















โครงการนักศึกษาภาคฤดูร้อนของหอสังเกตการณ์นิวทริโนไอซ์คิวบ์ ประจำปี 2568

นายธรรมรัตน์ ยาวิศิษฏ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รายงาน	**โครงการนักศึกษาภาคฤดูร้อนของหอสังเกตการณ์นิวทริโนไอซ์คิวบ์ ประจำปี 2568**
ชื่อ-สกุล	**ธรรมรัตน์ ยาวิศิษฏ์**
ช่วงเวลา	**วันที่ 31 พฤษภาคม - วันที่ 1 สิงหาคม 2568**

คำนำ

รายงานฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อบันทึกและเผยแพร่ผลการเข้าร่วม โครงการนักศึกษาภาคฤดูร้อนของหอสังเกตการณ์นิวทริโนไอซ์คิวบ์ ประจำปี 2568 (IceCube Summer Student Program 2025) อันเป็นส่วนหนึ่งของความร่วมมือด้านวิชาการระหว่างประเทศไทยกับโครงการวิจัยนานาชาติ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นแหล่งข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับโครงการดังกล่าว ตลอดจนบันทึกเนื้อหาการปฏิบัติงานวิจัย ข้อมูลของสถาบันและองค์กรที่เกี่ยวข้อง รายงานชีวิตความเป็นอยู่ระหว่างการเข้าร่วมโครงการ และประวัติส่วนตัว เพื่อประโยชน์แก่นักเรียน นักศึกษา ตลอดจนบุคคลทั่วไปที่สนใจทั้งในด้านวิชาการและการใช้ชีวิตในต่างประเทศ

โครงการนี้จัดขึ้น ณ มหาวิทยาลัยวิสคอนซิน–แมดิสัน (University of Wisconsin–Madison) และศูนย์วิจัยฟิสิกส์อนุภาคดาราศาสตร์วิสคอนซิน (Wisconsin IceCube Particle Astrophysics Center: WIPAC) สหรัฐอเมริกา ซึ่งเป็นศูนย์กลางการวิจัยระดับนานาชาติด้านฟิสิกส์อนุภาคดาราศาสตร์ การได้มีโอกาสเข้าร่วมโครงการครั้งนี้นับเป็นคุณวิเศษอันหาได้โดยยาก และเป็นประสบการณ์อันทรงคุณค่าทั้งในด้านการพัฒนาทักษะวิจัยเชิงลึก และการแลกเปลี่ยนเรียนรู้ในสภาพแวดล้อมวิทยาศาสตร์ระดับโลก

ข้าพเจ้าขอน้อมรำลึกในพระมหากรุณาธิคุณอย่างหาที่สุดมิได้ของ **สมเด็จพระกนิษฐาธิราชเจ้า กรมสมเด็จพระเทพรัตนสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี** ที่ได้พระราชทานโอกาสให้ข้าพเจ้าเป็นผู้แทนประเทศไทยเข้าร่วมโครงการดังกล่าว อันเป็นคุณูปการอย่างใหญ่หลวงที่เกื้อหนุนให้ข้าพเจ้ามีโอกาสได้ร่วมปฏิบัติงานวิจัยกับนักวิจัยในโครงการ IceCube ซึ่งเป็นความร่วมมือข้ามชาติเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ฟิสิกส์พลังงานสูงระดับจักรวาล

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ โครงการความร่วมมือไทย–ไอซ์คิวบ์, สถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน), สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.), มูลนิธิเทคโนโลยีสารสนเทศตามพระราชดำริ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี, และ หน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการพัฒนากำลังคนและทุนด้านการพัฒนาสถาบันอุดมศึกษา การวิจัยและการสร้างนวัตกรรม (บพค.) ที่ได้ให้การสนับสนุนทั้งด้านค่าใช้จ่าย คำปรึกษา และการอำนวยความสะดวกในด้านต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาการเข้าร่วมโครงการ

ข้าพเจ้ามีความมุ่งหวังเป็นอย่างยิ่งว่า รายงานฉบับนี้จะมีส่วนช่วยเผยแพร่องค์ความรู้และประสบการณ์ที่ได้รับจากการเข้าร่วมโครงการ ตลอดจนเป็นแรงบันดาลใจและแนวทางให้แก่นักวิจัยรุ่นใหม่ อันจะนำไปสู่การพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของชาติให้เจริญก้าวหน้ายิ่งขึ้น

ทั้งนี้ หากรายงานฉบับนี้มีข้อผิดพลาดหรือบกพร่องประการใด ข้าพเจ้าขออภัยไว้ ณ โอกาสนี้

ธรรมรัตน์ ยาวิศิษฏ์

รายงาน	**โครงการนักศึกษาภาคฤดูร้อนของหอสังเกตการณ์นิวทริโนไอซ์คิวบ์ ประจำปี 2568**
ชื่อ-สกุล	**ธรรมรัตน์ ยาวิศิษฏ์**
ช่วงเวลา	**วันที่ 31 พฤษภาคม - วันที่ 1 สิงหาคม 2568**

กิตติกรรมประกาศ



"น้อมสำนึกในพระมหากรุณาธิคุณ สมเด็จพระกนิษฐาธิราชเจ้า กรมสมเด็จพระเทพรัตนสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี ที่ได้พระราชทานโอกาสอันยิ่งใหญ่ให้ข้าพเจ้า ในฐานะนักศึกษาวิศวกรรมศาสตร์คนแรกของประเทศไทย ได้เข้าร่วมโครงการนักศึกษาภาคฤดูร้อนของหอสังเกตการณ์นิวทริโนไอซ์คิวบ์ ประจำปี 2568"

การเข้าร่วมโครงการนักศึกษาภาคฤดูร้อนของหอสังเกตการณ์นิวทริโนไอซ์คิวบ์ ประจำปี 2568 ในครั้งนี้ จะไม่อาจเกิดขึ้นได้ หากปราศจากพระมหากรุณาธิคุณและความอนุเคราะห์จาก โครงการความร่วมมือไทยไอซ์คิวบ์ ภายใต้พระราชดำริของ สมเด็จพระกนิษฐาธิราชเจ้า กรมสมเด็จพระเทพรัตนสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี ข้าพเจ้าขอน้อมสำนึกในพระมหากรุณาธิคุณอย่างหาที่สุดมิได้ ที่ทรงพระกรุณาโปรดเกล้าฯ พระราชทานโอกาสให้ข้าพเจ้าเป็นผู้แทนประเทศไทยเข้าร่วมโครงการ ซึ่งนับเป็นเกียรติสูงสุดและเป็นคุณูปการอย่างใหญ่หลวงต่อการศึกษาวิจัยและการพัฒนาศักยภาพของข้าพเจ้า

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ คณะอนุกรรมการดำเนินงานสนองโครงการตามพระราชดำริของ สมเด็จพระกนิษฐาธิราชเจ้า กรมสมเด็จพระเทพรัตนสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี ด้านฟิสิกส์พลังงานสูง มูลนิธิเทคโนโลยีสารสนเทศตามพระราชดำริสมเด็จพระเทพฯ, หน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการพัฒนากำลังคนและทุนด้านการพัฒนาสถาบันอุดมศึกษา การวิจัยและการสร้างนวัตกรรม (บพค.), การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.), สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน), สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.), สถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, และมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ได้คัดเลือกและสนับสนุนให้ข้าพเจ้าเข้าร่วมปฏิบัติงานวิจัยกับ IceCube Neutrino Observatory ณ University of Wisconsin–Madison ประเทศสหรัฐอเมริกา ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วราภรณ์ นันทิยกุล, ดร.อัจฉรา เสรีเพียรเลิศ, และ คุณกชนิภา ชัยน้อย ที่ประสานงานโครงการความร่วมมือไทยไอซ์คิวบ์ ให้ดำเนินไปด้วยความเรียบร้อย

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ University of Wisconsin-Madison และ Wisconsin IceCube Particle Astrophysics Center (WIPAC) ที่มอบโอกาสและสิ่งแวดล้อมการวิจัยระดับโลก ตลอดจนเปิดโอกาสให้ข้าพเจ้าได้ทำงานร่วมกับนักวิจัยจากนานาประเทศในโครงการวิทยาศาสตร์ขนาดใหญ่ระดับนานาชาติ และขอขอบคุณ Yuya Makino, Christopher Wendt, Professor Albrecht Karle นักวิทยาศาสตร์ นักวิจัย และวิศวกรทุกท่าน ที่ดูแล ให้คำแนะนำ และสนับสนุนการทำวิจัยอย่างใกล้ชิด

รายงาน	**โครงการนักศึกษาภาคฤดูร้อนของหอสังเกตการณ์นิวทริโนไอซ์คิวบ์ ประจำปี 2568**
ชื่อ-สกุล	**ธรรมรัตน์ ยาวิศิษฏ์**
ช่วงเวลา	**วันที่ 31 พฤษภาคม - วันที่ 1 สิงหาคม 2568**

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สมยศ เกียรติวณิชวิไล คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ และสำนักงานกิจการนักศึกษาต่างประเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้เกียรติสนับสนุนตลอดการเข้าร่วมโครงการ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อัมพวัน จุลเสรีวงศ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภศูล วงษ์วาณิช ที่ให้เกียรติจัดทำจดหมายรับรองประกอบการสมัคร พร้อมทั้งเมตตาสั่งสอนและเปิดโอกาสทางการเรียนรู้ให้แก่ข้าพเจ้ามาโดยตลอด รวมถึงคำชี้แนะด้านวิชาการและการวิจัยอย่างต่อเนื่อง และกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.พิทยา ปานนิล อาจารย์ที่ปรึกษา ที่เมตตาเปิดรายวิชา “Overseas Training” (ปฏิบัติการฝึกงานต่างประเทศ) ให้ข้าพเจ้าสามารถลงทะเบียนเรียนตลอดช่วงเวลาที่เข้าร่วมโครงการและกำลังทำวิจัยร่วมกับ IceCube ที่ประเทศสหรัฐอเมริกา

ขอขอบพระคุณ สำนักงานโครงการทุนการศึกษาพานาโซนิคแห่งทวีปเอเชีย บริษัท พานาโซนิค ประเทศไทย และคุณธรรมรงค์ อ่อนดีสวัสดิ์, บริษัท ไทยเบฟเวอเรจ จำกัด (มหาชน) - คุณมนตรี ยากูล, คุณรติรัตน์ วิตรามานันท์, และ คุณจิรวุฒิ กิจพานิชวิเศษ ที่ให้เกียรติจัดทำจดหมายรับรองประกอบการสมัคร และให้การสนับสนุนและส่งเสริมการพัฒนาศักยภาพของข้าพเจ้ามาอย่างต่อเนื่อง

ท้ายที่สุด ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณผู้ปกครองและครอบครัวที่คอยมอบทั้งกำลังใจและกำลังทรัพย์ เป็นแรงผลักดันให้ก้าวข้ามทุก ๆ บททดสอบ จนทำให้การดำเนินโครงการสำเร็จลุล่วงด้วยดี ประโยชน์ใด ๆ ที่เกิดจากการดำเนินงานวิจัยและการเข้าร่วมโครงการนี้ ย่อมเป็นผลสืบเนื่องจากความกรุณาและความปรารถนาดีของทุกท่านที่กล่าวนามมาแล้วทั้งสิ้น ข้าพเจ้าขอน้อมรับไว้ด้วยความสำนึกในพระคุณ และกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

รายงาน	**โครงการนักศึกษาภาคฤดูร้อนของหอสังเกตการณ์นิวทริโนไอซ์คิวบ์ ประจำปี 2568**
ชื่อ-สกุล	**ธรรมรัตน์ ยาวิศิษฏ์**
ช่วงเวลา	**วันที่ 31 พฤษภาคม - วันที่ 1 สิงหาคม 2568**

สารบัญ

1. ความเป็นมาของโครงการ 1

2. หอสังเกตการณ์นิวทริโนไอซ์คิวบ์ 2

2.1 โครงสร้างองค์กรและกลุ่มการทำงานของไอซ์คิวบ์ 3

2.2 IceCube-Gen2 “ขอบเขตใหม่ของการตรวจวัดนิวทริโนพลังงานสูงและฟิสิกส์ดาราศาสตร์” 4

2.3 Optical Module Candidates สำหรับโครงการ IceCube-Gen2 6

2.3.1 LOM-16 6

2.3.2 LOM-18 7

2.3.3 mDOM 8

2.3.4 pDOMq 9

2.3.5 D-Egg 10

2.3.6 Pencil Beam Module 11

3. IceCube Summer School 2025 12

3.1 ตารางแสดงรายละเอียดการอบรม IceCube Summer School 2025 13

4. งานวิจัยที่ทำร่วมกับ IceCube 15

4.1 หัวข้องานวิจัย 15

4.2 รายละเอียดและการมีส่วนร่วมในงานวิจัย 15

Design and Validation of a Cosmic Muon-Based Testing Method for IceCube-Gen2 Optical Modules 16

Abstract 16

Introduction 17

Methodology 19

Charge Distribution Analysis for Single Photoelectron and Cosmic Muon 24

From Charge Distributions to Event-Level Analysis 26

Identification of Muon Event Candidates 26

Transition from ADC Overflow to Gain Calculation 29

Conversion from Charge (pC) to Photoelectrons (PE) 29

Transition to Ch1/Ch2 Charge Ratio Analysis 31

Coincidence rates (data, threshold = 50 PE, ΔT = 100 ns) Definition and construction 37

Discussion 43

Conclusion 44

Future Work 44

Acknowledge 45

References 45

5. รายงานชีวิตประจำวัน 47

6. ภาคผนวก 123

6.1 Overview of LOM-16-09: The Final Module Construction 123

6.2 Component Preparation 124

6.2.1 PMT + Micro-Base Coupling 124

6.2.2 Optical Gel Pad Attachment 124

6.2.3 Sub-Assembly Jig 124

6.3 Mechanical and Electrical Assembly 125

6.3.1 PMT Installation 125

6.3.2 Shielded Cover Integration 125

6.3.3 Wiring and Cable Management 125

6.4 Optical Gel Backfilling and Vacuum Processing 126

6.4.1 Backfilling 126

6.4.2 Degassing 126

6.4.3 Vacuum Processing 127

6.5 Hemisphere Combination and Sealing 128

6.6 Quality Control and Pressure Test 129

6.6.1 Mechanical QC 130

6.6.2 Electrical QC 130

6.6.3 Optical QC 130

6.6.4 Pressure Test 130

Advisor, Colleagues and Contributors 131

รายงาน	**โครงการนักศึกษาภาคฤดูร้อนของหอสังเกตการณ์นิวทริโนไอซ์คิวบ์ ประจำปี 2568**
ชื่อ-สกุล	**ธรรมรัตน์ ยาวิศิษฏ์**
ช่วงเวลา	**วันที่ 31 พฤษภาคม - วันที่ 1 สิงหาคม 2568**

1. ความเป็นมาของโครงการ



โครงการนักศึกษาภาคฤดูร้อนของหอสังเกตการณ์นิวตริโนไอซ์คิวบ์ (IceCube Summer Student Program) เป็นโครงการที่จัดขึ้นโดยความร่วมมือของ Wisconsin IceCube Particle Astrophysics Center: WIPAC ซึ่งเปิดโอกาสให้นักศึกษาไทยระดับปริญญาตรี และระดับบัณฑิตศึกษา สาขาดาราศาสตร์ ฟิสิกส์ และสาขาวิทยาศาสตร์ธรรมชาติที่เกี่ยวข้องมาเข้าร่วมโครงการดังกล่าว ณ University of Wisconsin-Madison ประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นเวลา 10 สัปดาห์หรือประมาณ 2 เดือน โดยมีหนึ่งสัปดาห์ที่นักศึกษาไทยจะได้รับโอกาสเข้าร่วมหลักสูตรเข้มข้น และได้รับประกาศนียบัตรการเข้าร่วมทางด้านรังสีคอสมิกและนิวทริโนพลังงานสูงจากอวกาศ ภายใต้การอบรมเชิงปฏิบัติการ IceCube Summer School ซึ่ง WIPAC ดำเนินการจัดขึ้นทุกปี

Wisconsin IceCube Particle Astrophysics Center: WIPAC ประเทศสหรัฐอเมริกาได้ทูลเกล้าฯ ถวายทุนจำนวน 8,000 เหรียญสหรัฐแด่สมเด็จพระกนิษฐาธิราชเจ้า กรมสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี เพื่อพระราชทานแก่นักศึกษาสาขาวิศวกรรมศาสตร์ ฟิสิกส์ ดาราศาสตร์ และสาขาวิทยาศาสตร์ธรรมชาติที่เกี่ยวข้องให้เข้าร่วมโครงการนักศึกษาภาคฤดูร้อนของหอสังเกตการณ์ นิวตริโนไอซ์คิวบ์ “IceCube Summer Student Program” ณ มหาวิทยาลัยวิสคอนซิน-แมดิสัน ประเทศสหรัฐอเมริกา จำนวน 2 คนต่อปี

สำหรับปี พ.ศ. 2568 Wisconsin IceCube Particle Astrophysics Center: WIPAC ทูลเกล้าฯ ถวายทุนโครงการนักศึกษาภาคฤดูร้อน เป็นจำนวน 2 ทุน โดย WIPAC จะสนับสนุนค่าใช้จ่ายรายเดือนและที่พักในช่วงที่นักศึกษาทำงานอยู่ที่มหาวิทยาลัยวิสคอนซิน-แมดิสัน (University of Wisconsin-Madison) ส่วนประเทศไทย โดยโครงการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานและกำลังคนที่เกี่ยวข้องกับหอสังเกตการณ์นิวตริโนในทวีปแอนตาร์กติกา (Thai-Antarctic Neutrino Observatory: TANO) ตามพระราชดำริฯ จะสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการเดินทาง เป็นค่าตั๋วเครื่องบินไป-กลับระหว่างประเทศ ค่าเบี้ยเลี้ยงเสริมจากที่ WIPAC สนับสนุนค่าวีซ่าและค่าใช้จ่ายเพิ่มเติม โดยคุณสมบัตินักศึกษาที่จะเข้าร่วมโครงการ คือ กำลังศึกษาในชั้นปี ที่ 3-4 ของการศึกษาระดับปริญญาตรี หรือกำลังศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษาในสาขาที่เกี่ยวข้อง เคยได้ศึกษาในหลักสูตรใดหลักสูตรหนึ่ง ดังต่อไปนี้ (1) Cosmic rays, (2) Astrophysics หรือ High Energy Physics (3) Computational Astrophysics หรือ Computational Physics (4) Observational Astrophysics และวิศวกรรมศาสตร์ในสาขาที่เกี่ยวข้อง ซึ่งโครงการนักศึกษาภาคฤดูร้อน สำหรับปี พ.ศ. 2568 จัดขึ้นระหว่างวันที่ 1 มิถุนายน – 31 กรกฎาคม พ.ศ. 2568 ณ University of Wisconsin-Madison ประเทศสหรัฐอเมริกา

2. หอสังเกตการณ์นิวทริโนไอซ์คิวบ์

ไอซ์คิวบ์ (IceCube) เป็นชื่อเรียกอย่างง่ายของหอสังเกตการณ์นิวทริโนไอซ์คิวบ์ (IceCube Neutrino Observatory) ตั้งอยู่ ณ สถานีที่ขั้วโลกใต้ อมันด์เซน - สก็อตต์ ในทวีปแอนตาร์กติกา (Amundsen-Scott South Pole Station) หอสังเกตการณ์ นิวทริโนไอซ์คิวบ์สร้างเสร็จเมื่อวันที่ 18 ธันวาคม พ.ศ. 2553 ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากมูลนิธิวิทยาศาสตร์แห่งชาติ (National Science Foundation: NSF) ของประเทศสหรัฐอเมริกา ไอซ์คิวบ์มีรูปแบบโครงสร้างการตรวจวัดอนุภาคนิวทริโนที่ เป็นลักษณะเฉพาะ ซึ่งประกอบด้วยหน่วยตรวจวัดแสงจำนวน 5,160 ตัว กระจายอยู่ภายในน้ำแข็งขนาดหนึ่งลูกบาศก์กิโลเมตร ภายใต้ชั้นผิวของน้ำแข็งที่ขั้วโลกใต้ หน่วยตรวจวัดแสงแต่ละหน่วยนี้ มีรูปร่างเป็นทรงกลม หรือเรียกว่า ดอม (Digital Optical Modules: DOMs) ซึ่งประกอบด้วยหลอดทวีคูณแสง (Photo-Multiplier Tube: PMT) และเซ็นเซอร์ที่เชื่อมต่อกับแผงวงจร อิเล็กทรอนิกส์ เซ็นเซอร์เหล่านี้จะทำหน้าที่รับข้อมูลจากดอมแล้วแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลส่งไปยังระบบคอมพิวเตอร์ที่ติดตั้งอยู่ ภายในห้องปฏิบัติการณ์ไอซ์คิวบ์บนพื้นผิวของทวีปแอนตาร์กติกา ดอมทั้งหลายจะแบ่งออกเป็นชุด ชุดละ 60 ตัว แขวนอยู่บน เส้นลวด (string) แต่ละเส้นลงไปใต้น้ำแข็งที่ทำให้ละลายด้วยสว่านน้ำร้อน ในระดับความลึกจากชั้นผิวหน้า ระหว่าง 1,450 ถึง 2,450 เมตร

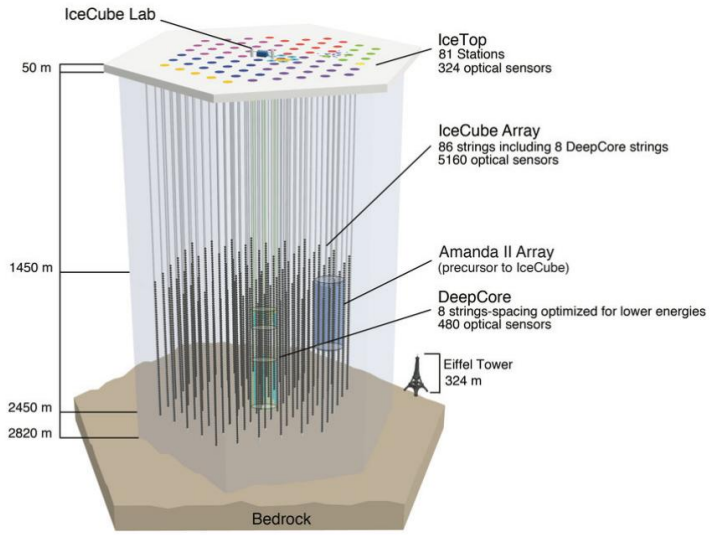


Figure 1: ภาพวาดแสดงการจัดวางตำแหน่งและความลึกของ DOM ในโครงการ IceCube

หลักการทำงานคร่าว ๆ ของ DOMs คือการตรวจจับแสงที่เกิดจากการแผ่รังสีเชเรนคอฟ (Cherenkov radiation) ซึ่งเป็นแสงที่เกิดขึ้นเมื่ออนุภาคมีการเคลื่อนที่เร็วกว่าความเร็วของแสงในตัวกลาง ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นเมื่อนิวทริโนมีปฏิกิริยากับ น้ำในรูปของน้ำแข็ง ทำให้เกิดเลปตอนมีประจุ (charged leptons) ที่สอดคล้องกับประเภทของนิวทริโนที่ตวจพบ ไอซ์คิวบ์ได้รับการออกแบบเพื่อค้นหาจุดกำเนิดของอนุภาคนิวทริโน ในเดือนพฤศจิกายน ค.ศ. 2013 ไอซ์คิวบ์ได้ประกาศการค้น พบนิวทรโนจำนวน 28 ซึ่งคาดว่ามาจากนอกระบบสุริยะจักรวาล ซึ่งหนึ่งในนิวทริโนที่ค้นพบนั้นมีพลังงานที่ระดับเพตะอิเล็กตรอน โวลต์ (peta-electron volt: PeV) ซึ่งเป็นระดับพลังงานสูงที่สุดเท่าที่เคยมีการตรวจพบ ณ เวลานั้น และในเดือนพฤศจิกายน ค.ศ. 2022 ไอซ์คิวบ์ประกาศถึงการค้นพบหลักฐานที่แน่นหนาเกี่ยวกับการปล่อยนิวทริโนจากนิวเคลียสดาราจักรกัมมันต์ (Active Galactic Nucleus: AGN) ของ Messier 77 ทำให้หอสังเกตการณ์นิวทริโนไอซ์คิวบ์เป็นหนึ่งในโครงการทางด้านการตรวจจับนิวทริโนในระดับโลก

รายงาน	โครงการนักศึกษาภาคฤดูร้อนของหอสังเกตการณ์นิวทริโนไอซ์คิวบ์ ประจำปี 2568
ชื่อ-สกุล	ธรรมรัตน์ ยาวิศิษฏ์
ช่วงเวลา	วันที่ 31 พฤษภาคม - วันที่ 1 สิงหาคม 2568

2.1 โครงสร้างองค์กรและกลุ่มการทำงานของไอซ์คิวบ์

ในการทำงานของ IceCube Collaboration จะแบ่งการทำงานหลัก ๆ ออก เป็น 5 ส่วน ได้แก่ Analysis, Technical Working Groups, Detector and Simulation และ Research and Development Project นอกจากนี้แต่ละส่วนก็จะแบ่งออกเป็น ส่วนงานย่อยต่าง ๆ ออกไป

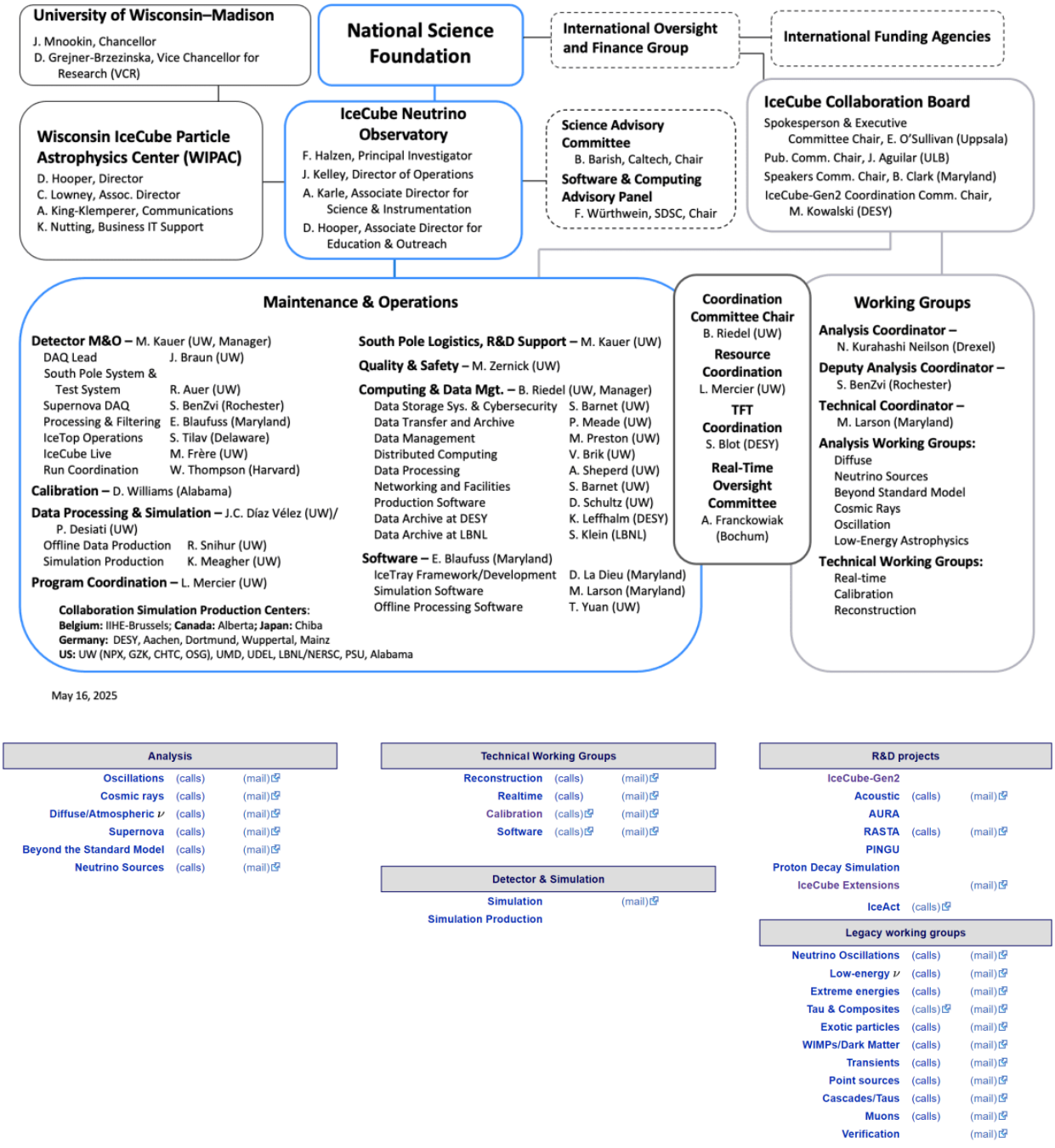


Figure 2: แผนภาพแสดงโครงสร้างองค์กรและกลุ่มการทำงานของ IceCube Collaboration

2.2 IceCube-Gen2 “ขอบเขตใหม่ของการตรวจวัดนิวทริโนพลังงานสูงและฟิสิกส์ดาราศาสตร์”

IceCube-Gen2 เป็นหอสังเกตการณ์นิวทริโนรุ่นถัดไป ณ ขั้วโลกใต้ ซึ่งมีแผนจะขยายจากหอสังเกตการณ์นิวทริโน IceCube ในปัจจุบัน ทั้งในด้านขนาดและช่วงพลังงาน เพื่อเพิ่มขีดความสามารถให้เป็นศูนย์ตรวจวัดอเนกประสงค์ที่รองรับงานวิจัยได้หลากหลายมากยิ่งขึ้น

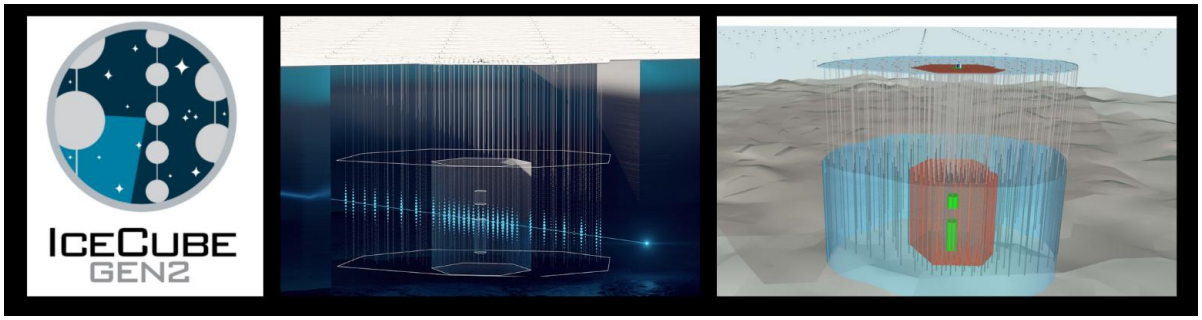


Figure 3: ภาพร่างของโครงการ IceCube-Gen2

ซึ่ง IceCube-Gen2 จะเพิ่มความสามารถในการตรวจวัดนิวทริโนได้ในระดับตั้งแต่เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ถึงเอกซะอิเล็กตรอนโวลต์ (MeV-EeV) และมีเทคโนโลยีการตรวจจับสองประเภท ได้แก่ การตรวจจับแสงและการตรวจจับทางวิทยุ ซึ่งเมื่อรวมกับอุปกรณ์ตรวจจับภาคพื้น (surface detector array) สำหรับการตรวจจับรังสีคอสมิกจะเพิ่มศักยภาพร่วมกับการวิจัยได้เป็นอย่างดี การพัฒนาจะมีการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจจับแสงรวมไปถึงเพิ่มจำนวนของอุปกรณ์ให้ครอบคลุมในขนาด 8 ลูกบาศ์กกิโลเมตร ทำให้คาดว่าจะสามารถตรวจจับอนุภาคนิวทริโนที่มีพลังงานสูงขึ้นกว่าเดิม นอกจากนั้นในการพัฒนา IceCube-Gen2 ในครั้งนี้จะทำให้ IceCube กลายเป็นหอสังเกตการณ์นิวทริโนที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในโลก



Figure 4: สมาชิกของ The IceCube-Gen2 Collaboration

ในโครงการ IceCube-Gen2 มีนักวิทยาศาสตร์มากกว่า 430 คน จาก 61 สถาบันวิจัย ใน 13 ประเทศ และ 4 ทวีป เข้าร่วมในกระบวนการวางแผน ก่อสร้าง และดำเนินงานของโครงการ IceCube-Gen2 โดยส่วนใหญ่เป็นพันธมิตรที่เคยร่วมงานกันอย่างประสบความสำเร็จในโครงการ IceCube มาตั้งแต่ปี 1999 และบางส่วนยังมีประสบการณ์จากโครงการวิจัยก่อนหน้านั้นที่ขั้วโลกใต้อีกด้วย

IceCube-Gen2 จะต่อยอดจากประสบการณ์อันกว้างขวางที่ได้รับจากโครงการ IceCube พร้อมสานต่อด้วยทีมงานที่แข็งแกร่งและเชื่อถือได้ ความร่วมมือจะขยายไปสู่การบูรณาการเทคโนโลยีใหม่และโครงการวิจัยใหม่ ๆ โดยสถาบันเจ้าภาพของ IceCube-Gen2 คือ มหาวิทยาลัยวิสคอนซิน–แมดิสัน สหรัฐอเมริกา ซึ่งเป็นผู้นำโครงการ IceCube รุ่นแรกและโครงการ IceCube Upgrade ระยะกลาง อีกทั้งยังเป็นผู้รับผิดชอบการดำเนินงานประจำวันของหอสังเกตการณ์นิวทริโนที่ขั้วโลกใต้ ซึ่งสถาบันพันธมิตรชั้นนำจากทั่วโลกยังรับผิดชอบภารกิจสำคัญเพิ่มเติม ตัวอย่างเช่น DESY จะผลิตเซนเซอร์ใหม่หนึ่งในสามทั้งหมด ซึ่งเป็นโมดูลตรวจวัดแสงแบบดิจิทัล (digital optical modules) สำหรับเครื่องตรวจวัดที่ขยายใหญ่ขึ้น ในยุโรปเพียงอย่างเดียว มีมากถึง 18 กลุ่มวิจัยที่เข้าร่วมในการวางแผนสำหรับโครงการ IceCube-Gen2

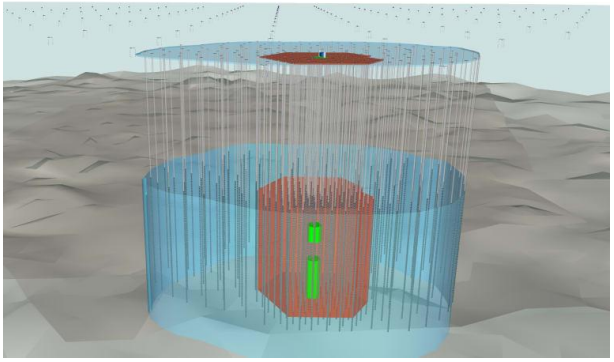


Figure 5: ภาพเรนเดอร์สามมิติของโครงการขยาย IceCube-Gen2 ที่วางแผนไว้ โดย IceCube-Gen2 ประกอบด้วยอาร์เรย์ใหม่สามระบบ ได้แก่ อาร์เรย์ตรวจวัดด้วยแสงในน้ำแข็ง (in-ice optical array), อาร์เรย์บนพื้นผิว (surface array) และอาร์เรย์ตรวจวัดด้วยคลื่นวิทยุระยะไกล (extensive radio array) ซึ่งจะช่วยเพิ่มขีดความสามารถของหอสังเกตการณ์นิวทริโน IceCube ในปัจจุบัน (เครดิตภาพ: IceCube Collaboration)

หอสังเกตการณ์แห่งอนาคตนี้จะต่อยอดจากคุณสมบัติอันโดดเด่นของแผ่นน้ำแข็งแอนตาร์กติกา ในการตรวจจับสัญญาณแสงและสัญญาณวิทยุที่เกิดจากปฏิสัมพันธ์และการเคลื่อนผ่านของอนุภาคพลังงานสูง ซึ่งรวมถึงมิวออนจากรังสีคอสมิกจำนวนมหาศาลและนิวทริโนมากกว่าหนึ่งล้านตัวต่อปี โอกาสที่จะได้ตรวจจับนิวทริโนจำนวนมากเช่นนี้ คือสิ่งที่จุดประกายจินตนาการของนักวิทยาศาสตร์ให้โลดแล่น ซึ่ง IceCube-Gen2 ถูกวางแผนให้สำรวจ “จักรวาลสุดขั้ว” ในพื้นที่ที่ยังไม่เคยมีใครค้นพบ ด้วยการใช้นิวทริโนเป็นสื่อกลาง ในพื้นที่ที่ทึบแสงหรือพร่ามัวเกินกว่าที่ผู้ส่งสารจักรวาลประเภทอื่นจะสื่อสารได้ และเช่นเดียวกับที่กล้องโทรทรรศน์อวกาศเจมส์ เวบบ์ กำลังเปิดเผยภาพของอวกาศลึกที่คมชัดและละเอียดขึ้น IceCube-Gen2 จะเปิดหน้าต่างสู่บริเวณที่มืดมิดที่สุดของจักรวาล ฝ่าข้ามหมู่เมฆฝุ่นและสนามแม่เหล็กไฟฟ้านอกกาแล็กซี เพื่อพาเราเข้าใกล้กลไกการทำงานภายในของหลุมดำมากกว่าที่เคย และจากการสังเกตการณ์กาแล็กซีแอกทีฟ NGC 1068 เมื่อไม่นานมานี้ เราได้พบหลักฐานของการเกิดนิวทริโนในระยะไม่ถึงหนึ่งร้อยรัศมีชวาร์เซชิลด์จากหลุมดำมวลยวดยิ่ง และหากนิวทริโนพลังงานสูงสุดเป็นกุญแจไขแหล่งกำเนิดที่ยังไม่แน่ชัดของรังสีคอสมิกที่มีพลังงานสูงที่สุด พวกมันก็ยังเป็นเครื่องมือพิเศษสำหรับการทดสอบขีดจำกัดของฟิสิกส์อนุภาค และอาจนำไปสู่การค้นพบอนุภาคหรือปรากฏการณ์ที่อยู่เหนือกรอบของแบบจำลองมาตรฐานอีกด้วย

2.3 Optical Modules Candidate สำหรับโครงการ IceCube-Gen2

จากการที่โครงการ IceCube-Gen2 มีเป้าหมายที่จะติดตั้งโมดูลตรวจจับแสง (Optical Modules) จำนวนกว่า 10,000 หน่วยในน้ำแข็งแอนตาร์กติก เพื่อเพิ่มความไวในการตรวจจับนิวทริโนพลังงานสูงระดับ PeV–EeV การเลือกโมดูลที่เหมาะสมที่สุดจึงเป็นก้าวสำคัญ โดยการทดสอบต้นแบบจะถูกดำเนินการในโครงการ IceCube-Upgrade (พ.ศ. 2568–2569) ซึ่งจะนำโมดูลหลายแบบไปติดตั้งจริงใต้ผิวน้ำแข็ง เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพและหาต้นแบบที่เหมาะสมสำหรับการผลิตจำนวนมากในอนาคต

โมดูลต้นแบบสำหรับ IceCube-Gen2

2.3.1 LOM-16

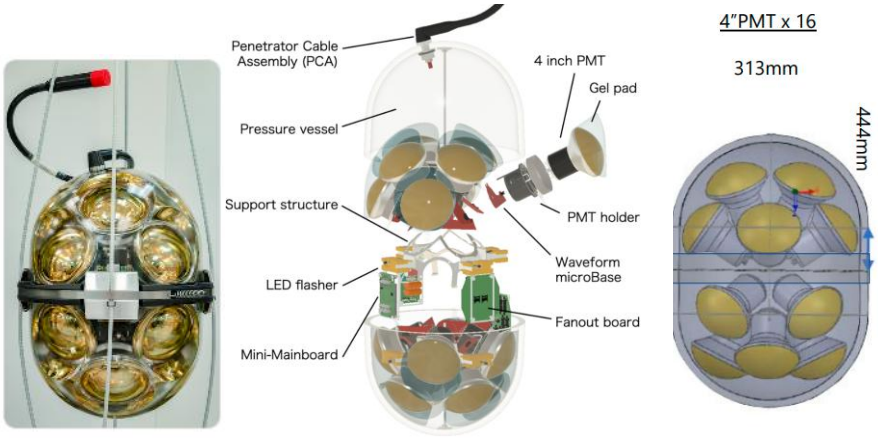


Figure 6: ภาพโครงสร้างของ LOM-16 (เครดิตภาพจาก Yuya Makino)

LOM-16 เป็นโมดูลตรวจจับแสงที่ออกแบบมาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการนับโฟตอนและการบอกทิศทางของสัญญาณเชเรนคอฟ โดยใช้ หลอดตรวจจับแสงขนาด 3 นิ้ว จำนวน 16 หลอด จัดเรียงอยู่ภายในตัวเรือนแก้วแรงดันสูงทรงกลม การใช้ PMT ขนาดเล็กหลายตัวแทนการใช้ PMT ขนาดใหญ่เพียงตัวเดียว ช่วยให้โมดูลมี มุมรับแสง (angular coverage) ที่ละเอียดขึ้น สามารถจำแนกทิศทางของโฟตอนที่กระเจิงในน้ำแข็งได้ดีกว่า DOM แบบดั้งเดิม นอกจากนี้การใช้ multi-PMT ยังช่วยลดสัญญาณรบกวน (dark noise) ต่อโมดูล และเพิ่มความสามารถในการวัดเหตุการณ์ที่มีจำนวนโฟตอนสูง โดยไม่เกิดการ saturation ง่าย จุดประสงค์ของ LOM-16 คือการพิสูจน์ว่าโมดูล multi-PMT ที่มีความซับซ้อนปานกลาง สามารถให้สมดุลที่เหมาะสมระหว่าง ประสิทธิภาพการตรวจจับและความคุ้มค่าในการผลิต

จุดเด่น : ให้ความสามารถในการ นับโฟตอน (photon counting) ที่ละเอียด รวมถึงเพิ่มความสามารถในการหาทิศทางของโฟตอน (angular resolution) และลด dark noise ต่อโมดูลเมื่อเทียบกับ DOM แบบเดิม

บทบาทในการทดสอบ IceCube-Upgrade: เพื่อใช้เป็นโมดูลต้นแบบสำหรับการตรวจจับนิวทริโนในเชิงมุม (directional sensitivity) และงานวิจัยของผู้รายงานเน้นการพัฒนา วิธีทดสอบด้วยมิวออนจากรังสีคอสมิก เพื่อยืนยันประสิทธิภาพการตอบสนองของโมดูล (charge response, noise, coincidence behavior)

2.3.2 LOM-18

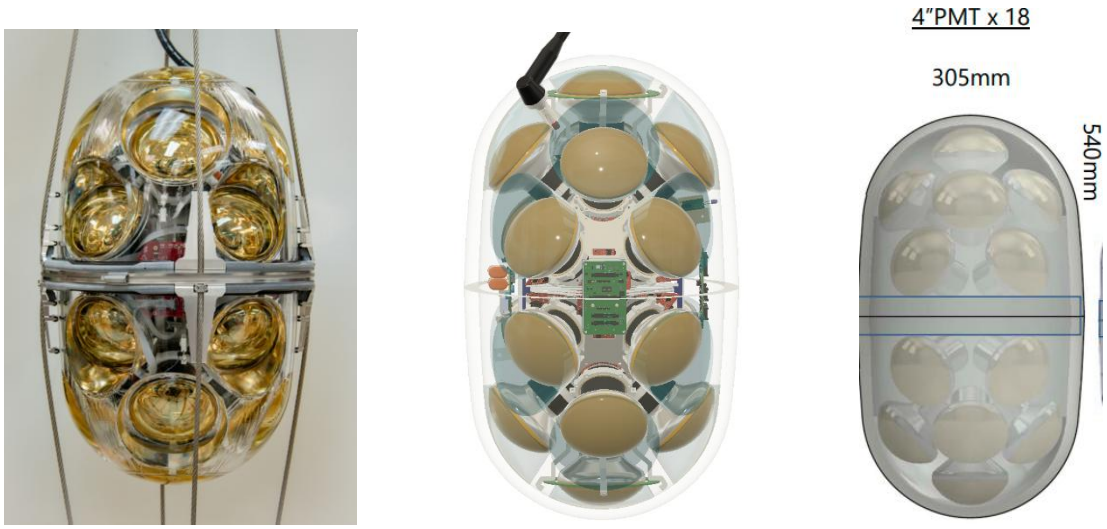


Figure 7: ภาพโครงสร้างของ LOM-18 (เครดิตภาพจาก Yuya Makino และ IceCube Detector Gallery: IceCube Wiki)

LOM-18 ถูกพัฒนาต่อยอดจาก LOM-16 โดยเพิ่มจำนวน PMTs ภายในตัวเรือนเป็น 18 หลอด เพื่อให้ได้พื้นที่หน้าตัดการตรวจจับโฟตอนที่มากขึ้น แนวคิดคือยิ่งเพิ่มจำนวน PMT ย่อย ก็จะสามารถเก็บสถิติการตรวจจับโฟตอนได้มากขึ้น ส่งผลให้การระบุทิศทางและพลังงานของเหตุการณ์มีความแม่นยำสูงขึ้น โดยเฉพาะสำหรับนิวทริโนพลังงานสูง อย่างไรก็ตาม การเพิ่มจำนวน PMTs ย่อมทำให้ระบบอิเล็กทรอนิกส์และการประกอบซับซ้อนขึ้น ต้นทุนการผลิตต่อโมดูลก็สูงขึ้นเช่นกัน ดังนั้น LOM-18 จึงมีบทบาทสำคัญใน IceCube-Upgrade ในการทดสอบว่า การเพิ่มจำนวน PMT จะคุ้มค่ากับความซับซ้อนและค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมหรือไม่ เมื่อเปรียบเทียบกับ LOM-16

จุดประสงค์หลัก : เพิ่มพื้นที่หน้าตัดการตรวจจับโฟตอน (photon coverage) และ เก็บสถิติได้แม่นยำมากขึ้น โดยเฉพาะเหตุการณ์พลังงานสูง (Bright Event)

ข้อท้าทายหลัก : จำนวน PMTs ที่มากขึ้นทำให้ระบบอิเล็กทรอนิกส์ซับซ้อนขึ้น และค่าใช้จ่ายในการผลิตต่อโมดูลสูงกว่า LOM-16

บทบาทในการทดสอบ IceCube-Upgrade : ใช้เปรียบเทียบเชิงปริมาณกับ LOM-16 ว่าการเพิ่ม PMTs จะส่งผลให้คุ้มค่ากับต้นทุนและความซับซ้อนที่มากขึ้นหรือไม่

2.3.3 mDOM (multi-PMT Digital Optical Module)

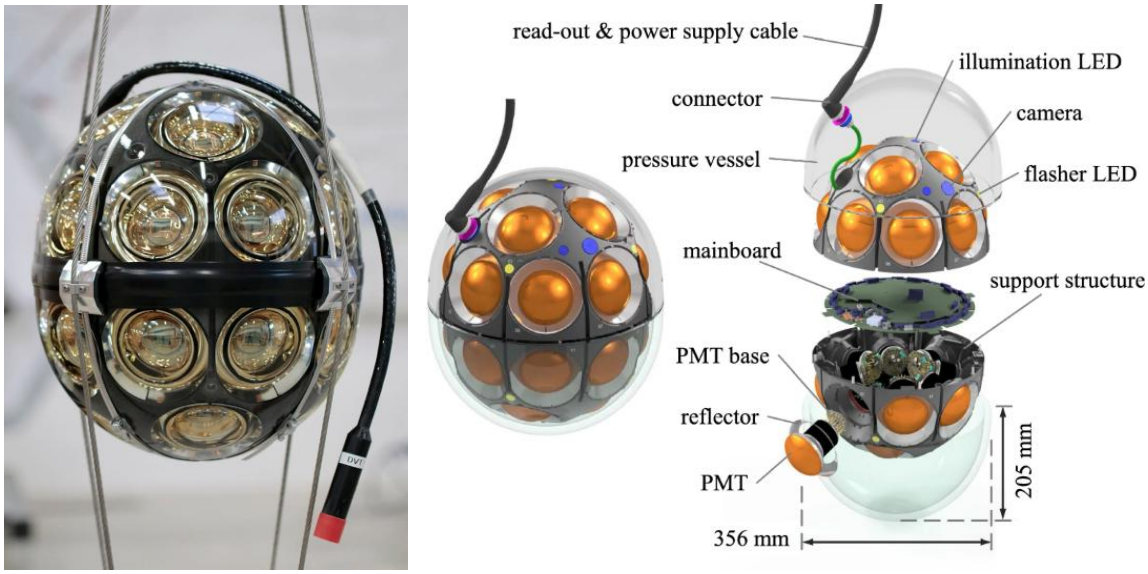


Figure 8: ภาพโครงสร้างของ mDOM (เครดิตภาพจาก IceCube Detector Gallery: IceCube Wiki)

mDOM เป็นหนึ่งในโมดูลที่มีการออกแบบ “multi-PMT” ที่ก้าวหน้าที่สุด โดยบรรจุ PMTs ขนาดเล็กจำนวนมาก (ประมาณ 24–31 หลอด) ภายในตัวเรือนแก้วทรงกลมใบเดียว แนวคิดนี้สืบทอดมาจากโครงการ KM3NeT ในยุโรป ซึ่งประสบความสำเร็จในการเพิ่มประสิทธิภาพด้านการระบุทิศทางของโฟตอน จุดแข็งของ mDOM คือสามารถให้ ข้อมูลเชิงมุมที่ละเอียด (fine directionality) และมี dynamic range กว้าง สามารถตรวจจับได้ทั้งโฟตอนเดี่ยวและเหตุการณ์ที่มีจำนวนโฟตอนหนาแน่น อย่างไรก็ตาม จุดอ่อนคือความซับซ้อนในการประกอบสูง ต้องใช้ระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบหลายช่องทาง (multi-channel readout) และมีต้นทุนต่อหน่วยสูงมาก บทบาทของ mDOM ใน IceCube-Upgrade จึงคือการพิสูจน์ว่า การลงทุนด้านความซับซ้อนสามารถสร้างความได้เปรียบเชิงวิทยาศาสตร์มากพอหรือไม่

จุดเด่น : ให้ข้อมูลเชิงทิศทางของโฟตอน (directionality) ที่แม่นยำมากและมี dynamic range กว้าง สามารถตรวจจับได้ทั้งสัญญาณโฟตอนเดี่ยวและเหตุการณ์ที่มีจำนวนโฟตอนสูง

ข้อจำกัด : การประกอบมีความซับซ้อนสูง และต้องใช้ระบบอ่านข้อมูลที่มีหลายช่องทาง (multi-channel readout)

บทบาทในการทดสอบ IceCube-Upgrade : ใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพกับโมดูลที่ใช้ PMTs น้อยกว่า และทดสอบว่าการลงทุนด้านความซับซ้อนจะคุ้มค่ากับความแม่นยำที่เพิ่มขึ้นหรือไม่

2.3.4 pDOM (precision DOM หรือ **π**-DOM)

