



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์)

ปริญญา

ฟิสิกส์

ฟิสิกส์

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาลักษณะของความพัวพันของโฟตอนที่กำเนิดโดยการแปลงผันลงอิงพารามิเตอร์
แบบเกิดขึ้นเองของแหล่งกำเนิดแบบพัลส์

Characterization of Entanglement Photons Generated by Spontaneous Parametric Down
Conversion Pulse Source

نامผู้วิจัย นายเอกสิทธิ์ สำนักระโทก

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรศักดิ์ เชียงกา, Dr.rer.nat.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์เชิดศักดิ์ คุณสมบัติ, วท.ค.)

หัวหน้าภาควิชา

(อาจารย์วิวัฒน์ วงศ์ก่อเกื้อ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สิงสถิตี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาลักษณะของความพัวพันของโฟตอนที่กำเนิดโดย
การแปลงผันลงอิงพารามิเตอร์แบบเกิดขึ้นเองของแหล่งกำเนิดแบบพัลส์

Characterization of Entanglement Photons Generated by
Spontaneous Parametric Down Conversion Pulse Source

โดย

นายเอกสิทธิ์ สำนักระโทก

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์)

พ.ศ. 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสิทธิ์ สำนักระโทก 2553: การศึกษาลักษณะของความพัวพันของโฟตอนที่กำเนิด
โดยการแปลงผ่นลงอิงพารามิเตอร์แบบเกิดขึ้นเองของแหล่งกำเนิดแบบพัลส์ ปรินญา
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (ฟิสิกส์) สาขาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรศักดิ์ เชียงกา, Dr.rer.nat. 102 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความพัวพัน (entangle) ของสถานะโพลาริเซชันระหว่างคู่โฟ
ตอนที่ผลิตขึ้น โดยกระบวนการแปลงผ่นลงอิงพารามิเตอร์แบบเกิดขึ้นเอง (spontaneous
parametric down conversion) ด้วยเลเซอร์ไดโอดความยาวคลื่น 405 นาโนเมตร กล้าสัญญาณรูป
สี่เหลี่ยมด้วยฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ ในผลึกไม่เชิงเส้น ชนิดเบต้าเบริลเลียมบอเรต (beta barium
borate; $\beta - BaB_2O_4$) ที่ตัดแกนผลึกเพื่อเข้าคู่เฟสชนิดที่ I (Type I phase matching) จำนวนสอง
แผ่น แต่ละแผ่นมีขนาด $5.0 \times 5.0 \times 0.5$ ลูกบาศก์มิลลิเมตร วางประกบกัน โดยให้แนวแกนเชิงแสง
ของผลึกทั้งสองทำมุมฉากกัน จากการทดลองพบว่าความต่างเฟสที่เกิดขึ้นเนื่องจากความเร็วของ
แสงที่แตกต่างกันในผลึกทั้งสอง สามารถชดเชยได้ด้วยแผ่นครึ่งคลื่นและแผ่นเลี้ยวคลื่นที่ทำจาก
ผลึกควอตซ์ (quartz crystal) สถานะที่ผลิตได้จากลักษณะการจัดวางผลึกและการชดเชยเฟส
ดังกล่าวข้างต้นจะเป็น $|\phi^-\rangle = (|HH\rangle - |VV\rangle) / \sqrt{2}$ ความพัวพันกันของสถานะโพลาริเซชัน
ระหว่างคู่โฟตอนจะเป็นฟังก์ชันไซน์โดยมีสภาพมองเห็นได้ (visibility) 93 เปอร์เซ็นต์ ความ
พัวพันของสถานะโพลาริเซชันระหว่างคู่โฟตอนจะวัดจากการละเมิดอสมการเบลล์ (Bell's
inequality) ตามแบบของ Clauser-Horne-Shimony และ Holt จากผลการทดลองพบว่าพารามิเตอร์
เบลล์ S เท่ากับ 2.55 ± 0.046 ซึ่งมากกว่าขีดจำกัดเชิงคลาสสิก $|S| \leq 2$ อยู่ 12 เท่าของค่าเบี่ยงเบน
มาตรฐานดังนั้นสถานะโพลาริเซชันที่สร้างขึ้นจึงเป็นสถานะเชิงควอนตัม

Ekkasit Sakatok 2010: Characterization of Entanglement Photons Generated by Spontaneous Parametric Down Conversion Pulse Source. Master of Science (Physics), Major Field: Physics, Department of Physics. Thesis Advisor: Assistant Professor Surasak Chiangga, Dr.rer.nat. 102 pages.

This research studied the polarization entanglement of photon pairs which generated by spontaneous parametric down-conversion process in nonlinear crystals beta barium borate ($\beta - BaB_2O_4$). The diode laser 405 nm modulated by rectangular signal from function generator was used as a pump source. Two $\beta - BaB_2O_4$ crystals were cut for type-I phase matching each dimension of $5.0 \times 5.0 \times 0.5 \text{ mm}^3$ were placed face-to-face with the optic axis made 90° to each other. The phase different occurs from different of speed of light in crystals could be compensated by using half-wave plate and quarter-wave plate both are quartz. The polarization state of the system described above was $|\phi^-\rangle = (|HH\rangle - |VV\rangle) / \sqrt{2}$. The polarization correlation between photon pairs was a sine function with the visibility of 93%. The entanglement between photons was measured by violation of Bell's inequality in Clauser-Horne-Shimony and Holt version. We found that the Bell parameter $S = 2.55 \pm 0.046$ which is 12 standard deviation higher than the classical allowed $|S| \leq 2$. Therefore, the polarization of photon pairs was in quantum regime.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรศักดิ์ เชียงกา ประธานกรรมการที่ปรึกษาที่ได้อบรมสั่งสอนวิชาความรู้ ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในการวางแผนงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมทั้งตรวจและแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์เชิดศักดิ์ คุณสมบัติ กรรมการวิชาเอก ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำข้อคิดเห็นอันเป็นประโยชน์ตลอดจนตรวจแก้วิทยานิพนธ์ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และพี่ ๆ ทุกคนที่คอยช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ในการจัดทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณรุ่นพี่ เพื่อน ๆ และรุ่นน้องทุกคน สำหรับคำปรึกษา ความช่วยเหลือ และกำลังใจที่มีให้

เอกสิทธิ์ สำนักระโทก

กุมภาพันธ์ 2553

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	32
อุปกรณ์	32
วิธีการ	35
ผลและวิจารณ์	57
สรุปและข้อเสนอแนะ	68
สรุป	68
ข้อเสนอแนะ	70
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	71
ภาคผนวก	75
ภาคผนวก ก คู่มือการใช้งานเลเซอร์ไดโอด	76
ภาคผนวก ข วงจรตรวจนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกัน	85
ภาคผนวก ค การคำนวณความน่าจะเป็นในการตรวจวัด คู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกัน	88
ภาคผนวก ง การคำนวณพารามิเตอร์เบลล์ S	91
ภาคผนวก จ การคำนวณความไม่แน่นอนของปริมาณ S	95
ภาคผนวก ฉ การคำนวณความไม่แน่นอนของสภาพมองเห็นได้ σ_v	99
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	102

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 ตารางบันทึกอัตราการนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกันที่มุม $A (\alpha)$ ต่าง ๆ จำนวน 3 ครั้งในเวลา 10 วินาที แล้วหาค่าเฉลี่ย N_{av} ในขณะที่มุมของโพลาริเซอร์ B (β) เปลี่ยนครั้งละ 15°	57
2 บันทึก อัตราการนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกัน (N) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของมุมโพลาริเซอร์ α, β ช่วงเวลาของการตรวจนับเป็น 10 วินาทีจำนวน 3 ครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ย หน้าต่างเวลาของอัตราการนับคู่โฟตอนที่ เกิดขึ้นพร้อมกัน $\tau = 25$ นาโนวินาที	61
3 บันทึกอัตราการนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกัน (N) ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับความถี่ ช่วงเวลาของการตรวจนับเป็น 10 วินาทีจำนวน 3 ครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ย หน้าต่างเวลาของอัตราการนับคู่โฟตอนที่ เกิดขึ้นพร้อมกัน $\tau = 25$ นาโนวินาที	63
4 สภาพมองเห็นได้ของเวกเตอร์ฐานในแนวระดับ (H) แนวตั้ง (V) และ $\pm 45^\circ$ กับความถี่ในการกล้ำสัญญาณเลเซอร์ไดโอด	64
5 บันทึกอัตราการนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกัน (N) ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับความกว้างของแผ่นกั้นแสง ช่วงเวลาของการตรวจนับเป็น 10 วินาทีจำนวน 3 ครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ยหน้าต่างเวลาของอัตราการนับคู่โฟตอนที่ เกิดขึ้นพร้อมกัน $\tau = 25$ นาโนวินาที	66
6 สภาพมองเห็นได้ของเวกเตอร์ฐานในแนวระดับ (H) แนวตั้ง (V) และ $\pm 45^\circ$ กับความกว้างของแผ่นกั้นแสง	66
ตารางผนวกที่	
ง1 ตัวอย่างข้อมูลในการคำนวณพารามิเตอร์ S	94

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	เวกเตอร์ฐานของตัวทำแสงโพลาริซซ์ที่ทำมุม α	16
2	ผลการรวมเวกเตอร์คลื่นของโฟตอนปั๊ม	18
3	เส้นโค้งดัชนีหักเห ของผลึก BBO	20
4	ผลึก 2 ชั้นที่เป็นแหล่งกำเนิดของการแปลงผันลงหนา 0.5 มิลลิเมตร และวาง สัมผัสกันแบบหน้าต่อหน้า	21
5	การทำนายพัฟพันกันทางโพลาริเซชัน สำหรับสถานะพัฟพันในกลศาสตร์ ควอนตัมและทฤษฎีตัวแปรแฝง	27
6	มุมของโพลาริเซอร์ที่ทำให้พารามิเตอร์เบลล์มากที่สุด	29
7	การยืดเลเซอร์ไดโอดกับแท่งยึดอลูมิเนียม	35
8	แหล่งกำเนิดคลื่นรูปสี่เหลี่ยมความถี่ 50 กิโลเฮิร์ต	35
9	การกล้ำสัญญาณอนาล็อกให้กับเลเซอร์ไดโอด	36
10	การจัดระดับทางเดินแสงที่ตกกระทบกับกระจกสะท้อน	37
11	การจัดระดับทางเดินแสงที่สะท้อนกับกระจกสะท้อน	38
12	ลำแสงถูกโฟกัสที่ผลึก BBO มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 มิลลิเมตร	38
13	แผนภาพการจัดอุปกรณ์การทดลอง เพื่อสร้างโพลาริเซชันพัฟพันของคู่โฟตอน	39
14	การติดตั้งอุปกรณ์ทางแสงที่ใช้ในการสร้างโฟตอนที่พัฟพัน	40
15	การติดตั้งตัวกรองแสงสีน้ำเงิน	41
16	การติดตั้งแผ่นกั้นแสง	41
17	การติดตั้งกระจกแยกลำแสงโพลาริซซ์ของเลเซอร์	42
18	การติดตั้งแผ่นครึ่งคลื่น	42
19	การติดตั้งกระจกสะท้อน	43
20	การติดตั้งผลึก BBO	43
21	การติดตั้งอุปกรณ์ทางแสงที่ใช้ในการตรวจวัดโฟตอนที่พัฟพัน	44
22	การติดตั้งแขนอลูมิเนียม	45
23	การติดตั้งแผ่นครึ่งคลื่นบนแขนอลูมิเนียม	45

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
24	การติดตั้งแผ่นเสี้ยวคลื่นบนแกนอลูมิเนียม	46
25	การติดตั้งโพลาริเซอร์ A และโพลาริเซอร์ B บนแกนอลูมิเนียม	46
26	การติดตั้งแผ่นกั้นแสงบนแกนอลูมิเนียม	47
27	การติดตั้งตัวกรองแสงสีแดง RG780 บนแกนอลูมิเนียม	47
28	การติดตั้งตัวทำแสงขนานบนแกนอลูมิเนียม	48
29	การติดตั้งตัวกั้นลำแสงสีม่วง	48
30	การติดตั้งใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดเข้ากับตัวทำแสงขนาน	49
31	การติดตั้งใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดเข้ากับ SPCMs	49
32	การติดตั้งวงจรตรวจนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกันเข้ากับเอาต์พุตของ SPCMs	50
33	การติดตั้งตัวตรวจนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกัน	50
34	แสดงสายไฟของแหล่งจ่ายเพื่อจ่ายไฟให้กับตัวตรวจหาโฟตอนเดี่ยว SPCMs	51
35	การติดตั้งตัวตรวจวัดโฟตอนเดี่ยว SPCMs	51
36	ความฟุ้งของคู่โฟตอน	59
37	โพลาริเซชันของอัตราการนับโฟตอนเดี่ยวจากคู่ของโฟตอนและคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกัน	60
38	สภาพมองเห็นได้กับความถี่	65
39	สภาพมองเห็นได้กับความกว้างของแผ่นกั้น	67
ภาพผนวกที่		
ข1	วงจรตรวจนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกัน	86
ข2	แผนภาพของวงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการตรวจวัดคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกัน	87
ง1	มุมที่ตัวทำแสงโพลาริซักระทำกับแนวตั้ง	92

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$ \rangle$	=	สัญกรณ์ดีเรค (dirac notation)
$ H\rangle, \leftrightarrow\rangle$	=	สถานะโพลาไรเซชันของโฟตอนในแนวระดับ
$ V\rangle, \updownarrow\rangle$	=	สถานะโพลาไรเซชันของโฟตอนในแนวตั้ง
$ +45\rangle, \nearrow\rangle$	=	สถานะโพลาไรเซชันของโฟตอนที่มุม 45 องศา
$ -45\rangle, \searrow\rangle$	=	สถานะโพลาไรเซชันของโฟตอนที่มุม -45 องศา
BBO	=	β - barium borate
HVT	=	hidden variable theory
SPCM	=	single photon counting module
SFG	=	sum frequency generation
EPR	=	Einstein-Podolsky-Rosen
BS	=	beam splitter
CHSH	=	Clauser-Horne-Shimony-Holt
HWP	=	half-wave plate
PBS	=	polarizing beam-splitter
QWP	=	quarter-wave plate
CS	=	compensation phase

การศึกษาลักษณะของความพัวพันของโฟตอนที่กำเนิด โดยการแปลงผันลงอิงพารามิเตอร์แบบเกิดขึ้นเองของแหล่งกำเนิดแบบพัลส์

Characterization of Entanglement Photons Generated by Spontaneous Parametric Down Conversion Pulse Source

คำนำ

สถานะพัวพัน (entangled state) เป็นหัวใจสำคัญของการประมวลผลทางสารสนเทศเชิงควอนตัม (quantum information processing) การคำนวณเชิงควอนตัม (quantum computation) (Shor 1997) การสื่อสารเชิงควอนตัม (quantum communication) (Bennett *et al.* 1993) และ การกระจายกุญแจเชิงควอนตัม (quantum key distribution) (Ekert 1991) สถานะพัวพันยังเป็นพื้นฐานสำคัญในการใช้ทดสอบทฤษฎีควอนตัมโดยพิจารณาจากการฝ่าฝืนอสมการเบลล์ (Bell's inequalities) (Clauser *et al.* 1996)

เมื่อไม่นานมานี้ได้มีการประยุกต์ใช้คู่โฟตอนที่โพลาไรเซชันพัวพันกันเข้ากับการทดลองการกระจายกุญแจเชิงควอนตัม (Jennewein *et al.* 2000; Naik *et al.* 2000; Tittel *et al.* 2000) การขนส่งทางไกลเชิงควอนตัม (quantum teleportation) (Bouwmeester *et al.* 1997) และการคำนวณเชิงควอนตัม (quantum computation) (Bouwmeester *et al.* 2002) และมีการนำเสนอแนวคิดในการประยุกต์ใช้ทางด้านมาตรวิทยาเชิงควอนตัม (quantum metrology) (Migdall 1999) หรือในการเพิ่มประสิทธิภาพกล้องจุลทรรศน์ (entangled-photon-pair enhanced microscopy) (Teich and Saleh 1998)

ในรอบทศวรรษที่ผ่านมา กระบวนการแปลงผันลงอิงพารามิเตอร์แบบเกิดขึ้นเอง (spontaneous parametric down-conversion; SPDC) เป็นที่ยอมรับให้เป็นวิธีมาตรฐานสำหรับการให้กำเนิดคู่โฟตอนที่โพลาไรเซชันพัวพันกัน (Kwiat *et al.* 1995) วิธีการให้กำเนิดโฟตอนที่มิสถานะโพลาไรเซชันพัวพันกันเกิดขึ้นโดยใช้ลำแสงเลเซอร์ความเข้มสูง ในการป้อนผลึกไม่เชิงเส้น (nonlinear crystal) ทำให้เกิดกระบวนการแปลงผันลงแบบเกิดขึ้นเองไปเป็นคู่โฟตอนที่โพลาไรเซชันตั้งฉากกัน ซึ่งเราเรียกว่า โฟตอนสัญญาณ (signal) และโฟตอนไอดีลอร์ (idler)

จากหลักของการอนุรักษ์พลังงานและโมเมนตัม ภายใต้อันตรกิริยาไม่เชิงเส้นทำให้เกิดคู่โฟตอน มีความยาวคลื่นและทิศทางพัวพันกัน (direction correlations) เมื่อโฟตอนสัญญาณและโฟตอนไอเดิลอร์มีความยาวคลื่นเดียวกัน โฟตอนที่ออกมาจากผลึกที่สมมาตรจะปรากฏเป็นสองกรวยและโพลาไรเซชันของแต่ละโฟตอนจะไม่สามารถระบุได้ว่ามาจากกรวยอันไหนสำหรับโพลาไรเซชันที่ตั้งฉากกัน การที่ไม่สามารถระบุแหล่งกำเนิดของแต่ละโฟตอนได้จึงกล่าวว่าคุณโฟตอนมีโพลาไรเซชันพัวพันกัน (Trojek *et al.* 2004) จากผลการวิจัยที่ผ่านมา (Boonkham 2009) มาถ้ามุมในการตรวจหาโฟตอนเดี่ยวและแถบกว้างความถี่ (band width) สอดคล้องกับการกำเนิดโฟตอนสัญญาณและโฟตอนไอเดิลอร์พบว่า ผลึกไม่เชิงเส้นชนิดเบต้าแบเรียมบอเรต ($\beta - \text{BaB}_2\text{O}_4 : \text{BBO}$) ที่ตัดแกนเข้าสู่เฟสชนิดที่ I (Type I phase matching) หนา 0.1 มิลลิเมตร จะให้อัตราการเกิดโฟตอนเดี่ยวและคู่โฟตอนที่พัวพันประมาณ 200 คู่ต่อ 10 วินาที เนื่องจากการผลิตคู่โฟตอนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความหนาของผลึก ดังนั้นเมื่อความหนาของผลึกเพิ่มขึ้นด้วยกำลังของปั๊มเลเซอร์ที่เท่ากันจะทำให้อัตราการเกิดโฟตอนเดี่ยวและคู่โฟตอนที่พัวพันกันได้มากขึ้น ซึ่งจะทำให้ความสว่าง (จำนวนคู่โฟตอน/กำลังปั๊ม) ของแหล่งกำเนิดเพิ่มขึ้นด้วย แหล่งกำเนิดที่มีอัตราการผลิตคู่โฟตอนที่พัวพันกันมากจะเป็นที่ต้องการในการสื่อสารเชิงควอนตัมที่ต้องการความเร็วของอัตราการสื่อสารสัญญาณ

งานวิจัยนี้ศึกษาการสร้างแหล่งกำเนิดคู่โฟตอนที่มีความพัวพันกันทางโพลาไรเซชันโดยใช้เลเซอร์ไดโอดลำแสงสีม่วงและผลึกไม่เชิงเส้น 2 แผ่นวางทำมุม 90 องศาต่อกันโดยแต่ละแผ่นมีความหนา 0.5 มิลลิเมตร และทำการวัดเชยความเร็วเฟสของโฟตอน ความพัวพันของสถานะโพลาไรเซชันระหว่างคู่โฟตอนจะพิจารณาจากการละเมิดอสมการเบลล์ตามรูปแบบของ Clauser-Horne-Shimony-Holt; CHSH

วัตถุประสงค์

1. สร้างแหล่งกำเนิดคู่โฟตอนพัวพันกันของโพลาริเซชันโดยใช้แหล่งกำเนิดเลเซอร์ไดโอดที่กล้ำ สัญญาณด้วยคลื่นรูปสี่เหลี่ยม
2. ศึกษาการชดเชยความเร็วเฟสของโฟตอนที่กำเนิดโดยกระบวนการแปลงผันลงอิงพารามิเตอร์แบบเกิดขึ้นเองจากผลึกไม่เชิงเส้นเบต้าแบริอุมโบเรต หนา 0.5 มิลลิเมตร
3. วัดสถานะโพลาริเซชันของคู่โฟตอนที่กำเนิดขึ้นตามกระบวนการแปลงผันลงอิงพารามิเตอร์แบบเกิดขึ้นเอง
4. ศึกษาทฤษฎีตัวแปรแฝงและอสมการเบลล์
5. ทำการทดลองเพื่อทดสอบสถานะเชิงควอนตัมของโพลาริเซชันของคู่โฟตอนโดยพิจารณาจากการละเมิดอสมการเบลล์

การตรวจเอกสาร

ไอน์สไตน์ (Einstein) มีความสงสัยเกี่ยวกับหลักความไม่แน่นอน (uncertainty principle) หลังจากทีกลศาสตร์ควอนตัมได้รับการยอมรับในช่วงยุคสมัยของเขา ภายหลังจากปาฐกถาโดย บอห์ (Bohr) ในปี 1933 ไอน์สไตน์ได้วิจารณ์และเสนอแนะ การทดลองเชิงแนวคิด (thought experiment) ถึงปัญหาของหลักความไม่แน่นอนที่บรรยายโดย โรเซนเฟลด์ (Rosenfeld) (Rosenfeld 1967) ซึ่งมีข้อโต้แย้งดังต่อไปนี้

“ สมมติว่าอนุภาคสองอนุภาคมีโมเมนตัมเท่ากันและโมเมนตัมดังกล่าวมีค่าสูงมากอนุภาคทั้งสองถูกกำหนดให้เคลื่อนที่เข้าหากัน เพื่อให้มีอันตรกิริยา (interact) กันด้วยเวลาที่สั้นมาก ณ ตำแหน่งที่แน่นอน พิจารณาผู้สังเกตคนหนึ่งที่ได้รับอนุภาคหนึ่งจากสองอนุภาคนั้นอยู่ไกลจากบริเวณที่อนุภาคทั้งสองมีอันตรกิริยากัน ผู้สังเกตทำการวัดโมเมนตัมของอนุภาคนั้น จากเงื่อนไขของการทดลองผู้สังเกตสามารถที่จะระบุโมเมนตัมของอีกอนุภาคหนึ่งได้ อย่างไรก็ตามถ้าผู้สังเกตเลือกที่จะวัดตำแหน่งของอนุภาคที่หนึ่ง เขาสามารถที่จะระบุตำแหน่งของอนุภาคที่สองได้ นี่คือข้อสรุปซึ่งถูกต้องและเป็นไปตามหลักของกลศาสตร์ควอนตัม แต่นี้เป็นลักษณะที่ขัดแย้งกันกับหลักความไม่แน่นอนใช่หรือไม่? หลังจากการมีอันตรกิริยากันของอนุภาคได้ยุติลง แล้วสถานะสุดท้ายของอนุภาคที่สองได้รับอิทธิพลจากการวัดบนอนุภาคที่หนึ่งได้อย่างไร? ”

ในประโยคสุดท้ายนี้ (ยืนยันโดยบอห์) สมมติว่าการได้มาของข้อมูลของอนุภาคเป็นการรบกวนอนุภาคนั้นทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะของอนุภาค ไอน์สไตน์เข้าใจว่าข้อมูลนี้สามารถที่จะได้รับโดยการวัดบนอนุภาคอีกอนุภาคหนึ่ง ซึ่งหมายถึงการวัดอนุภาคในสถานที่หนึ่ง มีอิทธิพลกับการวัดอนุภาคในสถานที่อื่น

สองปีต่อมาหลังจากปาฐกถาของบอห์ ไอน์สไตน์ โปโดลสกี และ โรเซน (Einstein, Podolsky, and Rosen; EPR) ได้ตีพิมพ์แนวคิดเดิมด้วยรูปแบบทางคณิตศาสตร์ (Einstein 1935) ซึ่งในเอกสารไม่ได้ให้ข้อเสนอแนะถึงการกระทำที่มีลักษณะขัดแย้งกันที่ระยะไกล และคิดว่าลักษณะเช่นนั้นเป็นไปได้ที่จะเกิดขึ้น ในทางตรงกันข้ามในเอกสารมีเจตนาที่จะแสดงความไม่สมบูรณ์ของทฤษฎีทางควอนตัม คุณลักษณะของระบบทางกายภาพสามารถที่จะกำหนดได้อย่างถูกต้องโดยปราศจากการรบกวนระบบ ดังนั้นจึงนำไปสู่ข้อโต้แย้ง คือสมาชิกของความเป็นจริง (reality) ทางกายภาพของวัตถุและการบรรยายระบบสามารถพิจารณาได้ว่าสมบูรณ์ (complete) ถ้าการ

บรรยายนั้นบรรจุส่วนต่าง ๆ ของความเป็นจริงไว้อย่างครบถ้วนจากตัวอย่างของสองอนุภาคที่แสดงให้เห็นว่าตำแหน่งและโมเมนตัมของอนุภาคหนึ่งสามารถได้มาจากการวัดที่เหมาะสมที่กระทำบนอีกอนุภาคหนึ่งโดยปราศจากการรบกวนอนุภาคตัวแรก และดังนั้นจึงเป็นส่วนต่าง ๆ ของความเป็นจริงตามนัยที่ระบุข้างต้น เนื่องจากทฤษฎีควอนตัมไม่ยินยอมให้ทั้งโมเมนตัมและตำแหน่งอธิบายสถานะของอนุภาคพร้อมกัน ดังนั้นการบรรยายแบบนี้จะมีความไม่สมบูรณ์ (incomplete) EPR ได้สรุปงานวิจัยของพวกเขาว่า ฟังก์ชันคลื่นไม่ได้ให้การบรรยายที่สมบูรณ์ของความเป็นจริงทางกายภาพ และฝากคำถามไว้ว่าการบรรยายที่สมบูรณ์มีอยู่จริงหรือไม่ อย่างไรก็ตามพวกเขาเชื่อว่าเป็นไปได้ที่จะมีทฤษฎีหนึ่งที่สามารถให้การบรรยายที่สมบูรณ์

ถึงแม้ว่าข้อขัดแย้งของ EPR จะไม่ได้ทำให้ความเชื่อมั่นทางกลศาสตร์ควอนตัมลดลงแต่นำมาซึ่งแง่มุมที่น่าสนใจ มีงานวิจัยจำนวนมากเกิดขึ้นเพื่อที่จะทำความเข้าใจข้อขัดแย้งตามข้อเสนอของ EPR ซึ่งประกอบไปด้วยการทำเข้าใจในประเด็นที่เกี่ยวข้องและการทดสอบด้วยการทดลอง ภายหลังจากงานวิจัยของ EPR จะพบว่าข้อขัดแย้งไม่ได้จำกัดอยู่เฉพาะกับสถานะของตำแหน่งหรือโมเมนตัมเท่านั้นซึ่งลักษณะของข้อขัดแย้งยังคงอยู่แค่คณิตศาสตร์จะง่ายขึ้นถ้าใช้ตัวแปรที่ไม่ต่อเนื่อง (discrete variables) เช่น สปินของอนุภาคหรือโพลาไรเซชันของโฟตอน

Bell (1964) ได้แสดงให้เห็นว่าการทำนายของกลศาสตร์ควอนตัมจะขัดแย้งกับทฤษฎีตัวแปรแฝงเฉพาะที่ ซึ่งบอกว่ากลศาสตร์ควอนตัมนั้นไม่สมบูรณ์โดยสมการเบลล์ที่สร้างขึ้นจะสอดคล้องกับทฤษฎีตัวแปรแฝงเฉพาะที่แต่กลศาสตร์ควอนตัมจะฝ่าฝืนสมการเบลล์นอกจากนี้เมื่อมีการปรับปรุงสมการเบลล์โดย CHSH ซึ่งทำให้สามารถทำการทดลองเพื่อทดสอบทฤษฎีของกลศาสตร์ควอนตัมและทฤษฎีตัวแปรแฝงเฉพาะที่ได้ จากการทดสอบพบว่า ถ้าขัดแย้งกับทฤษฎีตัวแปรแฝงเฉพาะที่แล้วจะสอดคล้องกับทฤษฎีของกลศาสตร์ควอนตัม

James *et al.* (2001) นำเสนอเทคนิคการสร้างเมทริกซ์ความหนาแน่น (density matrix) ของระบบคิวบิต (qubit) รวมถึงการวิเคราะห์ข้อผิดพลาดในการสร้างเมทริกซ์ความหนาแน่น ซึ่งได้ขยายความคิดในการคำนวณปริมาณต่าง ๆ ของสารสนเทศเชิงควอนตัม เช่น เอนโทรปี (entropy) และได้นำเสนอตัวอย่างการใช้คิวโฟตอนพัวพันของโพลาไรเซชันคิวบิตโดยปราศจากการสูญเสียคุณลักษณะทั่ว ๆ ไปของคิวโฟตอนด้วยเทคนิคนี้สามารถปรับให้เหมาะสมกับความเป็นจริงทางกายภาพของคิวบิต ซึ่งเราให้ความสำคัญเป็นพิเศษ

Dehlinger and Mitchell (2002) ได้นำเสนอรายละเอียดของการสร้างแหล่งกำเนิดและวิธีการกำเนิดคิวโฟตอนพัวพันกันของโพลาไรเซชัน แหล่งกำเนิดชนิดนี้ผลิตขึ้น ด้วยกระบวนการ

แปลงผันลงอิงพารามิเตอร์แบบเกิดขึ้นเองโดยผลึกชนิดที่ I คู่โฟตอนจะตรวจพบพร้อมกันด้วยเครื่องตรวจหาโฟตอนเดี่ยวและแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์กันเชิงโพลาไรเซชันของคู่โฟตอนจากการทดลองพบว่าคู่โฟตอนพัวพันกันมากกว่า 100 คู่ต่อวินาที จากนั้นได้ใช้คู่โฟตอนที่มีโพลาไรเซชันพัวพันกันอธิบายความไม่เฉพาะที่ทางควอนตัมและข้อขัดแย้งของ EPR (EPR paradox) ด้วยการพิจารณาแบบ CHSH พบว่าสหสัมพันธ์ของโพลาไรเซชันของคู่โฟตอนพัวพันกัน ฝ่าฝืนอสมการเบลล์ด้วยพารามิเตอร์ $S = 2.307 \pm 0.035$

Altepeter (2005) ได้นำเสนอการทดลองที่ทำให้เข้าใจได้อย่างแท้จริง สำหรับวิธีการตรวจหาคู่โฟตอนพัวพันกันแบบใหม่ ซึ่งประกอบด้วยการทดสอบอสมการเบลล์ในรูปแบบของโทโมกราฟี (tomography) และ พยานของความพัวพัน (entanglement witness) สำหรับการทดสอบในรูปแบบต่าง ๆ จะเปรียบเทียบผลจากการทดลองและผลจากทฤษฎี

Aiello *et al.* (2007) ได้นำเสนอระเบียบวิธีการของทฤษฎีที่อยู่ในรูปทั่วไป ในการสร้าง (maximum entangled mixed state; MEMS) ของสถานะโพลาไรเซชันของคู่โฟตอน แล้วรายงานผลด้วยการทดลองและยืนยันผลการทดลองนั้นด้วยผลทางทฤษฎีที่ได้นำเสนอ

Simone *et al.* (2009) ได้พิจารณาการทดลองและทฤษฎีในการกำเนิดผลึกคู่โฟตอนพัวพันกัน ด้วยกระบวนการแปลงผันลงอิงพารามิเตอร์แบบเกิดขึ้นเองด้วยเวลาอาพันธ์สั้น ๆ จากแหล่งกำเนิดเลเซอร์แบบต่อเนื่องชนิดสถานะของแข็ง (solid state cw lasers) ด้วยผลึก BBO จำนวนสองแผ่นในการเข้าคู่เฟสชนิดที่ I (type I phase matching) จากการศึกษาผลกระทบของสภาพมองเห็นได้และการฝ่าฝืนอสมการเบลล์ ของสถานะพัวพันจากการบีบด้วยเวลาด้าน ๆ จะเป็นฟังก์ชันกับขนาดของผลึก และเมทริกซ์ความหนาแน่นเต็มรูปแบบ (full density matrix) ได้ถูกสร้างขึ้นโดยโทโมกราฟีเชิงควอนตัม (quantum tomography) และทำให้สถานะพัวพันบริสุทธิ์ขึ้นด้วยการชดเชยผลึก

สมมุติฐานของกลศาสตร์ควอนตัม

สมมุติฐานข้อที่ 1 ระบบทางกายภาพใด ๆ จะอยู่ในปริภูมิเวกเตอร์เชิงซ้อนที่มีผลคูณภายใน (ปริภูมิฮิลเบิร์ต) (Hilbert space) ระบบจะอธิบายไว้อย่างสมบูรณ์ด้วยเวกเตอร์สถานะที่เวลาใด ๆ $|\psi(t)\rangle$ (state vector) ของระบบซึ่งเป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วย (unit vector) ในปริภูมิฮิลเบิร์ต

