วาระที่ 3.3

ความร่วมมือไทย-สิงคโปร์เพื่อพัฒนานาฬิกาอะตอมเชิงแสง*

ตามพระราชดำริสมเด็จพระกนิษฐาธิราชเจ้า กรมสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดา ฯ สยามบรมราชกุมารี
(ประจำปี 2566)

รายงานเมื่อ
5 มีนาคม 2567

หน่วยงานร่วมโครงการ

1. มูลนิธิเทคโนโลยีสารสนเทศตามพระราชดำริสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดา ฯ สยามบรมราชกุมารี
2. สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ
3. วิทยาลัยนานาชาติ ม.มหิดล
4. สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
5. Centre for Quantum Technologies, Singapore
6. National Institute of Information and Communication Technology, Japan
7. Quantum Technology Foundation Thailand(Tech Startup)

*ชื่อเต็มคือนาฬิกาอะตอมเชิงแสงด้วยไอออนเย็นของธาตุอิธเธอเบียม

1.ศูนย์เทคโนโลยีควอนตัม (Centre for Quantum Technologies :CQT) ม.แห่งชาติสิงคโปร์(NUS)

- เมื่อ 20 มกราคม 2562 สมเด็จพระกนิษฐาธิราชเจ้า กรมสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดา ฯ สยามบรมราชกุมารี เสด็จพระราชดำเนินไปยังศูนย์เทคโนโลยีควอนตัม มหาวิทยาลัยแห่งชาติสิงคโปร์
- ทรงเป็นประธานในการลงนามความร่วมมือด้านการวิจัยทางด้านเทคโนโลยีควอนตัม ระหว่างสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (NIMT: National Institute of Metrology of Thailand)กับมหาวิทยาลัยแห่งชาติสิงคโปร์ (NUS : National University of Singapore)

2. แผนความร่วมมือ NIMT-CQT ในการพัฒนานาฬิกาอะตอมเชิงแสง

<u>วัตถุประสงค์</u> เพื่อใช้เป็นนิยามของหน่วยวินาทีในอนาคตของประเทศไทย รวมทั้งการพัฒนาบุคลากรด้านเทคโนโลยีควอนตัม

- NIMT ใช้ไอออนของธาตุอิธเธอเบียม (Yb^+)
- CQT ใช้ไอออนของธาตุลูทิเทียม (Lu^+)

- งบประมาณทั้งโครงการ 83.38 ล้านบาท
- **<u>อนุมัติแล้ว 5 ปี(62-66)จำนวน 53.10 ล้านบาท ส่วนงบประมาณปี 67 อยู่ระหว่างการพิจาณา</u>**
- ระยะเวลาดำเนินการ 7 ปี (2562-69)

นักวิจัยไทย

- ดร. ปิยพัฒน์ พูลทอง NIMT
- ดร. รัฐกร แก้วอ่วม NIMT
- ดร. ธเนศ พฤทธิวรสิน ม.มหิดล
- ดร. ธารา เฉลิมทรงศักดิ์ ม.มหิดล
- นายนครินทร์ จายโจง จบป.โท ม.มหิดล ขณะนี้เรียนป.เอกที่NUS(CQT) ด้านนาฬิกาอะตอม Lu^+

นักวิจัยสิงคโปร์

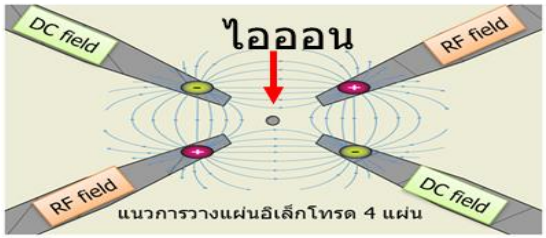
- Dr. Murray Barrett CQT
- Dr. Kyle Arnold CQT

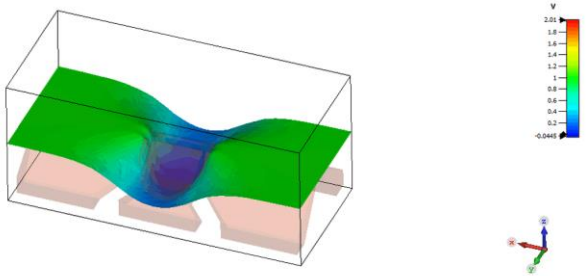
- 2562 – 2565 ร่วมวิจัยและสร้างอุปกรณ์กักขังไอออนของธาตุอิตเทอเบียม (Yb+) ซึ่งเป็นหัวใจของนาฬิกาอะตอมที่ CQT และ NIMT
- 2562 ร่วมพัฒนาเทคนิคในการเคลือบฟิล์มบางทองคำบนแผ่นเซรามิคอะลูมินาไนไตรด์ที่ CQT ที่สิงคโปร์แต่ไม่สมบูรณ์
- 2563 พัฒนาชั้นทองแดงบนแผ่นเซรามิค MACOR ด้วยเทคโนโลยีในไทย
- 2564 สร้างชิ้นส่วนเพิ่มเติมเพื่อให้ได้หน่วยกักขังไอออนอิตเทอเบียม
- 2565 ประสบความสำเร็จในการกักขังไอออนเย็นของธาตุอิตเทอเบียม
- 2565 - 2566 ทดสอบคุณสมบัติของไอออนอิตเทอเบียมที่กักขังได้

