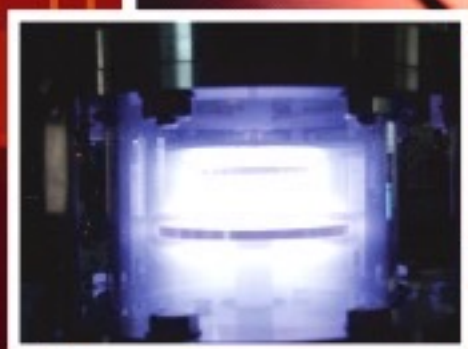
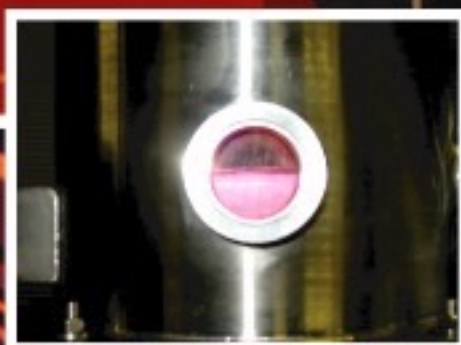


ฟิสิกส์ของพลาสมา และโกลด์สชาร์จ



รศ.ดร.บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์รณรงค์

ภาควิชาฟิสิกส์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ฟิสิกส์ของพลาสมาและโกลวดิสচারจ์

รศ.ดร.บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ยรรยง

ชื่อหนังสือ ฟิสิกส์ของพลาสมาและโกลวดิสชาร์จ

ชื่อผู้แต่ง รศ.ดร.บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ยรรยง

ข้อมูลทางบรรณานุกรมของหอสมุดแห่งชาติ

National Library of Thailand Cataloging in Publication Data

บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ยรรยง

ฟิสิกส์ของพลาสมาและโกลวดิสชาร์จ.—กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2564.

336 หน้า.

1.พลาสมา 2.ฟิสิกส์ I. ชื่อเรื่อง

530.44

ISBN 978-616-586-409-1

พิมพ์ครั้งที่ 1 กันยายน 2564

จำนวนพิมพ์ 200 เล่ม

ลิขสิทธิ์ของ รองศาสตราจารย์ ดร.บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ยรรยง

จัดทำโดย รองศาสตราจารย์ ดร.บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ยรรยง

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โทร. 02-218-7550 โทรสาร. 02-253-1150

พิมพ์ที่ สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย [6412-019]

โทร. 0-2218-3549-50, 0-2218-3563

www.cupress.chula.ac.th

คำนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีพลาสติกและระบบโกลวดิซาร์จถูกใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมต่าง ๆ อีกทั้งขอบเขตของการประยุกต์ใช้ ก็ได้ถูกขยายออกไปอย่างต่อเนื่อง และเช่นเดียวกับเทคโนโลยีที่เป็นสหวิทยาการอื่น ๆ ในทางวิทยาศาสตร์ซึ่งกระบวนการและปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นยังไม่ได้ถูกเข้าใจโดยสมบูรณ์ ความท้าทายของการศึกษาพลาสติกและโกลวดิซาร์จอยู่ที่ความซับซ้อนขององค์ประกอบพื้นฐานและฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้อง การที่พลาสติกประกอบด้วยอนุภาคหลายกลุ่มรวมอยู่ด้วยกัน ทำให้ต้องอาศัยความเข้าใจทางฟิสิกส์จากหลายสาขา งานทางวิชาการด้านพลาสติกเช่นหนังสือเล่มนี้ จึงมักมีลักษณะในแนวทางดังกล่าว คือ ต้องนำองค์ความรู้จากฟิสิกส์จากทั้งอุณหพลศาสตร์ จลนศาสตร์ ไฟฟ้าพลศาสตร์ ฟิสิกส์ของไหล และบางครั้งก็รวมถึงกลศาสตร์ควอนตัมมารวมใช้ เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่พบในพลาสติก

ในการเขียนตำราหรือหนังสือเชิงวิชาการที่มีความยาวจำกัดและต้องการให้ผู้อ่านสามารถติดตามทำความเข้าใจได้นั้น จำเป็นต้องอนุมานกรอบความรู้ของผู้อ่านที่เหมาะสม ระดับของหนังสือเล่มนี้ถูกวางเป้าหมายไว้ให้เหมาะกับนิสิตนักศึกษาในช่วงต้นจนถึงกลางของระดับบัณฑิตศึกษาในสาขาฟิสิกส์และวิศวกรรมที่เกี่ยวข้อง ด้วยเหตุนี้กรอบความรู้ฟิสิกส์พื้นฐานระดับปริญญาบัณฑิตที่ควรเพียงพอต่อการทำให้อ่านติดตามเนื้อหาทั้งหมดได้ และแม้ว่าอาจมีเนื้อหาบางส่วนที่ต้องการการค้นคว้าทบทวนเกินกว่าในหนังสือระดับฟิสิกส์พื้นฐานไปบ้าง แต่ก็ไม่ได้หมายความว่าผู้อ่านจะต้องมีความรู้ด้านฟิสิกส์ของพลาสติกมาก่อน ผู้วิจัยที่มีพื้นฐานทางฟิสิกส์ซึ่งเริ่มเข้าสู่การทำงานด้านพลาสติกและระบบดิซาร์จควรพบว่าสามารถเข้าถึงเนื้อหาในหนังสือเล่มนี้ได้เป็นอย่างดี ในแต่ละบทของหนังสือนี้จะประกอบด้วยส่วนที่นำเข้าสู่ฟิสิกส์ของพลาสติก และตัวอย่างซึ่งแม้ว่าเกือบทั้งหมดจะเน้นไปที่ระบบโกลวดิซาร์จในลักษณะต่าง ๆ แต่ผู้เขียนเชื่อว่าจะยังเป็นประโยชน์ต่อผู้วิจัยเชิงทฤษฎี และผู้วิจัยเชิงปฏิบัติการในระบบอื่น ๆ เช่น พิวทัน หรือพลาสติกในทางดาราศาสตร์ สำหรับผู้วิจัยที่มีประสบการณ์ทำงานด้านระบบโกลวดิซาร์จมาพอสมควรแล้ว ผู้เขียนหวังว่าจะสามารถใช้หนังสือเล่มนี้เป็นแหล่งอ้างอิงและช่วยในการเพิ่มเติมมุมมองได้มากขึ้นถึงแม้ว่าข้อจำกัดด้านความยาวของหนังสือจะไม่อนุญาตให้สามารถลงลึกในรายละเอียดที่สำคัญได้ครบทุกประการก็ตาม

