) A jég H-kötésekkel kimerevített „kvázi”-hexagonális kristályszerkezete.

Figure 7: a) Tetrahedral symmetry around an oxygen atom.
b) Quasi hexagonal crystal structure of ice with frozen H-bonds.

A víz halmazállapotai

A H₂O az egyetlen vegyület, amely természetes körülmények között mindhárom halmazállapotban egyszerre előfordulhat a föld légkörében. A három halmazállapot és a halmazállapot-változások tulajdonságai legegyszerűbben a víz fázisdiagramja alapján tekinthetők át (8. ábra).



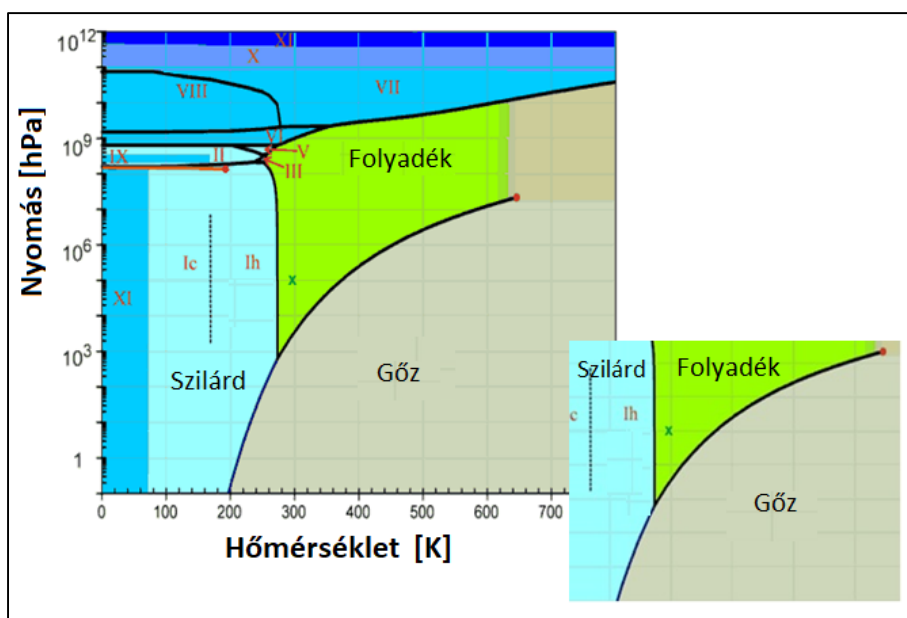
8. ábra: A víz háromdimenziós fázisdiagramja Czelnai (1979) és Bihari (2012) nyomán.

Figure 8: 3D phase diagram of water after Czelnai (1979) and Bihari (2012).

A 8. ábra a H_2O háromdimenziós egyensúlyi fázisdiagramját mutatja, a 9. ábrán bal oldalt pedig a szokásos fázisdiagram látható, ami a háromdimenziós fázisdiagram nyomás-hőmérséklet (p, T) felületre vett vetülete. A 9. ábra jobboldalán ebből a vetületből emeltük ki a közönséges körülményekre vonatkozó részt. A fázisdiagram a szilárd fázisban sokféle szerkezetű jég kialakulásának lehetőségét, és ennek megfelelően a bonyolult fázisátalakulások rendszerét mutatja be. Mindez azonban olyan hőmérsékleti és nyomás tartományban valósulhat meg, ami messze van a légköri nyomás és hőmérséklet tartományától.

Ezért a diagram légkörben elérhető tartományáról kivágotat készítettünk. A diagram jól mutatja, hogy a közönséges légköri körülmények között a jég is csak egyféle fázisban létezhet. A fázisdiagramról leolvasható, hogy a nyomás változásával a jég-víz fázisátalakulás hőmérséklete gyakorlatilag nem változik, 273 K marad.

Az egyensúlyi fázisdiagram azonban még a légköri állapotok tartományában sem írja le reálisan a H_2O halmazállapot-változásait. A víz nagymértékben túlhűthető és túlfűthető. Túlhűtött gőz a légkörben nem létezhet, a túlhűlt víz azonban jelentős szerepet játszik a csapadékképződésben. A 10. ábra a víz metastabil tartományait mutatja.



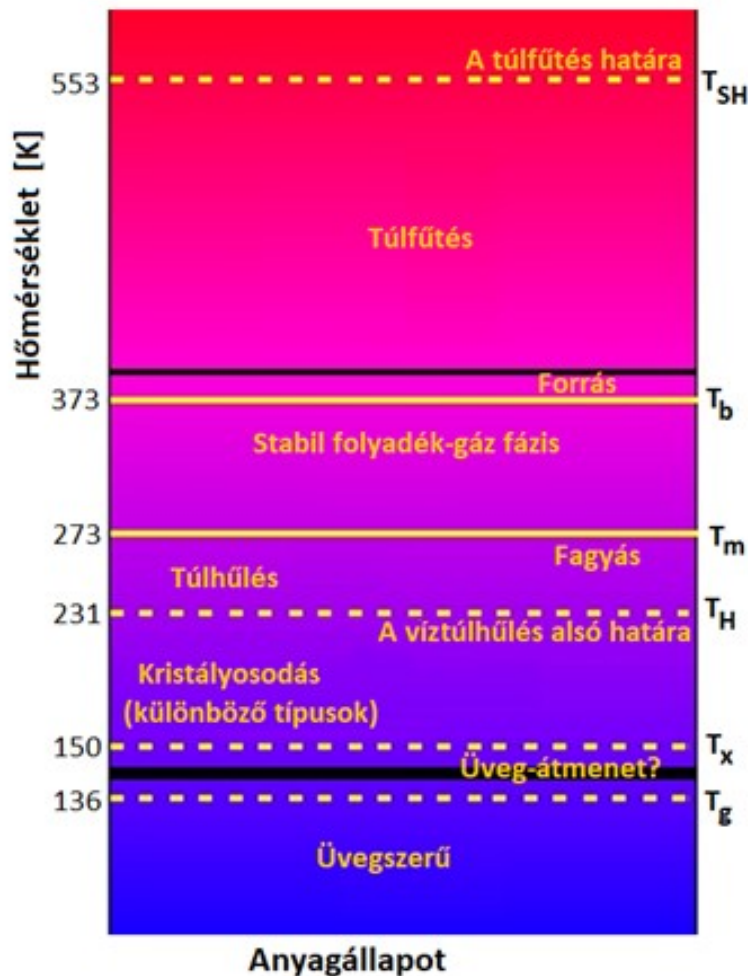
9. ábra: Fázisdiagram a $p - T$ síkon (Wikipédia nyomán).

Figure 9: Phase diagram in $p - T$ plane (after Wikipedia).