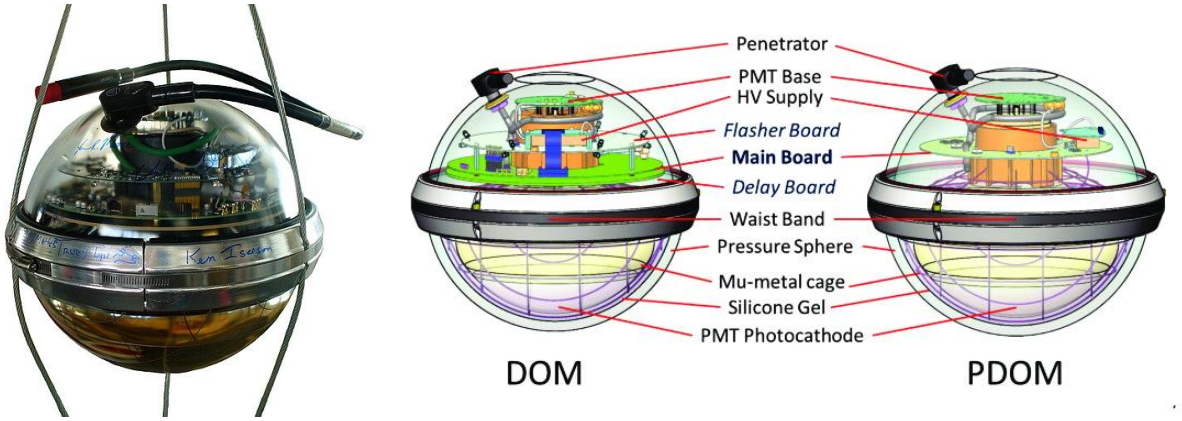


Figure 9: ภาพโครงสร้างของ pDOM (เครดิตภาพจาก IceCube Detector Gallery: IceCube Wiki)

pDOM ถูกออกแบบมาเป็น “รุ่นพัฒนาต่อยอด” ของ DOM แบบดั้งเดิมที่ใช้ใน IceCube โดยยังคงแนวคิดการใช้ PMT ขนาดใหญ่เพียงหนึ่งหลอด (10–12 นิ้ว) แต่เพิ่มประสิทธิภาพด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์รุ่นใหม่ที่สามารถให้ ความแม่นยำด้านเวลา (precision timing) และ ช่วงการทำงานที่กว้างขึ้น (dynamic range) จุดแข็งของ pDOM คือความเรียบง่าย แข็งแรง และความคุ้นเคยต่อการปฏิบัติงานภาคสนาม แต่ในขณะเดียวกันก็แก้ปัญหาสัญญาณรบกวนสูงที่ DOM รุ่นแรกเผชิญ อย่างไรก็ตาม การใช้ PMT เดี่ยวทำให้ไม่สามารถให้ข้อมูลเชิงทิศทางได้ละเอียดเท่ากับ multi-PMT design ดังนั้น pDOM จะทำหน้าที่เป็น baseline comparison ในการประเมินว่า multi-PMT design ที่ซับซ้อนนั้นให้ความได้เปรียบมากน้อยเพียงใดเมื่อเทียบกับการปรับปรุง DOM แบบดั้งเดิม

จุดเด่น : โครงสร้างเรียบง่าย แข็งแรง ทนทาน เพิ่มช่วงการทำงาน (dynamic range) และความแม่นยำของการวัดเวลา (precision timing) และสัญญาณรบกวนต่ำ (low noise)

ข้อจำกัด : การใช้ PMT ขนาดใหญ่เพียงหลอดเดียวทำให้ทิศทางของโฟตอนไม่แม่นยำเท่ากับ multi-PMT design

บทบาทในการทดสอบ IceCube-Upgrade: เป็น baseline comparison กับ DOM แบบเดิม เพื่อพิสูจน์ว่าเทคโนโลยีใหม่มีข้อได้เปรียบจริงหรือไม่

2.3.5 D-Egg (Dual Optical sensor in an Ellipsoid Glass)

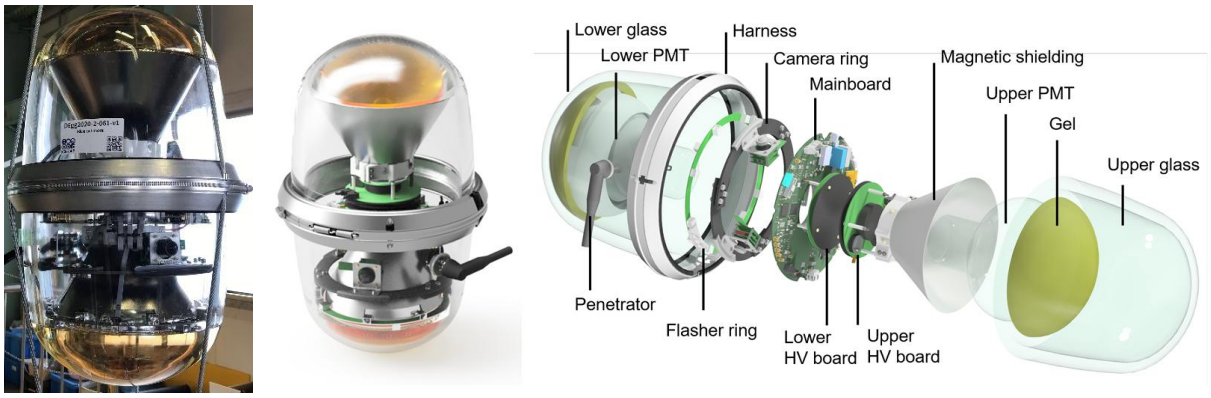


Figure 10: D-Egg (เครดิตภาพจาก IceCube Detector Gallery: IceCube Wiki)

D-Egg เป็นโมดูลที่พัฒนาขึ้นโดยทีมวิจัยจาก University of Tokyo (ICEHAP) โดยใช้การออกแบบที่เป็นเอกลักษณ์คือบรรจุ PMT ขนาด 8 นิ้ว จำนวน 2 หลอด หันขึ้นและลงในตัวเรือนแก้วทรงวงรี การจัดวางเช่นนี้ช่วยให้โมดูลมี การครอบคลุมเชิงมุม (angular coverage) ทั้งด้านบนและด้านล่าง ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการตรวจจับสัญญาณจากหลายทิศทางพร้อมกัน และยังเหมาะสำหรับการ veto events เพื่อลดสัญญาณรบกวนจากอนุภาคที่ไม่ใช่นิวทริโน จุดท้าทายคือการผลิตแก้วทรงวงรีที่ต้องใช้เทคนิคเฉพาะ และการซิงโครไนซ์ข้อมูลจาก PMT สองตัวที่ต้องการความแม่นยำสูง บทบาทของ D-Egg คือการพิสูจน์ว่า การเพิ่ม coverage ในเชิงทิศทางจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของการตรวจจับนิวทริโนได้จริงหรือไม่

จุดเด่น: เพิ่มการครอบคลุมเชิงมุม (angular coverage) ครอบทั้งบนและล่าง และเหมาะสำหรับการทำ veto events (กรองเหตุการณ์รบกวนที่ไม่ใช่นิวทริโน)

ข้อจำกัด : การผลิตแก้ววงรีและการประกอบซับซ้อนมาก และการวางสอง PMTs ต้องใช้ระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ซิงโครไนซ์แม่นยำ (High-Accuracy Synchronization)

บทบาทในการทดสอบ IceCube-Upgrade: ทดสอบว่าการเพิ่ม coverage จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของการตรวจจับนิวทริโนได้มากน้อยเพียงใด

2.3.6 Pencil Beam Module

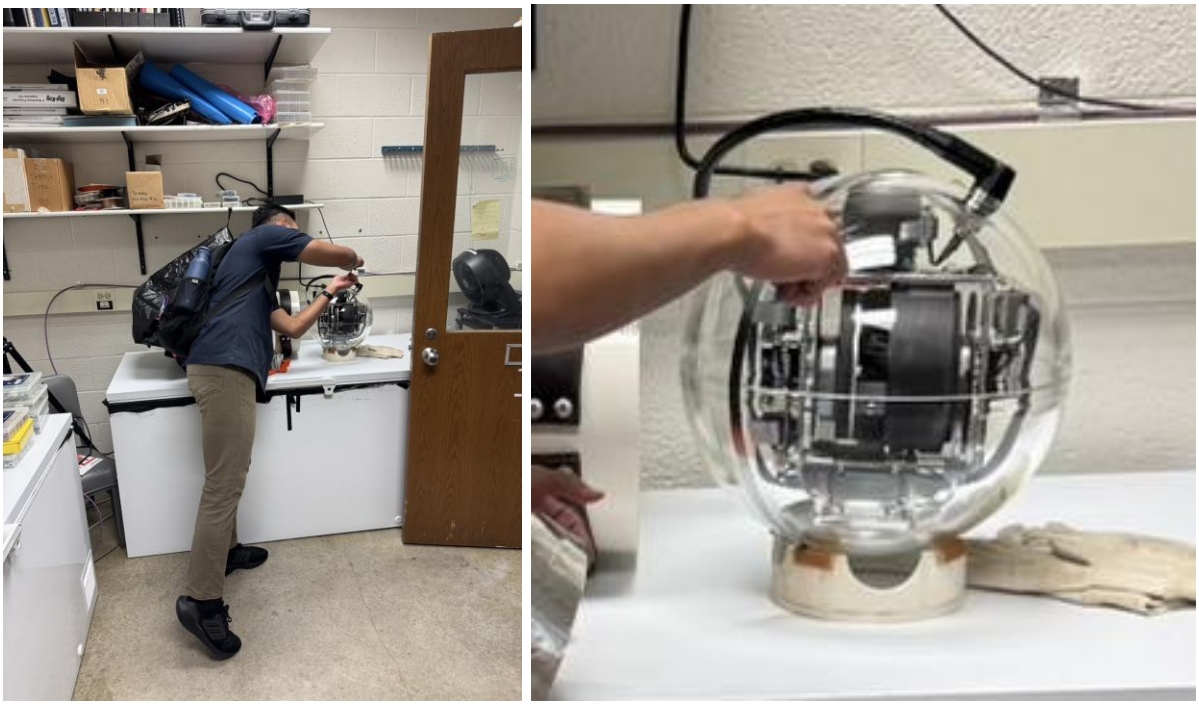


Figure 11: ภาพของผมและ Pencil Beam ที่กำลังทำ Module Testing อยู่ที่ Freezer ใน IceCube Lab, Chamberlin Hall

Pencil Beam Module เป็นโมดูลต้นแบบที่ไม่ได้ออกแบบมาเพื่อการตรวจจับนิวทริโนโดยตรง แต่มีบทบาทสำคัญในด้านการศึกษาและทำความเข้าใจคุณสมบัติของน้ำแข็งที่ขั้วโลกใต้ โมดูลนี้ถูกสร้างขึ้นเพื่อให้สามารถ ปล่อยแสงเป็นลำแสงแคบ (pencil-like beam) ลงไปในน้ำแข็งได้โดยตรง แสงที่ถูกปล่อยจะใช้ในการวัด การกระเจิง (scattering length), การดูดกลืน (absorption length) และ ความไม่เป็นเนื้อเดียว (anisotropy) ของน้ำแข็ง ข้อมูลเหล่านี้จำเป็นต่อการปรับปรุง โมเดลน้ำแข็ง (ice model) ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่สุดส่วนหนึ่งของการจำลองการเดินทางของโฟตอนและการตีความข้อมูลใน IceCube แม้ Pencil Beam จะไม่ใช่ baseline design สำหรับ Gen2 แต่เป็น เครื่องมือ calibration เชิงวิทยาศาสตร์ ที่ช่วยเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์ข้อมูลนิวทริโน

จุดประสงค์หลัก: ใช้ศึกษาคุณสมบัติของน้ำแข็งที่ขั้วโลกใต้ (South Pole Ice Properties) ได้แก่ ค่าการกระเจิง (scattering length) ค่าการดูดกลืน (absorption length) และ ความไม่เป็นเนื้อเดียว (anisotropy) ของน้ำแข็งในแต่ละทิศทาง

ความสำคัญ: ข้อมูลที่ได้จะถูกนำไปปรับปรุง **โมเดลน้ำแข็ง (ice model)** ซึ่งเป็นหัวใจของการจำลองและการตีความข้อมูลใน IceCube และ ช่วยให้การคำนวณตำแหน่งและพลังงานของนิวทริโนมีความแม่นยำสูงขึ้น

บทบาทในการทดสอบ IceCube-Upgrade: ใช้เป็น **เครื่องมือ calibration** สำหรับทำความเข้าใจคุณสมบัติน้ำแข็ง ไม่ใช่ baseline optical module สำหรับตรวจจับโดยตรง

3. IceCube Summer School 2025



การอบรมเชิงปฏิบัติการ IceCube Summer School ซึ่งดำเนินการจัดขึ้นทุกปีโดย WIPAC เป็นการอบรมเชิงปฏิบัติการหลักสูตรเข้มข้น ที่เกี่ยวข้องกับวิทยาศาสตร์ของไอซ์คิวบ์ อาทิเช่น เครื่องมือวัดนิวทริโนไอซ์คิวบ์ ดาราศาสตร์พหุพาหะ หลักทางวิศวกรรมที่เกี่ยวข้อง สถิติ และ รวมไปถึงการวิเคราะห์ข้อมูลของหอสังเกตการณ์นิวทริโนไอซ์คิวบ์ ณ ขั้วโลกใต้ การอบรมเชิงปฏิบัติการ IceCube Summer School จัดขึ้นทั้งหมด 5 วัน โดยเริ่มตั้งแต่วันที่ 2 มิถุนายน ถึง 6 มิถุนายน 2568



Figure 6: ภาพถ่าย นักวิจัย นักวิทยาศาสตร์ และนักศึกษา ที่เข้าร่วมกิจกรรม IceCube Summer School 2025

การอบรมในครั้งนี้ เปิดโอกาสให้ได้เรียนรู้หลายอย่าง เช่น ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับเครื่องมือวัดนิวทริโนไอซ์คิวบ์ที่ขั้วโลกใต้ วิ ธีการเลือกข้อมูลจากเครื่องมือวัดและการจัดการกับข้อมูล รวมไปถึงวิธีการทางสถิติที่ใช้ในการจัดการข้อมูลของหอสังเกตการณ์นิวทริโนไอซ์คิวบ์ ณ ขั้วโลกใต้ นอกจากนี้ยังได้เรียนรู้เกี่ยวกับแผนการในอนาคตของหอสังเกตการณ์นิวทริโนไอซ์คิวบ์ ณ ขั้วโลกใต้ ซึ่งจะมีการอัพเกรดอุปกรณ์เป็นไอซ์คิวบ์อัพเกรด (IceCube upgrade) และเจนเนอเรชั่น 2 (IceCube-Gen2) โดยกำหนดการอบรมมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 ตารางแสดงรายละเอียดการอบรม IceCube Summer School 2025 ระหว่างวันที่ 2-6 มิถุนายน พ.ศ. 2568

วันที่ 1: วันจันทร์ที่ 2 มิถุนายน 2568

Date	Time	Details	Categories	Contributors
Monday 2 June 2025	09:10 - 09:50	IceCube Science	Physics	Prof. Francis Halzen
	09:50 - 10:30	IceCube Detector	Detector and Calibration	Dr. Jim Braun
	11:00 - 11:40	Neutrino Physics	Physics	Dr. Baha Balantekin
	13:00 - 13:40	Cosmic rays	Physics	Dr. Paras Koundal
	13:40 - 14:20	Beyond Standard Model Physics with IceCube	Physics	Prof. Dan Hooper
	14:50 - 15:50	Introduction to Python	Workshop	Alicia Mand

วันที่ 2: วันอังคารที่ 3 มิถุนายน 2568

Date	Time	Details	Categories	Contributors
Tuesday 3 June 2025	09:00 - 09:40	Winterover: Life at the South Pole	Detector and Calibration	Dr. Yuya Makino
	09:40 - 10:20	Cosmic Ray Anisotropy	Physics	Perri Zilberman
	10:50 - 11:30	Diffuse neutrinos - from TeV to EeV	Physics	Prof. Lu Lu
	13:00 - 13:40	Detector Physics	Detector and Calibration	Prof. Justin Vandenbroucke
	13:40 - 14:20	GitHub Talk	Software and Computing	Jessie Thwaites
	14:50 - 15:50	JupyterHub, NPX, Grid, GitHub	Workshop	Jessie Thwaites

วันที่ 3: วันพุธที่ 4 มิถุนายน 2568

Date	Time	Details	Categories	Contributors
Wednesday 4 June 2025	09:00 - 09:40	Multi-messenger Astronomy	Physics	Angelina Partenheimer
	09:40 - 10:20	Astrophysics of Compact Objects	Physics	Nicholas Chamberlain Stone
	10:50 - 11:30	SNe Progenitors as Sources of GeV-PeV Neutrinos	Physics	Mukul Bhattacharya
	13:00 - 13:40	Neutrinos in Radio Waves	Physics	Michael DuVernois
	13:40 - 14:20	IceTray Talk	Software and Computing	Hannah Erpenbeck
	14:50 - 15:50	I3 File Tools & Steam Shovel	Workshop	Hannah Erpenbeck



รายงาน	โครงการนักศึกษาภาคฤดูร้อนของหอสังเกตการณ์นิวทริโนไอซ์คิวบ์ ประจำปี 2568
ชื่อ-สกุล	ธรรมรัตน์ ยาวิศิษฏ์
ช่วงเวลา	วันที่ 31 พฤษภาคม - วันที่ 1 สิงหาคม 2568

วันที่ 4: วันพฤหัสบดีที่ 5 มิถุนายน 2568

Date	Time	Details	Categories	Contributors
Thursday 5 June 2025	09:00 - 09:40	IceCube Event Selections	Data and Analysis	Zoe Rechav
	09:40 - 10:20	IceCube Analyses	Data and Analysis	Emre Yildizci
	10:50 - 11:30	IceCube Upgrade Talk	Detector and Calibration	Prof. Albrecht Karle
	13:00 - 14:30	Machine Learning and Neural Networks	Workshop	Josh Peterson
	15:00 - 15:40	Charge Collection, Digitization, and Processing / Filtering at the Pole	Detector and Calibration	Miles Garcia

วันที่ 5: วันพฤหัสบดีที่ 6 มิถุนายน 2568

Date	Time	Details	Categories	Contributors
Friday 6 June 2025	09:00 - 09:40	IceCube Simulation	Data and Analysis	Juan Carlos Díaz Vélez
	09:40 - 10:20	IceCube Calibration & Ice Models	Detector and Calibration	Dmitry Chirkin
	10:50 - 11:30	Event Reconstructions	Data and Analysis	Tianlu Yuan
	13:00 - 14:00	Diffuse Exercise	Workshop	Jesse Osborn

4. งานวิจัยที่ทำร่วมกับ IceCube

4.1 หัวข้องานวิจัย

Design and Validation of a Cosmic Muon-Based Testing Method for IceCube-Gen2 Optical Modules

การออกแบบและตรวจสอบความถูกต้องของเกณฑ์วิธีทดสอบด้วยคอสมิกมิวออนสำหรับโมดูลแสงในโครงการ IceCube-Gen2

4.2 รายละเอียดและการมีส่วนร่วมในงานวิจัย

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและตรวจสอบวิธีการทดสอบโมดูลตรวจจับแสงของ IceCube-Gen2 ด้วยอนุภาคมิวออนจากรังสีคอสมิก (cosmic muon-based testing) เพื่อใช้เป็นมาตรฐานการประเมินคุณภาพโมดูลในระดับการผลิตจำนวนมาก งานวิจัยนี้อ้างอิงข้อมูลจริงจากการทดสอบรับรองขั้นสุดท้าย (Final Acceptance Test: FAT) ของ LOM-16 ทั้ง 6 โมดูลแรก (หมายเลข 01, 02, 05, 06, 07, 08) ซึ่งเป็นชุดโมดูลรุ่นแรกของโลกที่กำลังจะถูกส่งไปติดตั้ง ณ ขั้วโลกใต้ภายในปีนี้

การดำเนินงานประกอบด้วยการประมวลผลและวิเคราะห์ข้อมูล waveform จาก PMT ทั้ง 16 หลอดต่อโมดูล โดยใช้ทั้งช่อง High-Gain (Ch1) และ Low-Gain (Ch2) พัฒนากระบวนการกู้ข้อมูลจากการชนขอบ ADC ในเหตุการณ์สว่างจัดของ Ch1 ด้วยการฟิตอัตราส่วนประจุ Ch1/Ch2 เพื่ออนุมาน gain ของ Ch2 ที่ไม่สามารถวัด SPE ได้โดยตรง วิเคราะห์การกระจายของประจุ (charge distribution) ทั้งในสเกลเชิงเส้นและลอการิทึม เพื่อระบุคุณลักษณะของสัญญาณมิวออน ตรวจสอบความสม่ำเสมอและการตอบสนองของ PMT แต่ละตัวผ่านการวิเคราะห์เหตุการณ์พร้อมกัน (coincidence) ระหว่างคู่ PMT ภายใต้พารามิเตอร์หน้าต่างเวลาและค่า threshold หลายระดับ และสร้างแผนที่ coincidence เพื่อระบุเหตุการณ์มิวออนที่มีลักษณะ “vertical-like” ซึ่งเป็นตัวชี้วัดความสมบูรณ์ของโมดูล

นอกจากนี้ยังได้สร้างและใช้งานการจำลองฟิสิกส์ด้วย GEANT4 บนโมเดล LOM-16 ล่าสุด เพื่อสร้างเหตุการณ์มิวออนจำลอง ปรับฟลักซ์ตามข้อมูลมาตรฐาน (PDG) และนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับข้อมูลจริงเพื่อยืนยันความถูกต้องของระเบียบวิธีที่พัฒนา ผลลัพธ์ชี้ว่าการกระจายของประจุและรูปแบบ coincidence จากข้อมูลจริงและการจำลองมีความสอดคล้องกันอย่างมีนัยสำคัญ

บทบาทของผู้วิจัยครอบคลุมการออกแบบแนวคิดการทดสอบ การพัฒนาเวิร์กโฟลว์การประมวลผลและวิเคราะห์ข้อมูลตั้งแต่ต้นจนจบ การสร้างตัวชี้วัดคุณภาพ (QC/QA metrics) ที่นำไปใช้ได้จริงในสายการผลิต รวมถึงการมีส่วนร่วมในขั้นตอนประกอบและทดสอบ LOM-16-09 ที่ PSL เพื่อปิดจ็อบชุด LOM-16 ทั้งหมด ผลงานนี้ได้วางรากฐานของวิธีทดสอบมิวออนที่ต้นทุนต่ำ ขยายสเกลได้ ทำซ้ำได้ และมีความน่าเชื่อถือ รองรับการผลิตและติดตั้ง IceCube-Gen2 ในอนาคตอย่างมีประสิทธิภาพ

รายงาน	โครงการนักศึกษาภาคฤดูร้อนของหอสังเกตการณ์นิวทริโนไอซ์คิวบ์ ประจำปี 2568
ชื่อ-สกุล	ธรรมรัตน์ ยาวิศิษฏ์
ช่วงเวลา	วันที่ 31 พฤษภาคม - วันที่ 1 สิงหาคม 2568

Design and Validation of a Cosmic Muon-Based Testing Method for IceCube-Gen2 Optical Modules

Thammarat Yawisit[12*], Yuya Makino[2], Christopher Wendt[2]

[1] School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Thailand

[2] Wisconsin IceCube Particle Astrophysics Center (WIPAC), University of Wisconsin–Madison, United States

*Corresponding author: tyawisit@icecube.wisc.edu

Abstract

The IceCube-Gen2 Neutrino Observatory plans to deploy approximately 10,000 optical modules to enhance sensitivity to high-energy astrophysical neutrinos, particularly in the TeV–PeV regime. Accurate reconstruction of neutrino-induced Cherenkov light in Antarctic ice demands robust and scalable quality control during module production. In this study, we present the design and validation of a muon-based testing method for IceCube-Gen2 optical modules using naturally occurring cosmic muons. The procedure integrates waveform inspection, charge distribution profiling, and inter-channel charge correlation of micro-base electronics to identify deviations from nominal performance. The protocol was applied to six LOM-16 modules, including the very first batch scheduled for deployment at the Amundsen-Scott South Pole Station. These results demonstrate the protocol's capability to identify subtle hardware issues and validate detector performance without reliance on external calibration sources, enabling large-scale, physics-informed quality assurance that supports the next-generation search for PeV neutrinos and beyond, including cosmogenic signatures.

Introduction

IceCube Neutrino Observatory has pioneered the detection of high-energy neutrinos using a cubic-kilometre array of photomultiplier-based Digital Optical Modules (DOMs) embedded in Antarctic ice. With the upcoming IceCube Gen2 upgrade, new-generation optical modules such as the LOM-16 are being developed to enhance detection efficiency and expand energy coverage. Ensuring the performance and reliability of these modules is critical to the success of the observatory. Conventional testing and validation of optical modules often rely on controlled laboratory setups or dedicated calibration beams, which are not scalable for screening large numbers of units under realistic deployment conditions. Cosmic muons, as ubiquitous and well-characterized particles, provide a natural and effective calibration source that can be leveraged for in-situ testing.

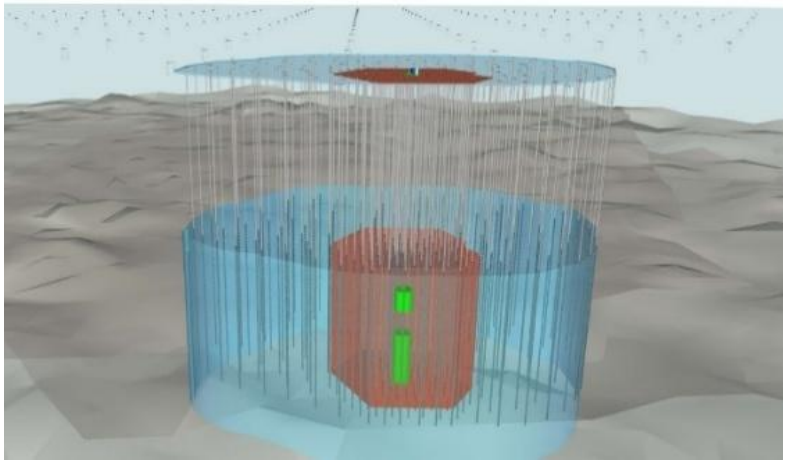


Fig1: Schematic drawing of the IceCube-Gen2 facility, including the optical array (blue shaded region) that contains IceCube (red shaded region) and a more densely instrumented core that will have additional sensors added in the next few years as part of the IceCube Upgrade project underway (green shaded region). Credit: IceCube Collaboration

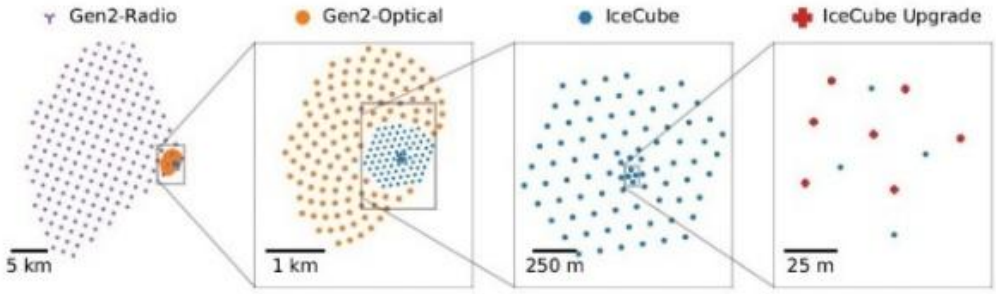


Fig2: Top view of the envisioned IceCube-Gen2 facility at the South Pole. From left to right: The radio array consisting of 200 stations. IceCube-Gen2 strings in the optical high-energy array, with 120 new strings (shown as orange points) spaced 240 m apart and instrumented with optical modules over a vertical length of 1.25 km. The total instrumented volume in this design is 7.9 times larger than the current IceCube detector array (blue points). On the far right, the layout for the seven IceCube Upgrade strings relative to existing IceCube strings is shown. Credit: IceCube Collaboration

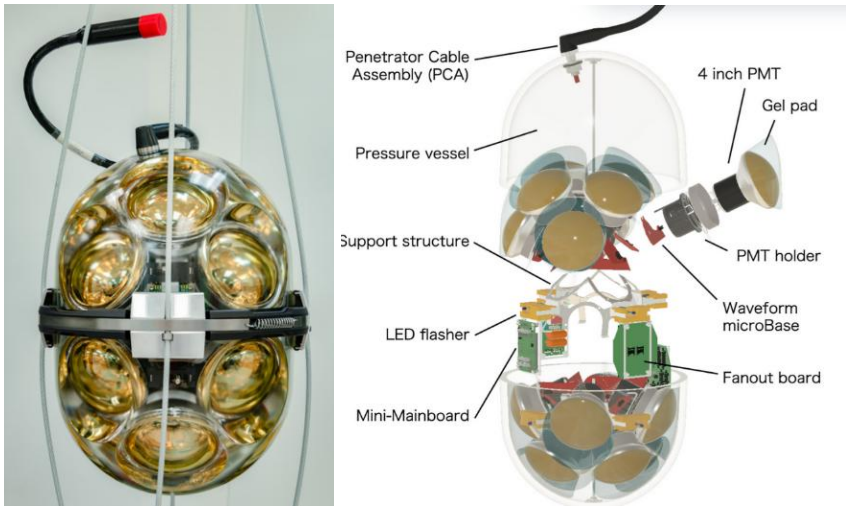


Fig3: The IceCube-Gen2 Optical Module Candidate (LOM-16), a next-generation photodetector array comprising 16 photomultiplier tubes (PMTs) enclosed in a transparent pressure-resistant sphere. The module is designed for enhanced photon detection and dynamic range, enabling the efficient observation of Cherenkov light in Antarctic ice.

This study focuses on the development and validation of a protocol for assessing the performance of the LOM-16 (mDOM: Multi-PMT Digital Optical Module), a next-generation optical sensor designed for the IceCube-Gen2 neutrino observatory. The LOM-16 comprises sixteen 4-inch photomultiplier tubes (PMTs) mounted within a transparent, pressure-resistant glass sphere capable of withstanding the extreme environment of the Antarctic ice sheet. The internal structure includes essential electronics such as the mini-mainboard, microBase, fanout board, and a calibration LED flasher system, all integrated to ensure reliable signal acquisition and module calibration. Compared with earlier single-PMT designs, the LOM-16 offers enhanced photon collection, greater angular coverage, and improved redundancy, thereby playing a crucial role in advancing the sensitivity of IceCube-Gen2 to astrophysical neutrinos.

To ensure quality and reliability prior to large-scale deployment, this study introduces a performance verification protocol specifically designed for the LOM-16 optical module, employing a comprehensive framework that integrates charge correlation analysis, waveform inspection, and charge distribution profiling. By analyzing correlations of detected charge across multiple PMT channels, the protocol identifies consistent signal behavior and highlights deviations that indicate hardware irregularities such as unstable PMT gain, faulty connectors, or calibration mismatches. Complementing this, detailed inspection of digitized PMT waveforms (ADC traces) enables precise evaluation of pulse shape, triggering behavior, and distortions, with particular attention to noise, afterpulses, undershoot or overshoot effects, and baseline stability, thereby detecting subtle malfunctions that may not be visible through conventional statistical checks. Finally, statistical profiling of integrated charge distributions across large datasets provides a further diagnostic layer by revealing long-term performance issues through characteristic deviations such as extended tails, skewed slopes, or shifts in the peak response, ensuring comprehensive validation of module performance.

Methodology

The Long Optical Module (LOM-16) is a next-generation photodetector designed candidate for the IceCube-Gen. It comprises 16 photomultiplier tubes (PMTs) arranged symmetrically within a transparent, pressure-resistant spherical housing.

The PMTs are distributed equally between the upper hemisphere and lower hemisphere, with eight PMTs in each section. In the upper hemisphere, the PMTs are further organized into two layers [1] Upper Polar (4 PMTs): PMT Nos. 08, 10, 12, and 14 [2] Upper Equatorial (4 PMTs): PMT Nos. 00, 02, 04, and 06

Similarly, the lower hemisphere is structured as [3] Lower Polar (4 PMTs): PMT Nos. 09, 11, 13, and 15 [4] Lower Equatorial (4 PMTs): PMT Nos. 01, 03, 05, and 07 This configuration provides nearly uniform angular coverage and enhances the module's capability to detect Cherenkov photons across a wide solid angle.

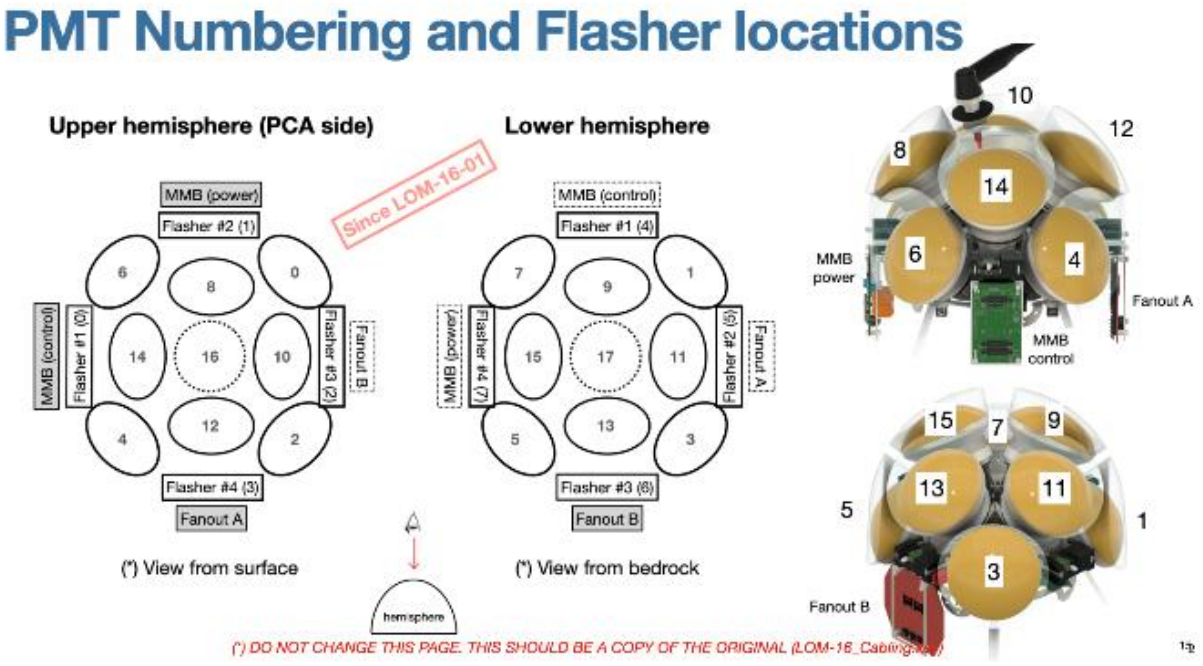


Fig. 4. Photomultiplier tube (PMT) numbering and flasher LED locations in the IceCube-Gen2 Long Optical Module (LOM-16). The module comprises 16 PMTs arranged symmetrically in a transparent spherical housing. The upper hemisphere (left) contains PMTs 00–07, divided into equatorial (PMTs 00, 02, 04, 06) and polar layers (PMTs 08, 10, 12, 14). The lower hemisphere (center) contains PMTs 01–07 in a similar configuration, with equatorial (PMTs 01, 03, 05, 07) and polar layers (PMTs 09, 11, 13, 15). Flasher boards (Flasher #1–#4) are distributed across the module for in-situ calibration. The right image shows the physical arrangement of PMTs and associated electronics within the module.

Each PMT in the LOM-16 optical module is equipped with a wuBase micro-base circuit, an advanced high-voltage (HV) and readout system adapted from the MDOM design. The wuBase integrates

The LOM-16 optical module integrates a compact yet efficient electronics architecture designed to ensure precise signal acquisition and reliable operation under extreme environmental conditions. A Cockcroft–Walton high-voltage generator with 13 stages and power consumption below 5 mW provides the PMTs with a stable and low-noise supply, while a dual-channel readout system combining Anode and Dy8 outputs extends the dynamic range for accurate charge measurements. Signal digitization is handled by an LTC2141IUP-12 analog-to-digital converter operating at 12-bit resolution and 60 MSPS with a low power footprint of approximately 90 mW, enabling high-fidelity waveform capture. These data are subsequently processed by a Lattice iCE40UP FPGA, which manages waveform buffering, coarse and fine timestamping, and local processing directly at the module base, while an STM32L552 microcontroller (ARM Cortex-M33) coordinates serial communications, triggering, and distributed data handling. Together, this integrated system balances performance, power efficiency, and functional versatility, providing a robust platform for large-scale deployment of IceCube-Gen2 optical modules.

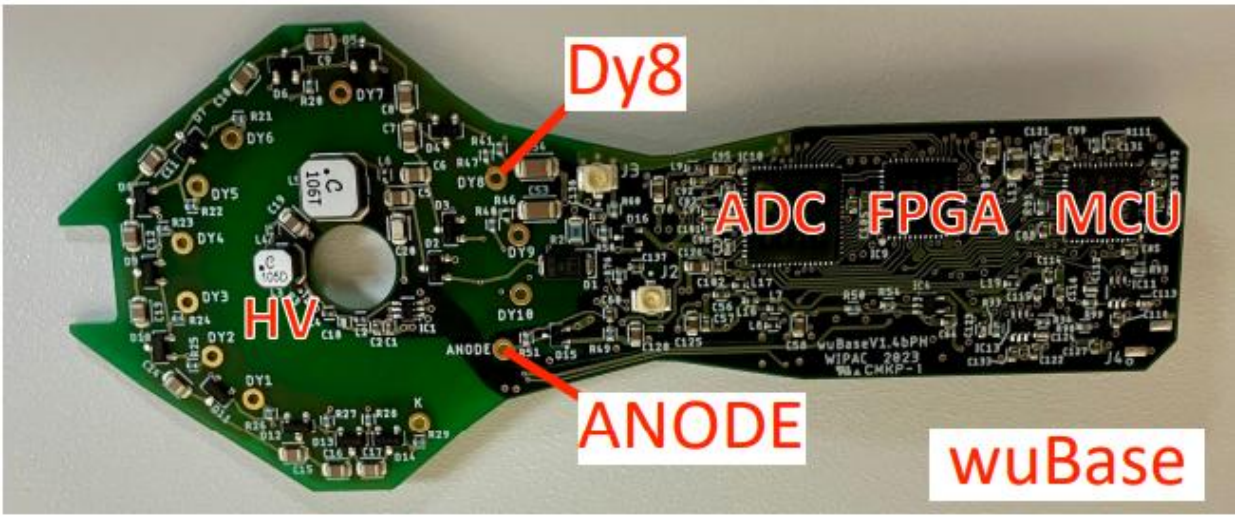


Fig. 5. The micro-base circuit integrated into each PMT of the LOM-16 optical module. Key components include: the Cockcroft–Walton high-voltage (HV) generator for PMT biasing; dual-channel readouts (Anode and Dy8) for extended dynamic range; an ADC (12-bit at 60 MSPS) for waveform digitization; a Lattice iCE40UP FPGA for on-base processing; and an ARM Cortex-M33 microcontroller (MCU) for communication and trigger management. This design enables distributed signal processing and facilitates efficient module testing in IceCube-Gen2.

While the previous figure illustrates the overall structure of the LOM-16 optical module, including the PMTs, pressure vessel, and mechanical support, a closer examination of the module's electronics is necessary to understand how signals are processed at the base. The detailed design is shown in Fig. 6, which highlights the micro-base architecture responsible for amplification, digitization, control, and data transfer, forming the foundation of reliable module performance.

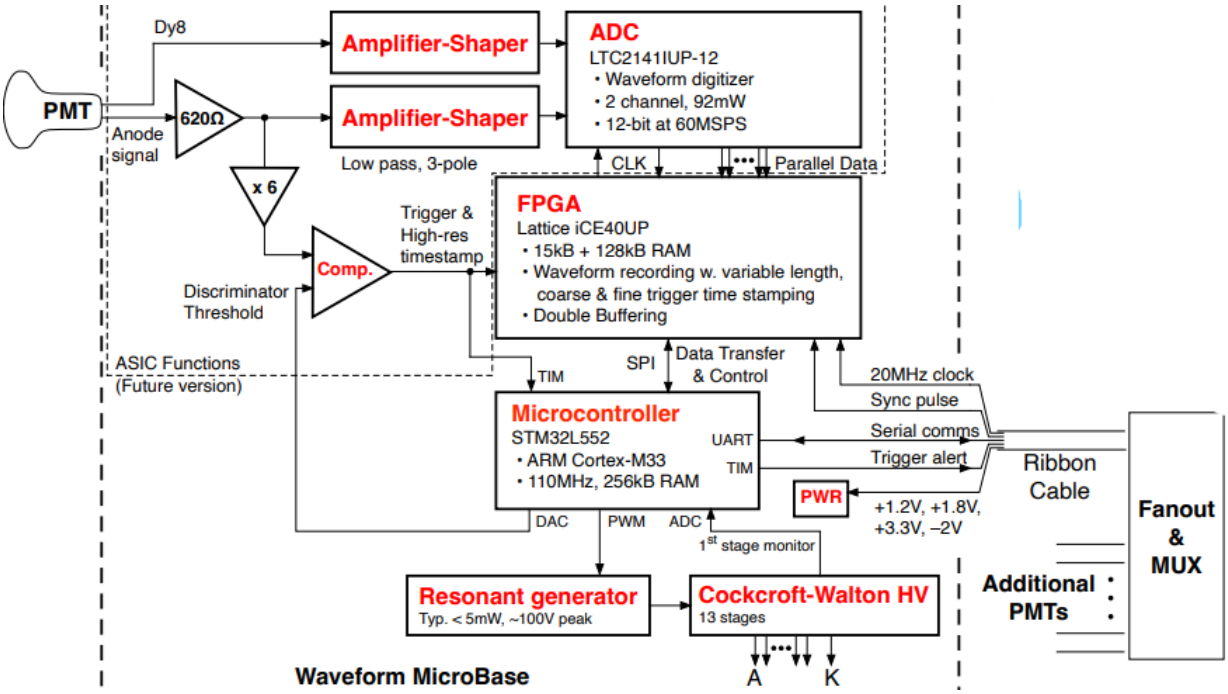


Fig. 6. Block diagram of the wuBase micro-base electronics used in the LOM-16 optical module. Signals from the PMT anode and Dy8 dynode are first amplified and shaped before being digitized by a 12-bit, 60 MSPS ADC (LTC2141IUP-12). A Lattice iCE40UP FPGA performs waveform buffering, timestamping, and data transfer management. An STM32L552 ARM Cortex-M33 microcontroller handles serial communication, trigger logic, and distributed control. The Cockcroft–Walton high-voltage generator provides biasing for the PMT, while a resonant generator supplies clock and synchronization signals.

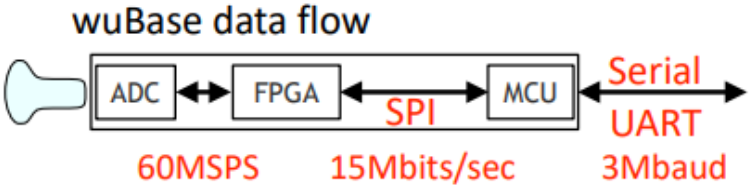


Fig. 7. Simplified data flow in the wuBase micro-base electronics. Signals from the PMT are digitized by a 12-bit ADC operating at 60 MSPS, buffered and processed by a Lattice iCE40UP FPGA, and transferred to the STM32L552 ARM Cortex-M33 microcontroller via SPI at 15 Mbit/s. The MCU communicates with the mainboard using a UART serial interface at 3 Mbaud for data transmission and control.

6. This design enables distributed signal processing within each PMT, improving scalability for mass production and testing of IceCube-Gen2 optical modules. The micro-base also provides self-monitoring capabilities for HV stability, electronic noise, and PMT time resolution. Thus the micro-base also maintains transmission rate of self-monitoring for and signal conversion between PMTs and FPGA signal processing module significantly.

7. Final acceptance testing (FAT) of the LOM-16 optical modules was performed at the Physical Sciences Laboratory (PSL), University of Wisconsin–Madison, under environmental conditions representative of the South Pole deployment. Each module was mounted within a temperature-controlled environmental chamber set to –40 °C, matching the expected in-ice operating temperature. The cosmic muon testing runs were integrated into the FAT sequence following gain calibration and baseline functional checks, enabling additional physics-informed validation without modifying the standard production workflow.



Fig. 8. Two LOM-16 optical modules inside the temperature-controlled environmental chamber at the Physical Sciences Laboratory (PSL), prepared for final acceptance testing at –40 °C. Each module is sealed within a protective bag to prevent frost accumulation and connected to the data acquisition and power systems via external cabling. Cosmic muon runs were conducted under these conditions to evaluate detector performance prior to South Pole deployment.

For each module, a dedicated muon run was executed with a duration of approximately 10–30 minutes, corresponding to an average of 6–18 k events per photomultiplier tube (PMT) given a nominal single-PMT trigger rate of ~10 Hz. The high-gain (Ch1) and low-gain (Ch2) channels of each PMT were digitized in parallel at 60 MSPS using the onboard 12-bit ADCs. This dual-channel readout ensured adequate sensitivity to both single photoelectron (SPE) signals and high-charge waveforms from through-going muons.

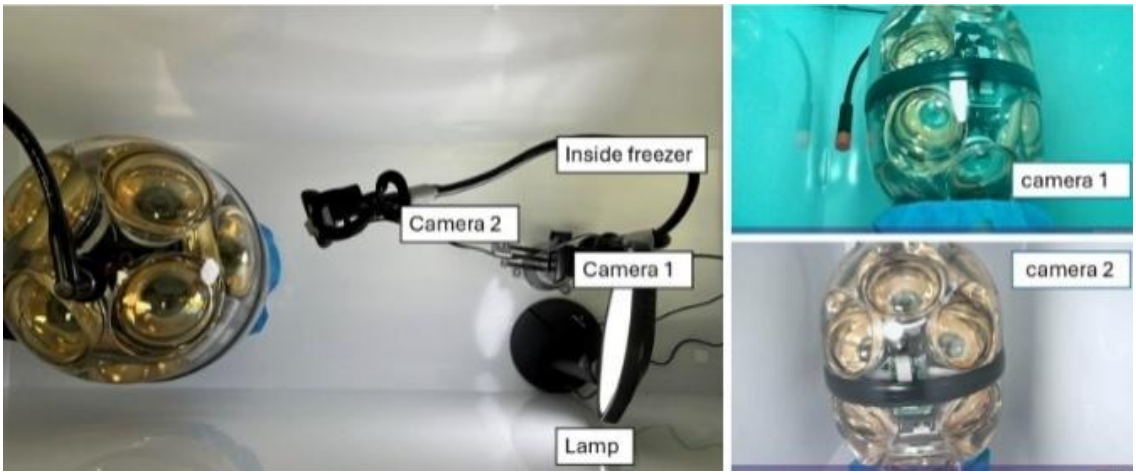


Fig. 9. Left: Dual-camera setup for monitoring the LOM-16 optical module during environmental chamber tests at –40 °C. Camera 1 provides a top-down view while Camera 2 captures a side profile, both illuminated by a fixed-position LED lamp inside the freezer. Right: Images from Camera 1 (top) and Camera 2 (bottom) during operation, used to visually inspect PMT status, detect possible condensation, and verify cabling integrity without opening the chamber.

The trigger configuration for muon runs employed a dynamic charge threshold tuned to yield an overall module trigger rate in the range of 150–200 Hz, equivalent to ~10 Hz per PMT. This threshold setting, combined with a fixed waveform readout window of 1.5 μs, maximized muon signal capture while suppressing noise-dominated triggers. All triggered events were recorded with full waveform information for both channels of the struck PMT, as well as timing metadata necessary for coincidence analysis across PMTs.

PMT No.	Total Events	Livetime (s)	Trigger Rate (Hz)
0	3392	601.16	5.642
1	4603	601.39	7.654
2	5321	601.56	8.845
3	4668	601.48	7.761
4	5803	601.4	9.65
5	6352	601.6	10.558
6	4649	601.13	7.734
7	3670	601.23	6.104
8	5634	601.83	9.362
9	8576	601.54	14.257
10	5100	601.36	8.481
11	5104	601.73	8.472
12	5484	601.84	9.112
13	5642	601.88	9.374
14	6303	601.87	10.473
15	6127	601.75	10.182

Table 1. This table summarizes the performance of each PMT in the tested LOM-16-01 module during a cosmic muon run. For each PMT (numbered 0–15), the Total Events column shows the number of triggered waveforms recorded within the run. The Livetime column indicates the effective data-taking duration for that PMT in seconds, and the Trigger Rate column shows the corresponding trigger frequency in Hz (calculated as Total Events / Livetime).

Muon runs were conducted for the first six production LOM-16 modules—serial numbers 01, 02, 05, 06, 07, and 08—which represent the inaugural deployment batch for IceCube-Gen2 and are scheduled for installation at the Amundsen–Scott South Pole Station in late 2025. Each module had previously passed standard electrical, optical, and communication tests; the muon-based measurements described here provided an additional performance layer targeted at identifying subtle anomalies, such as gain mismatches, atypical charge distributions, or inactive channels, that may not be detectable in conventional acceptance checks.

All data were stored in raw binary format on the module's onboard flash before being transferred via the UART communication interface to a local acquisition computer for offline analysis. Metadata recorded alongside each run included environmental conditions, firmware version, and calibration constants, ensuring reproducibility and traceability for subsequent data processing steps.



Fig 10. Six LOM-16 optical modules used in this study: LOM16-01 (Nyx), LOM16-02 (Stick_of_Butter), LOM16-05 (Westfallen_Watcher), LOM16-06 (Starspawn), LOM16-07 (Hutch), and LOM16-08 (Colossal_Squid). These modules represent the first production set of LOM-16 scheduled for deployment at the South Pole as part of the IceCube-Gen2 expansion in December 2025.

Charge Distribution Analysis for Single Photoelectron and Cosmic Muon

To characterize the responses of photomultiplier tubes (PMTs) within the LOM-16 modules, we analyzed charge distributions obtained from both Single Photoelectron (SPE) and cosmic muon events. The primary objective was to understand the intrinsic signal properties and to determine how different data visualization scales—linear and logarithmic—affect interpretation of the charge spectra. Initial charge distributions for both SPE and Muon datasets were first generated using a linear scale on the Y-axis (counts) to provide a preliminary overview of the event frequencies across different charge values.