สมมุติฐานข้อที่ 2 การวิวัฒนาการของระบบควอนตัมจะอธิบายด้วยการแปลงยูนิแทรี (unitary transformation) นั่นก็คือสถานะ $|\psi\rangle$ ของระบบที่เวลา t_1 จะสัมพันธ์กับสถานะ $|\psi'\rangle$ ของระบบที่เวลา t_2 โดยตัวดำเนินการยูนิแทรี (unitary operator) ซึ่งขึ้นอยู่กับเวลา t_1 และ t_2 เท่านั้น สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$|\psi'(t_2)\rangle = \hat{U} |\psi(t_1)\rangle \quad (1)$$

สมมุติฐานข้อที่ 3 การวิวัฒนาการไปตามเวลาของสถานะของระบบควอนตัม จะอธิบายด้วยสมการชเรอดิงเงอร์ (Schrödinger equation) ดังนี้

$$i\hbar \frac{d|\psi\rangle}{dt} = \hat{H} |\psi\rangle \quad (2)$$

โดย $\hbar$ คือค่าคงตัวของพลังค์ (Planck's constant) $\hat{H}$ คือตัวดำเนินการฮามิลโทเนียน (Hamiltonian operator)

สมมุติฐานข้อที่ 4 การวัดทางควอนตัมจะอธิบายได้ด้วยเซตของตัวดำเนินการการวัด $\{M_m\}$ (measurement operator) ตัวดำเนินการเหล่านี้กระทำบนปริภูมิสถานะของระบบที่กำลังวัด ครรชน m คือผลลัพธ์ต่าง ๆ ที่ได้จากการวัด ถ้าสถานะของระบบควอนตัมก่อนการวัดอธิบายได้ด้วยสถานะ $|\psi\rangle$ ความน่าจะเป็นที่จะได้ผลจากการวัด m สามารถเขียนได้ดังนี้

$$p(m) = \langle \psi | M_m^\dagger M_m | \psi \rangle \quad (3)$$

และสถานะของระบบหลังจากการวัดคือ

$$|\psi'\rangle = \frac{M_m |\psi\rangle}{\sqrt{\langle\psi|M_m^\dagger M_m|\psi\rangle}} \quad (4)$$

ตัวดำเนินการวัดสอดคล้องกับสมการความสมบูรณ์ (completeness equation) ดังนี้

$$\sum_m M_m^\dagger M_m = I \quad (5)$$

สมการความสมบูรณ์จะอธิบายว่าผลรวมของความน่าจะเป็นจะเท่ากับ 1 ดังนี้

$$1 = \sum_m p(m) = \sum_m \langle\psi|M_m^\dagger M_m|\psi\rangle \quad (6)$$

สมมุติฐานข้อที่ 5 ปริภูมิสถานะของระบบทางกายภาพที่ประกอบขึ้นจากหลายส่วน (composite physical system) เป็นผลคูณเทนเซอร์ของปริภูมิสถานะของระบบทางกายภาพที่ประกอบกันขึ้น ถ้าเรามีระบบตั้งแต่ 1 ถึง n และ ระบบที่ i อธิบายได้ด้วยสถานะ $|\psi_i\rangle$ แล้วสถานะร่วม (joint state) ของระบบทั้งหมด (total system) คือ $|\psi_1\rangle \otimes |\psi_2\rangle \otimes \dots \otimes |\psi_n\rangle$ (Niesen and Chuang 2000)

สถานะโพลาไรเซชันของโฟตอน

พิจารณาแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามแบบของแมกซ์เวลล์ โดยมีการสั่นของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ความถี่เท่ากัน เคลื่อนที่ในทิศทางตามแนวแกน z และเป็นโพลาไรซ์เชิงเส้นตรงมีทิศทางของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน x เมื่อ λ คือความยาวคลื่น $E_{0,x}$ คือแอมพลิจูดสูงสุด และ ϕ_0 เป็นค่าคงที่ของเฟส สนามไฟฟ้าสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$E(z,t) = E_{0,x} \sin(\omega t - kz + \phi_0) \quad (7)$$

สนามแม่เหล็กของแสงจะสั่นเหมือนกับสนามไฟฟ้าแต่เวกเตอร์สนามแม่เหล็ก $\vec{H}$ จะทำมุมตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าในทิศทางตามแนวแกน y ซึ่งสนามแม่เหล็กมีค่าเป็น

$$H(z,t) = H_{0,y} \sin(\omega t - kz + \phi_0) \quad (8)$$

จากหลักการพื้นฐานของคลื่นแสงธรรมชาตินี้ จะพิจารณาในส่วนที่เกี่ยวข้องกับโพลาไรเซชันของแสง ซึ่งในการจำแนกชนิดของโพลาไรเซชันจะพิจารณาความสัมพันธ์ทางเฟส (ϕ_0) ของทิศทาง x และ y และเปรียบเทียบขนาด E_x และ E_y ซึ่งสามารถจำแนกชนิดของแสงโพลาไรซ์ได้ดังนี้ คือ แสงโพลาไรซ์เชิงเส้นตรง (linear polarized light) แสงโพลาไรซ์เชิงวงกลม (circular polarized light) แสงโพลาไรซ์เชิงวงรี (elliptical polarized light)

แสงโพลาไรซ์เชิงเส้นตรง

ในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะสนามไฟฟ้าของแสงเท่านั้น เนื่องจากสนามไฟฟ้ามีผลกระทบต่อโมเลกุลต่าง ๆ มากกว่าสนามแม่เหล็ก และโพลาไรเซชันเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเฉพาะคลื่นตามขวางเท่านั้น ดังนั้นคลื่นแสงที่เคลื่อนที่ตามแนวแกน z จะสามารถแสดงเป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นตรงที่มีทิศทางตามแนวแกน x ได้ดังสมการ

$$\vec{E}_x = E_{0x} \sin(\omega t - kz + \phi_0) \hat{i} \quad (9)$$

เมื่อ $E_{0,x}$ คือแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้า และ $\hat{i}$ เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยตามแนวแกน x ในทำนองเดียวกัน แสงโพลาไรซ์เชิงเส้นตรงที่มีทิศทางตามแนวแกน y สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$\vec{E}_y = E_{0y} \sin(\omega t - kz + \phi_0) \hat{j} \quad (10)$$

เมื่อ $\hat{j}$ เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยตามแนวแกน y สนามไฟฟ้าของแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นตรงจะอยู่ในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่โดยสามารถแสดงในรูปของผลรวมของเวกเตอร์ $\vec{E}_x$ และ $\vec{E}_y$ ได้ดังสมการ

$$\begin{aligned} \vec{E} &= \vec{E}_x + \vec{E}_y \\ &= (E_{0x} \hat{i} + E_{0y} \hat{j}) \sin(\omega t - kz + \phi_0) \end{aligned} \quad (11)$$

แสงโพลาไรซ์เชิงวงกลม

กรณีที่แอมพลิจูดของคลื่นมีส่วนประกอบของแกนตั้งฉากทั้งสองเท่ากัน กล่าวคือ $E_{0x} = E_{0y} = E_0$ และมีเฟสต่างกัน 90 องศา เราสามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ของคลื่นได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\bar{E}_{rcp} &= E_0[\sin(\omega t - kz + \phi_0)\hat{i} + \sin(\omega t - kz + \phi_0 + \pi/2)\hat{j}] \\ &= E_0[\sin(\omega t - kz + \phi_0)\hat{i} + \cos(\omega t - kz + \phi_0)\hat{j}]\end{aligned}\quad (12)$$

หรือ

$$\begin{aligned}\bar{E}_{lcp} &= E_0[\sin(\omega t - kz + \phi_0)\hat{i} + \sin(\omega t - kz + \phi_0 - \pi/2)\hat{j}] \\ &= E_0[\sin(\omega t - kz + \phi_0)\hat{i} - \cos(\omega t - kz + \phi_0)\hat{j}]\end{aligned}\quad (13)$$

จากสมการที่ (12) ณ ตำแหน่ง $z = 0, \omega t = -\phi_0$ เวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าจะมีทิศตามแนวแกน $+y$ หลังจากนั้นขนาดเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน y จะค่อย ๆ ลดลง และเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน x จะมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่ง $\omega t = 90^\circ - \phi_0$ เวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน $+x$ พิจารณาช่วงเวลาหนึ่งจะได้ว่าสนามไฟฟ้าหมุนเป็นวงกลมมีทิศตามเข็มนาฬิกา และเวกเตอร์ $\bar{E}$ จะหมุนไปครอบรอบโดยแสงจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าเท่ากับความเร็วหนึ่งช่วงคลื่น เรียกแสงที่มีสถานะโพลาไรเซชันเช่นนี้ว่า แสงโพลาไรซ์เชิงวงกลมวนขวา (right circular polarization; *rcp*) ในทำนองเดียวกันถ้า $\bar{E}_x$ นำ $\bar{E}_y$ อยู่ 90 องศา สนามไฟฟ้าจะหมุนทวนเข็มนาฬิกา และเรียกแสงที่มีสถานะโพลาไรเซชันเช่นนี้ว่า แสงโพลาไรซ์เชิงวงกลมวนซ้าย (left circular polarization; *lcp*)

แสงโพลาไรซ์เชิงวงรี

จากการพิจารณาแสงโพลาไรซ์ชนิดต่าง ๆ พบว่าการรวมกันของส่วนประกอบของแสงโพลาไรซ์ที่มีเฟสเหมือนกันหรือต่างกัน 180 องศา แสงโพลาไรซ์จะเป็นชนิดเชิงเส้นตรง แต่กรณีที่มีเฟสต่างกัน 90 องศา และมีแอมพลิจูดเท่ากัน จะเป็นแสงโพลาไรซ์เชิงวงกลม แต่ถ้ากรณีที่มีแอมพลิจูดไม่เท่ากันเราจะเรียกแสงที่มีสถานะโพลาไรเซชันเช่นนี้ว่า แสงโพลาไรซ์เชิงวงรี สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\bar{E} = E_{0x} \sin(\omega t - kz + \phi_0)\hat{i} + E_{0y} \sin(\omega t - kz + \phi_0)\hat{j} \quad (14)$$

เมื่อ ϕ คือเฟสของสนามไฟฟ้าในส่วนประกอบแกน y ที่นำหน้าส่วนประกอบแกน x โดยที่ $\phi = +\pi/2$ สนามไฟฟ้าจะเคลื่อนที่เป็นวงรีวนขวา หรือ $\phi = -\pi/2$ สนามไฟฟ้าจะเคลื่อนที่เป็นวงรีวนซ้าย (Kliger *et al.*, 1990)

ในกรณีของโฟตอนเดี่ยว (single photon) ที่ไม่มีสนามไฟฟ้า ซึ่งเราสามารถอธิบายด้วยวิธีการดังกล่าวข้างต้น เนื่องจากเรามีเพียงโฟตอนตัวเดียว แต่โฟตอนตัวเดียวนี้นี้จะต้องมีความสมนัยกับปรากฏการณ์เชิงคลาสสิกของโพลาริเซชัน ดังนั้นอย่างน้อยจะต้องมีโฟตอนสองชนิดที่แตกต่างกัน เราอาจจะคิดว่าโฟตอนควรจะมากมายหลายชนิด และเวกเตอร์ไฟฟ้าสามารถชี้ไปในทิศทางต่าง ๆ เหล่านั้นอย่างไรก็ตาม เราสามารถอธิบายโพลาริเซชันของโฟตอนเดี่ยวได้ เช่นเดียวกับระบบสองสถานะ โฟตอนสามารถอยู่ในสถานะ $|H\rangle$ หรือสถานะ $|V\rangle$ โดย $|H\rangle$ หมายถึงสถานะโพลาริเซชันของแต่ละโฟตอนในลำแสงซึ่งในทางคลาสสิกเป็นแสงโพลาริเซชันในแนวระดับ และ $|V\rangle$ หมายถึงสถานะโพลาริเซชันของแต่ละโฟตอนลำแสงโพลาริเซชันแนวตั้ง และเราสามารถให้สถานะ $|H\rangle$ และ $|V\rangle$ เป็นสถานะฐานของโฟตอนเดี่ยวที่มีโมเมนตัมในทิศทางเข้าหาเรา ซึ่งโดยทั่วไปจะกำหนดให้เป็นแนวแกน z ดังนั้นจะมีเพียง 2 สถานะพื้นฐาน $|H\rangle$ และ $|V\rangle$ ที่จำเป็นในการบรรยายถึงโฟตอนทุกชนิด (Feynman *et al.*, 1996)

การพัวพันของสถานะบริสุทธิ์

สมมติว่าเรามีระบบทางควอนตัมสองระบบ ระบบแรกเรียกว่า อลิส (Alice) และระบบที่สองเรียกว่า บ๊อบ (Bob) สถานะของอลิสอาจจะอธิบายด้วยปริภูมิ ฮิลเบิร์ต H_A ของมิติ d_A และสถานะของบ๊อบอาจจะอธิบายด้วยปริภูมิ ฮิลเบิร์ต H_B ของมิติ d_B ระบบที่เกิดขึ้นจากระบบทั้งสองจะมีขนาด $d_A \otimes d_B$ สามารถอธิบายด้วยผลคูณเทนเซอร์ดังนี้

$$|\psi\rangle = \sum_{i,j=1}^{d_A, d_B} c_{ij} |a_i\rangle \otimes |b_j\rangle \in H_A \otimes H_B \quad (15)$$

c_{ij} เป็นสัมประสิทธิ์เชิงซ้อนเพื่อให้รูปแบบสัญกรณ์ง่ายขึ้นเราจะเขียนผลคูณเทนเซอร์ของเวกเตอร์ด้วย $|a\rangle \otimes |b\rangle$ เป็น $|a\rangle|b\rangle$ หรือ $|ab\rangle$

นิยามที่ 1 สถานะบริสุทธิ์ $|\psi\rangle \in H$ จะเรียกว่าสถานะผลคูณ (product state) หรือสถานะที่แยกออกจากกันได้ (separable) ถ้าเราสามารถพบสถานะ $|\phi^A\rangle \in H_A$ และ $|\phi^B\rangle \in H_B$ ที่ทำให้

$$|\psi\rangle = |\phi^A\rangle \otimes |\phi^B\rangle \quad (16)$$

สถานะ $|\psi\rangle$ ที่ไม่เป็นไปตามเงื่อนไขของสมการ (16) จะเรียกว่าสถานะพัวพัน

โดยทางกายภาพนิยามของสถานะผลคูณหมายถึงสถานะที่ไม่มีสหสัมพันธ์กัน (uncorrelation) สถานะผลคูณสามารถเตรียมขึ้นได้ในทางเฉพาะที่ โอลิสสร้างสถานะ $|\phi^A\rangle$ และ บ็อบสร้างสถานะ $|\phi^B\rangle$ และไม่ขึ้นกับโอลิส ถ้าโอลิสวัดปริมาณที่สังเกตได้ (observable) A และ บ็อบวัดปริมาณที่สังเกตได้ B แล้วความน่าจะเป็นของผลที่แตกต่างจะสามารถแยกเป็นตัวประกอบได้ด้วยเหตุนี้ ผลจากการวัดของโอลิส จะไม่ขึ้นกับผลการวัดของบ็อบ

ก่อนที่จะนิยามความพัวพันของสถานะผสมเราควรจะกล่าวถึงเครื่องมือที่จะนำมาใช้อธิบายความพัวพันของระบบที่สามารถแยกออกเป็นสองส่วนได้ (bipartite systems) เครื่องมือนั้นก็คือ การจำแนกของชมิตต์ (Schmidt decomposition)

นิยามที่ 2 กำหนด $|\psi\rangle = \sum_{i,j=1}^{d_A, d_B} c_{ij} |a_i b_j\rangle \in H_A \otimes H_B$ คือเวกเตอร์ในผลคูณเทนเซอร์ของสองปริภูมิฮิลเบิร์ต แล้วมีเวกเตอร์ฐานเชิงตั้งฉาก $|\alpha_i\rangle$ ของ H_A และเวกเตอร์ฐานเชิงตั้งฉาก $|\beta_j\rangle$ ของ H_B โดยที่ $|\psi\rangle$ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$|\psi\rangle = \sum_{k=1}^R \lambda_k |\alpha_k \beta_k\rangle \quad (17)$$

สัมประสิทธิ์ λ_k เป็นจำนวนจริงบวก โดยที่ λ_k คำนวณได้จากค่ารากที่สองของค่าเฉพาะ (eigenvalues) ของเมทริกซ์ $CC^\dagger$ โดยที่ $C = (c_{ij})$ เป็นเมทริกซ์ที่เกิดจากสัมประสิทธิ์ในสมการ (15) จำนวน $R \leq \min\{d_A, d_B\}$ เรียกว่าค่าลำดับชั้นชมิตต์ (Schmidt rank) ของ $|\psi\rangle$ ถ้า λ_k มี 2 ค่าที่แตกต่างกัน ดังนั้น $|\alpha_k\rangle$ และ $|\beta_k\rangle$ จะเป็นสถานะเดียวกันโดยอาจจะมีการเฟสที่ต่างกัน

ข้อสังเกตสถานะผลคูณของสถานะบริสุทธิ์ จะสมนัยกับสถานะต่าง ๆ ของค่าลำดับชั้นชมิตต์ที่มีค่าลำดับชั้นเท่ากับหนึ่ง เพราะฉะนั้นการจำแนกของชมิตต์สามารถใช้พิจารณาว่าสถานะบริสุทธิ์เป็นสถานะที่พัวพันกันหรือเป็นสถานะที่แยกออกจากกันได้

ตัวอย่าง ในกรณีการจำแนกของชมิตต์ที่ประกอบด้วย 2 พจน์ นั่นคือมีสัมประสิทธิ์ของชมิตต์คือ λ_1 และ λ_2 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าสถานะ $|\psi\rangle$ จะเป็นสถานะผลคูณสำหรับกรณี $\lambda_1 = 0$ และ $\lambda_2 = 1$ หรือกรณี $\lambda_1 = 1$ และ $\lambda_2 = 0$ สถานะ $|\psi\rangle$ ที่มีสัมประสิทธิ์ชมิตต์

$\lambda_1 = \lambda_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}$ จะเป็นสถานะพัวพันกันมากที่สุด (maximally entangled mixed state) โดยที่สถานะ $|\alpha_k\rangle \in \{|H\rangle, |V\rangle\}$ และสถานะ $|\beta_k\rangle \in \{|H\rangle, |V\rangle\}$ โดย $|H\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ และ $|V\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ ดังนั้นสถานะพัวพันกันมากที่สุด ก็คือ สถานะเบลล์นั่นเอง

$$|\psi^\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|HV\rangle \pm |VH\rangle) \quad (18)$$

$$|\phi^\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|VV\rangle \pm |HH\rangle) \quad (19)$$

การพัวพันของสถานะผสม

โดยทั่วไปเราจะไม่ทราบสถานะที่แน่นอนของระบบเชิงควอนตัม สิ่งที่เราทราบก็คือสถานะเชิงควอนตัมของระบบมีความน่าจะเป็น (p_i) ที่จะเป็น สถานะ $|\phi_i\rangle \in H$ สถานการณ์เช่นนี้เราจะอธิบายด้วยเมทริกซ์ความหนาแน่น (density matrix)

$$\rho = \sum_i p_i |\phi_i\rangle\langle\phi_i| \quad \text{โดยที่} \quad \sum_i p_i = 1 \quad \text{และ} \quad p_i \geq 0 \quad (20)$$

ในการให้เวกเตอร์ฐานอยู่ในรูปของเมทริกซ์ความหนาแน่นแบบนี้หรือสถานะถูกแสดงด้วยเมทริกซ์เชิงซ้อน เมทริกซ์นี้เป็นเซมิเดฟิไนทีฟเชิงบวก (positive semidefinite) และ เฮอร์มิเทียน (hermitian) กล่าวคือ เมทริกซ์เฮอร์มิเทียน M จะเรียกว่าเซมิเดฟิไนทีฟเชิงบวก ถ้าค่าเฉพาะจะไม่ติดลบ นั่นคือ $M \geq 0$ ถ้า $\langle\psi|M|\psi\rangle \geq 0$ สำหรับทุก ๆ $|\psi\rangle$ ทุก ๆ ตัวดำเนินการ $|\phi_i\rangle\langle\phi_i|$ เป็นบวกและเฮอร์มิเทียน เงื่อนไขเพียงพอบน p_i และ $\text{Tr}(\rho) = 1$ ในทางกลับกัน ทุก ๆ เมทริกซ์เซมิเดฟิไนทีฟเชิงบวก ของ $\text{Tr}(\rho) = 1$ สามารถถูกอธิบายเช่นเดียวกับเมทริกซ์ความหนาแน่นของบางสถานะ สิ่งนี้คือหนทางที่นำไปสู่ภาพเรขาคณิตของเซตของทุก ๆ สถานะเช่นเดียวกับเซตคอนเวกซ์ (convex set) วิธีนี้ซึ่งสอดคล้องสถานะ ρ_1 และ ρ_2 คือผลรวมคอนเวกซ์ $\rho = \alpha\rho_1 + (1-\alpha)\rho_2$ ด้วย $\alpha \in [0,1]$ เป็นสถานะใหม่ นี่คือการสมบัติที่ถูกควบคุม สำหรับผลรวมระบบของสถานะที่มากกว่าสองสถานะ ให้บาง $p_i \geq 0$ ด้วย $\sum_i p_i = 1$ เมื่อผลรวมคอนเวกซ์ $\sum_i p_i \rho_i$ ของบางสถานะเป็นสถานะใหม่ เราเรียกสมบัติที่ $p_i \geq 0$ ด้วยสมบัติ $\sum_i p_i = 1$ ว่าค่าน้ำหนักคอนเวกซ์ (convex weights)

เราสามารถนิยามความพัวพันและลักษณะที่อนุภาคแยกออกจากกันได้สำหรับสถานะผสม ซึ่งสอดคล้องตามเอกสารอ้างอิง (Werner 1989) ซึ่งมีความคิดเช่นเดียวกับกรณีของสถานะบริสุทธิ์ สถานะจะแยกออกจากกันได้ ถ้าสถานะเหล่านั้นสามารถสร้างขึ้นเฉพาะที่ นอกเหนือจากนั้นจะเป็น สถานะพัวพัน

นิยามที่ 3 ให้ ρ คือเมทริกซ์ความหนาแน่น สำหรับระบบผสมเราจะเรียก ρ ว่าเป็นสถานะ ผลคูณ (product state) ถ้าสถานะ ρ^A คือออลิสและ ρ^B คือบ็อบดังนี้

$$\rho = \rho^A \otimes \rho^B \quad (21)$$

สถานะที่แยกออกจากกันได้ถ้า p_i และ $\rho_i^A \otimes \rho_i^B$ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\rho = \sum_i p_i \rho_i^A \otimes \rho_i^B \quad (22)$$

สถานะที่ไม่เป็นไปตามเงื่อนไขของสมการที่ (22) เราเรียกสถานะเหล่านั้นว่าสถานะพัวพัน

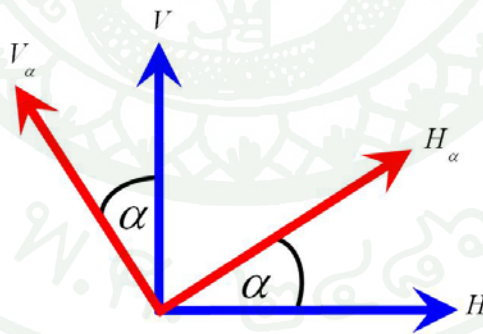
ทางกายภาพ นิยามเหล่านี้แสดงให้เห็นความแตกต่างระหว่างสามสถานะ สถานะแรกคือ สถานะผลคูณ เป็นสถานะที่ไม่มีสหสัมพันธ์โดยที่ออลิสและบ็อบมีสถานะที่แยกออกจากกันได้ สำหรับสถานะที่ไม่เป็นผลคูณ (non-product state) นี้คือข้อแตกต่างของสหสัมพันธ์ทั้งสองชนิด สถานะที่แยกออกจากกันได้เป็นสหสัมพันธ์เชิงคลาสสิก หมายความว่า ผลคูณของสถานะที่แยก ออกจากกันได้จำเป็นกับการดำเนินการเฉพาะที่ และการสื่อสารเชิงคลาสสิก (local operation and classical communication; LOCC) เท่านั้น ซึ่งออลิสและบ็อบสามารถรวมกันขึ้นจากเครื่องสุ่มตัวเลข (random number generator) ได้ผลลัพธ์แต่ละ i ด้วยความน่าจะเป็น p_i สำหรับแต่ละผลลัพธ์ซึ่งเรา สามารถสร้างสถานะ $\rho_i^A \otimes \rho_i^B$ เฉพาะที่ โดยขั้นตอนในการสร้างสถานะ $\rho = \sum_i p_i \rho_i^A \otimes \rho_i^B$ เปรียบวิธีการนี้ไม่เฉพาะเจาะจงสำหรับทฤษฎีควอนตัม ซึ่งได้แสดงหลักฐานความคิดของ สหสัมพันธ์เชิงคลาสสิกในทางตรงกันข้ามถ้าเป็นสถานะพัวพันกัน สหสัมพันธ์ไม่สามารถสร้างขึ้น ได้ด้วยวิธีการเชิงคลาสสิกดังที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น ในความหมายของสถานะพัวพันเป็น ลักษณะเฉพาะของกลศาสตร์ควอนตัม

สถานะโพลาไรเซชันพัวพัน

พิจารณาระบบกลศาสตร์ควอนตัมที่ประกอบด้วยสองโฟตอนที่เรียกว่าโฟตอนสัญญาณ (signal) และโฟตอนไอดีเลอร์ (idler) โฟตอนทั้งสองเคลื่อนในทิศทางที่แตกต่างกัน ดังนั้นสามารถระบุได้ว่าโฟตอนทั้งสองเป็นอนุภาคที่แยกออกจากกันได้ (distinguishable particles) สมมติว่าโฟตอนทั้งสองมีสถานะโพลาไรเซชัน ดังนี้

$$|\phi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|V\rangle_s |V\rangle_i - |H\rangle_s |H\rangle_i) \quad (23)$$

เมื่อ $|H\rangle$ และ $|V\rangle$ เป็นสถานะโพลาไรเซชันในแนวระดับและแนวตั้งตามลำดับตัวห้อย s คือสัญลักษณ์ของโฟตอนสัญญาณ ส่วนตัวห้อย i เป็นสัญลักษณ์ของโฟตอนไอดีเลอร์สถานะนี้ไม่สามารถแยกเป็นผลคูณของสถานะของโฟตอนไอดีเลอร์กับสถานะของโฟตอนสัญญาณได้ กล่าวคือไม่มีสถานะ $|A\rangle_s$ และสถานะ $|B\rangle_i$ ที่จะทำให้ $|\phi^+\rangle = |A\rangle_s |B\rangle_i$ ซึ่งการที่สถานะไม่สามารถแยกได้นั้นหมายความว่าสถานะของอนุภาคไม่สามารถชี้เฉพาะเจาะจงได้โดยปราศจากการอ้างอิงสถานะของอีกอนุภาคหนึ่ง ดังนั้นอนุภาคทั้งสองจึงเรียกว่าเป็นอนุภาคพัวพันกันและสถานะ $|\phi^-\rangle$ ตามสมการ (23) คือสถานะพัวพัน (entangled state)



ภาพที่ 1 เวกเตอร์ฐานของตัวทำแสงโพลาไรซ์ที่ทำมุม α กับเวกเตอร์ฐานในแนวระดับ (H) และแนวตั้ง (V)

ถ้าเราวัดโพลาไรเซชันของโฟตอนสัญญาณและโฟตอนไอดีเลอร์ด้วยเวกเตอร์ฐานในแนวระดับ (H) และเวกเตอร์ฐานในแนวตั้ง (V) ผลลัพธ์ที่เป็นไปได้คือสถานะโพลาไรเซชันของโฟตอนทั้งสองเป็นแนวตั้งทั้งคู่หรือเป็นแนวระดับทั้งคู่ซึ่งผลลัพธ์ทั้งสองจะมีความน่าจะเป็นเท่ากัน เรา

สามารถวัดโพลาไรเซชันด้วยตัวทำแสงโพลาไรซ์ที่ทำมุม α ดังภาพที่ 1 ซึ่งเวกเตอร์ฐานของโพลาไรเซชันที่หมุนด้วยมุม α คือ

$$\begin{aligned} |V_\alpha\rangle &= \cos\alpha|V\rangle - \sin\alpha|H\rangle \\ |H_\alpha\rangle &= \sin\alpha|V\rangle + \cos\alpha|H\rangle \end{aligned} \quad (24)$$

เมื่อ $|V_\alpha\rangle$ คือสถานะโพลาไรเซชันที่หมุนไปเป็นมุม α จากแนวตั้งขณะที่ $|H_\alpha\rangle$ คือสถานะโพลาไรเซชันที่หมุนไปเป็นมุม α จากแนวระดับ

ด้วยเวกเตอร์ฐานตามสมการที่ (24) สถานะของโฟตอนทั้งสองจะเป็น

$$|\phi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|V_\alpha\rangle_s |V_\alpha\rangle_i - |H_\alpha\rangle_s |H_\alpha\rangle_i) \quad (25)$$

นั่นคือ ถ้าเราวัดสถานะโพลาไรเซชันของโฟตอนด้วยเวกเตอร์ฐานที่ทำมุม α เราจะได้ผลลัพธ์เช่นเดียวกันกับกรณีของสถานะในสมการ (23) คือมีโอกาสครึ่งหนึ่งที่โฟตอนทั้งสองจะมีสถานะเป็น $|V_\alpha\rangle$ ทั้งคู่ และโอกาสอีกครั้งหนึ่งที่โฟตอนทั้งสองจะมีสถานะเป็น $|H_\alpha\rangle$ ทั้งคู่ ดังนั้นเราสามารถรู้โพลาไรเซชันของโฟตอนไอลเดอร์ด้วยความแน่นอนจากการวัดโพลาไรเซชันของโฟตอนสัญญาณนี้คือสถานการณ์ที่อธิบายโดย EPR แต่จะใช้โพลาไรเซชันพิจารณาแทนตำแหน่งและโมเมนตัม สังเกตว่ามีความสัมพันธ์ของความไม่แน่นอนระหว่างโพลาไรเซชันในเวกเตอร์ฐานที่แตกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่นถ้าเราทราบโพลาไรเซชันของโฟตอนในเวกเตอร์ฐาน V_0, H_0 จะมีความไม่แน่นอนอย่างสมบูรณ์ (complete uncertainty) ของโพลาไรเซชันของโฟตอนในเวกเตอร์ฐาน

V_{45}, H_{45}

กระบวนการแปลงผันลงอิงพารามิเตอร์แบบเกิดขึ้นเอง

กระบวนการแปลงผันลงอิงพารามิเตอร์แบบเกิดขึ้นเองเป็นกระบวนการผันกลับเชิงเวลา (time-reversed process) ของการกำเนิดผลรวมความถี่ (sum-frequency generation; SFG) ใน SFG ลำแสงความถี่ ω_1 และ ω_2 พบกันในผลึกไม่เชิงเส้นซึ่งจะไม่มีผกผัน (inversion) แบบสมมาตร ผลึกจะประพฤติตัวเหมือนกับเป็นตัวสะสมไอออนในบ่อศักย์แบบแอนฮาร์โมนิก (anharmonic potentials) เมื่อป้อนความถี่ทั้ง ω_1 และ ω_2 ไอออนต่าง ๆ จะออสซิลเลตด้วยองค์ประกอบของความถี่หลายค่า รวมไปถึงผลรวมของความถี่ $\omega_1 + \omega_2$ ซึ่งแต่ละไอออนจะแผ่พลังงานด้วยความถี่ที่เท่ากันท่ามกลางความถี่อื่น ๆ การรวมกันของแสงอาพันธ์ (coherent) จากแต่ละไอออนในผลึกนำไปสู่การแทรกสอดแบบเสริมโดยจะมีทิศทางและโพลาไรเซชันที่แน่นอน เงื่อนไขสำหรับการแทรกสอดแบบเสริม เรียกว่าการเข้าคู่เฟส ซึ่งภายในผลึก เวกเตอร์คลื่นของลำแสงส่งออกจะเป็นผลรวมของเวกเตอร์คลื่นของลำแสงรับเข้า ในกระบวนการแปลงผันลงอิงพารามิเตอร์แบบเกิดขึ้นเอง เลเซอร์ลำแสงสีม่วงจะขับ (drives) ผลึกด้วยผลรวมของความถี่ $\omega_1 + \omega_2$ และจะมีการแปลงผันลง (down-converted) ทำให้ได้ลำแสงความถี่ ω_1 และ ω_2 ซึ่งกระบวนการแปลงผันลงอิงพารามิเตอร์แบบเกิดขึ้นเอง ได้นำมาใช้ในการทดสอบอสมการเบลล์ ครั้งแรกในปี 1988 (Ou and Mandel 1988)

กระบวนการแปลงผันลงอิงพารามิเตอร์แบบเกิดขึ้นเอง เป็นปรากฏการณ์ที่ศึกษากันอย่างกว้างขวางในทัศนศาสตร์ไม่เชิงเส้น ซึ่งเป็นกระบวนการที่ผลึกหักเหสองแนว แปลงโฟตอนตกกระทบ (ปั๊มโฟตอน) เป็นสองโฟตอนคือ โฟตอนสัญญาณ และ โฟตอนไอดเลอร์ จากกฎการอนุรักษ์พลังงานจะได้

$$E_p = E_s + E_i \quad (26)$$

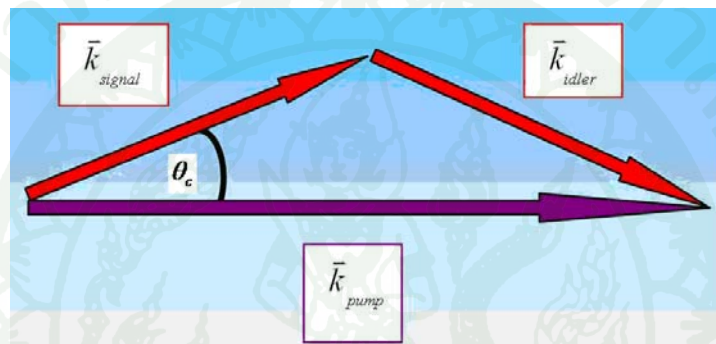
เมื่อ E_p เป็นพลังงานของปั๊มโฟตอน E_s และ E_i เป็นพลังงานของโฟตอนสัญญาณและโฟตอนไอดเลอร์ลำดับ เนื่องจาก $E = \hbar\omega = \hbar kc = hc/\lambda$ ดังนั้นเราสามารถเขียนสมการที่ (26) ได้อีกรูปแบบหนึ่งคือ

$$\omega_p = \omega_s + \omega_i \quad (27ก)$$

$$k_p = k_s + k_i \quad (27\text{ข})$$

$$\frac{1}{\lambda_p} = \frac{1}{\lambda_s} + \frac{1}{\lambda_i} \quad (27\text{ค})$$