A víz túlhűlése a hidrogénhidak stabilizáló hatásának a következménye. A fagyás általában jégmagok képződésével kezdődik. Nagyon tiszta vízben a magok homogén elrendeződésben keletkező molekuláris csoportosulások. (Ezt nevezzük homogén nukleációnak.) A víz azonban többnyire szennyező anyagokat is tartalmaz. E szennyezők a szilárd halmazállapot csírái. A szennyezők eloszlása a felhővízben nem homogén, ezért ezt a folyamatot inhomogén nukleációnak nevezzük.

A tapasztalat szerint a fagyásponthoz közeli hőmérséklet-tartományban mindig inhomogén nukleációval jön létre a jég. Amennyiben a vízben kevés a szennyező, akkor ebben a tartományban a víz túlhűthető. A túlhűthetőség határa a fagyás homogén nukleációval való bekövetkezésének hőmérséklete ($-41\text{ }^\circ\text{C}$), azaz az a hőmérséklet, amelyen a vízmolekulák szennyezők nélkül is spontán módon csoportosulnak.

A felhőcseppecskék – különböző koncentrációjú oldatokként – 0 °C-nál alacsonyabb hőmérsékleten fagynak meg. A légkörben –10 – –15 °C-ig többségében túlhűlt vízcseppekből álló felhők vannak (Geresdi, 2004).



10. ábra: A víz metastabil tartományai. T_{SH} , T_b , T_m , T_H , T_x és T_g rendre a túlfűtés, a forráspont, a fagyás, a víz túlhűtésének kritikus értéke, illetve az üvegszerű átmenet felső és alsó határhőmérséklete.

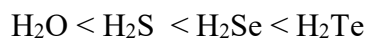
Figure 10: Metastable regions of water. (T_{SH} , T_b , T_m , T_H , T_x and T_g superheating-, boiling-, freezing- and supercooling-point, as well as the upper and lower limit of the transformation temperature to the glassy state.

A víz különleges termikus és mechanikai tulajdonságai

Magas fázisátalakulási hőmérsékletek

A tapasztalat szerint az azonos szerkezetű, de különböző méretű és tömegű molekulák között az összetartó erők annál nagyobbak, minél nagyobb a molekula tömege. Az oxigén (O), a kén (S), a szelén (Se) és a tellúr (Te) a periódusos rendszerben egymás alatt, ugyanabban az oszlopban található, így külső elektronhéjuk azonos szerkezetű. Tanulságos összevetni a víz (H_2O), a kén-hidrogén (H_2S), a szelén-hidrogén (H_2Se) és a tellúr-hidrogén (H_2Te) olvadási és forráspontját (11. ábra; Nyilasi, 1976).

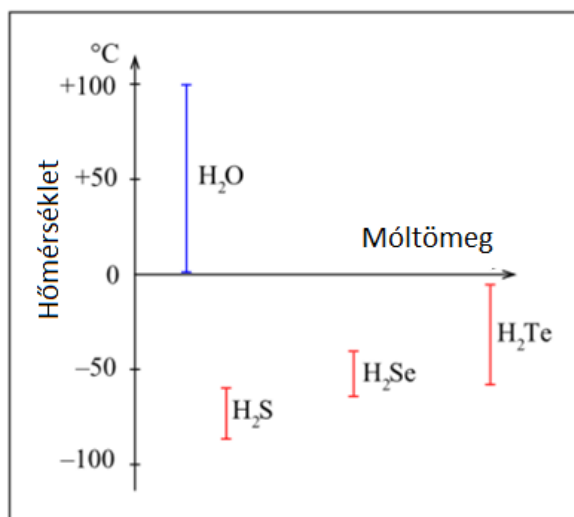
Bár a kén-, a szelén- és a tellúratomok tömege és mérete az oxigénatoméhoz képest egyre nagyobb, atomszerkezetük hasonló, a legkülső elektronhéjon mindegyiküknek hat elektronja van. Ebből következik, hogy mindegyikük két hidrogénatommal képez molekulát. A molekulák tömege a



sorrendben nő. A 10. ábráról leolvasható ezeknek a vegyületeknek az olvadás- és forráspontja a molekulatömeg függvényében, tehát az a hőmérséklet-tartomány is, amelyben 10^5 Pa (1000 hPa) nyomás esetén cseppfolyós halmazállapotúak.

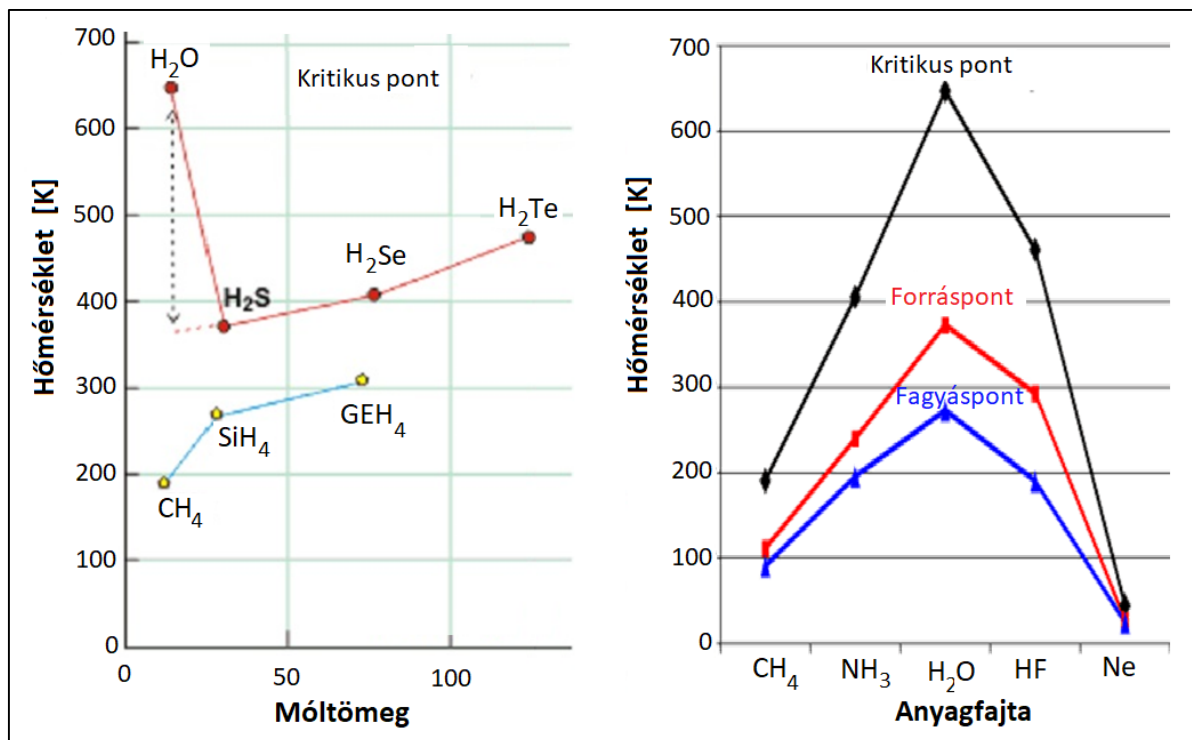
Figyelembe véve a dipólus molekulák közötti összetartó erőt, ezen adatok alapján a víz forráspontjának -80 °C-on, fagyáspontjának pedig -100 °C hőmérsékleten kellene lennie. A valóságban azonban a víz forráspontja lényegesen magasabb és a jég olvadáspontja is mintegy 100 K-nel magasabban van a vártnál. A jégben minden vízmolekula négy hidrogénkötést hoz létre (kettőt donorként, kettőt akceptorként), és viszonylag stabil és statikus kristályszerkezet keletkezik. A jég kötéseinek feltörése nagy energiát igényel, így az olvadáspont magasabb hőmérsékletre kerül. A folyékony vízben is sok hidrogénhid van. (Minél alacsonyabb a hőmérséklet, annál több.) A H-hidak megakadályozzák a molekulák kilépését a víz felszínéről, azaz a párányomás csökken. A forrás azonban csak akkor következhet be, amikor a párányomás eléri a külső nyomást. Emiatt a forráspont magasabbra kerül.