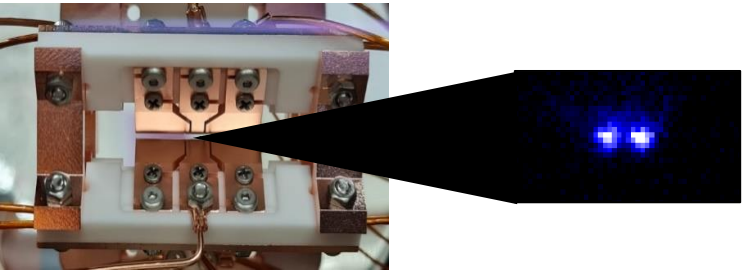
- **<u>2566 - 2568 CQT มีแผนที่จะพัฒนานาฬิกาอะตอมขนาดเล็กเชิงพานิชย์ ซึ่งเป็นโอกาสที่ดีของประเทศไทยที่จะได้ร่วมวิจัยและออกแบบระบบต่างๆ ของนาฬิกาอะตอมขนาดเล็ก</u>**
- 2567 - 2568 การเปรียบเทียบความถี่ด้วยระบบดาวเทียมนำทาง GNSS (Global Navigation Satellite System) เพื่อทำการเปรียบเทียบความถี่ของนาฬิกาอะตอมระหว่าง NIMT และ CQT
- นอกจากนี้จะเจรจาขยายความร่วมมือไปยัง NARIT (ไทย) และ NICT (ญี่ปุ่น) เพื่อใช้ระบบ VLBI (very large baseline interferometer) ในการเปรียบเทียบความถี่เพื่อให้แม่นยำมากกว่าระบบ GNSS
- 2568 - 2569 ทำการวัดความถี่ของนาฬิกาอะตอมเชิงแสงของทั้ง 2 หน่วยงานซึ่งทั้งสองธาตุนี้คาดว่าจะเป็นส่วนหนึ่ง ในการกำหนดมาตรฐานหน่วยวินาทีใหม่ของโลกในอนาคต
- 2569 จะเริ่มพิจารณานิยามใหม่ของหน่วยวินาที

3.ความก้าวหน้าในปี 2566:สร้างระบบนาฬิกาอะตอมเชิงแสงที่กักขังไอออนได้แล้ว(1/5)

การทำงานของไทยโดยลำพังในปี2565-66(1/2)





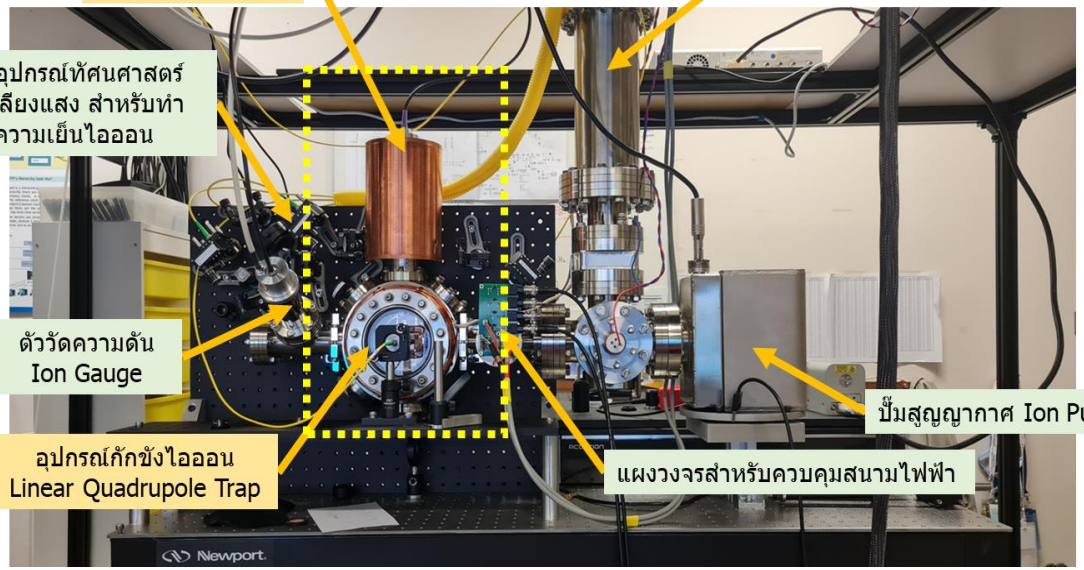


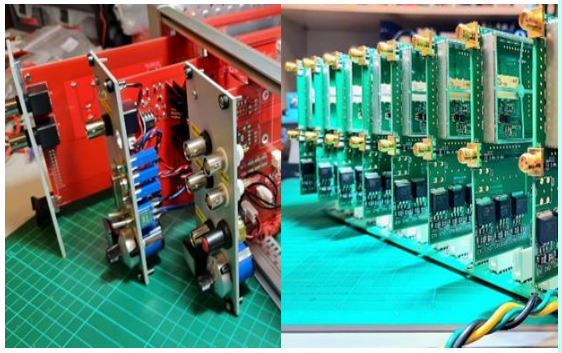
16 มีนาคม 2565 ประสบความสำเร็จในการกักขังไอออน Trapped ions (Yb171) เริ่มต้นจาก 1 ไอออน/นาฬิกาเรือนและค่อยเพิ่มให้มากขึ้นซึ่งจะช่วยความเสถียรของความถี่นาฬิกา

พ.ศ.2565 สามารถสร้างระบบนาฬิกาอะตอมเชิงแสงสำเร็จของไทยมีอุปกรณ์หลักคือ

1. อุปกรณ์ขยายสัญญาณคลื่นวิทยุ(Helical Resonator)
2. อุปกรณ์กักขังไอออน(Linear Quadrupole Trap)

และส่วนอื่นทำหน้าที่สนับสนุน





ปี 2566

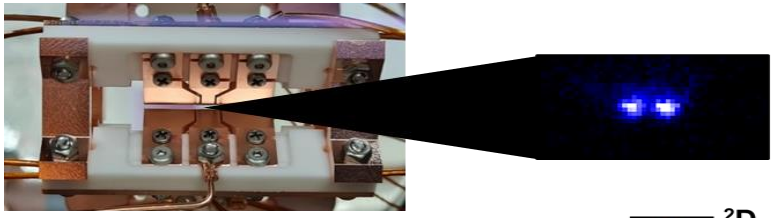
- ออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพื่อควบคุมการทำงานของนาฬิกาอะตอมเชิงแสง
- ติดตั้งระบบเลเซอร์เสถียรภาพสูงเพื่อวัดความถี่มาตรฐานของธาตุอิตเทอเบียม
- **คาดว่าจะได้ความถี่นาฬิกา ราว 2567-68เพื่อใช้งานในเบื้องต้น**
-

