

## บทที่ 9

### อะตอมมิกแมสสเปกโถรเมตรี

### Atomic Mass Spectrometry

อะตอมมิกแมสสเปกโถรเมตรีใช้วิเคราะห์คุณภาพและปริมาณธาตุที่อยู่ในสารตัวอย่าง แมสสเปกโถรเมตรีวิเคราะห์ธาตุได้เกือบทุกธาตุในตารางธาตุ

ข้อดีของแมสสเปกโถรเมตรีเมื่อเทียบกับวิธีการสเปกโถรเชิงแสงของอะตอมมุกคกลืน หรือ เปล่งแสงดังนี้

- 1 จัดลำดับการตรวจหาของวิธีนี้ดีกว่าวิธีเชิงแสงถึงสามเท่า
  - 2 สเปกตราไม่ซับซ้อน ทำคุณภาพวิเคราะห์ง่าย
  - 3 วัดอัตราส่วนมวล ไอโซโทปต่อมวลปกติ
- ข้อเสียของแมสสเปกโถรเมตรีเมื่อเทียบกับวิธีสเปกโถรเชิงแสง
- 1 ราคาเครื่องมือแพงกว่าเครื่องมือเชิงแสงอย่างคึ่งสามเท่า
  - 2 ค่าที่วัด ได้เปลี่ยนแปลงร้อยละ 5 ถึง 10 ในเวลา 1 ชั่วโมง
  - 3 รูปแบบของการแทรกสอดແเนื่อนอน

#### สมบัติทั่วไปของอะตอมมิกแมสสเปกโถรเมตรี Some General Features of Atomic Mass Spectrometry

การวิเคราะห์โดยเทคนิคแมสสเปกโถรมีขั้นตอน ( atomization ) 2 การเปลี่ยนอะตอมจากขั้นตอนที่ 1 เป็นไออ่อน ( ไออ่อนประจุบวกหนึ่ง ) 3 แยกไออ่อนจากขั้นตอน 2 โดยใช้หลักมวลต่อประจุ ( $m/z$ )  $m$  คือมวลของไออ่อนหน่วยมวลอะตอม  $z$  คือประจุ 4 การนับจำนวนไออ่อนแต่ละแบบ หรือ นับกระแสไออ่อนที่เกิดจากไออ่อนของสารตัวอย่างชนแพรนซ์คิวเซอร์ที่เหมาะสม

#### น้ำหนักอะตอมในแมสสเปกโถรเมตรี Atomic Weight in Mass Spectrometry

น้ำหนักอะตอมและน้ำหนักโนเลกูลเพียงในเทอมหน่วยมวลอะตอม ( atomic mass unit amu ) หรือ คัลตัน ( dalton Da ) หน่วยมวลอะตอม หรือ คัลตัน เป็นสเกลที่ใช้

เทียบกับมวลไอโซโทปอ้างอิง คาร์บอน  $^{12}_6\text{C}$  โดยมวลของ  $^{12}_6\text{C}$  เท่ากับ 12 amu ตั้งน้ำหนัก amu หรือ ค่าต้น คือ  $1 / 12$  ของมวลของอะตอม  $^{12}_6\text{C}$  ดังนั้น 1 amu หรือ 1 Da ของคาร์บอนเท่ากับ

$$\begin{aligned} 1 \text{ amu} &= 1 \text{ Da} \\ &= 1 / 12 [ (12 \text{ g } ^{12}\text{C} / \text{mole } ^{12}\text{C}) / (6.0221 * 10^{23} \text{ อะตอม } ^{12}\text{C} / \text{มอเล } ^{12}\text{C}) ] \\ &= 1.66054 * 10^{-24} \text{ กรัมต่ออะตอม } ^{12}\text{C} \\ &= 1.66054 * 10^{-27} \text{ กิโลกรัมต่ออะตอม } ^{12}\text{C} \end{aligned}$$

น้ำหนักอะตอมของไอโซโทป เช่น  $^{35}_{17}\text{Cl}$  มีมวลเป็น 2.91407 เท่าของมวลอ้างอิง  $^{12}_6\text{C}$  ดังนั้นน้ำหนักอะตอมของไอโซโทปคลอรินคือ

$$\begin{aligned} \text{มวลอะตอม } ^{35}_{17}\text{Cl} &= 12.0000 \text{ Da} * 2.91407 \\ &= 34.9688 \text{ Da} \end{aligned}$$

1 โมลของ  $^{12}_6\text{C}$  หนัก 12.0000 กรัม น้ำหนักอะตอมของ  $^{35}_{17}\text{Cl}$  เท่ากับ 34.9688 กรัม ต่ำโมล

มวลแน่นอน ( exact mass ) ของไอโซโทปเฉพาะของธาตุ หรือ มวลแน่นอนของสารประกอบที่มีไอโซโทปเฉพาะ การหาความแตกต่างมวลของสารประกอบชนิดเดียวกัน แต่มีไอโซโทปต่างกัน เช่น

$$\begin{aligned} ^{12}\text{C}^1\text{H}_4 \quad m &= 12.0000 * 1 + 1.007825 * 4 \\ &= 16.031 \text{ Da} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} ^{13}\text{C}^1\text{H}_4 \quad m &= 13.00335 * 1 + 1.007825 * 4 \\ &= 17.035 \text{ Da} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} ^{12}\text{C}^1\text{H}_3^2\text{H} \quad m &= 12.0000 * 1 + 1.007825 * 3 + 2.0140 * 1 \\ &= 17.037 \text{ Da} \end{aligned}$$

การคำนวณหามวลแน่นอนหากได้ละเอียดถึงจุดทศนิยมที่ 3 หรือ 4 แมสสเปกโตรมิเตอร์ที่มีการแยกดีหามวลได้ละเอียดและมีความเที่ยงสูง

มวลอนมินาล ( nominal mass ) ของสารประกอบ  $\text{CH}_4$  ทั้งสามไอโซโทปมีค่า 16, 17 และ 17 น้ำหนักอะตอมเชิงเคมี หรือ น้ำหนักอะตอมเฉลี่ยของธาตุที่มีไอโซโทปต่างกันเขียนเป็นสมการได้

$$A = A_1 p_1 + A_2 p_2 + \dots + A_n p_n = \sum_{i=1}^n A_i p_i$$

$A_1, A_2, \dots, A_n$  มวลอะตอมเป็นค่าต้นของ  $n$  ไอโซโทปของธาตุ  $p_1, p_2, \dots, p_n$  ปริมาณของแต่ละไอโซโทป น้ำหนักโมเลกุลเชิงเคมี หรือ น้ำหนักเฉลี่ยของสารประกอบคือมวลรวมของน้ำหนักอะตอมเชิงเคมีของแต่ละอะตอมในสูตรสารประกอบนั้น เช่น น้ำหนักโมเลกุลเชิงเคมีของมีเทน  $\text{CH}_4$  เท่ากับ  $12.01115 * 1 + 4 * 1.00797 = 16.0434$  Dalton

### อัตราส่วนมวลต่อประจุ Mass to Charge Ratio

อัตราส่วนมวลต่อประจุของไอออนเชิงอะตอม หรือ โมเลกุลคือ มวลของไอออนเชิงอะตอม หรือ โมเลกุล เช่น  $^{12}\text{C}^1\text{H}_4^+$   $m/z = 16.035 / 1 = 16.035$   $^{13}\text{C}^1\text{H}_4^{2+}$   $m/z = 17.035 / 2 = 8.518$  ไอออนในเครื่องแมสสเปกโตรเป็นไอออนประจุหนึ่งเป็นส่วนใหญ่ อัตราส่วนมวลต่อประจุคือมวล แม้ว่าสำรั่วมวลจะไม่ถอย回去ด้วย

### รูปแบบของอะตอมมิคแมสสเปกโตรเมตري Types of Atomic Mass Spectrometry

ตาราง 9-1 รูปแบบที่สำคัญของแมสสเปกโตรเมตري ในอดีตใช้หลักการแตกตัวเป็นไอออนด้วยความร้อนและแหล่งกำเนิดการสปาร์คเพื่อทำคุณภาพและปริมาณวิเคราะห์ธาตุ หลักการนี้ยังคงใช้อยู่ในปัจจุบัน ปัจจุบันใช้เทคนิคใหม่วิเคราะห์ธาตุ เทคนิคใหม่ให้ผลวิเคราะห์ดีกว่าเทคนิคเดิม จากตาราง 9-1 สามารถแยกเป็นวิธีไฮฟันเนต ( hyphenate ) การใช้เครื่องมือสองชนิดร่วมกัน

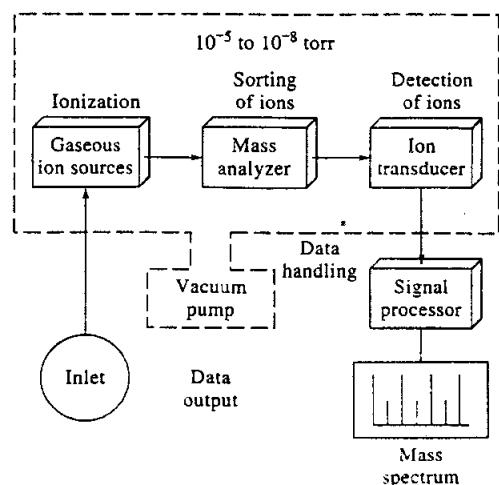
### แมสสเปกโตรมิเตอร์ Mass Spectrometers

แมสสเปกโตรมิเตอร์เป็นเครื่องมือแยกไอออนต่างชนิดกันซึ่งวิ่งด้วยความเร็วโดยใช้หลักมวลต่อประจุ ไอออนส่วนใหญ่มีประจุบวกหนึ่ง อัตรามวลต่อประจุจึงมีค่าเท่ากับมวลของไอออนนั้น อุปกรณ์ที่ใช้แยกมวลมีหลายชนิด ในบทนี้จะกล่าวเฉพาะอุปกรณ์ที่ใช้แยกมวลเชิงอะตอมที่นิยนใช้ซึ่งมีสามชนิด ควอครัพโพลแมสสเปกโตรมิเตอร์ ( quadrupole ) ไทน์อฟไฟล์แมสสเปกโตรมิเตอร์ ( Time of Flight ) และแมสสเปกโตรมิเตอร์แบบไฟกัสสองครั้ง ( double focusing ) อุปกรณ์แยกมวลชนิดอื่นกล่าวไว้ในบทที่ 17 คอลัมน์สุดท้ายของตาราง 9-1 เป็นชนิดของเครื่องวิเคราะห์มวลที่ใช้วิเคราะห์มวลเชิงอะตอม

แผนภูมิรูป 9-1 แสดงองค์ประกอบของแมสสเปกโตรมิเตอร์ ระบบใส่ตัวอย่าง ตัวอย่างที่ใช้มีนาคเป็นในไครกรรม เข้าสู่แหล่งกำเนิด ไอออน องค์ประกอบในการตัวอย่างเปลี่ยนเป็นไอออนสถานะก้าช การเปลี่ยนตัวอย่างให้เป็นไอออนบวกในสถานะ

ตาราง 9-1 รูปแบบของอะตอมมิคแมสสเปกไทรเมทรี

ชื่อ	คำย่อ	แหล่งกำเนิดไอออน	เครื่องวิเคราะห์มวล
อินดัคทีฟคัพเพลลาสما	ICPMS	พลาสมาร์กอนอุณหภูมิสูง	ความร้อนไฟฟ้า
พลาสมาระแสงรัง	DCPMS	พลาสมาร์กอนอุณหภูมิสูง	ความร้อนไฟฟ้า
ไมโครเวฟอินดิวซ์ พลาสما	MIPMS	พลาสมาร์กอนอุณหภูมิสูง	ความร้อนไฟฟ้า
แหล่งกำเนิดspark	SSMS	Radio frequency electric spark	การไฟฟ้าส่องครุ่ง
การแตกตัวเป็นไอออน ด้วยความร้อน	TIMS	Electrically heated plasma	การไฟฟ้าส่องครุ่ง
โกลว์ดิชาร์จ	GDMS	Glow discharge plasma	การไฟฟ้าส่องครุ่ง
เดเซอร์วิโนแคร์โรบ	LMMS	ไฟฟ้าด้วยลำเดเซอร์	ไนโตรฟายล์
ไอออนชุดที่สอง	SIMS	Accelerated ion bombardment	การไฟฟ้าส่องครุ่ง