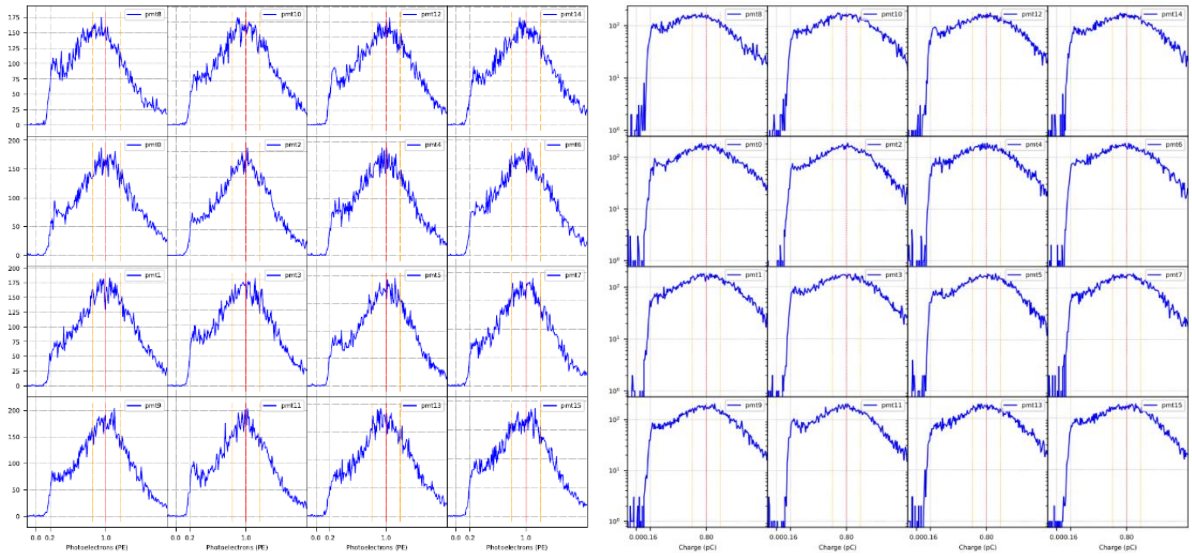


Fig 11. Charge Distribution of Single Photoelectron (SPE) Events. The plots display event counts versus charge in picoCoulombs (pC) and Photoelectrons (PE) for various PMT channels, using a linear scale on the Y-axis (left) and logarithm scale on the Y-axis (right)

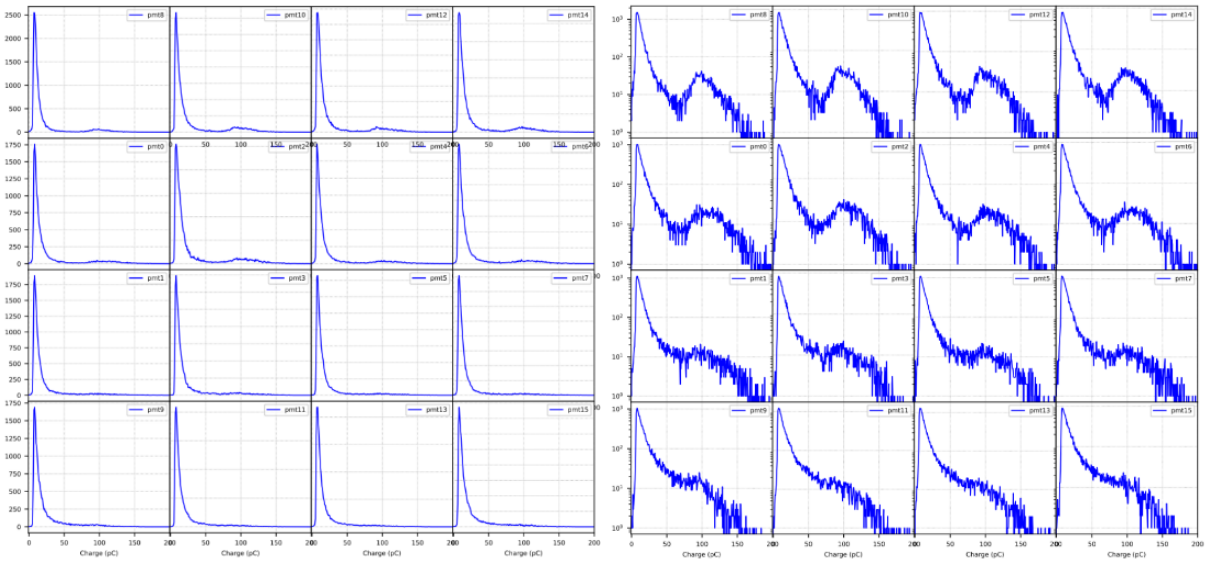


Fig 12: Charge Distribution of Muon Events. These plots show event counts versus charge in picoCoulombs (pC) and Photoelectrons (PE) for various PMT channels, using a linear scale on the Y-axis (left) and logarithm scale on the Y-axis (right)

Figures 11 present the charge distributions using a linear scale on the Y-axis. Figure 11 shows SPE events, where distinct peaks corresponding to single photoelectron charges can be identified across multiple PMT channels. Figure 2 shows cosmic muon events, where the charge spectrum extends to higher values due to multiple photoelectron production. While figures 12 display the same datasets using a logarithmic Y-axis scale, which enhances visibility of low-probability events and

tail structures in the charge spectra. The logarithmic scale allows for a more precise comparison between the SPE and muon distributions, highlighting subtle differences in gain and noise characteristics across PMT channels.

This analysis underscores the necessity of selecting appropriate visualization techniques for interpreting PMT charge spectra. The linear scale facilitates identification of peak positions and relative amplitudes, whereas the logarithmic scale reveals the full dynamic range of the signal, including low-intensity components. Together, these perspectives provide a more comprehensive characterization of PMT performance in both calibration (SPE) and operational (cosmic muon) conditions.

From Charge Distributions to Event-Level Analysis

While charge distribution analysis provides valuable statistical insight into the overall performance and sensitivity of each PMT channel, it does not reveal the detailed spatial–temporal characteristics of individual particle interactions. To investigate specific high-energy events particularly those consistent with cosmic muon signatures, it is necessary to examine waveform data from all PMTs on an event-by-event basis. By correlating the charge amplitude and timing patterns across the 16 PMT channels in the LOM-16 module, one can identify distinct topological patterns that indicate the passage of relativistic charged particles. Among these, through-going muons are of special interest, as they produce characteristic localized high-charge responses along a straight trajectory through the module. The following example demonstrates how such patterns emerge in the raw waveform data, allowing us to identify potential muon event candidates for further analysis.

Identification of Muon Event Candidates



Fig 13. Schematic top-view layout of the LOM-16 optical module showing the relative positions and numbering of the 3-inch PMTs. The highlighted red arrow illustrates the inferred trajectory of a through-going particle candidate, passing from PMT 08 through PMTs 00, 01, and 09, consistent with a vertically aligned muon track. This spatial correlation between consecutive high-charge PMT responses forms the basis for identifying potential muon event candidate

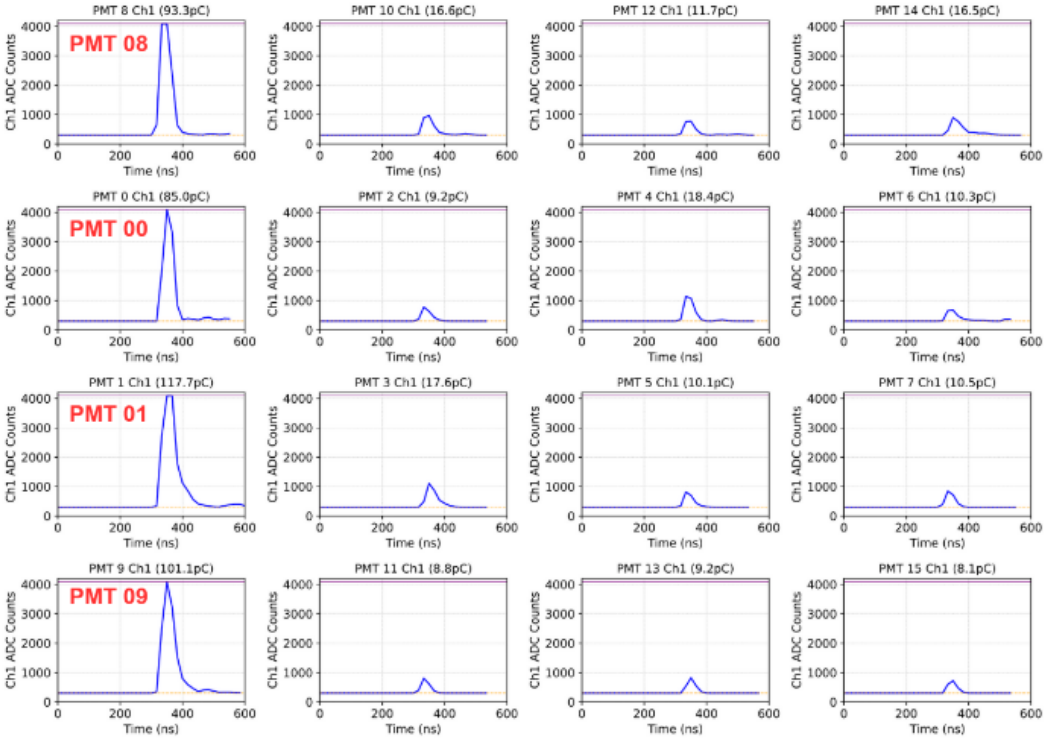


Fig 14. Example waveforms from all 16 PMTs in the LOM-16 optical module for a representative muon candidate event. PMTs 08, 00, 01, and 09 (highlighted in red) show significantly higher charge deposits (85–118 pC) and sharp, prompt peaks compared to other PMTs, consistent with the expected Cherenkov light pattern from a vertically traversing muon. The temporal alignment and localized high-charge responses along the inferred track path provide strong evidence for classifying this as a muon event candidate.

Waveform data from all 16 PMT channels for a single recorded event, alongside the corresponding physical arrangement of PMTs within the LOM-16 module. Four PMTs (PMT 08, PMT 00, PMT 01, and PMT 09) exhibit significantly higher integrated charges (ranging from approximately 85 pC to 117 pC) compared to the remaining channels, which mostly register below 20 pC.

These waveforms were acquired from the high-gain channel (Ch1) of a 12-bit ADC system (0–4095 counts) with a baseline of ~300 counts. In this event, the high-charge PMTs approach or reach the ADC's dynamic range limit, a common occurrence for muon events that can cause signal overflow in the high-gain channel. Such saturation underscores the importance of complementary information from the low-gain channel, which preserves pulse shape and amplitude for high-energy deposits, although tools for low-gain data analysis are not yet fully developed.

The spatial correlation of these high-charge PMTs forms a vertical alignment along one side of the module (see schematic on the right), suggesting a possible through-going muon traversing the optical module in a nearly straight trajectory. The temporal profiles of the corresponding waveforms display sharp, well-defined pulses with minimal afterpulsing, consistent with high-energy particle passage rather than background noise or single-photoelectron events.

This spatial temporal signature that localized high charges in adjacent PMTs aligned with a plausible particle track supports the hypothesis that the recorded event is a muon event candidate. Such candidate events can be further validated by cross-referencing with coincidence data from other modules or by applying reconstruction algorithms to determine the particle's direction and velocity.

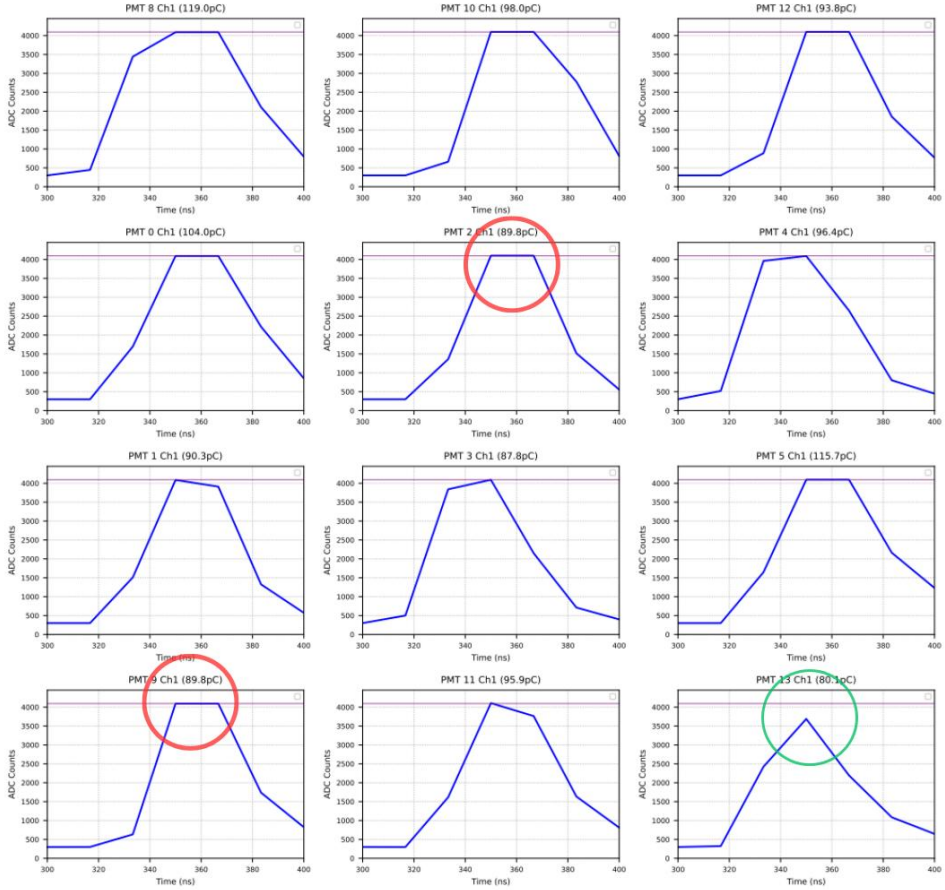


Fig 15. Example waveforms from the high-gain channel (Ch1) of selected PMTs during a recorded high-energy event. The ADC system employed is a 12-bit digitizer, with a maximum representable count of 4,095 and a baseline level at approximately 300 counts (green arrow). PMTs that register peaks exceeding the ADC limit experience waveform truncation at the top, as illustrated by the red-circled examples. This effect—known as ADC overflow—occurs when the input signal amplitude surpasses the digitizer's dynamic range, leading to underestimation of the true pulse height and, consequently, the integrated charge.

In contrast, other PMTs in the same event (green circle) remain below the ADC limit, retaining their complete pulse profiles. Such differences are critical for accurate charge reconstruction: overflowed pulses require either correction via calibration models or reliance on data from the low-gain channel, which is designed to accommodate higher-amplitude signals without saturation. However, in this analysis, low-gain channel processing tools are still under development, and thus the high-gain data are used with careful consideration of these limitations.

Transition from ADC Overflow to Gain Calculation

While the raw ADC waveform analysis provides insight into pulse shape and saturation effects, interpreting these signals in physically meaningful terms—such as the number of photoelectrons generated at the PMT's photocathode—requires an additional conversion step. This process bridges the measured charge in picoCoulombs to the fundamental photoelectron scale by incorporating the PMT's gain calibration.

Conversion from Charge (pC) to Photoelectrons (PE)

In Photomultiplier Tubes (PMTs), the detected signal is fundamentally related to the number of photoelectrons (PEs) generated at the photocathode by incoming photons. These initial photoelectrons are then multiplied through a series of dynodes, resulting in an amplified current pulse. The integral of this current pulse over time yields the total charge, typically measured in picoCoulombs (pC).

To convert the measured charge ($Q_{measured}$) back to the number of photoelectrons (N_{PE}), the gain of the PMT and the elementary charge of an electron are utilized. The fundamental relationship is based on the charge produced by a single photoelectron passing through the PMT's amplification stages.

The charge generated by one photoelectron (Q_{1PE}) can be calculated as

$$Q_{1PE} = G \times e$$

Where

- Q_{1PE} is the charge corresponding to one photoelectron (in Coulombs).
- G is the gain of the PMT, representing the average number of electrons produced at the anode per initial photoelectron (dimensionless, or electrons/PE).
- e is the elementary charge of an electron (1.602×10^{-19} Coulombs/electron).

Since the measured charge is typically in picoCoulombs (pC), and $1\ C = 10^{12}$ pC, the charge per photoelectron in pC is

$$Q_{1PE}\ (pC) = G \times e \times 10^{12}$$

Consequently, the number of photoelectrons N_{PE} for a given measured charge $Q_{measured}$ is determined by dividing the measured charge by the charge equivalent of a single photoelectron

$$N_{PE} = \frac{Q_{1PE}\ (pC)}{Q_{measured}\ (pC)}$$

$$N_{PE} = \frac{G \times e \times 10^{12}}{Q_{measured}\ (pC)}$$

In this analysis, a PMT gain (G) of 5×10^6 electrons/PE was used. Therefore, the charge equivalent for a single photoelectron was calculated as

$$Q_{1PE}\ (pC) = \left(5\times10^{6}\right)\times\left(1.602\times10^{-19}\ C\right)\times10^{12}\ pC/C$$

$$Q_{1PE}\ (pC) \approx 0.801\ pC$$

This conversion factor was then applied to all measured charge distributions, enabling the interpretation of signal strength in terms of fundamental photoelectron counts. The precision of this conversion is critically dependent on the accuracy of the PMT gain value.

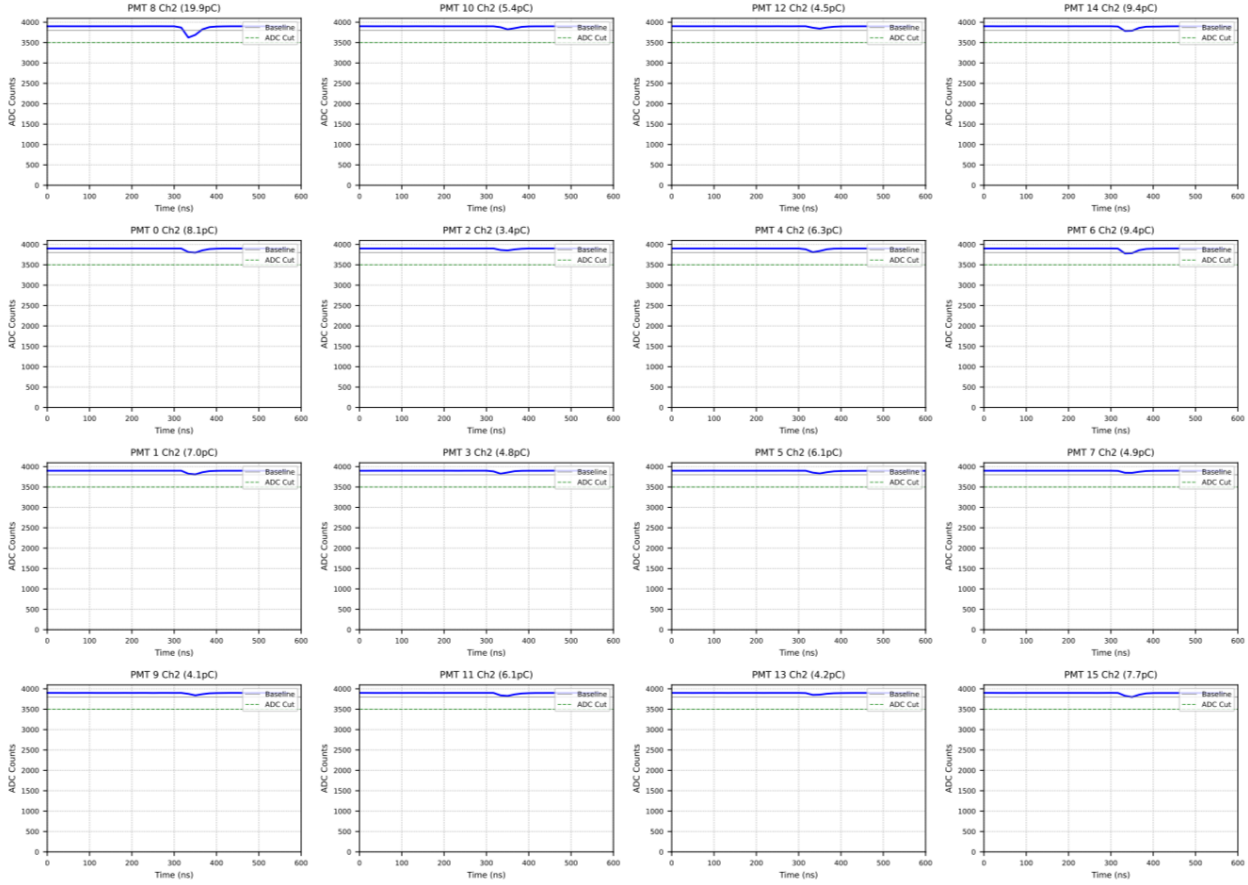


Fig 16. presents the ADC waveform traces for Ch2 from all 16 PMTs under test. Each panel displays the signal amplitude in ADC counts over time (0–600 ns) for a representative event, with the measured integrated charge shown in parentheses (in pC). The blue line marks the baseline level, while the green dashed line indicates the ADC cut threshold used in event selection.

Once the gain of Channel 1 (Ch1) is accurately determined using the method described in previous section, this value can serve as a reference for estimating the gain of Channel 2 (Ch2). The approach relies on the intrinsic correlation between the integrated charges recorded on both channels for coincident photon events.

In the testing setup, Ch1 and Ch2 correspond to two readout paths from the same photomultiplier tube (PMT), typically differing in preamplifier settings or cable routing. While both channels respond to the same physical signal, their absolute gains may differ due to variations in electronic amplification. To quantify this difference, we compute the **charge ratio correlation** between Ch2 and Ch1 for a large sample of events.

The integrated charge on Ch2, Q_{Ch2} is plotted against the corresponding charge on Ch1, Q_{Ch1} for coincident events. A linear fit to this distribution yields a slope $R_{Ch2/Ch1}$ representing the average ratio of Ch2 to Ch1 charge response. The gain of Ch2 can then be obtained as

$$G_{Ch2} = R_{Ch2/Ch1} \times G_{Ch1}$$

In this dataset, several Ch1 waveforms suffered from ADC overflow due to high-amplitude signals, making direct charge integration from Ch1 unreliable. To address this limitation, the corresponding Ch2 signals acquired through an alternate readout path with reduced gain were used as a substitute for charge measurement. This approach requires determining the Ch2 gain by correlating its measured charges with those from Ch1 in non-saturated events. Most Ch2 channels exhibit flat baselines without significant signal excursions for the shown events, except for a few cases where clear pulses are visible. These waveforms confirm the operational status of Ch2 and provide the necessary dataset for charge ratio correlation analysis with Ch1.

Transition to Ch1/Ch2 Charge Ratio Analysis

During normal operation, Channel 1 (Ch1) of each Photomultiplier Tube (PMT) in the LOM-16 modules is configured as the high-gain readout path. This channel is optimized for detecting low-amplitude signals with high resolution. However, in certain high-energy events—such as those caused by cosmic muons the Ch1 waveform amplitude can exceed the dynamic range of the Analog-to-Digital Converter (ADC), leading to ADC overflow and, consequently, an underestimation of the true integrated charge To address this limitation, Channel 2 (Ch2), which operates at a lower gain, is used as an auxiliary measurement path. Because of its reduced gain, Ch2 remains within the ADC range even in cases where Ch1 saturates, allowing for accurate charge extraction. Figure X demonstrates that the Ch2 readout path is fully functional across all tested PMTs, showing clear waveform pulses in events where Ch1 suffered from overflow.

In order to use Ch2 charges as substitutes for Ch1 charges in overflow cases, a calibration factor between the two channels must be determined. This is achieved by analyzing events in which both Ch1 and Ch2 record unsaturated waveforms from the same PMT. For each PMT, the integrated charges Q_{Ch1} and Q_{Ch2} from coincident events are plotted against each other

$$Q_{Ch1} = m \cdot Q_{Ch2} + c$$

Where

- m is the gain ratio between Ch1 and Ch2.
- c is the intercept, which ideally approaches zero in a properly calibrated system.

The gain ratio "*m*" provides the scaling factor required to convert Ch2 charges into their Ch1-equivalent values

$$G_{Ch2,\,est} = m \cdot G_{Ch1}$$

Figure 17 as following below shows an example correlation plot between Q_{Ch1} and Q_{Ch2} for LOM-16-01: PMT 00. The data points follow a near-linear trend, confirming a stable and predictable relationship between the two channels. A linear fit yields:

$$m = 12.47 \text{ and } c \approx 0.05 \text{ pC}$$

with a coefficient of determination $R^2 > 0.98$, indicating excellent linearity. This calibration procedure was repeated for every PMT across all six LOM-16 modules, producing a total of 96 correlation plots. The resulting gain ratios were compiled into a summary table (Table Z), enabling the conversion of Ch2 measurements into Ch1-equivalent charges for all tested modules. This approach ensures that even in events where Ch1 is saturated, accurate charge reconstruction remains possible.

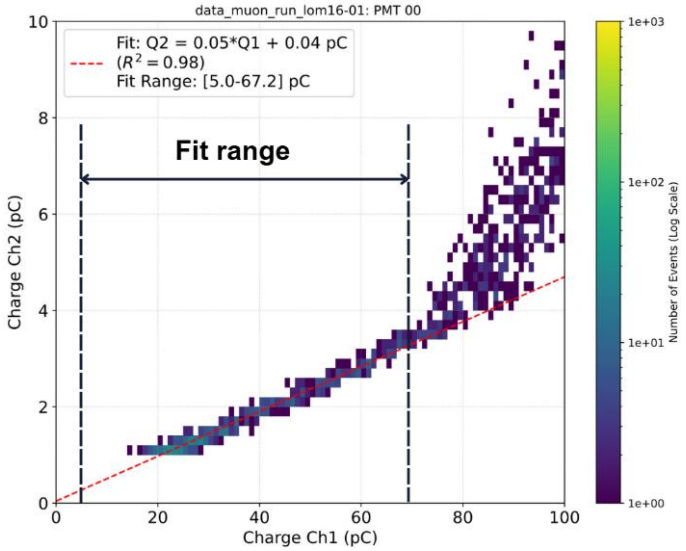


Fig 17. correlation between Channel 1 (Ch1) and Channel 2 (Ch2) integrated charges for LOM-16-01: PMT 00 during the cosmic muon run. Each point represents a coincident unsaturated event recorded by both channels. The color scale indicates the number of events in logarithmic scale. The linear fit (red dashed line) was performed within the defined fit range [5.0,67.2] pC of Q_{Ch1}, yielding a slope of 0.and intercept of 0.04 pC with $R^2 > 0.98$ This slope represents the gain ratio between Ch1 and Ch2 for this PMT.

The fitting range was restricted to 5–67.2 pC (≈4–84 PE), with the upper limit determined by the ADC dynamic range (Y-baseline = 300 ADC, Y-max = 4095 ADC), corresponding to ~3795 ADC counts. Using the measured single-PE amplitude (~45 ADC counts), the maximum non-saturated charge was estimated at ~84 PE. This ensures the linear fit is applied only within the detector's unsaturated response region. After determining the gain of Channel 2 using Channel 1 as the reference, the next step is to model the relationship between the integrated charges of Ch2 and Ch1. This enables cross-calibration and the correction of any non-linearities in the system.

- Data aggregation – For each PMT, aggregated mean charge values of Ch1 were computed for different Ch2 charge intervals, along with the corresponding standard deviations to be used as error bars.
- Polynomial regression – A second-degree polynomial fit was applied to capture the curvature of the Ch2–Ch1 relationship

$$Q_{Ch1} = a \cdot Q^2_{Ch2} + b \cdot Q_{Ch2} + c$$

- Non-linear modelling extensions – For PMTs exhibiting pronounced non-linearities (e.g., due to saturation effects or electronic response characteristics), this approach can be extended to advanced regression methods such as Gaussian Process Regression (GPR) or Neural Networks to improve accuracy across a wider dynamic range.

The figure below shows the fits for all 16 PMTs in the LOM16-01 module. Red markers represent the aggregated mean ± standard deviation values, while the blue dashed lines indicate the results of the second-degree polynomial fits.For most PMTs, the coefficient of determination (R^2) is high, indicating that a second-degree polynomial is sufficient for modelling the Ch2–Ch1 charge relationship in this context.

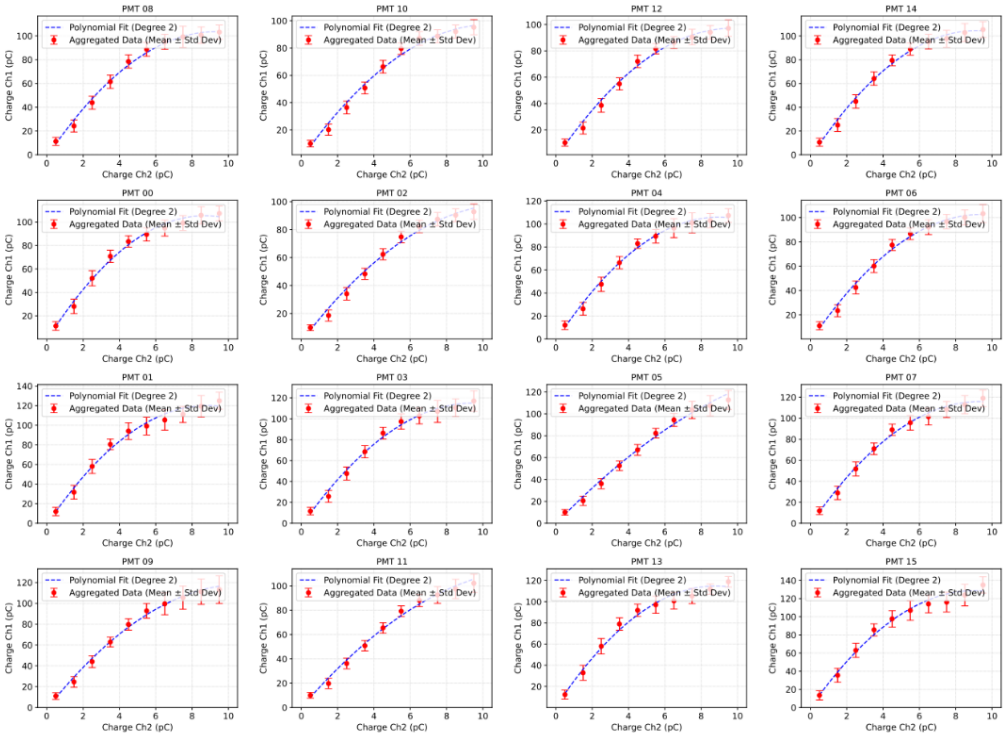


Fig 18: Charge ratio modelling results for all 16 PMTs in the LOM16-02 module. Red markers represent aggregated mean charge values of Ch1 for each Ch2 charge bin, with error bars indicating ±1 standard deviation. Blue dashed curves show second-degree polynomial fits applied to capture the non-linear Ch2–Ch1 relationship. The fitted models demonstrate high consistency across PMTs, with minor deviations at higher charges likely due to saturation effects.

After performing the fit within the defined charge range, the gain of Channel 2 (Ch2) relative to Channel 1 (Ch1) was obtained for each PMT. This calibration step ensures that both channels are properly cross-referenced, minimizing systematic deviations in the charge measurements. With the experimental gain calibration established, the next step is to describe the simulation setup used to model the same muon interactions under controlled conditions. This simulation, implemented in Geant4 with the latest LOM-16 geometry, enables a direct comparison between measured and simulated responses, and provides a deeper understanding of the detector's performance under muon flux.

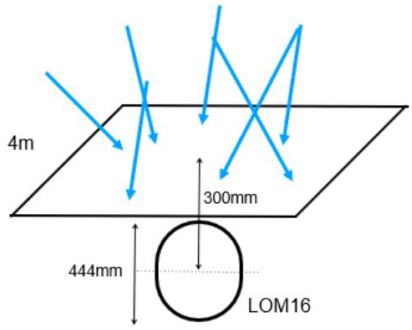


Fig 19: Schematic diagram of the simulation geometry for cosmic muon events. A 4 m × 4 m horizontal plane was defined above the LOM-16 module to serve as the muon generation surface. Muons were generated with random incident positions on the plane and isotropic angular distributions within the upper hemisphere. The vertical distance between the plane and the top of the LOM-16 module was set to 300 mm, with the module height of 444 mm from top to bottom. The diagram illustrates various possible muon trajectories intersecting the LOM-16 module.

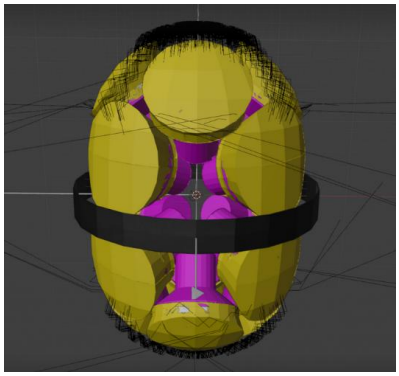


Fig 20: 3D model of the LOM-16 optical module implemented in the simulation framework. The module consists of sixteen 3-inch photomultiplier tubes (PMTs) arranged in two hemispherical arrays (yellow) and supported by an internal mechanical structure (magenta). The black horizontal band represents the external support frame. This geometry was used in Geant4 to accurately model the optical and physical interactions of cosmic muon events with the detector.

To validate the analysis chain and to interpret the measured muon signatures in a controlled setting, we generated a dedicated LOM-16 muon dataset in Geant4 (developed in collaboration with Nobu, Chiba University). The most recent LOM-16 geometry comprising sixteen 3-inch PMTs mounted in two hemispheres and the internal mechanical support was implemented and used throughout the study.

A planar generation surface of 4 m × 4 m was placed 300 mm above the top of the module (Fig. Y). Primary muons were sampled isotropically over the downward hemisphere (uniform in solid angle) with random impact points on the plane. The module height is 444 mm, and the detailed detector solids were included for proper particle transport and interactions. And we generated 100,000 down-going muon events; simple geometric acceptance yields ≈3,000 events intersecting the module. To relate the simulation to physical rates, events were weighted to the Particle Data Group (PDG) muon flux, i.e., the per-event weight reproduces the PDG-reported muon intensity integrated over the simulated solid-angle window and plane area. This normalization allows direct comparison of simulated hit rates and topology with the experimental dataset. Standard Geant4 processes for penetrating muons (energy loss and multiple scattering) were enabled. For each event, we recorded, for each PMT, the arrival time, detected photoelectron count, and deposited energy, allowing subsequent analysis of timing correlations, charge distributions, and coincidence rates across the module.

- integrated charge proxy (or PE estimate) consistent with the analysis units used for Ch1/Ch2 calibration,
- hit/topology information (PMTs above threshold, maximum channel, and multiplicity)
- basic kinematics (entry point and direction cosines) for track-pattern studies.

The same reconstruction and selection pipeline used for data—charge integration, quality cuts, and coincidence building—was applied to the simulated events. This ensures apples-to-apples comparison when validating (i) the muon-candidate topology seen in data, (ii) the expected multiplicity and charge distributions across PMTs, and (iii) the stability of the Ch2→Ch1 scaling under realistic muon trajectories.

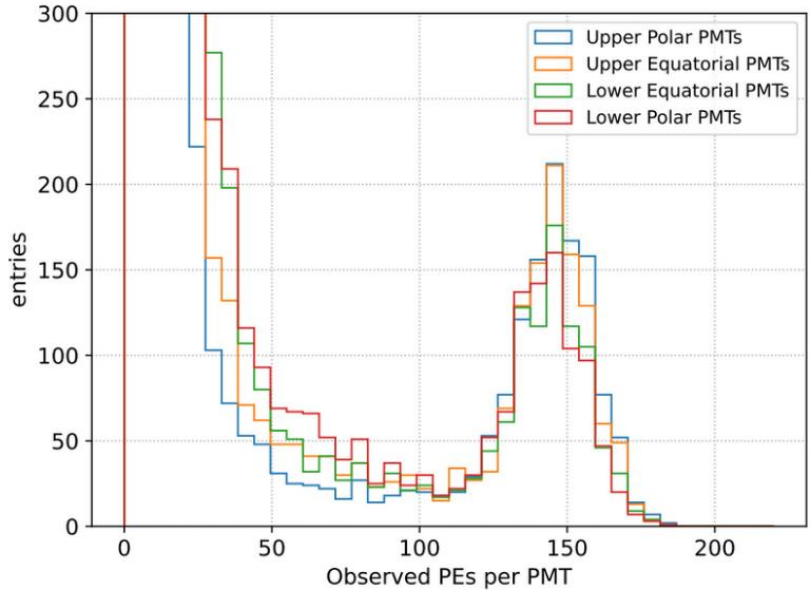


Fig 21: Distribution of observed photoelectrons (PEs) per PMT from the Geant4 LOM-16 muon simulation, separated by PMT location category: upper polar, upper equatorial, lower equatorial, and lower polar. All four categories show a broadly similar distribution shape.

The plot shown as above characterized by

- A pronounced peak around 140 PEs, corresponding to muons that traverse the module with trajectories producing near-maximum light yield in the directly illuminated PMTs.

- A steep drop toward low PE values (< 20 PEs), dominated by peripheral or grazing trajectories.

- A similar fall-off at high PE values (> 170 PEs), reflecting the geometric and optical limits of the module.

The close agreement in distribution shape across PMT groups indicates that the implemented geometry and optical response in simulation reproduce the symmetry and uniformity observed in experimental data. This validates the simulation's fidelity for subsequent rate and topology studies. To further confirm this consistency, the simulated charge distributions for individual PMTs were directly compared with those from real calibration data (e.g., Channel 2), revealing a similar peak position around 130 PEs, broader distributions in the lower hemisphere, and overall matching shapes with only minor deviations.

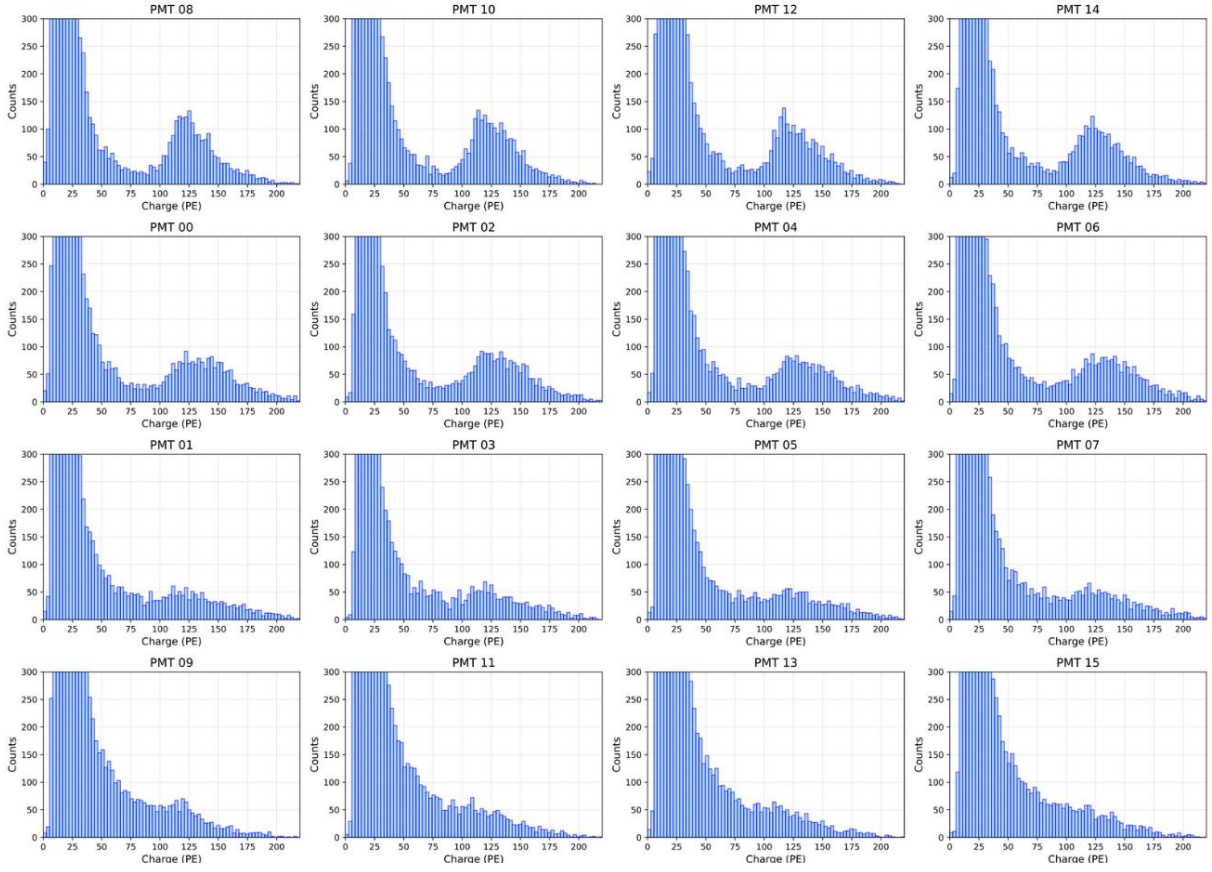


Fig 22: Simulated charge distributions (in photoelectrons, PEs) for all 16 PMTs in the LOM-16 geometry, generated from the Geant4 muon simulation. Each panel corresponds to an individual PMT, showing the frequency of recorded charge per event. The majority of PMTs exhibit a primary peak near 130 PEs, consistent with direct muon illumination and maximal light collection, and a broad low-charge component arising from peripheral or grazing trajectories.

When compared with the charge distribution from Channel 2 (Ch2) in real calibration data, the simulation reproduces key qualitative features

- Peak position: ~130 PEs in both data and simulation.
- Hemisphere asymmetry: Broader distributions in the lower hemisphere PMTs, attributed to module geometry and optical coupling differences.
- Shape similarity: Overall distribution shapes closely match those in the experimental data, with only minor deviations in relative amplitude and tail width.

This agreement supports the validity of the simulation setup for modeling muon-induced charge responses in the LOM-16 modules. Following the gain calibration and the study of single-channel charge spectra, where the simulated distributions were shown to closely match the experimental data in both shape and peak position, we extend our analysis to probe correlations between multiple PMTs within the same module. While the single-channel spectra capture the local response of individual sensors, they do not directly reveal how photons from the same physical event propagate through the module and are shared among different PMTs. Inter-PMT coincidences provide a powerful way to study these correlations. By examining the frequency at which two or more PMTs detect large signals within a short time window, we gain sensitivity to the module's optical geometry, the angular acceptance of each PMT, and the light scattering and absorption properties of the surrounding medium. These coincidence patterns are strongly influenced by the relative positioning of PMTs and by the photon propagation model used in the simulation, making them a stringent cross-check of our detector model. In this work, we quantify the coincidence rate between all PMT pairs by requiring that both channels register signals above a given charge threshold within a coincidence window of $\Delta T = 100$ ns. For example, the pair PMT 15 and PMT 07 located adjacently in the lower hemisphere shows one of the highest coincidence rates (~0.3 Hz) for events exceeding 50 PEs in both channels. Such results reflect not only their geometrical proximity but also shared light paths for photons produced in typical cosmic muon events. The resulting coincidence maps, shown in the following figure, serve as an additional benchmark for validating the simulation's geometry and photon transport against real detector data.

Coincidence rates (data, threshold = 50 PE, ΔT = 100 ns) Definition and construction.

For each event we formed the list of PMTs whose calibrated charge exceeded **50 PE** (we use the Ch2→Ch1 conversion derived earlier to avoid saturation). For every unordered pair (i,j) in that list, if the pulse times satisfied

$$|t_i - t_j| \leq \Delta T = 100 \text{ ns},$$

the pair was counted as a **coincidence**. The per-pair **rate** was obtained as

$$r_{ij} = \frac{N_{ij}}{T_{live}} \text{ [Hz]},$$

where N_{ij} is the number of coincidences and T_{live} is the data livetime. Statistical uncertainties are Poisson,

$$\sigma\,(r_{ij}) = \frac{\sqrt{N_{ij}}}{T_{live}}$$

The heat map is a symmetric 16×16 matrix (diagonal omitted), with PMT IDs on both axes and color indicating coincidence rate (Hz). The black horizontal/vertical lines divide the module into upper (top-right block) and lower (bottom-left block) hemispheres; the off-diagonal blocks correspond to cross-hemisphere pairs which have key observations as

- Nearest-neighbor enhancement. The largest rates appear along bands near the diagonal within each hemisphere, reflecting geometrical proximity and shared photon paths.
- Example pair. The PMT 15–PMT 07 pair in the lower hemisphere reaches ~ 0.3 Hz for the 50 PE threshold consistent with them being adjacent in the layout.
- Cross-hemisphere suppression. Pairs that span the hemispheres generally show lower rates due to reduced mutual acceptance and internal shadowing.
- Module symmetry. The matrix pattern is approximately symmetric between the two hemispheres; rows/columns with noticeably higher or lower rates would flag potential channel issues (timing offsets, gain mis-calibration, or partial occlusion).

Coincidence mapping complements single-channel charge spectra by probing spatial and temporal correlations of photons from the same physical event. The observed structure agrees with expectations from the module geometry and with the Geant4 photon-transport model, providing an additional validation of both the detector and the simulation. In practice, this diagnostic is also useful for channel-mapping checks, relative timing calibration, and QC: anomalous PMTs would appear as broken symmetry or outlying rows/columns in the matrix.

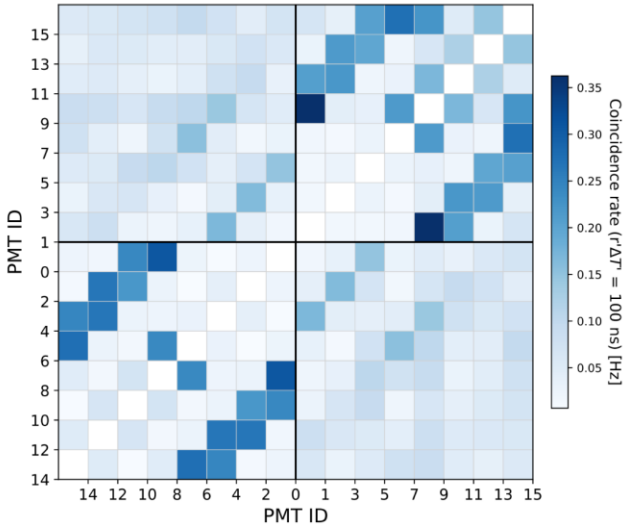


Fig 23: Coincidence rate matrix for LOM-16-01

Shows the coincidence rate between all 16 PMT channels of LOM-16-01, using a threshold > 50 PE and a time window ΔT = 100 ns. The X and Y axes correspond to PMT IDs. Darker colors indicate higher coincidence rates (up to ~0.35 Hz), while lighter colors represent lower rates.

Black lines divide the upper hemisphere (top-right block) and lower hemisphere (bottom-left block) of the module. Higher values near the diagonal correspond to PMT pairs that are physically close, making them more likely to detect photons from the same event within the coincidence window. A clear example is PMT 15 – PMT 07, which shows a rate of ~0.3 Hz due to their close proximity and shared light paths.



Fig 24: PMT layout within the module

This layout illustrates the physical arrangement of all 16 PMTs across the module's two hemispherical sides, providing spatial context for the coincidence matrix in Fig. 22. Each hemisphere hosts eight PMTs arranged to maximize angular coverage. Comparing this geometry with the coincidence patterns above reveals how physically adjacent PMT pairs—such as PMT 15 and PMT 07 on the left hemisphere—exhibit higher coincidence rates due to their proximity and shared light paths.

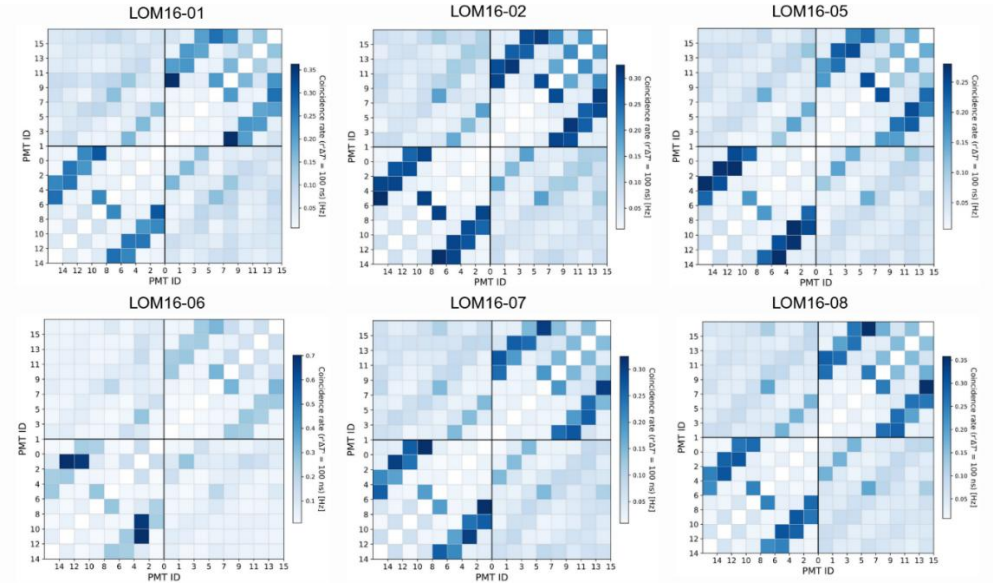


Fig 25: Coincidence rate matrices for six LOM-16 modules

Coincidence rate matrices are shown for six tested LOM-16 modules (LOM16-01, LOM16-02, LOM16-05, LOM16-06, LOM16-07, and LOM16-08). Each matrix displays the coincidence rate between all possible PMT pairs, calculated using a threshold of >50 PE and a time window of ΔT = 100 ns. The X and Y axes correspond to PMT IDs, with darker colors representing higher coincidence rates. Black lines divide the matrix into the upper hemisphere (top-right block) and lower hemisphere (bottom-left block) according to the physical PMT layout.

Higher coincidence rates are typically observed between PMTs that are physically adjacent or share overlapping light paths, producing values near the matrix diagonal. For example, several modules show strong coincidences between PMT pairs such as (15, 07) or (02, 03). Variations across modules reflect differences in optical coupling, PMT sensitivity, and assembly tolerances. Notably, LOM16-06 exhibits an unusually high coincidence (~0.7 Hz) for the (15, 07) pair, suggesting exceptionally strong optical cross-talk or higher localized photon yield in that configuration.

After establishing the coincidence matrices for all tested modules, we selected specific PMT pairs of interest particularly the polar pairs with the largest angular separation to further investigate the dependence of coincidence rate on detection threshold. By varying the integrated charge threshold (in PE) and recalculating the coincidence rate for each setting, we transformed the two-dimensional coincidence information into a one-dimensional functional relationship (Threshold vs Coincidence Rate).

This transformation allows for direct comparison between data and Geant4 simulation, providing a quantitative validation of both the PMT optical alignment and the overall module response to vertical muons. In addition, the resulting curves highlight performance consistency among selected PMT pairs, reinforcing the reliability of the coincidence-based testing approach for large-scale mass production.

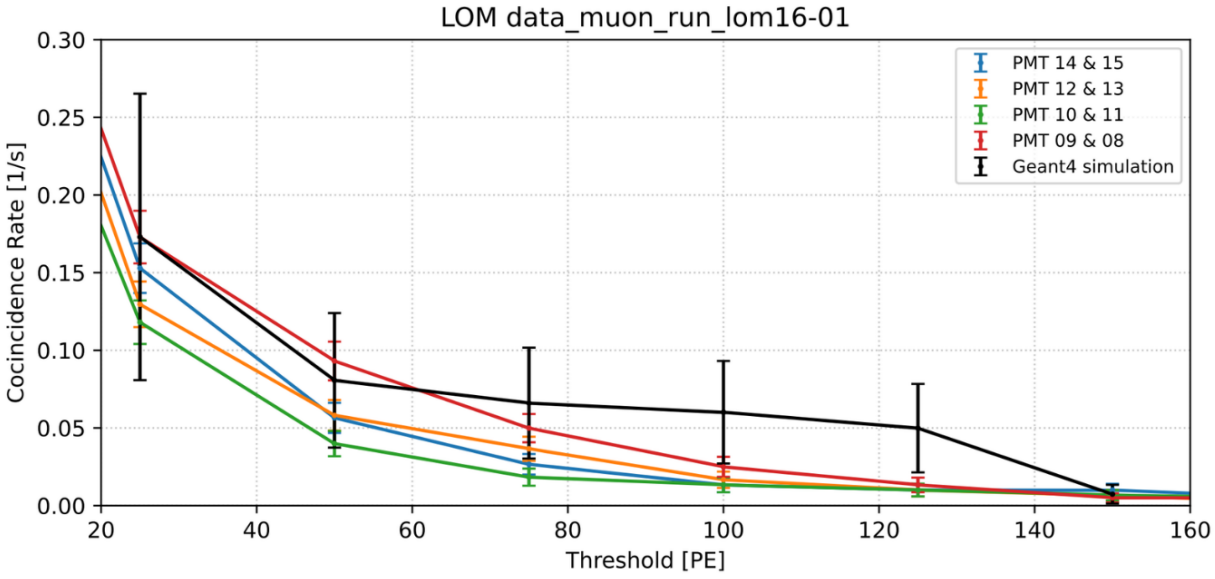


Fig 26: Coincidence rate as a function of photoelectron threshold for selected polar PMT pairs in LOM-16-01.