Érdekes egy pillantást vetni a víz kritikus pontjára is más vegyületekkel összehasonlítva (12. ábra)! A víz kritikus pontja mintegy 250 K-nel magasabban van mint a periódusos rendszer VIA oszlop elemeinek hidridjeivel való összevetésből adódna, de a IVA elemeinek hidridjeiéhez képest is sokkal magasabban van. Ezt azzal magyarázhatjuk, hogy a kritikus pont csak akkor érhető el, ha a vízmolekulák közötti kölcsönhatás meghatározott küszöb alá esik. A vízmolekulák hőmozgása a molekulák közötti H-hidakat csak jóval magasabb hőmérsékleten képes felszakítani, mint a többi anyagokat összekötő Van der Waals-féle kötéseket.



11 ábra: A vízhez hasonló molekulászerkezetű vegyületek olvadás- és forráspontja a molekulatömeg függvényében.

Figure 11: Melting- and freezing-point of some materials which have water like molecule structure.



12. ábra: A víz kritikus pontja a IVA és VIA oszlop elemeinek hidridjeivel (balra) és izoelektronos molekulákkal (jobbra) (Chalmers nyomán, http://www1.lsbu.ac.uk/water/phase_anomalies.html#Cpt).

Figure 12: Comparison of the Critical point of water with that of the IVA és VIA hydrids (left) and with isoelectronic molecules (right) (after Chalmers http://www1.lsbu.ac.uk/water/phase_anomalies.html#Cpt)

Magas fajhő és latens hő

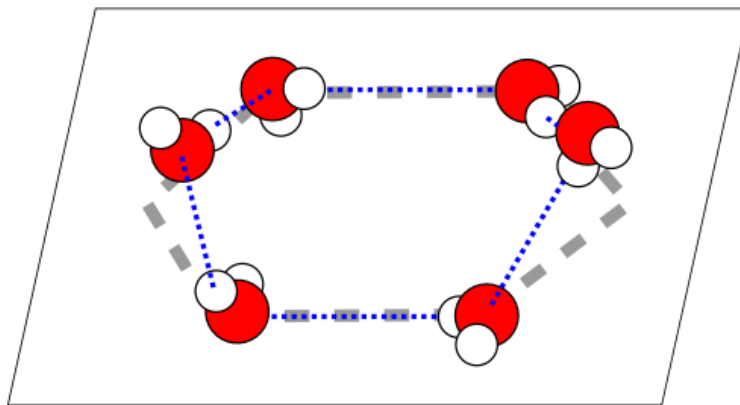
Az ammóniától eltekintve, a folyadékok között a víz fajhője a legnagyobb. A tömeg-egységnyi vízre (folyadék) vonatkozó állandó térfogaton (c_V) és állandó nyomáson (c_p) vett fajhő rendre $4137,5 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ és $4181,9 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (25°C -on). A víz melegítése során a molekulák hőmozgása erősödik és egyre több és több H-híd szakad fel. Ez nagy energiát igényel. Az is mutatja, hogy a víz (folyadékvíz) fajhőjében a H-hidak felszakítása nagy szerepet játszik. Teljesül továbbá, hogy a jég és a vízgőz fajhője nagyjából fele akkora, mint a vízé (Sem a gőz, sem a jég melegítésekor nem szakadnak fel H-hidak.). Amikor a víz hűl, akkor a magas fajhő miatt sok energia szabadul fel. A víz fajhője a szárazföldet felépítő anyagokénál is kétszer, háromszor nagyobb (*Az univerzum egyik legnagyobb fajhőjű anyaga.*). Emiatt a tengervíz is lassabban és kevésbé melegszik fel, valamint lassabban és kevésbé hűl le, mint a szárazföld: a víz a nyáron elraktározott hőmennyiséget télen lassan bocsátja ki (óceáni éghajlat). Ennek egyik legfontosabb következménye, hogy a szomszédos szárazföldi területek éghajlatára kiegyenlítő hatással van (télen fűt, nyáron hűt). Hozzájárul ehhez az is, hogy a tengervíz sokkal nagyobb mélységig melegszik fel, mint a szárazföld, mert a napsugarak 100 m mélyre is lehatolhatnak a vízbe. A víz hullámozása és áramlása tovább növeli a felmelegedő vízréteg vastagságát. Az Északi-tengerben például a nyár folyamán 30–40 m vastag vízréteg melegszik át. A hullámozás átkeverő hatása miatt eddig a mélységig nagyjából azonos a víz hőmérséklete, lejjebb azonban még a legmelegebb nyárban is ugrásszerűen csökken.

A H-kötésnek köszönhetően a víz párolgási hője a legnagyobb a molekuláris folyadékok között. A forrásponton a H-hidaknak még mintegy 75%-a létezik és mivel a légneművé váláshoz lényegében minden H-hidat fel kell szakítani, a latens hő nagyon nagy (2257 kJ kg^{-1}). A hőmérséklet csökkenésével a H-hidak száma is nő, így a víz párolgáshője még nagyobb lesz. Természetesen a szublimációs hő, ami jó közelítéssel a fagyáshő és a párolgási összege, szintén kivételesen magas. A légköri vízről szóló cikkünkben (Weidinger & Tasnádi, 2020) megmutatjuk, hogy a nagy latens hő miatt a víz légköri körforgalma során szállított energia több mint 20%-át teszi ki a teljes légköri energiaforgalomnak.

