



ดิวทีเรียมและน้ำหนักหนัก (Deuterium and Heavy Water)

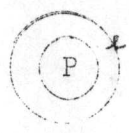
๒.๑ ดิวทีเรียม

การที่ธาตุแต่ละธาตุมีอะตอมที่มีเลขอะตอมเท่ากัน แต่จำนวนอนุภาคนิวตรอนต่างกัน แสดงว่าธาตุนั้นมีหลายชนิด ซึ่งใช้คำว่า ไอโซโทป (isotope) เช่น ธาตุไฮโดรเจนมีอะตอมอยู่ ๓ ชนิด คือ

อะตอมแรกมีชื่อเฉพาะเรียกว่า โปรเทียม (protium) หรือไฮโดรเจน มีนิวเคลียส (nucleus) ที่ประกอบด้วยอนุภาคโปรตรอน ๑ อนุภาค

อะตอมที่สองมีชื่อเฉพาะเรียกว่า ดิวทีเรียม (deuterium) มีนิวเคลียสที่ประกอบด้วยอนุภาคโปรตรอน ๑ อนุภาค กับอนุภาคนิวตรอน ๑ อนุภาค

อะตอมที่สามมีชื่อเฉพาะเรียกว่า ทริเทียม มีนิวเคลียสที่ประกอบด้วยอนุภาคโปรตรอน ๑ อนุภาค กับอนุภาคนิวตรอน ๒ อนุภาค



${}^1_1\text{H}^1$

โปรเทียม



${}^2_1\text{H}^2$ or D

ดิวทีเรียม



${}^3_1\text{H}^3$

ทริเทียม

รูป ๒.๑ แสดงอะตอมของไอโซโทปของธาตุไฮโดรเจน

คิวที่เริ่มเป็นไอโซโทปหนักของไฮโดรเจน มีน้ำหนักอะตอมเท่ากับ 2.000044 มีจุดหลอมเหลวเท่ากับ 13.8°K มีจุดเดือดเท่ากับ 23.5°K ส่วนโปรเทียมมีน้ำหนักอะตอมเท่ากับ 1.000167 มีจุดหลอมเหลวเท่ากับ 13.8°K มีจุดเดือดเท่ากับ 20.4°K

คิวที่เริ่มเกิดขึ้นเองในธรรมชาติ และมีความเข้มข้น ๑ ส่วนใน ๗๐๐๐ ส่วนของไฮโดรเจน ได้มีการค้นพบคิวที่เริ่มในปี ค.ศ. ๑๙๓๒ โดยการระเหยไฮโดรเจนเหลวแล้วตรวจสอบด้วยออปติคัล สเปกโตรกราฟี (optical spectrography) พบว่าส่วนที่เหลือคือคิวที่เริ่ม คิวที่เริ่มมีความสำคัญในการศึกษาวิจัยในสาขาต่าง ๆ เช่น ทางด้านเคมีจะไร้ทำสารเคมีสำหรับงานเฉพาะ (special purpose) ซึ่งส่วนใหญ่จะทำจากคิวที่เริ่ม ส่วนทางด้านฟิสิกส์ จะใช้ศึกษาคุณสมบัติของไฮไดรด์ (hydride) เช่น ลิเทียมไฮไดรด์ (lithium hydride) โดยศึกษา LiH และ LiD ซึ่งมีคุณสมบัติทางเคมีเหมือนกัน แต่ต่างกันตรงคุณสมบัติทางฟิสิกส์ นอกจากนี้ยังใช้เป็นตัวติดตาม (tracer) ในการวิจัยทางการแพทย์และทางเกษตรกรรมอีกด้วย

๒.๒ น้ำหนักหนัก (Heavy Water)

น้ำหนักหนักมีสัญลักษณ์ทางเคมีเป็น D_2O ซึ่งเป็นสารประกอบระหว่างคิวที่เริ่ม (D) กับออกซิเจน (O) มีอยู่ในน้ำตามธรรมชาติประมาณ 0.015% มีน้ำหนักโมเลกุล 20.0276 มีความถ่วงจำเพาะ 1.1047 ± 0.0006 ที่ 25°C มีคาขยายตัวทางความร้อนดังตารางที่ ๒.๑

