บทที่ 9
หยาดน้ำฟ้า (Precipitation)

9.1 การกำเนิดหยดน้ำ (Nucleation or Birth)

9.2 การเจริญเติบโตของหยดน้ำโดยการควบแน่น (การแพร่) (Growth by Condensation or Diffusion)

9.3 การใช้กราฟสรุปแสดงการก่อตัวและการเจริญเติบโตของหยดน้ำในก้อนเมฆ

9.4 การชนกัน (Coalescene) จนกลายเป็นหยดน้ำฝน (Maturity)

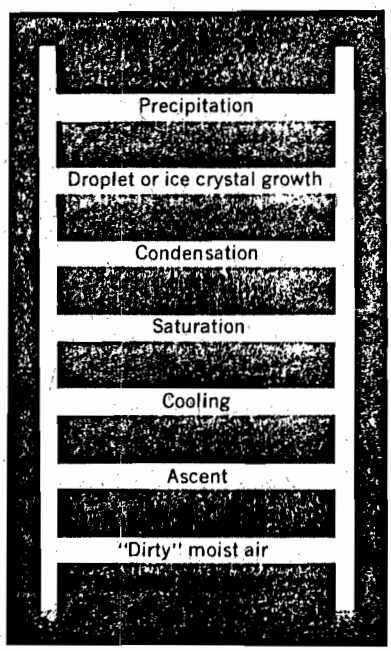
9.5 การทำฝนเทียม (Cloud Seeding)

9.6 ลูกเห็บ

9.7 สลีท และหยดน้ำฝนที่เยือกแข็ง (Sleet and Freezing Rain)

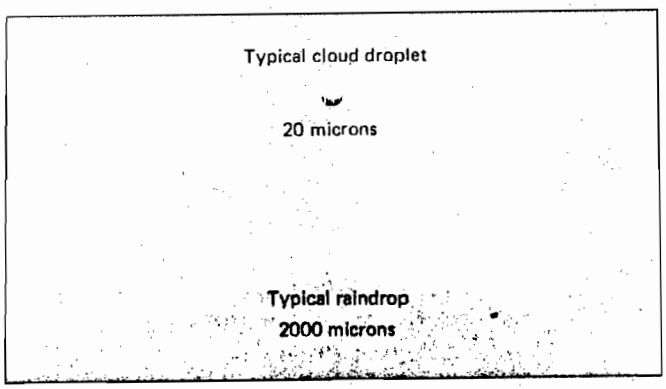
ขั้นตอนของการเจริญเติบโตของหยดน้ำฝนโดยย่อมีดังนี้ ครั้งแรกอากาศจะลอยตัวสูงขึ้น ขยายตัวภายใต้อุณหภูมิที่ลดลง และอากาศจะสามารถอม (hold) ไอน้ำได้น้อยลงกว่าเดิมจนทำให้เกิดการอิ่มตัว หยดน้ำเล็ก ๆ ในก้อนเมฆและผลึกน้ำแข็งจะควบแน่นบนฝุ่นบางชนิดในอากาศเจริญขึ้นไมเลกุลต่อไมเลกุลแต่จะยังไม่สามารถบรรลุไปถึงขนาดของหยดน้ำฝน

เมื่อหยดน้ำเล็ก ๆ (droplets) หรือ ผลึกน้ำแข็งเจริญเติบโตได้มากพอ (การเจริญเติบโตเกิดขึ้นในผลึกน้ำแข็งได้ง่ายกว่าในหยดน้ำ) ก็จะเริ่มหล่นลงมา หยดน้ำที่โตจะตกลงชนกับหยดน้ำที่เล็กกว่าตามเส้นทางที่มันตก โดยวิธีนี้หยดน้ำเล็ก ๆ ในก้อนเมฆก็จะเจริญเติบโตจนถึงขนาดเม็ดฝน (rain drop) หรือเกล็ดหิมะ (snowflake) และตกลงมาสู่โลก (รูป 9.1)



รูป 9.1 การเกิดหยาดน้ำฝนเปรียบเสมือนขั้นบันได (1) อากาศจะต้องชื้นและสกปรก (2) อากาศจะต้องลอยตัวสูงขึ้น (3) อากาศขยายตัวและเย็นลง (4) อากาศเกิดการอิ่มตัว (5) ควบแน่น (6) หยดน้ำเล็ก ๆ หรือผลึกน้ำแข็งเจริญเติบโตขึ้นจนสามารถหล่นลงมาทำให้เกิดมีการชนกันเกิดขึ้น (7) เกิดหยาดน้ำฟ้า

จะเห็นว่าหยดน้ำเล็ก ๆ ในก้อนเมฆและเม็ดฝนจะมีขนาดแตกต่างกัน หยดน้ำในก้อนเมฆจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางโต 10 ถึง 100 ไมครอน ในขณะที่เม็ดฝนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางโต 500 ถึง 5000 ไมครอน รูปที่ 9.2 จะให้ทัศนะต่อขนาดที่เกี่ยวข้องกัน



รูป 9.2 การเปรียบเทียบขนาดของหยดน้ำเล็ก ๆ ในก้อนเมฆกับหยดน้ำฝน

9.1 การกำเนิดหยดน้ำ (Nucleation or Birth)

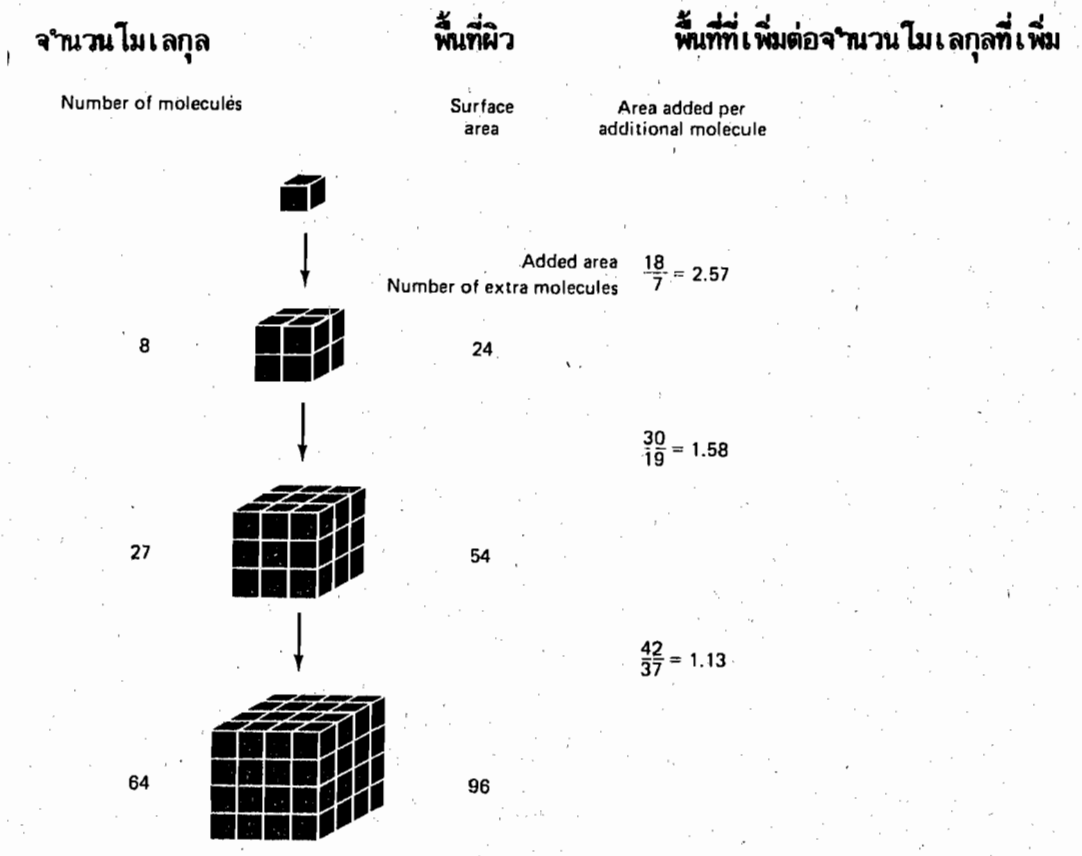
ถ้าอากาศของโลกเราบริสุทธิ์โดยปราศจากฝุ่นใด ๆ แล้วก็จะมีฝนบนโลกน้อยกว่านี้มาก ในอากาศชื้นที่สกปรกการควบแน่นสามารถเริ่มต้นเกิดขึ้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพียง 65 เปอร์เซ็นต์โดยที่จะมีชั้นที่บางมากของน้ำควบแน่นบนเกลือแกงซึ่งสามารถละลายน้ำได้โดยง่าย สิ่งนี้เองทำให้อากาศที่ชื้นเป็นฝ้า

เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เกิน 100% อนุภาคที่มีน้ำเคลือบเหล่านี้ก็จะเจริญอย่างรวดเร็วเป็นหยดน้ำเล็ก ๆ ในก้อนเมฆ แต่ถ้าไม่มีอนุภาคของฝุ่นอยู่ในอากาศการควบแน่นจะยังไม่เกิดขึ้นจนกว่าความชื้นสัมพัทธ์จะเกิน 400%

เป็นเพราะสาเหตุของแรงตึงผิวนั่นเองที่ทำให้เป็นการยากที่จะเริ่มต้นทำให้หยดน้ำบริสุทธิ์เจริญเติบโตขึ้น การกำเนิดหยดน้ำ (nucleation) จัดเป็นกระบวนการทางสถิติ โมเลกุลหลาย ๆ โมเลกุลจะต้องชนและจับแน่นเข้าด้วยกัน แต่แรงตึงผิวทำให้โมเลกุลเหล่านี้ยากที่จะจับเข้าด้วยกันโดยเฉพาะเมื่อหยดน้ำยังมีขนาดเล็กมาก เราลองมาดูว่าทำไมจึงเป็นเช่นนั้น