A vízsűrűség anomáliái

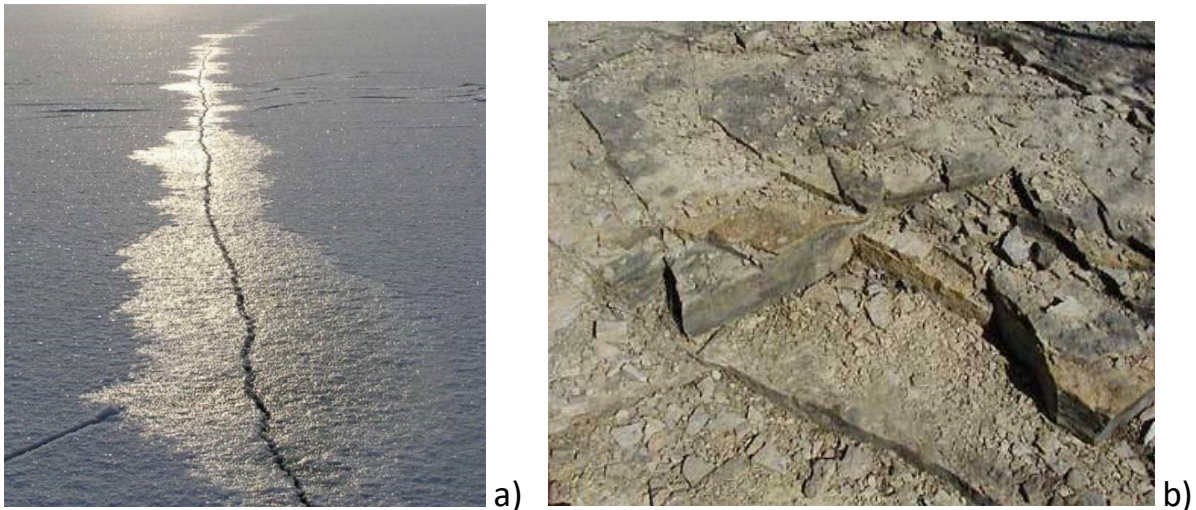
A víz egyik sajátos tulajdonsága, hogy szilárd állapotában kisebb a sűrűsége, mint folyadék halmazállapotban: a jég úszik a víz felszínén. Ez a ritka tulajdonság a víz szerkezetének ismeretében érthetővé válik. A vízmolekulák közötti H-kötés nem állandó, a hőmozgásnak köszönhetően folyamatosan felszakad és újraalakul. Hőmérséklettől függő verseny alakul ki a hőmozgás és a hidrogénkötés között: a H-kötés a rendezettség, a hőmozgás pedig a rendezetlenség irányában működik. Magas hőmérsékleten a hőmozgás dominál, alacsonyabb hőmérsékleten pedig a stabilizáló hidrogénhidak. A hőmérséklet csökkenésével a hőmozgás kisebb mértékű lesz, ami a sűrűség növekedésének irányába hat. Emiatt a hidrogénhidak egyre kevésbé szakadnak fel, stabilizálódnak. Ez a stabilizálódás, ha dominánssá válik, akkor már a sűrűség csökkenését segíti, mivel a hidrogénkötések hosszabbak a kovalens kötésnél, és „kifeszítik” a szerkezetet (13. ábra).

A két ellentétes hatás eredményeképpen a víz sűrűsége $+4 \text{ °C}$ -on a legnagyobb. Ez a sűrűségmaximum a fagyáspont közelében van, a víz további hűlésekor a víz sűrűsége már csökken. A víz sűrűségének fagyás közben történő csökkenése térfogat növekedéssel jár. Ez a 9%-os térfogat-növekedés okozza a befagyott édesvízű tavak felszínén a jég repedését, az ún. rianást. Hasonló folyamat okozza a kőzetek repedését is: a repedésekbe nyáron beszivárgó víz télen jéggé fagy, térfogata megnő, az így keletkezett nyomás tovább feszíti a repedést (14. ábra).



13. ábra: A H-híd kötéstávolsága nagyobb, mint a kovalens kötésé, ezért atomi skálán a hexagonális forma nem síkidom.

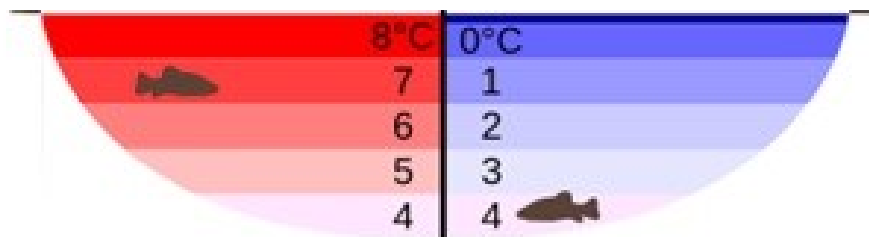
Figure 13: H-bond length higher than covalent bond length therefore in atomic scale the hexagonal form in clusters is not a plane figure.



14. ábra: a) Rianás a Balaton jegén, b) Kőzetek repedése.

Figure 14: a) Split on the Balaton ice b) Rock cracking.

Télen az édesvízi tavak befagyásakor a felszín közelében a hőmérséklet a mélységgel növekszik, ami a vízi élővilág számára rendkívül kedvező (15. ábra). A tavak nem alulról, hanem felülről fagynak be, mivel a víznek nagyobb a fajhője, mint a levegőnek, így lassabban hűl le. A külső hideg levegő hatására a vízfelszín fagy be először. A jégréteg nagyon lassan vastagszik, a jég rossz hővezető képessége miatt. A víz anomális sűrűségváltozása miatt a +4 °C-os víz lesz legalul.



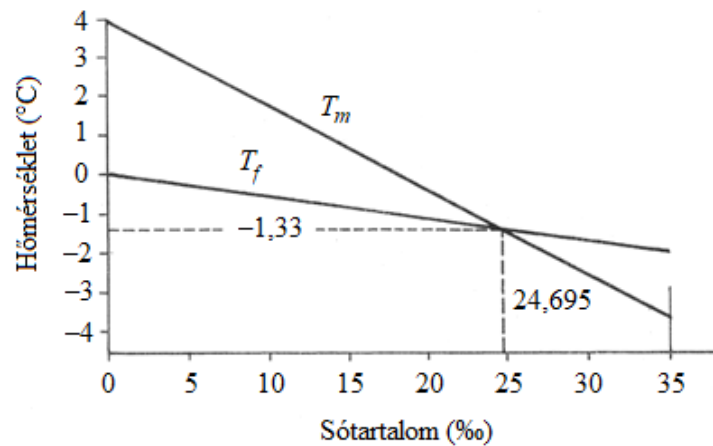
15. ábra: Télen a halak mélyebbre úszva áttelelnek a befagyott tóban.

Figure 15: Fishes swim deeper in the lake to survive the winter.

Az édesvízi tavaknál tapasztalt „fordított” rétegződés a tengerekben nem jön létre, a tengervíz hőmérséklete a mélységgel monoton csökken. Ennek oka a tengervíz sótartalma. A vízben oldott só csökkenti a víz fagyáspontját (T_f) és a maximális sűrűséghez tartozó hőmérsékletet (T_m) is, de nem egyforma mértékben (16. ábra).