รูป 9-1 องค์ประกอบของแมสสเปกไทร์มิเตอร์

ก้าชใช้วิธีการระดมยิงด้วยลำอิเล็กตรอน ไฟฟอน ไอออน หรือ โนแลกุล การทำให้เกิด ไอออนบวกซึ่งใช้พลังงานความร้อน หรือไฟฟ้า ไอออนบวกของจากแหล่งกำเนิดและถูกเร่งให้หวัดด้วยความเร็วสูง ( พลังงานจำนวนมาก ) เข้าสู่เครื่องวิเคราะห์มวล การศึกษาไอออน ลบในสถานะก้าชก็ทำได้เช่นกัน

เครื่องวิเคราะห์มวลทำหน้าที่คล้ายกับตัวทำแสงเอกสารค์ในเครื่องสเปกโตรเรืองแสง ในเดือนี้ใช้หลักการกระชาญมวลต่อประจุมากกว่าการกระชาญความยาวคลื่นไฟฟอน แมส สเปกโตรมิเตอร์ใช้เทอร์นซ์ดิวเซอร์เปลี่ยนลำไยอนบวกเป็นสัญญาณไฟฟ้า แล้วเข้าสู่กระบวนการเปลี่ยนเป็นสัญญาณที่เหมาะสม แล้วก็นำไว้ในเครื่องคอมพิวเตอร์ แล้วส่งสัญญาณออกทางจอภาพ หรือ ใช้วิธีอื่นที่เหมาะสม แมสสเปกโตรมิเตอร์ทำงานภายใต้ความดันต่ำ  $10^{-5}$  ถึง  $10^{-8}$  ทอร์ ยกเว้นกระบวนการจัดการสัญญาณและอ่านผล

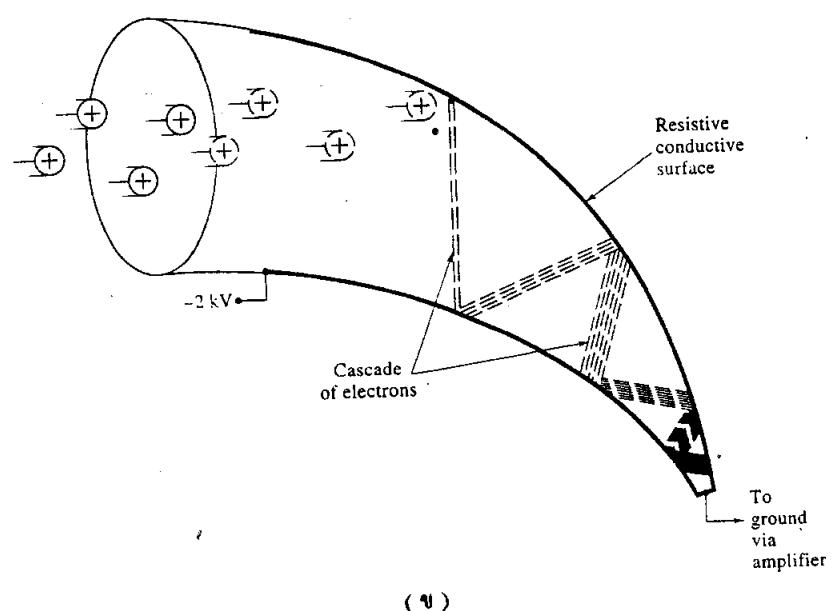
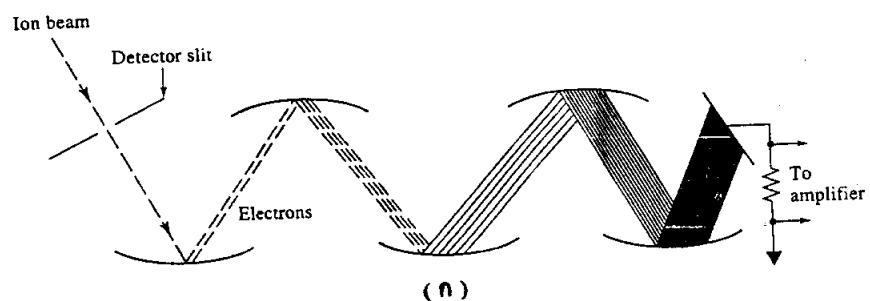
แทรนซ์ดิวเซอร์สำหรับแมสสเปกโตรเมตري Transducers for Mass Spectrometry  
แทรนซ์ดิวเซอร์ในเครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์มีหลายแบบ เครื่องขยายอิเล็กตรอน ( electron multiplier ) นิยมใช้มากที่สุด

#### อิเล็กตรอนมัลติพลายเออร์ Electron Multipliers

รูป 9-2 ก เป็นแผนภูมิของไดโนดอิเล็กตรอนมัลติพลายเออร์ต่อเนื่องใช้หาไอออนบวก แทรนซ์ดิวเซอร์นี้คล้ายกับแทรนซ์ดิวเซอร์ไฟฟอนมัลติพลายเออร์ที่ใช้ครั้งสี่ อัลตราไวโอเลต/วิสิเบิล บริเวณผิวแคโทดและไดโนดหลายอันเป็น Cu / Be เมื่อไอออนบวกชนผิวแคโทด อิเล็กตรอนจะหลุดจากผิวแคโทด ไดโนดตัวที่ 1 ได้รับศักย์สูงกว่าแคโทด และทำหน้าที่เพิ่มปริมาณอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนมัลติพลายเออร์มีไดโนดถึง 20 อัน โดยอันดับไปมีศักย์สูงกว่าอันแรก อิเล็กตรอนจึงถูกเร่งไปยังไดโนดถัดไปและมีปริมาณเพิ่มขึ้น ศุทธิภัยกระแสสูงถึง  $10^7$  เท่า

รูป 9-2 ข เป็นอิเล็กตรอนมัลติพลายเออร์แบบต่อเนื่อง รูปร่างคล้ายทรงเป็ต ทำจากแก้วที่โดยด้วยตะกั่ว ศักย์ที่ใช้คร่อมความยาวแทรนซ์ดิวเซอร์ 1.8 ถึง 2 กิโลโวลต์ ไอออนบวกชนผิวซึ่งใกล้กับช่องเล็กของถังข้า แล้วให้อิเล็กตรอนออกนา ไอออนบวกชนผิวแต่ละครั้งจะให้อิเล็กตรอน อิเล็กตรอนที่วิ่งออกนาจะชนผิวไดโนดและเพิ่มปริมาณอิเล็กตรอน ศุทธิภัยได้กระแสสูงถึง  $10^5$  เท่า ถ้าประยุกต์อุปกรณ์นี้จะได้กระแสสูงถึง  $10^8$  เท่า

อิเล็กตรอนมัลติพลาเยอร์จะหักด้วยกระแสน้ำที่แรงมาก ต้องสนองเร็ว ( เวลาตอบสนองเป็น  $10^{-9}$  วินาที ) ขั้นตอนนี้ตัวเซอร์นี่ไว้หลังของเล็กๆ ยาวอกของแมสสเปกโถร์มิเตอร์ชนิดเบี่ยงเบนคำว่าสนามแม่เหล็ก ไอออนบวกวิงชันแค่โถมีพลังงานจลน์สูงพอทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากผิวแค่โถ แมสสเปกโถร์มิเตอร์ชนิดที่ให้สำหรับไอออนบวกพัฒนาต่อ



รูป 9-2 ( ก ) ไคโโนดของอิเล็กตรอนมัลติพลาเยอร์ ไคโโนดตัวถัดไปมีศักย์สูงกว่าไคโโนดตัวแรก และมีไคโโนดหลายอันช่วยเพิ่มปริมาณอิเล็กตรอน ( ข ) ไคโโนดแบบต่อเนื่องของอิเล็กตรอนมัลติพลาเยอร์

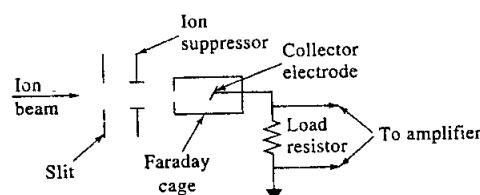
( เช่น ความครัพโพล ) ต้องใช้เทคนิคเร่งลำไอก่อนให้มีความเร็วสูง ( พลังงานจลน์สูง ) ชนแค่โภคแล้วให้คำอิเล็กตรอนออกมาน

### ถัวฟาราเดย์ The Faraday Cup

รูป 9-3 เป็นแผนภูมิถัวฟาราเดย์ที่ใช้รวมรวมไออกอนบวก ปรับตำแหน่งแทرنช์ดิวเซอร์ให้ไออกอนที่ออกจากเครื่องวิเคราะห์ชนชี้ไฟฟ้ารับไออกอนบวก ชี้ไฟฟ้าอยู่ในกรุงป้องกันไม่ให้ไออกอนบวกที่เกิดการสะท้อนออก และป้องกันอิเล็กตรอนชุดที่สองหลุดออก ชี้ไฟฟ้ารับไออกอนจัดไว้ในแนวอิสระกับทางเดินไออกอน การจัดแบบนี้ป้องกันอนุภาคที่ชน หรือ ออกจากชี้ไฟฟ้า และไออกอนที่สะท้อนกลับ มีแนวทางเดินไม่ตรงกับช่องที่ไออกอนเข้า ชี้ไฟฟ้ารับไออกอนและกรงต่อ กับความด้านทานที่มีค่ามากและต่อ กับศักย์ศูนย์ เมื่อประจุของไออกอนบวกชนแผ่น จะมีอิเล็กตรอนจากศักย์ศูนย์ ( ground ) วิ่งผ่านความด้านทานเพื่อสะเทินประจุนี้ และเกิดศักย์ ( potential drop ) รวมความด้านทานศักย์จะถูกขยายโดยเครื่องขยายอิมพีเดนซ์สูง การตอบสนองของแทرنช์ดิวเซอร์นี้ไม่ขึ้น กับพลังงาน แต่ขึ้นกับมวลและสมบัติเชิงเคมีของไออกอน ถัวฟาราเดย์ราคาถูก กลไกการทำงานและระบบไฟฟ้าไม่ซับซ้อน เครื่องขยายอิมพีเดนซ์สูงทำงานช้า การสแกนสเปกตรัมต้องใช้เวลานาน ถัวฟาราเดย์ไวน้อยกว่าอิเล็กตรอนมัลติพลาเยอร์

### ระบบตรวจหาชนิดอื่น Other Types of Detection Systems

แผ่นพิล์มถ่ายภาพที่เคลือบด้วยเงิน โลหะในครึ่งมัลตัน ไวต่อไออกอนที่มีพลังงานจลน์ แผ่นพิล์มนักใช้กับเครื่องแมสสเปกโทรท์ที่มีแหล่งกำเนิดสปาร์ค ระบบตรวจหาแบบนี้วัดไออกอนต่างๆ ได้พร้อมกัน ( ศึกษามวล  $m/z$  ช่วงกว้าง ) แผ่นพิล์มนี้จัดไว้บนระนาบไฟฟ้า ดังรูป 9-9



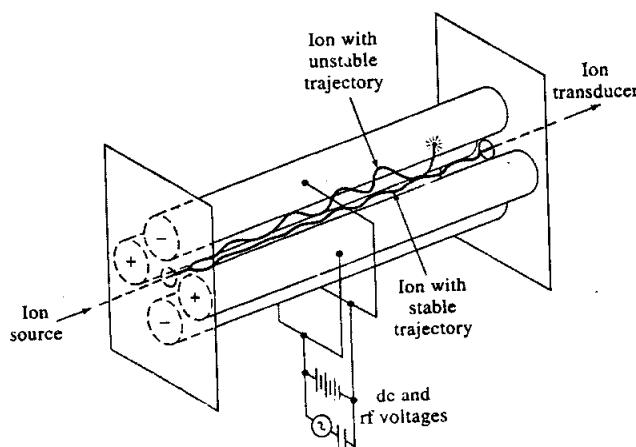
รูป 9-3 เครื่องตรวจหาถัวฟาราเดย์ ศักย์ที่ใส่กับแผ่นไออกอนซับเพลสเซอร์ถูกปรับให้เหมาะสมกับพิษกัณฑ์มวล