แหล่งอ้างอิง และบรรณานุกรมที่เสนอไว้ในแต่ละบท มีขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์หลักสองประการ ประการแรกคือเพื่อบอกที่มาขององค์ความรู้ รวมถึงเป็นตัวอย่างจริงของการใช้หลักการที่ได้กล่าวถึงในแต่ละบท และประการที่สองก็เพื่อเป็นจุดเริ่มต้นในการศึกษาเพิ่มเติมในรายละเอียดเชิงลึกจากผลงานเชิงวิชาการในหัวข้อเฉพาะนั้น ๆ แก่นิสิตนักศึกษาที่เริ่มเข้ามาทำงานวิจัยด้านนี้ วัตถุประสงค์รองที่อาจ

เพิ่มเติมเข้ามาอีกประการหนึ่งก็คือ เพื่อชี้ให้ผู้อ่านได้เห็นถึงประวัติศาสตร์และพัฒนาการในบางหัวข้อ ทั้งในระดับนานาชาติ และในงานวิจัยในห้องปฏิบัติการของผู้เขียน ในแง่มุมหนึ่งนั้น ผู้เขียนเป็นเพียงส่วนหนึ่งของกลุ่มคณาจารย์ นักวิจัย นิสิต นักศึกษา ในประเทศไทยที่ได้มีโอกาสร่วมกันศึกษา พัฒนาความเข้าใจและองค์ความรู้ด้านฟิสิกส์ของพลาสมาและโกลวดิสชาร์จที่เริ่มต้นในช่วงเกือบ 20 ปีที่ผ่านมา ผู้เขียนใคร่ขอขอบคุณทุกท่านไม่ว่าจะได้มีโอกาสอ้างถึงไว้ในบรรณานุกรมหรือไม่ อีกทั้งยังต้องขออภัยบางท่านที่ถึงแม้จะมีงานวิจัยในสาขานี้ หรือได้ร่วมงานวิจัยกันในทางใดทางหนึ่ง หากแต่ด้วยข้อจำกัดด้านความยาวและขอบเขตของหัวข้อที่บรรจุไว้ในหนังสือ ทำให้ไม่สามารถอ้างถึงไปถึง

สุดท้ายนี้ ถึงแม้ว่าหนังสือเล่มนี้จะมีส่วนหนึ่งขององค์ความรู้ที่มาจากประสบการณ์ในการสร้างระบบให้กำเนิดพลาสมาในแบบต่าง ๆ และหวังว่าผู้อ่านจะสามารถนำไปใช้ในการออกแบบและพัฒนา ระบบให้กำเนิดพลาสมา หรือโกลวดิสชาร์จขึ้นใช้ในงานวิจัยระดับห้องปฏิบัติการได้ แต่หนังสือเล่มนี้มิได้เป็นคู่มือการสร้างระบบดิสชาร์จ ซึ่งโดยทั่วไปจะต้องใช้แหล่งจ่ายไฟแรงสูงระดับหลายร้อยหรือแม้แต่หลายพันโวลต์ หรือต้องใช้แหล่งให้กำเนิดคลื่นวิทยุ หรือไมโครเวฟที่มีกำลังนับพันวัตต์ การทำงานกับระบบเช่นนี้จึงจำเป็นต้องใช้ความระมัดระวังอย่างยิ่ง หากคณาจารย์ นักวิจัย นิสิต นักศึกษาท่านใดมีประเด็นปัญหาหรือหัวข้อการศึกษาในงานด้านพลาสมา โดยเฉพาะที่เกี่ยวข้องกับระบบโกลวดิสชาร์จทางผู้เขียนและกลุ่มวิจัยยินดีอย่างยิ่งที่จะแบ่งปันประสบการณ์ความรู้ และให้ความร่วมมือเสมอ

บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ยรรยง
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 พัฒนาการของการศึกษาพลาสมา	1
1.2 ข้อกำหนดของการเป็นพลาสมา และตัวแปรพลาสมา	3
1.3 การให้กำเนิดและการคงสภาพพลาสมา	5
1.4 การแผ่รังสีของพลาสมา	7
1.5 การวิเคราะห์หาค่าตัวแปรพลาสมา	9
1.6 พลาสมาในเทคโนโลยียุคปัจจุบัน	11
บรรณานุกรม	17
บทที่ 2 ทฤษฎีจลน์ของแก๊สและพลาสมา	23
2.1 อุณหภูมิและฟังก์ชันการแจกแจง	24
2.1.1 ฟังก์ชันการแจกแจงความเร็ว	24
2.1.2 ฟังก์ชันการแจกแจงพลังงาน	28
2.2 อุณหภูมิของอิเล็กตรอน ไอออน และโมเลกุลที่เป็นกลาง	30
2.3 ความดันของแก๊สและพลาสมา	32
2.4 พลั๊กซ์ของอนุภาคในแก๊สและพลาสมา	34
คำถามท้ายบทที่ 2	43
บรรณานุกรม	44
บทที่ 3 การชนของอนุภาคในแก๊สและพลาสมา	45
3.1 ภาคตัดขวางการชน	45
3.2 ระยะเวลาของการชนเฉลี่ย	47
3.3 ค่าโอกาสของการชน	50
3.4 การถ่ายเทพลังงานในการชน	52
3.4.1 การชนแบบยืดหยุ่น	52
3.4.2 การชนแบบไม่ยืดหยุ่น	54
3.5 รูปแบบการชนที่เกิดในพลาสมา	56
3.5.1 การชนแบบยืดหยุ่นของอิเล็กตรอน	57
3.5.2 การชนแบบไม่ยืดหยุ่นของอิเล็กตรอนในพลาสมา	58
3.5.2.1 ไอออนไนเซชัน	58

	3.5.2.2 เอกไซเตชัน	62
	3.5.2.3 รีแล็กเซชัน	64
	3.5.2.3 รีคอมบิเนชัน	65
	3.5.3 การชนในลักษณะอื่น	68
	3.5.3.1 ดิสโซซิเอชัน	68
	3.5.3.2 แอทแทชเมนต์	69
	3.5.3.3 การชนอุปเสถียร	69
	3.5.4 ค่าภาคตัดขวางการชนรวม	70
	คำถามท้ายบทที่ 3	74
	บรรณานุกรม	75
บทที่ 4	ไฟฟ้าพลศาสตร์ของพลาสมา	77
	4.1 ศักย์พลาสมา	77
	4.2 ประจุปริภูมิและการเกิดซีทที่ผิววัสดุ	80
	4.3 การกำบังเดอบาย	86
	4.4 การแกว่งและคลื่นในพลาสมา	90
	4.4.1 การแกว่งของอิเล็กตรอน	90
	4.4.2 การแกว่งของไอออน	97
	4.4.3 ความถี่ไฮโคตรอน	101
	4.5 การแพร่ชั่วตัดเทียม	104
	คำถามท้ายบทที่ 4	108
	บรรณานุกรม	109
บทที่ 5	โกลวดิสชาร์จด้วยไฟฟ้ากระแสตรง	111
	5.1 โครงสร้างของระบบให้กำเนิดโกลวดิสชาร์จด้วยไฟฟ้ากระแสตรง	111
	5.2 การคงสภาพการโกลวดิสชาร์จ	113
	5.3 เกณฑ์ของโบห์ม	118
	5.4 บริเวณพรีซีท	121
	5.5 ซีทจากเมตตริกซ์ของไอออน	126
	5.6 ศักย์ที่ตกคร่อมซีท	128
	5.7 ปรัชญาการณการถูกจำกัดกระแส	130
	5.8 ซีทจากการถูกจำกัดกระแส	135
	5.9 การปรับเปลี่ยนสมการของซีทจากการถูกจำกัดกระแส	139

	คำถามท้ายบทที่ 5	145
	บรรณานุกรม	146
บทที่ 6	การดิสชาร์จด้วยความถี่วิทยุ	149
6.1	การดิสชาร์จที่ความถี่วิทยุแบบคู่ควบเชิงความจุ	149
6.1.1	ค่าตัวแปรทางไฟฟ้าของปริมาตรพลาสมานอกซีท	150
6.1.2	ค่าตัวแปรทางไฟฟ้าของซีท	155
6.1.3	กำลังที่รับเข้าสู่พลาสมาในการดิสชาร์จแบบคู่ควบเชิงความจุ	159
6.2	การดิสชาร์จที่ความถี่วิทยุแบบคู่ควบเชิงเหนี่ยวนำ	164
6.2.1	ผลเชิงผิวในพลาสมา	165
6.2.2	กำลังที่รับเข้าสู่พลาสมาในการดิสชาร์จแบบคู่ควบเชิงเหนี่ยวนำ	171
6.2.3	โหมดไฟฟ้าสถิตและโหมดแม่เหล็กไฟฟ้า	174
6.3	การแมทชิ่งของอิมพีแดนซ์	178
	คำถามท้ายบทที่ 6	184
	บรรณานุกรม	185
บทที่ 7	การดิสชาร์จด้วยไมโครเวฟ	189
7.1	การดิสชาร์จแบบอิเล็กทรอนิกส์โคตรอนไซโคลตรอนเรโซแนนซ์	190
7.2	การดิสชาร์จในโพรงเรโซแนนซ์ทรงเหลี่ยมมุมฉาก	195
7.3	การดิสชาร์จในโพรงเรโซแนนซ์ทรงกระบอก	202
7.4	กำลังที่รับเข้าสู่พลาสมาในการดิสชาร์จด้วยไมโครเวฟ	208
	คำถามท้ายบทที่ 7	212
	บรรณานุกรม	213
บทที่ 8	การวิเคราะห์พลาสมาด้วยหัววัดเชิงไฟฟ้า	215
8.1	การวิเคราะห์พลาสมาด้วยหัววัดลางมัวร์เดี่ยว	216
8.1.1	หัววัดลางมัวร์เดี่ยวทรงแบนบาง	218
8.1.2	หัววัดลางมัวร์เดี่ยวทรงกระบอก	222
8.1.3	ผลของรูปทรงของหัววัดลางมัวร์เดี่ยว	224
8.2	การวิเคราะห์พลาสมาด้วยหัววัดลางมัวร์คู่	228
8.2.1	การหาค่าตัวแปรพลาสมาจากความชัน ณ จุดกำเนิด	230
8.2.2	การหาค่าตัวแปรพลาสมาจากค่าสองตำแหน่งบนกราฟลักษณะส่อ	233
8.2.3	การหาค่าตัวแปรพลาสมาจากความต้านทานสมมูล	235
8.3	การวิเคราะห์พลาสมาด้วยหัววัดลางมัวร์ชุดเซยผล	237