A tiszta víz maximális sűrűséghez tartozó hőmérséklete és fagyáspontja nem esik egybe. A 16. ábra jól mutatja, hogy mind a fagyáspont, mind a maximális sűrűséghez tartozó hőmérséklet lineárisan csökken a sótartalom függvényében. A sótartalom növelésével egészen a 24,7% koncentrációig a maximális sűrűséghez tartozó hőmérséklet a tiszta vízhez hasonlóan magasabb, mint a fagyáspont, a két egyenes ennél a sótartalomnál metszi egymást. A tengervíz átlagos sótartalma 35%, ennél a sótartalomnál a fagyáspont már magasabb, mint a maximális sűrűséghez tartozó hőmérséklet. A tengerekben a nagyobb sűrűségű víz hidegebb, így nincs fordított rétegződés (Pruppacher & Klett, 2001).

A víz fagyásakor a só nem épül be a jég kristályszerkezetébe, hanem zárványként kicsapódik, így az úszó jégtáblák só-zárványokat tartalmaznak.



16. ábra: A víz fagyáspontjának (T_f) és a hőmérséklet függvényében (T_m) kialakuló maximális sűrűségértékének változása a sótartalommal.

Figure 16: Change of the freezing point (T_f) and the temperature (T_m) where the density is maximal as a function of the salt content.

A víz felületi feszültsége

A felületi hártya különleges tulajdonságai régóta ismertek, a szappanhártyaokról szóló első írásos emlék jócskán időszámítás előttről származik (b.c. 3000), babiloni ékírásos kőtábla rögzíti (Rajkovits, 2017). Ennek ellenére a felületi feszültség anyagjellemzőként csak akkor vált tudományosan is megalapozott fogalommá, amikor *Eötvös Loránd* eljárást dolgozott ki pontos mérésére és megfogalmazta a tiszta folyadékok felületi feszültségének hőmérséklet függését leíró univerzális *Eötvös-szabályt*. (Eötvös, 1886) *Eötvös* a felületi feszültséget a folyadékok molekulaszervezetével hozta kapcsolatba.



17. ábra: A nyugvó vízártya rugalmas hártyaaként viselkedik, a hullámhossz összemérhető a molnárpoloska lábainak fesztávolságával. [2 – www.cesio.eu]

Figure 17: The surface of the static water is similar to an elastic membrane, where waves can propagate. The wave length is comparable with the span of the feet of the aquatic insects. [2 – www.cesio.eu]

A víz-levegő határfelületi feszültség értéke a molekulák közötti kohéziós erő, és a hidrogénhid-kötés következtében kialakuló klaszter szerkezet miatt viszonylag nagy, kb. 72 mN m^{-1} , ennél csak a folyékony fémeké, pl. a higanyé nagyobb (közel 480 mN m^{-1}).

A nagy felületi feszültség következménye a víz felszínén kialakuló stabil, deformálható hártya, ami lehetővé teszi bizonyos vízi állatok életét a tavak felszínén. A poloskák, vízimolnárkák, vízipókók a vízen szökdecselve akár 1 m s^{-1} sebességgel is haladhatnak

(17. ábra). Érzékelné tudják a rugalmas hártján keltett hullámokat, sőt a hullámhosszat szükség esetén lábaikkal be is tudják mérni. Ez segíti őket a közeledő társak, illetve ellenségek azonosításában (Rajkovits, 2018).



18. ábra: A vízhártya alulról.

Figure 18: Water film from underneath.

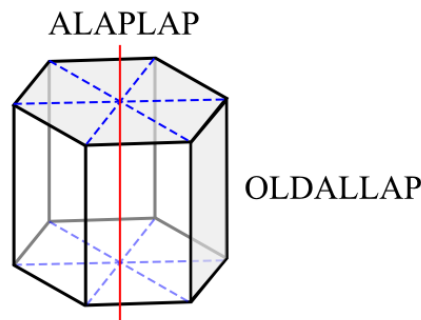
A vízhártyát nemcsak felülről, hanem alulról is lehet deformálni, amit sokszor láthatunk az úszóversenyeken készített fotókon. A 18. ábrán jól látszik, hogy az úszó fejével még nem lyukasztotta át teljesen a vízhártyát: az optikai torzulás a vékony vízrétegnek köszönhető. A vízhártya deformációja azonban nem ugyanazzal a mechanizmussal működik, mint a rugalmas gumihártyáé. Rugalmas anyagok megnyúlása esetén az anyagban a molekulák távolsága megnő, emiatt a belső feszültség is növekszik. Ezért kell nyújtáskor, azaz a rugalmas hártya felületének növelésekor munkát végeznünk. Vízhártya esetében a belső feszültség a felület növekedésekor nem változik, mivel a felület nem nyúlással, hanem új felület képződésével növekszik. Ilyenkor folyadék belsejéből további folyadékrészecskék jutnak a felszínre. Ehhez azért szükséges munkavégzés, mert a felszínen lévő molekulák helyzeti energiája nagyobb, mint a víz belsejében lévőké. A felületi feszültség megértéséhez érdemes ismét megvizsgálni a vízmolekulák között ható erőket. Amint már említettük, a molekulák közötti erők rövid hatótávolságúak. Ezért a víz tömbfázisának belsejében adott molekulát vizsgálva csak egy kicsiny gömbbe, az ún. hatásgömbbe eső molekulák által kifejtett erőket kell figyelembe venni. A hatásgömb szimmetrikus, és a kiválasztott molekulára a többi molekula részéről ható erők eredője lényegében zérus. (A kiválasztott molekulára ható nehézségi erő ebben az esetben elhanyagolható.) A víz felületén azonban a hatásgömb aszimmetrikussá válik: egyik fele a levegőbe kerül. Ennek ellenére minden felületi molekula egyensúlyi helyzetben lesz. A felületi réteg általában fellazul, a molekulák távolabb kerülnek egymástól, hogy a kohéziós és adhéziós erők egyensúlyba kerülhessenek. Tipikus tévedés az, hogy a felületen lévő molekulákra a folyadék belseje felé ható eredő erő hat, vagy az, hogy a felületi réteg a hatásgömb aszimmetriája miatt ráfeszül a folyadékra. A folyadékhártyát a felületi feszültségből származó erők mindig a hártya síkjában feszítik ki.

A felületi feszültség következménye az is, hogy a vízcseppek hétköznapi körülmények között stabil gömb alakot vesznek fel, így lesz a legkisebb a felületük, és ezzel együtt a felületi energiájuk is.