เมื่อ ω เป็นความถี่เชิงมุมของแสงโดย $\omega = ck$ เมื่อ c เป็นความเร็วแสง k_p, k_s และ k_i เป็นขนาดของเลขคลื่นในสุญญากาศและ λ คือความยาวคลื่นในสุญญากาศโดยที่ $k = 2\pi/\lambda = \omega/c$ ตัวห้อย p, i และ s หมายถึงปั๊มโฟตอน โฟตอนไอเดิลอร์ และโฟตอนสัญญาณ ตามลำดับ



ภาพที่ 2 ผลการรวมเวกเตอร์คลื่นของโฟตอนปั๊มเมื่อเกิดกระบวนการแปลงพลังงานอินพารามิเตอร์แบบเกิดขึ้นเองไปเป็นโฟตอนสัญญาณและโฟตอนไอเดิลอร์ทำมุมกับโฟตอนปั๊ม θ_c

โมเมนตัมมีความสัมพันธ์กับเวกเตอร์คลื่นคือ $\vec{p} = \hbar \vec{k}$ โดยที่เลขคลื่นภายในผลึกคือ $|\vec{k}| = nk = 2\pi n/\lambda$ เมื่อ n เป็นดัชนีหักเหของผลึก เงื่อนไขของการอนุรักษ์โมเมนตัมภายในผลึกนี้สามารถเขียนในพจน์ของเวกเตอร์คลื่นได้เป็น

$$\vec{k}_p = \vec{k}_s + \vec{k}_i \quad (28)$$

ทิศทางของโฟตอนสัญญาณและโฟตอนไอเดิลอร์จะกำหนดโดยมุมที่กระทำกับแกนเชิงแสงของผลึก และทิศทางของลำแสงปั๊มเนื่องจากเราพิจารณาการแปลงพลังงานในกรณีโฟตอนสัญญาณมีพลังงานเท่ากับโฟตอนไอเดิลอร์นั่นคือ ถ้า θ_c เป็นมุมซึ่งโฟตอนสัญญาณ และ โฟตอนไอเดิลอร์กระทำกับทิศของลำแสงปั๊มภายในผลึก ดังนั้นสมการ (28) จะสามารถเขียนได้เป็น

$$k_s = k_i = k_p/2 \quad (29)$$

และ

$$n_p k_p = 2n_s k_s \cos \theta_c \quad (30)$$

จากสมการที่ (29) เราสามารถเขียนสมการที่ (30) เป็น

$$n_p = n_s \cos \theta_c \quad (31)$$

ความสัมพันธ์ของดัชนีหักเหในสมการ (31) จะไม่จริงในตัวกลางเอกพันธ์เพราะสำหรับการกระจายแสงปกติ ดัชนีหักเหจะลดลงเมื่อความยาวคลื่นเพิ่มขึ้นนั่นคือ $n_p > n_s$ แต่สมการ (31) จะเป็นจริงสำหรับผลึกหักเหสองแนว ในกรณีของผลึก BBO ซึ่งเป็นผลึกไม่เชิงเส้นชนิดแกนเดียวแบบลบ (negative uniaxial crystal) ความสัมพันธ์ของดัชนีหักเหกับมุมเข้าคู่เฟส จะเขียนได้ดังนี้ (Saleh and Teich 1944)

$$\tilde{n}_e(\theta_m) = (\cos^2 \theta_m / n_o^2 + \sin^2 \theta_m / n_e^2)^{-1/2} \quad (32)$$

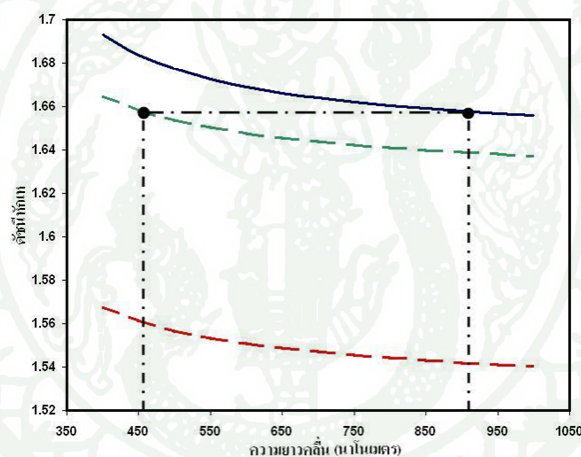
เส้นทึบบนสุดใน ภาพที่ 3 แทนดัชนีหักเหของแสงธรรมดา (n_o) เมื่อโพลาไรเซชันของแสงตกกระทบบ้างจากกับแกนเชิงแสงของผลึก ถ้าโพลาไรเซชันของแสงตกกระทบบนในระนาบเดียวกันกับแกนเชิงแสงจะเป็นดัชนีหักเหของแสงพิเศษ (n_e) ซึ่งขึ้นกับมุมการเข้าคู่เฟส θ_m ที่เป็นมุมระหว่างทิศทางการแผ่ $\vec{k}_p$ กระทำกับแกนเชิง และในกรณีที่ $\theta_m = \pi/2$ จะได้ $n_e = \tilde{n}_e$

จากการที่ดัชนีหักเหที่เป็นฟังก์ชันกับ θ_m ในสมการ (32) เราสามารถปรับดัชนีหักเหของรังสีพิเศษให้มีค่าอยู่ระหว่าง n_o และ n_e ดังกราฟดัชนีหักเหที่แสดงใน ภาพที่ 3 เป็นกรณีของผลึกไม่เชิงเส้นชนิดแกนเดียวแบบลบ ดัชนีหักเหสามารถกำหนดได้ดังนี้

$$n = \left[A + \frac{B}{\lambda^2 + C} + D\lambda^2 \right]^{1/2} \quad (33)$$

เมื่อค่าคงตัวสำหรับ n_o จะเป็น $A_o = 2.7359$, $B_o = 0.01878 \mu m^2$, $C_o = -0.01822 \mu m^2$, $D_o = -0.01354 \mu m^{-2}$ และค่าคงตัวสำหรับ n_e จะเป็น $A_e = 2.3753$, $B_e = 0.01224 \mu m^2$, $C_e = -0.01667 \mu m^2$, $D_e = -0.01516 \mu m^{-2}$ และสำหรับผลึก BBO สามารถคำนวณได้ว่า

$n_0 = 1.658$ ที่ 915.8 นาโนเมตร และ $n_e = 1.542$ ที่ 457.9 นาโนเมตร ภายใต้การเข้าสู่เฟสแบบที่ I โดยปั๊มโฟตอนมีดัชนีหักเหรังสีพิเศษ $\tilde{n}_e(\theta_m)$ และโฟตอนจากการแปลงผันลงมีดัชนีหักเหรังสีธรรมดา สมมติเราต้องการให้โฟตอนทั้งสองที่เกิดการแปลงผันลงเดินทางในแนวเส้นตรงเดียวกัน นั่นคือในสมการ (31) $\theta_c = 0^\circ$ โดยการปรับ $\theta_m = 25.67^\circ$ ลำแสงปั๊มจะมีดัชนีหักเหกำหนดโดยเส้นประในภาพที่ 3 หรือ $n_p = \tilde{n}_e(\theta_m) = 1.658$ ที่ความยาวคลื่น 457.9 นาโนเมตร ถ้าเราต้องการลำแสงสัญญาณเมื่อผ่านผลึกออกมาแล้วทำมุม $\theta_L = 3^\circ$ กับลำแสงปั๊ม เราสามารถใช้กฎของสเนลล์ $\sin \theta_L = n_s \sin \theta_c$ เพื่อคำนวณ θ_c และมุมเข้าสู่เฟส θ_m ซึ่งสอดคล้องกับสมการ (31) สำหรับในกรณีของงานวิจัยนี้การแปลงผันลงของโฟตอนปั๊ม 405 นาโนเมตร ไปเป็นโฟตอนสัญญาณและโฟตอนไอเดิลอร์ที่มีความยาวคลื่นเท่ากันเท่ากับ 810 นาโนเมตร ทำมุม $\theta_L = 0^\circ$ จะได้ $\theta_m = 29.01^\circ$ และถ้า $\theta_m = 29.5^\circ$ จะได้ $\theta_L = 3.8^\circ$



ภาพที่ 3 ดัชนีหักเห ของผลึก BBO สำหรับรังสีธรรมดา (เส้นทึบบน), รังสีพิเศษ (เส้นประล่าง) และรังสีพิเศษที่มีมุมเข้าสู่เฟส $\theta_m = 25.67^\circ$ (เส้นประตรงกลาง)

กราฟดัชนีหักเหของผลึก BBO ที่มีแกนเชิงแสงทำมุมจาก (เส้นทึบบน) และขนาน (เส้นประล่าง) กับแสงโพลาไรเซชันตกกระทบ (เส้นประ) ที่อยู่ตรงกลางระหว่างเส้นทึบบนและเส้นประล่างเป็นเส้นโค้งที่สมนัยกับเงื่อนไขของการเข้าสู่เฟส

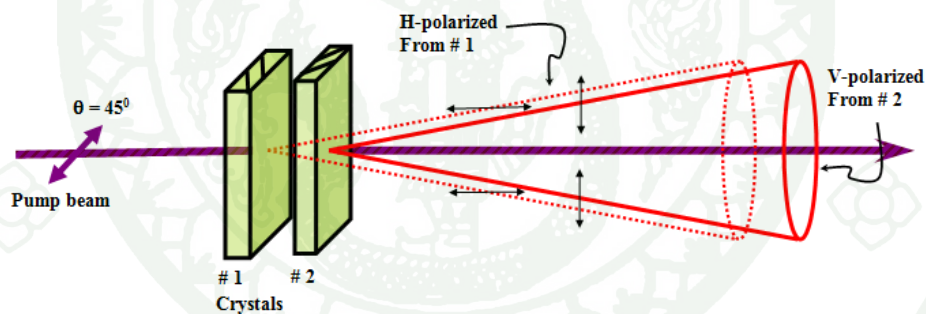
โพลาริเซชัน

ผลึก BBO ถูกตัดสำหรับการเข้าสู่เฟสแบบที่ I หมายความว่าโฟตอนสัญญาณและโฟตอนไอลเดอร์จะมีโพลาริเซชันที่เหมือนกันและตั้งฉากกัน โดยที่ผลึกแต่ละแผ่นจะตอบสนองต่อโพลาริเซชันของโฟตอนปั๊มในแนวแกนเฉพาะแนวแกนหนึ่งเท่านั้น ส่วนโพลาริเซชันในแนวแกนที่ตั้งฉากจะผ่านผลึกโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลง แนวแกนเชิงแสงของผลึกทั้งสองจะทำมุม 90° ต่อกัน ดังนั้นสถานะโพลาริเซชันของโฟตอนปั๊มจะแปลงผันลง (down conversion) ดังสมการ

$$|V\rangle_p \rightarrow |H\rangle_s |H\rangle_i \quad (34)$$

$$|H\rangle_p \rightarrow \exp[i\Delta] |V\rangle_s |V\rangle_i \quad (35)$$

เมื่อ Δ คือความต่างเฟสซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการกระจายของแสง (dispersion) และการหักเหสองแนวของแสง (birefringence) ในผลึกทั้งสอง ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ผลึก 2 ชั้นที่เป็นแหล่งกำเนิดของการแปลงผันลงหนา 0.5 มิลลิเมตร และวางสัมผัสกันแบบหน้าต่อหน้า (face – to – face) ในขณะที่ลำแสงของเลเซอร์ปั๊มมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 มิลลิเมตร ดังนั้นกรวยของแสงที่มีการแปลงผันลงจากผลึกทั้งสองเกือบจะซ้อนทับกันพอดี

ในการสร้างสถานะพัวพัน (entangled state) ประการแรกเราใช้กระจกแยกลำแสงชนิดโพลาริซ์และแผ่นครึ่งคลื่นเพื่อสร้างโพลาริซ์เชิงเส้นของลำแสงเลเซอร์ทำมุม θ_i กับแนวตั้ง ทำให้โฟตอนปั๊มของเลเซอร์มีสถานะคือ

$$|\psi_{pump}\rangle = \cos\theta_i |V\rangle_p + \exp[i\phi_i] \sin\theta_i |H\rangle_p \quad (36)$$

เมื่อโฟตอนปั๊มของเลเซอร์ตกกระทบผลึก BBO ทั้งสอง โฟตอนจะเกิดการแปลงผันลงตามสมการ (34) และ (35) เป็นสถานะ

$$|\psi_{DC}\rangle = \cos\theta_l |H\rangle_s |H\rangle_i + \exp[i\phi] \sin\theta_l |V\rangle_s |V\rangle_i \quad (37)$$

เมื่อ $\phi \equiv \phi_l + \Delta$ คือความต่างเฟสสุทธิ (phase difference) ขององค์ประกอบทั้งสองของโพลาริเซชัน สถานะตามสมการที่ (37) คือสถานะพัวพัน และเป็นสถานะที่สามารถปรับได้ด้วยอุปกรณ์พื้นฐานเชิงแสง ยกตัวอย่างเช่น ถ้า $\theta_l = \pi/4$ และ $\phi = \pi$ เมื่อวางแผ่นครึ่งคลื่นทำมุม 45° กับแนวราบในลำแสงโฟตอนสัญญาณจะสามารถเปลี่ยนโพลาริเซชันของโฟตอนสัญญาณจาก $|H\rangle_s \leftrightarrow |V\rangle_s$ เพื่อผลิตสถานะ $|\psi_{DC}\rangle = (|V\rangle_s |H\rangle_i - |H\rangle_s |V\rangle_i) / \sqrt{2}$ สถานะโพลาริเซชันนี้เป็นสถานะที่สมนัยกับสถานะเดี่ยว (singlet state) สำหรับอนุภาคสปิน 1/2 โดย $|\psi_{singlet}\rangle = (|\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2) / \sqrt{2}$ ในการวัดสถานะโพลาริเซชันของโฟตอนสัญญาณและโฟตอนไอเดิลอร์เราจะวางตัวทำแสงโพลาริซ์ทำมุม α ในเส้นทางของโฟตอนสัญญาณ และตัวทำแสงโพลาริซ์ทำมุม β ในเส้นทางของโฟตอนไอเดิลอร์ที่ผลิตขึ้นในสถานะ $|\psi_{DC}\rangle$ ตามสมการที่ (37) จะมีความน่าจะเป็นในการตรวจพบคู่โฟตอนในเวลาเดียวกัน (coincidence detection) คือ

$$P_{VV}(\alpha, \beta) = \left| \langle V_\alpha |_s \langle V_\beta |_i |\psi_{DC}\rangle \right|^2 \quad (38)$$

ตัวห้อย VV ของความน่าจะเป็น P แสดงให้เห็นถึงการวัดที่มีผลลัพธ์เป็น $V_\alpha V_\beta$ โดยโฟตอนทั้งสองมีโพลาริเซชันในแนวตั้งในเวกเตอร์ฐานของตัวทำแสงโพลาริซ์ทั้งสองตามลำดับ โดยทั่วไปสำหรับคู่ของมุม α, β ของตัวทำแสงโพลาริซ์มีสี่ผลลัพธ์ที่เป็นไปได้คือ $V_\alpha V_\beta, V_\alpha H_\beta, H_\alpha V_\beta$ และ $H_\alpha H_\beta$ ซึ่งจะแทนด้วย VV, VH, HV และ HH ตามลำดับ เมื่อใช้เวกเตอร์ฐานในสมการ (24) จะได้

$$P_{VV}(\alpha, \beta) = |\sin\alpha \sin\beta \cos\theta_l + \exp[i\phi] \cos\alpha \cos\beta \sin\theta_l|^2 \quad (39)$$

หรือ

$$P_{VV}(\alpha, \beta) = \sin^2\alpha \sin^2\beta \cos^2\theta_l + \cos^2\alpha \cos^2\beta \sin^2\theta_l + \frac{1}{4} \sin 2\alpha \sin 2\beta \sin 2\theta_l \cos\phi \quad (40)$$

เมื่อ $\theta_l = \pi/4$ และ $\phi=0$ เป็นกรณีพิเศษที่ $|\psi_{DC}\rangle = |\phi^-\rangle$ ในกรณีนี้จะได้

$$P_{VV}(\alpha, \beta) = \frac{1}{2} \cos^2(\beta - \alpha), \quad (41)$$

ซึ่งค่านี้จะขึ้นกับมุมสัมพัทธ์ $\beta - \alpha$ เท่านั้น

พจน์สุดท้ายในสมการที่ (40) ที่แสดงถึงการแทรกสอดระหว่าง H, H และ V, V ของส่วนต่าง ๆ ของสถานะ

ค่าของ ϕ ในพจน์นี้ขึ้นกับ Δ จะเป็นฟังก์ชันที่ซับซ้อนของความยาวคลื่นของโฟตอนปั๊ม ความยาวคลื่นของโฟตอนสัญญาณ และมุมของโฟตอนสัญญาณรวมไปถึงลักษณะของผลึกเนื่องจากเลเซอร์มีความกว้างของเส้นสเปกตรัมจำกัด (finite linewidth) และเราวัดโฟตอนภายในมุมตันที่จำกัดของความยาวคลื่นดังนั้นเราจึงพิจารณาได้เฉพาะช่วงของ ϕ ด้วยเหตุผลต่าง ๆ เหล่านี้จะแทน $\cos \phi$ ด้วยค่าเฉลี่ย $\langle \cos \phi \rangle = \cos \phi_m$ และเขียนสมการ (40) ได้เป็น

$$P_{VV}(\alpha, \beta) = \sin^2 \alpha \sin^2 \beta \cos^2 \theta_l + \cos^2 \alpha \cos^2 \beta \sin^2 \theta_l + \frac{1}{4} \sin 2\alpha \sin 2\beta \sin 2\theta_l \cos \phi_m \quad (42)$$

ในการทดลองจะกำหนดช่วงเวลาในการเก็บข้อมูล (โดยทั่วไปจะอยู่ในช่วง 0.5-15 วินาที) และในระหว่างช่วงเวลานี้จะบันทึกจำนวนอัตราการนับคู่โฟตอนในเวลาเดียวกัน $N(\alpha, \beta)$ สมมติว่าพลั๊กซ์ของคู่โฟตอนนี้มีค่าคงตัว จำนวนของคู่โฟตอนที่มาถึงตัวตรวจหาโฟตอนเดี่ยวแต่ละตัวในเวลาเดียวกัน จะเป็น

$$N(\alpha, \beta) = A(\sin^2 \alpha \sin^2 \beta \cos^2 \theta_l + \cos^2 \alpha \cos^2 \beta \sin^2 \theta_l + \frac{1}{4} \sin 2\alpha \sin 2\beta \sin 2\theta_l \cos \phi_m) + C \quad (43)$$

เมื่อ A คือจำนวนทั้งหมดของคู่โฟตอนที่พัวพันกัน และ C คือค่าออฟเซต (offset) เพื่อชดเชยความไม่สมบูรณ์ (imperfection) ของตัวทำแสงโพลาไรซ์และการวางแนวของผลึกทั้งสอง

ค่าออฟเซตนี้มีความจำเป็นที่จะต้องนำมาพิจารณาเนื่องจาก จะมีอัตราการนับคู่โฟตอนในเวลาเดียวกัน แม้ว่าจะตั้งค่ามุมของตัวทำแสงโพลาไรซ์ให้ตั้งฉากกัน นั่นคือ $\alpha=0^\circ, \beta=90^\circ$ ก็ตาม

การปรับสถานะ

ในการสร้างสถานะ $|\phi^-\rangle$ เราจะต้องปรับพารามิเตอร์ที่เป็นตัวกำหนดโพลาไรเซชันของเลเซอร์ ขั้นแรกปรับ θ_i ให้อัตราการนับคู่โฟตอนในเวลาเดียวกัน $N(0^\circ, 0^\circ)$ และ $N(90^\circ, 90^\circ)$ มีค่าเท่ากัน ต่อมาปรับ ϕ_i โดยการปรับมุมและบิดแผ่นกึ่งวอลคันและแผ่นครึ่งคลื่นรอบแกนในแนวตั้งเพื่อชดเชยความเร็วเฟสของคู่โฟตอนทั้งสองสถานะให้มีความเร็วเท่ากันแล้วจะได้ $N(45^\circ, 45^\circ)$ มีค่ามากที่สุด การปรับสถานะ $N(45^\circ, 45^\circ)$ ให้มีค่ามากที่สุดโดยทั่วไปจะได้จำนวนโฟตอนประมาณ 200-300 โฟตอนต่อการปรับมุมในแต่ละครั้ง ซึ่งจะใช้เวลาในการเก็บข้อมูลประมาณ 2-3 นาที

การทำให้สถานะพัวพันกันมีความบริสุทธิ์สามารถหาได้โดยการวัด $N(0^\circ, 0^\circ), N(90^\circ, 90^\circ), N(45^\circ, 45^\circ)$ และ $N(0^\circ, 90^\circ)$ โดยใช้แบบจำลองในสมการ (43) จะได้

$$C = N(0^\circ, 90^\circ), \quad (44)$$

$$A = N(0^\circ, 0^\circ) + N(90^\circ, 90^\circ) - 2C, \quad (45)$$

$$\tan^2 \theta_i = \frac{N(90^\circ, 90^\circ) - C}{N(0^\circ, 0^\circ) - C} \quad (46)$$

$$\cos \phi_m = \frac{1}{\sin 2\theta_i} \left(4 \frac{N(45^\circ, 45^\circ) - C}{A} - 1 \right) \quad (47)$$

อนุภาคที่พัวพันกันและการวัดทางควอนตัม

ข้อคิดเห็นของไอน์สไตน์ต่อการบรรยายของบอร์ ไอน์สไตน์สังเกตว่ากลศาสตร์ควอนตัมยินยอมให้การวัดของอนุภาคหนึ่งมีอิทธิพลต่อสถานะของอีกอนุภาคหนึ่ง ยกตัวอย่างเช่นอิทธิพลที่ส่งผลต่อโพลาไรเซชัน พิจารณาสถานะ $|\phi^-\rangle$ จากสมการ (25) ถ้าวัดโฟตอนสัญญาณด้วยตัวทำ

แสงโพลาไรซ์ที่ดัดมุมเป็น α ผลลัพธ์จะเป็น H_α หรือ V_α จำนวนเท่า ๆ กันในการตีความแบบโคเปนเฮเกน (Copenhagen interpretation) การวัดจะทำให้สถานะเกิดการยุบในขณะที่ทำการวัดจากสถานะ $|\phi^-\rangle$ ไปสู่สถานะ $|V_\alpha\rangle_s |V_\alpha\rangle_i$ หรือ $|H_\alpha\rangle_s |H_\alpha\rangle_i$ แต่การเลือกมุม α ไม่ได้เป็นตัวกำหนดสถานะของโฟตอนไอเดิลอร์ ผลลัพธ์ (แบบสุ่ม) จากการวัดโฟตอนสัญญาณจะเป็นการกำหนดสถานะโฟตอนไอเดิลอร์ว่าจะเป็นสถานะ $|V_\alpha\rangle_i$ หรือ $|H_\alpha\rangle_i$ ทั้ง ๆ ที่มีความสุ่มก็ตาม การเลือกมุม α จะเป็นการกำหนดสถานะโพลาไรเซชันของโฟตอนไอเดิลอร์ในเวกเตอร์ฐาน $|V_\alpha\rangle_i, |H_\alpha\rangle_i$ ซึ่งสถานะโพลาไรเซชันของโฟตอนไอเดิลอร์ไม่ได้เกิดขึ้นก่อนการวัด

กระบวนการที่อธิบายดังกล่าวเกิดขึ้นไม่เฉพาะที่ (nonlocal) สถานะจะเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดถึงแม้ว่าอนุภาคจะอยู่ไกลกันมาก อันตรกิริยาที่เกิดแบบทันทีทันใดที่ระยะไกลนั้นจะเป็นไปไม่ได้ตามทฤษฎีสัมพัทธภาพ หรือกล่าวอีกอย่างหนึ่งก็คืออันตรกิริยาที่เกิดขึ้นจะนำไปสู่ข้อขัดแย้งเกี่ยวกับการส่งข้อมูลก่อนกำหนดเวลา (earlier times) ในกรณีนี้ความสุ่มทางกลศาสตร์ควอนตัมจะทำให้ข้อขัดแย้งที่เกิดขึ้นหายไป การวัดที่กระทำบนโฟตอนสัญญาณจะส่งผลต่อสถานะของโฟตอนไอเดิลอร์จะไม่สามารถสังเกตได้จากการวัดโฟตอนไอเดิลอร์เพียงลำพัง ภายหลังจากการวัดโฟตอนสัญญาณ โฟตอนไอเดิลอร์มีโอกาสเท่า ๆ กันที่จะอยู่ในสถานะ V_α หรือ H_α การวัดโพลาไรเซชันของโฟตอนไอเดิลอร์ด้วยมุม β จะได้ V_β ด้วยความน่าจะเป็น

$$\begin{aligned} P_V(\beta) &= \frac{1}{2} |\langle V_\beta | V_\alpha \rangle|^2 + \frac{1}{2} |\langle H_\beta | H_\alpha \rangle|^2 \\ &= \frac{1}{2} [\cos^2(\beta - \alpha) + \sin^2(\beta - \alpha)] \\ &= \frac{1}{2} \end{aligned} \quad (48)$$

การวัดนี้ไม่ได้ให้ข้อมูลเกี่ยวกับตัวเลือกของมุม α นั่นคือจะมีความน่าจะเป็นเท่ากันนี้ ($P_V(\beta) = 1/2$) ในการพบโฟตอนไอเดิลอร์ในสถานะ V_β ถึงแม้ว่าจะยังไม่ได้วัดโฟตอนสัญญาณ

ดังนั้นกลศาสตร์ควอนตัม (ในการตีความแบบโคเปนเฮเกน) จะตรงกันกับสาเหตุเชิงสัมพัทธภาพ (relativistic causality) นั่นคือ อนุภาคมีอิทธิพลต่อกันแบบไม่เฉพาะที่ (nonlocality) และ ความสุ่มของธรรมชาติทำให้เราไม่สามารถส่งข้อมูลไปก่อนกำหนดเวลา

ทฤษฎีตัวแปรแฝงที่เป็นจริงเฉพาะที่

ไอน์สไตน์เชื่อว่ามีทฤษฎีซึ่งสามารถมาใช้แทนกลศาสตร์ควอนตัมซึ่งเป็นทฤษฎีที่สมบูรณ์ และมีเฉพาะอันตรกิริยาเฉพาะที่ (local interactions) เท่านั้น ทฤษฎีนั้นก็คือทฤษฎีตัวแปรแฝงที่เป็นจริงเฉพาะที่ (local realistic hidden variable theory; HVT) ชื่อของทฤษฎีจะเข้าใจได้ในภายหลัง ทฤษฎีเหล่านั้นได้รับการพิจารณาโดยเบลล์เป็นคนแรกถึงแม้ว่าการนำเสนอของเราจะใกล้เคียงกับของ Aspect เราขออ้างว่าทฤษฎีนี้ไม่ได้เป็นการคัดแปลงกลศาสตร์ควอนตัมแต่อย่างใด (ความจริงแล้วทฤษฎีนี้ใกล้เคียงกับกลศาสตร์คลาสสิกมากกว่า) เพียงแต่การทำนาย (predictions) ของทั้งสองทฤษฎีจะคล้ายคลึงกัน

ใน HVT นี้ แต่ละโฟตอนจะมีมุมโพลาไรเซชันเป็น λ แต่โพลาไรเซชันนี้ไม่ได้ประพฤติตัวเหมือนโพลาไรเซชันในกลศาสตร์ควอนตัม เมื่อโฟตอนมาถึงตัวทำแสงโพลาไรซ์ที่ตั้งค่ามุมเป็น γ โฟตอนจะลงทะเบียน (register) เป็น V_γ เสมอถ้า λ มีค่าเข้าใกล้กับ γ มากกว่าที่จะใกล้กับ $\gamma + \pi/2$ นั่นคือความน่าจะเป็นที่โฟตอนจะได้รับการลงทะเบียน

$$P_V^{(HVT)}(\gamma, \lambda) = \begin{cases} 1 & |\gamma - \lambda| \leq \pi/4 \\ 1 & |\gamma - \lambda| > 3\pi/4 \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (49)$$

ในแต่ละคู่ของโฟตอน โฟตอนสัญญาณและโฟตอนไอเดิลอร์จะมีโพลาไรเซชันเหมือนกันคือ $\lambda_s = \lambda_i = \lambda$ เมื่อคู่อื่น ๆ ของโฟตอนที่ถูกผลิตออกมาต่อเนื่องกัน λ จะเปลี่ยนแปลงแบบสุ่มซึ่งครอบคลุมพิสัยทั้งหมดของโพลาไรเซชันที่เป็นไปได้ทั้งหมด

ปริมาณ λ เป็นตัวแปรแฝง (hidden variable) เป็นชิ้นส่วนหนึ่งของข้อมูลซึ่งหายไปจากกลศาสตร์ควอนตัม ทฤษฎีตัวแปรแฝงที่เป็นจริงเฉพาะที่ ไม่ได้มีลักษณะที่แปลกประหลาดของกลศาสตร์ควอนตัมแต่ทฤษฎีที่กล่าวถึงนี้จะเป็นแบบเฉพาะที่ (local) หมายความว่า ผลลัพธ์จากการวัดถูกกำหนดด้วยลักษณะของวัตถุซึ่งปรากฏ ณ ตำแหน่งที่มีการวัด การวัดใด ๆ บนโฟตอนสัญญาณจะถูกกำหนดด้วย λ_s และ α ส่วนโฟตอนไอเดิลอร์กำหนดด้วย λ_i และ β ทฤษฎีนี้ยังเป็นแบบที่เป็นจริง (realistic) หมายความว่าทุก ๆ ปริมาณที่สามารถวัดได้จะมีค่าที่แน่นอน (definite values) ไม่ขึ้นกับว่าผู้ค่าเหล่านั้นหรือไม่ นอกจากนี้ทฤษฎีจะชี้เฉพาะเจาะจงถึงค่าต่าง ๆ ทั้งหมดสำหรับ λ ค่าหนึ่งนั่นคือจะมีความสมบูรณ์ (complete) ตามความหมายของไอน์สไตน์ท้ายและสุดท้าย λ ไม่

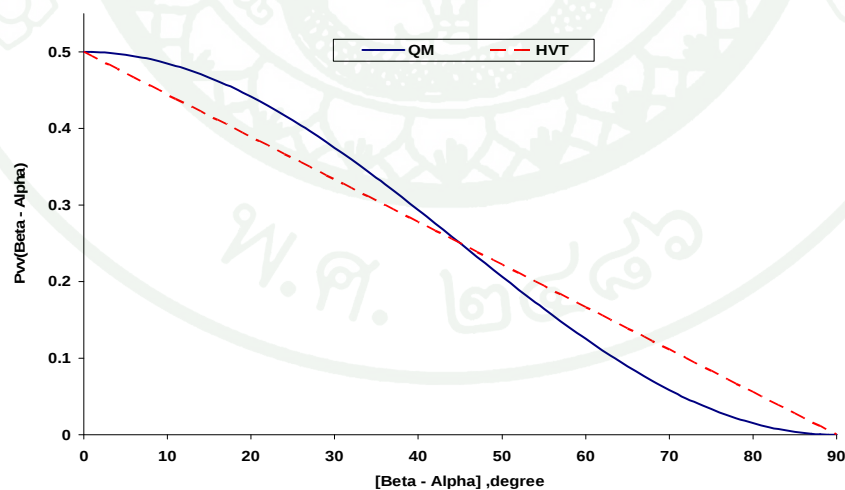
จำเป็นต้องเป็นแบบสุ่มโดย λ สามารถเปลี่ยนแปลงเชิงกำหนด (deterministic) แล้วยังคงถูกค้นหาได้

เพื่อที่จะเปรียบเทียบทฤษฎีนี้กับกลศาสตร์ควอนตัมเราจำเป็นต้องทำนายความน่าจะเป็นของการตรวจพบคู่โฟตอนในเวลาเดียวกัน (coincidence probability) $P_V^{(HVT)}(\alpha, \beta)$ คู่โฟตอนที่มาถึงตัวตรวจหาโฟตอนเดี่ยวแต่ละตัวในเวลาเดียวกันจะเกิดขึ้นเมื่อ λ อยู่ในพิสัยที่ทั้ง α และ β ใกล้เคียงกับ λ ความน่าจะเป็นของการพบคู่โฟตอนในเวลาเดียวกันนี้คือ

$$P_V^{(HVT)}(\alpha, \beta) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi P_V^{(HVT)}(\alpha, \lambda) P_V^{(HVT)}(\beta, \lambda) d\lambda$$

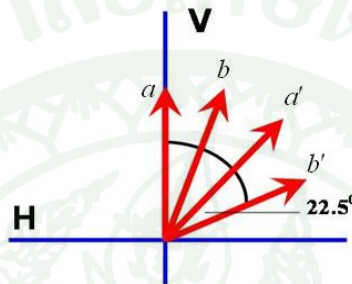
$$= \frac{1}{2} - \frac{|\beta - \alpha|}{\pi} \quad (50)$$

