บทที่ 1

บทนำ

ในช่วงประมาณ 20 ปีที่ผ่านมาได้มีนักวิทยาศาสตร์ให้ความสนใจและศึกษาสหสัมพันธ์ต่าง ๆของคู่อนุภาค (Bialynicki-Birrula และ Bialynicka-Birrula, 1990; Manoukian, 1992; Manoukian และ Caramanlian, 1994; Ducan และ Stehle, 1987; Mandel, 1983; Richter, 1983; Sobolowska และ Mostowski, 1983; Manoukian และ Ungkitchanukit, 1994) โดยได้ศึกษาแนวโน้มของอนุภาคที่ได้จากแหล่งกำเนิดต่าง ๆ ทั้งแหล่งกำเนิดที่ไม่มีอันตรกิริยาและมีอันตรกิริยาเพื่อดูว่าแนวโน้มในการเคลื่อนที่ของคู่อนุภาคเหล่านี้จะเกิดขึ้นในทิศทางเดียวกัน หรือว่าในทิศทางตรงข้ามกัน โดยแสดงผลในเทอมทางสถิติ ตัวอย่างเช่นการศึกษาสหสัมพันธ์ของคู่อนุภาค โดยในปีค.ศ. 1990 Bialynicki-Birrula และ Bialynicka-Birrula [1990] ทำให้สามารถเขียนสหสัมพันธ์ของคู่อนุภาคในรูปฟังก์ชันโคโซน์ของมุมระหว่างทิศทางของโมเมนตัม ของคู่อนุภาค เราอาจเรียกได้ว่าเป็นสหสัมพันธ์ของมุมของคู่อนุภาค โดยที่เมื่อสหสัมพันธ์ที่ได้มานั้นมีค่าเป็นบวกจะแสดงถึงคู่อนุภาคที่เกิดจากแหล่งกำเนิดต่าง ๆ ที่พิจารณา มีแนวโน้มเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกันและในกรณีที่มีค่าเป็นลบจะแสดงถึงคู่อนุภาคมีแนวโน้มที่จะเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้ามกัน ดังเช่นในงานตีพิมพ์ที่ผ่านของ Manoukian และ Ungkitchanukit ในปี ค.ศ. 1994 ซึ่งได้ศึกษาสหสัมพันธ์ของมุมของคู่อนุภาคที่มีพลังงานเท่ากันที่ได้จากกระบวนมูลฐานต่าง ๆ เช่น e+e- annihilation, e+e- production เป็นต้น พิจารณาและคำนวณโดยใช้ทฤษฎีสนามควอนตัม โดยที่เครื่องมือพื้นฐานที่ใช้ในการหาค่าสหสัมพันธ์นี้ เรียกว่า "conditional probability density, $f(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2)$" ซึ่งเป็นฟังก์ชันของโมเมนตัม($\mathbf{n}_1$, $\mathbf{n}_2$) ของคู่อนุภาคในกระบวนการที่พิจารณาทำให้ได้สหสัมพันธ์ของมุมของคู่อนุภาคเขียนได้ดังนี้ $\int \mathbf{n}_1\mathbf{n}_2 f(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2) d\Omega_1 d\Omega_2$ ในงานของ Manoukian และ Ungkitchanukit สหสัมพันธ์ที่ได้ไม่ขึ้นอยู่กับโมเมนตัมเริ่มต้น

ในการศึกษาสหสัมพันธ์โพลาไรเซชันของสปินของคู่อนุภาคที่วัดค่าพร้อมกัน เมื่อเร็ว ๆ นี้ (Yongram and Manoukian, 2003; Manoukian and Yongram, 2004; Manoukian and Yongram, 2005; Yongram, Manoukian and Siranan, 2006) ซึ่งคู่อนุภาคที่พิจารณาเกิดในกระบวนการต่าง ๆ ที่อธิบายได้โดยใช้ทฤษฎีสนามควอนตัม การคำนวณวิเคราะห์

