

MICROFÍSICA DA PRECIPITAÇÃO

Capítulo 6 – A formação de gelo na atmosfera

**Prof. OSWALDO MASSAMBANI, Ph.D.
Professor Titular**

**Departamento de Ciências Atmosféricas IAG-USP
massambani@usp.br
Maio - Junho de 2006**

Conteúdo

- ❑ Objetivos
- ❑ Introdução à microestrutura de nuvens e da precipitação
- ❑ Equilíbrio de fases
 - Potencial químico do vapor de água no ar úmido
 - Calor latente da mudança de fase
 - A equação de Clausius-Clapeyron
 - A variação da energia livre de Gibbs no processo de nucleação homogênea
- ❑ Aerossol atmosférico
 - A variação da energia livre de Helmholtz no processo de nucleação heterogênea
 - O equilíbrio entre gotas de solução aquosa e o ar úmido
 - A nucleação por íons
- ❑ O processo de difusão de vapor no crescimento e na evaporação de gotículas
 - O crescimento de uma população de gotículas em nuvens quentes
- ❑ A interação dinâmica entre as gotículas – O processo de colisão e coalescência
 - O crescimento de gotas na corrente ascendente
- ❑ **A formação de gelo na atmosfera**
 - O crescimento de cristais de gelo por difusão de vapor**
 - O desenvolvimento da precipitação na fase gelo**
- ❑ Composição química de hidrometeoros
- ❑ Microfísica da carga e da eletricidade atmosférica
- ❑ O sensoriamento remoto da precipitação
 - O espectro de tamanho de gotas
 - A taxa de precipitação e os parâmetros integrais e suas variabilidades

Capítulo 6 – A formação de gelo na atmosfera

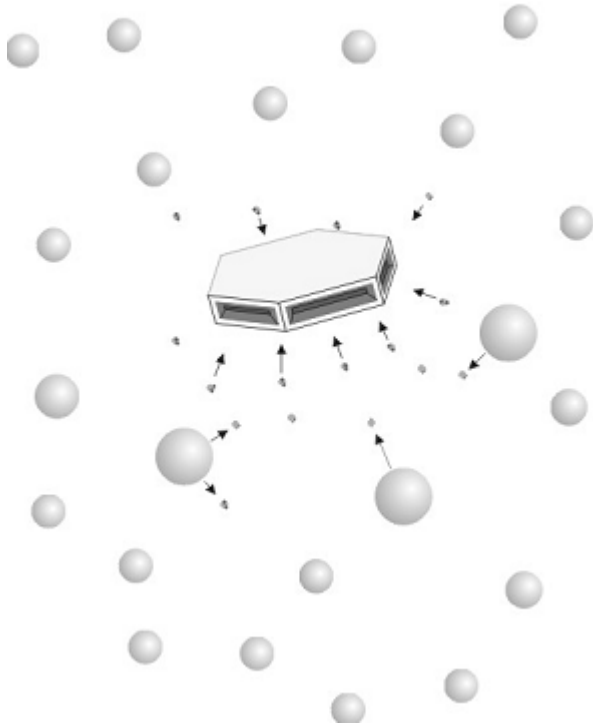
- A Formação dos cristais de gelo
- Desenvolvimento da Precipitação na fase gelo

Formação e crescimento de cristais de gelo

Cristais de gelo se formam quando a nuvem se estende a altitudes onde a temperatura está abaixo do nível de congelamento, através da transição de fase via:

- Congelamento de gotículas líquidas
- Sublimação

Crescimento do cristal via deposição de vapor



Se o vapor na nuvem está essencialmente saturado relativamente à água líquida, ele estará supersaturado em relação ao gelo.

Crescimento ~ da ordem de dezenas de microns em alguns minutos

Velocidades terminais ~ dezenas de cm/s

Nucleação homogênea:

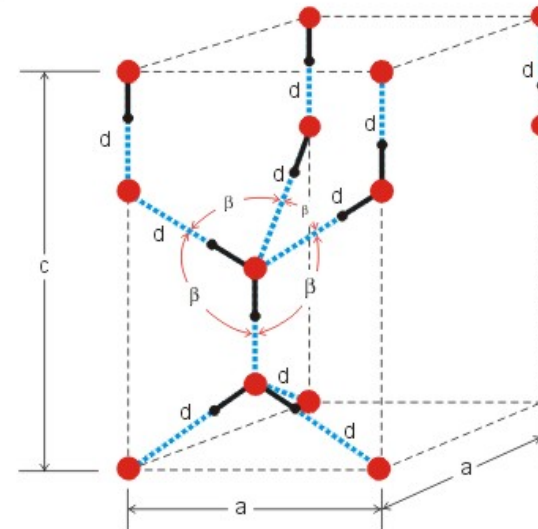
Ocorre quando a molécula de água toma a forma estável na estrutura cristalina.

Gotículas < 5 micras
congelarão a temperaturas
-40°C

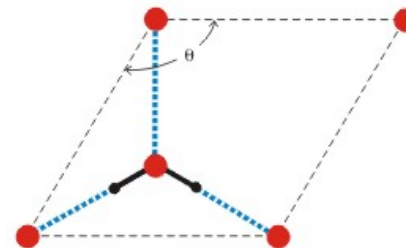
Gotículas > 5 micras
congelarão a temperaturas
levemente mais quentes
que -40°C

UNIT CELL OF ICE Ih

Perspective View:



Projection onto bottom plane:

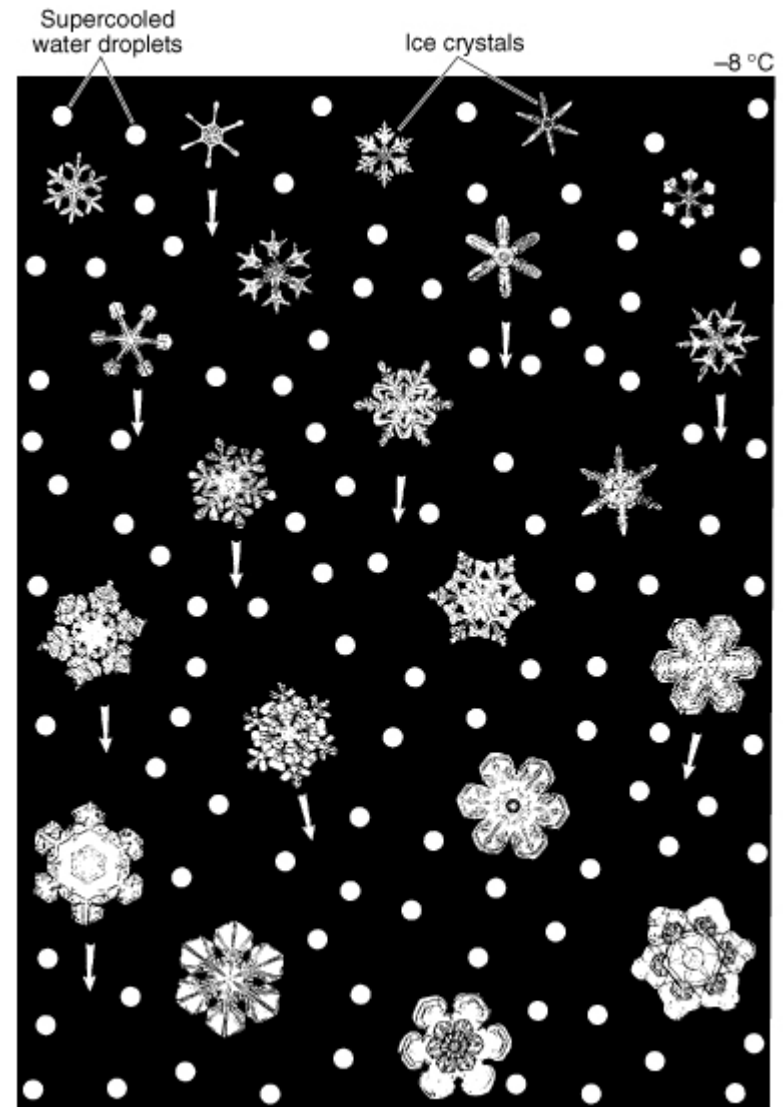


Nucleação Heterogênea

O congelamento ocorrendo num ambiente super-resfriado ou supersaturado é favorecido pela presença de Ice Nuclei

Deposição Heterogênea

- Sublimação
- Condensação → congelamento
- Contato → congelamento



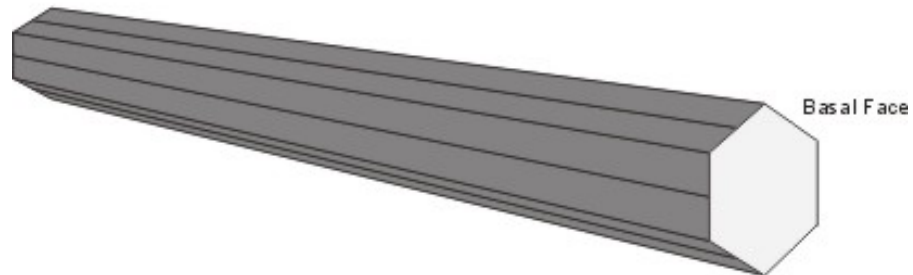
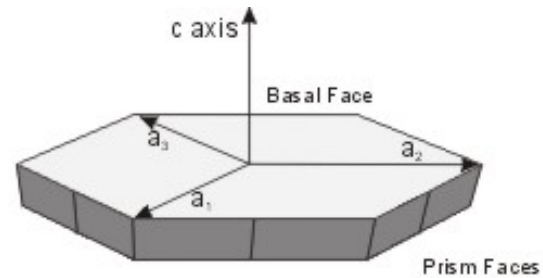
Copyright 1999 John Wiley and Sons, Inc. All rights reserved.

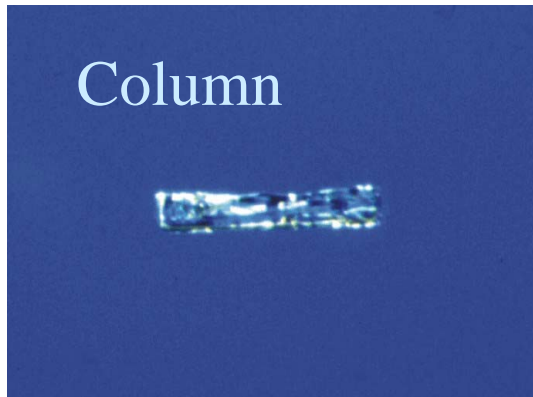
Iniciação e crescimento de cristais de gelo

IFN - ice forming nuclei (similar ao CCN) são necessários para líquido ou vapor formar cristais de gelo. Partículas de argila são IN naturais. Iodeto de Prata (Agl) são utilizados como IN artificial em operações de nucleação de nuvens, por possuírem estrutura cristalina similar ao gelo.