The four colored curves represent measured coincidence rates for different PMT pairs located on opposite poles of the module: PMTs 14 & 15 (blue), PMTs 12 & 13 (orange), PMTs 10 & 11 (green), and PMTs 09 & 08 (red). The black curve shows the corresponding Geant4 simulation under vertical muon illumination, incorporating standard energy loss and multiple scattering processes. Error bars indicate statistical uncertainties from the event counts. Across the threshold range, the measured coincidence rates of all polar PMT pairs are close to one another, reflecting the expected symmetry of the optical module response. The simulation results show reasonable agreement with the data, particularly at low to moderate thresholds, where the muon-induced Cherenkov light yield is high. At higher thresholds, the rates for all pairs drop sharply due to the reduced number of high-PE events, a trend also reproduced in simulation. These results confirm that the coincidence-based vertical muon detection method can serve as a practical and reliable diagnostic for module performance in the mass production phase.

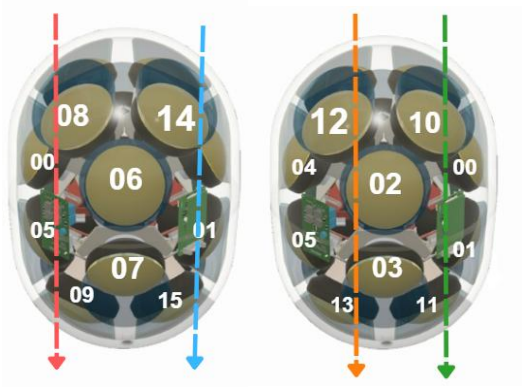


Fig 27: PMT pair configurations in the LOM-16 module used for coincidence analysis. Colored dashed lines indicate the pairs selected for vertical muon coincidence measurements (red and blue) and other geometrical pairings (orange and green). PMT numbering follows the standard IceCube LOM-16 scheme.

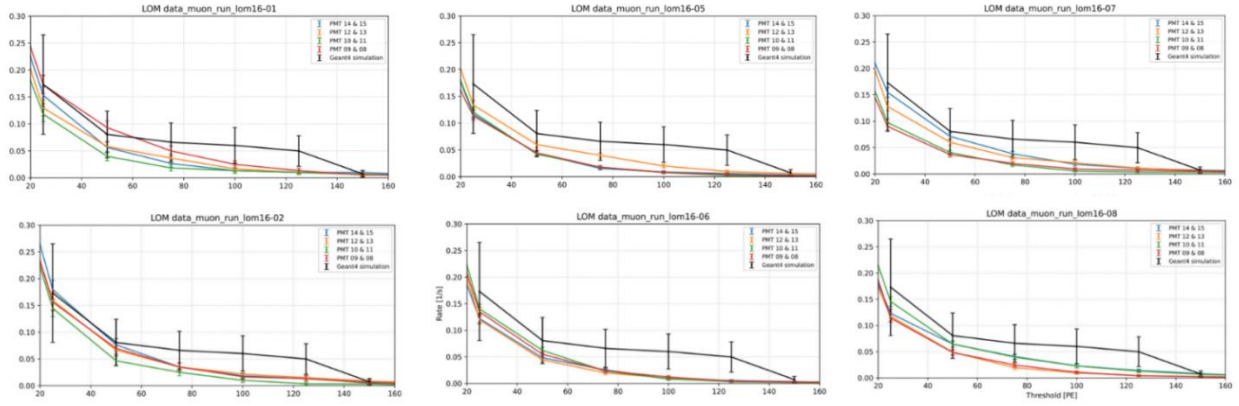


Fig 28: PMT pair configurations in the LOM-16 module used for coincidence analysis. Colored dashed lines indicate the pairs selected for vertical muon coincidence measurements (red and blue) and other geometrical pairings (orange and green). PMT numbering follows the standard IceCube LOM-16 scheme

Vertical-muon coincidence rates: from layout to threshold curves - Geometry & vertical pairs: The PMT layout drawings (upper panels) show the two hemispheres of the LOM-16 and the four polar PMT pairs that are approximately aligned with a vertical track through the module. The dashed guides indicate the two vertical meridians on each side. For the left hemisphere the relevant pairs are (08,09) and (14,15); on the right hemisphere they are (12,13) and (10,11). These pairs are chosen because a vertically down-going muon that intersects the module is most likely to illuminate both PMTs in a pair with comparable light yield and timing.

From matrices to rates: Starting from the coincidence matrices ($\Delta T = 100$ ns) introduced earlier, we extract the elements corresponding to each polar pair and evaluate their rate as a function of threshold. For a given threshold T in photoelectrons (PE), a coincidence is counted if both PMTs in the pair record an integrated charge $\geq$ T within the 100-ns window. The rate is then

$$R_{ij}(T) = \frac{N_{ij}\ (T)}{L}$$

Where $N_{ij}\ (T)$ is the number of qualifying coincidences and L is the live time after dead-time and data-quality cuts. Charges are expressed in PE by applying the Channel-1 gain (from SPE calibration) and the Ch2 gain obtained from the Ch1–Ch2 charge-correlation fits; saturated Ch1 events are therefore recovered via Ch2. Events with pathologies (e.g., ADC overflow in both channels, or waveform quality failures) are removed.

Threshold scan & uncertainties: We scan thresholds from 20 to 160 PE. Statistical uncertainties are computed from Poisson errors on $N_{ij}\ (T)$ and propagated to rates. The error bars shown on the Geant4 prediction also include a systematic band from the flux normalization (PDG), the muon angular spectrum, and photon transport uncertainties.

What the curves show: The lower panels plot $R_{ij}(T)$ for each polar pair and for each of the six LOM-16 modules. Several robust features appear

- Monotonic fall with T. Rates decrease as the minimum required light yield increases, as expected for a steeply falling energy / light-yield tail of through-going muons.
- Pair-to-pair consistency. The four polar pairs per module track one another closely across threshold evidence that the two hemispheres are optically and electronically balanced after the Ch2 cross-calibration.
- Module-to-module repeatability. Curves from different LOMs are similar within uncertainties, indicating stable assembly and calibration across the first-deployment batch.
- Data vs simulation. The black curve (Geant4) reproduces the overall shape and normalization from ~20–120 PE.

Small deviations at the highest thresholds are consistent with residual modeling differences (e.g., idealized surface optical properties, unmodeled electronic noise, or conservative data quality cuts).

Why this diagnostic matters: Compressing a full 16×16 matrix into four vertical-pair rate curves turns the coincidence topology into a production-friendly metric. For FAT/QA you can define

simple acceptance checks—e.g., rate at 50 PE, slope in the 40–100 PE region, and a χ^2 (or fractional deviation) to the Geant4 template—to rapidly flag modules with optical asymmetries, mis-gains, or underperforming PMTs. The agreement among the polar pairs and the reasonable data–simulation match demonstrate that (i) the Ch2 gain determination via charge-correlation works in practice, (ii) the coincidence timing and charge thresholds are behaving as designed, and (iii) this measurement is a strong candidate for a mass-production QC checkpoint for IceCube-Gen2 LOM-16 modules.

Discussion

The muon-based validation method for LOM-16 demonstrated in this work shows strong potential as a reliable and scalable quality assurance process for the IceCube-Gen2 optical modules. The coincidence matrix analysis, derived from data collected in controlled laboratory conditions, exhibited clear patterns consistent with the geometry of vertical muon tracks. The polar PMT pairs produced nearly identical coincidence rates, while the agreement between measured and simulated rates was within acceptable margins, indicating accurate modeling of both the module geometry and the muon angular distribution. One notable advantage of this approach is its **practicality for production environments**. Unlike calibration methods requiring specialized light sources, the muon-based test utilizes naturally occurring cosmic muons, eliminating the need for complex hardware setups. This enables **testing at any location and time**, with minimal operational downtime. The method also scales effectively — the same procedure can be applied to tens of thousands of modules in a large-scale production scenario, aligning with the anticipated deployment requirements for IceCube-Gen2.

From a detector physics perspective, the sensitivity of this method to vertical muons is particularly valuable. The geometry of the coincidence matrix enables the identification of signal symmetry across opposite PMT pairs, providing a strong indicator of module integrity. Furthermore, the charge correlation analysis between PMT channels allows for precise cross-validation of gain and dynamic range, enhancing diagnostic capabilities during production.

However, certain limitations should be acknowledged. The method relies on ambient muon flux, which may vary with altitude and environmental shielding, potentially affecting data acquisition time in heavily shielded environments. Additionally, while effective at identifying major defects or asymmetries, this test may not detect subtler optical or electronic instabilities that do not significantly alter muon coincidence rates. Complementary tests, such as controlled LED pulsing, may still be required for full characterization.

Looking forward, integrating this muon-based validation into the IceCube-Gen2 mass production workflow could provide **a standardized, low-cost, and scalable** quality assurance procedure. Combining this with automated data processing pipelines could enable real-time module validation, reducing bottlenecks and ensuring consistent detector performance in the field.

Conclusion

In this work, we developed and validated a muon-based testing method for the IceCube-Gen2 LOM-16 optical modules. By exploiting naturally occurring vertical cosmic muons and analyzing coincidence rates between polar PMT pairs, we established a practical, non-invasive approach to evaluate module performance without the need for specialized beam facilities. The method integrates both experimental data from multiple LOM-16 units and Geant4-based simulations, demonstrating consistent coincidence rate behavior across modules and good agreement between measurement and model predictions. This testing framework offers several key advantages

- **Anywhere / Anytime operability**: The method requires only basic shielding and triggering, allowing deployment in laboratory, production, or field environments without dependence on geographic location.
- **Scalability to mass production**: The procedure is efficient, repeatable, and adaptable to large-scale module validation, making it suitable for the quality control of **over 10,000 optical modules** anticipated for IceCube-Gen2.
- **Early fault detection**: Coincidence rate deviations can be used to identify PMT or electronics anomalies before deployment, reducing operational risks and maintenance costs.

The demonstrated agreement between data and simulation confirms the robustness of the approach and its potential as a **standardized quality-assurance step** in the production pipeline. Beyond LOM-16, the methodology can be adapted to future module designs, such as LOM-18, and to other large-scale neutrino detection arrays. This work thus represents a significant step toward ensuring the long-term reliability and performance of the next-generation IceCube detector.

Future Work

Building upon the demonstrated feasibility of the muon-based validation method for LOM-16 modules, several directions for future development are identified

- **Optimization of Coincidence Threshold Settings**: Further refinement of coincidence threshold values can improve signal purity and detection efficiency, particularly for modules deployed in high-background environments.
- **Extended Simulation Studies:** Conduct higher-statistics Geant4 simulations incorporating full ice/optical scattering models to better replicate South Pole deployment conditions and validate the robustness of the method under varying noise and muon flux scenarios.
- **Integration with Automated Test Benches**: Develop a fully automated data acquisition and analysis pipeline to enable continuous, hands-off module validation during mass production, reducing turnaround time for >10,000 modules planned for IceCube-Gen2.
- **Application to Other Optical Module Designs**: Adapt the method for next-generation optical modules with different PMT layouts or electronics, ensuring the approach remains flexible for future detector upgrades.
- **On-site Deployment Trials**: Conduct field tests at the South Pole and other relevant sites to verify the “Anywhere / Anytime” capability, including performance in extreme temperature and pressure conditions.

- Long-term Stability Monitoring: Extend the method to periodic post-deployment checks, enabling early detection of module degradation over years of operation.

Acknowledge

The author wishes to express sincere gratitude to the LOM-Team for their invaluable guidance and collaboration throughout the development and validation of the muon-based testing method. Special thanks are extended to the Detector & Calibration Group for their technical expertise, insightful feedback, and continuous support in both simulation and experimental phases of this work. The author also gratefully acknowledges the Wisconsin IceCube Particle Astrophysics Center (WIPAC), the Department of Physics at the University of Wisconsin–Madison, and the Physical Sciences Laboratory (PSL) for providing access to laboratory facilities, computational resources, and engineering support. Their collective contribution created the highly collaborative environment that enabled the successful completion of this project.

References

[1] C. Wendt, “LOM Final Design Review: Electronics — Other,” LOM Group: Chiba / Madison / Münster, Münster, Germany, Mar. 15, 2024.

[2] Y. Makino, “LOM FDR: Internal Structure & Integration,” LOM Team, Münster, Germany, Mar. 15–16, 2024.

[3] M. Dittmer, “Photomultiplier requirements,” Universität Münster, LOM FDR, Mar. 15, 2024.

[4] Y. Makino, “Upgrade LOM FDR Overview,” LOM Team, Münster, Germany, Mar. 15, 2024.

[5] K. Farrag, “Final Design Review: Pressure Vessel, Optical Gel and Gel Pads,” ICEHAP, Chiba University, Mar. 15, 2024.

[6] D. Butterfield, “Harness Development for the Long Optical Module (LOM),” LOM FDR, Münster, Germany, Mar. 15–16, 2024.

[7] M. Dittmer (IceCube-Gen2 Collaboration),“Performance studies on new 4" photomultiplier types intended for IceCube-Gen2 optical modules,” in Proc. 38th Int. Cosmic Ray Conf. (ICRC 2023), Nagoya, Japan, 2023. doi: 10.5281/zenodo.8151231.

[8] Y. Makino (IceCube-Gen2 Collaboration), “Mechanical design of the optical modules intended for IceCube-Gen2,” in Proc. 38th Int. Cosmic Ray Conf. (ICRC 2023), Nagoya, Japan, 2023.

[9] S. Griffin (IceCube-Gen2 Collaboration), “Electronics design for the IceCube-Gen2 optical module prototype,” in Proc. 38th Int. Cosmic Ray Conf. (ICRC 2023), Nagoya, Japan, 2023.

[10] S. Pick, “mDOM muon tagging studies,” Internal IceCube documentation, n.d.

[11] IceCube Collaboration, “LOM-16 cabling documentation,” Internal technical report, Jul. 16, 2024.

[12] S. Griffin, “LOM FDR software overview,” Version 3, Internal technical report, 2024.

[13] Y. Makino, “LOM WIPAC presentation,” Univ. of Wisconsin–Madison, Jun. 27, 2025.[14] IceCube Collaboration, “LOM FDR electronics — wuBase design,” Version 1, Internal technical report, 2024.

[15] IceCube Collaboration, “LOM internal progress report,” Internal documentation, May 30, 2025.

[16] C. Wendt, “Optical module electronics discussion: Overview of LOM design and considerations for Gen2 TDR; Look at motivations and questions around design choices,” Gen2 Workshop, IceCube Collaboration, Univ. of Wisconsin–Madison, Oct. 21, 2021

[17] Y. Makino, “Development of an optical module for IceCube-Gen2,” in Proc. ICHEP 2022, Bologna, Italy, Jul. 9, 2022, IceCube Collaboration, Univ. of Wisconsin–Madison.

[18] IceCube Collaboration, “LOM-16 assembly process at the Physical Sciences Laboratory (PSL)” , Univ. of Wisconsin–Madison, Physical Sciences Laboratory, n.d.

[19] IceCube Collaboration, “Integration of LOM-16 with electronics and DAQ system”, Dept. of Physics, Univ. of Wisconsin–Madison, n.d.

[20] IceCube Collaboration, “Laboratory testing and characterization of LOM-16 modules”, Univ. of Wisconsin–Madison, n.d.

[21] IceCube Collaboration, “Deployment preparations and handling procedures for LOM-16”, Univ. of Wisconsin–Madison, n.d.

รายงาน	**โครงการนักศึกษาภาคฤดูร้อนของหอสังเกตการณ์นิวทริโนไอซ์คิวบ์ ประจำปี 2568**
ชื่อ-สกุล	**ธรรมรัตน์ ยาวิศิษฏ์**
ช่วงเวลา	**วันที่ 31 พฤษภาคม - วันที่ 1 สิงหาคม 2568**

<u>รายงานชีวิตประจำวัน</u>

Day 1: May 31, 2025 (Saturday)

เสาร์ที่ 31 พฤษภาคม วันนี้ผมเริ่มต้นการเดินทางด้วยการเดินทางไป Check-In ที่ท่าอากาศยานนานาชาติสุวรรณภูมิ เวลา 15.00 น. ผมตื่นเต้นเล็กน้อย เพราะหลังจากประกาศผลในเดือนมกราคม ผมก็เตรียมตัวและ recheck ความพร้อมของตัวเองอย่างต่อเนื่องโดยตลอด ไม่ว่าจะเป็นเรื่องการจัดการ VISA / เอกสารต่าง ๆ / สัมภาระ รวมถึงเรื่องการประสานงานกับทีมงานของ Wisconsin IceCube Particle Astrophysics Center (ซึ่งต่อจากนี้จะขอเรียกว่า WIPAC) และ University of Wisconsin – Madison (ซึ่งต่อจากนี้จะขอเรียกว่า UW-Madison) โดยได้รับความเมตตาจากอาจารย์วราภรณ์ ดร.อัจฉรา และทางมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ช่วยในการติดตามและการ monitor การรายงานความคืบหน้าต่าง ๆ อย่างต่อเนื่อง ทำให้ทุกอย่างดำเนินไปอย่างราบรื่นและมีความพร้อมมากที่สุด

แผนการเดินทางของผม คือ จะเดินทางด้วยสายการบิน Korean Air และ Take Off จากสุวรรณภูมิเวลา 21.40 น. ของวันนี้ เดินทาง 5 ชั่วโมง ไปต่อเครื่องที่ท่าอากาศยานนานาชาติอินชอน สาธารณรัฐเกาหลี แวะพัก 5 ชั่วโมง และ take off จากอินชอน และบินยาวไปลงยังท่าอากาศยานนานาชาติโอแฮร์ ชิคาโก้ รัฐอิลลินอยส์ สหรัฐอเมริกา โดยผมเดินทางมาถึงสนามบินตั้งแต่เวลา 15.00 น. เพื่อตรวจสอบความเรียบร้อย และป้องกันการตกหล่นของเหตุการณ์ที่ไม่คาดคิด รวมถึง recheck เอกสารก่อนจะเข้าไป check in เพื่อรับ boarding pass ที่ counter โดยพวกผม check in แล้วเสร็จในเวลา 20.00 น. ซึ่งวันนี้ได้มีเพื่อน ๆ จาก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้เดินทางมาส่งผมด้วยเช่นเดียวกัน โดยถือว่าโชคดีมาก ๆ เพราะผมกำลังมีปัญหาเรื่อง eSim อยู่พอดี และได้เพื่อน ๆ มาช่วยดูอีกแรง

ผมเข้า Gate และนั่ง stand by อยู่ ณ บริเวณดังกล่าว เพื่อรอ loading เข้าสู่เครื่องบินในเวลาประมาณ 21.05 น. และ take off ขึ้นประมาณ 21.45 น. บิน 5 ชั่วโมง ไปลงที่อินชอนตามแผน โดยหลังผ่าน Immigration Process เพื่อ Transfer Flight ผมเดินไปสำรวจบริเวณอื่น ๆ ภายในสนามบิน เพื่อรับประทานอาหารเช้า และซื้อกาแฟ (เนื่องจากผมเบรก 5 ชั่วโมง และเป็นเวลาเช้ามาก ๆ และกว่าเครื่องจะออกก็ประมาณ 10.00 น.)




ภาพถ่ายร่วมกับเพื่อน ๆ ที่มาส่งผมที่ท่าอากาศยานนานาชาติสุวรรณภูมิ

Day 2: June 1, 2025 (Sunday)

หลังใช้เวลา 13 ชั่วโมงจากอินชอน ผมก็เดินทางมาถึง O'Hare, Chicago เวลาประมาณ 09.40 น. ตามเวลาท้องถิ่นของสหรัฐอเมริกา ในวันที่ 1 มิ.ย. และลงจากเครื่องเพื่อเข้า Immigration Process อีกครั้ง และเนื่องจากมี Invitation Letter และเอกสารอื่น ๆ เตรียมมาเรียบร้อยจากทางโครงการ ทำให้ทุกอย่างผ่านไปด้วยดี และผมผ่านเข้าไปสหรัฐได้โดยไปรับกระเป๋าที่โหลดตรงมาจากสุวรรณภูมิ และเดินทางไปขึ้น Coach Bus จาก O'Hare ไปเพื่อไปยังปลายทางของผมที่ Madison Downtown

Coach Bus ใช้เวลาเดินทางจาก Chicago มายัง Madison ประมาณ 3 ชั่วโมงนิด ๆ เนื่องจากเป็นรถโดยสารแบบไม่ประจำทางแต่ต้องจอง (อารมณ์คล้าย ๆ รถ บขส. ที่ไทย) Coach Bus ก็จะแวะจอดเป็นจุด ๆ ได้แก่ Rockford, South Beloit, Janesville, Dutch Mill และ Madison คือสุดป้าย ตามลำดับ โดยหลังจากถึง Downtown ทาง Caitlyn Daniel, Coordinator Staff ของ WIPAC ได้ขับรถมารับผมบริเวณ Mifflin West เพื่อเดินทางไป check in เข้าที่พักยัง Dejope Residence Hall ซึ่งเป็น Registration Center สำหรับการ check in เข้า housing ของ UW-Madison

โดยในปีนี้ผมจะพักที่ Vel Phillips Residence Hall ติดกับ Lake Mendota ซึ่งเป็น 1 ใน housing ที่อยู่ในจุดยุทธศาสตร์ของ Campus เนื่องจากมีสาธารณูปโภคครบครัน เดินทางสะดวก และมีความปลอดภัยสูง โดยหลังจาก check in เข้าที่พักและอาบน้ำเปลี่ยนชุดเสร็จแล้ว ผมก็ได้เดินไปสำรวจเมืองเล็กน้อย และหาของกินบริเวณ State Street และรีบกลับห้องมาประมาณ 19.00 – 20.00 น. เนื่องจาก วันพรุ่งเป็น IceCube Summer School วันแรก จึงต้องรีบกลับมานอนพักและเตรียมตัวสำหรับ School ในวันพรุ่งนี้



ภาพถ่ายร่วมกับ Caitlyn Daniels ที่เดินทางมารับผมจากบริเวณ South Campus
ไปลงทะเบียนเข้าที่พัก ที่ Dejope Residense Hall

Day 3: June 2, 2025 (Monday)

ผมเริ่มต้น IceCube Summer Student Program 2025 ด้วยการอบรม IceCube Summer School 2025

Date	Time	Details	Categories	Contributors
Monday 2 June 2025	09:10 - 09:50	IceCube Science	Physics	Prof. Francis Halzen
	09:50 - 10:30	IceCube Detector	Detector and Calibration	Dr. Jim Braun
	11:00 - 11:40	Neutrino Physics	Physics	Dr. Baha Balantekin
	13:00 - 13:40	Cosmic rays	Physics	Dr. Paras Koundal
	13:40 - 14:20	Beyond Standard Model Physics with IceCube	Physics	Prof. Dan Hooper
	14:50 - 15:50	Introduction to Python	Workshop	Alicia Mand

Topic หลัก ๆ ของวันนี้คือการ Introduction เกี่ยวกับ IceCube Neutrino Observatory โดยเริ่มตั้งแต่วิทยาศาสตร์ของ IceCube โดย Professor Francis Halzen, Principal Investigator ของ IceCube Neutrino Observatory, Detector and Calibration ของ IceCube เพื่อเข้าใจแนวทางในการ applied Engineering Conceptual ด้าน Instrumentation Engineering ในการตรวจวัด Astroparticle โดย Jim Braun, Neutrino Physics โดย Dr. Baha Balantekin และ Cosmic rays โดย Dr. Paras Koundal, Beyond Standard Model Physics with IceCube โดย Professor Dan Hooper, Director of WIPAC, และปิดท้ายด้วย workshop: Introduction to Python โดย Alicia Mand

Day 4: June 3, 2025 (Tuesday)

Date	Time	Details	Categories	Contributors
Tuesday 3 June 2025	09:00 - 09:40	Winterover: Life at the South Pole	Detector and Calibration	Dr. Yuya Makino
	09:40 - 10:20	Cosmic Ray Anisotropy	Physics	Perri Zilberman
	10:50 - 11:30	Diffuse neutrinos - from TeV to EeV	Physics	Prof. Lu Lu
	13:00 - 13:40	Detector Physics	Detector and Calibration	Prof. Justin Vandenbroucke
	13:40 - 14:20	GitHub Talk	Software and Computing	Jessie Thwaites
	14:50 - 15:50	JupyterHub, NPX, Grid, GitHub	Workshop	Jessie Thwaites

วันนี้เป็นวันที่สองของ IceCube Summer School 2025 เนื้อหาวันนี้จะเริ่มลงลึกขึ้นกว่าวันแรก โดย

เริ่มที่การเล่าประสบการณ์ Winterover: Life at South Pole จาก Yuya Makino, นักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่นที่ได้รับคัดเลือกให้เป็น IceCube Winterover 2019-2020 นั่นก็คือ Yuya ต้องไปใช้ชีวิตที่สถานีวิจัยขั้วโลกใต้ อามุนด์เซนต์-สก็อตต์ แอนตาร์กติกา เป็นระยะเวลา 1 ปีเต็ม เพื่อทำหน้านี้ในการเป็น Operator ของ IceCube และ Monitor การทำงานของ Field Station ตลอดทั้งปี ซึ่งสร้าง Inspiration ให้กับผมเป็นอย่างมาก เพราะด้วยกระบวนการคัดเลือกที่เข้มข้น ปัจจัยและเกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณา ความท้าทายของสภาพอากาศที่ส่งผลต่อรางกายและการทำงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ขึ้นชื่อว่าขั้วโลกใต้ ณ ทวีปแอนตาร์ติกา ทุกอย่างย่อมล้วนเป็นสภาพแวดล้อมที่สุดขีดโดยแท้จริง

ในส่วนเนื้อหาฟิสิกส์ก็เข้าสู่ Part ที่ลึกขึ้น ได้แก่ Cosmic Ray Anisotropy โดย Perri Zilberman , Diffuse Neutrinos – form TeV to EeV โดย Professor Lu Lu , Detector Physics โดย Professor Justin Vandenbroucke และปิดท้ายด้วยการ Workshop ด้าน Software อย่าง GitHub / JupyterHub / NPX / Grid ซึ่งเป็น Resources Communities ที่สำคัญของนักวิทยาศาสตร์และวิศวกรที่ทำงานอยู่ในสาย Software, Computer และด้าน Information Technology โดยสิ่งที่ผมได้กล่าวมา ณ ข้างต้นนี้เป็นเครื่องมือที่สำคัญมาก ๆ ของการทำงานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์ในปัจจุบัน

เมื่อเสร็จสิ้นการอบรมในช่วงเย็น ผมได้เข้าร่วม Social Events (Hiking) หรือ “การปีนผา” กับเพื่อน ๆ คนอื่น ๆ (ซึ่งมีแค่คนเดียว เพราะคนอื่น ๆ ไปทำอย่างอื่นกันหมด 555) นั่นก็คือ Aeron Richards เป็น Undergraduate Student จาก University of Alaska เรียนเอกด้าน Mathematics and Computer Science โดย Aeron ได้มาเข้าร่วม Cosmic Rays Summer Program 2025 ซึ่งเป็น Project-Based Program ที่จัดคู่ขนานใน Period เดียวกับ Summer Student Program ของผม เราเลยได้มีโอกาสคุยกันยาวตลอดทั้งเย็น - ค่ำ แลกเปลี่ยนมุมมองต่าง ๆ ด้านการเรียน วัฒนธรรม และความแตกต่างในการใช้ชีวิตระหว่างที่ไทยและสหรัฐ ฯ ซึ่งสิ่งหนึ่งที่ Aeron บอกกับผมคือ เขาเรียนเอกในด้าน Math-ComSci เป็นหลัก และ 48 ชั่วโมงที่นั่งฟังอบรมใน Summer School มา ฟิสิกส์ที่เขานั่งฟังมันแปลกใหม่ และ deep สำหรับเขาพอสมควร



ภาพถ่ายร่วมกับ Prof. Dan Hooper

Day 5: June 4, 2025 (Wednesday)

Date	Time	Details	Categories	Contributors
Wednesday 4 June 2025	09:00 - 09:40	Multi-messenger Astronomy	Physics	Angelina Partenheimer
	09:40 - 10:20	Astrophysics of Compact Objects	Physics	Nicholas Chamberlain Stone
	10:50 - 11:30	SNe Progenitors as Sources of GeV-PeV Neutrinos	Physics	Mukul Bhattacharya
	13:00 - 13:40	Neutrinos in Radio Waves	Physics	Michael DuVernois
	13:40 - 14:20	IceTray Talk	Software and Computing	Hannah Erpenbeck
	14:50 - 15:50	I3 File Tools & Steam Shovel	Workshop	Hannah Erpenbeck

เข้าสู่วันที่ 3 ของ IceCube Summer School 2025 กับเนื้อหาที่เรียกได้ว่าสเกลออกไปสู่นอกระบบสุริยะ

เริ่มต้นจากการเข้าใจ Multi-Messenger Astronomy Physics โดย Angelina Partenheimer ซึ่งถือเป็นการเปิดวันได้ดี เพราะ Multi-Messenger Astronomy เป็นแขนงวิชาที่ศึกษาจักรวาลโดยอาศัยข้อมูลจากผู้ส่งสารหลายรูปแบบ ได้แก่ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า นิวทริโน คลื่นความโน้มถ่วง และรังสีคอสมิก เพื่อทำความเข้าใจเหตุการณ์พลังงานสูง เช่น การระเบิดของซูเปอร์โนวา การรวมตัวของดาวนิวตรอน และการชนกันของหลุมดำ การรวมข้อมูลจากผู้ส่งสารเหล่านี้ช่วยให้ได้ภาพที่ครอบคลุมยิ่งขึ้นของฟิสิกส์ที่เกิดขึ้นในเอกภพ

ต่อที่ Astrophysics of Compact Objects หรือ ฟิสิกส์ดาราศาสตร์ของวัตถุมวลอัดแน่น โดย Nicholas Chamberlain Stone ซึ่งเป็น Talk ที่ผมรู้สึกสนใจเป็นพิเศษ (เนื่องจากศึกษาเกี่ยวกับวัตถุที่เกิดจากการยุบตัวของดาวมวลมาก เช่น ดาวนิวตรอน (neutron stars) และ หลุมดำ (black holes) และมีความเชื่อมโยงเกี่ยวกับสัมพัทธภาพทั่วไปและสมมติฐานเชิงทฤษฎีหลาย ๆ อย่างของไอน์สไตน์ ซึ่งผมชื่นชอบเป็นทุนเดิมอยู่แล้ว) ซึ่ง Compact objects เหล่านี้เป็นแหล่งพลังงานสูงที่ปล่อย นิวทริโน คลื่นความโน้มถ่วง และรังสีแกมมา ออกมาเมื่อเกิดเหตุการณ์รุนแรง เช่น การรวมตัวของดาวนิวตรอน (neutron star merger) หรือ การดูดกลืนมวลของหลุมดำ (accretion) เชื่อมกับ IceCube: ตรวจจับ neutrinos จาก compact objects เพื่อหาต้นกำเนิดของ cosmic rays และพิสูจน์ Energy Emissions Model ตามกรอบความคิดของนักฟิสิกส์ทฤษฎีนั่นเอง

SNe Progenitors as Sources of GeV–PeV Neutrinos หรือ นิวทริโนพลังงานสูงจากต้นกำเนิดของซูเปอร์โนวา โดยอธิบายได้คือ ดาวมวลมากก่อนระเบิดซูเปอร์โนวา (SNe progenitors) สามารถสร้างสภาพแวดล้อมที่เร่งอนุภาค (particle acceleration) ซึ่งปล่อยนิวทริโนพลังงานสูงระดับ GeV–PeV ออกมา ซึ่งทาง IceCube เองก็กำลังค้นหาสัญญาณจาก supernova remnants (SNRs) และ jets ของ gamma-ray bursts (GRBs) เหล่านี้อยู่ด้วย ทั้งยังมีส่วนเชื่อมกับงานของผมใน Summer นี้ สำหรับการที่อาจช่วย support calibrate detectors สำหรับการหานิวทริโนพลังงานสูงจากเหตุการณ์เหล่านี้ เป็นต้น

Neutrinos in Radio Waves (นิวทริโนในคลื่นวิทยุ) กล่าวคือ นิวทริโนพลังงานสูงมาก (ultra-high-energy neutrinos) สามารถทำให้เกิดปรากฏการณ์ Askaryan effect นั่นคือ เมื่อมันกระทบกับน้ำแข็งที่ขั้วโลกใต้จะปล่อย คลื่นวิทยุออกมา และสามารถตรวจจับได้ด้วยเสาอากาศ ARA (Askaryan Radio Array) หรือ RNO-G ซึ่งการตรวจจับสัญญาณวิทยุเหล่านี้จะเป็นส่วนสำคัญของ IceCube-Gen2 ในอนาคต

ปิดท้ายที่การ Workshop – IceTray & I3 File Tools & Steam Shovel โดย Hannah Erpenbeck ซึ่ง IceTray คือ framework หลักของซอฟต์แวร์ที่ใช้ประมวลผลข้อมูลใน IceCube โดยใช้สำหรับพัฒนาและเรียกใช้ modules (Python/C++) ในการวิเคราะห์ข้อมูล เช่น track reconstruction, event filtering และในส่วน I3 Files (.i3) คือ ไฟล์ข้อมูลหลักของ IceCube เก็บข้อมูลเหตุการณ์ที่บันทึกจาก detector และ (.i3) ยังมี I3 File Tools = เครื่องมือสำหรับแยก, รวม, และจัดการไฟล์ .i3 เช่น merge, split, dump ซึ่งสามารถทำงานร่วมกับ SteamShovel ซึ่งเป็น ซอฟต์แวร์ visualization ใช้ดู event ภายใน IceCube detector แบบ 3D สามารถเห็นการกระจายของ Cherenkov Light ใน DOM ทำให้เข้าใจว่ามี muon/neutrino ผ่านมาหรือไม่ เป็นต้น

หลังจากอบรมเสร็จในช่วงเย็น ผมได้ไปเข้าร่วมกิจกรรม Social Events นั่นคือการพายเรือคายัคที่ Lake Monona โดยนี่จะเป็นการพายเรือกลางทะเลสาบครั้งแรกของผม และผมลงแบบ Solo ไป (ใช่ครับ พายครั้งแรก + solo คนเดียว) แต่ไม่มีอะไรที่ผู้แทนประเทศไทยทำไม่ได้ครับ และหลังจากลงเรือไปได้ 5 นาที ผมก็พายวนอยู่กับที่อย่างนั้นแหละครับ 555 ความที่ครั้งแรก และพอเริ่มปรับทิศทางได้ก็มันส์ล่ะครับทีนี้ พายออกอ่าวไปไกล และก่อนจะวนกลับมา ลอดใต้สะพาน Monona Bridge และได้มีโอกาสชมวิวถ่ายรูปเมืองกลางทะเลสาบ ซึ่งสวยงามเกินจะบรรยายจริง ๆ ครับ

หลังจากพายเรือเสร็จ ผมได้ไปทานอาหารเย็นกับ Jay (Jieying Tang) ซึ่งเป็น Undergraduate Student เหมือนผม ที่เรียนอยู่ที่ UW-Madison โดยเรียนเอกด้าน Mathematics and Physics และทำงานในช่วง Summer ร่วมกับ Hannah Erpenbeck และ Professor Albrecht Karle ใน Pencil-Beam Project ใน Lab เดียวกับผม

Day 6: June 5, 2025 (Thursday)

Date	Time	Details	Categories	Contributors
Thursday 5 June 2025	09:00 - 09:40	IceCube Event Selections	Data and Analysis	Zoe Rechav
	09:40 - 10:20	IceCube Analyses	Data and Analysis	Emre Yildizci
	10:50 - 11:30	IceCube Upgrade Talk	Detector and Calibration	Prof. Albrecht Karle
	13:00 - 14:30	Machine Learning and Neural Networks	Workshop	Josh Peterson
	15:00 - 15:40	Charge Collection, Digitization, and Processing / Filtering at the Pole	Detector and Calibration	Miles Garcia

วันที่ 4 ของ IceCube Summer School เนื้อหา Talk วันนี้จะเน้น applied มากขึ้น โดยจะพูดถึงในฝั่ง Data and Analysis เป็นหลัก

IceCube Event Selections โดย Zoe Rechav อธิบายถึงกระบวนการเลือกเหตุการณ์ (event selection) จากข้อมูลดิบที่ได้จาก Field Station ของ IceCube เพื่อกรองให้เหลือแต่ signal ที่น่าสนใจ เช่น neutrino candidate และตัด background ออกไป (เช่น muons จาก cosmic rays หรือ Dark Noise จาก Signal Background) โดยใช้ filter และ reconstruction algorithm เพื่อแยกแยะ signal กับ noise

IceCube Analyses โดย Emre Yildizci เน้นอธิบายเกี่ยวกับแนวคิดทางการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงลึกหลังจาก event selection เช่น การหาทิศทางและพลังงานของ neutrino ในแต่ละช่วงสเกล / การสร้าง sky maps เพื่อใช้ในการหาความสัมพันธ์กับแหล่งกำเนิด (point source, diffuse flux) ผ่านการวิเคราะห์ในแนวทางต่าง ๆ เช่น Search for astrophysical neutrinos หรือ Multi-messenger coincidence analysis (ร่วมกับ gravitational waves หรือ gamma-ray bursts)

IceCube Upgrade Talk โดย Professor Albrecht Karle ซึ่งเป็น Director ของ IceCube Upgrade Project ซึ่งจะเป็นการ Talk เกี่ยวกับ IceCube Upgrade ซึ่งเป็นการติดตั้ง hardware ใหม่ (เช่น LOM-16, LOM-18, mDOM, DEgg) เพื่อปรับปรุง detector sensitivity โดยมุ่งเน้นการ calibrate DOMs รุ่นใหม่ (light yield, timing resolution) รวมถึงการติดตั้ง Long-Optical Module (LOM) ทั้ง 16-Series และ 18-Series ซึ่งจะปรับสเกลในการตรวจวัด Low-energy neutrinos เพิ่มขึ้นในช่วงปลายปี 2025 ที่ขั้วโลกใต้ ร่วมกับการเตรียมระบบให้ทำงานกับ software pipeline เดิมได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น (Integration)

Machine Learning and Neural Networks โดย Josh Peterson ซึ่งเป็น 1 ใน Part ที่สำคัญสำหรับการใช้เทคนิคทางด้าน AI เช่น neural networks ในการวิเคราะห์ข้อมูล IceCube โดยสามารถประยุกต์ใช้ได้อย่างหลากลาย ณ บริบทต่าง ๆ เช่น ใช้สำหรับ event classification (เช่น แยก neutrino flavor) / Regression Analysis (ประมาณค่าพลังงาน, ทิศทาง) หรือแม้กระทั่ง Anomaly detection (ค้นหาเหตุการณ์หายาก)

Charge Collection, Digitization, and Processing / Filtering at the Pole โดย Miles Garcia ซึ่งเป็นการอธิบายเกี่ยวกับการทำงานของ DOMs ที่ขั้วโลกใต้ ได้แก่ การเก็บประจุจาก PMT (photo-multiplier tube) , การแปลงสัญญาณ analog ⟶ digital (digitization) รวมถึงการทำ signal filtering เบื้องต้นเพื่อคัดเลือกสัญญาณ / ข้อมูลสำคัญก่อนส่งกลับไปที่ North data center



กิจกรรม Social Event ช่วงเย็นที่ The terrace

Day 7: June 6, 2025 (Friday)

Date	Time	Details	Categories	Contributors
Friday 6 June 2025	09:00 - 09:40	IceCube Simulation	Data and Analysis	Juan Carlos Díaz Vélez
	09:40 - 10:20	IceCube Calibration & Ice Models	Detector and Calibration	Dmitry Chirkin
	10:50 - 11:30	Event Reconstructions	Data and Analysis	Tianlu Yuan
	13:00 - 14:00	Diffuse Exercise	Workshop	Jesse Osborn

วันที่ 5 ของ IceCube Summer School 2025 ซึ่งวันนี้จะเป็นการอบรมในวันสุดท้ายของ Summer School

IceCube Simulation โดย Juan Carlos Díaz Vélez เน้นอธิบายเกี่ยวกับ การจำลองเหตุการณ์ (simulation) เป็นส่วนสำคัญในการทำความเข้าใจการตอบสนองของ IceCube Detector ต่ออนุภาคพลังงานสูง เช่น นิวทริโนและมิวออน โดยใช้ Monte Carlo methods เพื่อสร้างเหตุการณ์จำลองที่ใกล้เคียงกับความจริง เครื่องมือนี้ช่วยให้สามารถพัฒนาและทดสอบอัลกอริทึมสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลจริงได้อย่างแม่นยำ

IceCube Calibration & Ice Models โดย Dmitry Chirkin เน้นอธิบายเกี่ยวกับการ calibrate detector และการพัฒนา Ice Models เป็นหัวใจของการตีความข้อมูลจาก IceCube DOMs น้ำแข็งขั้วโลกใต้ไม่ได้เป็นสื่อที่สม่ำเสมอ (anisotropic medium) การเข้าใจการกระเจิงและการดูดกลืนของแสงภายในน้ำแข็ง (using models such as SPICE) จึงเป็นสิ่งจำเป็น เนื่องจากต้องตรวจสอบการปล่อยแสงของ light source ภายใน module และการแพร่กระจายของโฟตอนเพื่อให้โมเดลของน้ำแข็งสะท้อนพฤติกรรมที่แท้จริง ซึ่งจะเป็นรากฐานสำคัญของการวิเคราะห์ข้อมูลใน IceCube-Upgrade Project หรือ IceCube Gen2 ต่อไปในอนาคต

Event Reconstructions โดย Tianlu Yuan ซึ่งจะเน้นการขยายความเกี่ยวกับ Process หลังจากการเก็บข้อมูลและ calibrate อุปกรณ์ การ reconstruction จะทำหน้าที่แปลงสัญญาณที่ DOMs ตรวจจับได้เป็นข้อมูลทางฟิสิกส์ เช่น ทิศทาง พลังงาน และชนิดของอนุภาค วิธีการ reconstruction ที่พัฒนาขึ้น เช่น SplineMPE และ Paraboloid fit ช่วยให้สามารถระบุทิศทางการมาของนิวทริโนได้อย่างแม่นยำ การปรับปรุง DOMs รุ่นใหม่อย่าง LOM-16 ซึ่งมี photomultiplier tubes (PMTs) และระบบ calibration ภายใน จะช่วยลด uncertainty ใน reconstruction และยกระดับความสามารถของ algorithm ให้ทำงานร่วมกับ Module ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

ปิดท้ายด้วย Diffuse Exercise โดย Jesse Osborn เป็นการ workshop เกี่ยวกับวิเคราะห์ diffuse neutrino flux เป็นส่วนหนึ่งของ multi-messenger astrophysics มุ่งเน้นไปที่การศึกษาการปล่อยนิวทริโนจาก

แหล่งกำเนิดกระจาย (diffuse sources) ในเอกภพ ไม่ว่าจะเป็น supernova remnants หรือ active galactic nuclei การ workshop ครั้งนี้ใช้ IceCube data tools เพื่อสร้าง sky maps และจัดการกับ background events เพื่อให้สามารถแยกสัญญาณจริงออกมาได้ ในระยะยาวการ calibrate LOM-16 และการ integrate เข้าสู่ระบบจะช่วยให้สามารถตรวจจับเหตุการณ์นิวทริโนพลังงานสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

หลังจากอบรม Summer School เสร็จสิ้น ผมและเพื่อน ๆ ใน Summer School ได้แยกย้ายกันกลับยังที่พัก เนื่องจากหลาย ๆ คนต้องเดินทางกลับในวันรุ่งขึ้น แต่ผมได้คุยกับทาง Dr. Karle ว่าจะอยู่ต่อเพื่อรอพบกับ Advisor / Supervisor ที่พวกผมจะต้องเข้าไปช่วยงานต่อตลอดช่วง Summer ซึ่งคร่าว ๆ Dr. Karle ก็ได้แจ้งว่าผมจะทำงานร่วมกับ LOM-Team ที่ IceCube Lab, Chamberlin Hall ภายใต้การดูแลของ Christopher Wendt และ Yuya Makino

หลังจากนั่งรอไม่นานนัก Dr. Karle ก็ได้พาผมไปพบกับ Dr. Wendt (ซึ่งต่อจากนี้จะขออนุญาตเรียกว่า Chris) เพื่อ discussed เกี่ยวกับงานที่ผมจะสามารถ support LOM-Team ได้ในตลอดช่วง 2 เดือนหลังจากนี้ และเนื่องจากผมมาจาก background ด้าน Mechatronics and Automation Engineering ที่สามารถ support งานได้หลากหลายรูปแบบ ไม่เฉพาะในด้าน Hardware แต่ยังรวมถึง Software, Data Analysis และ System Integration ทาง Dr. Karle จึงให้ผมไป discuss ต่อกับทาง Chris และ Yuya เพิ่มว่า direction ของผมตลอด summer นี้ ควรเป็นไปในทิศทางใดจึงจะสามารถสร้าง Benefits และ Impact ให้กับ LOM-Team และ IceCube ได้มากที่สุด โดย Chris ได้นัดผมเข้าไป discuss ร่วมกับ Yuya เพิ่มเติมในวันจันทร์ที่ 9 June ที่ Chamberlin Hall เพื่อให้ได้ข้อสรุปร่วมกัน

โดยหลังจากคุยงานกับ Chris เสร็จ ในช่วงเย็นผมได้กลับห้องไปเปลี่ยนชุด และได้ออกวิ่งออกกำลังกายในช่วงเย็นเพื่อสำรวจเมือง โดยใช้เส้นทาง West Campus ยาวไปจนถึงแถบ Dudgeon-Monroe และไปจบที่ James Madison Park กลับกลับมาทานอาหารเย็นที่ Terrace โดยระยะทางรวม ๆ ราว 10 – 15 km. ซึ่งทำให้ผมคุ้นเคยกับเส้นทางภายใน Campus และ Downtown มากยิ่งขึ้น



ผมและ Dr. Wendt

Day 8: June 7, 2025 (Saturday)

วันนี้เป็นวันเสาร์ ผมทดลองไปทานอาหารที่ร้านอาหารจีนบริเวณ State Street เนื่องจากอยู่ที่นี่มา 1 week และยังไม่ได้ทานอาหารประเภทก๋วยเตี๋ยวเลยแม้แต่มื้อเดียว จึงได้ทดลองไปทาน (ซึ่งราคาก็ไม่แพงมากอร่อย รวมถึงให้เยอะด้วย) และหลังจากทานเสร็จ ผมก็เดินกลับมายัง Memorial Union เพื่อเตรียมตัวทำ Presentation ในการนำเสนอประสบการณ์ที่ได้รับจาก IceCube Summer School 2025 เนื่องในโอกาสที่ท่านอธิการบดี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ศ.ดร.นพ. พงษ์รักษ์ ศรีบัณฑิตมงคล (อาจารย์พงษ์รักษ์) และคณะ จะเดินทางมาลงนามความร่วมมือกับ University of Wisconsin-Madison และเยี่ยมชมสถานที่ต่าง ๆ ภายในมหาวิทยาลัย รวมถึงทาง IceCube และ WIPAC ด้วย ซึ่งในช่วงของการบรรยายของ IceCube จะมีการบรรยายเกี่ยวกับ IceCube Summer Student Program และมี Short-Session ที่ผมต้องเข้าร่วมบรรยายแชร์ประสบการณ์นั่นเอง



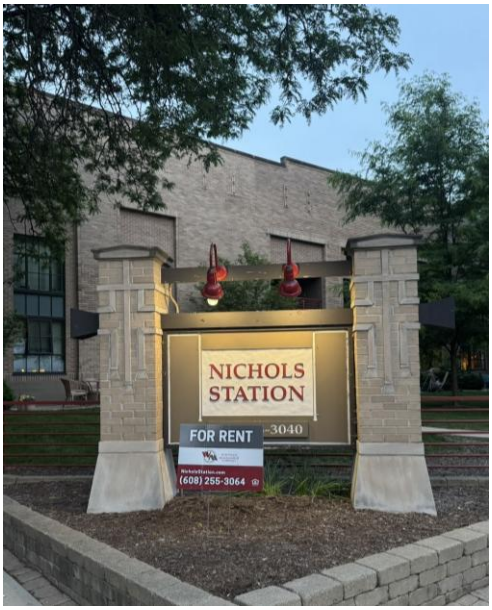
เย็นวันเสาร์ที่ Terrace (ผู้คนมักจะมานั่งพักผ่อนบริเวณนี้เป็นจำนวนมาก !)

