วาระที่ 3.1
โครงการความร่วมมือไทย – KATRIN และ KIT

ตามพระราชดำริสมเด็จพระกนิษฐาธิราชเจ้า กรมสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดา ฯ สยามบรมราชกุมารี
(ประจำปี 2567)

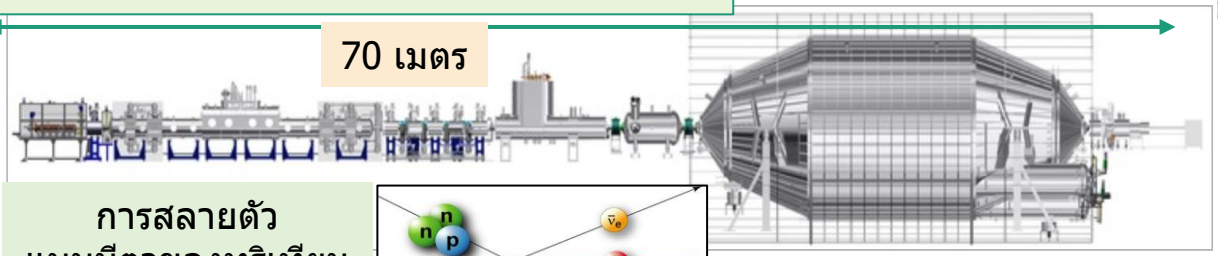
รายงานเมื่อ
10 มีนาคม 2568

หน่วยงานร่วมโครงการ
1. มูลนิธิเทคโนโลยีสารสนเทศตามพระราชดำริฯ
2. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
3. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1. KATRIN (KArlsruhe TRItium Neutrino experiment)(1/2)

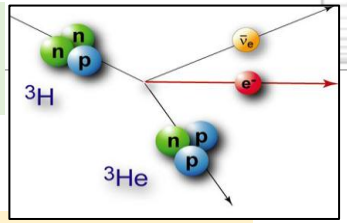
- เพื่อวัด**มวลของอิเล็กตรอนแอนตินิวทริโน** (electron antineutrino) ที่ปลดปล่อยออกมาจากการสลายตัวแบบบีตาของทริเทียมด้วยความแม่นยำที่ระดับต่ำกว่าอิเล็กตรอนโวลต์ (sub-eV)
- ตั้งอยู่ที่สถาบันเทคโนโลยีคาร์ลสรู (Karlsruhe Institute of Technology) เมืองคาร์ลสรู เยอรมนี
- มีนักวิทยาศาสตร์ วิศวกร ช่างและนักศึกษามากกว่า 150 คนจาก 23 สถาบัน**ใน 7 ประเทศ ได้แก่ เยอรมนี รัสเซีย สาธารณรัฐเช็ก สเปน อิตาลี ไทย และ สหรัฐอเมริกา**
- อุปกรณ์สำคัญ**คือ สเปกโทรมิเตอร์ หนัก 200 ตัน** ติดตั้งและผ่านการทดสอบจนสมบูรณ์เมื่อค.ศ. 2015
- การทดลองเริ่มเมื่อปลายปีค.ศ. 2016 และเปิดตัวเป็นทางการราวกลางปีค.ศ. 2018 ด้วยการสลายตัวของทริเทียมเป็นครั้งแรกและมี**การวัดผลทางวิทยาศาสตร์ครั้งแรกเมื่อเมษายน 2019 และมีแผนที่จะทดลองต่อไปอีก 5 ปี ปัจจุบันในปีค.ศ. 2025 ได้ทำการเก็บข้อมูลแล้ว 14 ครั้ง (KNM1-11)**

สมเด็จพระกนิษฐาธิราชเจ้า
กรมสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ
สยามบรมราชกุมารี
เสด็จทอดพระเนตร
KATRIN Experiment,
KIT, Karlsruhe, Germany
วันที่ 28 มิ.ย. 2562



การสลายตัว
แบบบีตาของทริเทียม

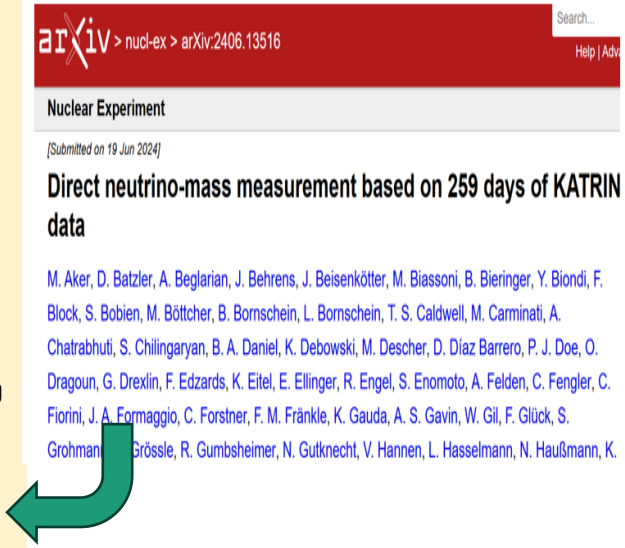
$$^3H \rightarrow {}^3He + e^- + \bar{\nu}_e$$