A hópelyhek kristályosodása

Már írtunk röviden a jég hexagonális szerkezetéről, ami a vízmolekulák közötti H-kötések következménye. A H-kötések jelentős szerepet játszanak a hópelyhek morfológiájában is. A hópelyhek nem esés közben megfagyott vízsepppek. Úgy keletkeznek, hogy vízgőz-molekulák kondenzálódnak közvetlenül a szilárd jégfelületre, akárcsak a felhőkben. Alakjuk kristálynövekedési folyamatot mutat. A kristályok makroszkopikus alakja és szimmetriája erősen függ az elemi rácsszerkezettől, a rácsot felépítő atomok illetve ionok kapcsolódási szimmetriájától. A hópelyhek mérete általában néhány mm. A hókristályok tulajdonságait *Illy Judit* munkája alapján foglaljuk össze (Tasnádi & Illy, 2018).

A jég egyensúlyi körülmények között szabályos hatszöges kristályokká nő (19. ábra). A hexagonális szerkezetű makroszkopikus kristályoknak két jellemző kristályformája a bázis (0001) és a hexagonális prizma (az alaplap és az oldallap). A hókristályok a felhőkben egészen egyszerű, hexagonális jégkristályként születnek aprócska szennyező magokon. Későbbi fejlődésük a felhő hőmérsékleti és nedvességviszonyaitól függ, kialakulásuk azonban nem egyensúlyi folyamat. A hópelyhek különleges és egyedi képződmények, nincs két egyforma hópehely (20–24. ábra). Bár a születő kristálymagok még nagyon egyformák, már kismértékben eltérő körülmények között is másként fejlődnek, ugyanakkor a hexagonális alakzatot és szimmetriát továbbra is megtartják a kristálycsírák.

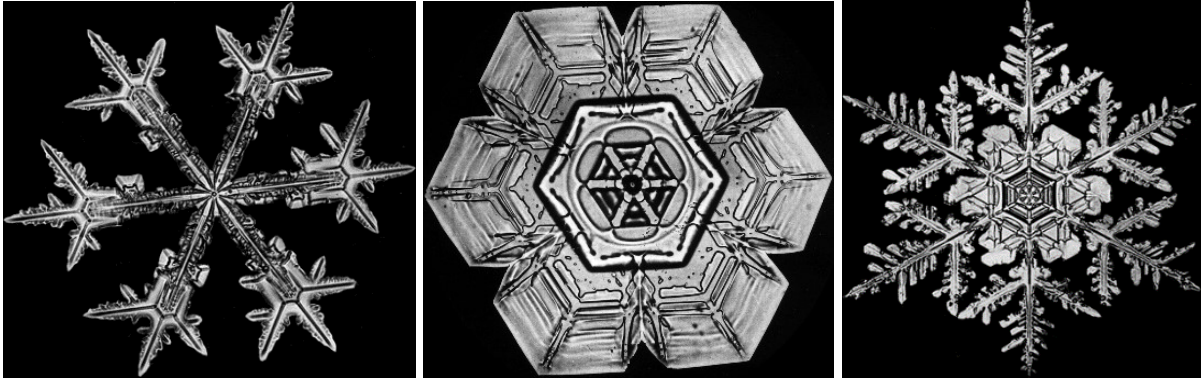


19. ábra: Hexagonális szerkezet.

Figure 19: Hexagonal structure.

A hópelyhek morfológiai (alak szerinti) változatosságát és kristályosodási folyamatát sokan vizsgálták, a jelenségnek nagy irodalma van (Libbrecht, 2007). A hópelyhekről fényképek alapján készítettek alaktani katalógusokat. A hópelyhek fényképezése nem egyszerű feladat, az idők folyamán többféle technikát dolgoztak ki. Az első hópehely fényképgyűjteményt *Wilson Bentley* vermonti farmer készítette hobbi fényképészként még a 20. század elején (20. ábra). Közel 5000 felvételt készített fotólemezre, halála után jelent meg összefoglaló könyve (Bentley & Humphreys, 1931). Mikroszkóp alatt fényképezett úgy, hogy a sötét háttér előtt lévő kristályokat hátulról világította meg. Részletesebb információk a fényképezés módszeréről és további felvételek a [3 – snowflakebentley.com] honlapon találhatóak.

Ukichiro Nakaya (Nakaya, 1954) volt az első, aki szisztematikusan vizsgálta a hókristályokat és katalogizálta őket. Először állított elő kísérletileg hópelyheket kontrollált laboratóriumi körülmények között, ún. konvekciós kamrában. A fényképek alapján megállapítható, hogy a hópelyhek mind a természetben, mind pedig mesterséges, laboratóriumi körülmények között ugyanolyan típusokban jelennek meg. A fényképek, a lemezes illetve hasáb formájú pelyhek jellegzetes típusait mutatják (21–23. ábra).



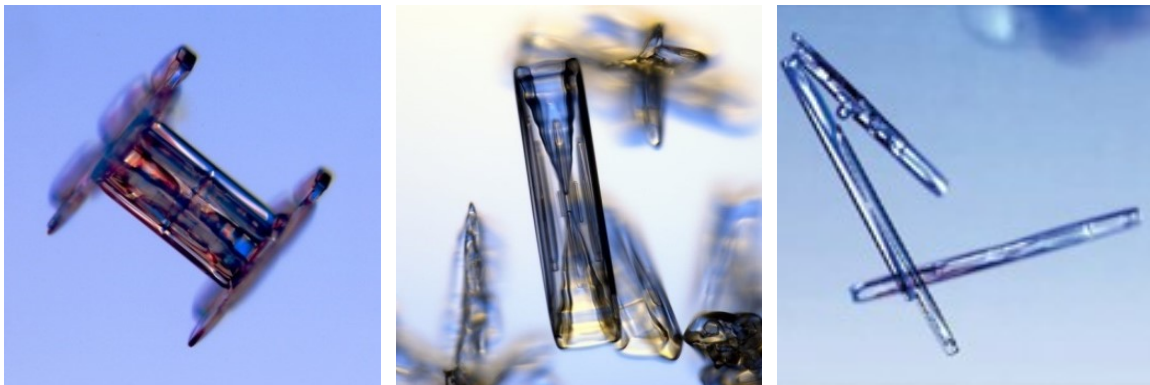
20. ábra: Wilson Bentley felvételei: Jól látszik a felvételen, hogy a hókristályok nem fehérek, hanem átlátszóak (forrás: [4 – en.wikipedia.org]).

Figure 20: Bentley's Photos: They well demonstrate that snowflakes are not white but transparent (source: [4 – en.wikipedia.org]).



21. ábra: Hatszögletű lemez, csillag lemez és dendrites kristály.