แรงตึงผิวมีบทบาทที่จะรักษาพื้นที่ผิวของของเหลวให้น้อยที่สุด เมื่อแมลงเดินอยู่บนพื้นน้ำนั้น น้ำหนักของมันจะกดบนพื้นผิว ดังนั้นเป็นการขยายพื้นที่ผิวของน้ำแรงตึงผิวจะเป็นเหตุให้พื้นผิวของน้ำ (surface water) มีบทบาทคล้ายกับแผ่นยางและต่อต้านการยืดตัวออก สิ่งนี้เองทำให้แมลงไม่จมลงในน้ำ

เมื่อโมเลกุลของน้ำเคลื่อนที่เข้าไปในหยดน้ำ ก็จะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของหยดน้ำ เนื่องจากแรงตึงผิวต่อต้านการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ ดังนั้นจึงเป็นการยากที่โมเลกุลของน้ำจะเคลื่อนที่เข้าไปในหยดน้ำโดยความจริงแล้วการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวในหยดน้ำที่เล็กจะมากกว่าในหยดน้ำที่ใหญ่ ดังแสดงในรูป 9.3

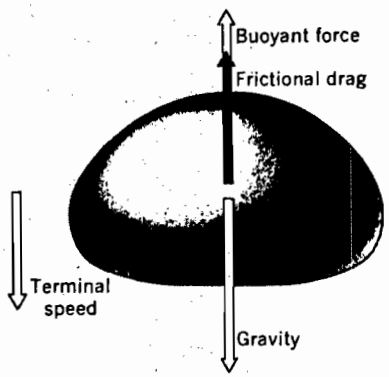


รูป 9.3 การเพิ่มพื้นที่ผิวอันเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนโมเลกุลของไอน้ำ หยดน้ำยิ่งโตขึ้น (ในที่นี้ใช้สี่เหลี่ยมลูกบาศก์แทน) จำนวนพื้นที่ที่เพิ่มขึ้นต่อจำนวนโมเลกุลที่เพิ่มขึ้นก็ยิ่งมีอัตราส่วนน้อยลง

ดังนั้นหยดน้ำยิ่งมีขนาดเล็กก็ยิ่งเป็นการลำบากมากขึ้นที่โมเลกุลของน้ำจะเข้าไปโดยกลับกันโมเลกุลของไอน้ำจะสามารถออกจากหยดน้ำที่เล็กได้ง่ายกว่า (นั่นคือการระเหย) เนื่องจากเป็นการลดพื้นที่ลง ดังนั้นแรงตึงผิวเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้หยดน้ำบริสุทธิ์ไม่สามารถเริ่มต้นเจริญเติบโตขึ้นมาได้

เม็ดฝนหรือหยดน้ำฝนสามารถยึดเข้าด้วยกันเป็นรูปหยดน้ำได้ด้วยแรงตึงผิวและแรงนี้เองทำให้หยดน้ำฝนและหยดน้ำเล็ก ๆ ในก้อนเมฆมีรูปเป็นทรงกลม สำหรับปริมาตรใด ๆ ที่กำหนดให้ทรงกลมเป็นรูปทรงที่มีพื้นที่ผิวน้อยที่สุด แต่เมื่อหยดน้ำเจริญเติบโตมากขึ้นแรงตึงผิวจะมีความสำคัญน้อยลง หยดน้ำที่มีขนาดโตมากขึ้นจนเป็นเม็ดฝนจะเริ่มต้นแบนและเปลี่ยนรูปในขณะที่มันตกลงมา (ดังนั้นหยดน้ำฝนจะไม่ใช่มีรูปเป็นหยดน้ำตา) (รูป 9.4) และจะแตกออกจากกันเมื่อโตขึ้นจนถึงเส้นผ่าศูนย์กลาง 7 มิลลิเมตรซึ่งจะไม่มีหยดน้ำฝนที่โตมากกว่านี้ (ดูรูป 9.9 ในหัวข้อถัดไป)

อนุภาคของเกลือและอนุภาคของสารชับน้ำอื่น ๆ (ซึ่งละลายอยู่ในน้ำ) รวมทั้งแก๊สที่ละลายน้ำได้ง่ายเช่น SO_2 ช่วยให้หยดน้ำเล็ก ๆ ชนะแรงตึงผิวและเจริญเติบโตรอบ ๆ นิวเคลียส์ได้อนุภาคเหล่านี้เรียกว่า แกนกลั่น (condensation nucles)



รูป 9.4 หยดน้ำฝนตกลงมาด้วยอัตราเร็วปลาย (terminal speed) รูปร่างที่เคยเป็นรูปทรงกลมจะเปลี่ยนรูปก้อนขนมปังแฮมเบอเกอร์

ความเข้มข้นของอนุภาคของฝุ่นในอากาศหรือ aerosols นั้นมีความเปลี่ยนแปลงสูงมาก โดยปกติมีประมาณ 10 พันล้านต่อลูกบาศก์เมตรบนทวีปและจะมีประมาณ 1 พันล้านต่อลูกบาศก์เมตรเหนือมหาสมุทร อนุภาคเหล่านี้ส่วนใหญ่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเพียง 0.1 ไมครอนเท่านั้นแต่มีบ้างที่อาจจะโตถึง 10 ไมครอน

ก้อนเมฆซึ่งเกิดขึ้นเหนือทวีปจะประกอบด้วยหยดน้ำเล็ก ๆ 500 ล้าน ถึงหนึ่งพันล้านหยดต่อลูกบาศก์เมตร ในขณะที่เมฆที่เกิดขึ้นเหนือมหาสมุทรจะประกอบด้วยหยดน้ำเล็ก ๆ ประมาณ 50 ถึง 100 ล้านหยดต่อลูกบาศก์เมตร ดังนั้นเฉพาะประมาณ 5 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์ของฝุ่นทั้งหมดเท่านั้นที่ช่วยในการควบแน่น

ในการเจริญเติบโตของผลึกน้ำแข็งถูกช่วยโดยอนุภาคชนิดอื่นที่เรียกว่าแกนเยือกแข็ง (Freezing nuclei) แกนเยือกแข็งจะมีรูปร่างของผลึกคล้ายคลึงกับน้ำแข็งมากเพื่อที่จะช่วยไมเลกุลของน้ำอยู่เป็นแนวเส้นตรงอย่างเหมาะสม อนุภาคของดินเหนียว (clay) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นเคโอลิไนท์ (kaolinite) (สูตรเคมีคือ $Al_2Si_2O_5(OH_4)$ เป็นแกนเยือกแข็งที่สำคัญที่สุดที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ สารตัวอื่น ๆ ที่สำคัญเช่นซิลเวอร์ไอโอไดด์ก็จะมีประสิทธิภาพดีกว่าแต่ไม่เกิดขึ้นในธรรมชาติ

ความเข้มข้นของผลึกน้ำแข็งจะมีจำนวนน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับจำนวนหยดน้ำเล็ก ๆ ในก้อนเมฆและยังขึ้นกับอุณหภูมิด้วย แม้ว่าน้ำปริมาณมาก ๆ จะแข็งตัวที่ 0°C แต่หยดน้ำเล็ก ๆ ในก้อนเมฆจะไม่แข็งตัวจนกว่าอุณหภูมิจะต่ำกว่า 0°C ลงไป ยกตัวอย่างเช่น หยดน้ำที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตรโดยทั่วไปจะยังไม่เยือกแข็งจนกว่าอุณหภูมิจะลดลงต่ำกว่า -24 °C ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิเท่ากับ -10°C จะมีผลึกน้ำแข็งเกิดขึ้นน้อยกว่า 10 ผลึกต่ออากาศหนึ่งลูกบาศก์เมตรในขณะที่เมื่ออุณหภูมิ -30°C จะมีผลึกน้ำแข็งเกิดขึ้น 100,000 ผลึกต่ออากาศหนึ่งลูกบาศก์เมตร

มีคำถามว่าทำไมหยดน้ำที่มีขนาดเล็กจึงยังไม่แข็งตัว แม้ว่าอุณหภูมิจะลดต่ำกว่า 0°C ไปมากก็ตาม คำอธิบายก็คือในน้ำแข็งนั้นโมเลกุลทั้งหมดจะเรียงเป็นแถว (line up) ในขณะที่โมเลกุลของน้ำจะเคลื่อนที่ไปรอบ ๆ ในลักษณะเกือบจะเป็นการสุ่ม เมื่ออุณหภูมิลดลงต่ำกว่า 0°C โมเลกุลในหยดน้ำเล็ก ๆ จะเคลื่อนไหวช้าลงจนถึงจุดที่จะทำให้เกิดการเยือกแข็งเข้าด้วยกัน แต่อย่างไรก็ตามน้ำแข็งจะยังไม่เกิดจนกว่าโมเลกุลจะเรียงแถวอย่างถูกต้อง

เมื่อน้ำมีปริมาตรเป็นจำนวนมากนั้นน่าจะมีโมเลกุลอยู่สองสามโมเลกุลที่เรียงเป็นแถวอย่างเหมาะสมและโมเลกุลส่วนที่เหลือของน้ำก็จะทำตาม (follow suit) และเยือกแข็งโดยกลับกันเมื่อมีปริมาตรของน้ำอยู่น้อยก็ไม่น่าที่จะมีโมเลกุลใด ๆ เรียงเป็นแถวจนกว่าอุณหภูมิจะต่ำกว่า 0°C ลงไปมาก ๆ หยดน้ำเล็ก ๆ ในก้อนเมฆโดยทั่วไปจะไม่แข็งตัวจนกว่าอุณหภูมิจะเย็นลงจนถึง -40°C หยดน้ำที่ยังไม่แข็งตัวแม้ว่าจะมีอุณหภูมิต่ำกว่า 0°C ก็ตามเรียกว่าหยดน้ำซุปเปอร์คูลเล็ก ๆ (supercooled water droplets)

