

Sveučilište u Zagrebu

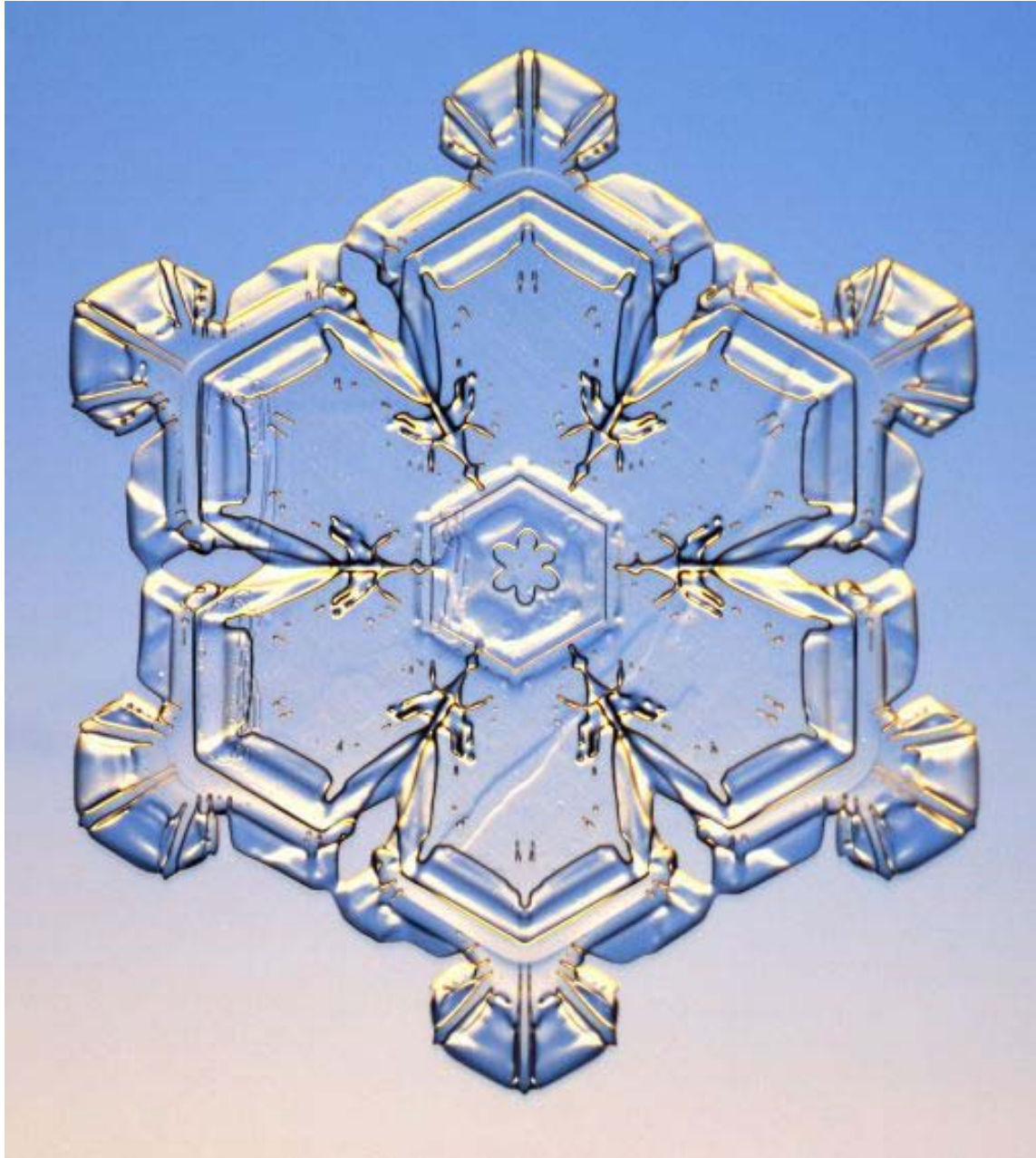
PMF- Matematički odjel

Tea Fabijanić

FIZIKA KRISTALA SNIJEGA

Diplomski rad

Zagreb, rujan, 2004.



Ovim putem želim se zahvaliti mentoru profesoru Ivi Batistiću, na svesrdnoj pomoći i korisnim savjetima, i mojim roditeljima na beskrajnom strpljenju i podršci.

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. POVIJESNE ČINJENICE.....	3
3. PRIRODNI KRISTALI SNIJEGA	
3.1. OSNOVNO O KRISTALU SNIJEGA.....	9
3.2. MORFOLOGIJA KRISTALA SNIJEGA.....	13
3.2.1. MORFOLOŠKI DIJAGRAM.....	15
3.3. JEZGRA KRISTALA SNIJEGA.....	18
3.4. RAZVOJ PRIRODNOG KRISTALA SNIJEGA.....	20
3.5. VJEROJATNOST DA NAĐEMO DVA IDENTIČNA KRISTALA SNIJEGA.....	28
3.6. KLASIFIKACIJA KRISTALA SNIJEGA PREMA OBLIKU.....	29
4. UMJETNI KRISTALI SNIJEGA – ISTRAŽIVANJA	
4.1. RAZVOJ KRISTALA SNIJEGA POD UTJECAJEM ELEKTRIČNOG POLJA.....	38
4.2. RAZVOJ KRISTALA SNIJEGA U KONVEKCIJSKOJ KOMORI.....	43
4.3. FILM RAZVOJA KRISTALA SNIJEGA U LABORATORIJU.....	47
5. ZAKLJUČAK.....	48
6. REFERENCE.....	49

1. UVOD

Svake nas zime svojom čarolijom oduševе pahulje snijega. Nježne i krhke lebde nad nama i napokon pokrivaju tlo. Koliko puta smo kao djeca pokušavali zadržati ih na rukavicama i promatrati ih, ali nam nije uspijevalo jer je toplina našeg tijela uskoro obavila svoj zadatak i otopila pahulju. Kristali snijega su čovjeku najpoznatiji i najdostupniji prirodni kristali. Možemo reći da nam oni pokazuju svu ljepotu prirode u malom.



Slika 1.1.

Koja se to čarolija skriva u broju šest? To i slična pitanja postavljali su si gotovo svi znanstvenici koji su proučavali kristale snijega. Mnogi od njih posvetili su veliki dio svoga života proučavanju tih čarobnih kristala. Zašto se baš pojavljuju kao šesterokraki kristali i postoje li iznimke? Koji čimbenici utječu na razvoj snježnih kristala? Kako se razvija kristal snijega? Koji su uvjeti najpovoljniji za razvoj određenih oblika? Biti će to pitanja na koja ću pokušati odgovoriti u ovom radu.

U drugom poglavlju obratila sam pozornost na proučavanje kristala snijega kroz povijest, te ujedno i razvoj tehnika korištenih za proučavanje.

Nakon toga u trećem poglavlju promatrala sam prirodne kristale snijega kroz njihov razvoj. Od jediničnog kristala leda, preko razvoja i morfološkog dijagrama do same klasifikacije.

Konačno u četvrtom poglavlju obradila sam zapravo suvremene metode proučavanja i proizvodnje kristala snijega koje su znanstvenici uspjeli realizirati u laboratorijima, te na taj način nadopuniti morfološki dijagram kristala snijega.

1. POVIJESNE ČINJENICE

Mnogi su znanstvenici kroz povijest proučavali misterij kristala snijega – kako bi odgonetnuli zašto su oblikovani kao što jesu, odakle dolaze, gdje poprimaju formu, itd...

1.1 JOHANNES KEPLER



Slika 1.1.1. Johannes Kepler

1611.godine Johannes Kepler izdao je znanstveni rad pod nazivom “O šesterokrakoju pahuljici”[1]. Bio je to prvi rad nekog znanstvenika posvećen kristalima snijega. Kepler je postavio pitanje zašto kristali snijega uvijek imaju šesterostranu simetriju. Iako ne promatra sa gledišta atoma, Kepler pretpostavlja da je heksagonalna struktura posljedica morfološke strukture kristala snijega.

Mudro je prepoznao da je simetrija kristala zanimljivo znanstveno pitanje, no istovremeno je bio svjestan činjenice da nema potrebna sredstva da bi dao zadovoljavajući odgovor. Trebalo je proći 300 godina da bi se odgovorilo na Keplerovo pitanje, otkrićem rendgenske kristalografije.

1.2 RENÉ DESCARTES



Slika 1.2.1. Rene Deascartes

Filozof i matematičar René Descartes prvi je 1635.godine u knjizi “Les Meteores” zabilježio dovoljno precizan opis morfologije kristala snijega obzirom na to da je promatranja vršio *golim okom*. Ove su precizne bilješke sadržavale čak i dvanaesterokraki kristal koji je vrlo rijedak.

Uočio je da su pahuljice plosnate, vrlo ravne, prozirne, debljine nešto debljeg papira....i potpuno savršeno oblikovane u heksagone, izuzetno oštarih rubova i pravilnih kutova, da tako nešto čovjek ne može napraviti u tolikoj mjeri precizno.

1.3 ROBERT HOOKE



Slika 1.3.1. Dio skica Roberta Hookea.

Robert Hooke objavio je djelo *Micrographia* godine 1665. u kojem su se nalazile skice svega što je Hooke mogao vidjeti najnovijim izumom svog vremena mikroskopom. Među ostalim nalazile su se i skice kristala snijega koje su po prvi puta otkrile njihovu složenost i savršenu simetriju.

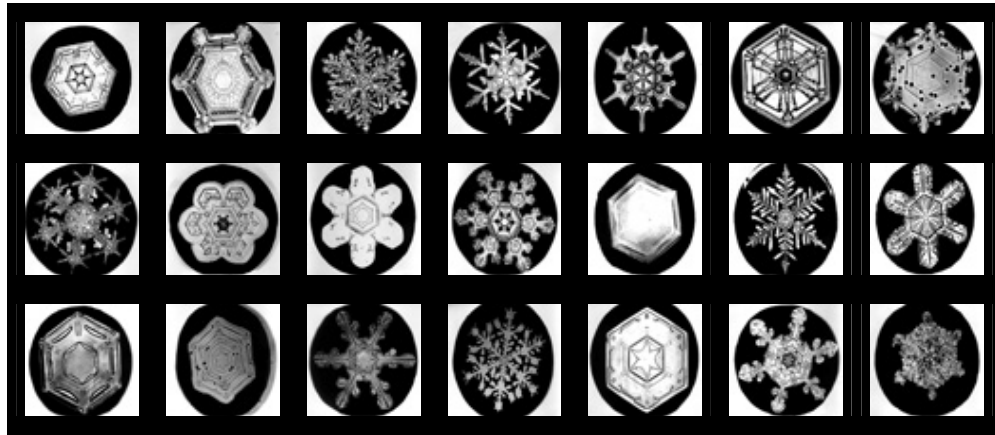
1.4 WILSON A. BENTLEY



Slika 1.4.1. Wilson A. Bentley pored svoje kuće sa dotad vrlo rijetkim strojem koji je mogao fotografirati uvećane kristale snijega.

Američki samouki fotomikrograf tijekom svog života fotografirao je oko 6000 snježnih kristala. 1931.godine izdao je svoju slavnu knjigu “Snow Crystals”, koja sadrži više od 2000 njegovih fotografija, a izdaje se još i danas.

Jedini problem je bio što je Bentley iznad svega više volio simetriju, stoga je fotografirao isključivo dvodimenzionalne kristale čije su fotografije bile simetrične i uredne, bez sjena.



Slika 1.4.2. Dio opsežnog Bentleyevog rada.

Tako danas promatrajući njegovu knjigu ne možemo naći niti jedan asimetrični kristal snijega. Na taj je način izbjegnuta većina neobičnih oblika kao i svi trodimenzionalni kristali. Osim što je isključio veliki broj neobičnih kristala nije ni precizno bilježio visinu ni uvjete u kojima je fotografirao kristale, već opisno, pa stoga njegova promatranja nemaju veliku znanstvenu vrijednost. S obzirom na to da je bio samouki fotograf, njegov je obol proučavanju kristala snijega uistinu golem. [2]



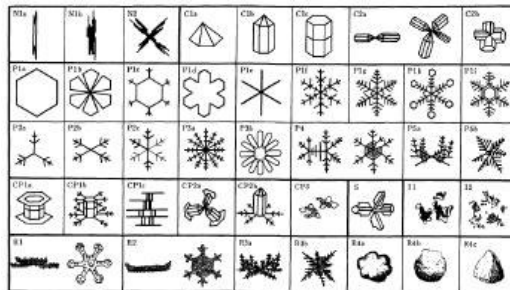
Slika 1.4.3. Savršenstvo kakvo je Bentley tražio kod svakog snimljenog kristala.

