ปฏิบัติการที่ 6

การทดลองของแฟรงค์และเฮริตซ์

(Lab 6: Frank-Hertz's Experiment)

วัตถุประสงค์

1. เพื่อทดสอบการมีระดับพลังงานเป็นชั้นตามแบบจำลองอะตอมของบอห์ร ผ่านการทดลองของแฟรงค์และเฮิรตซ์

อุปกรณ์

1. โปรแกรมจำลองการทดลองการทดลองของแฟรงค์และเฮริตซ์ (VLab 06-FrankHertz.swf)

ทฤษฎี

การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อสนับสนุนแบบจำลองอะตอมของบอห์รที่กล่าวว่านิวเคลียสภายในอะตอมซึ่งประกอบไปด้วยโปรตอนและนิวตรอนจะอยู่กับที่ที่ตำแหน่งใจกลางอะตอม ในขณะที่อิเล็กตรอนในอะตอมจะโคจรอยู่รอบ ๆ โดยพลังงานของอิเล็กตรอนที่โคจรอยู่เหล่านี้จะมีค่าได้เพียงบางค่าเท่านั้นขึ้นอยู่กับพลังงานที่อิเล็กตรอนมี เราเรียกค่าพลังงานเหล่านี้ว่า **"ระดับชั้นพลังงาน"**

แบบจำลองอะตอมของบอห์ร

สมมติฐานสำคัญของแบบจำลองอะตอมของบอห์รคือปริมาณโมเมนตัมเชิงมุมของอิเล็กตรอนจะมีขนาดเท่าเป็นจำนวนเท่าของ $\hbar$ เท่านั้น เมื่อ $\hbar$ คือค่าคงที่ของพลังค์หารด้วย 2π จากสมมติฐานดังกล่าวนี้เราสามารถคำนวณหาระดับชั้นพลังงานต่างๆ ของอิเล็กตรอนได้ไม่ยากโดยอาศัยความรู้ทางกลศาสตร์และไฟฟ้าดังต่อไปนี้

สมมติให้อะตอมที่เราสนใจมีโปรตอนอยู่ในนิวเคลียสเป็นจำนวน Z ตัว แต่ละตัวมีประจุเท่ากับ $+e$ ส่วนอิเล็กตรอนหนึ่งตัวที่มีประจุ $-e$ กำลังโคจรอยู่ด้วยรัศมีวงโคจรเท่ากับ r แรงไฟฟ้าที่นิวเคลียสกระทำต่ออิเล็กตรอนซึ่งมีปริมาณเท่ากับ $\frac{kZe^2}{r^2}$ จะทำหน้าที่เป็นแรงสู่ศูนย์กลางในการโคจรเป็นวงกลมของอิเล็กตรอนอาศัยความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่วงกลมที่ว่า

$$F_c = \frac{mv^2}{r} \tag{1}$$

เมื่อ F_c คือขนาดของแรงเข้าสู่ศูนย์กลาง และ v คืออัตราเร็วเชิงเส้นตามแนวเส้นรอบวง เราสามารถเขียนได้ว่า

$$\frac{kZe^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r} \tag{2}$$

ส่วนขนาดของโมเมนตัมเชิงมุม (L) คำนวณได้จาก

$$L = mvr \tag{3}$$

จากสมมติฐานของบอห์ร ขนาดของโมเมนตัมเชิงมุมต้องเป็นจำนวนเท่าของ $\hbar$ หรือ

$$L = n\hbar \tag{4}$$

เมื่อ n เป็นจำนวนเต็มบวกใดๆ ท้ายที่สุดเราจะได้ว่า

$$\frac{kZe^2}{r^2}=\frac{mv^2}{r}=\frac{m}{r}\left(\frac{n\hbar}{r}\right)^2$$

$$r=\frac{n^2\hbar^2}{kZe^2m} \qquad (5)$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่ารัศมีวงโคจรของอิเล็กตรอนที่เป็นไปได้ที่ขึ้นอยู่กับค่า n (สังเกตว่าปริมาณอื่น ๆ ด้านขวาของสมการด้านบนนี้ล้วนเป็นค่าคงที่ทั้งสิ้น) เราสามารถนำค่ารัศมีวงโคจรที่คำนวณได้ข้างบนมาใช้คำนวณหาระดับชั้นพลังงานได้จากความจริงที่ว่าพลังงานของอิเล็กตรอน (E) ย่อมเท่ากับผลบวกของพลังงานจลน์ (E_k) และพลังงานศักย์ไฟฟ้า (E_p) นั่นคือ