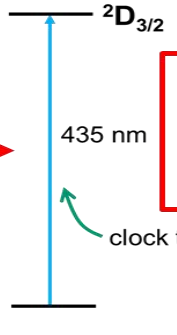
3.ความก้าวหน้าในปี 2566:สร้างระบบนาฬิกาอะตอมเชิงแสงที่กักขังไอออนได้แล้ว(2/5)

ผังและแผนเวลาองค์ประกอบของนาฬิกาอะตอมเชิงแสง

การทำงานของไทยโดยลำพังในปี2565-66(2/2)

- ปัจจุบันไทยใช้นาฬิกาอะตอมซีเซียมมีความถูกต้องราว10^{-13} – 10^{-14} ใน1วินาที
- นาฬิกาอะตอมอิธเธอเบียมจะเพิ่มความถูกต้องเป็น 10^{-16} – 10^{-18} ใน1วินาที





2567 - 2568

เลเซอร์ใช้กระตุ้นอิเล็กตรอนจาก S ไป D ถ้าอิเล็กตรอนถูกกระตุ้น แสดงว่าความถี่ตรงกับระดับชั้นพลังงานของอะตอม

เลเซอร์ 435 nm ที่มีความเสถียรสูง

2567 - 2569

ความถี่เลเซอร์ 435 nm คือ 690 THz จะถูกใช้เป็นความถี่มาตรฐาน

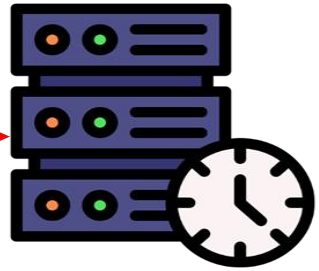
Optical Frequency Comb (**Optical Counter/Gear**)

ลดทอนความถี่ 690 THz -> 1 GHz

2567 - 2568

2568 - 2569

ความถี่จะถูกลดทอนลงโดยใช้ Optical Frequency Comb ให้ได้ความถี่ในช่วงคลื่นวิทยุ ประมาณ 1 GHz



ความถี่มาตรฐานในช่วงคลื่นวิทยุ และเวลามาตรฐาน จะถูกถ่ายทอดไปสู่ผู้ใช้งานต่อไป

2569 - 2570

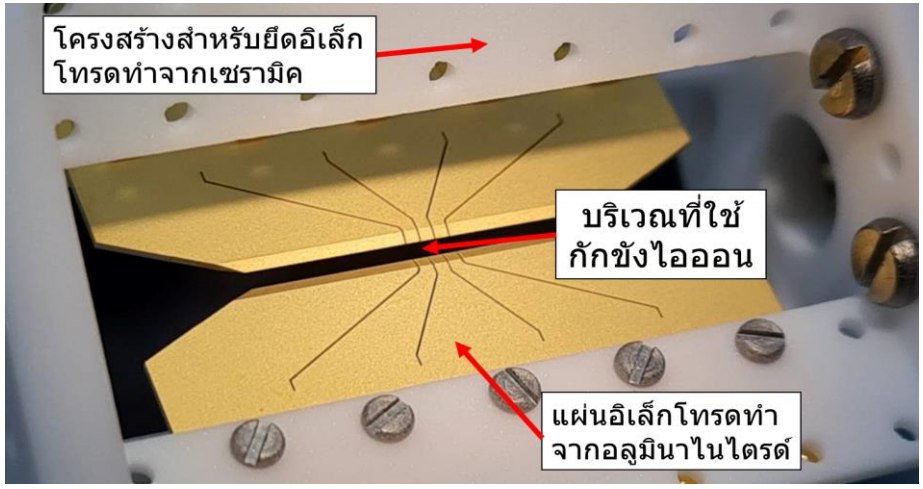
หมายเหตุ(1) เรารู้ว่าอิเล็กตรอนถูกกระตุ้นแล้วโดยการสังเกตว่าไอออนมืดชั่วขณะแล้วกลับมาสว่างใหม่ (2)การเลือกใช้ธาตุอะไรนั้นแล้วแต่ความสนใจของแต่ละกลุ่มวิจัย

3.ความก้าวหน้าในปี 2566:สร้างระบบนาฬิกาอะตอมเชิงแสงที่กักขังไอออนได้แล้ว(3/5)

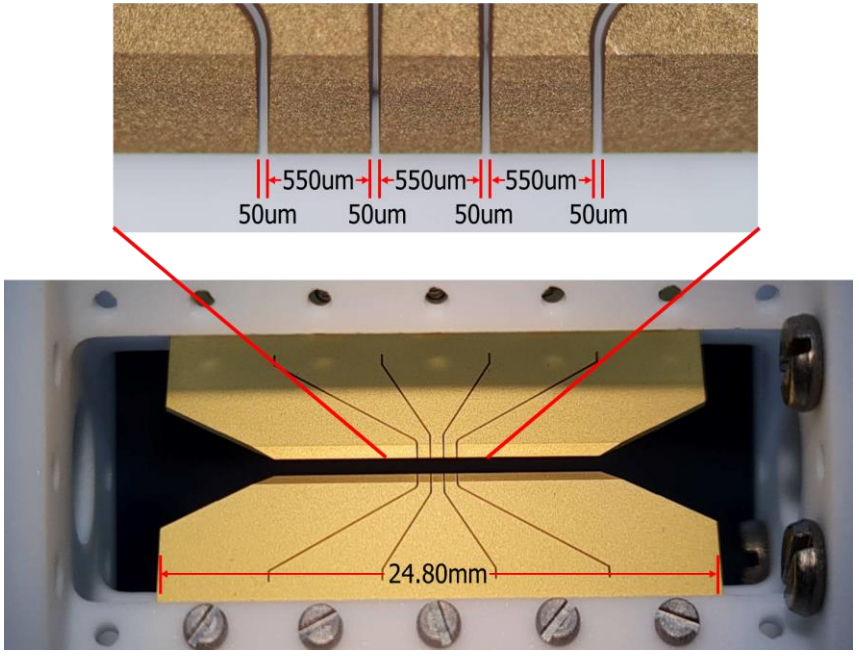
ความร่วมมือกับสิงคโปร์ในปี2566(1/3)