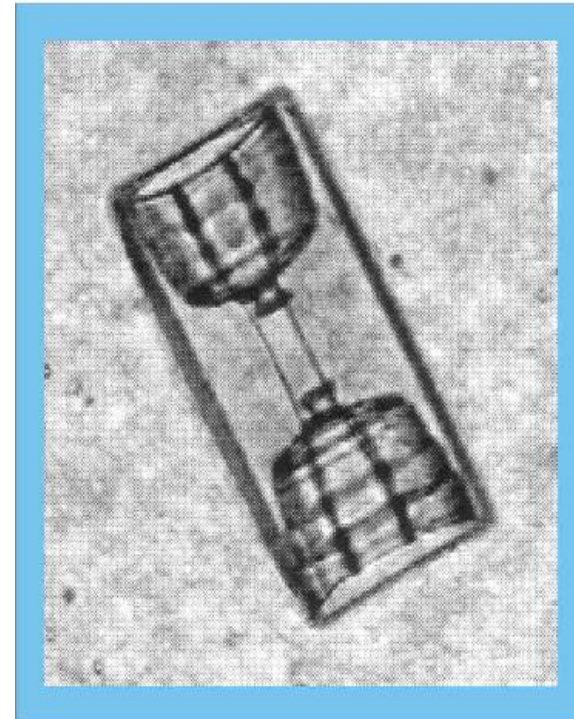
- Se os IFN não estão presentes no ar, a água irá instantaneamente congelar (formará gelo) quando a temperatura alcançar $T < -40^{\circ}\text{C}$. Outro nome para esse processo é “nucleação espontânea”.
- Gotículas de água a $T < 0^{\circ}\text{C}$ são chamadas super-resfriadas.
 - Existem em estado líquido.
 - Se encontram cristais de gelo, elas automaticamente congelam sobre o cristal por contato.
 - Gotículas de água líquida são muito comum serem encontradas a $T > -10^{\circ}\text{C}$.

Habitats de cristais de gelo



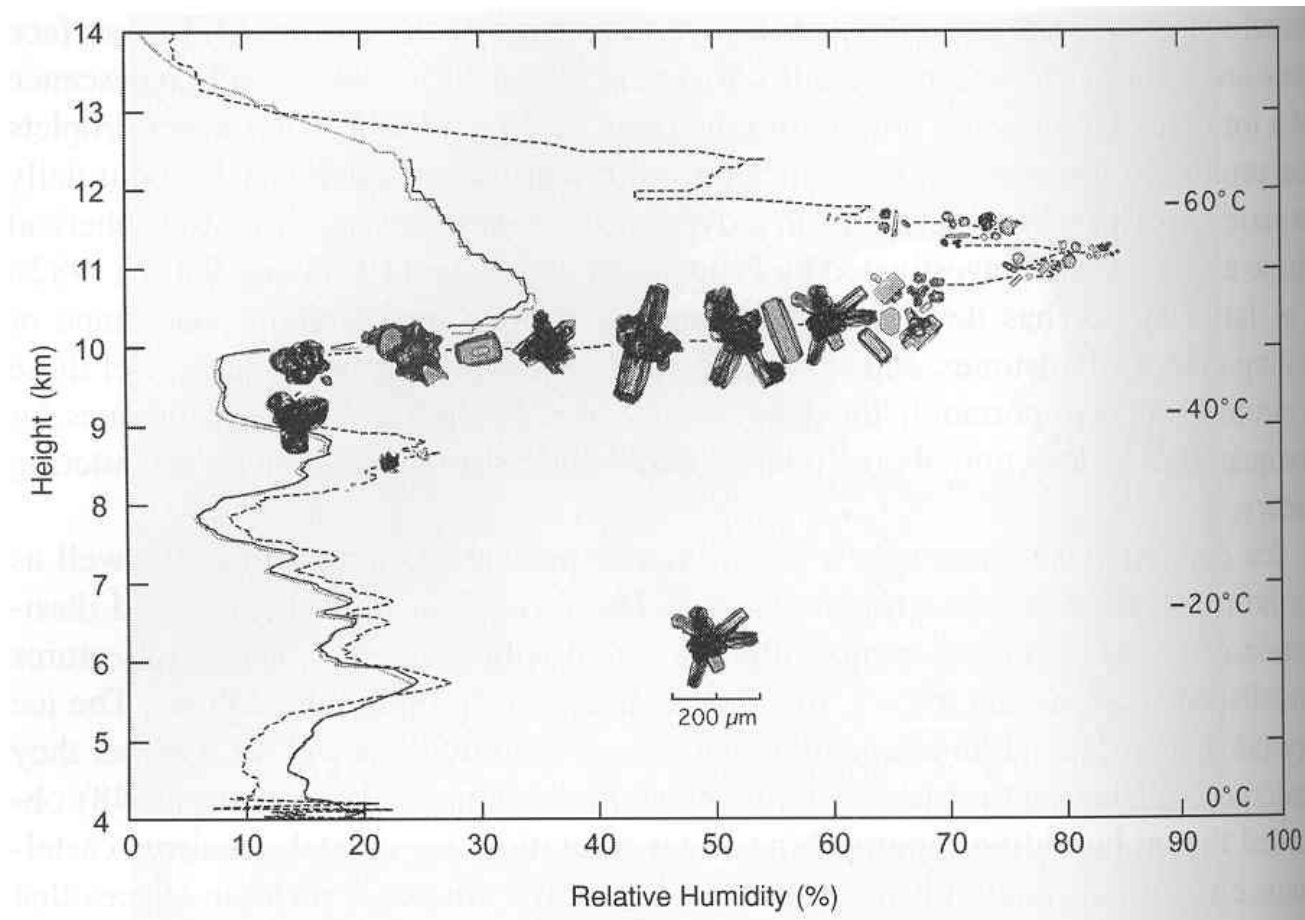


HOLLOWED COLUMN

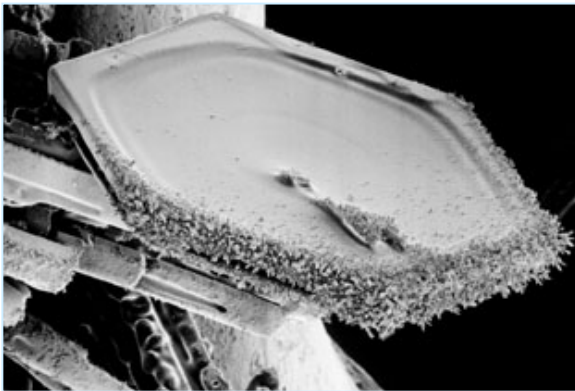
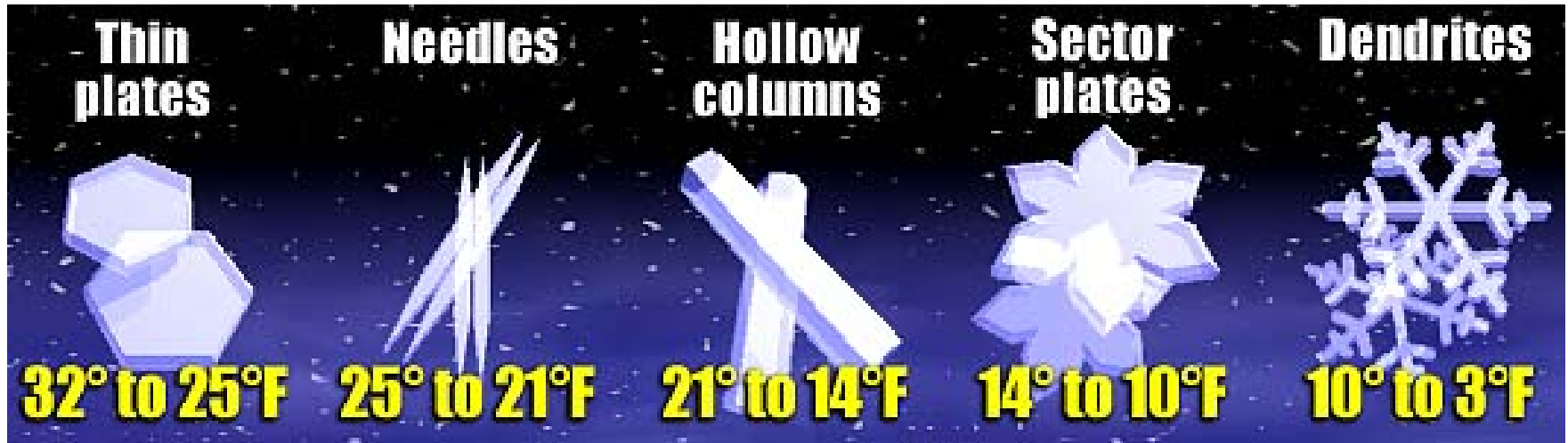


Courtesy of A. Heymsfield

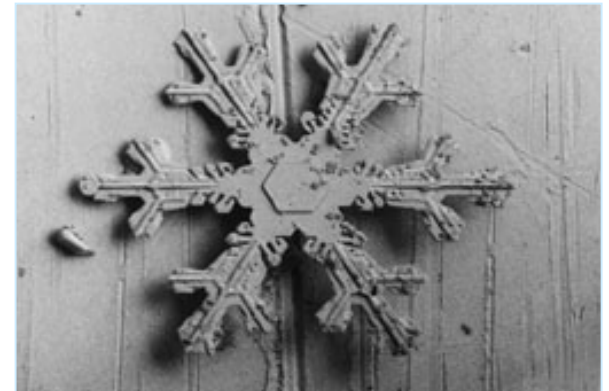
Tipos de cristais de gelo como uma função da altura (temperatura) e da umidade relativa