แทรนซ์ดิวเซอร์ชันนิคเปล่งแสงวับ ( scintillation ) ใช้วัดไอออนบวกได้ แทรนซ์ดิวเซอร์นี้เป็นผลึกฟอสฟอร์บันแผ่นอะลูมิเนียมบาง และจัดไว้บนหน้าต่างหลอดไฟโคมัลติพลาเยอร์ เมื่อไอออนบวกชนแคทโอด แคทโอดให้อิเล็กตรอน อิเล็กตรอนชนสารฟอสฟอร์เกิดแสงวับ ( flashes of light ) หลอดไฟโคมัลติพลาเยอร์ทำหน้าที่วัดแสงนี้

### ความครับโพลแอนาไอลอซอร์ Quadrupole Analyzer

เครื่องวิเคราะห์มวลสำหรับไอออนบวกนิยมใช้แบบความครับโพล ดังรูป 9-4 เครื่องมือนี้ขนาดกระทัดรัด ราคาไม่แพง เครื่องตรวจหาแบบนี้ให้อัตราการสแกนสูง การวิเคราะห์ใช่วลามน้อยกว่า 100 มิลลิวินาที

เครื่องวิเคราะห์ความครับโพลประกอบด้วยขั้วโลหะทรงกระบอกสี่ขั้ววางแน่นกัน ขั้วตรงข้ามกันมีประจุเหมือนกัน ขั้วไฟฟ้าคู่ที่มีประจุบวกต่อ กันแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งแบรค่าได้ ขั้วไฟฟ้าคู่ที่มีประจุลบต่อ กันแหล่งกำเนิดกระแสตรงเช่นกัน ขั้วไฟฟ้าทั้งสี่นี้ยังได้รับความถี่วิทยุแบบกระแสลับ ขั้วไฟฟ้าคู่บวกและคู่ลบได้รับความถี่วิทยุ 180 องศาคนละเพส ( เพสตรงข้าม ) ไอออนบวกถูกเร่งโดยศักย์ 5 ถึง 10 กิโลโวลต์เข้าสู่ทางเดินระหว่างขั้วทั้งสี่ ถ้าต้องการเพิ่มศักย์กระแสลับและกระแสตรงที่ให้กับขั้วทั้งสี่พร้อมกัน ต้องเพิ่มศักย์ทั้งสองชนิดเพื่อให้อัตราส่วนของศักย์กระแสลับต่อกระแสตรงคงที่ ไอออนบวกที่มีมวลต่อประจุเท่ากับศักย์ไฟกระแสตรงและความถี่วิทยุกระแสลับผ่านออกมาสู่แทรนซ์ดิวเซอร์ ไอออนอื่นจะชนกับขั้วไฟฟ้าและถูกเก็บด้วยขั้วไฟฟ้า เครื่องวิเคราะห์ความครับโพลแบบพื้นฐานแยกมวลไอออนต่างกัน 1 หน่วยมวล

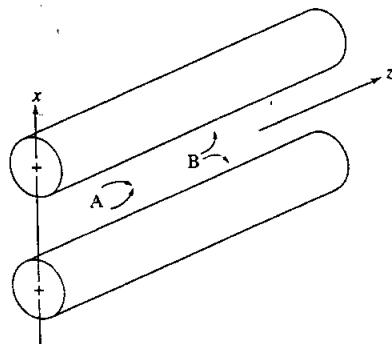


รูป 9-4 แมสสเปกโกรมิเตอร์แบบความครับโพล

การแยกมวลของควอครัพโพลค์ล้ายกับฟิลเตอร์ทำหน้าที่แยกรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า  
เครื่องวิเคราะห์มวลแบบนี้อาจเรียกว่า แมสฟิลเตอร์แทนสเปกโตรมิเตอร์

### ทางเดินไอออนในควอครัพโพล Ion Trajectories in a Quadrupole

ศักย์กระแสตรงและความถี่วิทยุกระแสสลับมีผลต่อทางเดินไอออนที่ผ่านระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสี่ ตอนแรกคุณที่ขั้วไฟฟ้าบวก รูป 9-5 จัดบนระนาบ XZ เมื่อไม่มีศักย์กระแสตรง ขณะที่มีศักย์กระแสสลับส่วนที่เป็นวงปืน ( sine wave ) ไอออนน้ำก็เดินทางในช่องจะถูกเข้าบริเวณตรงกลางช่อง ขณะที่มีศักย์กระแสสลับส่วนที่เป็นลบปืน ไอออนน้ำจะถูกดึงออก สมบัติดังกล่าวແแทบจะรูป A และ B ซึ่งศักย์ที่เป็นลบ ไอออนวิ่งเข้าชนขั้วโลหะประจุบวกบน ไอออนน้ำจะถูกสะท้อน เกิดโมเลกุลและหุคออกไปทางปลายขั้วทั้งสี่ ไอออนน้ำก็ชนขั้วจะเข็นกัน 1 อัตราเร็วของไอออนน้ำที่วิ่งไปตามแกน Z 2 อัตราส่วนมวลต่อประจุ 3 ความถี่และขนาดสัญญาณกระแสสลับ

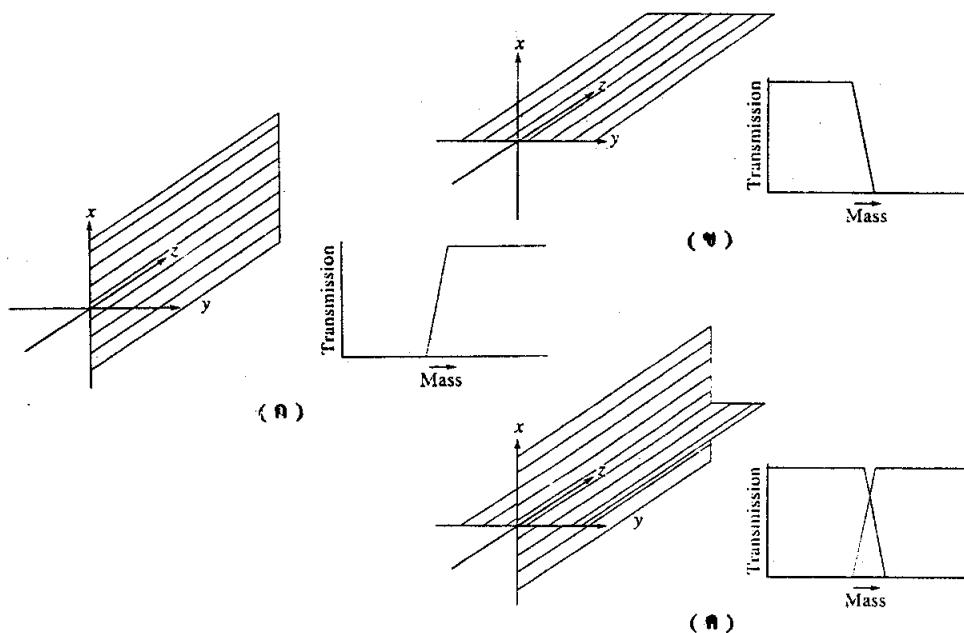


รูป 9-5 การทำงานของควอครัพโพลในระนาบ XY ไอออนบวก A ถูกฟอกส์ไปทางแกน Z  
ไอออน B ถูกดึงดูดเข้าหาขั้วนแกน X

เมื่อพิจารณาผลของศักย์กระแสตรงคริ่งบวก ( ช่วงที่เป็นบวก ) ซึ่งทับกันสนิทกับสัญญาณกระแสสลับ ( อยู่ในเฟสเดียวกัน ) โนเมนตัมของไอออนที่มีพลังงานจนเท่ากัน แปรโดยตรงกับรากที่สองของมวล ไอออนหนักจะเบนยากกว่าไอออนเบา ถ้าไอออนที่วิ่งในช่องเป็นไอออนหนักและ หรือ ความถี่กระแสสลับมีค่ามาก ไอออนนี้จะไม่ค่อยตอบ

สนองต่อศักย์กระแสสัมบ ( ความถี่วิทยุ ) ที่ป้อน แต่จะได้รับอิทธิพลจากศักย์กระแสตรง ( ไฟฟ้า ) ภายใต้สภาวะนี้ ไอออนหนักจะเดินทางในช่องระหว่างขั้วไฟฟ้า ในทางตรง ข้ามถ้าเป็นไอออนเบาและ หรือ ความถี่กระแสสัมบต่ำ ระหว่างป้อนศักย์กระแสตรงช่วงที่ เป็นลบ ไอออนจะชนกับขั้วไฟฟ้าและถูกกำจัด รูป 9-6 ก ขั้วโลหะคู่บวกทำหน้าที่เป็นฟิล เทอร์ให้มวลค่ามากผ่าน โดยไอออนหนักเดินทางในระนาบ XZ เมื่อถึงขั้วโลหะอีกคู่ที่ได้ รับศักย์กระแสตรง ( ขั้วลบ ) และไม่ใส่ศักย์กระแสสัมบ ( ความถี่วิทยุ ) ไอออนบางทุกตัว รึ่งไประหว่างขั้วไฟฟ้า เนื่องจากไอออนหนักถูกทำลาย ( ชนขั้ว ) ไอออนเบาเดินทางใน ระนาบ YZ ขั้วไฟฟ้าคู่นี้ทำหน้าที่เป็นฟิลเตอร์ให้มวลน้อยผ่าน

ไอออนเดินทางผ่านความครัพโพลเข้าสู่เครื่องตรวจหา ทางเดินในระนาบ XZ และ YZ ต้องเสียย ไอออนมวลหนักพอเหมาะสมเท่านั้นจะผ่านฟิลเตอร์สำหรับมวลมากผ่านใน ระนาบ XZ ส่วนไอออนเบาที่มีมวลพอเหมาะสมจะผ่านฟิลเตอร์สำหรับมวลน้อยในระนาบ YZ รูป 9-6 ก ความครัพโพลทั้งสี่ขั้วให้แบบไอออนซึ่งมีช่วงมวล  $m/z$  พอกเหมาะสม ( เช่น ช่วงมวล 30-31 ศูนย์กลางมวลคือ 30.5 ) การปรับศูนย์กลางมวลทำโดยปรับศักย์กระแส ตรง หรือ ความถี่วิทยุกระแสสัมบ



รูป 9-6 การทำงานของความครัพโพล ( ก ) แมสฟิลเตอร์ให้มวลหนักผ่าน ( high pass ) ใน ระนาบ XZ ( ข ) แมสฟิลเตอร์ให้มวลเบาผ่าน ( low pass ) ในระนาบ YZ ( ค ) ฟิลเตอร์ high pass และ low pass ทำงานร่วมกันให้แนบมวลแคบผ่าน