สหสัมพันธ์โพลาไรเซชันของสปินของคู่อนุภาคที่พิจารณา สามารถอธิบายโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ซึ่งคำนวณได้โดยตรงจากวิธีทางทฤษฎีสนามควอนตัม โดยความน่าจะเป็นของการวัด เรียกว่า "Joint probabilities of particles polarization correlations" ดังเช่นในงานตีพิมพ์ในการศึกษาสหสัมพันธ์โพลาไรเซชันของคู่โฟตอนที่ได้จากกระบวนการรวมตัวกันของอิเล็กตรอน-โพสิตรอนแล้วกลายเป็นโฟตอน 2 ตัว (Yongram and Manoukian, 2003) พบว่าค่าความน่าจะเป็นของการวัดนั้นขึ้นอยู่อัตราเร็วของอนุภาคเริ่มต้น และผลที่ได้ในงานตีพิมพ์ต่อ ๆ มา ดังเช่น สหสัมพันธ์โพลาไรเซชันของสปินของคู่อิเล็กตรอนที่ได้จากกระบวนการการกระเจิงเนื่องจากการชนกันเองของคู่อิเล็กตรอน (Manoukian and Yongram, 2004) สหสัมพันธ์โพลาไรเซชันของสปินของคู่อิเล็กตรอน-โพสิตรอนที่ได้จากนัมบุสตริงที่มีประจุและไม่มีประจุ (Manoukian and Yongram, 2005) และการศึกษาสหสัมพันธ์โพลาไรเซชันของสปินของคู่มิวออน-ปฏิมิวออนที่ได้จากกระบวนการการผลิตมิวออน-ปฏิมิวออนจากการรวมกันของอิเล็กตรอน-โพสิตรอน (Yongram, Manoukian and Siranan, 2006) โดยใช้อันตรกิริยาไฟฟ้าอย่างอ่อนของวายน์เบิร์ก–ซาลาม พบว่านอกจากค่าความน่าจะเป็นของการวัดจะขึ้นอยู่กับอัตราเร็วของอนุภาคเริ่มต้นแล้วยังขึ้นอยู่กับการคู่ควบด้วย ซึ่งการคำนวณวิเคราะห์ที่กล่าวมาเป็นการคำนวณเชิงพลวัตซึ่งต่างจากผลการพิจารณาโดยการรวมสปินของอนุภาคโดยตรง (Clauser and Shimoney, 1978) ซึ่งมักใช้ในการศึกษาเชิงจลนศาสตร์ (กรณีอัตราเร็วของคู่อนุภาคเริ่มต้นมีค่าต่ำ ๆ) ปริมาณที่สัมพันธ์กับความสนใจในที่นี้ในการทดสอบความไม่เท่าเทียมกันของเบลล์ [1, 2] สัญลักษณ์มาตรฐาน

$$S = \frac{p_{12}(a_1,a_2)}{p_{12}(\infty,\infty)} - \frac{p_{12}(a_1,a_2')}{p_{12}(\infty,\infty)} + \frac{p_{12}(a_1',a_2)}{p_{12}(\infty,\infty)} + \frac{p_{12}(a_1',a_2')}{p_{12}(\infty,\infty)}$$
$$- \frac{p_{12}(a_1',\infty)}{p_{12}(\infty,\infty)} - \frac{p_{12}(\infty,a_2)}{p_{12}(\infty,\infty)} \qquad (1.1)$$

ดังที่ *คำนวณจาก* QED. ในที่นี้ a_1, a_2 (a_1', a_2') ระบุทิศทางตามกับโพราไรเซชันของการวัดคู่อนุภาค โดย$p_{12}(a_1,a_2)/p_{12}(\infty,\infty)$ แทนความน่าจะเป็นร่วม และ $p_{12}(a_1,\infty)/p_{12}(\infty,\infty)$ และ$p_{12}(\infty,a_2)/p_{12}(\infty,\infty)$ แทนควาวมน่าจะเป็นเมื่อวัดโพราไรเซชันของอนุภาคตัวเดียว ($p_{12}(\infty,\infty)$ เป็น normalization factor). ความน่าจะเป็นสัมพันธ์ (ดังเช่นคำนวณจาก QED) จะแทนได้โดย$P[\chi_1,\chi_2]$, $P[\chi_1,-]$ และ$P[-,\chi_2]$ โดย χ_1 and χ_2 แทนมุมระบุทิศทางตามการวัดสปินเทียบกับแกนที่แน่นอน เพื่อแสดงให้เห็นว่ากระบวนการใน QED ละเมิดความไม่เท่าเทียมกันของเบลล์ของตัวแปรซ่อนประจำถิ่น(LHV) เพียงพอต่อการหาเซตของมุม χ_1, χ_2, χ_1', and χ_2' เช่นนั้นS มีค่าอยู่นอกช่วง $[-1,0]$ ผลจากการคำนวณวิเคราะห์สหสัมพันธ์โพลาไรเซชันของคู่อนุภาคที่กล่าวมานั้นได้แสดงให้เห็นความขัดแย้งอย่างชัดเจนเมื่อทดสอบตามวิธีการทดสอบของเบลล์