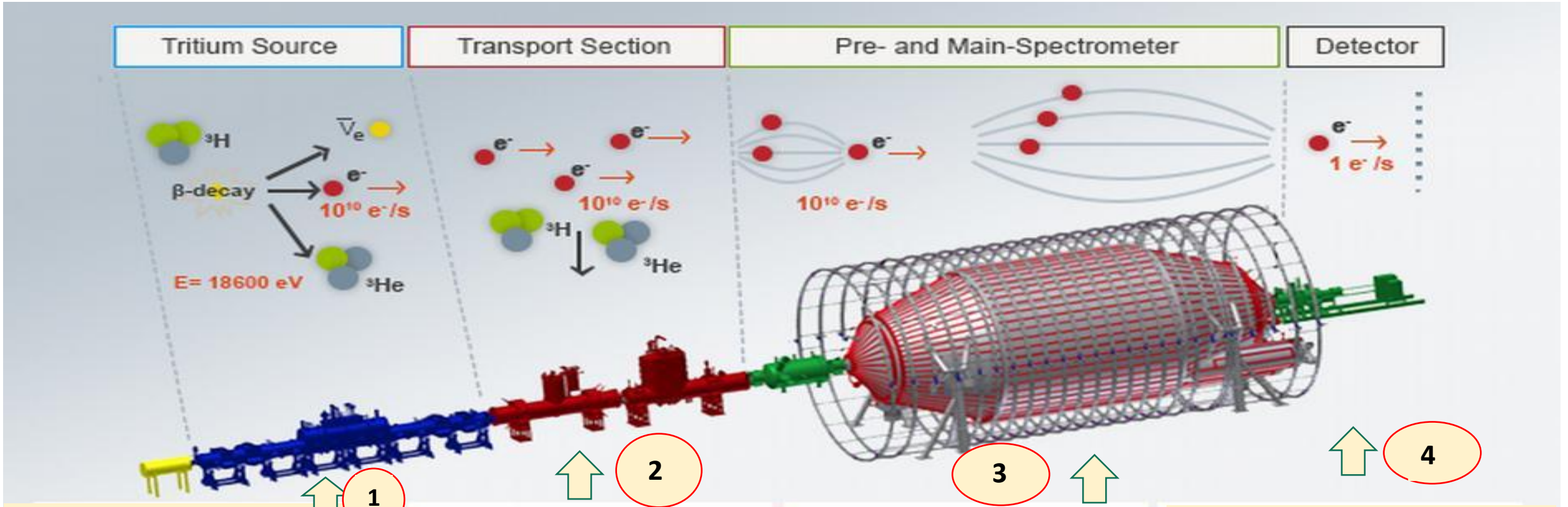
สเปกโทรมิเตอร์

มวลนิวทริโน

- นิวทริโนมีมากมายในเอกภพนี้ที่มีมากกว่าก็เพียงโฟตอนของแสง หากเรามีแว่นตาวิเศษมองเห็นนิวทริโนได้ เราก็จะเห็นนิวทริโนเหมือนเห็นแสงเต็มไปหมด
- นิวทริโนจากนอกโลกมาจากดวงอาทิตย์ ซูเปอร์โนวาและจากแหล่งอื่นที่ยังไม่ทราบอีก บนโลกเรามาจากโรงไฟฟ้าปรมาณูเป็นสำคัญ
- เดิมนักวิทยาศาสตร์เชื่อว่านิวทริโนไร้มวลเหมือนโฟตอนจึงทำให้เราพบมากมายเพราะความไร้มวลจึงเคลื่อนเร็วเท่าแสงไปทั่วเอกภพ
- ใน ค.ศ.2015 มีผู้ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ที่พบว่า นิวทริโนขณะเดินทาง เช่น จากดวงอาทิตย์มายังโลกเรา เป็นต้น สามารถเปลี่ยนชนิดไปมาได้ (นิวทริโนมี 3 ชนิด คือ อิเล็กตรอนนิวทริโน มิวออนนิวทริโน และทาวนิวทริโน) แสดงว่านิวทริโนมิได้ไร้มวล
- มวลของนิวทริโนนั้นต่ำกว่าอิเล็กตรอนราว 500,000 เท่า (electron mass 0.511 MeV/c^2) วัดได้ยากและยังไม่ทราบค่าที่แท้จริง
- การทดลองที่ **Mainz (เยอรมนี) และ Troitsk (รัสเซีย)** พบเพดานของมวลของอิเล็กตอนแอนตินิวทริโนว่าไม่เกิน 2.3 eV/c^2
- KATRIN ซึ่งจะใช้วิธีการวัดที่คล้ายกันจะค้นหา **(1) เพดานมวลที่ต่ำลงไปอีก 10 เท่า กล่าวคือที่ 0.2 eV/c^2 (90% CL (confidence interval)) หรือ (2) พบค่าที่แท้จริงหากมวลมากกว่า 0.35 eV/c^2** อุปกรณ์การทดลองที่ KATRIN จึงต้องสร้างให้มีสมรรถนะสูงกว่าอดีตขึ้นไป 20 เท่าจึงจะทำได้
- **การเผยแพร่ล่าสุดเมื่อ 19 มิถุนายน 2024 รายงานว่า เพดานมวลของอิเล็กตรอนแอนตินิวทริโนอยู่ที่ ที่ 0.45 eV/c^2 (90% CL)**



1. KATRIN(2/2): การทำงานของอุปกรณ์



- การสลายตัวของทริเทียมจะปลดปล่อยอิเล็กตรอนและอิเล็กตรอนแอนตินิวทริโน
- อิเล็กตรอนแอนตินิวทริโนหายตัวไปอย่างรวดเร็วตรวจวัดไม่ได้
- ทริเทียมและฮีเลียมจะถูกสูบออกไป
- อิเล็กตรอนเริ่มเดินทางไปสู่หน่วยตรวจวัด

- อิเล็กตรอนจะเดินทางต่อไปยังสเปกโทรมิเตอร์โดยมีสนามแม่เหล็กนำไป
- ทริเทียมและฮีเลียมที่เหลือก็จะถูกสูบออกไปอีกเพื่อไม่ให้เดินทางเข้าไปในในสเปกโทรมิเตอร์

- กำแพงศักย์ไฟฟ้าสถิตย์จะกรองไม่ให้อิเล็กตรอนพลังงานจลน์ต่ำผ่านไปได้
- อิเล็กตรอนที่มีพลังงานจลน์สูงมากพอเท่านั้นจึงสามารถผ่านสเปกโทรมิเตอร์ไปยังหน่วยตรวจวัดที่อีกปลายหนึ่งของสเปกโทรมิเตอร์ได้

- อิเล็กตรอนมาถึงปลายทางและถูกนับจำนวนด้วยเครื่องตรวจวัด
- จำนวนที่นับได้ต่อวินาทีขึ้นอยู่กับศักย์ไฟฟ้าในสเปกโทรมิเตอร์ที่ยอมให้อิเล็กตรอนผ่านได้
- ผลลัพธ์สุดท้ายจะได้สเปกตรัมพลังงานของอิเล็กตรอน

2. กิจกรรม ปี พ.ศ. 2567 (1/4):ภาคีไทย – แคทริน (Thai-KATRIN consortium) และทุนสนับสนุนวิจัย

2.1 ทุนสนับสนุนจาก PMUB เพื่อ (1) ส่งนักศึกษาและนักวิจัยไปร่วมงานที่ KIT (2) จัดอบรมให้ความรู้ด้านนิวทริโน (3) สร้างอุปกรณ์ตรวจวัดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่

1) โครงการ "ภาคีฟิสิกส์พลังงานสูงไทย: พรมแดนพลังงานสูง สสารมืด และนิวทริโน" **2,500,000 บาท พ.ศ.2566** (เม.ย. 66 ถึง มี.ค. 67 และขยายถึง ก.ย. 67)
2) โครงการพัฒนา**ระบบตรวจวัดสนามแม่เหล็กสำหรับการทดลองที่ KATRIN** และ**วิจัยด้านฟิสิกส์ของนิวทริโนร่วมกับ KATRIN และ JUNO** เพื่อยกระดับงานวิจัยขั้นแนวหน้าฟิสิกส์พลังงานสูงของไทย **3.2 ล้านบาท ในปี พ.ศ. 2567** (เม.ย. 67 ถึง มี.ค. 68)

- คณะนักวิจัยไทยภาคีไทย-แคทรินจากจุฬาฯ และมทส.

ผศ.ดร.นฤมล สุวรรณจันทร์ดี (จฬ.)
(PI for Thai- KATRIN

รศ.ดร.อรรถกฤต ฉัตรภูติ (จฬ.)

รศ.ดร.อุดมศิลป์ ปิ่นสุข (จฬ.)

ผศ.ดร.ชิโนรัตน์ กอบเดช (มทส.)

ผศ.ดร.ขรรค์ชัย โกศลทองกี่ (มทส.)

อ.ดร.วรินทร ศรีทะวงศ์ (มทส.)

2.2 การอบรม THAI-KATRIN School on Neutrino Physics ระหว่าง13-17 พ.ค. 67 มทส ร่วมกับจุฬา และ KATRIN Collaboration ณ มทส นักศึกษาและนักวิจัยเข้าร่วมการอบรม 33 คนจาก 5 ประเทศ ได้แก่ ไทย (27) เยอรมนี (2) ฝรั่งเศส (1) อินโดนีเซีย (2) และ อินเดีย (1)

- วิทยากร (ผู้เชี่ยวชาญจาก KATRIN)
  1) Dr. Martin Descher (KIT)
  2) Dr. Frank Edzards (TU Munich)
  3) Dr. Enrico Ellinger (U Wuppertal)
  4) Dr. Alexey Lokhov (KIT)
  5) Dr. Alexander Marsteller (KIT)
  6) Sonja Schneidewind (U Münster)
- หัวข้อการบรรยาย
  1) Basic Knowledge of Neutrino
  2) Introduction to KATRIN Experiment
  3) Sterile Neutrino
  4) Magnetic Field Measurement
  5) Simulation for KATRIN & TRISTAN
  6) Experimental Methods for Data Analysis

2. กิจกรรม ปี พ.ศ. 2567 (2/2): ภาคีไทย-แคทริน(Thai-KATRIN consortium)และทุนสนับสนุนวิจัย

2.3 47th KATRIN Collaboration Meeting วันที่ 30 ก.ย. – 2 ต.ค. 67 ณ สถาบัน KIT, Karlsruhe เพื่อประชุมและหารือกับนักวิจัยที่สนใจในการศึกษาฟิสิกส์ของ sterile neutrino