Day 9: June 8, 2025 (Sunday)

วันนี้ผมตื่นแต่เช้าและไปทานอาหารเช้าที่ Four-Lakes Market เหมือนเดิม ก่อนเดินเข้ามานั่งทำงานที่ Memorial Union เพื่อปรับแก้ Presentation อีกเล็กน้อยก่อนส่งให้กับทางอาจารย์วราภรณ์ สำหรับการนำเสนอในวันพรุ่งนี้ โดยช่วงบ่ายได้เดินทางเข้าไปยัง Downtown บริเวณ Mifflin West เพื่อซื้อของใช้เพิ่มเล็กน้อย ก่อนเดินกลับมานั่งทำงานที่ Terrace ต่อในช่วงบ่าย เพื่อเตรียมความพร้อมสำหรับการเริ่มงานในสัปดาห์ที่ 2









บรรยากาศของ Madison (ร้าน Jazz Man, College of Engineering, Nicholas Station & Camp Randall)

Day 10: June 9, 2025 (Monday)

วันนี้ผมรีบตื่นแต่เช้ามาทานข้าวที่ Four-Lakes Market เนื่องจากต้องเดินทางไปหลายที่ เริ่มจากไปคุยงานกับ Chris และ Yuya ที่ IceCube Lab, Chamberlin Hall ช่วง 10.00 น. และ 13.00 น. ต้องไปเตรียมตัว present ในช่วงบ่ายต่อที่ WIPAC โดยหลังจากทานอาหารเช้าเสร็จ ผมรีบเดินไปยัง IceCube Lab ทันที และได้พบกับ Yuya และ Chris โดยจาก discussion เมื่อวันศุกร์คร่าว ๆ Chris และ Yuya ได้เล่าให้ผมฟังต่อเรื่องงานที่มีอยู่ตอนนี้

1. เริ่มที่งานแรก คือ LOM-16 ทั้ง 10 ตัว ใกล้จะประกอบเสร็จสิ้นแล้ว และ 6 ตัว (LOM-16 00-05) พร้อมที่จะถูกส่งไป deploy ที่ South Pole ในช่วงปลายปีนี้ และจากการ Testing ของ Yuya ใน Freezer พบว่าได้รับ Data เกี่ยวกับ Parameters ต่าง ๆ ของ Testing Results มาเป็นจำนวนมาก เช่น Single Photoelectron (SPE), Cosmic Muon ฯลฯ อีกจำนวนมาก

2. รวมถึง data ที่ได้รับจาก validated และ calibrated Waveforms Signal เพื่อประมวลสัญญาณ (Signal Processing) และ Status การทำงานของ Electronics Board ภายใน LOM-16 ซึ่งจะเกี่ยวข้องโดยตรงกับ components ต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็น DAQ System, Analog-to-digital converter (ADC), FPGA, Micro-Base รวมถึง High-Voltage Power Supply (HVPS) โดย Data ดังกล่าวยังไม่ได้ถูกนำไป Analyze เพิ่ม ร่วมกับการประเมิน Performance ของ Hardware ซึ่งโจทย์ง่าย ๆ สำหรับผมเลย คือ ระหว่าง นำ Data ไปวิเคราะห์ต่อกับ วิเคราะห์การทำงานของ Hardware ทาง Electrical & Electronics ผมจะเลือกอันไหน? นี่คือโจทย์ที่ Chris และ Yuya มอบมาให้ผม และคำตอบของผมก็แสนง่ายเช่นกัน คือ เลือกทั้งสองอันครับ (พูดแล้วหัวเราะ 5555)

3. ว่ากันตามตรง Chris บอกกับผมว่า เป็นไปได้ยากที่จะทำทั้งสองงานให้เสร็จสมบูรณ์ในระยะเวลาที่ค่อนข้างจำกัดเพียง 2 เดือน แต่ในเมื่อผมอยากทำ เพราะฉะงั้นก็มีความเป็นไปได้ที่จะลอง Integration ทั้งสองงานเข้าด้วยกัน โดยยึดงานใดงานหนึ่งเป็น Main ซึ่งคำตอบท้ายที่สุดก็คือ ผมเลือกทำ Data Analysis เป็นงานหลักควบคู่กับการวิเคราะห์ Hardware เป็นงานเสริม โดยพยายามหาความเชื่อมโยงระหว่าง 2 งานเข้าด้วยกันให้ได้ เพราะ Yuya มี Muon Data เป็นจำนวนมากที่ได้รับจากการ Testing LOM-16 set แรกใน Freezer จำนวนมาก และน่าจะเกิดประโยชย์มากกว่าถ้า Dataset จำนวนมากได้รับการวิเคราะห์และ Classified อย่างเป็นระบบ เพื่อประเมินประสิทธิภาพก่อนที่ IceCube จะส่งมันไป deploy ที่ South Pole ในสิ้นปีนี้

4. และอีก 1 หน้าที่ที่ผมได้รับ Assigned คือการไปช่วย Yuya ประกอบ LOM-16-09 ตัวสุดท้ายของ Series IceCube Upgrade Project ที่ Physical Science Lab (พูดแล้วขนลุก) ซึ่งเป็นจังหวะที่เหมาะเจาะ เพราะงาน assembly เป็นงานที่เหมาะกับ Engineer แบบผมมาก ๆ และผมเองก็คลุกคลีอยู่กับ stuff ด้าน Mechanical, Electrical, Electronics เป็นทุนเดิมอยู่แล้ว การที่ผมได้เข้ามาเป็นส่วนหนึ่งของ Project นี้ จึงน่าจะ support และช่วยแบ่งเบาภาระจาก Yuya และ Engineer Team ที่ IceCube Lab, PSL ได้อย่างมีนัยสำคัญ

หลักคุยงานเสร็จเรียบร้อย และได้ข้อสรุป ผมก็ได้เดินทางไปพร้อมกับ Yuya เพื่อไปยัง WIPAC สำหรับการเตรียม present ในช่วงบ่าย โดยนั่งรอได้สักพัก ทางอาจารย์วราภรณ์ อาจารย์ศิรามาศ และ ดร.อัจฉรา ก็ได้ขึ้นมายัง WIPAC พร้อมกับอาจารย์พงษ์รักษ์และทีมงานมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และเข้าสู่ Delegation Ceremony ตามกำหนดการจนเสร็จสิ้นในช่วงประมาณ 15.00 น. และทุกอย่างก็ดำเนินไปได้อย่างราบรื่นและผ่านไปด้วยดี

หลักจากเสร็จ Delegation Ceremony ช่วงเย็น วรรษชล ได้พา ผม และพี่ ๆ ท่านอื่นไปท่านอาหารเย็นที่ Taste of Sichuan ภัตตาคารอาหารจีน บริเวณ State Street ซึ่งเป็น Original Food ในแบบเสฉวน และอร่อยมาก ๆ และผมสันนิษฐานว่านี่กำลังจะกลายเป็นร้านประจำของผมหลังจากนี้

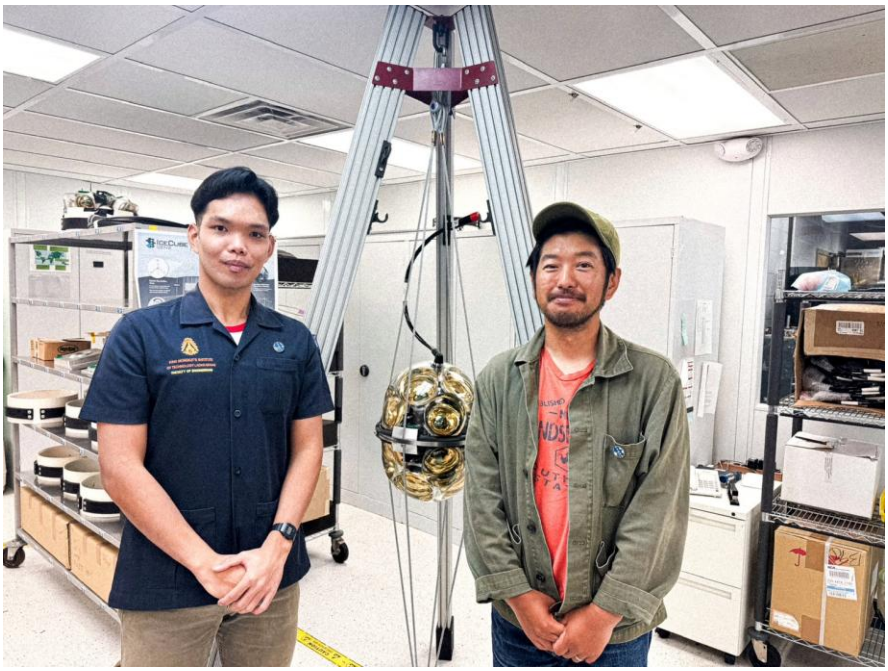


ภาพบรรยากาศการนำเสนอประสบการณ์ IceCube Summer School 2025

Day 11: June 10, 2025 (Tuesday)

วันนี้ผมตื่นแต่เช้ากว่าเดิมเล็กน้อยเพื่อมาทานข้าวที่ 4 Lakes Market และรอ Yuya มารับเพื่อเดินทางไปยัง Physical Science Lab ในช่วงประมาณ 10.00 น. เนื่องจากวันนี้ ทางอาจารย์พงษ์รักษ์และคณะ จะเดินทางไปเยี่ยมชม PSL และ Yuya ต้องไป setting IceCube Lab เพื่อรอต้อนรับ โดยมีผมเป็นลูกมือ โดยวันนี้ทางคณะมหาวิทยาลัยเชียงใหม่จะเยี่ยมชม Lab ต่าง ๆ ภายใน PSL ที่ support experiment และ Project ต่าง ๆ ประกอบด้วย IceCube Upgrade, IceCube Gen2, Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE), Wisconsin HTS Axisymmetric Mirror (WHAM), Askaryan Radio Array (ARA) และเยี่ยมชม Drilling Operations รวมถึง Utilities Systems ต่าง ๆ ตามลำดับ

หลังจากเสร็จสิ้นภารกิจในช่วงเช้า ช่วงบ่ายผมได้เดินทางกลับมาพร้อมกับ Yuya โดยเราต้องนำ LOM-16 จำนวน 2 ตัวกลับมา testing เพิ่มเติมที่ IceCube Lab, Chamberlin Hall และ Yuya ได้ส่งตัวอย่าง Data Files ของ Single Photoelectron และ Cosmic Muon พร้อม Prototype ของ Python Script ที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ data ดังกล่าวมาให้ผมลองศึกษา พร้อมกับข้อมูลตัวอย่างการศึกษา Factory Acceptance Test (FAT) ของ LOM-18 โดย Professor Nobuhiro Shimizu จาก International Center for Hadron Astrophysics (ICEHAP), Chiba University เพื่อใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์ข้อมูล



ผมกับ Yuya และ LOM-16 ที่กำลังทำการใส่ Cabling ก่อนส่งไปที่ South Pole ที่ Physical Science Laboratory (ถ่ายโดย Professor Albrecht Karle)

Day 12: June 11, 2025 (Wednesday)

วันนี้เป็นวันแรกที่ผมเริ่มงาน โดยแม้ Chris และ Yuya จะบอกว่าไม่มี Schedule ตายตัวในการเข้างาน แต่ผมเลือก set ไว้ที่ 09.30 น. จะเป็นเวลาเริ่มงานสำหรับผมในทุก ๆ วัน เนื่องจากผมต้องการใช้เวลาที่มีอยู่ contribute กับทีม และ project ที่ผมได้รับมอบหมายให้ได้มากที่สุด และวันนี้ก็บังเอิญเป็นวันที่ Members ของทุกทีมใน IceCube Lab อยู่กันพร้อมหน้า โดยใน Lab ผมมีสมาชิกที่ทำงานอยู่ในช่วง Summer นี้ ทั้งหมด 8 คน ได้แก่

- Christopher Wendt	Senior Scientist	IceCube Lab Supervisor
- Yuya Makino	Assistant Scientist	IceCube Gen2 DOM R&D
- Hannah Erpenbeck	Ph.D Student in Physics	IceCube Pencil Beam Project
- Britta Thompson	Post-Grad Student	IceCube Optical Module Project
- Jay Tang	Undergraduate Student	IceCube Pencil Beam Project
- Finn Novac	Undergraduate Student	IceCube Optical Module Project
- John Rader	Undergraduate Student	Cosmic Rays Summer Program (Chris)
และผม Pound Thammarat	Undergraduate Student	IceCube Gen2 DOM R&D

โดยผมเริ่มต้นจากการศึกษาข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับ Cosmic Muon , Structure of Python Scripts , Data Structures & Frame โดยอ้างอิงจากการศึกษาของ Prof. Nobu และ Simon Pick ซึ่งหลังจากนั้นได้ทำการย้าย Program ทั้งหมดขึ้นไปประมวลผลบน Platform Google Colab และ JupyterNotebook เพราะต้องการทดสอบประสิทธิภาพและ Workload ของโปรแกรมในสภาวะต่าง ๆ เช่น Analysis Function, Plotting Function รวมถึงการศึกษา Reader Classes ที่ใช้ในการอ่านไฟล์ data ซึ่งเป็นไฟล์รูปแบบ .hdf โดยจากการทดลอง run program ได้เบื้องต้นเสร็จแล้ว จึงวางแผนไว้ว่าจะใช้เวลาประมาณ 3-5 วัน ในการศึกษาและทดสอบ environment ต่าง ๆ ก่อนจะทำการ insight และ design experiment อื่น ๆ เข้าไปเพิ่มตามลำดับ

Day 13: June 12, 2025 (Thursday)

ในวันนี้ผมตื่นเช้าเหมือนเดิม และไปทานอาหารเช้าที่ 4-Lakes Market ก่อนจะเดินทางไปทำงานตามปกติ แต่เพิ่มเติมคือทดลองซื้อกาแฟที่ Peet's Café ที่ Discovery Hall เพื่อมาลองทาน และสิ่งที่ผมชอบมาก ๆ คือ Dark Roast Coffee (กาแฟคั่วเข้ม) ที่สหรัฐมี texture ที่ดีมาก ๆ นุ่มและทานง่าย แม้จะเป็นคั่วเข้ม จากนั้นก็เดินทางไปทำงานต่อที่ Chamberlin Hall ตามปกติ และสิ่งที่หนึ่งที่สังเกตได้คือ คนที่นี่ชิลล์มาก ๆ ชนิดที่ผมไปถึง 10.00 น. , 11.00 จนเกือบเที่ยงก็แล้ว ยังไม่มีใครมาทำงาน (อาจด้วยความ Un-Scheduling) จึงทำให้การเข้างานของทุกคน flexible มาก ๆ (ขึ้นกับความสะดวกและภาระของแต่ละคน) แต่สำหรับผม ผมชอบ IceCube Lab ที่ Chamberlin Hall มาก ๆ เพราะบรรยากาศมันเหมือนกับ Lab ที่ภาควิชาของผมที่ลาดกระบัง มีกลิ่นอายของความเป็น Workshop Space แบบย่อม ๆ และมี mechanics devices ทุกอย่างครบถ้วน เหมาะกับ Engineer อย่างผมมาก ๆ (พูดแล้วหัวเราะ 555) ซึ่งผมก็จะทำงานห้องเดียวกันกับ Jay ทุกวัน ในขณะที่ Jay วิ่งไปวิ่งมาเพื่อปรับปรุง Pencil Beam ผมก็จะนั่งรันโค้ดอยู่ตรงนั้นตามกิจวัตร และหลังจากเลิกงานวันนี้ ช่วงเย็น ทางอาจารย์วราภรณ์ และ อาจารย์สิรามาศ ได้ชวนผมไปทานอาหารเย็นที่ร้านชาบูบริเวณใกล้ ๆ กับ Lake Monona ด้วยกัน เพราะเดี๋ยวในวันเสาร์ที่ 14 มิ.ย. นี้ ทางอาจารย์วราภรณ์ อาจารย์ศิรามาศ และทีมมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ก็จะเดินทางกลับแล้ว





บรรยากาศการทำงานที่ 4206 IceCube Laboratory, Chamberlin Hall

Day 14: June 13, 2025 (Friday)

วันนี้ผมตื่นสายเล็กน้อย เนื่องจากมีฝนตกในช่วงเช้ามืด ทำเอาผมหลับเพลิน (และลืมตั้งนาฬิกาปลุก 5555) แต่ก็ไปทานอาหารเช้าที่ 4-Lakes Market ตามปกติ จากนั้นก็แวะซื้อ Power Drink ของ Starbucks ที่ใต้ Chamberlin Hall และงานวันนี้ก็เป็นไปตาม Planning ที่วางไว้ ผมปรับปรุง Script จนสามารถอ่านไฟล์ และสามารถดึงข้อมูลจาก Dataset ออกมาเพื่อทดลอง plot Parameters ต่าง ๆ ได้ตามที่ Yuya ได้แนะนำมา ซึ่งหลัก ๆ ผมจะเริ่มต้นจากการศึกษา Charge Distribution ของ Single Photoelectron เพื่อให้เข้าใจพฤติกรรมของอนุภาคเหล่านี้มากขึ้น ก่อนจะเริ่มศึกษา Cosmic Muon อย่างจริงจัง นอกจากนั้นยังต้องทำความเข้าใจเพิ่มเติมเกี่ยวกับ Hardware Layer และ Effect ของ Electronics ต่าง ๆ ของ LOM-16 ว่ามันมีความเชื่อมโยงกับพฤติกรรมของ Single Photoelectron (หรือแม้กระทั่ง Muon ในอนาคต) อย่างไร?

โดยหลังจากเสร็จงานในช่วงเย็น Jay ได้พาผมนั่ง Uber ไปยัง TJ Mall บริเวณ West Town เพราะเขาต้องการไปช็อปเสื้อผ้าใหม่โดยได้ขอให้ผมไปช่วยเลือก ซึ่งหลังจากเราเดินช็อปกันอยู่ 2 ชั่วโมง คำตอบคือ เขาไม่ได้ แต่ผมได้ครับ 5555 โดยผมได้ซื้อถุงเท้ามาเพิ่ม เพราะปกติจะวิ่งออกกำลังกายทุกวัน และเตรียมถุงเท้ามาน้อย (ซึ่งไม่สามารถซักหมุนเวียนได้ทัน จึงต้อง ซื้อใหม่ ใช่ครับ ทุนนิยมจริง ๆ ไม่มีผิด) หลังจากนั้น ผมบอกเขาว่าอยากลองไป Walmart และเขาก็ไม่รอช้า พาผมเดินจาก TJ Mall ไป Walmart ระยะทางกว่า 5 km ใช้เวลาไปชั่วโมงกว่า แต่ระหว่างทางก็ได้แวะทานอาหารเย็นที่ Popeyes ซึ่งเป็นปีกไก่ทอดที่อร่อยแบบชนิดที่ว่าผมน้ำตาไหลตั้งแต่กัดคำแรก... มันเป็นความรู้สึกกรอบนอก นุ่มใน และให้ความรู้สึกของเครื่องเทศแบบอเมริกัน ผสานความเป็นบาร์บีคิวอ่อน ๆ แบบแม็กซิกัน ทอดออกมาใหม่ ๆ ไม่เกรียมจนเกินไป ร้อน ๆ อุ่น ๆ ซึ่งทำเอาผมนิพพานจริง ๆ หลังกินจนหมด และตั้งปณิธานว่าเดี๋ยวจะต้องกลับมากินอีกให้ได้

และวิวระหว่างทางของ West Side นี่ Good Vibes มาก ๆ ยิ่งเป็นช่วงเวลาพลบค่ำที่ภาษาญี่ปุ่นเรียกว่า “Kataware Doki” คือยามสนธยาพระอาทิตย์สีทองอ่อน ๆ ใกล้ลับขอบฟ้า ยิ่งเปรียบเสมือนผมหลุดไปอยู่ในทิวทัศน์ในนิยายยังไงยังงั้น และในที่สุดผมก็ถึง Walmart และไม่รอช้าที่จะถ่ายภาพกับ Walmart ไว้เป็นที่ระลึก เพราะได้ยินมาโดยตลอดแต่ไม่เคยมาเห็นของจริง (และในที่สุดวันนี้ก็ได้มาเห็น) ยิ่งใหญ่ ของเยอะ ราคาเป็นมิตรสมคำร่ำลือจริง ๆ ครับ และหลังจากเดินช็อปกันได้พักใหญ่ ๆ ผมและ Jay ก็ได้เรียก Uber เพื่อกลับมายังที่พัก ปิดวันศุกร์ 13 ด้วยการ เดิน เดิน และเดิน (แต่สนุกสุด ๆ)

Day 15: June 14, 2025 (Saturday)

วันนี้เป็นวันเสาร์ แต่ผมยังตื่นแต่เช้าไปทาน Breakfast ที่ 4-Lakes Market เช่นเดิม หลังจากทานเสร็จ ได้กลับห้องเพื่อไปเอาของและเตรียมออกไปนั่งทำงานต่อที่ Terrace โดย วันนี้ตั้งใจว่าจะปรับปรุง Script สำหรับใช้ในการอ่านไฟล์ data เพิ่มเติม และอยากลอง plotting parameters อื่น ๆ ที่ยังไม่ได้ทำก่อนหน้านี้ โดยเนื่องจากผมจัดการความพร้อมของตัวเองอยู่ตลอด จึงไม่ค่อยมีปัญหาเรื่องยิบย่อย และในส่วนของการปรับตัว ก็ค่อนข้างจะเข้าที่ตั้งแต่ประมาณช่วงสัปดาห์แรกแล้ว การทำงานเลยมี Flow ที่ดี ในขณะที่ผมก็สามารถแบ่งเวลาในช่วงวันหยุดไปออกกำลังกายเพิ่มเติมได้อีกด้วย



ภาพ Jay ที่พาผมไปเดินซื้อของใช้ที่ Walmart

Day 16: June 15, 2025 (Sunday)

วันนี้วันอาทิตย์ ผมก็ยังตื่นแต่เช้าเพื่อไปทาน Breakfast ที่ 4-Lakes เช่นเดิม และหลังจากทานเสร็จก็เดินทางมานั่งทำงานต่อจากเมื่อวานที่ Terrace โดยตามแผนวันนี้ คือ การทดลองรันโปรแกรมบางส่วนใน Jupyter จากเดิมซึ่งรันใน Google Colab ซึ่งพอมาถึงวันนี้ Frameworks และ Library ต่าง ๆ ก็ค่อนข้างมีความพร้อมพอสมควร และการรันโปรแกรมผ่าน Jupyter โดย Tunneling ผ่าน IceCube Cobalt ซึ่งเป็น High-Performance Computing ที่ทางนักวิจัยของ IceCube ใช้ในการรันงานต่าง ๆ ช่วยให้ผมสามารถปรับปรุงการทำงานของ Function ต่าง ๆ ได้ดียิ่งขึ้น



ภาพบริเวณ State Capitol (ด้านบนของ State Capitol)

Day 17: June 16, 2025 (Monday)

วันนี้วันจันทร์ กับ Breakfast ที่ 4-Lakes เช่นเดิม โดยวันนี้ผมมีนัด Update กับ Yuya เพิ่มเติมในช่วงบ่าย ที่ WIPAC แต่หลังจากทาน Breakfast เสร็จก็เดินทางเข้าไปทำงานที่ Chamberlin Hall ก่อน ซึ่งส่วนใหญ่โปรแกรมรันได้สมบูรณ์เกือบ 100% เหลือแค่ปรับปรุงฟังก์ชันต่าง ๆ ให้มี workflow ที่ดีขึ้น ในขณะที่การศึกษา Charge Distribution ของ Single Photoelectron ก็ช่วยให้ผมเข้าใจพฤติกรรมของ Particle ในสภาวะต่าง ๆ ซึ่ง effect โดยตรงจาก Hardware ได้ดีขึ้น

โดยหลังจากไปคุยกับ Yuya เสร็จในช่วงบ่าย Yuya ได้ส่ง HDF Reader Module มาให้ผมเพิ่มเติม ซึ่งจะเป็น Reader Module ที่ใช้สำหรับอ่าน .hdf files สำหรับวิเคราะห์ข้อมูลของ Cosmic Muon หลังจากนี้ ซึ่งผมจะย้ายกลับไปทำงานบน platform Visual Studio Code เพื่อพัฒนา Python Script สำหรับใช้ในการวิเคราะห์ Cosmic Muon Dataset แรก ซึ่งเป็น Dataset ที่ได้จากการ Testing LOM-16-06 (LOM-16 หมายเลข 06) ใน Freezer ของ Chamberlin Hall ซึ่งการวิเคราะห์ของผมเราจะดำเนินการตามที่ศึกษากับ Single Photoelectron เมื่อก่อนหน้า และจะค่อย ๆ ออกแบบการศึกษา หรือการวิเคราะห์อื่น ๆ เพิ่มเข้าไปตามลำดับ เช่น Event Coincidence Analysis (การวิเคราะห์เหตุการณ์ร่วมที่เกิดขึ้นใน LOM-16-06) หรือการศึกษา Charge Correlation ของ Photomultipliers Tube (PMT) ในแต่ละ Channel ซึ่งจะขยายความเพิ่มเติมในส่วนโครงงานที่ทำร่วมกับ IceCube ถัดไป

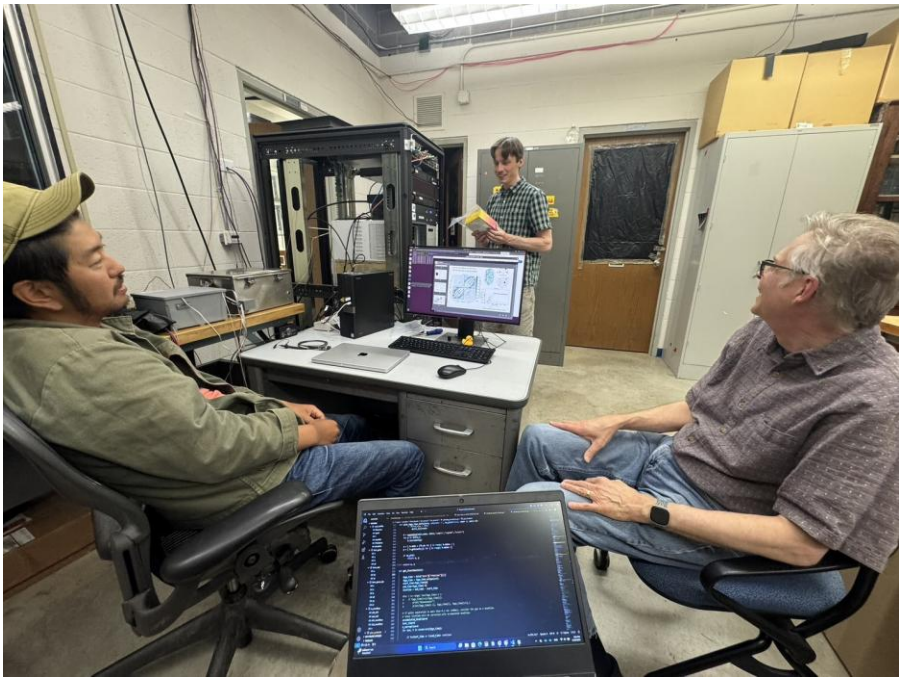


ภาพบริเวณห้องทำงานของ IceCube Lab (ด้านซ้ายจะเป็น Shelf ของ Pencil Beam Project)

Day 18: June 17, 2025 (Tuesday)

เนื่องจากฝนตกทำให้ผมใช้เวลาในการเดินทางจาก Dejope Hall ไปยัง Chamberlin นานกว่าปกติเล็กน้อย และหลังจากถึง Lab ผมก็ต้องอึ้ง เพราะไม่มีอยู่เลย ใช่ครับ ไม่มีเลย แม้แต่คนเดียว... จากนั้นไม่นานัก Jay ก็เดินเข้ามา ผมจึงถามเขาเรื่องนี้ และเขาก็บอกว่าอาจเป็นปกติเวลาที่อากาศไม่ดีหรือมีฝน ผู้คนมักจะทำงานอยู่ที่ที่พักของตน มากกว่าถ่อมาถึง Lab อยู่แล้ว แต่สำหรับสุภาพบุรุษแมน ๆ แบบเรา สบายครับ เราต้องใช้เวลาให้คุ้ม สำหรับ Summer ที่นี่ ผมจึงรีบเริ่มต้นการทำงานของผมอย่างไม่รอช้า และวันนี้ก็เปิดประเดิมด้วยการทดลอง plotting parameters ต่าง ๆ ภายใน Cosmic Muon Data เช่น Charge Distribution ของ PMT 16 Number ในแต่ละ Channel – (Channel 1 สำหรับ High-gain channel และ Channel 2 สำหรับ Low-gain Channel) เป็นต้น ซึ่งผลลัพธ์ที่ออกมาก็เป็นไปตามที่ Yuya เคย brief ไว้ แต่ก็ยังคงมีหลายจุดที่ต้องปรับปรุงเพิ่มเพื่อให้ขอบเขตของการวิเคราะห์นั้นครอบคลุมมากที่สุด

ช่วงเย็นหลังจากเลิกงาน ผมรีบนำของกลับไปเก็บที่ห้อง เพราะวันนี้ตั้งใจว่าจะไปวิ่งออกกำลังกายหลังจากไม่ได้วิ่งมาหลายวัน โดยวันนี้ผมเลือกใช้เส้นทางต่างจากเดิมเล็กน้อย โดยมุ่งไปทาง East Town ผ่าน Terrace อ้อม State Capital และไปยัง 1st Settlement และไปจบที่ Lake Monona และกลับมาเจอ Jay โดยบังเอิญที่ Terrace จากนั้น Jay จึงได้พาผมทาน Dinner ที่ Raising Cane's Chicken Fingers ซึ่งเป็นร้าน Fast Food ที่เขาบอกว่าเขาชอบมาก (ได้ไงก็ไม่รู้ แต่ผมว่า Popeyes อร่อยกว่า เอาจริง ๆ แล้ว 55555) แต่ก็อิ่มอร่อยครับ เขาพาผมซื้อแล้วมานั่งทานที่ริม Terrace ด้วยกัน ก่อนจะแยกย้ายช่วงเวลาประมาณ 22.00 น.



ภาพบรรยากาศการประชุมงานร่วมกันกับ Yuya, Chris และ Jack

Day 19: June 18, 2025 (Wednesday)

วันนี้ฝนตกแต่เช้า แต่ผมก็ยังตื่นแต่เช้าเพื่อไปทาน Breakfast ที่ 4-Lakes เช่นเดิม ด้วยความเคารพ เอาตรง ๆ American Breakfast นี่เป็นอาหารที่ผมชอบและโปรดปรานมาก ๆ เป็นแบบนี้ตั้งแต่สมัยอยู่ที่ไทยแล้ว และนั่นเป็นเหตุผลที่ว่าทำไมผมถึงสามารถทานมันได้ทุกมื้อแบบไม่เบื่อเลยจริง ๆ 5555 เพราะอร่อย ถูกปากผม และ staff ของ 4-Lakes ก็น่ารักและอัธยาศัยดีมาก ๆ ตักให้ผมเยอะตลอด ทำให้ผมสามารถกินมื้อเดียวและอิ่มไปทั้งวัน

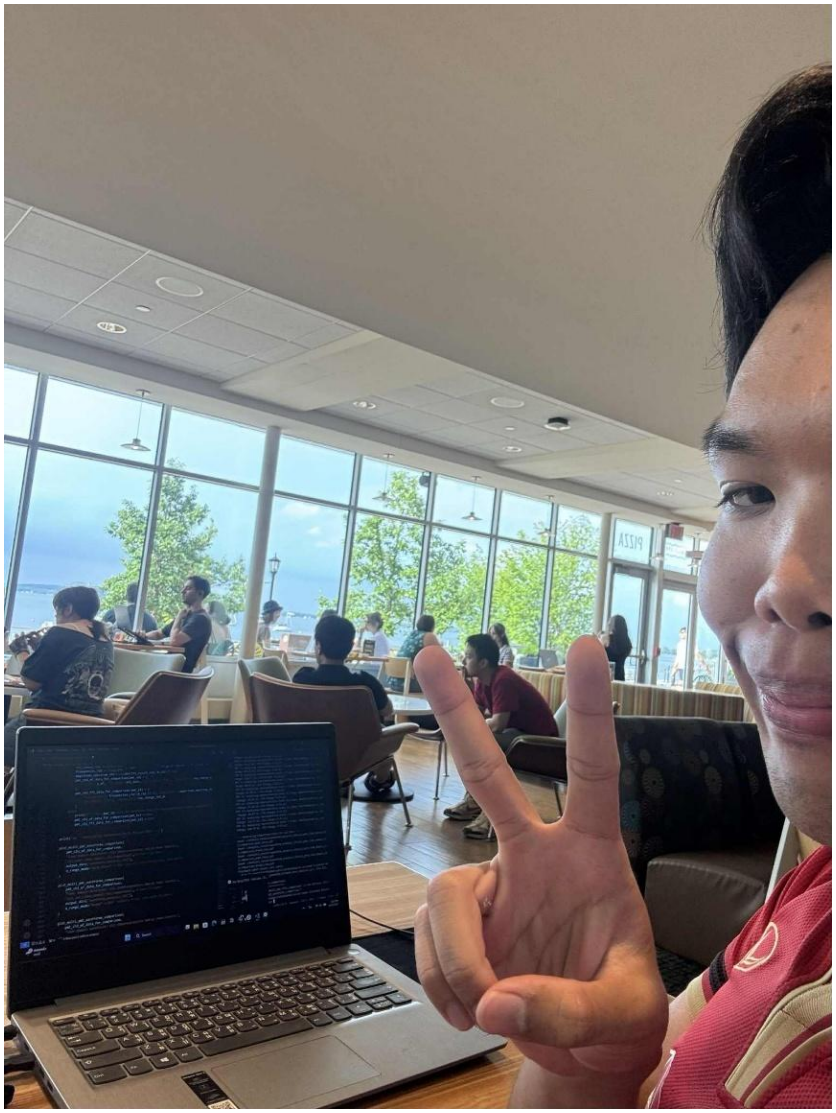
และเนื่องจากวันนี้ฝนตกอีกแล้ว แต่ไม่หนักมากทำให้ผมสามารถเดินไปที่ Chamberlin Hall ได้ (ถึงจะสู้ชีวิตหน่อย ๆ ก็เถอะ...) และหลังจากถึงก็เปิดคอมมานั่งเพิ่ม Function ในการวิเคราะห์ data เพิ่ม รวมถึง Verified ความถูกต้อง script ก่อน ๆ หน้า ซึ่งทุกอย่างก็รันไปตามปกติ และในช่วงเที่ยง ผมก็เดินไปซื้อกาแฟจาก Peet's Café กลับมาทานที่ Lab โดยหลังเลิกงานในช่วงเย็นมีฝนตกอีกครั้ง ผมจึงรีบเดินทางกลับห้องทันที



ภาพเพื่อน ๆ ของผมที่กำลังทำงานอยู่ที่ IceCube Lab
(Jay กับ Pencil Beam ในภาพซ้าย และ John กับ Cosmic Rays Project ในภาพขวา)

Day 20: June 19, 2025 (Thursday)

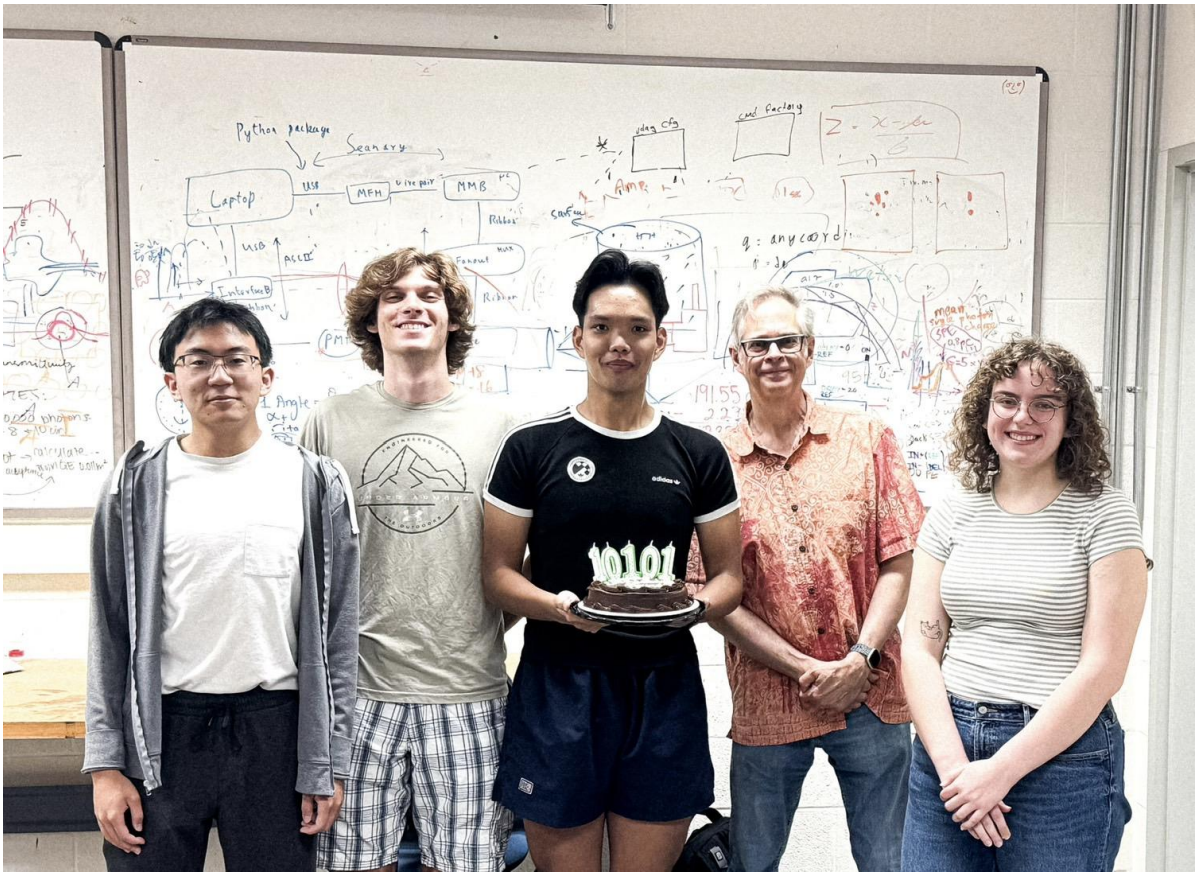
วันนี้ผมเปลี่ยนสถานที่ทำงานจาก Chamberlin Hall มาเป็นที่ Terrace เนื่องจากต้องเข้ามาติดต่อเจ้าหน้าที่เรื่องขอลงทะเบียน Guest WiFi และ Printing Card เพิ่ม รวมถึงได้เปลี่ยนไปทานอาหารเช้าที่ Taste of Sichuan แทน ซึ่งวันนี้งานก็จะมีความซับซ้อนเพิ่มมากขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากผมต้องทำการปรับแก้รูปแบบของ Plot ที่ได้ออกมาจาก Charge Distribution ของ PMT ในแต่ละ Channel ซึ่งเกิด error จาก Dataframe ที่ได้รับการกำหนดไม่ถูกต้อง และเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง ผมจึงได้ทำการทดลอง plot Event Coincidence ออกมาเพื่อตรวจสอบความถูกต้องในภาพรวม และทำให้ผมกับจุดที่ต้องปรับแก้ โดยหลังจากทำงานเสร็จในช่วงเย็น ได้ไปวิ่งออกกำลังกายตามปกติ โดยใช้เส้นทาง South End ไปยัง Lake Monona เช่นเดิม



บรรยากาศการนั่งทำงานที่ Memorial Union Terrace

Day 21: June 20, 2025 (Friday)

วันนี้วันศุกร์ และเป็นวันเกิดของผม ครบ 21 ปีบริบูรณ์ และพิเศษมาก ๆ คือ John และเพื่อน ๆ ที่ Lab ทำ surprise เค้กวันเกิดมาให้ผม ซึ่งเรียกได้ว่าเป็นครั้งแรกในชีวิตเลยที่มีคนซื้อเค้กวันเกิดมา surprise ผม ตื่นเต้น ประทับใจ และเค้กก็อร่อยมาก ๆ รวมถึงทั้ง John, Jay, Chris, Britta และ Finn ต่างก็รวมฉลองและอวยพรให้กับผม และหลังจากฉลองเสร็จ ผมก็ทำงานต่อตามปกติ โดยวันนี้ผมได้ขอออกมานั่งทำงานที่ Terrace เหมือนเดิม เนื่องจากยังจัดการเรื่อง WiFi กับ Printing Card ไม่เรียบร้อย โดยวันนี้ได้แก้ไข script ต่อจากเมื่อวานเล็กน้อย เพราะโครงสร้างโดยรวมถือว่าสมบูรณ์แล้ว อยู่ที่จะเพิ่ม Function อะไรเข้าไปเพื่อวิเคราะห์เพิ่ม โดยโจทย์หลักวันนี้ คือ ผมจะเขียนโครงสำหรับทำการ plot Event Coincidence ของ Cosmic Muon ใน LOM-16-06 สำหรับเป็น Prototype ไปศึกษาต่อในสัปดาห์หน้า ซึ่งหลังจากใช้เวลาไม่นานก็เขียน Function และจัด Classes เสร็จสมบูรณ์ในขั้นต้น และทดลอง plot ออกมาได้ หลังจากนั้นเมื่อถึงเวลาเลิกงาน Jay ได้ชวนผมไปทานไก่ทอดที่ร้านใหม่ติดกับ South Campus ซึ่งมีรสชาติให้เลือกเยอะมาก ๆ รวมถึงรสแกงกะหรี่ไทยด้วย จากนั้นในช่วงค่ำ John ได้ชวนผมออกมา Hangout ที่ Terrace ด้วยกันเพื่อเป็นการฉลองวันเกิดให้แก่ผม เสร็จประมาณ 00.00 น. ผมก็เดินทางกลับถึงห้อง



ภาพเพื่อน ๆ ใน Lab ที่ซื้อเค้กมาเป่า surprise วันเกิดของผม

Day 22: June 21, 2025 (Saturday)

วันนี้วันเสาร์ ผมตื่นสายนิด ๆ เพราะต้องการพักผ่อน และหลังจากตื่นได้เดินทางไปทานอาหารเช้า ซุปหม่าล่า ที่ร้านโปรดของผม Taste of Sichuan เสร็จจากนั้นก็ได้แวะซื้อกาแฟจาก Peet's Café มาทานและมานั่งทำงานที่ Terrace ตามปกติ โดยผมได้นำงานที่ตั้งใจว่าจะทำในสัปดาห์หน้า มาเริ่มตั้งแต่วันนี้เลยเพื่อไม่ให้ขาดช่วง โดยหลัก ๆ คือการทดสอบการ plotting Event Coincidence ของ Cosmic Muon ใน LOM-16-06 ซึ่งหลังจากได้ลองทดสอบก็พบว่า มี error ใน Dataframe จริง ๆ กล่าวคือการรับ Input โดยดึง Data จาก files เมื่อแสดงผล Output ออกมาใน Plot ไม่ได้รับการแปลงข้อมูลอย่างถูกต้อง ส่งผลให้ข้อมูลเกิดความผิดพลาดในการแสดงผล ลัพธ์ ซึ่งหลังจากพิจารณาแล้วว่าการแก้ไขจะใช้เวลาพอสมควร ผมจึงรีบรายงาน Yuya ทิ้งไว้ก่อน พร้อมสอบถามถึงวิธีการออกแบบ Dataframe เพื่อที่จะได้สามารถไปทำต่อได้ในวันจันทร์



ผมและ Jay ที่ Popeyes Luisiana Restaurants

Day 23: June 22, 2025 (Sunday)

วันนี้ผมตื่นแต่เช้าไปทานข้าวที่ 4 Lakes ด้วยตั้งใจว่าจะรีบกินและรีบไปนั่งทำงานที่คาไว้จากเมื่อวาน แต่แล้วผมจึงตัดสินใจว่าจะพักงานไว้ทำในวันพรุ่งนี้ แล้วไปเดิน West Town Mall ก่อน โดยผมจะนั่งรถบัสจาก Stop ที่ Chamberlin ไป ใช้เวลาประมาณ 30 นาที เมื่อไปถึงก็พบว่า West Mall นั้นใหญ่มาก ๆ และมีลักษณะเป็นห้างสรรพสินค้าหลาย ๆ ประเภทอยู่รวมกัน เช่น ห้างนึงขายเสื้อผ้า ห้างนึงขายอุปกรณ์ IT ห้างนึงขายอาหาร เป็นต้น ผมใช้เวลาเดินทั้งหมดราว ๆ 3-4 ชั่วโมง ก็กลับมาถึงยังที่พักเวลาประมาณ 18.00 น. ด้วย Uber เพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการทำงานต่อไปในวันพรุ่งนี้



ภาพบรรยากาศเมือง Madison (ถ่ายจากหน้า Memorial Union)



ภาพบรรยากาศบริเวณ Lake Mendota (ติดกับ Fisher Pier)

Day 24: June 23, 2025 (Monday)

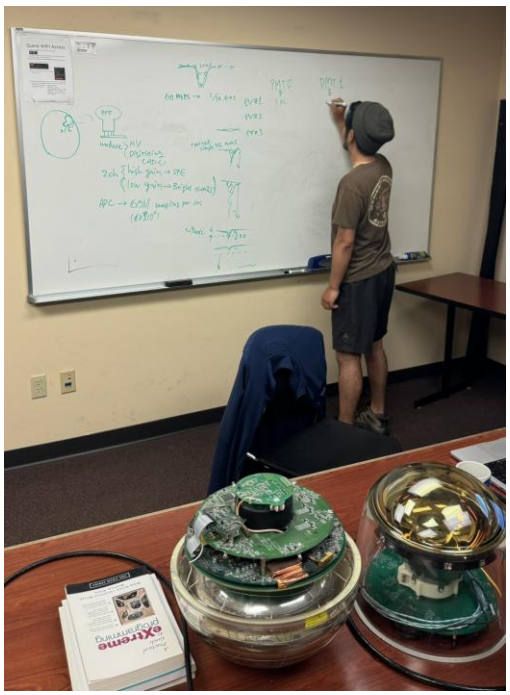
วันนี้ผมตื่นแต่เช้ามาก ๆ และรีบมาทานอาหารที่ 4 Lakes เพราะวันนี้ต้องไปช่วยงาน Yuya ที่ PSL โดย Yuya นัดผมไว้ที่ 10.00 น. ที่ Chamberlin Hall และล้อหมุนเวลา 10.10 น. โดยวันนี้ Yuya ต้องนำ PMT และ Micro-Base จาก Chris ไปติดเข้ากับ Gel-Pad เพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการประกอบ LOM-16-09 ซึ่งเป็น LOM-16 ตัวสุดท้ายจากทั้งหมด 10 ตัว ในซีรีส์นี้ สำหรับใช้ใน IceCube Upgrade Project โดยหลัก ๆ คือ นำมา set เตรียมไว้สำหรับการทำ Sub Assembly ในสัปดาห์หน้า ผมและ Yuya ใช้เวลาประมาณครึ่งวัน จนประมาณบ่าย 2-3 ก็กลับมายัง Downtown โดย Yuya ได้พาผมไปลองชิม Matcha Latte ที่ Café ร้านนึงในแถบ Monona (South Campus) เพราะผมบอกไปว่าตั้งแต่มาถึงสหรัฐ แทบไม่เจอ Café ร้านไหนขาย Matcha Latte เลย วันนี้เลยได้เปิดประเดิมเป็นวันแรก และหลังจากนั้นก็กลับไปยัง Chamberlin เพื่อทำการ discuss เกี่ยวกับผลลัพธ์ที่สงสัยเกี่ยวกับการ plot event coincidence ของ Cosmic Muon จาก LOM-16-06 และหลังจาก discuss เสร็จ Yuya ได้นัดให้ผมเตรียม present Progress ในวันพรุ่งนี้ (อังคาร 24 June)



ภาพผมกับการจัดเตรียม PMT ในการประกอบ LOM-16-09 (ตัวสุดท้าย)

Day 25: June 24, 2025 (Tuesday)

วันนี้ผมตื่นแต่เช้าตามปกติ ไปทาน Breakfast ที่ 4 Lakes ตามเดิม และรีบเดินทางไปนั่งทำงานที่ Discovery Center เพราะวันนี้ช่วงบ่ายเวลา 15.00 น. มี Present โดยจะมีสมาชิกในทีม LOM ได้แก่ Yuya, Chris และ Delaney จะมาเข้าฟังและให้คำแนะนำเกี่ยวกับงานของผม โดยตรวจสอบโปรแกรมกับ Presentation เพิ่มเติมก่อนจะเริ่มนำเสนอ จนถึงเวลาประมาณ 14.30 ก็เดินทางไปยัง IceCube Lab ที่ Chamberlin โดยผมอธิบายงานของผมประมาณ 25-30 นาที เกี่ยวกับงานที่ทำ วัตถุประสงค์ วิธีการที่ใช้ ผลลัพธ์ และความคืบหน้าตลอด 2-3 สัปดาห์ที่ผ่านมา ซึ่งทุก ๆ คนบอกว่าสิ่งที่ผมค้นพบในการศึกษาครั้งนี้นั้นมีสิ่งที่น่าสนใจและควรค่าแก่การศึกษาเพิ่มเยอะมาก ๆ โดยเฉพาะพฤติกรรมที่เกิด High-Events of Cosmic Muon ที่ Lower-Hemisphere ของ LOM-16-06 ในย่านของ Lower-Charge Threshold โดยหลังจากนำเสนอเสร็จ ได้ Discussion กันต่ออีกประมาณ 45 นาที ก็เรียบร้อย ผมได้รับ suggestion และ ideas จำนวนมากทั้งจาก Chris และ Delaney สำหรับเพิ่มเติมลงในงานของผม ซึ่งช่วยลดเวลาในการตกผลึกเองของผมลงไปเยอะ และหลังจาก Present เสร็จ ก็ได้แยกย้ายกันกลับ โดย 1 ใน Achivement ของผมในวันนี้คือ Chris ได้บอกให้ Yuya ลองส่ง Muon Data ที่เหลือทั้งหมดที่ได้รับจากการ Testing LOM-16 ทุกตัวใน Freezer มาให้ผมลองศึกษา วิเคราะห์ และสำรวจเพิ่มเติม ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าเป็นการ Scale Up งานของผมใน Summer นี้ขึ้นอย่างมหาศาล เนื่องจาก Data ที่ต้องจัดการเพิ่มมากขึ้นจากเดิมถึง 5-6 เท่าตัว ซึ่งผมมองแล้วว่าสามารถจัดการได้ไม่ยาก และเป็นเรื่องดี เพราะจะได้เป็นการ validate การทำงานของ LOM-16-06 ด้วยว่าถูกต้องมากน้อยแค่ไหน?



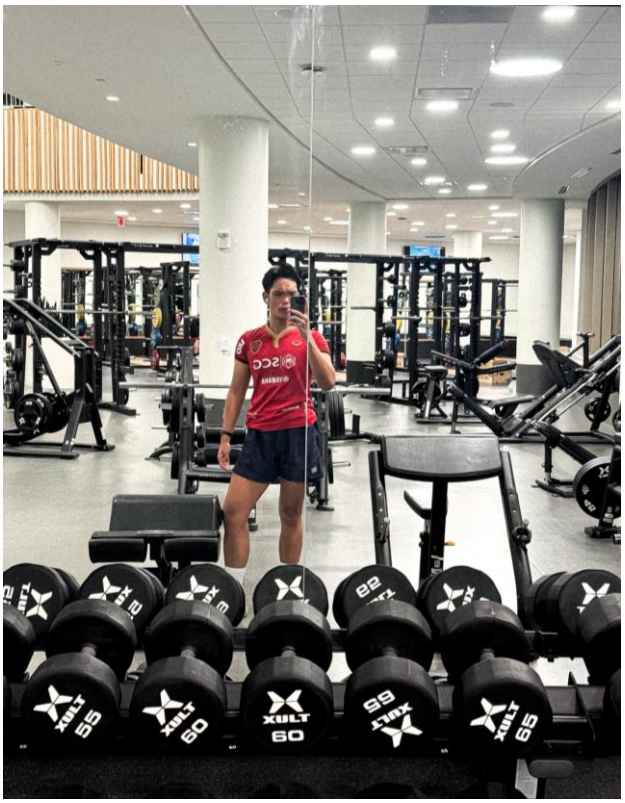
ภาพ Yuya กำลังอธิบายบรีฟเกี่ยวกับงานที่ Black Hole Meeting Room

รายงาน	**โครงการนักศึกษาภาคฤดูร้อนของหอสังเกตการณ์นิวทริโนไอซ์คิวบ์ ประจำปี 2568**
ชื่อ-สกุล	**ธรรมรัตน์ ยาวิศิษฏ์**
ช่วงเวลา	**วันที่ 31 พฤษภาคม - วันที่ 1 สิงหาคม 2568**

Day 26: June 25, 2025 (Wednesday)

วันนี้ผมเปลี่ยนสถานที่ทำงานไปนั่งทำที่ Terrace อีกวัน เพราะต้องการ recap ข้อเสนอแนะที่ได้จากการนำเสนอเมื่อวาน โดยโจทย์ที่ได้รับมาเพิ่มก็คือ เมื่อเราทราบพฤติกรรมจากการ plot distribution ของ Cosmic Muon แล้ว ก้าวต่อไปคือการดูว่า ณ จุด Peak ของ Charge นั้นมีเหตุการณ์อะไรเกิดขึ้นบ้าง? ซึ่งนั่นเป็นสิ่งที่ผม Yuya และ Chris เองต่างก็ให้ความสนใจ ซึ่งสิ่งที่ผมต้องทำก็คือการ plotting parameters อื่น ๆ ออกมาเพิ่ม เช่น ความสัมพันธ์ของ Waveforms ใน Channel 1 และ Channel 2 เทียบกับเวลา / correlation ระหว่าง muon charge ใน channel 1 และ channel 2 เป็นต้น (ซึ่งรายละเอียดในเชิงลึกจะขอกล่าวในส่วนที่เป็นเนื้อหาวิชาการของ Project ในลำดับถัดไป) แต่หลังจากเสร็จสิ้นงานในวันนี้ ผมได้กลับห้องเผื่อมาเก็บของและไป Gym ต่อ (อ้อ ลืมเล่าไปว่า Jay ได้พาผมไปสมัครเล่น Gym เมื่อวานนี้ ทำให้ต่อจากนี้ผมได้ที่ออกกำลังกาย และเวทเทรนนิ่งเป็นเรื่องเป็นราวแล้ว) จนประมาณ 20.00 น. Chris ก็ทักมาบอกใน Slack ว่า Group ของ Cosmic Ray Summer Program จะไป visiting Yerkes Observatory กันในวันพรุ่งนี้ และ Dr. Karle ให้ผมเข้าร่วมด้วยได้ โดยต้องเดินทางไปขึ้นรถที่ Chamberlin ในวันพรุ่งนี้เวลา 11.30 น.