	คำถามท้ายบทที่ 8	243
	บรรณานุกรม	245
บทที่ 9	การวิเคราะห์พลาสมาจากลักษณะทางสเปกตรัม	249
9.1	ค่าสัมประสิทธิ์ไอน์สไตน์ของการเปลี่ยนระดับพลังงาน	250
9.2	ความเข้มของเส้นสเปกตรัม	251
9.3	การหาค่าอุณหภูมิพลาสมาจากความเข้มของเส้นสเปกตรัม	254
9.3.1	การหาค่าอุณหภูมิพลาสมาจากอัตราส่วนระหว่างความเข้มของเส้นสเปกตรัม	255
9.3.2	การหาค่าอุณหภูมิพลาสมาจากกราฟโบลต์ซมันน์พล็อต	258
9.4	การหาค่าความหนาแน่นพลาสมาจากสเปกตรัมการดูดซับ	260
	คำถามท้ายบทที่ 9	266
	บรรณานุกรม	268
บทที่ 10	งานวิจัยด้านกระบวนการพลาสมาและการประยุกต์ใช้	271
10.1	การสังเคราะห์คาร์บอนคล้ายเพชรด้วยกระบวนการพลาสมา	272
10.1.1	โครงสร้างคาร์บอนและคุณภาพของคาร์บอนคล้ายเพชร	272
10.1.2	การสังเคราะห์คาร์บอนคล้ายเพชรในการดิสชาร์จด้วยความถี่วิทยุ	275
10.1.3	การสังเคราะห์คาร์บอนคล้ายเพชรในการดิสชาร์จด้วยไมโครเวฟ	279
10.2	การสังเคราะห์พอลิเมอร์นำไฟฟ้าด้วยกระบวนการพลาสมา	284
10.2.1	การสังเคราะห์พอลิเมอร์นำไฟฟ้ากลุ่มพอลิไทโอฟินและอนุพันธ์	286
10.2.2	การสังเคราะห์พอลิเมอร์นำไฟฟ้ากลุ่มพอลิไพร์โรล	291
10.3	การปรับเปลี่ยนคุณลักษณะของเส้นใยและสิ่งทอด้วยกระบวนการพลาสมา	294
10.3.1	การพื้สมบัติทนวงไฟให้กับเส้นใยและผ้า	295
10.3.2	การปรับเปลี่ยนสมบัติความชื้นซับน้ำและการติดสีของเส้นใยและผ้า	300
10.3.3	การปรับเปลี่ยนสมบัติของเซลลูโลสเมมเบรน	306
10.4	การชุบแข็งผิวโลหะด้วยกระบวนการพลาสมาไนไตรด์	308
10.4.1	การไนไตรด์ของเหล็กกล้าในการดิสชาร์จด้วยความถี่วิทยุ	310
10.4.2	การไนไตรด์ของอลูมิเนียมอัลลอยในการดิสชาร์จด้วยความถี่วิทยุ	312
	บรรณานุกรม	314
บรรณานุกรม		321

บทที่ 1 บทนำ

ในปัจจุบันเป็นที่ยอมรับกันว่า พลาสมาคือเฟส (phase) หนึ่ง หรือในศัพท์ที่ใช้กันทั่วไปคือสถานะหนึ่งของสสาร เช่นเดียวกับของแข็ง ของเหลว และแก๊ส โดยทั่วไปแล้วพลาสมามีสภาพเป็นตัวกลางนำไฟฟ้าที่ประกอบด้วยอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบ ไอออนที่มีประจุบวก และอะตอม หรือโมเลกุล หรือทั้งอะตอมและโมเลกุลของแก๊สที่เป็นกลางทางไฟฟ้า โดยที่ประจุบวกในพลาสมาโดยรวมจะมีจำนวนใกล้เคียงกับจำนวนของประจุลบ คุณลักษณะของพลาสมาจะแสดงโดยพฤติกรรมร่วมหมู่ (collective behavior) ของอนุภาคองค์ประกอบ ซึ่งจะต่างออกไปจากพฤติกรรมเชิงเดี่ยว (individual behavior) ของอนุภาคองค์ประกอบแต่ละชนิด สสารเกือบทั้งหมดในจักรวาลที่เราตรวจพบได้ ดำรงอยู่ในสถานะพลาสมา ไม่ว่าจะเป็นดวงอาทิตย์ ดาวฤกษ์ และเทอร์ฟฟ้า (astronomical object) ต่างๆ แม้แต่แสงเหนือ-แสงใต้ (aurora) และสายฟ้าก็เป็นพลาสมา ในชีวิตประจำวันเราเห็นพลาสมาได้ในการส่องสว่างของหลอดฟลูออเรสเซนต์ หลอดฮาโลเจน และหลอดไส้ชนิดอื่น ๆ เราสามารถสร้างพลาสมาได้ในห้องปฏิบัติการโดยการให้ความร้อน หรือสนามไฟฟ้าแก๊สให้มีความหนาแน่นสูง ซึ่งจะทำให้มีการชนกันในลักษณะต่าง ๆ ระหว่างอนุภาค เกิดไอออนไนเซชัน (ionization) แยกอิเล็กตรอนจากไอออนภายในพลาสมาอย่างต่อเนื่อง ไอออนไนเซชันในพลาสมาอาจเป็นเพียงบางส่วนหรือโดยสมบูรณ์ พลาสมาของแก๊สไฮโดรเจนที่ถูกไอออนไนซ์โดยสมบูรณ์ จะประกอบไปด้วยเพียงอิเล็กตรอน และโปรตอนที่เป็นนิวเคลียสของไฮโดรเจนเท่านั้น จึงมีความซับซ้อนน้อยกว่าพลาสมาที่มีไอออนไนเซชันบางส่วนซึ่งจะมีองค์ประกอบที่เป็นอะตอมและโมเลกุลเพิ่มเข้ามา ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าพลาสมาของแก๊สไฮโดรเจนที่ถูกไอออนไนซ์โดยสมบูรณ์คือ โครงพื้นฐานที่สุดของสถานะพลาสมาที่เราจะรู้จักกัน