1) นักวิจัยไทย 5 คน รศ.ดร.อรรถกฤต ฉัตรภูติ (จุฬา) ผศ.ดร.นฤมล สุวรรณจันทร์ดี (จุฬา) และนายจักรภัทร สียางนอก (จุฬา) อ.ดร.วรินทร ศรีทะวงศ์ (มทส)และนักศึกษานายจุลนันทน์ ทรงวัฒนา (มทส)
2) นักวิจัย KATRIN 3 คน Dr. Martin Descher Dr. Alexey Lokhov และ Joscha Lauer

2.4 Remote shift takers เมื่อ 2 ก.พ. 66 Dr. Diana Parno (Carnegie Mellon University, CMU) ส่งเมลถามถึงความเป็นไปได้ที่จะให้นักวิจัยไทยช่วย take remote monitoring shifts โดยแต่ละ shift ใช้เวลา 1 สัปดาห์ นักวิจัยทำหน้าที่จดบันทึกและรายงานผลหรือปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการเดินเครื่องให้ที่ประชุม KATRIN general call ทราบ หลังจากเสร็จสิ้นแต่ละ shift

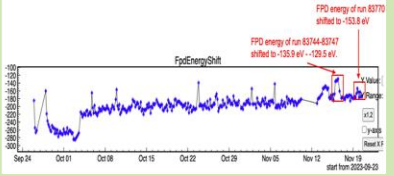
ผู้เข้าร่วมทำหน้าที่นี้ 4 คน

1) รศ. ดร.อุดมศิลป์ ปิ่นสุข (จฬ.)
2) อ.ดร.วรินทร ศรีทะวงศ์ (มทส.)
3) นายจักรภัทร สียางนอก (จฬ.)
4) นายจุลนันทน์ ทรงวัฒนา (มทส.)

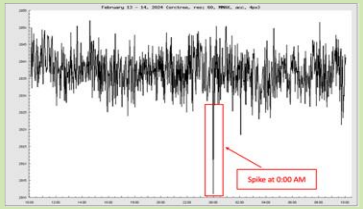
Take shifts แล้ว 5 ช่วง (ปี 66 รวม 2 ช่วง และปี 67 รวม 3 ช่วง)

1) 22 มีนาคม – 18 เมษายน 2566 ข้อมูล KNM8 – KNM9
2) 10 สิงหาคม – 10 ตุลาคม 2566 ข้อมูล KNM10 – KNM11
3) 14 กุมภาพันธ์ – 8 เมษายน 2567 ข้อมูล KNM12
4) 17 เมษายน – 12 มิถุนายน 2567 ข้อมูล KNM13
5) 25 กรกฎาคม – 14 กันยายน 2567 ข้อมูล KNM14

Remote shift 67	KNM 11	KNM 12	KNM 13	KNM14
ข้อมูลถูกอัพเดทช้า		FBM	FBM	
ข้อมูลบางช่วงเวลาหายไป	FBM (Forward Beam Monitor) DAQ → dead-time	FBM DAQ → dead-time	FBM, BIXS HV K65, HV tank potential	
ข้อมูลแกว่งสูงหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ย	FPD energy shift (รูป ก)	BIXS (Beta Induced X-ray Spectrometry) (รูป ข)	BIXS, FPD	BIXS

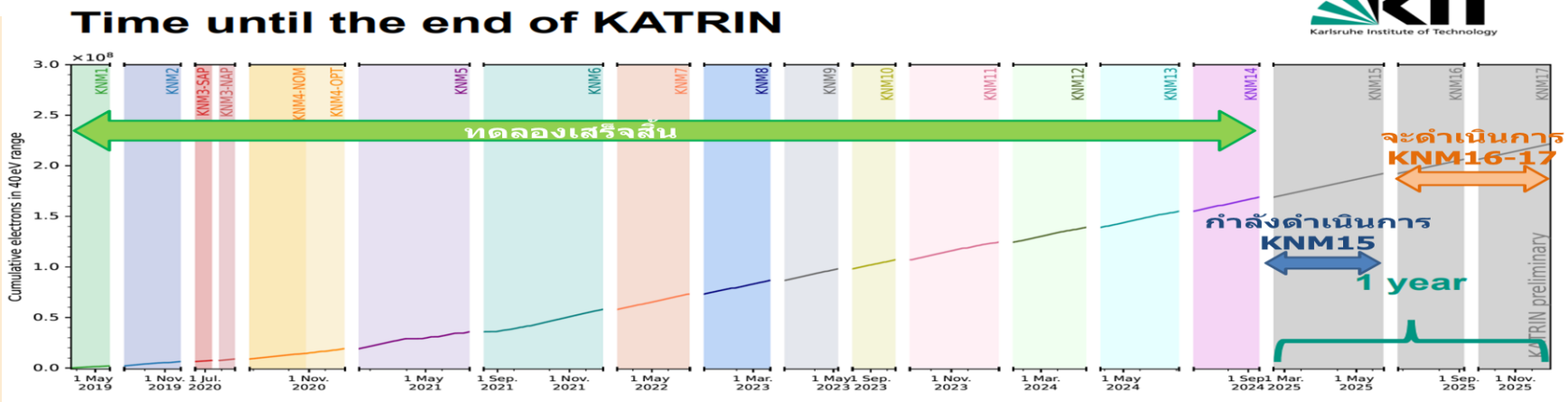


รูป ก ตัวอย่างค่า FPD energy shift สูงกว่าปกติในกรอบสีแดง



รูป ข ตัวอย่างสัญญาณ BIXS มีการแกว่งที่ให้ค่าต่ำกว่าปกติ

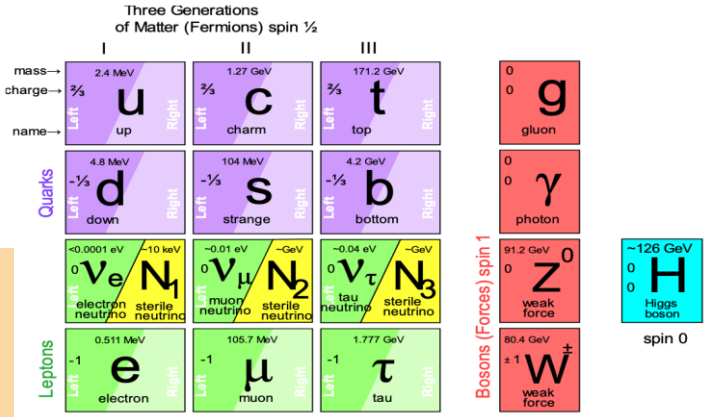
2.5 แผนการทดลอง KATRIN : (1) การทดลองที่ทำแล้วเสร็จ KNM1-KNM14: May 2019 – Sept 2024 (2) การทดลองที่กำลังดำเนินการ KNM 15: (3) การทดลองที่จะดำเนินการ KNM16 และ KNM17: จะเก็บข้อมูลให้ได้ตามแผนที่วางไว้ โดยคาดการว่าจะสิ้นสุดการวัดในช่วงเดือนพฤศจิกายน 2025 **<u>จากนั้นจะเริ่มการทดลอง TRISTAN เป็นลำดับถัดไป</u>**



