

# วารสารฟิสิกส์ไทย

Thai Journal of Physics

วารสารสำหรับผู้รักและสนใจในแวดวงฟิสิกส์

ISSN 0857-1449

ปีที่ 26 ฉบับที่ 4 : ธันวาคม 2552 – กุมภาพันธ์ 2553

รางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ประจำปี 2009

2552 ปีดาราศาสตร์สากล

ปีแห่งปรากฏการณ์ดาราศาสตร์ไทย

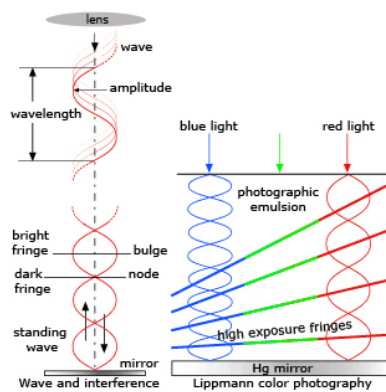
ระบบการศึกษาวิทยาศาสตร์ไทย ...จะไปถึงดวงดาว  
หรือจะเข้าขั้นมะเร็งระยะสุดท้าย ตอนที่ 3 (ตอนจบ):

เส้นทางสู่มหาวิทยาลัย

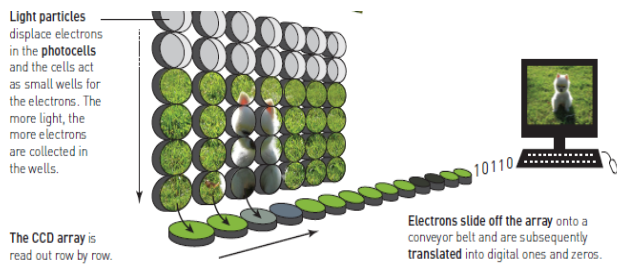
รูปประกอบจากบทความ “รางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์  
ประจำปี 2009” หน้า 4 - 21



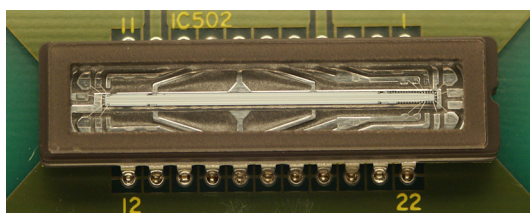
รูปที่ 1



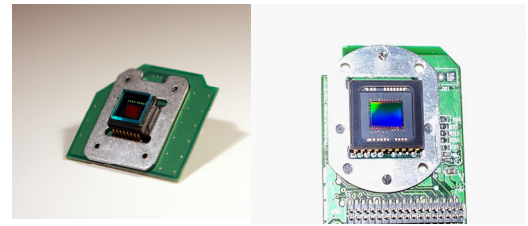
รูปที่ 13



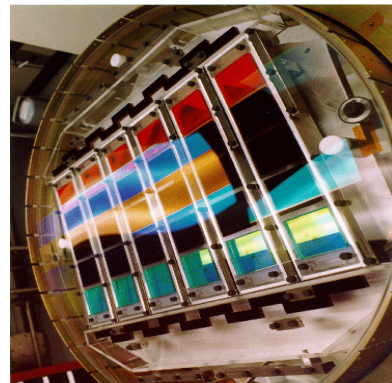
รูปที่ 15



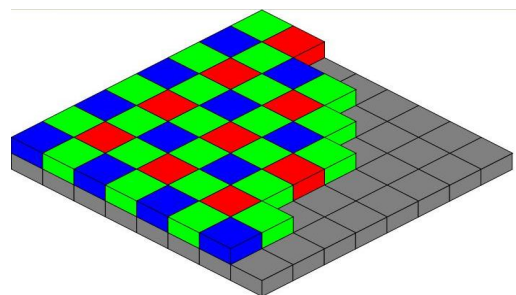
รูปที่ 23



รูปที่ 24

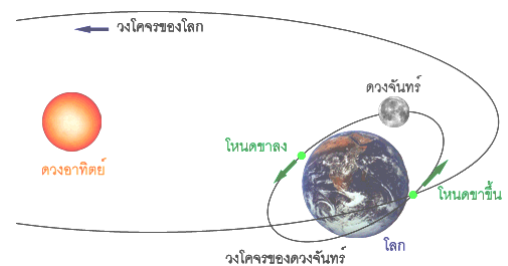


รูปที่ 25



รูปที่ 26

รูปประกอบจากบทความ “2552 ปีดาราศาสตร์สากล ปี  
แห่งปรากฏการณ์ดาราศาสตร์ไทย” หน้า 27 – 29



รูปที่ 1

## สารบัญ

|                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------|----|
| สวัสดิ์                                                     | 1  |
| สรุปข่าว                                                    | 2  |
| รางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ประจำปี 2009                          | 4  |
| พรเทพ นิศามณีพงษ์                                           |    |
| ระบบการศึกษาวิทยาศาสตร์ไทย ...จะไปถึงดวงดาว                 | 22 |
| หรือจะเข้าขั้นมะเร็งระยะสุดท้าย ตอนที่ 3 (ตอนจบ):           |    |
| เส้นทางสู่มหาวิทยาลัย                                       |    |
| เฉลิมพล รุจิณรินทร์, สิริพัฒน์ ประโทนเทพ                    |    |
| 2552 ปีดาราศาสตร์สากล ปีแห่งปรากฏการณ์ดาราศาสตร์ไทย         | 27 |
| ศิรามาศ โกมลจินดา                                           |    |
| เหลี่ยมเพชรเม็ดงามวิชาแม่เหล็กไฟฟ้า: ตอนที่ 6 ศักย์เวกเตอร์ | 30 |
| ชาญกิจ กันฉ่อง, ศักดิ์สิทธิ์ สงวนผล                         |    |



## สวัสดิ์

กลับมาพบกันอีกครั้งหนึ่งกับวารสารฟิสิกส์ไทย ซึ่งอาจจะล่าช้าไปบ้าง ทั้งนี้สืบเนื่องจากสาเหตุหลายประการ ซึ่งประการหลักสองประการคงจะเป็นหน้าที่การงานประจำของกองบรรณาธิการ ที่มีความจำเป็นต้องเดินทางบ่อยขึ้นทั้งในและต่างประเทศ สมทบด้วยปัญหาสุขภาพที่เกิดขึ้นกับสมาชิกของกอง บก. ในช่วงที่ผ่านมา ซึ่งทางกองบรรณาธิการก็ต้องขออภัยท่านผู้อ่านมา ณ ที่นี้ และทางกอง บก.ก็จะพยายามอย่างเต็มที่ที่จะไม่ให้เกิดเหตุการณ์เช่นนี้อีก

สำหรับในฉบับนี้ทางวารสารฟิสิกส์ไทยมีบทความที่น่าสนใจหลายบทความ อาทิ เรื่องราวโดยละเอียดของรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ประจำปี 2009 ซึ่งได้ให้แก่ผู้ที่ประดิษฐ์คิดค้นไฟเบอร์ออปติกและเซ็นเซอร์ CCD เรื่องของระบบการศึกษาวิทยาศาสตร์ของประเทศไทยซึ่งสืบเนื่องมาจนถึงบทสรุปในตอนสุดท้ายแล้วในฉบับนี้ และบทความทางด้านดาราศาสตร์ที่ได้รวบรวมเหตุการณ์ทางด้านดาราศาสตร์สำคัญๆ ที่เกิดขึ้นให้สังเกตได้ในประเทศเราในช่วงรอบปีที่ผ่านมา ซึ่งจากประมวลภาพที่นำเสนอจะเห็นได้ชัดเจนว่าสังคมภาคประชาชนทั่วไปมีความสนใจต่อเรื่องราวในแวดวงวิทยาศาสตร์เพิ่มมากขึ้น ซึ่งทางกอง บก. เห็นว่าเป็นเรื่องที่น่ายินดีและเป็นนิมิตรที่ดีอย่างยิ่งต่อวงการวิทยาศาสตร์ของไทย

กองบรรณาธิการ

กองบรรณาธิการ ชาญกิจ กันฉ่อง, ศุภกร รักใหม่, วันทนา คล้ายสุบรรณ, ฉัตรชัย ศรีนิติวรวงศ์, นฤมล สุวรรณจันทร์ดี, พวงรัตน์ ไพเราะ, พรทิพย์ สุดเมือง, ศิรามาศ โกมลจินดา, พรรณ วัฒนกลวิษฐ์ หัวหน้ากองบรรณาธิการ ประพนธ์ คล้ายสุบรรณ ที่ปรึกษากองบรรณาธิการ สมสร สิงขรัตน์ ภาพและออกแบบปก ประพนธ์ คล้ายสุบรรณ เลขานุการกองบรรณาธิการ ประพนธ์ คล้ายสุบรรณ จำนวนพิมพ์ 2,000 เล่ม

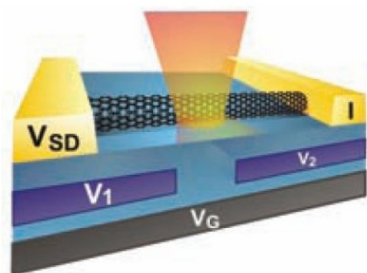
ติดต่อกองบรรณาธิการ วารสารฟิสิกส์ไทย สมาคมฟิสิกส์ไทย อาคารสุรพัฒน์ 3 ถนนมหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000 โทรศัพท์: 044-217040 โทรสาร: 044-217047 วารสารฟิสิกส์ไทย เป็นวารสารราย 3 เดือน มีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่สาระ ข่าวสาร และเป็นสื่อสัมพันธ์ในมวลหมู่สมาชิกและผู้สนใจในแวดวงฟิสิกส์ ส่งเสริมให้เกิดการแลกเปลี่ยนข้อมูลและประสบการณ์เกี่ยวกับฟิสิกส์ในวงกว้างที่สร้างสรรค์ โดยความคิดเห็นและทัศนะที่ปรากฏอยู่ในบทความต่างๆ เป็นเฉพาะของผู้เขียนแต่ละท่าน สมาคมฟิสิกส์ไทยไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

Website: [www.thps.org](http://www.thps.org) ผู้ดูแล: ณัฐวุฒิ สุระเดช ติดต่อ: [info@thps.org](mailto:info@thps.org)

คณะกรรมการสมาคมฟิสิกส์ไทย ประจำปี 2552 – 2554 นายกสมาคมฯ รศ. ดร. วีระพงษ์ แพสุวรรณ อุปนายก รศ. ดร. วิทยา อมรกิจบำรุง เลขานุการ ผศ. ดร. ประยูร ส่งศิริฤทธิกุล เหรัญญิก ศ. ดร. ชูกิจ ลิ้มปีจันทร์ นายทะเบียน ดร. สาโรช รุจิวรรณ บรรณาธิการ วารสารฟิสิกส์ไทย ดร. ประพนธ์ คล้ายสุบรรณ ปฎิคม ผศ. ดร. ศุภกร รักใหม่ ประธานสัมพันธ์ ดร. สัมภาส นิดเกตุ รองเลขานุการ ดร. ขรรค์ชัย โกศลทองกี กรมการ ผศ. ดร. ขจรยศ อยู่ดี, ผศ. รัชนา ชินพิทักษ์, รศ. ดร. ชีววรรณ บุญญวรรณ, ผศ. ดร. ธนากร โอสดาจันทร์, ผศ. ดร. นิรันดร์ วิทอนันต์, ผศ. ดร. ขวัญ อารยะรัตนกุล, ดร. สิริพัฒน์ ประโทนเทพ, ดร. ณัฐพร นัทรแถม

## สรุปข่าว

### เพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยท่อนาโนคาร์บอน



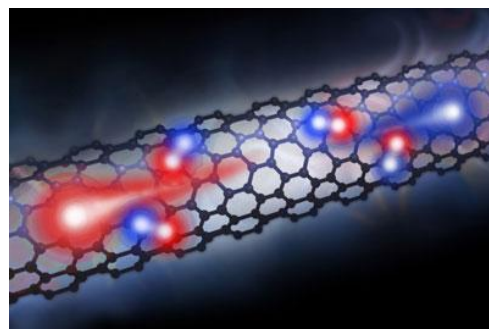
กลุ่มนักวิจัยจากมหาวิทยาลัยคอร์เนล (Cornell University) ประสบความสำเร็จในการคิดค้นเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์แบบใหม่ที่จะทำให้เรานำ

พลังงานแสงอาทิตย์มาเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าและคุ้มกว่าในปัจจุบัน ด้วยการนำสิ่งประดิษฐ์ที่เรียกว่า “ท่อนาโนคาร์บอน” (Carbon nanotube) มาประยุกต์ใช้

กระแสไฟฟ้าที่ถูกผลิตจากเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic) แบบเดิมที่ทำจากสารกึ่งตัวนำนั้นเกิดขึ้นเมื่อพลังงานจากโฟตอนหรือแสงอาทิตย์ตกกระทบบนแผ่นเซลล์ และถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำซึ่งอยู่ในชั้นพลังงานแถบวาเลนซ์ (Valence band) เมื่อได้รับพลังงานเพียงพออิเล็กตรอนก็จะเปลี่ยนชั้นพลังงานไปยังแถบการนำ (Conduction band) และจะทำให้เกิดที่ว่างขึ้นในแถบวาเลนซ์ที่เรียกว่า โฮล (Hole) โดยจะมีประจุเป็นบวก หลักการดังกล่าวนี้มีข้อจำกัดตรงที่ อิเล็กตรอน-โฮล ที่เกิดขึ้นจะมีแค่ 1 คู่ ต่อโฟตอน 1 ตัว ในขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์แบบที่ทำจากท่อนาโนคาร์บอนสามารถเพิ่มประมาณ อิเล็กตรอน-โฮล ได้หลายๆ คู่ ต่อโฟตอน 1 ตัว จึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า

Paul McEuen หัวหน้าทีมนักวิจัยจากคอร์เนล ได้รายงานถึงการออกแบบและสร้างเซลล์แสงอาทิตย์จากท่อนาโนคาร์บอนแบบชั้นเดียว (A Single-Walled Carbon Nanotube) ที่มีความหนาเพียง 1 อะตอมของคาร์บอน ยาว 3-4 ไมโครเมตร และมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1.5 - 3.6 นาโนเมตร โดยท่อนาโนคาร์บอนนี้จะวางอยู่บนฐานที่เป็นฉนวนไฟฟ้า และต่อกับขั้ว

อิเล็กโทรด 3 ขั้วดังรูปด้านบน เมื่อเราจ่ายศักย์ไฟฟ้าในปริมาณที่เหมาะสมให้กับขั้วอิเล็กโทรด ท่อนาโนคาร์บอนจะมีลักษณะคล้ายกับโฟโอดีไดโอด ที่ยอมให้กระแสไหลได้ทางเดียว (p-n junction photodiode)



ทีมนักวิจัยรายงานเพิ่มเติมถึงการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของกระแส จากการทดลองฉายพลังงานแสงเลเซอร์บวกกับการจ่ายศักย์ไฟฟ้าตามแนวแกนให้กับท่อนาโนคาร์บอน ซึ่งพบว่า กระแสที่เกิดขึ้นสามารถไหลได้อย่างอิสระและมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นทวีคูณที่อุณหภูมิต่ำกว่า 90 เคลวิน โดยกระแสที่เกิดขึ้นจะตอบสนองต่อศักย์ไฟฟ้าเป็นจังหวะ McEuen และ Gabor เชื่อว่า อิเล็กตรอนซึ่งถูกกระตุ้นจากโฟตอนที่เกิดขึ้นในท่อนาโนคาร์บอน จะมีพลังงานสูงกว่าอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นในเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วไป ทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานพอที่จะไปกระตุ้นอิเล็กตรอนในชั้นถัดไปหรือสูงกว่าได้ ซึ่งแตกต่างจากปกติที่โฟตอนจะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนชั้นพลังงานไปแค่หนึ่งระดับชั้นพลังงานเท่านั้น พวกเขาได้อธิบายเพิ่มเติมว่า จังหวะของกระแสที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงนั้นเกิดจากอิเล็กตรอนในระดับชั้นพลังงานย่อยได้รับพลังงานมากพอที่จะกระตุ้นอิเล็กตรอนตัวอื่น กระบวนการนำพลังงานที่ได้จากแสงอาทิตย์บวกกับพลังงานจากสนามไฟฟ้านี้ จึงเปรียบเสมือนการทำให้ อิเล็กตรอน 1 ตัว เปลี่ยนเป็นอิเล็กตรอนหลายๆ ตัวได้ ซึ่งอาจทำให้บรรลุเป้าหมายสำคัญในการนำแสงอาทิตย์มาใช้ให้คุ้มค่าที่สุด

ในยุคที่เราต้องช่วยกันอนุรักษ์และประหยัดพลังงานแบบนี้ เทคโนโลยีพลังงานทดแทนจึงเป็นทางออกที่น่าสนใจเป็น

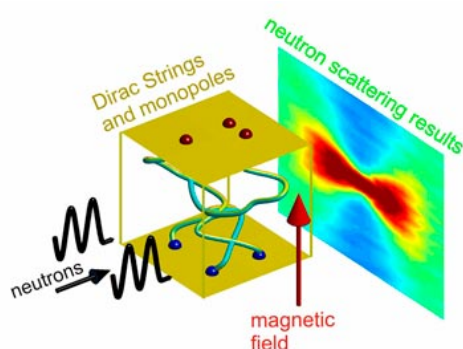
อย่างมาก ต่อไปเราอาจนำเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้ได้อย่างแพร่หลายและคุ้มค่ากว่าในปัจจุบันนี้ นอกเหนือจากเพียงแค่นำมาใช้แทนแบตเตอรี่ในเครื่องคิดเลข ติดตั้งบนหลังคาบ้านเพื่อใช้แทนพลังงานไฟฟ้า หรือใช้ทำเครื่องอบแห้ง

## ที่มา

[1] <http://physicsworld.com/cws/article/news/40332/>

[2] <http://www.sciencedaily.com/releases/2009/09/090910151927.htm>

## พบแม่เหล็กขั้วเดียวใน “Spin ice”



โดยปกติแม่เหล็กจะมีสองขั้ว คือขั้วเหนือและขั้วใต้ หากแยกแม่เหล็กรออกเป็นสองชิ้น แต่ละชิ้นก็จะทำให้เกิดขั้วเหนือและขั้วใต้ขึ้นใหม่ ไม่ว่าจะแบ่งออกเล็กจนถึงระดับอะตอมก็ไม่สามารถแยกขั้วเหนือออกจากขั้วใต้ได้

ในทางทฤษฎีนั้นเชื่อกันว่ามีแม่เหล็กอีกประเภทที่เรียกว่า แม่เหล็กขั้วเดียว (Magnetic monopole) ซึ่งยังไม่มีใครพบเจอทั้งจากการทดลองและจากธรรมชาติ แต่ก็มีหลายทฤษฎีที่ได้อธิบายไว้ หนึ่งในนั้นเป็นทฤษฎีของนักฟิสิกส์ชื่อดัง พอล ดิแรค (Paul Dirac) ซึ่งได้อธิบายไว้ในปี 1931 ในปัจจุบันทีมนักวิจัยจาก Helmholtz Centre in Berlin (HZB) ได้ค้นพบแม่เหล็กขั้วเดียวจากสารที่เรียกว่า “Spin ice” ซึ่ง Spin ice ที่ได้ค้นพบนี้มีลักษณะแตกต่างไปจากแม่เหล็กขั้วเดียวที่ดิแรคทำนายไว้ด้วยพลศาสตร์ไฟฟ้าควอนตัม (Quantum electrodynamics)

ทีมนักวิจัยจาก HZB นำโดยโจนาธาน มอร์ริส (Jonathan Morris) ได้ศึกษาผลึก  $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$  ซึ่งเป็นผลึกที่มียูนิทเซลล์เป็นรูปทรง Tetrahedron ที่มีสปิน Dy สองตัวมีทิศชี้เข้าปยังกลาง

Tetrahedron และสปินอีกสองตัวมีทิศชี้ออก ลักษณะดังกล่าวถูกเรียกว่า Spin ice เนื่องจากการเรียงตัวของสปินมีลักษณะคล้ายกับอะตอมไฮโดรเจนในน้ำแข็ง แต่การจัดเรียงตัวนั้นจะมีความแตกต่างจากสารแม่เหล็กชนิดอื่น ซึ่งหากโครงสร้างของสปินในแต่ละ Tetrahedron ถูกกระตุ้นด้วยการกลับทิศทางของสปินจากด้านนอกเข้าด้านใน จะทำให้สตรึงเสียหายและฟลักซ์ของสนามแม่เหล็กจะแตกออกมาและจะประพัตตัวเป็นแม่เหล็กขั้วเดียวในที่สุด ทั้งนี้ทีมนักวิจัยของมอร์ริสได้ศึกษาการมีอยู่ของ Spin ice ด้วยการยิงนิวตรอนเข้าสู่ผลึกตัวอย่าง และศึกษารูปแบบการแทรกสอด (Interference pattern) ที่เกิดจากผลการกระเจิงของนิวตรอน ซึ่งเป็นนิวตรอนที่มีโมเมนต์แม่เหล็ก (Magnetic moment) อยู่ ผลการทดลองนี้สามารถยืนยันได้อย่างว่ามีแม่เหล็กขั้วเดียวอยู่จริง ทั้งยังพบว่าแม่เหล็กชนิดนี้เกิดขึ้นได้อย่างไรอีกด้วย

แต่เนื่องจากการที่แม่เหล็กขั้วเดียวที่ถูกค้นพบในครั้งนี้มีจุดกำเนิดที่แตกต่างไปอย่างมากจากที่ดิแรคทำนายไว้ ผลการค้นพบแม่เหล็กขั้วเดียวจาก Spin ice นี้จึงอาจไม่ช่วยให้นักวิทยาศาสตร์ไขปัญหาทฤษฎี Grand unification theory และทฤษฎีสตริง (String theory) ซึ่งเป็นทฤษฎีหนึ่งที่ทำนายถึงการมีอยู่ของแม่เหล็กขั้วเดียวได้ แต่จะเป็นก้าวสำคัญในการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตสาร Spintronics สำหรับสร้างหน่วยความจำแม่เหล็กที่มีขนาดเล็ก

## ที่มา

[1] <http://physicsworld.com/cws/article/news/40302>

[2] <http://www.sciencedaily.com/releases/2009/09/090903163725.htm>

# รางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ประจำปี 2009

พรเทพ นิศามณีพงษ์<sup>1</sup>

รางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ประจำปี 2009 ได้ถูกประกาศอย่างเป็นทางการในวันที่ 6 ตุลาคม 2009 โดยในปีนั้นพิจารณาให้กับงานวิจัย การสื่อสารเชิงแสง (Optical telecommunication) โดยการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแก้วนำแสงและการประดิษฐ์ CCD Sensor ผู้ที่ได้รับรางวัลมีด้วยกันสามคน คนแรก คือ ชาร์ลส์ เกา (Charles K. Kao) เกิดปี 1933 ปัจจุบันประจำอยู่ที่ Chinese University of Hong Kong, สาธารณรัฐประชาชนจีน และเกษียณจากที่นี่ในตำแหน่งอธิการบดีของมหาวิทยาลัยแห่งนี้ในปี ค.ศ. 1996 แต่ตอนที่เขาทำงานวิจัยนี้ อยู่ที่ Standard Telecommunication Laboratories Harlow, เครือจักรภพอังกฤษ เกาได้รับรางวัลเพียงครั้งหนึ่งซึ่งเท่ากับ 727,345 USD ส่วนอีกครั้งหนึ่งของรางวัลมอบให้แก่ผลงานประดิษฐ์ CCD Sensor ซึ่งผู้ที่ได้รับรางวัล คือ วิลลาร์ด บอยล์ (Willard S. Boyle) เกิดในปี 1924 และ จอร์จ สมิธ (George E. Smith) เกิดในปี 1930 ทั้งคู่เคยประจำอยู่ที่ห้องปฏิบัติการเบลล์ (Bell Laboratory, Murray Hill, New Jersey, USA) โดยได้รับรางวัลคนละหนึ่งในสี่ ซึ่งเท่ากับ 363,672.50 USD



**รูปที่ 1** ผู้ที่ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ 2009 จากผลงานที่สร้างวิวัฒนาการของเทคโนโลยีเชิงแสง ครั้งหนึ่งของรางวัลมอบให้กับ เกา (Charles K. Kao) จากการประดิษฐ์เส้นใยแก้วนำแสง ส่วนอีกครั้งหนึ่งของรางวัลมอบให้กับ บอยล์ (Willard S. Boyle) และ สมิธ (George E. Smith) ในรูปเรียงลำดับจากซ้ายไปขวา คือ เกา, บอยล์ และ สมิธ

จะเห็นได้ว่าคณะกรรมการพิจารณารางวัลโนเบลปีนี้พิจารณาผลงานที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศ หรือที่รู้จักกันว่า IT (Information Technology) ซึ่งมีผลกระทบเชิงเทคโนโลยีอย่างมากต่อชีวิตประจำวันของเรา และส่วนใหญ่ถูกคิดค้นพัฒนาจากเครื่องมือและอุปกรณ์อปโตอิเล็กทรอนิกส์ (Optoelectronic)



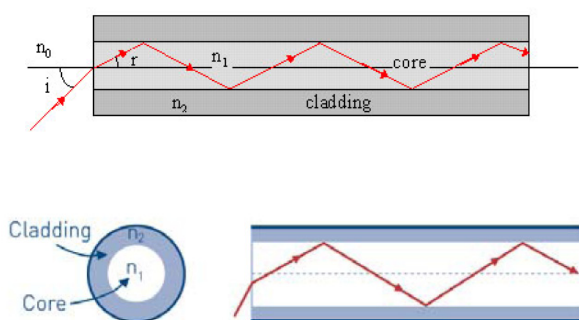
**รูปที่ 2** เกาถ่ายรูปโอบไหล่กับนักศึกษาที่ Chinese University of Hong Kong ตอนต้นปีการศึกษา 1994-1995