## การสแกนด้วยควอตัวร์ฟิลเตอร์ Scanning with a Quadrupole Filter

การแกว่งกวัสดุของอนุภาคที่มีประจุในฟิลเตอร์ควอตัวร์ฟิลเตอร์มีสองแบบ

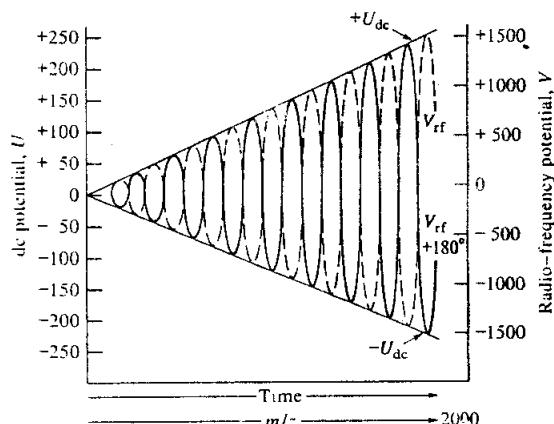
1 แอนพลิกุคของการแกว่งกวัสดุมีค่าจำกัด

2 แอนพลิกุคของการแกว่งกวัสดุเพิ่มขึ้นแบบยกกำลังและมีค่าไม่จำกัด

สมการธินายความประพฤติของ ไออ่อนมวลต่างกันในฟิลเตอร์ควอตัวร์ฟิลเตอร์ค่อนข้างซับซ้อน ตัวแปรในสมการนี้คือ อัตราส่วนมวลต่อประจุ ศักย์กระแสตรง ความถี่และขนาดของศักย์กระแสสลับ และระยะห่างระหว่างขั้วโอดำรงทั้งสี่ การแยกของควอตัวร์ฟิลเตอร์ได้จากอัตราส่วนศักย์กระแสสลับต่อศักย์กระแสตรง การแยกมีค่าสูงสุดเมื่ออัตราส่วนนี้ มีค่าน้อยกว่า 6 เล็กน้อย เครื่องแมสสเปกโทร์ใช้ค่านี้ได้

การสแกนสเปกตรัมมวลไส่ศักย์กระแสสลับและศักย์กระแสตรงค่า  $B$  เริ่มจาก 0 จนถึงค่าสูงสุดทั้งทางบวกและลบจน  $V_{ac} / V_{dc}$  มีค่าน้อยกว่า 6 เล็กน้อย รูป 9-7 แผนภูมิการสแกนขณะเปลี่ยนศักย์ เส้นตรงสองเส้นคู่ออก (ขนาดการแกว่งกวัสดุเพิ่มขึ้น) จะมีเพิ่มและลดศักย์กระแสตรงจาก 0 ถึงประมาณ +/- 250 โวลต์ เมื่อเทียบกับเวลา การสแกน 1 ครั้งใช้เวลา 2-3 มิลลิวินาที ไส่ศักย์กระแสสลับ (ความถี่วิทยุ) เริ่มจาก 0 ถึงประมาณ +/- 1500 โวลต์ สัญญาณกระแสสลับ 180 องศาคนละเฟส

ควอตัวร์ฟิลเตอร์แมสสเปกโทร์ใช้วิเคราะห์มวลต่อประจุ ( $m/z$ ) ได้สูง 3000 ถึง 4000 เครื่องนี้แยกมวลต่างกันเท่ากับ 1 ได้ เครื่องนี้ใช้ช่องกลมแทนช่องเล็กๆ ดังรูป 9-4 ไออ่อนตัวอย่างเข้าช่องกลมและเกิดการกระจายในบริเวณควอตัวร์ฟิลเตอร์ ช่องกลมใหญ่กว่าช่องเล็กๆ ปริมาณตัวอย่างผ่านมาก ช่องกลมไม่เหมาะสมกับเครื่องวิเคราะห์



รูป 9-7 ความสัมพันธ์ศักย์กระแสตรงและกระแสสลับขณะสแกนมวลของ ไออ่อนด้วยเครื่องวิเคราะห์มวลควอตัวร์ฟิลเตอร์

มวลคุณภาพนิคการเป็นคุณภาพนามแม่เหล็ก      เพราะปริมาณตัวอย่างผ่านมากจนเครื่องแยก  
มวลได้ไม่หมด   การแยกแปรผลผันกับความกว้างช่องเล็กมาก

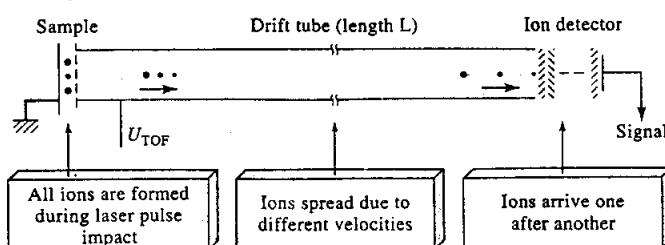
### ไทม์อฟไฟลท์แมสโซน่าໄลเชอร์ Time of Flight Mass Analyzers

เมื่อใช้อิเล็กตรอน ไอออนชุดที่สอง   ไฟต่อน   จูกเหย่งกำเนิดเลเซอร์ระดับยิง  
ตัวอย่างในสถานะก้าชั่วเวลาสั้นๆ ( แบบจังหวะ ) ความถี่ที่ระดับยิงมีค่า 10 ถึง 50 กิโล  
เฮิรตซ์ และมีช่วงชีวิต 0.25 ในคริวินาที   ไอออนถูกเร่งโดยสนามไฟฟ้าแบบจังหวะ  $10^3$   
ถึง  $10^4$  โวลต์   สนามนี้ให้หลังจากการป้อนความถี่ที่ยิงตัวอย่างอนุภาค ( ไอออนบวก )  
ถูกเร่งเข้าสู่ทางเดินไอออนยาวประมาณ 1 เมตร   หลอดนี้ได้รับศักย์แบบจังหวะ ดังรูป 9-8  
ไอออนทั้งหมดที่เข้าทางเดินไอออนมีพลังงานคงที่เท่ากัน   เมื่อจากไอออนมีมวลต่างกัน

รูป 9-8   หลักการไทม์อฟไฟลท์แมสสเปกโทรมิเตอร์   เลเซอร์ไฟฟ์ระดับยิง  
ตัวอย่างเกิดไอออน   ไอออนถูกเร่งเข้าสู่ทางเดินไอออนยาว L   ไอออนมีมวลนักวิ่งช้า  
ไอออนเบาวิ่งถึงเครื่องตรวจหาก่อน   ไอออนต่างชนิดกันวิ่งด้วยความเร็วต่างกัน   ความเร็ว  
ไอออนแปรผลผันกับมวล   ไอออนเบาวิ่งเข้าเครื่องตรวจหาก่อน ไอออนหนัก   ไอออนชุด  
หนึ่งๆ   ใช้เวลาันับสัญญาณ 1 ถึง 30 ในคริวินาที

แทรนซ์คิวเซอร์ไทม์อฟไฟลท์แมสสเปกโทรมิเตอร์เป็นอิเล็กตรอนมัลติพลายนอร์  
สัญญาณที่ได้ปรากฏบนจอแสดงผลไซโลสโคป   การนับสัญญาณ 1 ครั้งใช้เวลาเป็นไม่คริวินาที  
การจัดหาและรวมข้อมูลต้องใช้ระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ตอบสนองเร็ว   พลังงานของ  
ไอออนที่เกิดมีค่าไม่คงที่ ( แปลไปเดือน้อย )   พีคที่ได้ก็วางแผนทำให้การแยกไม่ได้

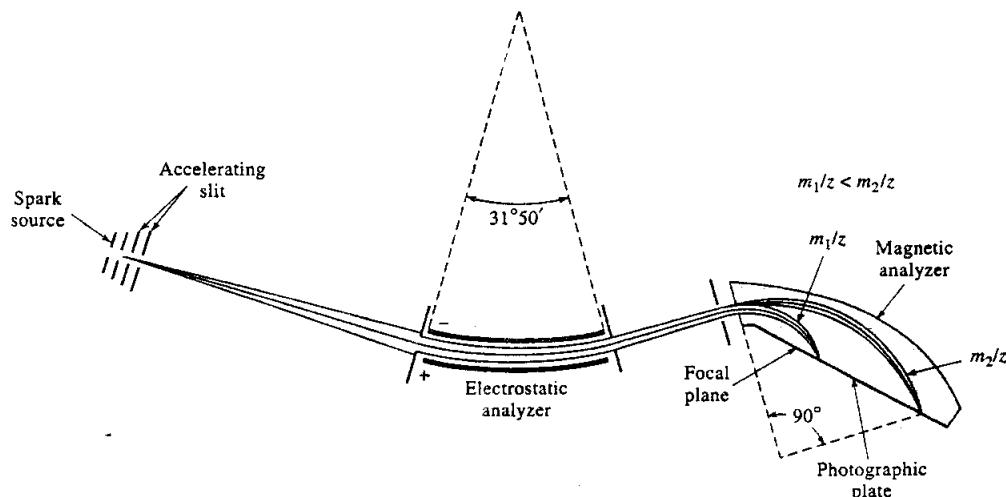
การแยกโดยไทม์อฟไฟลท์คือยกเว้นการแยกด้วยความเร็วครัพโพลและการไฟกัสสอง  
ครั้ง   ข้อดีของไทม์อฟไฟลท์   อุปกรณ์จะติดต่อไม่ซับซ้อน   ทางเข้าของแหล่งกำเนิด  
ไอออนไม่ต้องอยู่ในอุปกรณ์พิเศษ   วิเคราะห์ได้ทุกช่วงมวลและวิเคราะห์ได้เร็ว



รูป 9-8   หลักการไทม์อฟไฟลท์แมสสเปกโทรมิเตอร์   กลุ่มไอออนที่เกิดจากเลเซอร์ไฟฟ์  
ถูกเร่งเข้าสู่หลอดไฟลท์ซึ่งทำหน้าที่แยกมวล

### เครื่องวิเคราะห์แบบโฟกัสสองครั้ง Double Focusing Analyzers

รูป 9-9 แมสสเปกโกรมิเตอร์แบบโฟกัสสองครั้ง การโฟกัสลำไอ่อนใช้อุปกรณ์สองชนิด เครื่องวิเคราะห์ไฟฟ้าสถิตย์ ( electrostatic ) และเซคเตอร์แม่เหล็ก ( magnetic sector ) ไอ่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิดไอ่อนถูกเร่งผ่านช่องเล็กๆทางเข้าสู่ทางเดิน โค้งของเครื่องวิเคราะห์ไฟฟ้าสถิตย์ทำหน้าที่รวมรวมไอ่อนพลังงานลงเท่ากัน แต่ว่าทางเดินโค้งของเซคเตอร์แม่เหล็ก ไอ่อนเบา ( $m/z$ ) เป็นน้อย แผ่นพิล์มจัดไว้วัดความเข้ม ( ปริมาณ ) รังสีของไอ่อนและบันทึกค่านี้ได้ รายละเอียดการทำงานของการโฟกัสสองครั้งดูจากบทที่ 17



รูป 9-9 แมสสเปกโกรมิเตอร์แบบโฟกัสสองครั้งของเมทซ์ไฮร์ชอค การแยกดีกว่า  $10^5$

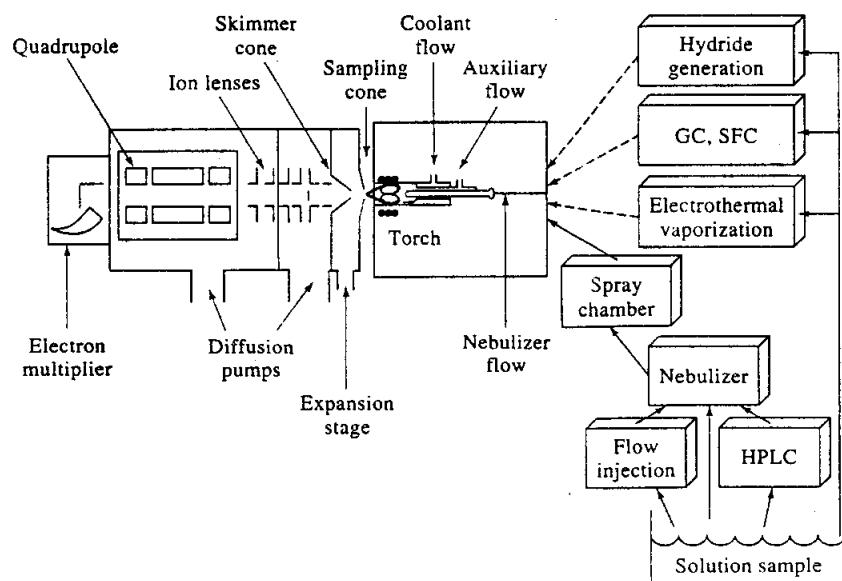
### อินดักต์ฟลีดเพล็อกพลาสมาแมสสเปกโกรมีตري Inductively Couple Plasma Mass Spectrometry