ฟังก์ชันของความน่าจะเป็นนี้และความน่าจะเป็นทางกลศาสตร์ควอนตัมตามสมการที่ (41) จะเขียนเป็นกราฟได้ดังภาพที่ 5 จะเห็นได้ว่าการทำนายจะมีความคล้ายคลึงกัน ณ ตำแหน่งซึ่งค่าความน่าจะเป็นของทั้งสองทฤษฎีไม่เท่ากัน การทำนายทางกลศาสตร์ควอนตัมจะมีสหสัมพันธ์ (correlations) หรือปฏิสหสัมพันธ์ (anticorrelations) มากกว่าของ HVT



ภาพที่ 5 การทำนายสหสัมพันธ์ของโพลาไรเซชันสำหรับสถานะพััวพันเชิงกลศาสตร์ควอนตัม (เส้นทึบ) และทฤษฎีตัวแปรแฝง (เส้นประ)

จะเห็นได้ว่า HVT ไม่ยุ่งยากและยังสอดคล้องก่อนข้างดีกับกลศาสตร์ควอนตัม หลายคนอาจจะหวังว่าเมื่อดัดแปลงอีกเล็กน้อย จะทำให้สอดคล้องกับทฤษฎีควอนตัมได้ ในปี 1964 เบลล์แสดงให้เห็นว่าเป็นไปไม่ได้ที่ทั้งสองทฤษฎีจะสอดคล้องกัน โดยสร้างอสมการ ซึ่งทฤษฎีตัวแปรแฝงที่เป็นจริงเฉพาะที่ต่าง ๆ จะต้องเป็นไปตามอสมการนั้น แต่กลศาสตร์ควอนตัมจะไม่เป็นไปตามอสมการนั้น เราจะใช้อสมการซึ่งแตกต่างจากที่เบลล์นำเสนอซึ่งเป็นอสมการที่สร้างขึ้นโดย Clauser, Horne, Shimony, และ Holt แต่อย่างไรก็ตามอสมการที่ใช้ก็ยังเรียกว่า อสมการเบลล์



ภาพที่ 6 มุมของตัวทำแสงโพลาไรซ์ (เทียบกับแนวตั้ง)ที่ทำให้พารามิเตอร์ S เชิงกลศาสตร์มากที่สุด

อสมการเบลล์จะบังคับองศาของสหสัมพันธ์ของโพลาไรเซชันภายใต้การวัดด้วยมุมของตัวทำแสงโพลาไรซ์ที่แตกต่างกัน การทดสอบความพัวพันกันจะเกี่ยวข้องกับ 2 การวัด การวัดที่หนึ่งคือ

$$E(\alpha, \beta) \equiv P_{VV}(\alpha, \beta) + P_{HH}(\alpha, \beta) - P_{VH}(\alpha, \beta) - P_{HV}(\alpha, \beta) \quad (51)$$

การวัด $E(\alpha, \beta)$ จะเป็นการรวมผลลัพธ์ของการวัดที่เป็นไปได้ทั้งหมดและค่าที่วัดได้จะแปรเปลี่ยนจาก +1 (เมื่อโพลาไรเซชันเหมือนกัน) ถึง -1 (เมื่อโพลาไรเซชันตรงข้ามกัน) การวัดที่สองคือ

$$S \equiv E(a, b) - E(a, b') + E(a', b) + E(a', b') \quad (52)$$

เมื่อ a, a', b, b' คือมุมของตัวทำแสงโพลาไรซ์ 4 มุมที่แตกต่างกัน พารามิเตอร์ S ไม่ได้มีความหมายทางกายภาพที่ชัดเจนความสำคัญของพารามิเตอร์ S คือ

$$|S| \leq 2 \quad (53)$$

สำหรับทฤษฎีตัวแปรแฝงเฉพาะที่ใด ๆ และ a, a', b, b' เป็นมุมใด ๆ ซึ่งสมการ (53) พิสูจน์โดย CHSH กลศาสตร์ควอนตัมจะมีมุมที่แน่นอนที่สามารถฝ่าฝืนอสมการเบลล์ถ้าเลือกมุมของตัวทำแสงโพลาไรซ์ ดังนี้ $a = 0^\circ, a' = -45^\circ, b = -22.5^\circ$ และ $b' = -67.5^\circ$ ดังแสดงในภาพที่ 6 จากสมการที่ (41), (51) และ (52) จะได้พารามิเตอร์ S เชิงควอนตัมเป็น

$$S^{(QM)} = 2\sqrt{2} \quad (54)$$

ผลลัพธ์นี้จะเป็นค่าเฉพาะสำหรับสถานะ $|\phi^-\rangle$ (สมการ (23)) ถ้าเป็นสถานะเบลล์อื่น S จะมีค่าน้อยกว่า $2\sqrt{2}$ เป็นที่น่าสนใจว่าค่ามุมต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณข้างต้นเมื่อนำมาใช้ใน HVT จะได้

$$S^{(HVT)} = 2 \quad (55)$$

ซึ่งค่าที่คำนวณได้นี้จะเลียนแบบค่าพารามิเตอร์ S ที่ได้จากการคำนวณเชิงกลศาสตร์ควอนตัมและยังเป็นไปตามสมการที่ (53)

อสมการเบลล์แสดงให้เห็นว่าไม่มีทฤษฎีที่มีทั้งเฉพาะที่ และเป็นจริง (สมบูรณ์ในความหมายของ EPR) ที่สอดคล้องกับกลศาสตร์ควอนตัม ซึ่งก็ยังคงมีปัญหาวาธรรมชาติ (nature) เห็นพ้องกับกลศาสตร์ควอนตัมหรืออสมการเบลล์ เนื่องจากเรามีแหล่งกำเนิดที่ผลิตโฟตอนในสถานะ $|\phi^-\rangle$ หรือสถานะที่ใกล้เคียงกับสถานะนี้และเราสามารถวัดค่า $|S|$ ถ้าพบว่า $|S| > 2$ ก็จะฝ่าฝืนอสมการเบลล์ และขัดแย้งกับ HVT ถ้าพบว่า $|S| \leq 2$ ก็จะได้ข้อสรุปเพราะผลลัพธ์นี้เป็นจริงทั้งกลศาสตร์ควอนตัมและ HVT

การพิสูจน์อสมการเบลล์ในรูปแบบของ CHSH

สำหรับ HVT การแจกแจง (distribution) ของตัวแปรแฝง λ จะอธิบายด้วยฟังก์ชัน $\rho(\lambda)$ เมื่อ

$$\rho(\lambda) \geq 0 \quad (56)$$

และ

$$\int \rho(\lambda) d\lambda = 1 \quad (57)$$

สมมติฐานของความเฉพาะที่ และความเป็นจริง แสดงได้ดังต่อไปนี้ สมมติว่าผลลัพธ์ของการวัดโฟตอนสัญญาณ ถูกกำหนดได้อย่างสมบูรณ์ด้วย λ และมุม α ผลลัพธ์ของการวัดเหล่านี้จะระบุด้วยฟังก์ชัน $A(\lambda, \alpha)$ ซึ่งกำหนดให้มีค่าเป็น +1 สำหรับการวัดที่เป็น V_α และเป็น -1 สำหรับการวัดที่เป็น H_α ในทำนองเดียวกันฟังก์ชัน $B(\lambda, \beta)$ จะอธิบายผลลัพธ์สำหรับโฟตอนไอลเดอร์ ซึ่งจะเป็น +1 สำหรับ V_β และเป็น -1 สำหรับ H_β ดังนั้น HVT สามารถที่จะระบุด้วยฟังก์ชัน ρ, A และ B ความน่าจะเป็นของผลลัพธ์เฉพาะค่าหนึ่งซึ่งเฉลี่ยบนองชองเปิด (ensemble) ของคู่โฟตอน หาได้จากการอินทิเกรต ดังนี้

$$\begin{aligned} P_{VV}(\alpha, \beta) &= \int \left(\frac{1+A(\lambda, \alpha)}{2} \right) \left(\frac{1+B(\lambda, \beta)}{2} \right) \rho(\lambda) d\lambda, \\ P_{VH}(\alpha, \beta) &= \int \left(\frac{1+A(\lambda, \alpha)}{2} \right) \left(\frac{1-B(\lambda, \beta)}{2} \right) \rho(\lambda) d\lambda, \\ P_{HV}(\alpha, \beta) &= \int \left(\frac{1-A(\lambda, \alpha)}{2} \right) \left(\frac{1+B(\lambda, \beta)}{2} \right) \rho(\lambda) d\lambda, \\ P_{HH}(\alpha, \beta) &= \int \left(\frac{1-A(\lambda, \alpha)}{2} \right) \left(\frac{1-B(\lambda, \beta)}{2} \right) \rho(\lambda) d\lambda, \end{aligned} \quad (58)$$

สมการ (58) เป็นความน่าจะเป็นที่จะพบโฟตอนในสถานะ $V_\alpha V_\beta, V_\alpha H_\beta, H_\alpha V_\beta$ และ $H_\alpha H_\beta$ ตามลำดับค่า E ในสมการที่ (51) สามารถเขียนได้ง่าย ๆ ดังนี้

$$E(\alpha, \beta) = \int A(\lambda, \alpha) B(\lambda, \beta) \rho(\lambda) d\lambda \quad (59)$$

โดยจะนิยามปริมาณ s ซึ่งอธิบายสหสัมพันธ์ของโพลาไรเซชันในคู่หนึ่งของอนุภาค

$$\begin{aligned} s &\equiv A(\lambda, a)B(\lambda, b) - A(\lambda, a)B(\lambda, b') \\ &\quad + A(\lambda, a')B(\lambda, b) + A(\lambda, a')B(\lambda, b') \\ &= A(\lambda, a)[B(\lambda, b) - B(\lambda, b')] \\ &\quad + A(\lambda, a')[B(\lambda, b) + B(\lambda, b')] \end{aligned} \quad (60)$$

เมื่อ a, a', b, b' คือมุมทั้งสี่ตามสมการที่ (52) สังเกตว่าค่า s สามารถจะมีค่าเป็น ± 2 เท่านั้น ค่าเฉลี่ยของ s บนองชองขอบเขตของคู่ต่าง ๆ คือ

$$\begin{aligned}
\langle s \rangle &= \int s(\lambda, a, a', b, b') \rho(\lambda) d\lambda \\
&= E(a, b) - E(a, b') + E(a', b) + E(a', b') \\
&= S(a, a', b, b')
\end{aligned} \tag{61}$$

เนื่องจาก s สามารถมีค่าเป็น ± 2 เท่านั้น ทำให้ค่าเฉลี่ยของ S เป็น $-2 \leq S \leq +2$ ซึ่งก็คือ อสมการเบลล์ในสมการ (53) นั้นเองความหมายของการฝ่าฝืนอสมการเบลล์ เป็นหัวข้อทางปรัชญา ไม่ใช่ฟิสิกส์เชิงการทดลอง จุดเริ่มต้นที่ดีสำหรับการอ่านปรัชญาของความพัวพันคือเอกสารอ้างอิง (Redhead, M. 1987) เรามีข้อวิจารณ์เล็กน้อย ซึ่งควรจะเข้าใจว่าเป็นการแปลความหมายของเรา มากกว่าเป็นความคิดเห็นส่วนใหญ่ของนักปรัชญาหรือนักฟิสิกส์ ใน HVT ผลของการวัด สามารถอธิบายในพจน์ของความเป็นจริง ซึ่งอันตรกิริยาทั้งหมดเป็นแบบเฉพาะที่ ยกตัวอย่างเช่น ผลที่เป็นไปได้ทั้งหมดจะอธิบายโดยโพลาริเซชันของโฟตอน λ_s, λ_t และการวัดโพลาริเซชันบนโฟตอนสัญญาณ (ไอเคลอร์) ไม่ได้เปลี่ยนโพลาริเซชันโฟตอนไอเคลอร์ (สัญญาณ) จากอสมการเบลล์และการทดลองของเรา พบว่าการอธิบายแบบนี้เป็นไปได้ เราสามารถที่จะสงวนสมมุติฐานของเราได้อย่างหนึ่งอย่างใดเท่านั้น คือความจริงหรือเฉพาะที่ แต่ไม่สามารถสงวนสมมุติฐานได้ทั้งคู่ อันดับแรกพิจารณาการอธิบายที่จะต้องรวมอันตรกิริยาไม่เฉพาะที่ ยกตัวอย่างเช่น λ_s สามารถเปลี่ยนแปลง เพื่อตอบสนองต่อการวัด บนโฟตอนไอเคลอร์ ซึ่งดูเหมือนว่านักวิจัยส่วนมาก จะชอบการอธิบายเช่นนี้ และการฝ่าฝืนอสมการเบลล์โดยการทดลองบางครั้งอธิบายว่าเป็นการปฏิเสธหลักของความเฉพาะที่ เราสามารถที่จะไม่พิจารณาถึง สมมุติฐานของความเป็นจริง และกล่าวว่าไม่มี ความเป็นจริง ที่จะอธิบายการสังเกตเหล่านั้นโดยเป็นเพียงความปรกติเชิงสถิติ ที่สัมพันธ์กับผลจากการวัดถ้าเป้าหมายของวิชาฟิสิกส์ คือการอธิบายสิ่งซ่อนเร้นของธรรมชาติ การยอมรับการอธิบายเช่นนี้เป็นสิ่งที่น่าผิดหวังอย่างมาก สิ่งที่น่าสนใจ ซึ่งคล้ายกับการอธิบายเวกเตอร์สถานะในกลศาสตร์ควอนตัม จากการแปลความของโคเปนเฮเกน เวกเตอร์สถานะของอนุภาคพัวพัน จะเปลี่ยนแปลงอย่างทันที เมื่อมีการวัด ยิ่งไปกว่านั้น เวกเตอร์สถานะสามารถเปลี่ยนแปลงเพื่อตอบสนองต่อการวัด ที่กระทำบนอนุภาคอีกอนุภาคหนึ่ง ซึ่งการวัดนี้กระทำในสถานที่แตกต่างกัน ถ้าพิจารณาว่าเวกเตอร์สถานะเป็นวัตถุจริงแล้ว การทรุดตัวของเวกเตอร์สถานะ เป็นตัวอย่างของการกระทำทันทีทันใด ที่ระยะทางไกล แต่เราอาจพิจารณาเวกเตอร์สถานะแตกต่างจากนั้นได้ โดยพิจารณาว่าเป็นเพียงเครื่องมือในการคำนวณ ถ้าเป็นเช่นนั้นแล้ว เราไม่สามารถที่จะวัดเวกเตอร์สถานะ จะมีก็แต่เพียงความน่าจะเป็นเท่านั้นที่สามารถสังเคราะห์ได้จากเวกเตอร์สถานะ ดังแสดงในสมการ (48) ความน่าจะเป็นสำหรับแต่ละผลลัพธ์ของอนุภาคเดี่ยว จะมีพฤติกรรมแบบเฉพาะที่ ในมุมมองนี้ นั่นคือไม่มีการกระทำที่ระยะทางไกล แต่ก็ยังไม่มีคำตอบของคำถามที่ว่าเกิดอะไรขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เลเซอร์ไดโอดลำแสงสีม่วง ความยาวคลื่น 405 นาโนเมตร ผลิตโดยบริษัท NEWPORT
2. เลเซอร์ไดรเวอร์ที่มาพร้อมกับเลเซอร์ไดโอด ผลิตโดยบริษัท NEWPORT
3. ตัวกรองแสงสีน้ำเงินชนิดผ่านแถบความถี่ BG40 (Band pass Filters) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร หนา 2 มิลลิเมตร ผลิตโดยบริษัท THORLABS
4. ที่ยึดกระจกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว รุ่น LH-1 ผลิตโดยบริษัท NEWPORT
5. แผ่นกั้นแสงขนาดรูเปิดแสงกว้างสุดได้ 20 มิลลิเมตร ผลิตโดยบริษัท THORLABS
6. กระจกแยกแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นช่วงความยาวคลื่น 405 นาโนเมตร ขนาด 10×10×10 มิลลิเมตร รุ่น PBS101 ผลิตโดยบริษัท THORLABS
7. แผ่นครึ่งคลื่นอันดับที่ศูนย์กลางความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร ผลิตโดยบริษัท MELLES GRIOT
8. ตัวยึดแผ่นครึ่งคลื่นแบบปรับมุมได้ ซึ่งสามารถบรรจุอุปกรณ์ทางแสงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว สามารถหมุนได้ 360° โดยมีสเกลบอกในการหมุนทีละ 2° รุ่น RM25A ผลิตโดยบริษัท NEWPORT
9. กระจกสะท้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว รุ่น 45602 ผลิตโดยบริษัท ORIEL CORPORATION
10. ที่ยึดกระจกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว รุ่น LH-2 ผลิตโดยบริษัท NEWPORT

11. ผลึก BBO สองแผ่นเหมือนกันขนาด $5.0 \times 5.0 \times 0.5$ มิลลิเมตร ตัดให้แกนแสงของผลึกทำมุม 29.2° กับระนาบของผลึก ประกบผลึกทั้งสองไว้ในแผ่นพลาสติกโดยให้หมุนผลึกแผ่นหนึ่งไป 90° เทียบกับอีกแผ่นหนึ่ง ผลิตโดยบริษัท PHOTOP

12. แผ่นครึ่งคลื่นหลายอันดับ (half wave plate multi order) ความยาวคลื่น 808 นาโนเมตร ประกบไว้ในตัวยึดพลาสติกที่มีขีดสีขาวบอกแนวแกนเร็วของแสงผลิตโดยบริษัท THORLABS

13. แผ่นเลี้ยวคลื่นหลายอันดับ (quarter wave plate multi order) ความยาวคลื่น 808 นาโนเมตร ประกบไว้ในตัวยึดพลาสติกที่มีขีดสีขาวบอกแนวแกนเร็วของแสงผลิตโดยบริษัท THORLABS

14. ตัวทำแสงโพลาไรซ์ใกล้ย่านอินฟราเรด (near - infrared polarizer) ความยาวคลื่น 780 - 1250 นาโนเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร มีช่องเปิดให้แสงผ่าน 15 มิลลิเมตร รุ่น 03 FPI 001 ผลิตโดยบริษัท MELLES GRIOT

15. ตัวยึดตัวทำแสงโพลาไรซ์ ที่สามารถบรรจุอุปกรณ์ทางแสงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 - 20.6 มิลลิเมตร สามารถหมุนได้ 360° โดยมีสเกลบอกในการหมุนทีละ 2° รุ่น 07 HPR 223 ผลิตโดยบริษัท MELLES GRIOT

16. ตัวกรองแสงสีแดงผ่านความยาวคลื่นมาก RG780 (long pass colored glass filter) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว หนา 2 มิลลิเมตร จะให้แสงที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 780 นาโนเมตร ผ่านได้ ผลิตโดยบริษัท THORLABS

17. ตัวปิดกั้นลำแสงสีม่วง ทำจากอะลูมิเนียม ให้มีช่องเปิดให้ลำแสงเข้าไป ภายในพ่นด้วยสีดำให้แสงเกิดการสะท้อนน้อยที่สุด

18. ตัวทำแสงขนานหัวต่อแบบ FC ความยาวคลื่น 635 นาโนเมตร ความยาวโฟกัส 35.30 มิลลิเมตร รุ่น F810FC-635 ผลิตโดยบริษัท THORLABS ($\lambda = 635$ nm FC / PC Collimation Package, NA=0.25, f=35.30 mm)

19. เส้นใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมด ยาว 5 เมตร ผลิตโดยบริษัท INTERLINK

20. เครื่องกำเนิดความถี่ 2 เมกะเฮิรตซ์ (2 MHz function generator) อยู่ในย่านความถี่ 0.2 Hz - 2 MHz ให้กำเนิดคลื่นรูป Sine, Triangle, Square และ TTL Pulse สามารถควบคุม DC Offset ได้ รุ่น GFG-8015G ผลิตโดยบริษัท GW instek

21. มัลติมิเตอร์ รุ่น 110 ผลิตโดยบริษัท Fluke

22. มัลติมิเตอร์ รุ่น 189 ผลิตโดยบริษัท Fluke

23. ออสซิลโลสโคป รุ่น TDS 220 ผลิตโดยบริษัท TEKTRONIX

24. ตัวตรวจหาโฟตอนเดี่ยว SPCM-AQ4C มี 4 ช่อง ในการตรวจวัดโฟตอนเดี่ยว แต่ละช่องจะไม่ขึ้นต่อกัน ตรวจวัดคลื่นแสงในช่วงความยาวคลื่น 400 – 1060 นาโนเมตร ผลิตโดยบริษัท PerkinElmer

25. แหล่งจ่ายไฟ 3 เอาต์พุต (5V / 3A fixed output) รุ่น GPC-3030D ผลิตโดยบริษัท GW instek จำนวน 2 เครื่อง

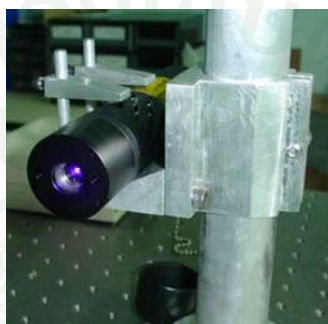
26. ตัวตรวจนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกัน (coincidence counter) รุ่น SR620 ผลิตโดยบริษัท SRS

27. แขนอลูมิเนียมยาวข้างละ 48 นิ้ว ขนาด 1×0.5 นิ้ว ที่ปลายเจาะรู 12 รู ห่างกันรูละ 1 นิ้ว แล้วทำเกลียวขนาด 6 มิลลิเมตร ที่แขนข้างหนึ่งจะมีอลูมิเนียมยาว 10 นิ้ว ร่องไว้ด้านใต้เพื่อให้แขนสัมผัสกับพื้นเรียบ ง่ายต่อการปรับมุมของแขนอลูมิเนียม ที่ปลายอีกด้านหนึ่งของแขนอลูมิเนียมทั้งสองเจาะรูขนาด 6 มิลลิเมตร ห่างจากปลายสุด 0.5 นิ้ว เพื่อเป็นจุดหมุนร่วมกัน

วิธีการ

1. ศึกษาการใช้งานเลเซอร์ไดโอดและเลเซอร์ไดรเวอร์

1.1 ยึดเลเซอร์ไดโอดกับแท่งยึดอลูมิเนียม ที่ปรับระดับความสูงได้ ดังภาพที่ 7

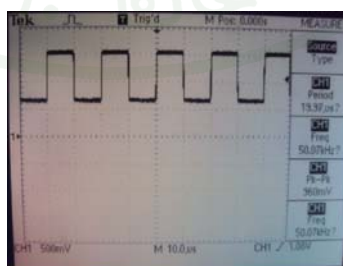


ภาพที่ 7 การยึดเลเซอร์ไดโอดกับแท่งยึดอลูมิเนียม

1.2 กด้าสัญญาณอนาล็อกให้กับเลเซอร์ไดโอดดังนี้

1.2.1 เปิดสวิทช์กุญแจที่เครื่องเลเซอร์ไดรเวอร์ โดยยังไม่ต้องนำหัวต่อ BNC สำหรับคลื่นสัญญาณของเลเซอร์ไดโอดมาต่อกับแหล่งกำเนิดสัญญาณคลื่น (function generator)

1.2.2 เปิดแหล่งกำเนิดสัญญาณคลื่น แล้วเลือกสัญญาณคลื่นรูปสี่เหลี่ยมและเลือกความถี่ 50 กิโลเฮิร์ต ปรับยอดสัญญาณถึงยอดสัญญาณ (peak to peak) เป็น 960 มิลลิโวลต์และปรับ offset เป็น 1 โวลต์ ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 แหล่งกำเนิดคลื่นรูปสี่เหลี่ยมความถี่ 50 กิโลเฮิร์ต

1.2.3 นำหัวต่อ BNC สำหรับกล้าสัญญาณของเลเซอร์ไดโอด ต่อกับแหล่งกำเนิดคลื่นรูปไซน์ ที่ตั้งค่าไว้จากข้อ 1.2.2

1.2.4 กดสวิทช์รีเซ็ตค่าที่เลเซอร์ไดรเวอร์ ไฟสถานะของเลเซอร์ไดโอดจะแสดงสถานะการทำงานของเลเซอร์ไดโอดเป็นสีแดง

1.2.5 ต่อสายจากเลเซอร์ไดโอดมาเข้ากับมัลติมิเตอร์ 2 ตัว เพื่อวัดความต่างศักย์ดังต่อไปนี้

ก. มัลติมิเตอร์ตัวที่ 1 แสดงผลการวัดกระแสของเลเซอร์ไดโอด โดยที่ 1 มิลลิโวลต์ = 1 มิลลิแอมป์

ข. มัลติมิเตอร์ตัวที่ 2 แสดงความต่างศักย์ในหน่วยโวลต์ซึ่งสามารถแปลงเป็นอุณหภูมิของเลเซอร์ไดโอดได้ตามตารางคู่มือเลเซอร์ไดโอด รายละเอียดดัง ภาคผนวก ก

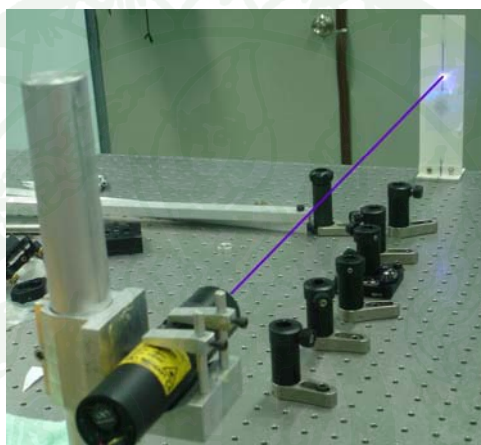


ภาพที่ 9 การกล้าสัญญาณอนาล็อกให้กับเลเซอร์ไดโอด

2. วางแนวทางเดินแสง

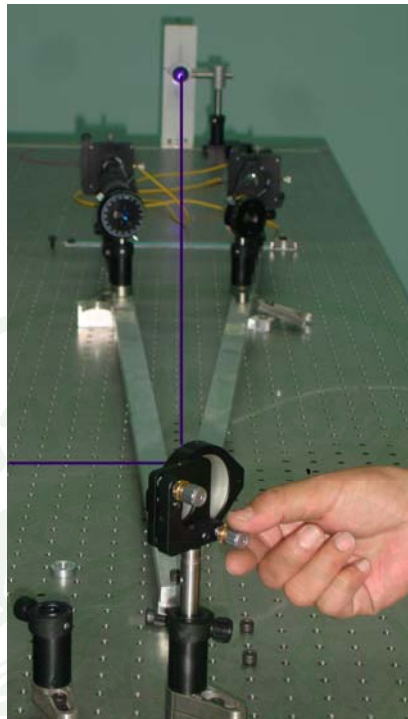
วางแนวทางเดินแสง ให้มีระดับเดียวกับระนาบโต๊ะและขนานกับแนวของรูยึดอุปกรณ์บนโต๊ะ เพื่อความสะดวกในการติดตั้งอุปกรณ์ทางแสงอื่น ๆ การวางแนวทางเดินแสงแบ่งเป็นสองส่วน ดังนี้

2.1 ส่วนแรก คือ แสงที่กระทบกระจกจะต้องมีระดับเดียวกับโต๊ะและขนานกับแนวของรูยึดอุปกรณ์ ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 การจัดระดับทางเดินแสงที่ตกกระทบกับกระจกสะท้อน

2.2 ส่วนที่สอง คือลำแสงที่สะท้อนจากกระจก จะต้องอยู่ในระดับเดียวกันกับแสงส่วนแรก และขนานกับแนวของรูยึดอุปกรณ์ ดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 การจัดระดับทางเดินแสงที่สะท้อนกับกระจกสะท้อน

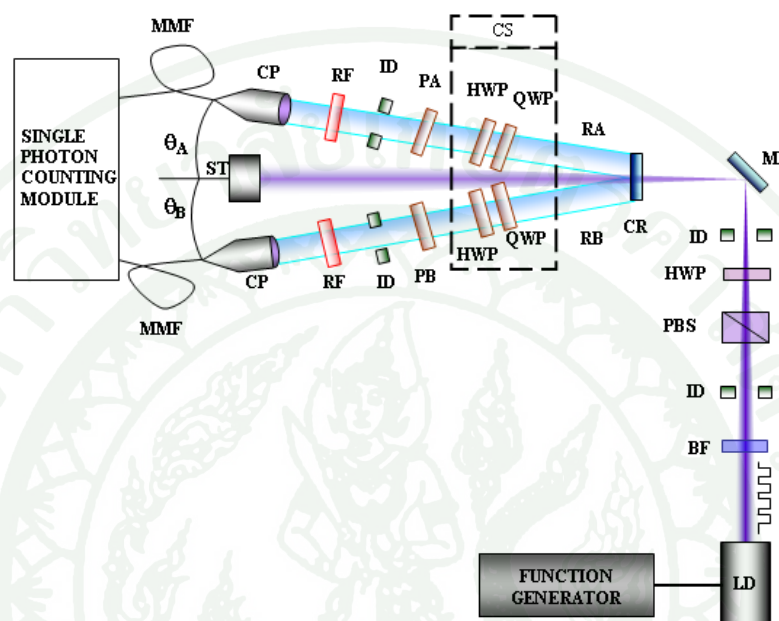
2.3 ปรับให้ลำแสงไปโฟกัสที่ผลึก BBO มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 มิลลิเมตร โดยการหมุนเลนส์หน้าเลเซอร์ไดโอด ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 ลำแสงถูกโฟกัสที่ผลึก BBO มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 มิลลิเมตร

3. จัดอุปกรณ์ทางแสงสำหรับการสร้างโพลาริเซชันพัฟฟันของโฟตอน

จัดอุปกรณ์ทางแสงสำหรับการสร้างโพลาริเซชันพัฟฟันของโฟตอน ดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 แผนภาพการจัดอุปกรณ์การทดลอง เพื่อสร้างโพลาริเซชันพัฟฟันของโฟตอน

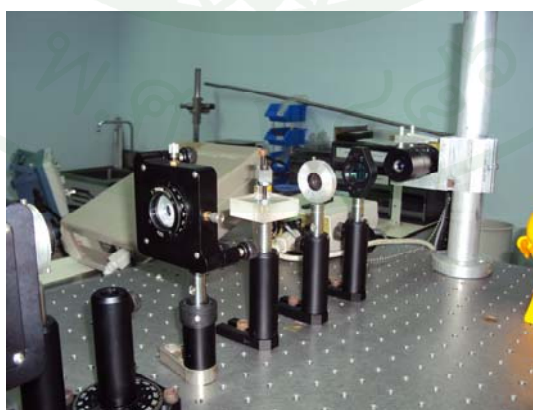
สัญลักษณ์ LD คือเลเซอร์ไดโอด, BF คือ ตัวกรองแสงสีน้ำเงิน, ID คือ แผ่นกั้นแสง, PBS กระดาษแยกแสงโพลาริเซชันเชิงเส้น, UV HWP คือ แผ่นครึ่งคลื่นย่านอัลตราไวโอเล็ต, MI คือ กระดาษสะท้อน, CR คือผลึกที่ทำให้แสงมีการแปลงผันลง, RA คือแขนอลูมิเนียม, QWP คือแผ่นเสี้ยวคลื่น และ HWP คือ แผ่นครึ่งคลื่นชนิดหลายโหมด, PA คือตัวทำแสงโพลาริซ์ A, PB คือ ตัวทำแสงโพลาริซ์ B, RF คือตัวกรองแสงสีแดงใกล้ย่านอินฟราเรด, CP คือตัวทำแสงขนาน, MMF คือใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดและ ST คือตัวกั้นลำแสงสีม่วง, CS คือส่วนของการชดเชยเฟส

ภาพที่ 13 แสดงแผนภาพการจัดอุปกรณ์การทดลอง เพื่อสร้างสถานะโพลาริเซชันของโฟตอนที่พัฟฟันกัน จากเลเซอร์ไดโอดลำแสงสีม่วง ความยาวคลื่น 405 นาโนเมตร ผลิตจากบริษัท Newport รุ่น LQA-50E ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิได้อย่างแม่นยำ และมีเลเซอร์ไดร์เวอร์สำหรับขับเลเซอร์ไดโอดที่จ่ายกระแสได้อย่างเที่ยงตรง เลเซอร์จะยิงด้วยแท่งยึดอลูมิเนียมที่ปรับระดับความสูงได้โดยที่ลำแสงจะผ่านอุปกรณ์ทางแสงดังต่อไปนี้ ตัวกรองแสงสีน้ำเงิน กระดาษแยกลำแสง

