SCIENCE & TECHNOLOGY
BOOK SERIES

0 2564 7000
0 2564 7002-5
https://www.nstda.or.th
NSTDATHAILAND
info@nstda.or.th
111 อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย
ถนนพหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง
อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี
12120

สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ
กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

เทคโนโลยีควอนตัม
QUANTUM
Technology

POLICE
MRI
เทคโนโลยีควอนตัม
QUANTUM
Technology
WARNING!!

เทคโนโลยีควอนตัม

ISBN	978-616-12-0582-9
พิมพ์ครั้งที่	1, พ.ศ. 2562
จำนวน	3,700 เล่ม
สงวนลิขสิทธิ์	ตาม พ.ร.บ. ลิขสิทธิ์ (ฉบับเพิ่มเติม) พ.ศ. 2558
จัดทำโดย	กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (มว.)

ไม่อนุญาตให้คัดลอก ทำซ้ำ และดัดแปลง ส่วนใดส่วนหนึ่ง
ของหนังสือเล่มนี้ นอกจากได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษร
จากเจ้าของลิขสิทธิ์เท่านั้น

สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.
เทคโนโลยีควอนตัม = quantum technology.--ปทุมธานี : สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2562.
36 หน้า.

1. ทฤษฎีควอนตัม. I. ชื่อเรื่อง.

530.12
ISBN 978-616-12-0582-9

บรรณาธิการ	กุลประภา นาวานุเคราะห์
ผู้เขียน	ดร.คณิน อึ้งสกุลสิริ
ผู้เขียนร่วม (นาฬิกาอะตอม)	ดร.ปิยพัฒน์ พูลทอง
กองบรรณาธิการ	รักฉัตร เวทีวุฒาจารย์, วีณา ยศวังใจ, วัชราภรณ์ สนทนา, จุฬารัตน์ นิ่มนวล, ดร.นำชัย ชีววิวรรธน์, ดร.สิวินีย์ สวัสดิ์อารี
กราฟิก	ฉัตรกมล พลสงคราม
รูปเล่ม	งานออกแบบ ฝ่ายสื่อวิทยาศาสตร์ สวทช.

SCIENCE & TECHNOLOGY BOOK SERIES by NSTDA

คำนิยม

วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เป็นปัจจัยสำคัญในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจ สังคม มาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งประเทศไทยได้ให้ความสำคัญในการวิจัยพัฒนา สร้างความรู้ใหม่ และการนำไปใช้ประโยชน์ในการพัฒนาเศรษฐกิจ สังคม และคุณภาพชีวิต ขณะที่การเปลี่ยนแปลงทางเทคโนโลยีเป็นไปอย่างก้าวกระโดดในช่วงสิบปีที่ผ่านมา การส่งเสริมให้ประชาชนได้รับรู้และทำความเข้าใจกับเรื่องราวใหม่ๆ ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จึงเป็นส่วนสำคัญที่จะทำให้สังคมพร้อมต่อการก้าวไปข้างหน้าอย่างเท่าทันโลก

กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ซึ่งก่อตั้งอย่างเป็นทางการเมื่อวันที่ 24 มีนาคม พ.ศ. 2522 ได้ทำหน้าที่เป็นกลไกในการขับเคลื่อนประเทศผ่านหน่วยงานวิจัยหลากหลายหน่วยงาน โดยมีการปรับเปลี่ยนไปตามสถานการณ์ตลอดช่วงเวลาหลายสิบปีที่ผ่านมา และจะยังคงพัฒนาต่อไปเพื่อเป็นองค์กรหลักในการนำประเทศสู่เศรษฐกิจฐานความรู้ และสังคมนวัตกรรม ในโอกาสครบรอบ 40 ปีของกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ในปี พ.ศ. 2562 ท่าน ดร.สุวิทย์ เมษินทรีย์ อดีตรัฐมนตรีว่าการกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มีดำริให้กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จัดทำ "หนังสือชุดความรู้ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี" เพื่อรวบรวมเรื่องราวด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่น่าสนใจรวม 19 เรื่องไว้ในชุดหนังสือนี้

การจัดทำหนังสือเทคโนโลยีควอนตัมนี้ มุ่งหวังให้เยาวชนคนรุ่นใหม่ได้เข้าถึงองค์ความรู้ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี รวมทั้งยังเป็นโอกาสในการสร้างแรงบันดาลใจกับเยาวชนคนรุ่นใหม่ให้เข้าใจถึงบทบาทและความสัมพันธ์ของวิทยาศาสตร์ในมิติต่างๆ ของการดำรงชีวิต

ผมขอขอบคุณผู้ที่เกี่ยวข้องในการจัดทำหนังสือชุดนี้ทุกท่าน และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าหนังสือเล่มนี้และเล่มอื่นๆ ในชุด จะเป็นแหล่งข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการเรียนรู้และมีส่วนช่วยกระตุ้นให้เยาวชนและประชาชนไทยเกิดความสนใจหาความรู้วิทยาศาสตร์ในด้านอื่นๆ ต่อไป

รองศาสตราจารย์สรนิต ศิลธรรม
ปลัดกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มีนาคม 2562

คำนำ

เมื่อเอ่ยถึงคำว่า "ควอนตัม" คนไทยส่วนใหญ่อาจจะนึกไม่ออกว่าหมายถึงอะไร หรือเกี่ยวข้องอะไรกับชีวิตของเรา รวมไปถึงมีความสำคัญอะไรบ้างหรือไม่

หนังสือ**เทคโนโลยีควอนตัม (quantum technology)** เล่มนี้จัดทำขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างความรู้ ความเข้าใจ และเตรียมเยาวชนไทยและคนไทยทั่วไปให้พร้อมสำหรับการขับเคลื่อนประเทศในคริสต์ศตวรรษที่ 21 ผ่านการเรียนรู้คำศัพท์และแนวคิดมุมมอง โดยเฉพาะด้านวิทยาศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับเศรษฐกิจ ซึ่งใกล้ตัวคนไทย และจะเป็นตัวขับเคลื่อนสำคัญสำหรับระบบเศรษฐกิจประเทศในอนาคตอันใกล้นี้ ซึ่งแม้ในกรณีนี้คำว่า "ควอนตัม" อาจจะดูเป็นวิทยาศาสตร์ไกลตัว แต่การประยุกต์ใช้กลับใกล้ตัวเราอย่างคาดไม่ถึง อาทิ ทรานซิสเตอร์ที่อยู่ในอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า เลเซอร์ หลอดไฟแอลอีดี เซลล์สุริยะ เซนเซอร์รับแสงต่างๆ รวมไปถึงกล้องดิจิทัล เครื่องสแกนเนอร์ ฯลฯ คำศัพท์ต่างๆ ที่ปรากฏอยู่ในหนังสือเล่มนี้ เช่น โฟตอน ทฤษฎีควอนตัม การคำนวณเชิงควอนตัม สภาวะพัวพันทางควอนตัม วิศวกรรมควอนตัม ฯลฯ หลายคำก็เริ่มกลายเป็นศัพท์ที่ค่อยๆ พบเห็นหรือได้ยินบ่อยมากขึ้น แต่คาดได้ว่าทุกคำจะกลายเป็นคำสามัญในอนาคตอันใกล้นี้

หนังสือเล่มนี้ออกแบบให้อ่านได้ทั้งเยาวชนและประชาชนทั่วไป โดยเน้นให้ความรู้เบื้องต้น ภาพรวม และผลกระทบต่างๆ ที่เกิดจากแนวคิดด้านเทคโนโลยีที่สำคัญนี้ โดยเฉพาะในแง่มุมที่เกี่ยวข้องกับวิทยาศาสตร์ที่อยู่เบื้องหลัง และนวัตกรรมต่างๆ โดยมีรูปแบบเป็นหนังสือสอนคำศัพท์ประกอบรูป (illustrated wordbook) แบบอินโฟกราฟิก (infographic) โดยหวังว่าจะสามารถสร้างแรงบันดาลใจ ทำให้เห็นความสำคัญ และทำให้เยาวชนไทยเกิดความสนใจในด้านสะเต็มศึกษา (STEM) ที่จะเป็นฐานสำหรับอาชีพในอนาคตจำนวนมากที่จะเกิดขึ้นจากเทคโนโลยีควอนตัม

สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)