ตารางที่ ๒.๑ ค่าขยายตัวทางความร้อนของน้ำชนิดหนัก

อุณหภูมิ, °C	$\frac{\text{ความหนาแน่นที่ } t^{\circ}\text{C}}{\text{ความหนาแน่นที่ } 25^{\circ}\text{C}}$	อุณหภูมิ, °C	$\frac{\text{ความหนาแน่นที่ } t^{\circ}\text{C}}{\text{ความหนาแน่นที่ } 25^{\circ}\text{C}}$
๕	๑.๐๐๐๕๓	๒๓	๑.๐๐๐๓๖
๗	๑.๐๐๑๑๘	๒๔	๑.๐๐๐๑๕
๙	๑.๐๐๑๓๓	๒๕	๑.๐๐๐๐๐
๑๐	๑.๐๐๑๓๖	๒๖	๐.๙๙๙๘๘
๑๑	๑.๐๐๑๓๗	๒๗	๐.๙๙๙๕๕
๑๒	๑.๐๐๑๓๗	๒๘	๐.๙๙๙๓๖
๑๓	๑.๐๐๑๓๕	๒๙	๐.๙๙๙๑๕
๑๔	๑.๐๐๑๓๒	๓๐	๐.๙๙๘๙๐
๑๕	๑.๐๐๑๒๗	๓๑	๐.๙๙๘๖๘
๑๖	๑.๐๐๑๒๑	๓๒	๐.๙๙๘๔๖
๑๗	๑.๐๐๑๑๒	๓๕	๐.๙๙๗๙๓
๑๘	๑.๐๐๑๐๓	๓๖	๐.๙๙๗๖๖
๑๙	๑.๐๐๐๙๓	๓๘	๐.๙๙๖๖๓
๒๐	๑.๐๐๐๘๑	๔๐	๐.๙๙๕๕๓
๒๒	๑.๐๐๐๕๓		

มีความหนาแน่นสูงสุด (maximum density) ๑.๑๐๒๖๒ กรัม/ลบ.ซม. ที่ ๑๑.๒๓ ± ๐.๐๒ °C
 Chang และ Chien (๕) พบว่าความหนาแน่นของ H₂O และ D₂O จะแตกต่างกัน
 อย่างมากที่อุณหภูมิตั้งแต่ ๕๐ °C และจะมีความหนาแน่นเท่ากันที่ ๓๗๐ °C

ความถ่วงจำเพาะของน้ำจะเปลี่ยนไปตามความเข้มข้นของคิตที่เริ่ม คั้งต่อไปนี้



- กำหนดให้ d = ความหนาแน่นของตัวอย่างน้ำ
- d_1 = ความหนาแน่นของน้ำชนิดเบา (density of protium oxide) = ๐.๙๙๙๖๕๕ กรัม/ลบ.ซม.
- d_2 = ความหนาแน่นของน้ำชนิดหนัก (density of deuterium oxide) = ๑.๑๐๘๕๑ กรัม/ลบ.ซม.
- Δd = $d - d_1$
- $\Delta' d$ = $d_2 - d$
- M_1 = น้ำหนักโมเลกุลของโปรเทียมออกไซด์ = ๑๘.๐๑๕๓๑ กรัมต่อโมล
- M_2 = น้ำหนักโมเลกุลของคิตที่เริ่มออกไซด์ = ๒๐.๐๒๘๓๖ กรัมต่อโมล
- S = ความถ่วงจำเพาะของตัวอย่างน้ำ
- S_1 = ความถ่วงจำเพาะของโปรเทียมออกไซด์
- S_2 = ความถ่วงจำเพาะของคิตที่เริ่มออกไซด์
- ΔS = $S - S_1$
- $\Delta' S$ = $S_2 - S$

โมล เปรอ์ เซ้นต์คิตที่เริ่มในรูปความหนาแน่นสัมบูรณ์และความถ่วงจำเพาะ ;

$$\text{โมล เปรอ์ เซ้นต์คิตที่เริ่ม} = \frac{๙๒๓.๓๕ \Delta d}{๑ - ๐.๐๓๖๕ \Delta d}$$