1.1 พัฒนาการของการศึกษาพลาสมา

ประวัติศาสตร์ของการศึกษาพลาสมาเกี่ยวข้องกับหลากหลายสาขา ฟิสิกส์พื้นฐาน 3 สาขาหลักที่ใช้เป็นแกนกลางในการทำความเข้าใจพฤติกรรมของพลาสมาประกอบด้วย ทฤษฎีจลน์ของแก๊ส ฟิสิกส์ของไหล และไฟฟ้าพลศาสตร์ ซึ่งเราจะได้ศึกษาถึงรายละเอียดต่อไปในบทที่ 2, 3 และ 4 อย่างไรก็ตาม อาจกล่าวได้ว่าจุดเริ่มต้นความสนใจในปรากฏการณ์การดิสชาร์จสามารถย้อนกลับไปถึงงานของกลุ่มนักฟิสิกส์ชาวอังกฤษในศตวรรษที่ 18 ตั้งแต่นั้น ไมเคิล ฟาราเดย์ (Michael Faraday) ศึกษาการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงปี 1830 รวมถึง โจเซฟ ทอมป์สัน (Joseph John Thomson) และ จอห์น ทาวน์เซนด์ (John Sealy Edward Townsend) ที่ในช่วงปี 1900 ได้วางรากฐานสำคัญในการทำความเข้าใจปรากฏการณ์ต่างๆ ของการดิสชาร์จในแก๊ส (gaseous discharge) คำศัพท์ว่า Plasma ได้ถูกบัญญัติ

ขึ้นโดย เออร์วิง ลางมัวร์ (Irving Langmuir) ในขณะที่กำลังค้นคว้าวิจัยการดิซซาร์จในแก๊ส โดยในปี 1929 ลางมัวร์ และ ลีวี ทงส์ (Lewi Tonk) นักฟิสิกส์อีกท่านหนึ่งที่ทำงานอยู่ในสหรัฐอเมริกา ได้ใช้ คำศัพท์นี้เพื่อหมายถึงบริเวณในการดิซซาร์จที่พบว่าการแกว่งของอิเล็กตรอน [Tonks and Langmuir, 1929] ซึ่งในภายหลังปรากฏการณ์นี้ถูกเรียกว่าการแกว่งของพลาสมา (plasma oscillation) แนวทางการศึกษาพลาสมาในแบบพฤติกรรมรวมหมู่เช่นปัจจุบัน อาจนับว่าเริ่มต้นในช่วงปี 1951 - 1953 ที่นักฟิสิกส์อีกสองท่านคือ เดวิด โบห์ม (David Bohm) และเดวิด ไพน์ส (David Pines) ได้เสนอผลงานตีพิมพ์ เรื่องพฤติกรรมรวมหมู่ของกลุ่มแก๊สของอิเล็กตรอน ในอันตรกิริยาเชิงแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งส่งผลต่อการแกว่งของอิเล็กตรอน [Bohm, and Pines, 1951] ในอันตรกิริยาเชิงการชนระหว่างอนุภาค [Bohm, and Pines, 1952] และในอันตรกิริยาคลุมบังและปรากฏการณ์การกำบัง (shielding) [Bohm, and Pines, 1953] ซึ่งงานตีพิมพ์ชุดนี้เองได้กลายเป็นรากฐานความเข้าใจพฤติกรรมรวมหมู่ของพลาสมาจนถึงปัจจุบัน และเราจะได้ศึกษารายละเอียดบางส่วนกันต่อไปในบทที่ 5