แม้แต่กับแกนเยือกแข็งที่เกิดขึ้นเองในธรรมชาติ ก็จะไม่ทำให้ผลึกน้ำแข็งเจริญเติบโตขึ้นจนกว่าอุณหภูมิจะลดต่ำลงจนประมาณ -10°C ที่อุณหภูมิต่ำกว่านี้ แกนเยือกแข็งที่เกิดขึ้นในธรรมชาติหลายชนิดจะกลายเป็นตัวกระตุ้น (become active) และช่วยให้เกิดผลึกน้ำแข็งขึ้น

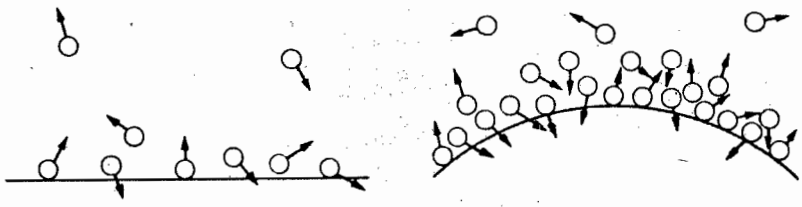
ซิลเวอร์ไอโอไดด์ซึ่งไม่ได้เกิดขึ้นโดยธรรมชาติในบรรยากาศ จะช่วยกระตุ้น (activate) ให้เกิดผลึกน้ำแข็งที่อุณหภูมิประมาณ -4°C ในขณะที่สารอินทรีย์บางชนิดจะกระตุ้นที่อุณหภูมิ -1°C นี่คือลักษณะสำคัญที่ช่วยในการทำฝนเทียม ซึ่งเราจะกล่าวในหัวข้อ 9.5

9.2 การเจริญเติบโตของหยดน้ำโดยการควบแน่น (การแพร่)
(Growth by Condensation)

ขั้น (stage) ของการควบแน่นหรือการแพร่ (diffustion) แสดงถึงขั้นที่ยังเยาว์ของการเจริญเติบโตของหยดน้ำฝน และเกล็ดหิมะ หยดน้ำเล็ก ๆ หรือผลึกน้ำแข็งจะเจริญเติบโตได้เมื่อความหนาแน่นไอในบริเวณใกล้เคียงกับหยดน้ำมีค่ามากกว่าความหนาแน่นไอที่อยู่ติดกับรอบนอกของพื้นผิวของหยดน้ำเล็ก ๆ (หรือของผลึกน้ำแข็ง) เมื่อหยดน้ำเล็ก ๆ หรือผลึกน้ำแข็งโตขึ้นจนมีเส้นผ่าศูนย์กลางสองถึงสามไมครอน ผลของแกนกลั่นและแรงตึงผิวต่อการเจริญ

เติบโตก็จะหมดไป คำว่าความหนาแน่นไอที่ผิวของหยดน้ำเล็ก ๆ หรือของผลึกน้ำแข็งก็คือความหนาแน่นไออิ่มตัวของน้ำและน้ำแข็งตามลำดับนั่นเอง (รูป 9.5)

สิ่งนี้หมายความว่าหยดน้ำเล็ก ๆ ไม่สามารถเจริญเติบโตได้นอกจากว่าอากาศข้างนอกหยดน้ำจะอิ่มตัวยวดยิ่ง (supersaturated) ด้วยไอน้ำที่มากกว่า ดังนั้นในเมฆส่วนใหญ่ความชื้นสัมพัทธ์จะเกิน 100 เปอร์เซนต์ไปเล็กน้อย ค่าความชื้นสัมพัทธ์ในก้อนเมฆอยู่ระหว่าง 100.1% ในอากาศที่ลอยสูงขึ้นอย่างช้า ๆ จนกระทั่งมีความชื้นสัมพัทธ์ถึง 100.5% ในพายุฟ้าคะนองที่มีอากาศลอยตัวขึ้นอย่างรวดเร็ว ระหว่างในขั้นตอนนี้ หยดน้ำเล็ก ๆ ที่กำลังเจริญเติบโตจะถูกทำให้อุ่นขึ้นไป 0.1°C เหนืออุณหภูมิของอากาศแวดล้อมเพราะความร้อนที่เกี่ยวข้องกับการควบแน่น



รูป 9.5 ที่จุดอิ่มตัว โมเลกุลของไอน้ำจะออกจากผิวน้ำและกลับสู่น้ำด้วยอัตราที่เท่ากัน สำหรับความดันไออิ่มตัวเหนือหยดน้ำที่มีผิวโค้งจะมากกว่าบนพื้นผิวที่เรียบ

ในเบื้องต้น หยดน้ำเล็ก ๆ จะเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วโดยการควบแน่น (นั่นคือการแพร่) อย่างไรก็ตามการแพร่เป็นกระบวนการของโมเลกุล (molecular process) และจะมีความสำคัญน้อยลงเมื่อหยดน้ำโตมากขึ้น นอกจากนี้เนื่องจากมีจำนวนหยดน้ำเล็ก ๆ อยู่มากมาย และแต่ละหยดแข่งขันกันให้ไอน้ำเกาะเพื่อที่จะทำให้ตัวเองเจริญเติบโตมากยิ่งขึ้น พบว่าในก้อนเมฆที่เกิดขึ้นเหนือพื้นดินจะต้องใช้เวลาหนึ่งวินาทีสำหรับหยดน้ำที่เกิดโดยวิธีการควบแน่นจะเจริญเติบโตขึ้นจากขนาดเป็นศูนย์จนกลายเป็นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางหนึ่งไมครอน และใช้เวลา 1 ล้านวินาที (ประมาณ 2 สัปดาห์) เพื่อจะให้โตจนถึงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 ไมครอน เนื่องจากในเมฆบนมหาสมุทรจะมีจำนวนหยดน้ำเพียงหนึ่งในสิบของบนพื้นดิน ดังนั้นแต่ละหยดจะโตขึ้นโดยวิธีการแพร่เร็วขึ้น 10 เท่า (เพราะไม่ต้องแข่งขันกันแย่งไอน้ำมาก) แต่ก็ยังค่อนข้างช้า

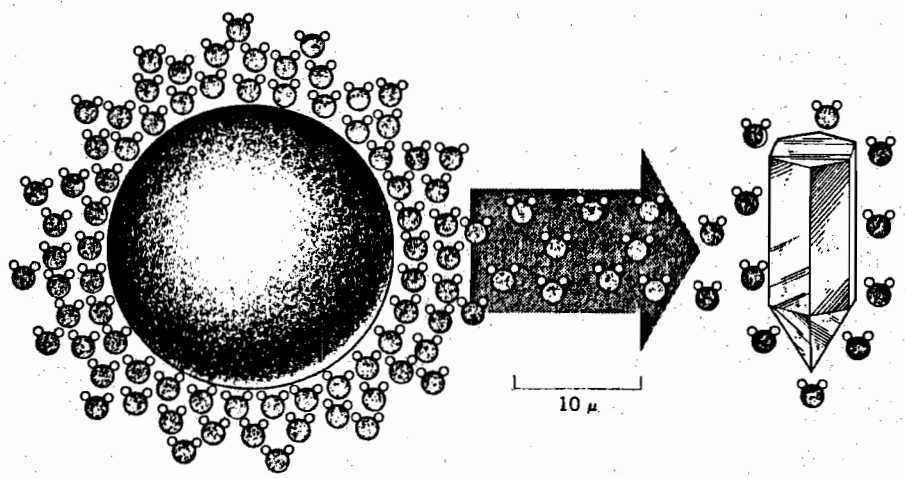
สรุปได้ว่าวิธีการแพร่อย่างเดียวไม่สามารถทำให้เกิดพายุฝน เนื่องจากมันจะผลิตหยดน้ำเล็ก ๆ ออกมาเล็กเกินไปโดยไม่มีหยดน้ำที่โตพอ นี่เองการชนกันของหยดน้ำ (coalescence) จึงเป็นสิ่งจำเป็นบทบาทของการควบแน่นก็คือยอมให้หยดน้ำเล็ก ๆ หรือผลึกน้ำแข็งเจริญเติบโตขึ้นได้โตพอเพื่อที่เมฆจะสามารถมาถึงขั้นตอนของการชนกันได้ เมื่อมีการชนกัน

เกิดขึ้นฝนก็จะตกลงมาอย่างสม่ำเสมอนอกเสียแต่ว่าอากาศใต้ก้อนเมฆจะแห้งมาก ฝนก็จะระเหยไปหมดก่อนที่จะมาถึงพื้นดิน

จะเห็นได้ว่าก่อนที่การชนกันจะบังเกิดผลหยดน้ำเล็ก ๆ จะต้องโตถึงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 40 ไมครอนเสียก่อน ในเมฆหลายชนิดหยดน้ำเล็ก ๆ ไม่โตขึ้นเกินกว่า 20 ไมครอนโดยวิธีการควบแน่นดังที่กล่าวแล้ว ดังนั้นจึงทำให้เกิดช่องว่างระหว่างหยดน้ำที่โตโดยวิธีการควบแน่นที่จะต้องโตต่อไปให้ถึงขนาดของหยดน้ำที่จะทำให้เริ่มเกิดการชนกันฝนจะไม่ตกลงมาจนกว่าช่องว่างนี้จะถูกเชื่อมเข้าด้วยกัน

เนื่องจากเมฆบนมหาสมุทรมีจำนวนหยดน้ำอยู่น้อยกว่าเมฆบนแผ่นดิน ดังนั้นแต่ละหยดจะได้ส่วนแบ่งของไอน้ำที่จะเข้ามาเกาะมีได้มากกว่าเมฆบนแผ่นดิน ด้วยเหตุนี้เมฆที่เกิดบนมหาสมุทรจะมีจำนวนหยดน้ำที่สามารถโตจนถึงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 40 ไมครอน ได้จำนวนมากพอที่จะทำให้การชนกันเริ่มต้นขึ้นมาได้