1.5 UKICHIRO NAKAYA



Slika 1.5.1. Ukichiro Nakaya u svom laboratoriju.

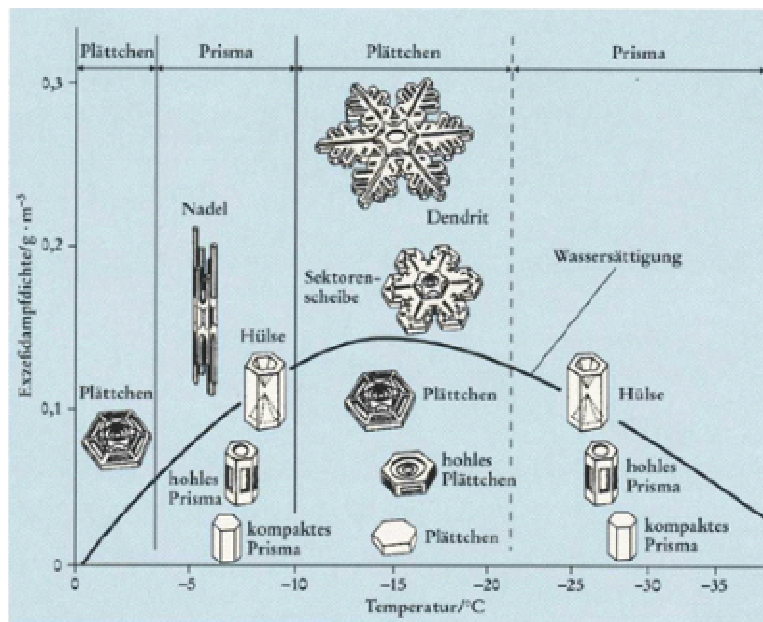
Ukichiro Nakaya bio je prva osoba koja je provela pravo sistematično promatranje kristala snijega, koje je rezultiralo velikim napretkom u razumijevanju nastanka snježnih kristala. Kao nuklearni fizičar koji je radio na otoku Hokkaido u Japanu, na kojem nije bilo ustanove za nuklearna promatranja, posvetio se proučavanju kristala snijega kojih je tamo bilo u izobilju. Provedeći vrlo detaljna promatranja svih oblika, vodio je i katalogizaciju svih značajnijih tipova kristala snijega. Svrstao ih je u 40 različitih kategorija. Za razliku od Bentleya, Nakaya je fotografirao sve oblike pahuljica, a ne samo savršeno simetrične.



Slika 1.5.2. Nakaya-ina klasifikacija u tabličnom prikazu. [3]

Najveći uspjeh bio mu je u tome što je uspio proizvesti umjetne kristale snijega u laboratoriju pod kontroliranim uvjetima. Prema studiji provedenoj na umjetnim kristalima Nakaya je mogao opisati morfologiju kristala u raznim uvjetima, što je vrlo važno za razumijevanje fizike nastanka kristala snijega. Kao rezultat toga danas imamo sve te podatke evidentirane u posebnom dijagramu koji nazivamo “Nakaya-in dijagram”. Prema tom dijagramu i prema

obliku kristala koji se proučava može se zaključiti u kakvim je meteorološkim prilikama nastao.



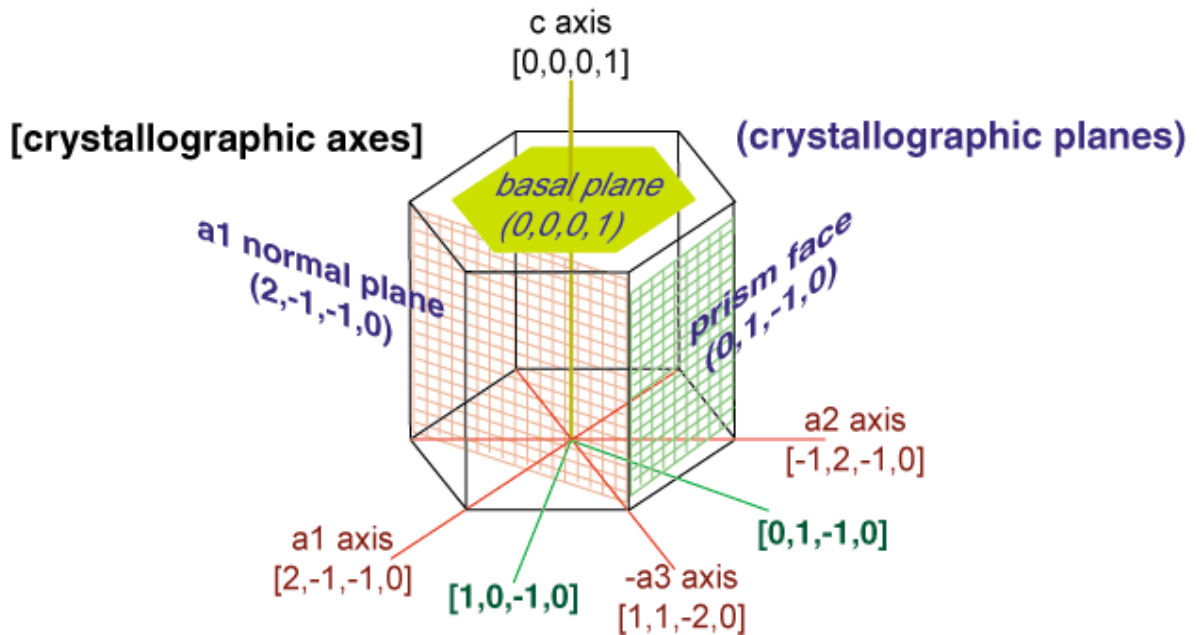
Slika 1.5.3. Modificirani Nakaya-in dijagram. Doradio ga je Kuroda. [3]

1954. godine u knjizi “Snow Crystals: natural and artificial”, Nakaya je objavio svoj rad. Knjiga obuhvaća sve od samih početaka do sistematičnih promatranja i preciznih znanstvenih opisa tog prirodnog fenomena. Možemo ga smatrati prvim znanstvenikom koji je sa fizičkog aspekta proučavao kristale snijega. Njegov rad na žalost ipak nije dao primjerice odgovor na pitanje: Zašto se morfologija snježnih kristala tako drastično mijenja i s najmanjom promjenom meteoroloških uvjeta?

Kroz proteklih pedesetak godina mnogi su znanstvenici pokušavali dati odgovor na ovo teško pitanje, no nisu uspjeli naći zadovoljavajući odgovor koji bi se odnosio na sve pojavne oblike koji se susreću. U posljednjih deset godina znanstvenici na otoku Hokkaido, a i neki američki istraživači, uspjeli su shvatiti jedan važni korak u formaciji samih kristala snijega, koji se odnosi na njihovu raznolikost oblika, do tada nepoznati kvazitekući sloj.

3. PRIRODNI KRISTALI SNIJEGA

3.1. OSNOVNO O KRISTALU SNIJEGA

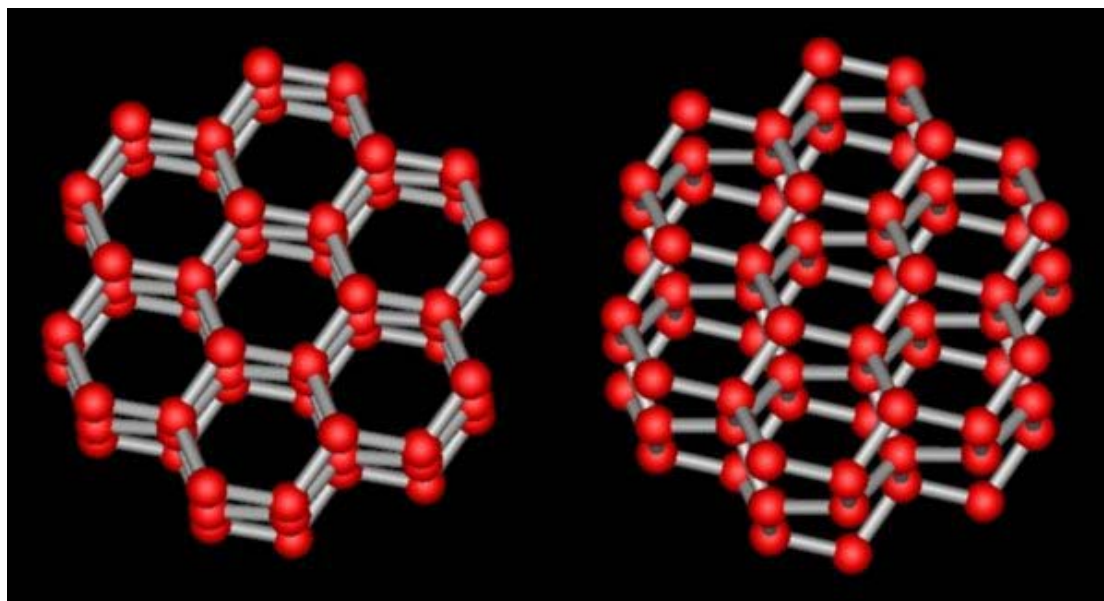


Slika 3.1.1. Jedinična ćelija kristala leda. Preuzeto sa [4].

Led poprima više od 10 različitih kristalografskih oblika, no promjene koje promatramo kod kristala snijega nikada nisu vezane na promjene kristalografske faze. Raspon temperature i tlaka u kojima se razvija snježni kristal pripada području heksagonalne strukture leda koju zovemo I(h)[3].

U ledu je svaka molekula vode okružena s četiri susjedne molekule vode pri čemu su dvije vodikovim vezama vezane na kisikov atom središnje molekule H_2O . Dva atoma vodika iz središnje molekule slično su povezana sa dva atoma kisika iz druge dvije susjedne molekule. Gledajući trodimenzionalno, četiri veze svakog atoma kisika usmjerene su prema četiri ugla tetraedra u kojima se nalaze atomi vodika. Takav temeljni raspored ponavlja se u prostoru tvoreći kristal leda.

Naravno da nije potrebno naglašavati, da heksagonalni raspored molekula u jediničnom kristalu ima za posljedicu tako specifičan oblik kristala snijega (slika 3.1.2) [5].



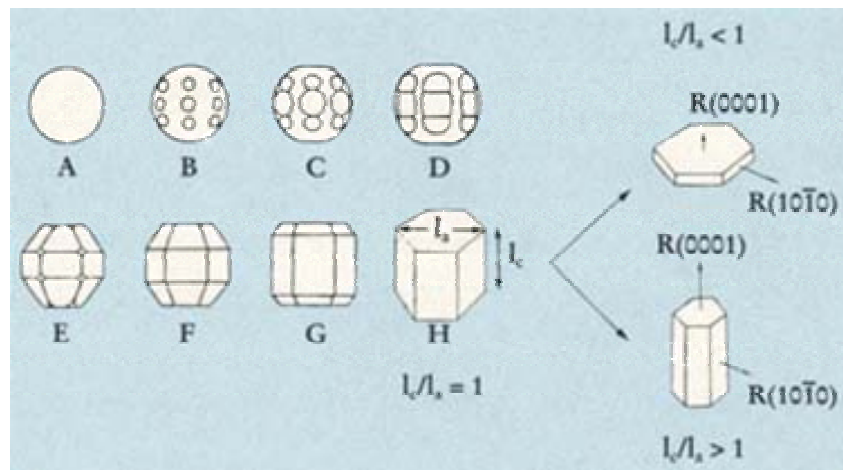
Slika 3.1.2. Ilustracija rasporeda atoma vodika i kisika u kristalu leda. preuzeto sa [4].

Atomi vodika u ledu raspoređeni su prema Bernal-Fowlerovim pravilima:

- 1) dva protona su od svakog atoma kisika udaljena 0.98Å , slično kao kod slobodne molekule vode
- 2) svaka molekula H_2O je orijentirana tako da su dva protona usmjerena prema dvama nasuprotnim atomima kisika
- 3) postoji samo jedan proton između dvaju susjednih atoma kisika
- 4) pod uobičajenim uvjetima svaka od mogućih kombinacija je jednako vjerojatna [6].