$$E=E_k+E_p=\frac{1}{2}mv^2-\frac{kZe^2}{r} \qquad (6)$$

แทนค่า v^2 และ r ลงในสมการจะได้

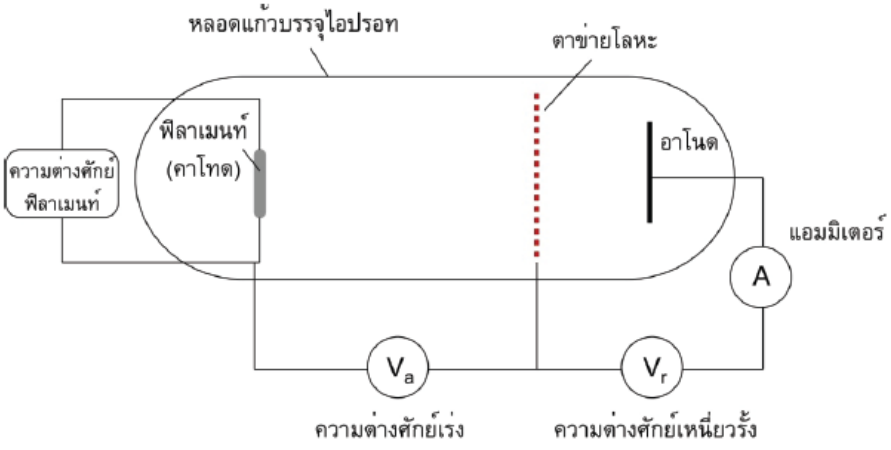
$$E=-\frac{\left(kZe^2\right)^2m}{n^2 2\hbar^2} \qquad (7)$$

ซึ่งให้ค่าระดับชั้นพลังงานที่เป็นไปได้ที่ขึ้นอยู่กับค่าของจำนวนนับ n โดย E จะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อ n =1 ซึ่งเป็นระดับชั้นพลังงานที่เราเรียกว่า **“ระดับชั้นพลังงานพื้นฐาน”** (ground state energy) และมีค่ามากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อ n เพิ่มขึ้น

ในแบบจำลองอะตอมของบอห์รนี้ อิเล็กตรอนสามารถเปลี่ยนวงโคจรที่ระดับชั้นพลังงานหนึ่งไปยังระดับชั้นพลังงานที่สูงขึ้นได้โดยการรับพลังงานเพิ่มเข้าไปในปริมาณที่พอดีเท่านั้น ในการทดลองนี้ เราจะให้พลังงานกับอิเล็กตรอนในอะตอมปรอท (ซึ่งต่อไปนี้เราจะเรียกว่าอะตอมปรอท) โดยการยิงอิเล็กตรอนออกมาจาก “ฟิลาเมนท์” แล้วไปชนกับอะตอมปรอทที่อยู่ในหลอดแก้วในชุดทดลอง หากอิเล็กตรอนเหล่านี้มีพลังงานจลน์พอดีกับที่อะตอมปรอทจะรับไปได้ พลังงานก็จะถ่ายเทจากอิเล็กตรอนไปยังอะตอมปรอททำให้อิเล็กตรอนไม่สามารถเคลื่อนต่อไปได้ รายละเอียดการทดสอบการมีระดับชั้นพลังงานของอะตอมปรอทตามการทดลองของแฟรงค์และเฮิร์ตซ์มีดังต่อไปนี้

การทดลองแฟรงค์และเฮิร์ตซ์

แผนภาพอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำการทดสอบการมีระดับชั้นพลังงานตามแบบจำลองอะตอมของบอห์รโดยแฟรงค์และเฮิร์ตซ์แสดงดังในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนภาพชุดทดลองของแฟรงค์-เฮิร์ตซ์