สำหรับเมฆบนแผ่นดินเกือบทุกชนิดมีความต้องการกระบวนการพิเศษที่จะเชื่อมช่องว่างอันนี้ กระบวนการนี้เรียกว่ากระบวนการผลึกน้ำแข็งของแบร์จิรอน (Bergeron ice crystal process) ซึ่งเสนอโดย แบร์จิรอนในปี ค.ศ. 1933 แบร์จิรอนพบว่าเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 0°C ผลึกน้ำแข็งจะเจริญเติบโตขึ้นโดยการระเหยของหยดน้ำซึ่งจะเข้ามาเกาะรอบ ๆ ผลึกน้ำแข็ง (รูป 9.6)



รูป 9.6 ความดันไออิ่มตัวเหนือพื้นผิวน้ำที่มีค่ามากกว่าเหนือพื้นผิวของผลึกน้ำแข็งทำให้หยดน้ำซุปเปอร์คูลเล็ก ๆ ระเหยมาเกาะที่ผลึกน้ำแข็ง และทำให้ผลึกน้ำแข็งเจริญเติบโตมากขึ้น

โดยปกติแล้วผลึกน้ำแข็งจะเกิดขึ้นโดยธรรมชาติเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า -10°C (โดยประมาณ) ที่อุณหภูมินี้แกนเยือกแข็งจะถูกกระตุ้น (activated) ทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งจำนวนเล็กน้อยขึ้นท่ามกลางหยดน้ำซุปเปอร์คูล ผลึกน้ำแข็งสองสามผลึกจะเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วโดยการควบแน่นอันเกิดจากหยดน้ำที่ระเหยเร็วกว่าเข้ามาเกาะ ในการทำให้เกิดหยาดน้ำฟ้าจุดสำคัญก็คือผลึกน้ำแข็งจะต้องเจริญเติบโตโดยการควบแน่นได้เร็วกว่าหยดน้ำเล็ก ๆ ผลก็คือผลึกน้ำแข็งสามารถเจริญได้โตพอที่จะเริ่มต้นทำให้เกิดการชนกันขึ้น ถ้าไม่ใช่ความแตกต่างระหว่างความดันไออิ่มตัวเหนือน้ำแข็ง และความดันไออิ่มตัวเหนือหยดน้ำเพียงเล็กน้อยนี้แล้ว ฝนและหิมะก็จะมีได้น้อย

9.3 การใช้กราฟสรุปแสดงการก่อตัวและการเจริญเติบโตของหยดน้ำในก้อนเมฆ

เพื่อที่จะให้เข้าใจถึงการก่อตัวและเริ่มต้นเจริญของหยดน้ำเล็ก ๆ ในก้อนเมฆว่าเกิดขึ้นได้อย่างไรก็มีความจำเป็นต้องพูดถึงรายละเอียดของกระบวนการและอธิบายคำจำกัดความของคำว่าการอิ่มตัว (saturation) ที่ถูกต้องยิ่งขึ้น

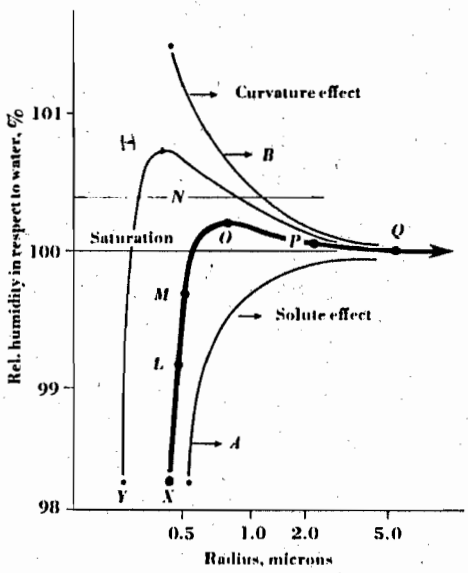
เราพูดว่าอากาศอิ่มตัว เมื่ออากาศชื้นมีส่วนประกอบซึ่งสามารถอยู่ในสภาพสมดุล (equilibrium) กับพื้นผิวเรียบของน้ำบริสุทธิ์ที่มีอุณหภูมิเช่นเดียวกับอากาศ ดังนั้นคำว่าสมดุลหมายถึงไม่มีการถ่ายโอนโมเลกุลของน้ำจากอากาศไปยังพื้นผิวน้ำ หรือจากพื้นผิวน้ำไปยังอากาศ ดังนั้นความสมดุลให้คำจำกัดความว่าเป็นความดันไออิ่มตัว (saturation vapor pressure) หรือให้คำจำกัดความว่าเป็นความชื้นสัมพัทธ์ 100 เปอร์เซ็นต์นั่นเอง

คุณสมบัติที่น้ำจะต้องบริสุทธิ์และพื้นผิวจะต้องเรียบมีความสำคัญ เพราะถ้าน้ำไม่บริสุทธิ์หรือพื้นผิวไม่เรียบความสมดุลชนิดอื่นจะเกิดขึ้นเช่นเกลือแกงจะแตะก่อนที่ความชื้นสัมพัทธ์จะถึง 100 เปอร์เซนต์ (อย่างที่ให้คำจำกัดความไว้ข้างบน) ดังนั้นถ้าหยดน้ำมีเกลือแกงผสมอยู่มันสามารถจะอยู่ในสภาพสมดุลกับอากาศแวดล้อมโดยที่ความชื้นสัมพัทธ์น้อยกว่า 100 เปอร์เซนต์ ความแตกต่างขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลาย (solution) หรือเราพูดว่า ผลของตัวละลาย (solute effect)

สมมุติว่าเราใส่เกลือแกงเข้าไปในอากาศชื้นซึ่งยังไม่อิ่มตัว การควบแน่นจะเกิดขึ้นที่เกลือแกง อย่างไรก็ตามเมื่อหยดน้ำเจริญเติบโตความเข้มข้นของสารละลายจะลดลงและลักษณะการเจริญเติบโตของหยดน้ำจะเป็นดังเส้นกราฟ A (ดูรูป 9.7) ซึ่งเมื่อหยดน้ำเจริญเติบโตไปจนมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2μ มันจะเจือจางและประพฤติเสมือนน้ำบริสุทธิ์ ดังนั้นผลของตัวละลายจะสำคัญเมื่ออยู่ในขั้นต้น ๆ ของกระบวนการเพราะถ้าไม่มีเกลือหยดน้ำก็จะไม่เกิดขึ้น

ผลของตัวละลายจะถูกต่อต้าน (counteracted) โดยผลอย่างอื่นคือผลของความโค้ง (curvature effect) เมื่อหยดน้ำมีขนาดเล็กมาก แรงตึงผิวจะมีค่ามากผิวของหยดน้ำจะประพฤติตนเหมือนกับยางที่ยืดได้ และต้องใช้งานในการที่จะยืดยางออก ผลเช่นนี้

หมายความว่าหยดน้ำที่มีขนาดเล็กจะต้านการที่จะมีไอน้ำในอากาศเข้ามาเกาะจนกว่าความดันไอของอากาศ (vapor pressure of the air) จะมากกว่าความดันไออิ่มตัว (saturation vapor pressure) ที่เปรียบเทียบกับพื้นน้ำที่เรียบหรือกล่าวอีกอย่างหนึ่งว่าหยดน้ำที่เล็กจะไม่อยู่ในสถานสมดุลกับอากาศแวดล้อม จนกว่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายนอกจะมากกว่า 100 เปอร์เซ็นต์ อากาศจะต้องอิ่มตัวยวดยิ่ง (supersaturated) เสียก่อนที่การควบแน่นจะเริ่ม



รูป 9.7 รูปกราฟแสดงการเกิดหยดน้ำเล็ก ๆ ในก้อนเมฆว่าเริ่มต้นเจริญขึ้นมาได้อย่างไร นิวเคลียสของแกนกลั่น X จะเจริญเติบโตในลักษณะประนีประนอมระหว่างผลของตัวละลาย (solute effect) และผลของความโค้ง (curvature effect) สำหรับเส้นทางของกระบวนการจะเป็นไปตามเส้น LMOPQ

ต้น สมมุติว่าหยดน้ำเล็ก ๆ ที่เป็นน้ำบริสุทธิ์ถูกใส่เข้าไปในอากาศที่อิ่มตัวยวดยิ่งที่มีความชื้นสูง ก็จะทำให้หยดน้ำบริสุทธิ์นี้เริ่มต้นเจริญเติบโตขึ้น ดังนั้นความโค้งของหยดน้ำก็จะลดน้อยลง และเมื่อการเจริญเติบโตยังดำเนินต่อไป ผลของความโค้ง (curvature effect) จะหายไป ซึ่งเป็นไปตามเส้นกราฟ B ในรูป 9.7 เมื่อหยดน้ำเจริญเติบโตขึ้นจนมีรัศมี 2-3 μ ผลของความโค้งจะมีน้อยมาก และในทางปฏิบัติถือว่าหยดน้ำประพฤติเหมือนกับว่ามีพื้นน้ำที่เรียบ ดังนั้นจะเห็นว่าทั้งผลของตัวละลายและผลของความโค้งจะมีความสำคัญเฉพาะในช่วงระยะต้น ๆ หลังจากนั้นกระบวนการเกือบจะเหมือนกับว่าเป็นน้ำที่บริสุทธิ์และมีพื้นผิวที่เรียบ

การเจริญเติบโตที่แท้จริงของหยดน้ำในก้อนเมฆออกมาในลักษณะที่เป็นการประนีประนอม (compromise) ระหว่างผลของตัวละลายและผลของความโค้ง รูป 9.7 จะแสดงให้