**รางวัลโนเบล 2009 ส่วนแรก: การพัฒนาเส้นใยแก้วนำแสง**

ผลงานแรกที่จะขอกล่าวถึงคือ ประวัติความเป็นมาของการวิจัยและการส่งผ่านสัญญาณแสงอย่างมีประสิทธิภาพผ่านเส้นใยแก้วนำแสง การส่งผ่านแสงผ่านตัวกลางดังกล่าวใช้แนวคิดของการสะท้อนกลับหมดภายในตัวกลาง (Total internal reflection) จากกฎของสเนลล์ เมื่อแสงเดินทางจากตัวกลางที่มีดัชนีหักเหที่มากกว่าไปยังตัวกลางที่มีดัชนีหักเหที่น้อยกว่า จะมีมุมวิกฤตที่ทำให้แสงสะท้อนกลับหมดและไม่สามารถทะลุผ่านไปยังอีกตัวกลางได้ แนวคิดนี้ได้ถูกเสนอขึ้นเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1841 โดย คอลลาดอน (D. Colladon) จากมหาวิทยาลัยเจนีวา (University of Geneva) ซึ่งได้ทำการสาธิตให้เห็นว่า แสงสามารถถูกนำให้เคลื่อนที่ภายในน้ำได้ ในเวลาเดียวกันนั้นที่ประเทศ

<sup>1</sup> ดร. ผู้อำนวยการฝ่ายของความรู้และต้นแบบ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฝรั่งเศส แบบิเน (Babinet) ได้ค้นพบปรากฏการณ์ที่คล้ายคลึงกันนี้ และยิ่งไปกว่านั้นยังสาธิตให้เห็นอีกว่าลำแสงสามารถถูกนำให้เดินทางในท่อที่ทำด้วยแก้วได้อีกด้วย โดยทั่วไปแล้วการค้นพบดังกล่าวมักจะถูกอ้างอิงถึงการสาธิตของ จอห์น ทินคัลล์ ที่ Royal Society ลอนดอน ในปี ค.ศ. 1854 ถ้าจะว่าไปแล้วปรากฏการณ์ดังกล่าวได้มีการอ้างอิงถึงในบันทึกของอียิปต์ หรือไมกั เมโสโปเตเมีย จากชิ้นส่วนของเครื่องประดับที่ส่องแสงสีแวววาว นอกจากนี้แสงสีต่างๆ ยังถูกนำไปตกแต่งในงานบันเทิงในรูปของน้ำพุที่มีสีสันต่างๆ ซึ่งอยู่ในบันทึกของงานแสดงในปารีสในปี ค.ศ. 1889



**รูปที่ 3** แสดงภาพการนำแสงในเส้นใยแก้ว เส้นใยแก้วประกอบด้วยแกนกลาง (Core) ที่มีดัชนีหักเห  $n_1$  และ Cladding ที่มีดัชนีหักเห  $n_2$  การสะท้อนกลับหมดภายในเกิดเมื่อ  $n_2 > n_1$  โดยทั่วไปขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนกลางประมาณ  $10 \mu\text{m}$  หรือ  $50 \mu\text{m}$  ขนาดทั้งหมดของเส้นใยแก้วคือ  $125 \mu\text{m}$  เนื่องจากเส้นใยแก้วนำแสงค่อนข้างเปราะบางจึงต้องมีพลาสติกเคลือบภายนอกอีกชั้นเพื่อเป็นการป้องกันการแตกหักภายใน

การประยุกต์ของการนำแสงด้วยเส้นใยแก้วในยุคแรกๆ ราวปี ค.ศ. 1920 ได้มีการทดลองนำแสงในหลอดแก้ว โดยมีวัตถุประสงค์ของการออกแบบเพื่อนำไปใช้ในอุปกรณ์แพทย์ที่ใช้ในการตรวจกระเพาะอาหาร ในด้านการทหาร หรือแม้กระทั่งการพัฒนาโทรทัศน์ในยุคแรกๆ ปัญหาของการใช้แก้วเพื่อนำแสงก็คือแสงไม่สามารถถูกนำอย่างมีประสิทธิภาพ และมักจะมีการรั่วทะลุออกมาภายนอกเมื่อมีรอยขีดข่วนหรือไมก็เมื่อเส้นใยแก้วมาสัมผัสกัน การคิดค้นพัฒนาที่นับว่าเป็นก้าวกระโดดที่สำคัญเริ่มขึ้นประมาณปี ค.ศ. 1950 เมื่อเริ่มมีการคิดค้นการเคลือบผิวภายนอกของผิวแก้ว ด้วยวิธีการดังกล่าวสามารถลดการรั่วออกของแสงได้อย่างมาก ในช่วงเวลาใกล้เคียงกันนี้ ฮอปกินส์ (Hopkins) และ คา

ปานิ (Kapany) ขณะที่ทำการวิจัยเรื่องนี้ที่ Imperial College ลอนดอน ประเทศอังกฤษ ประสบความสำเร็จในการสร้างมัดของเส้นใยแก้วหลายพันเส้นที่มีความยาว 75 ซม. โดยแต่ละเส้นเคลือบด้วย Cladding ได้เป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1954 ซึ่งปรากฏตีพิมพ์ในวารสาร Nature vol. 173, 39, (1954) หลังจากที่ได้ประสบความสำเร็จในการเคลือบผิวแก้วด้วย Cladding เส้นใยแก้วจึงเริ่มถูกพัฒนาและนำไปใช้ในอุตสาหกรรม ทฤษฎีของแสงที่ถูกนำภายในเส้นใยแก้วที่ริเริ่มโดย คาปานิ ได้ถูกปรับปรุงแก้ไขให้ดีขึ้นในเวลาต่อมาโดยชนิทเซอร์ (E. Snitzer) ปรากฏในวารสาร Journal of American Optical Society ปี ค.ศ. 1961. [ J. Opt. Am. Vol. 51, 491, (1961)]

ย่านของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในการสื่อสารส่งผ่านข้อมูลอยู่ในช่วงของ Near IR (Infrared) หรือไมก็ UV (Ultraviolet) การส่งผ่านข้อมูลที่มีความเร็วสูงในย่านของการใช้งานเป็นความถี่ที่เป็น High signal modulation ในปี ค.ศ. 1880 เบลล์ (Alexander Graham Bell) ได้จดสิทธิบัตรของ Air-based optical telephone ซึ่งรู้จักกันในนาม Photophone โดยการโฟกัสแสงอาทิตย์บนกระจกราบที่มีการสั่นด้วยเสียง แสงที่สะท้อนออกจะถูกส่งไปยัง Detector ซึ่งประกอบด้วยซีลีเนียม (Selenium) ที่ Couple กับเครื่องรับโทรศัพท์ แนวคิดเริ่มอันนี้ได้ถูกพัฒนาต่อมา โดยมีสิทธิบัตรอันหนึ่งที่จดโดยกลุ่มญี่ปุ่นได้เสนอแนวคิดที่ใช้ควอตซ์ (Quartz) เป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณ ในช่วงปี 1950 นับได้ว่าเป็นช่วงเวลาที่มีการวิจัยและพัฒนาการสื่อสารเชิงแสง (Optical telecommunication) อย่างค่อนข้างตื่นตัว

เมื่อพูดถึงการสื่อสาร เมื่อประมาณ 100 ปีที่แล้ว มาร์โคนิ (Marconi) และ บราวน์ (K.F. Braun) ก็ได้รับรางวัลโนเบลจากการคิดพัฒนาเทคโนโลยีการสื่อสารที่ไร้สาย ในช่วงเวลาต่อมาประมาณ 50 ปีที่แล้วก็ได้มีการพัฒนาการสื่อสารทางอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic communication) และการสื่อสารวิทยุ (Radio communication) อย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง สายเคเบิลใต้น้ำพาดผ่านมหาสมุทรแอตแลนติกได้เริ่มวางในปี ค.ศ. 1956 หลังจากดาวเทียมสื่อสารดวงแรกถูกส่งออกไปในปี ค.ศ. 1958 การสื่อสารผ่านดาวเทียมก็เริ่มครอบคลุมขึ้น การวิจัยด้านสื่อสารมักจะมุ่งเน้นในย่านคลื่นวิทยุในช่วงความยาวคลื่นสั้นๆ กล่าวคือในย่านมิลลิเมตร โดยต้องการเพิ่มความเร็วในการส่งผ่านข้อมูล ส่วน

คลื่นที่มีความยาวคลื่นมากไม่สามารถส่งผ่านได้ง่ายในอากาศ การวิจัยในยุคนี้จึงเน้นในเรื่องของการออกแบบ ตัวนำคลื่น (Waveguide) ที่สามารถใช้งานได้ในการสื่อสาร

การพัฒนาด้านการสื่อสารเชิงแสงเริ่มมีก้าวกระโดดอีกครั้งหลังจากที่มีการคิดค้นและผลิตแสงเลเซอร์ออกมา เลเซอร์ถูกพัฒนาขึ้นมาราวปี 1960 โดย เทนเนส (C.H. Townes), บาสอฟ (N.G. Basov) และ โปรคอฟ (A.M. Prokhorov) ถูกเสนอให้ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี ค.ศ. 1964 จากผลงานดังกล่าว หลังจากนั้น ไมมาน ไมมาน (T.H. Maiman) ได้แสดงให้เห็นความเป็นไปได้ที่จะทำพัลส์เลเซอร์ (Pulse Laser) จากผลึกทับทิม (Ruby) และ ในเวลาเดียวกันนั้นเอง จาเวน (A. Javan) สามารถสร้างเลเซอร์คลื่น-ต่อเนื่อง (Continuous-wave laser) โดยใช้ก๊าซผสมของ ฮีเลียม-นีออน เป็นคนแรก ในช่วงการคิดค้นและพัฒนาเดียวกันนี้ ก็มีหลายคนที่ยกย่องสร้างเลเซอร์จากสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor laser) แต่ไม่สามารถผลิตกันเข้าสู่อุตสาหกรรมได้ เนื่องจากพัลส์เลเซอร์ของพวกสารกึ่งตัวนำต้องใช้กระแสสูง ความร้อนที่เกิดขึ้นจึงทำให้มีปัญหาในทางปฏิบัติที่อุณหภูมิห้อง จนกระทั่งหลายปีต่อมาปัญหาดังกล่าวนี้สามารถแก้ไขได้เมื่อเราสามารถสังเคราะห์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างหลายชั้น (Heterostructure) ขึ้นมา จึงทำให้อัลเฟอร์อฟ (Z.I. Alferov) และ เครเมอร์ (H. Kremer) ได้รับรางวัลโนเบลในปี 2000 จากผลงานดังกล่าว

หลังจากที่มนุษย์สามารถพัฒนาแหล่งกำเนิดของสัญญาณเพื่อใช้ในการสื่อสารแบบออปโต-อิเล็กทรอนิกส์ (Opto-electric telecommunication) จากแสงเลเซอร์ ปัญหาที่ตามมาคือการหาตัวกลางที่จะใช้ส่งสัญญาณแสงอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งก็ได้มีการพัฒนาควบคู่ไปกับแหล่งกำเนิดสัญญาณในช่วงราวๆ ปี ค.ศ. 1960 ปัญหาใหญ่ของไฟเบอร์นำแสงคือประสิทธิภาพของการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแก้วนำแสง เนื่องจากคุณลักษณะเฉพาะของเส้นใยแก้วนำแสงเองมีการลดทอน (Attenuation) ก่อนข้างสูง สัมประสิทธิ์ของการลดทอน ( $\alpha$ ) ในหน่วย เดซิเบล/เมตร (dB/m) สามารถเขียนเป็นสูตรได้ดังนี้

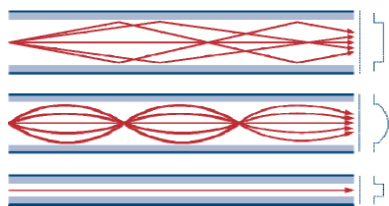
$$\alpha = \frac{10}{L} \log_{10} \frac{P(0)}{P(L)},$$

ในที่นี้  $P(0)$  คือ กำลังขาเข้า และ  $P(L)$  คือ กำลังขาออก และ  $L$  คือ ความยาวของสายไฟเบอร์

กำลังการลดทอนของสายไฟเบอร์ในยุคแรกมีค่าประมาณ 1000 dB/m ซึ่งหมายความว่า 1% ของกำลังของแสงเท่านั้นที่สามารถถูกส่งผ่านไปสายไฟเบอร์ที่มีความยาว 20 เมตร ทางเลือกในยุคแรกๆ ที่พยายามหาวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพของการส่งผ่านแสงในตัวกลางวิธีหนึ่งก็คือ การผ่านเลนส์เป็นช่วงๆ หรือ ไม่ก็ผ่านท่อแก้วที่บรรจุแก๊สเจือจางที่ใช้เกรเดียนต์ของอุณหภูมิ (Gradient temperature) ควบคุมการโฟกัสของแสง อย่างไรก็ตามวิธีนี้ไม่พบความสำเร็จเท่าที่ควร ได้มีความพยายามที่จะคิดค้นหาตัวนำคลื่น (Waveguide) แบบต่างๆ อย่างเช่น คาร์โบวีก (A. E. Karbowiak) ที่ STL (Standard Telecommunication Laboratory) เมืองแฮร์โลว์ ประเทศอังกฤษ และอีกกลุ่มวิจัยหนึ่งที่ CSF (Compagnie générale de télégraphie Sans Fil) โดยนักวิจัยสองคน คือ ซีมอน (J.C. Simon) และ สปิทซ์ (E. Spitz) พบว่า เราจะสามารถใช้ Single mode ของแสงในการส่งผ่านข้อมูลในตัวนำคลื่นอย่างฟิล์มบาง (Thin film) ในการสื่อสารเชิงแสง (Optical telecommunication) เนื่องจากสามารถลดการกระจายตัว (Dispersion) และการสูญเสียของการส่งผ่าน (Propagation loss) ของแสงได้ กลุ่มวิจัยไม่ว่าจะเป็น นิชิซาวา (J. Nishizawa) และ ซาซากิ (I. Sasaki) ที่มหาวิทยาลัยโตโฮกุ ประเทศญี่ปุ่น และ มิลเลอร์ (S.A. Miller) ที่ห้องปฏิบัติการเบลล์ (Bell Laboratory) ได้เสนอวิธีการลดค่ากำลังการสูญเสียที่ส่งผ่านในเส้นใยแก้วโดยการทำให้ดัชนีหักเหของเส้นใยแก้วมีค่าแปรเปลี่ยน (Varying refractive index) หรือที่เรียกกันว่า Gradient-index fiber สัญญาณที่ส่งในเส้นใยแก้วประเภทนี้จะช่วยลดการกระจายตัว (Dispersion) ของคลื่นแสงอันเนื่องมาจากกรณีที่สัญญาณแสงเป็น Multi-mode ซึ่งมีความเร็วหลากหลาย สำหรับเส้นใยแก้วที่มีค่าดัชนีหักเหที่ที่เรียกกันว่า Step-index multimode fiber จะมีค่าการกระจายตัวค่อนข้างมาก ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณลดลง อันเนื่องมาจากกำลังที่ส่งผ่านถูกลดทอนในตัวกลาง ในยุคแรกของการวิจัยและพัฒนาในเรื่องนี้ ได้มีการทดลองกับแหล่งกำเนิดสัญญาณของแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 870 นาโนเมตร (1 นาโนเมตร =  $10^{-9}$  เมตร)



**รูปที่ 5** Charles Kuen Kao สัญชาติอังกฤษและอเมริกัน เกิดวันที่ 4 พฤศจิกายน ค.ศ. 1933 ที่เมืองเซี่ยงไฮ้ ได้รับการศึกษาเบื้องต้นที่ฮ่องกง ต่อมาได้เดินทางไปศึกษาต่อที่มหาวิทยาลัยลอนดอน ประเทศอังกฤษ และได้รับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (ในขณะนั้น คือ Woolwich Polytechnic ซึ่งเป็นวิทยาเขตหนึ่งของมหาวิทยาลัยลอนดอน ในปัจจุบันได้ถูกยกวิทยฐานะขึ้นเป็นมหาวิทยาลัยที่มีชื่อว่า University of Greenwich) และปริญญาเอก สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ที่มหาวิทยาลัยเดียวกันในปี ค.ศ. 1957 และ ค.ศ. 1965 ตามลำดับ หลังจากจบได้เข้าทำงานที่ STL (Standard Telecommunication Laboratory) และเป็นที่ซึ่งเขาใช้เวลาในการคิดค้นและพัฒนาเส้นใยแก้วนำแสงเพื่อใช้ในเทคโนโลยีการสื่อสารเชิงแสง เขาได้รับตำแหน่งผู้อำนวยการที่ STL ต่อมาได้ถูกเชิญให้เป็นอาจารย์ที่ Chinese University of Hong Kong ในปี ค.ศ. 1970 เพื่อก่อตั้งคณะวิศวกรรมไฟฟ้า ในปี ค.ศ. 1974 เขากลับเข้าไปทำงานที่ ITT ในปี ค.ศ. 1987 เขาถูกเชิญกลับมาเป็นอธิการบดีของ Chinese University of Hong Kong จนกระทั่งเกษียณจากที่นี้ในปี ค.ศ. 1996



**รูปที่ 6** แสดงภาพของแสงที่ส่งผ่านภายในเส้นใยแก้วนำแสงชนิดต่างๆ รูปบนสุดเป็น Step-index multimode fiber, รูปถัดลงมาเป็น Single mode fiber และรูปล่างสุดเป็น Gradient index multimode fiber, สีแดงแสดงถึงภาพการส่งผ่านของแสงภายในเส้นใยแก้วนำแสงชนิดต่างๆ ส่วนด้านหลังสุดของแต่ละภาพแสดงถึงการกระจายตัว (Distribution) ของดัชนีหักเหของแสง

ชาร์ลส์ เกา (Charles K. Kao) ได้เริ่มงานวิจัยเรื่องนี้ในขณะที่เป็นวิศวกรหนุ่มที่ STL โดยที่เข้าร่วมกับกลุ่มวิจัย การสื่อสารเชิงแสง (Optical Telecommunication) ซึ่งมี คาร์โบวีก (Karbowiak) เป็นหัวหน้ากลุ่ม และได้ถูกแต่งตั้งให้เป็นหัวหน้ารับผิดชอบโครงการนี้ในเวลาต่อมา ตอนที่เริ่มต้นโครงการ เกาได้สร้างกลุ่มขึ้นมาเองโดยเริ่มจากศูนย์ กล่าวคือ มีผู้ช่วยเพียงคนเดียวคือ ฮอกแฮม (G.A. Hockham)



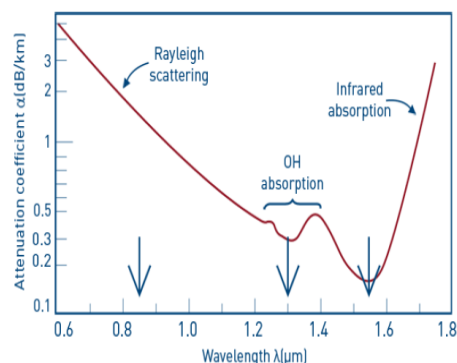
**รูปที่ 7** รูปของเกาส์มัยที่ยังเป็นนักวิจัยที่ Standard Telecommunication Laboratories Harlow รูปนี้ถ่ายประมาณปี 1960 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่เขาได้คิดค้นงานวิจัยเกี่ยวกับเส้นใยแก้วนำแสงเพื่อนำไปใช้ในการสื่อสารเชิงแสง ซึ่งนำไปสู่การได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี ค.ศ. 2009

ประวัติคร่าวๆ ของเกา คือ เกิดที่เซี่ยงไฮ้ในปี ค.ศ. 1933 ได้รับการศึกษาเบื้องต้นระดับประถมและมัธยมในฮ่องกงที่ St. Joseph's College จากนั้นจึงไปศึกษาต่อที่ประเทศอังกฤษ ณ มหาวิทยาลัยลอนดอน (University of London) ได้รับปริญญาตรี วิศวกรรมไฟฟ้า ในปี ค.ศ. 1957 และ ปริญญาเอก สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ในปี ค.ศ. 1965 จากมหาวิทยาลัยลอนดอน สำหรับฮอกแฮมซึ่งเป็นผู้ร่วมงานในกลุ่มตอนเริ่มแรกนั้นเป็นนักทฤษฎีช่วยงานด้านการวิเคราะห์พฤติกรรมของคลื่นแสงที่ถูกส่งผ่านในตัวนำคลื่น (Waveguide) ในแง่มุมต่างๆ ผลงานนี้เป็นหัวข้อวิจัยปริญญาเอกของเขาเอง ฮอกแฮมทำการสอบวิทยานิพนธ์ระดับปริญญาเอกในปี ค.ศ. 1969 และได้รับปริญญาเอกในปีเดียวกันนี้สิ่งที่ฮอกแฮมและเกาได้ร่วมกันคิดก็คือ การวิเคราะห์เพื่อศึกษารายละเอียดของคุณสมบัติพื้นฐานของเส้นใยแก้วนำแสงในแง่ของตัวนำคลื่นแสง (Optical waveguide) ที่สามารถพัฒนาต่อเชิงเทคโนโลยีของการสื่อสารเชิงแสง (Optical telecommunication)

เนื่องจากความมุ่งหวังที่จะต่อยอดการวิจัยไปสู่เทคโนโลยี ทั้งคู่จึงไม่เพียงแต่ศึกษาความเป็นไปได้เชิงทฤษฎีเท่านั้น แต่ยังวิเคราะห์ถึงรายละเอียดของคุณสมบัติของสารอย่างละเอียดที่จะถูกนำไปผลิตเชิงอุตสาหกรรม ผลงานนี้ได้ถูกเสนอในที่ประชุมเชิงวิชาการในลอนดอนในราวต้นปี ค.ศ. 1966 และถูกตีพิมพ์ในวารสาร Proc., IEE, **113**, 1151 (1966) [วารสาร Proceeding International Electrical Engineering, volume 113, page 1151, 1966] หัวข้อที่ตีพิมพ์ในวารสารฉบับนี้ คือ Dielectric-Fibre Surface Waveguides for Optical Frequencies โดยที่เกาติพิมพ์คู่กับฮอคแฮมในปี ค.ศ. 1966 งานวิจัยชิ้นนี้ได้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ที่จะใช้เส้นใยแก้วนำแสงที่มีโครงสร้างพื้นฐานเป็น ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) เป็นสื่อตัวกลางที่ใช้ในการสื่อสารเชิงแสง (Optical telecommunication) หลังจากนั้นจึงได้เกิดความตื่นตัวในวงการอุตสาหกรรมที่จะได้คิดค้นต่อเพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวางดังที่ปรากฏในปัจจุบัน ปัญหาใหญ่ในแง่ของการผลิตก็คือ โครงสร้างของ  $\text{SiO}_2$  ที่ใช้นี้ต้องผ่านกระบวนการผลิตโดยที่มีจุดหลอมเหลวค่อนข้างสูง ประกอบกับต้องทำการควบคุมมิให้สิ่งแปลกปลอมเจือปน มิเช่นนั้นจะขาดคุณสมบัติที่สำคัญในแง่ของฟิสิกส์ หลายต่อหลายกลุ่มได้คิดค้นหาวิธีที่จะผลิตเส้นใยแก้วนำแสงด้วยวิธีการต่างๆ แต่ก็ไม่ประสบความสำเร็จที่จะสามารถผลิตต้นเข้าสู่อุตสาหกรรมได้ หลังจากนั้น สตีปป์ดอมา บริยัทคอร์นนิ่ง (Corning) ประเทศสหรัฐอเมริกาที่ประสบความสำเร็จในการคิดค้นหากระบวนการผลิตเส้นใยแก้วนำอย่างมีประสิทธิภาพขึ้นมาได้ กลุ่มวิจัยคอนนิ่ง ประกอบด้วย แคปรอน (F.P. Kapron), เคค (D.B. Keck), ชูลซ์ (P.C. Schultz), ซิมมาร์ (F. Zimar) ภายใต้การนำของ เมาโร (R.D. Maurer) ได้ใช้กระบวนการทางเคมีที่มีชื่อว่า CVD (Chemical Vapor Deposition) ในการผลิตเส้นใยแก้วนำแสงที่มีคุณสมบัติตามที่เกาและฮอคแฮมได้เสนอในปี ค.ศ. 1966 ปัญหาในแง่ของโครงสร้างทางเคมี ก็คือ เนื่องจากแกนกลางและ Cladding มีดัชนีหักเหใกล้เคียงกัน เราจึงต้อง Dope ไททาเนียม (Titanium) เข้าไปในแกนของ ซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) ในขณะที่ต้องควบคุมให้ ส่วนของ Cladding เป็นซิลิกาบริสุทธิ์ ผลงานนี้ได้ถูกตีพิมพ์ลงในวารสาร Applied Physics Letter ในปี ค.ศ. 1970 [Appl. Phys. Lett. **17**, 423, (1970)] หลังจากนั้นสองสามปีต่อมาก็ได้มีการคิดค้นและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยการใช้ เจอมาเนียม (Germanium) เป็นตัว Dope แทนไททาเนียม ซึ่งมีค่าความสูญเสีย

4 dB/km ที่ความยาวคลื่นแสง 850 นาโนเมตร ซึ่งไปกว่านี้ค่าความสูญเสียก็น้อยกว่าที่ เกาได้เสนออีกด้วย เทคโนโลยีการผลิตอื่นๆ ได้ถูกพัฒนาขึ้นในห้องปฏิบัติการวิจัยและพัฒนาในประเทศญี่ปุ่น, อเมริกา, อังกฤษ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ห้องปฏิบัติการเบลล์ (Bell Laboratory) ที่อเมริกา ปัจจุบันเราสามารถผลิตเส้นใยแก้วนำแสงที่มีค่าลดทอนน้อยกว่า 0.2 dB/km ที่ความยาวคลื่น 1.55 ไมโครเมตร เส้นใยแก้วนำแสงส่วนใหญ่ที่ผลิตในปัจจุบันมีค่าความสูญเสีย 5% ต่อ 1 กิโลเมตร