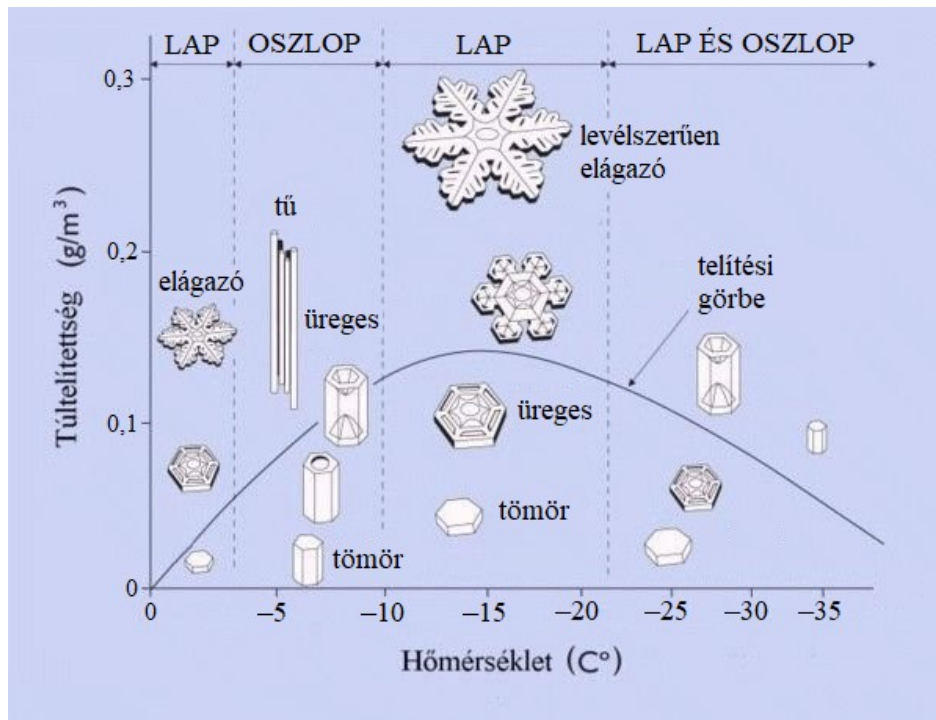
Figure 21: Hexagonal plate, stellar plate and dendritic crystal.



22. ábra: Tömör hasáb, üreges oszlop, tű.

Figure 22: Solid column, hollow column, needle.

Nakaya szisztematikus vizsgálatait azt mutatták, hogy a morfológia alapvetően a hőmérséklettől és a túltelítettség mértékétől függ az alábbi összefoglaló diagram szerint a 23. ábrán bemutatott módon (Czelnai, 1979).



23. ábra: A jégkristályok alakja a hőmérséklet és a tútelítettség függvényében.

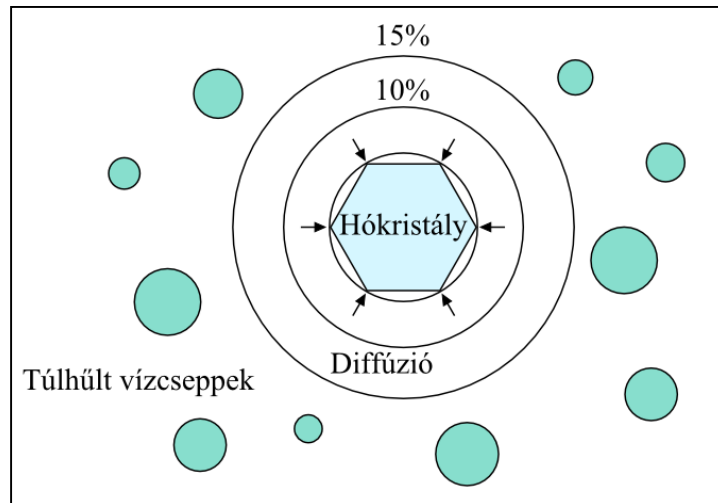
Figure 23: Crystal shapes as function of temperature and excess vapor density.

A diagram (23. ábra) jól szemlélteti, hogy

- $T = -2$ °C körül lemez alakú és dendrites kristályok képződnek;
- $T = -5$ °C körül oszlop alakú kristályok figyelhetők meg;
- $T = -15$ °C körül megint a lemez alak dominál, és növekvő tútelítettségnél egyre bonyolultabb a szerkezet;
- $T < -25$ °C esetén pedig vegyesen, lemez és oszlopforma egyaránt kialakul.

A tútelítettség növekedésével a kristályok szerkezeti komplexitása nő. A hőmérséklettől függő morfológiai különbség annak a következménye, hogy a kristályok képződéskor az atomi kapcsolódásoknak megfelelően kialakuló kristálytani síkok a hőmérséklettől függően nem egyforma sebességgel növekednek (24. ábra).

Érdekes, hogy a hópehelyek változatossága a sarkokon megszűnik, a különösen hideg és száraz körülmények között a hókristályok nagyon egyszerű formájúak. Ennek köszönhetően jönnek létre a különlegesen szép sarki halojelenségek.



24. ábra: Kristály növekedése nagy túltelítettség esetén.

Figure 24: Crystal growth in case of high excess vapor density.

Áltudományos nézetek, babonák

A víz hétköznapi jelenléte, ismertsége ellenére különleges tulajdonságaival tápot adott, és ma is tápot ad számos áltudományos nézetnek is. Úgy érezzük, tanulságos lehet ezek közül is néhánynak megemlítése, mert hazánkban is felkapott babonákká váltak.

A víz a leggyakrabban használt oldószer, így a homeopátiás gyógyszerek alapelemévé vált. A „kutyaharapást szűrivel” elven alapuló homeopátia állítása szerint a betegségek gyógyíthatóak, ha a mérgezést, rosszulletet okozó anyagot óriási hígításban beadjuk a betegnek. A hígítás 20, 50 és akár 200 lépésben is történhet, és minden lépésben 100-szoros. Nyilvánvaló, hogy a „gyógyszer” esetenként már csak legfeljebb egy két molekulát, vagy semmit sem tartalmaz az eredeti anyagból. A homeopátiás gyógyszereknek tudományosan kimutatott hatása nincsen, legfeljebb placebóként alkalmazhatók. A homeopátiáról az Európai Akadémiák Tudományos Tanácsadó Testületének (EASAC) visszafogott állásfoglalása szerint „nem állnak rendelkezésre a homeopátia hatékonyságát alátámasztó, tudományosan elfogadható és reprodukálható bizonyítékok. Ez az alternatív gyógyítási módszer [5 – www.urbanlegends.hu] elterjedtsége ellenére egyszerű szélhámosság.

A homeopátiához szorosan kapcsolódik a „víz memóriájáról” szóló nézet. Az állítás az, hogy a homeopátiás szert hígító víz, még akkor is őrzi a hígított szer hatását, ha a vízben az eredeti szer egyetlen molekulája sem található, azaz a víz emlékezik arra, hogy milyen előzetes kezelésen ment keresztül. A kérdés részletes elemzése megtalálható Chaplin már többször idézett honlapján [6 – www1.lsbu.ac.uk]. Itt egyetlen ellenérvet idézünk. A vízben, bár kialakulhatnak molekulacsoportok, az egyes H-kötések élettartama annyira rövid (ps), hogy egyéb szennyező nélkül a víz nem tárolhat hosszabb ideig információt.