เห็นรายละเอียด สมมุติว่านิวเคลียสของเกลือแกงถูกใส่เข้าไปในอากาศที่ยังไม่อิ่มตัว ซึ่งแสดงด้วยจุด X เกลือจะดูดกลืนน้ำเข้าหาตัวจนกระทั่งถึงจุดสมดุลกับอากาศแวดล้อมซึ่งสมมุติเป็นจุด L ขั้นต่อไปให้อากาศถูกทำให้เย็นลงไปอีกเพื่อว่าความชื้นสัมพัทธ์จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย หยดน้ำจะเจริญเติบโตต่อไปจนกระทั่งความสมดุลอันใหม่จะมาถึงที่จุด M ถ้าเราทำให้อากาศเย็นต่อไปอีกเพื่อที่ความชื้นสัมพัทธ์จะเพิ่มขึ้นไปถึงระดับ N ดังนั้นหยดน้ำจะเจริญตามเส้น LMOP โดยไม่ถึงระดับ N นั่นคือมันจะไม่มีความสมดุลกับอากาศแวดล้อม หลังจากโหนก (hump) O ได้ผ่านไปแล้ว การเจริญเติบโตจะไม่มีเสถียรภาพ (unstable) ในความรู้สึกที่ว่ามันไม่ทำให้ผลเข้าใกล้จุดสมดุล การเจริญเติบโตแบบไม่มีเสถียรภาพนี้มีความสำคัญมาก เพราะหลังจากกระบวนการได้ผ่านโหนกที่จุด O แล้ว มันจะเจริญเติบโตโดยปราศจากการต่อต้าน

จะเห็นว่าการควบแน่นในบรรยากาศจะเริ่มต้นบนอนุภาคที่มีขนาดโต (หรือพูดว่ามีประสิทธิภาพดีกว่า) ส่วนอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะไม่มีผลในการเจริญเติบโต สมมุติว่าเราใส่นิวเคลียส Y ซึ่งเล็กกว่านิวเคลียส X ลงไปแทน ผลของตัวละลาย (solution effect) ของ Y จะน้อยกว่า X แต่ผลของความโค้งจะมากกว่า X ดังนั้นการควบแน่นจะเริ่มที่ X ก่อนที่จะเริ่มที่ Y ยิ่งไปกว่านั้นนิวเคลียส X จะถึงจุด O ก่อน Y จะสามารถไปถึงจุด H การเจริญเติบโตแบบไม่มีเสถียรภาพของ X ตามเส้นทาง OPQ จะพยายามใช้ไอน้ำที่สามารถควบแน่นได้ในอากาศไปจนหมด และดังนั้นจะป้องกันไม่ให้ Y ไปถึงจุด H ซึ่งเป็นจุดที่ Y จะเจริญเติบโตแบบไม่มีเสถียรภาพต่อไปได้

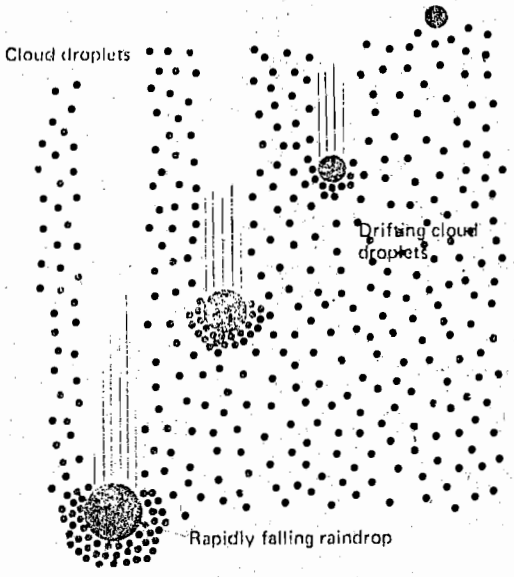
การควบแน่นสามารถสรุปได้ดังนี้ เมื่ออากาศเย็นลงความชื้นสัมพัทธ์จะเพิ่มขึ้น แต่ก่อนที่ความชื้นสัมพัทธ์จะถึง 100 เปอร์เซ็นต์ (เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นน้ำที่ผิวเรียบ การควบแน่นจะเริ่มขึ้นที่แกนกลั่นที่มีขนาดโตและว่องไว (active) ซึ่งจะเจริญเติบโตจนเป็นหยดน้ำที่โตเต็มที่ในก้อนเมฆ เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เข้าใกล้ 100 เปอร์เซ็นต์ ผลของตัวละลายจะถูกต้านโดยผลของความโค้ง และโดยเหตุผลนี้เอง ฝุ่นที่มีขนาดเล็กและไม่ว่องไว ก็จะไม่มีบทบาทในการเจริญเติบโตเพราะไอน้ำจะถูกนำไปใช้หมดโดยฝุ่นที่มีขนาดโต ดังนั้นจำนวนหยดน้ำในก้อนเมฆต่อปริมาตรจะน้อยกว่าจำนวนของนิวเคลียส (neclei) เป็นอันมาก

เราทราบว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของนิวเคลียสของเกลือที่มีประสิทธิภาพดีในการดูดซับน้ำเข้าหาตัวมีประมาณ 1μ (0.01 มิลลิเมตร) เมื่อเริ่มต้นมีการควบแน่นบนอนุภาคของเกลือนี้ก็จะใช้ต้องเวลา 1 วินาทีเพื่อที่มันจะเจริญเติบโตจนมีขนาดหยดน้ำเล็ก ๆ ในก้อนเมฆที่มีขนาด 10μ และจะต้องใช้เวลาประมาณ 500 วินาที สำหรับหยดน้ำเล็ก ๆ ที่จะเจริญเติบโตเป็นหยดน้ำขนาดใหญ่ซึ่งมีขนาด 100μ และจะต้องใช้เวลาประมาณ 10,000 วินาที (หรือ 3 ชม.) เพื่อที่จะเจริญเติบโตเป็นหยดน้ำฝนขนาดเล็ก (small raindrop) ที่มีขนาด 1,000μ และจะต้องใช้เวลาหลายวันสำหรับหยดน้ำฝนขนาดใหญ่ที่จะเกิดขึ้นโดยวิธีการควบแน่นเพียงอย่างเดียว ดังนั้นจะเห็นว่าแม้ว่ากระบวนการควบแน่น จะสามารถทำให้เกิดหยดน้ำเล็ก ๆ ในก้อนเมฆแต่ก็ช้าเกินกว่าจะทำให้เกิดหยดน้ำฝนจริงตามขนาดที่เราได้สังเกต เมื่อถึงจุดนี้จึงเห็นได้ชัดว่าจะต้องมี

กลไกบางอย่างที่ทำให้หยดน้ำเล็ก ๆ ในก้อนเมฆสามารถรวมตัวเป็นหยดน้ำฝนได้ และมีข้อสังเกตว่าประมาณหนึ่งล้านหยดของน้ำเล็ก ๆ ในก้อนเมฆจึงจะเท่ากับหยดน้ำฝนขนาดใหญ่หนึ่งหยด

9.4 การชนกัน (Coalescene) จนกลายเป็นหยดน้ำฝน (Maturity)

เมื่อหยดน้ำเล็ก ๆ หรือผลึกน้ำแข็งได้เจริญจนโตเพียงพอแล้วก็จะเริ่มหล่นลงมาซึ่งมันจะชนกับหยดน้ำเล็ก ๆ และผลึกน้ำแข็งในเส้นทางที่ตกลงมา หยดน้ำฝนหรือผลึกน้ำแข็งมักจะจับติดกันแน่นหลังจากชนกันและจะโตขึ้น หยดน้ำที่มีขนาดใหญ่จะตกลงมาเร็วกว่าเนื่องจากมันสามารถชนะความต้านทานของอากาศได้ง่ายกว่า และการที่มันตกลงมาเร็วกว่า ก็จะสามารถจับกับผลึกของน้ำแข็งอื่นหรือหยดน้ำเล็ก ๆ อื่น ๆ ได้อย่างรวดเร็วเช่นกัน (รูป 9.8) หยดน้ำยิ่ง



รูป 9.8 กระบวนการชนกัน เนื่องจากหยดน้ำขนาดใหญ่ตกลงมาเร็วกว่าหยดน้ำขนาดเล็กจึงทำให้เกิดการเก็บหยดน้ำเล็ก ๆ ในทางเดินที่หยดน้ำขนาดใหญ่ตกลงมา หยดน้ำในก้อนเมฆส่วนใหญ่มีขนาดเล็กมาก ซึ่งการเคลื่อนที่ของอากาศจะทำให้มันแขวนตัว (suspended) อยู่ในอากาศได้ แม้ว่าหยดน้ำขนาดเล็กเหล่านี้จะตกลงมาก็จะระเหยไปหมดก่อนที่จะถึงพื้นดิน

มีขนาดโตขึ้นความเร็วของการตกก็ยิ่งมีมากซึ่งจะตรงกันข้ามกับการเจริญเติบโตแบบควบแน่น ที่อยู่ในลักษณะหยดน้ำยิ่งโตหรือผลึกยิ่งโตเส้นผ่าศูนย์กลางที่ขยายก็ยิ่งช้าลงดังนั้นการเจริญเติบโตแบบการควบแน่นจะเกิดขึ้นส่วนใหญ่ในหยดน้ำเล็ก ๆ เท่านั้นในขณะที่การเจริญเติบโตโดยการชนกันจะเกิดขึ้นในหยดน้ำหรือผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดโตดูตาราง 9.1

Growth Rates and Related Properties of Drops and Crystals

Initial Diameter (Microns)	Terminal Fall; Speeds in Still Air (Meters per Second)[a]	Distance Drop Falls Before Completely Evaporates (Meters)[b]	Percentage Increase of Diameter in 10 Minutes[c]			Assumed Collection Efficiency (Percent)
			Condensation Growth of Drop (Percent)	Condensation Growth of Ice Sphere (Percent)	Coalescence Growth of Drop (Percent)	
1	0.00003	–	1,900	13,900	–	–
2	0.00012	–	910	6,900	–	–
5	0.00075	0.00008	310	2,700	–	–
10	0.003	0.003	125	1,320	–	–
20	0.012	0.05	41	615	0.3	10
50	0.075	2	11	200	2.8	20
100	0.30	30	2	73	10.5	30
200	0.80	250	0.5	22	18	50
500	2	4,000	0.08	4	18	50
1,000	4	30,000	0.02	1	18	50
2,000	7	Large	0.005	0.25	15	50
5,000	10	Large	0.0008	0.04	9	50
1 cm hail	9	Large	–	–	4	50
2 cm hail	16	Large	–	–	2	50
5 cm hail	33	Large	–	–	0.8	50
10 cm hail	59	Large	–	–	0.35	50

[a] Terminal speeds depend on air density, so these figures are only approximate.