ความเข้าใจพื้นฐานจากการศึกษาอันตรกิริยาและปฏิสัมพันธ์ของของไหลที่นำไฟฟ้า ภายใต้ อิทธิพลของสนามแม่เหล็ก (magnetohydrodynamic interaction) โดยฟาราเดย์ และ แอมแปร์ (André-Marie Ampère) ในยุคปี 1830 ได้ถูกนำมาใช้ในการทำความเข้าใจเบื้องต้นกันพฤติกรรมรวมหมู่ของ อนุภาคต่าง ๆ ของพลาสมาในสนามแม่เหล็ก ซึ่งต่อมาภายหลังได้เพิ่มเติมด้วยความเข้าใจที่มาจาก การศึกษาปรากฏการณ์ทางสุริยะ ซึ่งเกี่ยวข้องกับผลของสนามแม่เหล็กของดาวฤกษ์ที่มีต่อแก๊สที่ได้รับการไอออนไนซ์ (Gurnett, 2005) ในเชิงดาราศาสตร์ และในปี 1942 แฮนส์ อัลเฟน (Hannés Alfvén) ได้แสดงให้เห็นถึงการมีอยู่ของคลื่นในของไหลนำไฟฟ้า [Alfvén, 1942] ซึ่งเป็นการแกว่งของประจุที่เกิด จากแรงคืนตัวในสนามแม่เหล็ก อัลเฟนได้เสนอว่าหากมีของไหลที่นำไฟฟ้าอยู่ในสนามแม่เหล็กคงที่ การ เคลื่อนที่ของของไหลจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและทำให้เกิดการไหลของกระแส การไหลของกระแส ในสนามแม่เหล็กก็จะส่งผลให้เกิดแรงเชิงกลที่จะเปลี่ยนสภาพการเคลื่อนที่ของของไหล ในท้ายที่สุดแล้ว ผลเชิงแม่เหล็กไฟฟ้า และการเคลื่อนที่ของของไหลก็จะทำให้เกิดคลื่นขึ้น ต่อมาภายหลังคลื่นนี้ได้รับการ พิสูจน์ให้เห็นด้วยการทดลองทั้งในของไหลและในการดิซซาร์จของแก๊ส และถูกเรียกว่าคลื่นอัลเฟน (Alfvén wave)

การศึกษาในสองแนวทางข้างต้นคือ การศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคโดยเฉพาะอิเล็กตรอน ในการดิซซาร์จ และการศึกษาพฤติกรรมของประจุภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็ก สามารถนำมา เชื่อมโยงกันได้ด้วยทฤษฎีจลน์ของแก๊สและพลาสมา ดังที่เราจะศึกษากันในบทที่ 2 และ 3 ในปี 1905 ลอร์เรนซ์ (Hendrik Antoon Lorentz) ได้ประยุกต์ทฤษฎีจลน์ของอะตอมซึ่งเป็นสมการที่สร้างขึ้นโดย โบลต์ซมันน์ (Ludwig Boltzmann) เข้ากับพฤติกรรมของอิเล็กตรอนโดยเฉพาะในโลหะ นับตั้งแต่นั้นคือ

ช่วงปี 1930 และ 1940 นักฟิสิกส์ และนักคณิตศาสตร์ก็ได้พัฒนาทฤษฎีของแก๊สและพลาสมาสู่ระดับที่มีความซับซ้อนเช่นที่เห็นในปัจจุบัน การสำรวจอวกาศ การพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ตลอดจนความพยายามในการพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์ฟิวชัน ในยุคปี 1950 ล้วนกระตุ้นให้เกิดความสนใจอย่างมากต่อการให้กำเนิดพลาสมาด้วยระบบดิสชาร์จในรูปแบบต่าง ๆ ในการให้พลังงานเพื่อกระตุ้นแก๊สสู่สถานะพลาสมานั้น จำเป็นต้องทำความเข้าใจกับชุดสมการทางแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งรู้จักกันดีในชื่อของสมการของแมกซ์เวลล์ (James Clerk Maxwell) เพื่อหาผลเฉลยของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กในขณะเดียวกันก็ต้องอาศัยฟังก์ชันการแจกแจงจากทฤษฎีจลน์ในการอธิบายพฤติกรรมของอนุภาคกลุ่มต่าง ๆ ในพลาสมา ซึ่งจะเป็นประเด็นหลักของการศึกษาเรื่องคลื่นในพลาสมาของเราต่อไปในบทที่ 4

1.2 ข้อกำหนดของการเป็นพลาสมา และตัวแปรพลาสมา

ในสภาวะปกติ แก๊สจะเป็นฉนวนไฟฟ้า แต่ที่อุณหภูมิสูงมากพอ มันจะกลายเป็นตัวนำไฟฟ้า เมื่อมีค่าพลังงานอุณหภาพ (thermal energy) สูงขึ้น อะตอมและโมเลกุลจะถูกไอออไนซ์จากการชน เกิดการแยกออกจากกันของอิเล็กตรอน และไอออน และเมื่อความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงมากพอ แก๊สที่ถูกไอออไนซ์ก็จะกลายเป็นพลาสมา ลักษณะพื้นฐานอย่างหนึ่งของพลาสมาคือสภาพเสมือนเป็นกลางทางไฟฟ้า (quasi-neutrality) ซึ่งคือสภาพที่จำนวนของประจุลบ และประจุบวกต่อหน่วยปริมาตรของพลาสมามีค่าใกล้เคียงกัน สภาพเสมือนเป็นกลางทางไฟฟ้าจะเกิดขึ้นเสมอเมื่อความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงระดับหนึ่ง อย่างไรก็ตาม หากมีจำนวนอนุภาคที่มีประจุชนิดใดชนิดหนึ่งสูงกว่าจำนวนอนุภาคของอีกชนิดประจุ ก็จะทำให้เกิดแรงคืนตัว (restoring force) ขนาดใหญ่ เป็นแรงดึงประจุต่างชนิดเข้าหากัน และจะทำให้เกิดการแกว่งของพลาสมานั้นเอง