Kao što se vidi na slici 3.1.1., heksagonalna prizma sastoji se od dvije bazne plohe i šest bočnih ploha (pobočki). Obzirom na udaljenost baznih ploha

heksagonalne prizme dijelimo na “pločaste” i “stupčaste”. Oblik kristala ovisi o brzini razvoja pojedinih njegovih dijelova.



Slika 3.1.3. Prikaz ovisnosti oblika kristala o udaljenosti baznih ploha. Preuzeto sa [3].

Kada ploha $\{1010\}$ raste brže od bazne plohe $\{0001\}$, onda nastaje stupčasti kristal. Ukoliko razvojni proces teče obrnutim smjerom pa se bazna ploha razvija brže od pobočnih nastaje pločasti kristal [3].

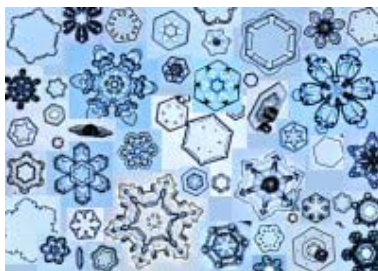
Izbočeni dijelovi kristala ne rastu najbrže, jer ponekad je za sistem nakon određene faze razvoja puno važnije, promatrajući s energetskeg gledišta, da rastu dijelovi koji nisu jako istaknuti. Kada bismo promotrili maleni kristal, mogli bismo primijetiti da mu je površina na molekularnoj skali prilično hrapava. Molekule vode iz zraka lako se vežu na tu hrapavu površinu. Plohe kristala, naime, teže tome da budu glatke na molekularnoj skali. Molekule vode iz zraka sve teže se priljubljuju uz glatke površine i rast kristala se usporava [5].

Kod proučavanja razvoja kristala najveći je problem što niti kvantna mehanika ne može dati približni odgovor na pitanje: kako će se brzo neka površina kristala razvijati. Danas se razvijaju razni kompjuterski modeli i simulacije, ali na kraju nisu od velike pomoći pri modeliranju brzine razvoja

kristala. Osnovni mehanizmi brzine rasta kristala snijega još nisu dovoljno istraženi. Ustanovilo se da brzina rasta kristala ovisi o temperaturi na kojoj se kristal razvija i prezasićenosti zraka vodenom parom, a uz to i o vrsti kristala koji nastaje. Ove razlike u brzinama rasta uz temperaturu, utječu na morfologiju kristala. Mnogo više saznat će se proučavanjem samih kristala snijega[6].

3.2. MORFOLOGIJA KRISTALA SNIJEGA

Promotrimo li samo jedan kristal snijega, možemo zaključiti da je Zemljina atmosfera najbolji laboratorij za proučavanje strukture tih kristala. Prirodan snijeg nalazimo u neizmjerljivo velikom broju oblika, neki od primjeraka su na slici 3.2.1.. Ovakvi primjerci uglavnom su mete fotografa, dok ima puno jednostavnijih oblika koji se promatraju u laboratorijima diljem svijeta i pomažu nam odgonetnuti fiziku tih čarobnih kristala.



Slika 3.2.1. Ova slika prikazuje svu raznolikost kristala snijega.

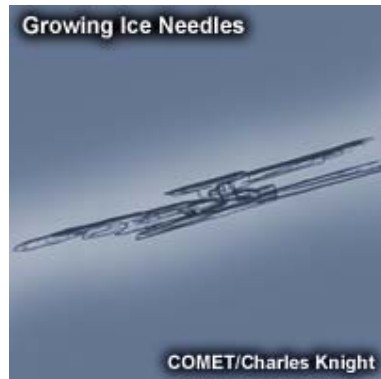
Oblik kristala snijega će ovisiti o uvjetima u kojima nastaje. Primjerice kristali snijega na južnom polu su vrlo maleni jer su tamo niske temperature i zrak je vrlo suh. Snježni kristali u takvom okruženju jako sporo rastu i nikada nisu jako veliki. Spori rast je najbolji način da se dobije jednostavan kristal snijega.[7]



Slika 3.2.2. Jednostavni heksagoni kakvi se razvijaju uglavnom na antarktičkom području.[4]

Prostori sa nešto blažom klimom od antarktičke imat će kao posljedicu kristale koji mnogo brže rastu, te uz to poprimaju i veći broj oblika. Primjerice:

jednostavne se prizme mogu razviti u tanke stupčaste kristale koji imaju prazno središte; stupčasti koji brže rastu, razvit će se u skupove dugačkih ledenih iglica (slika 3.2.3.);



Slika 3.2.3. Skup dugačkih ledenih iglica.[8]

često se vidi primjerak u obliku jednostavne heksagonske plohe, no veći kristali često teže kompleksnijoj, razgranatoj, strukturi sa ograncima ili dendritima.










Slika 3.2.4. a) razdijeljeni pločasti kristal b) uvećani *tsuzumi* kristal [12].

Permutacije svih osnovnih oblika daju nam beskonačan broj mogućnosti, pa čak i egzotične oblike poput *tsuzumi* kristala, koji se sastoji od stupčastog djela pokrivenog s obje strane pločastim završecima (vidi sliku br.3.2.4.b)).

3.2.1. MORFOLOŠKI DIJAGRAM

Ukichiro Nakaya je kao što smo već spomenuli prvi znanstvenik koji je osim klasifikacije kristala snijega došao mjerenjima do morfološkog dijagrama. Nakaya je otkrio da se kristali formiraju u različite oblike ovisno o uvjetima u kojima nastaju, točnije o temperaturi i prezasićenosti zraka. Detaljna mjerenja Nakaya je iskoristio kako bi formirao morfološki dijagram koji nam pomaže pri razumijevanju fizike kristala snijega. [8]

Tablica 3.1.

Oblici kristala snijega na različitim temperaturama i pri različitim razinama prezasićenosti vodenom parom		
Temperatura pri kojoj nastaje(°C)	Kristalni oblik	
0 do -4	TANKI PLOČASTI (thin plate)	
-3 do -6	IGLICE (Needles)	
-6 do -10	PRAZNI STUPČASTI (hollow columns)	
-10 do -12	PLOČASTI solid plates sector plates broad-branch plates	
-12 do -16	DENDRITI dendrites (kao i svi ostali pločasti)	
-16 do -22	PLOČASTI solid plates sector plates broad-branch plates	
-22 do -40	STUPČASTI solid columns hollow columns bullet rosette	

Kao što možemo vidjeti prema dijagramu **glavni oblik** kristala ovisi uglavnom o temperaturi i prezasićenosti zraka vodenom parom. **Izgled** dane strukture pak ovisi više o prezasićenosti zraka i brzini rasta kristala. Primjerice kada je vlažnost zraka velika stupčasti kristali koji brzo rastu pretvaraju se u kristalne iglice, a pločasti heksagoni se oblikuju u zvjezdaste dendrite. [3]

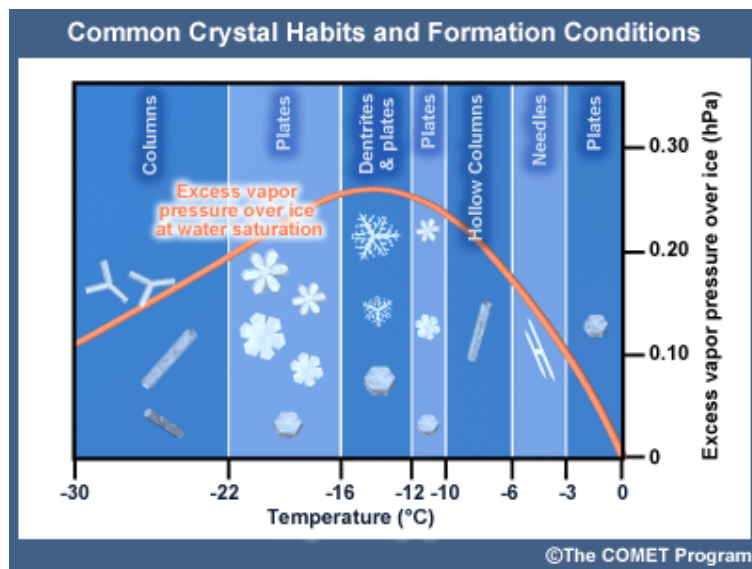
Izuzetno je neobična činjenica da se morfološki, dakle oblikom, u ovisnosti o temperaturi nekoliko puta izmjenjuju pločasti i stupčasti kristali. Unutar tek nekoliko stupnjeva morfologija kristala se mijenja od duguljastih, igličastih kristala (oko -5°C), do pločastih, tankih (-15°C). Svi podaci o ovisnosti oblika kristala o temperaturi evidentirani su u tablici 3.1., no nema podataka o razini prezasićenosti zraka vodenom parom. Njih možemo vidjeti u morfološkom dijagramu. Ovakva je pojava zapravo vrlo neobična, jer drugi materijali ne mijenjaju morfologiju na tako malim temperaturnim razmacima. [9]

Dva su glavna faktora koji utječu na izgled morfološkog dijagrama: intrinzična brzina rasta kristalnih ploha i difuzija. Promatramo li rast bočnih i baznih ploha uočavamo da:

kada pobočke rastu brže od baznih ploha dobivamo stupčaste;

kada bazne plohe rastu brže od pobočki dobivamo pločaste kristale. [3]

Dakle ono što nam morfološki dijagram odmah daje do znanja jest da različiti oblici kristala rastu različitim brzinama te da, te brzine, ovise i o najmanjoj promjeni temperature.



Graf 3.2.6. Morfološki dijagram.[9]

Ovaj morfološki dijagram je danas usavršena verzija Nakayainog morfološkog dijagrama, doraden prema najnovijim istraživanjima. Prikazana je ovisnost oblika kristala snijega o temperaturi i tlaku pare na kristal pri određenoj razini prezasićenosti zraka vodenom parom. [9]

3.3. JEZGRA KRISTALA SNIJEGA

Čestice koje pospješuju razvoj kapljica i kristala u oblaku su čestice raspršene u zraku i nazivamo ih *kondenzacijske jezgre* ili prema engleskom izrazu *cloud condensation nuclei*, skraćeno CCN. Od svih čestica koje lebde zrakom mali je postotak onih koje omogućuju razvoj kristala snijega. Njih nazivamo *ledene jezgre* ili prema engleskom izrazu *ice nuclei*, skraćeno IN. To je ujedno i jedini način na koji se može formirati kristal u jako ohlađenom oblaku. Kada je razvoj kristala započet kažemo da je IN čestica aktivirana. [9]

Sve CCN čestice ne omogućuju razvoj kristala, već postoji nešto posebno u kemijskom sastavu IN čestica. Vrlo je specifično to da voda mijenja svoje stanje u dodiru s takvom česticom, odnosno prelazi u čvrsto agregatno stanje.

Osim o samoj čestici, razvoj kristala ovisi i o gustoći vodene pare i temperaturi oblaka. Snižavanjem temperature povećava se vjerojatnost da će neka CCN čestica postati IN čestica, zbog povećanja gustoće vodene pare. Zapravo IN čestice neće biti aktivirane dok temperatura oblaka nije barem -4°C i ako zrak nije prezasićen vodenom parom. Međutim, čak i kada bi zadovoljili uvjet prezasićenosti i uvjet postojanja IN čestica, a ne bismo imali temperaturu od -4°C , ne bismo mogli postići nastanak kristala snijega jer IN čestica ne bi bila aktivirana.

Od svih čestica u zraku samo ih 5-10% smatramo CCN česticama. Od svih CCN čestica mali postotak smatramo IN česticama. Broj CCN čestica varira od mjesta do mjesta, s obzirom na napučenost, urbanizaciju, blizinu mora i geografski položaj. Broj CCN čestica smanjuje se udaljavanjem od površine zemlje i zatim se ubrzano povećava u području donje stratosfere. [10]

Istraživanja provedena na srednjem zapadu na sjeverno-američkom kontinentu pokazuju da većina IN čestica pripada nekoj vrsti glinastog

materijala. U tim studijama pokazalo se da otopljeni kristal snijega sadrži u svome središtu krutu česticu. Za različite IN čestice pokazalo se da su im i temperature aktivacije različite. Primjerice :

- **Srebrni jodid** (koji se koristi za zasijavanje oblaka (seeder-feeder mehanizam)) -4°C
- **Kaolinit** (jedna vrsta gline) -9°C
- **Vulkanska prašina** -13°C
- **Vermiculite** (najraširenija vrsta gline) -15°C .