Matcha Latte ที่ Eldo's Café และ ผมที่ Buckey Recreation Center

Day 27: June 26, 2025 (Thursday)

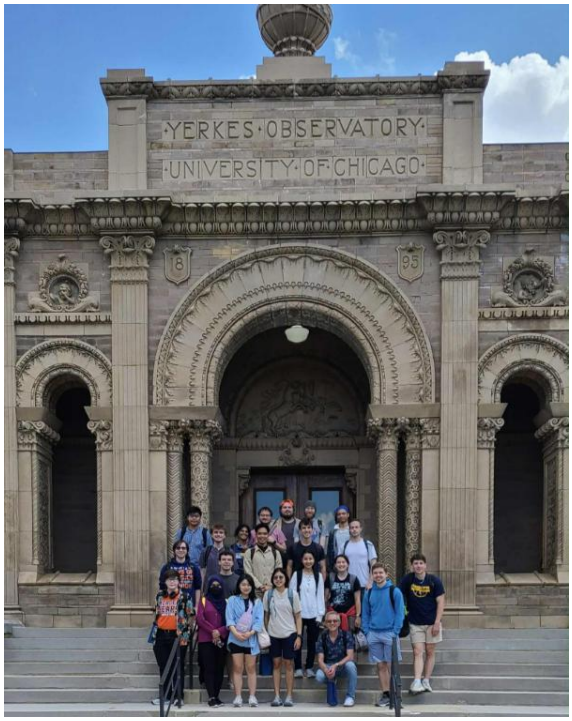
วันนี้ผมตื่นไม่เช้ามาก และไปทานข้าวที่ 4 Lakes ก่อนจะเดินออกไปซื้อกาแฟที่ Aldo's Café เพื่อจะไปขึ้นรถที่ Charter Street ในเวลา 11.30 น. โดยได้พบกับเพื่อน ๆ จาก Cosmic Ray Summer Program จำนวนมาก (Assume ว่าเกือบทั้งหมด) โดยอันที่จริง ผมที่ทำงานอยู่ที่ IceCube Lab, Chamberlin Hall เช่นเดียวกันกับเพื่อน ๆ จาก Cosmic Ray Program ทำให้ได้พบหน้าคร่าตากันอยู่ตลอดแทบจะทุกวันอยู่แล้ว ประจวบกับไปนั่งเล่นด้วยกันที่ Terrace อยู่บ่อย ๆ จึงทำให้สนิทกันค่อนข้างไว โดยวันนี้เราจะเดินทางด้วย School Bus จาก Madison ไปยัง Yerkes Observatory ไปทางทิศใต้ ตั้งอยู่ที่เมือง Williams Bay และเป็นส่วนหนึ่งของ University of Chicago ในอดีต ใช้เวลาประมาณชั่วโมงครึ่งก็ถึง วิวระหว่างทางนี่สวยเกินจะบรรยายเหมือนเดิมครับ และพอไปถึง ผมเองก็ขนลุกสุด ๆ เป็นสถานที่ทางดาราศาสตร์เชิงประวัติศาสตร์ที่ได้รับการยกย่องว่าเป็น "แหล่งกำเนิดของดาราศาสตร์ฟิสิกส์สมัยใหม่" ก่อตั้งขึ้นในปี พ.ศ. 2440 (ค.ศ. 1897) โดยมหาวิทยาลัยชิคาโก ภายใต้การนำของศาสตราจารย์จอร์จ เอลเลอรี เฮล (George Ellery Hale) นักดาราศาสตร์ผู้มีชื่อเสียง และได้รับทุนสนับสนุนจากชาร์ลส์ ที. เยอร์คีส (Charles T. Yerkes) นักธุรกิจผู้ใจบุญ โดยหอดูดาวแห่งนี้เป็นที่ตั้งของกล้องโทรทรรศน์หักเหแสงที่ใหญ่ที่สุดในโลก ซึ่งมีเลนส์วัตถุขนาด 40 นิ้ว (1 เมตร) ถือเป็นผลงานวิศวกรรมที่ยิ่งใหญ่ที่สุดด้านออปติคส์ในยุคปลายศตวรรษที่ 19 กล้องโทรทรรศน์นี้ได้เปิดโอกาสให้นักดาราศาสตร์ทำการสังเกตการณ์ที่มีความละเอียดและลึกซึ้งกว่าที่เคย ทำให้เกิดการค้นพบที่สำคัญในด้านฟิสิกส์ของดาวฤกษ์และกาแล็กซี และตลอดหลายทศวรรษที่ผ่านมา หอดูดาวเยอร์คีสได้บ่มเพาะนักวิทยาศาสตร์ผู้ยิ่งใหญ่หลายท่าน เช่น เอ็ดวิน ฮับเบิล (Edwin Hubble) ผู้ค้นพบการขยายตัวของจักรวาลซึ่งปฏิวัติวงการจักรวาลวิทยา และ สุพรหมันยัน จันทรเสขร (Subrahmanyan Chandrasekhar) หรือ "จันทรา" เจ้าของรางวัลโนเบลผู้คิดค้นขีดจำกัดจันทรเสขรในวิวัฒนาการของดาวฤกษ์ อีกทั้งยังมีส่วนสำคัญในการพัฒนาเทคนิคการวัดแสง (Photometry) และสเปกโทรสโกปี (Spectroscopy) ซึ่งเป็นรากฐานสำคัญของดาราศาสตร์สมัยใหม่ แม้ว่ามหาวิทยาลัยชิคาโกจะยุติการดำเนินงานวิจัยที่หอดูดาวแห่งนี้ในปี พ.ศ. 2561 (ค.ศ. 2018) แต่ปัจจุบันหอดูดาวเยอร์คีสได้รับการดูแลโดยมูลนิธิ Yerkes Future Foundation เพื่อทำหน้าที่เป็นศูนย์การศึกษาสำหรับสาธารณะ การอนุรักษ์ประวัติศาสตร์ และกิจกรรมเผยแพร่ความรู้ทางดาราศาสตร์ต่อไป เพื่อสืบสานมรดกทางวิทยาศาสตร์อันยิ่งใหญ่นี้ให้คงอยู่ และที่สำคัญที่สุด ผมได้มีโอกาสยืนอยู่ ณ จุดจุดเดียวกับที่ Albert Einstein และคณะนักวิทยาศาสตร์ในอดีตเคยยืนอยู่ เมื่อ 100 ปีก่อน นับว่าเป็นการส่งผ่านเจตนารมณ์จากรุ่นสู่รุ่นที่สร้างแรงบันดาลใจให้แก่ผมเป็นอย่างมาก

หลังจากนั้นเราก็เดินทางกลับในเวลาประมาณ 16.00 น. โดยวันนี้มีความพิเศษอีกอย่างคือ วรรษชล ได้พาผมไปทานอาหารเย็นที่ร้านอาหารไทย บริเวณ State Street ซึ่งเป็นครั้งแรกในรอบเดือนตั้งแต่ผมบินมาถึงที่นี่ และไม่ได้ทานอาหารไทยเลยแม้แต่มื้อเดียว ซึ่งเป็นร้านเดียวกับที่พี่ ๆ รุ่นก่อน ๆ (ญาณภัทร และ ปนัดดา : IceCube Summer Student 2024) เคยล้วนแต่มาทาน ซึ่งเมนูที่ผมสั่งคือผัดกระเพราไก่ไข่ดาว ซึ่งอร่อยมาก ๆ และพี่เจ้าของร้านยังเติมข้าวให้ผมฟรีอีกด้วย ก่อนจะแยกย้ายกันกลับห้องหลังทานเสร็จ

รายงาน	โครงการนักศึกษาภาคฤดูร้อนของหอสังเกตการณ์นิวทริโนไอซ์คิวบ์ ประจำปี 2568
ชื่อ-สกุล	ธรรมรัตน์ ยาวิศิษฏ์
ช่วงเวลา	วันที่ 31 พฤษภาคม - วันที่ 1 สิงหาคม 2568









ภาพการเยี่ยมชม Yerkes Observatory

Day 28: June 27, 2025 (Friday)

วันนี้ผมได้กลับเข้าไปทำงานตามปกติที่ IceCube Lab, Chamberlin Hall เพื่อทำการ tesing data อื่น ๆ ตามบรีฟและ suggestion ที่ได้รับจาก Yuya และ Chris โดยภาพรวมเป็นการตรวจสอบการทำงานของระบบและ Reader Module เพิ่มเติม เนื่องจากจะมีการเพิ่ม Function ในการวิเคราะห์ข้อมูลต่าง ๆ เพิ่มเข้าไปยัง Program เพราะฉะนั้น จึงต้องมีการจัดระเบียบโครงสร้างโปรแกรมเพิ่มเติมขึ้นมา โดยวันนี้ผมตั้งใจว่าจะวางโครงสร้างอื่น ๆ แบบคร่าว ๆ เพื่อเป็นการเตรียมความพร้อมสำหรับการ Upgrade Analysis Function ใน week หน้า และหลังจากเสร็จงานในวันนี้ก็ได้ไปออกกำลังกายที่ Nicholas Gym ตามปกติ



ภาพบรรยากาศบริเวณ ถนน Charter Street และ Chamberlin Hall (อาคารด้านขวา)



ภาพบรรยากาศบริเวณ Terrace และ Lake Mendota ในช่วงเย็นวันศุกร์

Day 29: June 28, 2025 (Saturday)

วันนี้วันเสาร์ และพอจะเดาได้ไหมครับ? ใช่ครับ สัปดาห์ก่อนผมไป West Town Mall มา งั้นสัปดาห์นี้ต้องไป East Town Mall ครับ จะได้ครบทุกฝั่งผมตั้งใจไว้ที่เวลา 13.00 น. ที่ Dejope Hall และเดินทางไปขึ้นรถที่หน้า Chamberlin พร้อมกัน ใช้เวลาประมาณ 30 นาที ก็เดินทางถึง East Town พวกเราแยกกันเดิน โดยจากการสำรวจของผม East Mall มันก็คล้าย ๆ West Mall เลย แต่ต่างตรงที่มันจะมีความลูกทุ่งกว่าหน่อย ๆ 555555555 ผมหมายถึง.... มันดูสงบเงียบ ๆ น่ะครับ ร้านค้าและโครงสร้างก็คล้าย ๆ กัน แต่โดยส่วนตัวรู้สึกว่า West Mall จะมีความเป็นห้างมากกว่า แต่ผมก็ชอบทั้งสองฝั่งจริง ๆ ครับ หลังจากเดินซื้อได้ประมาณ 3-4 ชั่วโมง พวกเราก็เดินทางกลับ โดยพี่ ๆ ก็กลับห้องกัน ส่วนผมแยกไป Gym ต่อตามระเบียบ



บริเวณ East Side ของ Madison

Day 30: June 29, 2025 (Sunday)

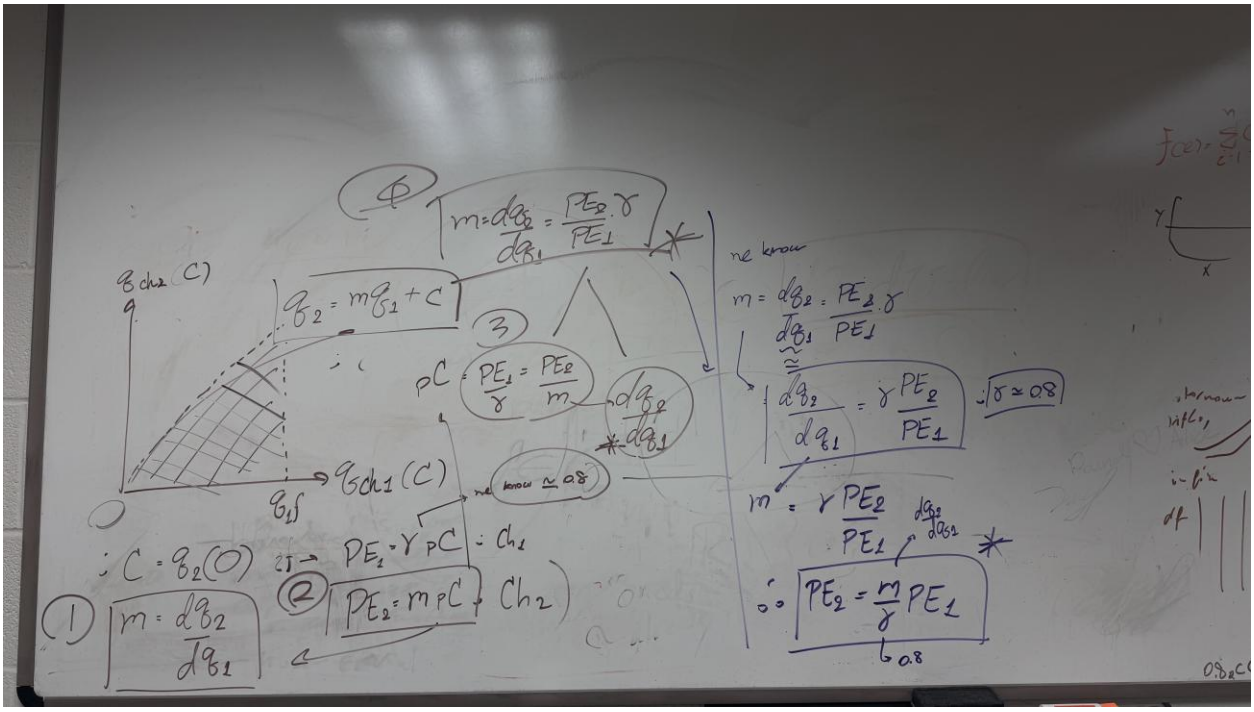
วันนี้ผมตื่นสาย ๆ นิด ๆ และไปกินข้าวที่ 4 Lake เหมือนเดิม ก่อนจะเดินทางไปทำงานที่ Terrace ที่เก่าที่เดิม หลัก ๆ วันนี้จะเป็นการเตรียม Environment ต่าง ๆ สำหรับรันงานในสัปดาห์ถัดไป เช่น ปรับแก้ Script จัด Files Path รวมถึงตรวจสอบความเรียบร้อยของ Terminal ต่าง ๆ เนื่องจาก ผมพยายามให้งานของผมมีลักษณะที่ยืดหยุ่น มันจึงสามารถรันได้ในทุก Platform ไม่ว่าจะเป็น Local Host หรือ Could-Based ก็ดี และช่วงค่ำ ๆ ก็ได้เจอกับ Ray Spenser เพื่อนจาก Cosmic Ray Program ผมเลยนั่งเมาท์กับเขาต่ออีกเล็กน้อยก่อนจะแยกย้ายกลับเตรียมทำงานในวันต่อไป



ภาพถ่ายระหว่างนั่งพูดคุยกับเพื่อน ๆ Ray Spenser (ซ้าย) Jay Tang (กลาง) และ ผม (ขวา)

Day 31: June 30, 2025 (Monday)

วันนี้ผมตื่นแต่เช้าไปทาน Breakfast ที่ 4 Lakes และเดินทางไปทำงานที่ Chamberlin ตามปกติ โดยวันนี้หลังจากการ setting มาระยะนึง โปรแกรมของผมก็ plotting สำเร็จและทำงานได้อย่างสมบูรณ์ สามารถ plot Charge Correlation ออกมา พร้อมกับ parameters อื่น ๆ ได้ตามที่ต้องการ และโจทย์ต่อไปคือต้องมาเลือกว่าอันไหนควรเป็นจุดที่เจาะลึกเข้าไป ซึ่งการจะสร้างผลลัพธ์ที่สมบูรณ์ ทำให้ผมต้องย้อนกลับไปที่การคำนวณทางทฤษฎีเพิ่มเติม ซึ่งหลัก ๆ คือการคำนวณอัตราส่วนของประจุ และการแปลง parameters ต่าง ๆ ซึ่งจะกล่าวโดยละเอียดในส่วนของโครงงานที่ทำ โดยหลังจากเสร็จงานในวันนี้ ผมได้ไป Gym พร้อม Jay และหลังจากออกกำลังกายเสร็จ Jay ได้พาผมไปลองทาน Dinner ที่ Naf Naf ซึ่งเป็นร้านอาหารสไตล์ mediterranean food ซึ่งราคาย่อมเยา และได้เยอะมาก รวมถึงอร่อยมาก เราซื้อไปนั่งทาน Terrace ด้วยกัน ก่อนจะแยกย้ายกันกลับห้องหลังทานเสร็จ



การคำนวณทางทฤษฎีประกอบงานวิจัยของผม (อัตราส่วนระหว่างประจุของ PMT ทั้ง 2 channel)

Day 32: July 1, 2025 (Tuesday)

หลังคำนวณทางทฤษฎีเพิ่มเติมเสร็จสิ้น ผมได้เพิ่มฟังก์ชันต่าง ๆ ที่จำเป็นเข้าไปในโปรแกรม และสามารถ plot charge correlation ออกมาได้ตามที่คำนวณเอาไว้ โดยเราพบข้อมูลที่น่าสนใจจำนวนมาก และผมได้รีบส่งไปรายงาน Yuya กับ Chris ทันที ซึ่งทั้งสองท่าน ต่างก็เห็นตรงกันว่าผลลัพธ์นี้ให้ข้อมูลที่น่าสนใจมาก ๆ และสมควรแก่การ Insight เข้าไปอีก และหลังจากได้ suggestion จากทั้งสองท่านมาเพิ่ม ผมจึงทำการ list ไว้ว่าต้องเพิ่มเติมตรงไหน และได้พับงานไว้ชั่วขณะ เนื่องจากช่วงเวลาที่เหลือของวีคนี้ต้องไปช่วย Yuya ทำ Sub-Assembly ของ LOM-16-09 ที่ PSL ในวันพรุ่งนี้ โดยวันนี้ผมยังได้แวะไปที่ Madison East Side Market อีกด้วยหลังเสร็จงาน และหลังจากนั้นก็ได้ไปออกกำลังกายที่ GYM พร้อมกับ Jay ตามปกติ ก่อนจะรีบกลับห้องมานอนพักเพื่อเตรียมพร้อมสำหรับงานที่ PSL ในวันพรุ่งนี้



East Side Market ซึ่งเป็นเหมือน Supermarket ขนาดใหญ่ (มาก) มีของใช้ขายเยอะ และราคาเป็นมิตรสุด ๆ

Day 33: July 2, 2025 (Wednesday)

วันนี้ผมนัด Yuya ไว้ 09.30 น. เลยรีบอาบน้ำแต่งตัวออกไปทาน Breakfast ที่ 4-Lakes ในช่วงเช้า หลังจากนั้นไม่นาน Yuya ก็มาถึง และเดินทางไปยัง PSL พร้อมกัน วันนี้งานของผมคือการประกอบ Sub-Assembly Site เพื่อเตรียมการสำหรับการ Assembly LOM-16-09 ตัวสุดท้ายในสัปดาห์หน้า ซึ่งงานวันนี้จะใช้เวลาประมาณ 3-4 ชั่วโมง และพวกเรามาถึงช่วงสาย ๆ กัน โดยหลังจากเปลี่ยนชุดเสร็จเรียบร้อย ไม่รอช้า ผมรับบรีฟจาก Yuya และ Brian เกี่ยวกับงานที่ผมต้องทำวันนี้ และเริ่มลงมือทันที อย่างได้เขียนไว้ข้างต้นว่างานของผมคือการประกอบ Sub-Assembly Site ซึ่งเป็นงาน shop ที่ผสมผสานระหว่าง Mechanical กับ Electrical กล่าวคือต้องต่อตัวโครงของ Machine และทำการ Wiring ตามแบบ เพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการ Assembly LOM-16-09 ในสัปดาห์หน้า โดยหลังจากเริ่มลงมือก็ใช้เวลาไม่นานนัก ประมาณ 2-3 ชั่วโมง ทุกอย่างก็เรียบร้อย ผมต่อได้สมบูรณ์ตามแบบ โดยไม่มีข้อผิดพลาดเลย นั่นทำให้งานของผมและ Yuya ในวันนี้เสร็จไว้กว่าที่แพลนเอาไว้ Yuya จึงพาผมไปทาน Ice-Cream Shake ในช่วงบ่าย ก่อนกลับมาส่งที่ Chamberlin Hall และทางวรรษชลได้นัดหมายกับพี่ลี (Linipun Phuttitarn) รุ่นพี่ชาวไทยที่กำลังศึกษาปริญญาเอก อยู่ที่ Department of Physics, UW-Madison ใน Quantum Computing & Information Group โดยพี่ลีจะพา visiting lab ที่พี่เขากำลังทำงานอยู่ จึงได้มีโอกาสในการพูดคุย / discuss ประสบการณ์อื่น ๆ เพิ่มเติมเกี่ยวกับการทำวิจัย / การเรียน และการทำงาน และในช่วงเย็นผมก็เปลี่ยนชุดและไปออกกำลังกายที่ Gym ตามปกติ



การประกอบ Sub-Assembly Site ของ LOM-16-09 ที่ PSL

รายงาน	โครงการนักศึกษาภาคฤดูร้อนของหอสังเกตการณ์นิวทริโนไอซ์คิวบ์ ประจำปี 2568
ชื่อ-สกุล	ธรรมรัตน์ ยาวิศิษฏ์
ช่วงเวลา	วันที่ 31 พฤษภาคม - วันที่ 1 สิงหาคม 2568





Yuya ที่พาผมไปทาน Milk Shake ที่ Calver (ภาพซ้าย) และพี่ลีที่พาผมและพี่ ๆ ไปเยี่ยมชม Quantum Computing Laboratory (อยู่ชั้น 5 ของ Chamberlin Hall ใกล้ ๆ กับ Lab ของผม)



บรรยากาศของ Riverside Brewery House ที่ Yuya ได้พาผมไปเยี่ยมชม

Day 34: July 3, 2025 (Thursday)

วันนี้ผมตื่นแต่เช้ามาทาน Breakfast ที่ 4 lake ตามปกติ และเดินทางไปทำงาน แต่เนื่องจากวันพรุ่งนี้ (4 July) จะเป็น Independence day หรือวันชาติสหรัฐอเมริกา ทำให้ผู้คนส่วนใหญ่เริ่มหยุดงานกันแล้ว รวมถึงใน Lab ผมด้วย ซึ่งวันนี้มีแค่ผม Jay และ Hannah ที่มาทำงาน โดยวันนี้ผมทำการพัฒนาฟังก์ชันการทำงานของโปรแกรมยกใหญ่ โดยเพิ่มการ plot Charge Correlation เข้าไปทั้งในช่วง Log-Scale และ Linear Scale ปกติ โดยปรับปรุงในแง่ของการ plot Event Coincidence ให้มีความละเอียดมากขึ้นเพื่อให้ครบคลุมหลายช่วง Threshold ซึ่งเนื่องจากมีโครงสร้างของโปรแกรมที่เตรียมมาก่อนหน้านี้ จึงทำให้ใช้เวลาไม่นานนัก ทุกอย่างก็เรียบร้อย หลังจากได้ผลลัพธ์ที่น่าสนใจออกมาเพิ่มเติม จึงรีบรายงานไปยัง Yuya และ Chris และเนื่องจากวันนี้เป็นเย็นก่อน Long-Weekend ทำให้ทุกคนกลับบ้านไปหมดแล้ว ผมจึงตัดสินใจว่าเดี๋ยวจะ Pause งานไว้ และกลับห้องไปเก็บของเพื่อจะไปออกกำลังกายที่ Gym พร้อมกับ Jay โดยความฮาก็คือ Gym ปิดยาว 3 วัน Jay จึงพาผมไปทาน Noodles เดินซื้อของใช้เพิ่มเติมที่ East Side Store จากนั้นช่วงค่ำพวกเราก็กลับเข้ามาในเมืองและแยกย้ายกันกลับห้อง



ผมและ Saigon Sandwich ซึ่งเป็น Food Truck โดยขายแซนด์วิชต์สไตล์เวียดนาม

Day 35: July 4, 2025 (Friday)

วันนี้เป็นวันชาติสหรัฐอเมริกา หรือ Independence Day โดย Fin เพื่อนที่ Lab ของผมจะจัด Party ในช่วงเย็น และได้ชวนผมกับ Jay ไปด้วย ซึ่งระหว่างวัน ผมก็ไม่อยากปล่อยเวลาว่างทิ้งไปเปล่า ๆ จึงรีบตื่นไปทาน Breakfast ที่ Four Lakes Market และไปนั่งทำงานที่ Terrace เช่นเดิม โดยใน 3 วันนี้ ตั้งใจว่าจะใช้เวลาในการ Recap งานที่ทำมาในช่วงเวลาก่อนหน้าประมาณ 3-4 Weeks และ planning งานสำหรับช่วงเวลา 1 เดือนที่เหลือ ซึ่งส่วนใหญ่วันนี้ที่ Terrace คนเยอะมาก เนื่องจากเป็น Long-weekend และผู้คนก็มักจะมาสังสรรค์ที่ Terrace เป็นหลัก ทำให้หลังจากผมเคลียร์งานเสร็จ จึงรีบกลับห้องเพื่อไปอาบน้ำเปลี่ยนชุดเพื่อเตรียมไป Party ตอนเย็น หลังจากนั้นผมนัดพบกับ Jay ที่ใต้ Apartment ของเขา และเราก็ได้ไป Party ที่บ้านของ Fin พร้อม ๆ กัน เริ่มตั้งแต่ประมาณ 19.00 น. และเสร็จประมาณ 23.30 น. จากนั้นพวกเราก็แยกย้ายกันกลับห้อง



ภาพบรรยากาศการฉลองในวันชาติสหรัฐอเมริกา (Independence Day)

Day 36: July 5, 2025 (Saturday)

วันนี้เป็นวันเสาร์ และผมตื่นสายนิด ๆ เพื่อไปทานอาหารเช้าที่ Taste of Sichuan โดยเป็นซุปหม่าล่าเช่นเดิม จากนั้นก็แวะไปซื้อกาแฟที่ Peet's Café และไปนั่งทำงานที่ Terrace เช่นเดิม เนื่องจากปกติผมจะเขียน Diary ทุกวัน และวันนี้ไม่มีงานอะไรทำเป็นพิเศษ จึงแก้โปรแกรมเพิ่มเติมเล็กน้อย และปรับปรุงโค้ดของ FPGA: Icarus Verilog เพราะก่อนหน้านี้ต้องการเข้าใจระบบการทำงานของ FPGA ใน Micro-Base ของ LOM-16 ให้มากขึ้น จึงได้ฝึกเขียน FPGA เพิ่มเติมนอกเหนือจากการทำงานปกติ หลังจากนั่งทำงานไปได้พักใหญ่ ๆ และอยู่ ๆ ฝนก็ตกจึงทำให้ Terrace คนเยอะเป็นพิเศษ หลังจากผมปรับแก้โค้ดใน Icarus Verilog เสร็จสักพัก ก็ได้กลับห้อง เพราะวันนี้ต้องการไปซักผ้าในช่วงค่ำ



ภาพบรรยากาศในร้าน Noodle Bowl's ซึ่งเป็นร้านแนวผัดเส้น เช่น Spagetthi หรือผัดไทย เป็นต้น

Day 37: July 6, 2025 (Sunday)

วันนี้วันอาทิตย์ ผมตื่นแต่เช้ามาทาน Breakfast ที่ Four Lake Market เช่นเดิม จากนั้นจึงตั้งใจว่าจะไปนั่งทำงานที่ Terrace ตามปกติ โดยเมื่อไปถึงก็พบว่าโปรแกรมที่รันทดสอบไว้บน JupyTer กับ Back-end Script บน VS-Code ที่ต้องการ Plot Events นั้นมีปัญหา จึงได้ทำการแก้ไขเพิ่มเติม และสรุปงานสำหรับ 5 weeks ที่ผ่านมาอีกครั้ง โดยเป็นการ Plan เพิ่มอีกนิดเกี่ยวกับ Plan การทำงานสำหรับ 1 เดือนที่เหลือหลังจากนี้ โดยผมตั้งใจว่าในช่วงเวลาที่เหลือต้องการ Exploring Event อื่น ๆ นอกเหนือจากที่ได้ทำกับ Cosmic Muon Data ก่อนหน้านี้อีกด้วย เช่นการใช้ Machine Learning / Deep Learning Techniques ในการจำแนกลักษณะของ Event หรือตรวจหา Anomalous Detection เพื่อ Validate การทำงานของ LOM-16 และใด ๆ คือวิเคราะห์ Consistency ของส่วนต่าง ๆ ทั้ง Hardware และ Electronics System ว่าเป็นไปอย่างถูกต้องอย่างมีนัยสำคัญมากน้อยแค่ไหน? โดยหลังจากนั่งทำงานไปได้ไม่นาน Jay ก็เดินมาหาผมที่ Terrace ผมจึงวางมือจากงานไปนั่งพักสักครู่ และนั่งคุยและไม่นานหลังจากนั้น Yuya ก็ทักมาใน Slack ว่าจะมารับผมพรุ่งนี้แต่เช้าเวลา 08.00 น. เนื่องจากเรามีงานที่ต้องทำอย่างมหาศาลในวันพรุ่งนี้ที่ PSL ซึ่งนั่นก็คือการ Assembly LOM-16-09 ตัวสุดท้ายใน Series นี้นั่นเอง



ภาพบรรยากาศบริเวณ Terrace ในช่วงค่ำ (ซ้าย) และ ภาพบริเวณ Memorial Library (ขวา)

Day 38: July 7, 2025 (Monday)

วันนี้พิเศษมาก เพราะผมตื่นเช้าที่สุดในรอบกี่วันก็ไม่รู้ (อนุมานว่า 20-30 วัน) เวลา 06.00 น. และรีบอาบน้ำแต่งตัว ไปทาน Breakfast ที่ Four-Lakes และต้องทานอย่างติด speed เพราะนัด Yuya ไว้ตอน 08.00 น. ซึ่งหลังจากทานเสร็จไม่นานนัก Yuya ก็มาถึงพอดี และเดินทางไปยัง PSL โดย Yuya ได้พาผมไปแวะ Café ติดกับ Lake Monona ก่อนไป PSL และเมื่อถึง PSL แล้ว ก็เริ่มลุยงานอย่างไม่รอช้า โดยวันนี้งานของเราหลัก ๆ คือมีหลายอย่างมาก ๆ เริ่มตั้งแต่การประกอบ PMT แต่ละตัวเข้าสู่ Metal Frame ของตัว LOM-16 โดยช่วงเช้าผมรับผิดชอบในส่วนของ Mechanics Structures ของการขึ้นโครงของ LOM-16 และ Yuya จะจัดการการ Built-In PMT เนื่องจาก PMT แต่ละตัวเพิ่ง connected เข้ากับ Micro-Based และมี Fragile ที่สูงมาก ๆ จึงต้องระมัดระวังอย่างสูง และวันนี้จะมี Brian ที่มาช่วยเรา Assembly ด้วย หลังจากเสร็จในช่วงเช้า Yuya ได้ขับรถพาผมเข้าไปยัง Stoughton Town ซึ่งผมต้องทึ่งกับสิ่งที่เห็น เพราะมันคือ Popeyes ร้านอาหารร้านโปรดของผม และเป็นร้านโปรดของ Yuya เช่นเดียวกัน โดยหลังจากนั้นพวกเราได้แวะกินที่ร้านนี้สำหรับ Lunch ผมซึ่งชอบ Popeyes เป็นทุนเดิมอยู่แล้ว และไม่ได้ทานมานานมาก ๆ จึงซัดซะเกลี้ยง และ Yuya ก็เลี้ยงผมอีกแล้ว ซึ่งผมเกรงใจมาก ๆ T___T แต่ Yuya บอกว่าผม hardworking มานาน แค่นี้ไม่เป็นไรเลย ผมจึงแพลนเอาไว้ว่าเดี๋ยวจะพา Yuya ไปเลี้ยงอาหารไทยกลับเร็ว ๆ นี้ หลังจากเสร็จ พวกเราก็นั่งรถกลับมาประกอบตัว Cover Shielded เข้ากับ Mechanics Frame ซึ่งเป็น Process ที่ต้องใช้เวลาและความระมัดระวังสูงมาก โดยพวกเราทำกัน 3 คน มีผม Yuya และ Brian ซึ่งใช้เวลาประกอบทั้ง Upper และ Lower Hemisphere ราว ๆ 3-4 ชั่วโมง ก่อนจะนำไปเข้า Vacuum Freezer เพิ่มให้เจลที่ PMT แนบสนิทกับ Shielded หลังจากเสร็จ Yuya ก็มาส่งผมที่ Phillips Hall และผมก็เปลี่ยนชุดเพื่อไปออกกำลังกายที่ Gym ตามปกติ



ภาพบรรยากาศบริเวณด้านหน้า Physical Science Laboratory

Day 39: July 8, 2025 (Tuesday)

วันนี้ผมมี online meeting เล็กน้อยในช่วงเช้า จึงไม่ได้ออกมาทาน breakfast ซึ่งก่อน meeting ใกล้จะจบ ทางวรรษชลได้ทักไลน์มาชวนผมไปทานร้านอาหารไทย (Rising Star) ด้วยกัน เพราะจะพาเพื่อนอีก 2 คนจาก University of Delaware มาทานด้วย ผมจึงทักไปชวน Jay และ Fin ซึ่งทั้งคู่ก็บอกโอเค พอ meeting เสร็จ ผมจึงเดินจาก Phillips Hall ไปยัง Chamberlin เพื่อรับทั้งสองคนก่อน และเนื่องจาก Jay และ Fin กำลังงานพันมือ ผมเลยต้องรอสักครู่ แต่หลังจากนั้นไม่นานก็เสร็จเรียบร้อยและเดินไปทานพร้อมกัน วันนี้พวกเราได้โต๊ะใหญ่เพราะมากันถึง 5 คน ได้แก่ ผม วรรษชล Yuca, Ahood, Jay และ Finn ซึ่งส่วนใหญ่ก็จะสั่งเมนูทั่วไปกัน ตั้งแต่ ราดหน้า แกงเขียวหวาน พะแนง ผัดไทย และต้มยำกุ้ง และหลังจากทานเสร็จ พวกเราก็แยกย้ายกันกลับ เนื่องจากวรรษชลต้องกลับไปทำงานต่อ ผมกับ Jay ก็เช่นกัน จากนั้นเมื่อกลับมานั่งทำงานต่อที่ Lab จนเสร็จในช่วงเย็น ๆ ผมกับ Jay ก็ไปออกกำลังกายที่ Gym ตามปกติ จากนั้นเมื่อเสร็จก็ไปทานอาหารเย็นที่ Terrace และได้พบกับ John ที่เพิ่งเสร็จงานพอดี พวกเราจึงได้นั่งทาน Dinner ด้วยกัน ก่อนที่จะแยกย้ายกลับกันตามปกติ โดย Yuya ได้ทักมาบอกผมใน Slack ว่าวันพรุ่งนี้ เราต้องกลับไป PSL เพื่อทำ Backfilling ใน PMT ที่พวกเราเพิ่งประกอบกันเสร็จไปเมื่อวานนี้ (ครบ 48 ชั่วโมง ในการนำเข้า Vacuum Machine เพื่อดูดซับอากาศออกให้หมด)



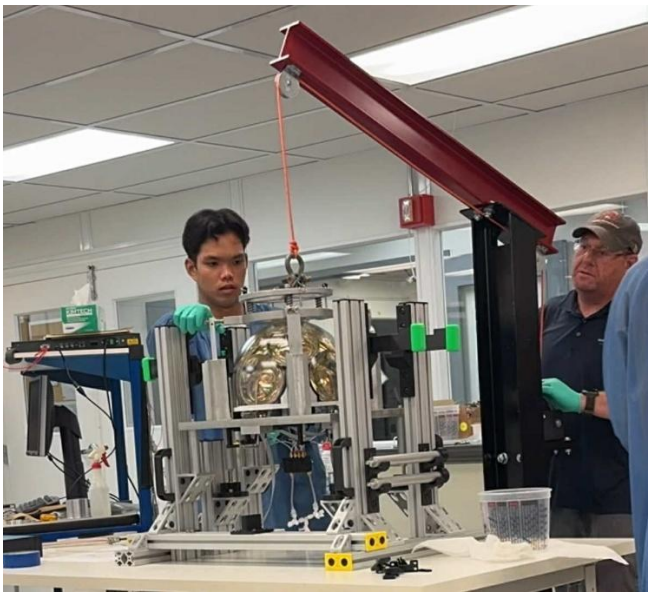
ภาพหลังทานอาหารเสร็จที่ร้านอาหารไทย Rising Star โดยมี ผม Finn, Jay, Ahood, Yuca และ วรรษชล

Day 40: July 9, 2025 (Wednesday)

วันนี้ผมตื่นแต่เช้าไปทาน Breakfast ที่ 4 Lake ตามปกติ โดย Yuya มารับผมประมาณ 09.00 พวกเราใช้เวลาไม่นานก็เดินทางไปถึง PSL โดย งานวันนี้มีหลายอย่างที่ต้องทำ หลัก ๆ จะเป็นการ Backfilling ตัว Gelpad ภายใน Air-Gap ของ PMT แต่ละตัว ในทั้งสอง Hemisphere ที่แนบติดกับ Cover หรือว่าฝาครอบ โดยวัตถุประสงค์ คือ เพื่อใช้ Optical Gel เป็นตัวกลาง เมื่อเวลาที่อนุภาคพลังงานสูง เช่น Muon วิ่งมาชนและเคลื่อนที่ในตัวกลางจนสร้าง Cherenkov Light หากเกิด Air-Gap ที่วางอยู่ระหว่าง Surface ของ PMT กับ Cover อาจทำให้ Light เกิดการกระเจิงหรือสะท้อนไปในทิศทางที่ไม่สอดคล้องกับการตรวจวัด ดังนั้นตึงต้องมีการเติม Optical Gel ดังกล่าวเพื่อเปรียบเสมือนการสร้างตัวกลางในการตรวจวัด Cherenkov Light ให้แก่ PMT นั่นเอง โดยวิธีการ Backfilling วันนี้ ก็จะค่อนข้างซับซ้อนเล็กน้อย เริ่มตั้งแต่การทำความสะอาด Sling ในการเติม Gel โดยเราจะสามารถเติมได้พร้อมกันครั้งละ 4 Sling / 4 PMT นั่นหมายความว่า ต้องเติมทั้งหมด 4 รอบ โดยเริ่มจาก Lower Hemisphere ก่อน 2 Sling และ Upper Hemisphere อีก 2 sling หลังจากทำความสะอาด Sling เสร็จ ก็ต้องนำ Gel ไปเข้า Vacuum Cleaner เพื่อดูดซับ Air ออกให้หมด ก่อนจะนำ Gel ที่ได้มาเติมลงใน Sling แต่ละหลอด และทำการ Backfilling ตามแผนต่อไป โดยตามแพลน Yuya บอกว่าน่าจะใช้เวลาเกือบทั้งวัน และเสร็จบ่าย ๆ แต่เนื่องจากการ Backfilling ดำเนินไปได้ไวกว่าปกติ จึงทำให้พวกเราทำกันยาวจนเสร็จทั้งหมดตั้งแต่ประมาณ 13.00 น. และได้นำ LOM-16-09 ทั้ง 2 Hemisphere กลับไปเข้า Vacuum Cleaner อีกครั้งนึง และต้องใช้เวลาประมาณ 4-5 วัน ในการดูดซับ Air จากแต่ละ Module และให้ Gel Pad สมานกันให้เต็มที่ ซึ่งงานต่อไปจะเป็นการประกอบหรือ Combining ทั้ง 2 Hemisphere เข้าด้วยกัน เป็นการปิดมหากาพย์การประกอบ LOM-16 ชุดแรก โดยหลังจากเสร็จงานที่ PSL วันนี้ ช่วงบ่าย Yuya ได้พาผมไปทานร้านลับ ซึ่งเป็น Grill Bar B Q โดย Yuya ได้สั่ง Pork BBQ ทานคู่กับ Hamburger มาให้ผม ซึ่งเยอะมาก ๆ และอร่อยมาก ๆ จากนั้นเมื่อทานเสร็จก็กลับมายัง Chamberlin โดยผมได้นัด Yuya คุยงานต่อเวลาประมาณ 15.30 น. โดยผมได้ขอ present และ discuss เกี่ยวกับ results ที่ผมได้จากการวิเคราะห์ Cosmic Muon ล่าสุด โดยได้ plot Charge Correlation ออกมาและ Parameter อื่น ๆ ตามที่พวกเราสนใจ ซึ่งจากการ present งานของผมมีความสมบูรณ์เกือบ 80% แล้ว ขาดส่วนเติมเต็มอื่น ๆ อีกเล็กน้อย ทาง Yuya จึงได้เสนอให้ผมลองเพิ่ม Parameter ต่าง ๆ ที่จำเป็นต่อการวิเคราะห์และออกแบบการศึกษาในครั้งนี้ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น จากนั้นในช่วงเย็นผมจึงได้กลับห้องไปเปลี่ยนชุดและไปออกกำลังกายที่ Gym ตามปกติ โดยหลังจากออกกำลังกายที่ Gym เสร็จในเวลา 20.00 น. ผมได้ไปทานอาหารเย็นที่ Terrace จากนั้นจึงได้รีบกลับมายังห้อง เพื่อที่จะอาบน้ำและนั่งทำงานต่ออีกสักพัก (ซึ่งไม่สักพัก) ผมนำผ้าไปซักตอน 23.00 น. และเริ่มลงมือรื้อโค้ดและปรับแก้โปรแกรมตั้งแต่เวลา 23.30 จนถึงเวลา 03.30 น.

รายงาน	**โครงการนักศึกษาภาคฤดูร้อนของหอสังเกตการณ์นิวทริโนไอซ์คิวบ์ ประจำปี 2568**
ชื่อ-สกุล	**ธรรมรัตน์ ยาวิศิษฏ์**
ช่วงเวลา	**วันที่ 31 พฤษภาคม - วันที่ 1 สิงหาคม 2568**





ภาพประกอบการทำ Back Filling เพื่อให้ Gel Pad ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อม PMT
และการประกอบ Shielded เข้ากับแต่ละ Hemisphere



หลังจากเสร็จงาน Yuya ได้พาผมไปทาน Bar BQ ที่ร้านแถว ๆ Lake Monona

Day 41: July 10, 2025 (Thursday)

Ok ครับ มันอาจดูแปลก ๆ แต่ใช่ครับ คือความที่มันเข้าวันใหม่แบบเลยเที่ยงคืนมาแล้ว งั้นเราจะนับเป็นวันใหม่เลยละกันครับ 5555 ก็จากการแก้โค้ดและปรับปรุงการทำงานตั้ง 23.30 น. ของเมื่อวาน ผมก็นั่งปรับเรื่อย ๆ มาจนประมาณ 03.30 น. ของวันนี้ ทุกอย่างก็เสร็จเรียบร้อย และผมได้ Update ทิ้งไว้กับ Yuya ทันที เพราะวันนี้ผมนัดเขา present งานต่อในช่วงบ่าย หลังจากตื่นสายเล็กน้อยในวันนี้ ผมได้ไปทาน Breakfast ที่ 4 Lakes Market เพราะว่าเดี๋ยวต้องมาทำ Presentation เพิ่มเติม และหลังจากทำเสร็จช่วงบ่าย ผมได้นัด Present กับ Yuya อีกครั้ง ซึ่งทุกอย่างก็เป็นไปได้อย่างดี Results ของผมมีความถูกต้อง ครบถ้วน และสมบูรณ์ขึ้นมาที่ 90-95% ซึ่งเกิดจากการที่ผมให้เวลาในการทำความเข้าใจงาน และทำให้งานที่ได้รับ assigned มาตั้งช่วงเดือน มิ.ย. เสร็จก่อนกำหนด โดยผมได้ discuss กับ Yuya เพิ่มเติมว่าสามารถเพิ่มเติมส่วนต่าง ๆ เข้าไปให้งานออกมาสมบูรณ์ขึ้นได้ไหม? ซึ่ง Yuya ก็บอกว่า ทาง Prof. Nobu ที่ Chiba University ได้ทำการ Simulation การ Testing LOM-16 ผ่าน Freezer โดยมี setting แบบเดียวกับที่ Chamberlin Hall วัตถุประสงค์ก็เพื่อเป็นการ validate ความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการ testing ใน freezer เพื่อเปรียบเทียบกับการคำนวณและ Generating เชิงทฤษฎี โดย Yuya ได้บอกว่าจะรวบรวมข้อมูล และส่งมาให้ผมในช่วงสัปดาห์หน้า และให้ผมเตรียมทำ Final-Presentation สำหรับสิ้นเดือนนี้ไว้ตั้งแต่เนิ่น ๆ ซึ่งหลังจากเสร็จงานวันนี้ ผมก็ได้ไปออกกำลังกายที่ Gym ตามปกติ



ภาพการแสดง Plot ที่กำลังพาเราเข้าสู่ปลายทางของงานที่เริ่มต้นตั้งแต่เดือนมิถุนายนที่ผ่านมา

Day 42: July 11, 2025 (Friday)

วันนี้เช้าผมไม่ได้ไปทานอาหารที่ 4 Lakes Market เพราะอยากไปลองทาน Subway จึงเดินจากหอไปซื้อ Subway ที่บริเวณ South Campus ใกล้ ๆ กับ Discovery และได้ซื้อทานคู่กับ Iced-Matcha Latte ที่ Peet's Café ก่อนจะเดินไปเจอกัน Finn โดยบังเอิญ ซึ่งกำลังเดินไปทำงานยัง Lab เช่นเดียวกับผม แต่ผมยังซื้อ Matcha ไม่เสร็จ เลยส่ง Finn ล่วงหน้าไปก่อน แล้วผมถึงเดินตามไป วันนี้แพลนการทำงานของผมจะเป็นการ draft outline ของ Final Presentation สำหรับสิ้นเดือนนี้ก่อนกลับไทย และแก้ Bug อีก 5% ภายใน Program ที่เมื่อวานนี้ Yuya ได้ suggest มา เกี่ยวกับการสร้างสมการ Fit Curved เพื่อกำหนดการสร้าง Linear Regression สำหรับวิเคราะห์ Correlation ของ Charge Ratio ระหว่าง Channel 1 และ Channel 2 ซึ่งจาก 96 Plots ที่ออกมา มี 1 Plot จาก LOM-16-06 ใน PMT-02 ที่มีหน้าตาของ Fitting Curved Equation สำหรับ Linear Regression ที่ผิดแปลกพิสดารจากอีก 95 Plots อื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญ (ชนิดที่ผมเองก็งงว่าเกิดอะไรขึ้น ???) ช่วงบ่ายจึงได้นัด Yuya มา discuss เพิ่มเติมเกี่ยวกับ results นี้อีกครั้ง ซึ่ง Yuya ได้เสนอให้ลองปรับแก้โปรแกรมในส่วนของการสร้าง Fitting Curved อีกครั้ง โดยเพิ่ม Syntax ที่ช่วยในการกำหนดช่วงของค่าที่ต้องการให้มีความเฉพาะเจาะจงมากขึ้น รวมถึงปรับตัวแปรในโปรแกรมบางส่วนซึ่งอาจไป effect กับ part ที่เป็น Event Coincidence Matrices หลังจากเสร็จงานวันนี้ ตอนแรกผมได้นัด Yuya เพื่อจะพาไปลองทาน Rising Sons ร้านอาหารไทย แต่วันนี้ดันช็อตฟีล เพราะพี่แกปิดร้าน T_____T และเปิดอีกที่ July 21 Yuya จึงได้พาผมไปลองร้านที่ American จ๋า ๆ แทน ซึ่งก็คือ Great Dane Pub & Brewing ซึ่งเป็นผับนั่งชิลล์ของคนวัยทำงานที่นี่ โดย Yuya ได้พาผมมาลองทาน Steak เป็น Dinner และลองชิมเบียร์ที่เป็น Signature ของร้าน ซึ่งพอได้ลองมาชิมอะไรที่เป็น Americans จ๋า ๆ นี่มันก็ได้ฟีลไปอีกแบบเหมือนกันครับ เหมือนหนัง Marvel ที่เราดูกันอะไรแบบนั้นล่ะครับ 5555 หลังจากเสร็จช่วง 21.00 คุณ Leah ภรรยาของ Yuya ก็ได้ขับรถมารับพวกเรา และพาผมไปส่งที่หอ เป็นการปิด Week 6 ที่ fantastic สุด ๆ 555



ภาพบรรยากาศที่ Subway ในช่วงเช้า

รายงาน	โครงการนักศึกษาภาคฤดูร้อนของหอสังเกตการณ์นิวทริโนไอซ์คิวบ์ ประจำปี 2568
ชื่อ-สกุล	ธรรมรัตน์ ยาวิศิษฏ์
ช่วงเวลา	วันที่ 31 พฤษภาคม - วันที่ 1 สิงหาคม 2568



Yuya พาผมมาทาน Steak ที่ Great Dane Pub & Brewing



ร้าน McDonald ในช่วงค่ำ ๆ ซึ่งมีเมนูส่วนใหญ่มากกว่าของสาขาที่ไทยเป็นจำนวนมาก

Day 43: July 12, 2025 (Saturday)

วันนี้วันเสาร์ ผมอยากนอนพัก จึงตื่นสายเล็กน้อย และไปทาน Mala Noodles ที่ Ruyi Hand Pulled Noodle ซึ่งก็เป็นอีก 1 ร้านประจำที่ผมต้องแวะเวียนมาสัปดาห์ละครั้ง หลังจากเสร็จ เนื่องจากเสื้อ UW Badgers มันได้ตราตึงในใจผมมาพักใหญ่แล้ว ผมจึงตัดสินเดินเข้าไปยัง Book Stores เพื่อเลือกซื้อมาลองใส่สักตัว ซึ่งก็จบที่สีแดงซึ่งเป็น Signature จากนั้นจึงได้ไปนั่งทำงานต่อเล็กน้อยที่ Terrace โดยเนื่องจาก Yuya บอกว่าผมทำงานติดต่อกันมา 40 กว่าวันติดแบบไม่มีพัก สุดสัปดาห์นี้เขาจึงอยากให้ผมพักผ่อนแบบจริง ๆ จัง ๆ สักที (ซึ่งจริง ๆ ผมก็พัก + ทำงานตลอดอยู่แล้ว เพียงแต่อาจจะชอบทำงานกว่าปกติเพราะสนุก 5555) ผมจึงเปิดโค้ดมา testing พอเป็นพิธี และไม่ได้แก้อะไรเพิ่ม เพราะเดี๋ยวจะปรับตามโจทย์ที่ Yuya ให้ไอเดียมา จากนั้นช่วงเย็น ๆ จึงได้ไปออกกำลังกายที่ Gym เสร็จจากนั้นจึงกลับห้องมา เพราะวันนี้ plan ไว้ว่าจะนำผ้าไปซักและมานั่งเขียน Diary ก่อนนอน



ภาพที่ Nicholas Recreation Center พร้อมกับเสื้อ Wisconsin Badgers (เห่อสุด ๆ)

Day 44: July 13, 2025 (Sunday)

เนื่องจากวันนี้ช่วงเช้าผมมีนัดประชุมกับทางภาควิชาที่ลาดกระบังในช่วงเช้า และเสร็จช่วงประมาณ 11 โมง จึงได้ออกมาทานอาหารเช้า + เที่ยง ที่ร้านโปรด Taste of Sichuan โดยวันนี้ผมไม่ได้ Mala Soup ตามปกติ แต่ลองเปลี่ยนบรรยากาศลองทาน Spicy Sichuan Chicken และ Gyoza แทน ซึ่งก็คือเมนูข้าวผัดไก่เสฉวนผัดซอสเซิร์ฟพร้อมเปาะเปี๊ยะ และเกี๊ยวซ่า ซึ่งก็อร่อยมาก ๆ เกินจะบรรยาย (ไม่รู้เป็นเพราะอาจจะไม่ค่อยได้กินเมนูข้าวไหม 5555) แต่ปกติผมจะต้องทานข้าวอย่างน้อย 1 มื้อ ในแต่ละวัน และตั้งแต่มาอยู่ที่สหรัฐก็ไม่ได้ค่อยได้ทานอาหารที่เป็นเมนูข้าวบ่อยเท่าไหร่นัก วันนี้จึง Good Taste แต่เช้า 5555 และทางร้านก็ให้ผมเยอะมาก ๆ เสร็จจากนั้น ผมได้ไปทานชานมไข่มุกต่อที่ Kang Fu Tea บริเวณใกล้ ๆ the Square และนั่งแก้โค้ดเล็กในน้อยร้าน ก่อนประมาณช่วง 16.00 จะไปออกกำลังกายที่ Gym และไปทานไอติมเป็น Dinner ที่ Terrace และกลับห้องมาช่วงค่ำเพื่อเตรียมตัวสำหรับทำงานในสัปดาห์ที่ 7 ต่อไป...