Cristais e temperatura



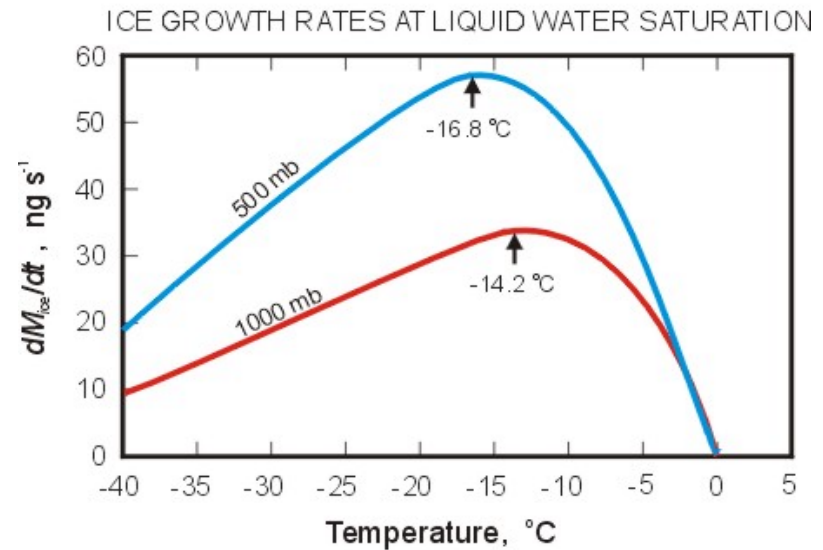
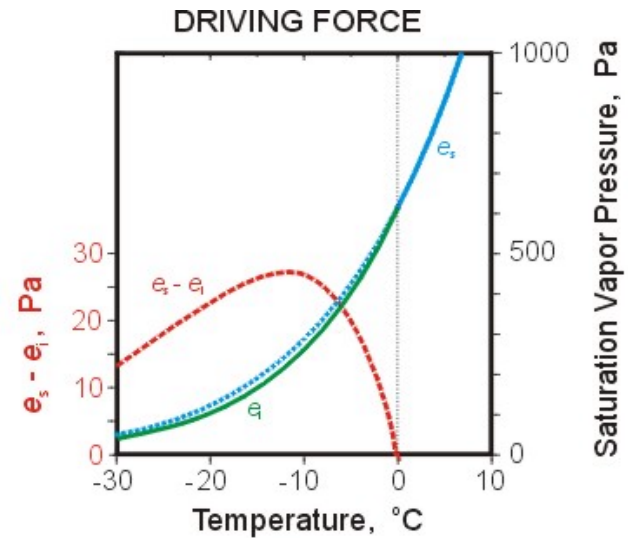
Imagens de cristais via microscópio de elétrons



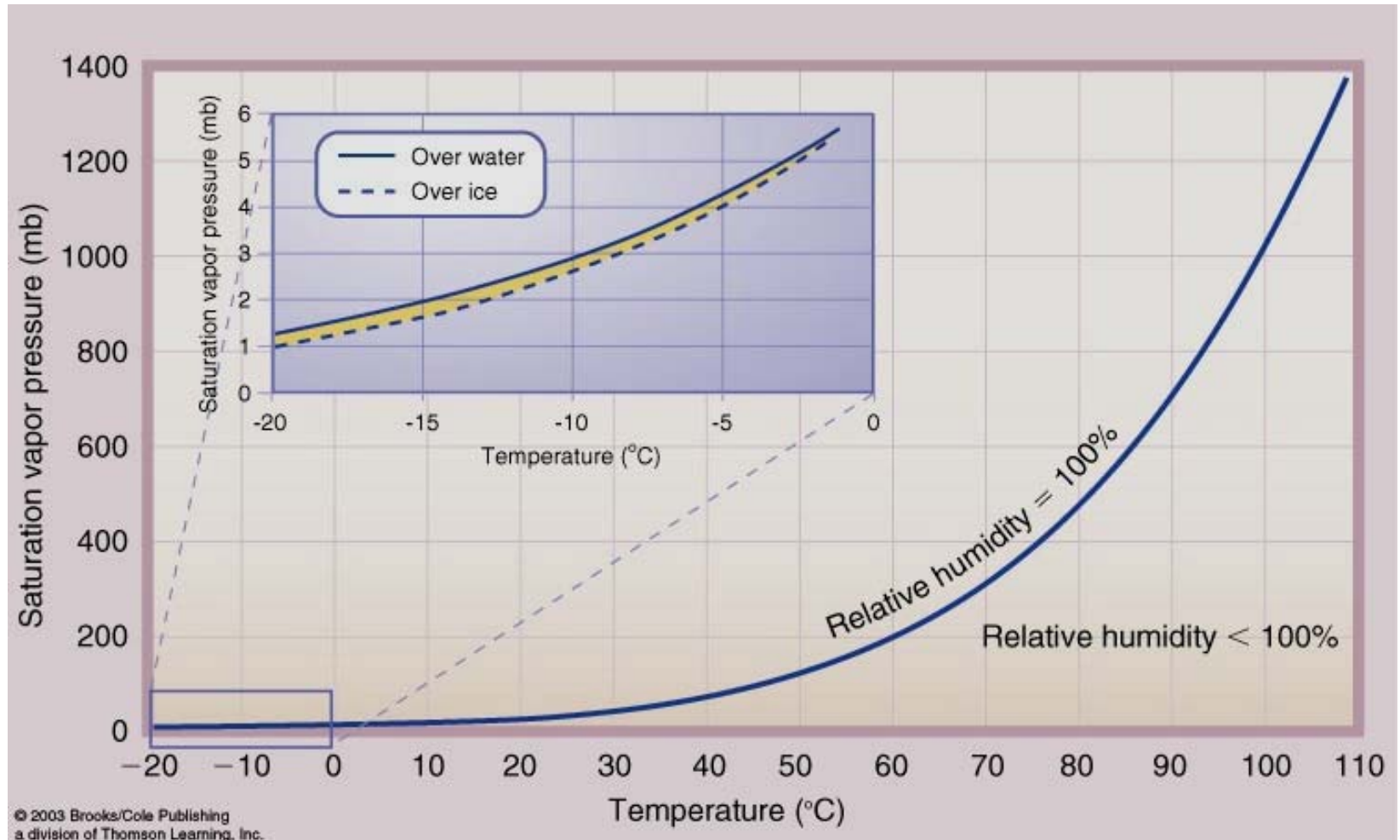
Fato singular:

Abaixo de 0°C, e_s é menor sobre gelo plano do que sobre água líquida.

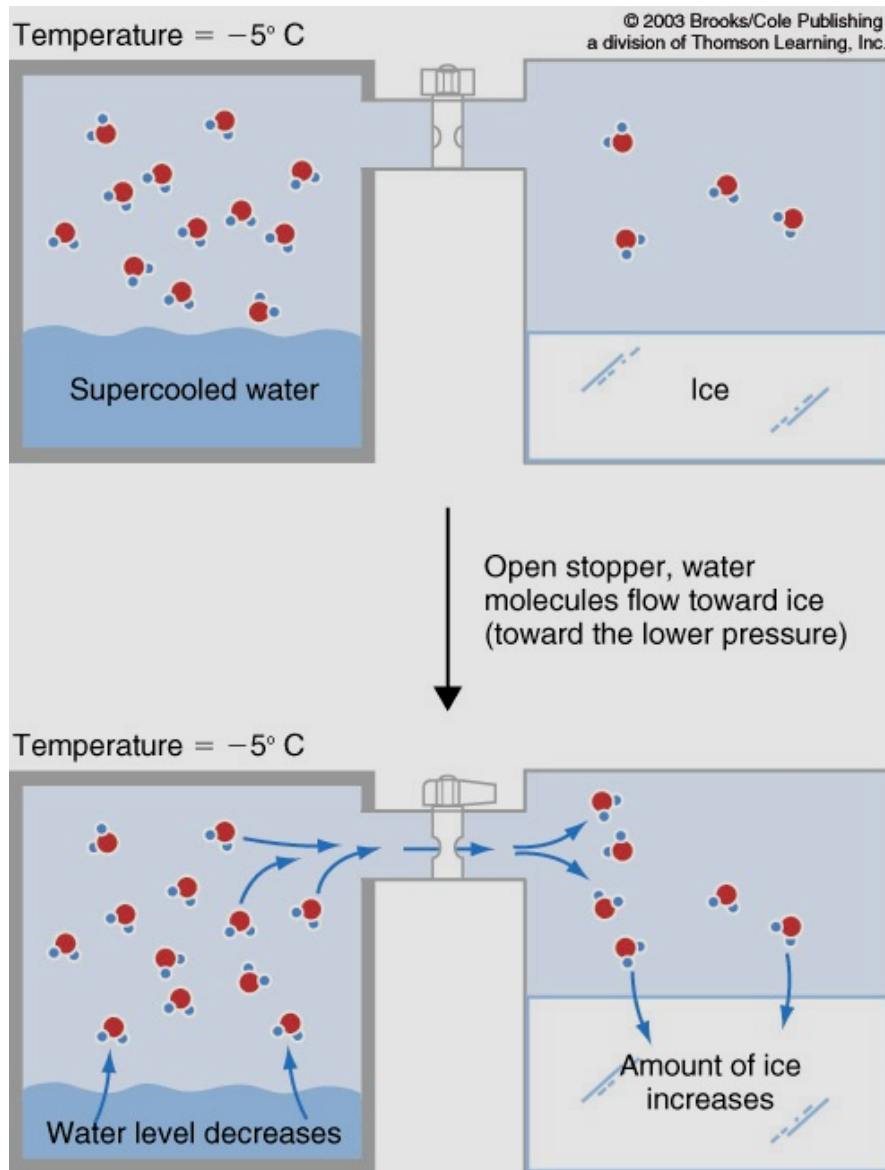
A maior diferença ocorre a -12°C



A adapted from Byers (1965)



A evidência em laboratório



Processos de crescimento de cristais de gelo

- **Deposição:**

difusão molecular de vapor sobre o cristal de gelo – na mistura líquido/gelo, o líquido pode evaporar para vapor e então congelar sobre o cristal de gelo.

$$S_i = \frac{e}{e_s} \frac{e_s}{e_i} \quad \frac{dm}{dt} = 4\pi CD(\rho_v - \rho_{vr}) \quad \frac{dM}{dt} = \frac{4\pi C(S_i - 1)}{\left(\left(\frac{L_s}{R_v T} - 1\right) \frac{L_s}{KT} + \frac{R_v T}{De_i(T)}\right)}$$

- **Acrescimento - *Riming*:**

gotículas super-resfriadas se aderem aos cristais de gelo durante contatos mecânicos.