- **สถานการณ์COVID-19**คลี่คลายทำให้มีโอกาสได้เดินทางไปยัง CQT
- ร่วมกันสร้าง**อุปกรณ์กักขังไอออนที่ตกลงกันไว้ก่อนการระบาดของCOVID-19**จนแล้วเสร็จตามแผน ประเทศไทยได้อุปกรณ์กลับมา 1 ชุด
- อุปกรณ์กักขังไอออนที่พัฒนาขึ้นเองโดยประเทศไทยจะถูกใช้กับอิธเธอร์เบียมเป็นนาฬิกาอะตอมของประเทศเราเท่านั้น ในขณะที่อุปกรณ์กักขังไอออนที่ได้ร่วมสร้างกับ CQT จะสามารถใช้งานกับไอออนธาตุลูทิเทียม (CQT) หรืออิธเธอเบียม (NIMT)ก็ได้ ทั้งของไทยและสิงคโปร์ใช้ประโยชน์ต่อแผนการทำวิจัยของไทยในอนาคตดังนี้:
  1. แต่ละชุดสามรถใช้ทำงานเป็น**นาฬิกาอะตอมขนาดเล็ก**ต้องการตู้ Rack Network ประมาณ 2 ตู้เท่านั้น
  2. เป็นเครื่องมือพื้นฐานสำคัญสำหรับนักวิทยาศาสตร์ไทยในการศึกษาระบบทางควอนตัม

ชิ้นส่วนหลัก คือ แผ่นอลูมินาไนไตรด์เคลือบทองคำ จำนวน 4 แผ่น แต่ละแผ่นจะมีขั้วไฟฟ้าย่อย จำนวน 5 ขั้ว และโครงสร้างเซรามิคสำหรับยึดอิเล็กโทรด



ขนาดของขั้วไฟฟ้าย่อย จำนวน 5 ขั้ว บนแผ่นอิเล็กโทรด

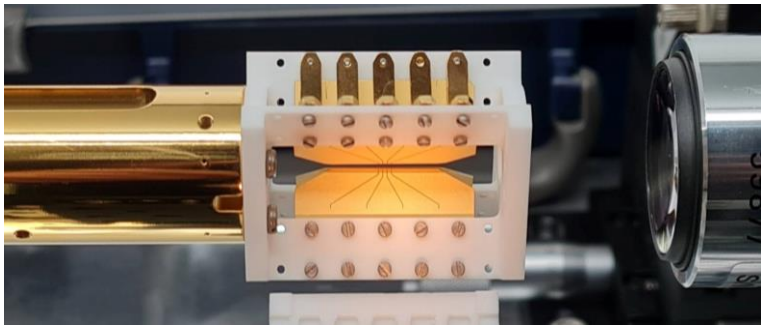


3.ความก้าวหน้าในปี 2566:สร้างระบบนาฬิกาอะตอมเชิงแสงที่กักขังไอออนได้แล้ว(4/5)

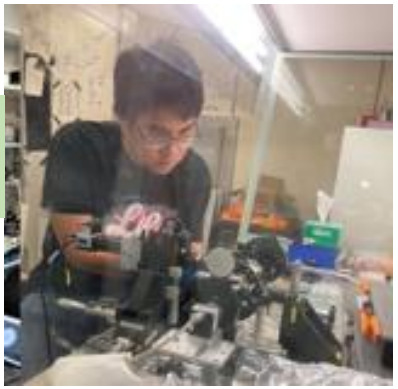
ความร่วมมือกับสิงคโปร์ในปี2566(2/3)

การประกอบและการจัดวางแนวของอิเล็กโทรด

- ระบบกักขังไอออนที่ร่วมกันสร้างนี้ จำเป็นที่จะต้องวางแผ่นอิเล็กโทรดให้ขนานกัน และแนวร่องของแผ่นอิเล็กโทรดทั้ง 4 แผ่นต้องตรงกัน คลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน 10 ไมโครเมตร
- ต้องใช้ชุดเครื่องมือพิเศษที่ร่วมกันพัฒนาเพื่อวางแผ่นอิเล็กโทรดแต่ละแผ่นเรียงตัวกันตามที่ต้องการ