นอกจากการพัฒนาเส้นใยแก้วนำแสงเพื่อทำให้ค่าลดทอนน้อยลงแล้ว แหล่งกำเนิดแสงก็ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องเช่นกัน ไม่ว่าจะเป็น LED (Light Emitting Diode) โดยเฉพาะอย่างยิ่งพวกเลเซอร์ไดโอด ซึ่งในตอนแรกพัฒนามาจากพวกสารแกลเลียม-อาแซไนต์ GaAs ซึ่งผลิตแสงในช่วงความยาวคลื่น 800-900 นาโนเมตร ในเวลาต่อมาถูกพัฒนาโดยใช้สารอินเดียม-แกลเลียม-อาแซไนต์-ฟอสไฟด์ InGaAsP ที่ให้แสงช่วงความยาวคลื่น 1-1.7 ไมโครเมตร แหล่งกำเนิดแสงของการสื่อสารเชิงแสง (Optical telecommunication) ได้ถูกพัฒนาจากแสงความยาวคลื่น 870 นาโนเมตร ไปสู่ 1.3 ไมโครเมตร จน ณ ขณะนี้สู่ 1.55 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีค่าการสูญเสียที่น้อยที่สุด



**รูปที่ 8** กราฟแสดงสัมประสิทธิ์การลดทอน  $\alpha(\lambda)$  (Coefficient of attenuation) ของแสงในเส้นใยแก้วนำแสงที่ผลิตจาก Fused silica ในรูปฟังก์ชันของความยาวคลื่น  $\lambda$  ในหน่วยของไมโครเมตรในย่านความยาวคลื่นสั้น ทางด้านซ้ายมือของกราฟ  $\alpha(\lambda) \propto \lambda^{-4}$  อันเนื่องมาจากการกระเจิงเรย์ลีย์ (Rayleigh scattering) ในช่วงซ้ายสุดของกราฟเป็นการลดทอนเนื่องจากแสงที่ถูกดูดซับโดยโมเลกุลของสิ่งแปลกปลอมในย่าน IR (อินฟราเรด) ส่วนตรงแถวตำแหน่งความยาวคลื่น 1.3 ไมโครเมตร การลดทอนเกิดจากสิ่งแปลกปลอม

พวก OH ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพวกความชื้น บริเวณนี้เป็นตำแหน่งที่ไม่สามารถทำให้หายไปได้อันเนื่องมาจาก *Intrinsic property* ของเส้นใยแก้วนำแสง ย่านที่ใช้ในการสื่อสารเชิงแสง (*Optical Telecommunication*) อยู่ในช่วง 1.3 และ 1.55 ไมโครเมตร

เส้นใยแก้วนำแสงพวก Gradient-index fiber ถูกพัฒนาใช้ในการสื่อสารเชิงแสงในยุคแรกๆ อย่างไรก็ตาม เพื่อที่จะขยายระยะทางในการสื่อสารที่ความยาวคลื่นมากขึ้น เส้นใยแก้วพวก Single-mode มีบทบาทอย่างมากในการพัฒนาเทคโนโลยีการสื่อสารเชิงแสง ซึ่งเป็นแนวทางของการพัฒนาเครือข่ายของโครงสร้างการสื่อสารให้ครอบคลุมในบริเวณที่ไกลออกไป เป็นไปตามวิสัยทัศน์ของเกาท์ที่ได้เล็งเห็นถึงการพัฒนาต่อขยายอนาคตของสิ่งที่เขาได้คิดค้นขึ้นมา เนื่องจากการสูญเสียในระหว่างการส่งสัญญาณที่ใช้ในการสื่อสาร จึงจำเป็นที่จะต้องมีความขยายสัญญาณที่ส่งในเส้นใยแก้วนำแสงเป็นระยะทางไกลๆ จึงมีการพัฒนา ตัวซ้ำสัญญาณ (Repeater) ในยุคแรกเพื่อแก้ปัญหาสัญญาณที่สูญเสียในระหว่างการส่งผ่าน ตัวซ้ำสัญญาณได้ถูกแทนที่ด้วย ตัวขยายสัญญาณเชิงแสง (Optical amplifier) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีตัวใหม่ที่เข้ามาแทนที่ ตัวขยายสัญญาณที่ใช้ในปัจจุบันนี้เป็นพวกเส้นใยแก้วที่ Dope สารพวก Erbium เข้าไป นอกจากนี้แล้วยังมี WDM (Wavelength Division Multiplexing) ซึ่งเป็นตัวช่วยส่งสัญญาณคลื่นแสงหลายๆ ความยาวคลื่นไปในเส้นใยแก้วนำแสงในเวลาเดียวกัน ซึ่งเท่ากับเป็นการเพิ่มอัตราการส่งสัญญาณเป็นทวีคูณ ได้มีการนำเทคโนโลยีไปใช้ทดลองติดตั้งระบบเครือข่ายการสื่อสารที่อังกฤษในราวปี ค.ศ. 1975 และได้ทดลองติดตั้งในอเมริกาและญี่ปุ่นในเวลาต่อมา สายเคเบิลเส้นใยแก้วนำแสงได้ถูกติดตั้งผ่านมหาสมุทรแอตแลนติกในปี ค.ศ. 1988 โครงสร้างของเครือข่ายการสื่อสารของโลกในปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งพวกอินเทอร์เน็ตและโทรศัพท์ทางไกลได้อาศัยเครือข่ายของเทคโนโลยีในการเชื่อมโยงการสื่อสารของโลกในปัจจุบันซึ่งใช้โครงสร้างของเทคโนโลยีการสื่อสารเชิงแสง ข้อได้เปรียบของเทคโนโลยีนี้ก็คือ คลื่นแสงสามารถส่งข้อมูลด้วยความถี่สูงกว่าคลื่นวิทยุซึ่งทำให้เพิ่มอัตราการส่งผ่านข้อมูล ด้วยเทคโนโลยีในปัจจุบันเราสามารถส่งผ่านข้อมูลไปในเส้นใยแก้วนำแสงเพียงเส้นเดียวได้หลาย Terabit ต่อวินาที ซึ่งมีอัตราการส่งข้อมูลมากกว่าเดิมประมาณล้านเท่า ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้เองจึงได้มีการวาง

เครือข่ายของเคเบิลเส้นใยแก้วนำแสงทั่วทั้งโลก นอกจากนี้เส้นใยแก้วนำแสงยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีในด้านต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นทางการแพทย์ เลเซอร์ และเซ็นเซอร์

ในทางวิทยาศาสตร์ ได้มีการวางเครือข่ายการสื่อสารเชิงแสงที่ LHC (Large Hadron Collider) ที่ CERN ณ เมืองเจนีวา ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ ทำให้นักฟิสิกส์สามารถส่งผ่านข้อมูลหามาจากเครื่องตรวจวัดอนุภาคไปยังศูนย์คอมพิวเตอร์ต่างๆ ทั่วโลกได้อย่างรวดเร็ว ทำให้สามารถวิเคราะห์ข้อมูลได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ

### รางวัลโนเบล 2009 ส่วนที่สอง: การประดิษฐ์ CCD

ผลงานที่สองที่ถูกคัดเลือกให้ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์อีกครั้งหนึ่งก็คือ การประดิษฐ์กล้อง CCD (Charge-Coupled Devices) ซึ่งนับว่าเป็นผลงานที่มีอิทธิพลเชิงวิวัฒนาการต่อพัฒนาเทคโนโลยีเชิงแสง ผู้ที่ร่วมรับรางวัลจากผลงานนี้ก็คือนักฟิสิกส์จากห้องปฏิบัติการเบลล์ (Bell Laboratory, Murray Hill, New Jersey, USA) วิลเลียม บอยล์ (William S. Boyle) และ จอร์จ สมิธ (George E. Smith)

เทคโนโลยีของ CCD นับได้ว่ามีผลกระทบเชิงวิวัฒนาการต่อการพัฒนาของเทคโนโลยีการบันทึกภาพ จากฟิล์มถ่ายรูปไปสู่การเก็บข้อมูลและรายละเอียดของภาพในรูปแบบของดิจิทัล ซึ่งนับได้ว่าเป็นการพัฒนาไปสู่ทั้งด้านประสิทธิภาพ, คุณภาพและปริมาณ กล่าวคือกล้องดิจิทัลในปัจจุบันสามารถบันทึกจำนวนภาพประมาณ 100 เท่าของเทคโนโลยีการถ่ายภาพด้วยฟิล์ม (ประมาณจาก Memory card ขนาด 16 Gb ต่อ 1 ม้วนฟิล์ม) ด้วยกล้องที่มีขนาดกะทัดรัด สะดวกในการพกพาและใช้งาน ก่อนที่จะกล่าวถึงรายละเอียดของการพัฒนา CCD จะกล่าวถึงประวัติความเป็นมาของการบันทึกภาพที่มนุษย์ได้พยายามคิดค้นและพัฒนาจากโบราณกาลจนถึงปัจจุบัน



**รูปที่ 9** โจเซฟ นีปซ์ นักประดิษฐ์ชาวฝรั่งเศส ผู้ที่คิดค้นวิธีการบันทึกภาพถ่ายจากกล้องรูเข็มได้เป็นคนแรก เกิดเมื่อวันที่ 7 มีนาคม 1765 มรณภาพวันที่ 5 กรกฎาคม 1833

การประดิษฐ์กล้องถ่ายภาพและรูปถ่ายมีประวัติความเป็นมายาวนาน ซึ่งมีบันทึกถึงการค้นพบที่สำคัญๆ ควบคู่ไปกับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจากอดีตจนถึงปัจจุบัน เมื่อมองย้อนกลับไปในสมัยอารยธรรมโบราณของจีน อียิปต์ และกรีก ได้พบปรากฏการณ์ของการเกิดภาพหัวกลับบนฉาก ซึ่งเกิดจากแสงสะท้อนวัตถุผ่านรูเข็ม ปรากฏการณ์นี้นำไปสู่ความพยายามในยุคต่อมาในอันที่จะหาวิธีบันทึกภาพที่เกิดขึ้น ในปี ค.ศ. 1826 โจเซฟ นีปซ์ (Joseph Nicéphore) สามารถบันทึกภาพถ่ายได้เป็นครั้งแรกในโลกโดยแสงผ่านกล้องรูเข็ม ซึ่งใช้เวลาในการบันทึกภาพ 8 ชั่วโมง วัสดุที่ใช้ในการบันทึกภาพเป็นแผ่นฟิวเตอร์ (Pewter) [ฟิวเตอร์เป็น อัลลอยด์ของสังกะสี ที่ประกอบด้วยสังกะสี 85% - 99% ส่วนผสมที่เหลือเป็น ทองแดง, พลวง, บิสมัท และ ตะกั่ว] ที่ถูกเคลือบด้วยบิทูเมน (Bitumen) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากปิโตรเลียมที่สามารถล้างออกได้ด้วยพวกน้ำมันลาเวนเดอร์ (Lavender oil) คุณสมบัติที่สำคัญของบิทูเมนก็คือ บริเวณที่ถูกแสงจะติดแน่นและล้างไม่ออก การล้างภาพจึงสามารถทำได้โดยนำแผ่นฟิวเตอร์ไปชะล้างด้วยน้ำมันลาเวนเดอร์ ซึ่งจะทำให้บริเวณที่ไม่ถูกแสงถูกชำระออกหมดปรากฏส่วนที่เหลือให้เห็นเป็นภาพออกมา แผ่นฟิวเตอร์ที่ใช้บันทึกภาพนี้ถือได้ว่าเป็นแผ่นบันทึกภาพเนกาทีฟ (Negative image) ในปี 1829 ดาแกร์ (L.J.M. Daguerre) เข้าร่วมเป็นส่วนร่วมกับนีปซ์ และร่วมงานกันเป็นเวลา 4 ปี หลังจากที่นีปซ์ตายในปี 1833 ดาแกร์ก็ได้คิดค้นพัฒนาหาวิธีการบันทึกภาพถ่ายต่อ จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1839 ดาแกร์ประสบความสำเร็จในการทำภาพพอสติฟ (Positive image) จากภาพ

เนกาทีฟนี้ และภาพที่ได้นี้ ถูกเรียกว่า ภาพพิมพ์แดแกร์โร (Daguerrotype) แดแกร์คิดค้นพัฒนาหาขบวนการที่ใช้เวลาในการผลิตภาพด้วยเวลา (Exposure time) ที่สั้นลงเพียงไม่กี่นาที เขาได้จดสิทธิบัตรจากผลงานนี้ในวันที่ 19 สิงหาคม 1839



**รูปที่ 10** หลุยส์ แจก มานเด แดแกร์ นักประดิษฐ์ชาวฝรั่งเศส (Louis Jaques Mande' Daguerre) เกิดวันที่ 18 พฤศจิกายน 1787 ตายวันที่ 10 กรกฎาคม 1851 ดาแกร์เข้าร่วมงานกับนีปซ์เป็นเวลา 4 ปี หลังจากที่นีปซ์ได้ตายไป เขาได้คิดค้นหาวิธีการบันทึกภาพที่ใช้เวลาสั้นลงต่อ และประสบความสำเร็จในปี 1839 ผลงานการบันทึกภาพถ่ายนี้ถูกขนานนามว่า Daguerrotype

แผ่นบันทึกภาพที่เขาคิดค้นนี้ ก็คือแผ่นทองแดงที่ถูกเคลือบด้วยเงิน จากนั้นนำเอาแผ่นในสารละลายไอโอดีน ผิวหน้าเงินทำปฏิกิริยากับไอโอดีนเกิดเป็น Silver-iodide ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับแสงสร้างภาพเนกาทีฟ (Negative Image) ขึ้นมา จากนั้นจึงผ่านขบวนการที่ทำให้เกิด Positive Image โดยการผ่านไอของปรอทภาพที่เกิดขึ้นจากขบวนการนี้มีชื่อว่า ภาพพิมพ์แดแกร์โร (Daguerrotype) ในปี 1841 ทัลบอต (William Fox Talbot) นักประดิษฐ์ชาวอังกฤษ ได้พัฒนาขบวนการบันทึกภาพต่อโดยเคลือบกระดาษด้วยเกลือของโลหะเงินซึ่งมีปฏิกิริยาที่ไวต่อแสง ซึ่งถูกพัฒนาต่อโดยมีการผสมเกลือของโลหะเงินกับเจลาติน (Gelatin) ในปี 1870 แผ่นบันทึกภาพได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องเป็นฟิล์มถ่ายรูปที่ทำจากพวกเซลลูลอยด์ (Celluloid) ในราวปี 1880



**รูปที่ 11** วิลเลียม เฮนรี ฟอกซ์ ทัลบอท (William Henry Fox Talbot) ได้พัฒนาแผ่นบันทึกภาพจากแผ่นกระดาษที่เคลือบด้วยเกลือของโลหะเงินซึ่งมีปฏิกิริยาไวต่อแสง ในรูปคือตัวกล้องที่ใช้กับฟิล์มที่เขาคิดค้นขึ้นมา ทัลบอทเป็นชาวอังกฤษ เกิดวันที่ 11 กุมภาพันธ์ 1800 ตายวันที่ 17 กันยายน 1877) ทัลบอทเริ่มคิดค้นหาวิธีการบันทึกภาพถาวรตั้งแต่ปี 1834

จนกระทั่งปี 1887 สาธุคุณกู๊ดวิน (H. Goodwin) ประดิษฐ์ม้วนฟิล์มประกอบเข้าในตัวกล้อง ในปี 1888 อีสแมน โคดัก (G. Eastman Kodak) นักธุรกิจชาวอเมริกันได้นำแนวคิดนี้ไปประดิษฐ์เป็นตัวกล้องที่บรรจุม้วนฟิล์มภายใน และเป็นจุดเริ่มของ บริษัทโกดัก ซึ่งเป็นธุรกิจกล้องถ่ายรูปและฟิล์มแห่งแรกที่ขยายตัวไปทั่วโลก ต่อมาในปี 1935 บริษัทโกดักก็ได้เปิดตลาดของฟิล์มสีจากผลงานของนักดนตรีสองคนคือ โกดอฟสกี (L. Godowsky) และมานเนส (L. Mannes)

ก่อนหน้านี้ก็มีความพยายามเสนอแนวคิดในการผลิตฟิล์มสีโดยนักเปียโนชื่อว่า ฮัวรอง (L.D. du Hauron) ในปี ค.ศ. 1869 โดยอาศัยหลักการที่ว่า วัตถุทุกชนิดจะดูดกลืนทุกสีที่ไม่ใช่สีของตัวเอง กล่าวคือ สีที่เราเห็นคือสีที่วัตถุไม่ดูดกลืนและสะท้อนออกมา หลักการของฟิล์มสีคร่าวๆ คือ เม็ดสี (pigment) ของฟิล์มแบ่งเป็นสามระดับ เริ่มจากสีฟ้า ต่อมาไล่ลงมาเป็นสีเขียว และสุดท้ายเป็นสีแดง สีที่สะท้อนจากวัตถุจะทำปฏิกิริยาต่อฟิล์มสีที่ระดับต่างๆ จากนั้นภาพสีสุดท้ายที่ออกมาอาศัยขบวนการล้างภาพสี ซึ่งจะทำการลบสีเหลือง, สี Magenta และสี Cyan หลักการนี้เป็น หลักพื้นฐาน ที่บริษัท โกดัก ใช้ในการพัฒนาไปสู่อุตสาหกรรมจนสามารถนำผลผลิตดังกล่าวออกสู่ตลาด

ถ้าจะว่าไปแล้วการพิจารณารางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ โดยพิจารณาให้กับการพัฒนาเทคโนโลยีการบันทึกภาพไม่ได้เป็นเรื่องใหม่แต่อย่างไร ได้มีการพิจารณาให้แก่ผลงานในด้านนี้มาแล้วถึงสองครั้ง ครั้งแรกให้กับนักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศส นามว่า ลิปมานน์ (Gabriel Lippmann) ในปี 1908 จากผลงานที่คิดค้นมาในปี 1893 ที่สามารถบันทึกภาพสีโดยอาศัยหลักการของการแทรกสอดของคลื่นแสง ครั้งที่สองก็คือในปี 1971 ให้แก่ กาบอร์ (Dennis Gabor) จากการพัฒนาแนวคิดของการประดิษฐ์และพัฒนาภาพโฮโลแกรม (Hologram) ความแตกต่างของทั้งคู่ก็คือ ลิปมานน์พัฒนาการบันทึกภาพขาวดำสองมิติไปสู่ภาพสีสองมิติ ในขณะที่กาบอร์พัฒนาจากภาพสีสองมิติไปสู่ภาพสีในสามมิติ

**แนวคิดของลิปมานน์ในการบันทึกภาพสีโดยอาศัยหลักการแทรกสอด**

#### ประวัติโดยสังเขป

ลิปมานน์เกิดที่ลักเซมเบิร์กวันที่ 16 สิงหาคม 1845 แต่เติบโตและได้รับการศึกษาเบื้องต้นที่ปารีส เนื่องจากครอบครัวอพยพมาตั้งถิ่นฐานใหม่ในฝรั่งเศส ในวัยเด็กผลการเรียนไม่ค่อยเป็นที่ประทับใจ สอบตกหลายวิชาเนื่องจากเขาจะเรียนเฉพาะวิชาที่สนใจเท่านั้น ต่อมาเขาได้การฝึกฝนจากนักฟิสิกส์ที่มีชื่อหลายคนในเยอรมัน เช่น กับคานน์และเคอร์ซอพฟ์ในไฮเดลเบิร์ก และกับเฮมโฮลท์ซ์ในเบอร์ลิน เขามีความสนใจในฟิสิกส์หลายแขนง มีความคิดริเริ่มสูงและเป็นผู้นำการคิดในหลายๆ เรื่อง เขาได้รับตำแหน่งศาสตราจารย์ที่มหาวิทยาลัยปารีสในปี 1883 และยังเป็นผู้อำนวยการห้องปฏิบัติการวิจัยและพัฒนาของมหาวิทยาลัย ผลงานที่เขาสนใจไม่เพียงแต่ในด้านฟิสิกส์เชิงทฤษฎีแต่ยังมองไปถึงการใช้แนวคิดเพื่อคิดค้นต่อยอดสู่เครื่องมือวัดแบบต่างๆ ระหว่างอยู่ที่ไฮเดลเบิร์กเขาได้ศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างไฟฟ้าและปรากฏการณ์ Capillary และเขาได้นำผลของการศึกษานี้ไปพัฒนาเครื่องมือที่มีชื่อว่า Capillary electrometer ที่สามารถวัดค่าความตึงผิวได้อย่างละเอียด ผลงานที่ทำให้เขาได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี 1908 นั้นเป็นผลงานที่ทำมาตั้งแต่ปี 1893 โดยการคิดค้นพัฒนาขบวนการบันทึกภาพสีโดยอาศัยหลักการแทรกสอดของแสง

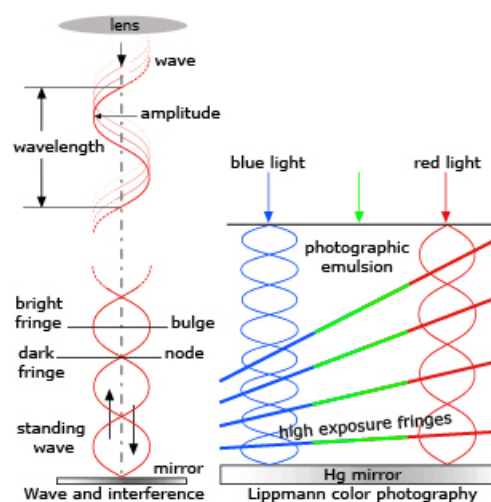


**รูปที่ 12** ลิปมานน์ (Gabriel Lippmann) นักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศสผู้คิดค้นวิธีการบันทึกภาพสีในปี 1893 ผลงานนี้ทำให้เขาได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี ค.ศ. 1908 ลิปมานน์เกิดที่ลักเซมเบิร์ก วันที่ 16 สิงหาคม 1845 ต่อมาครอบครัวได้อพยพไปอยู่ที่ปารีส ผลการศึกษาเบื้องต้นไม่ค่อยดีและสอบตกหลายวิชาเนื่องจากเขาจะเรียนเฉพาะวิชาที่เขาสนใจเท่านั้น ต่อมาเขาได้ทำงานร่วมกับนักฟิสิกส์ที่มีชื่อเสียงในเยอรมัน เช่นกับ Kuhne และ Kirchhoff ในไฮเดลเบิร์ก และกับ Helmholtz ในเบอร์ลิน ลิปมานน์มีความสนใจในฟิสิกส์หลายสาขา โดยเฉพาะอย่างยิ่งไฟฟ้า, พลศาสตร์ความร้อน, แสง และ Photochemistry ลิปมานน์ได้รับการแต่งตั้งเป็นประธานของราชบัณฑิตยสถานของฝรั่งเศสในปี 1912 เขาตายในเรือเดินสมุทรระหว่างเดินทางกลับจากอเมริกาในวันที่ 13 กรกฎาคม 1921

### เบื้องหลังแนวคิด

หลักการบันทึกภาพสีของลิปมานน์ อาศัยการสร้างคลื่นนิ่ง (Standing wave) ที่เกิดจากการแทรกสอดของคลื่นสองชุดที่มีความยาวคลื่นเดียวกันแต่เฟสตรงข้ามกัน (ต่างกัน  $180^\circ$ ) วังเข้าหากันจากทิศตรงข้าม ทำให้เกิดคลื่นนิ่งที่มีระยะห่างระหว่าง Node/anti-node หนึ่งไปยัง Node/anti-node ถัดไปเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ในทางปฏิบัติเราสามารถสร้างคลื่นนิ่งของแสงได้โดยฉายแสงลงบนกระจกเงาเรียบ เพื่อให้เกิด Interference fringe ที่เสถียร เราจำเป็นต้องใช้แหล่งกำเนิดแสง Coherence กล่าวคือ แหล่งกำเนิดแสงที่ให้ความยาวคลื่นเดียวกันและมีเฟสพ้องกัน เราสามารถสร้างเงื่อนไขนี้ได้โดยการแยกคลื่นจากแหล่งกำเนิดเดียวกัน โดยที่ควบคุมให้ความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดและส่วนที่สะท้อนกับกระจกเงาเรียบต่างกัน 2-3 เท่า

ของความยาวคลื่น ลิปมานน์สร้างเงื่อนไขนี้โดยการให้คลื่นนิ่งนี้ผ่านชั้นของฟิล์มบางของน้ำมัน ปัญหาที่น่าสนใจก็คือ ลิปมานน์ใช้หลักการดังกล่าวในการสร้างภาพสีขึ้นมาได้อย่างไร หลักการของการแทรกสอดบอกเราว่าคลื่นแสงที่มีความคลื่นต่างๆ กันจะสร้างรูปแบบของคลื่นนิ่งที่สอดคล้องกับความยาวเชิงคาบ (Period length) ลิปมานน์เริ่มจากรูปแบบคลื่นนิ่งที่สนามคลื่น (Wave field) บรรจบพบกันอีกครั้งหลังจากที่สะท้อนกับกระจกเงาราบ จากนั้นจึงฉายภาพที่เกิดลงบน Photographic plate (แผ่นที่มีความไวต่อแสง) จากนั้นจึงใส่ผลของการแทรกสอดเข้าไปโดยเคลือบกระจกด้วยปรอทที่สัมผัสกับ Emulsion ที่ไวต่อแสง ภาพที่เกิดจะวิ่งผ่าน Emulsion สะท้อนกระจกและวิ่งผ่าน Emulsion อีกที ความหนาของฟิล์มบางที่เคลือบบนแผ่น Photographic ประมาณ 10 เท่าของความยาวคลื่นแสง ภาพที่ฉายบนแผ่น Photographic ไม่เพียงแต่ทำปฏิกิริยากับแสงที่ตกกระทบเท่านั้น แต่ยังรวบรวมรายละเอียดของพิคเมนต์ของสีแต่ละบริเวณที่สะท้อนออกมาจากวัตถุกล่าวคือแสงที่ตกลงบนแผ่น Photographic และสะท้อนกลับ จะถูกกระเจิงโดยอะตอมของเงินที่กระจายตัวอยู่โดยทั่วภายใน Emulsion ทุกทิศทุกทางและสร้างรูปแบบของการแทรกสอดขึ้นมาโดย เฉพาะอย่างยิ่งที่ตำแหน่งที่มีการแทรกสอดแบบเสริมกัน (Constructive interference) ก็จะปรากฏรายละเอียดของสีนั้นๆ อย่างชัดเจนเปรียบได้กับรายละเอียดของสีที่ปรากฏบนปีกผีเสื้อ