- gotículas congelam em contato com o gelo
- forma pelotas de gelo - *graupel*
- *graupel* torna-se pesado e cai rápido
- granizo

- **Agregação:**

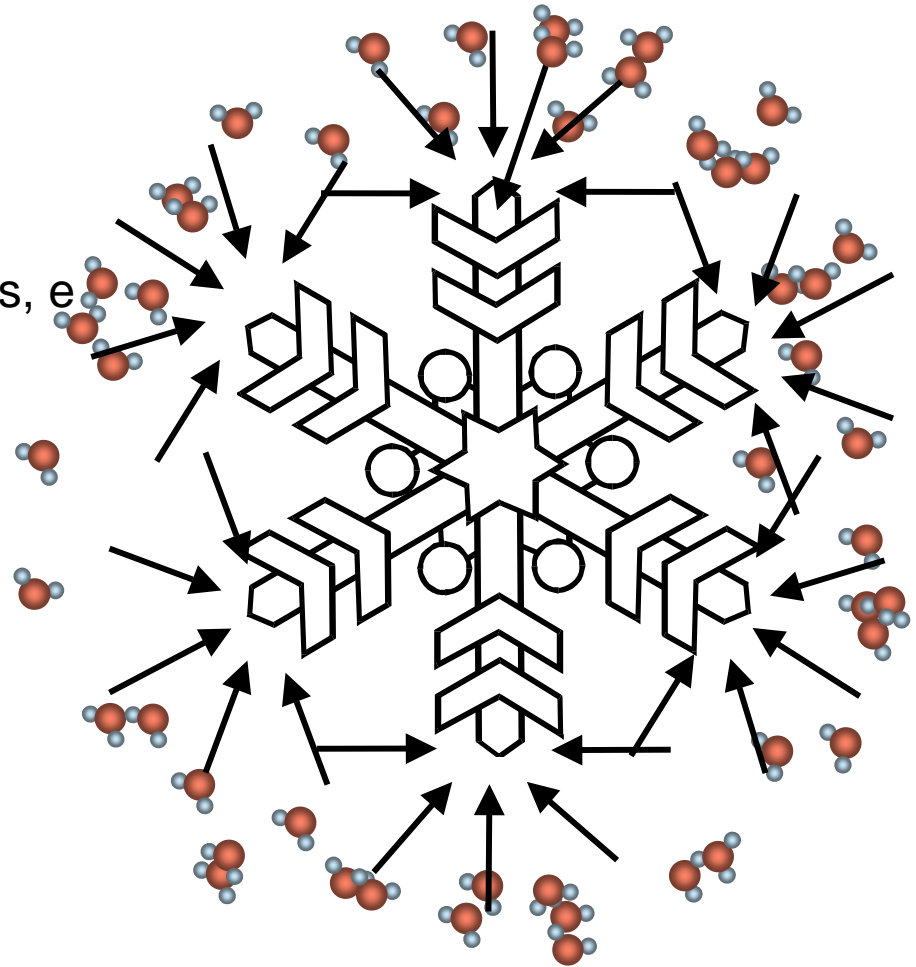
agregado de cristais, colidem, aderem entre si e formam os flocos de neve.

$$\frac{dm}{dt} = \bar{E} M \pi R^2 u(R)$$

O processo de deposição em “Nuvens Frias”

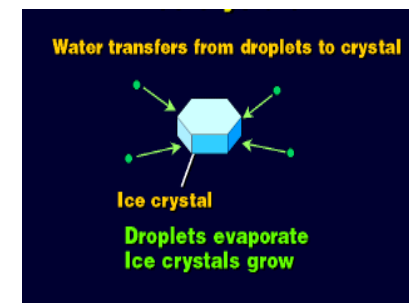
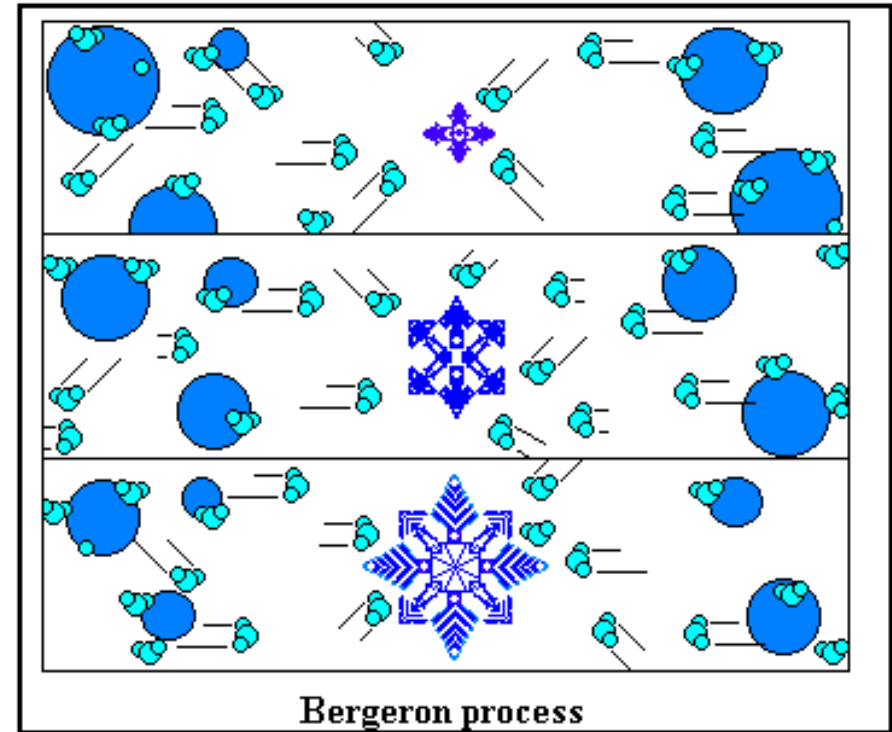
Cristais de gelo crescem por difusão molecular do vapor na nuvem.

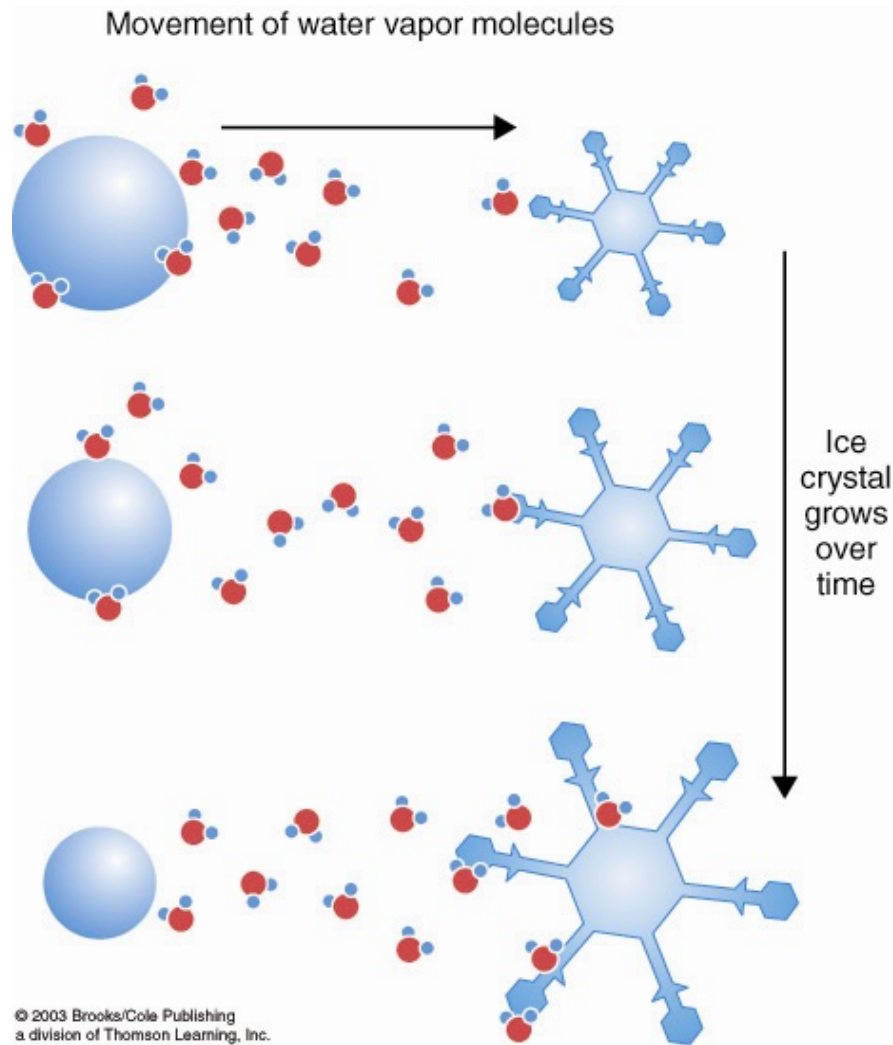
O vapor difunde para as estruturas pontiagudas a partir de muitas direções, e as pontas crescem rapidamente.



O processo de Bergeron - o processo das 3-fases

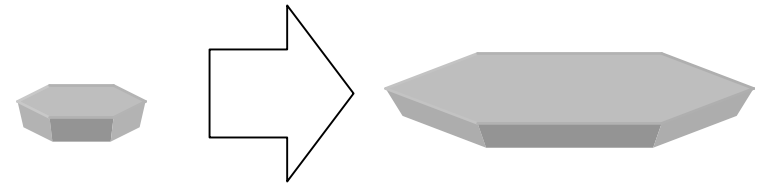
- Um novo ingrediente: cristais de gelo (fase sólida)
- Dentro da nuvem: água super-resfriada (líquido) em equilíbrio com o vapor de água.
 - Gelo não forma espontaneamente abaixo de 0°C
 - Gotículas de água "Super-resfriada" podem existir a temperaturas abaixo do ponto de congelamento - "esperando" por contatar alguma partícula para congelar ou perder sua massa para fazer crescer os cristais de gelo.





Deposição somente não é suficiente

A deposição só não justifica a formação de grandes partículas de gelo que precipitam.



1 mm



30 min.