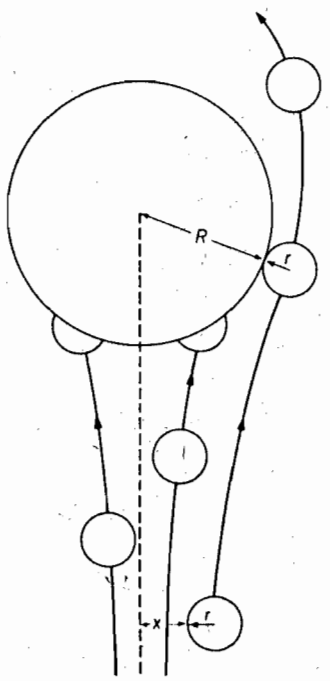
[b] Assuming $T = 0°C$ and RH = 90%. The distance is inversely proportional to how much the RH is below 100%. For example, if RH = 80%, all distances in this column must be divided by 2. The distances here are given for still air. Updrafts may considerably reduce these distances.

[c] Air is assumed to have $T = -10°C$, RH = 100.25% (with respect to water), and there are 20 million cloud droplets per cubic meter, each of which is 15 microns in diameter (liquid water content = 0.28 g/m³). Condensation growth of *drops* is proportional to how much the RH exceeds 100%, and it also doubles for roughly every 10°C increase of temperature. The coalescence growth is proportional to the liquid water content. Growth by coalescence occurs in discrete jumps; therefore, a small percentage of the drops will grow *much* faster by coalescence than this table indicates. *Example:* A droplet 200 microns in diameter falls 0.8 m/s in still air and would evaporate completely after a fall of 250 m below the cloud (under conditions stated above). After 10 minutes, 200 micron droplets would grow by 0.5% by condensation, but 18% by coalescence, assuming 50% of all droplets in the direct path are collected. A 200 micron spherical ice crystal would grow by 22% by diffusion during the same 10 minutes.

ตาราง 9.1 อัตราการเจริญเติบโตและคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกัน (related properties) ของหยดน้ำและผลึกน้ำแข็ง

ในขณะที่หยดน้ำตกลงมานั้น มันไม่ได้เก็บ (collected) อนุภาคทั้งหมดในทางเดิน หยดน้ำที่ชนอาจกระเด็นออกจากกันอันเนื่องจากแรงตึงผิว สำหรับผลึกน้ำแข็งจะพยายามกระเด็นออก (bouce away) จากกันเมื่อมีรูปร่างแบนเย็นจัดและแห้ง เหตุผลอีกอย่างหนึ่งที่ทำไมหยดน้ำหรือผลึกน้ำแข็งไม่เก็บทุกอย่างในทางเดินของมันก็คือ มันสร้างกระแสอากาศเล็กที่จะพัดเอาอนุภาคเล็ก ๆ ออกไปจากทางเดิน (ดูรูป 9.9)

เนื่องจากผล 2 ประการนี้ ประสิทธิภาพของการเก็บ (collection efficiency) จะมีค่าน้อยมากเมื่ออนุภาคที่ใหญ่กว่าในสองอนุภาคมีเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 40 ไมครอน และเมื่อหยดน้ำอันใหญ่ที่เป็นตัวเก็บมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 60 ไมครอน ประสิทธิภาพของ



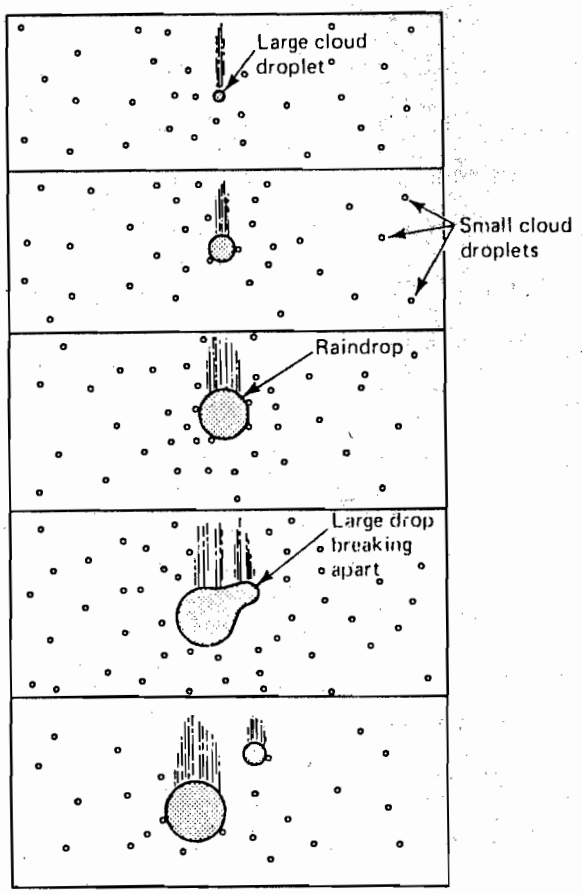
รูป 9.9 ลักษณะเส้นกระแส (streamline) ที่ไหลรอบ ๆ หยดน้ำที่มีขนาดใหญ่ หยดน้ำขนาดเล็กจะต้องอยู่ใกล้เส้นจุดศูนย์กลาง (center line) น้อยกว่า x เพื่อที่จะสัมผัสกับหยดน้ำขนาดใหญ่ได้

การเก็บประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อเส้นผ่าศูนย์กลายเป็น 40 ไมครอน จะมีประสิทธิภาพของการเก็บ 10% และเมื่อใน 30 ไมครอน จะน้อยกว่า 5% ประสิทธิภาพของการเก็บจะเป็น 100% เมื่อหยดน้ำอันใหญ่เก็บหยดน้ำเล็ก ๆ ในทางเดินได้ทั้งหมดซึ่งจะไม่เกิดขึ้น เมื่อรวมเอาประสิทธิภาพของการเก็บและอัตราการตกลงมาของหยดน้ำหรือผลึกน้ำ

แข็งมาพิจารณาแล้ว จะเห็นได้ชัดเจนว่าการชนกัน (coalescence) จะไม่เกิดขึ้นจนกว่าหยดน้ำหรือผลึกน้ำแข็งจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่กว่า 40 ไมครอน เมื่ออนุภาคที่ทำให้เกิดการเก็บมีขนาดใหญ่กว่านี้ การชนกันก็จะดำเนินไปอย่างรวดเร็วทำให้หยดน้ำโตขึ้นเรื่อย ๆ แต่ถ้าโตมากเกินกว่าสองสามมิลลิเมตร ก็จะแตกออกจากกัน (รูป 9.10)

เกล็ดหิมะและลูกเห็บมีแนวโน้มที่จะแตกออกจากกันน้อย ดังนั้นบางครั้งจะเจริญเติบโตขึ้นได้ใหญ่กว่าหยดน้ำ เมื่อเราเห็นเกล็ดหิมะขนาดใหญ่นั้นแสดงว่าเกล็ดหิมะค่อนข้างเปียก ซึ่งคุณสมบัติเช่นนี้สามารถทำให้มันติดแน่นกับผลึกอื่นเมื่อเกิดการชนกันขึ้นและทำให้สามารถบอกได้ว่าอุณหภูมิของบรรยากาศมีค่าประมาณ 0°C เท่านั้น

โดยการชนกันนั้น เมื่อไหร่ผลที่ได้จึงจะเป็นฝนและเมื่อไหร่ผลที่ได้จะเป็นหิมะ คำตอบคือถ้าผลึกน้ำแข็งชนกับหยดน้ำและละลายในระหว่างทางที่ตกผลที่ได้รับจะเป็นฝน และถ้าอากาศค่อนข้างเย็นผลึกน้ำแข็งจะชนกับผลึกน้ำแข็งอื่นเป็นส่วนใหญ่ผลที่ได้คือหิมะ ส่วนลูกเห็บจะเกิดจาก



รูป 9.10 หยดน้ำฝนเมื่อมีขนาดใหญ่เกินก็จะแตกตัวออกจากกัน

หยดน้ำซุปเปอร์คูลหยดเล็ก ๆ (supercooled water droplets) ชนกับน้ำแข็งก้อนกลม (ice pellet) และเยือกแข็งเข้าด้วยกัน ส่วนสลีท (sleet) เกิดจากเมื่อฝนตกผ่านชั้นอากาศที่เย็นจัดและเกิดการเยือกแข็งนั่นเอง

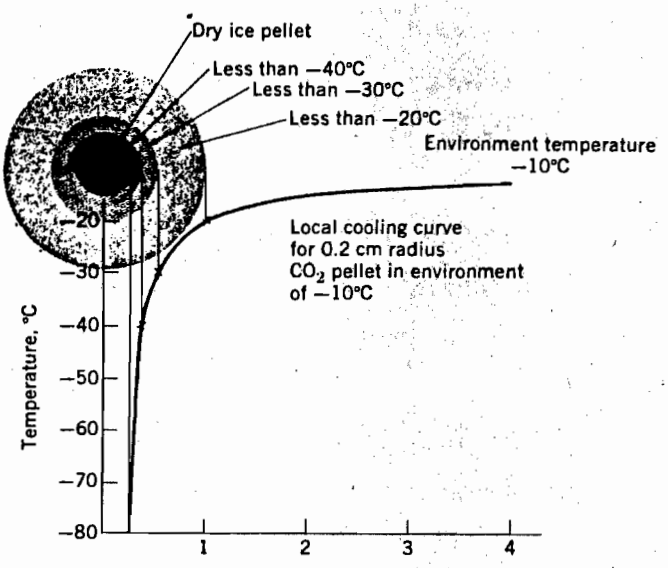
9.5 การทำฝนเทียม (Cloud Seeding)