ชนิดโพลาไรซ์ (polarization beam splitter; PBS) และแผ่นครึ่งคลื่น ก่อนที่จะไปถึงคู่ของผลึก BBO ในผลึกคู่นี้โฟตอนจากเลเซอร์จะสลายตัวแบบเกิดขึ้นเองไปสู่คู่ของโฟตอนด้วยกระบวนการ SPDC ในการสลายตัวนี้โฟตอนที่แปลงผันลงจะเกิดขึ้นในเวลาเดียวกันซึ่งจะอยู่ในด้านตรงข้ามกันจากกึ่งกลางของลำแสงสีม่วงของเลเซอร์ปั๊ม มอดูลการนับโฟตอนเดี่ยว (single photon counting modules: SPCM_s) เชื่อมต่อกับตัวทำแสงขนานด้วยใยแก้วนำแสงแบบหลายโหมดที่มีหัวต่อแบบ FC โดยให้ตัวทำแสงขนานติดตั้งอยู่บนแขนออปติคัลและด้านหน้าตัวตรวจหาโฟตอน โพลาไรซ์เชิงเส้นย่านอินฟราเรด แผ่นครึ่งคลื่น แผ่นเลี้ยวคลื่น และตัวกรองแสงสีแดง (red filters) เพื่อป้องกันแสงเลเซอร์ที่เกิดการกระเจิงไปสู่ตัวตรวจหาโฟตอน อุปกรณ์ทางแสงที่เป็นส่วนประกอบของการนับคู่ของโฟตอนเดี่ยวที่ติดตั้งไว้บนแขนออปติคัลทั้งสองนี้จะทำให้การนับคู่ของโฟตอนที่แปลงผันลงที่มุมต่าง ๆ นั้นมีการจัดแนวของอุปกรณ์ในการตรวจวัดง่ายขึ้น ซึ่งในการทดลองนี้จะกำหนดให้ตำแหน่งของแขนออปติคัลทั้งสองทำมุม $\theta_A = \theta_B \approx 3^\circ$ และปรับตัวทำแสงขนานที่อยู่บนแขนออปติคัลทั้งสองข้างเพื่อให้อัตราการนับโฟตอน (single count rates) มีค่ามากที่สุด โดยที่แผ่นกั้นแสง (iris) มีรูเปิดกว้างประมาณ 4 mm และจัดแนวแกนของตัวทำแสงโพลาไรซ์ย่านอินฟราเรดให้อยู่ในแนวตั้งหรือ 0° ซึ่งจะสังเกตเห็นการนับ (count) จากตัวตรวจนับมากกว่า 700 ต่อวินาที (counts per second)

3.1 ติดตั้งอุปกรณ์ทางแสงที่ใช้ในการผลิตคู่ของโฟตอนที่พัวพัน

อุปกรณ์ทางแสงจะอยู่บนโต๊ะทดลอง ก่อนที่จะถึงกระจกสะท้อน โดยที่อุปกรณ์ทุกชิ้นจะอยู่ในแนวเดียวกันและมีความสูงเท่ากันจากโต๊ะทดลอง ดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 การติดตั้งอุปกรณ์ทางแสงที่ใช้ในการสร้างโฟตอนที่พัวพัน

3.1.1 การติดตั้งตัวกรองแสงสีน้ำเงิน โดยให้จุดศูนย์กลางของตัวกรองแสงตรงกับจุดแสงของเลเซอร์ และให้ระนาบของตัวกรองแสงตั้งฉากกับทิศทางของแสงเลเซอร์ ดังภาพที่ 15



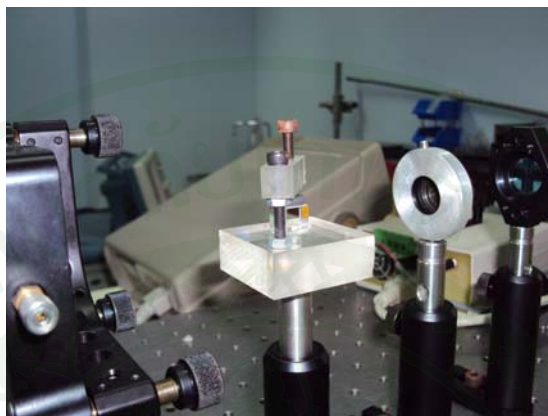
ภาพที่ 15 การติดตั้งตัวกรองแสงสีน้ำเงิน

3.1.2 การติดตั้งแผ่นกั้นแสง โดยปรับให้รูเปิดของแผ่นกั้นแสงให้เล็กที่สุด แล้วจัดแนวรูเปิดของแผ่นกั้นแสงทั้งสองตัวให้ตรงกัน ตรวจสอบได้จากแสงของเลเซอร์ที่ผ่านรูทั้งสองถ้าไม่ตรงกัน แสงจะไม่ผ่านรูของแผ่นกั้นแสงตัวที่สอง หรือถ้าแสงผ่านได้ก็อาจจะผ่านรูแค่บางส่วนเท่านั้น จากนั้นปรับให้รูเปิดของแผ่นกั้นแสงกว้างมากขึ้น ดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 การติดตั้งแผ่นกั้นแสง

3.1.3 การติดตั้งกระจกแยกลำแสงโพลาไรซ์ของเลเซอร์ให้จุดศูนย์กลางของกระจกแยกลำแสง ตรงกับจุดแสงของเลเซอร์ และให้ระนาบของตัวกรองแสงตั้งฉากกับทิศทางของแสงเลเซอร์ ดังภาพที่ 17



ภาพที่ 17 การติดตั้งกระจกแยกลำแสงโพลาไรซ์ของเลเซอร์

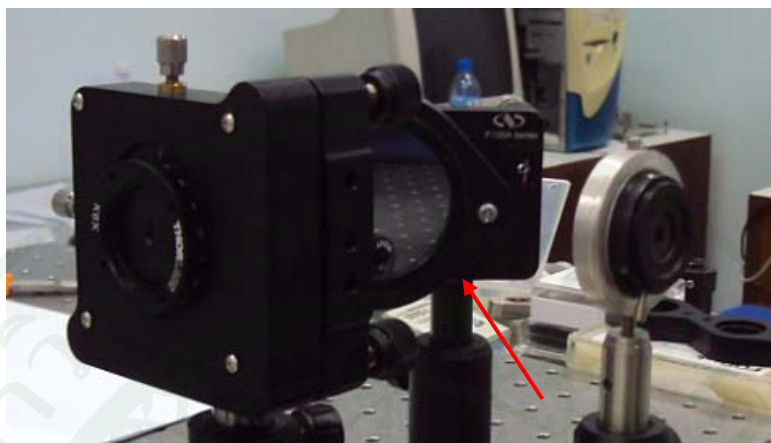
3.1.4 การติดตั้งแผ่นครึ่งคลื่น ให้จุดศูนย์กลางของแผ่นครึ่งคลื่น ตรงกับจุดแสงของเลเซอร์ โดยให้ระนาบของแผ่นครึ่งคลื่น ตั้งฉากกับทิศทางของแสงเลเซอร์และหมุนแผ่นครึ่งคลื่น ไป 22.5 องศาเพื่อให้เลเซอร์บีบทำมุม 45 องศา ดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 การติดตั้งแผ่นครึ่งคลื่น

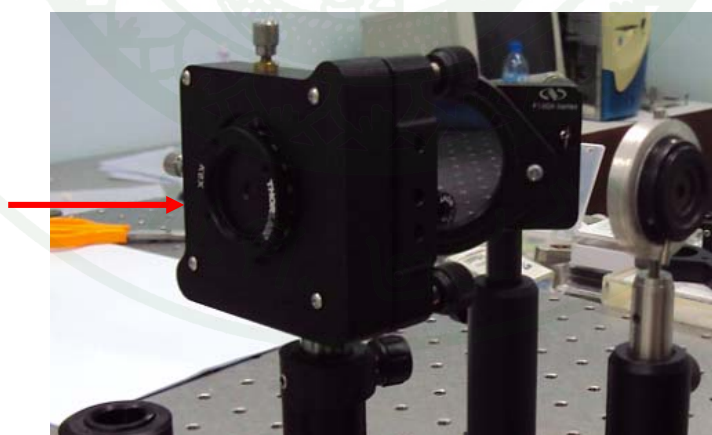
3.1.5 การติดตั้งกระจกสะท้อน โดยให้ลำแสงเลเซอร์พุ่งมาตกกระทบบที่จุดศูนย์กลางของกระจก จากนั้นปรับระนาบของกระจกสะท้อนให้ทำมุม 45° กับแสงที่มาตกกระทบบและได้

ลำแสงสะท้อนทำมุม 45° กับระนาบของกระจก จากนั้นปรับให้ลำแสงสะท้อนมีความสูงเท่าลำแสงที่ตกกระทบ ดังภาพที่ 19



ภาพที่ 19 การติดตั้งกระจกสะท้อน

3.1.6 การติดตั้งผลึก BBO โดยให้ผลึกอยู่ตรงตำแหน่งจุดหมุนของแขนออปติคัลทั้งสองแขน ซึ่งจุดศูนย์กลางของผลึกตรงกับจุดแสงของเลเซอร์และให้ระนาบของผลึกตั้งฉากกับทิศทางของลำแสงที่มาจากกระจก ดังเกตได้จากการสะท้อนของลำแสงจากผลึกต้องสะท้อนกลับไปด้วยผ่านรูเปิดของแผ่นกันแสง ดังภาพที่ 20



ภาพที่ 20 การติดตั้งผลึก BBO

3.2 ติดตั้งอุปกรณ์ทางแสงที่ใช้ในการตรวจวัดคู่ของโฟตอนที่พัวพัน

อุปกรณ์ทางแสงที่ใช้ในการตรวจวัดโฟตอนที่พัฟฟ์ อยู่บนแกนอลูมิเนียม ซึ่งอุปกรณ์ทางแสงที่อยู่บนแกนอลูมิเนียม จะให้จุดศูนย์กลางของอุปกรณ์ทางแสงทุกชิ้นตรงกับจุดแสงของเลเซอร์สีม่วง โดยที่ความสูงของอุปกรณ์บนแกนอลูมิเนียมทั้งสองนี้ จะเท่ากับอุปกรณ์ทางแสงในส่วนที่ใช้ในการผลิตโฟตอนที่พัฟฟ์ ดังภาพที่ 21



ภาพที่ 21 การติดตั้งอุปกรณ์ทางแสงที่ใช้ในการตรวจวัดโฟตอนที่พัฟฟ์

3.2.1 ติดตั้งแกนอลูมิเนียมโดยให้ปลายข้างหนึ่งของแกนอลูมิเนียมทั้งสองมีจุดหมุนร่วมกัน โดยใช้สกรูขนาด M6 ยึดไว้กับโต๊ะทดลอง ปรับให้แกนอลูมิเนียมทั้งสองทางออกจากแนวลำแสงสีม่วงของเลเซอร์ไดโอดไปข้างละ 5 เซนติเมตร ($\theta_A = \theta_B = 3^\circ$) โดยใช้ไม้บรรทัดวางเส้นขึ้นบนโต๊ะทดลองเป็นตัวบอกสเกล จากนั้นนำอุปกรณ์ทางแสงที่ใช้ในการตรวจวัดโฟตอนที่พัฟฟ์ มาติดตั้งบนแกนอลูมิเนียม เนื่องจากผลึกถูกตัดให้แกนแสงของผลึกทำมุม 29.2° ($\theta_m = 29.2^\circ$) กับระนาบของผลึก การแปลงผันลงจากความยาวคลื่น 405 นาโนเมตรไปสู่ความยาวคลื่น 810 นาโนเมตรทำให้โฟตอนทั้งสองที่เกิดการแปลงผันลงเดินทางในแนวเส้นตรงเดียวกัน นั่นคือ $\theta_c = 0^\circ$ แต่ในการทดลองต้องการให้ $\theta_c = 3.0^\circ$ ทำได้โดยการปรับมุมแกนแสงของผลึกโดยการหมุนตัวปรับมุมของตัวยึดอุปกรณ์ทางแสงที่เคลื่อนที่ได้ 6 ทิศทางซึ่งบรรจุผลึก BBO ไว้ ปรับจนอัตราการนับโฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกันมากที่สุด ณ จุดที่ $\theta_c = 3.0^\circ$



ภาพที่ 22 การติดตั้งแกนอลูมิเนียม

3.2.2 การติดตั้งแผ่นครึ่งคลื่น โดยที่แผ่นครึ่งคลื่นอยู่บนแกนออลูมิเนียมทั้งสองข้าง ซึ่งจุดศูนย์กลางของแผ่นครึ่งคลื่นตรงกับจุดของลำแสงสีม่วง โดยที่ระนาบของแผ่นครึ่งคลื่นจะต้องตั้งฉากกับทิศทางของลำแสงสีม่วง สังเกตได้จากแสงที่สะท้อนจากแผ่นครึ่งคลื่นจะต้องสะท้อนกลับเข้าไปในผลึก BBO แล้วปรับให้แนวแกนแสงของแผ่นครึ่งคลื่นอยู่ 0° ดังภาพที่ 23



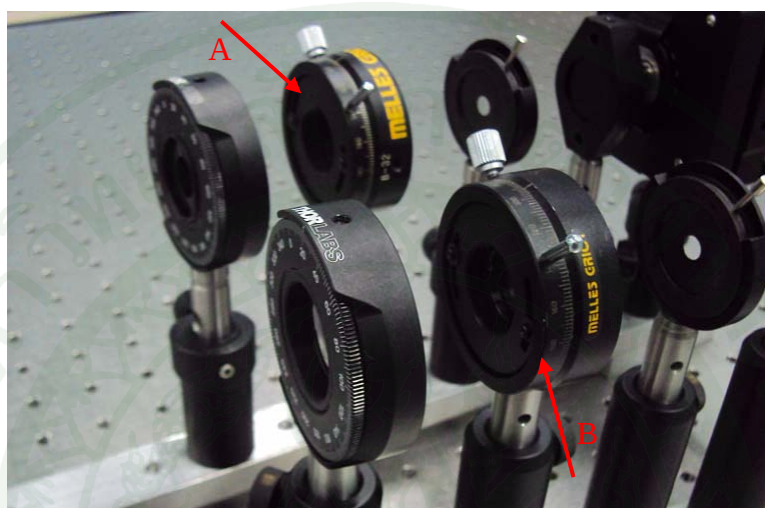
ภาพที่ 23 การติดตั้งแผ่นครึ่งคลื่นบนแกนออลูมิเนียม

3.2.2 การติดตั้งแผ่นเลี้ยวคลื่น โดยที่แผ่นเลี้ยวคลื่นอยู่บนแกนออลูมิเนียมทั้งสองข้าง ซึ่งจุดศูนย์กลางของแผ่นครึ่งคลื่นตรงกับจุดของลำแสงสีม่วง โดยที่ระนาบของแผ่นครึ่งคลื่นจะต้องตั้งฉากกับทิศทางของลำแสงสีม่วง สังเกตได้จากแสงที่สะท้อนจากแผ่นครึ่งคลื่นจะต้องสะท้อนกลับเข้าไปในผลึก BBO แล้วปรับให้แนวแกนแสงของแผ่นครึ่งคลื่นอยู่ 0° ดังภาพที่ 24



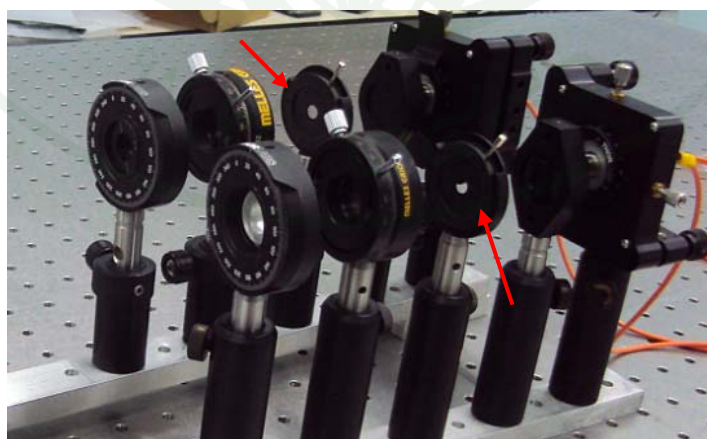
ภาพที่ 24 การติดตั้งแผ่นเลี้ยวคลื่นบนแกนออลูมิเนียม

3.2.3 ติดตั้งตัวทำแสงโพลาไรซ์ A และ ตัวทำแสงโพลาไรซ์ B บนแกนของอลูมิเนียม ข้างละตัวโดยมีระยะเท่ากันจากผลึก BBO ระบายของตัวทำแสงโพลาไรซ์ทั้งสองตั้งฉากกับแสง เลเซอร์สีม่วง โดยที่จุดศูนย์กลางของตัวทำแสงโพลาไรซ์ทั้งสองตรงกับจุดแสงของเลเซอร์ ดังภาพ ที่ 25



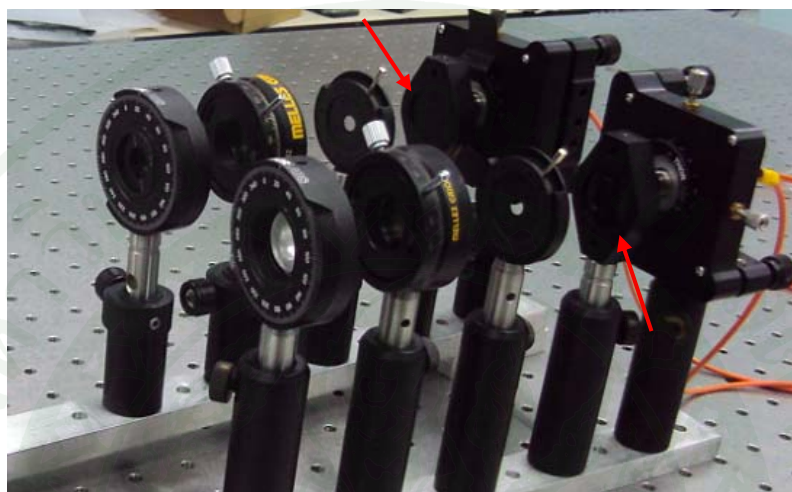
ภาพที่ 25 การติดตั้งตัวทำแสงโพลาไรซ์ A และตัวทำแสงโพลาไรซ์ B บนแกนอลูมิเนียม

3.2.4 ติดตั้งแผ่นกั้นแสงบนแกนอลูมิเนียมข้างละตัว โดยมีระยะเท่ากันจากผลึก BBO ระบายของตัวทำแสงโพลาไรซ์ทั้งสองตั้งฉากกับแสงเลเซอร์สีม่วง โดยปรับให้รูแสงของแผ่นกั้น แสงเล็กที่สุดก่อนแล้วปรับตำแหน่งให้ลำแสงเลเซอร์ผ่านรูเปิดของแผ่นกั้นแสงดังภาพที่ 26



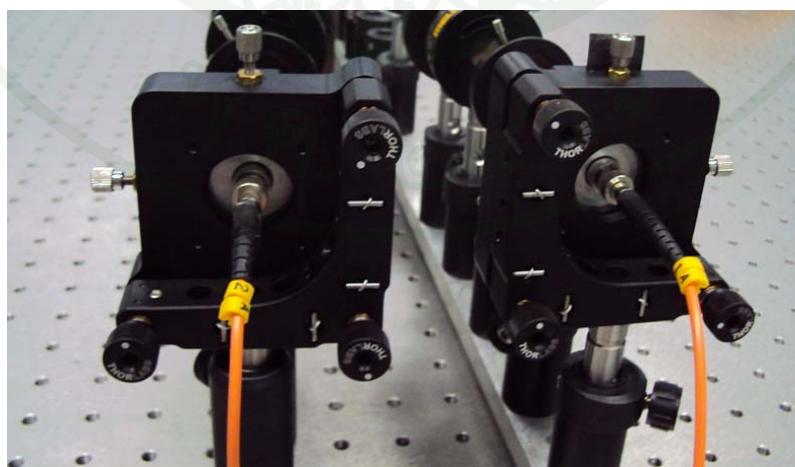
ภาพที่ 26 การติดตั้งแผ่นกั้นแสงบนแกนอลูมิเนียม

3.2.5 ติดตั้งตัวกรองแสงสีแดง RG 780 บนแกนอลูมิเนียมข้างละตัวโดยมีระยะเท่ากันจากผลึก BBO ระบายของตัวกรองแสงสีแดงทั้งสองตั้งฉากกับแสงเลเซอร์สีม่วง โดยที่จุดศูนย์กลางของตัวกรองแสงสีแดงตรงกับจุดแสงของเลเซอร์สีม่วง ดังภาพที่ 27



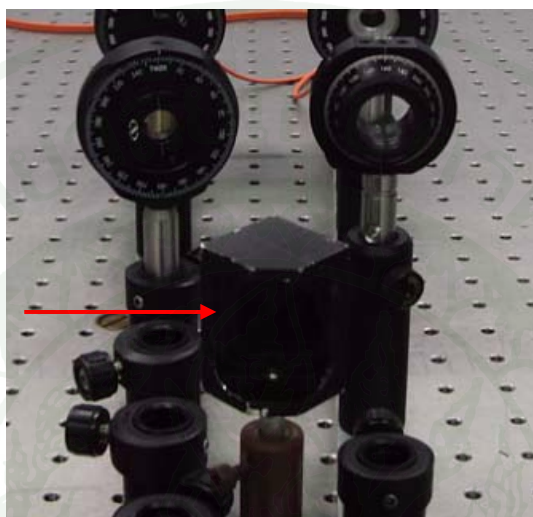
ภาพที่ 27 การติดตั้งตัวกรองแสงสีแดง RG780 บนแกนอลูมิเนียม

3.2.6 ติดตั้งตัวทำแสงขนานซึ่งใส่ไว้ในตัวยึดอุปกรณ์ทางแสงที่เคลื่อนที่ได้ 6 ทิศทางบนแกนอลูมิเนียมข้างละตัว โดยมีระยะเท่ากันจากผลึก BBO ระบายของตัวทำแสงขนานทั้งสองตั้งฉากกับแสงเลเซอร์สีม่วง โดยที่จุดศูนย์กลางของตัวกรองแสงสีแดงตรงกับจุดแสงของเลเซอร์สีม่วง ดังภาพที่ 28



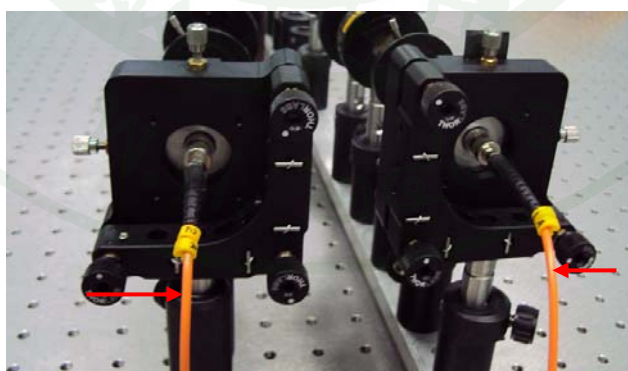
ภาพที่ 28 การติดตั้งตัวทำแสงขนานบนแกนอลูมิเนียม

3.2.7 ติดตั้งตัวกั้นลำแสงสีม่วงโดยให้ลำแสงสีม่วงของเลเซอร์พุ่งเข้าสู่จุดศูนย์กลางของตัวกั้นลำแสง ให้ตำแหน่งของตัวกั้นลำแสงสีม่วงอยู่ด้านหน้าของอุปกรณ์ทางแสงที่อยู่บนแกนอลูมิเนียม ดังภาพที่ 29



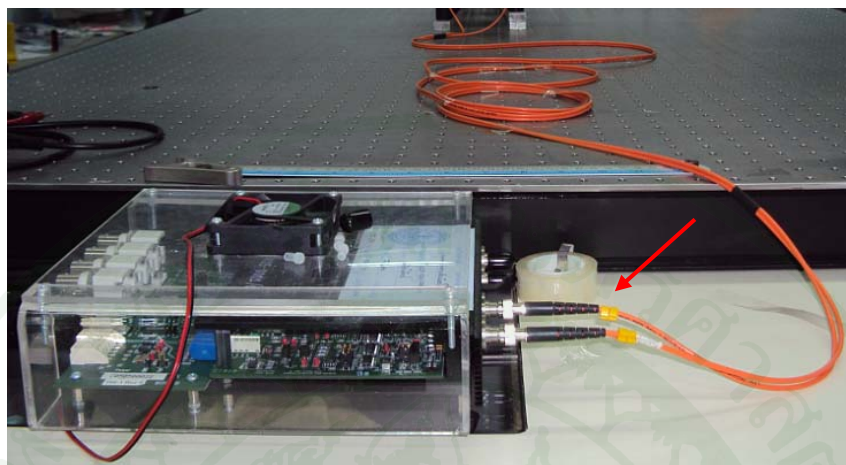
ภาพที่ 29 การติดตั้งตัวกั้นลำแสงสีม่วง

3.2.8 ติดตั้งใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดเส้น 1A และ เส้น 2A เข้ากับตัวทำแสงขนาน ซึ่งหัวต่อของใยแก้วนำแสงเป็นหัวต่อแบบ FC



ภาพที่ 30 การติดตั้งใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดเข้ากับตัวทำแสงขนาน

3.2.9 ติดตั้งใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดเส้น 1B และ เส้น 2B เข้ากับตัวตรวจวัดโฟตอนเดี่ยว SPCMs ซึ่งหัวเชื่อมต่อของใยแก้วนำแสงเป็นหัวต่อแบบ FC ดังภาพที่ 31



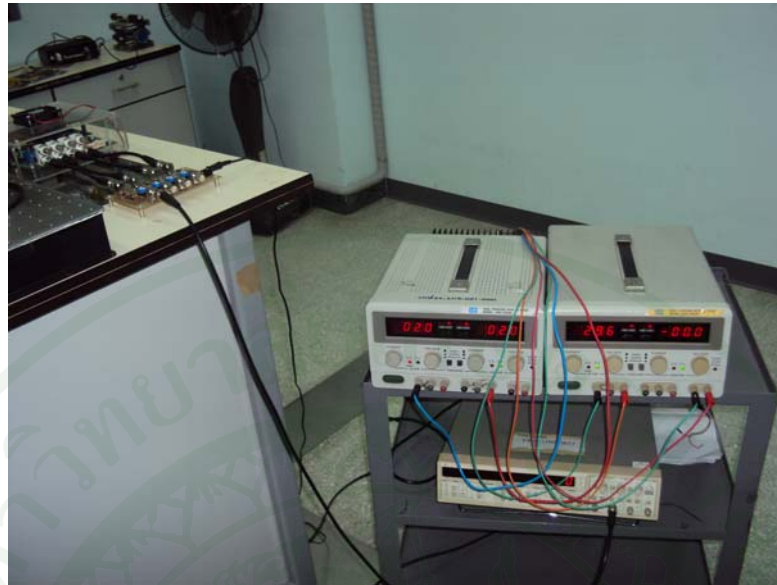
ภาพที่ 31 การติดตั้งใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดเข้ากับ SPCMs

3.2.10 ติดตั้งวงจรตรวจนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกันเข้ากับขาเอาต์พุตของ SPCMs ด้วยสายต่อที่มีหัวต่อแบบ BNC แล้วจ่ายไฟ 5 โวลต์ให้กับวงจรตรวจนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกัน ดังภาพที่ 32



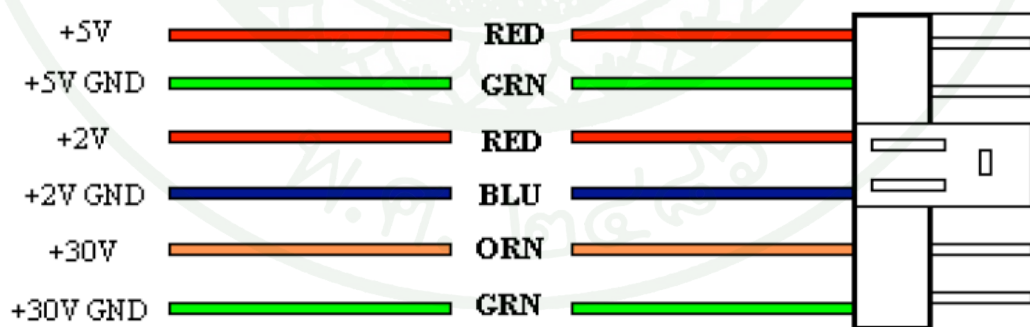
ภาพที่ 32 การติดตั้งวงจรตรวจนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกันเข้ากับเอาต์พุตของ SPCMs

3.2.11 ติดตั้งตัวตรวจนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกัน โดยการนำสายของตัวตรวจนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกันไปต่อกับสายสัญญาณเอาต์พุตของวงจรตรวจนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกัน แล้วจ่ายไฟให้กับตัวตรวจนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกัน ดังภาพที่ 33



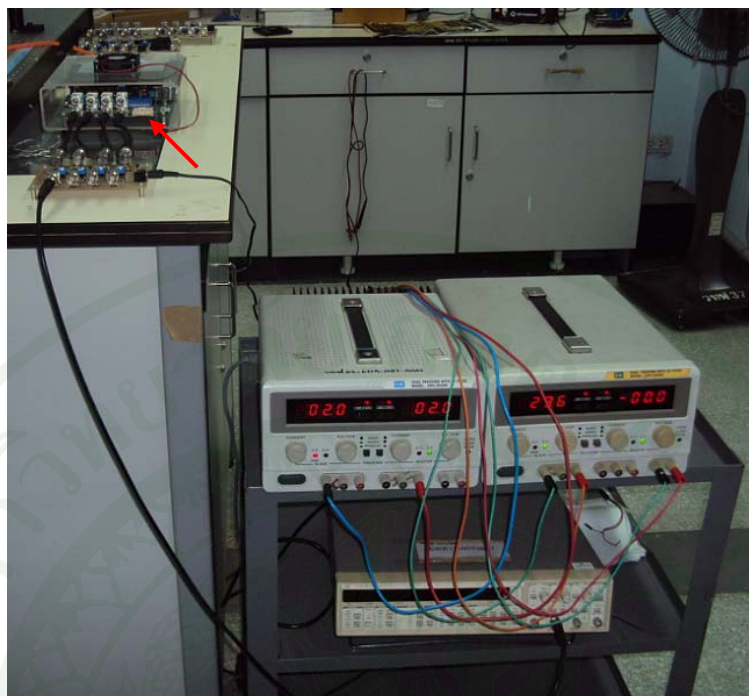
ภาพที่ 33 การติดตั้งตัวตรวจนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกัน

3.2.12 การติดตั้งตัวตรวจหาโฟตอนเดี่ยว SPCMs ตรวจสอบตัวตรวจวัดก่อนใช้งาน โดยเมื่อจ่ายไฟให้กับตัวตรวจนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกันและตัวตรวจวัดโฟตอนเดี่ยวแล้ว ตรวจสอบความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟของตัวตรวจวัดโฟตอนเดี่ยว ด้วยมัลติมิเตอร์ ที่ปลั๊กพลาสติกสีขาวให้ความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟมีค่า 5V, 2V และ 30V ตามลำดับ ดังภาพที่ 34



ภาพที่ 34 แสดงสายไฟของแหล่งจ่ายเพื่อจ่ายไฟให้กับตัวตรวจหาโฟตอนเดี่ยว SPCMs

3.2.13 หลังจากนั้นปิดไฟในห้องให้มืด อย่าให้มีแสงเข้ามาในห้อง แล้วสอดปลั๊กพลาสติกที่ตรวจสอบความต่างศักย์แล้ว เข้าไปในตัวตรวจวัดโฟตอนเดี่ยว SPCMs เพื่อให้ตัววัดโฟตอนเดี่ยวพร้อมทำงาน ดังภาพที่ 35



ภาพที่ 35 การติดตั้งตัวตรวจวัดโฟตอนเดี่ยว SPCMs

3.2.14 ทดสอบการจัดแนวลำแสงและอุปกรณ์ทางแสง เป้าหมายเพื่อให้ได้อัตราการนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกันมากที่สุดโดยการเคลื่อนที่แกนอลูมิเนียมทั้งสองไปที่มุม 3.0° จากแนวกึ่งกลางของลำแสงสีม่วง จากนั้นปรับแนวของตัวทำแสงขนานที่บรรจุอยู่ในตัวยึดอุปกรณ์ทางแสงที่เคลื่อนที่ได้ 6 ทิศทางของทั้งสองแกน จนได้อัตราการนับโฟตอนเดี่ยวจากคู่ของโฟตอน (single count rates) มากที่สุด แล้วเคลื่อนที่แกนอลูมิเนียมข้างใดข้างหนึ่งไปกลับรอบมุม 3.0° ดังกล่าวข้างต้น จนได้อัตราการนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกัน $N(\alpha, \beta)$ มากที่สุด โดยตั้งค่าให้แกนของตัวทำแสงโพลาไรซ์ A และ ตัวทำแสงโพลาไรซ์ B อยู่ 0° ทั้งคู่ $[N(0^\circ, 0^\circ)]$ และให้ช่วงเวลาของการตรวจนับเป็น 10 วินาที

4. สร้างสถานะพััวพันของคู่โฟตอน $|\phi^-\rangle$

4.1 ปรับโคเนแสงของสถานะ H และ V จากผลึก BBO ทั้งสองแผ่นให้ซ้อนทับกัน

4.1.1 เมื่อเคลื่อนที่แกนอลูมิเนียมทั้งสองไปที่มุม 0° จากแนวกึ่งกลางของลำแสงสีม่วง จากนั้นปรับแกนของตัวทำแสงโพลาไรซ์ A (α) และ B (β) ซึ่งเป็นตัวทำแสงโพลาไรซ์ที่ใช้

วิเคราะห์ โฟตอนสัญญาณ และโฟตอนไอเคลอร์ ตามลำดับ บิดให้แนวแกนของตัวทำแสงโพลาไรซ์ทั้งสองอยู่ในแนวแกนตั้ง (0°) จากนั้นทำการบิด ตัวยี่ดอุปกรณ์ทางแสงที่เคลื่อนที่ได้ 6 ทิศทาง ซึ่งบรรจุผลึก BBO ไว้ โดยที่แนวแกนของผลึกอยู่ในแนวตั้งหรือแนวราบ โดยการบิดให้แนวแกนของผลึกมีการหมุนรอบแกน x หรือ แกน y เท่านั้น จนอัตราการนับโฟตอนเดี่ยวจากคู่ของโฟตอนมากที่สุด จากนั้นเปลี่ยนมุมแนวแกนของตัวทำแสงโพลาไรซ์ทั้งสอง ให้อยู่ในแนวราบ (90°) แล้วทำการบิดแกนของตัวยี่ดอุปกรณ์ทางแสงในแนวแกนตรงกันข้ามกับที่กล่าวมาข้างต้น จนได้อัตราการนับโฟตอนเดี่ยวจากคู่ของโฟตอนมากที่สุดเช่นกัน