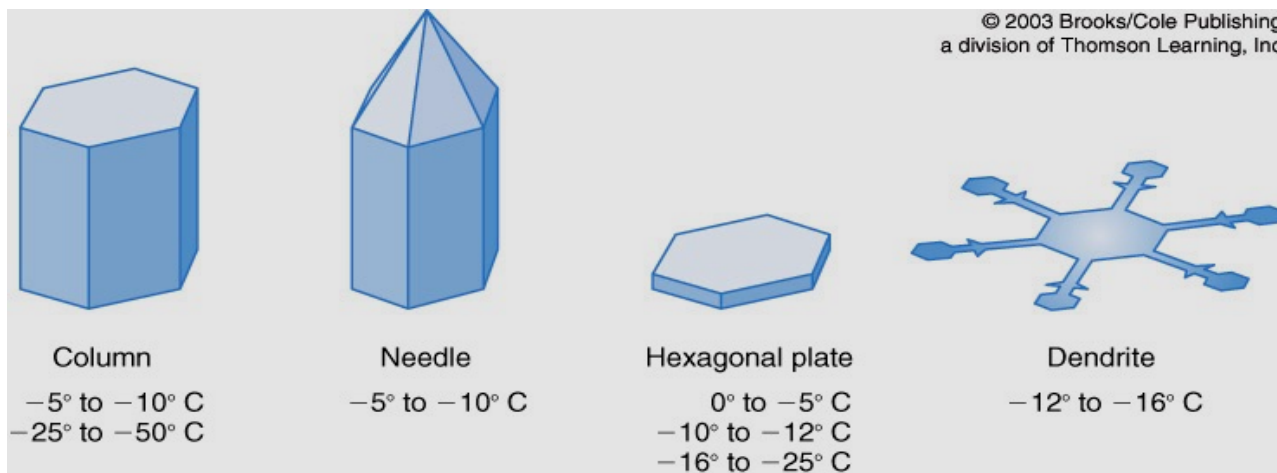
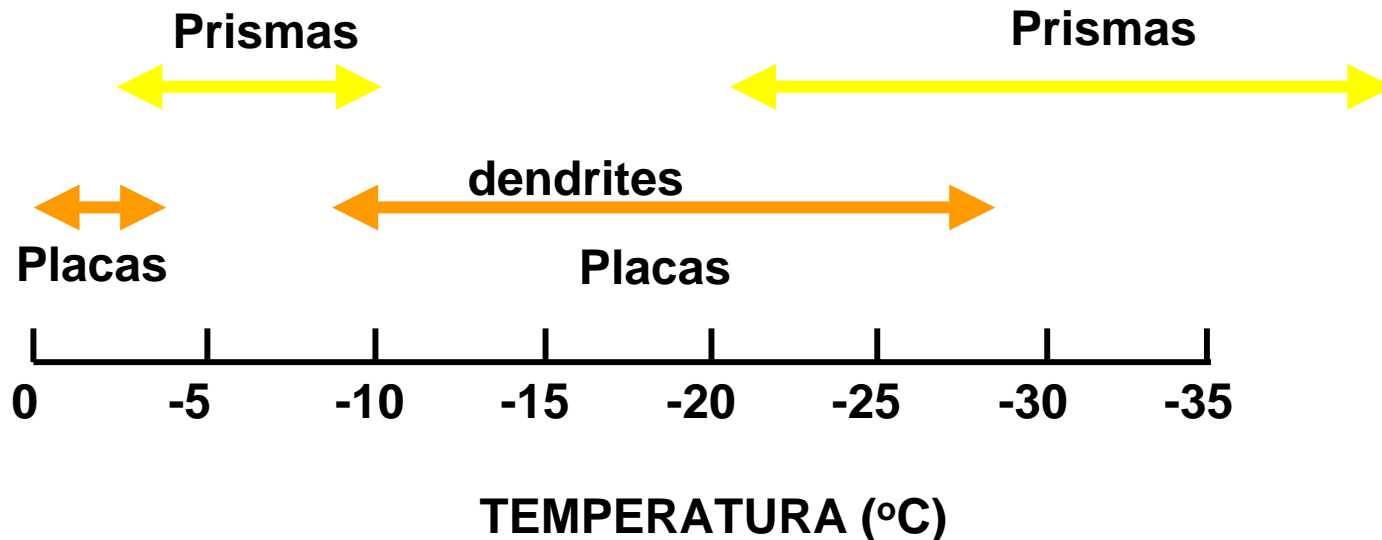
Uma classificação

Type of particle (F)	CODE	GRAPHIC SYMBOL	TYPICAL FORMS				TERM
	1						Plates
2						Stellar crystals	
3						Columns	
4						Needles	
5						Spatial dendrites	
6						Capped columns	
7						Irregular particles	
8						Graupel (soft hail)	
9						Ice pellets (Am. sleet)	
0						Hail	

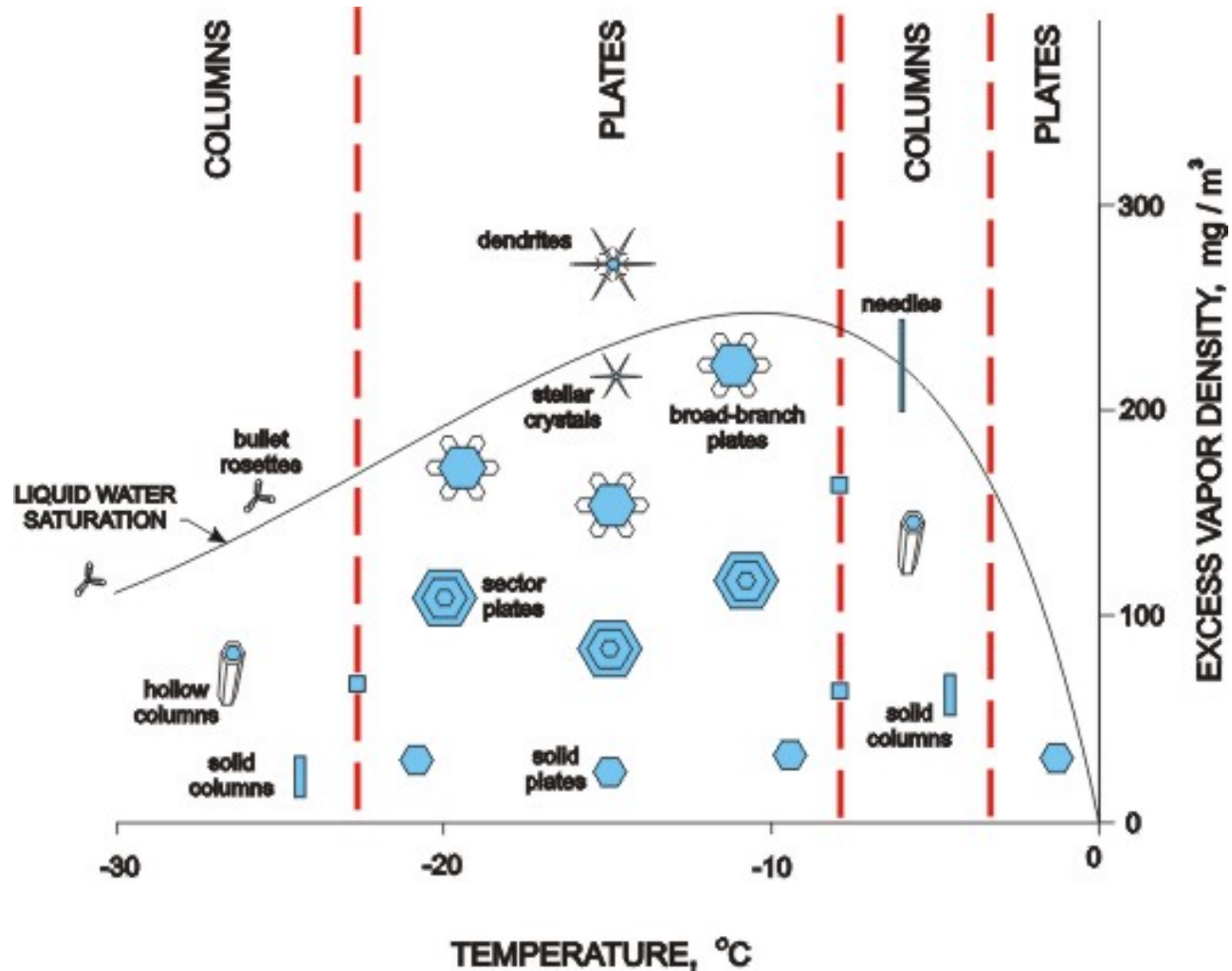
Additional characteristics	m	*	Broken
	r	*	Rimmed
	f	(*)	Flake
	w	e	Wet

Size of particle (D)	a	0-0.49 mm	Very small
	b	0.5-0.99 mm	Small
	c	1.0-1.99 mm	Medium
	d	2.0-3.99 mm	Large
	e	4.0 mm or larger	Very large

Habitats dos cristais de gelo



Habitats dos cristais de gelo



Similaridade entre os processos

Compare as fórmulas

$$S_i = \frac{e}{e_i} = \frac{e}{e_s} \frac{e_s}{e_i} = S \left(\frac{e_s}{e_i} \right) \quad \text{Eq. 9.1}$$

Para o crescimento por condensação e para crescimento de cristais

$$r \frac{dr}{dt} = \frac{(S-1)}{\left(\left(\frac{L}{R_v T} - 1 \right) \frac{L \rho_L}{KT} + \frac{\rho_L R_v T}{De_s(T)} \right)} \quad \text{Eq. 7.17}$$

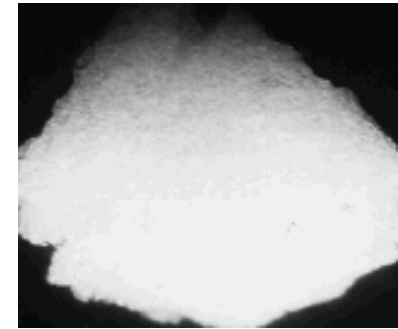
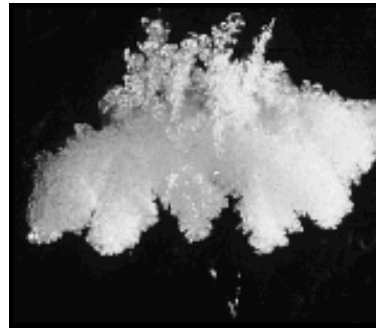
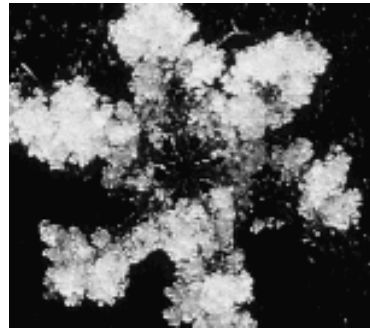
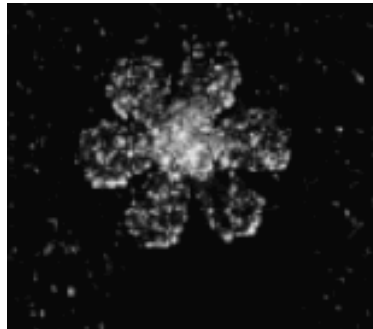
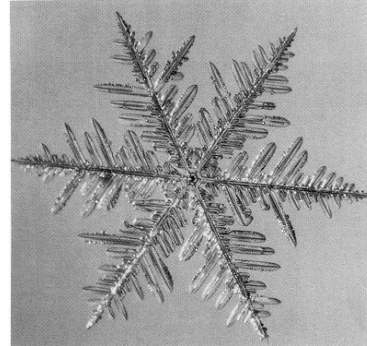
$$\frac{dM}{dt} = \frac{4\pi C (S_i - 1)}{\left(\left(\frac{L_s}{R_v T} - 1 \right) \frac{L_s}{KT} + \frac{R_v T}{De_i(T)} \right)} \quad \text{Eq. 9.4}$$