Kristal snijega formirati će se na čestici soli pri temperaturi od -8°C , dok će se na čestici gline formirati tek pri temperaturi od -15°C . [10]

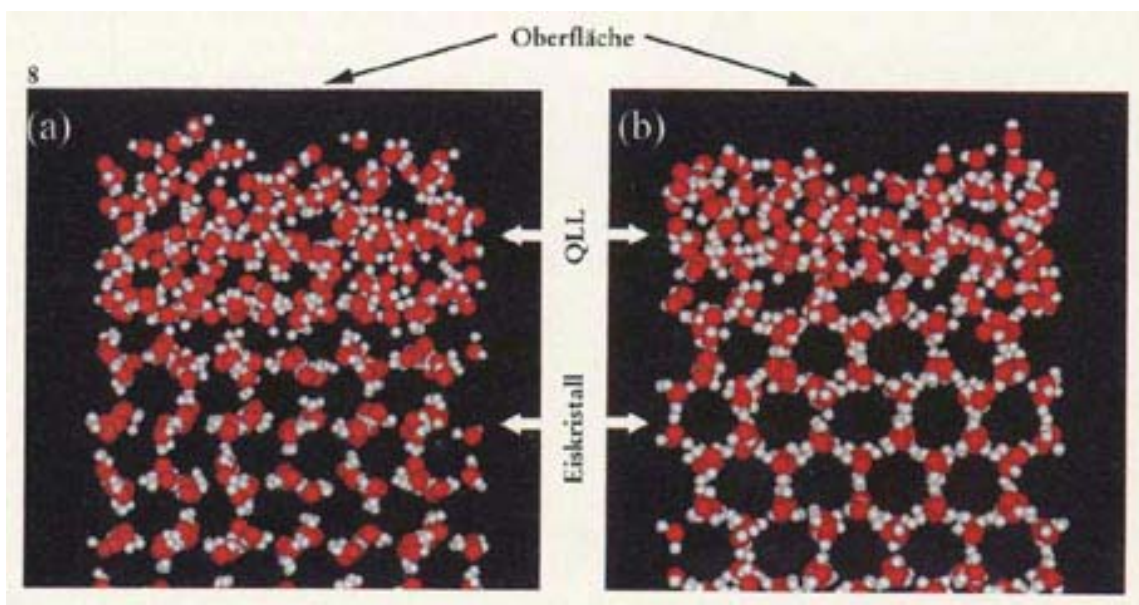
Promotrimo sada način na koji IN čestice u oblaku utječu na razvoj kristala na sebi. Postoje tri osnovna oblika aktiviranja IN čestice :

1. **razvoj kondenzacijom** – vodena para se kondenzira na IN česticu i smrzne.
2. **razvoj kontaktom** – IN čestica potiče razvoj kristala u trenutku kad dotakne jako ohlađenu kapljicu vodene pare.
3. **razvoj smrzavanjem** – IN čestica koja se već nalazi u jako ohlađenoj kapljici potakne njezino smrzavanje.

Važno je naglasiti da bez obzira na količinu IN čestica u oblaku i prezasićenost zraka vodenom parom, ukoliko nije temperatura oblaka niža od -4°C neće doći do razvoja kristala snijega.

3.4. RAZVOJ PRIRODNOG KRISTALA SNIJEGA

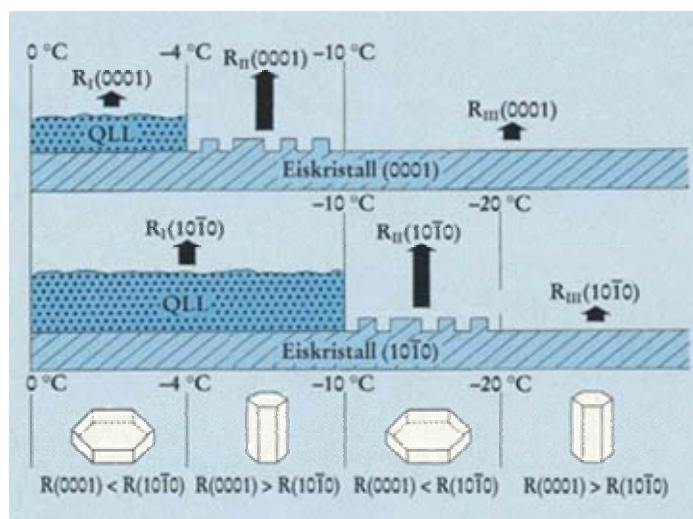
Razvoj kristala snijega još uvijek nije u potpunosti dokučen, no dugotrajnim proučavanjem uočeno je da veliku ulogu u razvoju kristala igra pojava topljenja površine. Kao i kod svakog kristala molekule na površini nisu vezane tako snažno kao one smještene u unutrašnjosti kristala. Te slabije vezane molekule na površini kristala nazivaju se **kvazitekući sloj** (eng. *quasi liquid layer* = qll).



Slika 3.4.1. Rezultati dobiveni simulacijom izvedenom pri temperaturi 255K. Prikazane su dvije plohe istog kristala $\{0001\}$ na slici (a) i $\{1010\}$ na slici (b) i to preko projekcije na os $[1120]$. Crvene i bijele sfere predstavljaju redom atome kisika i vodika. [3]

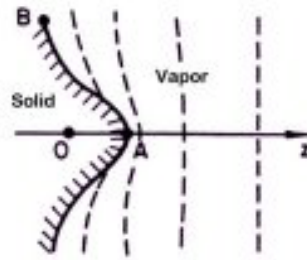
Ovaj sloj u potpunosti nestaje pri jako niskim temperaturama, jer molekule pri nižim temperaturama sve manje titraju, dok pri višim temperaturama taj sloj može biti sve deblji dok u konačnici ne postane beskonačno debeo (otopljeni kristal).

Kvazitekući sloj može utjecati na razvoj kristala snijega na različite načine. Na niskim temperaturama, tog sloja nema, pa je stoga površina kristala vrlo glatka i zato sporo raste. Na višim temperaturama molekule na površini nisu više tako čvrsto vezane na kristal i čine površinu hrapavijom, što ujedno povećava brzinu rasta kristala. Promotrimo li sada kvazitekući sloj i njegova svojstva koja se mijenjaju promjenom temperature, možemo pokušati shvatiti kako to utječe na razvoj kristala.



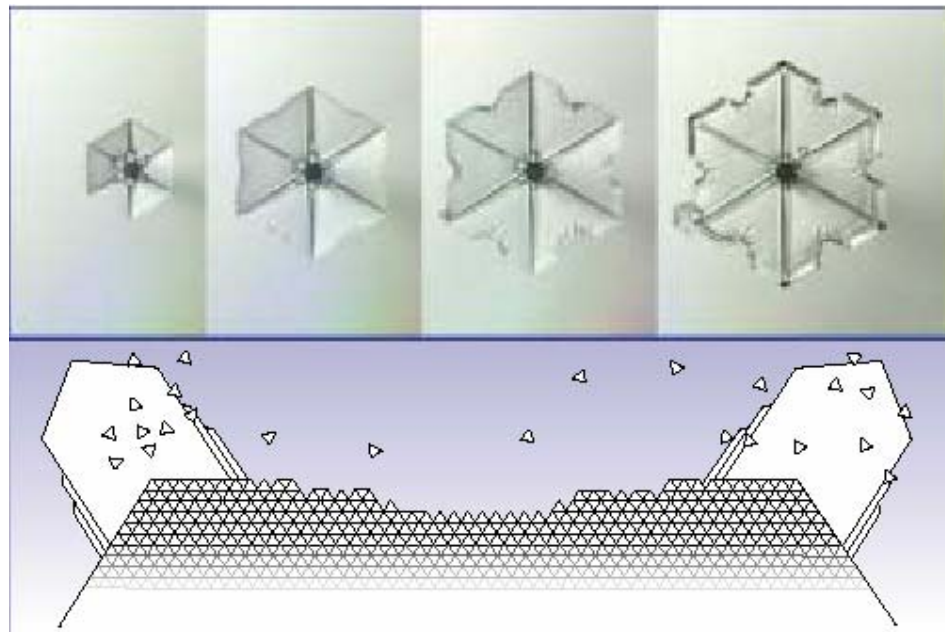
Slika 3.4.2. Shematski prikaz nam objašnjava promjenu oblika kristala snijega s obzirom na debljinu kvazitekućeg sloja. Prikazana je promjena strukture za plohe kristala redom $\{0001\}$ i $\{1010\}$. [2]

Drugi faktor koji utječe na razvoj kristala snijega jest **difuzija molekula vode** kroz zrak. Ovdje nam je mehanizam uglavnom jasan. Kristal svojim rastom obuhvaća sve više i više molekula vode i sve više molekula mora difundirati kroz zrak da bi došle do površine kristala. Difuzija usporava razvoj kristala i to je efekt poznat kao Mullins-Sekerka nestabilnost, koja nam zapravo objašnjava zašto se kristali razvijaju u tako različitim oblicima. [12]



Slika 3.4.3. Na ovoj slici je prikazan prodor kristala kroz zrak prezasićen vodenom parom.

Promotrimo li novonastali kristal snijega, koji je tipičnog heksagonalnog oblika (pločastog), primjećujemo da mu vrhovi strše dalje u zrak nego plošne strane. Zaključujemo stoga da bi se vrhovi morali razvijati brže, jer je molekulama iz okolnog zraka lakše doći do njih. Vrhovi svojim rastom ostavljaju stepenice od molekula za sobom, odnosno hrapave bočne strane, koje će se zatim početi brže razvijati jer se molekule lakše vežu na hrapave površine.(slika 3.4.4.)



Slika 3.4.4. Na ovim slikama vidimo postupni razvoj kristala snijega.[5]

Ovakvim načinom razvoja zadržava se oblik jednostavne heksagonalne prizme, no s vremenom, kako bi pratile razvoj kristala, bočne plohe postaju sve grublje i grublje, te na kraju vrhovi ipak počnu rasti brže. (Slika 3.4.4.) Izdanci koji nastaju također poštuju Mullins-Sekerka nestabilnost, pa iz njih izrastaju novi izdanci.

Sada možemo lakše razumjeti zašto ima toliko mnogo različitih oblika kristala snijega. Nakon što je stvoren mali kristal odmah nastaje heksagonalna prizma kojoj bočne plohe rastu sporije od vrhova. Što je kristal veći to više dolazi do izražaja Mullins-Sekerka nestabilnost zbog koje vrhovi počnu brže rasti. Brzina rasta novih izdanaka ovisi o trenutnoj temperaturi i prezasićenosti zraka vodenom parom u području u kojem se kristal nalazi, kao što to možemo vidjeti prema morfološkom dijagramu.

Važno je naglasiti da svaki izdanak zapravo prolazi kroz iste uvjete razvoja i zbog toga dolazi do tako savršene simetrije kristala. Naime, kristal je još uvijek premalen da bi se uvjeti tako drastično razlikovali na njegovim nasuprotnim stranama. Kako se kristal kreće kroz oblak, odnosno atmosferske prilike, tako mu se mijenja i brzina rasta, i izdanci će usklađeno mijenjati brzinu razvoja. Kristal je to kompleksnije građe, što mu je kompleksnija staza kojom se kreće za vrijeme razvoja.