**รูปที่ 13** ขบวนการสร้างภาพสีจากหลักการแทรกสอดของคลื่นแสง รูปทางซ้ายมือแสดงให้เห็นถึงการสร้างคลื่นนิ่งโดยการสะท้อนบนกระจกที่ถูกเคลือบด้วยฟิล์มบาง ส่วนรูปทางขวามือ

แสดงให้เห็นขบวนการที่ปริมาณใช้ในการ Encode ข้อมูลของภาพและเก็บข้อมูลของสีจากหลักการดังกล่าว

โดยรวมแล้วอาจสรุปได้ว่าเทคนิคที่ปริมาณใช้นี้ประกอบด้วยสองขั้นตอนที่สำคัญคือ การแทรกสอดและการเลี้ยวเบนของคลื่นแสง โดยขั้นตอนแรกภาพถูก Encode เป็นรูปแบบของการแทรกสอด (Interference pattern) หลังจากนั้นเข้าขบวนการสร้างภาพขึ้นมาใหม่จากรูปแบบของการเลี้ยวเบน (Diffraction pattern)

### กาบอร์โฮโลแกรม (Gabor Hologram)

จากเทคนิคของปริมาณที่ใช้การ Encode ข้อมูลแสงในรูปแบบของคลื่นนิ่ง จากนั้นจึงแปลงข้อมูลนั้นกลับเป็นภาพ 2 มิติบนแผ่น Photographic กาบอร์ก็ใช้หลักการที่คล้ายๆ กันสองขั้นตอนนี้เช่นกัน แตกต่างกันตรงที่จะสร้างขบวนการสองขั้นตอนนั้นให้เกิดภาพ 3 มิติได้อย่างไร ความซับซ้อนของขบวนการดังกล่าวอยู่ที่นอกจากต้องอาศัยแหล่งกำเนิดแสงสีเดียว (Monochromatic light) แล้ว ตำแหน่งอ้างอิงของการแทรกสอดที่เกิดจากการสะท้อนและตกกระทบไม่สามารถใช้ตำแหน่งอ้างอิงอันเดียวกัน แต่จะต้องอาศัยสนามอ้างอิง (Reference field) ต่างกันมุมระหว่างสนามอ้างอิงและจุดใดๆ จากสนามวัตถุ (Object field) ถูกพิจารณาจากคาบและการวางตัวของข้อมูลภาพทั้งหมด หรืออีกนัยหนึ่งเป็นรูปแบบของการแทรกสอดในสามมิติซึ่งมีรูปแบบที่ซับซ้อนกว่ารูปแบบของการแทรกสอดในสองมิติ

ดังนั้นขบวนการสองขั้นตอนในการแปลงข้อมูลภาพเป็นข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบของการแทรกสอดในสามมิติและแปลงข้อมูลนี้กลับเป็นภาพสีสามมิติจึงซับซ้อนกว่ามาก สิ่งที่กาบอร์คิดค้นราวปี ค.ศ. 1948 ก่อนหน้าที่จะมาสู่การสร้างภาพโฮโลแกรมนี้ นั่นก็เพียงต้องการแก้ปัญหาความไม่ชัดเจน (Aberration) ของภาพที่เกิดขึ้นในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron microscope) Mercury arc lamp ซึ่งใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงในตอนนั้น ทำให้เกิดข้อจำกัดในการทดลองที่ต้องทำกับวัตถุขนาด 2 - 3 มิลลิเมตร จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1963 ลีทส์ (Leith) และอุพานิคส์ (Upatniek) จากมหาวิทยาลัยมิชิแกน สามารถสร้างภาพโฮโลแกรมสามมิติจากแสงเลเซอร์ จนกระทั่งราวปี ค.ศ. 1971 กาบอร์

โฮโลแกรมที่มีขนาดหลายลูกบาศก์เมตรได้ถูกสร้างขึ้นจาก Pulse laser

ประวัติคร่าวๆของกาบอร์มีดังนี้ เขาเกิดที่เมืองบูดาเปสต์ ประเทศฮังการีในปี ค.ศ. 1900 และตายในลอนดอน ประเทศอังกฤษ ในปี ค.ศ. 1976 แสดงแววของนักประดิษฐ์ตั้งแต่ยังเยาว์วัย คือ จดสิทธิบัตรชิ้นแรกตั้งแต่อายุเพียง 11 ปี จากนั้นได้ Diploma (หลักสูตรในเยอรมัน ปริญญาแรกเรียกว่า Diploma ใช้เวลาเรียน 5 ปีและต้องทำวิทยานิพนธ์ด้วย อาจเทียบเท่ากับปริญญาโทในอเมริกาหรืออังกฤษ จากนั้นทำ Diploma ใบที่สองพร้อมวิทยานิพนธ์ ใช้เวลาอีกประมาณ 3 ปีก็จะได้ปริญญาเอก) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าจาก Technische Hochschule ใน Berlin ปี ค.ศ. 1924 และได้ปริญญาเอก Dr.-Ing ในปี ค.ศ. 1927 ทำวิทยานิพนธ์เกี่ยวกับ High-speed cathode ray oscilloscope หลังจากจบปริญญาเอกได้เขาทำงานกับบริษัท Siemen & Halske เขาได้ร่วมงานกับ Knoll (Knoll) และรัสกา (Ruska) ในงานวิจัยที่สำคัญหลายๆ เรื่อง รวมไปถึงการพัฒนาหลอดจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เอิร์น รัสกา (Ernst Ruska) ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ ในปี ค.ศ. 1986 ในเรื่องเกี่ยวกับการพัฒนาเทคโนโลยีภาพยนตร์ ซึ่งเป็นงานชิ้นหนึ่งที่กาบอร์หันกลับมาสนใจและมีส่วนร่วมในงานวิจัยและพัฒนา

ต่อมาเมื่อฮิตเลอร์ขึ้นมามีอำนาจในเยอรมัน เขาได้อพยพไปอังกฤษในปี ค.ศ. 1934 และแปลงสัญชาติเป็นอังกฤษในเวลาต่อมา เขาเข้าทำงานกับบริษัท British Thomson-Houston คิดค้นและพัฒนา Gas discharge tube หลังสงครามโลกสงบลงเขากลับมาสนใจทฤษฎีการสื่อสาร การบันทึกภาพ และ Stereoscopic cinematography รวมไปถึงแนวคิดใหม่เกี่ยวกับ Wavefront reconstruction ซึ่งช่วยแก้ปัญหาของ Aberration ที่เกิดขึ้นในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แนวคิดนี้นำไปสู่การสร้างภาพโฮโลแกรมในเวลาต่อมา ในปี 1962 Y.N.Denisyuk นักประดิษฐ์ชาวรัสเซียได้นำหลักการของปริมาณและกาบอร์มาประยุกต์เข้าด้วยกัน จนสามารถสร้างภาพสีสามมิติจากการสะท้อน ผลงานนี้นำไปสู่การประยุกต์เชิงอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง เนื่องจากเป็น White-light reflection hologram

ในปี ค.ศ. 1949 กาบอร์ถูกเชิญให้เข้าเป็นอาจารย์ในมหาวิทยาลัย Imperial College และได้รับตำแหน่งศาสตราจารย์

ของ Applied Electron Physics กาบอร์ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี ค.ศ. 1971 จากผลงานภาพโฮโลแกรม



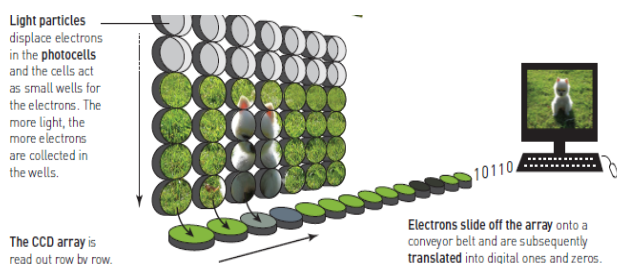
**รูปที่ 14** เดนิส กาบอร์ เกิดวันที่ 5 มิถุนายน ค.ศ. 1900 ที่เมืองบูดาเปสต์ ประเทศฮังการี ชอบวิชาฟิสิกส์และคณิตศาสตร์ตั้งแต่เด็ก แสดงแว่นของนักประดิษฐ์โดยที่สามารถจดลึบทริบ์ตร เมื่ออายุเพียง 11 ปี Diploma สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าจาก Technische Hochschule ใน Berlin ปี ค.ศ. 1924 และได้ปริญญาเอก Dr.-Ing ในปี ค.ศ. 1927 ทำวิทยานิพนธ์ เกี่ยวกับ High-speed cathode ray oscilloscope เขามีความประทับใจผลงานของเกเบรียล ลิปมานน์ เกี่ยวกับการบันทึกภาพสีสองมิติ จากการ Encode ข้อมูลภาพในรูปแบบคลื่นนิ่งแล้วจึง Decode เป็นภาพสีบันทึกลงบนแผ่นไวแสง เขาได้ใช้แนวคิดอันเดียวกันนี้สร้างภาพสามมิติขึ้นมา ซึ่งรู้จักกันในนามภาพโฮโลแกรม กาบอร์ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี ค.ศ. 1971 จากผลงานดังกล่าว

เมื่อมองชีวิตของลิปมานน์และกาบอร์มีความคล้ายคลึงกันมาก ทั้งคู่เริ่มจากความชอบและสนใจในวิชาคณิตศาสตร์และฟิสิกส์ จากนั้นได้นำหลักการดังกล่าวมาประยุกต์เทคโนโลยีบันทึกภาพสีโดยอาศัยหลักการแทรกสอดของแสง ผลงานดังกล่าวนำไปสู่การพัฒนาเชิงอุตสาหกรรมในหลายๆ ด้าน อย่างเช่น Hologram interferometer ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ตรวจสอบการบิดตัวและการสั่นของวัตถุที่มีความละเอียดสูง, Holographic grating, Holographic x-ray, เครื่องเล่น CD, แผ่น Hologram ที่คิดค้นบัตรเครดิต, ธนบัตร และอื่นๆ

## จากเทคโนโลยีการบันทึกภาพสู่หน่วยวัดกรรมกล้อง CCD

งานวิจัยที่สองที่ได้รับรางวัลโนเบลปีนี้ ที่นับได้ว่าเป็นส่วนเกี่ยวข้องกับการพลิกโฉมหน้าของเทคโนโลยีเชิงแสงก็คือการประดิษฐ์กล้อง CCD แทบจะกล่าวได้ว่าการพัฒนากล้องถ่ายรูปดิจิทัลดอลลงไม่สามารถพัฒนาและก้าวไปข้างหน้าอย่างรวดเร็วดังที่ปรากฏในปัจจุบันโดยปราศจาก CCD ไม่ว่าจะเป็นกล้องโทรทรรศน์ที่ติดตั้งในกล้องโทรทรรศน์อวกาศฮับเบิล (Hubble Space Telescope) ซึ่งมีมีส่วนช่วยนักดาราศาสตร์ได้มองเห็นภาพที่เป็นไปในเอกภพได้กระจ่างขึ้น สิ่งต่างๆ เหล่านี้ที่เกิดขึ้นล้วนแต่เป็น Cutting-edge technology ที่ตามมาหลังจากที่กล้อง CCD ได้อุบัติขึ้นเกินความคาดหมายกว่าที่ทั้งบอยล์ (Willard Boyle) และ สมิธ (George Smith) จะสามารถมองเห็น เรื่องราวของการคิดค้นประดิษฐ์กล้อง CCD นั้นเริ่มขึ้นในราวเดือนกันยายน ปี ค.ศ. 1969 ที่ได้เริ่มใส่โครงการประดิษฐ์ Image sensor บนกระดานดำในห้องทำงานของบอยล์ ในตอนนั้นยังไม่ได้คิดไปไกลถึงวิธีการที่จะบันทึกภาพดิจิทัลพวกนี้ เป้าหมายแรกของโครงการนี้มุ่งไปที่การสร้าง Electric memory CCD เองก็ไม่ต่างไปจากอุปกรณ์อื่นๆ ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ที่ล้วนแต่ถูกผลิตขึ้นจากโครงสร้างของซิลิกอน เมื่อพูดถึงความจุของ CCD ก็คือแผ่นซิลิกอนขนาดสามมิลลิเมตรสามารถบรรจุ Photocell ที่ไวต่อแสงได้เป็นล้านๆ ตัว เทคนิคการสร้างภาพอาศัยหลักการทางฟิสิกส์ที่มีชื่อว่า Photoelectric effect ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ค้นพบโดยอัลเบิร์ต ไอนสไตน์ (Albert Einstein) ซึ่งทำให้เขาได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์จากผลงานนี้ในปี ค.ศ. 1921 กล่าวคือ เมื่อเราฉายแสงลงบนแผ่นซิลิกอน อิเล็กตรอนใน Photocell ก็จะถูกชนกระดอนออกมา โดยที่ปริมาณของอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับความเข้มของแสงที่ฉายลงไป อย่างไรก็ตามในการที่จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากแผ่นซิลิกอนได้นั้น ความถี่ของแสงที่ฉายลงไปนั้นต้องเป็นความถี่ที่มีความเหมาะสมกับชนิดของโลหะนั้น มิฉะนั้นอิเล็กตรอนก็จะไม่สามารถหลุดออกมาได้ ไม่ว่าเราจะเพิ่มความเข้มของแสงที่ฉายลงไปเท่าใดก็ตาม นอกจากนี้ในการที่จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมา พลังงานของแสงซึ่งก็คือ โฟตอนที่ถูกดูดซับโดยอิเล็กตรอน จะต้องมีความพอที่จะเอาชนะพลังงานศักย์ที่เกิดจากการยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมภายในโครงสร้างนั้นๆ จากนั้นเมื่อเราใส่ความต่างศักย์ไฟฟ้าเข้าไปใน CCD array จะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จาก

จุดหนึ่งใน Array ไปยังอีกตำแหน่งหนึ่งใน Array ผลของศักย์ไฟฟ้าที่ใส่เข้าไปนั้นจะทำให้อิเล็กตรอนกระโดดจากหลุมศักย์หนึ่งไปยังอีกหลุมศักย์หนึ่งในแต่ละแถว ทำให้เราสามารถอ่านข้อมูลดิจิทัลได้เป็นแถวๆ ทีละแถว ซึ่งอาจจะกล่าวได้ว่าข้อมูลของภาพซึ่งก็คือแสงที่ฉายลงบนซิลิกอนถูกเปลี่ยนเป็นข้อมูลดิจิทัลที่เป็นเลขฐานสอง คือ 0 หรือ 1 เราเรียกจุดต่างๆบนแผ่นซิลิกอนที่ถูกบันทึกข้อมูลเมื่อแสงตกกระทบว่าพิกเซล (Pixel) ตัวอย่างเช่น Array ของภาพขนาด 10 x 10 ถูกแปลงเป็นเลขฐานสองของเส้นตรงที่มีความยาว 100 หน่วย ความจุของภาพขนาด 10 x 10 จะมีความจุ 100 พิกเซล นั่นคือ CCD ที่มีขนาด 1280x1024 ก็จะมีค่าความจุ 1.3 ล้านพิกเซล กรณีของภาพสีจะต้องมีฟิลเตอร์ (Filter) ใส่ไว้ในสีหลักแต่ละสี คือ สีแดง, สีเขียว และสีน้ำเงิน ที่เหมาะสมกับ Sensitivity ของตามมนุษย์ กล่าวคือ จำนวนของพิกเซลสีเขียวจะต้องเป็นจำนวนสองเท่าของพิกเซลสีแดงหรือสีฟ้า นอกจากนี้ยังมีการปรับแต่งฟิลเตอร์ของสีเพื่อให้ภาพเกิดความคมชัด

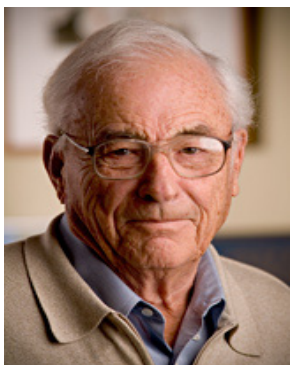


**รูปที่ 15** แสดงหลักการทำงานของ CCD โดยการเปลี่ยนข้อมูลภาพที่เกิดจากแสงที่ตกลงบนแผ่นซิลิกอนเป็นข้อมูลดิจิทัลในรูปของเลขฐานสอง

ประวัติของผู้ได้รับรางวัลในส่วนนี้คร่าวๆ เป็นดังนี้ ทั้ง บอยล์ (Willard S. Boyle) และสมิธ (George E. Smith) ได้ทำงานกับ Bell Lab ที่รัฐนิวเจอร์ซีย์มาก่อน สมิธเป็นผู้ร่วมงานที่อยู่ในโครงการประดิษฐ์ CCD ภายใต้การควบคุมดูแลของบอยล์ซึ่งเป็นผู้ดำเนินการของห้องปฏิบัติการพัฒนาเครื่องมือ บอยล์ถือสองสัญชาติคือแคนาดาและสหรัฐ เกิดที่แอมเฮิร์ทซ์ โนวาสโกเชีย (Amherst Nova Scotia) ประเทศแคนาดา ปี ค.ศ. 1924 จบปริญญาเอกสาขาฟิสิกส์ จากมหาวิทยาลัยแมคกิลล์ (McGill University) ในปี ค.ศ. 1950 ตำแหน่งสุดท้ายก่อนเกษียณในปี ค.ศ. 1979 คือ

ผู้อำนวยการบริหารของ Communication Science Division ส่วนสมิธ (George E. Smith) เป็นผู้ร่วมงานในกลุ่มเดียวกัน เกิดปี ค.ศ. 1930 เมือง White Plains มลรัฐนิวเจอร์ซีย์ สหรัฐอเมริกา จบปริญญาเอกสาขาฟิสิกส์ปี ค.ศ. 1959 จากมหาวิทยาลัยชิคาโก เข้าทำงานกับ Bell Lab ในหน่วยวิจัยภายใต้การควบคุมดูแลของบอยล์เกษียณจากที่นี่ในปี ค.ศ. 1986 โดยมีตำแหน่งสุดท้ายเป็นหัวหน้าของ VLSI Device Department

ผลงานจากเรื่อง CCD ได้ถูกนำมาประยุกต์เพื่อให้ได้ภาพที่มีคุณภาพในรูปแบบของดิจิทัล ผลงานที่ตีพิมพ์สองบทความทั้งทฤษฎีและเชิงปฏิบัติ ปรากฏในปี ค.ศ. 1970 ผลงานแรกทางทฤษฎีเป็นผลงานที่สมิธตีพิมพ์คู่กับบอยล์ ในวารสาร Bell Systems Technical Journal [Bell System Technical Journal, W.S. Boyle and G.E. Smith, **49**, 587 (1970)] ส่วนอีกหนึ่งบทความเป็นเชิงปฏิบัติที่สมิธตีพิมพ์กับทีมของเขาในปีเดียวกันนั้น [Bell Systems Technical Journal, G.F. Amelio, M.F. Tompsett and G.E. Smith, **49**, 593, (1970)] ในแง่ของวัสดุศาสตร์ ผลงานการประดิษฐ์นี้เป็นการพัฒนาเทคโนโลยีของ MOS (Metal Oxide Semiconductor) ตัวใหม่ที่ผนวก (Integrate) อุปกรณ์การบันทึกและการอ่านข้อมูลเข้าไว้ในตัวเดียวกัน โดยการจัดเรียงข้อมูลที่อยู่ในรูปของประจุไฟฟ้า มาเรียงตัวใหม่ในรูปแบบของดิจิทัล (ระบบเลขฐานสอง) มีชื่อว่า BBD (Bucket Brigade Device) ถูกคิดค้นและจดสิทธิบัตรในปี ค.ศ. 1967 โดย แซงสเตอร์ (F. Sangster) หลังจากนั้นจึงได้มีการตีพิมพ์คู่กับเทียร์ (K. Teer) ในปี ค.ศ. 1969 ในวารสาร IEEE J. of Solid State Circuit, SC-4, 131, (1969) ชื่อที่เรียกกันว่า BBD นี้มาจากคุณลักษณะการเคลื่อนย้ายประจุระหว่างตัวเก็บประจุอันถัดไปอย่างต่อเนื่องเป็นลูกโซ่ โดยอาศัยคุณสมบัติของ Transistor เป็นตัวช่วยให้การเคลื่อนย้ายประจุจากตัวเก็บประจุหนึ่งไปยังอีกตัวหนึ่งถัดไปได้ในหนึ่ง Clock cycle



**รูปที่ 16** วิลลาร์ด บอยล์ (Willard Sterling Boyle) สัญชาติแคนาดาและอเมริกัน เกิดวันที่ 19 สิงหาคม ค.ศ. 1924 ที่ Amherst Nova Scotia ประเทศแคนาดา บิดาประกอบอาชีพทางการแพทย์ย้ายไปอยู่ที่ Quebec ตั้งแต่อายุสามขวบและได้รับการศึกษาเบื้องต้นที่บ้านจากมารดาจนอายุ 14 ปี หลังจากนั้นจึงเข้าเรียนต่อมัธยม แล้วจบปริญญาตรี (B.Sc. 1947), โท (M.Sc. 1948), และเอก (Ph.D. 1950) สาขาฟิสิกส์ที่มหาวิทยาลัยแมคกิลล์ (McGill University) ในปี ค.ศ. 1943 ถูกเกณฑ์เข้ากองทัพเรือเพื่อร่วมรบในสงครามโลกครั้งที่สอง หลังจากสงครามสงบลงจึงเข้าทำการศึกษาต่อจนจบปริญญาเอก หลังจากนั้นทำงานหนึ่งปีใน Canada's Radiation Lab และเป็นอาจารย์สอนฟิสิกส์ที่ Royal Military College ของแคนาดาอยู่สองปีก่อนที่จะร่วมงานในฐานะนักวิจัยที่ Bell Lab ในปี 1953 ได้ร่วมงานกับ คอนเนลสัน (Don Nelson) ในปี ค.ศ. 1962 ซึ่งนำไปสู่การจดสิทธิบัตรในเรื่องของ Semiconductor Injection Laser หลังจากนั้นได้รับตำแหน่งผู้อำนวยการของ Space Science and Exploratory Study ที่ Bellcomm ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของ Bell Lab เพื่อสนับสนุนโครงการอพอลโล ในการเลือกบริเวณที่จะนำยาน Lunar Module ร่อนลงบนดวงจันทร์ หลังจากสำเร็จจากโครงการนี้ เขากลับมาทำทีมวิจัยและพัฒนา IC ที่ Bell Lab ในปี ค.ศ. 1964 ในปี ค.ศ. 1969 ได้เริ่มโครงการวิจัยเพื่อหาทางสร้าง CCD ขึ้นมาร่วมกับสมิธ ซึ่งนำไปสู่รางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ปี 2009 เขาเกษียณอายุจาก Bell Lab ในปี 1979 ในตำแหน่ง Executive Director ของ Communication Science Division

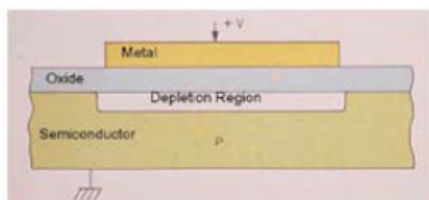
คุณสมบัตินี้เป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่ทำให้การเคลื่อนย้ายประจุสามารถเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ คุณสมบัติของ BBD ที่เกิดขึ้นใน MOS ดังกล่าวเป็นสมบัติที่บอยล์และสมิธใช้เลียนแบบในการพัฒนา CCD เพียงแค่ประจุที่ถูกสร้างขึ้นมานั้น

เกิดจากแสงโดยปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect) จากนั้นจึงทำการเคลื่อนย้ายประจุอย่างต่อเนื่องเป็นลูกโซ่เพื่อแปลงสัญญาณประจุที่เกิดจากภาพ (ก็คือแสงที่ตกกระทบบน MOS) ให้อยู่ในรูปของดิจิทัล ในตอนเริ่มต้นของการพัฒนาเพื่อผลิตต้นแบบนั้น บอยล์และสมิธเรียกอุปกรณ์ที่เขาสร้างนั้นมานี้ว่า CBD (Charge Bubble Device) หัวใจของการออกแบบก็คือการหาทางเคลื่อนย้ายประจุเป็นลูกโซ่อย่างต่อเนื่องบนผิวของสารกึ่งตัวนำ ต่อมา CBD ได้ถูกเรียกชื่อว่า CCD (Charge-Coupled Device) จนติดปากกันในปัจจุบัน