Para colisão-coalescência e para a agregação de cristais

$$\frac{dR}{dt} = \frac{\overline{EM}}{4\rho_L} u(R) \quad \text{Eq. 8.15}$$

$$\frac{dm}{dt} = \overline{EM} \pi R^2 u(R) \quad \text{Eq. 9.8}$$

O crescimento por acreção de gotículas super-resfriadas



Cristal de gelo



Tempo

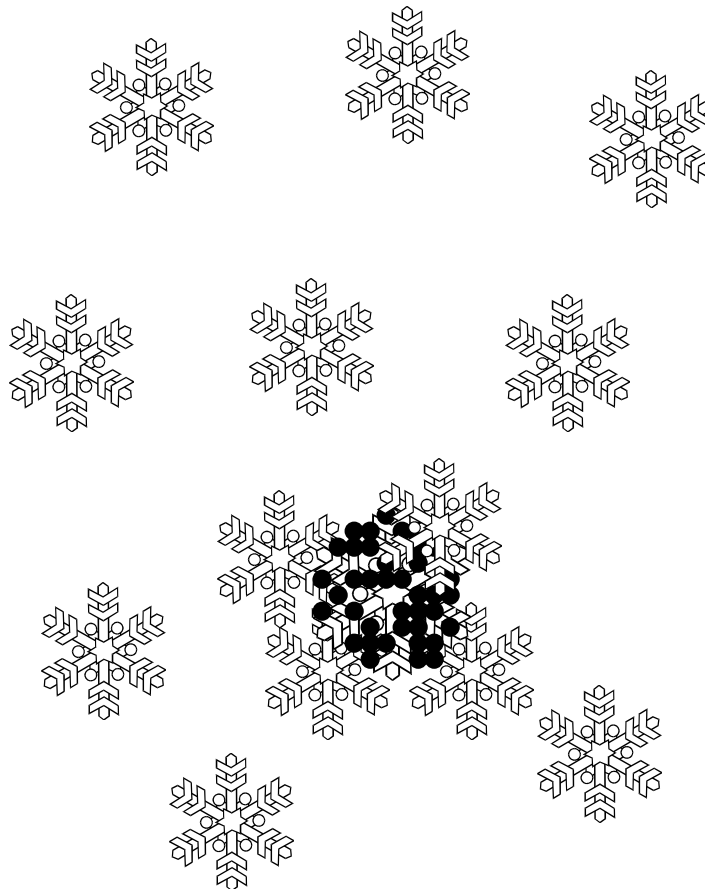


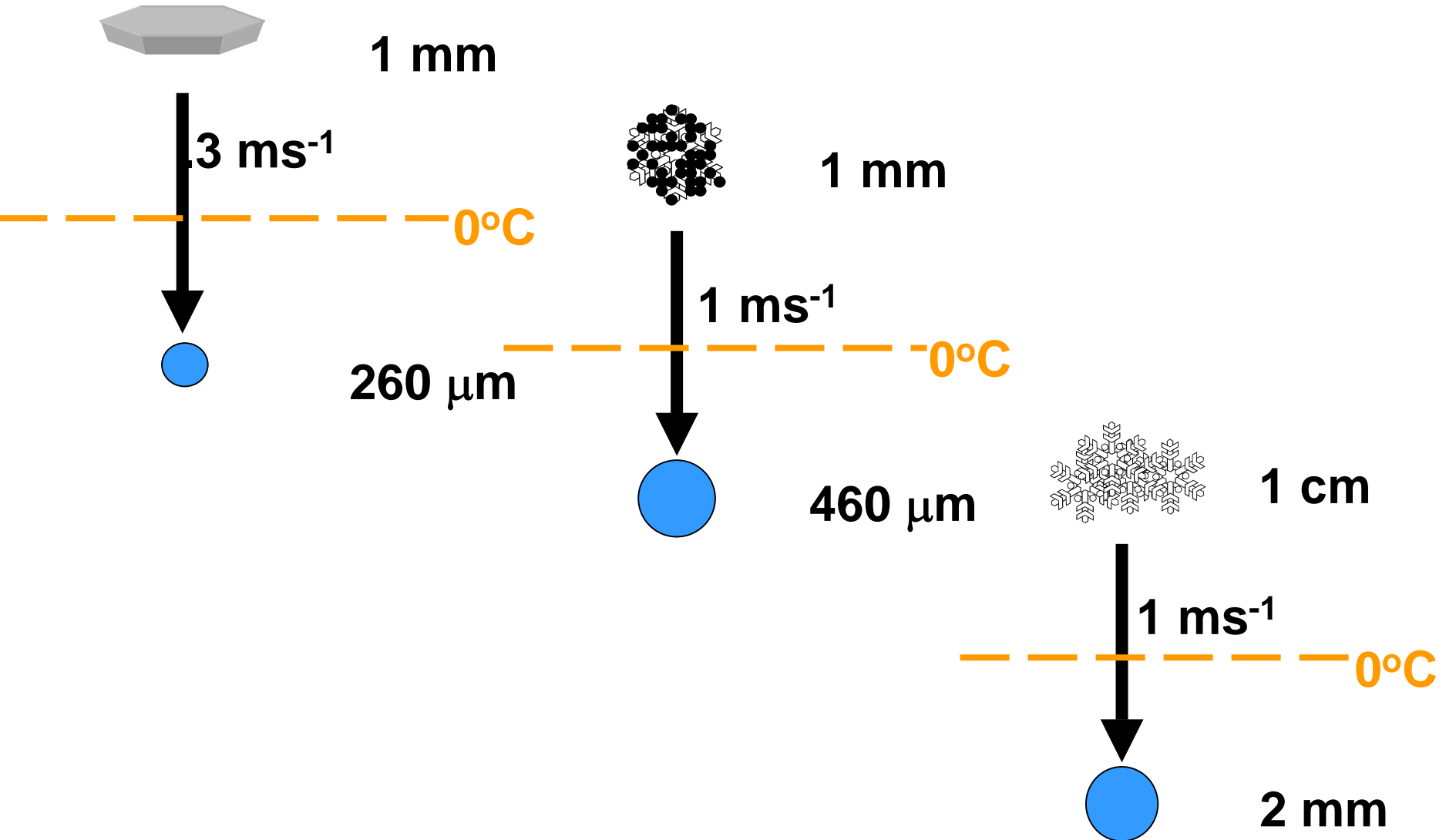
graupel

Ao final do processo, o cristal original não pode mais ser distinguido.

Crescimento por agregação - Aderência de cristais

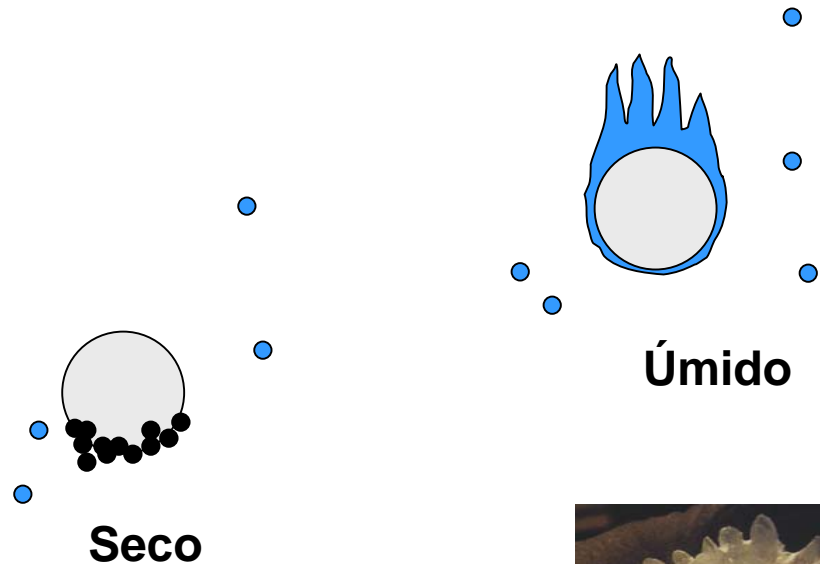
cristais se tornam mais “pegajosos” para temperaturas entre - 5 e 0 C





Formação do Granizo

Precipitação oriunda de nuvens convectivas em forma de pelotas irregulares de gelo, gerada por crescimento através de múltiplas interações na corrente ascendente.



Velocidade Terminal do Granizo



A velocidade terminal (m/s) do granizo é estimada via aD^b , onde D é o diâmetro equivalente do granizo (em mm), e a e b são constantes empíricas.

Medidas indicam que b varia entre 0.5 a 1, isto é dependência menor que linear com o diâmetro. Considerando dados observacionais determinou-se que $a=1.43$ e $b=0.8$

Assim para um granizo de 1-cm sua velocidade terminal é de 9 m/s.

Um granizo de 8 cm pesa cerca de 0.7 kg e cai a 48 m/s (171 km/h)!

Não é surpresa que produzem estragos a bens materiais e vidas.

O maior granizo já medido caiu no Kansas em setembro de 1970: seu peso 755 gramas, com um diâmetro de 14 cm, e caiu a 57 m/s (i.e. 207 km/h).

Esta velocidade é comparável à maior corrente ascendente observada, estimada via aeronave e Radar Doppler.

Exemplos de destruição devido ao Granizo



Receita para a Formação de Granizo

- Nuvem Cumulonimbus
- Alto conteúdo de água líquida
- Forte e duradoura corrente ascendente
- Embriões de granizo – sementes de granizo
- Crescer via processo de colisão-coalescência

Terminal Velocities

Qual a corrente ascendente necessária para manter suspenso essas partículas?