ข้าวผัด Spicy Sichuan Chicken พร้อมเกี๊ยวซ่า

Day 45: July 14, 2025 (Monday)

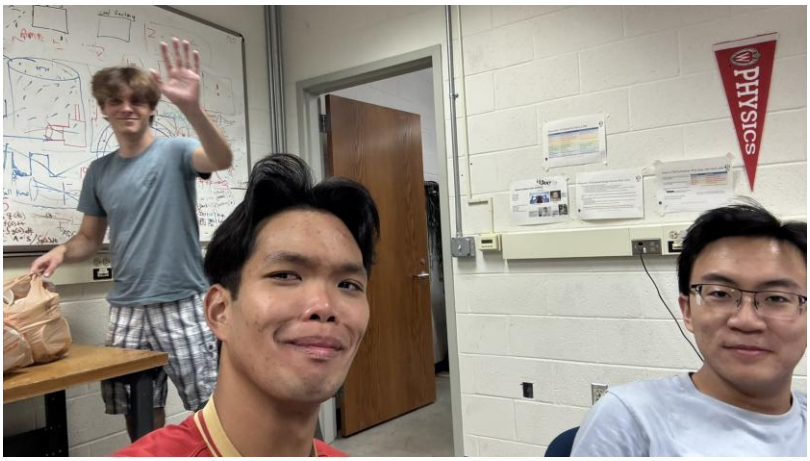
วันนี้ผมตื่นแต่เช้ามาทาน Breakfast ที่ 4 Lakes Market เช่นเดิม จากนั้นช่วงสาย ๆ ได้เดินเข้าไปทำงานที่ Chamberlin Hall โดยแผนงานวันนี้คือจะปรับปรุง 2 สิ่งหลัก ๆ

- การ Curved Fitting ของ Correlation of Charge Ratio between Ch1 vs Ch2 ของ PMT-02, LOM-16-06
- Symmetry of Event Coincidence Matrices ซึ่งมี Coincidence Rate ที่ไม่ปกติเท่าไหร่นัก (plotting ที่ออกมานั้นปราศจากสมมาตร)

โดยเริ่มต้นจากการแก้ Curved Fitting ก่อน ซึ่งเมื่อผมพิจารณาดี ๆ แล้วจึงพบว่า “งานใหญ่” เหมือนกัน เนื่องจากต้องอาศัยการคำนวณ Model ทางคณิตศาสตร์ของ PMT แต่ละตัวเข้าไปเพิ่มด้วย จึงได้ออกแบบการ Plot เป็น 2 รูปแบบ เพื่อดูว่าแบบใดจะเวิร์คกว่ากัน ซึ่งคำตอบก็แสนง่าย... คือ คำนวณดี ๆ เถอะ 555

หลังจากนั้นผมได้รายงานไปที่ Yuya ว่ากำลังติดปัญหาเล็กน้อยเรื่องการแก้ Plotting และต้องการบรีฟเพิ่ม ทาง Yuya จึงได้เสนอว่าเดี๋ยวพรุ่งนี้จะพาผมไปทำ Pre-Combining of LOM-16-09 ที่ PSL อยู่แล้ว งั้นเสร็จจาก PSL เดี๋ยวค่อยมา discuss กันต่อที่ Chamberlin ก็ได้ ผมเลยตอบรับตามนั้นไป

ในช่วงเย็น หลังเสร็จงาน Jay ได้ชวนผมไปเดินซื้อของที่ West Town Mall ผมซึ่งกำลังงานติดพันอยู่พอดี แต่ก็กำลังอยากไปช็อป จึงไม่รอช้า รีบหอบคอมขึ้นบัส และไปที่ West Town Mall (ใช่ครับ นั่งแก้งานบนรถ + ไปถึงแล้วก็ยังแก้อยู่ พร้อมซื้อของไปด้วย --- ทำได้ไงก็ไม่รู้ 5555) แต่ในท้ายที่สุด งานก็เสร็จเตรียมพร้อมสำหรับ Discussion ในวันพรุ่งนี้ และได้ซื้อของ รวมถึงได้ทดลองทานร้านอาหารจีน China Experiences ซึ่งอร่อยถูกปากผมมาก ๆ แถมราคาย่อมเยาอีกด้วย จึงบอก Jay ว่าก่อนกลับ เดี๋ยวจะมาอีก 555 จากนั้น พวกเราก็นั่ง Bus กลับมาลงที่ Nicholas Center เพื่อออกกำลังกายในช่วงเย็นต่อไป



ภาพของผม Jay และ Finn ในห้องทำงานที่ IceCube Lab

รายงาน	โครงการนักศึกษาภาคฤดูร้อนของหอสังเกตการณ์นิวทริโนไอซ์คิวบ์ ประจำปี 2568
ชื่อ-สกุล	ธรรมรัตน์ ยาวิศิษฏ์
ช่วงเวลา	วันที่ 31 พฤษภาคม - วันที่ 1 สิงหาคม 2568



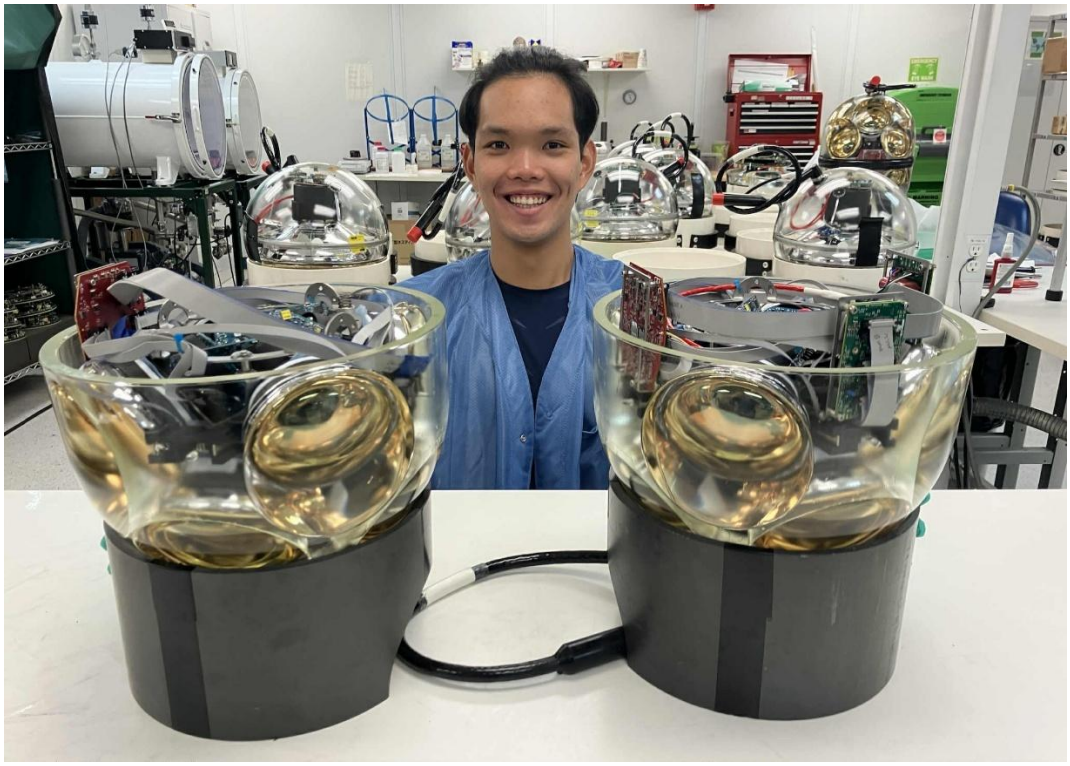




ภาพของ JC Penney และ China Experience ที่ West Town Mall และผมกับ Jay ที่กำลังเดินอยู่

Day 46: July 15, 2025 (Tuesday)

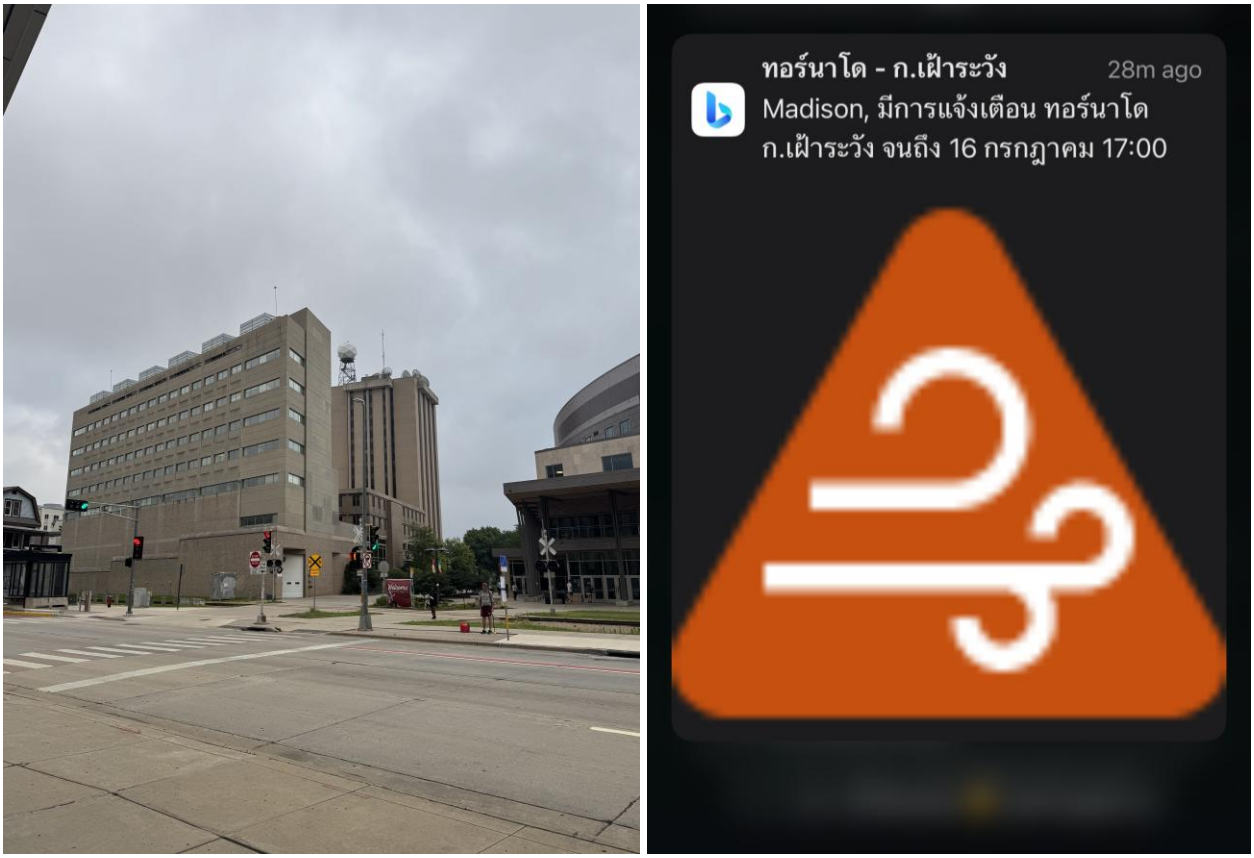
วันนี้ตื่นแต่เช้ามาทาน Breakfast ที่ 4 Lakes เช่นเดิม และ Yuya มารับผมตอนประมาณ 09.30 น. เพื่อไป PSL แพลนวันนี้คือการเก็บรายละเอียดก่อนที่เราจะทำ Combining 2 Hemispheres เข้าด้วยกันใน Week หน้า เพราะฉะนั้นวันนี้คือการนำ LOM-16-09 ในแต่ละ Hemisphere ออกมาจาก Vacuum Cooler และทำการจัดระเบียบ wire ต่าง ๆ โดยใช้เวลาไม่นาน ถึงแค่ประมาณ 12.00 น. ทุกอย่างก็เสร็จสิ้น และ Yuya พาผมขับรถไปทาน Taco ที่ Los Perez Supermarket แต่เนื่องจากผมแน่น ๆ อยู่ จึงได้เดิน survey เพียงอย่างเดียว (และใด ๆ คือเกรงใจ Yuya ด้วย เพราะเขาพาผมไปเลี้ยงบ่อยมาก ๆ) เสร็จจากนั้นพวกเรากลับมา discuss กันต่อที่ Chamberlin โดย Yuya ได้เสนอวิธีการปรับปรุง Curved Fitting ให้ผมด้วยการแบ่ง Partition ของ Charge ใน Ch1 โดยใช้ Piecewise Linear Regression เพื่อทำ Sub-Fitting ของ Charge ในแต่ละช่วง แล้วค่อยเชื่อมแต่ละ Part เข้าด้วยกัน วิธีนี้จะช่วยให้เราได้ Curved ที่มี Precision สูงขึ้น รวมถึงทำให้ Range ของ Correlation Equation สามารถกำหนดได้ง่ายขึ้นอีกด้วย จากนั้นผมได้ discuss กับ Yuya ต่อในเรื่องของการแก้ Symmetry ของ Coincidence Matrices รวมถึงรับบรีฟเพิ่มเกี่ยวกับการทดลองกำหนด Charge ใน Channel 2 มาใช้เพื่อแสดง Bright Event รวมถึงการ plot เพื่อแสดง trends ระหว่าง Coincidence Rate (Hz) – Threshold (PE) ของแต่ละ PMT Pairs ซึ่งหลังจากรับบรีฟเสร็จ ก็เริ่มวาง Plan ไว้ว่าทุกอย่างน่าจะเสร็จก่อนวันศุกร์นี้ โดยหลังจบงานวันนี้ ผมก็ไปออกกำลังกายที่ Gym เช่นเดิม



ภาพผมและ LOM-16-09 ที่เตรียมพร้อมสำหรับการทำ Hemisphere Integration (ถ่ายโดย Yuya Makino)

Day 47: July 16, 2025 (Wednesday)

วันนี้ฝนตกหนักแต่เช้า ผมตื่นไปทาน Breakfast ที่ 4 Lakes เช่นเดิม โดยมี Tornado Watch แต่เนื่องจากผมออกมาจากห้องแล้ว จึงเดินทางไปนั่งทำงานที่ Discovery แทน และนั่งแก้ 2 Brief แรกตามที่ได้รับมาจาก Yuya ซึ่งเนื่องจากฝนตกหนักตลอดทั้งวัน ผมจึงไม่ได้ไปไหนเลย และนั่งทำงานอยู่ที่ Discovery ตั้งแต่ประมาณ 11.00 – 19.00 น. โดยหลังจากเสร็จงานในช่วงเย็น จึงได้นัด Jay ไปออกกำลังกายที่ Gym ตามปกติ



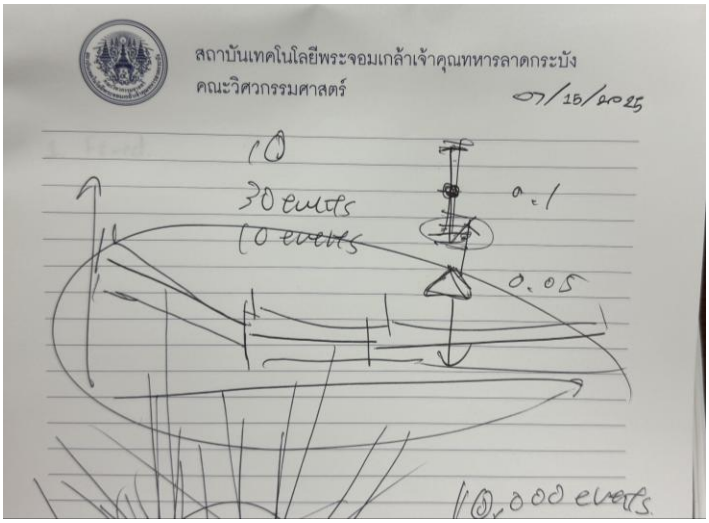
ภาพ Madison (บริเวณ South Campus) ในวันที่มี Tornado Watch (ซึ่งสุดท้ายก็รอด!)

Day 48: July 17, 2025 (Thursday)

วันนี้ช่วงบ่ายผมนัด Yuya ตรวจ Brief ที่ Chamberlin ในช่วงบ่าย โดยผมทำการปรับปรุงทั้ง Curved Fitting เสร็จสิ้น รวมถึงได้หน้าตา Coincidence Plot ที่ Symmetry ออกมา จึงได้นัด discuss กับ Yuya ก่อนที่จะเข้าสู่ brief สุดท้าย ซึ่งทุกอย่างก็เป็นไปตามที่พวกเราคาดหวังไว้ และเป็นไปในทิศทางที่ถูกต้อง พร้อมไป step ต่อไป โดย Yuya ได้อัปเดตผมเพิ่มเติมเกี่ยวกับการ Simulation ของ Prof. Nobu ที่ setting LOM-16 ใน Setting เดียวกับที่ Chamberlin จากนั้นได้ทำงานวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของแต่ละ PMT Pairs ที่เปลี่ยนแปลงไปตาม Event Coincidence Rate (Hz) และ Charge Threshold (PE) โดย Yuya ได้ให้ข้อมูลต่าง ๆ ที่จำเป็น รวมถึงหน้า Plot ที่ Prof. Nobu วิเคราะห์จากข้อมูลใน Simulation

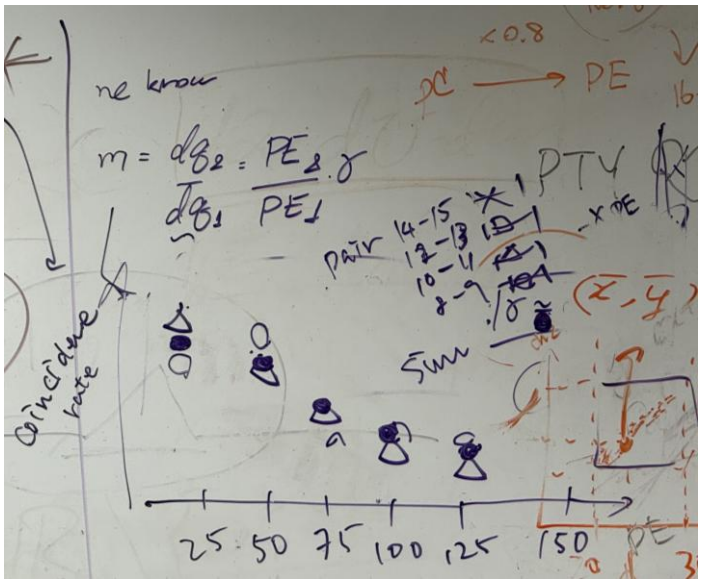
ผมใช้เวลาไม่ถึง 1 ชั่วโมงในการ improve code จากที่มีอยู่เดิม โดยสมมติฐานที่ของพวกเราคือ เราต้องการเห็น Trends ที่มีลักษณะ curved นั้นสอดคล้องกัน หรือกล่าวคือเราอยากเห็น curve ของ Polar PMT Pairs มีคุณลักษณะที่ตอบสนองต่อ parameter ที่เปลี่ยนไปคล้ายกันมากที่ (ใด ๆ คือถ้ามันกลายเป็นเส้นเดียวกันจะเป็นสิ่งอัศจรรย์มาก ๆ เพราะนั่นหมายความ คู่ PMT ใน Polar Section สามารถตอบสนองต่อ Event Coincidence ได้อย่างมีประสิทธิภาพ) พูดง่าย ๆ อีกคือ การตรวจวัดมี Reliability ที่สูง เพราะผลลัพธ์ที่ออกมา มีทั้งความเที่ยงตรงและแม่นยำนั่นเองครับ

และผลลัพธ์ที่ออกมาจาก Plotting ของผม ทำให้พวกเราทึ่งมาก ๆ เพราะมันเป็นไปตามสมมติฐานที่ผมและ Yuya ได้ตั้งเอาไว้ (ซึ่งจะกล่าวโดยละเอียดในเนื้อหาส่วนวิชาการ) โดยผมได้ plot ของ Equatorial PMT Pairs อีก 4 คู่ทันทีเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง และรีบอัปเดตไปให้ Yuya จากนั้นหลังเสร็จงานในช่วงเย็น ผมได้ไปออกกำลังกายที่ Gym พร้อมกับ Jay เช่นเดิม

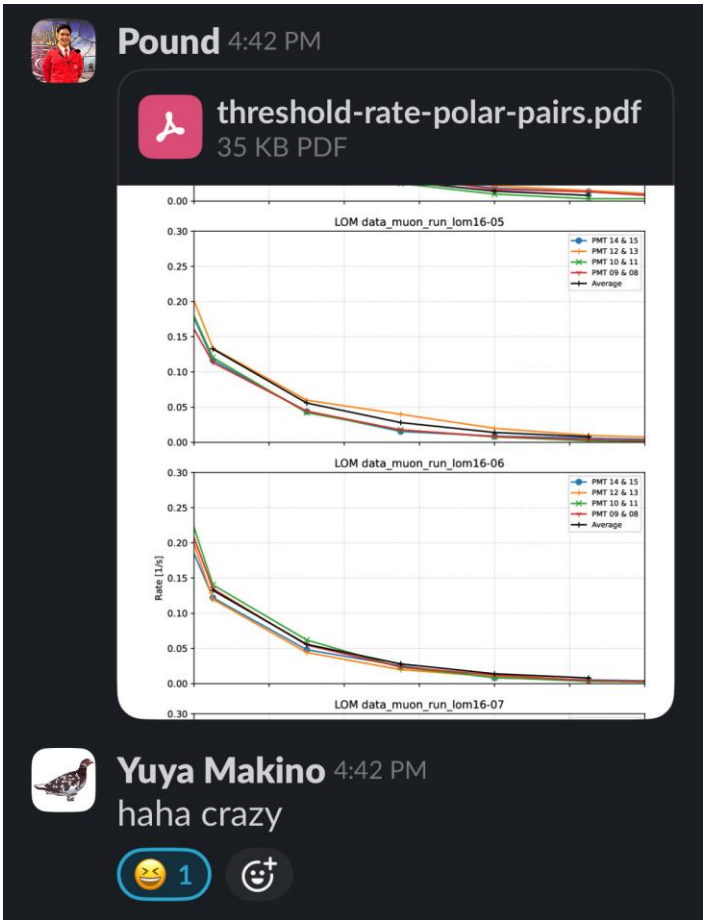


สมมติฐานที่ผมเคยคาดการณ์ไว้ตั้งแต่เมื่อครั้งเริ่มต้นวิเคราะห์กับ Yuya แรก ๆ

รายงาน	โครงการนักศึกษาภาคฤดูร้อนของหอสังเกตการณ์นิวทริโนไอซ์คิวบ์ ประจำปี 2568
ชื่อ-สกุล	ธรรมรัตน์ ยาวิศิษฏ์
ช่วงเวลา	วันที่ 31 พฤษภาคม - วันที่ 1 สิงหาคม 2568



แนวโน้มของข้อมูลที่ Yuya ได้วิเคราะห์เอาไว้



ผลลัพธ์สุดท้ายที่ได้จากการ plot ข้อมูลจริงออกมา

Day 49: July 18, 2025 (Friday)

วันนี้ผมเข้าไปจัดการงานที่ Chamberlin โดยมี Plan ว่าจะเข้าไป design template ของ Final-Presentation ที่จะใช้ในวันจันทร์ที่ 28 กรกฎาคม โดย Idea คือ recap งานที่ผมทำร่วมกับ Yuya, Chris และ LOM-Team ตลอดหลายสัปดาห์ที่ผ่านมา กับหัวข้อวิจัย “Design and Validation of a Cosmic Muon-Based Testing Method for IceCube-Gen2 Optical Modules” รวมถึง Assembly of LOM-16-09 แน่นอนว่ารวมถึงการ Improving การศึกษาและการวิเคราะห์ข้อมูลของผมใน Software & Data Analysis Part ให้มีความถูกต้องและตรวจสอบที่มาที่ไปได้ด้วย โดยหลังจากเสร็จงานในช่วงเย็นได้ไปออกกำลังกายที่ Nicholas Center เช่นเดิม พร้อมกับมานั่งทานอาหารเย็น และนั่ง Recap งานต่อที่ Terrace ในชวงประมาณ 19.00 – 23.00 น.



ภาพบริเวณด้านหน้าหอพักของผม (Vel Phillips Residence Hall)

Day 50: July 19, 2025 (Saturday)

วันนี้ผมตื่นสายเล็กน้อยเพราะต้องการพักจากอาการล้า (เนื่องจากโหมงานหนักมาหลายวัน 555) เลยไปทานอาหารเช้าที่ Ruyi Chinese's Noodle บริเวณ Main Street ในช่วงสาย ๆ จากนั้นได้กลับมาซื้อกาแฟและนั่งทำงานต่อที่ Peet's Café, Terrace โดยวันนี้ผมได้ทำ Recap และ Draft ของ Report + Presentation เสร็จสิ้น และตั้งใจว่าจะนำ Draft นี้ไปปรึกษา Yuya เพิ่มเติมในวันจันทร์ก่อนเริ่มทำ เพราะจากมุมมองของพวกเรา งานนี้ยังไปต่อได้อีก 5555 หลังจากนั้นในช่วงเย็น ๆ ประมาณ 16.00 น. ผมก็ได้เดินทางไปซื้อกาแฟ (แก้วที่ 2) และไปออกกำลังกายที่ Nicholas Center จนถึงประมาณ 19.00 น. ได้กลับห้องมาอาบน้ำ และเปลี่ยนชุด เนื่องจากวันนี้มีคอนเสิร์ต Coldplay Tour ที่ Camp Randall (ซึ่ง Official Ticket หมดตั้งแต่ตุลาคมปีที่แล้ว 5555) ผมจึงตั้งใจว่าเดี๋ยวจะไปยืนดูบรรยากาศอยู่ข้าง ๆ Stadium ซึ่งก็ไม่ผิดหวังจริง ๆ เพราะได้เก็บภาพบรรยากาศต่าง ๆ รวมถึงไปทันจังหวะที่ทางวงกำลัง shown Iconic Song อย่าง Viva la Vida, A sky full of stars, Yellow รวมถึง Fixed You และ Performance และเสียงก็ชัดเจนมาก ๆ 5555 ผมจึง enjoy เต็มที่ และหลังจากวงเล่นเสร็จประมาณ 22.00 ผมได้เดินไปหาอาหารทานที่ South Campus เล็กน้อยก่อนกลับห้อง





ภาพบรรยากาศภายใน Madison และ Camp Randall ที่มีผู้คนจำนวนมาก (มารอชม Coldplay Tour)

Day 51: July 20, 2025 (Sunday)

วันนี้ก็คล้าย ๆ เดิม คือผมตื่นสายเล็กน้อย แต่ตื่นมาด้วยความรู้สึกประหลาด ๆ นิด ๆ คืออยากทาน Shabu มาก ๆ และเมื่อเดือนก่อนทางอาจารย์วราภรณ์ได้พาผมไปเลี้ยง Hot Pot ที่ Number 10 Hot Pot วันนี้ผมจึงตั้งปณิธานอันแรงกล้า สะพายกระเป๋าพร้อมสวมร้องเท้าอย่างมุ่งมั่น ว่าจะเดินเท้าข้าม Downtown รวมระยะทางกว่า 3 km (ไม่ค่อยไกลเท่าไหร่นัก...) ไปทาน Shabu ที่ร้านนี้ ซึ่งก็ใช้เวลาไม่นานนักก็ไปถึง ใด ๆ คือ คิดถึงเมืองในฝั่ง East Side ด้วยเพราะมันสวยมาก ๆ ติด Lake Monona และหลังจากถึงก็สั่งทานเองตาม Step และได้เจอพนักงานที่เป็นนักศึกษาจีนที่เรียนด้าน Chemistry อยู่ที่นี่ เขาทักผมเพราะผมดูเหมือน Southeast Asian (เขาเดาว่าไม่ Vietnamese ก็ Thai – ซึ่งใช่... เขาเดาถูก 555) หลังจากทานเสร็จ ผมได้ทดลองมาซื้อกาแฟทานที่ Café ร้านใหม่ อยู่หลัง Capital State และไปนั่งทำงานอยู่ที่ Terrace เช่นเดิม หลังจากนั้นไม่นานก็เดินกลับมาทำ HIIT Workout ที่ Nicholas Center (ด้วยความเคารพ ผมว่าผมใช้ทุกบาททุกสตางค์ที่จ่ายค่า Gym ไปคุ้มมาก ๆ เพราะผมมาทุกวัน และใช้เวลาแต่ละวันที่ Gym 1-2 ชั่วโมงหลังเสร็จงานในแต่ละวัน ซึ่งผมว่านี่แหละคือเคล็ดลับที่ช่วยให้ผมสามารถมาทำงานติดต่อกันได้เป็นระยะเวลานานมากกว่ามนุษย์ปกติ 555) จากนั้นจึงได้กลับมาทำงานต่อที่ Terrace ถึงประมาณ 22.00 ก็เดินกลับห้องเพื่อพักเตรียมทำงานในวันรุ่งขึ้น



Number 10 Hot Pot / East Side / State Capitol และ Café (ลืมชื่อ 5555)

Day 52: July 21, 2025 (Monday)

วันนี้ผมตื่นเช้าไปทาน Sandwich ที่ Subway เพราะนัด Yuya คุยงานตอนประมาณ 14.00 น. โดย Key Topic วันนี้คือการวางหมุดหมายปลายทางของตลอดช่วงที่ผ่านมา และได้ข้อสรุปดังนี้

1. ปิดจ๊อบ LOM-16-09 ให้สมบูรณ์ก่อนกลับ

    - ในช่วง 1-2 วันนี้ จะเริ่มเข้าสู่ขั้นตอนการ Combining ของ LOM-16-09 ซึ่งเป็นโมดูลตัวสุดท้ายของ LOM-16 Series ที่กำลังจะส่งไป South Pole ภายในปีนี้ และเนื่องจาก Yuya ได้ให้ผมมีส่วนร่วมในงานของ LOM-16-09 มาตั้งแต่ช่วงต้นที่ผมมาถึง Madison เพราะฉะนั้นผมจึงตั้งใจว่าจะช่วยปิดจ๊อบให้สมบูรณ์ก่อนกลับ เพื่อให้งานชุด LOM-16 ทั้ง 6 ตัวที่ผมร่วมทำด้วยเสร็จสมบูรณ์ในรุ่นแรกของโลกจริง ๆ

2. ตรวจสอบความถูกต้องของ Muon Coincidence Rate และคำนวณ Error อย่างละเอียด

    หลังจากที่ผมได้ Plot กราฟ Muon Event Coincidence Rate (Hz) เทียบกับ High Charge Threshold (PE) ของ LOM-16 ทั้ง 6 ตัว (ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม Polar Pair: North และ South Hemisphere) และส่งไปอัปเดต Yuya เมื่อสัปดาห์ที่ผ่านมา ปรากฏว่าผลลัพธ์ออกมาสวยและ “ideal” เกินคาด Yuya จึงแนะนำให้ผมวิเคราะห์ในเชิงลึกเพิ่มเติม เพื่อ make sure ว่าทุกอย่างถูกต้องจริง โดยมีการบ้านมา 3 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่

    - คำนวณ Error Range ของแต่ละ Data Point เพื่อใส่ Error Bars ที่แม่นยำบนกราฟ
    - คำนวณผลกระทบจาก Dead Time ของระบบ ซึ่งเกิดจากช่วงเวลาที่ PMT บันทึกข้อมูลไม่ได้ ต้องนำค่าดังกล่าวมาหักลบจาก Dilation Time เพื่อให้ได้ Event Rate ที่แท้จริง
    - ทำ Histogram โดย Plot ค่าของ Nevents (จำนวนเหตุการณ์) เทียบกับ Log10(Time Interval) เพื่อดู distribution ของเวลาที่ Muon เข้ามากระทบในแต่ละช่วง ซึ่งทั้งหมดนี้จะช่วยให้กราฟของผมมีความถูกต้องในระดับที่สามารถอ้างอิงในระดับวิชาการได้อย่างถูกต้องยิ่งขึ้น

3. การเป็นส่วนหนึ่งของโมดูล LOM-16 ชุดแรกของโลกที่จะไปประจำการที่ South Pole จริง ๆ โดย LOM-16 ทั้ง 6 ตัวที่ผมมีส่วนร่วมในการวิเคราะห์ ได้แก่ LOM-16-01, 02, 05, 06, 07 และ 08

    - ได้รับการยืนยันแล้วว่าจะเป็นชุดแรกของ LOM-16 ที่จะถูกส่งไปปฏิบัติการจริงที่ Amundsen–Scott South Pole Station ภายในสิ้นปีนี้ โดยจะเริ่มขนส่งทางเรือในเดือนหน้า และ Yuya เองก็จะเป็นหนึ่งในคณะผู้เดินทางไป Deploy ด้วยตัวเอง
    - การได้ทำงานร่วมกับโมดูลเหล่านี้ทุกวัน พิถีพิถันกับมันเหมือนดูแลลูกของตัวเอง และพอรู้ว่าพวกมันจะถูกฝังลึกลงไปใต้ชั้นน้ำแข็งเพื่อร่วมปฏิบัติภารกิจของมนุษยชาติในการไขปริศนาจักรวาล มันทำให้ผมทั้ง

ทึ่ง ภูมิใจ และเศร้าเล็ก ๆ ไปพร้อมกัน เพราะทุกตัวที่ผมร่วมทดสอบด้วยเหมือนมีชีวิต และกลายเป็น “เพื่อน” ของผมไปแล้วอย่างไม่รู้ตัว

4. เตรียมตัว Final Presentation ที่ใหญ่และอลังการที่สุดในชีวิต

สำหรับ Final Presentation ในวันจันทร์ที่จะถึงนี้ Yuya ได้ช่วยให้แนวทางหัวข้อและ Framework ที่ครอบคลุมมาก ๆ โดยหัวข้อของผมคือ

“Design and Validation of a Cosmic Muon-Based Testing Method for IceCube-Gen2 Optical Module”

ซึ่งจะประกอบด้วยสาระสำคัญระดับ “จักรวาล” ดังนี้

- ภาพรวมของ IceCube Gen2 และวิวัฒนาการจาก IceCube Upgrade
- โครงสร้างแกนลึก (Deep Core) ของ LOM-16
- พฤติกรรมการตอบสนองของ PMT แต่ละตัวแบบละเอียด (micro-based PMT behavior)
- การออกแบบและ integration ทั้ง Hardware, Electronics, FPGA, Signal Processing และ Data Acquisition
- การพัฒนา Python Script และการประมวลผลด้วยเครื่องมืออย่าง ROOT, Jupyter, รวมถึงการใช้ Cobalt Computing Environment
- การคำนวณทางคณิตศาสตร์ เช่น Coincidence Rate, Charge Threshold Scaling, และ Error Modeling
- การเชื่อมโยงข้อมูลเชิงทฤษฎีด้าน QED และ Interaction กับผลลัพธ์จาก Cosmic Rays Muon

ทั้งหมดนี้ไม่ใช่แค่การ “พรีเซนต์โปรเจกต์” แต่เป็นการ ถ่ายทอดประสบการณ์ของการร่วมสร้างประวัติศาสตร์ ผ่านมุมมองของนักศึกษาวิศวกรรมที่พยายามเข้าใจและเชื่อมโลกของวิศวกรรมเข้ากับจักรวาลของฟิสิกส์ระดับสูง เพื่อส่งต่อความเข้าใจนี้ไปยังคนอื่น ๆ ที่อาจเดินตามเส้นทางเดียวกันในอนาคต

หลังจากเสร็จงานผมได้เดินทางไปออกกำลังกายในช่วงเย็นที่ Nicholas Center เช่นเดิม และเดินทางมานั่งเขียน Daily Report ฉบับนี้ที่ Terrace ตามกิจวัตรประจำวัน พร้อมกับนั่งทาน Ice-Cream จาก Daily Scoop



ภาพการ Meeting ระหว่างผมและ Yuya ใน Discussion วันนี้

Day 53: July 22, 2025 (Tuesday)

วันนี้ผมตื่นแต่เช้ามาทาน Breakfast ที่ 4 Lakes เช่นเดิม และที่พิเศษหน่อยคือช่วงเช้าจะต้องไปฟัง Lecture ที่ WIPAC เกี่ยวกับงาน Drilling ของ “BigRAID: Drilling on the Greenland glacier” โดย Jason Chan ซึ่งจะเล่าเกี่ยวกับการขุดเจาะน้ำแข็งที่ North Pole ของ BigRAID Project ซึ่งค่อนข้างจะลึกและ insight มากเนื่องจากใช้ utilities ในสาย instrumentation engineering ค่อนข้างเยอะ ซึ่งหลังจบ talk ผมก็ได้มีโอกาสไป discuss กับ Jason และ team ในหลาย ๆ topic หลังจากเสร็จ Talk จึงได้กลับมาทำงานต่อที่ Chamberlin ต่อจนถึงช่วงเย็น และเดินทางไปออกกำลังกายที่ Nicholas Center เช่นเดิม





ภาพ Talk Session ของ Jason Chan เกี่ยวกับ BIGRAID ณ Green Land

Day 54: July 23, 2025 (Wednesday)

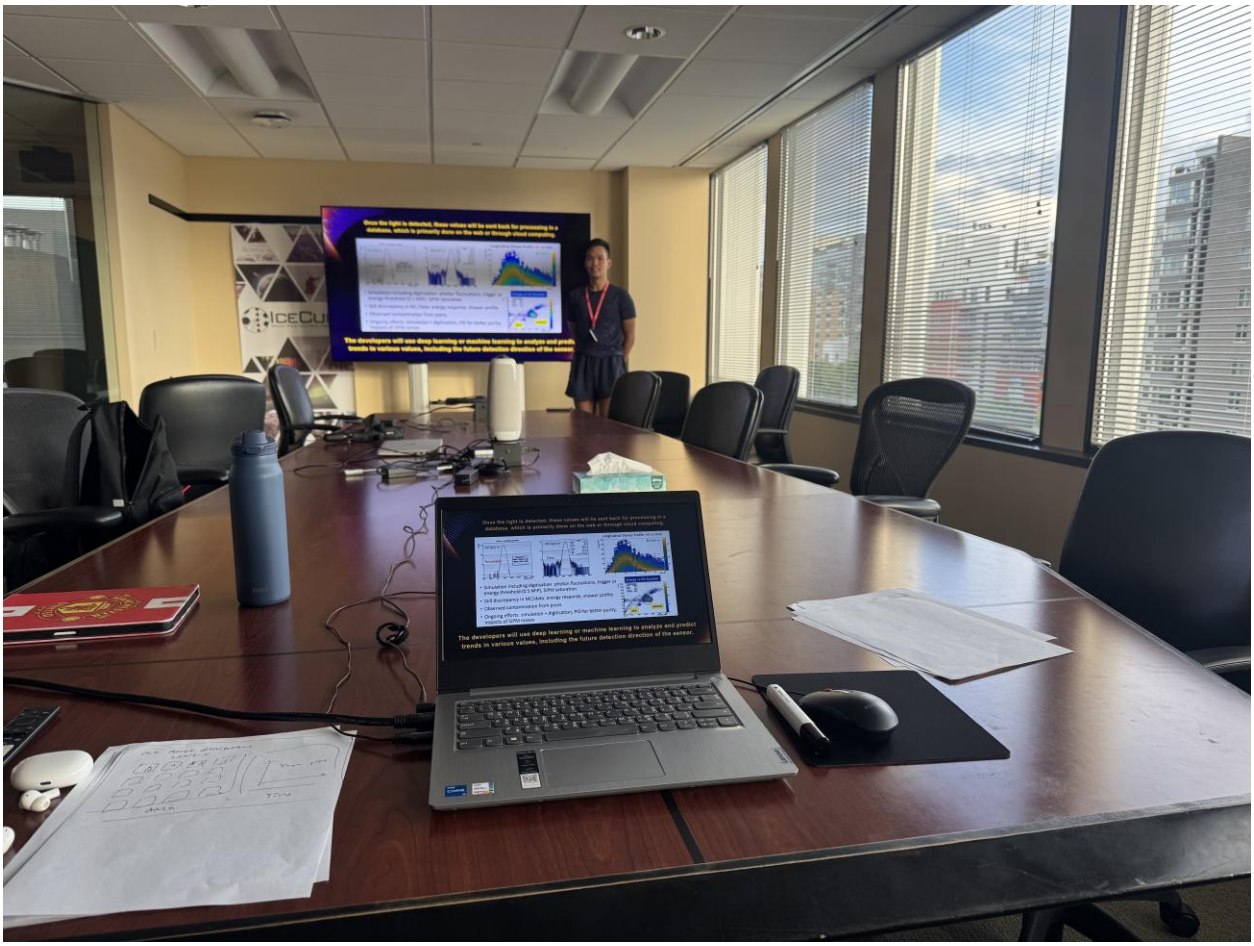
วันนี้ผมตื่นแต่เช้ามาทาน Breakfast ที่ 4 Lakes เช่นเดิม และที่พิเศษอีกแล้ว คือ วันนี้จะเป็นวันที่ผมและ Yuya จะทำ combination LOM-16 ทั้ง 2 hemisphere เสร็จสิ้น ที่ PSL ก่อนที่จะนำมา testing ที่ Chamberlin Hall กล่าวโดยง่ายก็คือ เราจะประกอบ LOM-16-09 ตัวสุดท้ายเสร็จสิ้นแล้ว ซึ่งกำหนดการก็เช้ามาก ๆ คือ start ตอน 08.30 น. โดยจะมี Brian และ Andy มาช่วยพวกเรา การประกอบใช้เวลาประมาณ 3 ชั่วโมงนิด ๆ เริ่มจาก cleaning และเริ่มทำการ assembly ผ่าน site machine ของ sub-assembly จากนั้นก็ประกอบทั้ง 2 hemisphere เข้าด้วยกัน และทำการ Pressure testing ก็เป็นอันเสร็จสมบูรณ์ และเนื่องจากทางทีมทำกันมาถึง 9 ชุดก่อนหน้านี้แล้ว สำหรับ module สุดท้ายนี้จึงใช้เวลาไม่นานมากเท่าไหร่นัก หลังจากเสร็จการ assembly ในวันนี้ เราก็ได้นำ 09 กลับมา testing ที่ Chamberlin และช่วงบ่ายผมก็ได้ discuss งานกับ Yuya ต่อในช่วงสุดท้าย ซึ่งความโชคดี คือ เราสามารถตัด part Deadtime Correction Analysis ออกไปได้ เพราะ Muon Signal Pulse มีลักษณะปกติ และสามารถวิเคราะห์ได้ตามเดิมนั่นเอง และเริ่มตั้งแต่วันพรุ่งนี้ Yuya ได้นัดผมไปทำการซ้อม presentation และทำ slide ที่ WIPAC จนถึงวันฟรีเซนต์ เพื่อเตรียมความพร้อมให้มากที่สุด หลังจากเสร็จงานในช่วงเย็น ผมก็ได้ไปออกกำลังกายที่ Nicholas Center ตามปกติพร้อมกับ Jay



หลังจากทำ Hemisphere Combining LOM-16-09 ตัวสุดท้ายเสร็จสิ้น

Day 55: July 24, 2025 (Thursday)

วันนี้ผมนัด Yuya ไว้เวลา 14.00 ที่ Black Holes เพื่อที่จะ validate งานของผมในขั้นตอนสุดท้าย และเริ่มรัน slide กัน โดยวันนี้ผมได้แวะซื้อ sandwich ที่ Subway เพื่อมาทานเป็น breakfast ควบคู่กับ black coffee ที่ Aldo's Café จากนั้นได้เดินไปยัง WIPAC ต่อ เนื่องจากผมได้จัดทำ draft ของงานตลอดเวลาที่ผ่านมาไว้ จึงทำให้การจัดเตรียมสไลด์เป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ควบคู่กับการที่ Yuya คอยไกด์แนวทางในการย่อยเนื้อหาที่มีความซับซ้อนออกมาถ่ายทอดโดยง่าย จึงช่วยให้ทุก flow ไปได้ดียิ่งขึ้น หลังจากเสร็จบรีฟในช่วงเย็น Yuya ได้ให้ผมลอง plot Charge Distribution ใน Ch2 โดยใช้ PMT Gain ที่ได้จากการคำนวณ Charge Ratio อีกครั้ง และเนื่องจากผมต้องการ recheck ทุกอย่างให้เรียบร้อยก่อน final brief พรุ่งนี้อีกครั้ง จึงได้ทำงานต่อจนถึงประมาณ 23.00 น. ถึงได้ออกมาจาก WIPAC เพื่อกลับห้อง



การจัดเตรียมสไลด์และซ้อมนำเสนอที่ WIPAC

Day 56: July 25, 2025 (Friday)

วันนี้ผมนัด Yuya ไว้เวลา 14.00 เช่นเดิม แต่เนื่องจากผมเดินทางมาถึงก่อน เราจึงได้เริ่มงานกันตั้งแต่ช่วงเที่ยง วันนี้เป้าหมายของพวกเราคือจะเสร็จการ review presentation และปรับปรุงงานให้สมบูรณ์ในขั้นตอนสุดท้าย โดยเนื่องจากวันนี้ต้องการปรับปรุง plot ให้มีความสมบูรณ์ และถูกต้องอีกครั้ง พวกเราจึงใช้เวลาในการปรับโปรแกรมเล็กน้อย โดย Yuya กำกับ ส่วนผมดำเนินการตามบรีฟ และจากนั้นในช่วงประมาณ 17.00 น. เนื่องจากทำงานติดกันมาหลายชั่วโมง Yuya จึงชวนไปทานข้าวเย็น ซึ่งเนื่องจากผมติดที่จะพา Yuya ไปเลี้ยงที่ Rising Son Thai Restaurant ซึ่ง Yuya ได้ทดลองสั่ง “ต้มยำกุ้ง” และ “ราดหน้า” ซึ่งเป็นครั้งแรกของ Yuya ที่ได้ทดลองทาน และติดใจทันที 555 ส่วนผมได้สั่ง “กระเพราหมูสับ” พร้อมกับ “ราดหน้า” เช่นกัน และบางทีสำหรับ Madison “ราดหน้า” อาจจะกลายเป็น Thai Food Signature ไปแล้วก็ได้ 555 และหลังจากทานเสร็จในช่วงเย็น ผมและ Yuya ได้กลับไป brief presentation และ validate ความสมบูรณ์ของงานอีกครั้ง จนถึงประมาณ 23.00 น. ก็ได้แยกย้ายกันกลับที่พัก พร้อมกับผมยังต้องปรับปรุง Presentation อีกเล็กน้อยในช่วง weekend นี้





ผมกับ Yuya ที่กำลังพัฒนา Presentation และซ้อมนำเสนอ

ส่วนภาพล่าง ผมพา Yuya มาทานอาหารที่ร้านอาหารไทย The Rising Son

Day 57: July 26, 2025 (Saturday)

วันนี้ผมตื่นแต่เช้าไปทาน Breakfast ที่ 4 Lake เนื่องจากตั้งใจว่าหลังทานเสร็จจะไปนั่งปั่น slide ที่ Terrace ต่อ แต่ก่อนหน้านั้นในช่วงบ่าย ๆ ผมได้นัด Jay ไปเดินซื้อของเพิ่มเติมอีกเล็กน้อยที่ Trader Joe's โดยหลังจากเสร็จ Jay ได้เดินมานั่งทำงานเป็นเพื่อนผมที่ Terrace ซึ่งพวกเรานั่งทำงานกันจนถึงประมาณ 16.00 – 17.00 น. ก็ได้ไปทาน Dinner ที่ the post hotel ด้วยกัน ซึ่งวันนี้ Jay ได้พาผมมาลองทาน Ribeye Grills 400g ซึ่งผมยังไม่เคยทานมาก่อนในชีวิต และหลังจากได้ลิ้มรสคำแรก ก็รู้ได้ทันทีว่าต้องกลับมาลองอีกให้ได้ไม่ว่าอะไรจะเกิดขึ้น 555 เพราะมันอร่อย ๆ มาก ๆ และมี texture ในแบบ American's Steak จริง ๆ จากนั้นทานถึงประมาณ 21.00 น. พวกเราก็เดินทางกลับห้อง โดยระหว่างทาง Jay ได้พาผมไปแวะซื้อ McDonald อีกเล็กน้อย (ผมอยากทาน Shake !!!) จากนั้นก็ได้แยกย้ายกันกลับห้อง





Trader Joe's ในภาพบน และ ผม กับ Jay ที่มาทาน Steak ด้วยกันใน DInner

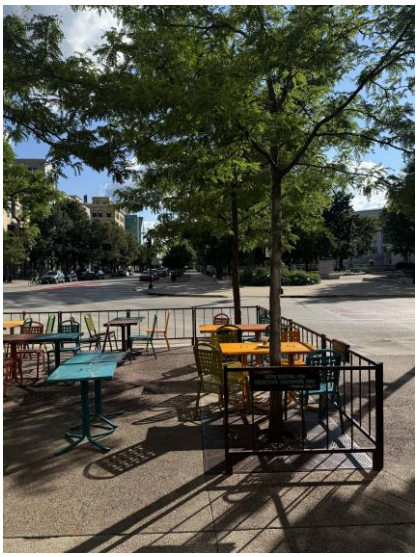
Day 58: July 27, 2025 (Sunday)

วันนี้ผมตื่นแต่เช้า เอ่อ... ก็ไม่เช้าเท่าไหร่หรอกครับ hahaha ไปทาน Mala Soup ที่ Ruyi Noodles จากนั้นก็ได้เดินไปลองกาแฟที่ Colectivo Café บริเวณหลัง State Street ซึ่งใช้ medium-light blend อร่อยมาก texture นุ่มสุด ๆ (จนเสียดายว่า อยู่มาตั้งนาน...ทำไมเพิ่งมาลอง.....? 55555) จากนั้นก็เริ่มทำการปรับปรุง slide ตั้งแต่ประมาณ 13.00 ถึงประมาณ 17.00 โดยในที่สุดผมก็ได้เปลี่ยนใจจาก White tone ไปเป็น Black tone แทน เนื่องจากมองว่าง่ายต่อการอ่านของ audience มากกว่า หลังจากเสร็จการปรับปรุง presentation และมั่นใจว่าสมบูรณ์แล้ว ผมได้ส่ง draft ไปให้ Yuya ช่วยตรวจสอบอีกครั้ง และเดินทางไปออกกำลังกายช่วงเย็นที่ Nicholas Center เช่นเดิม จากนั้นเมื่อเสร็จในช่วงเย็นได้ไปทาน dinner ที่ Terrace ตามปกติ









Colectivo Café บริเวณหลัง State Capitol

Day 59: July 28, 2025 (Monday)

วันนี้เป็นวัน Final Presentation โดยผมได้นัด Yuya ไปเตรียมบรีฟก่อนเข้า presentation ในช่วงประมาณ 12.00 ที่ Black Holes โดยเนื่องจากพวกเราเตรียมตัว ซ้อมบรีฟ และฝึกงาน presentation มาค่อนข้างดี เลยไม่ค่อยตื่นเต้นนัก คิวของผมประมาณ 14.30 น. โดยผมใช้เวลา present ประมาณ 30 นาที และตอบคำถามอีกประมาณ 15-20 นาที โดยประมาณ ตกใจนิด ๆ เพราะเนื่องจากเป็น Group Meeting ของ WIPAC จึงทำให้มี PI, Scientist และ Grad Students มาเข้าร่วม meeting และฟังการ presentation ของผมเป็นจำนวนมาก รวมถึง Jay และ Finn ซึ่งทำให้ Dr. Karle ถึงกับต้องถามว่ามา joined meeting นี้ทำไม...? 55555 (ซึ่งพวกเขาก็บอกไปว่ามาฟังผม present) ซึ่งเนื่องจากซ้อมมาค่อนข้างดี เลยทำให้การ presentation ผ่านไปได้อย่างราบรื่น โดยหลัง present เสร็จ ก็มี audience ถามคำถามจำนวนมาก ซึ่งโชคดีที่ผมเตรียม Back Up มาค่อนข้าวเยอะจึงทำให้สามารถตอบได้ค่อนข้างครอบคลุมและสมบูรณ์มากที่สุด สิ่งหนึ่งที่รู้สึกภูมิใจคือ ผมตั้งใจกับงานนี้มากตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา และได้รับการ support อย่างดีจาก Yuya, Chris รวมถึงนักวิจัยและนักวิทยาศาสตร์ของ IceCube ทำให้งานนี้ออกมาอย่างสมบูรณ์ที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ใน 2 เดือนที่จำกัดนี้ รวมถึงได้รับคำชมจากหลาย ๆ คนว่าผม talk ได้ nice อธิบายเข้าใจง่าย เปี่ยมด้วย power และ content ค่อนข้าง useful และ practical เป็นอย่างมาก ใด ๆ ก็คือผมยินดีเป็นอย่างยิ่งที่จะส่งต่อเจตนารมณ์ที่เหลือไปกับ LOM-16 ทั้ง 6 ตัวที่กำลังจะ shipping ไป south pole ในเดือนหน้า โดยหลังจากเสร็จการ present ผมได้ discuss งานต่อกับ Chris, Yuya, Tianlu และ Albrecht อีกนิดเกี่ยวกับงาน รวมถึงได้ส่งเมลไป discuss กับ Will และ Kiara ซึ่งเป็น Grad Students จาก Harvard University ที่มาทำ project เกี่ยวกับ PDoms ที่ PSL และมันเป็น 1 ใน 4 detector ที่จะถูกส่งไป deploy ที่ pole เช่นเดียวกับ LOM-16 ของผมนั่นเอง! จากนั้นผมได้กลับห้องไปเปลี่ยนชุด และไปออกกำลังกายช่วงเย็นกับ Jay ที่ Nicholas Center ต่อตามปกติ รวมถึงไปซื้อ dinner ที่ Mooya และไปทานที่ Terrace