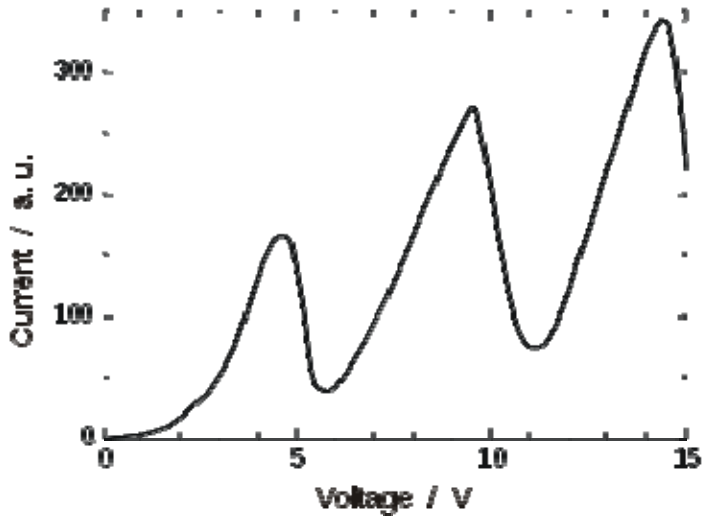
ชุดทดลองประกอบไปด้วยองค์ประกอบหลักสามส่วนดังต่อไปนี้

1. ฟิลาเมนท์ (หรือคาโทด) ที่ทำหน้าที่สร้างอิเล็กตรอนโดยกระบวนการปลดปล่อยด้วยความร้อน (thermionic emission) โดยความร้อนที่เกิดขึ้นที่ฟิลาเมนท์สามารถควบคุมโดยปรับค่าความต่างศักย์ที่ให้กับฟิลาเมนท์ ความต่างศักย์นี้ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในฟิลาเมนท์และทำให้ฟิลาเมนท์ร้อน เมื่อความร้อนมีค่ามากพอก็จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากฟิลาเมนท์ได้

2. ตาข่ายโลหะหรือกริด (grid) ต่อเข้ากับแหล่งกำเนิดความต่างศักย์โดยศักย์ที่ตาข่ายโลหะมีศักย์สูงกว่าที่ฟิลาเมนท์ เพราะฉะนั้นอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากฟิลาเมนท์จะถูกเร่งเข้าหาตาข่าย และเราอาจเรียกความต่างศักย์นี้ว่าความต่างศักย์เร่ง (ใช้สัญลักษณ์ V_a) อิเล็กตรอนที่วิ่งเข้าหาตาข่ายโลหะนี้สามารถทะลุตาข่ายไปยังอีกด้านหนึ่งได้

3. ขั้วอาโนด ทำหน้าที่รวบรวมอิเล็กตรอนที่วิ่งทะลุตาข่ายออกมาโดยขั้วอาโนดศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าศักย์ไฟฟ้าของตาข่ายโลหะ เพราะฉะนั้นอิเล็กตรอนที่วิ่งทะลุตาข่ายมาจะโดนรั้ง (เคลื่อนที่ช้าลง) ดังนั้น ความต่างศักย์นี้จึงอาจเรียกได้ว่าเป็นความต่างศักย์เหนี่ยวรั้ง (ใช้สัญลักษณ์ V_r) อิเล็กตรอนที่สามารถวิ่งไปถึงขั้วอาโนดเกิดเป็นกระแสไฟฟ้าที่สามารถวัดได้โดยแอมมิเตอร์ที่ติดตั้งอยู่