Diametro do Granizo	Velocidade da Corrente ascendente	Velocidade Terminal
3 cm	25 m s^{-1}	56 mi hr^{-1}
8 cm	55 m s^{-1}	125 mi hr^{-1}
10 cm	83 m s^{-1}	185 mi hr^{-1}

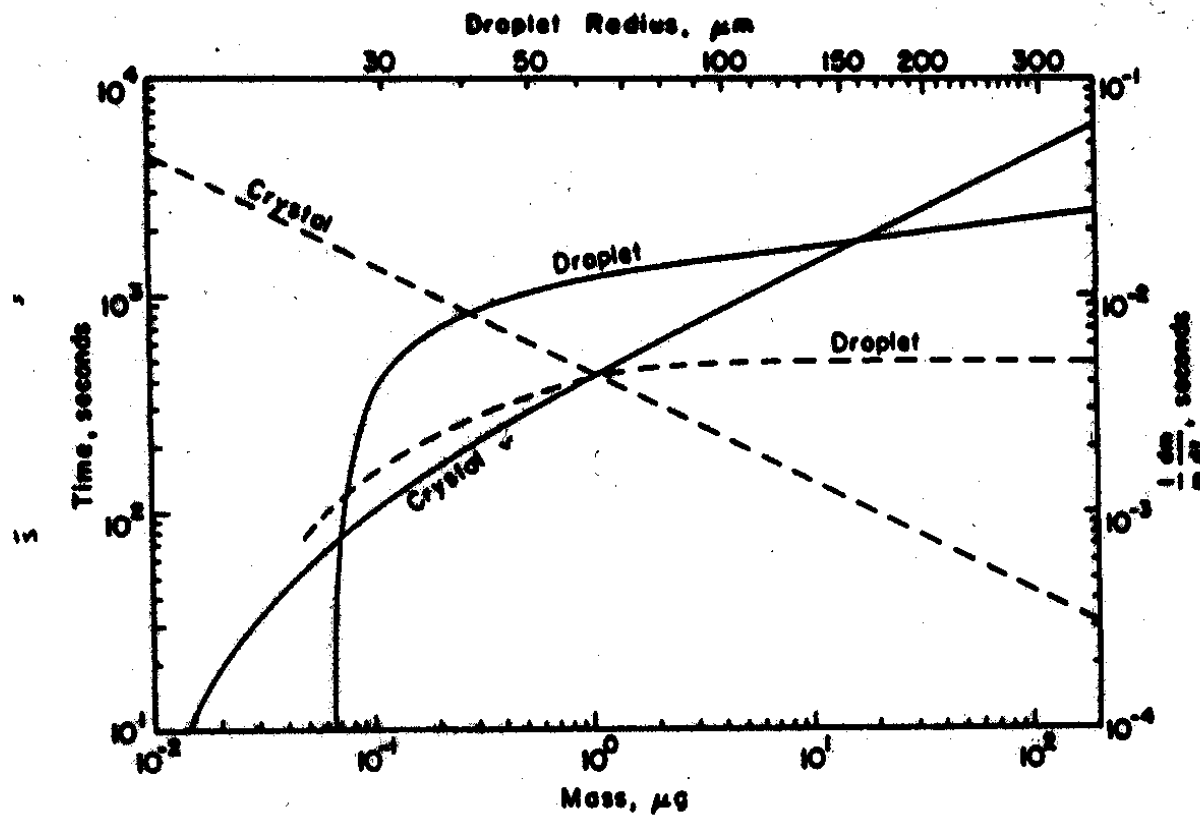
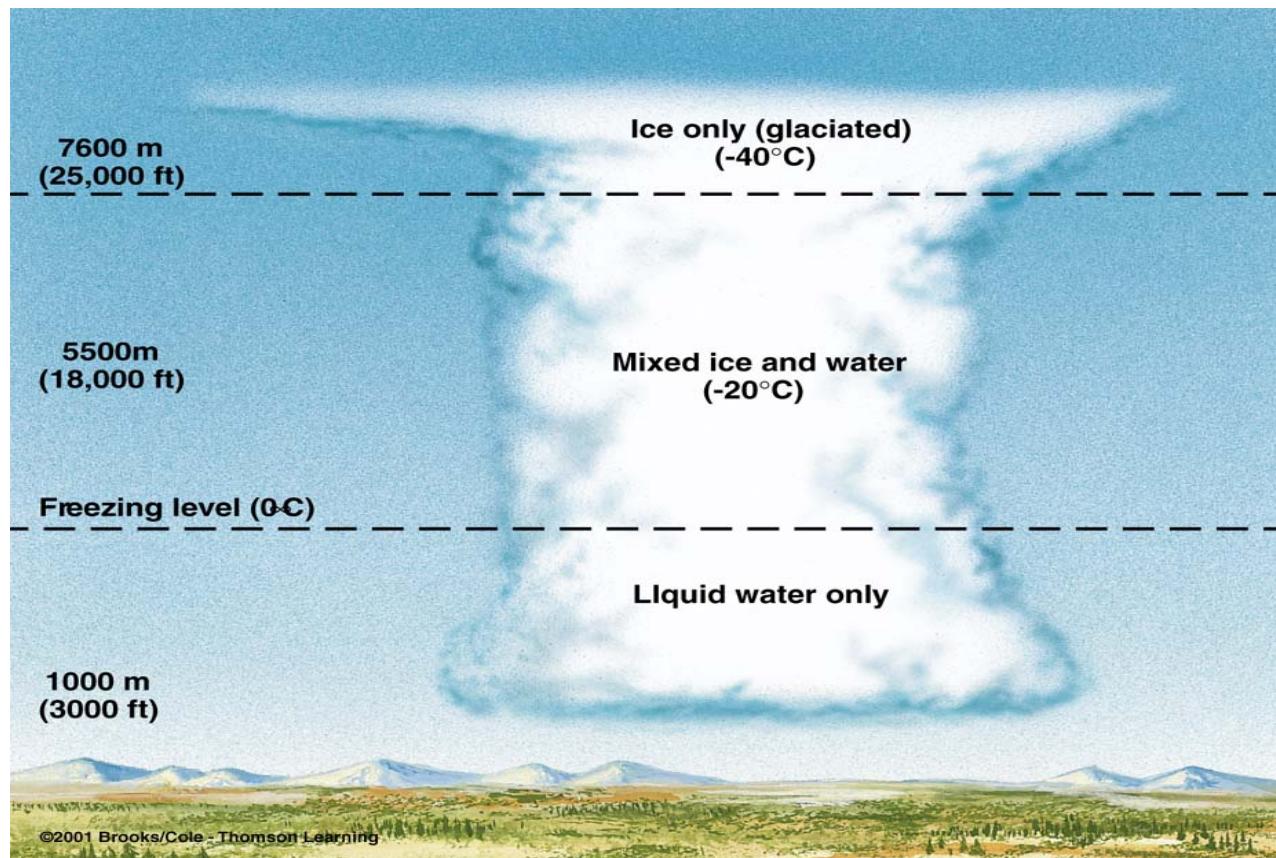


FIG. 9.8. Times required for an ice crystal and a water droplet (solid curves) to grow to the indicated mass. Top scale gives the corresponding drop radius. Dashed curves are for the rates of fractional increase of mass, referred to the scale on the right.

Distribuição de gelo e água numa nuvem Cumulonimbus



Acresção, fraturamento e agregação de cristais de gelo



(a) Falling ice crystals may freeze supercooled droplets on contact (accretion), producing larger ice particles.



(b) Falling ice particles may collide and fracture into many tiny (secondary) ice particles.

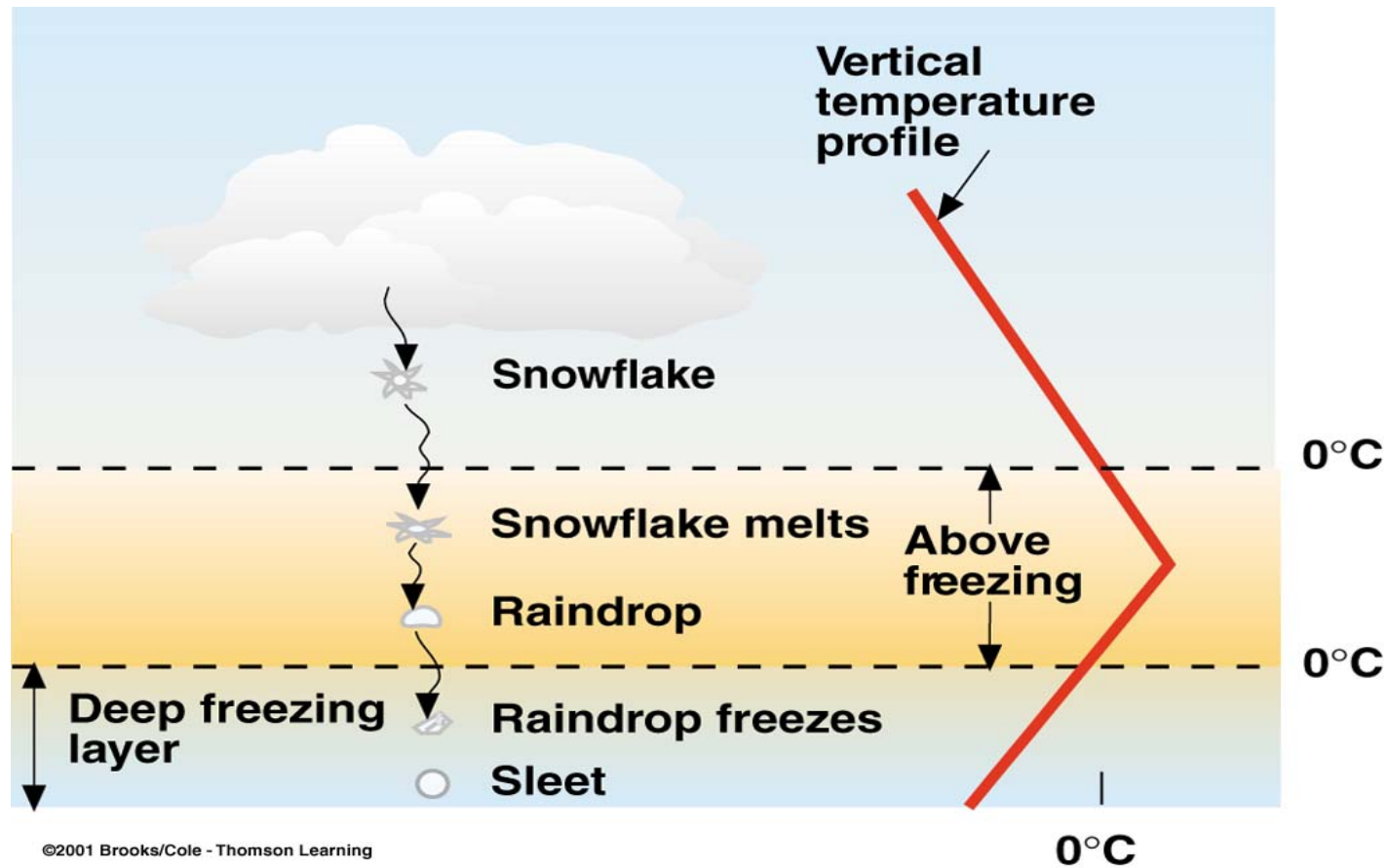


(c) Falling ice crystals may collide and stick to other ice crystals (aggregation), producing snowflakes.