เทคโนโลยีควอนตัม QUANTUM Technology

สารบัญ

08	เทคโนโลยีอยู่รอบตัวเรา
10	การอธิบายธรรมชาติ ขึ้นอยู่กับขนาดและความเร็วของวัตถุ
12	กลศาสตร์คลาสสิก กับการอธิบายปรากฏการณ์ของสสารและคลื่น
14	แบบจำลองอะตอม
16	เมื่อส่องวัตถุขนาดเล็ก เรื่องราวเปลี่ยนไปเมื่อก้าวสู่โลกของอะตอม
18	ปรากฏการณ์ทางควอนตัม
22	เทคโนโลยีควอนตัมยุคที่ 2
24	การคำนวณเชิงควอนตัม
26	การสื่อสารด้วยเทคโนโลยีควอนตัม
28	นาฬิกาอะตอม
30	วิศวกรรมควอนตัม
32	Quantum Timeline
36	เอกสารอ้างอิง

เทคโนโลยีอยู่รอบตัวเรา

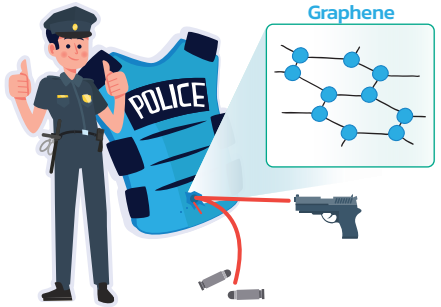
ปัจจุบันนี้เทคโนโลยีสมัยใหม่เข้ามาเป็นส่วนหนึ่งในชีวิตประจำวันของเรา และมีหลายเทคโนโลยีที่ได้รับอิทธิพลมาจากการพัฒนาองค์ความรู้ใน**ทฤษฎีควอนตัม (quantum theory)** ซึ่งเป็นฟิสิกส์แขนงหนึ่งที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์ของสิ่งที่มีขนาดเล็กระดับอะตอม

เทคโนโลยีควอนตัมยุคที่ 1 (quantum technology 1.0) เป็นผลผลิตมาจากการสะสมความรู้ของนักวิทยาศาสตร์จนเข้าใจปรากฏการณ์ทางธรรมชาติของแสงที่มีหน่วยย่อยในระดับ**โฟตอน (photon)** และอนุภาคขนาดเล็กในระดับอะตอมและอิเล็กตรอน ซึ่งนำไปสู่การพัฒนาวัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ล้ำสมัย มาช่วยอำนวยความสะดวกในการทำกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ และเป็นพื้นฐานของการพัฒนาต่อยอดไปสู่เทคโนโลยีขั้นสูงขึ้นไป

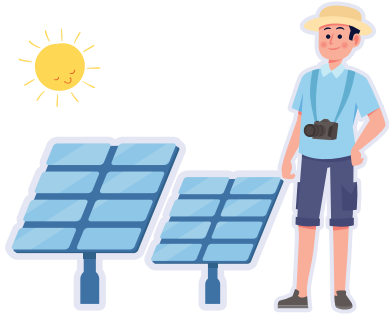
ความรู้ในทฤษฎีควอนตัมได้นำมาใช้อธิบายพฤติกรรมการเลี้ยวเบนของแสงและอิเล็กตรอนเมื่อวิ่งผ่านสิ่งกีดขวาง ซึ่งนำไปสู่การพัฒนากล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยายสูง เครื่องสแกนเอ็มอาร์ไอ (MRI) และเครื่องฉายรังสีเอกซ์

ความรู้เกี่ยวกับระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนผนวกกับความเข้าใจในกลไกการดูดกลืนและปลดปล่อยพลังงานของอิเล็กตรอน นำไปสู่การสร้างหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ หลอดไฟแอลอีดี (LED) และรวมไปถึงเลเซอร์ (LASER) ซึ่งนำมาประยุกต์เป็นกลไกการอ่านเขียนข้อมูลในเครื่องเล่นซีดี (CD) ดีวีดี (DVD) การฉายรังสีทางการแพทย์ หรือแม้กระทั่งนำเลเซอร์พลังงานสูงไปใช้ในการตัดวัตถุที่มีความแม่นยำสูง

ความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมของอิเล็กตรอนในวัสดุสารกึ่งตัวนำ เป็นจุดเริ่มต้นของการสร้างทรานซิสเตอร์ (transistor) ซึ่งเป็นชิ้นส่วนสำคัญในโทรศัพท์มือถือ คอมพิวเตอร์ และอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ มากมาย



ความรู้ในทฤษฎีควอนตัมได้นำมาใช้อธิบายโครงสร้างโมเลกุลของวัสดุสารกึ่งตัวนำ ทำให้มีการค้นพบกราฟีน (graphene) ซึ่งมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าสูง อีกทั้งยังมีความแข็งแรงในระดับที่สามารถนำมาทำเป็นเสื้อเกราะกันกระสุนที่มีน้ำหนักเบาได้เป็นอย่างดี



การค้นพบ**ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (photoelectric effect)** ที่แสงสามารถถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอน เป็นกุญแจสำคัญที่นำไปสู่การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์สุริยะ (solar cell) และการสร้างอุปกรณ์รับภาพในกล้องดิจิทัล เครื่องสแกนเนอร์ เซนเซอร์ตรวจวัดระยะห่างที่เราใช้กันในรถยนต์และประตูอัตโนมัติ

การอธิบายธรรมชาติขึ้นอยู่กับขนาดและความเร็วของวัตถุ

ความอยากรู้อยากเห็นและความช่างสังเกตของมนุษย์ ก่อให้เกิดการศึกษาเพื่อทำความเข้าใจปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ ตลอดจนการเปลี่ยนแปลงของสิ่งที่อยู่รอบตัวเรา ก่อเกิดเป็นองค์ความรู้ทางด้านวิทยาศาสตร์ในแขนงต่างๆ อาทิ ชีววิทยา เคมี ฟิสิกส์ และคณิตศาสตร์

ฟิสิกส์ (physics) เป็นหนึ่งในวิชาพื้นฐานทางวิทยาศาสตร์ ที่มุ่งศึกษาเพื่อทำความเข้าใจเกี่ยวกับสมบัติของสสารและพลังงานในจักรวาล

การอธิบายปรากฏการณ์ทางธรรมชาติด้วยฟิสิกส์ยังแบ่งออกเป็นหลายแขนง โดยจำแนกตามปัจจัยทางด้านขนาดและความเร็วของสิ่งที่ศึกษา ตั้งแต่สิ่งที่มีขนาดใหญ่ระดับจักรวาลที่อธิบายด้วย**ฟิสิกส์ดาราศาสตร์ (astrophysics)** และ**ทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป (general relativity)** การใช้**กลศาสตร์ท้องฟ้า (celestial mechanics)** ในการอธิบายปรากฏการณ์บนท้องฟ้าจากการสังเกตการณ์ของนักดาราศาสตร์ การอธิบายการเคลื่อนที่และพลังงานของมวลสารด้วย**กลศาสตร์คลาสสิก (classical mechanics)** การอธิบายปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วใกล้แสงด้วย**ทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ (special relativity)** และในกรณีของวัตถุที่มีขนาดเล็กระดับโมเลกุลที่อธิบายด้วย**ฟิสิกส์ของแข็ง (solid-state physics)** ไปจนถึงอนุภาคขนาดเล็กในระดับอะตอมและหน่วยย่อยของแสง (โฟตอน) ที่อธิบายด้วย**ทฤษฎีควอนตัม**

กลศาสตร์คลาสสิก กับการอธิบายปรากฏการณ์ของสสารและคลื่น

วัตถุหรือสิ่งของที่อยู่รอบตัวเรา ทั้งดิน น้ำ อากาศ สิ่งมีชีวิตทุกชนิด รวมทั้งมนุษย์ เป็นสิ่งที่มีมวลและขนาด เราเรียกสิ่งเหล่านี้ว่า **สสาร (matter)**