ปี 1980 มีการสร้าง ICPMS สำหรับวิเคราะห์ธาตุ ข้อดีของเทคนิคนี้ 1 ขั้นนำก็คือ การตรวจหาธาตุต่างๆ 2 ความจำเพาะสูง 3 ความแม่นและความเที่ยงคี ICP ทอร์ชเป็นแหล่งผลิตอะตอมและไอ่อน การพาตัวอย่างของเหลวเข้าทอร์ชใช้เนนูไลเซอร์พื้นฐาน

หรือ อัลตราโซนิก การพาตัวอย่างของเข็งเข้าทอร์ช ( ของแข็งเปลี่ยนเป็นไอ ) ใช้เลเซอร์ แอบแลชน หรือ โกลว์ดิสชาร์จ การวิเคราะห์ตัวอย่างของเข็งเริ่มปี 1983 ไอออนโอดาประจุบวกนิวเคลียร์ บนทอร์ชถูกปั๊มเข้าสู่แมสสเปกโกรมิเตอร์ควบคุมโดยไฟฟ้า ICP สเปกトラที่ได้เป็นชุดพีคไอโซโทปของแต่ละธาตุ การทำคุณภาพวิเคราะห์และปริมาณวิเคราะห์ใช้สเปกตรานี้เทียบกับเคอร์ฟมาตรฐาน เคอร์ฟการเดินสารมาตรฐานภายใน และการเจือจางไอโซโทป

### เครื่องมือ ICPMS Instruments for ICPMS

รูป 9-10 แผนภูมิของค์ประกอบระบบ ICPMS ส่วนสำคัญที่สุดคือส่วนที่พ่วงกับ ICP ทอร์ช เพราะ ICP ทอร์ชนีความดันเท่ากับความดันบริรยาการ แมสสเปกโกรมิเตอร์ ต้องมีความดันต่ำกว่า  $10^{-4}$  ทอร์ร์ การควบคุ่นต้องใช้ปั๊มบีฟเฟอเรนเซียลต่อคู่ควบบริเวณปลายที่ตัวอย่างออก ( รูปกรวย ) กรณีทำงานนิกเกิลใช้น้ำหล่อเย็น ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 1.0 มิลลิเมตร กําชพลasmaร้อนผ่านทางรูปปั๊มกรวยอันแรกซึ่งมีการคุณความดันคงที่ 1 ทอร์ร์ ปั๊มเชิงกลทำหน้าที่คุ้มความดันนี้ บริเวณนี้ ( ห้อง ) อุณหภูมิจะลดลง กําชจะขยายตัวอย่างเร็ว ส่วนหนึ่งของกําชในห้องนี้ผ่านเข้ารูปปั๊มกรวยอันที่สองซึ่ง

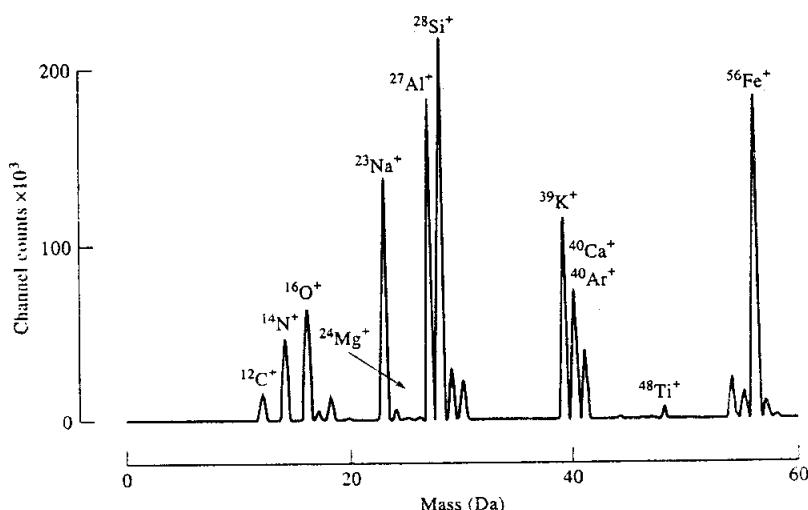


รูป 9-10 แผนภูมิระบบ ICPMS เส้นประแสดงทางเดินตัวอย่างกําช เส้นทึบแทนทางเดินตัวอย่างของเหลว

เรียก skimmer แล้วเข้าสู่แมสสเปกโถรัมิเตอร์ที่คุณความดันคงที่  $10^{-4}$  ทอร์ ด้วยคิพพิวชัน ปั๊มปี ศักย์ลบทำหน้าที่แยกอิเล็กตรอนและโนเลกุลที่เป็นกลาง และร่วงไออกอนบวก ไออกอนบวกถูกไฟฟ้าสดด้วยเลนส์แม่เหล็กแล้วเข้าสู่ช่องของเครื่องวิเคราะห์ควอครัพโพล

อะตอมมิกแมสสเปกโถรัมิเตอร์ที่พ่วงกับ ICP วิเคราะห์มวลช่วง 3 ถึง 300 ความสามารถในการแยกไออกอน m / z เท่ากับ 1 เทคนิค ICPMS วิเคราะห์ธาตุได้ร้อยละ 90 ของตารางธาตุ การวัดแต่ละธาตุใช้เวลา 10 วินาที จีดจำกัดการตรวจหาอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 10 ส่วนในพันล้านส่วน ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์สำหรับความเชี่ยวขันร้อยละ 2 ถึง 4 อยู่ในช่วงคลังเกอร์ฟมาตรฐาน

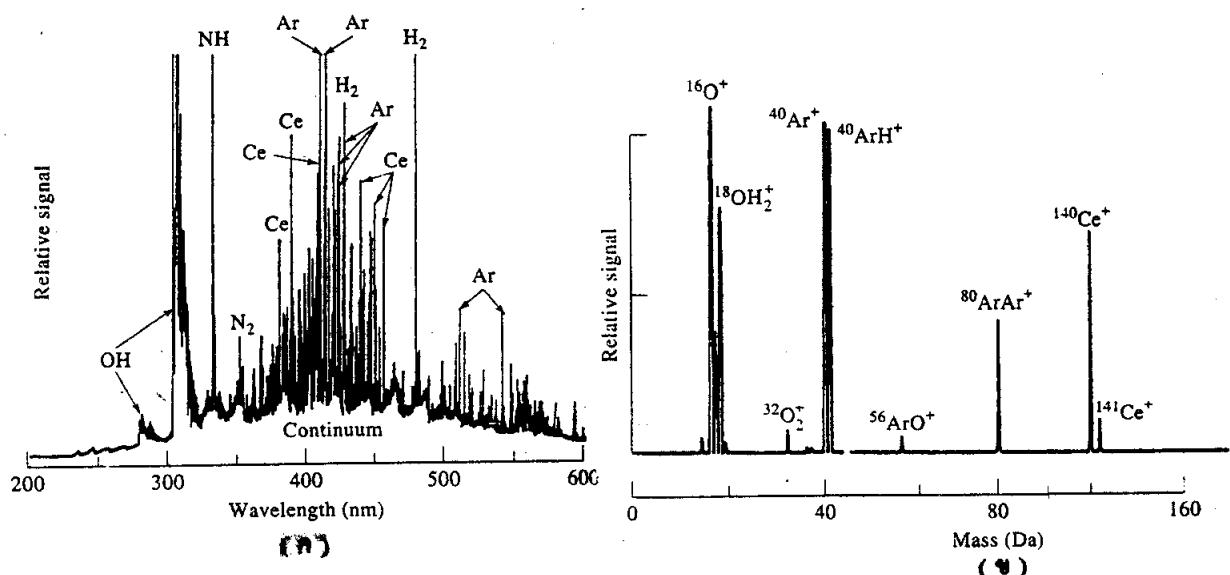
ปัจจุบันมีการพ่วงระบบเดเซอร์เข้ากับ ICPMS ระบบนี้วิเคราะห์ตัวอย่างของแข็งได้ จำเพาะรูแบบพัลส์ ( จังหวะ ) ขนาด  $10^{12}$  วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ถูกไฟฟ้าสบบันพื้นที่ผิว ตัวอย่าง ขนาด 2 ถึง 3 ตารางไมโครเมตร ตัวอย่างของแข็งเปลี่ยนเป็นไอ ( ธาตุหนึ่ไฟเปลี่ยนเป็นไอได้ ) ก้าซาร์กอนพาไอของสารตัวอย่างเข้า ICP ทอร์ช สูคท้ายเกิดอะตอม หรือ ไออกอนพลาสม่าผ่านเข้าแมสสเปกโถรัมิเตอร์ เครื่องสเปกโถรแบบนี้เหมาะสมกับการวิเคราะห์ตัวอย่างที่คล้ายยาก เช่น ตัวอย่าง ธารมี โลหะผสม แก้ว พลิตภัณฑ์เกย์ตร อนุภาคในน้ำเสีย และของแข็ง รูป 9-11 แมสสเปกตรัมของตัวอย่างหินมาตรฐานวิเคราะห์โดย laser ablation ICPMS บคหินงานเป็นผงขนาดเล็ก ใส่ผงในงานเล็กพร้อมลดความดันตัวอย่างเข้าสู่ ICP ทอร์ช ตัวอย่างเปลี่ยนเป็นไออกอน วิเคราะห์ไออกอนด้วยเครื่องวิเคราะห์ควอครัพโพล



รูป 9-11 スペกตรัมตัวอย่างหินมาตรฐานจาก laser ablation / ICPMS องค์ประกอบหลัก ร้อยละ Na 5.2, Mg 0.21, Al 6.1, Si 26.3, K 5.3, Cu 1.4, Ti 0.18

## Interferences

การศึกษา ( ชี ) สเปกตร้า ICPMS สะดวกและง่ายกว่าสเปกตร้าเชิงแสง โดยเฉพาะการวิเคราะห์ธาตุหายาก ( rare earth ) โดยวิธีนี้ง่ายกว่าวิธีอื่น เพราะจำนวนเส้นของธาตุเหล่านี้มีมาก ( พันเส้น ) รูป 9-12 เป็นแมสสเปกตรัมและสเปกตรัมเชิงแสงของสารละลายซึ่งเรียนเป็นองค์ประกอบ รูป 9-12 ก สเปกตรัมเชิงมวลของสารละลายซึ่งเรียน 100 ส่วนในล้านส่วน สเปกตรัมเชิงแสงของซีเรียมแบ่งเป็นสองชุด ชุดที่มีความเข้มสูงมี 12 เส้น เส้นที่มีความเข้มต่ำมีประมาณ 100 เส้น เส้นเหล่านี้อยู่ใกล้กันมากจนซ้อนทับกัน ( เห็นเสมือนเส้นแบล็คกราวน์ ) แบล็คกราวน์นี้คล้ายແตนไมเลกุลจากการป่นเปื้อนของบรรยายกาศ เช่น  $\text{NH}_3$ ,  $\text{OH}$ ,  $\text{N}_2$  และ  $\text{H}_2$  และແตนสเปกตรัมเนื่องจากไอออกนาร์กอน ( พลังงานต่างกันเล็กน้อย ) กับอิเล็กตรอน รูป 9-12 ข การซีสเปกตรัมง่าย เพราะซีเรียมมีสองพีคเนื่องจากมี



รูป 9-12 การเปรียบเทียบ ( ก ) สเปกตรัมเชิงแสง ICP ของซีเรียม 100 ส่วนในล้านส่วน และ ( ข ) สเปกตรัมเชิงมวล ICP ของซีเรียม 10 ส่วนในล้านส่วน

สองไอโซโทป  $^{140}\text{Ce}^+$  และ  $^{142}\text{Ce}^+$  และยังพบพิคเล็กจาก  $^{140}\text{Ce}^{2+}$  ที่ตำแหน่ง  $m/z = 140 / 2 = 70$  แบล็คกราวน์เน่ของจาก ไออ่อนและโมเลกุลเกิดที่  $m/z$  น้อยกว่าและเท่ากับ 40 เป็นส่วนมาก