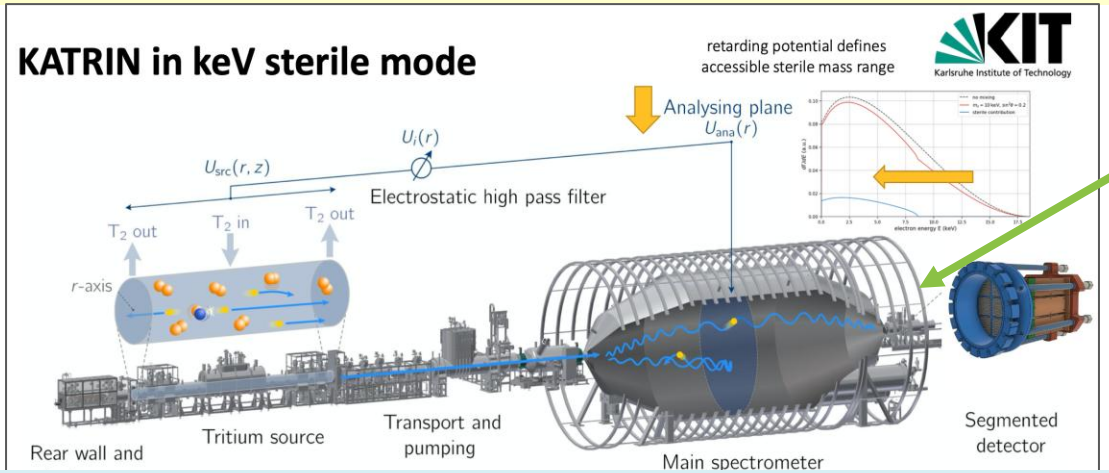
3.กิจกรรม ปีพ.ศ. 2567(1/1):**TRISTAN เพื่อการค้นหาอนุภาค Sterile Neutrinos**

3.1 **<u>สเตอไรล์นิวทริโน</u>** ในปีค.ศ. 2005 Mikhail Shaposhnikov และ Takehiko Asaka นักฟิสิกส์อนุภาคทฤษฎีรัสเซียและญี่ปุ่นตามลำดับพยายามเชื่อมโยงแบบจำลองมาตรฐานกับสสารมืด ได้เสนอว่าเอกภพควรจะมีอนุภาคสเตอร์ไรล์นิวทริโนอีก 3 ตัวนอกเหนือจาก อิเล็กตรอนนิวทริโน มิวออนนิวทริโนและทาวนิวทริโนที่รู้จักกันในปัจจุบัน

- สเตอไรล์นิวทริโนคืออะไร? คุณสมบัติมีดังนี้
  - ✓ **สปินตามกฎมือขวา**ต่างจากนิวทริโนที่รู้จักมาแล้วซึ่งมีสปินตามกฎมือซ้าย
  - ✓ ทำอันตรกิริยาด้วย**แรงโน้มถ่วงเท่านั้น**(ซึ่งคล้ายกับอนุภาคของสสารมืด)
  - ✓ มีมวลน้อยที่สุดใน**ระดับ keV** จนมีอายุยาวพอที่จะเป็นตัวแทนของอนุภาคสสารมืดที่พบในเอกภพ

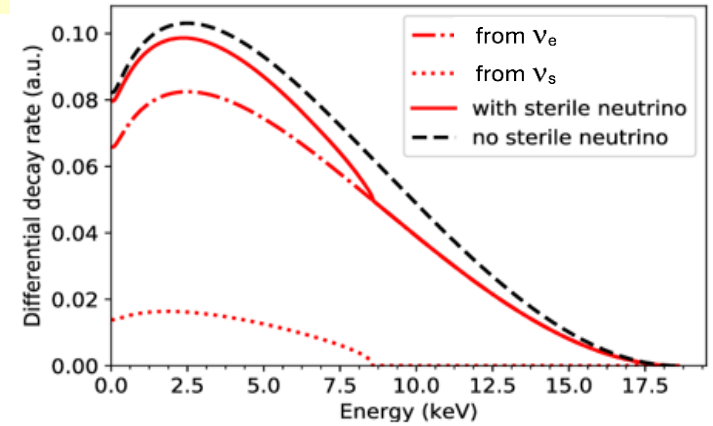


แบบจำลองเหนือแบบจำลองมาตรฐานของฟิสิกส์อนุภาค ที่รวมอนุภาคสเตอร์ไรล์นิวทริโน

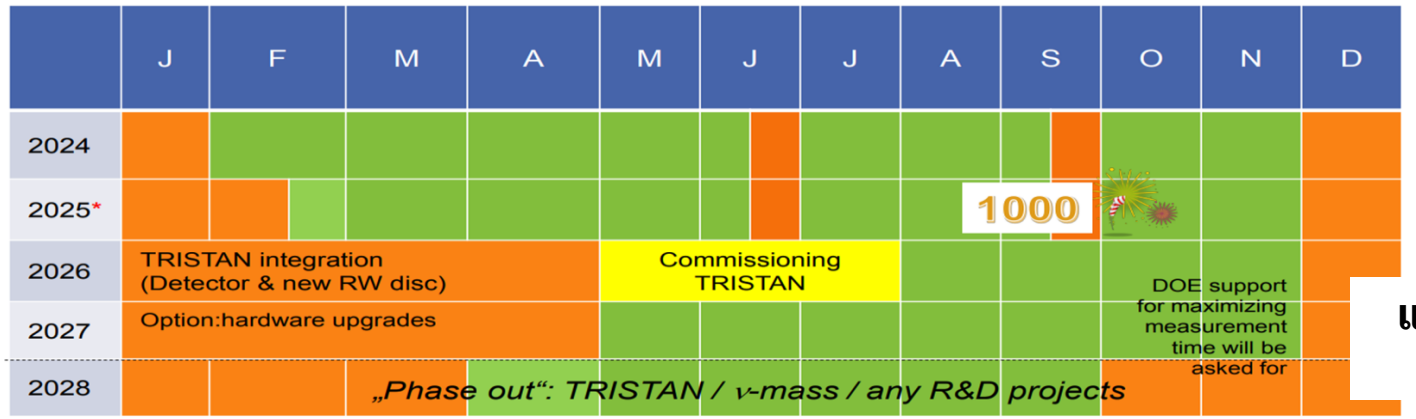


ระบบตรวจวัดพลังงานของอิเล็กตรอนเพื่อค้นหาสเตอร์ไรล์นิวทริโนที่ KATRIN

- การค้นหาทำได้โดยการพัฒนาหน่วย**<u>ตรวจวัดอิเล็กตรอน(main Spectrometer)</u>** ให้สามารถวัดสเปกตรัมพลังงานของอิเล็กตรอนด้วย**<u>ความละเอียดที่สูงมากจนสามารถมองเห็นร่องรอยของอนุภาคสเตอร์ไรล์ที่ทิ้งไว้กับอิเล็กตรอนและคำนวณหาค่ามุมผสม(mixing angle)ระหว่างอิเล็กตรอนนิวทริโนและเสตอไรล์นิวทริโนได้ละเอียดถึง $\sin^2\theta < 10^{-6}$</u>**
- ต้องมีการอัพเกรดหน่วยตรวจวัดให้เป็น**<u>silicon drift detector (SDD)</u>**ที่มีความละเอียดสูงมากจนสามารถตรวจวัดปริมาณอิเล็กตรอนจำนวนมหาศาลเพื่อวัดสเปกตรัมของพลังงานอิเล็กตรอน

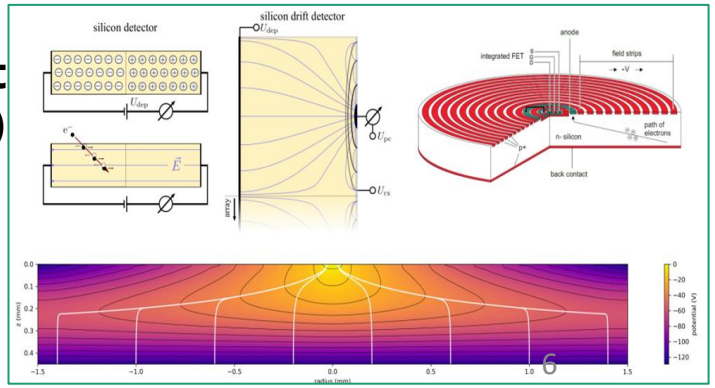


สเปกตรัมพลังงานของอิเล็กตรอน เปรียบเทียบกรณีที่มีสเตอร์ไรล์นิวทริโน (เส้นสีแดง) กับกรณีที่ไม่มี (เส้นประดำ)