4.1.2 ทำการบิดแกนของตัวยี่ดอุปกรณ์ทางแสงที่เคลื่อนที่ได้ 6 ทิศทางซึ่งบรรจุผลึก BBO ไว้ให้เคลื่อนที่รอบแกน x และ y จนกระทั่งอัตราการนับโฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกัน $N(0^\circ, 0^\circ)$ หรือ $N(90^\circ, 90^\circ)$ มากที่สุด โดยที่ $N(0^\circ, 0^\circ)$ คือการบิดแนวแกนของตัวทำแสงโพลาไรซ์ A และ ตัวทำแสงโพลาไรซ์ B อยู่ที่ 0° ทั้งคู่ ส่วน $N(90^\circ, 90^\circ)$ คือการบิดแนวแกนของตัวทำแสงโพลาไรซ์ A และ ตัวทำแสงโพลาไรซ์ B อยู่ที่ 90° ทั้งคู่ โดยช่วงเวลาของการตรวจนับเป็น 10 วินาที

4.2 ปรับสถานะ $|\phi^-\rangle$

4.2.1 ปรับ θ โดยการหมุนมุมแผ่นครึ่งคลื่นไปที่ 22.5° ที่อยู่ก่อนหน้าผลึก BBO จะได้อัตราการนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกัน $N(0^\circ, 0^\circ)$ และ $N(90^\circ, 90^\circ)$ เท่ากัน โดยช่วงเวลาของการตรวจนับเป็น 10 วินาที แล้วติดตั้งแผ่นเลี้ยวคลื่นและแผ่นครึ่งคลื่นบนแขนออลูมิเนียมทั้งสองข้าง ดังภาพที่ 24 และ 25 ปรับมุมไว้ที่ศูนย์องศาแล้วพิจารณาอัตราการนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกัน $N(0^\circ, 0^\circ)$ และ $N(90^\circ, 90^\circ)$ ให้มีจำนวนที่เท่ากัน และจะได้ $N(45^\circ, -45^\circ)$ มีอัตราการนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกันมีค่ามากที่สุดและจะมีค่าเท่ากับ $N(0^\circ, 0^\circ)$ และ $N(90^\circ, 90^\circ)$ โดยช่วงเวลาของการตรวจนับเป็น 10 วินาทีเช่นกัน

4.2.2 ปรับ ϕ โดยการใส่แผ่นครึ่งคลื่นและแผ่นเลี้ยวคลื่นชนิดหลายโหมดไว้ที่แขนออลูมิเนียมทั้งสองข้างแล้วสังเกตอัตราการนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกันของ $N(45^\circ, -45^\circ)$ จะมีค่ามากที่สุดและสถานะที่ได้คือ $|\phi^-\rangle = (|HH\rangle - |VV\rangle)/\sqrt{2}$ โดยที่ $N(45^\circ, -45^\circ)$ คือการบิดแนวแกนของตัวทำแสงโพลาไรซ์ A และ B ให้อยู่ที่ 45 และ -45 องศาตามลำดับ

5. วัดพัวพันกันทางโพลาริเซชันของคู่โฟตอนของสถานะ $|\phi^-\rangle$

5.1 บันทึกค่าอัตราการนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกัน $N(\alpha, \beta)$ โดยปรับให้แกนแสงของตัวทำแสงโพลาริซ A (α) อยู่ที่มุม 0° ในขณะที่มุมของตัวทำแสงโพลาริซ B (β) เปลี่ยนครั้งละ 15° จากนั้นเปลี่ยนมุมแนวแกนของตัวทำแสงโพลาริซ A ไปที่ 90° , -45° และ 45° ตามลำดับ ซึ่งตัวทำแสงโพลาริซ B (β) เปลี่ยนมุมทีละ 15° เช่นกัน โดยช่วงเวลาของการตรวจนับเป็น 10 วินาที

5.2 ทำการบันทึกอัตราการนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกัน $N(\alpha, \beta)$ ของตัวทำแสงโพลาริซ A (α) ที่มุม 45° ในขณะที่มุมของตัวทำแสงโพลาริซ B (β) เปลี่ยนครั้งละ 15° จากนั้นให้ทำการบันทึกอัตราการนับโฟตอนเดี่ยวจากคู่ของโฟตอน N_B ของตัวทำแสงโพลาริซ B ที่อยู่บนแขนอคูมินิยมด้านตรงข้ามกัน โดยเปลี่ยนมุมของตัวทำแสงโพลาริซ B ครั้งละ 15° ซึ่งที่แกนแสงของตัวทำแสงโพลาริซ A ยังคงทำมุม 45° เพื่อเปรียบเทียบกราฟระหว่างอัตราการนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกันและอัตราการนับโฟตอนเดี่ยวจากคู่ของโฟตอน โดยช่วงเวลาของการตรวจนับเป็น 10 วินาที

5.3 บันทึกค่าอัตราการนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกัน $N(0^\circ, 0^\circ)$, $N(90^\circ, 90^\circ)$, $N(45^\circ, 45^\circ)$ และ $N(0^\circ, 90^\circ)$ เพื่อหาสถานะพัวพัน จากสมการ (43) จะได้

$$C = N(0^\circ, 90^\circ) \quad (62)$$

$$A = N(0^\circ, 0^\circ) + N(90^\circ, 90^\circ) - 2C \quad (63)$$

$$\tan^2 \theta_\ell = \frac{N(90^\circ, 90^\circ) - C}{N(0^\circ, 0^\circ) - C} \quad (64)$$

$$\cos \phi_m = \frac{1}{\sin 2\theta_\ell} \left(4 \frac{N(45^\circ, 45^\circ) - C}{A} - 1 \right) \quad (43)$$

5.4 เขียนกราฟ ของการวัดพัวพันกันทางโพลาริเซชัน ของคู่โฟตอนของสถานะ $|\phi^-\rangle$ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราการนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกัน กับ มุมของตัวทำแสงโพลาริซ B (β) ที่เปลี่ยนครั้งละ 15°

5.5 เขียนกราฟระหว่างอัตราการนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกัน และ อัตราการนับโฟตอนเดี่ยวจากคู่ของโฟตอน ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราการนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกัน กับมุมของตัวทำแสงโพลาไรซ์ B (β) ที่เปลี่ยนครั้งละ 15° เพื่อตรวจสอบความพัวพันของสถานะ $|\phi^-\rangle$

6. ทดสอบสมการเบลล์

6.1 ทดสอบสมการเบลล์ของสถานะ $|\phi^-\rangle$

เมื่อได้สถานะ $|\phi^-\rangle$ แล้ว ให้ทำการทดสอบสมการเบลล์ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

6.1.1 หาค่าผลรวมของความน่าจะเป็น $E(\alpha, \beta)$ จากสมการ

$E(\alpha, \beta) = P_{VV}(\alpha, \beta) + P_{HH}(\alpha, \beta) - P_{VH}(\alpha, \beta) - P_{HV}(\alpha, \beta)$ ซึ่งต้องหาความน่าจะเป็น P เพื่อให้ได้ค่า $E(\alpha, \beta)$ โดยการวัดค่า $N(\alpha, \beta)$ 4 ค่า ดังต่อไปนี้

$P_{VV}(\alpha, \beta) = N(\alpha, \beta) / N_{tot}$, $P_{VH}(\alpha, \beta) = N(\alpha, \beta_\perp) / N_{tot}$, $P_{HV}(\alpha, \beta) = N(\alpha_\perp, \beta) / N_{tot}$ และ $P_{HH}(\alpha, \beta) = N(\alpha_\perp, \beta_\perp) / N_{tot}$ เมื่อ $N_{tot} = N(\alpha, \beta) + N(\alpha_\perp, \beta) + N(\alpha, \beta_\perp) + N(\alpha_\perp, \beta_\perp)$ ซึ่ง N_{tot} คือผลรวมของจำนวนนับนับทั้งหมดของคู่โฟตอน และ $\alpha_\perp, \beta_\perp$ คือการบิดมุมตัวทำแสงโพลาไรซ์เป็นมุม $\alpha + 90^\circ$ และ $\beta + 90^\circ$ ตามลำดับ ดังนั้นสามารถเขียนค่า $E(\alpha, \beta)$ ได้ดังสมการ

$$E(\alpha, \beta) = \frac{N(\alpha, \beta) + N(\alpha_\perp, \beta_\perp) - N(\alpha, \beta_\perp) - N(\alpha_\perp, \beta)}{N(\alpha, \beta) + N(\alpha_\perp, \beta_\perp) + N(\alpha, \beta_\perp) + N(\alpha_\perp, \beta)} \quad (65)$$

6.1.2 หาค่า S ซึ่งเป็นนิยามของ พัวพันกันของโพลาไรเซชัน (polarization correlation) จากคู่ของโฟตอน สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$S = E(a, b) - E(a, b') + E(a', b) + E(a', b')$$

เมื่อเลือกมุมของตัวทำแสงโพลาไรซ์ ดังต่อไปนี้ $a = 0^\circ$, $a' = 45^\circ$, $b = 22.5^\circ$, $b' = 67.5^\circ$

6.2 ทดสอบ อสมการเบลล์ ของสถานะ $|\phi^-\rangle$

จากหัวข้อ 4.2.2 เมื่อปรับสถานะจนได้สถานะ $|\phi^-\rangle$ ทำการทดสอบอสมการเบลล์ ซึ่งมีขั้นตอนเช่นเดียวกับ ข้อ 5.1

7. หาสภาพมองเห็นได้จากโพลาไรเซชันของสถานะ $|\phi^-\rangle$

หาสภาพมองเห็นได้จากสมการ

$$V = \frac{N_{Max} - N_{Min}}{N_{Max} + N_{Min}} \times 100\% \quad (66)$$

เมื่อ N_{Max} และ N_{Min} คือจำนวนนับโฟตอนที่มากที่สุดและน้อยที่สุด ตามลำดับ

8. หาความไม่แน่นอนของ สภาพมองเห็นได้จากสถานะ $|\phi^-\rangle$

8.1 คำนวณความไม่แน่นอน ของจำนวนนับโฟตอน (N) จากสมการ

$$\sigma_N = \sqrt{N} \quad (67)$$

8.2 คำนวณความไม่แน่นอน (uncertainty) ของสภาพมองเห็นได้จากสมการ

$$\sigma_V = \left(\frac{2}{(N_{Max} + N_{Min})^2} \right) \sqrt{N_{Min}^2 N_{Max} + N_{Max}^2 N_{Min}} \quad (68)$$

9. หาค่าความไม่แน่นอนของค่า S ที่เกิดขึ้นจากการวัดของสถานะ $|\phi^-\rangle$

9.1 คำนวณความไม่แน่นอน ของจำนวนนับโฟตอน ครั้งที่ i (N_i) จากสมการ

$$\sigma_{N_i} = \sqrt{N_i} \quad (69)$$

9.2 จำนวนความไม่แน่นอน ของปริมาณ S จากสมการ

$$\sigma_s = \sqrt{\sum_{i=1}^{16} (\sigma_{N_i} \frac{\partial S}{\partial N_i})^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^{16} N_i (\frac{\partial S}{\partial N_i})^2} \quad (70)$$



ผลและวิจารณ์

1. ผลของการสร้างสถานะพัวพันของคู่โฟตอน $|\phi^-\rangle$

ปรับ θ_c โดยการหมุนมุมแผ่นครึ่งคลื่นย่านอุลตราไวโอเรต ที่อยู่ก่อนหน้าผลึก BBO ไปครั้งละ 1° จนได้อัตราการนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกัน $N(0^\circ, 0^\circ)$ และ $N(90^\circ, 90^\circ)$ เท่ากัน พบว่าอัตราการนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกันมีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด คือ 22.5° มีค่าประมาณ 500 คู่โฟตอนต่อ 10 วินาที แล้วทำการปรับ ϕ_c โดยการใส่แผ่นครึ่งคลื่นและแผ่นเลี้ยวคลื่นชนิดหลายโหมดที่แขนอลูมิเนียมทั้งสองข้างแล้วปรับแผ่นเลี้ยวคลื่นโดยการบิครอบแกนตั้งและปรับมุมที่เหมาะสมแล้วพิจารณาจนได้อัตราการนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกัน $N(45^\circ, -45^\circ)$ มากที่สุด และ $N(45^\circ, 45^\circ)$ น้อยที่สุดมีค่าประมาณ 500 และ 50 คู่โฟตอนต่อ 10 วินาทีตามลำดับแล้วเราจะได้คู่โฟตอนที่มีความพัวพันกันด้วยสถานะ $|\phi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|H_s\rangle|H_i\rangle - |V_s\rangle|V_i\rangle)$

2. ผลของการวัดพัวพันกันทางโพลาไรเซชันของคู่โฟตอนของสถานะ $|\phi^-\rangle$

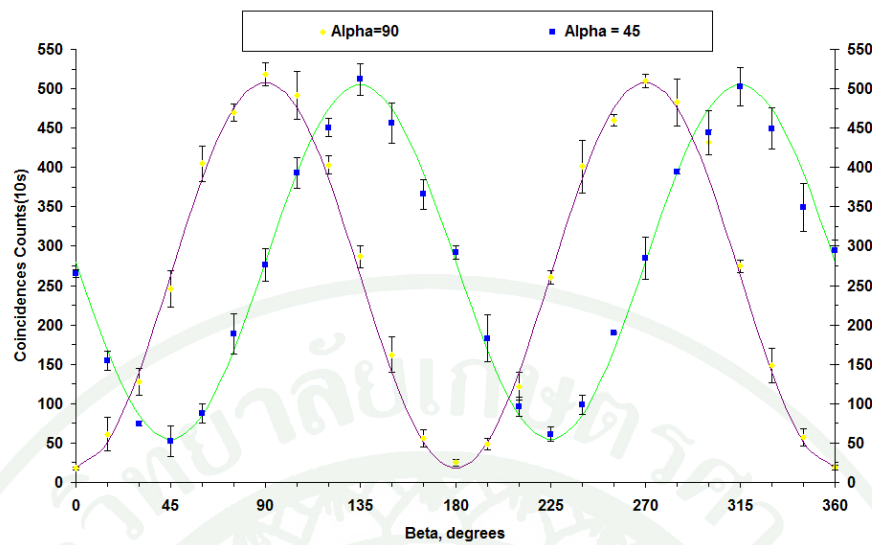
ตารางที่ 1 ตารางบันทึกอัตราการนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกันที่มุม A (α) ต่างจำนวน 3 ครั้งในเวลา 10 วินาที แล้วหาค่าเฉลี่ย N_{av} ในขณะที่มุมของตัวทำแสงโพลาไรซ์ B (β) เปลี่ยนครั้งละ 15°

	มุมตัวทำแสงโพลาไรซ์ B ($^\circ$)				N_{av}
	A = 0	A = 90	A = 45	A = -45	
0	487.3333333	18	265.3333333	238	
15	460.6666667	61.33333333	154.6666667	358	
30	376	128	74.66666667	404.6666667	
45	275.3333333	246	52	466	
60	126.6666667	404.6666667	88	398	
75	55.33333333	469.3333333	188.6666667	351.3333333	
90	18	518.3333333	276	257.3333333	
105	67.33333333	491.3333333	393.3333333	160.6666667	

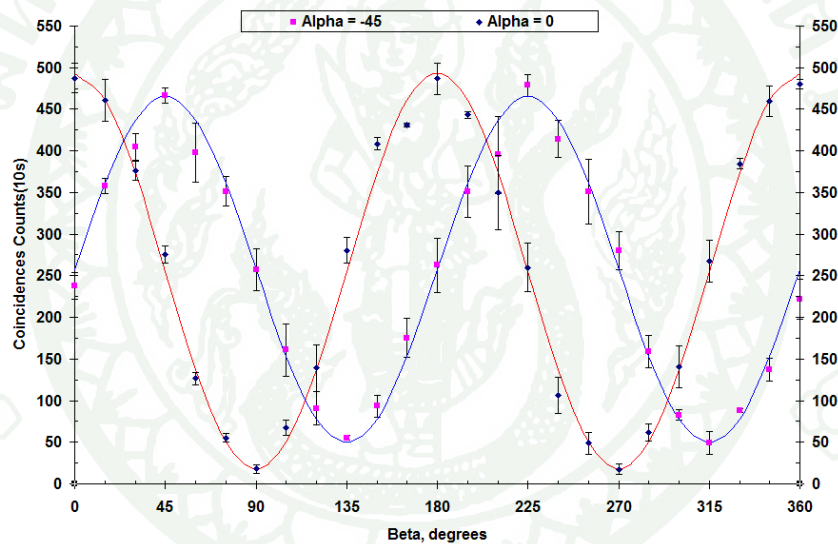
ตารางที่ 1 (ต่อ)

มุมตัวทำแสงโพลาไรซ์ B (°)	N_{av}			
	A = 0	A = 90	A = 45	A = -45
120	139.3333333	403.3333333	450.6666667	90.66666667
135	280.6666667	286.6666667	512	55.33333333
150	408.6666667	162	456.6666667	93.33333333
165	431.3333333	56	366	175.3333333
180	486.6666667	25.33333333	292	262.6666667
195	443.3333333	48.66666667	182.6666667	351.3333333
210	350	122	96	395.3333333
225	260	260	61.33333333	478.6666667
240	106.6666667	401.3333333	98.66666667	414
255	48.66666667	460	189.3333333	351.3333333
270	17.33333333	510	284.6666667	280
285	61.33333333	482.6666667	394.6666667	158.6666667
300	140.6666667	432	444	82.66666667
315	267.3333333	274.6666667	502.6666667	49.33333333
330	384.6666667	148.6666667	449.3333333	88
345	459.3333333	57.33333333	349.3333333	137.3333333
360	480	19.33333333	294.3333333	222

ผลของการวัดพัวพันกันทางโพลาไรเซชันของคู่โฟตอนของสถานะ $|\phi^-\rangle$ แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกัน กับ มุมของตัวทำแสงโพลาไรซ์ B (β) ที่เปลี่ยนครั้งละ 15° ดังภาพที่ 37



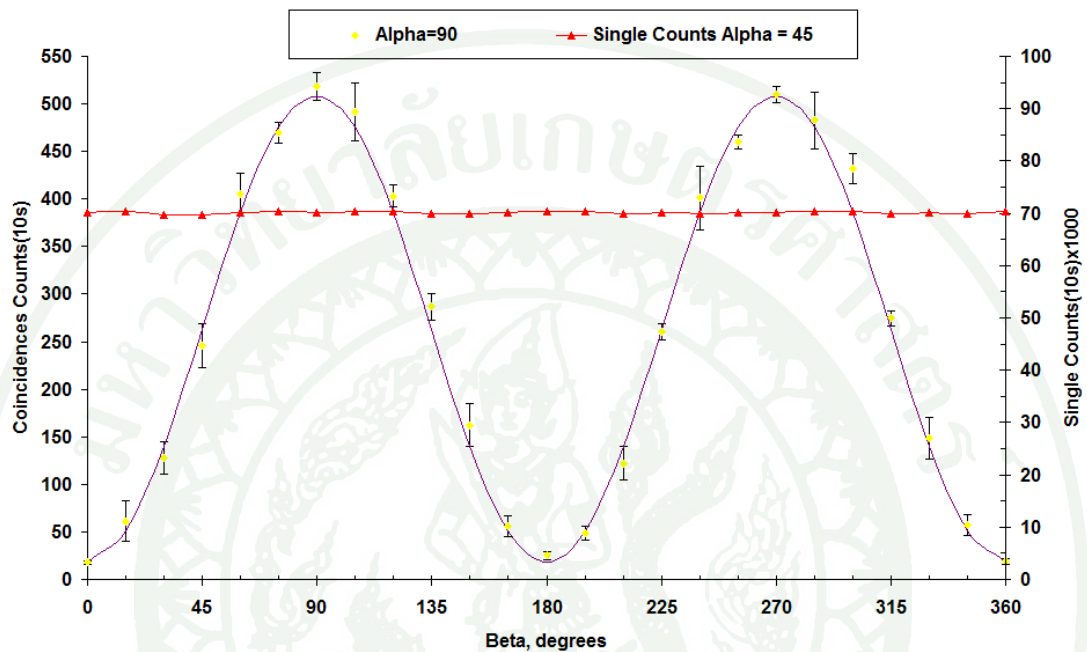
(a)



(b)

ภาพที่ 36 (a) $\alpha = 90^\circ$ คือแนวแกนของตัวทำแสงโพลาไรซ์ A อยู่ที่ 90° (สีเหลี่ยมสีเหลือง) และ $\alpha = 45^\circ$ คือแนวแกนของตัวทำแสงโพลาไรซ์ A (α) อยู่ที่ 45° (สีเหลี่ยมสีน้ำเงิน) ในขณะที่มุมของตัวทำแสงโพลาไรซ์ B (β) เปลี่ยนครั้งละ 15° ภาพ (b) $\alpha = 0^\circ$ คือแนวแกนของตัวทำแสงโพลาไรซ์ A อยู่ที่ 0° (สีเหลี่ยมสีน้ำเงินเข้ม) และ $\alpha = -45^\circ$ คือแนวแกนของตัวทำแสงโพลาไรซ์ A อยู่ที่ -45° (สีเหลี่ยมสีชมพู) ในขณะที่มุมของตัวทำแสงโพลาไรซ์ B (β) เปลี่ยนครั้งละ 15° เช่นกัน จากภาพ (a) และ (b) แสดงให้เห็นว่าโฟตอนสัญญาณ และ โฟตอนไอเดลอร์ มีความพัวพันกันถึงแม้ว่าโฟตอนทั้งคู่จะอยู่คนละตำแหน่ง กันก็ตาม (ไม่เฉพาะที่)

ผลการตรวจสอบความพัวพันของสถานะ $|\phi^-\rangle$ แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราการนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อม (แกนด้านซ้าย) และ อัตราการนับโฟตอนเดี่ยวจากคู่ของโฟตอน (แกนด้านขวา) โดยช่วงเวลาของการตรวจนับเป็น 10 วินาที ทั้งสองแกน ดังภาพที่ 37



ภาพที่ 37 โพลาริเซชันของอัตราการนับโฟตอนเดี่ยวจากคู่ของโฟตอน (สีแดง) ของแกนด้านขวา และอัตราการนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกัน (สีม่วง) ของแกนด้านซ้าย

จากภาพที่ 38 เป็นการวัดโพลาริเซชันของโฟตอนที่พัวพันของสถานะ $|\phi^-\rangle$ แนวแกนของตัวทำแสงโพลาริซที่แกน A อยู่ที่ 90° (โฟตอนสัญญาณ) ในขณะที่ตัวทำแสงโพลาริซที่แกน B (โฟตอนไอเคิลอร์) เปลี่ยนมุมครั้งละ 15° อัตราการนับโฟตอนเดี่ยวจากคู่ของโฟตอน (สามเหลี่ยมสีแดงของแกนด้านขวามือ) จะให้รูปไซน์ (sinusoidal fringes) ที่ค่อนข้างจะเรียบมีสภาพมองเห็นได้ $V < 0.5\%$ นั่นคืออัตราการนับโฟตอนเดี่ยวจากคู่ของโฟตอนจะไม่มีโพลาริเซชัน ในขณะที่อัตราการนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกัน (สี่เหลี่ยมสีเหลืองของแกนด้านซ้ายมือ) จะมีพัวพันกันทางกลศาสตร์ควอนตัม ปรับเส้นโค้งด้วยสมการ (43) จะได้สภาพมองเห็นได้ $V = 93.2\%$ แสดงให้เห็นว่าสถานะของคู่โฟตอนเป็นสถานะพัวพันกัน

3. ทดสอบสมการเบลล์ ของสถานะ $|\phi^-\rangle$

3.1 การหาค่าพารามิเตอร์เบลล์ S เพื่อทดสอบสมการเบลล์ของสถานะ $|\phi^-\rangle$ ทำได้ดังต่อไปนี้

$$3.1.1 \text{ จากสมการ } E(\alpha, \beta) = \frac{N(\alpha, \beta) + N(\alpha_\perp, \beta_\perp) - N(\alpha, \beta_\perp) - N(\alpha_\perp, \beta)}{N(\alpha, \beta) + N(\alpha_\perp, \beta_\perp) + N(\alpha, \beta_\perp) + N(\alpha_\perp, \beta)}$$

และ $S = E(a, b) - E(a, b') + E(a', b) + E(a', b')$ เมื่อเลือกมุมของตัวทำแสงโพลาไรซ์ดังต่อไปนี้ $a = 0^\circ, a' = 45^\circ, b = 22.5^\circ, b' = 67.5^\circ$ นำข้อมูลจากตารางที่ 4 มาคำนวณจะได้ค่า $S = 2.55 > 2$ ซึ่งฝ่าฝืน สมการเบลล์

ตารางที่ 2 บันทึก อัตราการนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกัน (N) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของมุมโพลาไรเซอร์ α, β ช่วงเวลาของการตรวจนับเป็น 10 วินาทีจำนวน 3 ครั้งเฉลี่ย หน้าต่างเวลาของอัตราการนับคู่โฟตอนที่ เกิดขึ้นพร้อมกัน $\tau = 25$ นาโนวินาที

α	β	1	2	3	N_{av}
-45°	-22.5°	102	98	118	106
-45°	22.5°	402	396	404	400.667
-45°	67.5°	444	418	414	435.333
-45°	112.5°	114	96	106	105.333
0°	-22.5°	458	444	436	446
0°	22.5°	440	424	452	438.667
0°	67.5°	86	80	64	76.6667
0°	112.5°	106	78	96	93.3333
45°	-22.5°	448	462	466	458.667
45°	22.5°	114	106	92	104
45°	67.5°	134	132	120	128.667
45°	112.5°	454	478	456	462.667
90°	-22.5°	100	76	110	95.3333
90°	22.5°	94	84	80	86
90°	67.5°	468	468	470	468.6667
90°	112.5°	528	482	476	495.333

3.1.2 คำนวณความไม่แน่นอนของ จำนวนนับโฟตอนครั้งที่ i (N_i) คือ

$$\sigma_{N_i} = \sqrt{N_i}$$

3.1.3 คำนวณความไม่แน่นอน (uncertainty) ของปริมาณ S คือ

$$\sigma_s = \sqrt{\sum_{i=1}^{16} (\sigma_{N_i} \frac{\partial S}{\partial N_i})^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^{16} N_i (\frac{\partial S}{\partial N_i})^2}$$

จากการคำนวณได้ $\sigma_{N_i} = 0.046$ ดังนั้นพารามิเตอร์เบลล์ $S = 2.55 \pm 0.046$

ซึ่งพารามิเตอร์เบลล์ S ฝ่าฝืนอสมการเบลล์มากกว่า 12 เท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าที่ได้นี้จะขัดแย้งกับ HVTs แต่สอดคล้องกับกลศาสตร์ควอนตัม

จากตารางที่ 3 แสดงให้เห็นถึงการฝ่าฝืน อสมการเบลล์ ซึ่งพารามิเตอร์เบลล์ $|S| \leq 2$ จะเห็นว่าในทุกสถานะของ EPR- Bell จะฝ่าฝืน อสมการเบลล์ โดยที่สถานะ $|\phi^-\rangle$ มีการฝ่าฝืน อสมการเบลล์ มากกว่า 12 เท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

4. หาคความสัมพันธ์ของสภาพมองเห็นเมื่อเปลี่ยนความถี่ในการกล้ำสัญญาณเลเซอร์ได้ของสถานะ $|\phi^-\rangle$

4.1 ทำการปรับฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ ให้มีความถี่ 100 - 15000 Hz โดยใช้ ออสซิลโลสโคปวัดให้มีแอมพลิจูด 960 mV และ offset 1.6 V แล้วบันทึกข้อมูลดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 บันทึกอัตราการนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกัน (N) ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับความถี่ ช่วงเวลาของการตรวจนับเป็น 10 วินาทีจำนวน 3 ครั้งเฉลี่ย หน้าต่างเวลาของอัตราการนับคู่โฟตอนที่ เกิดขึ้นพร้อมกัน $\tau = 25$ นาโนวินาที

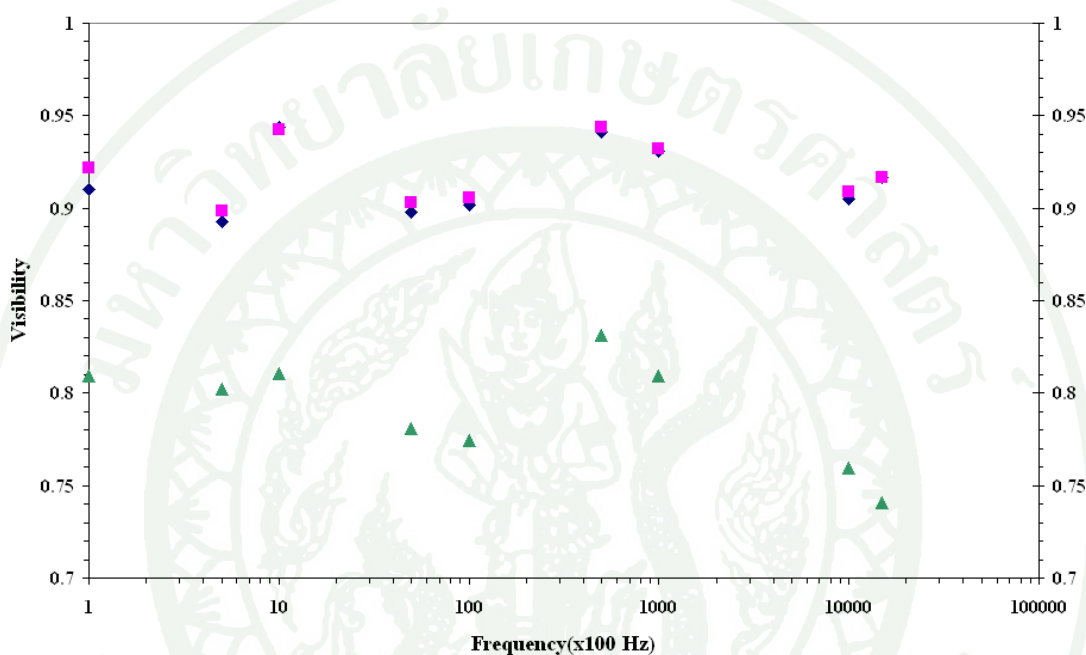
Frequency (x100 Hz)	N_{av}				
	N(0, 0)	N(90, 90)	N(0, 90)	N(45, 45)	N(45, -45)
1	537.3333333	624.6666667	25.33333333	60	569.3333333
5	565.3333333	598	32	62	564
10	529.3333333	519.3333333	15.33333333	51.33333333	490
50	408	431.3333333	22	50.66666667	412
100	465.3333333	484	24	60	471.3333333
500	484	508.6666667	14.66666667	42.66666667	462.6666667
1000	466.6666667	476.6666667	16.66666667	50.66666667	480
10000	294	307.3333333	14.66666667	38.66666667	282.6666667
15000	184	183.3333333	8	27.33333333	183.3333333

4.2 หาสภาพมองเห็นได้โดยใช้สมการที่ (44) กำหนดให้ $N(0,0)$, $N(90,90)$ และ $N(45,-45)$ คือ $N_{\max}$, $N(0,90)$ และ $N(45,45)$ คือ $N_{\min}$ แล้วบันทึกผลดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สภาพมองเห็นได้ของเวกเตอร์ฐานในแนวระดับ (H) แนวตั้ง (V) และ ± 45 กับความถี่ในการกล้ำสัญญาณเลเซอร์ไดโอด

Frequency(x100 Hz)	H	V	± 45
1	0.909952607	0.922051282	0.809322034
5	0.892857143	0.898412698	0.801916933
10	0.94369645	0.942643392	0.810344828
50	0.897674419	0.902941176	0.780979827
100	0.901907357	0.905511811	0.774153074
500	0.941176471	0.943949045	0.831134565
1000	0.931034483	0.932432432	0.809045226
10000	0.904967603	0.908902692	0.7593361
15000	0.916666667	0.916376307	0.740506329

ผลของการหาสภาพมองเห็นได้ที่เป็นฟังก์ชันกับความถี่ของโฟตอนที่พัวพันของสถานะ $|\phi^-\rangle$ แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพมองเห็นได้ กับความถี่พบว่าสภาพมองเห็นได้ของโฟลาไรเซชันในแนวดิ่งและแนวระดับมีลักษณะเป็นเส้นตรงมีค่าอยู่ระหว่าง 90%-95% ในขณะที่สภาพมองเห็นได้สำหรับโฟลาไรเซชันในแนว 45 องศา มีค่าประมาณ 74%-83% ดังภาพที่ 38



ภาพที่ 38 สภาพมองเห็นได้กับความถี่ของเลเซอร์บีม สภาพมองเห็นได้สำหรับโฟลาไรเซชันในแนวระดับ (สี่เหลี่ยม) จะมีค่าเท่ากับสภาพมองเห็นได้สำหรับโฟลาไรเซชันในแนวดิ่ง (สี่เหลี่ยมจัตุรัส) ซึ่งจะมีค่ามากกว่าสภาพมองเห็นได้สำหรับโฟลาไรเซชันในแนว 45 องศา (สามเหลี่ยม)

5. หาความสัมพันธ์ของสภาพมองเห็นได้กับขนาดของแผ่นกั้นแสง (iris size)

5.1 ปรับความกว้างของแผ่นกั้นแสงให้มีขนาดเริ่มต้นประมาณ 2 มิลลิเมตรโดยใช้ความถี่ในการกล้ำสัญญาณเลเซอร์ไดโอด 50 กิโลเฮิร์ต แล้วบันทึกผลดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 บันทึกอัตราการนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกัน (N) ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับความกว้างของแผ่นกั้นแสง ช่วงเวลาของการตรวจนับเป็น 10 วินาทีจำนวน 3 ครั้งเฉลี่ย หน้าต่างเวลาของอัตราการนับคู่โฟตอนที่ เกิดขึ้นพร้อมกัน $\tau = 25$ นาโนวินาที