จากการศึกษาสเปกตราเชิงมวลจากรูป 9-12 จะ จึงหวังว่า ICPMS น่าจะไม่มีการแทรกสอด ความหวังนี้ไม่เป็นความจริง เพราะเทคนิคนี้มีการแทรกสอด เช่นกัน โดยการแทรกสอดแบบ 1 การแทรกสอดเชิงสเปกโทร (spectroscopic) 2 การแทรกสอดที่ไม่เกิดจากสเปกโทร (nonspecific) การแทรกสอดนี้คล้ายกับผลของเมทริกซ์ที่เกิดจากวิธีดูดกลืนและเปล่งแสง

### การแทรกสอดเชิงสเปกโทร Spectroscopic Interferences

การแทรกสอดเชิงสเปกโทรเกิดจาก ไออ่อนในพลาสมานี้ค่า  $m/z$  เท่ากับ  $m/z$  ของ ไออ่อนที่สนใจ การแทรกสอดเชิงสเปกโทรแบ่งได้ 1 ไออ่อนที่มีมวลเท่า 2 หลายอะตอม หรือ ไออ่อนที่รวมกัน 3 ไออ่อนประจุบวกสอง 4 ไออ่อนสารประกอบอนทนไฟฟ์

### การแทรกสอดมวลเท่ากัน Isobaric Interferences

สเปซีฟิกกว่าหนึ่งชนิดมีมวลเท่ากัน เช่น ไออ่อนจาก ไอโซโทปธาตุหนึ่งมีมวลเท่ากับมวลของ ไออ่อนธาตุสอง เมื่อใช้แมสสเปกโทรเมตรีชนิดควอครัฟโพล สเปซีฟิก ไอโซบาร์คือ ไอโซโทปที่มีมวลต่างกันน้อยกว่าหนึ่งหน่วย ถ้าใช้ระบบไฟฟ์ส่องคริ้ง มวลต่างกันมีค่าน้อยกว่านี้

ธาตุส่วนใหญ่ในตารางธาตุมี ไอโซโทปหลายค่า เช่น หนึ่ง สองและสาม ธาตุเหล่านี้ไม่มีการทับกันเนื่องจาก ไอโซบาร์ ยกเว้น ธาตุ อินเดียม มีสอง ไอโซโทป  $^{113}\text{In}^+$  และ  $^{115}\text{In}^+$   $^{113}\text{In}^+$  เกิดการทับกันกับ  $^{113}\text{Cd}^+$   $^{115}\text{In}^+$  เกิดการทับกันกับ  $^{115}\text{Sn}^+$  ถ้า การแทรกสอด ไอโซบาร์ธาตุ ( ไอโซโทป ) ปริมาณมาก หรือ ไอโซโทปที่ว่องไวที่สุด เช่น พิค  $^{40}\text{Ar}^+$  ทับกับพิค  $^{40}\text{Ca}^+$  ( ไอโซโทปนี้มีร้อยละ 97 ) การวิเคราะห์แคลเซียมต้องใช้ ไอโซโทป  $^{44}\text{Ca}^+$  ( ไอโซโทปนี้มีร้อยละ 2.1 ) ตัวอย่างที่สอง ไอโซโทปนิกเกิต  $^{58}\text{Ni}^+$  มีการแทรกสอด ไอโซบาร์กับ ไอโซโทปเหล็ก  $^{58}\text{Fe}^+$  การวิเคราะห์เหล็กต้องใช้ ไอโซโทป  $^{56}\text{Fe}^+$  อัตราส่วนความเข้มเส้นของเหล็กบริสุทธิ์  $^{56}\text{Fe}^+ / ^{58}\text{Fe}^+$  ใช้เก็บผลของการแทรกสอดนี้ได้ ปัจจุบันใช้ soft ware ในเครื่องคอมพิวเตอร์เก็บผลการแทรกสอดนี้

## การแทรกสอดจากไอออนหลายอะตอม Polyatomic Ion Interferences

การแทรกสอดแบบนี้มีผลมากกว่าการแทรกสอดไอโซบาร์ การแทรกสอดจากไอออนหลายอะตอมเกิดจากอันตรกิริยาระหว่างสปีชีส์ในพลาสม่าและสปีชีส์ในเมทริกซ์ หรือ บรรยายกาศ เกิด ไอออนหลายโมเลกุลซึ่งรบกวนการวิเคราะห์ไอออนที่สนใจ การแทรกสอดแบบนี้มักเกิดกับไอออนที่มี  $m/z$  ประมาณ 82 หรือ ต่ำกว่าเล็กน้อย จากรูป 9-12 ฯ การแทรกสอดเนื่องจากไอออนหลายอะตอม  $^{40}\text{Ar}^{2+}$ ,  $^{40}\text{ArH}^+$ ,  $^{16}\text{O}_2^+$ ,  $^{16}\text{OH}^+$ ,  $^{14}\text{N}^+$  และสปีชีส์อื่นๆ มีผลต่อการวิเคราะห์หมวดเชิงอะตอม เช่น  $^{14}\text{N}_2^+$  กับ  $^{28}\text{Si}^+$ ,  $\text{NOH}^+$  กับ  $^{31}\text{P}^+$ ,  $^{16}\text{O}_2^+$  กับ  $^{32}\text{S}^+$ ,  $^{40}\text{ArO}^+$  กับ  $^{56}\text{Fe}^+$  และ  $^{40}\text{Ar}_2^+$  กับ  $^{80}\text{Se}^+$  การแทรกสอดแบบนี้ทำโดยใช้แบล็ค หรือ วิเคราะห์ธาตุที่สนใจโดยใช้ไอโซโทป อื่น

## การแทรกสอดจากสปีชีส์ออกไซด์ หรือ ไฮดรอกไซด์ Oxide and Hydroxide Species Interference

การแทรกสอดใน ICPMS เกิดจากไอออนที่สนใจทำปฏิกิริยากับ 1 ออกไซด์และ ไฮดรอกไซด์เกิดสารประกอบออกไซด์และไฮดรอกไซด์ 2 องค์ประกอบที่อยู่ในเมทริกซ์ 3 ตัวทำละลาย 4 พลาสมาก๊าซ รูป 9-12 ฯ การแทรกสอดสารประกอบออกไซด์ ไฮดรอกไซด์ และเมทริกซ์มีผลต่อการวิเคราะห์ไอออนที่สนใจ สปีชีส์เหล่านี้เกิด ไอออน  $\text{MO}^+$  และ  $\text{MOH}^+$  M แทน ไอออนที่สนใจ หรือ เมทริกซ์ สปีชีส์เหล่านี้ให้พีคทับกับพีค ไอออนของธาตุที่สนใจ เช่น ไอออนออกไซด์ประจุบวกหนึ่งของไอโซโทปไทเทเนียมใน ธรรมชาติมีห้าไอโซโทป 62, 63, 64, 65 และ 66 พีคเหล่านี้แทรกสอด ( รบกวน ) พีคของ ไอออนที่สนใจ  $^{62}\text{Ni}^+$ ,  $^{63}\text{Cu}^+$ ,  $^{64}\text{Zn}^+$ ,  $^{65}\text{Cu}^+$  และ  $^{66}\text{Zn}^+$  ตาราง 9-2 ไอออนออกไซด์ และ ไฮดรอกไซด์ประจุบวกหนึ่งของไอโซโทปเคลเซียมรบกวนการวิเคราะห์ไอออนโลหะ หลายชนิด

การแก้การแทรกสอดสารประกอบออกไซด์และไฮดรอกไซด์ในพลาสม่าใช้หลักการ รีดิวช์ การเกิด ไอออนออกไซด์และไฮดรอกไซด์ขึ้นกับตัวแปร 1 อัตราการ ไอลก๊าซ อาร์กอน 2 ความถี่วิทยุที่ป้อนให้ขดลวดทองแดงเหนี่ยวนำ 3 ระยะห่างที่ให้ไอผ่านช่องที่ 1 ไปช่องที่ 2 4 ขนาดของช่องที่ไอตัวย่างผ่าน 5 องค์ประกอบก๊าซที่ใช้ผลิตพลาสม่า 5 วิธีการกำจัดออกซิเจน 6 วิธีการกำจัดตัวทำละลาย

### ผลของเมทริกซ์ Matrix Effect

ถ้าสารปนเปื้อน ( matrix ) ที่วิเคราะห์มีความเข้มข้นประมาณ 500 ถึง 1000 ส่วนในพันล้านส่วน ( ppb  $\mu\text{g}/\text{cm}^3$  ) จะรบกวนการวิเคราะห์ ผลของเมทริกซ์ทำให้วัดสัญญาณ ไอออนที่สนใจได้น้อย หรือ มากกว่าความเป็นจริง ( ปกติวัดได้น้อยลง ) การลดการรบกวนเนื่องจากเมทริกซ์ 1 เอียงสารละลาย 2 เปลี่ยนวิธีการพาสารตัวอย่างเข้าสู่เครื่องแยก 3 แยกสเปชีส์ที่รบกวน การแก้การรบกวนจากเมทริกซ์นิยมใช้วิธีการเติมสารมาตรฐานภายใน เช่น ใส่สารมาตรฐานภายในที่มีมวลและสักย์ในการแตกตัวเป็นไอออนใกล้เคียงกับสารที่สนใจ

ตาราง 9-2 สเปชีส์แคลเซียมออกไซด์และไฮดรอกไซด์ และสเปชีส์อื่นที่รบกวนการวิเคราะห์ การหาปริมาณธาตุ Ni และธาตุที่มีมวลใกล้กับ Ni

m / z	ธาตุ ( ปริมาณของไอโอดีปเป็นร้อยละ )	ตัวแทรกสอด
56	Fe ( 91.66 )	$^{40}\text{ArO}$ , $^{40}\text{CaO}$
57	Fe ( 2.19 )	$^{40}\text{ArOH}$ , $^{40}\text{CaOH}$
58	Ni ( 67.77 ), Fe ( 2.19 )	$^{42}\text{CaO}$ , $\text{NaCl}$
59	Cu ( 100 )	$^{43}\text{CaO}$ , $^{42}\text{CaOH}$
60	Ni ( 26.16 )	$^{43}\text{CaOH}$ , $^{44}\text{CaO}$
61	Ni ( 1.25 )	$^{44}\text{CaOH}$
62	Ni ( 3.66 )	$^{46}\text{CaO}$ , $\text{Na}_2\text{O}$ , $\text{NaK}$
63	Cu ( 69.1 )	$^{44}\text{CaOH}$ , $^{40}\text{ArNa}$
64	Ni ( 3.66 ), Zn ( 48.89 )	$^{32}\text{SO}_2$ , $^{32}\text{S}$ , $^{48}\text{CaO}$
65	Cu ( 30.9 )	$^{33}\text{S}$ , $^{32}\text{S}$ , $^{33}\text{SO}_2$ , $^{48}\text{CaOH}$

### การประยุกต์ใช้ ICPMS Applications of ICPMS

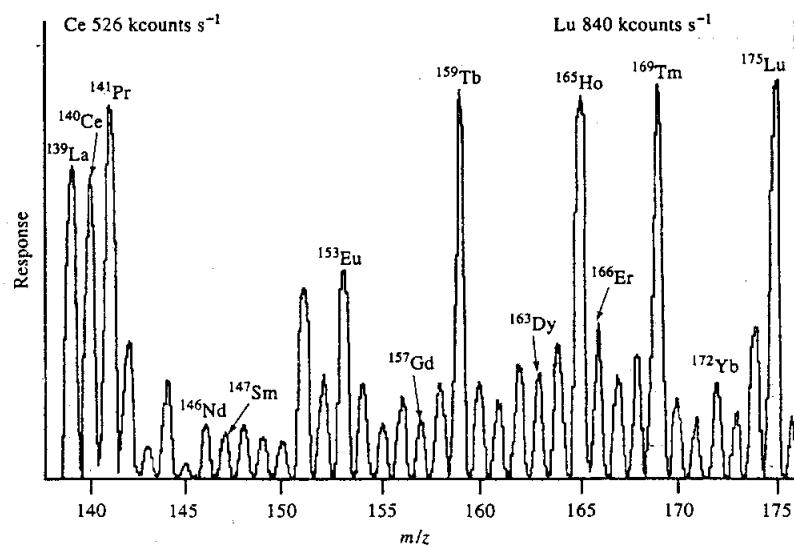
เทคนิค ICPMS ใช้ทำคุณภาพวิเคราะห์และกึ่งปริมาณ และปริมาณวิเคราะห์ของธาตุหนึ่ง หรือ หลายธาตุในตัวอย่าง