หรือ

$$\text{โมล เปรอ์ เซ้นต์คิตที่เริ่ม} = \frac{๙๒๔.๖๕ \Delta S}{๑ - ๐.๐๓๖๕ \Delta S}$$

ซึ่ง $\Delta S = S - 0.5555556$

โมลเปอร์เซ็นต์ไฮโดรเจน = $\frac{533.53}{1 + 0.0333333 \Delta d}$

หรือ โมลเปอร์เซ็นต์ไฮโดรเจน = $\frac{539.24}{1 + 0.03333 \Delta s}$

ซึ่ง $\Delta s = 9.90776 - S$

ที่ ๒๕ °C

เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของน้ำหนักหนัก = $530.65 \Delta d$

หรือ เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของน้ำหนักหนัก = $533.53 \Delta s$

เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของน้ำหนักเบา = $530.65 \Delta d$

หรือ เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของน้ำหนักเบา = $533.53 \Delta s$

เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำหนักหนัก = $\frac{9033.59}{10000} \Delta d$
 $\Delta d + 0.5555556$

หรือ เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำหนักหนัก = $\frac{9033.59}{10000} \Delta s$
 $\Delta s + 0.5555556$

ปริมาณปริมาตรโมเลกุลของน้ำหนักหนักจะมีค่ามากกว่าของน้ำธรรมดา และโครงสร้างของผลึกของน้ำหนักหนัก จะมีลักษณะเช่นเดียวกับน้ำแข็งธรรมดา จุดหลอมเหลวของน้ำหนักหนักมีค่า ๓.๘๒ °C ส่วนจุดเดือดมีค่า ๑๐๑.๔๓๑ ± ๐.๐๐๓ °C และความตึงผิวของน้ำหนักหนักมีค่าน้อยกว่าของน้ำที่อุณหภูมิเดียวกัน

ดิวทีเรียม (D หรือ ${}^2_1\text{H}$) และสารประกอบของดิวทีเรียม (D_2O , HDO, HD, CH_3D etc) มีอยู่ในธรรมชาติ ในรูปไอโซโทปมิกซ์เจอร์ (isotopic mixture) กับไฮโดรเจนธรรมดา (${}^1_1\text{H}$) ด้วยอัตราส่วน ๑ โมลดิวทีเรียมต่อ ๓๖๖ โมลไฮโดรเจน

น้ำชนิดหนัก ใช้เป็นตัวหน่วงความเร็วของนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพราะมีพื้นที่ภาคตัดขวางในการดูดกลืนนิวตรอน และยังใช้เป็นตัวระบายความร้อนอีกด้วย

น้ำชนิดหนักดูดความชื้นจากอากาศได้ดี กล่าวคือถ้าสัมผัสกับอากาศชื้นนาน ๆ จะทำให้ความเข้มข้นเจือจางลง การที่จะเจือจางเท่าใดขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่สัมผัสกับอากาศ, ความชื้นของอากาศ, อุณหภูมิของอากาศ, ตัวอย่างน้ำ ฯลฯ ดังนั้นในการถ่ายเทตัวอย่างน้ำ ควรจะทำในที่ที่มีอากาศแห้ง หรืออาจจะใช้หลอดขยายก็ได้

๒.๓ วิธีหาปริมาณของน้ำชนิดหนัก

การหาปริมาณของน้ำชนิดหนัก ส่วนใหญ่มักจะอาศัยคุณสมบัติทางฟิสิกส์บางอย่างที่แตกต่างกัน กล่าวคือ โปรเทียมออกไซด์ (H_2O) และดิวทีเรียมออกไซด์ (D_2O) มีความหนาแน่นต่างกันประมาณ ๑๐ % และความหนาแน่นของตัวอย่างน้ำ ขึ้นอยู่กับปริมาณของดิวทีเรียมที่มีอยู่

ในการหาความหนาแน่นของตัวอย่างน้ำ มีอยู่หลายวิธีดังนี้

๒.๓.๑ วิธีการลอยตัว (๑,๒)