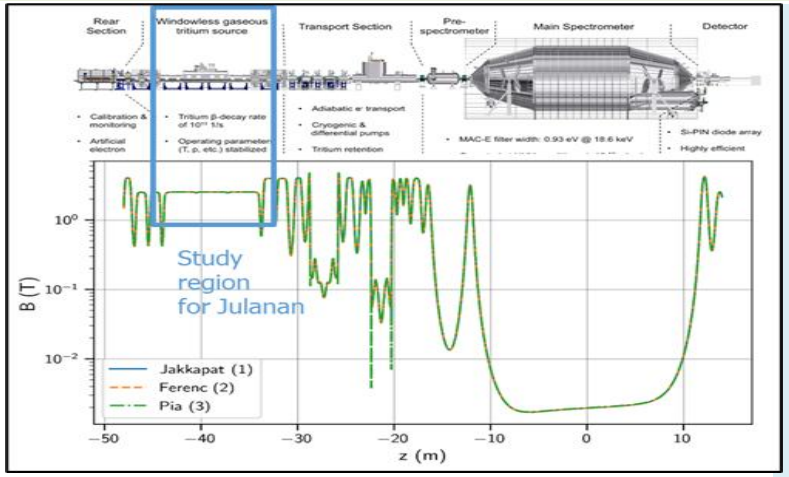
แผนการทดลอง TRISTAN

silicon drift detector (SDD)

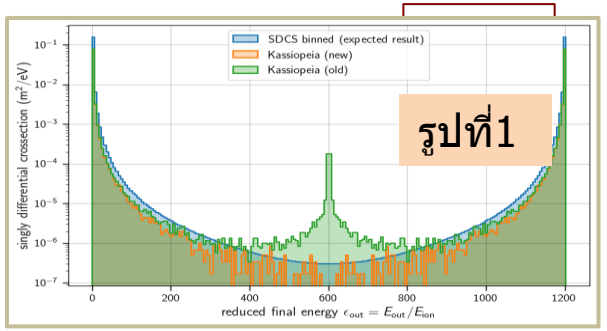


3.กิจกรรม ปีพ.ศ. 2567(1/2): **TRISTAN เพื่อการค้นหาอนุภาค Sterile Neutrinos**

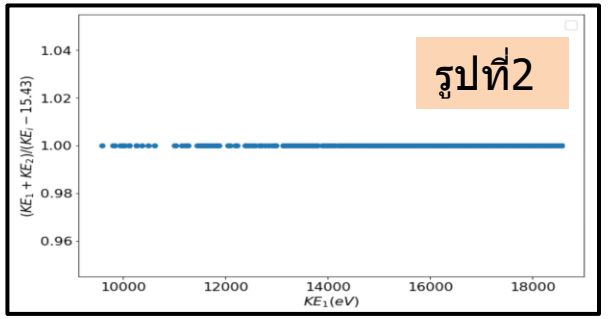
3.2 งานวิจัยของนายจุลนันทน์ ทรงวัฒนา ปี 2567 ร่วมกับ อ.ดร.วรินทร ศรีทะวงศ์ (SUT) และ Dr. Martin Descher (KIT) **"การกระเจิงของอิเล็กตรอนภายในกับดักสนามแม่เหล็กในแหล่งกำเนิดทริเทียมสำหรับโครงการทริสตัน"** เพื่อศึกษาการสูญเสียพลังงานของอิเล็กตรอนที่กระเจิงจากโมเลกุลทริเทียมจนสามารถหลุดออกจากกับดักสนามแม่เหล็กภายในแหล่งกำเนิดทริเทียม



- การศึกษาพบว่าบริเวณแหล่งกำเนิดทริเทียม **โปรแกรม KASSIOPEIA** ให้ผลที่ไม่ถูกต้อง
  1. ค่าพลังงานหลังจากการกระเจิงของอิเล็กตรอนปฐมภูมิแบบมีการแตกตัวของไอออน (final energy of primary electron in ionization) (รูปที่ 1) ผลเดิม (สีเขียว) หลังจากปรับแก้ (สีส้ม) ซึ่งสอดคล้องกับค่าทางทฤษฎี (สีฟ้า)
  2. เดิมอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (KE2) ที่มาจากการแตกตัวของทริเทียมมีค่าพลังงานและโมเมนตัมแบบสุ่ม ปรับแก้โดยให้พลังงานของอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (KE2) ขึ้นอยู่กับพลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิที่มาจากการสลายของโมเลกุลทริเทียม (KE1) ดังสมการ KEi = KE1 + KE2 + 15.43 เมื่อ KEi คือ พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนปฐมภูมิมีค่า 18,575 eV และ 15.43 eV คือ พลังงานที่ทำให้โมเลกุลทริเทียมแตกตัวเป็นอิออน รูปขวาแสดงอัตราส่วนพลังงาน (KE1 + KE2) ต่อ (KEi – 15.43) ที่ค่า KE1 ต่าง ๆ (รูปที่ 2)

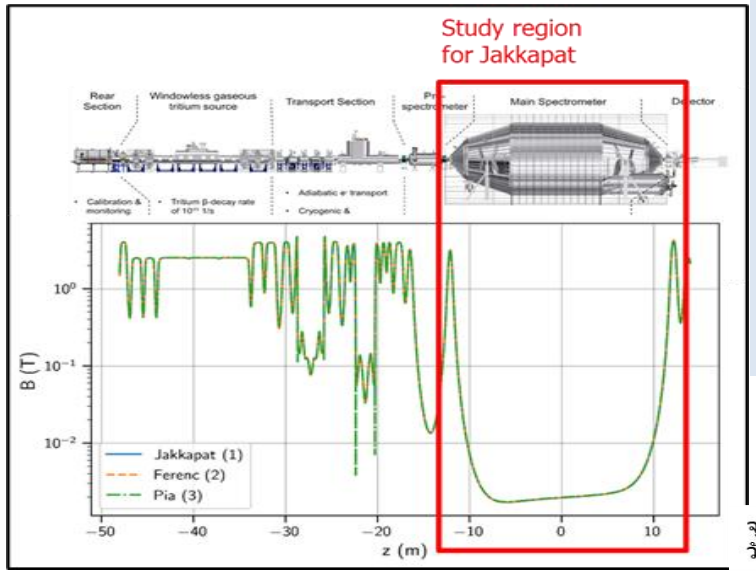


รูปที่1

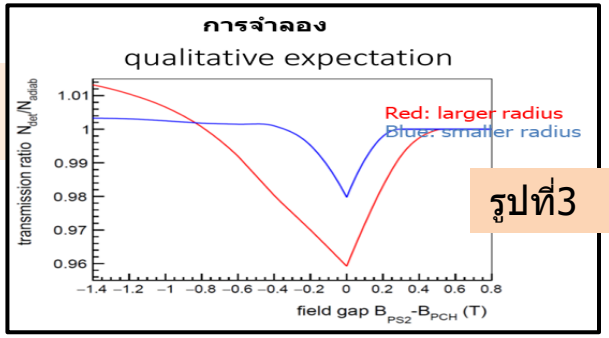


รูปที่2

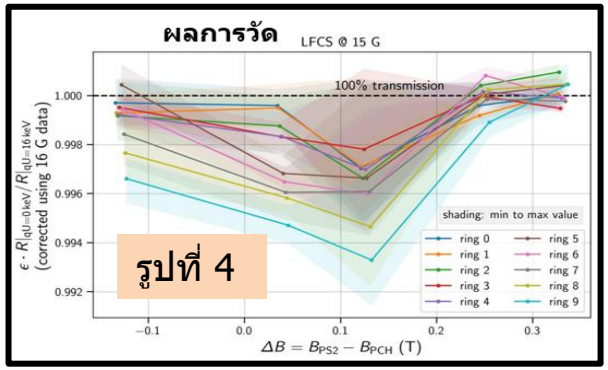
3.3 ก.ย. 2566 - ส.ค. 2567 งานวิจัยของนายจักรภัทร ศรียางนอก ปี 2567 ร่วมกับ Ferenc Gluck, Rudolf Sack, and Martin Descher (KIT) การออกแบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับการทดลองทริสแตน (Electromagnetic design for TRISTAN)