มีเหตุผลอยู่สองประการที่ก้อนเมฆไม่ทำให้เกิดฝน คือ (1) หยดน้ำเล็ก ๆ ในก้อนเมฆไม่สามารถเจริญเติบโตเพียงพอที่จะเริ่มต้นให้เกิดการชนกัน และ (2) อุณหภูมิในก้อนเมฆไม่เย็นเพียงพอ (ต่ำกว่า -10°C) ที่จะทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งอย่างในธรรมชาติ อย่างไรก็ตามเมื่อซิลเวอร์ไอโอไดด์ถูกใส่ลงในก้อนเมฆผลึกน้ำแข็งจะก่อตัวรอบ ๆ ผลึกซิลเวอร์ไอโอไดด์ ดังนั้นอนุภาคของเกล็ดน้ำแข็งนี้จะเจริญเติบโตขึ้นจนมีขนาดเพียงพอที่จะเริ่มต้นให้เกิดการชนกันแม้ว่าอุณหภูมิในก้อนเมฆจะสูงถึง -4°C ก็ตาม การที่ซิลเวอร์ไอโอไดด์สามารถทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งขึ้นมาได้ก็เพราะมีรูปร่างของผลึกเหมือนกับน้ำแข็งและมีขนาดเดียวกัน ดังนั้นซิลเวอร์ไอโอไดด์จะทำหน้าที่เป็นแกนเยือกแข็ง (freezing nuclei)

เราใช้ซิลเวอร์ไอโอไดด์เพียงสองสามกรัมก็สามารถที่จะเปลี่ยนเมฆธรรมดาให้กลายเป็นเมฆฝนได้ ดังนั้นการโปรยสารเคมีจึงนับว่าเป็นกลไกของการตั้งต้น ชนิดของเมฆที่เหมาะในการทำฝนเทียมคือเมฆคิวมิวลัสซึ่งที่ยอดมีอุณหภูมิระหว่าง -4°C ถึง -15°C จากการศึกษาได้แสดงว่าเมื่อเมฆเหล่านี้ได้รับการโปรยด้วยซิลเวอร์ไอโอไดด์อย่างเหมาะสม ฝนจะตกเพิ่มขึ้น 10 ถึง 20% โดยเฉลี่ย การใช้ซิลเวอร์ไอโอไดด์นั้นอุณหภูมิของเมฆต้องไม่น้อยกว่า -4°C จึงเหมาะในการทำฝนเทียมในเมืองหนาว

สารเคมีอย่างอื่นที่ใช้ในการทำฝนเทียมได้แก่ผลึกน้ำแข็งแห้ง (แก๊ส CO_2 ที่แข็งตัว) ที่มีอุณหภูมิเย็นจัด (ประมาณ -79°C) และเมื่อโปรยลงในก้อนเมฆจะทำให้อากาศที่อยู่ข้าง ๆ โดยรอบมีอุณหภูมิต่ำกว่า -10°C (ทั้งนี้เนื่องจากน้ำแข็งแห้งจะระเหิดกลับกลายเป็นแก๊สตามเดิมในการระเหิดต้องดูดกลืนความร้อนจากอากาศแวดล้อมและทำให้อุณหภูมิเย็นลง ดูรูป 9.11) ผลเช่นนี้จะไปกระตุ้นให้เกิดผลึกน้ำแข็งที่จะให้ไอน้ำมาเกาะจนกลายเป็นฝน จะเห็นว่าการโปรยน้ำแข็งแห้งเหมาะในการทำฝนเทียมในเมืองร้อนซึ่งก้อนเมฆมีอุณหภูมิไม่เย็นมากนัก

การทำฝนเทียมอาจจะไม่ได้รับความสำเร็จเสมอไป ถ้าผลึกน้ำแข็งเกิดขึ้นมากเกินไปอันเกิดจากการโปรยสารเคมีลงในก้อนเมฆ หยดน้ำเล็ก ๆ ทั้งหมดก็ไม่สามารถเจริญเติบโตได้พอที่ทำให้เกิดการชนขึ้นได้ แต่วิธีนี้มีประโยชน์สามารถทำให้ลูกเห็บไม่มีขนาดโตอันจะเป็นอันตรายต่อพืชไร่และบ้านเรือน



Carbon dioxide requires energy to change its state from solid to gas. The change produces intense local cooling. When temperature is lowered below −40°C, spontaneous generation of icelike aggregates of water molecules occurs. Evaporation of 1 g of CO_2 generates 10^{16} ice crystals in region saturated with respect to ice. Adapted from Borovikov *et al.*, *Cloud Physics*, NSF translation from the Russian, 1961, p. 286.

รูป 9.11 คาร์บอนไดออกไซด์ต้องการพลังงานที่จะเปลี่ยนสถานะจากของแข็งไปเป็นแก๊สในการเปลี่ยนสถานะนี้จะดูดกลืนความร้อนจากสิ่งแวดล้อมข้าง ๆ และเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า -40°C ผลึกน้ำแข็งจะเกิดขึ้น 1 กรัมของ CO_2 เมื่อระเหิดสามารถทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งได้ถึง 10^{16} ผลึก

9.6 ลูกเห็บ (Hail)

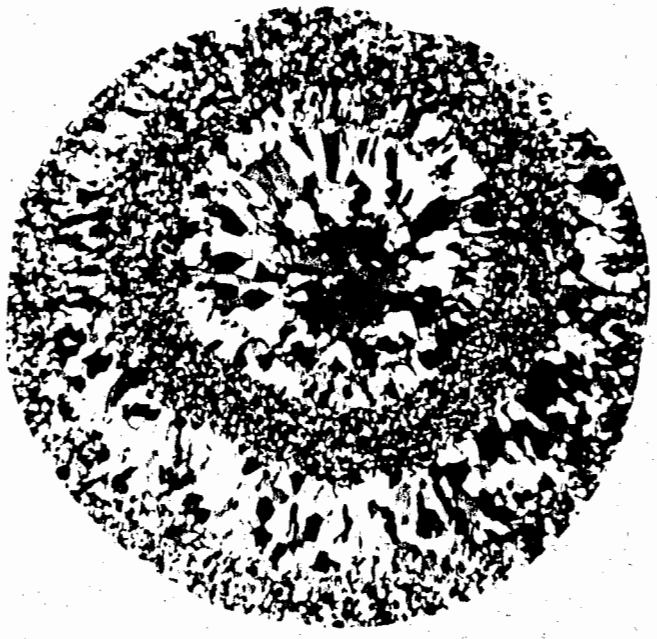
ลูกเห็บคือหยาดน้ำฟ้าในรูปที่เป็นก้อนของน้ำแข็ง ลูกเห็บจะตกจากพายุฟ้าคะนองที่มีกระแสอากาศไหลขึ้นรุนแรง มีความเจริญเติบโตของเมฆคิวมิวโลนิมบัสในแนวดิ่งมากโดยที่ส่วนล่างของก้อนเมฆจะอุ่นส่วนบนจะเย็น และมีจำนวนหยดน้ำซุปเปอร์คูล (supercooled water droplets) อยู่ในก้อนเมฆเป็นจำนวนมาก ลูกเห็บมีขนาดตั้งแต่เม็ดถั่วถึงโตกว่าผลส้ม ลูกเห็บที่ใหญ่ที่สุดพบที่เมือง คอฟฟี่วิล มลรัฐแคนซัส ในวันที่ 3 กันยายน 1970 ซึ่งหนัก 758 กรัม และมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 cm

เนื่องจากในส่วนล่างของก้อนเมฆเป็นอากาศอุ่นจึงมีหยดน้ำที่เป็นของเหลวอยู่ หยดน้ำเล็ก ๆ เหล่านี้สามารถขึ้นสู่เบื้องบนของก้อนเมฆได้โดยกระแสอากาศที่ไหลขึ้นอย่างแรง (strong updraft) ซึ่งอาจจะมีความเร็วถึง 40 เมตรต่อวินาที เนื่องจากอากาศเย็นลงเมื่อลอยตัวสูงขึ้น อากาศในส่วนบนของก้อนเมฆจะเย็นจัด ซึ่งหยดน้ำเล็ก ๆ จะกลายเป็น

ซุปเปอร์คูล และเมื่อหยดน้ำซุปเปอร์คูลเล็ก ๆ นี้ชนกับผลึกน้ำแข็งมันจะเกาะติดเข้าด้วยกันและเยือกแข็งเกิดเป็นก้อนน้ำแข็งเล็ก ๆ (ice pellets) ขึ้น (หยดน้ำซุปเปอร์คูลเล็ก ๆ ในก้อนเมฆเมื่อเยือกแข็งเราเรียกว่า rime) ก้อนน้ำแข็งเล็ก ๆ นี่เองเป็นตัวอ่อน (embryo) ที่จะก่อให้เกิดลูกเห็บ