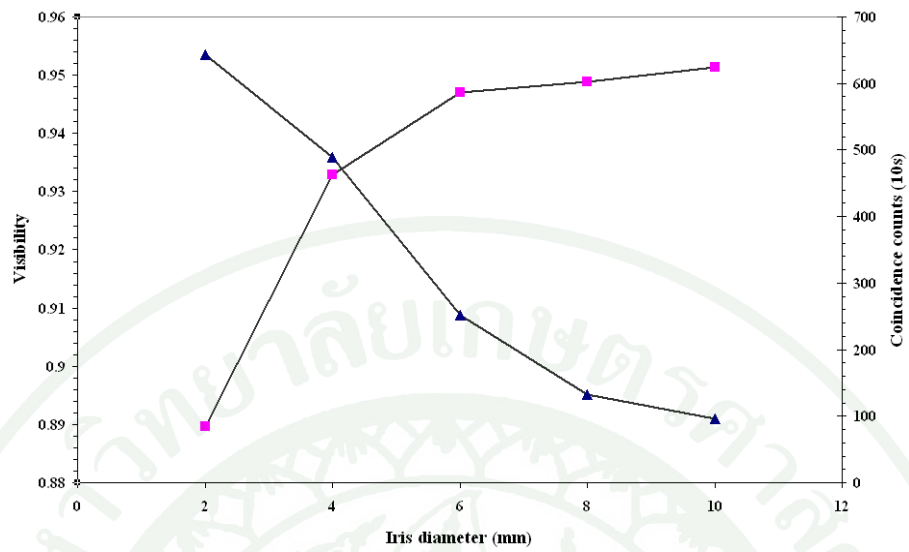
Iris size (mm)	N_{av}				
	N(0, 0)	N(90, 90)	N(0, 90)	N(45, 45)	N(45, -45)
2	84	81.33333333	2	5.333333333	77.33333333
4	462.6666667	508.6666667	15.33333333	54.66666667	480.6666667
6	586	633.3333333	28	65.33333333	630.6666667
8	602.6666667	600	33.33333333	60	643.3333333
10	624	628.6666667	36	80.66666667	624

5.2 หาสภาพมองเห็นได้โดยใช้สมการที่ (44) กำหนดให้ $N(0,0)$, $N(90,90)$ และ $N(45,-45)$ คือ N_{max} , $N(0,90)$ และ $N(45,45)$ คือ N_{min} แล้วบันทึกผลดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 สภาพมองเห็นได้ของเวกเตอร์ฐานในแนวระดับ (H) แนวตั้ง (V) และ ± 45 กับความกว้างของแผ่นกั้นแสง

Iris size (mm)	H	V	± 45
2	0.953488372	0.952	0.870967742
4	0.935843794	0.941475827	0.795765878
6	0.908794788	0.915322581	0.812260536
8	0.895178197	0.894736842	0.829383886
10	0.890909091	0.891675025	0.771050142

ผลของการหาสภาพมองเห็นได้ที่เป็นฟังก์ชันกับความกว้างของแผ่นกั้นแสง ห่างจากผลึก BBO ประมาณ 1 เมตร ก่อนจะถึงตัวตรวจหาโฟตอนเดี่ยว พบว่าในขณะที่ความกว้างของแผ่นกั้นแสงเพิ่มขึ้นสภาพมองเห็นได้จะมีค่าลดลงและอัตราการนับคู่โฟตอนที่มาถึงตัวตรวจหาโฟตอนเดี่ยวพร้อมกันมีค่าเพิ่มขึ้น ที่ความกว้างของแผ่นกั้นแสงมีค่ามากที่สุดอัตราการนับคู่โฟตอนที่มาถึงตัวตรวจหาโฟตอนเดี่ยวพร้อมกันมีค่า 62 คู่ต่อวินาที ดังภาพที่ 39



ภาพที่ 39 สภาพมองเห็นได้กับความกว้างของแผ่นกั้นแสง (สามเหลี่ยม แกนซ้ายมือ) และอัตราการนับคู่โฟตอนที่มาถึงตัวตรวจหาโฟตอนเดี่ยวพร้อมกัน (สี่เหลี่ยม แกนขวามือ)

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

ในการวิจัยได้สร้างโพลาริเซชันจากสถานะพััวพันของคู่โฟตอน $|\phi^-\rangle$ โดยใช้ เลเซอร์ไดโอดลำแสงสีม่วงความยาวคลื่น 405 นาโนเมตร และ ผลึก BBO 2 แผ่นเป็นแหล่ง กำเนิดของคู่โฟตอนพััวพันและชดเชยความเร็วเฟสของคู่โฟตอนพััวพันด้วยแผ่นครึ่งคลื่นและแผ่นเลี้ยวคลื่น

1. สร้างสถานะพััวพันของคู่โฟตอน $|\phi^-\rangle$

ปรับ θ โดยการหมุนมุมแผ่นครึ่งคลื่นย่านอัลตราไวโอเรต ที่อยู่ก่อนหน้าผลึก BBO ไป ครั้งละ 1° จนได้อัตราการนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกัน $N(0^\circ, 0^\circ)$ และ $N(90^\circ, 90^\circ)$ เท่ากัน พบว่าอัตราการนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกันมีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด คือ 22.5° มีค่าประมาณ 500 คู่โฟตอนต่อ 10 วินาทีแล้วทำการปรับ ϕ โดยการใส่แผ่นครึ่งคลื่นและแผ่นเลี้ยวคลื่นชนิดหลายโหมดที่แขนอคูมินิยมทั้งสองข้างแล้วปรับแผ่นเลี้ยวคลื่นโดยการบิดรอบแกนตั้งและปรับมุมที่เหมาะสมแล้วพิจารณาจนได้อัตราการนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกัน $N(45^\circ, -45^\circ)$ มากที่สุด และ $N(45^\circ, 45^\circ)$ น้อยที่สุดมีค่าประมาณ 500 และ 50 คู่โฟตอนต่อ 10 วินาทีตามลำดับแล้วเราจะได้คู่โฟตอนที่มีความพััวพันกันด้วยสถานะ $|\phi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|H_s\rangle|H_i\rangle - |V_s\rangle|V_i\rangle)$

2. วัดพััวพันกันทางโพลาริเซชันของคู่โฟตอน ของสถานะ $|\phi^-\rangle$

ผลของการวัดพััวพันกันทางโพลาริเซชันของคู่โฟตอนของสถานะ $|\phi^-\rangle$ แสดงให้เห็นว่าโฟตอนสัญญาณ และ โฟตอนไอเดิลอร์ มีพััวพันกันกันถึงแม้ว่าโฟตอนทั้งสองจะอยู่คนละตำแหน่ง (ไม่เฉพาะที่) ส่วนผลการตรวจสอบความพััวพันของสถานะ $|\phi^-\rangle$ แสดงว่าสถานะของคู่โฟตอนเป็นสถานะพััวพันกัน

3. ทดสอบ อสมการเบลล์ ของสถานะ $|\phi^-\rangle$

ผลของการทดสอบ อสมการเบลล์ ของสถานะ $|\phi^-\rangle$ โดยการหาค่าพารามิเตอร์เบลล์ S พบว่า พารามิเตอร์เบลล์ $S = 2.55 \pm 0.046$ ซึ่งฝ่าฝืนอสมการเบลล์มากกว่า 12 เท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งจะขัดแย้งกับทฤษฎีตัวแปรแฝงที่เป็นจริงเฉพาะที่

4. หาคความสัมพันธ์ของสภาพมองเห็นเมื่อเปลี่ยนความถี่ในการกล้ำสัญญาณเลเซอร์ได้ของสถานะ $|\phi^-\rangle$

ผลของการหาสภาพมองเห็นได้ที่เป็นฟังก์ชันกับความถี่ของโฟตอนที่พัฟฟันของสถานะ $|\phi^-\rangle$ แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพมองเห็นได้ กับความถี่พบว่าสภาพมองเห็นได้ของโพลาริเซชันในแนวตั้งและแนวระดับมีลักษณะเป็นเส้นตรงมีค่าอยู่ระหว่าง 90%-95% ในขณะที่สภาพมองเห็นได้สำหรับโพลาริเซชันในแนว 45 องศา มีค่าประมาณ 74%-83%

5. หาคความสัมพันธ์ของสภาพมองเห็นได้กับขนาดของแผ่นกั้นแสง (iris size)

ผลของการหาสภาพมองเห็นได้ที่เป็นฟังก์ชันกับความกว้างของแผ่นกั้นแสง ห่างจากผลึก BBO ประมาณ 1 เมตร ก่อนจะถึงตัวตรวจหาโฟตอนเดี่ยว พบว่าในขณะที่ความกว้างของแผ่นกั้นแสงเพิ่มขึ้นสภาพมองเห็นได้จะมีค่าลดลงและอัตราการนับคู่โฟตอนที่มาถึงตัวตรวจหาโฟตอนเดี่ยวพร้อมกันมีค่าเพิ่มขึ้น ที่ความกว้างของแผ่นกั้นแสงมีค่ามากที่สุดอัตราการนับคู่โฟตอนที่มาถึงตัวตรวจหาโฟตอนเดี่ยวพร้อมกันมีค่า 62 คู่ต่อวินาที

6. หาสภาพมองเห็นได้ (visibility) จากโพลาริเซชัน ของสถานะ $|\phi^-\rangle$

ผลของการหาสภาพมองเห็นได้จากโพลาริเซชันของสถานะ $|\phi^-\rangle$ ที่ปรับไค้งด้วยสมการ $\cos^2(\alpha + \beta)$ มีสภาพมองเห็นได้ พบว่าสภาพมองเห็นได้จากโพลาริเซชันเป็นฟังก์ชันกับความถี่ในการกล้ำสัญญาณเลเซอร์และแผ่นกั้นแสงที่อยู่ห่างจากผลึก BBO 1 เมตร ก่อนจะถึงตัวตรวจหาโฟตอนเดี่ยว สภาพมองเห็นได้ของโพลาริเซชันในแนวตั้งและแนวระดับมีลักษณะเป็นเส้นตรงมีค่าอยู่ระหว่าง 90%-95% และที่สภาพมองเห็นได้สำหรับโพลาริเซชันในแนว 45 องศา มีค่าประมาณ 74%-83%

ข้อเสนอแนะ

1. ในการชดเชยเฟสที่เหมาะสมต้องใช้ความหนาของแผ่นควอทซ์ที่พอดีเพื่อจะทำให้สภาพมองเห็นได้ของสถานะของคู่โฟตอนที่พัวพันกันมีค่ามากขึ้น
2. เมื่อสร้างแหล่งกำเนิดคู่โฟตอนที่พัวพันกันได้แล้ว นอกจากการวัดด้วยอสมการเบลล์แล้ว ควรใช้วิธีการวัดอย่างอื่นด้วย เช่นสถานะควอนตัมโทโมกราฟี และพยานความพัวพัน เพื่อเป็นการยืนยันการพัวพันกันของคู่โฟตอน
3. ควรนำแหล่งกำเนิดคู่โฟตอนที่พัวพันกันไปประยุกต์ใช้ในการสื่อสาร เช่น วิทยาการเข้ารหัสลับเชิงควอนตัม การเข้ารหัสลับแบบบีบอัด การขนส่งทางไกล และการคำนวณเชิงควอนตัม เป็นต้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- Shor, P. 1997. Polynomial-time algorithms for prime number factorization and discrete logarithms on a quantum computer. **SIAM J. Comp.** 26, 1484–1509.
- Bennett, Ch. H., G. Brassard, C. Cr'epeau, R. Jozsa, A. Peres and W. K. Wootters. 1993. Teleporting an unknown quantum state via dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen channels. **Phys. Rev. Lett.** 70. 1895–1899.
- Cleve, R. and H. Buhrman. 1997. Substituting quantum entanglement for communication. **Phys. Rev. A.** 56. 1201–1204.
- Ekert, A. K. 1991. Quantum cryptography based on Bell's theorem. **Phys. Rev. Lett.** 67. 661–663.
- Clauser, J. F., M. A. Horne, A. Shimony and R. A. Holt. 1969. Proposed experiment to test local hidden variable theories. **Phys. Rev. Lett.** 23(15): 880–884.
- Jennewein, T., Ch. Simon, G. Weihs, H. Weinfurter and A. Zeilinger. 2000. Quantum cryptography with entangled photons. **Phys. Rev. Lett.** 84. 4729–4732.
- Naik, D. S., C. G. Peterson, A. G. White, A. J. Berglund and P. G. Kwiat. 2000. Entangled state quantum cryptography: eavesdropping on the Ekert protokol. **Phys. Rev. Lett.** 84. 4733–4736.
- Feynman, R. P., R. B. Lighton and M. Sands. 1996. **The Feynman Lecture on Physics.** Addison-Wesley Publ. USA.

- Tittel, W., J. Brendel, H. Zbinden and N. Gisin. 2000. Quantum cryptography using entangled photons in energy-time bell states. **Phys. Rev. Lett.** 84. 4737–4740.
- Bouwmeester, D., J.-W. Pan, K. Mattle, M. Eibl, H. Weinfurter and A. Zeilinger. 1997. Experimental quantum teleportation. **Nature (London)** 390. 575–579.
- Pittman, T. B., B. C. Jacobs and J. D. Franson. 2002. Demonstration of nondeterministic quantum logic operations using linear optical elements. **Phys. Rev. Lett.** 88. 257902.
- Migdall, A. 1999. Correlated-photon metrology without absolute standards. **Physics Today January**. 41–46.
- Teich, M. C. and B. E. A. Saleh. 1998. Entangled-photon microscopy, spectroscopy, and display. **U. S. Patent**. 5. 796. 477.
- Kwiat, P. G., K. Mattle, H. Weinfurter, A. Zeilinger, A. V. Sergienko and Y. Shih. 1995. New high-intensity source of polarization-entangled photon pairs. **Phys. Rev. Lett.** 75. 4337-434.
- Dehlinger, D. and M. W. Mitchell. 2002. Entangled photons, nonlocality, and Bell inequalities in the undergraduate laboratory. **Am. J. Phys.** 70(9):903–910.
- Einstein, A., B. Podolsky and N. Rosen. 1935. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?. **Phys. Rev.** 47: 777-780.
- Boonkham, K. 2009. **Single Photon Source for Quantum Cryptography System**. M.S. Thesis, Kasetsart University.
- Bell, J. S. 1964. On the Einstein-Podolsky-Rosen paradox. **Physics (Long Island City)**. 1: 195-200.

- Altepeter, J. B., E.R. Jeffrey and P.G. Kwiat. 2005. Experimental Methods for Detecting Entanglement. **Phys. Rev. Lett.** 95(3): 033601.
- Peter, N.A., J.B. Altepeter, D. Branning, E.R. Jeffrey, T.-C. Wei and P.G. Kwiat. 2004. Maximally Entangled Mixed States: Creation and Concentration. **Phys. Rev. Lett.** 92(13):133601.
- Aiello, A., G. Puentes, D. Voigt and J. P. Woerdman. 2007. Maximally entangled mixed-state generation via local operations. **Phys. Rev. A.** 75: 062118.
- Simone, C., F. Castelli and G.A. Paris. 2009. Properties of entangle photon pairs generated by CW laser with small coherence time: theory and axperiment. **J. M. Opt.** 56: 215-225.
- Kwiat, P. G., E. Waks, A. G. White, I. Appelbaum and P. H. Eberhard. 1999. Ultrabright Source of Polarization-Entangled Photons. **Phys. Rev. A.** 60(2): 773-776.
- Barbieri, M., C. Cinelli, F De Martini and P. Mataloni. 2006. Generation of polarization-Entangled photon pairs by a Single crystal interferometric source pumped by Femtosecond laser pulses. **Laser Physics.** 16 (10): 1439-1443.
- Bennett, C. H., F. Bessette, G. Brassard, L. Salvail and J. Smolin. 1992. Experimental quantum cryptography. **J. Cryptology.** 5: 3-28.
- Venkatraman, D. 2004. **Methods and implementation of quantum cryptography.** (document). MIT Department of Physics.
- Ekert, A. K. 1991. Quantum cryptography based on Bell's theorem. **Phys. Rev. Lett.** 67 (6): 661-663.

Rangarajan R., M. Goggin and P. G. Kwiat. 2009. Optimizing type-I polarization-entangled Photons. **Opt. Express** 17(21):18920–18933

Saleh, Bahaa E. A. and M. C. Teich. 1994. **Fundamental of photonics**. A Wiley-Interscience Publ. John Wiley and Sons, Inc. New York.

Nielsen, M. A. and I. L. Chuang. 2000. **Quantum Computation and Quantum Information**. Cambridge University Press, Inc., Cambridge United Kingdom.

Kliger, D. S., J. W. Lewis and C. E. Randall. 1990. **Polarized Light in Optics and Spectroscopy**. Academic Press, Inc., California.

Rosenfeld, L. 1967. **Niels Bohr in the thirties: Consolidation and extension of the conception of complementarity in Niels Bohr: His Life and work as seen by his Friends and Colleagues**, edited by S. Rosental (North-Holland, Amsterdam).

Werner, R. F. 1989. Quantum states with Einstein-Podolsky-Rosen correlations admitting a hidden-variable model. **Phys. Rev. A**. 40: 4277.

Redhead, M. 1987. **Incompleteness, nonlocality, and realism: a prolegomenon to the philosophy of quantum mechanics**. Oxford University Press., Oxford.



ภาคผนวก



Operating instruction for LQA/LQC/LQD series laser diode module

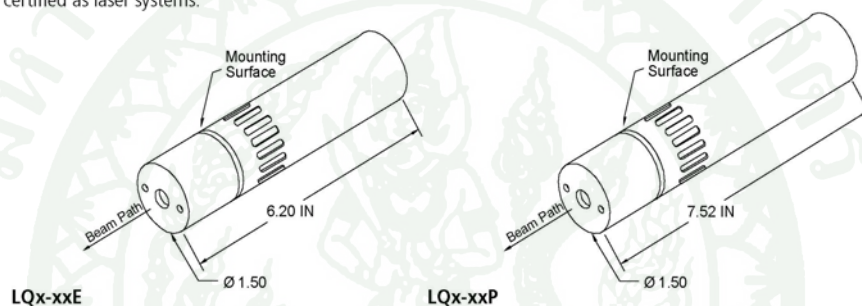
Instructions for LQA, LQC, and LQD

Introduction

The LQx series of laser modules offers the most precise temperature control available from Newport Corporation. The LQx series also features quality glass optics and a precision current driver for a wide assortment of laser diodes.

This operating instruction applies to several members of the LQx series. Within the part number, in the first option code, the letter E represents laser modules with a laser diode driver, active temperature control, and a simple optical system. The letter P represents laser modules with the same specifications, except the optical system is more advanced and contains a pair of prisms for beam circularization. In LQA, the letter A represents a laser module with 70MHz analog beam modulation. In LQD, the letter D represents a laser module with 100MHz TTL beam modulation. In LQC, the letter C represents laser modules with a CW output.

LQx series laser modules can be configured with a variety of laser diodes at various output powers and operating wavelengths. Products with IR outputs or with output powers above 5mW are not intended for surveying, leveling, and alignment applications. Visible units with output powers below 5mW are CDRH-certified as laser systems.



Installation

Do not mount the laser in a thermal insulating material, such as foam plastic. Heat can have adverse effects on laser diodes. Such effects include decreased output power and large shifts in wavelengths. For best heat dissipation, use a metal mounting fixture. A heat sink is always recommended for operating temperatures above 25°C.

Operating voltages for LQ series modules are 5 to 12VDC, with most diodes operating optimally at 5VDC. However, LQ modules that incorporate certain diodes (e.g., 405nm 5mW) must operate from 6VDC, while others (e.g., 405nm 60mW, 375nm 10mW, 440nm 20mW) must operate from 7VDC.

If the label attached to the laser module reads, "Complies with 21CFR 1040.10 and 1040.11," a permanently installed switch at the power source will be required to retain the modules certification as a laser system. This certification is void if the unit is enclosed or otherwise inaccessible, if the labels are modified or removed, or if the system is permanently connected (e.g., soldered) directly to the power source without the required switch. Modifying the laser will void the CDRH certification. If the distance between the laser head and the power source switch exceeds two meters, an emissions indicator must be mounted near the switch.



Newport Corporation, 1791 Deere Avenue, Irvine, CA 92606
Telephone: 800-222-6440, 949-863-3144 • Facsimile: 949-253-1680 • www.newport.com
Copyright 2005 Power Technology Inc.

A 16-pin header connector is present on all LQx series modules and accommodates the DC supply voltage and monitoring connections. Pin one (1) is marked on the back of the unit with a red dot. Connections are listed below.



A power only cable is provided with LQx series modules. If you require a more complex cable, contact your sales engineer.

Pin	Wire Color	Description
1	Red	Vin, +5V to +12V
2	Red	Vin, +5V to +12V
3		For future use
4	Gray	PDMON, Photodiode monitor
5		For future use
6		For future use
7	Blue	LDIMON, Laser diode current monitor
8		For future use
9	White	TMPMON, Laser diode temperature monitor
10		For future use
11	Yellow	ERROR!, Error signal
12	Green	GRD, Monitoring ground
13	Green	Modulation signal (+)
14	Green	GRD, Monitoring ground, modulation signal (-)
15	Black	Power ground
16	Black	Power ground

To monitor laser diode current, read the voltage between the blue wire and green wire. This reading will be in mV with 1mV=1mA.

To monitor laser diode temperature, read the voltage between the white wire and green wire. This reading will be in V. Use the chart below to calculate laser diode temperature. Please note that the temperature control pot is used to set the desired temperature. There will be a short delay between adjusting the pot and monitoring a change in the laser diode temperature.

ANALOG MODULATION USERS: Analog modulation requires an input voltage on the BNC connector. A control voltage of 1VDC will yield a 100% power output. A control voltage of 0VDC will yield a 0% output. The relationship between voltage and output power is not linear.

TTL MODULATION USERS: TTL modulation requires an input voltage on the BNC connector. A control voltage of 5VDC will yield a 0% power output. A control voltage of 0VDC will yield 100% output. The laser is either ON or OFF depending on the control voltage. The LQD-xxE and LQD-xxP are easily connected to either a function or pulse generator.



Newport®

Newport Corporation, 1791 Deere Avenue, Irvine, CA 92606
 Telephone: 800-222-6440, 949-863-3144 • Facsimile: 949-253-1680 • www.newport.com
 Copyright 2005 Power Technology Inc.

Temperature Monitor: The user may monitor the temperature of the laser diode by measuring the voltage between Pin 9 (white) and Pin 14 (green). That voltage can be compared to the chart below to determine the diode's temperature.

TMPMON	Temp	TMPMON	Temp
0.950996483	-0.003050765	1.983406439	23.99951443
0.988555222	0.997046962	2.028	24.99963102
1.026862732	1.997145503	2.072331362	25.99974836
1.065891044	2.997244855	2.116360728	26.99986646
1.10560988	3.997345018	2.160049906	27.9999853
1.145986745	4.997445987	2.203362406	29.00010489
1.18698702	5.99754776	2.246263529	30.00022523
1.228574089	6.997650336	2.288720439	31.00034631
1.27070946	7.997753711	2.330702222	32.00046813
1.313352918	8.997857883	2.372179931	33.00059068
1.356462679	9.99796285	2.41312662	34.00071398
1.39999556	10.99806861	2.45351736	35.000838
1.44390716	11.99817516	2.493329247	36.00096275
1.488152041	12.99828249	2.532541399	37.00108824
1.532683927	13.99839061	2.571134938	38.00121444
1.5774559	14.99849952	2.609092965	39.00134137
1.622420602	15.9986092	2.646400526	40.001469
1.667530436	16.99871966	2.683044569	41.00159739
1.71273777	17.99883089	2.71901389	42.00172648
1.757995134	18.9989429	2.754299082	43.00185628
1.803255416	19.99905568	2.788892466	44.00198678
1.848472054	20.99916922	2.822788029	45.002118
1.893599212	21.99928353	2.855981348	46.00224992
1.938591962	22.9993986	2.888469518	47.00238255

Operating Procedure & Control Description

LQ series modules do not have any user adjustable controls. The user may adjust the focus or collimation of the output beam on LQA-xxE, LQC-xxE, and LQD-xxE models by using the supplied spanner wrench to increase or decrease the distance between the diode and the optic. LQA-xxP, LQC-xxP, and LQD-xxP series modules do not offer adjustable optics.

Maintenance & Service

This laser module contains no user serviceable parts. Depending on environmental conditions, the optics may require occasional cleaning. Clean, compressed air is recommended to blow the optics clean. If compressed air fails, clean lens carefully with alcohol and a lint-free cloth or cotton swab.

Warranty and Repair Return Policy

Opening the LQ laser will void the warranty.

No return of merchandise will be accepted by Newport without an RMA (Return Material Authorization) number, issued by the factory and prominently displayed on the return package. No return shipments will be accepted "Collect" or "COD". On warranty returns, Newport will pay for shipping charges on the return of merchandise to the customer.

When contacting the factory for an RMA number, please have the following information available: model number, serial number(s), and a description of the problem.



Newport Corporation, 1791 Deere Avenue, Irvine, CA 92606
Telephone: 800-222-6440, 949-863-3144 • Facsimile: 949-253-1680 • www.newport.com
Copyright 2005 Power Technology Inc.

Laser Safety

Class 3b and 4 lasers are not intended for use in surveying, leveling, alignment, or medical applications.

Caution: Use of controls or adjustments or performance of procedures other than those specified herein may result in hazardous radiation exposure.

Caution: The use of optical instruments with this product will increase eye hazard.

Do not shine laser in the direction of other people or at reflective surfaces that might cause exposure to the human eye. Do not mount the laser at eye level.

Modifications that affect any aspect of the product's performance or intended functions will require re-certification and re-identification of the product in accordance with the provisions of 21CFR 1040.10 and 1040.11. The product labels shown below can typically be found near the output optics.

Class 1 Laser: Class 1 Laser Product ☐ Component MAX Power: mW Wavelength: nm DOES NOT comply with 21 CFR 1040.10 and 1040.11 RECORDED - 1 AUG 2001 Model No: _____ Serial No: _____ Mfg Date: _____ CLASS 1 LASER PRODUCT  ☐ System MAX Power: mW Wavelength: nm Complies with 21 CFR 1040.10 and 1040.11 except for deviations pursuant to Laser Notice No. 50, dated 7/20/01 Model No: _____ Serial No: _____ Mfg Date: _____ CLASS 1 LASER PRODUCT  One of the above labels is attached to the laser head.	Class 1M Laser: Laser Radiation, Do not view directly with optical instruments ☐ Component MAX Power: mW Wavelength: nm DOES NOT comply with 21 CFR 1040.10 and 1040.11 RECORDED - 1 AUG 2001 Model No: _____ Serial No: _____ Mfg Date: _____ LASER RADIATION DO NOT VIEW DIRECTLY WITH OPTICAL INSTRUMENTS CLASS 1M LASER PRODUCT  ☐ System MAX Power: mW Wavelength: nm Complies with 21 CFR 1040.10 and 1040.11 except for deviations pursuant to Laser Notice No. 50, dated 7/20/01 Model No: _____ Serial No: _____ Mfg Date: _____ LASER RADIATION DO NOT VIEW DIRECTLY WITH OPTICAL INSTRUMENTS CLASS 1M LASER PRODUCT  One of the above labels is attached to the laser head.	Class 2 Laser: Laser Radiation, Do not stare into beam ☐ Component MAX Power: mW Wavelength: nm DOES NOT comply with 21 CFR 1040.10 and 1040.11 RECORDED - 1 AUG 2001 Model No: _____ Serial No: _____ Mfg Date: _____ LASER RADIATION DO NOT STARE INTO BEAM CLASS 2 LASER PRODUCT  ☐ System MAX Power: mW Wavelength: nm Complies with 21 CFR 1040.10 and 1040.11 except for deviations pursuant to Laser Notice No. 50, dated 7/20/01 Model No: _____ Serial No: _____ Mfg Date: _____ LASER RADIATION DO NOT STARE INTO BEAM CLASS 2 LASER PRODUCT  One of the above labels is attached to the laser head.
Class 2M Laser: Laser Radiation, Do not stare into the beam or view directly with optical instruments ☐ Component MAX Power: mW Wavelength: nm DOES NOT comply with 21 CFR 1040.10 and 1040.11 RECORDED - 1 AUG 2001 Model No: _____ Serial No: _____ Mfg Date: _____ LASER RADIATION DO NOT STARE INTO THE BEAM OR VIEW DIRECTLY WITH OPTICAL INSTRUMENTS CLASS 2M LASER PRODUCT  ☐ System MAX Power: mW Wavelength: nm Complies with 21 CFR 1040.10 and 1040.11 except for deviations pursuant to Laser Notice No. 50, dated 7/20/01 Model No: _____ Serial No: _____ Mfg Date: _____ LASER RADIATION DO NOT STARE INTO THE BEAM OR VIEW DIRECTLY WITH OPTICAL INSTRUMENTS CLASS 2M LASER PRODUCT  One of the above labels is attached to the laser head.	Class 3R Laser: Laser Radiation, Avoid direct eye exposure ☐ Component MAX Power: mW Wavelength: nm DOES NOT comply with 21 CFR 1040.10 and 1040.11 RECORDED - 1 AUG 2001 Model No: _____ Serial No: _____ Mfg Date: _____ LASER RADIATION AVOID DIRECT EYE EXPOSURE CLASS 3R LASER PRODUCT  ☐ System MAX Power: mW Wavelength: nm Complies with 21 CFR 1040.10 and 1040.11 except for deviations pursuant to Laser Notice No. 50, dated 7/20/01 Model No: _____ Serial No: _____ Mfg Date: _____ LASER RADIATION AVOID DIRECT EYE EXPOSURE CLASS 3R LASER PRODUCT  One of the above labels is attached to the laser head.	Class 3B Laser: Laser Radiation, Avoid exposure to beam ☐ Component MAX Power: mW Wavelength: nm DOES NOT comply with 21 CFR 1040.10 and 1040.11 RECORDED - 1 AUG 2001 Model No: _____ Serial No: _____ Mfg Date: _____ LASER RADIATION AVOID EXPOSURE TO BEAM CLASS 3B LASER PRODUCT  ☐ System MAX Power: mW Wavelength: nm Complies with 21 CFR 1040.10 and 1040.11 except for deviations pursuant to Laser Notice No. 50, dated 7/20/01 Model No: _____ Serial No: _____ Mfg Date: _____ LASER RADIATION AVOID EXPOSURE TO BEAM CLASS 3B LASER PRODUCT  One of the above labels is attached to the laser head.



Newport Corporation, 1791 Deere Avenue, Irvine, CA 92606
Telephone: 800-222-6440, 949-863-3144 • Facsimile: 949-253-1680 • www.newport.com
Copyright 2005 Power Technology Inc.

Analog and Digital Modulation of LQx and DLx Series Laser Diode Modules

LQx and DLx Series Laser Diode Modules

The **LQx** series Fabry-Perot laser diode modules offers the most precise temperature control available from Newport Corporation. The **DLx** Series Distributed Feedback (DFB) Laser Source modules offer exceptionally stable wavelength and narrow spectral width. The LQx and the DLx series represent laser modules with a CW output.

The LQx and DLx series represents laser modules with 20MHz analog beam modulation. The LQx and DLx series represents a laser module with 100MHz TTL digital modulation. Analog modulation requires an input voltage with 0 to 1 VDC modulation on the SMC Connector. A control voltage of 1V will yield a 100% power output. A control voltage of 0VDC will yield a 0% output. The digital, or the transistor-transistor logic (TTL), modulation requires an input voltage of 0 to 5 V. A control voltage of 5V will yield a 100% power output. A control voltage of 0V will yield a 0% output. The laser is either ON or OFF depending on the control voltage.

The laser current at which the laser power is at the modulation low or OFF state is barely above the lasing threshold. Thus the user will still measure finite light intensity. This way the modulation operation of the laser is optimized and the largest possible bandwidth is obtained. It is possible to set the trough current point below threshold, but in that case the modulation bandwidth decreases and distortion at the bottom of the waveform occurs.

Newport can also provide a laser module that is set lower than the threshold when the modulation input is low. Unless the current flow on the laser diode chip is 0 A, there always is emission of light, in the form of amplified spontaneous emission (ASE). However, the ASE is incoherent light and thus shows very low power level as well as a very large divergence angle.

Bias Consideration

The laser chip is biased such that the 0% of the output is still above the lasing threshold. In case the bias is required to result in below-threshold condition, the customer must consider the distortion of the laser output.

Figure 1 describes the effect of the laser bias on the output signal. The first quadrant indicates the power vs time, while the fourth quadrant indicates the driving current vs time. The plot shown in green indicates the signal and current with a bias so that the current at trough is still above threshold. The plot indicates that the laser output closely follow the pattern of the input modulation.

The line in pink indicates a case without the bias. As soon as the current level falls below the threshold, there is no lasing so the power will be suddenly dropped. Therefore, the output signal is distorted and the relationship between the modulation signal and the laser output is no longer linear. The user is recommended to make a decision after considering the trade-offs between the biased vs non-biased cases.

Results of Unbiased Laser Supply

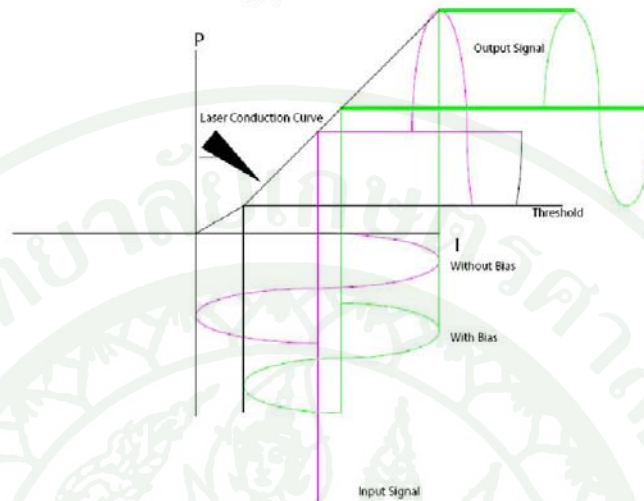


Figure 1. Modulation of input current and output power.