**รูปที่ 17** สมิธ (George Elwood Smith) สัญชาติอเมริกัน เกิดวันที่ 10 พฤษภาคม ค.ศ. 1930 ที่ White Plains นิวยอร์ก จบปริญญาตรีฟิสิกส์ จากมหาวิทยาลัยเพนซิลเวเนีย (University of Pennsylvania) ในปี ค.ศ. 1955 และปริญญาเอกสาขาฟิสิกส์ที่มหาวิทยาลัยชิคาโก (University of Chicago) ในปี ค.ศ. 1959 ด้วยวิทยานิพนธ์เพียง 3 หน้ากระดาษ เขาเข้าร่วมงานกับ Bell Lab ในปีที่เขาจบปริญญาเอก สมิธจดสิทธิบัตรกว่า 40 ชิ้นในระหว่างที่ทำงานอยู่กับ Bell Lab เขาได้รับรางวัลต่างๆ มากมายร่วมกับบอยล์ อาทิ Stuart Ballantine Medal ในปี ค.ศ. 1973, IEEE Morris N. Liebmann Memorial Award ในปี ค.ศ. 1974, Charles Stark Draper Prize ในปี ค.ศ. 2006 และรางวัลอันทรงเกียรติสุดท้ายก็คือรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ปี 2009 เขาเริ่มงานชิ้นนี้หลังจากที่ได้รับแนวคิดของโครงการจากบอยล์ในปลายวันหนึ่งของปี ค.ศ. 1969 จากนั้นใช้เวลาในการร่างแนวคิดเพื่อที่จะประดิษฐ์ CCD ชั่วโมงกว่าๆ และผลิตต้นแบบออกมาภายในหนึ่งสัปดาห์ เขาเกษียณอายุจาก Bell Lab ปี ค.ศ. 1986 ในตำแหน่ง Head ของ VLSI Device Department

การต่อยอดเทคโนโลยีของ CCD เริ่มจากการสร้างหน่วยความจำ 8-bit shift register โดยเริ่มจากการป้อนข้อมูลในรูปแบบของประจุเข้าไปที่ Input register ต่อมาในปี 1971 ไมเคิล ทอมเซตต์ (Michael F. Tompsett) นักวิจัยที่ Bell Lab ได้นำสิ่งที่บอลลีและสมิธคิดค้นสร้างเป็นกล้อง CCD โดยที่ประจุที่ป้อนเข้า Input register นี้ถูกสร้างมาจากแสงที่ตกกระทบลงบนแผ่นซิลิกอนซึ่งจะให้ประจุออกมาตามปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก หลังจากนั้นเป็นต้นมาจึงเกิดการวิจัยค้นคว้าเพื่อพัฒนากล้อง CCD ที่มีคุณภาพอย่างต่อเนื่อง หลายๆ บริษัทไม่ว่าจะเป็น Fairchild Semiconductor, RCA, Texas Instrument ได้จับผลงานของทอมเซตต์ไปพัฒนาต่อทันที หลังจากนั้นประมาณ 3 ปี Fairchild Semiconductor ภายใต้การนำของเอมิลิโอ (Gil Amelio) ซึ่งเคยอยู่กับ Bell Lab มาก่อน สามารถพัฒนาต่อจนสามารถนำไปสู่อุตสาหกรรมเชิงพาณิชย์ได้ในปี ค.ศ. 1974 ซึ่งสามารถผลิตกล้อง CCD 100x100 pixel ขึ้นมาได้ บริษัทโซนี่ภายใต้การนำของ คาซุโอะ อิอามา (Kazuo Iwama) ได้ทุ่มทุนมหาศาลจนสามารถผลิตเครื่องบันทึกภาพดิจิทัลออกมาได้เป็นครั้งแรกจนเกิดการผลิตขนาดใหญ่ (Mass production) อิอามาตายในปี ค.ศ. 1982 ได้มีการนำ CCD chip จารึกไว้ที่หินบนหลุมศพของเขาเพื่อเป็นการระลึกถึงผลงานที่เขาได้ฝากไว้ให้แก่โลก

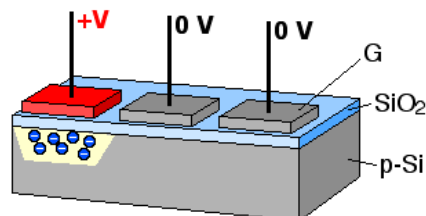


รูปที่ 18 โครงสร้างพื้นฐานของ MOS ซึ่งเป็นฟิล์มบางของซิลิกอนไดออกไซด์

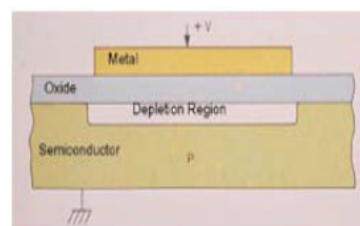
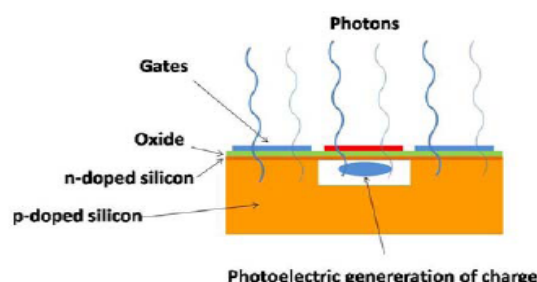
#### โครงสร้างและฟิสิกส์ของการทำงาน

CCD ถูกสร้างขึ้นมาจาก Silicon wafer ที่ผ่านขบวนการประกอบขึ้นมาเป็นชั้นๆ รวมไปถึงขั้นตอน Photolithographic ที่ซับซ้อน Photolithography เป็นขบวนการที่ใช้ใน Microfabrication ในการสร้างชิ้นงานที่มีขนาดเล็กมากและต้องการความละเอียดสูง โดยการฉายแสงลงบนชิ้นงานที่ผ่าน Mask ซึ่งทำหน้าที่เป็นเหมือนแม่พิมพ์แบบ กล่าวคือ บริเวณที่ถูก

แสงจะยึดแน่นและไม่สามารถแกะหรือลอกออก (Etch) ได้ ในขณะที่บริเวณที่ไม่ถูกแสงจะถูก Etch ออกเป็นรูปทรงที่ถูกกำหนดโดยแม่พิมพ์นั้นๆ



รูปที่ 19 แสดงการเคลื่อนย้ายประจุใน MOS ซึ่งมี  $\text{SiO}_2$  เป็นโครงสร้างพื้นฐาน กลุ่มประจุที่อยู่ทางด้านซ้ายมือถูกรวบรวมไว้ในหลุมศักย์ที่ถูกสร้างขึ้นมาจากศักย์ +V ที่ตรง Gate electrode (G) กลุ่มประจุจะถูกเคลื่อนย้ายอย่างต่อเนื่องเป็นลูกโซ่ โดยการใส่ศักย์ +V เป็น sequence ที่ถูกต้องอย่างต่อเนื่อง ด้วยวิธีการดังกล่าว



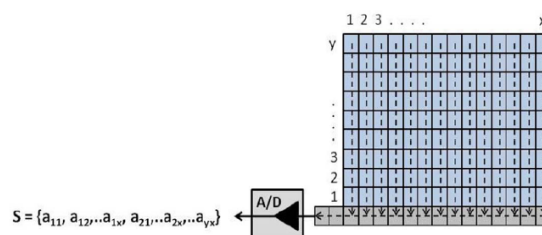
รูปที่ 20 แสดงภาพของ MOS capacitor ที่ใช้เป็นอุปกรณ์ที่ไวต่อแสง โดยที่ประจุอิเล็กตรอนจะถูกปลดปล่อยออกมาเมื่อผิวของโลหะออกไซด์ถูกฉายด้วยแสง ประจุที่เกิดขึ้นก็จะถูกกักไว้ในหลุมศักย์ใน Substrate ของ p-doped silicon โดยมีชั้นฟิล์มบางของ n-doped silicon ที่ปลูกขึ้นบนผิวของ Substrate นี้แล้วถูกประกบด้วยโลหะออกไซด์

แนวคิดนี้มีความคล้ายคลึงกับเทคนิคการถ่ายรูปและล้างรูปด้วยฟิล์มโพราลอยด์ ซึ่งการล้างรูปเปรียบได้กับการ Etch ในขบวนการ Photolithography พวก IC ที่มีความซับซ้อนหรือพวก CMOS รุ่นใหม่ๆ ที่ผ่านขบวนการ Photolithography จะมีขบวนการผลิตที่ละเอียดและเร็วกว่าขบวนการปกติถึง 50 เท่า

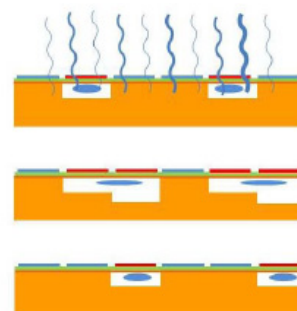
ในแง่ของโครงสร้างแล้ว Silicon-substrate จะถูก Doped ด้วย Boron เพื่อสร้าง p-type silicon ซึ่งเป็นสารที่ตัวพาหะนำไฟฟ้า (Carrier) หลักเป็น Hole ซึ่งมีประจุบวก โดยปกติแล้วบริเวณผิวที่มีความไวต่อแสง (Photoactive region) จะถูก Doped ด้วย ฟอสฟอรัส (P) ซึ่งจะเป็นชั้นของ n-type silicon ชั้นฟิล์มบางนี้ถูกปลูกทีละชั้นด้วย Molecular beam epitaxy (MBE) ประกอบบนผิวของ Substrate ของ p-type silicon ชั้น n-type นี้ป้องกันไม่ให้ประจุถูกกักอยู่ใน Surface channel ในระหว่างการเคลื่อนย้ายประจุชั้นถัดมาจะเป็น Surface channel ซึ่งเป็นฟิล์มบางของซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ทำหน้าที่เป็นช่องทางลำเลียงเคลื่อนย้ายประจุที่เกิดจากอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาเมื่อถูกแสงฉายลงไป ผิวบนสุดจะเป็น Gate electrode ที่เราให้ศักย์ไฟฟ้าเพื่อเป็นตัวควบคุมการเคลื่อนย้ายประจุ กล่าวคือเมื่อเราให้ศักย์บวกเข้าไปที่ Gate electrode อิเล็กตรอนจะเข้าไปอยู่ในบริเวณผิวล่างของ Electrode ในขณะเดียวกัน พวก Hole ซึ่งมีประจุบวกจะถูกผลักออกไปจากบริเวณผิว Electrode ก่อตัวเป็นหลุมศักย์ลึกลงไปในซิลิกอน บริเวณดังกล่าวนี้มีชื่อว่า Depletion layer ซึ่งเป็นบริเวณที่อิเล็กตรอนทั้งหมดที่หลุดออกมาเมื่อถูกแสงฉายจะเข้าไปรวมกันในบริเวณนี้ จำนวนของอิเล็กตรอนที่เข้าไปออกกันอยู่บริเวณนี้จะเพิ่มขึ้นตามความเข้มของแสงที่ฉายลงไปจนกระทั่งบรรจบจนเต็มหลุมศักย์ ซึ่งจะต้องมีการควบคุมไม่ให้อิเล็กตรอนที่เข้าไปอยู่ในหลุมศักย์ล้นออกมานอกหลุม ตัวป้องกันนี้เปรียบได้กับชัตเตอร์ในกล้องถ่ายรูป กลไกของการควบคุมชัตเตอร์ขึ้นอยู่กับสถาปัตยกรรมของออกแบบ (Architecture design) ซึ่งจะได้อธิบายต่อไปภายหลัง

โดยโครงสร้างในแง่ของวัสดุศาสตร์จะเห็นได้ว่า CCD ก็เป็น MOS ที่ถูกออกแบบให้เป็น Detector ที่ใช้บันทึกภาพในรูปแบบดิจิทัลที่มี Surface structure ที่ประกอบด้วยเมทริกซ์ของเซลล์เล็กๆ จำนวนมากหรือที่เราเรียกว่าพิกเซลเรียงเป็นสองมิติของแถวและหลัก เมื่อแสงตกกระทบบนแต่ละพิกเซลก็จะให้

อิเล็กตรอนหลุดออกมาและจะถูกเก็บไว้ในหลุมศักย์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุ จำนวนอิเล็กตรอนขึ้นกับความเข้มแสงที่ตกกระทบบนแต่ละพิกเซล ข้อมูลของภาพจึงเก็บในรูปแบบของการกระจายตัวของอิเล็กตรอนบนแต่ละพิกเซล ส่วน Output signal ทำได้โดยการเคลื่อนย้ายกลุ่มประจุเป็นลูกโซ่อย่างต่อเนื่องทีละแถวทีละแถวไล่ลงมาโดยผ่าน A/D converter



รูปที่ 21 ภาพแสดงหลักการ Read-out ของ CCD chip ซึ่งจะทำให้การอ่านทีละแถวเลื่อนลงมาโดยผ่าน A/D converter ซึ่งจะให้ Output signal ออกมา



รูปที่ 22 การ Read-out สัญญาณ สามารถทำได้โดยการรวบรวมประจุเข้าไว้ในหลุมศักย์ จากนั้นจึงทำการเคลื่อนย้ายประจุจากหลุมศักย์หนึ่งไปยังอันถัดไป ซึ่งสามารถควบคุมโดย Voltage pulse บน Electrode

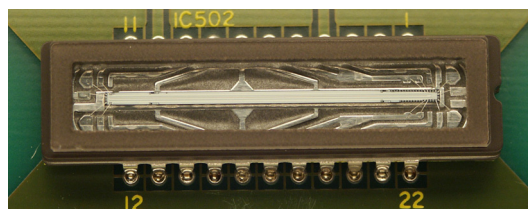
### สถาปัตยกรรมของการออกแบบ CCD

สถาปัตยกรรมของการออกแบบมีความหลากหลาย ที่ใช้กันมากมีด้วยกันสามแบบ คือ Full-frame, Frame-transfer และ Interline ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับการควบคุมชัตเตอร์ของการรับแสงที่ตกลงบน Surface structure ใน Full-frame พื้นที่ทั้งหมดจะถูกใช้ในการรับแสง แต่เราสามารถเพิ่มชัตเตอร์เชิงกล (Mechanical shutter) เข้าไปเพื่อกำหนดปริมาณแสงที่ต้องการรับ

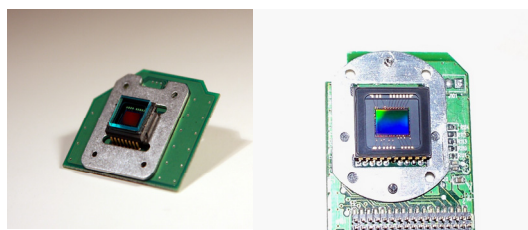
โดยตั้งรอบเวลาของการ Read-out ข้อมูล ใน Frame-transfer นั้นเพียงครึ่งหนึ่งของ Surface structure เท่านั้นที่ได้รับแสง อีกครึ่งหนึ่งจะถูกปิดด้วยแผ่นหน้ากากที่ทำด้วยอลูมิเนียม ข้อมูลภาพที่ได้รับจะถูกส่งไปเก็บไว้ในบริเวณที่บังแสงซึ่งเป็นบริเวณที่เก็บข้อมูลภาพชั่วคราว ผลที่ตามมาคือจะมีการสูญเสียข้อมูลภาพประมาณสองสามเปอร์เซ็นต์ ข้อมูลภาพถัดไปก็จะถูกอ่านและส่งต่อที่ละชุด ลักษณะของ Frame-transfer ไม่ต้องมีชัตเตอร์เชิงกลแต่มีข้อเสียก็คือ จะต้องใช้ MOS เพิ่มเป็นสองเท่าเพื่อที่จะให้สามารถมีประสิทธิภาพในการอ่านภาพเท่ากับแบบ Full-frame นอกจากนี้ต้นทุนการผลิตก็เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าเช่นกัน

สำหรับการออกแบบชนิด Interline นั้นขยายแนวคิดของการออกแบบเชิงสถาปัตยกรรมไปอีกหนึ่งขั้น โดยการใส่หน้ากากบังแสงเป็นช่วงๆ ทำให้การอ่านและส่งต่อของข้อมูลภาพเป็นไปได้เร็วขึ้น ข้อเสียก็คือ ทุกๆ ครั้งที่มีการส่งข้อมูลไปยังบริเวณที่เก็บข้อมูลชั่วคราวก่อนจะส่งต่อ นั้นจะมีการสูญเสียเกิดขึ้นค่อนข้างมากประมาณ 50% เนื่องจากการกระจายของแสงบางส่วนไปยังบริเวณที่ไม่ถูกแสง จึงมีการออกแบบเพิ่มเติมเพื่อลดการสูญเสีย โดยการเพิ่ม Microlens เข้าไปทำให้แสงโฟกัสลงบนบริเวณ Active surface structure มากขึ้น วิธีการนี้ทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นถึง 90% หรืออาจจะมากกว่านั้นขึ้นอยู่กับขนาดของพิกเซลและการออกแบบเพิ่มเติมในส่วนอื่นๆ จะเห็นได้ว่าสถาปัตยกรรมของการออกแบบชนิด Inline-frame นี้จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและลดต้นทุนการผลิต กล้อง CCD โดยทั่วไปที่ราคาไม่แพงมาก จะใช้การออกแบบ Interline การเลือกชนิดของกล้องซึ่งขึ้นกับชนิดของการออกแบบขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งาน ตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการภาพที่มีคุณภาพสูงสุดและไม่กังวลเรื่องเวลาที่ใช้ในการอ่านภาพ ตลอดจนเรื่องราคา ก็น่าจะเป็นแบบ Full-frame กล้องโทรทรรศน์ที่ใช้ในทางดาราศาสตร์ใช้ชนิด Full-frame ส่วน Frame-transfer จะเป็นอะไรที่อยู่ตรงกลางระหว่าง Frame-transfer และ Interline พิกเซลของ CCD ที่ใช้ในพวกกล้องดิจิทัล สแกนเนอร์ และกล้องวิดีโอจะถูกออกแบบเป็นรูปกริด (Grid) ซึ่งจะมีประสิทธิภาพของการรับแสงประมาณ 70% ดีกว่าการถ่ายรูปโพลาอยด์โดยทั่วไปซึ่งมีประสิทธิภาพของการรับแสงเพียง 2% เท่านั้น โดยส่วนใหญ่ CCD จะตอบสนองได้อย่างดีที่แสงย่าน Near-infrared ซึ่งใช้ถ่ายภาพเวลากลางคืนหรือในที่ที่ไม่ค่อยมีแสงสว่าง สำหรับพวก

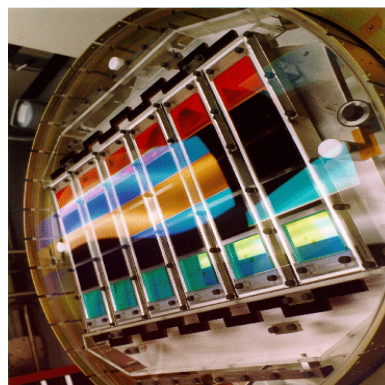
เครื่องบันทึกภาพวิดีโอเราสามารถเพิ่มประสิทธิภาพ CCD ที่ใช้ในที่ซึ่งความเข้มแสงน้อยๆ ได้ โดยการลดคุณสมบัติของตัว CCD sensor ซึ่งจะช่วยลด Dark current (เป็นกระแสที่เกิดจาก Thermal noise) ซึ่งจะช่วยในการบันทึกภาพที่มีความเข้มแสงน้อย นอกจากในย่านอินฟราเรดแล้วยังรวมไปถึงย่าน UV และช่วงที่มองเห็นด้วยตาอีกด้วย



รูปที่ 23 CCD sensor ที่ใช้ในเครื่องส่งแฟกซ์



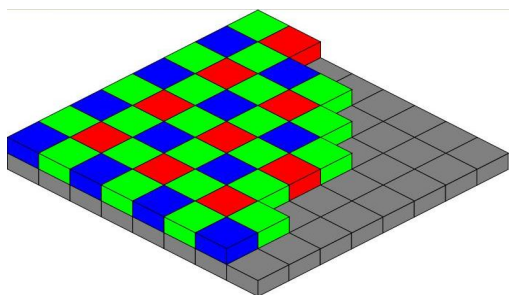
รูปที่ 24 CCD ของกล้องดิจิทัล ที่ให้ความละเอียดภาพ 2.1 megapixel ด้านซ้าย เป็นของกล้อง Argus ส่วนขวามือ เป็นของกล้อง Hewlett-Packard



รูปที่ 25 Array ของ CCD 30 ตัวที่ใช้ในกล้องโทรทรรศน์ดาราศาสตร์ที่ใช้ใน Sloan Digital Sky Survey กล้องในทางดาราศาสตร์ ซึ่งต้องการ Sensitivity ค่อนข้างสูง จึงต้องมีการควบคุมอุณหภูมิ

เพื่อลด Dark current อันเกิดเนื่องมาจาก Thermal noise กล้องดาราศาสตร์ที่ใช้ CCD sensor สามารถบันทึกภาพในย่าน UV, IR และย่านที่ตามองเห็น

ในการบันทึกภาพสีนั้นอาศัยการออกแบบฟิลเตอร์สีที่มีชื่อว่า Bayer filter หลักการของการออกแบบ ก็คือ การจัดเรียงฟิลเตอร์ของสีแดง-เขียว-น้ำเงิน (RGB) ใน Array ด้วยอัตราส่วน สีเขียว 50%, สีแดง 25% และ สีน้ำเงิน 25% การออกแบบนี้เกี่ยวข้องกับ Sensitivity ของการรับรู้สีของมนุษย์ เนื่องจากตามนุษย์ตอบสนองสีเขียวมากกว่าสีแดงและสีน้ำเงิน เทคนิคการบันทึกภาพสีก็คือใช้ 4 พิกเซล ในแต่ละ Resolution element กล่าวคือ 2 พิกเซลเป็นสีเขียว สีแดง และสีน้ำเงินอย่างละ 1 พิกเซล เราสามารถปรับเทคนิคการบันทึกภาพสีให้มีคุณภาพดีขึ้นได้โดยเทคนิคที่มีชื่อว่า Dichroic beam splitter แยกสีต่างๆ ออกจากกัน และโดยการใช้ CCD sensor หลายตัวเข้าช่วยจะให้ได้ความละเอียดของภาพที่ดีขึ้น กล้องโทรทรรศน์ทางดาราศาสตร์ที่ต้องถ่ายภาพที่มีความเข้มแสงน้อยและต้องการความละเอียดสูง ต้องอาศัยฟิลเตอร์หลายตัวในการเก็บข้อมูลภาพ



**รูปที่ 26** โครงสร้างของ Bayer Filter ของ CCD ที่ใช้ในกล้องบันทึกภาพสี โดยมีอัตราส่วนของสีเขียว:สีแดง:สีน้ำเงิน เป็น 2:1:1 นั่นคือ 1 Resolution element มีสีเขียว 2 พิกเซล สีแดง 1 พิกเซล และสีน้ำเงิน 1 พิกเซล

ส่วน Sensitivity ของ CCD ขึ้นกับความยาวคลื่นแสงและชนิดของอุปกรณ์ที่นำ CCD ไปติดตั้ง CCD คุณภาพสูงในปัจจุบันมีค่า Quantum efficiency (คือ ค่าอัตราส่วนของกระแสอิเล็กตรอนที่เกิดจากอิเล็กตรอนหลุดออกจากผิวโลหะเมื่อแสงฉายลงไป ต่อ ปริมาณโฟตอนที่ตกกระทบต่อวินาที) ถึง 90% สมบัติ

อีกอย่างหนึ่งที่ใช้เป็นตัววัดคุณภาพของ CCD ก็คือ Dynamic range หรือ Luminance range ซึ่งก็คือความสามารถที่จะให้ภาพที่มีความสว่างมากและสว่างน้อยได้ในเวลาเดียวกัน ค่านี้ถูกกำหนดโดยสัดส่วนระหว่าง Full well capacity และ Noise level โดยทั่วไปค่าของ Full well capacity มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับจำนวนอิเล็กตรอน  $10^5$  ตัว ในขณะที่ Noise level โดยประมาณอยู่ที่อิเล็กตรอนจำนวน 2 – 3 ตัว ดังนั้น Dynamic range จึงมีค่าราวๆ 50,000

ค่าความละเอียด (Resolution) ของ CCD ถูกกำหนดโดยขนาดของพิกเซล ขนาดของพิกเซลโดยทั่วไปที่สามารถผลิตได้ในปัจจุบันมีขนาดประมาณ 1 - 2 ไมครอน (1 ไมครอน เท่ากับ หนึ่งในล้านเมตร) ค่าความละเอียดมาตรฐานในอุปกรณ์ปัจจุบันอยู่ที่ 2048 x 2048 พิกเซล

อุปกรณ์อีกชนิดหนึ่งที่มีผลกระทบต่อเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ นั่นคือ CMOS (Complementary MOS) เป็นพวกทรานซิสเตอร์ที่ใช้ n-type และ p-type ร่วมกันในการสร้างระบบวงจรตรรกศาสตร์ (Logic Circuit) ที่ใช้กำลังไฟฟ้านาโนวัตต์ในระหว่าง Switching process ของเลขฐานสองจาก 0 → 1 การพัฒนาเทคโนโลยี CMOS เป็นกุญแจสำคัญที่เชื่อมโยงไปสู่อุตสาหกรรมพวก IC (Integrated Circuit) รางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ปี 2000 ได้มอบให้กับการประดิษฐ์ IC เนื่องจากงานวิจัยดังกล่าวมีผลกระทบอย่างใหญ่หลวงต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์เป็นอย่างมาก CMOS ถูกพัฒนาขึ้นมาในราวปี ค.ศ. 1960 หลังจากนั้นอีกประมาณทศวรรษถัดมา CMOS sensor ที่เกิดขึ้นมาจาก Photosensitive sensor ชนิด reversed biased ชนิด pn เพื่อใช้อ่านข้อมูลดิจิทัลในวงจรไฟฟ้าก็ได้ถูกสร้างขึ้นมา หน้าที่ของ CMOS ที่ตอบสนองต่อแสงนี้ทำหน้าที่เหมือนกับ CMOS ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์โดยทั่วไปเนื่องจากแต่ละพิกเซลต้องใช้ทรานซิสเตอร์หลายตัว โดยเฉพาะแต่บริเวณที่ไวต่อแสงเท่านั้น ขนาดของพิกเซลใน CMOS ประเภทนี้จึงใหญ่กว่าพิกเซลที่ออกแบบสำหรับกล้อง CCD นอกจากจะใช้กำลังไฟฟ้าค่อนข้างต่ำแล้วยังให้ Sensitivity ที่ดีกว่า CMOS ปกติโดยทั่วไป