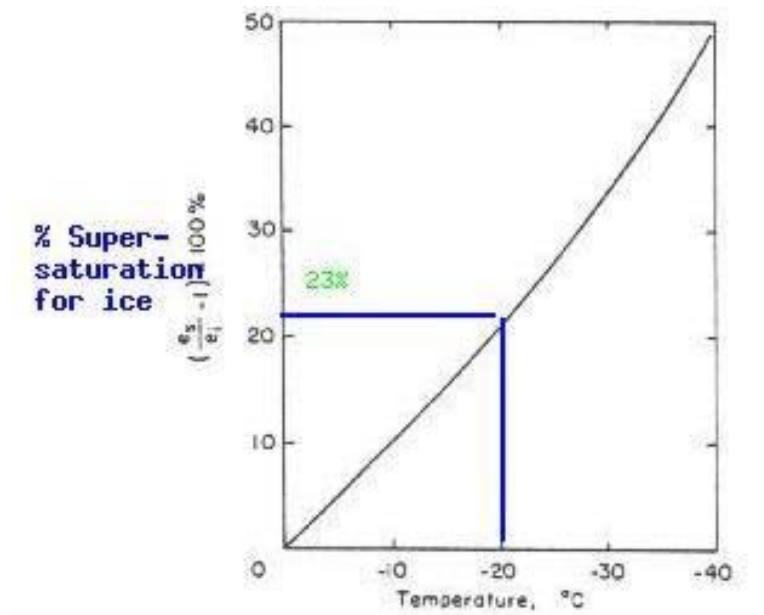
Postoje tri osnovna načina razvoja kristala u oblaku za koji smo pretpostavili da ne sadrži kristale snijega :

Razvoj kondenzacijom

Kondenzacija je zapravo prijelaz iz vodene pare u kruto stanje – kristal. Ovim se načinom kristali razvijaju *na račun* vodenih kapljica iz zraka kojem je zasićenost veća od 100%, odnosno koji je prezasićen. Tlak pare na kristal snijega manji je od tlaka pare na vodenu kapljicu, te će se stoga para kretati u smjeru kristala (ili IN čestice), a ne u smjeru kapljice. Kondenzacija se odvija tako da se vodena para kondenzira na kristal snijega i na njemu se odmah smrzne

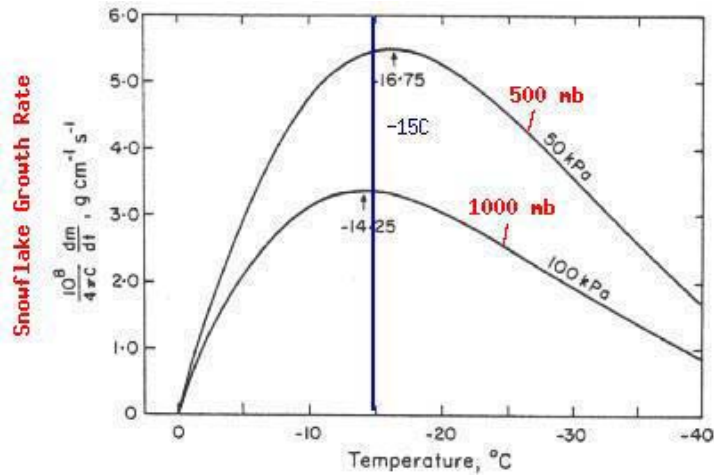
ili se pak odmah kondenzira u krutom obliku. Naravno da se gubitkom kondenziranih čestica pare, zasićenost zraka smanji, pa se stoga stvara mjesta za još pare. To se zapravo naziva razvoj kristala snijega *na račun* vodene pare.

Promotrimo slučaj kada imamo oblak prezasićen vodenom parom. Snizimo li mu temperaturu oblak postaje prezasićen kristalima snijega, s tim da ta prezasićenost raste. Odnos zasićenosti zraka vodenom parom, odnosno kristalima snijega prikazan je slijedećim dijagramom.



Slika 3.4.5. Ovisnost prezasićenosti zraka vodenom parom o temperaturi. (preuzeto iz [7])

Kao što smo već spomenuli ovaj proces ne ovisi samo o temperaturi, već i o tlaku. Ako promotrimo iste promjene temperature pri različitim tlakovima, dobivamo slijedeći dijagram:



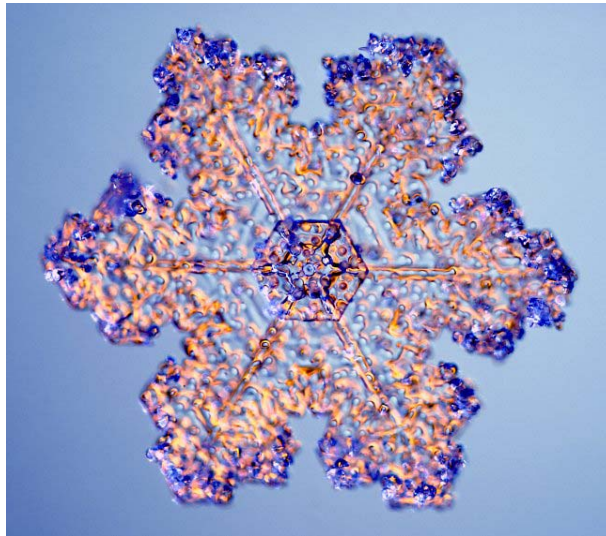
Slika 3.4.6. Ovaj graf nam daje usporedbu ovisnosti brzine rasta kristala snijega o temperaturi pri tlaku od 50kPa i 100kPa. (preuzeto iz [7])

Za identične uvjete razvoja kristala, smanjenje tlaka uzrokovalo je značajan porast broja kristala pri temperaturi od -15°C .

Razvoj u naslagama

Razvoj u naslagama se pojavljuje kada je kristal snijega već dovoljno razvijen da oteža i počinje padati, pa tijekom pada na sebe veže još jako pothlađene kapljice vodene pare. Pretpostavka je da se kristal razvio već opisanom metodom kondenzacije.

Broj sakupljenih čestica vodene pare je to veći što je veća brzina kojom snježni kristal pada. To su uglavnom čestice različitih oblika od igličastih do onih razgranatih dendrita i zapravo im je “funkcija” da uspore pad samoga kristala. Tako prilijepljene čestice nazivaju se GRAUPEL. (Slika 3.4.7.) Ovaj način razvoja kristala karakterističan je za donje dijelove oblaka, za razliku od kondenzacije koja je tipična za gornje dijelove oblaka.



Slika 3.4.7. Razvijeni kristal oteža i počne propadati kroz oblak, a na njega se lijepe čestice pothlađene pare.[1]

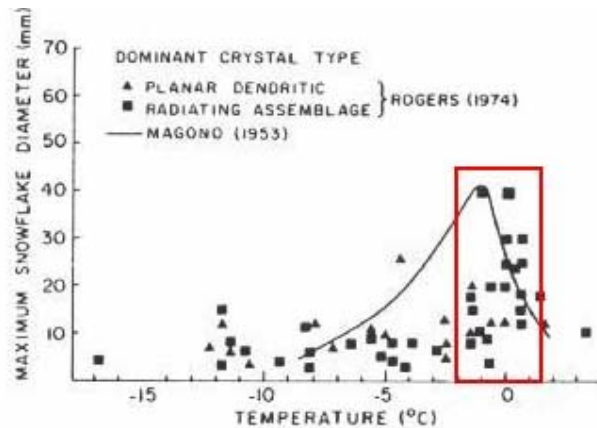
Razvoj nakupljanjem

Nakupljanje je proces u kojem se više kristala snijega udruži kako bi formirali pahuljicu. Ovaj je proces najintenzivniji pri temperaturi od 0°C . Pri toj temperaturi kristalima je, kao što smo već rekli, kvazitekući sloj sve deblji jer ima sve više slabo vezanih molekula vode na površini. Stoga se na 0°C kristali najučinkovitije vežu jedan za drugoga, i ponovno samim dodirrom smrznju. Prema slijedećem dijagramu možemo vidjeti da najveće pahuljice nastaju oko temperature od 0°C (u crvenom okviru).



Slika 3.4.8. U desnom gornjem kutu ove slike možemo vidjeti takozvani konglomerat kristala snijega koji nastaje nakupljanjem.

Snowflake
Size



Slika 3.4.9. Ovaj nam dijagram prikazuje ovisnost maksimalnog promjera kristala snijega o temperaturi. U ovom slučaju uspoređujemo dva autora: Rogersa (geometrijski likovi) i Magonoa (glatka linija). (preuzeto sa [7])

SEEDER-FEEDER MECHANISM

Ovaj mehanizam obuhvaća oblake koji sadrže kristale snijega (eng. *seeder*) na temperaturi oko -14°C koji prelazi iznad oblaka u kojem se nalazi jako pothlađena vodena para na temperaturi od -6°C .

Možemo zaključiti da je zaista nemoguće naći dva jednaka kristala snijega iz jednostavnog razloga što ne postoje dva kristala koja su prošla isti razvojni put. Zapravo bismo samim promatranjem kristala mogli zaključiti u kakvim se sve uvjetima nalazio.

3.5. VJEROJATNOST DA NAĐEMO DVA IDENTIČNA KRISTALA SNIJEGA

Promatramo li molekule vode nastale isključivo iz atoma vodika i kisika, a ne njihovih izotopa, tada moramo priznati da su sve takve molekule vode identične. No ipak, među svakih 5000 molekula prirodno nastale vode nalazi se jedna koja sadrži atom deuterija umjesto vodika. Među svakih 500 nađe se jedna molekula koja sadrži atom kisika ^{18}O umjesto uobičajenog atoma ^{16}O . [7]

Obzirom da tipičan manji kristal snijega sadrži otprilike 10^{18} molekula vode, biti će barem 10^{15} različitih. Ove neobične molekule biti će nasumično raspoređene kroz kristal i dati mu jedinstveni oblik. Vjerojatnost da dva kristala imaju točno isti raspored takvih molekula, čak i uz broj od 10^{24} kristala godišnje, je doslovce nula. Čak niti u slučaju kada bismo imali isključivo izotopno čiste molekule, možemo reći da bi vjerojatnost nalaženja dva identična i dalje ostala vrlo mala. Naime, za vrijeme razvoja kristala molekule se ne spajaju potpuno savršeno, postoji velik broj nepravilnosti koje zovemo dislokacije. Dislokacije su također razbacane kroz kristal nasumično, te na taj način pridonose njegovoj jedinstvenosti. Ovdje se možemo pozvati na model od 10 molekula. [4]

Čak je i u ovakvom modelu malo vjerojatno da bi svaka molekula sadržavala oba normalna atoma vodika. Kristal od 10 molekula imati će mali broj konfiguracija. Stoga možemo zaključiti da bi se mogla naći dva identična kristala od 10 molekula. Na žalost takvi kristali su suviše maleni da bismo ih mogli izučavati. [7]

Možemo malo ublažiti kriterije i promatrati slične kristale. Slični kristali su oni koji pod mikroskopom izgledaju identično. Najviše do izražaja dolaze jednostavni kristali kojih ima mnogo na području Antarktika. Zato možemo reći da općenito takvi kristali snijega sličje jedan drugome u određenoj mjeri. [4]

3.6 KLASIFIKACIJA KRISTALA SNIJEGA PREMA OBLIKU

Postoje mnoge klasifikacije kristala snijega, primjerice: klasifikacija međunarodne komisije za snijeg i led, zatim Nakayaina klasifikacija, te Moagono-Leeova klasifikacija. Međutim, iako je nemoguće naći dva identična kristala snijega, ovdje ćemo navesti samo osnovne oblike, ili grupe, u koje se oni dijele.

ZVJEZDASTI DENDRITI

Dendrite ili izdanke možemo usporediti sa oblikom krošnje drveta u presjeku, što bi nam zapravo trebalo predočiti taj razgranati oblik snježnih kristala. Zvezdasti dendriti imaju šest simetričnih glavnih grana i mnogo manjih, po njima, nepravilno raspodijeljenih grana. Ovi kristali imaju veličinu čak i do 5 mm u promjeru, te debljinu nešto manju od 0.1 mm. [4]



Slika. 3.6.1. a)



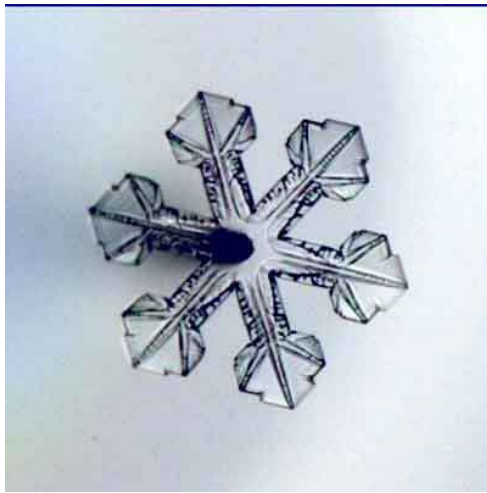
b)



c) Zvezdasti dendriti. Preuzeto iz [12].