โดยทั่วไป พลาสมาจะเป็นส่วนผสมที่ซับซ้อนของอนุภาคหลายกลุ่ม ซึ่งมีความแตกต่างกันในขนาดมวล ค่าประจุ และสภาพการเคลื่อนที่เชิงอุณหภาพ (thermal motion) หากกล่าวถึงพลาสมาในเชิงสถานะหนึ่ง ลักษณะโดยทั่วไปของมันจะไม่ขึ้นกับคุณลักษณะเชิงเคมี แต่จะขึ้นอยู่กับพลังงานและโมเมนตัมของอนุภาคภายในโดยเฉพาะอิเล็กตรอนเป็นหลัก การศึกษาอันตรกิริยาที่มีความซับซ้อนอย่างมากของอนุภาคจำนวนมาก จำเป็นจะต้องใช้กระบวนการทางสถิติ ความหนาแน่นต่อหน่วยปริมาตร (n) และอุณหภูมิ (T) ซึ่งอีกนัยหนึ่งก็คือค่าพลังงาน จะมีค่าที่แตกต่างกันในแต่ละชนิดของอนุภาคองค์ประกอบ จากกระบวนการทางสถิติในบทที่ 2 เราจะพบว่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแต่ละชนิดอนุภาคจะเป็น 1.5 เท่าของผลคูณระหว่างค่าคงที่โบลต์ซมันน์ (k_B) กับค่าอุณหภูมิของกลุ่มอนุภาคนั้น คือ $\frac{3}{2}k_B T$ และโดยที่พื้นฐานของพลาสมาที่มาจากแก๊ส ความดันจึงนิยามได้เป็นผลคูณของความหนาแน่นกับค่าคงที่โบลต์ซมันน์และอุณหภูมิคือ $nk_B T$ ตัวแปรที่นิยมใช้ในการจำแนกพลาสมา

ประกอบด้วยความหนาแน่นอิเล็กตรอนซึ่งคือจำนวนอิเล็กตรอนต่อหน่วยปริมาตร (n_e) อุณหภูมิอิเล็กตรอน (T_e) และองศาของการไอออนไนซ์ (degree of ionization) ซึ่งคือ สัดส่วนของแก๊สที่ได้กลายเป็นไอออน ตัวแปรที่มีความสำคัญที่สุดอีกตัวหนึ่งในพลาสมาคือความยาวเดอบาย (Debye Length) ซึ่งเป็นค่าระยะที่พัฒนามาจากแนวความคิดของ เดอบาย (Peter Joseph William Debye) และฮุคเคิล (Erich Hückel) ในงานด้านทฤษฎีของอิเล็กโทรไลต์ (Debye and Hückel, 1923) ความยาวเดอบาย (λ_D) ในพลาสมาคือ ระยะทางมากที่สุดที่ความแตกต่างระหว่างจำนวนประจุบวกและจำนวนประจุลบจะคงอยู่ในพลาสมาได้ ซึ่งจะเท่ากับค่าคงที่คูณด้วยรากที่สองของอัตราส่วนระหว่างอุณหภูมิอิเล็กตรอนต่อความหนาแน่นอิเล็กตรอนคือ $\lambda_D = 7.43 \times 10^2 (T / n_e)^{1/2}$ ในหน่วย cm โดยที่ T เป็นอุณหภูมิอิเล็กตรอนในหน่วย eV และ n_e เป็นความหนาแน่นอิเล็กตรอนในหน่วย cm^{-3} เราจะศึกษาที่มาของสมการนี้โดยละเอียดในบทที่ 4 และ 5

ในกรณีที่น้อยกว่าความยาวเดอบาย ไอออนจะส่งแรงกระทำต่ออิเล็กตรอน และพฤติกรรมเชิงเดี่ยวที่แตกต่างกันของแต่ละกลุ่มอนุภาคก็จะสามารถเป็นไปได้ แต่ในกรณีที่เกินไปกว่าค่าความยาวเดอบาย พลาสมาจะอยู่ในสภาพเสมือนเป็นกลางทางไฟฟ้าและแสดงพฤติกรรมร่วมหมู่ ปฏิกิริยาการชนเช่นนี้ เป็นที่มาของข้อกำหนดหนึ่งในการอยู่ในสถานะพลาสมาคือ ขนาดของปริมาตรพลาสมาจะต้องใหญ่กว่าความยาวเดอบายมาก นั่นคือ

$$\lambda_D \ll d \quad [1.1]$$

เมื่อ d คือมิติทั่ว ๆ ไปของระบบพลาสมา (characteristic dimension of the discharge) เช่น ขนาดในด้านหนึ่งของปริมาตรพลาสมา หรือเส้นผ่านศูนย์กลางของการดิสชาร์จ หรือ ระยะระหว่างขั้วไฟฟ้า เป็นต้น และเมื่อพิจารณาว่าการคำนวณค่าตัวแปรพลาสมาต่าง ๆ ล้วนวางอยู่บนกระบวนการคำนวณทางสถิติ อนุภาคชนิดต่าง ๆ จึงต้องมีจำนวนมากพอที่จะมีการแจกแจงเชิงสถิติ และมากพอที่จะเกิดการกำบังศักย์รบกวน ได้ ดังนั้นข้อกำหนดอีกข้อหนึ่งในการอยู่ในสถานะพลาสมาจะเขียนได้เป็น