จากแนวคิดของบอห์และสมิธที่ Bell Lab ในปี 1969 และนำไปสู่ CCD prototype ชิ้นแรกของโลก หลังจากนั้นไม่กี่

สปีดาร์ ได้ก่อให้เกิดความตื่นตัวอย่างมากต่อการพัฒนาของ CCD sensor ต่อходไปสู่การพัฒนาเครื่องมือชนิดต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นกล้องดิจิทัล CCD, อุปกรณ์ทางการแพทย์, อุปกรณ์วิทยาศาสตร์ที่ต้องการความละเอียดสูง, กล้องโทรทรรศน์ดาราศาสตร์, CMOS เซนเซอร์ ซึ่งทำหน้าที่เหมือนกับ CMOS ที่ว่าไปแต่ต่างกันตรงที่ประจุที่เกิดขึ้นมาจากแสงที่ฉายลงบนพื้นที่ซึ่งไวต่อแสง และนอกจากนั้นยังใช้กำลังไฟฟ้าต่ำในระหว่างการทำงาน

สำหรับ CCD sensor หลังจากประดิษฐ์ CCD prototype เมื่อ 40 ปีที่แล้วได้มีคณานาวาณิดินนี้ไปต่อออกเป็นจำนวนมาก กล่าวคือมีการตีพิมพ์ผลในเรื่องที่เกี่ยวข้องกันนี้นับหมื่นผลงาน มี CCD sensor หลากหลายนับล้านแบบถูกออกแบบมาเพื่ออุปกรณ์แบบต่างๆ ตามลักษณะของการใช้งาน ตัวอย่างเช่นกล้องโทรทรรศน์ดาราศาสตร์ที่สามารถสร้างภาพขนาดใหญ่ที่สุดในโลก PAN-STARRS (Paranomic Survey Telescope and Rapid Response System) ใน Hawaii ที่ประกอบไปด้วย CCD chip มีขนาดมากกว่า 5 giga-pixels ระบบกล้อง WFPC (Wild Field Planetary Camera) ที่ติดตั้งบนกล้องฮับเบิลในสถานีวิจัยอวกาศฮับเบิล ในทางการแพทย์ กล้อง CCD มีส่วนช่วยในการศึกษาเนื้อเยื่อและเซลล์ เช่น ดูภาพและถ่ายภาพเซลล์และเนื้อเยื่อ เนื่องจากกล้อง CCD ให้ภาพที่มีความละเอียดสูงจึงทำให้แพทย์สามารถวินิจฉัยถึงความผิดปกติของเนื้อเยื่อหรือเซลล์ดังกล่าวได้ การประยุกต์ที่มีประโยชน์อย่างมากในทางการแพทย์ก็คือ กล้อง Endoscope ซึ่งช่วยทำให้แพทย์สามารถเห็นภาพของอวัยวะภายในร่างกาย และนอกจากนี้ยังช่วยแพทย์เห็นภาพขนาดเล็กในระหว่างการผ่าตัด

Solid-state sensor และ กล้องดิจิทัลได้เปลี่ยนรูปโฉมของเทคโนโลยีก้าวขึ้นไปอีกระดับ การเก็บข้อมูลในรูปของดิจิทัลนี้ไม่ว่าจะในเทคโนโลยีการถ่ายภาพ, การแพทย์, การส่งผ่านข้อมูล, ดาราศาสตร์ และการศึกษาวิทยาศาสตร์แขนงต่างๆ ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้ ผลงานในด้านนี้จึงถูกพิจารณาให้ได้รับรางวัลโนเบลปี 2009 เนื่องจากสิ่งประดิษฐ์ที่ถูกคิดค้นขึ้นมานี้ได้นำคุณอย่างเอนกอนันต์ ในแง่ของการพัฒนาเทคโนโลยีที่เป็นคุณแก่มนุษย์

### เฉลยปัญหาาร่วมสนุกประจำฉบับที่ 3

[illegible]

ในฉบับที่แล้วเรามีปัญหาซึ่งรางวัลคือคำถามว่า เพลงที่อยู่ในรูปของเลขฐานสองข้างบนนี้เป็นเพลงประกอบภาพยนตร์เรื่องอะไร คำตอบก็คือเพลงจากภาพยนตร์เรื่อง Anastasia ชื่อเพลง Once Upon A December ซึ่งมีท่านผู้อ่านเพียงท่านเดียวที่ตอบถูก คือคุณอารร นวทิพย์สกุล ซึ่งก็ได้รับของที่ระลึกจากทางกองบรรณาธิการเรียบร้อยแล้ว สำหรับวิธีการหาคำตอบโดยการใช้คำสั่งโปรแกรม MatLab นั้นทำได้โดยใช้คำสั่ง `char(bin2dec(reshape(T, 7, length(T)/7)))` โดยที่ตัวแปร T คือเลขฐานสองข้างต้น ซึ่งเป็นรหัส ASCII ขนาด 7 บิตนั่นเอง

# ระบบการศึกษาวิทยาศาสตร์ไทย ...จะไปถึงดวงดาว หรือจะเข้าขั้นมะเร็งระยะสุดท้าย ตอนที่ 3 (ตอนจบ): เส้นทางสู่มหาวิทยาลัย

เฉลิมพล รุจิรินทร์<sup>1</sup>

สิรพัฒน์ ประโทนเทพ<sup>2</sup>

เส้นทางสู่รั้วมหาวิทยาลัยไทยของเด็กนักเรียนไทยในอดีตเป็นระบบการสอบ Entrance ซึ่งเป็นการวัดผลครั้งเดียว แปลว่าสอบได้ก็ได้อ่านสอบตกก็อด หรือต้องรอปีต่อไป นี่เป็นจุดอ่อนของระบบการสอบแบบ Entrance ทำให้การเรียนของเด็กนักเรียนตลอด 6 ปี ในระดับมัธยมนั้นแทบจะไม่มีจุดหมาย ไม่จำเป็นต้องเรียนในชั้นเรียนก็สามารถสอบเข้ามหาวิทยาลัยได้ เกิดเป็นระบบสอบเทียบ และศูนย์ติวเตอร์ต่างๆทั่วทุกมุมเมือง ปัญหาเหล่านี้จึงนำมาซึ่งความพยายามในการปรับเปลี่ยนระบบการศึกษาเป็นระบบที่คล้ายคลึงกับระบบของประเทศไทยที่เรียกว่า A-net O-net และ GAT PAT ที่ใช้กันในปัจจุบัน แต่เส้นทางเดินเข้าสู่รั้วมหาวิทยาลัยเส้นทางใหม่นี้เป็นทางเลือกที่ดีกว่าเดิมหรือไม่

บทความตอนที่ผ่านมามีได้นำเสนอความแตกต่างระหว่างระบบการศึกษาของประเทศไทยและประเทศอังกฤษในระดับมัธยมต้น ซึ่งเทียบได้ประมาณระดับ iGCSE (O-level) ของอังกฤษ สิ่งหนึ่งของความแตกต่างที่ชัดเจนซึ่งอาจจะเกิดจากความเข้าใจที่ผิด รู้เท่าไม่ถึงการณ์ หรือ “ไม่รู้” อะไรเลย คือ การลดระดับการศึกษาระดับ ม.6 ของไทยให้เท่ากับเพียงแค่ระดับ iGCSE เท่านั้น และเป็นที่น่าเสียดายว่า ผลสอบ iGCSE นี้ยังสามารถนำไปใช้สมัครเข้าเรียนในมหาวิทยาลัยของไทยบางแห่งได้อีกด้วย ความเข้าใจผิดนี้ยังได้นำไปสู่การนำระบบการสอบวัดความถนัดซึ่งในประเทศไทยจะทำในช่วงก่อนการสอบ iGCSE มาใช้ใน

ไทย เพื่อสอบเข้ามหาวิทยาลัยในสาขาที่ต้องการ ทั้งที่จริงแล้วระบบการวัดความถนัดของประเทศอังกฤษมีการวัดทดสอบด้วยวิธีการหลากหลายอย่างถึงขั้นเป็นระยะเวลาถึง 2 ปี นักการศึกษาของประเทศอังกฤษล้วนแต่ทราบถึงผลกระทบของการเลือกเส้นทางอาชีพที่ผิด ต่อชีวิตทั้งชีวิตของเด็กนักเรียนคนหนึ่ง และผลเสียหายต่อประเทศโดยรวม แต่ถ้ามองวัดความถนัดในการเรียนของเด็กทำได้ถูกต้อง และเลือกวิถีอาชีพที่เหมาะสมบนฐานของความถนัด จะนำมาซึ่งความสุขในการทำงาน ความดำรงอยู่ได้อย่างดีในโลกของการแข่งขันอย่างยิ่งในปัจจุบัน และได้ผลผลิตประชากรคนหนึ่งซึ่งจะทำหน้าที่ของตนให้แก่ประเทศได้เต็มความสามารถและด้วยความภาคภูมิใจ

บทความตอนสุดท้ายนี้จะกล่าวถึงเส้นทางก้าวเข้าสู่มหาวิทยาลัยในประเทศอังกฤษ ว่าพัฒนาต่างไปจากระบบของประเทศไทยมากเพียงใด เริ่มจากการเรียนการสอนในระดับ A-Level ขึ้นตอนการสมัครเข้าเรียนในมหาวิทยาลัย และการพิจารณารับเด็กเข้าเรียนของมหาวิทยาลัยสิบอันดับแรกของประเทศอังกฤษ รวมถึงกรณีศึกษาที่น่าสนใจต่างๆ

## ระบบการเรียนการสอนในระดับ A-Level ของประเทศอังกฤษ

ใน Year 8 และ Year 9 ซึ่งเป็นระดับการศึกษาขั้นพื้นฐาน เป้าหมายหลักๆ ของการเรียนการสอนคือมุ่งหวังให้เด็กๆ ได้ค้นหาตัวเองให้พบ ว่าตนเองมีความชอบ มีความถนัด และ

<sup>1</sup> (ดร.) นักวิชาการอิสระ

<sup>2</sup> อาจารย์ (ดร.) วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

อยากเป็นอะไรในอนาคต จากนั้นใน Year 10 และ Year 11 คือการเรียนในระดับ iGCSE ให้เด็กๆ ได้เลือกเรียนเพียงเจ็ดถึงเก้าวิชาที่สอดคล้องกับสาขาที่ตนเองสนใจเท่านั้นเอง จะมีวิชาคณิตศาสตร์ วิทยาศาสตร์ และภาษาอังกฤษ เป็นวิชาบังคับให้ต้องเลือกสำหรับทุกคน ถึงแม้สามวิชานี้จะเป็นวิชาบังคับ แต่ในแต่ละวิชาบังคับเหล่านี้ก็ยังมีอีกหลายรูปแบบให้เลือกเรียน เพื่อให้สอดคล้องกับสิ่งที่เด็กจะเรียนต่อไปในอนาคต

ในระดับ Year 12 และ Year 13 คือระดับ A-level (ยังมีอีกสองระบบ คือ IB และ CPU ซึ่งจะยังไม่นำมากล่าวในที่นี้) โดยในระดับนี้จะให้เด็กเลือกเรียนเพียงสามวิชาที่จะต้องจริงจังในอนาคต แต่หากเด็กๆ ยังไม่แน่ใจร้อยเปอร์เซ็นต์ หรือหากต้องการเข้าเรียนในคณะพิเศษบางคณะ เด็กอาจเลือกเรียนได้ถึงสี่ถึงห้าวิชา แต่ทั้งนี้เด็กๆ จะต้องรู้ก่อนว่าแท้ที่จริงแล้วตนเองต้องการเข้าเรียนในคณะอะไร มหาวิทยาลัยไหน เพราะแต่ละคณะและแต่ละมหาวิทยาลัยต่างมีหลักเกณฑ์ในการพิจารณาเลือกรับเข้าที่ไม่เหมือนกัน

เนื้อหาการเรียนการสอนในระดับ Year 12 นี้เรียกว่าการเรียนในระดับ AS เทียบโดยเนื้อหาที่เด็กๆ ได้เรียนในแต่ละรายวิชาแล้ว ก็เท่ากับเนื้อหาที่จัดให้เด็กไทยได้เรียนในระดับมัธยมปลาย ดังนั้นเด็กไทยที่เรียนจบ ม.6 แล้วไปเรียนต่อที่ประเทศอังกฤษ ทางโรงเรียนในประเทศอังกฤษก็จะเทียบความรู้ให้เท่ากับ Year 12 และให้เด็กเลือกเรียนต่อสามวิชาในชั้น Year 13 ได้เลย (แต่ในประเทศไทย กลับอนุญาตให้เด็กที่เรียนจบเพียงแค่ Year 11 หรือ iGCSE นำผลการเรียนที่ผ่านเพียงแค่ห้าวิชามาเทียบวุฒิ ม.6 แล้วสามารถเข้าเรียนต่อในระดับมหาวิทยาลัยได้เลย)

เนื้อหาการเรียนการสอนในระดับ Year 13 นี้เรียกว่าการเรียนในระดับ A2 ซึ่งเนื้อหาในระดับนี้ลึกและยากกว่าการเรียนในระดับมัธยมของไทยมาก เนื้อหาในบางบทอาจครอบคลุมไปถึงเนื้อหาเบื้องต้นของการเรียนการสอนในระดับมหาวิทยาลัยปีที่สองหรือปีที่สามของไทยเลยทีเดียว การคิดคะแนนของเด็กที่เรียนในระดับ A-level จะนำคะแนนในระดับ AS และ A2 มาเฉลี่ยโดยคิดค่าเฉลี่ยในสัดส่วน 80 ต่อ 20 แล้วจึงตัดออกมาเป็นเกรด หรือเป็นผลของการเรียนในระดับ A-level นี้ โดยมีเกรดในระดับสูงสุดคือ A\* (เอ-สตาร์)

โรงเรียนที่จัดให้มีการเรียนการสอนในระดับ A-level นี้ มีสามประเภทคือ แบบที่หนึ่งเป็นโรงเรียนที่จัดให้มีการเรียนการสอนตามปกติจนถึงจบระดับสูงสุด ของ High-school แบบที่สองคือโรงเรียนที่มีการเรียนการสอนเฉพาะในระดับ A-level หรือที่เรียกกันว่า 6<sup>th</sup> form college ซึ่งโรงเรียนเหล่านี้จะรับเด็กๆ ที่เรียนจบในระดับ iGCSE เข้ามาเรียน หลักการคล้ายกับโรงเรียนชั้นนำของบ้านเราที่เลือกคัดเอาเฉพาะเด็กที่เรียนดีๆ เข้ามาเรียนพัฒนาต่อในช่วงสองปีสุดท้ายเพื่อเตรียมตัวเข้ามหาวิทยาลัย โรงเรียนแบบที่สามคือ Tutor college มีลักษณะคล้ายโรงเรียนกวดวิชา เพียงแต่มีมาตรฐานในการจัดหลักสูตรการเรียนการสอนที่อิสระและดีกว่าโรงเรียนกวดวิชาทั่วไปในประเทศไทย จากผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของเด็กนักเรียนจาก Tutor college เมื่อเทียบวัดจากการสมัครเข้าในมหาวิทยาลัยเดียวกันกับเด็กจากโรงเรียนในสองแบบแรก ผลงานของ Tutor college บางสถาบันสูงกว่าโรงเรียนในแบบแรกและแบบที่สองมาก แต่บางสถาบันมีผลงานในเกณฑ์ระดับธรรมดาถึงระดับต่ำกว่ามาตรฐาน เพราะจัดตั้งขึ้นมาเพียงเพื่อเหตุผลทางธุรกิจ (ตาดีได้ ตาร้ายเสีย) ดังนั้นพ่อแม่ต้องใช้วิจารณญาณให้ดีในการเลือกโรงเรียนให้กับลูก

เนื้อหาตามหลักสูตรที่เด็กนักเรียน A-Level จะต้องเรียนในแต่ละวิชาจะใช้เวลาประมาณ 14 ถึง 15 คาบต่อสัปดาห์ (เวลา 1 คาบเท่ากับประมาณ 45 นาที) ในหลักสูตรการเรียนการสอนของ A-level ตั้งแต่ที่จัดให้เด็กได้เลือกเรียนเพียง 3 วิชา ก็จะรวมเป็นเวลาการเรียนการสอนประมาณ 45 คาบต่อสัปดาห์ แต่เนื่องจากในปัจจุบันมีทางเลือกสายอาชีพมากขึ้น เด็กจำนวนมากไม่สามารถเลือกทางเดินชีวิตได้อย่างชัดเจนอย่างในอดีต จึงทำให้เด็กส่วนใหญ่เลือกเรียน 4 วิชาก่อนในระดับ AS แล้วค่อยเลือกทิ้ง 1 วิชาในระดับ A2 จึงทำให้โรงเรียนทั่วไปต้องแก้ปัญหาโดยจัดระบบการเรียนการสอนใหม่ให้สอดคล้องกับค่านิยมใหม่นี้ จึงจัดให้มีการเรียนเพียง 8 ถึง 10 คาบต่อสัปดาห์ ในเนื้อหาที่เท่าเดิม (คือเนื้อหาที่เด็กควรจะได้เรียนอย่างน้อย 14 คาบต่อสัปดาห์) แต่สำหรับโรงเรียนประเภท 6<sup>th</sup> form college จะใช้วิธีการขยายเวลาเรียนให้นักเรียนต้องเรียนเพิ่มให้ครบ 14 คาบต่อสัปดาห์ ตามที่เนื้อหาเดิมๆ กำหนด โดยขยายเวลาเรียนเพิ่มจากโรงเรียนทั่วไปคือ 7.30 น ถึง 14.30 น ไปเป็น 8.00 น ถึง 17.00 น ซึ่งก็เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ของการศึกษา ของโรงเรียนประเภท 6<sup>th</sup> form college

นี้ ที่จะต้องให้เด็กได้เรียนอย่างครบถ้วนและเต็มที่ เพื่อให้ได้เข้าเรียนในมหาวิทยาลัยที่ดีๆ ต่อไป

### ระบบการสอบเข้ามหาวิทยาลัยในประเทศไทย

ช่วงเวลาในการสมัครเข้าเรียนต่อในมหาวิทยาลัยจะทำในช่วงภาคเรียนที่หนึ่งของ Year 13 (หนึ่งปีมีสามภาคเรียน ภาคเรียนที่หนึ่งคือช่วงเดือนตุลาคมถึงธันวาคม) โดยที่เด็กๆ จะเริ่มเตรียมตัวเพื่อสมัครเข้าเรียนในระดับมหาวิทยาลัยตั้งแต่เริ่มเทอมแรกของ Year 12 แล้ว สิ่งที่สำคัญๆ จะต้องใช้ส่งให้มหาวิทยาลัยพิจารณาในขั้นตอนการสมัครมีดังนี้ 1) ผลการสอบ iGCSE ทั้งหมดที่เคยเรียนมา 2) ผลสอบ AS ของ Year 12 3) ผลการคาดคะเนเกรด (Predicted grade) สำหรับ Year 13 จากทางโรงเรียน และ 4) บทความที่เรียกว่า Personal statement ที่เล่าเรื่องราวต่างๆ ของตัวเองเพื่อให้มหาวิทยาลัยเห็นว่าเรามีความเหมาะสมเพียงไรที่จะได้เข้าเรียนในสาขานั้นๆ ที่เขาเลือกสมัครเข้าเรียน

เอกสารทั้งหมดที่ใช้ประกอบการสมัครจะถูกส่งไปยังองค์กรกลางคือ UCAS [1] ที่ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการสมัครเข้ามหาวิทยาลัย เหมือนกับสถาบันทดสอบทางการศึกษาแห่งชาติ (สทศ.) [2] UCAS จะจัดส่งเอกสารกระจายไปยังมหาวิทยาลัยต่างๆ ที่เด็กๆ แต่ละคนเลือก เมื่อตัวแทนคณะหรือภาควิชาของแต่ละมหาวิทยาลัยได้พิจารณาเอกสารทั้งหมดของเด็กๆ ที่ยื่นเข้ามาแล้ว มหาวิทยาลัยจะออก Offer หรือสิทธิ์ในการสอบเข้าเรียนให้เด็กที่มีความเหมาะสมที่สุดที่ควรจะได้เข้ามาเรียน โดยจำนวนของเด็กที่จะได้รับ Offer จะไม่เกินหนึ่งเท่าครึ่ง (1.5 เท่า) ของจำนวนเด็กที่แต่ละมหาวิทยาลัยต้องการรับเข้ามาเรียนจริงๆ สำหรับสัดส่วนของจำนวนนักเรียนที่ได้รับ Offer ต่อจำนวนผู้สมัครเข้าเรียนของมหาวิทยาลัยอันดับต้นๆ ของอังกฤษจะอยู่ที่ 1 ต่อ 10 ถึง 1 ต่อ 50 โดยประมาณ ทั้งนี้ขึ้นกับจำนวนความต้องการและระดับความมีชื่อเสียงของแต่ละมหาวิทยาลัย

การพิจารณาของมหาวิทยาลัยจะเริ่มขึ้นจากการดู Predicted grade และผลการเรียนใน Year 12 ก่อน แล้วคัดเด็กนักเรียนไว้กลุ่มหนึ่ง จากนั้นจึงมาพิจารณาที่ Personal statement และผล iGCSE เด็กส่วนใหญ่ที่ยื่นเข้ามาให้พิจารณาในแต่ละคณะของแต่ละมหาวิทยาลัยมักจะมีผลการเรียนในระดับ Year 12 และ

Predicted grade ที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นตัวชี้ขาดว่ามหาวิทยาลัยควรที่จะออก Offer ให้เด็กคนไหนนั้น น้ำหนักกว่าร้อยละเจ็ดสิบจึงอยู่ที่ Personal statement และผล iGCSE โดยเฉพาะผล iGCSE นั้นเป็นตัวยืนยันที่ดีที่สุดถึงความสม่ำเสมอในความตั้งใจเรียนตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันของเด็กๆ แต่ละคน ตัวอย่างเช่น มหาวิทยาลัย Cambridge มีความคาดหวังให้เด็กๆ ที่ยื่นใบสมัครเข้ามาจะต้องได้เกรด iGCSE ในระดับ A ถึง A\* อย่างน้อย 6 ตัว แต่จากประสบการณ์กว่า 14 ปีของผู้เขียน (ดร.เฉลิมพล) ที่ทำงานในด้านนี้ พบว่าส่วนใหญ่เด็กที่ยื่นใบสมัครไปที่ มหาวิทยาลัย Cambridge มักมีผล iGCSE ในระดับ A\* อย่างน้อย 6 ถึง 8 ตัวกันเกือบทุกคน นอกจากนี้หลายๆ มหาวิทยาลัยยังให้ความสำคัญสูงสุดกับการเรียกสัมภาษณ์อย่างเป็นทางการอีกด้วย แม้แต่ในสาขาวิชาที่หานักเรียนมาเรียนได้ยาก เช่น สาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยแทบทุกแห่งจะมีการเชิญนักเรียนให้มาเยี่ยมชมมหาวิทยาลัยและสัมภาษณ์ก่อนให้ Offer ด้วย ในมหาวิทยาลัยหรือสาขาวิชาที่มีการแข่งขันกันสูงยังมีการนำประสบการณ์อื่นๆ ของเด็กนักเรียนมาประกอบการพิจารณาเข้ามหาวิทยาลัย เช่น การฝึกงานและการทำวิจัยในหน่วยงานต่างๆ โครงการและการแข่งขันทางวิทยาศาสตร์ เป็นต้น

ตัวอย่าง Offer ของ Imperial college ต่อเด็กคนหนึ่งทีเลือกเรียนวิชาคณิตศาสตร์ ฟิสิกส์ และดีไซน์เทคโนโลยี ในระดับ A-level และสมัครเข้าเรียนในสาขาวิศวกรรมเครื่องกล จะได้รับการ Offer เป็น A\*A A โดยวิชาคณิตศาสตร์จะต้องได้เกรด A\* เท่านั้น และหากเด็กคนนี้สามารถจบ A-level (Year 13) ด้วยเกรดที่ทางมหาวิทยาลัย Offer มาเขาก็จะได้รับสิทธิ์เข้าเรียนในสาขาที่เขาเลือกอันนั้น ทั้งนี้การ Offer เกรดของมหาวิทยาลัยจะพิจารณาเป็นรายบุคคล เด็กนักเรียนที่มีคุณสมบัติตรงตามที่มหาวิทยาลัยต้องการ มีลักษณะโดดเด่น เช่น มีประสบการณ์เกี่ยวกับสาขานั้น อาจได้รับ Offer เกรดเพียง BBB ในสามวิชา ในขณะที่นักเรียนทั่วไปอาจจะได้รับ Offer เป็น A\*A\*A\* โดยไม่มีข้อครหา เพราะมหาวิทยาลัยทุกแห่งต้องการรับเด็กนักเรียนที่มีคุณภาพสูงเพื่อรักษามาตรฐานทางวิชาการของตนเองเป็นพื้นฐานอยู่แล้ว

แม้ว่าโดยผิวเผินแล้วระบบการศึกษาพื้นฐานแบบใหม่ของไทยจะลดปัญหาของระบบเดิมในการคัดเลือกรับนักเรียนเข้าเรียนต่อในระดับมหาวิทยาลัยซึ่งเป็นการสอบเพียงครั้งเดียว โดย

ปรับเปลี่ยนให้มีการวัดผลต่อเนื่อง รวมคะแนนจากการสอบ O-net A-net การสอบความถนัด และผลการเรียนจากในโรงเรียน แต่เมื่อพิจารณาในรายละเอียดภายในของระบบใหม่นี้ จะพบว่าประเทศเราได้นำเข้า หรือเลียนแบบมาแต่เปลือกของระบบการศึกษาประเทศอังกฤษ ขาดแนวปรัชญาของระบบดั้งเดิม ทำให้การวัดผลทุกอย่างคล้ายกับการเพิ่มจำนวนครั้งในการสอบเข้ามหาวิทยาลัยในระบบ Entrance เดิม เป็น Entrance Part 1, Part 2 และ Part 3 เป็นต้น แม้แต่การนำผลเรียนในโรงเรียนมาใช้เป็นเกณฑ์ก็ล้มเหลวโดยสิ้นเชิง เพราะมีการลดแลกแจกแถมคะแนนจนนักเรียนสอบได้เกรด 4 กันยกห้อง หรือเด็กนักเรียนเองก็ได้เริ่มปรับตัวเข้าสู่ระบบใหม่ เช่น นักเรียนแผนวิทย์ก็สามารถโยกย้ายตัวเองไปเรียนแผนศิลป์คำนวณ เพื่อให้ได้เกรดสูงกว่าเพื่อไปใช้สอบเข้ามหาวิทยาลัยในสาขาที่เป็นของสายวิทย์ดั้งเดิม เช่น สถาปัตยกรรม ก็ได้ รายละเอียดตัวเนื้อหาข้อสอบก็ไม่สามารถวัดผลทางการศึกษาใดๆ เกี่ยวกับความรู้ความสามารถของนักเรียนในสาขาอาชีพนั้นได้เลย เพราะเป็นการทดสอบแบบปรนัย (Multiple choices) และเติมคำ ซึ่งมีเนื้อหาที่สามารถท่องจำได้เป็นส่วนมาก เช่น ในวิชาฟิสิกส์จะเน้นการท่องสูตรคำนวณและนำไปคำนวณค่าต่างๆ โรงเรียนกวดวิชาในประเทศไทยจึงมีเคล็ดลับต่างๆ ออกมามากมายเพื่อช่วยให้นักเรียนทำข้อสอบได้เร็วขึ้น เช่น การคัด Choice ที่ไม่ใช่คำตอบออก การคำนวณลัด เป็นต้น เคล็ดลับเหล่านี้ไม่ได้เป็นประโยชน์ใดๆ เลยต่อการเรียนขั้นสูงในมหาวิทยาลัย เพราะนักเรียนขาดความเข้าใจพื้นฐานที่ถูกต้องในเรื่องนั้น แต่ในประเทศไทยจะเป็นข้อสอบแบบเขียนตอบ หรืออัตนัย แสดงวิธีทำแบบคิดวิเคราะห์เป็นส่วนมาก ทั้งที่จำนวนประชากรและจำนวนนักเรียนของทั้งสองประเทศไม่ต่างกันมากนัก แต่ประเทศอังกฤษสามารถออกแบบการทดสอบต่างๆ เพื่อวัดผล เช่น การเขียนเรียงความ และจ้างผู้ตรวจข้อสอบสำหรับการวัดผลนักเรียนในประเทศเขาเองได้ทั้งหมด ในวิชาวิทยาศาสตร์ทั้ง ฟิสิกส์ เคมี และชีววิทยา ยังมีการสอบภาคปฏิบัติการใช้เป็นคะแนนสมัครเข้ามหาวิทยาลัยอีกด้วย การสอบภาคปฏิบัติเพื่อเข้ามหาวิทยาลัยเช่นนี้คงไม่มีใครคิดว่าจะเกิดขึ้นได้ในประเทศไทย

ตัวอย่างสมมุติของเด็กไทยคนหนึ่งซึ่งไม่ใช่เด็กอัจฉริยะ และศึกษาอยู่ในระบบการเรียนแบบไทยในระดับมัธยมปลาย เด็กคนนี้ได้เกรดเฉลี่ยโดยรวมไม่ถึงสอง และมีเพียงวิชาคณิตศาสตร์กับวิทยาศาสตร์บางวิชาเท่านั้นที่ได้เกรด 3 หรือ 4 เด็กคนนั้นจึง

สามารถเรียนต่อในสายวิทยาศาสตร์ได้หรือไม่? และเด็กคนนี้เป็น “เด็กโง่” หรือไม่?