RAZDIJELJENI PLOČASTI KRISTALI

Kod ovog oblika kristala karakteristično je to da oštri rubovi kao da dijele ispružene izdanke opet na pločasta područja. Ovi kristali su također plosnati poput zvjezdastih dendrita.[13] Promotrimo primjerke na slikama 3.6.2.



a)

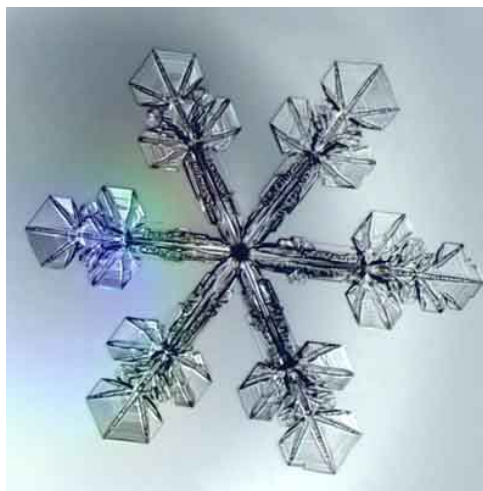


b)

Slika 3.6.2.

Razdijeljeni pločasti kristali samim izgledom nam daju naslutiti da su se počeli razvijati kao zvjezdasti dendriti a prelaskom u drugo područje oblaka na vrhovima ogranaka počeli su se razvijati pločasti djelovi.[4]

c)



PRAZNI STUPČASTI KRISTALI

Kristali ovoga oblika česta su pojava za snježnih padalina. To su stupčasti kristali koji uglavnom podsjećaju svojim heksagonalnim oblikom na drvene olovke. U unutrašnjosti nemaju jednoliki promjer praznine, već su udubljenja stožastog oblika, sa svake strane, čiji je vrh usmjeren prema središtu kristala, no ne dodiruju se međusobno. [4,13]



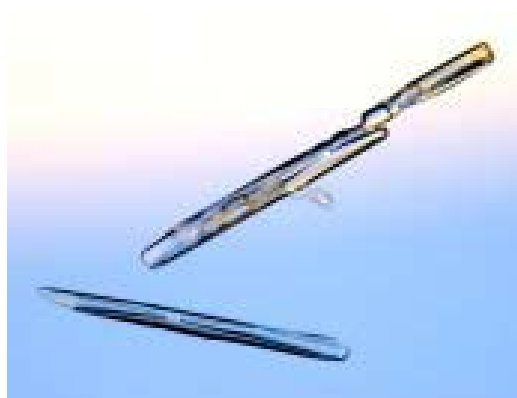
Slika 3.6.3. Ova slika prikazuje tipičan prazan stupčasti kristal snijega. Možemo lijepo vidjeti stožasta udubljenja koja se sužavaju prema sredini.[7]

IGLICE

Ponekad su stupčasti kristali toliko uski i dugački da zapravo liče na tanke iglice. Može se dogoditi da su te iglice prazne u unutrašnjosti, a može se i dogoditi da se krajevi razdijele i formiraju dvije nove male iglice. [4]



a)

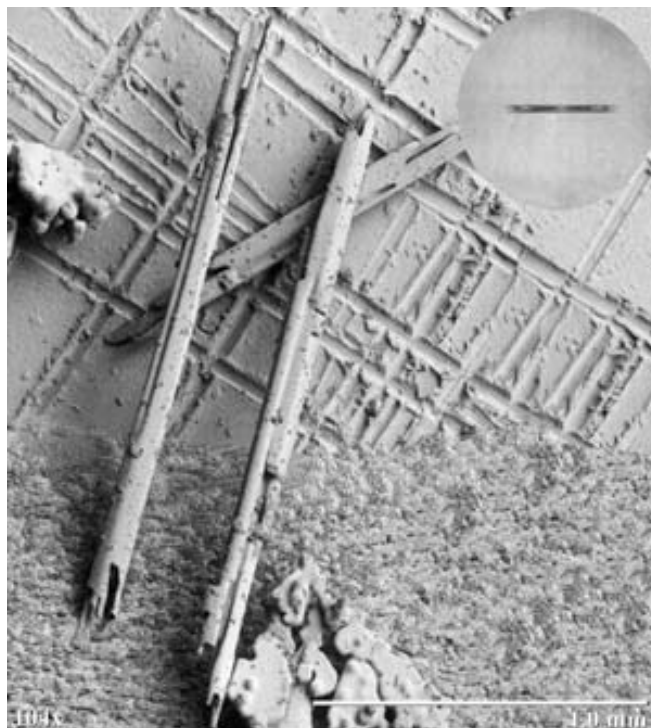


b)

Slika 3.6.4.

Na slici a) možemo vidjeti kako su se vrhovi kristala razdijelili i formirale se dvije male iglice.

Na slici b) isti je kristal prikazan s bočne strane. [4]



Slika 3.6.5. Igljice uvećane 104 puta. U desnom gornjem kutu nalazi se fotografija istih iglica s veće udaljenosti. U desnom donjem kutu nalazi se referentna duljina od 1,0 mm.[12]

PROSTORNI DENDRITI

Ova vrsta kristala zapravo je načinjena od dijelova različitih kristala spojenih u jedan. Svaki od ogranaka ima oblik ogranaka jednog zvjezdastog dendrita, ali je svaki orijentiran u svojem smjeru, odnosno ne nalaze se u jednoj ravnini. [4]



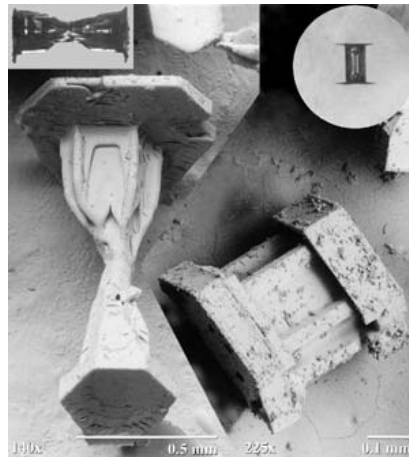
Slika 3.6.6. Prostorni dendriti. Preuzeto iz [4].

ZATVORENI STUPČASTI (TSUZUMI) KRISTALI

Ovi kristali se počnu razvijati kao stupčasti, no u jednom trenutku ih meteorološke prilike u oblaku dovedu u područje u kojem su drugačiji uvjeti, prvenstveno temperatura. Na njihovim krajevima počnu se razvijati jednostavni pločasti kristali. [4]



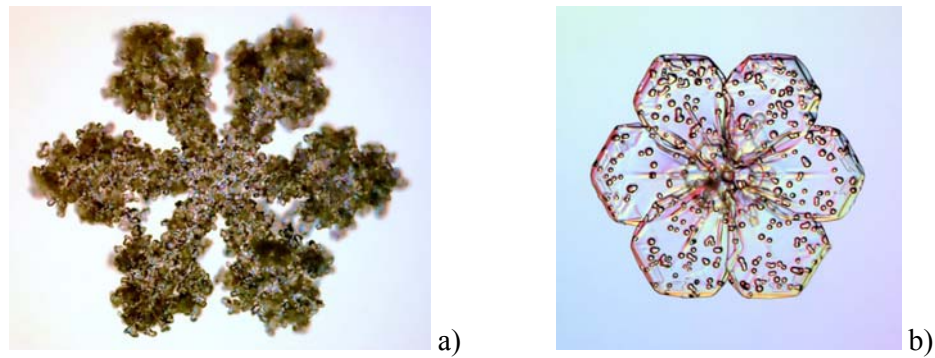
Slika 3.6.7. Lijepi primjerci tsuzumi kristala snijega. [5]



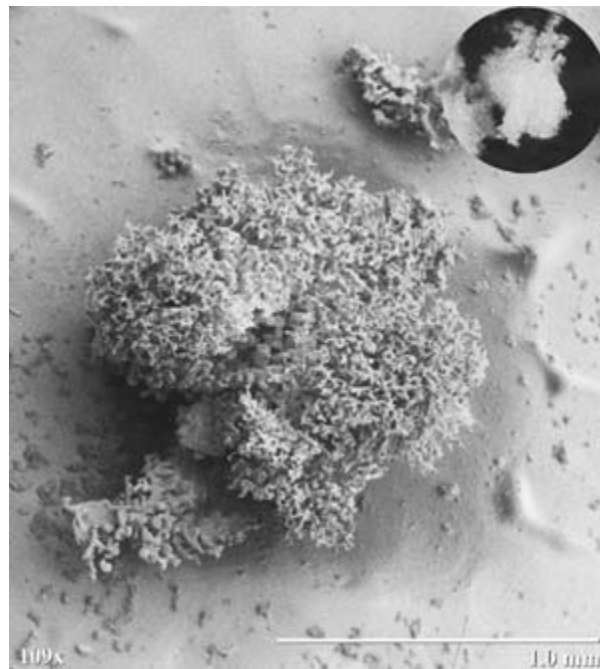
Slika 3.6.8. Uvećana snimka tsuzumi kristala snijega, slike s veće udaljenosti nalaze se u gornjim kutevima slike, a referentna duljina od 0.1mm nalazi se u desnom donjem kutu. [12]

KRISTALI SNIJEGA ZATRPANI LEDENIM KAPLJICAMA

Ova je pojava vrlo česta. Do nje dolazi propadanjem kristala kroz oblak koji je pun smrznutih kapljica vode, a one se lijepe na kristal. Ponekad se kristal snijega ni ne vidi kroz sloj nakupljenih kapljica. [4]



Slika 3.6.9. Kristali snijega zatrpani pothlađenim česticama vodene pare. [4]



Slika 3.6.10. Ova slika prikazuje jedan prostorni dendrit zatrpan kapljicama . Slika prikazuje povećanje od 109 puta. Referentna duljina dana je u desnom donjem kutu 1.0mm. [12]

NEPRAVILNI KRISTALI

Ako se kristal snijega nađe u nekom vrlo turbulentnom oblaku može se dogoditi da poprimi oblik koji je nemoguće definirati. Takve kristale nazivamo nepravilnima. [4]



Slika 3.6.11. Na ovoj slici se može vidjeti kristal koji je zapravo spoj različitih razvojnih faza u različitim uvjetima. Možemo vidjeti jedan ogranak(dendrit) , zatim stupčasti ogranak, te pločasti ogranak uz još neke ne definirane oblike.[4]

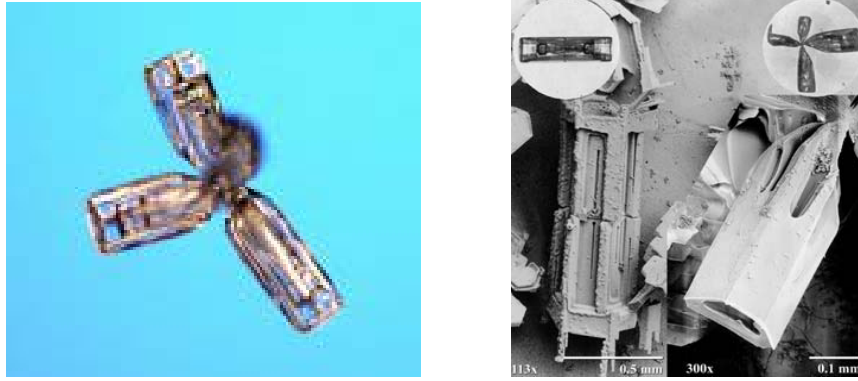
NEOBIČNI OBLICI



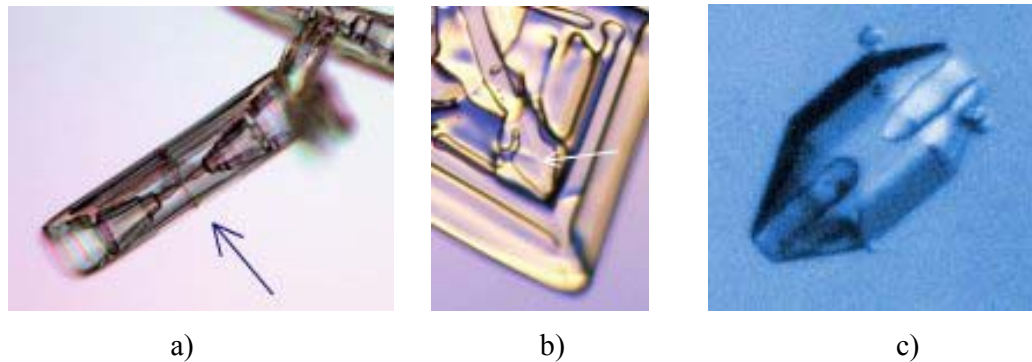
Slika 3.6.12. Dvanaesterokraki kristal snijega. Dosta rijetka pojava iako znanstvenici nisu sigurni koji vremenski uvjeti dovode do takvog oblika. [4]