## การประยุกต์ทำคุณภาพและกึ่งปริมาณ Qualitative and Semiquantitative Applications

เทคนิค ICPMS วิเคราะห์ธาตุได้พร้อมกันหลายธาตุ เทคนิคนี้เหมาะสมกับการทำกึ่งปริมาณวิเคราะห์ ตัวอย่างที่สังเคราะห์ และตัวอย่างปกติที่มีในธรรมชาติ ซึ่งจำกัดการตรวจหาของ ICPMS ดีกว่า เทคนิคการเปล่งของ ICP แต่มีค่าพอๆ กับการวิเคราะห์การคุณค่าของตัวอย่างเดียวไฟฟ้า

การซึ่งสเปกตรามของอะตอมแม่สเปกตราร่างสเปกตราเชิงแสง สมบัติข้อนี้เห็นได้ชัดกับตัวอย่างธาตุหายาก และพวกรโโลหะหนัก เช่น เหล็ก ซึ่งให้สเปกตราเปล่งจำนวนน้ำมาก ดังรูป 9-12 ฯ รูป 9-13 อะตอมมิกส์สเปกตรัมของของผสมซึ่งมีธาตุหายาก 14 ธาตุ ( มวลช่วง 139 ถึง 175 ) ถ้าวิเคราะห์ของผสมนี้โดยวิธีการเปล่ง การซึ่งสเปกตราอย่างมาก ใช้เวลาวิเคราะห์นาน ผลอาจไม่ถูกต้อง

การทำกึ่งปริมาณวิเคราะห์หนึ่ง หรือ มากกว่าหนึ่งองค์ประกอบในของผสม จากรูป 9-13 ความสูงพื้นใช้หาปริมาณสารที่สนใจได้โดยเปรียบเทียบกับพื้นมาตรฐาน ความแม่นในการวิเคราะห์มีค่า +/- ร้อยละ 100



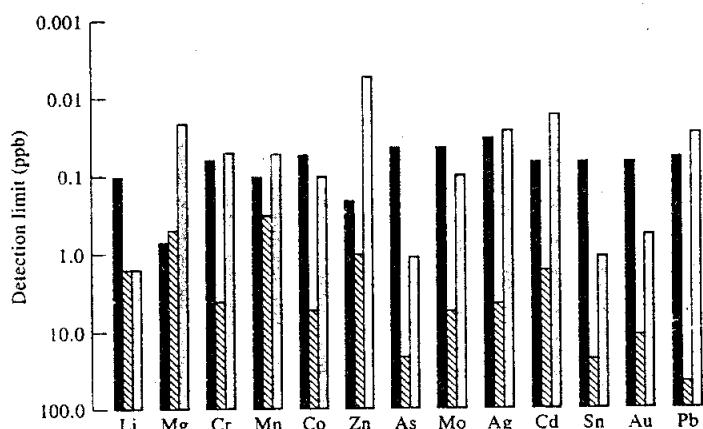
รูป 9-13 สเปกตรัม ICPMS ของธาตุหายาก สารละลายน้ำวิเคราะห์มีธาตุหายากธาตุละ 1 ppb  $\mu\text{g}/\text{cm}^3$

### ขีดจำกัดการตรวจหา Detection Limits

ขีดจำกัดการตรวจหาของ ICPMS มีค่าต่ำกว่าแมสสเปกโพร์และวิธีเชิงแสง ขีดจำกัดการตรวจหา ICPMS มีค่าไกล์ หรือ มากกว่าวิธีการคุณลักษณะตอนด้วยเตาไฟฟ้า ข้อได้เปรียบของ ICPMS 1 วิเคราะห์รวดเร็ว 2 วิเคราะห์ธาตุได้พร้อมกันหลายธาตุ รูป 9-14 การเปรียบเทียบขีดจำกัดการตรวจหา ICPMS กับ ICPOES ( การเปล่งแสง ) และ ETAAS ( การคุณลักษณะตอนด้วยเตาไฟฟ้า ) ของธาตุบางธาตุ ขีดจำกัดการตรวจหาราดู บางธาตุอยู่ในช่วง 0.02 ถึง 0.7 ส่วนในพันล้านส่วน ธาตุส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 0.02 ถึง 0.1 ส่วนในพันล้านส่วน

### การทำปริมาณวิเคราะห์ Quantitative Analyzes

วิธี ICPMS ใช้สารมาตรฐานชุดหนึ่งเตรียมเครื่องฟมาตรฐาน ถ้าสารที่สนใจมีปริมาณสารอื่น ( ของแข็งที่ละลายอยู่น้อยกว่า 2000 ส่วนในล้านส่วน ( $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ ) ) ใช้สารละลายมาตรฐานแบบธรรมชาติได้ ถ้าสารที่สนใจมีเมทริกซ์ปนมาก ต้องหาสารมาตรฐานที่มี



รูป 9-14 ขีดจำกัดการตรวจหาของธาตุบางธาตุโดยวิธี ICPMS ( แท่งมีค่า ) เปรียบเทียบกับ ICPOES ( แท่งลายอิฐ ) เป็นการเปล่งแสงและ ETAAS ( แท่งสีเทา ) เป็นการคุณลักษณะตอนด้วยเตาไฟฟ้า แกนตั้งแนบท geleลือคของขีดจำกัดการตรวจหางานมากไปน้อย ( ส่วนในพันล้านส่วน ) แกนรายแนบทนิคธาตุ วิธี ETAAS ขีดจำกัดการตรวจหามักเกี่ยวนในเทอนมวล ( พิโภกรัม ) ในตารางเปลี่ยนเป็นความเข้มข้นโดยสมมติปริมาตรเป็น 20 ไมโครลิตร/g เดซิเมตร

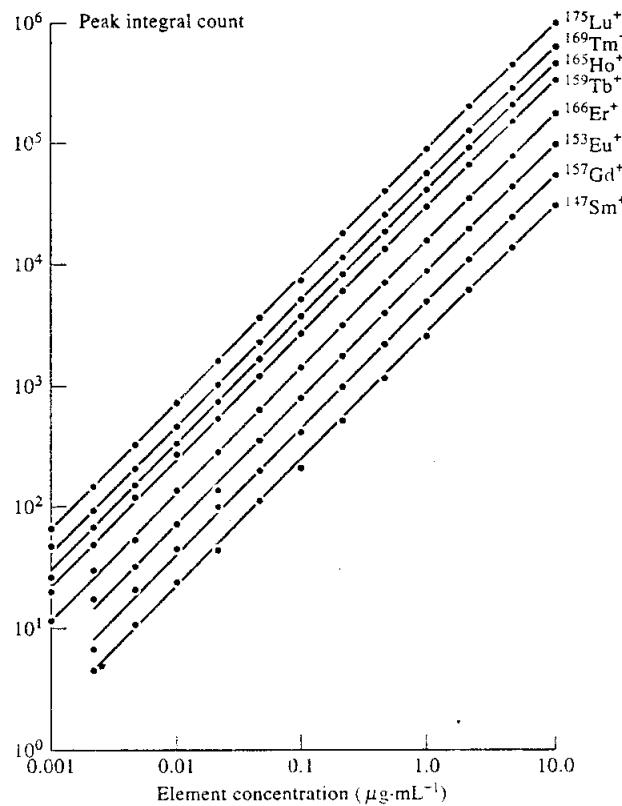
เมทริกซ์คล้ายสารตัวอย่างมากที่สุดเพื่อให้ผลวิเคราะห์แม่น การใช้เทคนิคการเติมสารมาตรฐานภายใน โดยใส่สารมาตรฐานภายในลงในสารมาตรฐานและสารตัวอย่าง ช่วยแก้ผลเนื่องจาก 1 เครื่องมือไม่เสถียร 2 ค่าที่เครื่องวัดได้มีการแปร ( ไม่คงที่ ) 3 ผลของเมทริกซ์ สารมาตรฐานภายในที่ใช้ต้องเป็นสารที่ไม่มีในสารตัวอย่าง สารนี้ต้องมีมวลและพักษ์เดกตัวเป็นไอออนใกล้เคียงกับสารที่วิเคราะห์

ธาตุสองธาตุที่ใช้เป็นสารมาตรฐานภายในคือ อินเดียมและโรเดียม ธาตุทั้งสองให้เส้นมวลระหว่างช่วง ( 115, 113 และ 103 ) ธาตุสองธาตุนี้ไม่ค่อยมีในสารตัวอย่าง รูป 9-15 เครื่อร์ฟมาตรฐานภายในของธาตุหายาก แกนตั้งแทน log กระसต/o/on หรือ จำนวนไอออนของสารที่สนใจของธาตุหายาก แกนราวนแทน log ความเข้มข้นของสารมาตรฐาน ความสัมพันธ์นี้เป็นเส้นตรงในช่วงความเข้มข้นต่างกันถึง  $10^4$  เท่า

ตาราง 9-3 การทำปริมาณวิเคราะห์ธาตุปริมาณน้อยในตัวอย่างน้ำสังเคราะห์ ทำการวิเคราะห์ 10 ครั้ง

วิธี ICPMS ( ppb )

ธาตุ	ไอออน	NBS ค่ามาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	%ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์
เบรลเลียม	$^{9} \text{Be}^+$	19	21	20
วานเดียม	$^{51} \text{V}^+$	54	52	6
โครเมียม	$^{52} \text{Cr}^+$	17	18	12
แมกนีเซียม	$^{55} \text{Mn}^+$	32	34	5
โคบอดต์	$^{59} \text{Co}^+$	19	21	7
สังกะสี	$^{66} \text{Zn}^+$	69	57	11
สารหมู่	$^{75} \text{As}^+$	77	76	5
ส ท ร ဓ น เชิง	$^{88} \text{Sr}^+$	243	297	7
โนลิบดีนัม	$^{98} \text{Mo}^+$	97	134	9
เงิน	$^{107} \text{Ag}^+$	2.8	3.5	16
แคดเมียม	$^{114} \text{Cd}^+$	10	13	22
แบนเรียม	$^{138} \text{Ba}^+$	47	74	17
ตะกั่ว	$^{208} \text{Pb}^+$	27	31	8



รูป 9-15 เครื่องฟามาตรฐานของธาตุหายากหลายธาตุ

การทำปริมาณวิเคราะห์ให้ผลแม่นที่สุด ใช้วิธีการเจือจางไอโซโทป รายละเอียดของเทคนิคนี้คุ้มจากบทที่ 16 เทคนิคนี้ไม่ค่อยมีการแทรกสอดเชิงเคมีและฟิสิกส์ ข้อเสียของเทคนิคนี้คือใช้เวลาวิเคราะห์นาน

### การวัดอัตราส่วนไอโซโทป Isotope Ratio Measurements

เทคนิคการวัดอัตราส่วนไอโซโทปนิยมใช้กับสาขาวิทยาศาสตร์และแพทยศาสตร์ เช่นการหาอายุของสัตว์และหลักฐานทางธรรมวิทยา นักเคมีและนักวิทยาศาสตร์การแพทย์ใช้เทคนิคนี้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ในปฏิกิริยาเคมี และในอวัยวะ ในอดีต การวัดอัตราส่วนไอโซโทปต้องใช้ความร้อนทำให้ตัวอย่างเกิดออกซอน แล้วเกิดไอออน โดยใช้เส้นลวดร้อนให้ความร้อน ไอออนที่เกิดเข้าสู่แมสスペกโกรามิเตอร์แบบไฟฟัสสองครั้ง วัดอัตราส่วนไอโซโทป การวัดใช้เวลานานแต่ผลที่วัดได้เที่ยง ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์มีค่าร้อยละ 0.01 ปัจจุบันใช้เทคนิค ICPMS หาอัตราส่วนไอโซโทป การวิเคราะห์ใช้เวลา