จากผลการศึกษาข้างต้นทำให้เห็นว่าค่าสหสัมพันธ์ของคู่อนุภาคขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ เช่น โมเมนตัม, โพลาไรเซชันและสปิน จึงทำให้เกิดความสนใจที่จะศึกษาปัจจัยอื่นที่น่าจะมีผลต่อค่าสหสัมพันธ์ของคู่อนุภาคและเนื่องจากการกำเนิดของคู่อนุภาคในกระบวณการที่พิจารณานั้นเกิดในทฤษฎีที่เรียกว่าทฤษฎีพลศาสตร์ไฟฟ้าควอนตัม ดังนั้นในงานวิจัยนี้เราจะศึกษา

สหสัมพันธ์ของคู่อนุภาคที่กำเนิดจากกระบวนการทีพิจารณาโดยทฤษฎีสมมาตรยิ่งยวดควอนตัมอิเล็กโตรไดนามิคส์ (Supersymmetry Quantum electrodynamics) อีกด้วย ผลการคำนวณวิเคราะห์ที่ได้นั้นจะช่วยยืนยันหรือขัดแย้งกับ Bell's inequality วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือการศึกษาปัจจัยอื่นที่น่าจะมีผลต่อค่าสหสัมพันธ์ของคู่อนุภาคและ เพื่อศึกษาสหสัมพันธ์ของคู่อนุภาคที่กำเนิดจากกระบวนการทีพิจารณาโดยทฤษฎีสมมาตรยิ่งยวดควอนตัมอิเล็กโตรไดนามิคส์ (Supersymmetry Quantum electrodynamics) ผลการวิเคราะห์ที่ได้นั้นจะช่วยยืนยันหรือขัดแย้งกับ Bell's inequality

รายงานการวิจัยนี้ถูกจัดเรียงหัวข้อเรื่องดังนี้ บทที่ 2 เราจะแนะนำกระบวนการมูลฐานในทฤษฎีควอนตัมอิเล็กโตรไดนามิคส์ที่เราใช้ในการศึกษาสหสัมพันธ์ของโพราไรเซชันของคู่กำเนิดอนุภาคในบทที่ 3 เราจะคำนวณหาแอมปลิจูดการเปลี่ยนสถานะสุญญากาศไปยังสุญญากาศเพื่อใช้ประยุกต์หากระบวนการมูลฐานในทฤษฎีสมมาตรยิ่งยวดควอนตัมอิเล็กโตรไดนามิคส์ ในบทที่ 4 และ 5 ศึกษาและคำนวณหาความน่าจะเป็นของสหมสัมพันธ์ของโพราไรเซชันของคู่อนุภาคกำเนิดในกระบวนการมูลฐานในทฤษฎีควอนตัมอิเล็กโตรไดนามิคส์และทฤษฎีสมมาตรยิ่งยวดควอนตัมอิเล็กโตรไดนามิคส์ ในบทที่ 6 เราได้สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัยหมสัมพันธ์ของโพราไรเซชันของคู่อนุภาคกำเนิดในกระบวนการมูลฐานในทฤษฎีพลศาสตร์ไฟฟ้าควอนตัมหลังจากบรรณานุกรมจะเป็นภาคผนวก ภาคผนวก A เป็นการสรุปการนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ในเชิงวิชาการ ส่วนภาคผนวก B จะเป็น reprint ของบทความวิจัยตีพิมพ์จากโครงการนี้