Modulation Waveform Samples

The modulation characteristics vary greatly from one chip to another. However, below is a collection of sample data measured using a fast oscilloscope that shows the modulation behavior of the Newport laser diode modules.

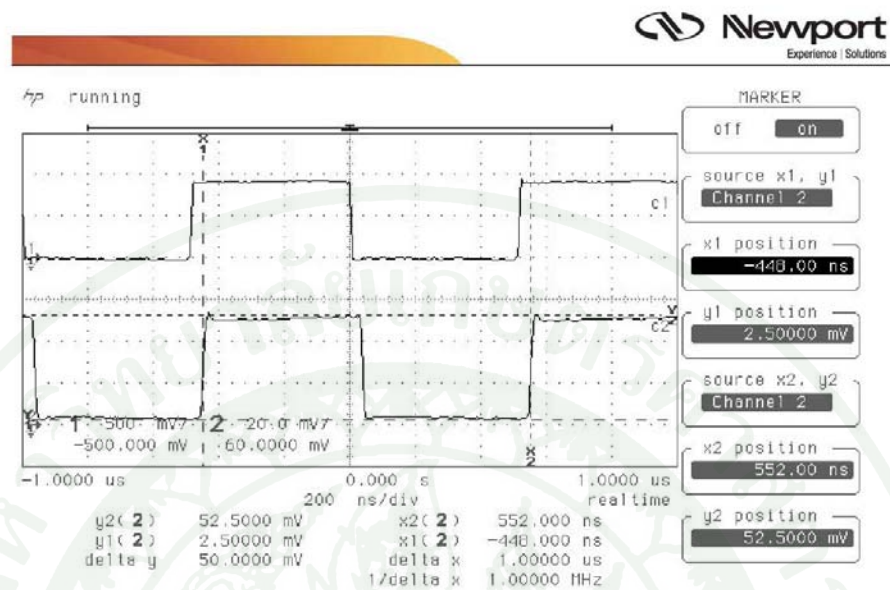


Figure 2. 1 MHz analog modulation for a laser operating at 658 nm.

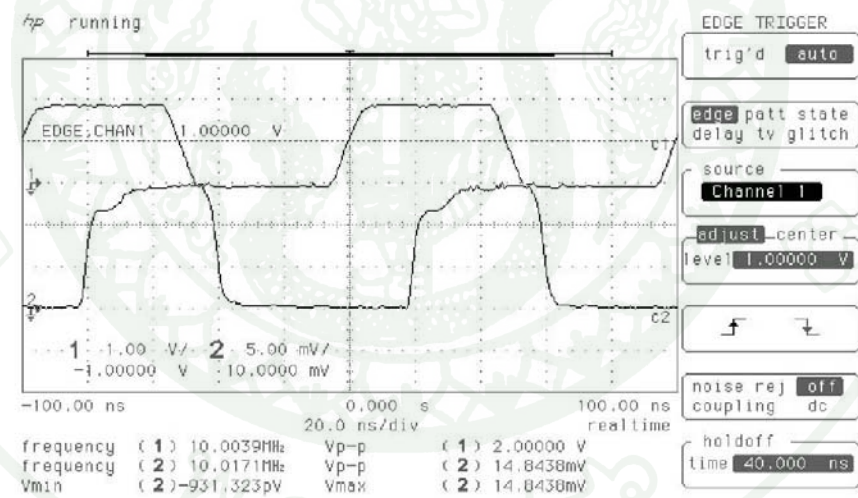


Figure 3. 20 MHz analog modulation for a laser operating at 635 nm.

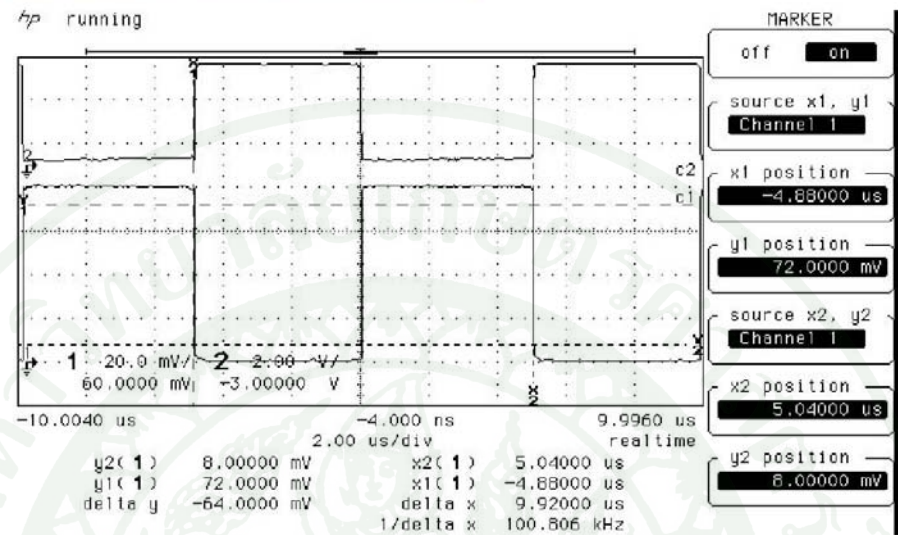


Figure 4. 20 MHz TTL modulation for a laser operating at 405 nm.

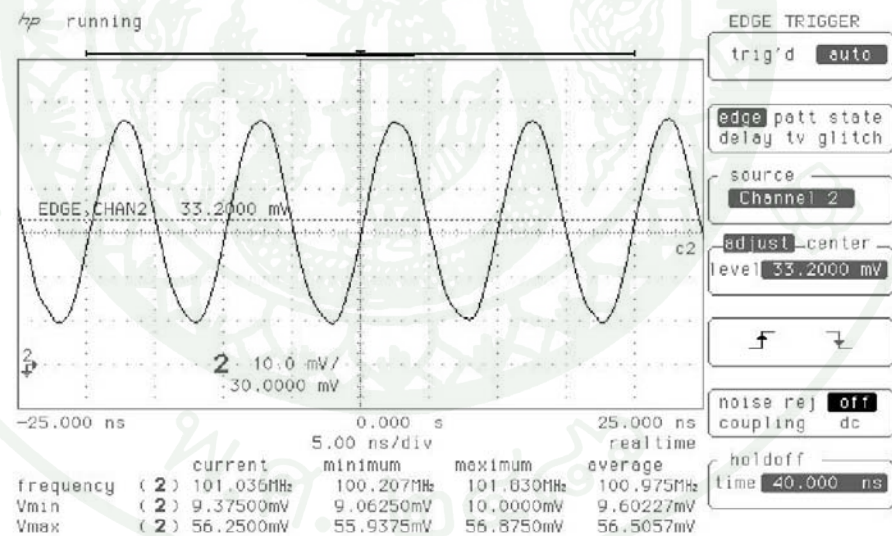
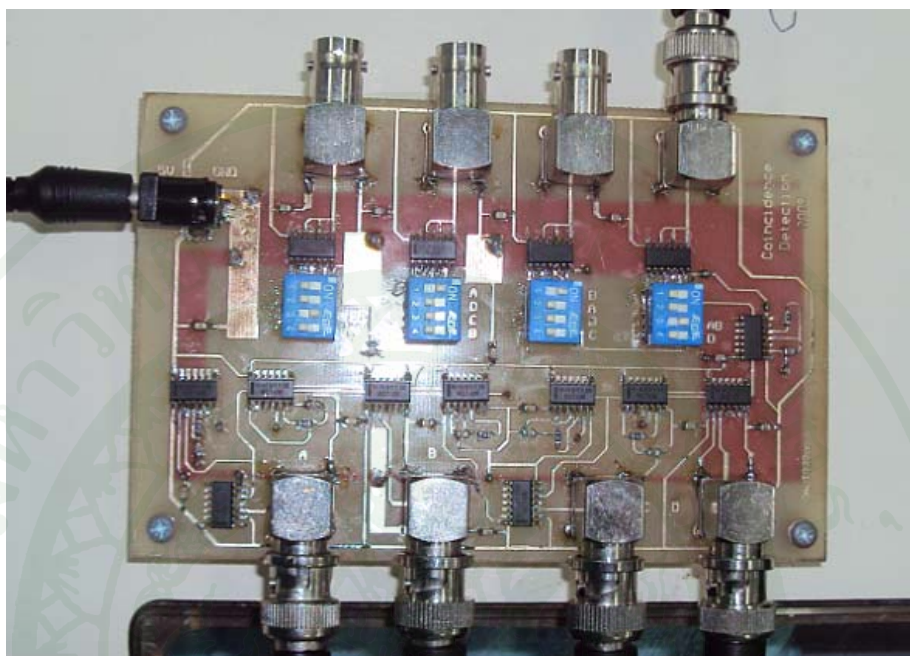


Figure 5 100 MHz TTL modulation for a laser operating at 405 nm.

วงจรตรวจนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกัน (Coincidence circuit)



ภาพผนวกที่ ข1 วงจรตรวจนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกัน

การตรวจหาโฟตอนเดี่ยวด้วย SPCMs สัญญาณพัลส์สั้น (short pulse) TTL จะถูกสร้างขึ้นประมาณ 25 นาโนวินาทีในการแยกโฟตอนที่มีการแปลงผันลงจากโฟตอนฟลูออเรสเซนส์ (fluorescence photons) ซึ่งเป็นจำนวนนับพื้นหลัง ทำได้โดยการบันทึกอัตราการนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกัน ซึ่งสามารถสร้างวงจรตรวจนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกัน ได้จากแผ่นวงจรตรรกะเร็ว (fast logic chips)

วงจรอิเล็กทรอนิกส์การนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกันสร้างจาก 74HC74 ชนิด dual D-type เป็น ฟลิปฟล็อปแบบ positive edge - triggered จำนวน 4 ตัว เริ่มพิจารณาฟลิปฟล็อปจากตัวล่างซ้ายของแผนภาพต่อยอดด้วยฟลิปฟล็อปตัวอื่นเรียงตามเข็มนาฬิกา ฟลิปฟล็อปตัวแรกทางด้านล่างซ้ายของแผนภาพ จะเป็นตัวเริ่มรับสัญญาณนาฬิกา (clock) ซึ่งจะทำให้พัลส์มีสัญญาณดีเลย์ 6.5 - 19.5 นาโนวินาที ฟลิปฟล็อปตัวต่อมาจะสร้างพัลส์ให้ออกที่ A OUT และตัวที่อยู่ตรงกลางทางด้านขวาจะเป็นตัวสร้างพัลส์ของคู่โฟตอนที่มาถึงพร้อมกัน ถ้าสัญญาณจาก A IN เป็นสัญญาณขอบสูงในขณะที่สัญญาณดีเลย์จาก B มาถึงพอดี พัลส์ของคู่โฟตอนที่มาถึงพร้อมกันจะถูกสร้างขึ้น



ภาคผนวก ค

การคำนวณความน่าจะเป็นในการตรวจวัดคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกัน

การคำนวณความน่าจะเป็นในการตรวจวัดคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกัน

เวกเตอร์ฐานของโพลาไรเซชันที่ทำมุม α คือ

$$\begin{aligned} |V_\alpha\rangle &= \cos\alpha|V\rangle - \sin\alpha|H\rangle \\ |H_\alpha\rangle &= \sin\alpha|V\rangle + \cos\alpha|H\rangle \end{aligned}$$

เมื่อ $|V_\alpha\rangle$ คือสถานะโพลาไรเซชันที่ทำมุม α จากแนวดิ่ง ขณะที่ $|H_\alpha\rangle$ คือสถานะโพลาไรเซชันที่ทำมุม α กับแนวราบ ดังนั้นจะมีความน่าจะเป็นที่จะได้สถานะโพลาไรเซชันเป็น VV คือ

$$\begin{aligned} P_{VV}(\alpha, \beta) &= \left| \langle V_\alpha |_s \langle V_\beta |_i \psi_{DC} \rangle \right|^2 \\ &= \left| (\cos\alpha \langle V |_s - \sin\alpha \langle H |_s) (\cos\beta \langle V |_i - \sin\beta \langle H |_i) \left[\cos\theta_\ell |H\rangle_s |H\rangle_i + \exp[i\phi] \sin\theta_\ell |V\rangle_s |V\rangle_i \right] \right|^2 \\ &= |(\cos\alpha \langle V |_s \cos\beta \langle V |_i - \cos\alpha \langle V |_s \sin\beta \langle H |_i - \sin\alpha \langle H |_s \cos\beta \langle V |_i + \sin\alpha \sin\beta \langle H |_s \langle H |_i) \\ &\quad (\cos\theta_\ell |H\rangle_s |H\rangle_i + \exp[i\phi] \sin\theta_\ell |V\rangle_s |V\rangle_i)|^2 \\ &= |(\cos\alpha \cos\beta \langle V |_s \langle V |_i - \cos\alpha \sin\beta \langle V |_s \langle H |_i - \sin\alpha \cos\beta \langle H |_s \langle V |_i + \sin\alpha \sin\beta \langle H |_s \langle H |_i) \\ &\quad (\cos\theta_\ell |H\rangle_s |H\rangle_i + \exp[i\phi] \sin\theta_\ell |V\rangle_s |V\rangle_i)|^2 \\ &= |\cos\alpha \cos\beta \sin\theta_\ell \exp[i\phi] + \sin\alpha \sin\beta \cos\theta_\ell|^2 \end{aligned}$$

หรือ

$$\begin{aligned} P_{VV}(\alpha, \beta) &= \sin^2\alpha \sin^2\beta \cos^2\theta_\ell + 2\sin\alpha \sin\beta \cos\theta_\ell \cos\alpha \cos\beta \sin\theta_\ell \exp[i\phi] \\ &\quad + \cos^2\alpha \cos^2\beta \sin^2\theta_\ell \\ &= \sin^2\alpha \sin^2\beta \cos^2\theta_\ell + \sin 2\alpha \cdot \frac{1}{2} \sin 2\beta \cdot \frac{1}{2} \sin 2\theta_\ell \exp[i\phi] + \cos^2\alpha \cos^2\beta \sin^2\theta_\ell \\ &= \sin^2\alpha \sin^2\beta \cos^2\theta_\ell + \sin 2\alpha \cdot \frac{1}{2} \sin 2\beta \cdot \frac{1}{2} \sin 2\theta_\ell \cos\phi + \cos^2\alpha \cos^2\beta \sin^2\theta_\ell \end{aligned}$$

เมื่อ $\theta_\ell = \pi/4$ และ $\phi = 0$ เป็นกรณีพิเศษที่ $|\psi_{DC}\rangle = |\phi_{EPR}^+\rangle$ ดังนั้น

$$\begin{aligned}
P_{vv}(\alpha, \beta) &= \sin^2 \alpha \sin^2 \beta \cos^2 \frac{\pi}{4} + \sin 2\alpha \cdot \frac{1}{2} \sin 2\beta \cdot \frac{1}{2} \sin \left[2 \left(\frac{\pi}{4} \right) \right] 2\theta_i \cos 0 \\
&\quad + \cos^2 \alpha \cos^2 \beta \sin^2 \frac{\pi}{4} \\
&= \frac{1}{2} \sin^2 \alpha \sin^2 \beta + \frac{1}{2} \cos^2 \alpha \cos^2 \beta + \frac{1}{4} \sin 2\alpha \sin 2\beta \\
&= \frac{1}{2} \left[\sin^2 \alpha \sin^2 \beta + \cos^2 \alpha \cos^2 \beta + \frac{1}{2} (2 \sin \alpha \cos \alpha)(2 \sin \beta \cos \beta) \right] \\
&= \frac{1}{2} \left[\sin^2 \alpha \sin^2 \beta + \cos^2 \alpha \cos^2 \beta + (2 \sin \alpha \cos \alpha \sin \beta \cos \beta) \right] \\
&= \frac{1}{2} \left[\sin^2 \alpha \sin^2 \beta + 2 \sin \alpha \sin \beta \cos \alpha \cos \beta + \cos^2 \alpha \cos^2 \beta \right] \\
&= \frac{1}{2} [\sin \alpha \sin \beta + \cos \alpha \cos \beta]^2 \\
&= \frac{1}{2} [\cos(\beta - \alpha)]^2 \\
&= \frac{1}{2} \cos^2(\beta - \alpha)
\end{aligned}$$



การคำนวณพารามิเตอร์เบล S

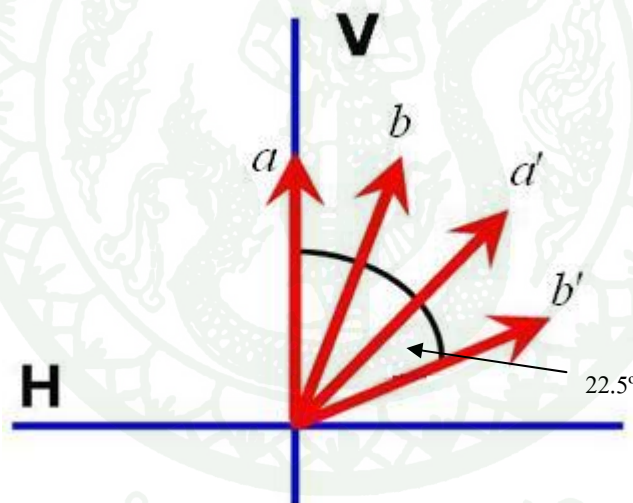
อสมการเบล $-2 \leq S \leq 2$ หรือ $|S| \leq 2$ เมื่อ

$$S = E(a,b) - E(a,b') + E(a',b) + E(a',b')$$

หรือ

$$S = E(\alpha, \beta) - E(\alpha, \beta') + E(\alpha', \beta) + E(\alpha', \beta')$$

โดย a, b, a', b' คือมุมที่ตัวทำแสงโพลาไรซ์กระทำกับแนวตั้ง มีทิศทาง เมื่อ $(a,b) = (b,a') = (a',b')$
ดังภาพผนวกที่ จ1



ภาพผนวกที่ จ1 มุมที่ตัวทำแสงโพลาไรซ์กระทำกับแนวตั้ง

จากผลรวมของความน่าจะเป็น

$$E(\alpha, \beta) = P_{VV}(\alpha, \beta) + P_{HH}(\alpha, \beta) - P_{VH}(\alpha, \beta) - P_{HV}(\alpha, \beta)$$

หรือเขียนในพจน์ของจำนวนโฟตอนได้เป็น

$$\begin{aligned} E(\alpha, \beta) &= P(\alpha, \beta) + P(\alpha_{\perp}, \beta_{\perp}) - P(\alpha, \beta_{\perp}) - P(\alpha_{\perp}, \beta) \\ &= \frac{N(\alpha, \beta)}{N_{total}} + \frac{N(\alpha_{\perp}, \beta_{\perp})}{N_{total}} - \frac{N(\alpha, \beta_{\perp})}{N_{total}} - \frac{N(\alpha_{\perp}, \beta)}{N_{total}} \\ &= \frac{N(\alpha, \beta) + N(\alpha_{\perp}, \beta_{\perp}) - N(\alpha, \beta_{\perp}) - N(\alpha_{\perp}, \beta)}{N_{total}} \end{aligned}$$

เมื่อ $\alpha_{\perp} = \alpha + 90^{\circ}$, $\beta_{\perp} = \beta + 90^{\circ}$ และ $N_{total} = N(\alpha, \beta) + N(\alpha_{\perp}, \beta_{\perp}) + N(\alpha, \beta_{\perp}) + N(\alpha_{\perp}, \beta)$

ทำนองเดียวกัน

$$\begin{aligned} E(\alpha, \beta') &= \frac{N(\alpha, \beta') + N(\alpha_{\perp}, \beta'_{\perp}) - N(\alpha, \beta'_{\perp}) - N(\alpha_{\perp}, \beta')}{N_{total}} \\ E(\alpha', \beta) &= \frac{N(\alpha', \beta) + N(\alpha'_{\perp}, \beta_{\perp}) - N(\alpha', \beta_{\perp}) - N(\alpha'_{\perp}, \beta)}{N_{total}} \end{aligned}$$

และ

$$E(\alpha', \beta') = \frac{N(\alpha', \beta') + N(\alpha'_{\perp}, \beta'_{\perp}) - N(\alpha', \beta'_{\perp}) - N(\alpha'_{\perp}, \beta')}{N_{total}}$$

ดังนั้น ต้องทำการวัด อัตราการนับโฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกันจำนวนทั้งหมด 16 ครั้ง สำหรับค่า S

ตารางผนวกที่ 1 ตัวอย่างข้อมูลในการคำนวณพารามิเตอร์ S โดย $(a, b) = (b, a') = (a', b') = 22.5^{\circ}$ นั้น
คือเลือกมุมของตัวทำแสงโพลาไรซ์ดังต่อไปนี้ $a = 0^{\circ}, a' = 45^{\circ}, b = 22.5^{\circ}, b' = 67.5^{\circ}$

			Nc		P(a,b)
aV = 0	bV=22.5		438.6666667		0.394011976
aH=0+90	bH=22.5+90(112.5) - 67.5		495.3333333		0.44491018
aH=0+90	bV=22.5		86		0.077245509
aV = 0	bH=22.5+90(112.5) - 67.5		93.33333333		0.083832335
		nt	1113.333333	E(a,b)	0.677844311
			Nc		P(a,b)
aV = 0	bV=67.5		76.66666667		0.070552147
aH=0+90	bH=67.5+90(157.5) -22.5		95.33333333		0.087730061
aH=0+90	bV=67.5		468.6666667		0.431288344
aV = 0	bH=67.5+90(157.5) -22.5		446		0.410429448
		nt	1086.666667	E(a,b')	-0.683435583
			Nc		P(a,b)
aV = 45	bV=22.5		104		0.09695463
aH=45+90 (135) - 45	bH=22.5+90(112.5) - 67.5		105.3333333		0.098197638
aH=45+90(135) - 45	bV=22.5		400.6666667		0.373523928
aV = 45	bH=22.5+90(112.5) - 67.5		462.6666667		0.431323804
		nt	1072.666667	E(a' ,b)	-0.609695463
			Nc		P(a,b)
aV = 45	bV=67.5		128.6666667		0.113998819
aH=45+90 (135) - 45	bH=67.5+90(157.5) -22.5		106		0.093916125
aH=45+90(135) - 45	bV=67.5		435.3333333		0.385705848
aV = 45	bH=67.5+90(157.5) -22.5		458.6666667		0.406379209
		nt	1128.666667	E(a' , b')	-0.584170112
				S	-2.555145469



การคำนวณความไม่แน่นอนของปริมาณ S

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ความไม่แน่นอนของปริมาณ S คือ

$$\sigma_s = \sqrt{\sum_{i=1}^{16} (\sigma_{N_i} \frac{\partial S}{\partial N_i})^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^{16} N_i (\frac{\partial S}{\partial N_i})^2}$$

โดยที่ $\sigma_{N_i} = \sqrt{N_i}$

พิจารณา $\frac{\partial S}{\partial N_i}$ โดยที่

$$N_1 = N(\alpha, \beta), N_2 = N(\alpha_{\perp}, \beta_{\perp}), N_3 = N(\alpha, \beta_{\perp}), N_4 = N(\alpha_{\perp}, \beta)$$

$$N_5 = N(\alpha, \beta'), N_6 = N(\alpha_{\perp}, \beta'_{\perp}), N_7 = N(\alpha, \beta'_{\perp}), N_8 = N(\alpha_{\perp}, \beta')$$

$$N_9 = N(\alpha, \beta), N_{10} = N(\alpha', \beta_{\perp}), N_{11} = N(\alpha', \beta_{\perp}), N_{12} = N(\alpha', \beta)$$

$$N_{13} = N(\alpha', \beta'), N_{14} = N(\alpha'_{\perp}, \beta'_{\perp}), N_{15} = N(\alpha', \beta'_{\perp}), N_{16} = N(\alpha'_{\perp}, \beta')$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial N_1} S &= \frac{\partial}{\partial N(\alpha, \beta)} S \\ &= \frac{\partial}{\partial N(\alpha, \beta)} E(\alpha, \beta) - \frac{\partial}{\partial N(\alpha, \beta)} E(\alpha, \beta') + \frac{\partial}{\partial N(\alpha, \beta)} E(\alpha', \beta) + \frac{\partial}{\partial N(\alpha, \beta)} E(\alpha', \beta') \\ &= \frac{\partial}{\partial N(\alpha, \beta)} \left[\frac{N(\alpha, \beta) + N(\alpha_{\perp}, \beta_{\perp}) - N(\alpha, \beta_{\perp}) - N(\alpha_{\perp}, \beta)}{N_{total}} \right] \\ &\quad - \frac{\partial}{\partial N(\alpha, \beta)} \left[\frac{N(\alpha, \beta') + N(\alpha_{\perp}, \beta'_{\perp}) - N(\alpha, \beta'_{\perp}) - N(\alpha_{\perp}, \beta')}{N_{total}} \right] \\ &\quad + \frac{\partial}{\partial N(\alpha, \beta)} \left[\frac{N(\alpha', \beta)N(\alpha', \beta_{\perp})N(\alpha', \beta_{\perp})N(\alpha', \beta)}{N_{total}} \right] \\ &\quad + \frac{\partial}{\partial N(\alpha, \beta)} \left[\frac{N(\alpha', \beta')N(\alpha', \beta'_{\perp})N(\alpha', \beta'_{\perp})N(\alpha', \beta')}{N_{total}} \right] \\ &= \frac{N_{total} - [N(\alpha, \beta) + N(\alpha_{\perp}, \beta_{\perp}) - N(\alpha, \beta_{\perp}) - N(\alpha_{\perp}, \beta)]}{(N_{total})^2} \end{aligned}$$

ในทำนองเดียวกัน

$$\frac{\partial}{\partial N_2} S = \frac{\partial}{\partial N(\alpha_{\perp}, \beta_{\perp})} S = \frac{N_{total} - [N(\alpha, \beta) + N(\alpha_{\perp}, \beta_{\perp}) - N(\alpha, \beta_{\perp}) - N(\alpha_{\perp}, \beta)]}{(N_{total})^2}$$

$$\frac{\partial}{\partial N_3} S = \frac{\partial}{\partial N(\alpha, \beta_{\perp})} S = \frac{(-1)N_{total} - [N(\alpha, \beta) + N(\alpha_{\perp}, \beta_{\perp}) - N(\alpha, \beta_{\perp}) - N(\alpha_{\perp}, \beta)]}{(N_{total})^2}$$

$$\frac{\partial}{\partial N_4} S = \frac{\partial}{\partial N(\alpha_{\perp}, \beta)} S = \frac{(-1)N_{total} - [N(\alpha, \beta) + N(\alpha_{\perp}, \beta_{\perp}) - N(\alpha, \beta_{\perp}) - N(\alpha_{\perp}, \beta)]}{(N_{total})^2}$$

$$\frac{\partial}{\partial N_5} S = \frac{\partial}{\partial N(\alpha, \beta')} S = \frac{N_{total} - [N(\alpha, \beta') + N(\alpha_{\perp}, \beta'_{\perp}) - N(\alpha, \beta'_{\perp}) - N(\alpha_{\perp}, \beta')]}{(N_{total})^2}$$

$$\frac{\partial}{\partial N_6} S = \frac{\partial}{\partial N(\alpha_{\perp}, \beta'_{\perp})} S = \frac{N_{total} - [N(\alpha, \beta') + N(\alpha_{\perp}, \beta'_{\perp}) - N(\alpha, \beta'_{\perp}) - N(\alpha_{\perp}, \beta')]}{(N_{total})^2}$$

$$\frac{\partial}{\partial N_7} S = \frac{\partial}{\partial N(\alpha, \beta'_{\perp})} S = \frac{(-1)N_{total} - [N(\alpha, \beta') + N(\alpha_{\perp}, \beta'_{\perp}) - N(\alpha, \beta'_{\perp}) - N(\alpha_{\perp}, \beta')]}{(N_{total})^2}$$

$$\frac{\partial}{\partial N_8} S = \frac{\partial}{\partial N(\alpha_{\perp}, \beta')} S = \frac{(-1)N_{total} - [N(\alpha, \beta') + N(\alpha_{\perp}, \beta'_{\perp}) - N(\alpha, \beta'_{\perp}) - N(\alpha_{\perp}, \beta')]}{(N_{total})^2}$$

$$\frac{\partial}{\partial N_9} S = \frac{\partial}{\partial N(\alpha', \beta)} S = \frac{N_{total} - [N(\alpha', \beta) + N(\alpha', \beta_{\perp}) - N(\alpha', \beta_{\perp}) - N(\alpha', \beta)]}{(N_{total})^2}$$

$$\frac{\partial}{\partial N_{10}} S = \frac{\partial}{\partial N(\alpha', \beta_{\perp})} S = \frac{N_{total} - [N(\alpha', \beta) + N(\alpha', \beta_{\perp}) - N(\alpha', \beta_{\perp}) - N(\alpha', \beta)]}{(N_{total})^2}$$

$$\frac{\partial}{\partial N_{11}} S = \frac{\partial}{\partial N(\alpha', \beta_{\perp})} S = \frac{(-1)N_{total} - [N(\alpha', \beta) + N(\alpha', \beta_{\perp}) - N(\alpha', \beta_{\perp}) - N(\alpha', \beta)]}{(N_{total})^2}$$

$$\frac{\partial}{\partial N_{12}} S = \frac{\partial}{\partial N(\alpha_{\perp}, \beta_{\perp})} S = \frac{(-1)N_{total} - [N(\alpha', \beta) + N(\alpha', \beta_{\perp}) - N(\alpha', \beta_{\perp}) - N(\alpha', \beta)]}{(N_{total})^2}$$

$$\frac{\partial}{\partial N_{13}} S = \frac{\partial}{\partial N(\alpha', \beta')} S = \frac{N_{total} - [N(\alpha', \beta') + N(\alpha', \beta'_{\perp}) - N(\alpha', \beta'_{\perp}) - N(\alpha', \beta')]}{(N_{total})^2}$$

$$\frac{\partial}{\partial N_{14}} S = \frac{\partial}{\partial N(\alpha'_{\perp}, \beta'_{\perp})} S = \frac{N_{total} - [N(\alpha', \beta') + N(\alpha'_{\perp}, \beta'_{\perp}) - N(\alpha', \beta'_{\perp}) - N(\alpha'_{\perp}, \beta')]}{(N_{total})^2}$$

$$\frac{\partial}{\partial N_{15}} S = \frac{\partial}{\partial N(\alpha', \beta'_{\perp})} S = \frac{(-1)N_{total} - [N(\alpha', \beta') + N(\alpha'_{\perp}, \beta') - N(\alpha', \beta'_{\perp}) - N(\alpha'_{\perp}, \beta')]}{(N_{total})^2}$$

$$\frac{\partial}{\partial N_{16}} S = \frac{\partial}{\partial N(\alpha'_{\perp}, \beta')} S = \frac{(-1)N_{total} - [N(\alpha', \beta') + N(\alpha'_{\perp}, \beta'_{\perp}) - N(\alpha', \beta'_{\perp}) - N(\alpha'_{\perp}, \beta')]}{(N_{total})^2}$$

จากข้อมูลใน ตารางผนวกที่ 1 นำมาแทนค่าในสมการ $\sigma_s = \sqrt{\sum_{i=1}^{16} (\sigma_{N_i} \frac{\partial S}{\partial N_i})^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^{16} N_i (\frac{\partial S}{\partial N_i})^2}$

จะได้ $\sigma_{N_i} = 0.046$

นั่นคือ $S = 2.55 \pm 0.046$



การคำนวณความไม่แน่นอนของสภาพมองเห็นได้ σ_v

สภาพมองเห็นได้แสดงดังสมการ

$$V = \frac{N_{Max} - N_{Min}}{N_{Max} + N_{Min}} \times 100\%$$

ความไม่แน่นอนของสภาพมองเห็นได้ คือ

$$\sigma_v = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial N_{Max}}\right)^2 \sigma_{N_{Max}}^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial N_{Min}}\right)^2 \sigma_{N_{Min}}^2}$$

โดยที่

$$\sigma_{N_{Max}} = \sqrt{N_{Max}} \text{ และ } \sigma_{N_{Min}} = \sqrt{N_{Min}}$$

พิจารณา

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial N_{Max}} &= \frac{(N_{Max} + N_{Min})(1) - (N_{Max} - N_{Min})(1)}{(N_{Max} + N_{Min})^2} \\ &= \frac{2N_{Min}}{(N_{Max} + N_{Min})^2} \end{aligned}$$

และ

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial N_{Min}} &= \frac{(N_{Max} + N_{Min})(-1) - (N_{Max} - N_{Min})(1)}{(N_{Max} + N_{Min})^2} \\ &= -\frac{2N_{Max}}{(N_{Max} + N_{Min})^2} \end{aligned}$$

แทนค่า จะได้

$$\begin{aligned}
 \sigma_v &= \sqrt{\left[\frac{2N_{Min}}{(N_{Max} + N_{Min})^2} \right]^2 N_{Max} + \left[-\frac{2N_{Max}}{N_{Max} + N_{Min}} \right]^2 N_{Min}} \\
 &= \left[\frac{2}{N_{Max} + N_{Min}} \right]^2 \sqrt{N_{Min}^2 N_{Max} + N_{Max}^2 N_{Min}}
 \end{aligned}$$



ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายเอกสิทธิ์ สำนักระโทก
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 06 พฤษภาคม 2528
สถานที่เกิด	เพชรบูรณ์
ประวัติการศึกษา	วท.บ.(ฟิสิกส์) มหาวิทยาลัยนเรศวร จ.พิษณุโลก
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนสนับสนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาโครงการความร่วมมือในการผลิตนักวิจัยและพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