การหาปริมาณไอโซโทปที่ผสมกันอยู่ในรูปของของเหลว กระทำได้ง่าย ๆ ด้วยวิธีที่เรียกว่าการลอยตัว ลูกลอยที่ใช้ในการวัดค่าควอเตอร์ ซึ่งมีความหนาแน่นใกล้เคียงกับความหนาแน่นของของเหลวที่ต้องการวัด เมื่ออุณหภูมิของของเหลวถึงอุณหภูมิหนึ่ง ความหนาแน่นของของเหลวจะเท่ากับความหนาแน่นของลูกลอย และที่อุณหภูมินี้ลูกลอยจะนั่งอยู่ในของเหลว ความหนาแน่นที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยระหว่างของเหลวที่วัดได้สองตัวอย่าง อันเนื่องมาจากความแตกต่างของปริมาณไอโซโทปที่ผสมกันอยู่จะถูกแทนที่ด้วย ความแตกต่างของอุณหภูมิการลอยตัว และทำให้สามารถคำนวณหาส่วนผสมของไอโซโทปของของเหลวนั้นได้

เงื่อนไขที่สำคัญในการวิเคราะห์ไอโซโทปด้วยวิธีนี้คือ

๒.๓.๑.๑ จะต้องทำให้ของเหลวที่บรรจุในหลอดได้ โดยไม่เกิดไอโซโทปเฟรคชันเนชัน (isotope fractionation)

๒.๓.๑.๒ จะต้องรู้ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของไอโซโทปนั้น ๆ กับอุณหภูมิที่ถูกต้อง กล่าวคือจะต้องอ่านอุณหภูมิการลอยตัวละเอียดถึง $\frac{0}{100}^{\circ}\text{C}$ หรือ $\frac{0}{1000}^{\circ}\text{C}$

๒.๓.๒ วิธีตรวจวัดการไหลของหยดน้ำตัวอย่าง (The Falling Drop Method) (๓)

วิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้หาความเข้มข้นของน้ำหนักหนัก (D_2O) ที่มีอยู่ในน้ำ โดยหาความเข้มข้นของคิวที่เริ่มในรูปของน้ำหนักหนัก เป็นจำนวนกรัมต่อของผสมระหว่างน้ำธรรมดา กับ น้ำหนักหนัก ($\text{H}_2\text{O}/\text{D}_2\text{O}$) จำนวน ๑๐๐ ลบ.ซม. ซึ่งวิธีนี้จำเป็นต้องใช้เทคนิคที่แน่นอน เพราะความถูกต้องแน่นอน (accuracy) ขึ้นอยู่กับเทคนิคดังกล่าว ในตอนแรก ๆ ใช้วิธีนี้ศึกษาเกี่ยวกับน้ำในร่างกายของมนุษย์ ซึ่งมีความเข้มข้นอยู่ระหว่าง ๐.๑ ถึง ๐.๒ % ความผิดพลาดที่จะเป็นไปได้ ๑ หรือ ๒ % ซึ่งเพียงพอที่จะใช้หา ± 0.002 % D_2O หรือน้อยกว่านี้

หลักการของวิธีนี้ขึ้นอยู่กับความจริงที่ว่า ความเร็วของวัตถุที่ไหลผ่านตัวกลางซึ่งทราบความเข้มข้น ณ อุณหภูมิที่กำหนดให้ จะสัมพันธ์กับความแตกต่างของความหนาแน่นระหว่างวัตถุและตัวกลาง

ความสัมพันธ์โดยทั่ว ๆ ไป สำหรับวัตถุที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำในตัวกลางแสดงโดย Stokes' Law ดังนี้

$$V_{\infty} = \left(\frac{2}{9}\eta\right) (6 - \zeta) gr^2,$$

ซึ่ง

V_{∞} = ความเร็วสุดท้าย

η = ความหนืดของมีซิม

g = ความเร่งอันเนื่องมาจากแรงดึงดูดของโลก

r = รัศมีของวัตถุที่กำลังเคลื่อนที่

$6 \ \& \ \zeta$ = ความหนาแน่นของวัตถุและตัวกลาง ตามลำดับ

มีชนิดที่ใช้ส่วนใหญ่จะใช้ o - fluorotoluene ซึ่งเป็นของเหลวที่ไม่ละลายใน
กับน้ำและมีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำเล็กน้อย