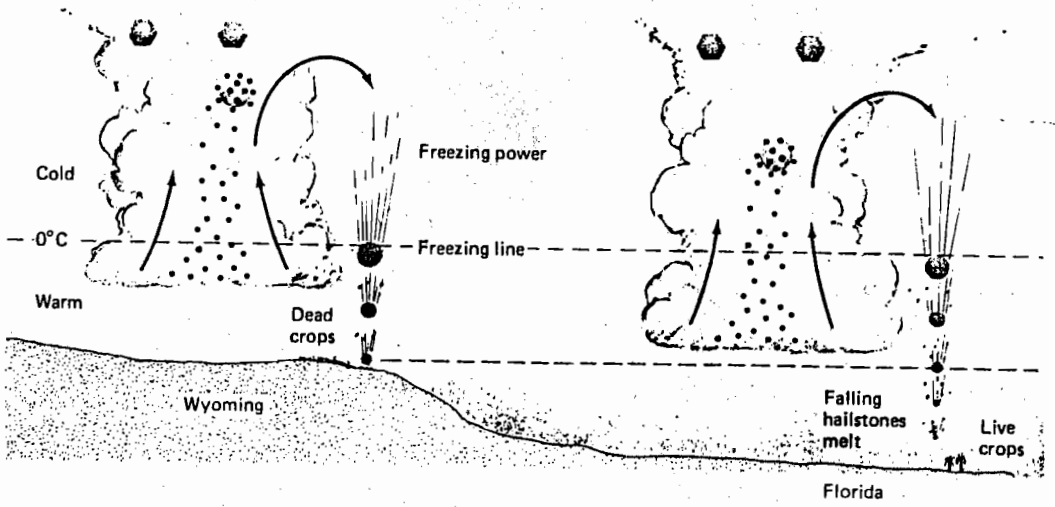
ice pellet อาจจะตกลงมาในก้อนเมฆโดยตลอดหรืออาจจะขึ้นหรือลงตามกระแสอากาศที่พัดขึ้นหรือลงก็ได้ ในกระบวนการนี้ก้อนน้ำแข็งเล็ก ๆ จะโตขึ้นโดยการพอกเข้าไปของหยดน้ำซุปเปอร์คูลที่เกิดการเยือกแข็งเมื่อชนกันซึ่งในที่สุดจะใหญ่และหนักจนตกจากเมฆกลายเป็นลูกเห็บ

เมื่อก้อนน้ำแข็งเล็ก ๆ เข้าสู่ก้อนเมฆที่มีหยดน้ำซุปเปอร์คูลอยู่มากน้ำจะสะสม (collect) บนก้อนน้ำแข็งในรูปที่เป็นฟิล์มของของเหลว (liquid film) ซึ่งจะเย็นลงอย่างช้า ๆ เกิดเป็นชั้นที่ไปร่งใส (transparent) หรือ glaze ขึ้นแต่เมื่อก้อนน้ำแข็งเดินทางผ่านส่วนของก้อนเมฆที่มีความเข้มข้นของหยดน้ำซุปเปอร์คูลอยู่น้อย หยดน้ำซุปเปอร์คูลจะแข็งทันทีเมื่อสัมผัสกับก้อนน้ำแข็งซึ่งฟองอากาศจะถูกขังไว้ในน้ำแข็งทำให้เกิดชั้นที่ขาวทึบ (opaque whitish) ดังนั้นทำให้เกิดเป็นชั้นที่ใสและทึบสลับกัน ซึ่งเมื่อผ่าลูกเห็บออกเป็นสองซีกจะมีลักษณะคล้ายโครงสร้างของหัวหอมที่มีลักษณะเป็นชั้น ๆ (concentric layer) (ดูรูป 9.12)



รูป 9.12 รูปภาคตัดขวางของลูกเห็บซึ่งถ่ายผ่านกล้องจุลทัศน์ด้วยแสงโพลาไรซ์ (poralized)

ขนาดความใหญ่ของลูกเห็บขึ้นกับองค์ประกอบหลายอย่าง (ดูรูป 9.13) ประการที่หนึ่ง กระแสอากาศจะต้องมีความแรงมากเพื่อทำให้ก้อนลูกเห็บสามารถลอยอยู่ในบริเวณส่วนที่เย็นของก้อนเมฆได้ ดังนั้นลูกเห็บขนาดใหญ่จะเกิดขึ้นในพายุฟ้าคะนองที่มีความรุนแรงเท่านั้น ประการที่สอง เมื่อลูกเห็บกำลังตกลงมาจะต้องไม่ตกผ่านชั้นที่อุ่นและชั้นของอากาศที่หนามากเกินไป มิฉะนั้นมันจะละลายก่อนที่จะมาถึงพื้นดินนี่เป็นเหตุผลอันหนึ่งที่ลูกเห็บมีแนวโน้มที่ตกก่อนที่ฝนจะเริ่ม ในกรณีที่ลูกเห็บตกผ่านชั้นที่อุ่นซึ่งหนามากก็จะทำให้ลูกเห็บละลายไปหมดก่อนที่จะถึงพื้น



รูป 9.13 สภาวะต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดลูกเห็บ เมืองที่อยู่ในที่สูงเช่นไอโอมิงจะมีลูกเห็บตกลงมาถึงพื้นดิน ในขณะที่เมืองที่อยู่ต่ำในที่ลุ่ม ลูกเห็บจะละลายเสียก่อนที่จะถึงพื้น

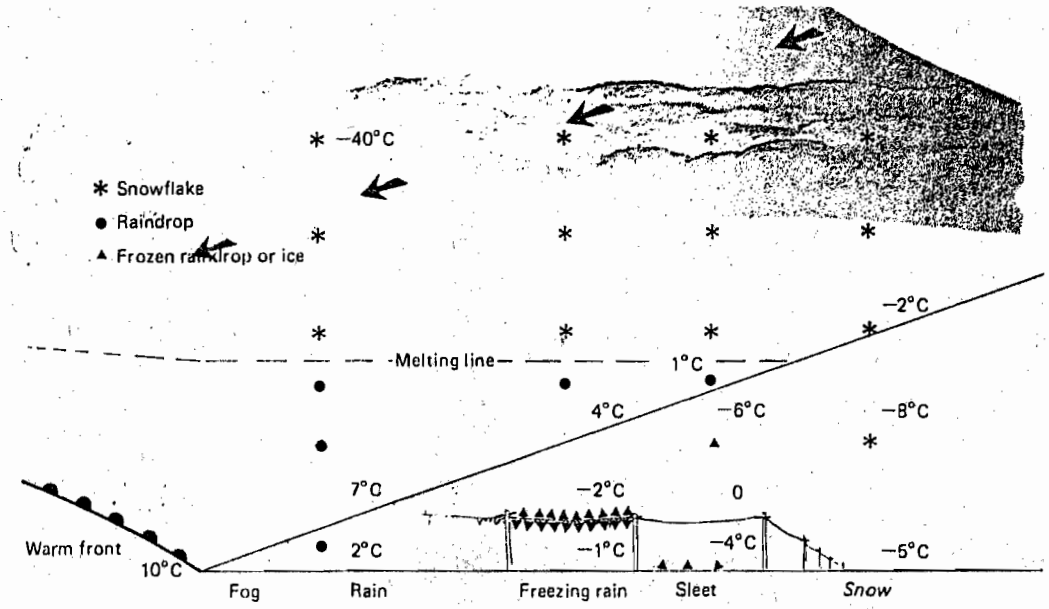
9.7 สลีทและหยดน้ำฝนที่เยือกแข็ง (Sleet and Freezing Rain)

สลีทก็คือหยดน้ำฝนที่แข็งตัว ส่วนหยดน้ำฝนที่เยือกแข็งจะดูคล้ายกับหยดน้ำฝนธรรมดาจนกว่าจะกระทบกับวัตถุแข็งใด ๆ ซึ่งจะทำให้มันเยือกแข็งเป็นชั้นเหนือวัตถุนั้น ทั้งสลีทและหยดน้ำฝนที่เยือกแข็งจะก่อขึ้นภายใต้สภาวะพื้นฐานเดียวกัน แต่สลีทมักก่อตัวเมื่ออุณหภูมิของอากาศมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อยดังนั้นมันจะเยือกแข็งก่อนที่จะกระทบพื้น ทั้งสลีทและหยดน้ำฝนที่เยือกแข็งจะเกิดขึ้นในชั้นของอากาศซึ่งอยู่ติดกับพื้นดินมีอุณหภูมิต่ำกว่า 0°C (เพื่อหยดน้ำจะเยือกแข็งได้) แต่อุณหภูมิของอากาศเบื้องบนจะอยู่สูงกว่าจุดเยือกแข็ง (ดังนั้นจึงเกิดเป็นฝนแทนที่จะเป็นหิมะ)

โดยทั่วไป อุณหภูมิของอากาศจะลดลงเมื่อขึ้นไปสูง ดังนั้นจะเห็นว่าสภาวะการเกิดสลีทและหยดน้ำที่เยือกแข็งจะค่อนข้างไม่ปกติ (รูป 9.14) มีคำถามว่าในสภาวะเช่นไรอากาศเบื้องต้นจึงจะอุ่นกว่าอากาศที่อยู่ใกล้พื้นดิน คำตอบก็คือในกรณีที่กลางคืนมีอากาศโปร่งใส แต่หยดน้ำฝนจะไม่ตกลงมาในคืนที่ปราศจากเมฆ ดังนั้นจึงเป็นกรณีเมื่อเกิดแนวปะทะอากาศอุ่นขึ้น

ในกรณีนี้อากาศที่ลอยสูงเหนือแนวปะทะอากาศอาจจะอุ่นมากพอที่จะทำให้เกิดฝนในขณะที่ชั้นของอากาศเย็นใกล้พื้นดินที่ผู้คนอาศัยอยู่ซึ่งคาดว่าจะมีหิมะเกิดขึ้นอยู่เบื้องล่าง แต่ปรากฏว่าสิ่งที่เกิดขึ้นกลับเป็นสลีทหรือหยดน้ำฝนที่เยือกแข็งอย่างใดอย่างหนึ่งแทน ในกรณีที่อุณหภูมิที่ระดับพื้นดินต่ำกว่า -3°C สิ่งที่เกิดคือสลีท และถ้าอยู่ระหว่าง 0 ถึง -3°C สิ่งที่จะเกิดก็คือหยดน้ำฝนที่เยือกแข็งแทน

Meteorological conditions leading to freezing rain and sleet.



รูป 9.14 สภาวะต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดสลีทและหยดน้ำฝนที่เยือกแข็ง