สสารทุกชนิดมี **"พลังงานศักย์" (potential energy)** ซึ่งเป็นพลังงานที่สะสมอยู่ในสสารในรูปแบบต่างๆ เช่น พลังงานศักย์ที่เกิดจากพันธะยึดเหนี่ยวทางเคมี หรือพลังงานศักย์ที่เกิดจาก **แรงโน้มถ่วง (gravity)** และเมื่อใดก็ตามที่วัตถุมีการเคลื่อนที่ จะมีพลังงานอีกรูปแบบที่เกี่ยวข้อง เรียกว่า **"พลังงานจลน์" (kinetic energy)** ในทางกลศาสตร์คลาสสิกสามารถอธิบายได้ว่า การเปลี่ยนแปลงของพลังงานศักย์จากแรงโน้มถ่วงขึ้นอยู่กับความสูงของวัตถุ และการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ขึ้นอยู่กับความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุ ซึ่งการถ่ายเทพลังงานระหว่างพลังงานศักย์กับพลังงานจลน์เกิด**แบบต่อเนื่อง (continuous)** เปรียบเทียบกับในทางทฤษฎีควอนตัมที่การถ่ายเทพลังงานของอนุภาคเป็นกรณีพิเศษที่เกิดขึ้น**แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete)** แต่ถูกจำกัดให้ถ่ายเทพลังงานได้แค่บางช่วงในลักษณะเป็นขั้น (ดูเรื่องควอนไทเซชัน หน้า 19)

คลื่น (wave) คือ พลังงานในรูปแบบหนึ่งที่มีการส่งผ่านจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง แบ่งเป็น**คลื่นกล (mechanical wave)** ที่ต้องอาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่ และ**คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave)** ที่ไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่

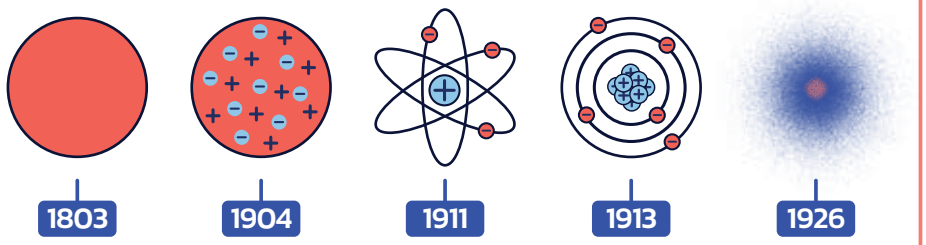
สมบัติของคลื่น เช่น

คลื่นและสสารมีสิ่งที่เหมือนกันอย่างหนึ่งคือ **พลังงาน** โดยในทางกลศาสตร์คลาสสิกยังไม่มีการเชื่อมโยงสสารและคลื่นเข้าหากัน แต่ใน**ทฤษฎีควอนตัม**นั้น พลังงานเป็นสิ่งที่ใช้อธิบายและเชื่อมต่อกันระหว่างสสารกับคลื่น ซึ่งเกิดจากการค้นพบคุณลักษณะที่แปลกประหลาดบางอย่างในทางควอนตัม เช่น สสารสามารถแสดงคุณลักษณะของคลื่น และคลื่นแสดงคุณลักษณะของสสารได้ (wave-particle duality)

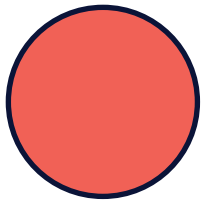
แบบจำลองอะตอม

อะตอม (atom) คือ หน่วยย่อยมูลฐานของสสาร ความเข้าใจเกี่ยวกับโครงสร้างของอะตอมมีวิวัฒนาการมาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นผลมาจากการตั้งสมมติฐานและทำการทดลองเพื่อหาคำตอบ ความเข้าใจเกี่ยวกับโครงสร้างอะตอมในยุคหลังๆ ได้นำไปสู่การกำเนิดศาสตร์ใหม่ในทางฟิสิกส์ที่ชื่อว่า ทฤษฎีควอนตัม

ทฤษฎีและแบบจำลองอะตอม



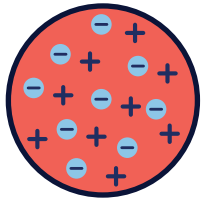
จอห์น ดอลตัน (John Dalton)

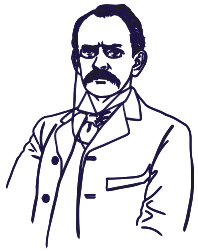


ค.ศ. 1803

อะตอมมีสัณฐานทรงกลม เป็นหน่วยย่อยที่สุดของสสาร ไม่สามารถแบ่งแยก ทำลาย หรือสร้างใหม่ได้

เจ เจ ทอมสัน (J.J. Thomson)

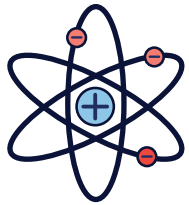




ค.ศ. 1904

อะตอมมีสัณฐานทรงกลม ประกอบด้วยอนุภาคที่มีประจุบวก เรียกว่า **โปรตอน (proton)** และอนุภาคที่มีประจุลบ เรียกว่า **อิเล็กตรอน (electron)** กระจายตัวอยู่ภายในทรงกลมในจำนวนเท่ากัน

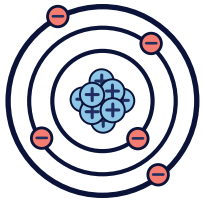
เออร์เนสต์ รัทเทอร์ฟอร์ด (Ernest Rutherford)

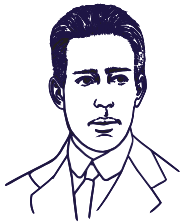


ค.ศ. 1911

อะตอมประกอบด้วยพื้นที่ว่างเปล่ามีประจุบวกรวมตัวอยู่เป็นแกนกลางที่เรียกว่า "นิวเคลียส" โดยมีอิเล็กตรอนกระจายตัวอยู่โดยรอบ

นีลส์ โบร์ (Niels Bohr)

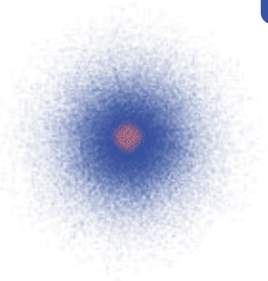




ค.ศ. 1913

ภายในอะตอมมีอิเล็กตรอนโคจรอยู่รอบนิวเคลียสโดยวงโคจรของอิเล็กตรอนถูกจำกัดอยู่ ณ บางตำแหน่งเท่านั้น ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนถูกกำหนดเป็นชั้นๆ ที่มีความสัมพันธ์กับรัศมีวงโคจรที่เรียกว่า **รัศมีของโบร์ (Bohr's radius)** แบบจำลองอะตอมของโบร์นี้เป็นจุดเริ่มต้นที่ทฤษฎีควอนตัมได้นำมาใช้อธิบายปรากฏการณ์การเปล่งแสงของอะตอม

แอร์วิน ชเรอดิงเงอร์ (Erwin Schrödinger)

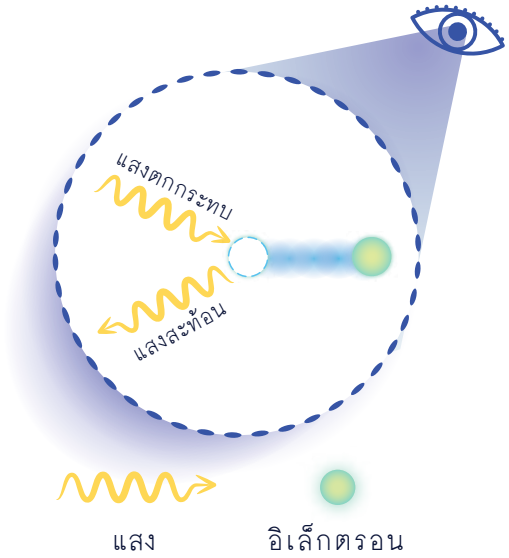


ค.ศ. 1926

เป็นการต่อยอดแบบจำลองอะตอมของโบร์ที่นำความน่าจะเป็นมาใช้อธิบายตำแหน่งของอิเล็กตรอน โดยนิวเคลียสของอะตอมประกอบด้วยโปรตอนและนิวตรอน มีอิเล็กตรอนเคลื่อนที่อยู่โดยรอบในระดับชั้นพลังงานต่างๆ การกระจายตัวของอิเล็กตรอนถูกนิยามด้วยความน่าจะเป็นในลักษณะของ **กลุ่มหมอกอิเล็กตรอน (electron cloud)** โดยบริเวณที่กลุ่มหมอกหนาแน่นแสดงถึงความน่าจะเป็นในการพบอิเล็กตรอนสูงกว่าบริเวณที่กลุ่มหมอกเจือจาง