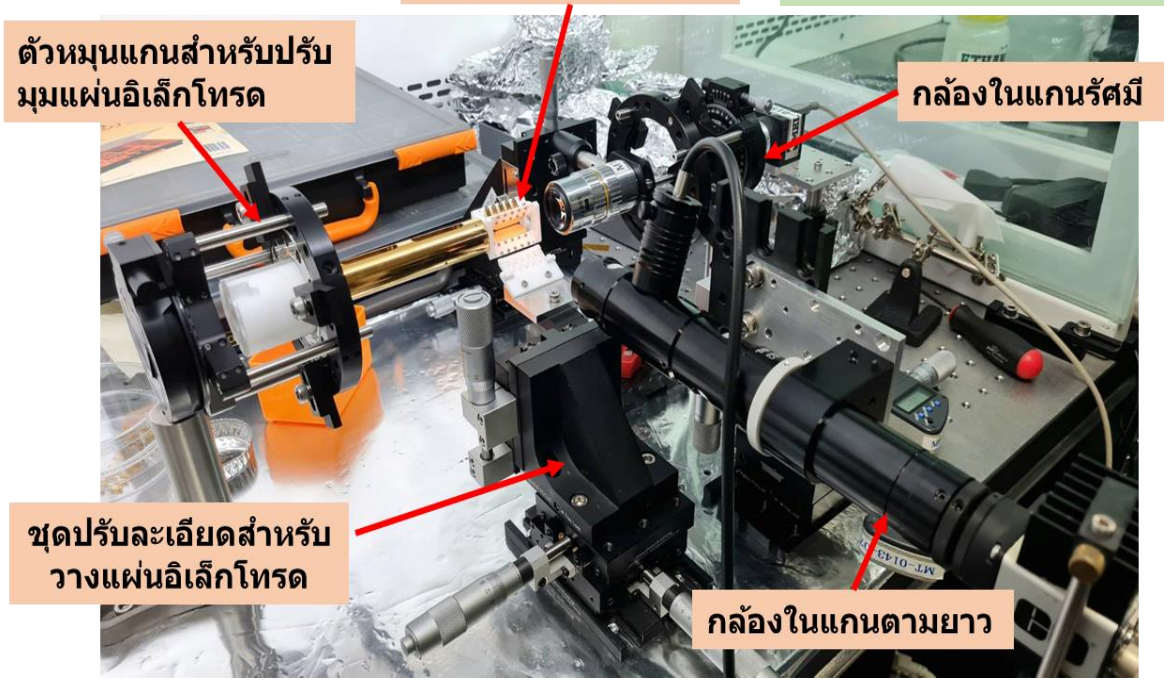


แสดงการจัดวางอิเล็กโทรด ขวามือคือเลนส์กำลังขยายสูงสำหรับวัดระยะห่างของแผ่นอิเล็กโทรด



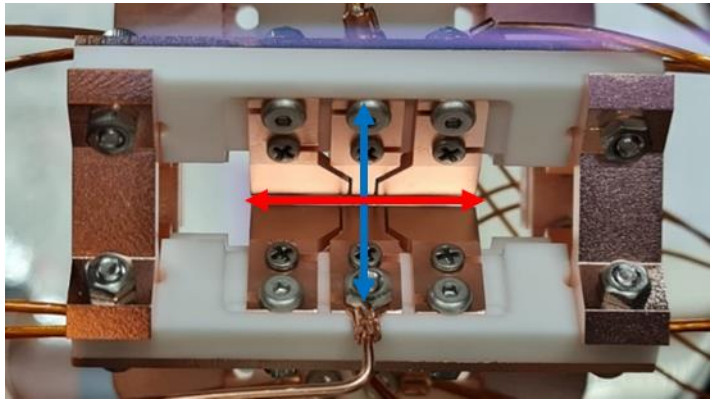
การทำงานของนักวิจัย

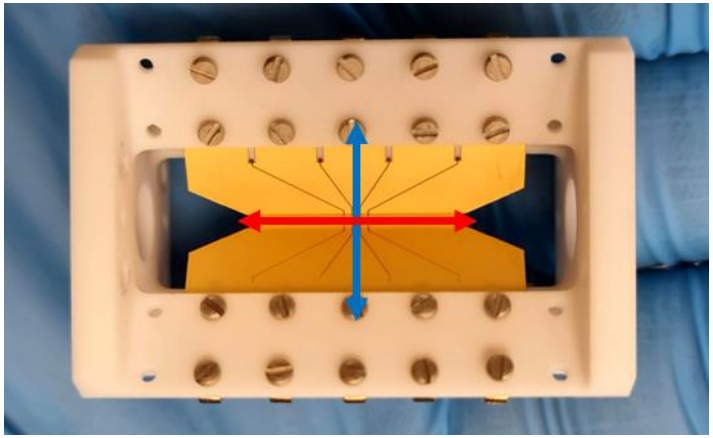
แสดงระบบการติดตั้งแผ่นอิเล็กโทรดบนอุปกรณ์กักขังไอออน

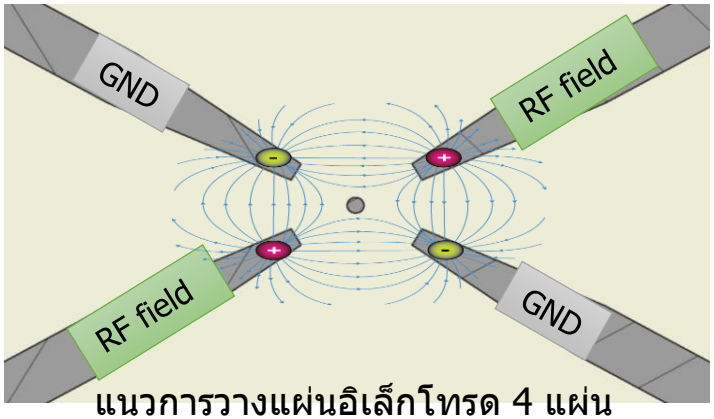


3.ความก้าวหน้าในปี 2566:สร้างระบบนาฬิกาอะตอมเชิงแสงที่กักขังไอออนได้แล้ว(5/5)

ความร่วมมือกับสิงคโปร์ในปี2566(3/3)







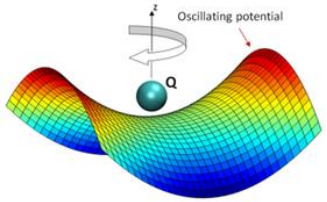
แนวการวางแผ่นอิเล็กโทรด 4 แผ่น

NIMT design(ไทย)

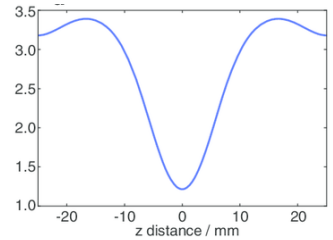
- ขั้วไฟฟ้า 12 ขั้ว
- ทำจากทองแดงบริสุทธิ์
- ใช้ขั้วไฟฟ้า 4 ขั้วในการสร้างสนามไฟฟ้าในแกนรัศมี
- ใช้ขั้วไฟฟ้า 8 ขั้วในการสร้างสนามไฟฟ้าในแกนตามยาว