บรรยากาศการ Presentation ของผมที่ Supernova ท่ามกลาง Researcher และ Scientist ของ IceCube

Day 60: July 29, 2025 (Tuesday)

วันนี้ผมตื่นแต่เช้า เพราะนัด Jay ไว้ที่ the discovery เพราะจะนำ keycard ไปคืนที่ WIPAC รวมถึงนำกุญแจไปคืนที่ Chamberlin Hall และกลับมา rendering files งานต่าง ๆ ส่งให้กับ Yuya ก่อนเดินทางออกจาก Madison ในวันพรุ่งนี้ โดยหลังจากทำงานไปถึงช่วงประมาณ 17.00 ผม Chris และ Jay ได้เดินทางไป Terrace ตามคำชวนของ Albrecht เนื่องจาก ทุกคนต้องการฉลองก่อนกลับให้กับพวกเราก่อนกลับนั่นเอง โดยหลังจากเสร็จประมาณ 20.00 น. Yuya, Sean และ Jessie ได้พาผมไปทานข้าวต่อที่ Buffalo Wild Wings และ Ian’s Pizza จากนั้นประมาณ 23.00 ผมได้ขอบคุณ Yuya, Sean และ Jessie ที่ดูแลผมตลอด 2 เดือนที่ผ่านมา และขอตัวกลับห้องเนื่องจากมีของที่ต้องเก็บก่อนเดินทางอีกเล็กน้อย






ภาพผมถ่ายร่วมกับ Professor Albrecht Karle, Sean Griffin, & Yuya Makino

และ Ian’s Pizza (Pizza ครั้งแรกในสหรัฐฯ ของผม)

Day 61: July 30, 2025 (Wednesday)

วันนี้ผมตื่นประมาณ 06.00 น. และไปทาน Breakfast ที่ 4 Lakes เช่นเดิม ก่อนจะกลับห้องมาเก็บของและตรวจสอบความเรียบร้อยอีกเล็กน้อย จากนั้นได้เดินทางไปยังบริเวณใกล้ ๆ Nicholas Recreation Center เพื่อรอรถ Coach Bus มาถึง ประมาณ 11.00 รถ Coach ก็เริ่มมาจอดรอ และ Jay ก็ได้เดินมาส่งผมและซื้อกาแฟจาก Aldo's Café มาฝากก่อนขึ้นรถ โดยผมได้ฝากของบางส่วนกับ Jay ไว้ เนื่องจากไม่สามารถนำกลับทั้งหมดได้ เช่น ไม้แขวนเสื้อ หรือ อุปกรณ์ทำความสะอาด จากนั้นประมาณ 11.30 น. ผมได้ขึ้นรถและเดินทางออกจาก Madison ใช้เวลาประมาณ 3 ชั่วโมงนิด ๆ ก็เดินทางมาถึง Chicago O'Hare International Airport และได้เรียก Taxi จากสนามบินเพื่อไปยังโรงแรมที่พัก (Sonesta Simply Suites Hotel) โดยหลังจาก Check In เข้าโรงแรมที่พัก และเก็บของสัมภาระเรียบร้อย ผมก็ได้เดินทางเข้าไปยัง Chicago Downtown โดยใช้ Metro City Link ซึ่งคล้าย ๆ กับ Airport Rail Link ของไทย

Timeline & เส้นทาง 30 July 2025 – Pound's Chicago Night

1. ออกจาก Sonesta Simply Suites เดินทางเข้าเมือง Chicago Downtown ด้วย Metro (CTA Blue Line) และ ลงสถานี Clark/Lake (สายหลักสีน้ำเงิน/น้ำตาล, ใจกลาง Loop)

2. เริ่มสำรวจ Chicago Downtown - เดินออกมาฝั่ง Clark St. ผ่าน Grand Ave, Lower Wacker, และโซน business district

3. ริมแม่น้ำ Chicago Riverwalk และถ่ายรูป วิว landmark ตึกสูง ริมแม่น้ำ (มีตึก Marina City, อาคาร Britannica, Wacker Dr., ตึก Wrigley, Trump Tower) และถ่าย Selfie ริมสะพาน Clark Street Bridge (คลาสสิกมาก) โดยนั่งพัก/กินข้างแม่น้ำที่ร้าน Chicago Brewhouse โดยมื้อเย็นได้กินไก่ทอด Popeyes + Chicago Beer ท่ามกลางบรรยากาศเย็น ๆ ริมน้ำ เห็นเรือเดินผ่าน และแวะดูป้าย "BEER – A part of Chicago's History"

4. Landmark Zone โดยเดินไปยังตึก Marina City (ตึกกลม ๆ iconic) และตึก Wrigley Building (ตึกขาว หอคอยนาฬิกา) รวมถึง Trump Tower (อาคารสูงใหญ่)

5. Millennium Park & The Bean (Cloud Gate) โดยเดินมาที่ The Bean (Cloud Gate) ถ่ายรูปหน้าสัญลักษณ์ประจำเมือง พร้อมตึกเก่า "Legacy at Millennium Park" และฝั่งตะวันออกของ Grant Park

6. Jay Pritzker Pavilion (ใน Millennium Park) ซึ่งเดินไปสนามหญ้าใหญ่/ลานดนตรี Jay Pritzker Pavilion และเจอวง orchestra กำลังซ้อม/เล่นสด เลยได้นั่งพักผ่อนกลางเมือง บรรยากาศชิลล์

7. Landmark สายหนัง: “The Dark Knight Route” โดยถ่ายตึกฝั่ง Millennium Park / Wacker Dr. (ตึกที่ใช้เป็นอาคาร Wayne Enterprises ใน The Dark Knight) และเดินมายังถนนเส้น Lower Wacker Drive (ฉากรถไล่ล่าของ Joker “Like a dog chasing cars!”) รวมถึงถ่ายรูปโซนใต้สะพาน/ถนนใต้ดินที่ถูกใช้ถ่ายหนังหลายเรื่อง

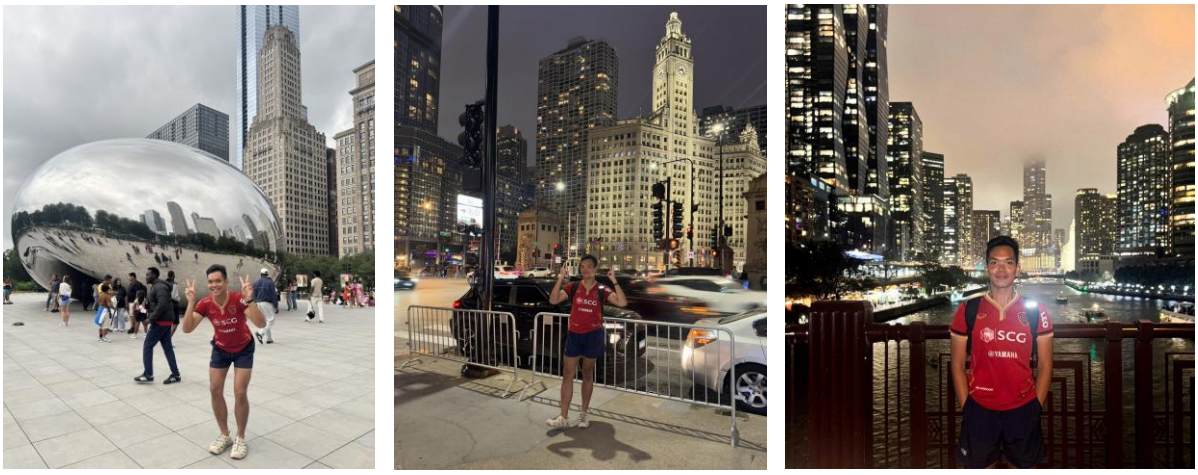
8. เดินริมแม่น้ำ – Magnificent Mile/Trump Tower และถ่ายรูปกับ “Wrigley Building + Trump Tower” มีชาวอเมริกันอาสาถ่ายให้ (ใจดีมาก ๆ) และเดินขึ้นไปถนน Michigan Ave โซนร้านค้า แสงไฟสวย

9. Navy Pier และเดินเท้าจาก Downtown ตามแม่น้ำ Chicago ผ่านเส้นทางลัด (ลุย Lower Wacker อีกรอบ) และถึง Navy Pier (ท่าเรือใหญ่สุด iconic ฝั่งทะเลสาบ Michigan) ดู พลุ ริมน้ำ/Chicago Shakespeare Theater และแวะถ่ายรูป Chicago Children’s Museum (ป้ายไฟแดง) และเดินเล่นริมทะเลสาบ Michigan

10. ย้อนกลับ Downtown – รอฝนซา & ดึก เนื่องจากฝนตกหนัก จึงเดินกลับมาโซน Michigan Ave / State St. และแวะร้าน Potbelly Sandwiches (ระหว่าง State & State Lake) ได้ “Banana Pudding” มากินรองท้อง และนั่งรอฝนหยุด ก่อนเดินทางต่อ

11. Chicago Theatre (ปิดท้าย) โดยเดินไปหน้า Chicago Theatre (ป้ายไฟ “CHICAGO” สีทองโดดเด่น) ถ่ายรูปป้ายไฟในตำนาน กลางคืนหลังฝนตก สะท้อนพื้นถนน นี่คือ landmark ปิดท้าย “สมบูรณ์แบบ” ของการท่องราตรีใน Chicago

โดยสรุป... ผมได้มีโอกาสเก็บ landmark สำคัญสุด ๆ + สัมผัสบรรยากาศ Chicago แบบ day-to-night ใน 1 คืนเต็ม ได้ทั้งของกินเด็ด, street experience, ฟีลหนังฮอลลีวูด, จังหวะพลุ, street life จริง ๆ, และ iconic ป้าย Chicago Theatre ครบและคุ้มมากสำหรับ 1 คืนใน Chicago!



ภาพผมที่ Millenium Park, Wrigley Building และ Chicago Bridge (W Ohio St)

Day 62: July 31, 2025 (Thursday)

ผมตื่นประมาณ 08.00 และนั่ง Shuttle Bus ของโรงแรมไป Check in ที่ Counter ของ O'Hare Airport จากนั้นได้เดินไปซื้อ Black Coffee ที่ Dunkin Donut ทานรองท้องก่อนขึ้นเครื่อง และเนื่องจากผมมีประสบการณ์ขามาแล้ว จึงใช้เวลาไม่นานในการเช็คอินและนั่งรอที่ Gate และเนื่องจากทาง Korean Air จะทำการเซิร์ฟอาหาร 2 มื้อใหญ่ + อาหารว่าง ทำให้ผมรอไปทานบนเครื่อง และเนื่องจากใช้เวลาในการเดินทางยาวถึง 14 ชั่วโมง จึงได้ซื้อน้ำและขนมบางส่วนเตรียมไว้ทานรองท้องบนเครื่อง ประมาณ 12.15 พนักงานก็เริ่มประกาศให้ boarding load เข้าสู่เครื่อง และประมาณ 12.55 เครื่องก็ Take off และสำหรับผม ระยะเวลาที่อยู่บนเครื่องก็เป็นช่วงที่ยาวนานจนน่าเอามาเขียนด้วย 5555 ผมชมภาพยนตร์จบไป 6-7 เรื่อง ได้แก่

- Sherlock Holmes

- Frozen 1 & 2

- Megamind

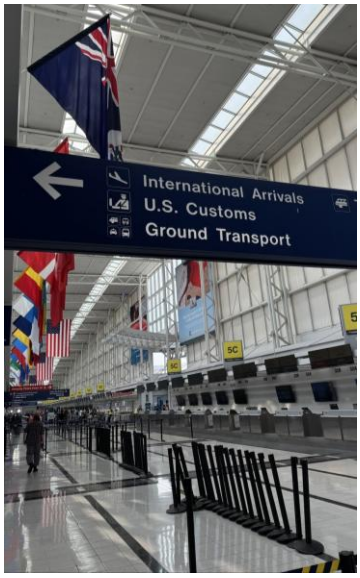
- Mission Impossible 4: the Ghost protocol

- Untold Melody (ภาพยนตร์เกาหลี)

- The Dark Knight

คือคนอื่นหลับ แต่ผมไม่หลับ เพราะพลังงานยังเหลือล้นอยู่มาก ๆ 55555





ภาพผมก่อน On Boarding ขึ้นเครื่อง และ Chicago O'Hare International Airport

Day 63: August 1, 2025 (Friday)

และประมาณ 17.00 น. ณ เวลาท้องถิ่นของสาธารณรัฐเกาหลี (เกาหลีใต้) ผมก็เดินทางมา Landing ที่ Incheon International Airport เพื่อ transit flight โดยมีเวลาประมาณ 2 ชั่วโมง ซึ่งหลังจากตรวจสัมภาระ ได้ที่นั่งแล้ว ผมก็ได้เดินไปอาหารทานที่ Food court ซึ่งเมนูเดิมกับขามา นั่นก็คือซุปกิมจิเต้าหู้อ่อนเซิร์ฟพร้อมข้าว และหลังทานเสร็จก็ได้เดินไปซื้อ Frappe Matcha Latte ที่ Starbucks ทาน และมานั่งรอขึ้นเครื่องที่ Gate หลังจากนั้นไม่นากนักพนักงานก็เริ่ม boarding ผู้โดยสารเข้า และเนื่องจาก traffic ของสนามบินเกิด error เล็กน้อย จึงทำให้การ take off เกิด delayed ไปประมาณ 1 ชั่วโมง จากเดิมที่จะออกประมาณ 19.25 ก็กลายเป็น 20.25 แต่ใช้เวลาแค่ประมาณ 5 ชั่วโมงนิด ๆ ก็เดินทางมา landing ยังสุวรรณภูมิอย่างปลอดภัย เนื่องจากผ่านการเดินทางหลายสิบชั่วโมงมาหลายรอบ 5 ชั่วโมงนี้จึงกลายเป็นเรื่องเล็กน้อยสำหรับผม 55555 นั่นแหละครับ และผมก็เดินไปรับกระเป๋า และเดินออกมาหาคุณน้า ที่มารอรับประมาณ 00.30 น. และเดินทางกลับบ้าน









และก่อนจะปิดฉาก Diary Report และบันทึกการเดินทางฉบับนี้ ผมขอยกคำพูดที่ General Douglas MacArthur กล่าวในปี 1942 ก่อนออกจากฟิลิปปินส์ตามคำสั่งของประธานาธิบดี Flankin D. Roosevelt ไว้ว่า

เช่นนั้นแล้ว....

“Dear United States, Pound Thammarat Shall Return!”

---

6. ภาคผนวก

6.1 Overview of LOM-16-09: The Final Module Construction



Figure 6.1: ภาพรวมของ LOM-16-09 Construction ในทุกกระบวนการ

LOM-16-09 เป็นโมดูลลำดับที่ 10 และเป็น โมดูลสุดท้ายของซีรีส์ LOM-16 ที่ถูกสร้างขึ้นภายใต้โครงการ IceCube-Upgrade เพื่อนำไปทดสอบภาคสนาม ณ ขั้วโลกใต้ (South Pole) โมดูลรุ่นนี้ถือเป็นหมุดหมายสำคัญ เนื่องจากการประกอบที่สมบูรณ์ของ LOM-16-09 ไม่ได้เป็นเพียงแค่การผลิตโมดูลเพิ่มเติมเท่านั้น แต่ยังเป็นการสรุปและสะสมองค์ความรู้จากการสร้างโมดูลก่อนหน้านี้ทั้ง 9 ชุด ซึ่งทีมวิศวกรและนักวิจัยได้เรียนรู้จากข้อผิดพลาด ปรับปรุงกระบวนการ และพัฒนาวิธีการทำงานให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นเรื่อย ๆ

ดังนั้น LOM-16-09 จึงถูกมองว่าเป็น ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับมาตรฐานการผลิต (semi-standard operating procedure; SOP) ของ LOM-16 ทั้งสายการผลิต กระบวนการประกอบที่เคยใช้เวลานานในโมดูลแรก ๆ ถูกปรับให้รวบรัด มีลำดับขั้นตอนที่ชัดเจน และมีมาตรการควบคุมคุณภาพที่แม่นยำมากขึ้น ครอบคลุมตั้งแต่การเตรียมส่วนประกอบเชิงกลและเชิงไฟฟ้า การติดตั้งหลอดตรวจจับแสง (PMTs) ลงในเฟรมโลหะ การประกอบฝาครอบและเดินสายไฟ การใช้สารออปติคัลเจล (optical gel) เชื่อมผิวรับแสงระหว่าง PMT และ cover เพื่อลดการกระเจิงของแสง การทำสุญญากาศ (vacuum processing) เพื่อกำจัดฟองอากาศและทำให้เจลสมานตัว ตลอดจนการนำสอง hemisphere มาประกอบเข้าด้วยกันและทำการทดสอบความทนทานต่อแรงดัน (pressure test)

เมื่อผ่านกระบวนการทางกลและการตรวจสอบคุณภาพทั้งหมดแล้ว โมดูลจะถูกส่งไปยัง Chamberlin Hall เพื่อตรวจสอบสัญญาณเชิงไฟฟ้าและทำการวิเคราะห์เบื้องต้นของสัญญาณจากอนุภาคมิวออน ซึ่งถือเป็นขั้นตอนสุดท้ายก่อนการ deploy สู่ IceCube-Upgrade ในสนามจริง การเสร็จสิ้นของ LOM-16-09 ไม่เพียงแสดงถึงความพร้อมของต้นแบบ multi-PMT optical module สำหรับการทดสอบในสภาวะแวดล้อมจริง แต่ยังเป็นหลักฐานของการบรรลุความสามารถในการผลิตซ้ำ (reproducibility) และการจัดทำมาตรฐานการสร้างโมดูลที่สามารถขยายไปสู่ระดับการผลิตจำนวนมากสำหรับ IceCube-Gen2 ในอนาคต

6.2 Component Preparation

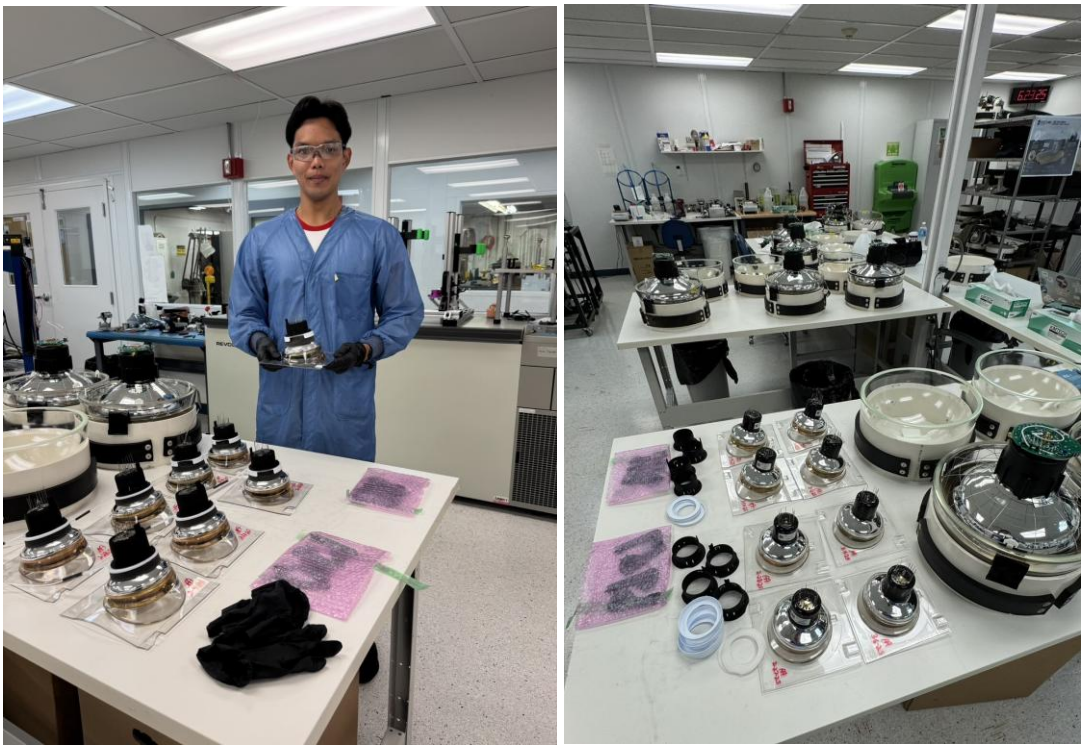


Figure 6.2: ภาพการเตรียมการ assembly โดยในภาพเป็นการเตรียม PMTs ทั้ง 16 ตัว

6.2.1 PMT + Micro-Base Coupling

หลอดทวีคูณแสง (Photomultiplier Tubes; PMTs) ขนาด 4 นิ้ว ถูกเชื่อมต่อกับ micro-base electronics ที่ออกแบบเฉพาะสำหรับ LOM series โดย micro-base ทำหน้าที่ทั้งในการจ่ายแรงดันสูงให้ PMT และการอ่านสัญญาณไฟฟ้าที่เกิดจากโฟตอน การ coupling ที่ดีมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากการประกอบไม่ถูกต้องอาจทำให้เกิดปัญหาความเสถียรของแรงดัน (voltage stability), dark noise เพิ่มสูงขึ้น, หรือแม้แต่การเสียหายของ PMT ในระยะยาว

6.2.2 Optical Gel Pad Attachment

เมื่อ PMT และ micro-base ถูกเตรียมเสร็จ จึงติดตั้งเข้ากับ optical gel-pad โดย gel-pad ทำหน้าที่เป็นตัวกลางเชิงแสง (optical interface) ระหว่างผิวรับแสงของ PMT และ protective cover ของโมดูล Gel นี้ช่วย เพิ่มประสิทธิภาพการส่งผ่านแสง (optical coupling efficiency) ลดการสะท้อน (reflection losses) และลดโอกาสที่แสง Cherenkov จะเบี่ยงเบนจากทิศทางจริง การเลือกวัสดุและความหนืดของเจลมีผลโดยตรงต่อการตอบสนองของโมดูล

6.2.3 Sub-Assembly Jig

เพื่อให้มั่นใจว่า PMTs ทั้ง 16 หลอดถูกจัดวางในตำแหน่งและมุมที่ถูกต้อง ได้มีการสร้าง sub-assembly jig ซึ่งเป็น fixture พิเศษที่รวมโครงสร้างโลหะ (metal frame) และระบบไฟฟ้า (wiring harness) ไว้ด้วยกัน Jig นี้ช่วยให้การติดตั้ง PMT มี repeatability สูง ลด error ที่เกิดจาก human factor และทำให้กระบวนการสามารถทำซ้ำได้ในทุกโมดูล

6.3 Mechanical and Electrical Assembly



Figure 6.3: *Sub-assembly jig สำหรับ LOM-16-09* โมดูล jig ถูกออกแบบมาเพื่อรองรับการติดตั้ง PMTs และ wiring harness ให้มี alignment ที่แม่นยำ ลด human error ในการประกอบ และทำให้สามารถทำซ้ำได้ในทุกโมดูลภายใต้ SOP

6.3.1 PMT Installation

ชุดประกอบ PMT (ประกอบด้วย PMT + micro-base + gel-pad) ถูกติดตั้งเข้าสู่ metal frame ของโมดูลในแต่ละฝั่ง ได้แก่ upper hemisphere และ lower hemisphere การติดตั้งต้องอาศัย alignment fixture ที่ออกแบบมาเฉพาะ เพื่อควบคุมตำแหน่ง มุมรับแสง และการจัดเรียงเชิงเรขาคณิตของ PMTs ทั้งหมด 16 หลอดอย่างแม่นยำ ความสำคัญของขั้นตอนนี้อยู่ที่การจัดทิศทางที่ถูกต้องของ PMTs เนื่องจากความเบี่ยงเบนเพียงเล็กน้อยสามารถส่งผลโดยตรงต่อความสามารถของโมดูลในการ reconstruct ทิศทางของแสงเชเรนคอฟ และท้ายที่สุดคือความแม่นยำของการระบุทิศทางนิวทริโน (neutrino directional reconstruction) ดังนั้นการติดตั้งทุกหลอดจึงต้องผ่านการตรวจ alignment อย่างเป็นระบบ รวมถึงการตรวจสอบความแน่นของจุดยึดเพื่อลดการสั่นสะเทือนหรือการคลายตัวระหว่างการ deploy

6.3.2 Shielded Cover Integration

เมื่อการติดตั้ง PMT ครบถ้วนในแต่ละ hemisphere ขั้นตอนต่อไปคือการปิด shielded cover รอบตัวโมดูล โดย cover นี้ทำหน้าที่สองประการคือ ป้องกันเชิงกล (mechanical protection) จากแรงกระแทกและแรงดันสูง และ ลดแสงรบกวนจากภายนอก (optical shielding) ที่อาจทำให้เกิดสัญญาณผิดพลาด (spurious hits) การติดตั้ง cover ต้องใช้ torque control tools ที่ปรับค่าแรงบิดอย่างละเอียด เพื่อให้แรงขันของ fasteners อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน หากแรงบิดต่ำเกินไปอาจทำให้ cover ไม่ปิดสนิท ขณะที่แรงบิดสูงเกินไปจะก่อให้เกิด stress points บนโครงสร้างแก้ว ซึ่งมีความเสี่ยงสูงต่อการแตกหักเมื่ออยู่ภายใต้แรงดันในน้ำแข็ง การ integrate shielded cover จึงถือเป็นขั้นตอนที่ต้องอาศัยความสมดุลระหว่าง mechanical integrity และ optical cleanliness ของโมดูล

6.3.3 Wiring and Cable Management

หลังการติดตั้ง PMTs และ cover ขั้นตอนถัดไปคือการจัดระเบียบ wiring harness ของสายสัญญาณจาก PMTs ทุกตัว สายเหล่านี้ต้องถูก ยึดแน่นและจัดเรียงอย่างมีระเบียบ เพื่อลดแรงดึง (strain) ที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการเคลื่อนย้ายหรือการ deploy ใต้น้ำแข็ง นอกจากนี้ การจัดเรียงสายยังต้องคำนึงถึงการลด electrical cross-talk ระหว่าง channel ซึ่งอาจส่งผลต่อความถูกต้องของสัญญาณที่บันทึกได้ การวางระบบสายถูกออกแบบโดยใช้หลักการ strain relief และ vibration tolerance เพื่อให้ withstand ต่อแรงสั่นสะเทือน แรงดันสูง และอุณหภูมิต่ำสุดขั้วในสภาวะแวดล้อมจริงของ South Pole ความสำเร็จของการจัดการระบบสายนี้มีผลโดยตรงต่อ ความเสถียรของสัญญาณ (signal stability) และ ความน่าเชื่อถือของโมดูลในระยะยาว

6.4 Optical Gel Backfilling and Vacuum Processing



Figure 6.4: ขั้นตอนการ backfilling optical gel การเติม gel ผ่าน sling system ครั้งละ 4 PMTs ทำให้กระจายตัวสม่ำเสมอ ลดความเสี่ยงของ micro-gaps ที่อาจส่งผลต่อ optical coupling และ photon detection efficiency

6.4.1 Backfilling

การ backfill เป็นขั้นตอนสำคัญในการกำจัดช่องว่างอากาศ (air-gap) ระหว่างผิวของ PMT และฝาครอบ (protective cover) โดยใช้ optical gel ที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับตัวกลางแสง เพื่อทำหน้าที่เป็น “optical coupler” ให้โฟตอนจากแสงเชเรนคอฟสามารถส่งผ่านเข้าสู่ PMT ได้อย่างมีประสิทธิภาพ หากปล่อยให้มี air-gap อยู่ภายใน โฟตอนจำนวนมากจะถูกสะท้อนหรือกระเจิงออกนอกทิศทาง ทำให้ความไวของโมดูลลดลงอย่างมาก

ในการปฏิบัติ ทีมงานใช้ sling system ซึ่งออกแบบมาให้สามารถ backfill ได้ครั้งละ 4 PMTs วิธีนี้ช่วยให้การไหลของเจลเข้าสู่แต่ละช่องมีความสม่ำเสมอ ลดความเสี่ยงที่เจลบางส่วนจะกระจายไม่ทั่วถึง นอกจากนี้ การเติมแบบ batch-wise ยังช่วยให้ทีมสามารถควบคุมคุณภาพของเจลแต่ละชุดได้ใกล้ชิด โดยมีการตรวจสอบปริมาณ ความหนืด และการกระจายตัวก่อนและหลังการเติมทุกครั้ง การควบคุมนี้มีความสำคัญมาก เนื่องจาก optical gel ที่เติมไม่สมบูรณ์อาจสร้าง “micro-gaps” ที่แทบมองไม่เห็น แต่จะส่งผลต่อ calibration และการวัดสัญญาณในระยะยาว

6.4.2 Degassing

เพื่อให้การ backfill มีประสิทธิภาพสูงสุด optical gel ที่ใช้ในแต่ละ batch จะต้องผ่านกระบวนการ degassing ภายใน vacuum cleaner ก่อนนำไปใช้งาน ขั้นตอนนี้มีจุดประสงค์เพื่อกำจัดฟองอากาศขนาดเล็ก (micro-bubbles) ที่อาจฝังอยู่ในเนื้อเจล หากฟองเหล่านี้ยังคงอยู่ จะทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการกระเจิง (scattering centers) ทำให้แสงเชเรนคอฟสูญเสียทิศทาง และในบางกรณีอาจทำหน้าที่เป็นจุดสะท้อนภายในที่รบกวนการวัดเวลาของโฟตอน

กระบวนการ degassing ต้องดำเนินการอย่างระมัดระวังเพื่อให้มั่นใจว่า gel ยังคงคุณสมบัติทางกลและทางแสงที่เหมาะสม ไม่เกิดการ polymerization หรือการแยกชั้นของส่วนผสม นอกจากนี้ หลัง degassing gel จะต้องถูกใช้งานทันทีภายในเวลาที่กำหนด (working time) เพื่อป้องกันไม่ให้ฟองอากาศใหม่ก่อตัวขึ้นระหว่างการเก็บหรือนำออกจากสภาวะสุญญากาศ การควบคุมขั้นตอนนี้ถือเป็นหนึ่งใน QC ที่มีความสำคัญสูง เนื่องจากคุณภาพของ gel แต่ละ batch มีผลโดยตรงต่อ sensitivity และ stability ของโมดูลในระยะยาว

6.4.3 Vacuum Processing

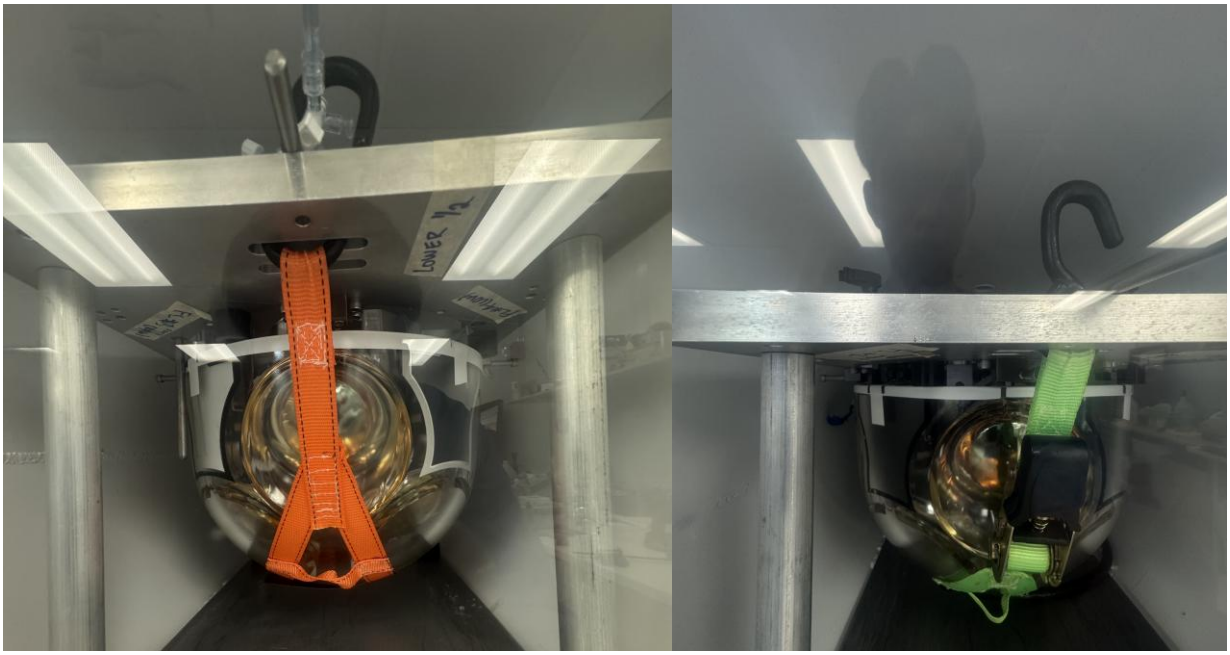


Figure 6.4.3: ขั้นตอนการนำ LOM-16-09 ทั้งสอง Hemisphere เข้าสู่ vacuum chamber

หลังการ backfill เสร็จสิ้น hemispheres ทั้งสองจะถูกนำเข้าสู่ vacuum chamber เป็นเวลาประมาณ 4–5 วัน เพื่อให้ optical gel ค่อย ๆ สมานตัวเข้ากับพื้นผิว PMT และ cover อย่างสมบูรณ์ กระบวนการนี้ยังช่วยกำจัด residual bubbles ที่อาจตกค้างอยู่ใน gel หลังการเติม แม้จะเป็นฟองขนาดเล็กที่ตามนุษย์แทบไม่สามารถมองเห็นได้ แต่หากยังคงอยู่จะทำให้โมดูลมีพฤติกรรมการส่งผ่านแสงที่ไม่เสถียร และส่งผลเสียโดยตรงต่อความแม่นยำในการทำ detector calibration

กระบวนการ vacuum hold ยังมีบทบาทสำคัญในเชิงกล โดยช่วยให้ gel มีเวลาเพียงพอในการ “settle” และสร้างการยึดเหนี่ยวที่มั่นคงกับผิวของ PMT เมื่อโมดูลต้องเผชิญกับสภาวะแรงดันสูงและอุณหภูมิต่ำสุดขั้ว (~–40 °C) ที่ขั้วโลกใต้ ขั้นตอนนี้ถือเป็น critical step ในการสร้าง optical module เพราะแม้เพียงการคงอยู่ของ air inclusion ปริมาณเล็กน้อย ก็สามารถลดประสิทธิภาพของโมดูลลงอย่างชัดเจน ทำให้ค่า photon detection efficiency (PDE) เบี่ยงเบน และท้ายที่สุดกระทบต่อการวิเคราะห์ทางฟิสิกส์ระดับ high-energy neutrino

6.5 Hemisphere Combination and Sealing

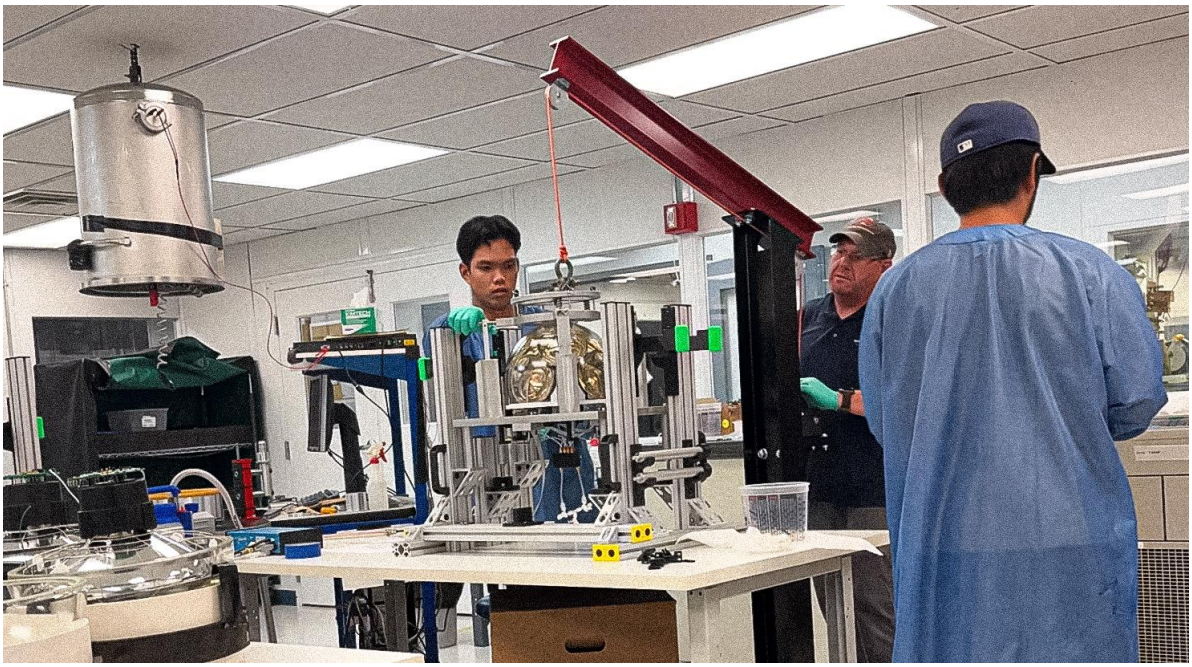


Figure 6.5: *การ combine hemispheres ของ LOM-16-09* ใช้ alignment jig และ sealing compound เพื่อป้องกัน leakage และคง alignment ที่แม่นยำ ขั้นตอนนี้เป็น critical step ของการสร้าง optical module ที่ deploy ได้จริง

หลังจาก hemispheres ทั้งสองผ่านกระบวนการ vacuum processing เป็นเวลาหลายวันเพื่อกำจัดฟองอากาศและทำให้ optical gel สมานตัวอย่างสมบูรณ์ ขั้นตอนถัดไปคือการนำ Upper Hemisphere และ Lower Hemisphere มาประกอบรวมเข้าด้วยกัน (combination) เพื่อสร้างเป็นโมดูล LOM-16-09 ที่สมบูรณ์ กระบวนการนี้ถือเป็นหนึ่งในขั้นตอนที่ ซับซ้อนและ critical ที่สุด ของการผลิต เนื่องจากเป็นการผสานทุกส่วนประกอบเข้าด้วยกัน ทั้งเชิงกลไก (mechanical), เชิงไฟฟ้า (electrical), และเชิงออปติคัล (optical coupling)

ในทางปฏิบัติ การ combine hemispheres ต้องใช้ alignment jig ซึ่งถูกออกแบบมาเพื่อควบคุมตำแหน่งและมุมของ hemispheres ให้ตรงศูนย์ (coaxial alignment) อย่างแม่นยำ แม้จะมีความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยในการประกอบ ก็อาจส่งผลต่อความแข็งแรงของโครงสร้างและการกระจายแรงดันของแก้วเมื่อทำงานในสภาวะภาคสนามที่แรงดันสูงมาก ทีมงานจึงใช้ fixture พิเศษเพื่อประคอง hemispheres ให้วางทับกันอย่างสม่ำเสมอ พร้อมทั้งตรวจสอบ alignment ซ้ำหลายครั้งก่อนเริ่มกระบวนการ sealing

การ sealing ใช้ sealing compound เฉพาะที่สามารถทนต่อแรงดันและอุณหภูมิที่ต่ำกว่า –40°C ได้ โดยสารนี้ต้องถูกทาอย่างสม่ำเสมอรอบรอยต่อของ hemispheres ทั้งหมดเพื่อป้องกันการรั่ว (leakage) ที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการ deploy ใต้น้ำแข็ง ปริมาณของ compound ต้องพอดี ไม่มากเกินไปจนดันออกมาเป็นคราบ และไม่บางเกินไปจนเกิดช่องว่าง หลังจากทาเสร็จ ทีมงานจะใช้ torque wrench ที่ปรับค่าได้ละเอียด เพื่อขัน fasteners ให้ได้แรงบิด (torque) ตามสเปกมาตรฐาน การใช้ torque ที่มากเกินไปอาจทำให้แก้วเกิด stress fracture ได้ ขณะที่ torque ต่ำเกินไปอาจทำให้การซีลไม่สมบูรณ์

ระหว่างขั้นตอน combination ยังมีรายละเอียดสำคัญคือ การตรวจสอบระบบไฟฟ้า (cable feedthroughs และ wiring harness) เนื่องจากเมื่อ hemispheres ถูกปิดรวมเข้าด้วยกันแล้ว จะไม่สามารถแก้ไขการเดินสายภายในได้อีก หากมีสายใดสายหนึ่งบิดงอหรือกดทับโดยไม่ได้ตั้งใจ อาจก่อให้เกิด short circuit หรือสัญญาณขาดหายได้เมื่อใช้งานจริง ดังนั้น ก่อนปิด hemispheres ทีมงานจะทำการ inspect เดินสายทุกเส้น รวมถึง strain relief ของ connector ให้เรียบร้อย

กระบวนการ combine LOM-16-09 ใช้เวลารวมประมาณ 3 ชั่วโมง ซึ่งสั้นกว่าที่คาดการณ์ไว้ในตอนแรก ส่วนหนึ่งเพราะทีมงานได้สั่งสมประสบการณ์จากการประกอบโมดูลก่อนหน้านี้ทั้ง 9 ชุด จึงสามารถลดความผิดพลาดและปรับขั้นตอนการทำงานให้ง่ายขึ้น (streamlined process) เช่น การวางลำดับผู้ปฏิบัติงาน, การใช้ jig ร่วมกับ marking system ที่ชัดเจน และการทำ checklist QC ระหว่างขั้นตอนการประกอบ ผลลัพธ์คือการประกอบที่มีความมั่นใจสูงขึ้นและใช้เวลาน้อยลงโดยไม่ลดทอนคุณภาพ

หลังการ sealing เสร็จสิ้น LOM-16-09 จะถูกนำไปผ่าน pressure test ทันที โดยจำลองสภาวะที่คล้ายกับการถูกกดทับในน้ำแข็งที่ความลึกมากกว่า 1.5–2 กิโลเมตร การผ่าน pressure test เป็นตัวบ่งชี้ว่า sealing และโครงสร้างทั้งหมดสามารถทนต่อแรงกดดันและอุณหภูมิสุดขั้วของ South Pole ได้อย่างมั่นใจ

การ combine hemispheres ของ LOM-16-09 จึงไม่ใช่เพียงแค่ “ขั้นตอนการประกอบ” แต่เป็นการสรุปบทเรียนจากโมดูลก่อนหน้าและยกระดับกระบวนการไปสู่ semi-standard operating procedure (semi-SOP) ที่สามารถขยายผลไปสู่การผลิต optical modules จำนวนมากในอนาคต (IceCube-Gen2) ความสำเร็จของขั้นตอนนี้จึงตอกย้ำทั้งความพร้อมเชิงเทคนิคและศักยภาพในการผลิตซ้ำอย่างมีมาตรฐาน

6.6 Quality Control and Pressure Test

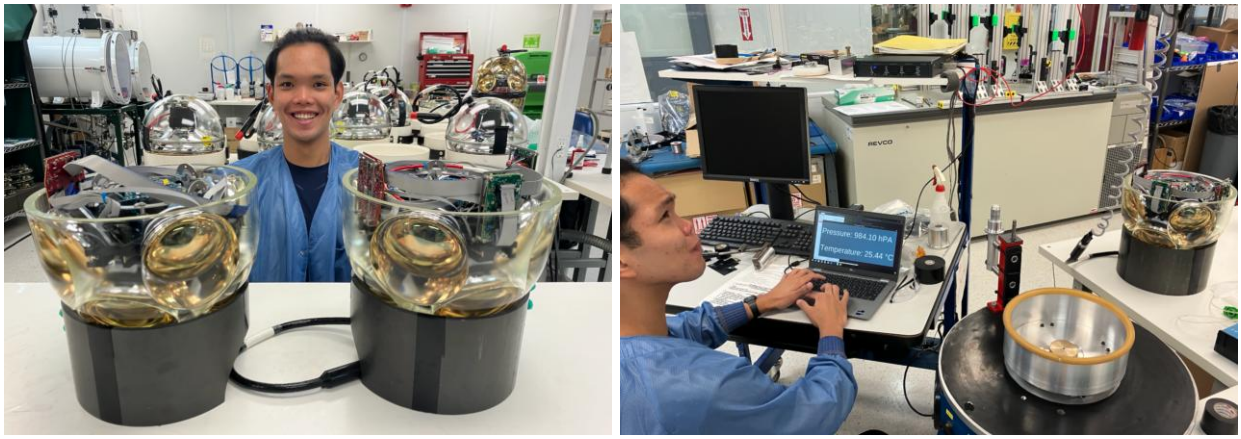


Figure 6.6: ภาพผมและ LOM-16-09 ที่เตรียมทำ testing ก่อนทำ 2-Hemisphere Combining (ขวา) และการทำ Pressure testing (ซ้าย)

เพื่อให้มั่นใจว่าโมดูล LOM-16-09 ที่ประกอบเสร็จมีความพร้อมทั้งด้านโครงสร้างและการทำงาน จำเป็นต้องผ่านกระบวนการตรวจสอบคุณภาพ (Quality Control; QC) หลายด้านก่อนการนำไปใช้งานจริง การตรวจสอบเหล่านี้ถูกออกแบบให้ครอบคลุมทุกองค์ประกอบหลักของโมดูล ทั้งเชิงกล (mechanical), เชิงไฟฟ้า (electrical), และเชิงออปติคัล (optical) รวมถึงการทดสอบความทนทานเชิงกายภาพ (pressure test) ที่จำลองสภาวะแวดล้อมของการใช้งานที่ขั้วโลกใต้

6.6.1 Mechanical QC

การตรวจสอบเชิงกลประกอบด้วยการวัด alignment ของ hemispheres หลังการ combine เพื่อตรวจสอบว่าการเชื่อมต่ออยู่ในแนวแกนเดียวกันและไม่เกิด offset ซึ่งอาจสร้างความเค้น (stress) เพิ่มในจุดเฉพาะ นอกจากนี้ยังมีการตรวจสอบค่า torque ของ fasteners ทุกตัวด้วย torque wrench ที่ผ่านการ calibrate เพื่อยืนยันว่าแรงบิดอยู่ในช่วงที่กำหนด หากต่ำเกินไปอาจทำให้การซีลไม่สมบูรณ์ ขณะที่แรงบิดที่สูงเกินไปอาจสร้างความเสียหายให้แก้วหรือโครงโลหะ สุดท้ายทีมงานได้ทำ visual inspection และ mechanical stress check เพื่อตรวจสอบ structural integrity ของโมดูลโดยรวม

6.6.2 Electrical QC

ระบบไฟฟ้าภายในถูกตรวจสอบอย่างละเอียด โดยทำการวัด continuity ของทุกเส้นสัญญาณจาก PMT ไปยัง connector ภายนอก เพื่อยืนยันว่าไม่มีการขาดตอน รวมถึงทดสอบ insulation resistance ระหว่างสายไฟและโครงโลหะเพื่อป้องกันการรั่วของแรงดันสูง (HV leakage) การตรวจสอบขั้นนี้มีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากความผิดพลาดแม้เพียงเล็กน้อยจะนำไปสู่ปัญหาสัญญาณรบกวน (noise) หรือ short circuit ที่แก้ไขไม่ได้หลังการ deploy

6.6.3 Optical QC

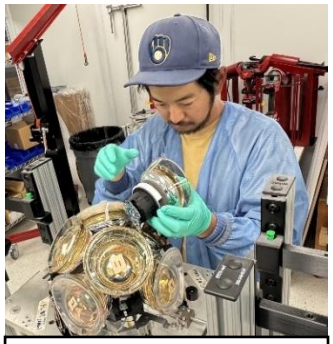
ด้านออปติคัล ทีมงานทำการตรวจสอบโดยส่องแสงผ่านผิวรับแสง (PMT face) และ cover เพื่อค้นหาฟองอากาศหรือความไม่ต่อเนื่องใน optical gel โดยเฉพาะจุดที่อยู่ใน critical optical path หากพบ air inclusion แม้เพียงเล็กน้อยอาจก่อให้เกิด scattering และ reflection ที่ส่งผลให้การวัด Cherenkov photons มีความผิดเพี้ยน การตรวจสอบครั้งนี้ยืนยันว่า ไม่พบฟองอากาศในจุดวิกฤต และ optical coupling อยู่ในสภาพสมบูรณ์

6.6.4 Pressure Test

เมื่อผ่าน QC ทั้งสามด้าน โมดูลถูกนำเข้าสู่ pressure chamber ที่ PSL เพื่อทำการทดสอบความทนทานต่อแรงดันสูง การทดสอบนี้จำลองสภาวะแรงดันที่โมดูลจะต้องเผชิญเมื่อติดตั้งใต้ผิวน้ำแข็งในระดับความลึกมากกว่า 1.5–2 กิโลเมตร เป้าหมายคือยืนยันว่าโครงสร้างแก้ว การซีล และ feedthroughs ของสายไฟฟ้ายังคงสภาพสมบูรณ์และไม่เกิดการรั่วซึมหรือเสียหาย ผลการทดสอบยืนยันว่า LOM-16-09 ผ่านมาตรฐาน field deployment และพร้อมสำหรับการใช้งานจริงใน IceCube-Upgrade

รายงาน	โครงการนักศึกษาภาคฤดูร้อนของหอสังเกตการณ์นิวทริโนไอซ์คิวบ์ ประจำปี 2568
ชื่อ-สกุล	ธรรมรัตน์ ยาวิศิษฏ์
ช่วงเวลา	วันที่ 31 พฤษภาคม - วันที่ 1 สิงหาคม 2568

Advisor, Colleagues and Contributors List



Yuya Makino



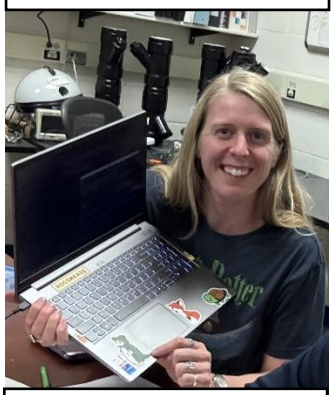
Christopher Wendt



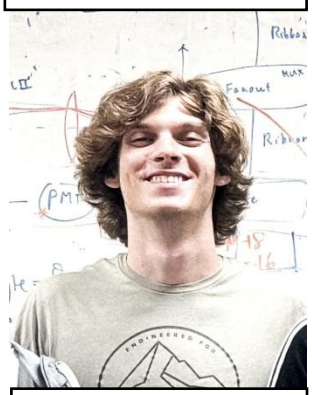
Professor Albrecht Karle



Jay Tang



Hannah Erpenbeck



Finnigan Novak



Britta Thompson



John Radar



Tianlu Yuan



Delaney Butterfield



Andrew Arbuckle



Brian Landerud



Jack Nuckles



Caitlyn Daniels