ความเข้มข้นของน้ำชนิดหนึ่งจะมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับระยะเวลาในการไหลของ
หยดน้ำตัวอย่าง ซึ่งมีความเข้มข้นอยู่ในช่วงไม่เกิน ๐.๕ % D₂O ทั้งนี้ในการหาความเข้มข้น
ของคิตที่เตรียม จึงใช้วิธีเปลี่ยนจากระยะเวลาของการไหลของตัวอย่างน้ำไปเป็นความเข้มข้น
ของ D₂O โดยเทียบกับ calibration curve ของระยะเวลาของการไหลของน้ำ
มาตรฐาน

๒.๓.๓ การหาปริมาณของน้ำชนิดหนึ่งด้วยแมสสเปกโตรมิเตอร์ (๑)

Urey, Brickwedde และ Murphy (๖) นำวิธีการของสเปกโตรสโคปิก
(spectroscopic) มาใช้หาปริมาณคิตที่เตรียมในกาซไฮโดรเจน โดยวัดความยาวคลื่น
(wavelength) ของโปรเทียมและคิตที่เตรียมในอะตอมมิกสเปกตร้า (atomic spectra)
ซึ่งแตกต่างกัน วิธีการของสเปกโตรสโคปิกไม่ค่อยแน่นอน ทั้งนี้จึงได้มีการปรับปรุงวิธีการใหม่
เพื่อให้ความแน่นอนสูงขึ้น เพื่อนำมาวิเคราะห์ไอโซโทปที่มีอยู่ในกาซไฮโดรเจน โดยใช้
แมสสเปกโตรมิเตอร์ Bleakney (๗) เป็นตัววิเคราะห์ไอโซโทปของไฮโดรเจนด้วย
แมสสเปกโตรมิเตอร์ ต่อมาก็มีการปรับปรุงวิธีการดังกล่าวเรื่อยมา เพื่อให้มีความแน่นอนสูงขึ้น
สำหรับงานที่ต้องการความแน่นอนสูงจะต้องใช้ชุดที่มีความชำนาญในการใช้เครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์
โดยเฉพาะจุดสำคัญในการใช้เครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์ มีดังนี้

เส้นลวดเล็ก ๆ ที่ถูกความร้อนจะปล่อยอิเล็กตรอนออกมา และอิเล็กตรอนดังกล่าว
จะถูกกระตุ่นด้วยสนามไฟฟ้า แล้วเคลื่อนที่ผ่านช่องของหลอด ๆ ซองแล้วรวมตัวเป็นลำแสงของ
อิเล็กตรอน (electron beam) และปล่อยให้ลำแสงดังกล่าวผ่านไปยังบริเวณที่บรรจุไฮโดรเจน
ซึ่งมีความดัน ~ ๑๐^{-๔} มม. ของปรอท จะทำให้เกิดไฮโดรเจนไอออน ทั้งตารางที่ ๒.๓

ตารางที่ ๒.๒ อีออนจากของผสมของไฮโดรเจน ซึ่งมีโปรเทียม มากกว่าดิวเทอเรียม

Ion	Mass	Intensity
H^+	1	Weak
H_2^+	2	Very strong
D^+	2	Very weak
H_3^+	3	Weak
HD^+	3	Weak
D_2^+	4	Very, very weak
H_2D^+	4	Very, very weak
HD_2^+	5	Very, very weak
D_3^+	6	Very, very weak

และที่ค่าลบจำนวนเล็กน้อยจะถึง อีออนในทิศทางตั้งฉากกับลำแสงของอิเล็กตรอน ซึ่งอีออนจำนวนนี้จะผ่านไปยังช่องสำหรับเก็บและถูกกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าทำให้เกิดเป็นแถบของอีออน ซึ่งมีพลังงานค่อนข้างจะคงที่ แถบของอีออนดังกล่าวจะแผ่กระจายอยู่ในแมสสเปกตรัมด้วยอำนาจของสนามแม่เหล็ก ทั้งส่วนของสเปกตรัมดังกล่าวจะมีน้ำหนักที่แน่นอน แล้วทำการวัดขนาดของกระแสที่ได้ เมื่อเปรียบเทียบขนาดของกระแสแต่ละอันจะได้ความสัมพันธ์ของไอโซโทป