CQT design(สิงคโปร์)

- ขั้วไฟฟ้าทั้งหมด 20 ขั้ว
- ทำจากอลูมินาไนไตรด์ เคลือบด้วยทองคำ
- ใช้ขั้วไฟฟ้า 12 ขั้วในการสร้างสนามไฟฟ้าในแกนรัศมี
- ใช้ขั้วไฟฟ้า 8 ขั้วในการสร้างสนามไฟฟ้าในแกนตามยาว



RF field ทำให้เกิดหลุมพลังงานศักย์แบบพาราโบลา<u>ในแกนรัศมี</u> ทำให้ไอออนถูกกักขังอยู่ที่ก้นหลุมหรือบริเวณตรงกลาง



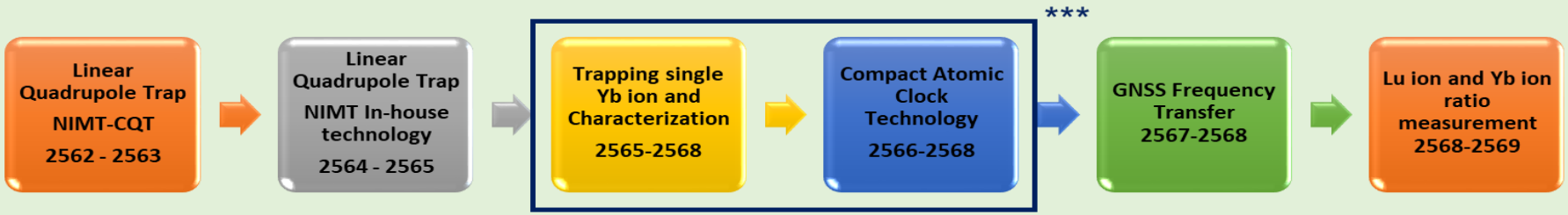
DC field ทำให้เกิดหลุมพลังงานศักย์แบบพาราโบลา<u>ในแกนตามยาว</u> ทำให้ไอออนถูกกักขังบรเวณตรงกลาง

4.สรุป

1. เมื่อ 20 มกราคม 2562 สมเด็จพระกนิษฐาธิราชเจ้า กรมสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดา ฯ สยามบรมราชกุมารี เสด็จพระราชดำเนินไปยังศูนย์เทคโนโลยีควอนตัม มหาวิทยาลัยแห่งชาติสิงคโปร์ ทรงเป็นประธานในการลงนามความร่วมมือด้านการวิจัยทางด้านเทคโนโลยีควอนตัม ระหว่างสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (NIMT: National Institute of Metrology of Thailand)กับมหาวิทยาลัยแห่งชาติสิงคโปร์ (NUS : National University of Singapore)
2. นับตั้งแต่พ.ศ.2562-65 ประเทศไทยสามารถสร้างระบบนาฬิกาอะตอมเชิงแสงสำเร็จของไทยมีอุปกรณ์หลักคือ(1)อุปกรณ์ขยายสัญญาณคลื่นวิทยุ(Helical Resonator)และ(2)อุปกรณ์กักขังไอออน(Linear Quadrupole Trap)และกำลังาร้างระบบเลเซอร์ที่จะไปทำให้อะตอมย้ายชั้นพลังงานให้ความถี่เป็นนาฬิกาที่ต้องการ
3. ในพ.ศ.2566 สถานการณ์COVID-19คลี่คลายลง นักวิจัยไทยจึงได้เดินทางไปร่วมกับสิงคโปร์สร้างอุปกรณ์สำหรับกักขังไอออนร่วมกับ CQT เป็นงานต่อเนื่องตั้งแต่เริ่มโครงการ แต่หยุดชะงักไปเนื่องจากโควิด19 ได้ต้นแบบ Linear Quadrupole Trap เพื่อนำมาทำการทดลองต่อในไทย เทียบผลกับสิงคโปร์
4. ในพ.ศ.2566 ยังได้ขยายความร่วมมือทางวิชาการกับสถาบันมาตรวิทยาแห่งสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB) โดยดร. ปิยพัฒน์ พูลทอง และดร.รัฐกร แก้วอ่วม ไปร่วมวิจัยระหว่าง 2 ตุลาคม 2566 - 31 มีนาคม 2567
5. แผนเวลา

- ปี 2565 - 2568 ทดสอบคุณสมบัติของไอออนอิตเทอเบียมที่กักขังได้
- ปี 2566 - 2568 CQT มีแผนที่จะพัฒนานาฬิกาอะตอมขนาดเล็กเชิงพานิชย์ ซึ่งเป็นโอกาสที่ดีของประเทศไทยที่จะได้ร่วมวิจัยและออกแบบระบบต่างๆ ของนาฬิกาอะตอมขนาดเล็ก

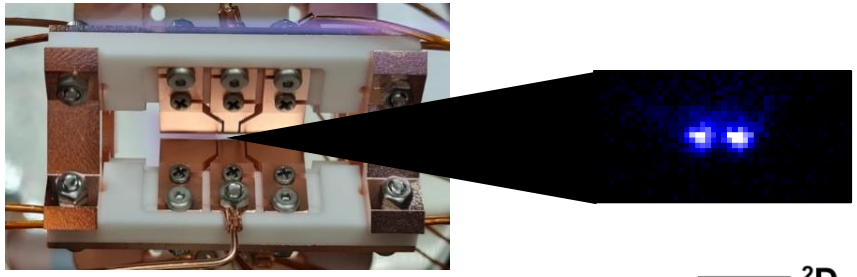
- ปี 2567 - 2568 การเปรียบเทียบความถี่ด้วยระบบดาวเทียมนำทาง GNSS (Global Navigation Satellite System) เพื่อทำการเปรียบเทียบความถี่ของนาฬิกาอะตอมระหว่าง NIMT และ CQT
- ปี 2568 - 2569 ทำการวัดความถี่ของนาฬิกาอะตอมเชิงแสงของทั้ง 2 หน่วยงานซึ่งทั้งสองธาตุนี้คาดว่าจะเป็นส่วนหนึ่ง ในการกำหนดมาตรฐานหน่วยวินาทีใหม่ของโลกในอนาคต
- **<u>ปี2569 จะเริ่มพิจารณานิยามใหม่ของหน่วยวินาที</u>**