เพียง 5 ถึง 10 นาที ความเที่ยงในการวิเคราะห์ดีกว่าวิธีเดิม 10 ถึง 100 เท่า แต่ผลที่วิเคราะห์ได้รีโพร์ติวซ์

## แมสสเปกโถรเมตรีแหล่งกำเนิดspark Mass Spectrometry SSMS

ปี ก.ศ. 1930 มีการแนะนำอะตอมมิกแมสสเปกโถรเมตรีที่ใช้แหล่งกำเนิดspark วิเคราะห์ธาตุต่างๆ และไอโซโทปของธาตุปริมาณน้อย ปี ก.ศ. 1958 อะตอมมิกแมสสเปกโถรเมตรีที่ใช้แหล่งกำเนิดsparkเริ่มนิยาราย และมีการพัฒนามาเรื่อยจนถึง ปี ก.ศ. 1960 มีการพัฒนาเครื่อง ICPMS มาใช้งาน อะตอมมิกแมสสเปกโถรเมตรีที่ใช้แหล่งกำเนิดsparkใช้วิเคราะห์ตัวอย่างที่ละลายยาก ( ใช้ ICPMS วิเคราะห์ไม่ได้ )

อะตอมมิกแมสสเปกโถรเมตรีที่ใช้แหล่งกำเนิดsparkมีสองแบบ 1 ใช้สักย์สูง (~ 30 กิโลโวลต์) เป็นตัวอย่างของแข็งเป็นไอออนในสถานะก๊าซ 2 ใช้ความถี่วิทยุเปลี่ยนตัวอย่างของแข็งเป็นไอออนในสถานะก๊าซ เทคนิคนี้ใช้ตัวอย่างทำข้าไฟฟ้า หรือใช้ข้าวทั้งสองที่จากสารตัวอย่าง หรือใช้ตัวอย่างผสมกับแกรไฟต์ แล้วใส่ในข้าไฟฟ้ารูปถ่ายใช้สักย์กระแสตรงร่วงไอออนบวก ( ก๊าซ ) เข้าสู่เครื่องวิเคราะห์มวล การสปาร์กเกิดในห้องที่อาจกาศอออก และพ่วงติดกับเครื่องวิเคราะห์มวล ห้องนี้มีระบบปั๊มป์อาจกาศออกอย่างเร็วเพื่อลดความดันภายในห้องจนมีค่า  $10^{-8}$  托ร์

ไอออนที่ได้จากเทคนิคนี้มีพลังงานจลน์ค่อนข้างกว้าง การแยกมวลนี้ใช้ระบบการไฟกัสสองครั้ง เพราะไฟล์วิเคราะห์ดี ดังรูป 9-9 เป็นการจัดแบบแมทเทาช์เซอร์ซอค ระบบตรวจทางของเครื่องรุนใหม่ใช้ได้ทั้งฟลัมถ่ายภาพและระบบอิเล็กทรอนิกส์ ( อิเล็กตรอนมัลติพลายเออร์ ) การสแกนสเปกตรัมทำโดยแปรผ่านมัลติพลายเออร์ เทคนิคการไฟกัสสองครั้งไม่ค่อยมีการแทรกสอดคือโซนาร์ เช่น การวิเคราะห์ปริมาณเหล็กในแมทริกซ์ซิลิเกต พนในตัวอย่าง หิน หรือ แก้ว แก้วเป็นตัวแทรกสอด พิคเหล็กที่  $^{56}\text{Fe}^+$  ( $m/z = 55.93494$ ) มีพิค  $^{28}\text{Si}_2^+$  ( $m/z = 55.95386$ ) เครื่องวิเคราะห์ควรรับไฟล์แยกมวลนี้ไม่ได้ ต้องใช้เครื่องวิเคราะห์แบบไฟกัสสองครั้ง

## สเปกตร้า Spectra

แม่สสเปกตราจากแหล่งกำเนิดสปาร์ค ชี้่ง่าย พิคที่ได้จากใจไฟฟ้าประจุบวกหนึ่ง มีความเข้มสูงกว่าพิคของไอออนที่มีประจุมากกว่านั้น ซึ่งพิคจากสปีซีส์ออกไซด์และไฮดรอกไซด์ให้ความเข้มน้อย และเป็นพิคที่ทำให้เกิดการแทรกสอด ( รบกวน )

## การประยุกต์ทำคุณภาพวิเคราะห์ Qualitative Applications

แม่สสเปกโทรเมตريที่ใช้แหล่งกำเนิดสปาร์คใช้ทำคุณภาพวิเคราะห์และกึ่งปริมาณวิเคราะห์ ธาตุในตารางธาตุจาก  $^7\text{Li}$  ถึง  $^{238}\text{U}$  วิเคราะห์ง่าย ( กระดุนเพียงครึ่งเดียว ) ถ้าตัวอย่างที่วิเคราะห์มีปริมาณน้อย ( ppb ) จะกระดุนตัวอย่างหลายครั้ง การซึ่งสเปกตราต้องใช้ความจำนาญสูง เพราะมีการแทรกสอดจากสปีซีส์ที่มีหลายประจุ สปีซีส์โพลีเมอร์ และไอออนโนมเลกุล

## การประยุกต์ทำปริมาณวิเคราะห์ Quantitative Applications

แหล่งกำเนิดสปาร์คแบบความถี่วิทยุให้ผลไม่เรียบคิวช์ต้าสปาร์คตัวอย่างช่วงเวลาสั้นๆ ถ้าทำการสปาร์คนานๆ ( หลายวินาทีถึง 100 วินาที ) สัญญาณที่นับได้จะเรียบคิวช์ ผลวิเคราะห์ดี ถ้าใช้ฟลัมรันสัญญาณความเข้มบนฟลัมแปรโคลด์รอนกับเวลาันบันสัญญาณ ถ้าใช้อิเล็กตรอนมัลติพลายเออร์มักใช้เทคนิคการเติมสารมาตรฐานภายใน ผลวิเคราะห์มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในช่วงร้อยละ 2 ถึง 20

ข้อดีของแม่สสเปกโทรเมตريแหล่งกำเนิดสปาร์ค 1 สภาพไวสูง 2 ช่วงความเข้มข้นที่วิเคราะห์กว้าง ( สัญญาณที่รัดได้กับความเข้มข้นเป็นเส้นตรง ในช่วงความเข้มขั้นกว้าง ) 3 จำนวนธาตุที่วิเคราะห์ได้ต่ำกว่าธาตุ 4 ตัวอย่างที่มีเมทริกซ์ปน ( ช่วงมวลของเมทริกซ์กว้าง )

## โกล์ว์ดิษชาร์จแม่สสเปกโทรเมตري Glow Discharge Mass Spectrometry

แหล่งกำเนิดโกล์ว์ดิษชาร์จมีขั้วไฟฟ้าจัดไว้ในระบบปิดซึ่งมีก๊าซอาร์กอนความดัน 0.1 ถึง 10 ทอร์ แหล่งจัดทำกำลังกระแสแรงแบบพัลส์จัดหาศักย์ 5 ถึง 15 กิโลโวลต์ ครองขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ก๊าซอาร์กอนเกิดการแตกตัวเป็นไอออนอาร์กอน  $\text{Ar}^+$  และอิเล็กตรอน  $\text{Ar}^-$  ถูกเร่งไปชนడิโอด แค็โอดทำจากตัวอย่างของแข็ง ถ้าตัวอย่างเป็นของเหลวนำเคนโอดจุ่มในตัวอย่างของเหลว ใช้รังสีอินฟราเรด ( ระยะ ) ตัวทำละลาย ตัวอย่าง

จะติดกับขั้วแคโทด เมื่อ  $\text{Ar}^+$  ชานแคโทดจะเกิดการสปีตเตอร์ ของแข็งจะเปลี่ยนเป็นอะตอนในสถานะแก๊ส  $\text{Ar}^+$  อะตอนดังกล่าวถูกดึงโดยไฟฟ้า ไปยังบัวก ปืนปืนไฟฟ้าเรนเนียลทำหน้าที่พาไฟฟ้าไปยังบัวกเข้าสู่แมสสเปกโตรมิเตอร์แบบคุณครูพโพล หรือ แบบฟอกสส่องครั้ง แหล่งกำเนิดโกลว์ดิสชาร์จนิยมใช้ ICP ทอร์ซ โดยโกลว์ดิสชาร์จทำหน้าที่เปลี่ยนตัวอย่างของแข็งเป็นอะตอน ( atomization ) ICP ทอร์ซทำหน้าที่เปลี่ยนอะตอนเป็นไฟฟ้าบัวก ( ionizer )

แหล่งกำเนิดโกลว์คิสชาร์จะเสื่อมกว่าแหล่งกำเนิดสปาร์ค ใช้วิเคราะห์ตัวอย่างของแข็งได้ บริษัทผลิตแมสสเปกโตรีมิเตอร์ที่ใช้แหล่งกำเนิดโกลว์คิสชาร์ร่วมกับเครื่องวิเคราะห์น้ำคลอรีฟอล หรือ แบบ ไฟกัสสองครั้ง

# การวิเคราะห์ธาตุบริเวณผิวโดยวิธีแมสสเปกโทร Elemental Surface Analysis by Mass Spectrometry

การวิเคราะห์องค์ประกอบต่างๆ บริเวณผิวของแข็ง ใช้แมสสเปกโทร์ไอออนชุบฟล่อง ( secondary ion ) และแมสสเปกโทร์เลเซอร์ในไมโครไพร์บ ( Microprobe ) ทั้งสองเทคนิคกล่าวในบทที่ 18 เทคนิคนี้ศึกษาตัวอย่างของแข็งจากผิวเข้าไปลึก 2 ถึง 3 อั้งสตอรอม ถึง halfway สิบอั้งสตอรอม ตัวอย่างของแข็งที่ศึกษาได้แก่ ตัวคงตะไอลซ์คันเดเนื้อ การกัดกร่อนและการยึดติด สมบัติความerasible ความประพุติและหน้าที่การทำงาน เนื้อเยื่ออวัยวะ การศึกษาองค์ประกอบบริเวณผิวนักมีความสำคัญกว่าองค์ประกอบทั้งหมด ( bulk )

## แบบฝึกหัด

- 9-1 เครื่องแมสสเปกโทรแบบใดบ้างที่ใช้กับ ICPMS แต่ละแบบมีความแตกต่างกันอย่างไร
- 9-2 บอกหน้าที่ของ ICP ทอร์ชใน ICPMS
- 9-3 แกนตั้งและแกนราบของแมสสเปกโทรเชิงอะตอมแทนอะไร
- 9-4 เพาะเหตุใดเทคนิค ICPMS นิยมใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง
- 9-5 อธิบายการอินเทอร์เฟสระหว่าง ICP ทอร์ชกับเครื่องแมสสเปกโทรใน ICPMS
- 9-6 เลเซอร์ทำหน้าที่อย่างไรในการวิเคราะห์ตัวอย่างของแข็งด้วยเทคนิค ICPMS
- 9-7 การอินเทอร์เฟสในวิธีแมสสเปกโทรเชิงอะตอมมีกี่แบบ
- 9-8 เหตุใดการทําปริมาณวิเคราะห์โดย ICPMS จึงใช้วิธีการเติมสารมาตรฐานภายใน
- 9-9 อธิบายเทคนิคการเจือจางไอโซโทปที่ใช้ในวิธีแมสสเปกโทรเชิงอะตอม
- 9-10 อธิบายการทำงานของวิธีแมสสเปกโทรที่ใช้แหล่งกำเนิดโกลว์คิลชาร์จ และบอกข้อดีของเทคนิคนี้
- 9-11 วิธีแมสสเปกโทรโดยใช้ไออ่อนชุดที่สองเป็นอย่างไร วิธีนี้ให้ข้อมูลวิเคราะห์แบบใด