Slika 3.6.13. Trostrani kristali snijega su još uvijek danas svojevrsna enigma za znanstveni svijet. Njihova pojavnost slična je onoj dvanaesterostranih kristala. Usporedbe radi; četvero-, petero-, i osmerostrani kristali ne postoje u prirodi. [4]



Slika 3.6.14. Ovi kristali svojim oblikom podsjećaju na metak. Razvojni put im je krenuo od prostornog dendrita, no međutim su očito promijenili uvjete u kojima su se razvijali te se svaka od grana počela razvijati kao stupčasti kristal. Posljedica takvog razvoja je da su naši *meci* uglavnom grupirani. Možemo naći i samostalne *metke*, no oni su jednostavno nastali raspadom grupe, u kojoj su nastali, uslijed mehaničkih djelovanja. [12]



Slika 3.6.15. Ove slike prikazuju kristale koji su nastali razvojem iz iste jezgre, odnosno iz iste IN čestice. To su dvostruki kristali koji su se razvijali istovremeno u različitim smjerovima. Primjerice dvostruke prizme (a) nalaze se pod kutem od 60° jedna u odnosu na drugu. Vrlo je rijetka pojava kristala u obliku piramida (c). Najveća vjerojatnost je da ih nađemo na Južnom polu. [4]

4. UMJETNI KRISTALI SNIJEGA

Fizika koju se ovdje proučava u biti ovisi o svojstvima površine samoga kristala. Osnovna ideja kojom se vode znanstvenici kod izvođenja eksperimentalna je proizvesti kristale snijega pod kontroliranim uvjetima i mjeriti njihove veličine kao funkcije vremena koje je potrebno za rast.

U takvim se eksperimentima proizvode obično mali kristali, čak manji od antarktičkih, jer je puno jednostavnije modelirati veličinu kao funkciju brzine rasta. Nakon provedenih mjerenja uspjelo se doći do ovisnosti brzine rasta o temperaturi, prezasićenosti i ostalim uvjetima.[3]

Već se iz morfološkog dijagrama dalo zaključiti: brzina rasta baznih i pobočnih ploha jako ovisi o prezasićenosti kao i o temperaturi, dok neka novija istraživanja pokazuju da čak ovise i o plinu koji se nalazi među molekulama u zraku. Npr. u slučajevima kada su se provodili pokusi u vakumiranim komorama u kojima je bila samo vodena para, nisu nastajali kristali snijega već neki izometrični oblici. Pokazalo se da je zrak u takvom slučaju prilično inertan, a slično je i u slučaju s helijem. Unatoč lošim rezultatima uočili su da se u takvom okruženju usporava razvoj kristala, pa bi se stoga na taj način mogli dobivati jednostavniji oblici. [7]

4.1 RAZVOJ KRISTALA SNIJEGA POD UTJECAJEM ELEKTRIČNOG POLJA

Električno polje može utjecati na razvoj kristala snijega, te se može koristiti za razvoj kristala u obliku iglica. Utjecaj električnog polja je evidentan zbog toga što ono utječe na način na koji molekule vode difundiraju kroz zrak. Ako promatramo primjerice kristal koji je izložen jakom elektrostatičkom polju.

Molekule vode se u električnom polju orijentiraju, a kasnije i vežu u smjeru gradijenta polja, zbog asimetrične raspodjele naboja unutar molekule. [7]

Ako se u komoru u kojoj se vrše mjerenja unese žica, ona će u kratkom vremenu biti obložena ledom. Primjenom visokog napona od 2000V, iz žice će se početi razvijati krhke iglice leda. Te su iglice istraživačima vrlo interesantne jer se na njihovim krajevima mogu formirati kristali snijega. Takve iglice se nazivaju *električne iglice*. [4]



Slika 4.1.1. Pod visokim naponom iz običnog ogranka zvjezdastog dendrita izbila je tzv. električna iglica.[4]

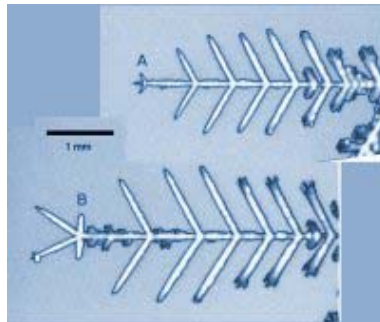
Slika 4.1.1.prikazuje dendrit koji je razvijen na vrhu jedne električne iglice i u trenutku kada je dosegao konstantan rast od 3 mikrona po sekundi, žica je spojena na napon koji se polako povećava. Povećavanjem napona povećala se i brzina razvoja kristala na 4 mikrona po sekundi. Na 1400V najednom je iz vrha dendrita izbila iglica brzinom od 30 mikrona po sekundi i nastavila rasti tom brzinom. Ovaj zagonetan oblik ponašanja kristala snijega koji još uvijek nije dokučen do kraja. [7]

Ima još neobičnih načina kako električno polje utječe na razvoj kristala snijega. Primjerice na slijedećoj slici 4.1.2. možemo vidjeti kristal dobiven uobičajenom metodom, kao i u prethodnom slučaju. U trenutku kada je napon dosegao kritičnu vrijednost nije izbila iglica, već se vrh dendrita rascijepio na dva dijela. Dvije grane nastale na taj način još su se jednom svaka zasebno rascijepile. Osim rascijepa je kristal promijenio ravninu u kojoj se nalazi. Naime

kristal se razvijao duž $[1\ 0\ -1\ 0]$ osi, a nakon rascijepa se os promijenila i ogranak se nastavio razvijati duž osi $[2\ -1\ -1\ 0]$ (promotri bočnu snimku, b). Nije otkriveno zašto se rotacija dogodila, samo je poznato da se odvijalo pri naponu pri kojem normalan razvoj više nije stabilan. [4]



Slika 4.1.2. Razvoj kristala pod visokim naponom u ovom je slučaju uzrokovao cijepanje vrha izdanka i promjenu ravnine u kojoj se kristal razvijao.[4]



Možemo zaključiti da zapravo razvoj kristala pri sve višim naponima postaje sve neobičniji i sve nestabilniji. Rezultat takvog razvoja možemo vidjeti na slici 4.1.3..



Slika 4.1.3. Pri izuzetno visokim iznosima napona kristali snijega počnu se ponašati vrlo neobično i poprimati nove izometrične oblike.[4]

Poboljšanom tehnologijom uspjelo je znanstvenicima proizvesti zvjezdaste dendrite na vrhovima električnih iglica. Prvo se proizvede vrlo tanka električna iglica. Kada iglica dosegne željenu duljinu isključi se visoki napon, a kristal se preseli u područje koje ima temperaturu povoljnu za razvoj kristala. U tom trenutku počinje se na vrhu iglice razvijati pločasti kristal.

Primjerak na slici 4.1.4. prikazuje kako uvjeti u kojima se kristal snijega nalazi utječu na njegov razvoj. U ovom je slučaju nakon formiranja kristala na vrhu iglice, razina prezasićenosti zraka vodenom parom bila niska, pa su se stoga bočne strane sporo razvijale. Nakon što su se formirali bočni izdanci temperatura okoline kristala bila je povišena, a prezasićenost vodenom parom snižena. Na taj način postignuto je da su se na izdancima počeli razvijati novi pločasti elementi, a zatim je temperatura snižena i rubovi kristala su se sporo razvijali slično kao kod antarktičkih kristala. Promjer tako dobivenog kristala snijega iznosi 0.8mm.



Slika 4.1.4. Boje na ovoj slici nisu prirodne. Slika je bila crno-bijela, no obrađena je radi boljeg uočavanja u programu Photoshop. [7]

Uspjelo se proizvesti i stupčaste kristale (slika 4.1.5.). Na vrhu električne iglice, koja je nastala pri temperaturi od -4°C , nakon isključenja napona iglica je premještena u područje nešto niže temperature. Na vrhu iglice, pri temperaturi od -8°C razvio se prazni stupčasti kristal, dok se ostatak iglice podebljao.



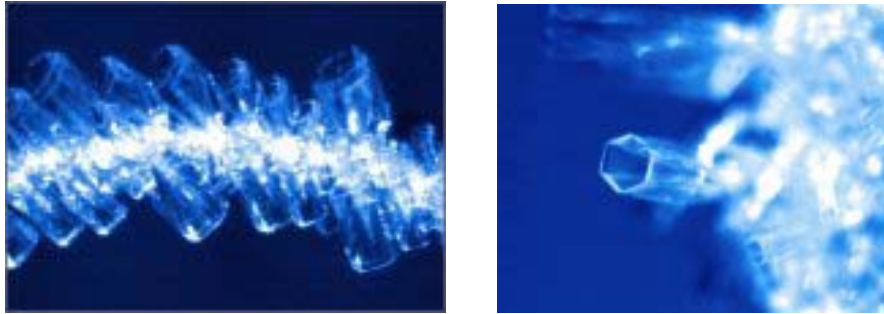
Slika 4.1.5. Stupčasti kristali na vrhu električnih iglica koje svojim oblikom podsjećaju na drvene šesterostrane olovke.[7]

Iglice na ovoj slici dobivene su razvojem kristala duž c-osi, i one su vrlo glatke, te oblikom podsjećaju na drvene olovke. Moguće je razviti i kristale duž a-osi, no oni su puno grublji za razliku od kristal razvijenih duž c-osi(slika 4.1.6.). Takvim razvojem, dobiju se također prazni stupčasti kristali (promotri sliku).



Slika 4.1.6. Stupčasti kristal razvijen na električnoj iglici koja se pruža duž a-osi. Možemo vidjeti kako joj je površina gruba.[4]

Na slici 4.1.7. možemo vidjeti krasan primjerak praznih stupčastih kristala. Ovakvi se kristali mogu dobiti pri izuzetno visokoj prezasićenosti zraka vodenom parom i temperaturi od -7°C .



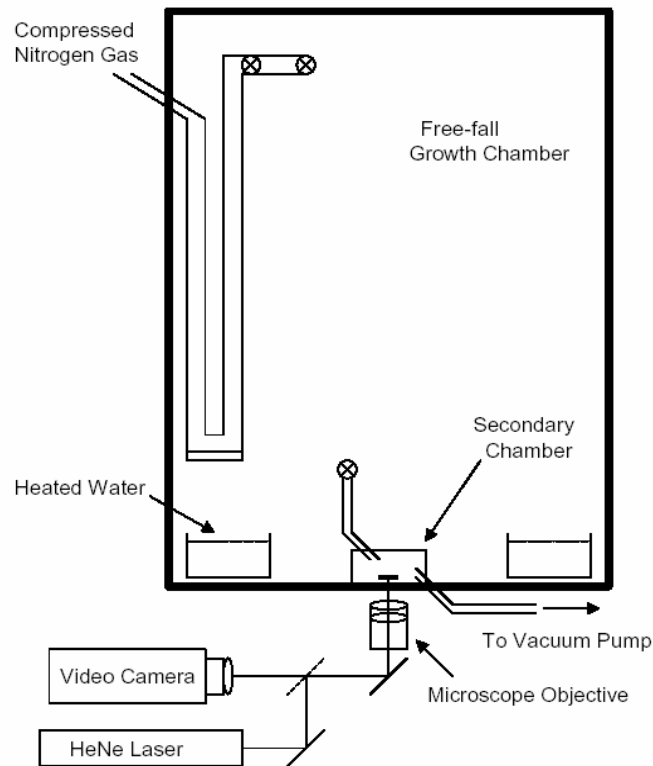
Slika 4.1.7. Umjetno dobiveni prazni stupčasti kristali. [7]

4.2 RAZVOJ KRISTALA SNIJEGA U KONVEKCIJSKOJ KOMORI

Razvoj kristala u konvekcijskoj komori je pokušaj da se kristali snijega dobiju na *prirodan* način. Konvekcijska je komora zapravo obična hladna komora visoka oko metar koja u svojem dnu ima dva spremnika zagrijane vode. Vodena para konvekcijom se miješa sa hladnim zrakom i na taj način se dobije hladan zrak prezasićen vodenom parom.