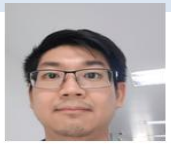
- ศึกษาการสลับค่าสนามแม่เหล็กสูงสุดระหว่างทางเข้า (BPS2) และทางออก (BPCH) ของเครื่องสเปกโตรมิเตอร์หลัก (Main Spectrometer, MS) พบว่าอิเล็กตรอนทั้งหมดที่เคลื่อนที่เข้า MS แม้ว่าจะมีการเคลื่อนที่แบบนอนอะเดียแบติก (non-adiabatic) ก็สามารถเคลื่อนที่ไปยังเครื่องตรวจวัด (detector) ได้ทั้งหมด โดยเราทราบว่าอิเล็กตรอนตัวใดมีการเคลื่อนที่แบบ adiabatic หรือ non-adiabatic ใน MS
- ผลจากการจำลอง (รูปที่3) สอดคล้องกับผลการวัดของ KATRIN (รูปที่4) โดยแบบจำลองนี้จะนำใช้ในการออกแบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับการทดลอง TRISTAN ต่อไป



รูปที่3



รูปที่ 4


จุลนันทน์ ทรงวัฒนา(มทส.)

จักรภัทร สียางนอก (จพ.)

อ. ดร.วรินทร ศรีทะวงศ์ (มทส.)

Dr. Martin Descher Postdoc (KIT IAP)

Dr. Ferenc Gluck นักวิจัย (KIT IAP)

Dr. Rudolf Sack Postdoc (KIT IAP)

3. กิจกรรม ปี พ.ศ. 2567(1/3): TRISTAN เพื่อการค้นหาอนุภาค Sterile Neutrinos

3.4 ส.ค. 2567-2568 งานวิจัยของนายจักรภัทร สียางนอก, Prof. Ignatios Antoniadis, ดร.อรรถกฤต ฉัตรภูติ, Dr. Hiroshi Isono (CU) Dr. Alexey Lokhov, Joscha Lauer และ Shailaja Mohanty (KIT) "มิติพิเศษและการทดลองแคทริน(Extra Dimension and KATRIN Experiment)"

Prof. Ignatios Antoniadis (จฬ.)

จักรภัทร สียางนอก (จฬ.)

รศ. ดร.อรรถกฤต ฉัตรภูติ (จฬ.)

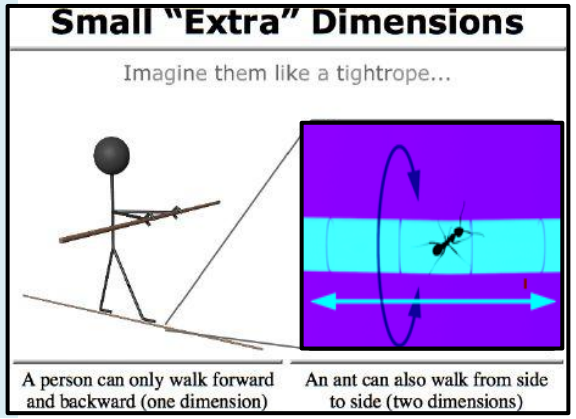
Dr. Hiroshi Isono (จฬ.)

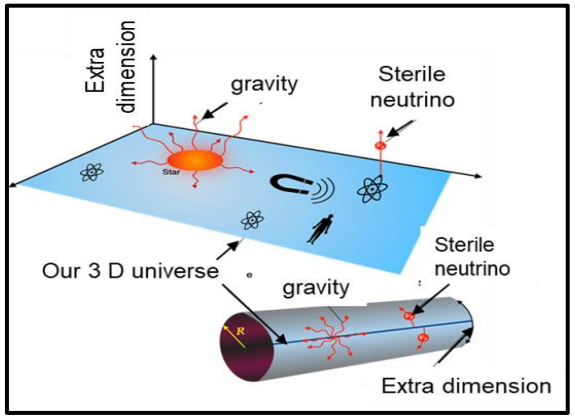
Dr. Alexey Lokhov (KIT)

Joscha Lauer (KIT)

Shailaja Mohanty (KIT)

- ทฤษฎีฟิสิกส์เหนือแบบจำลองมาตรฐานกล่าวว่าจักรวาลอาจดำรงอยู่ในอวกาศ (space) ที่มีมากกว่า 3 มิติ (กว้าง ยาว สูง) แต่เรายังหามิติที่ 4 ทางปฏิบัติไม่พบ
- คนที่เดินไต่เส้นเชือกก็คิดว่าทิศของเขามีมิติเดียวเท่านั้นเดินไปข้างหน้าหรือถอยหลัง แต่มดบอกว่ามี 2 มิติ เพราะมันสามารถเดินตามแนวเส้นรอบวงของเชือกได้ด้วย
- ในอวกาศนั้นคนเราเห็นจักรวาลเพียง 3 มิติแสดงด้วยเส้นตามทรงกระบอกและระนาบแบน โดยยังมีอีกหนึ่งมิติพิเศษในอวกาศที่ยังไม่ถูกตรวจพบ มีเพียง "แรงโน้มถ่วง" และอนุภาคที่ไม่ตอบสนองกับแรงนิวเคลียร์และแรงไฟฟ้า เช่น สเตอร์ไรล์นิวทริโน เท่านั้นที่สามารถแพร่กระจายไปทั่วทุกมิติได้
- การหนีรอดออกไปยังมิติพิเศษนั้นสเตอร์ไรล์นิวทริโนอาจทิ้งร่องรอยไว้ในสเปกตรัมการสลายตัวให้อนุภาคบีตา การตรวจสอบการมีมิติพิเศษผ่านการวิเคราะห์ข้อมูลและแบบจำลองของสเปกตรัมของอิเล็กตรอนของ KATRIN จึงอาจเป็นไปได้





4.กิจกรรม ปี พ.ศ. 2567 (1/1): การปรับปรุงหน่วยวัดสนามแม่เหล็กของTRISTAN

เนื่องจาก sensor ที่ใช้ในการวัดสนามแม่เหล็กในบริเวณ Main Spectrometer (MS) ของ KATRIN วัดได้ไม่เกิน 10 G ไม่สามารถใช้กับ TRISTAN ได้ จึงจำเป็นต้องพัฒนาขึ้นไปถึง 30 G แบ่งภารกิจออกเป็น

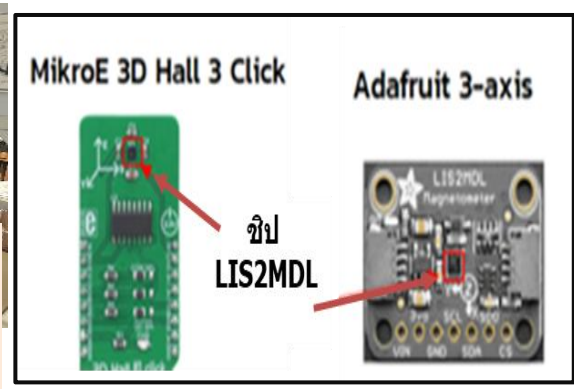
(1) การพัฒนาชุดตรวจวัดสนามแม่เหล็ก **30 G ใช้ที่ TRISTAN**

(2) การนำต้นแบบ mobile device วัดสนามแม่เหล็กจาก KATRIN มาศึกษาที่ มทส.**เพื่อประโยชน์งานอื่นเช่น JUNO เป็นต้น** แบ่งออกเป็น (2.1) ชุดตรวจวัดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ในแนววงกลมระนาบดิ่ง (vertical ring) และ (2.2) ชุดตรวจวัดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ในแนวพิกัด (x,y,z)