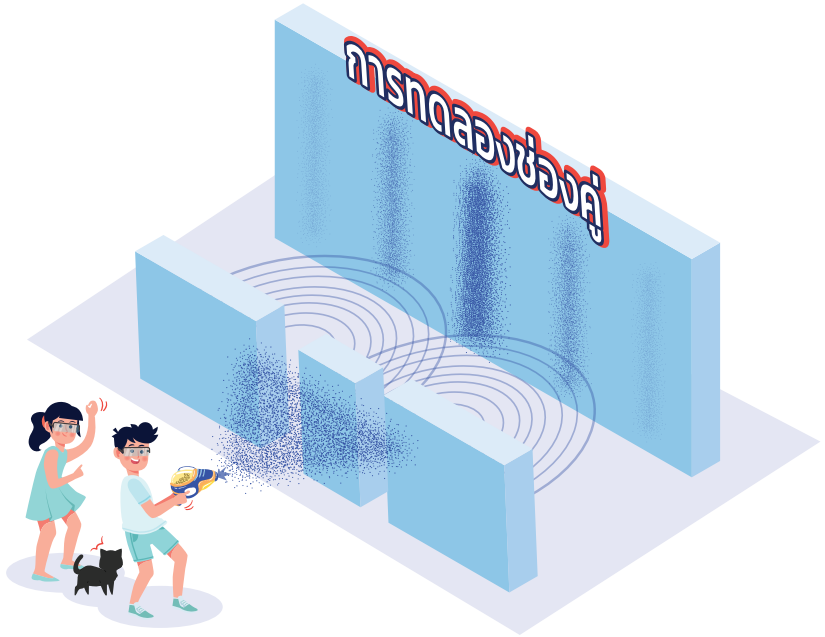
เมื่อส่องวัตถุขนาดเล็ก เรื่องราวเปลี่ยนไปเมื่อก้าวสู่โลกของอะตอม

การที่เรามองเห็นวัตถุต่างๆ ได้ เนื่องจากมีแสงส่องไปที่วัตถุนั้นแล้วสะท้อนเข้าตาของเรา โดยที่วัตถุหรือสิ่งของนั้นยังคงอยู่ที่ตำแหน่งเดิม ไม่เคลื่อนที่หรือได้รับผลกระทบใดๆ จากแสงที่ตกกระทบ



แต่เมื่อเราพยายามใช้แสงเพื่อส่องดูอนุภาคที่มีขนาดเล็ก เช่น อิเล็กตรอน จะทำให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนตำแหน่งและความเร็วไปจากเดิม ซึ่งเป็นผลจากการที่แสงไปกระทบอิเล็กตรอนนั่นเอง แสดงให้เห็นว่า **"คลื่นแสงแสดงคุณลักษณะของการเป็นอนุภาค"** และได้ข้อสรุปว่า เราไม่สามารถระบุตำแหน่งและความเร็วที่แท้จริงของอิเล็กตรอนได้พร้อมๆ กัน เป็นไปตาม **หลักความไม่แน่นอนของไฮเซนแบร์ก (Heisenberg's uncertainty principle)**

นักวิทยาศาสตร์ทำ**การทดลองช่องคู่ (double-slit experiment)** โดยยิงลำอิเล็กตรอนผ่านช่องแคบ 2 ช่อง ไปชนกับฉากรับด้านหลัง ปรากฏว่าเกิดรูปแบบการแทรกสอดของคลื่นบนฉาก แสดงให้เห็นว่า **อนุภาคอิเล็กตรอนแสดงคุณลักษณะของการเป็นคลื่น**



ทางทฤษฎีควอนตัม สสารทุกชนิดมีคุณลักษณะของการเป็นคลื่น โดยสสารที่มีขนาดใหญ่จะมีคุณลักษณะของความเป็นคลื่นเล็กน้อยจนแทบไม่ปรากฏให้เห็น ในขณะที่สิ่งของเล็กๆ ระดับอะตอมคุณลักษณะของความเป็นคลื่นปรากฏและแสดงออกอย่างเด่นชัด ผลจากการทดลองทำให้นักวิทยาศาสตร์ได้ข้อสรุปว่า **"อนุภาคสามารถทำตัวเป็นคลื่น และคลื่นสามารถทำตัวเป็นอนุภาค"** ซึ่งเป็นความแปลกประหลาดที่เกิดขึ้นในทางควอนตัม

คุณลักษณะที่แปลกประหลาดในทางควอนตัมอื่นๆ ที่เกิดขึ้น ได้แก่ ปรากฏการณ์การลอดอุโมงค์ควอนตัม (quantum tunneling) ควอนไทเซชัน (quantization) สภาวะควบรวมทางควอนตัม (quantum superposition) และสภาวะพัวพันทางควอนตัม (quantum entanglement)

ปรากฏการณ์ทางควอนตัม

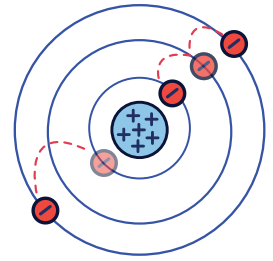
การลอดอุโมงค์ควอนตัม (quantum tunneling)

การเดินทางข้ามภูเขาต้องใช้พลังงานสูงกว่าการเดินทางบนพื้นราบ และจะเป็นไปไม่ได้เลยหากเรามีพลังงานไม่เพียงพอ แต่สำหรับอนุภาคควอนตัมแล้ว แม้จะมีพลังงานต่ำก็ยังสามารถทะลุผ่านสิ่งกีดขวางหรือข้ามขีดจำกัดได้ การข้ามขีดจำกัดนี้เกิดขึ้นได้ด้วย**ปรากฏการณ์การลอดอุโมงค์ควอนตัม** ซึ่งพฤติกรรมนี้จะไม่เกิดขึ้นในสสารทั่วไป แต่จะเกิดขึ้นได้เฉพาะกับอนุภาคควอนตัมที่แสดงสมบัติความเป็นคลื่น

ปรากฏการณ์การลอดอุโมงค์ควอนตัมเกิดขึ้นได้ในชีวิตประจำวันของเราเช่นกรณีที่อาจเกิดขึ้นกับหน่วยประมวลผลกลาง (central processing unit, CPU) ที่มีทรานซิสเตอร์ขนาดเล็กจิ๋วระดับนาโนเมตรอยู่กันอย่างแออัด จนอิเล็กตรอนที่อยู่ในทรานซิสเตอร์ตัวหนึ่งเดินทางทะลุผ่านไปยังตัวอื่นได้ จึงเกิดการรบกวนสัญญาณระหว่างกันขึ้น

ควอนไทเซชัน (quantization)

แบบจำลองอะตอมของโบร์



โปรตอน อิเล็กตรอน

ถ่ายเทเป็นขั้นๆ

จากแบบจำลองอะตอมของโบร์ (หน้า 15) จะเห็นว่าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นวงรอบนิวเคลียสแบบถูกจำกัดเป็นขั้นๆ ตามระดับของพลังงาน หมายความว่า เมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นหรือเสียพลังงานก็จะหลุดออกจากวงโคจรเดิมไปอยู่ในวงอื่นๆ การที่พลังงานของอิเล็กตรอนถูกจำกัดให้อยู่เป็นขั้นและถ่ายเทพลังงานได้ตามระดับขั้นนี้เรียกว่า **ควอนไทเซชัน**

แนวคิดในเรื่อง**ควอนไทเซชัน**ช่วยอธิบายกลไกการถ่ายเทพลังงานระหว่างโฟตอนกับอิเล็กตรอนใน**ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (photoelectric effect)** เช่น การทดลองหนึ่งที่มีการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตตกกระทบบนพื้นผิวโลหะ โฟตอนซึ่งเป็นก้อนพลังงานในย่านรังสีอัลตราไวโอเล็ตจะชนกับอิเล็กตรอนที่อยู่บนพื้นผิวโลหะ ทำให้อิเล็กตรอนกระโดดจากผิวโลหะแผ่นหนึ่งไปยังอีกแผ่น เกิดการเชื่อมต่อของวงจรไฟฟ้าขึ้น เรานำความรู้จากปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกนี้มาพัฒนาเป็นโซลาร์เซลล์ เซนเซอร์วัดระยะห่าง และกล้องดิจิทัลที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน

แอลเบิร์ต ไอน์สไตน์ (Albert Einstein) ใช้ทฤษฎีควอนตัมอธิบายปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกและได้รางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี ค.ศ. 1921