องค์ประกอบทั้งสามที่กล่าวไปถูกบรรจุอยู่ในหลอดแก้วที่มีไอปรอทอยู่ เพื่อให้ปริมาณไอปรอทมีมากพอและไม่ไปเกาะที่ขั้วต่างๆ หลอดแก้วทั้งหมดจะถูกบรรจุอยู่ภายในเตาความร้อนอีกชั้นหนึ่ง เมื่อมีไอปรอทอยู่ภายในหลอดแก้วแล้ว ระหว่างที่อิเล็กตรอนถูกเร่งด้วยความต่างศักย์เร่ง V_a และกำลังเคลื่อนที่เข้าหาขั้วตาข่ายโลหะอิเล็กตรอนอาจเกิดการชนกับอะตอมปรอทที่อยู่ภายในหลอดแก้วได้ ในกรณีที่พลังงานของอิเล็กตรอนมีค่ามากพอที่จะกระตุ้นให้อะตอมปรอทเปลี่ยนระดับชั้นพลังงาน อิเล็กตรอนก็จะสูญเสียพลังงานไป จำนวนอิเล็กตรอนที่มีพลังงานเหลือพอที่จะเอาชนะความต่างศักย์เหนี่ยวรั้ง V_r ได้ก็จะลดลงไปด้วย ผลที่เกิดขึ้นคือทำให้กระแสไฟฟ้าที่อ่านได้จะมีค่าลดลงตามไปด้วยนั่นเอง เมื่อเราปรับค่าความต่างศักย์เร่งขึ้นไปเรื่อยๆ อิเล็กตรอนก็จะมีพลังงานสูงพอที่จะชนกับอะตอมปรอทมากกว่าหนึ่งครั้ง เพราะฉะนั้นจากการทดลองเมื่อเพิ่มค่าความต่างศักย์เร่งไปเรื่อยๆ เราจะสังเกตเห็นการลดลงของกระแสไฟฟ้าเป็นช่วงๆ ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยระยะห่างระหว่างจุดยอดแต่ละจุดจะบอกความแตกต่างของระดับชั้นพลังงานของปรอทได้ การทดลองนี้จึงเป็นการยืนยันว่าระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในอะตอมมีลักษณะเป็นชั้นๆ ตามที่อธิบายโดยแบบจำลองอะตอมของบอร์หจริง



รูปที่ 2 กราฟจากผลการทดลองของแฟรงค์-เฮิร์ตซ์

ลักษณะของชุดทดลองเสมือนในการทดลองของแฟรงค์และเฮริตซ์แสดงดังในรูปที่ 3 การใช้งานส่วนต่างๆ ของชุดทดลองเสมือนมีดังต่อไปนี้

รูปที่ 3 โปรแกรมจำลองการทดลองของแฟรงค์และเฮริตซ์

หมายเลข 1 ชุดทดลองแฟรงค์-เฮิร์ตซ์ ด้านนอกอุปกรณ์ชุดทดลองแฟรงค์-เฮิร์ตซ์ซึ่งก็คือด้านนอกของเตาอบนั่นเอง มีภาพโครงสร้างของหลอดแก้วเช่นเดียวกับในรูปที่ 1 แสดงให้เห็น หลอดแก้วจริงนั้นอยู่ภายในเตาอบที่เห็นอยู่นี้ ปุ่มสีดำด้านข้างนั้นคือปุ่มปรับอุณหภูมิของเตาอบ ซึ่งผู้ทดลองสามารถควบคุมได้โดยปุ่มปรับหมายเลข 2

หมายเลข 2 ปุ่มปรับอุณหภูมิภายในเตาอบ ใช้ปรับอุณหภูมิของเตาเพื่อช่วยให้มีไอปรอทในหลอดแก้ว วิธีใช้คือกดเมาส์แล้วลากซ้าย-ขวา ตามต้องการ โดยประมาณแล้วที่ค่าสูงสุด (หมายเลข 10) จะทำให้อุณหภูมิของเตาอบอยู่ที่ประมาณ $200^{o}C$ อย่างไรก็เมื่อมีการปรับอุณหภูมิ ผู้ทำการทดลองควรรอให้อุณหภูมิมีค่าเกือบคงที่ก่อนที่จะเริ่มอ่านและบันทึกข้อมูลต่างๆ

หมายเลข 3 เครื่องวัดอุณหภูมิ แสดงอุณหภูมิของเตาอบ

หมายเลข 4 นาโนแอมมิเตอร์ เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลในชุดทดลองมีค่าต่ำมาก (อาจต่ำกว่าระดับไมโครแอมแปร์) เพราะฉะนั้นแอมมิเตอร์จะต้องมีความไวมากพอที่จะอ่านกระแสไฟฟ้าปริมาณน้อยๆ ได้ ในการทดลองนี้จึงใช้นาโนแอมมิเตอร์ซึ่งก็คือแอมมิเตอร์ที่สามารถอ่านกระแสได้ในระดับนาโนแอมแปร์ (nA) ตัวเลขที่แสดงผลอยู่มีหน่วย nA