4.1 การพัฒนาชุดตรวจวัดสนามแม่เหล็กวัดค่าสนามแม่เหล็ก 30 G ใช้ที่ TRISTAN

- **ระยะที่ 1 (11 พฤศจิกายน – 14 ธันวาคม 2566) วิจัย ณ KIT** ศึกษาการตั้งค่าของ sensor ชื่อ Adafruit LIS2MDL ซึ่งใช้ชิป LIS2MDL ในการตรวจวัดสนามแม่เหล็ก แล้วทำการเขียนโปรแกรมเพื่ออ่านค่าอุณหภูมิ และอ่านค่าต่าง ๆ ของสนามแม่เหล็ก ทำการเปรียบเทียบ sensor Adafruit LIS2MDL กับ MikroE LIS2MDL ซึ่ง sensor ทั้งสองใช้ชิปแบบเดียวกัน ต่างกันที่การประกอบลงในแผงวงจรที่มีลักษณะต่างกัน พบว่า **MikroE LIS2MDL มีความสามารถในการอ่านค่าสนามแม่เหล็กที่แม่นยำกว่า**

นายวิทพงษ์ คล้ายกบิลท์ และ นายพชรพล ธีรเศรษฐ์ นักศึกษา ป.โท (มทส.) ทำวิจัย ณ KIT

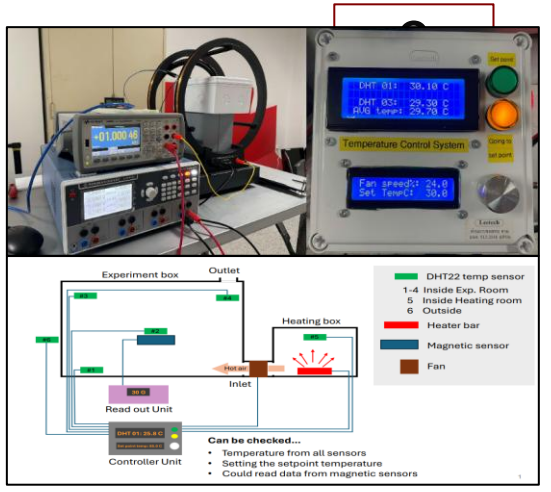


4.กิจกรรม ปี พ.ศ. 2567 (1/2): การปรับปรุงหน่วยวัดสนามแม่เหล็กของTRISTAN

ระยะที่ 2 หลังจากกลับมาจาก KIT ศึกษาเปรียบเทียบ sensor ชื่อ MiKroE สองรุ่น ได้แก่ LIS2MDLและ AK09970N

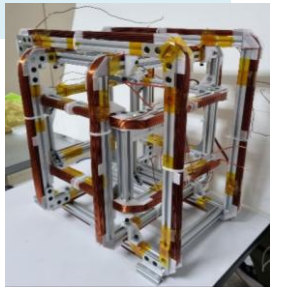
- พบว่า sensor LIS2MDL มีช่วงในการวัดอยู่ที่ 50 G มีความละเอียดที่ 0.15 μT ซึ่งละเอียดมากกว่า AK09970N ที่มีช่วงการ วัด 360 G และความละเอียดที่ 1.10 μT นอกจากนี้เซนเซอร์ LIS2MDL ยังสามารถวัดอุณหภูมิในช่วง -40 ถึง 85 องศาเซลเซียส ที่จำเป็นต่อการชดเชยค่าสนามแม่เหล็กที่อ่านได้อีกด้วย **<u>จึงสรุปว่าเลือกใช้ MikroE รุ่น LIS2MDL</u>** ในการพัฒนาเพื่อใช้วัดสนามแม่เหล็กภายใต้โครงการ TRISTAN
- อย่างไรก็ดีพบว่าค่าสนามแม่เหล็กที่ได้จาก sensor MikroE LIS2MDL ช่วงอุณหภูมิ 20 ถึง 35 องศาเซลเซียส ที่อ่านได้เปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น **<u>จึงสรุปอีกด้วยว่ายังต้องศึกษาเปรียบเทียบ sensor เดียวกันนี้กับตัวอื่น ๆ</u>** เพื่อสังเกตและสรุปพฤติกรรมต่อไปอีก

นายภาสกร ภูมรา นักวิจัยหลังป.โท (มทส.) พัฒนาชุดควบคุมอุณหภูมิในการทดสอบ sensor



- เนื่องจากขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก (Helmholtz coils) ที่ใช้ทดสอบมีเพียงหนึ่งมิติ จึงต้องมีการเปลี่ยนตำแหน่งของเซนเซอร์ในทดสอบแต่ละครั้งซึ่งอาจส่งผลต่อการสอบเทียบได้
- ทีมวิจัยจึงออกแบบและสร้าง**<u>ระบบขดลวด 3 มิติ</u>** ทรงสี่เหลี่ยมขนาด 30cm x 36cm x 42cm สร้างสนามแม่เหล็กสูงถึง 30 G ใช้ในการทดสอบ ขณะนี้อยู่ระหว่างการสอบเทียบค่าสนามแม่เหล็กของขดลวดโดยใช้อุปกรณ์ฟลักซ์เกท (Fluxgate) ที่ได้รับอนุเคราะห์ยืมจาก KIT

นายเทเลอร์ แยน นักวิจัยหลังป.โท (PSI) พัฒนาระบบ Helmholtz Coils 3 มิติ ทรงสี่เหลี่ยม

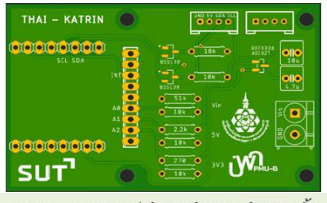


Helmholtz Coils 3 มิติจริงที่สร้างแล้วเสร็จ

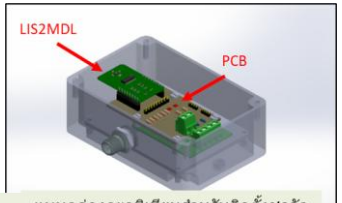
- ค่าสนามแม่เหล็กจาก MiKroE LIS2MDL ทั้ง 3 แกน จะต้องถูกส่งค่าเข้าไปยังระบบกลางของโครงการ TRISTAN เพื่อใช้ในการคำนวณ นักวิจัยจึงต้องออกแบบแผ่น วงจรพิมพ์ (PCB) และกล่องอลูมิเนียมต่อกับคอนเนคเตอร์เพื่อรับส่งสัญญาณกับระบบเดิมได้ การออกแบบแล้วเสร็จโดยผ่าน**<u>ความเห็นชอบของนักวิจัยจาก KIT</u>** แล้ว และอยู่ระหว่างขั้นตอนการผลิตต่อไป

นายวิทพงษ์ คล้ายกบิลท์ นักศึกษา ป.โท (มทส.)

นายภาสกร ภูมรา นักวิจัยหลังป.โท (มทส.) ออกแบบวงจร PCB



แผ่นวงจรพิมพ์ (PCB) สำหรับติดตั้ง sensor MiKroE LIS2MDL



แบบกล่องอะลูมิเนียมสำหรับติดตั้งชุดวัดสนามแม่เหล็ก และแผงวงจรที่ออกแบบ

แผนการต่อไปในส่วนของการพัฒนาชุดวัดสนามแม่เหล็กของ TRISTAN

(1) **<u>มกราคม 2568</u>** มทส.จะส่งมอบ ชุดวัดสนามแม่เหล็กวัดสนามแม่เหล็กได้ 30 G ที่ผ่านการสอบเทียบแล้วชุดแรก จำนวน 8 ชิ้น

(2) **<u>20 มกราคม – 19 กุมภาพันธ์ 2568</u>**
นายวิทพงษ์ คล้ายกบิลท์ และนายพชรพล ธรีเศรษฐ์ เดินทางไปร่วมทำวิจัย ณ KIT โดยนำชุดวัดสนามแม่เหล็กไปติดตั้งและทดสอบการใช้กับ ระบบกลางของ TRISTAN

(3) **<u>16 - 20 กุมภาพันธ์ 2568</u>** ผศ.ดร.ขรรค์ชัย โกศลทองกี่ เดินทางไปร่วมวิจัย ณ KIT

คณาจารย์พัฒนาชุดตรวจวัดสนามแม่เหล็ก

ผศ.ดร.ขรรค์ชัย โกศลทองกี่ วิทยาศาสตร์ (มทส.)