สภาวะควบรวมทางควอนตัม (quantum superposition)

แอร์วิน ชเรอดิงเงอร์ สมมติการทดลองขึ้นมา (thought experiment) โดยสมมติให้แมวตัวหนึ่งอยู่ในกล่องปิด มีขวดยาพิษที่มีกลไกเชื่อมต่อกับสารกัมมันตรังสีที่ปลดปล่อยรังสีออกมาได้ ซึ่งมีโอกาส 50% ที่รังสีนั้นจะทำให้ขวดยาพิษแตก ส่งผลให้แมวตาย และมีโอกาส 50% ที่ขวดยาพิษจะไม่แตก ส่วนแมวก็ยังมีชีวิตอยู่ ในขณะที่เรายังไม่เปิดกล่องดู แมวจะมีสภาวะทางควอนตัมที่อาจมีชีวิต "และ" ตายในเวลาเดียวกัน ซึ่งเรียกว่า **สภาวะควบรวมทางควอนตัม** แต่เมื่อเราเปิดกล่องดู สภาวะควบรวมนี้จะสูญหายไปและจะพบว่าแมวอยู่ในสภาวะใดสภาวะหนึ่ง ซึ่งก็คือมีชีวิตอยู่ "หรือ" ตายแล้วเท่านั้น

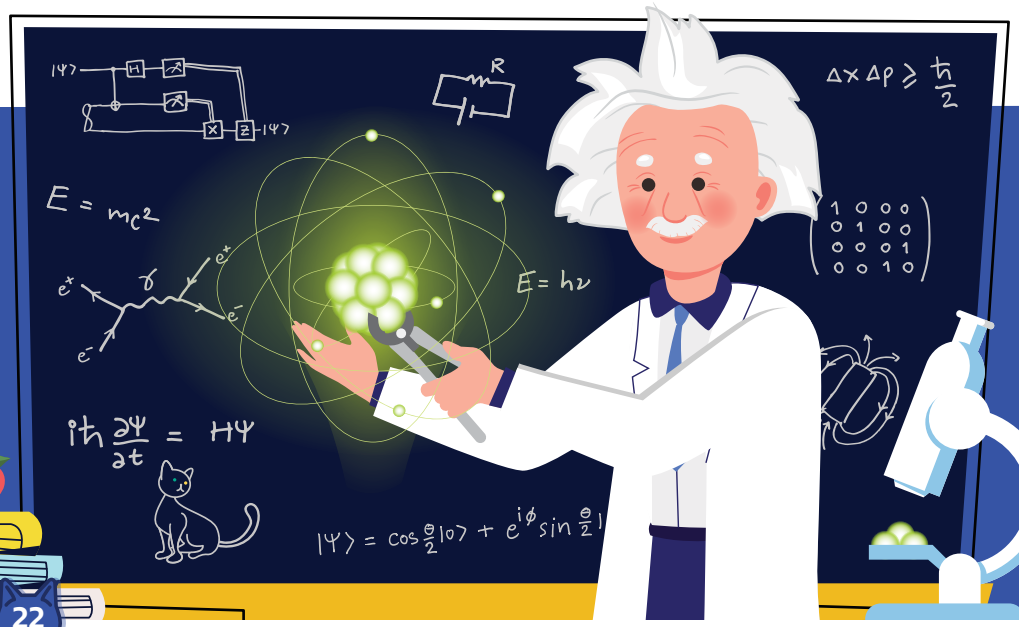
สภาวะพัวพันทางควอนตัม (quantum entanglement)

สภาวะพัวพันทางควอนตัมเป็นสภาวะที่อนุภาคควอนตัมตั้งแต่สองอนุภาคขึ้นไปมีความเชื่อมโยงกัน โดยเมื่อเกิดการกระทำใดขึ้นกับอนุภาคตัวหนึ่ง จะส่งผลกระทบให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกับอนุภาคตัวอื่นๆ ที่เชื่อมโยงกันโดยทันที แม้ว่าอนุภาคทั้งสอง (หรือมากกว่า) จะอยู่ห่างไกลกันคนละสุดขอบจักรวาลก็ตาม นักฟิสิกส์นำแนวคิดสภาวะพัวพันทางควอนตัมนี้ไปใช้ประโยชน์ในการพัฒนา**การคำนวณเชิงควอนตัม (quantum computing)** และ**การกระจายกุญแจเข้ารหัสเชิงควอนตัม (quantum key distribution)** เพื่อใช้เข้ารหัสการสื่อสาร

เทคโนโลยีควอนตัมยุคที่ 2

ผลจากการเข้าใจธรรมชาติของคลื่นแสงและอนุภาคควอนตัม รวมถึงการกำเนิดทฤษฎีควอนตัม ทำให้เกิดนวัตกรรมต่างๆ มากมายในศตวรรษที่ 20 เช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และวัสดุใหม่ๆ เทคโนโลยีที่เกิดขึ้นนี้ถือได้ว่าเป็นผลผลิตจาก**เทคโนโลยีควอนตัมยุคที่ 1**

ตลอดช่วงเวลากว่าครึ่งศตวรรษที่ผ่านมา นักฟิสิกส์ได้พัฒนาความรู้และขีดความสามารถในการควบคุมอนุภาคควอนตัม เช่น การจัดการสถานะของโฟตอน การกักอะตอม และการควบคุมอิเล็กตรอน ความสามารถในการเข้าถึงและจัดการอนุภาคควอนตัมได้นำไปสู่การใช้ประโยชน์ในรูปแบบใหม่ เกิดเป็นแนวโน้มทางเทคโนโลยียุคใหม่ที่เรียกกันว่า **เทคโนโลยีควอนตัมยุคที่ 2 (quantum technology 2.0)**



สิ่งใหม่ๆ ที่จะเกิดขึ้นในเทคโนโลยีควอนตัมยุคที่ 2 จะเป็นก้าวกระโดดทางเทคโนโลยีที่จะสร้างความเปลี่ยนแปลงให้แก่โลก อาทิ การเสริมประสิทธิภาพการคำนวณด้วย**การคำนวณเชิงควอนตัม** การเสริมความปลอดภัยในการสื่อสารด้วย**การสื่อสารเชิงควอนตัม (quantum communication)** การใช้ความสามารถในการควบคุมอะตอมในการสร้าง**นาฬิกาอะตอม (atomic clock)** การสร้างเครื่องวัดและเซนเซอร์ตรวจวัดต่างๆ ที่มีความแม่นยำสูง

โลกของ**เทคโนโลยีควอนตัมยุคที่ 2** จะนำเราก้าวล้ำไปสู่การค้นพบทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีต่างๆ อีกมากมาย เช่น การนำการคำนวณเชิงควอนตัมและเซนเซอร์ทางควอนตัมไปใช้ในการวิจัยทางการแพทย์เพื่อศึกษาโครงสร้างยาและปฏิกิริยาทางชีวเคมีภายในร่างกายมนุษย์ หรือแม้กระทั่งการนำคอมพิวเตอร์เชิงควอนตัมไปใช้ในเรื่องของการสร้างเครื่องจักรกลที่มีสมรรถนะในการเรียนรู้และประมวลผลข้อมูลเพื่อประโยชน์ในการวิเคราะห์งานด้านต่างๆ อาทิ การจัดระเบียบข้อมูล การวิเคราะห์พฤติกรรมผู้บริโภค และการช่วยเสนอทางเลือกที่เหมาะสม

การคำนวณเชิงควอนตัม

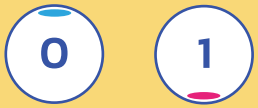
การคำนวณเชิงควอนตัมคืออะไร

นักฟิสิกส์นำแนวคิดเรื่องที่อนุภาคควอนตัมสามารถอยู่ใน 2 สถานะ (หรือมากกว่า) ได้ในเวลาเดียวกันมาใช้ใน**การคำนวณเชิงควอนตัม (quantum computing)** ซึ่งเป็นรูปแบบการประมวลผลทางคณิตศาสตร์แบบใหม่ที่ใช้หลักการสภาวะควบรวมทางควอนตัมในลักษณะของการควบรวมกันของชุดคำสั่ง ส่งผลให้การประมวลผลชุดคำสั่งหลายชุดเสร็จสิ้นภายในครั้งเดียว จึงช่วยร่นระยะเวลาของการประมวลผลให้เร็วขึ้นได้หลายเท่าตัว นอกจากนี้ยังค้นพบอีกว่า สภาวะพัวพันทางควอนตัมสามารถนำมาใช้เป็นโครงสร้างของตรรกะการประมวลผลที่เป็นชุดคำสั่งที่เกี่ยวกับเงื่อนไข (conditional statement)