หมายเลข 5 ปุ่มเปิด-ปิดนาโนแอมมิเตอร์ กดเพื่อเปิด-ปิดนาโนแอมมิเตอร์

หมายเลข 6 แหล่งกำเนิดความต่างศักย์เร่ง ควบคุมค่าความต่างศักย์ระหว่างฟิลาเมนท์ (ขั้วคาโทด) กับตาข่ายโลหะ ปุ่มหมุนนี้สามารถควบคุมได้โดยการกดเมาส์แล้วลากซ้าย-ขวา หรือในกรณีที่ต้องการเปลี่ยนค่าทีละน้อยๆ ก็สามารถใช้ล้อหมุนของเมาส์ (scroll wheel) ได้

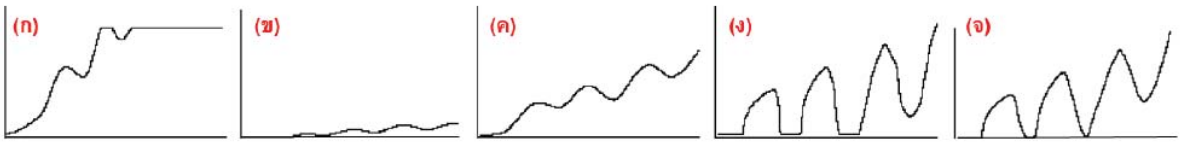
หมายเลข 7 แหล่งกำเนิดความต่างศักย์เหนี่ยวรั้ง ควบคุมค่าความต่างศักย์ระหว่างตาข่ายโลหะกับขั้วอาโนด ปุ่มหมุนนี้สามารถควบคุมได้โดยการกดเมาส์แล้วลากซ้าย-ขวา หรือในกรณีที่ต้องการเปลี่ยนค่าทีละน้อยๆ ก็สามารถใช้ล้อหมุนของเมาส์ (scroll wheel) ได้

หมายเลข 8 แหล่งกำเนิดความต่างศักย์ที่ฟิลาเมนท์ ควบคุมค่าความต่างศักย์ที่ฟิลาเมนท์ (ขั้วคาโทด) เพื่อทำให้ฟิลาเมนท์ร้อนและปลอดปล่อยอิเล็กตรอน ปุ่มหมุนนี้สามารถควบคุมได้โดยการกดเมาส์แล้วลากซ้าย-ขวา หรือในกรณีที่ต้องการเปลี่ยนค่าทีละน้อยๆ ก็สามารถใช้ล้อหมุนของเมาส์ (scroll wheel) ได้เช่นเดียวกับปุ่มปรับทั้งสองข้างต้น

จุดประสงค์ของการทดลองนี้คือเพื่อทดสอบการมีระดับพลังงานเป็นชั้นตามแบบจำลองอะตอมของบอห์ร โดยพิจาณาจากการตกลงของกระแสไฟฟ้าเมื่อมีการเพิ่มความต่างศักย์เร่งภายในชุดทดลองแฟรงค์-เฮิร์ตซ์

วิธีการทดลอง

1. เปิดโปรแกรมจำลองการทดลองแฟรงค์และเฮริตซ์ VLab 06-FrankHertz.swf
2. ปรับอุณหภูมิของเตาเพื่อช่วยให้มีไอปรอทในหลอดแก้ว โดยให้อุณหภูมิของเตาอบอยู่ที่ประมาณ $200\,^{o}C$
3. เลือกค่าความต่างศักย์ที่ฟิลาเมนท์ (V_f) และความต่างศักย์เหนี่ยวรั้ง(V_r) ที่เหมาะสม (นั่นคือเป็นค่าที่ให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ตลอดช่วงความต่างศักย์เร่ง) วิธีการพิจาณาว่าค่ากระแสไฟฟ้าที่อ่านได้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมสามารถสังเกตจากลักษณะการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าดังแสดงในรูปด้านล่าง



รูป ก ความต่างศักย์เร่งมีค่าสูงเกินไป
รูป ข ความต่างศักย์เร่งมีค่าต่ำเกินไป
รูป ค ความต่างศักย์เร่งมีค่าเหมาะสม แต่ความต่างศักย์เหนี่ยวรั้งมีค่าต่ำเกินไป
รูป ง ความต่างศักย์เหนี่ยวรั้งมีค่ามากเกินไป
รูป จ ลักษณะกราฟที่ค่าต่างๆ เหมาะสม