ผศ. ดร.โศรฎา แข็งการ วิศวกรรมศาสตร์ (มทส.)

อ.ดร.จิตติมา วระกุล วิศวกรรมศาสตร์ (มทส.)

Dr.Woosik Gil Institute for Nuclear Physics,(KIT)

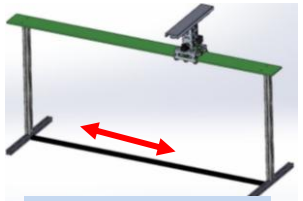
Dr.Heiko Bouquet Institute for Data Processing and Electronics, (KIT)

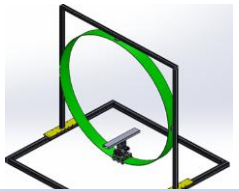
4. กิจกรรม ปี พ.ศ. 2567 (1/2): การปรับปรุงหน่วยวัดสนามแม่เหล็กของTRISTAN

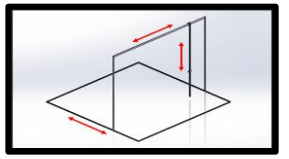
4.2 การจัดสร้างต้นแบบ mobile device เพื่อทดลอบวัดสนามแม่เหล็กโครงการ JUNO ที่มทส.

- นำความรู้การสร้างหุ่นยนต์ที่ใช้วัดสนามแม่เหล็กบริเวณ MS ของ KATRIN มาออกแบบสร้างหุ่นยนต์วัดสนามแม่เหล็กที่กระทบต่อ PMT ในห้องทดลองมืด (ในโครงการ JUNO) ณ มทส. โดยแบ่งได้ 2 ชุด
  1. ชุดตรวจวัดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ในแนวเส้นรอบวงกลมระนาบดิ่ง(vertical ring): (i) เริ่มต้นด้วยศึกษาการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์บนเส้นทางตรงซึ่งสะดวกต่อการควบคุมและปรับปรุงประสิทธิภาพ เส้นทาง 2 เมตร (ii) จากนั้นศึกษาการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เป็นวงกลมในแนวระนาบดิ่ง วงกลมนั้นมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางด้านใน 1.8 m และระนาบของวงกลมเคลื่อนที่ได้ อยู่ระหว่างการทดสอบ (นักวิจัย:นายพชรพล ธีรเศรษฐ์นักศึกษา ป.โท (มทส.))
  2. ชุดตรวจวัดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ได้ในแนว 3 แกนที่ตั้งฉากกัน (แกน x แกน y และ แกน z) สามารถระบุตำแหน่งการวัดภายในห้องทดสอบอย่างอัตโนมัติ ขณะนี้(ตุลาคม 67)อยู่ระหว่างการสั่งซื้อวัสดุต่าง ๆ เพื่อสร้างชุดตรวจวัดดังกล่าว (นักวิจัย:นายวิทพงษ์ คล้ายกบิลท์ นักศึกษา ป.โท (มทส.))

หุ่นยนต์


เคลื่อนที่แนวนอน


เคลื่อนที่รอบวงกลมในระนาบแนวดิ่ง


(แกน x แกน y และ แกน z)

5.สรุป

1. การทดลอง KATRIN (KArlsruhe TRItium Neutrino experiment) ตั้งอยู่ที่สถาบันเทคโนโลยีคาร์ลสรู เมืองคาร์ลสรู เยอรมนี เริ่มเก็บผลการทดลองเมื่อเมษายน พ.ศ.2562 จนปัจจุบัน
2. นักวิจัยมีนักวิทยาศาสตร์ วิศวกร ช่างและนักศึกษามากกว่า 150 คนจาก 23 สถาบันใน 7 ประเทศรวมทั้งประเทศไทยด้วย
3. วัตถุประสงค์หลัก เพื่อหาค่ามวลของอิเล็กตรอนแอนตินิวทริโน ที่ได้จากการสลายแบบบีตาของทริเทียม (ไอโซโทปหนึ่งของไฮโดรเจน)
4. การเผยแพร่ล่าสุดเมื่อ 19 มิถุนายน 2024 รายงานว่าเพดานมวลของอิเล็กตรอนแอนตินิวทริโนอยู่ที่ ที่ 0.45 eV/c^2 (90% CL)
5. การทราบมวลของนิวทริโนจะทำให้เราเข้าใจสาเหตุ และอาจช่วยไขปริศนาเกี่ยวกับสสารมืดและพลังงานมืดที่เป็นองค์ประกอบหลักของเอกภพด้วยก็ได้
6. นักวิจัยจากจุฬาฯ และมทส. ได้เข้าร่วม KATRIN รวมทั้งการประเมินค่าสนามแม่เหล็กในสเปกโทรมิเตอร์ โดยใช้ประสบการณ์จากการทดลอง JUNO
7. นักศึกษาระดับ ป.โท และเอก สามารถเข้าร่วมรับฟังการบรรยาย การประชุมเชิงปฏิบัติการ และการฝึกงานวิจัยระยะสั้นที่ KIT
8. หลังสถานการณ์ COVID-19 นักวิจัยไทยสามารถติดต่อกับผู้ประสานงานที่ KATRIN เมื่อมกราคม 2564 และเริ่มไปเยี่ยมเยียน KATRIN ในปี 2565 ได้แล้ว
9. หลังสิ้นสุด KATRIN ตอนปลายปี 2564 ก็จะเริ่มโครงการใหม่ในการค้นหาสเตอร์ไรล์นิวทริโนที่เรียกว่า TRitium Investigation on STerile to Active Neutrino Mixing : TRISTAN ซึ่งมีแผนจะเริ่มในปีค.ศ. 2025
10. ประเทศไทยเริ่มต้นด้วยการเข้าร่วมทำการพัฒนาชุดตรวจวัดสนามแม่เหล็กของ TRISTAN และหาค่าสนามแม่เหล็กที่เหมาะสมด้วยโปรแกรม KASSIOPEIA เพื่อการค้นหา sterile neutrino ในปี2566และทำงานต่อเนื่องจนปัจจุบัน
11. กิจกรรม ปี พ.ศ. 2567 มีความก้าวหน้าดังนี้ เกิดภาคีไทย-แคทริน, การอบรม THAI-KATRIN School on Neutrino Physics ที่ประเทศไทย, 47th KATRIN Collaboration Meeting ที่ KIT, Remote shift takers จากประเทศไทย, วิจัยการกระเจิงของอิเล็กตรอนภายในกับดักสนามแม่เหล็กที่ KATRIN, ศึกษาการสลับค่าสนามแม่เหล็กสูงสุดระหว่างทางเข้า (BPS2) และทางออก (BPCH) ของเครื่องสเปกโตรมิเตอร์หลักที่ KATRIN, การค้นหามิติที่ 4, การพัฒนาชุดตรวจวัดสนามแม่เหล็ก 30 G ใช้ที่ TRISTAN, การนำต้นแบบ mobile device วัดสนามแม่เหล็กจาก KATRIN มาศึกษาที่มทส.เพื่อประโยชน์อื่นเช่น JUNO เป็นต้น **ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจาก บพค. 2566 - 2568**

ประเด็นเสนอที่ประชุม

เพื่อรับทราบผลการดำเนินงาน ปี 2567