Kristale se proizvodi tako da se u komoru ubaci sićušni komadić suhog leda, ili pak ekspanzijom hladnog komprimiranog zraka unutar komore. Kristali prije pada na dno komore uspiju doseći veličinu između 10 i 100 mikrona.

Promjer i debljina kristala određuju se laserskom interferometrijom. U eksperimentima u konvekcijaskoj komori koristi se He-Ne laser. [4]



Slika 4.2.1. Shematski dijagram konvekcijaskog aparata – kristali se razvijaju u velikoj Free-fall komori i zatim ih se prevodi u sekundarnu komoru radi mjerenja. Laserskom interferometrijom mjere se promjene debljine kristala za vrijeme rasta.[6]

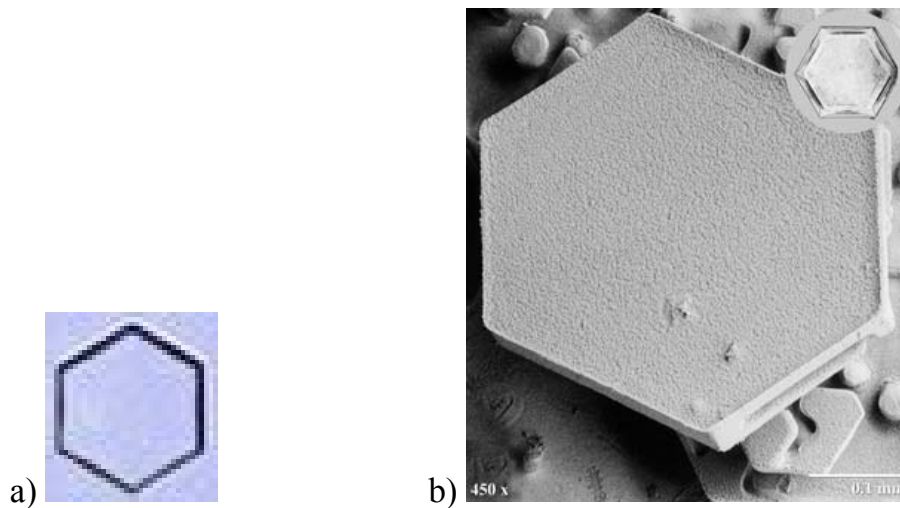
Kristali dobiveni pri temperaturi od -15°C :

uz prezasićenost ($>105\%$) razvijaju se zvjezdani i pločasti dendriti. Evo nekih od dobivenih kristala:



Slika 4.2.2. Neki od kristala dobiveni u konvekcijaskoj komori pri temperaturi od -15°C . [4,6]

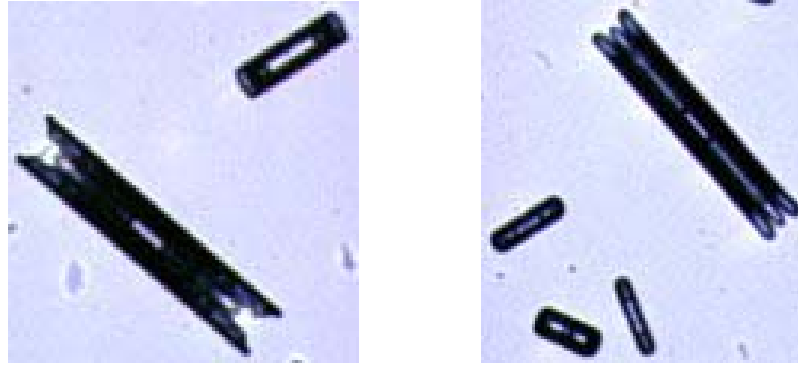
svi su ovi kristali dobiveni u vrlo sličnim uvjetima, samo što su se neki od njih razvijali duže od ostalih prije no što su dotakli staklo prozora za promatranje. Čak su i najmanje promjene u temperaturi ili prezasićenosti unutar same komore dovodile do drastičnih razlika u oblicima kristala. To nam pokazuje koliko završni oblik kristala ovisi o uvjetima u kojima se kristal nalazi. Ako je prezasićenost niža, pri istoj temperaturi od -15°C , gotovo uvijek će se razviti jednostavni heksagonalni pločasti kristali. (promotrite sliku 4.2.3.)



Slika 4.2.3 Kristal s lijeve strane je u promjeru manji od promjera jedne prosječne ljudske vlasi. S desne strane vidimo isti taj kristal uvećan 450 puta. U donjem desnom kutu slike b) možemo vidjeti referentnu duljinu od 0.1 mm.[12]

Kristali dobiveni pri temperaturi od -5°C :

Pri ovoj temperaturi i uz visoko prezasićenje oblikuju se prazni stupčasti kristali. Manji stupčasti kristali djeluju gotovo kao potpuno kruta tijela, dok veći kristali pokazuju zanimljivo svojstvo: kroz bazne plohe se stvaraju udubljenja koja prodiru prema središtu kristala. Tanji, razvojni rubovi kod ove vrste kristala cijepaju se prema istom pravilu nestabilnosti kao i kod bočne grane kod zvjezdastih dendrita.

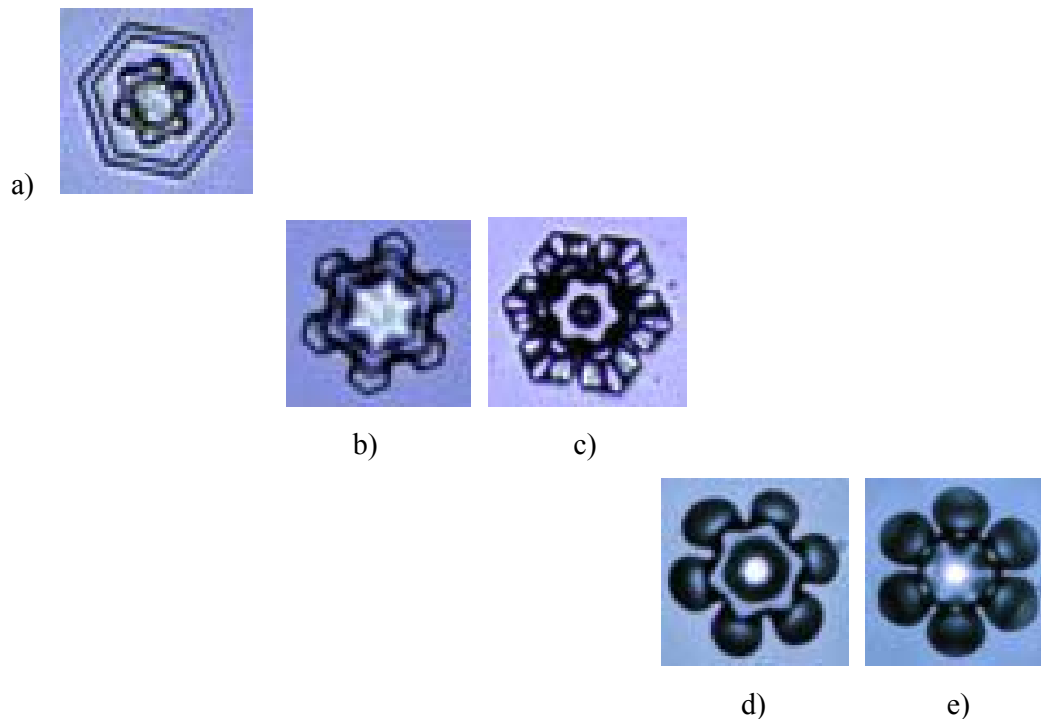


Slika 4.2.4. Prazni stupčasti kristali kojima su se rubovi počeli cijepati.[4]

Kristali dobiveni pri temperaturi -2°C :

Pri ovoj temperaturi opet se razvijaju pločasti kristali, iako brzina rasta nije tako velika kao pri temperaturi od -15°C . Kristali dobiveni pri ovoj temperaturi su neusporedivo manji od kristala dobivenih pri -15°C , no pokazuju vrlo zanimljiva svojstva. Primjerice, kristali na slici 4.2.5.(d) i e)), nastali pri iznimno visokim razinama prezasićenosti zraka vodenom parom, imaju zanimljive oble završetke, kakvi se ne susreću pri većim kristalima.

Slika 4.2.5. Ovdje je nekoliko primjeraka kristala dobivenih pri velikim razinama prezasićenosti zraka vodenom parom.[7]



4.3 FILM RAZVOJA KRISTALA SNIJEGA U LABORATORIJU

Ideja snimanja razvoja kristala pokazala se vrlo interesantnom, no i teško izvedivo. Danas se može naći tek nekoliko filmova od par sekundi, na kojima se vidi razvoj kristala snijega. Uz svu vrhunsku opremu rezultate je teško postići.



Slika 4.3.1. Vremenski razvoj snježnog kristala.. *Film* je izradio Kenneth G. Libbrecht. [7].

5. ZAKLJUČAK

Kroz ovaj rad pokušala sam prikazati svu fiziku koja se krije iza ljepote snježnih kristala. Iako su snježni kristali svima dostupni tijekom zimskih mjeseci, vrlo ih je teško izučavati. Taj je problem razriješen otkrićem mikrofotografije. Tako je W. A. Bentley pomoću nje pokazao svijetu ono što do tada nikada nije bilo viđeno: uvećane kristale snijega. To je pobudilo još veće zanimanje za proučavanjem kristala snijega.

Kroz dvadeseto stoljeće učinjen je veliki napredak. Znanstvenici su sustavnim proučavanjem uspjeli shvatiti što najviše utječe na razvoj kristala snijega. Osim toga već 1956. godine Nakaya nam daje morfološki dijagram kao rezultat svoga istraživačkog rada. Taj su dijagram još mnogi znanstvenici dorađivali i proučavali, te je postao svojevrsan izazov potpuno ga dovršiti i objasniti.

Danas, pak, znanstvenici proizvode kristale snijega u laboratorijima pod strogo kontroliranim uvjetima i postižu izuzetno dobre rezultate. Možemo čak govoriti o doslovce dizajniranim kristalima snijega.

REFERENCE

- [1] **J. Keppler**: *Strena seu de nive sexangula*, Godfey Tampach at Frankfort on Main., 1611, pp.24. A New Years Gift or on the Six- Cornered Snowflake, Ed. and Trans. C. Hardie (1966) Oxford Pres. pp.74.
- [2] **Blanchard, Duncan C.**, *The Snowflake Man*, *weathewise*,23(6),260-269,(1970)
- [3] **Furukawa, Y.**; <http://www.lowtem.hokudai.ac.jp/~frkw/english/ss2.html>;
Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Sapporo, 060 JAPAN
- [4] **Libbrecht, Kenneth G.**, <http://www.its.caltech.edu/~atomic/snowcrystals.htm> ;
Caltech University
- [5] **Mayer, Darko**; *Voda od nastanka do upotrebe*, Prosvjeta, Zagreb, 2004.
- [6] **Libbrecht, Kenneth G.**; *Growth Rates of the Principal Facets of Ice between -10 C to -40 C*, Norman Bridge Laboratory of Physics, California Institute of Technology 264-33, August, 2002.
- [7] **Libbrecht, Kenneth G.**, *Morphogenesis on Ice: The physics of Snow crystals*, Engineering & Science, No.1 (2001)
- [8] **Nakaya,U.**, *Snow crystals*, Harvard Univ. Press, Cambridge, MA,(1954)
- [9] **University Corporation for Atmosphere Research**; *Winter precipitation processes*, <http://meted.ucar.edu/norlat/snow/index.htm>
- [10] **Baumgardt,D.**;<http://www.crh.noaa.gov/arx/micrope.html> , *Wintertime cloud microphysics review*, National Weather service,(1999)
- [11] **W. W. Mullins & R. F. Sekerka**, J. Appl. Phys. 35, 444 (1964).
- [12] <http://www.lpsi.barc.usda.gov/emusnow/RimeGraupel>
- [13] **Simonova, Y.**; *Snow crystals*, 2003.,
- [14] **Bentley, W. A.**, and **W. J. Humphreys**. *Snow Crystals*. New York, McGraw-Hill Book Co., 1931. 227 pp.