จากหลักการของปรากฏการณ์ทางควอนตัมทั้งสองแบบที่กล่าวมา นักวิทยาศาสตร์จึงสร้างเครื่องจักร (machine) ที่มีความสามารถประมวลผลเชิงควอนตัมได้เป็นผลสำเร็จ ซึ่งเครื่องจักรดังกล่าวรู้จักกันในชื่อ **คอมพิวเตอร์ควอนตัม (quantum computer)**

การคำนวณโดยทั่วไป

บิต (bit) ใช้ในการ "แสดงค่าของข้อมูล" ที่อยู่ในรูปของเลขฐานสอง

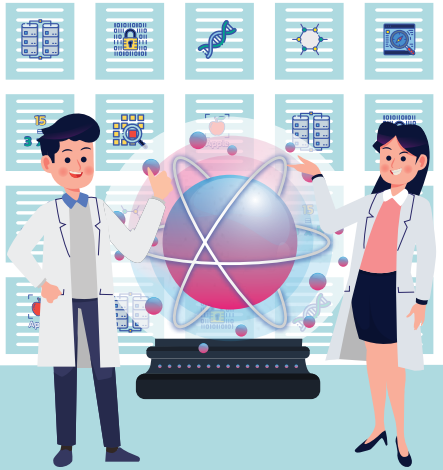


การคำนวณแบบควอนตัม

คิวบิต (qubit) ใช้ในการแสดงค่าของข้อมูลที่อยู่ในรูปของ "สภาวะควบรวมของบิต 0 และบิต 1 "

การคำนวณเชิงควอนตัมทำอะไรได้บ้าง

คอมพิวเตอร์ควอนตัมไม่ได้เข้ามาแทนที่คอมพิวเตอร์ทั่วไป แต่จะเข้ามาเสริมการทำงานเฉพาะทางบางอย่างที่คอมพิวเตอร์ทั่วไปต้องใช้เวลาประมวลผลยาวนาน โดยนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในงานดังต่อไปนี้



- การจัดลำดับดีเอ็นเอ (DNA sequencing)
- การจัดกลุ่มข้อมูลขนาดใหญ่ (big data segmentation)
- การค้นหาข้อมูลในระบบฐานข้อมูล (database search)
- การจำลองโครงสร้างโมเลกุล (simulation for molecular structure)
- การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization)
- การแยกตัวประกอบทางคณิตศาสตร์ (factorization)
- การเข้ารหัสและการถอดรหัสข้อมูล (encryption & decryption)
- ความสามารถในการเรียนรู้ได้ด้วยตัวเอง (unsupervised learning)

การสื่อสารด้วยเทคโนโลยีควอนตัม

การสื่อสารที่มีการรักษาความปลอดภัยของข้อมูลจะต้องมี**การเข้ารหัสข้อมูล (encryption)** ที่ต้นทางก่อนส่งไปยังผู้รับ โดยนำข้อมูลตั้งต้นและชุดตัวเลขสุ่มมาทำหน้าที่เป็น**กุญแจ (key)** ในการเข้าสูตรทางคณิตศาสตร์ ข้อมูลที่ผ่านกระบวนการเข้ารหัสแล้วจึงจะถูกส่งออกไปผ่านทางช่องทางการสื่อสารต่างๆ เช่น ส่งด้วยสัญญาณวิทยุ หรือผ่านระบบใยแก้วนำแสง ซึ่งผู้รับปลายทางจะถอดรหัสโดยใช้กุญแจชุดเดียวกันกับผู้ส่ง เพื่อแปลงค่าคืนออกมาเป็นข้อมูลตั้งต้น

การสื่อสารในรูปแบบนี้จะใช้กุญแจเดิมในการเข้ารหัสไปเรื่อยๆ จนกว่าจะมีการตกลงเปลี่ยนกุญแจใหม่ ซึ่งก่อให้เกิดช่องโหว่ที่ผู้ดักฟังสามารถศึกษารูปแบบของการเข้ารหัสและเดาค่ากุญแจได้ในที่สุด ดังนั้นระดับความปลอดภัยในการเข้ารหัสจากการใช้กุญแจเดิมซ้ำๆ กันจึงขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของสูตรทางคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้ในการเข้ารหัส คือยิ่งซับซ้อนก็ยิ่งทำให้การเจาะรหัสกินเวลายาวนาน จนอาจเกินช่วงระยะเวลาที่ข้อมูลสำคัญนั้นยังมีผลในการใช้งาน

แนวคิดและการเติบโตของคอมพิวเตอร์ควอนตัมที่มีศักยภาพในการเรียนรู้และถอดรหัสของข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว จะส่งผลกระทบต่อความเชื่อมั่นในเรื่องความปลอดภัยของการสื่อสาร จึงเริ่มมีการนำทฤษฎีควอนตัมเข้ามาประยุกต์ใช้ในการเสริมสร้างความปลอดภัยให้อยู่ในขั้นสูงสุด โดยนำหลักความไม่นอนของไฮเซนแบร์กที่กล่าวว่า "การวัดค่าตัวแปรหนึ่งในระบบควอนตัม ส่งผลต่อค่าความไม่แน่นอนของการวัดค่าของอีกตัวแปรหนึ่ง" ประกอบกับนำหลักการเกี่ยวกับสภาวะควบรวมทางควอนตัมและสภาวะพัวพันของโฟตอนมาประยุกต์สู่การใช้โฟตอนในการส่งกุญแจด้วยวิธีทางควอนตัมที่เรียกว่า **การกระจายกุญแจเข้ารหัสเชิงควอนตัม หรือ QKD (quantum key distribution)** ซึ่งช่วยสร้างความเชื่อมั่นในการตรวจจับการดักฟังข้อมูล โดยหากมีการดักฟังเกิดขึ้น ทั้งผู้ส่งและผู้รับปลายทางจะรู้ตัวและเปลี่ยนกุญแจใหม่ ทำให้ผู้ดักฟังไม่สามารถรับรู้ข้อมูลสำคัญจากการดักฟังข่าวสารได้

นาฬิกาอะตอม

นาฬิกาเป็นเครื่องมือที่ใช้บอกเวลา แต่ทราบหรือไม่ว่าเวลาที่เราได้มานั้นมีความถูกต้องแม่นยำเพียงใด และนาฬิกาที่เราใช้นั้นบอกเวลาได้แม่นยำหรือไม่

ภายในนาฬิกาทุกเรือนจะมีอุปกรณ์สำคัญที่ทำให้เกิดการสั่นอย่างเป็นจังหวะ ซึ่งใช้เป็นแหล่งกำเนิดของความถี่ และมีกลไกหรือวงจรเพื่อทำให้เกิดการนับเวลาเป็นวินาที นาที และชั่วโมง

นาฬิกาแบ่งได้เป็น 4 ประเภท ดังนี้

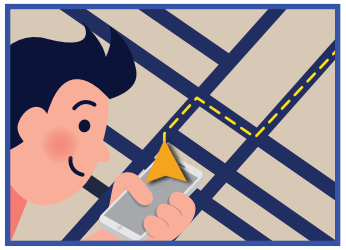
- **นาฬิกาดาราศาสตร์** อาศัยช่วงเวลาการโคจรของดาวต่างๆ
- **นาฬิกาเชิงกล** อาศัยช่วงเวลาการสั่นของกลไกเชิงกล
- **นาฬิกาไฟฟ้า** อาศัยช่วงเวลาการสั่นของผลึกควอตซ์
- **นาฬิกาอะตอม** อาศัยช่วงเวลาการสั่นที่เกิดจากการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานของอะตอม

นาฬิกาที่มีความแม่นยำสูงคือนาฬิกาที่อ้างอิงเวลามาจากนาฬิกาอะตอม โดยนาฬิกาอะตอมที่แม่นยำที่สุดในปัจจุบันจะใช้เวลา 13,000,000,000 ปี (หนึ่งหมื่นสามพันล้านปี) จึงจะทำให้เวลาในการนับคลาดเคลื่อนไป 1 วินาที