ประเด็นเสนอที่ประชุม

เพื่อรับทราบผลการดำเนินงาน ปี 2566
และเห็นชอบแผนการดำเนินงานปี 2567

Backup slides



เลเซอร์ 435 nm
ที่มีความเสถียรสูง

2567 - 2568

เลเซอร์ใช้กระตุ้นอิเล็กตรอนจาก S ไป D ถ้าอิเล็กตรอนถูกกระตุ้น แสดงว่าความถี่ตรงกับระดับชั้นพลังงานของอะตอม

2567 - 2569

ความถี่เลเซอร์ 435 nm คือ 690 THz
จะถูกใช้เป็นความถี่มาตรฐาน

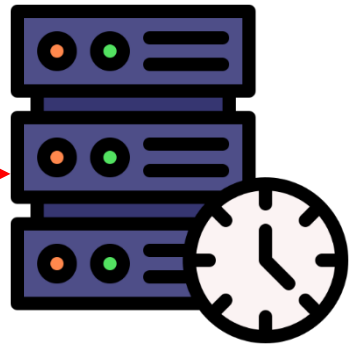
Optical Frequency Comb
(**Optical Counter/Gear**)

2567 - 2568

ลดทอนความถี่ 690 THz -> 1 GHz

2568 - 2569

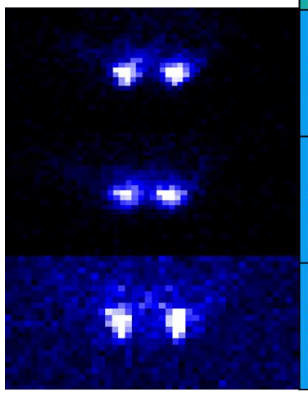
ความถี่จะถูกลดทอนลงโดยใช้ Optical Frequency Comb ให้ได้ความถี่ในช่วงคลื่นวิทยุ ประมาณ 1 GHz



ความถี่มาตรฐานในช่วงคลื่นวิทยุ และเวลามาตรฐาน จะถูกถ่ายทอดไปสู่ผู้ใช้งานต่อไป

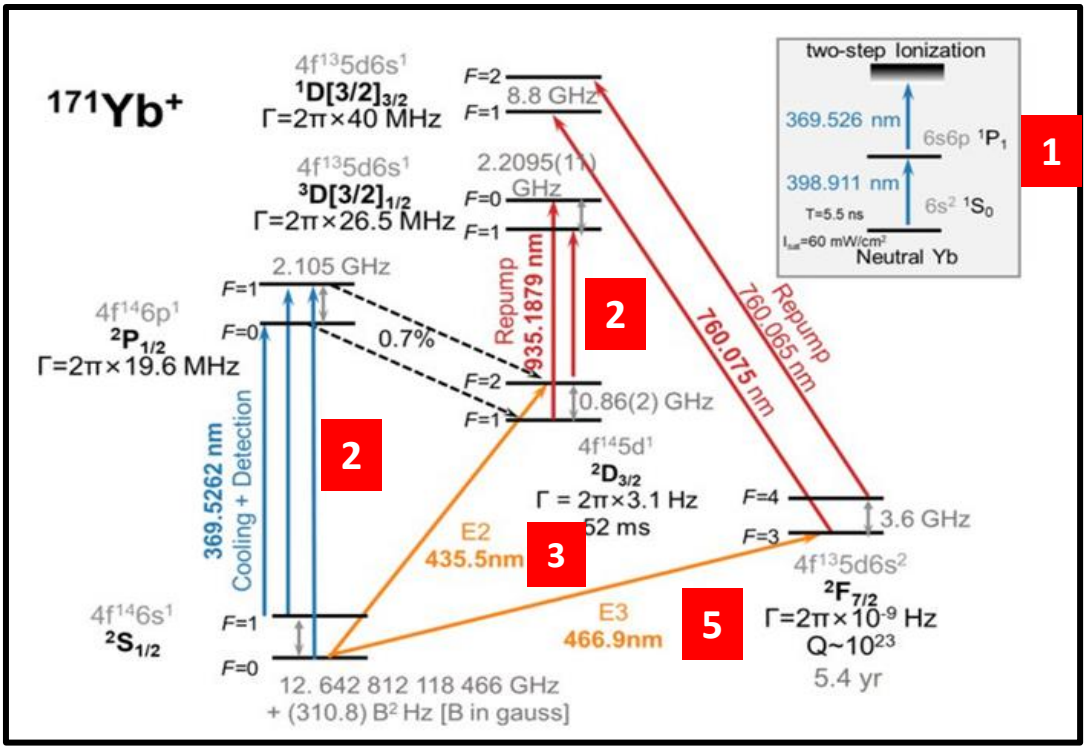
2569 - 2570

3.ความก้าวหน้าในปี2565:ความยาวคลื่นของเลเซอร์สำหรับแต่ละไอโซโทปของอิตเทอเบียม(4/4)



Isotope	Cooling Laser (nm)	Exciting Laser (nm)	Repump Laser (nm)
Yb174	369.525 07(1)	398.911 35(1)	935.180 41(5)
Yb172	369.524 49(1)	398.911 04(1)	935.188 04(5)
Yb171	369.526 19(1)	398.910 91(1)	935.188 35(5)

- คณะวิจัยได้ทำการทดสอบโปรแกรมอัตโนมัติโดยการกักขังไอโซโทปต่างๆ ของอิตเทอเบียม
- ทั้งนี้ด้างอิงข้อมูลจากงานวิจัยในต่างประเทศเพื่อที่จะหาค่าความยาวคลื่นที่เหมาะสมที่ใช้ในการกักขัง พบว่าสามารถที่กักขังไอออนของธาตุอิตเทอเบียมที่มีไอโซโทป 174, 172 และ 171 ได้ตามลำดับ