Ugyancsak a víz emlékező tulajdonságára alapoznak a *PI* víz („élővíz”) árusítói és pozitív hatásának hívői is. A *PI* víz esetén az emlékezést külső mágneses tér hatásának tulajdonítják. Érdeemes az interneten elolvasni néhány, a *PI* víz csodálatos hatását taglaló cikket. Annak ellenére, hogy Riedel Miklós és munkatársai már 1995-ben egyszerű mérésekkel kimutatták, hogy a *PI* víz és a csapvíz között nincsen lényeges különbség, a babonák tovább élnek és rombolnak [1 – www1.lsbu.ac.uk].

Összefoglalás

A víz különleges tulajdonságaiért alapvetően a hidrogénhíd-kötések és a vízmolekula nagy elektromos dipólmomentuma a felelős. A H-kötések a jégben megszabják a kristályszerkezetet, a folyadékvízben (vagy egyszerűen a vízben) pedig molekulacsoportokat hoznak léte. A H-kötések felszakításához többlet energia befektetése szükséges, ezért a folyadékvíz különösen stabillá válik. Fajhője és latens párolgási hője kirívóan magas lesz. Hasonlóképpen felületi feszültsége is nagy. A H-kötéseknek köszönhető, hogy a víz sűrűsége 4 °C-on a legnagyobb, s a jég 9%-kal könnyebb, mint a víz. A víz anomális tulajdonságainak különleges szerepe van a légköri víz körforgásában és rajta keresztül a földi klíma alakításában. Ezekre hoztunk fel példákat, rámutatva a valóságos hatásokra és az általános babonákra.

Köszönetnyilvánítás: A tanulmány elkészítését a Magyar Tudományos Akadémia Tantárgy-pedagógiai Kutatási Programja támogatta.

Hivatkozások



- Bentley, W.A., Humphreys, W. J., 1931: Snow crystals. *Dover Pictorial Archive*, 224p. ISBN-13: 978-0486202877
- Bihari, P., 2012: Műszaki hőtan. EDUTUS Főiskola, Digitális Tankönyvtár.
https://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0017_42_muszaki_hotan/ch02s02.html
- Bodor, E., 1968: Szervetlen Kémia. Tankönyvkiadó, Budapest. 735p. Tankönyvi szám: 44326.
- Czelnai, R., 1979: Bevezetés a Meteorológiába I. Légkörtani alapismeretek. Tankönyvkiadó, Budapest. 231p. Tankönyvi szám: J3-1192.
- Eötvös, L., 1886: Über den Zusammenhang der Oberflächenspannung mit dem Molekular Volumen. *Annalen Der Physik Und Chemie, Neue Folge*, 27: 448–459.
<https://mek.oszk.hu/03200/03286/html/eotvos1/eotv6.html>
<https://doi.org/10.1002/andp.18862630309>
- Geresdi, I., 2004: Felhőfizika. Dialóg Campus Könyvkiadó, Budapest-Pécs, 272p. ISBN: 9639542091.
- Libbrecht, K., 2007: The Art of Snowflake: A Photographic Album, (epub) Voyager Press, 208p. ISBN-13: 978-0760347003
- Marx, Gy., 1978: Életrealó atomok. Akadémiai Kiadó, Budapest, 318p. ISBN 9630515431
- Nakaya, U., 1954: Snow Crystals: Natural and Artificial. Griffin Books (Stamford, CT, U.S.A.), Harvard University Press, 510p. ISBN-13: 978-0674811515.
<https://doi.org/10.4159/harvard.9780674182769>
- Nyilasi, J., 1976: A víz. Gondolat Zsebkönyvek, Gondolat Kiadó, Budapest. ISBN: 9632803442
- Ormándi, Zs., 2014: Klasszikus molekuladinamikai szimulációk víz-molekula klaszterekben. *BSc Szakdolgozat*, ELTE Kémia Intézet, 39p.
http://phys.chem.elte.hu/test/szakdolik/2014/OrmandiZsofia_BSc_2014.pdf
- Pruppacher, H.R., Klett, J.D., 2001: Microphysics of clouds and Precipitation. Springer, Berlin. 954p. ISBN 978-0-306-48100-0.

- Rajkovits, Zs., 2017: Szappanhártyák és -buborékok tudománytörténete. *Fizikai Szemle*, 48(4): 121–129. http://www.epa.oszk.hu/00300/00342/00330/pdf/EPA00342_fizikai-szemle-2017-04_121-129.pdf
- Rajkovits, Zs., 2018: Fizika az élő természetben. *Fizikai Szemle*, 68(7–8): 256–263. http://www.epa.oszk.hu/00300/00342/00330/pdf/EPA00342_fizikai-szemle-2018-07-08_256-263.pdf
- Tasnádi, P., Illy, J., 2018: Víz a légtérben és a talajban. Budapest, Kézirat.
- Weidinger, T., Tasnádi, P., 2015: Víz a légtérben. *Magyar Kémikusok Lapja*, LXX(11): 344–349. HU ISSN 1588-1199 (online), https://www.mkl.mke.org.hu/images/stories/downloads/2015/2015_11.pdf
- Weidinger, T., Tasnádi, P., 2020: Víz a légtérben. *Egyetemi Meteorológiai Füzetek*, 32 (Szerk.: Weidinger, T.): 81–104. (Jelen kiadványban.) <https://doi.org/10.31852/EMF.32.2020.081.104>
- Zhang, J., Chen, P., Yuan, B., Ji, W., Cheng, Z., Qiu, X., 2013: Real-Space Identification of Intermolecular Bonding with Atomic Force Microscopy. *Science*, 342(6158): 611–614. <https://doi.org/10.1126/science.1242603>

Internetes hivatkozások

- [1 – www1.lsbu.ac.uk]: A víz anomális tulajdonságai (Chaplin honlapja alapján): (http://www1.lsbu.ac.uk/water/water_structure_science.html)
- [2 – www.cesio.eu]: Molnárpóloska a vízen, és ami mögötte van: <http://www.cesio.eu/index.php/about-surfactants/what-are-surfactants>
- [3 – snowflakebentley.com]: A hópelyhek fényképezéséről: <http://snowflakebentley.com/>
- [4 – en.wikipedia.org]: Wilson Bentley – információk az Internetről: https://en.wikipedia.org/wiki/Wilson_Bentley
- [5 – www.urbanlegends.hu]: Európai Akadémiák Tudományos Tanácsadó Testületének (EASAC) állásfoglalása: <http://www.urbanlegends.hu/2017/09/europai-tudosok-allasfoglalas-homeopatia-easac/>
- [6 – www1.lsbu.ac.uk]: A babonák tovább élnek, a PI víz és a csapvíz között nincsen lényeges különbség: http://www1.lsbu.ac.uk/water/memory_of_water.html#r1206
-

ORCID

- Tasnádi P.  <https://orcid.org/0000-0002-7813-5269>
- Weidinger T.  <https://orcid.org/0000-0001-7500-6579>