ระบบการศึกษาของประเทศอังกฤษมีการกำหนดปรัชญาเป้าหมาย แนวทางการดำเนินการที่สอดคล้องกันทั้งระบบ จึงสามารถผลิตบุคลากรที่มีความสามารถและความเชี่ยวชาญสูงในทุกๆ สาขาได้อย่างเต็มรูปแบบ เด็กนักเรียนสามารถเดินทางในเส้นทางการศึกษาตามที่ตนเองชอบและถนัดได้อย่างมีความสุข แม้จะเรียนเพียงสามวิชา ก็มีความยากลำบากในการเรียนไม่แพ้เด็กไทย เพราะเนื้อหายากและลึกซึ้งไปถึงระดับปริญญาตรีของ ไทยในบางหัวข้อ แต่สิ่งที่แตกต่างกันคือ เด็กนักเรียนอังกฤษรักในวิชานั้น แม้จะเหนื่อยยากก็ไม่เป็นไร ครูผู้สอนก็มีความสุข สอนได้อย่างสนุก เนื่องจากเด็กชอบและสนใจในวิชาที่เลือก อย่างไรก็ตามคงจะเป็นไปไม่ได้ที่จะไม่มีความผิดพลาดเกิดขึ้นในระบบเลย เด็กนักเรียนอังกฤษส่วนน้อยจำนวนหนึ่งก็ไปไม่ถึงดวงดาว ต้องออกจากการเรียนระดับมหาวิทยาลัยกลางคัน แต่ระบบการศึกษาของประเทศไทยกำลังทำให้ความผิดพลาดนี้กลายเป็นสัดส่วนข้างมาก นักเรียนที่เลือกเรียนผิดเส้นทางจะเป็นคนหม่่มากของประเทศ เราอาจจะมีนักการเมือง นักภาษาศาสตร์ นักกฎหมาย นักบัญชี นักสื่อสารมวลชนและศิลปินมากขึ้นในวงการวิทยาศาสตร์ในอนาคต ในมหาวิทยาลัยหลายๆ แห่ง นักศึกษาชั้นปีที่ 1 ในสาขา เช่น วิศวกรรมศาสตร์ สอบตกวิชาเคมีและฟิสิกส์พื้นฐานเป็นจำนวนมาก และอาจถึงกับต้องออกจากการเรียน นักเรียนคณะแพทยศาสตร์หลายๆ แห่งเข้าไปเรียนมหาวิทยาลัยได้ด้วยคะแนนวิชาที่ไม่ใช่วิทยาศาสตร์เป็นหลัก เพราะคะแนนวิชาฟิสิกส์ เคมี และชีววิทยาถูกรวมให้เป็นวิชาเดียวมี 100 คะแนนเท่ากับคะแนนวิชาภาษาอังกฤษหนึ่งวิชา หากขาดการแก้ไข สาขาอาชีพที่มีผลต่อชีวิตและทรัพย์สินของคนหม่่มากอย่างเช่น แพทย์และวิศวกรนี้คงต้องเข้าภาวะระบบล้มเหลว และนำมาซึ่งความหายนะต่อประเทศ

ประเทศอังกฤษและประเทศไทยมีความแตกต่างกันอย่างมากในด้านบุคลากรและโครงสร้างทางสังคม คนอังกฤษเป็นคนที่เชื่อมั่นในตนเองสูง ทำให้มีความภูมิใจในสาขาอาชีพที่ได้เลือกเดิน คนอังกฤษยังมีความกระตือรือร้น ใฝ่รู้ และรักการอ่าน มีหนังสือความรู้ศาสตร์สาขาต่างๆ มากมายสำหรับคนทั่วไปที่ไม่เคยได้ศึกษาเรื่องนั้นมาก่อน และรักในการคิดวิเคราะห์ วิจัยในเรื่องต่างๆ อย่างมีเหตุผล วันหยุดคริสต์มาสของทุกปีพ่อแม่ลูกจะมานั่ง

รวมกันฟังการบรรยายพิเศษหน้าจอทีวีที่เรียกว่า Christmas Lectures เกี่ยวกับวิทยาการในกระแสนิยม มีการอธิบายและสาธิตในระดับที่คนทั่วไปเข้าใจได้ง่าย นอกจากนั้นการที่เป็นระบบประชาธิปไตยแบบสังคมนิยมมาช้านานทำให้คนอังกฤษเข้าใจในสิทธิและหน้าที่พลเมืองเป็นอย่างดี ในยุโรปคนเดินถนนคนหนึ่งมีสิทธิเท่าเทียมกับคนที่ขับรถยนต์คนหนึ่ง การทำงานในอาชีพเกษตรกรรมก็มีเกียรติและเงินไม่ด้อยไปกว่าวิศวกรนั่งโต๊ะคนหนึ่ง การมีระบบสวัสดิการที่รัฐช่วยเหลือ และระบบค่าตอบแทนเงินเดือนที่เหมาะสม ทำให้คนอังกฤษและคนยุโรปหลายประเทศทำงานด้วยความพอใจและมีแนวโน้มที่จะมุ่งสร้างความสุขในชีวิตมากกว่าหารายได้ให้ได้มากที่สุด ในขณะที่คนไทยส่วนมากขาดความภูมิใจในอาชีพของตน และในความเป็นไทย เมื่อมีชีวิตที่ลำบากมาก่อนจึงชวนขวยและขยันขันแข็งเพื่อยกระดับชีวิตตนเองให้ดีกว่าเดิม หรืออาจจะแสดงออกโดยการผลักดันลูกหลานให้ได้เข้าเรียนในสถานศึกษาที่ดี เพื่ออาชีพที่ดี โดยขาดการพิจารณาไตร่ตรองถึงความเหมาะสม จึงมุ่งให้บุตรหลานได้เป็นแพทย์และวิศวกรกันเป็นส่วนใหญ่ แล้วจะมีพ่อแม่ที่เป็นครู ข่างไฟฟ้า หรือเกษตรกร สักกี่คนที่อยากให้ลูกทำอาชีพเหมือนตนเอง คนไทยโดยพื้นฐานแล้วมีความสามารถสูง ได้สั่งสมภูมิปัญญาท้องถิ่น โดยเฉพาะในด้านเกษตรกรรมที่ก้าวหน้าไม่แพ้ใคร มีวัฒนธรรมและศาสนาที่สืบเนื่องมาช้านาน มีความช่วยเหลือเอื้อเฟื้อเผื่อแผ่ต่อเพื่อนมนุษย์ ชาวต่างประเทศที่เยี่ยมชมมาเที่ยวประเทศไทยประทับใจกับรอยยิ้ม ความมีน้ำใจ ซึ่งเกิดจากความจริงใจและพลังจากภายใน (Inner strength) ของคนไทย ดังดูให้เขากลับมาเขียนอีกโดยไม่เบื่อหน่าย ภาพลักษณ์เหล่านี้เริ่มเลือนลางไปอย่างมากในการพัฒนาประเทศอย่างรวดเร็วในช่วงหลายสิบปีที่ผ่านมา

คำตอบสำหรับระบบการศึกษาใหม่สำหรับประเทศไทย ไม่ใช่เรื่องง่ายเลย จะมีพ่อแม่สักกี่เปอร์เซ็นต์ที่จะยอมรับผลสอบความถนัดในมาตรฐานอังกฤษของลูกตนเองได้ ถ้าผลนั้นบอกว่าลูกไม่ควรเป็นแพทย์หรือวิศวกร การสร้างระบบใหม่คงจะหลีกเลี่ยงไม่ได้ที่จะต้องปลูกฝังค่านิยมเกี่ยวกับอาชีพการทำงานกันใหม่ และการพัฒนาคุณภาพครูให้รองรับระบบใหม่ ซึ่งคงต้องใช้ระยะเวลานาน การเปลี่ยนระบบเพียงแค่รูปแบบการสอบอาจจะช่วยพัฒนาคุณภาพทางวิชาการของเด็กนักเรียนได้ส่วนหนึ่ง เช่น การใช้ข้อสอบที่ต้องใช้กระบวนการคิดวิเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์

เพื่อคัดเลือกรักเรียนเข้ามาเรียนในสายวิทยาศาสตร์ ซึ่งกระบวนการคิดนี้จะสอนแบบตัวเข้มได้ยาก ถ้าเด็กคนนั้นไม่มีทักษะพื้นฐานทางความคิดมาก่อน หรือการนำข้อสอบภาคปฏิบัติมาใช้ในการคัดเลือกรักเรียน สิ่งเหล่านี้จะลดจำนวนนักเรียนที่เรียนไม่ตรงสายอาชีพได้บ้าง แต่นั่นจะนำมาซึ่งความเครียดของนักเรียนที่เรียนได้ไม่ตรงความถนัด อีกแนวทางหนึ่งที่กำลังเกิดขึ้นมาก คือการสร้าง “บ่อน้ำกลางทะเลทราย (Oasis)” ของการศึกษา โดยไม่สนใจระบบกลาง เกิดเป็นการสอบเข้ามหาวิทยาลัยโดยตรง หรืออาจจะเกิดขึ้นเป็นการสอบเข้าระบบใหม่คู่ขนานไปกับระบบกลางเพื่อเป็นตัวอย่างในการยกระดับคุณภาพการศึกษา ก็อาจจะพอเป็นช่องหายใจใหม่ให้กับการศึกษาไทยได้บ้าง

ถ้าสัญลักษณ์ของประเทศอังกฤษคือสิงโต และของประเทศไทยคือช้าง สิ่งที่กำลังเกิดขึ้นกับประเทศไทยคงเปรียบได้กับ “เห็นสิงโตวิ่ง วิ่งตามสิงโต” เสียงวิจารณ์แบบหนึ่งที่จะเกิดขึ้นกับระบบการศึกษาที่นำมาใช้ในประเทศไทยคือการโทษระบบการศึกษาประเทศอังกฤษว่าไม่ดี ไม่เหมาะสมกับประเทศไทย ทั้งที่จริงแล้วต้องถือว่าไม่เคยได้มีการนำระบบ (หรือแก่นของระบบ) การศึกษาของอังกฤษเข้ามาใช้ในประเศเราเลย การเปลี่ยนแปลงระบบการศึกษาทั้งระบบไม่ใช่เรื่องง่าย ต้องใช้ระยะเวลาและความถี่ถ้วนของการศึกษาผลกระทบที่จะตามมา ประวัติศาสตร์ไทยได้ให้บทเรียนที่ดีถึงทั้งข้อดีและข้อเสียของการเปลี่ยนแปลงแบบฉับพลันอย่างการเปลี่ยนระบอบการปกครองมาเป็นระบอบประชาธิปไตย เทียบกับการเปลี่ยนแปลงแบบค่อยเป็นค่อยไปของการยกเลิกระบบทาสในประเทศไทยซึ่งเป็นพระปรีชาสามารถของรัชกาลที่ 5 และเป็นที่ยกย่องในหมู่นานอารยประเทศแล้วประเทศไทยจะเลือกเส้นทางอนาคตทางการศึกษาแบบใด?

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] UCAS. <http://www.ucas.ac.uk>
- [2] สถาบันทดสอบทางการศึกษาแห่งชาติ (สทศ.) <http://www.niets.or.th>

## 2552 ปีดาราศาสตร์สากล

### ปีแห่งปรากฏการณ์ดาราศาสตร์ไทย

ศิรามาศ โกมลจินดา<sup>1</sup>

ปีพุทธศักราช 2552 สำหรับวงการดาราศาสตร์นานาชาติ เป็นปีที่เฉลิมฉลองดาราศาสตร์สากลเนื่องในวาระครบรอบ 400 ปี ที่กาลิเลโอ กาลิเลอี บิดาแห่งดาราศาสตร์สมัยใหม่ ใช้กล้องโทรทรรศน์ส่องขึ้นไปบนท้องฟ้า แล้วบันทึกปรากฏการณ์ทางดาราศาสตร์ สร้างแนวคิดทางดาราศาสตร์สมัยใหม่ โดยใช้พื้นฐานแห่งการไม่เป็นศูนย์กลางของจักรวาลของโลก

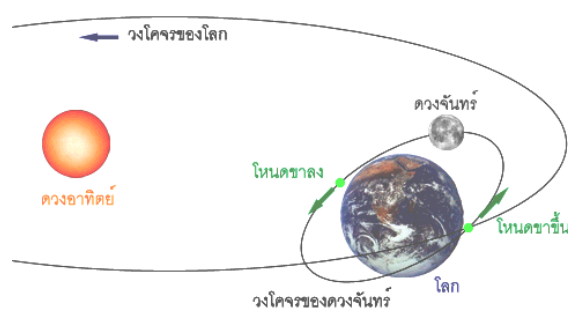
ในขณะเดียวกัน ปีพุทธศักราช 2552 นับเป็นโอกาสอันดีสำหรับนักดาราศาสตร์ไทย เริ่มต้นจากการสถาปนาสถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) เมื่อวันที่ 1 มกราคม 2552 ซึ่งเป็นหน่วยงานที่มุ่งเน้นการวิจัยด้านดาราศาสตร์ของประเทศให้เข้าสู่ระดับสากล พร้อมทั้งสร้างเครือข่ายการวิจัยในสาขาดาราศาสตร์กับสถาบันการศึกษา และองค์กรต่างๆที่เกี่ยวข้อง

ตั้งแต่ช่วงต้นปี 2552 ที่ผ่านมา ได้เกิดปรากฏการณ์ทางดาราศาสตร์มากมาย ปรากฏการณ์เหล่านี้ได้สร้างแรงกระตุ้นเข้าสู่สังคมไทยให้เกิดความสนใจในวิชาดาราศาสตร์และวิทยาศาสตร์ทั่วไป อันจะเป็นแรงผลักดันให้เยาวชนมีความสนใจในวิทยาศาสตร์ และส่งผลต่อการพัฒนาประเทศต่อไปในอนาคต

ปรากฏการณ์ที่ยิ่งใหญ่ พิเศษ และได้รับความสนใจมากที่สุดในช่วงปีดาราศาสตร์สากลที่ผ่านมา เห็นจะไม่พ้นการเกิดปรากฏการณ์สุริยุปราคาบางส่วนที่สามารถเห็นได้จากประเทศไทยมากถึงสามครั้งภายในเวลาสิบสองเดือน ปรากฏการณ์เช่นนี้เกิดขึ้นไม่ได้ง่ายนัก ณ บริเวณใดก็ตามบนโลก

ปรากฏการณ์สุริยุปราคาเกิดขึ้นเมื่อดวงอาทิตย์ ดวงจันทร์ และโลก โคจรเคลื่อนที่มาอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน แต่

เนื่องจากระนาบวงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ และระนาบวงโคจรของดวงจันทร์รอบโลกนั้น ไม่ได้อยู่บนระนาบเดียวกัน แต่ทำมุมต่างกันอยู่ประมาณห้าองศา ทำให้ถึงแม้ว่าดวงจันทร์จะเคลื่อนที่มาอยู่ด้านเดียวกับดวงอาทิตย์เมื่อมองจากโลกทุกเดือน (หรือที่เรียกว่าเป็นคืนเดือนมืด แรม 15 ค่ำ) แต่ดวงจันทร์ก็ไม่ได้อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกันพอดีกับโลกและดวงอาทิตย์ จึงไม่เกิดการบังกัน (ดังแสดงในรูปที่ 1) สิ่งสำคัญอีกประการหนึ่งที่ทำให้การเกิดสุริยุปราคาในแต่ละครั้งแตกต่างกันไปก็คือการที่ขนาดปรากฏของดวงจันทร์และดวงอาทิตย์เมื่อสังเกตจากโลกนั้นมีขนาดใกล้เคียงกัน แต่ก็แตกต่างกันไปได้ในแต่ละวัน เนื่องจากวงโคจรของโลกและวงโคจรของดวงจันทร์ต่างก็เป็นวงรี ขนาดเชิงมุมที่มองเห็นดวงอาทิตย์และดวงจันทร์จากโลก จึงมีขนาดเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา โดยขนาดเชิงมุมของวัตถุทั้งสองมีค่าประมาณ 0.5 องศา



รูปที่ 1 แสดงวงโคจรของดวงจันทร์รอบโลก และวงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ (ที่มา: สุริยุปราคาในประเทศไทย ปี 2552-2553, สถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) 2552)

<sup>1</sup> อาจารย์ (ดร.) ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ผู้เชี่ยวชาญดาราศาสตร์แสง สถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

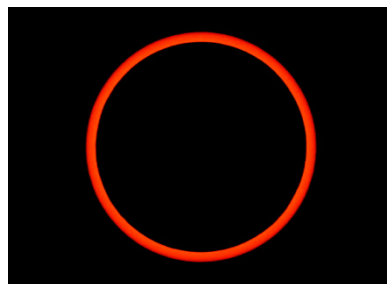
ปรากฏการณ์สุริยุปราคาทั้งสามครั้งได้รับความสนใจจากประชาชนเป็นจำนวนมาก ดังจะเห็นได้จากการจัดกิจกรรมสังเกตสุริยุปราคาในทุกครั้งมีประชาชนให้ความสนใจเข้าร่วมสังเกตปรากฏการณ์ที่จัดโดยหน่วยงานต่างๆ อย่างล้นหลาม มีการรายงานข่าวการเกิดปรากฏการณ์ทั้งสามครั้งในทุกสื่อทั่วประเทศ



**รูปที่ 2** จากเหนือจรดใต้ กับบางส่วนของ การสังเกตสุริยุปราคาบางส่วน 15 มกราคม 2553 ณ สวนเฉลิมพระเกียรติฯ ราชพฤกษ์ จังหวัดเชียงใหม่ (จัดโดยสถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ หรือ สดร.), มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, หุ่นศรีเมืองอุดรธานี (จัดโดยมหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี), โรงเรียนเบญจมราชรังสฤษฎิ์

จังหวัดละโว้, มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต (ภาพจากสถาบันเครือข่ายสุริยุปราคาบางส่วน 15 มกราคม 2553 /ฝ่ายประชาสัมพันธ์ สดร.)

ในแง่วิทยาศาสตร์ นักดาราศาสตร์ศึกษาปรากฏการณ์สุริยุปราคาเพื่อทำความเข้าใจในความสัมพันธ์ระหว่างดวงอาทิตย์กับสถานะแวดล้อมบนโลกและพฤติกรรมของสิ่งมีชีวิต และศึกษาสภาพบรรยากาศของดวงอาทิตย์โดยเฉพาะอย่างยิ่งบรรยากาศชั้นโคโรนา



**รูปที่ 3** (บน) ทีมจากสถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติระหว่างการสังเกตและเก็บข้อมูลปรากฏการณ์สุริยุปราคา 15 มกราคม 2553 ณ เมืองต้าลี่ ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน (ล่าง) ภาพถ่ายเปรียบเทียบปรากฏการณ์สุริยุปราคา 15 มกราคม 2553 จากเมืองต้าลี่ ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน และจากจังหวัดเชียงใหม่ (ภาพจากฝ่ายประชาสัมพันธ์ สดร.)

สำหรับปรากฏการณ์สุริยุปราคาครั้งต่อไปที่จะสังเกตเห็นได้จากประเทศไทย จะเกิดขึ้นในวันที่ 9 มีนาคม 2559 ซึ่งจะเป็นสุริยุปราคาแบบบางส่วน (พร้อมกับการเกิดสุริยุปราคาแบบเต็มดวงในประเทศอินโดนีเซีย และหมู่เกาะในมหาสมุทรแปซิฟิก) ส่วนปรากฏการณ์สุริยุปราคาเต็มดวงที่จะสังเกตเห็นได้จากประเทศไทยนั้น จะต้องรอไปถึงวันที่ 11 เมษายน 2613 เลยทีเดียว และในครั้งนั้น แนวคราสสุริยุปราคาเต็มดวง จะพาดผ่านจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ชุมพร และระนอง

นอกจากสุริยุปราคาแล้ว ปีที่ผ่านมาผู้สังเกตปรากฏการณ์ดาราศาสตร์ในประเทศไทยยังมีโอกาสดีที่ได้สังเกตปรากฏการณ์ฝนดาวตกหลายครั้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งฝนดาวตกไลโอนิดส์และฝนดาวตกเจมินิดส์

โดยทั่วไป ดาวตกเกิดขึ้นจากวัตถุขนาดเล็กในอวกาศเคลื่อนที่ผ่านเข้ามาในชั้นบรรยากาศของโลก ถ้าวัตถุเหล่านี้มีขนาดเล็กก็จะเกิดการเสียดสีเผาไหม้กับชั้นบรรยากาศหมดไปก่อนที่จะตกถึงพื้นโลก แต่ถ้ามีขนาดใหญ่ก็มีโอกาสที่จะตกลงถึงพื้นโลกหลงเหลือเป็นชิ้นส่วนที่เรียกว่าอุกกาบาต ปรากฏการณ์ฝนดาวตกเกิดขึ้นเมื่อโลกโคจรผ่านเข้าไปในแถบฝุ่นที่เหลืออยู่ในอวกาศจากการเคลื่อนที่ของดาวหางหรือดาวเคราะห์น้อย ฝุ่นเล็กๆ ที่มีขนาดเล็กเพียงไม่กี่ไมครอนนี้ เมื่อเข้ามาสู่ชั้นบรรยากาศของโลกก็เกิดการเผาไหม้ เกิดให้เห็นเป็นดาวตกจำนวนมาก ให้ความรู้สึกเหมือนเป็นเม็ดฝนที่พุ่งลงมาสู่ผู้สังเกต อย่างไรก็ตาม เมื่อสังเกตทิศทางที่เม็ดฝนดาวตกเหล่านี้พุ่งออกมาจะพบว่า ทั้งหมดจะพุ่งมาจากจุดๆ หนึ่ง ซึ่งก็คือทิศทางของแถบฝุ่นในอวกาศนั่นเอง ตำแหน่งนั้นเรียกว่า ตำแหน่งเรเดียนต์ (Radiant) และปรากฏการณ์ฝนดาวตกที่เกิดขึ้น ก็จะมีชื่อเรียกตามตำแหน่งของเรเดียนต์เช่น ฝนดาวตกไลโอนิดส์ ก็คือฝนดาวตกที่มีตำแหน่งเรเดียนต์อยู่ในกลุ่มดาวสิงโต นั่นเอง



รูปที่ 4 ภาพถ่ายฝนดาวตกเจมินิดส์จากยอดคอยอินทนนท์ (ภาพถ่ายจากฝ่ายประชาสัมพันธ์ สดร.)