ในการพิจารณาความเหมาะสมของกราฟ ผู้ทดลองอาจทำการเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ต่างๆ แล้วสังเกตขนาดของกระแสไฟฟ้าด้วยตาดูก่อน ก่อนลงมือบันทึกผลในขั้นตอนที่ 4

4. ปรับค่าความต่างศักย์เร่ง(V_a) ตั้งแต่ 0 V (เพิ่มทีละ 0.5V) ไปจนค่าความต่างศักย์สูงสุด บันทึกค่ากระแสไฟฟ้าที่อ่านได้ควบคู่ไปด้วยโดยตลอด
5. นำค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าที่อ่านได้ไปเขียนลงบนกระดาษกราฟแบบเชิงเส้น (เป็นกระดาษกราฟจริง) โดยให้แกนนอนเป็นขนาดของความต่างศักย์เร่ง(V_a) ส่วนแกนดิ่งเป็นขนาดของกระแสไฟฟ้า (I) ที่อ่านได้
6. จากกราฟที่ได้คำนวณหาผลต่างของระดับชั้นพลังงานในอะตอมปรอทโดยพิจารณาระยะห่างระหว่างจุดต่ำสุดของแต่ละช่วงที่มีการตกลงของกระแสไฟฟ้า
7. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 3 โดยใช้ค่าความต่างศักย์เหนี่ยวรั้ง ความต่างศักย์เร่งและ/หรือความต่างศักย์ที่ฟิลาเมนท์ค่าอื่น
8. คำนวณผลต่างของระดับชั้นพลังงานโดยใช้ค่าเฉลี่ยจากการวัดทั้งหมดที่ทำซ้ำ

ตารางบันทึกผลการทดลอง

ตารางที่ 1.1 ค่าความต่างศักย์ที่ฟิลาเมนท์ (V_f) = ...0.5.....V ค่าความต่างศักย์เหนี่ยวรั้ง (V_r) = ...1.0.....V

ความต่างศักย์เร่ง;V_a (V)	กระแสไฟฟ้า; I (nA)
0	
0.5	
1.0	
1.5	
2.0	
2.5	
3.0	
3.5	
4.0	
4.5	
5.0	
5.5	
6.0	
6.5	
7.0	
7.5	
8.0	
8.5	
9.0	
9.5	
10.0	

ความต่างศักย์เร่ง;V_a (V)	กระแสไฟฟ้า; I (nA)
10.5	
11.0	
11.5	
12.0	
12.5	
13.0	
13.5	
14.0	
14.5	
15.0	
15.5	
16.0	
16.5	
17.0	
17.5	
18.0	
18.5	
19.0	
19.5	
20.0	
20.5	

ความต่างศักย์เร่ง;V_a (V)	กระแสไฟฟ้า; I (nA)
21.0	
21.5	
22.0	
22.5	
23.0	
23.5	
24.0	
24.5	
25.0	

ตารางที่ 1.2-1.4 **เปลี่ยนค่าความต่างศักย์ที่ฟิลาเมนท์** (V_f) **เป็น** 1.0, 1.5, 2.0 V **และค่าความต่างศักย์เหนี่ยวรั้ง** (V_r) **เป็น** 2.0, 3.0, 4.0 V **ตามลำดับ**

เมื่อนำข้อมูลจากตารางผลการทดลองมาเขียนกราฟระหว่างความต่างศักย์เร่ง(V_a) และกระแสไฟฟ้า (I)

ตารางที่ 1.1 พบว่าระดับชั้นพลังงานในอะตอมปรอทมีค่า.....V

ตารางที่ 1.2 พบว่าระดับชั้นพลังงานในอะตอมปรอทมีค่า.....V

ตารางที่ 1.3 พบว่าระดับชั้นพลังงานในอะตอมปรอทมีค่า.....V

ตารางที่ 1.4 พบว่าระดับชั้นพลังงานในอะตอมปรอทมีค่า.....V

ระดับชั้นพลังงานในอะตอมปรอทเฉลี่ยมีค่า.....V

เอกสารอ้างอิง

1. http://en.wikipedia.org/wiki/Franck–Hertz_experiment
2. http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/frhz.html