ปัจจุบันนิยามของเวลาอ้างอิงมาจากคาบของการแผ่รังสีที่เป็นผลมาจากการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานของอะตอมซีเซียม 133 (Cesium-133) โดยในการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานจะเกิดการแผ่รังสีด้วยคาบการสั่นจำนวนทั้งสิ้น 9,192,631,770 ครั้ง ใน 1 วินาที เวลาที่อ้างอิงด้วยวิธีการนี้ถูกใช้เป็นมาตรฐานเวลาโลก ซึ่งรู้จักกันในชื่อของ **"นาฬิกาอะตอม"**

เซนเซอร์ทางควอนตัม (quantum sensor)

เนื่องจากระดับชั้นพลังงานของอะตอมนั้นมีความอ่อนไหวกับสิ่งแวดล้อมรอบข้าง เช่น สนามแม่เหล็ก สนามไฟฟ้า ทำให้เราสามารถนำนาฬิกาอะตอมไปประยุกต์ใช้งานเป็นเซนเซอร์ทางควอนตัม เช่น



เซนเซอร์วัดการเคลื่อนไหว (inertial measurement sensor) นำไปประยุกต์ใช้งานสำหรับการติดตามการเคลื่อนไหวที่มีความละเอียดสูง

เซนเซอร์วัดสนามแม่เหล็ก (atomic magnetometer) นำไปใช้ในการสำรวจทางธรณีวิทยา เฝ้าระวังปรากฏการณ์แผ่นดินไหวและภูเขาไฟระเบิด

เวลามาตรฐานที่เทียบเคียงมาจากนาฬิกาอะตอมมีความละเอียดและแม่นยำสูง เพียงพอที่จะรองรับการบันทึกเวลาของการซื้อขายหลักทรัพย์ที่มีจำนวนหลายล้านรายการต่อวินาที

วิศวกรรมควอนตัม

วิศวกรรมควอนตัม (quantum engineering) คือกระบวนการแบบใหม่ที่จะเชื่อมโยงองค์ความรู้ในภาคการศึกษาให้ไปสู่ภาคอุตสาหกรรม โดยวิศวกรรมควอนตัมจะผสานความรู้ในทุกๆ แขนง เช่น ทฤษฎีควอนตัม คณิตศาสตร์ และใช้ความพยายามเชิงวิศวกรรมมาพัฒนาต้นแบบในห้องทดลองเพื่อต่อยอดไปสู่นวัตกรรมที่สามารถใช้ได้จริง

ตัวอย่างของวิศวกรรมควอนตัมคือ

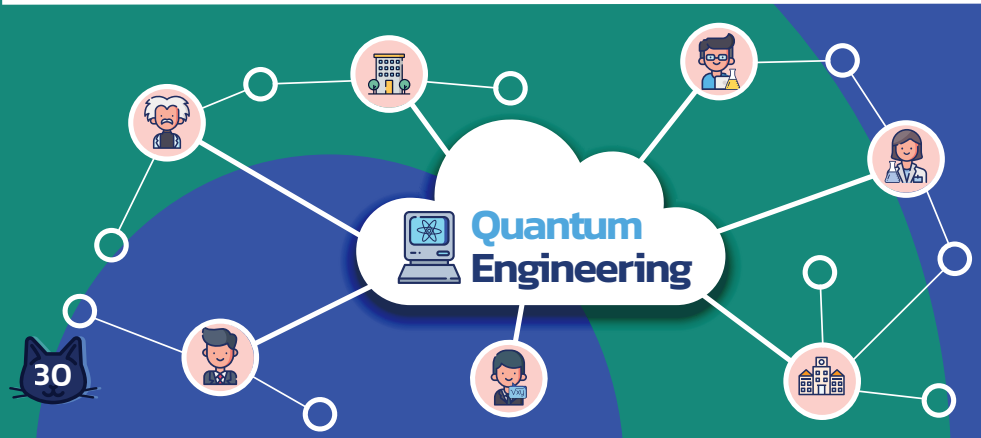
(1) การยกระดับความปลอดภัยในการสื่อสารด้วยการพัฒนาระบบโครงข่าย QKD

(2) การสร้างเซนเซอร์และเครื่องวัดทางควอนตัมที่มีประสิทธิภาพ เช่น เซนเซอร์ตรวจวัดการเคลื่อนไหว เซนเซอร์วัดสนามแม่เหล็ก เซนเซอร์สำหรับอุปกรณ์การแพทย์ และเซนเซอร์สำหรับตรวจสอบคุณภาพในโรงงานอุตสาหกรรม

(3) การสร้างคอมพิวเตอร์ควอนตัมที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในงานต่างๆ เช่น การจำลองทางชีวเคมีเพื่อการรักษาโรค การจำลองพันธะเคมีเพื่อการค้นคว้าวัสดุใหม่ๆ การจำลองการสังเคราะห์แสงของพืชเพื่อประโยชน์ในการเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร การใช้ขุมพลังของคอมพิวเตอร์ควอนตัมเพื่อเสริมสร้างสมรรถนะของการคำนวณและประมวลผลข้อมูล

ในปัจจุบันมีบริษัทผู้นำด้านเทคโนโลยีหลายแห่งทุ่มเททรัพยากร และแข่งขันกันเชิงวิศวกรรมควอนตัม เพื่อพัฒนาคอมพิวเตอร์ควอนตัม เช่น

- Google
- D-Wave
- IBM
- Toshiba
- Microsoft
- Airbus
- Alibaba
- Intel
- Hewlett Packard (HP)



เทคโนโลยีควอนตัม จากจินตนาการสู่นวัตกรรม

Frontier Research

ทฤษฎีทางฟิสิกส์ (theoretical physics)

นักทฤษฎี (ฟิสิกส์) — มหาวิทยาลัย

การจำลองลงบนระบบทางกายภาพ (physical implementation)

นักทดลอง (ฟิสิกส์) — มหาวิทยาลัย

Quantum Engineering

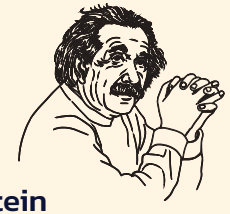
วิศวกรรมและการพัฒนาต้นแบบ (engineering and developing prototypes)

นักวิทยาศาสตร์ วิศวกร — มหาวิทยาลัย ศูนย์แห่งชาติ Startup

การผนวกทุกอย่างเพื่อให้สามารถนำมาใช้ได้จริง (integration for general use)

นักวิทยาศาสตร์ วิศวกร และอื่นๆ — Google Microsoft D-Wave IBM เป็นต้น

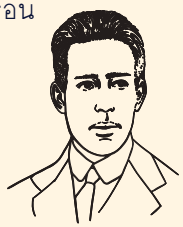
QUANTUM
TIMELINE



1900
Max Planck
อธิบายการแผ่รังสีของวัตถุดำ
(blackbody radiation)

1905
Albert Einstein
ได้เสนอแนวคิดของควอนไทเซชัน
มาอธิบายปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก
และได้รับรางวัลโนเบล
สาขาฟิสิกส์ในปี ค.ศ.1921

1913
Niels Bohr
เสนอแบบจำลองอะตอม
ของไฮโดรเจนที่มีการกำหนด
ชั้นพลังงานและรัศมีวงโคจร
ของอิเล็กตรอน



1923
Louis de Broglie
เสนอแนวคิดของความเชื่อมโยงกัน
ระหว่างความเป็นคลื่นกับอนุภาค
(wave-particle duality)

1926
Erwin Schrödinger
เสนอสมการคลื่นที่ใช้ในทางควอนตัม
ซึ่งต่อมาเรียกกันในชื่อ "สมการชเรอดิงเงอร์"
และได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์
ในปี ค.ศ.1933

Paul A.M. Dirac
ตีพิมพ์ทฤษฎีควอนตัมของแสง
และได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์
ในปี ค.ศ. 1933

1927
Friedrich Hund
ค้นพบปรากฏการณ์
การลอดอุโมงค์ควอนตัม

เทคโนโลยีควอนตัม 1.0

1948
Richard Feynman
Julian Schwinger
Sin-Itiro Tomonaga
เสนอทฤษฎีควอนตัมอิเล็กโทรไดนามิกส์
(quantum electrodynamics, QED)
โดยทั้งสามได้รางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์
ร่วมกันในปี ค.ศ. 1965

1982
Richard Feynman
ริเริ่มแนวคิดเกี่ยวกับ
คอมพิวเตอร์ควอนตัม

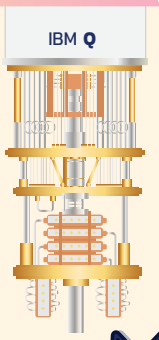
1984
Charles Bennett
และ **Gilles Brassard**
เสนอโปรโตคอลการทำ QKD
เป็นครั้งแรกซึ่งรู้จักกันในชื่อ BB84

1991
Artur Ekert
เสนอโปรโตคอลการทำ QKD
โดยใช้สภาวะพัวพันทางควอนตัม
ของโฟตอนซึ่งรู้จักกันในชื่อ E91

2009
Google D-Wave
ร่วมกันวิจัยและสร้าง
คอมพิวเตอร์ควอนตัม

เทคโนโลยีควอนตัม 2.0 กำลังใกล้เข้ามา...