ปรากฏการณ์ฝนดาวตกแต่ละครั้ง จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับองค์ประกอบของดาวหางหรือดาวเคราะห์น้อยที่เป็นต้นกำเนิดของแถบฝุ่น และยังแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุต่างๆ ในระบบสุริยะได้อีกด้วย

สำหรับในปี 2553 นี้ ถึงแม้ว่าจะไม่มีปรากฏการณ์สุริยุปราคาให้เห็นได้ในประเทศไทย แต่ก็ยังคงมีปรากฏการณ์ทางดาราศาสตร์ที่น่าสนใจอื่นๆ อีก เช่น ดาวอังคารโคจรมาอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้โลกที่สุดในวันที่ 28 มกราคม, การบังกันของดวงจันทร์และดาวศุกร์ในคืนวันที่ 16 พฤษภาคม, จันทรุปราคาบางส่วนในช่วงหัวค่ำของวันที่ 26 มิถุนายน, ฝนดาวตกในเดือนต่างๆ และดาวเคียงเดือน ให้ติดตามกันต่อไปตลอดทั้งปี

# เหลื่อมเพชรเม็ดงามวิชาแม่เหล็กไฟฟ้า: ตอนที่ 6 ศักย์เวกเตอร์

ชาญกิจ กันจ่อง<sup>1</sup>

ศักดิ์สิทธิ์ สงวนผล<sup>2</sup>

## 1. บทนำและมโนทัศน์ของศักย์สถิต

ถ้าถามว่า ศักย์ (Potential) คืออะไร? หลายคนก็ตอบได้ทันที เพราะนี่เป็นประเด็นฟิสิกส์พื้นฐาน แต่ถ้าถามว่า สิ่งที่เราเรียกกันว่าศักย์ทั้งหมด เช่น ศักย์ไฟฟ้า, ศักย์เวกเตอร์, ศักย์สเกลาร์ (ในพลศาสตร์ไฟฟ้า), ศักย์ลิ้มิต (4-potential) เป็นต้น มีมโนทัศน์ (Concept) ร่วมกันหรือไม่? อย่างไร? เราต้องคิดนานกว่านั้นมาก สำหรับผมคิดว่า “มี” ในที่นี้เราจะพิจารณามโนทัศน์ร่วมกันเฉพาะระหว่างศักย์ไฟฟ้าในทฤษฎีไฟฟ้าสถิต (Electrostatics) และศักย์เวกเตอร์ในทฤษฎีแม่เหล็กสถิต (Magnetostatics) และอภิปรายความไม่ลงตัวในมโนทัศน์ร่วมกันด้วย

วิธีนิยามศักย์ไฟฟ้าสถิต ( $V$ ) และศักย์เวกเตอร์สถิต ( $\vec{A}$ ) ในตำรามาตรฐาน [1, 2] เป็นไปตามตารางนี้

| ศักย์สถิต     | วิธีที่ 1                                                                                          | วิธีที่ 2                                                                   |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| ศักย์ไฟฟ้า    | งานต่อต้านแรงไฟฟ้า<br>$V(\vec{x}) = -\int_o^{\vec{x}} d\vec{r} \cdot \vec{E} \quad (1.1)$          | $\nabla \times \vec{E} = \vec{0}$<br>$\vec{E} = -\nabla V \quad (1.2)$      |
| ศักย์เวกเตอร์ | งานต่อต้านแรงแม่เหล็ก<br>$\vec{A} = -\int_o^{\vec{x}} d\vec{r} \times \vec{B} \quad ? \quad (1.3)$ | $\nabla \cdot \vec{B} = 0$<br>$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (1.4)$ |

ตารางที่ 1 แสดงวิธีนิยามศักย์สถิตในตำรามาตรฐาน

วิธีที่ 1 กับ 2 ในตารางนั้นสมมูล (Equivalent) กัน แต่ต้องใช้วิธีทั้งสองร่วมกันจึงจะสามารถบรรยายมโนทัศน์ร่วม

ระหว่างศักย์ทั้งสองชนิดได้ กล่าวคือ จากวิธีที่ 1 พิจารณางานต่อต้านแรงสนาม (Field force) และเมื่อแทนค่าสนามจากวิธีที่ 2 ลงไป ก็จะพบว่า ในงานดังกล่าวมีส่วนที่ (1) ไม่ขึ้นกับเส้นทาง (Path independent) ในรูปโครงสร้าง  $\int d\vec{r} \cdot \nabla$  และ (2) ไม่ขึ้นกับความเข้มของปริมาณในวัตถุทดสอบที่ถูกแรงสนามกระทำ และเมื่อแยกปริมาณส่วนที่มีสมบัติข้อ (1) และ (2) ออกมาจากการจะได้นิยามของปริมาณ “ศักย์สถิต (Static potential)”

เมื่อใช้วิธีทั้งสองร่วมกันสร้างมโนทัศน์ของศักย์สถิตทั้งสองชนิดขึ้นมาแล้ว สำหรับศักย์ไฟฟ้าก็สามารถใช้วิธีที่ 1 เขียนศักย์ในรูปสนามของแรง และใช้วิธีที่ 2 เขียนสนามของแรงในรูปของศักย์ แต่สำหรับศักย์เวกเตอร์สถิต การใช้วิธีที่ 1 หารูป Magnetostatic analog ของ (1.1) ที่ควรอยู่ในรูปการเขียนศักย์เวกเตอร์ในรูปสนามแม่เหล็กนั้น มีปัญหาสำคัญที่การเขียนรูปเช่นนี้ทำไม่ได้อย่างทั่วไปเนื่องจากศักย์เวกเตอร์ไม่เป็นได้เฉพาะเดียว (Non-unique) นั่นคือ สามารถบวกเกรเดียนต์ของสนามสเกลาร์ใดใด ( $\nabla \lambda$ ) เข้าไปได้ (แต่ถ้ากำหนดเงื่อนไขเพิ่มเติมลงบนศักย์เวกเตอร์โดยใช้เกจคูลอมบ์ (Coulomb gauge:  $\nabla \cdot \vec{A} = 0$ ) ก็จะสามารถเขียนศักย์เวกเตอร์ในรูปสนามแม่เหล็กในอีกรูปแบบหนึ่งได้ [1]) จากข้อยุ่งยากนี้ ร่วมกับความซับซ้อนของวิธีที่ 1 ไม่น่าแปลกใจที่ในตำรามาตรฐาน [1-2] นิยามศักย์เวกเตอร์ขึ้นจากวิธีที่ 2 มากกว่าวิธีที่ 1 แม้ว่าวิธีที่ 1 จะมีประวัติเก่าแก่ไปจนถึงสมัยที่มีการแนะนำศักย์เวกเตอร์ขึ้นมาใหม่ (โดย F. E. Neumann ปี 1847 และ 1849 [3]) ก็ตาม

อย่างไรก็ดี ยังมีรูปที่เป็น “ผู้สมัครชิงตำแหน่งโดยธรรมชาติ (Natural candidate)” ของ Magnetostatic analog ของ

<sup>1</sup> อาจารย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

<sup>2</sup> นักศึกษาวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

(1.1) อยู่ นั่นคือ สูตร (1.3) ซึ่งกล่าวไว้ในหนังสือ “Introduction to Electrodynamics” ของ Griffiths [1] แต่ว่าอินทิกรัล (1.3) ขึ้นกับเส้นทาง จึงไม่ใช่สมบัติของสเกลาร์ เราจะอภิปรายเพิ่มเติมจากหนังสือ Griffiths ว่า การอนุมาน (1.3) จากวิธีนิยามที่ 1 นั้นมีที่ผิดตรงไหน และอธิบายลักษณะและที่มาของโครงสร้างที่ขึ้นกับเส้นทางของอินทิกรัลนี้ อย่างไม่เคร่งครัดเชิงคณิตศาสตร์

## 2. ศักย์ไฟฟ้าและศักย์เวกเตอร์สถิต

พิจารณาเปรียบเทียบสมบัติของศักย์ไฟฟ้ากับศักย์เวกเตอร์ที่นิยามขึ้นจากวิธีที่ 1 ร่วมกับวิธีที่ 2 ดังนี้ สำหรับศักย์ไฟฟ้า จากงานต่อต้านแรงสนามไฟฟ้า

$$\begin{aligned} W_E &= \int_o^{\vec{x}} d\vec{r} \cdot (-\vec{F}_E) = \int_o^{\vec{x}} d\vec{r} \cdot (-q\vec{E}) \\ &= -q \int_o^{\vec{x}} d\vec{r} \cdot \nabla V = -qV(\vec{x}) \end{aligned} \quad (2.1)$$

การมี  $\int d\vec{r} \cdot$  ดำเนินการกับ  $\vec{E}$  ที่มีโครงสร้าง  $\vec{E} = -\nabla V$  จะทำให้เกิดโครงสร้าง อินทิกรัลของผลต่างเชิงอนุพันธ์รวม (Total differential) ซึ่งไม่ขึ้นกับเส้นทาง ในรูป

$$\int d\vec{r} \cdot \nabla F = \int \left( dr_i \frac{\partial}{\partial x_i} \right) F = \int dF \quad (2.2)$$

ต่อไปถ้าเขียน ดัชนีซ้ำ ให้หมายถึง การมีผลบวก  $\sum_{i=1}^3$  ตามลำดับ

ดัชนี  $i=1,2,3$  เมื่อแยกส่วนที่ไม่ขึ้นกับเส้นทางและไม่ขึ้นกับประจุทดสอบ (Test charge) ออกมา ก็จะได้ (1.1) ที่เป็นการเขียนศักย์ในรูปสนามไฟฟ้า

สำหรับศักย์เวกเตอร์ พิจารณางานในการเลื่อนวงจรทดสอบ (Test circuit)  $C$  อย่างช้าๆ ต่อต้านแรงสนามแม่เหล็ก [4] ดังนี้

$$\begin{aligned} W_B &= \int_o^{\{\vec{x}\}_C} d\vec{r} \cdot (-\vec{F}_B) \\ &= \int_o^{\{\vec{x}\}_C} d\vec{r} \cdot \left( -\frac{1}{c} \oint_C d\vec{l} \times \vec{B} \right) \\ &= \int_o^{\{\vec{x}\}_C} d\vec{r} \cdot \left( -\frac{1}{c} \oint_C d\vec{l} \times (\nabla \times \vec{A}) \right) \\ &= -\frac{1}{c} \oint_C d\vec{l} \cdot \left( \int_o^{\vec{x}} d\vec{r} \cdot \nabla \right) \vec{A} \\ &\quad + \int_o^{\{\vec{x}\}_C} d\vec{r} \cdot \left( \frac{1}{c} \oint_C d\vec{l} \cdot \nabla \right) \vec{A} \\ &= -\frac{1}{c} \oint_C d\vec{l} \cdot \vec{A}(\vec{x}) \end{aligned} \quad (2.3)$$

โดยที่  $\{\vec{x}\}_C$  หมายถึง ตำแหน่งสุดท้ายต่างๆ ของ ชิ้นประกอบกระแส (Current elements)  $d\vec{l}$  ของวงจรทดสอบ  $C$  สังเกตว่าเมื่อมี  $\int d\vec{r} \cdot \oint d\vec{l} \times$  ดำเนินการกับ  $\vec{B}$  ที่มีโครงสร้าง  $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$  ก็จะทำให้เกิดโครงสร้าง อินทิกรัลของผลต่างเชิงอนุพันธ์รวม (2.2) ที่ไม่ขึ้นกับเส้นทางขึ้นมาได้ เมื่อแยกส่วนโครงสร้างที่ไม่ขึ้นกับเส้นทางและไม่ขึ้นกับวงจรกระแสทดสอบออกมาจะได้เป็นนิยามของ ศักย์เวกเตอร์  $\vec{A}(\vec{x})$  นั่นเอง

จากวิธีที่ 1 เราจะอนุมาน Magnetostatic analog ของ (1.1) โดยการย้าย  $\int d\vec{r}$  ของงานใน (2.3) ผ่านอินทิเกรตของ  $d\vec{l}$  เข้าไปกระทำกับ  $\vec{B}$  โดยตรง (ในทำนองเดียวกับ (2.1) ที่ย้าย  $\int d\vec{r} \cdot$  ผ่าน  $q$  เข้าไปดำเนินการกับ  $\vec{E}$  โดยตรง) ซึ่ง “น่าจะ” ทำได้โดยใช้เอกลักษณ์ (Identity)

$$d\vec{r} \cdot (d\vec{l} \times \vec{B}) = -d\vec{l} \cdot (d\vec{r} \times \vec{B}) \quad (2.4)$$

และเมื่อแยกส่วนที่ไม่ขึ้นกับวงจรกระแสทดสอบออกแล้วเทียบกับ RHS (2.3) ก็น่าจะได้เป็นสมการ (1.3) ดังกระบวนการนี้

$$\begin{aligned} -\frac{1}{c} \oint_C d\vec{l} \cdot \vec{A} &= \int_o^{\{\vec{x}\}_C} d\vec{r} \cdot \left( -\frac{1}{c} \oint_C d\vec{l} \times \vec{B} \right) \\ &= \frac{1}{c} \oint_C d\vec{l} \cdot \int_o^{\vec{x}} d\vec{r} \times \vec{B} \end{aligned} \quad (2.5)$$

พิจารณาตรวจสอบ (1.3) ที่ได้ โดยการแทน  $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$  กลับลงไป RHS (1.3) ก็จะได้เอกลักษณ์ว่า

$$-\int_o^{\vec{x}} d\vec{r} \times \vec{B} = \vec{A} - \hat{e}^j \int_o^{\vec{x}} dr_i \frac{\partial}{\partial x_j} A_i \quad (2.6)$$

โดยที่  $i, j = 1, 2, 3$  เรียกพจน์ที่ 1 ว่า  $\bar{T}_1$  และพจน์ที่ 2 ว่า  $\bar{T}_2$  จะเห็นว่า  $\bar{T}_1$  ไม่ขึ้นกับเส้นทางและตรงกับ (1.3) แต่มีพจน์  $\bar{T}_2$  เกินมาโดยไม่ใช้พจน์เกรเดียนต์ของสนามสเกลาร์ในการแปลงเกจด้วย ซึ่งแจกแจงตามองค์ประกอบได้ว่า

$$\bar{T}_2 = -\sum_i \hat{e}_i \int_0^{\bar{x}} dr_i \frac{\partial}{\partial x_i} A_i - \sum_{i \neq j} \hat{e}_j \int_0^{\bar{x}} dr_i \frac{\partial}{\partial x_j} A_i \quad (2.7)$$

เราจะเรียกพจน์แรกและพจน์ที่สองของ (2.7) ว่า  $\bar{T}_{2.1}$  และ  $\bar{T}_{2.2}$  ตามลำดับ และพบว่า  $\bar{T}_2$  มีลักษณะดังนี้

(1) พจน์  $\bar{T}_2$  เท่ากับศูนย์ในบางเส้นทางและบางระบบเท่านั้น แต่โดยทั่วไปไม่เท่ากับศูนย์ ทำให้ได้ว่า (1.3) ไม่จริงโดยทั่วไป แม้แต่ในระบบที่ง่าย เช่น ระบบสนามแม่เหล็กคงที่ ซึ่งในเกจคูลอมบ์มี  $\vec{A} = -\frac{1}{2}(\vec{x} - \vec{x}_0) \times \vec{B}$  [1] ทำให้พบว่ามี

$$\bar{T}_2 = \bar{T}_{2.2} = -\frac{1}{2}(\vec{x} - \vec{x}_0) \times \vec{B} \neq 0 \quad (2.8)$$

(2) พจน์  $\bar{T}_2$  โดยทั่วไปขึ้นกับเส้นทาง อันเนื่องจาก (2.6) เป็นอินทิกรัลในรูป

$$\int d\vec{r} \times (\nabla \times \vec{F}) = -\int (d\vec{r} \cdot \nabla) F_i \hat{e}_i + \int \left( dr_j \frac{\partial}{\partial x_i} \right) F_j \hat{e}_i \quad (2.9)$$

ซึ่งเป็น  $\int d\vec{r} \times$  ดำเนินการกับ  $\nabla \times \vec{A}$  แบบผลคูณไขว้ (Cross product) ที่ไม่ใช่แบบผลคูณจุด (Dot product) เช่นใน (2.2) จึงทำให้เกิดพจน์ที่มีลักษณะ

$$\int \left( dr_j \frac{\partial}{\partial x_i} \right) V_{ij}$$

(โดยที่ แต่ละพจน์ที่มี  $i = j$  นั้นมี  $V_{ii}$  ไม่เท่ากัน) ซึ่งไม่ใช่โครงสร้างอินทิกรัลของผลต่างเชิงอนุพันธ์รวมที่ไม่ขึ้นกับเส้นทางดัง (2.2) นั่นคือ การเกิดพจน์ที่สองของ (2.9) หรือพจน์  $\bar{T}_2$  ใน (2.6) ซึ่งเป็นพจน์ที่ส่งผลให้อินทิกรัล RHS (1.3) ขึ้นกับเส้นทางนั่นเอง เช่น ตัวอย่างลวดกระแสยาวอนันต์ ซึ่งมี

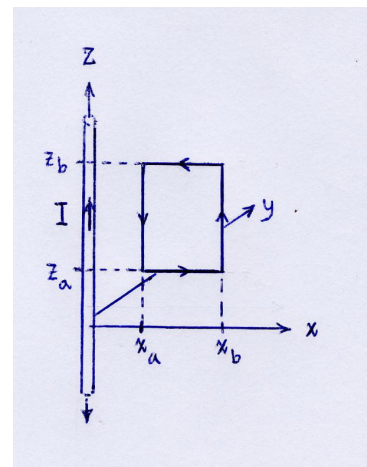
$$\vec{B}(x, y) = \frac{I}{c} \frac{\hat{e}_\phi}{\rho^2} \quad \text{และ} \quad \vec{A}(x, y) = \hat{e}_3 A_z = \hat{e}_3 \left( -\frac{2I}{c} \ln \rho \right)$$

โดยที่  $\hat{e}_\phi = -\hat{e}_1 \cos \theta + \hat{e}_2 \sin \theta$  และ  $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$  [5] ในตัวอย่างนี้ได้ว่า

$$\bar{T}_2 = \bar{T}_{2.2} = -\left( \hat{e}_1 \int_0^z dz \frac{\partial}{\partial x} A_z + \hat{e}_2 \int_0^z dz \frac{\partial}{\partial y} A_z \right) \quad (2.10)$$

ซึ่งขึ้นกับเส้นทางโดยสามารถแสดงได้ว่าอินทิกรัลนี้รอบบางวงปิดไม่เท่ากับศูนย์ (สำหรับตัวอย่างนี้,  $\bar{T}_{2.1} = 0$ ) เช่น สำหรับวงปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าในระนาบ  $XZ$  ที่ขนานกับเส้นลวดกระแสดัง รูปที่ 1 [1] ได้ว่า

$$\bar{T}_{2.2} = \hat{e}_1 (z_b - z_a) \frac{\partial A_z}{\partial x} \Big|_{x=x_a}^{x=x_b} \neq 0 \quad (2.11)$$



รูปที่ 1 แสดงวงปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ขนานกับลวดกระแสยาวอนันต์

มีคำถามว่า จากงาน (2.3) ได้ศักย์เวกเตอร์  $\vec{A}$  ที่ไม่ขึ้นกับเส้นทาง แต่เหตุใดเมื่อจัดรูปงานนี้โดยใช้ (2.4) กลับได้ผลที่แตกต่าง คือ (1.3) ที่ขึ้นกับเส้นทาง? จาก (2.4) พิจารณาเอกลักษณ์ต่อไปนี้

$$d\vec{r} \cdot (d\vec{l} \times (\nabla \times \vec{A})) = dr_i dl_j \frac{\partial A_j}{\partial x_i} - dr_i dl_j \frac{\partial A_i}{\partial x_j} \quad (2.12)$$

$$-d\vec{l} \cdot (d\vec{r} \times (\nabla \times \vec{A})) = dl_j dr_i \frac{\partial A_j}{\partial x_i} - dl_j dr_i \frac{\partial A_i}{\partial x_j} \quad (2.13)$$

จะเห็นว่าการใช้ (2.4) กับอินทิกรัล (2.3) เป็นจริงเฉพาะกับชิ้นประกอบน้อยยิ่ง (Infinitesimal line elements) เท่านั้น แต่เมื่อใส่เครื่องหมายอินทิเกรตแล้วอาจได้อินทิกรัลที่ต่างกัน เพราะมีการสลับลำดับการอินทิเกรต เช่น พจน์แรกของ (2.12) และ (2.13) ให้อินทิกรัลที่ไม่ขึ้นกับเส้นทางเท่ากัน แต่พจน์ที่ 2 ให้ผลที่แตกต่าง

กัน กล่าวคือ พจน์ที่ 2 ของ (2.12) ให้อินทิกรัลรอบวงจรทดสอบเป็นศูนย์ ดังนี้

$$\int dr_i \oint_C dl_j \frac{\partial A_i}{\partial x_j} = \int d\vec{r} \cdot \left( \oint_C d\vec{l} \cdot \nabla \right) \vec{A} = 0 \quad (2.14)$$

(เช่น พจน์ที่ 2 ในบรรทัดที่ 4 ของ (2.3) [4]) ส่วนพจน์ที่สองของ (2.13) กลับให้ตัวถูกอินทิเกรต  $\vec{T}_2$  (2.7) ที่ขึ้นกับเส้นทางและไม่เป็นได้อย่างเดียว และทำให้อินทิกรัลเชิงเส้นรอบวงปิดของ  $\vec{T}_2$  ไม่จำเป็นต้องเท่ากับศูนย์ กล่าวคือ

$$\oint_C dl_j \int dr_i \frac{\partial A_i}{\partial x_j} = \oint_C d\vec{l} \cdot \vec{T}_2 \neq 0 \quad (2.15)$$

แม้แต่ในระบบง่าย ๆ เช่น ระบบสนามแม่เหล็กคงที่ ที่มี  $\vec{T}_2$  (2.8) ก็ตาม

### 3. สรุป

ศักย์ไฟฟ้าสถิตและศักย์เวกเตอร์สถิตมีมโนทัศน์ร่วมกัน คือ เป็นส่วนของงานต่อต้านแรงสนาม ที่ไม่ขึ้นกับเส้นทางและไม่ขึ้นกับปริมาณวัตถุทดสอบที่ถูกแรงกระทำ สำหรับศักย์เวกเตอร์สถิต การอนุมานการเขียนศักย์เวกเตอร์ในรูปสนามแม่เหล็ก (1.3) จากงานต่อต้านแรงสนามแม่เหล็ก (2.3) มีที่ผิดตรงที่ การจัดรูปอินทิกรัลโดยใช้เอกลักษณ์เวกเตอร์ (2.4) ทำไม่ได้อย่างทั่วไป ถ้าจะทำ ก็จะทำให้เกิดการสลับลำดับการอินทิเกรตและให้อินทิกรัลที่แตกต่างกันออกมา โดยอยู่ในรูป  $\int d\vec{r} \times$  ดำเนินการกับ  $\nabla \times \vec{A}$  ในลักษณะผลคูณไขว้ที่ไม่ให้รูปอินทิกรัลของผลต่างเชิงอนุพันธ์รวม และนำไปสู่โครงสร้างที่ขึ้นกับเส้นทางนั่นเอง

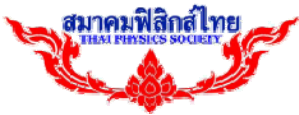
เอกสารอ้างอิง

- [1] D. J. Griffiths, *Introduction to Electrodynamics* (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1989), 2<sup>nd</sup> ed.
- [2] J. D. Jackson, *Classical Electrodynamics* (John Wiley & Sons, New York, 1975), 2<sup>nd</sup> ed.
- [3] J. D. Jackson and L. B. Okun, “Historical Roots of Gauge Invariance,” *Rev. Mod. Phys.* **73**, 3, 663-680 (2001).
- [4] P. Lorrain and D. R. Corson, *Electromagnetic Fields and Waves* (W. H. Freeman, San Francisco, 1970). และชาญกิจ กันล่อง, “เหลื่อมเพชรเม็ดงามวิชาแม่เหล็กไฟฟ้า: ตอนที่ 4 พลังงานแม่เหล็กสถิต (1),” วารสารฟิสิกส์ไทย, ปีที่ 25 ฉบับที่ 2, มิ.ย.-ส.ค. 2551.
- [5] B. Hague and D. Martin, *An Introduction to Vector Analysis for Physicists and Engineers* (Chapman and Hall, London, 1970).

---

\* บทความนี้ มาจาก โครงการการค้นคว้าอิสระ (Senior project) ของ ศักดิ์สิทธิ์ สวงผล, “การศึกษาการก่อรูปศักย์แม่เหล็กสถิตผ่านงานต้านแรงแม่เหล็ก,” รายงานการค้นคว้าอิสระ, วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์, (คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2551).

ภาพถ่ายฝนดาวตกเจมินิดส์ จากยอดดอยอินทนนท์  
(ดูรายละเอียดภายในเล่ม)



สมาคมฟิสิกส์ไทย

อาคารสุรพัฒน์ 3 ถนนมหาวิทยาลัย

ต. สุรนารี อ. เมือง

จ. นครราชสีมา 30000

ตู้ ปณ. 93 ปณจ. นครราชสีมา 30000

THAI PHYSICS SOCIETY

Surapat 3 Building, University Avenue

Tambon Suranaree, Muang District

Nakhon Ratchasima 30000

P.O. Box 93 Nakhon Ratchasima 30000

ชำระค่าฝากส่งเป็นรายเดือน

ใบอนุญาตเลขที่ 187/2552

ปท.จ. นครราชสีมา

สิ่งตีพิมพ์

หากไม่ถึงผู้รับ โปรดส่งคืนสมาคมฟิสิกส์ไทย