Cristais de gelo em nuvens Cirrus



Efeitos do degelo durante a precipitação





Acumulação por *riming*
Freezing rain

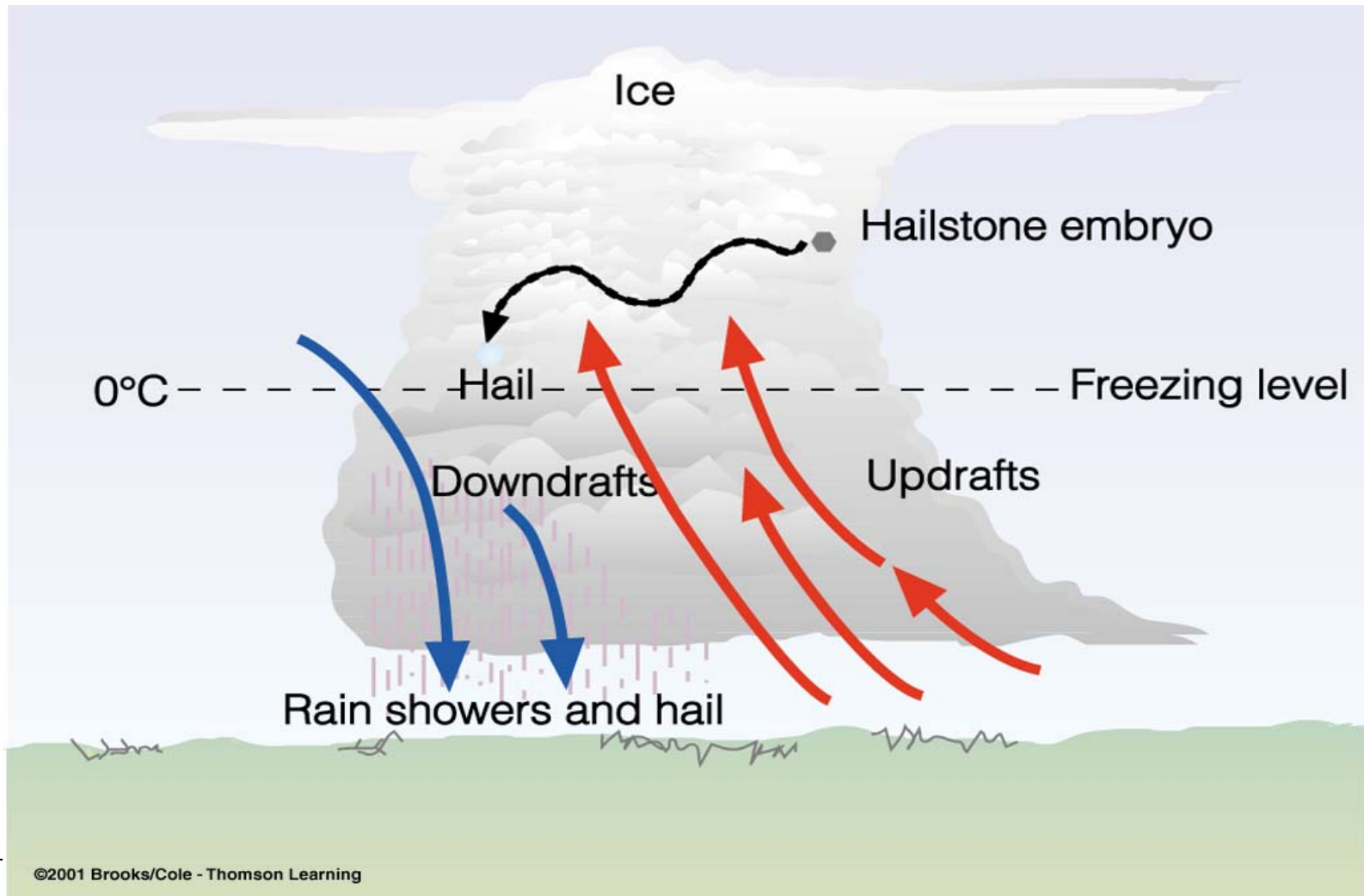




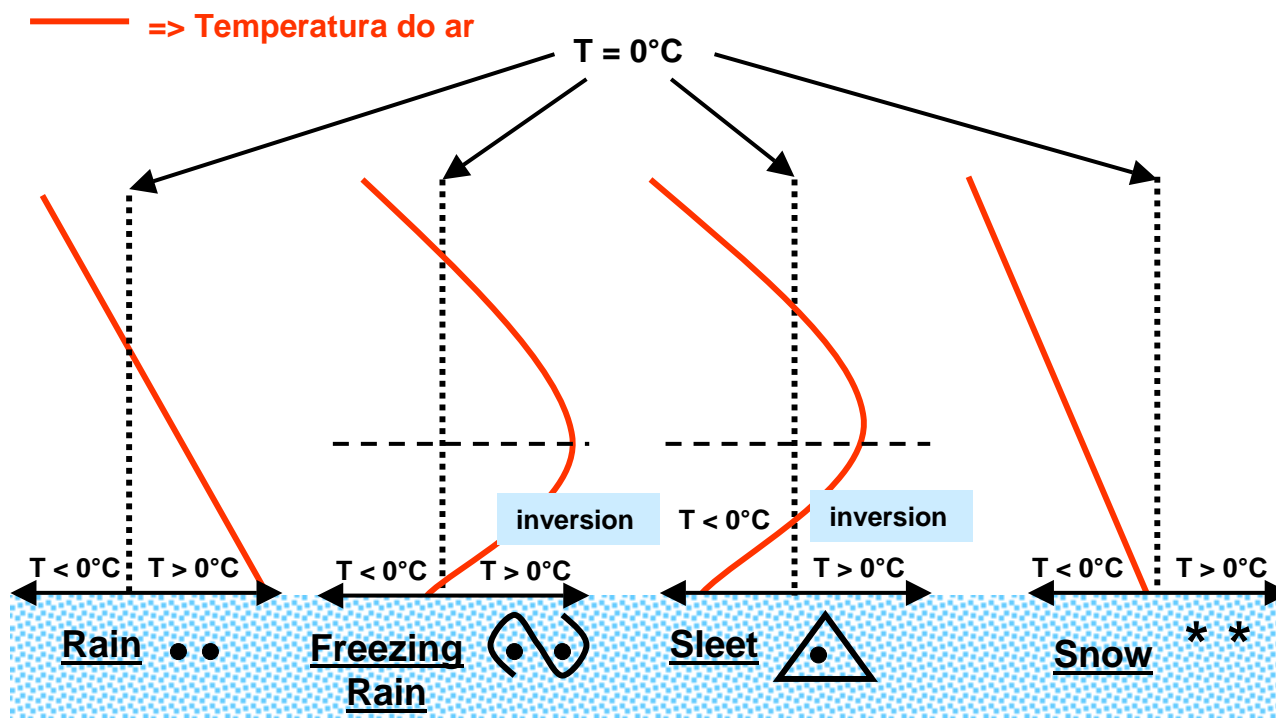
Granizo em Coffeyville 3 de Set de 1970 no Kansas: A estrutura em camadas indica viagens através de uma nuvem com temperatura e conteúdo de água líquida variável



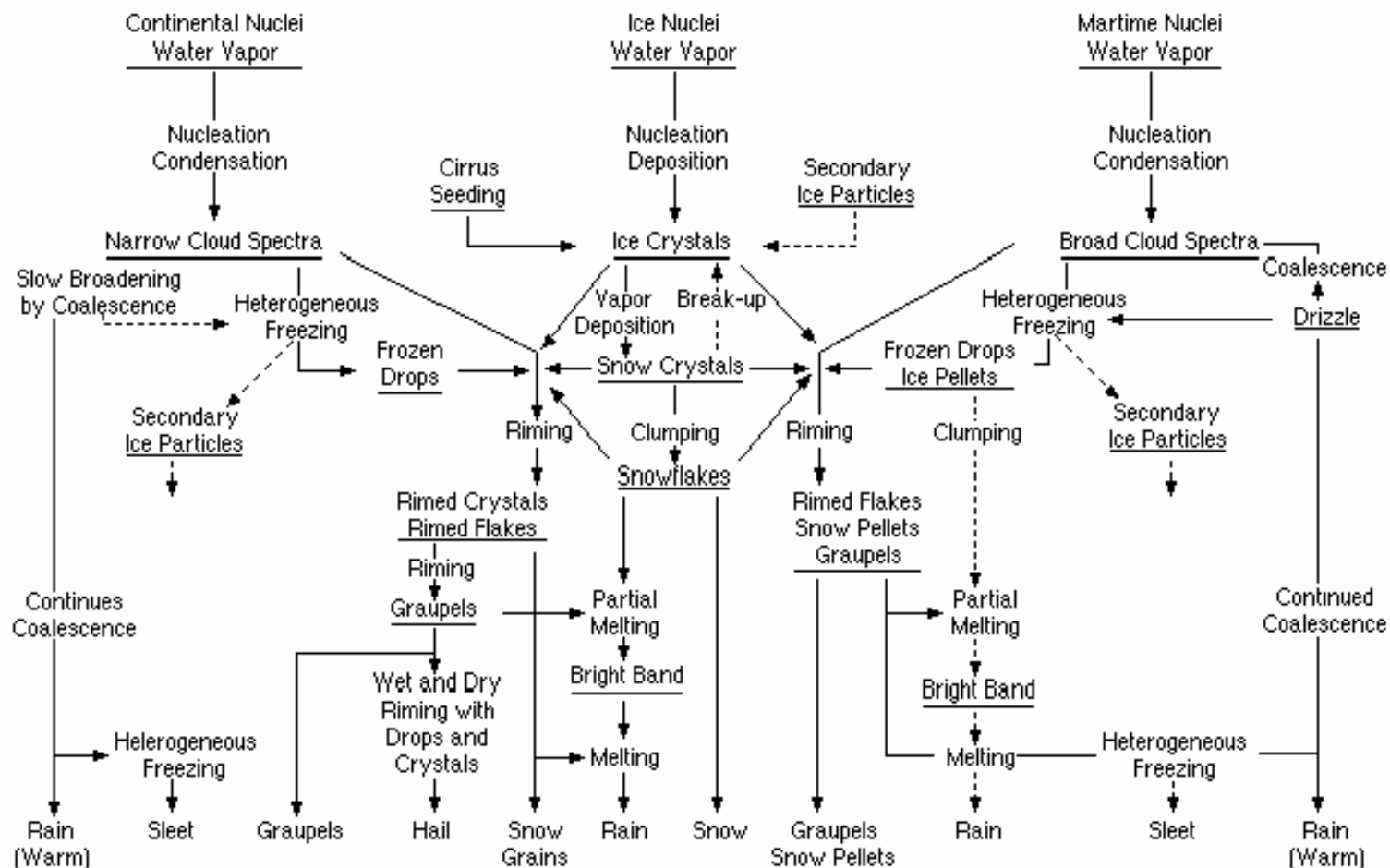
Quando a corrente ascendente está inclinada, partículas de gelo são varridas horizontalmente através da nuvem, produzindo trajetórias favoráveis ao crescimento do granizo



Precipitação e perfiz verticais de temperatura



A Síntese da Formação da Precipitação



Exercícios:

6.1 Discuta o crescimento de cristais de gelo por difusão de vapor

6.2 Discuta o processo de 3-fases de Bergeron

6.3 Discuta o crescimento de partículas de gelo por acreção de gotículas e por agregação de cristais

6.4 Analise as características microfísicas e dinâmicas para a formação de granizo em nuvens Cumulonimbus