2019
IBM
เปิดตัวเครื่องคอมพิวเตอร์
ควอนตัมสำหรับเชิงพาณิชย์
เป็นครั้งแรก



The mean king's problem
(ปัญหากวนใจราชาผู้ใจร้าย)

ณ ดินแดนอันไกลโพ้น มีเกาะแห่งหนึ่งที่ปกครองโดยพระราชาผู้ทรงโปรดปรานและรักแมวมาก.. พระองค์เคยได้ยินเรื่องราวของนักควอนตัมฟิสิกส์ที่ชื่อว่า "ชเรอดิงเงอร์" ผู้ซึ่งนำแมวมาใช้ในการทดลอง จึงเกิดความรู้สึกไม่ปลื้มนักฟิสิกส์อยู่ในใจลึกๆ

วันหนึ่งมีเรือของนักฟิสิกส์ชื่อ "อลิซ" เกิดอุบัติเหตุและไปเกยตื้นอยู่บนเกาะแห่งนั้น ทหารจึงจับตัวอลิซไปเข้าเฝ้าพระราชา.. เมื่อพระราชาทำการสอบสวนจนรู้ว่าอลิซเป็นนักฟิสิกส์ ด้วยความที่พระองค์ไม่ปลื้มนักฟิสิกส์อยู่แล้ว จึงได้หาข้ออ้างที่จะสั่งลงทัณฑ์อลิซ โดยจำลองสถานการณ์และตั้งปัญหาทางฟิสิกส์ที่ยังไม่มีผู้ใดเคยแก้ได้ให้อลิซทำการทดลองและแก้ปัญหา

ปัญหาทั้งหมดนั้นเกี่ยวกับการเดาสถานะของอนุภาคควอนตัม อลิซจะต้องทำการทดลองเพื่อเดาคำตอบให้ถูกต้องทุกครั้ง ซึ่งโอกาสที่จะเดาถูกมี 50% ในขณะที่อีก 50% เป็นโอกาสที่อลิซจะเดาผิดและจะถูกประหารชีวิตทันที อลิซนำแนวคิดสภาวะพัวพันทางควอนตัมมาใช้แก้ปัญหา ซึ่งช่วยให้อลิซเดาคำตอบได้ถูกต้องทุกครั้ง

นิทานเรื่องนี้มาจากการทดลองทางความคิดที่นำเสนอโดย **Lev Vaidman** ในปี ค.ศ. 1987[†] ซึ่งต่อมาแนวคิดนี้ถูกนำไปต่อยอดในการสร้างโปรโตคอล **QKD**[‡] สำหรับการสื่อสารเชิงควอนตัม

เอกสารอ้างอิง

[†] L. Vaidman, Y. Aharonov, and D.Z. Albert, "How to ascertain the values of σ_x, σ_y, and σ_z of a spin-1/2 particle", Physical Review Letters, 58 (14), p.1385 (1987).

[‡] J. Bub, "Secure key distribution via pre-and postselected quantum states", Physical Review A, 63 (3), p.032309 (2001).

เอกสารอ้างอิง (สืบค้นเมื่อเดือนมีนาคม 2562)

A. Acín et al., "The quantum technologies roadmap: a European community view", *New Journal of Physics*, **20** (8), p. 080201 (2018).

C. H. Bennett and G. Brassard, "Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing", *Proceedings of IEEE International Conference on Computers, Systems and Signal Processing*, **Vol. 175**, p. 8, New York (1984).

J. Bub, "Secure key distribution via pre-and postselected quantum states", *Physical Review A*, **63** (3), p. 032309 (2001).

J. P. Dowling, and G. J. Milburn, "Quantum technology: the second quantum revolution", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 361*, **no 1809**, p. 1655–1674 (2003).

A. K. Ekert, "Quantum cryptography based on Bell's theorem", *Physical Review Letters*, **67** (6), p. 661 (1991).

N. Gisin, and R. Thew, "Quantum communication", *Nature Photonics*, **1**, pp. 165–171 (2007).

R. P. Feynman, "Simulating physics with computers", *International Journal of Theoretical Physics*, **21** (6–7), pp. 467–488 (1982).

L. Vaidman, Y. Aharonov, and D.Z. Albert, "How to ascertain the values of σx, σy, and σz of a spin-1/2 particle", *Physical Review Letters*, **58** (14), p. 1385 (1987).

D-Wave's Quantum Computing, https://www.dwavesys.com/

Google's Quantum AI, https://ai.google/research/teams/applied-science/quantum-ai/

IBM 's Quantum Computing, https://www.research.ibm.com/ibm-q/

Microsoft's Quantum Computing, https://www.microsoft.com/en-us/quantum/

Quantum key distribution, https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_key_distribution

บรรณาธิการอำนวยการ

นายปฐม สวรรค์ปัญญาเลิศ	รองปลัดกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

กองบรรณาธิการบริหารชุดหนังสือวิทยาศาสตร์เพื่อประชาชน Science & Technology Book Series

นางกรรณิการ์ เฉิน	องค์การพิพิธภัณฑ์วิทยาศาสตร์แห่งชาติ
นางกุลประภา นาวานุเคราะห์	สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
ดร.นำชัย ชีววิวรรธน์	สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
นายจุมพล เหมะศิรินทร์	สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
นายประสิทธิ์ บุบผาวรรณา	สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ
นางสาวยุพิน พุ่มไม้	สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย
ดร.สุภรา กมลพัฒนะ	องค์การพิพิธภัณฑ์วิทยาศาสตร์แห่งชาติ
ดร.วิจิตรา สุริยกุล ณ อยุธยา	องค์การพิพิธภัณฑ์วิทยาศาสตร์แห่งชาติ

คณะทำงาน

นายปฐม สวรรค์ปัญญาเลิศ	รองปลัดกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
นางสาวภัทริยา ไชยมณี	สำนักงานปลัดกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
นางจินตนา บุญเสนอ	สำนักงานปลัดกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
นางสาวอัจฉราพร บุญญพนิช	สำนักงานปลัดกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
นางวลัยพร ร่มรื่น	กรมวิทยาศาสตร์บริการ
นางสาวนุชจรีย์ สัจจา	สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ
นางสาวยุพิน พุ่มไม้	สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย
นางสาววรรณรัตน์ วุฒิสาร	สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย
นางทัศนา นาคสมบูรณ์	องค์การพิพิธภัณฑ์วิทยาศาสตร์แห่งชาติ
นางชลภัสส์ มีสมวัฒน์	องค์การพิพิธภัณฑ์วิทยาศาสตร์แห่งชาติ
นางกุลประภา นาวานุเคราะห์	สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
นางจุฬารัตน์ นิ่มนวล	สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
นายประสิทธิ์ บุบผาวรรณา	สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ
นางสาววรรณพร เจริญรัตน์	สำนักงานคณะกรรมการนโยบายวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและนวัตกรรมแห่งชาติ
นายสรทัศน์ หลวงจอก	สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน)
นายจักรี พรหมบริสุทธิ์	สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน)
นางสาวปณิธา รื่นบันเทิง	สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน)
นางสาวศศิพันธุ์ ไตรทาน	สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)
นายนเรศ เข่งเงิน	สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร (องค์การมหาชน)
นายศุภฤกษ์ คฤหานนท์	สถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน)
นายกฤษกร รอดช้างเผื่อน	สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ (องค์การมหาชน)
นางสาวศรินภัสร์ ลีลาเสาวภาคย์	ศูนย์ความเป็นเลิศด้านชีววิทยาศาสตร์ (องค์การมหาชน)