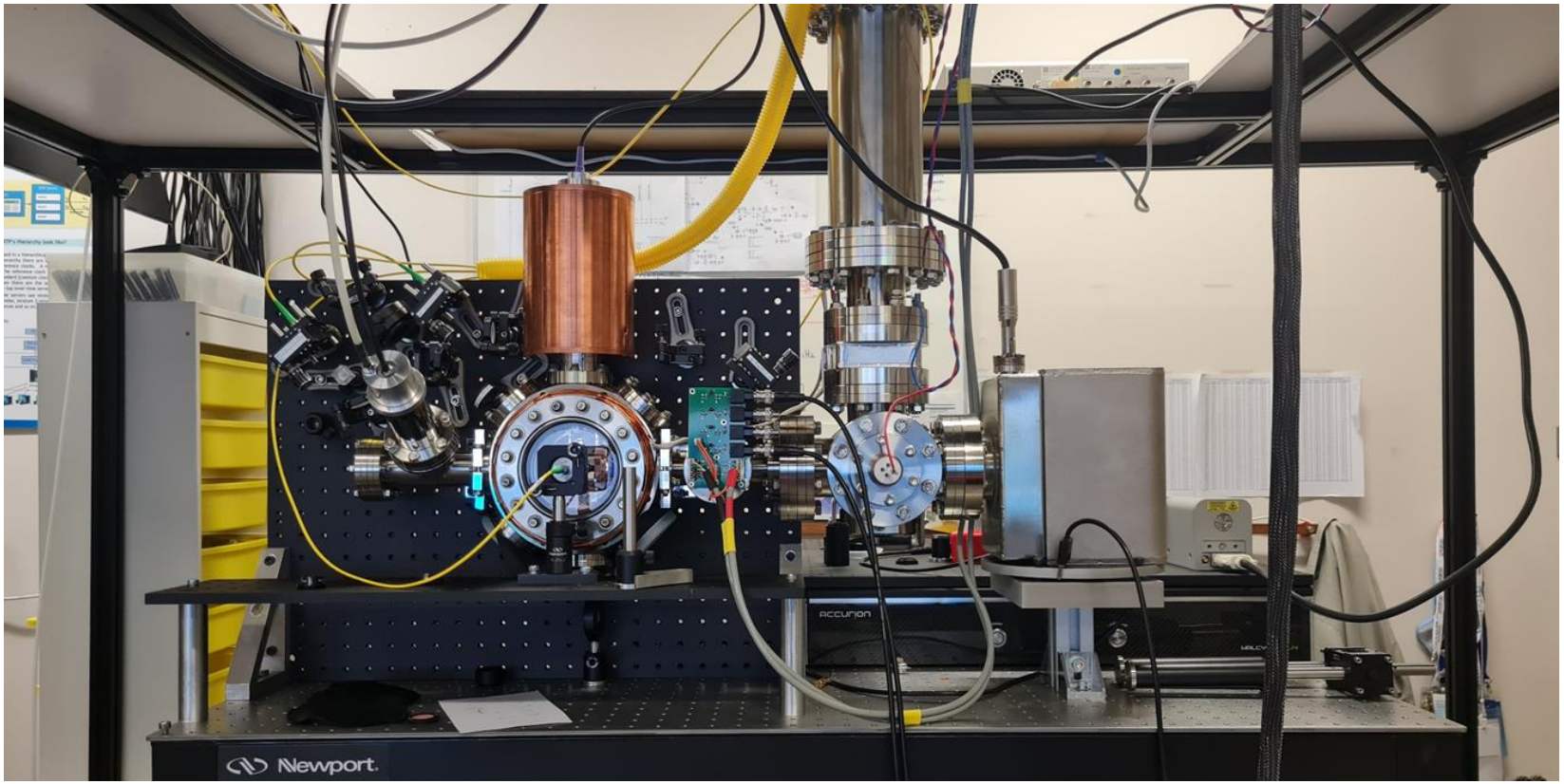
ระดับชั้นพลังงานของไอออนอิตเทอเบียม171

<u>การทำงานของเลเซอร์ที่ความยาวคลื่นต่างๆ</u>

1. **ทำให้อะตอมกลายเป็นไอออน ด้วย** 398.9nm และ 369.5nm
2. **ทำให้ไอออนเย็นและถูกกักขัง** ด้วย 369.5nm และ 935.2nm
3. **สร้างความถี่นาฬิกา(E2 clock transition)** ด้วย 435.5nm กระตุ้นอิเล็กตรอนจาก S ไป D
4. **ตรวจว่าอิเล็กตรอนในชั้น S ไป Dไหมด้วย 369.5nm** ถ้าภาพไอออนสว่าง แสดงว่าไม่โดนกระตุ้น ถ้าภาพมืด แสดงว่าอิเล็กตรอนโดนกระตุ้นไปแล้ว
5. **ส่วน E3 466.9 nm**นั้นจะใช้เป็นนาฬิกาอีกหนึ่งความถีในอนาคต

- ในปี 2566 จะเป็นการทดสอบคุณสมบัติของไอออนและวัดความถี่ของไอออน
- ปัจจุบันไทยใช้นาฬิกาอะตอมซีเซียยมีความถูกต้องราว10^{-13} – 10^{-14} ใน1วินาที
- นาฬิกาอะตอมอิธเธอเบียมจะเพิ่มความถูกต้องเป็น 10^{-16} – 10^{-18} ใน1วินาที

รายงานความก้าวหน้าโครงการนาฬิกาอะตอมเชิงแสง 2566



รูปแสดงระบบสูญญากาศที่ใช้ในการกักขังไอออน ของโครงการนาฬิกาอะตอมเชิงแสง