$$\frac{4}{3} \pi \lambda_D^3 n_e \gg 1 \quad [1.2]$$

ในบริเวณที่พลาสมาไม่ได้อยู่ในสมดุล (equilibrium) กล่าวคือมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเมื่อเทียบกับไอออน ก็จะเสมือนว่ามีฟลักซ์เกิดขึ้นภายในพลาสมา อันตรกิริยาระหว่างอนุภาคภายในทรงกลมที่มีรัศมีเป็นความยาวเดอบาย จะพิจารณาได้จากการชนกันของอนุภาคภายในทรงกลมดังกล่าว โดยที่จะสามารถใช้ผลรวมจากการชนระหว่างอนุภาค 2 ตัวใด ๆ ที่เกิดขึ้นพร้อม ๆ กันจำนวนมากอย่างต่อเนื่องในช่วงเวลาหนึ่ง จำนวนของเหตุการณ์การชนกันต่อช่วงเวลาจะเป็นตัวแปรพลาสมาที่เรียกว่า ความถี่ของการชน (collision frequency, ν) ตัวแปรพลาสมาที่สำคัญอีกตัวหนึ่งซึ่งเรียกว่าความถี่

พลาสมา (ω_e) เป็นค่าความถี่เชิงมุมของการแกว่งของอิเล็กตรอนที่ศึกษาโดยลางมัวร์ และทองส์ตั้งที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ ความถี่พลาสมามีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยความเร็วอุณหภาพของอิเล็กตรอน ($\bar{u}_e$) หารด้วยความยาวเดอบาย $\omega_e = \bar{u}_e / \lambda_D$ ซึ่งเราจะพบว่าเมื่อคำนวณโดยแทนค่าตัวแปรและค่าคงที่ต่าง ๆ ลงไป ความถี่พลาสมาในหน่วย Hz จะแปรผันตามค่ารากที่สองของความหนาแน่นอิเล็กตรอนเป็น $f_e = 8.97 \times 10^3 (n_e)^{1/2}$ เมื่อ n_e อยู่ในหน่วย cm^{-3} เราจะได้พบต่อไปว่าความถี่พลาสมานี้คือความถี่ที่ต่ำสุดของคลื่นใด ๆ จะเคลื่อนไปในพลาสมาได้ ที่จริงแล้วข้อกำหนดอีกข้อในการที่แก๊สจะอยู่ในสถานะพลาสมาได้ คืออัตราการชนกันระหว่างอนุภาคทั้งหมดจะต้องต่ำกว่าความถี่พลาสมา

$$v \ll \omega_e \quad [1.3]$$

นั่นหมายถึงอันตรกิริยาของพฤติกรรมรวมหมู่ในพลาสมา จะขึ้นกับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมากกว่าที่จะขึ้นกับการชน ทำให้คลื่นที่ความถี่สูงสามารถเคลื่อนไปในพลาสมา และทำให้มีสนามของแรงกระทำต่อประจุด้วยระยะทางไกลออกมาจากจุดกำเนิดคลื่นเกินกว่าความยาวเดอบาย ซึ่งเราจะได้ศึกษารายละเอียดต่อไปในบทที่ 6 และ 7

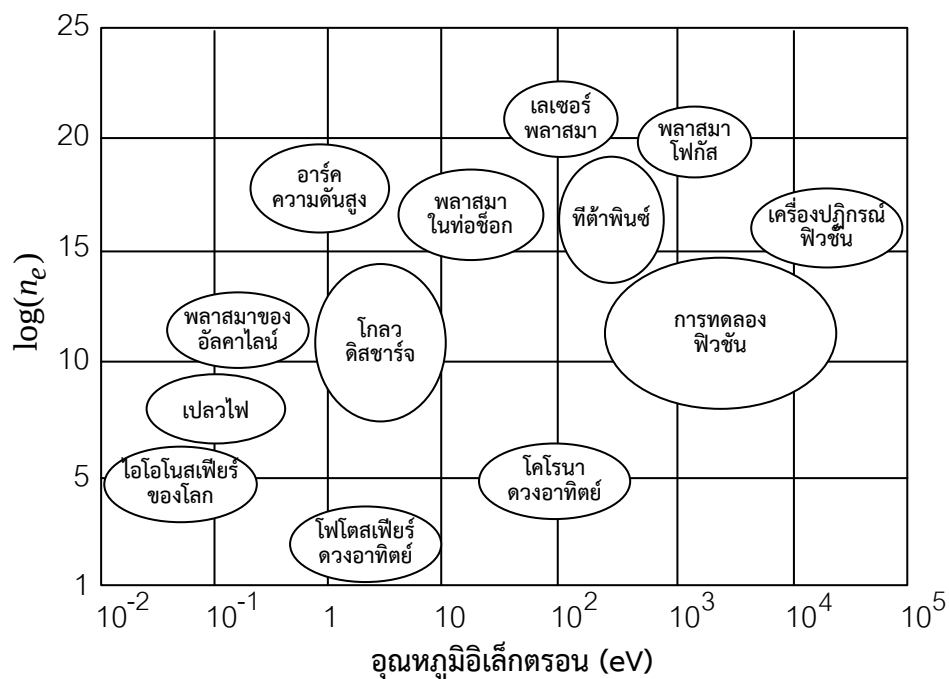
1.3 การให้กำเนิดและการคงสภาพพลาสมา

ส่วนใหญ่แล้วพลาสมาจะเป็นแก๊สที่มีการไอออนไนซ์อย่างอ่อนด้วยองศาของการไอออนไนซ์ที่น้อยมาก ตารางที่ 1.1 และรูปที่ 1.1 แสดงค่าตัวแปรพลาสมาของพลาสมาที่เกิดขึ้นในธรรมชาติและในระบบให้กำเนิดพลาสมาบางชนิด

ตารางที่ 1.1 ค่าตัวแปรพลาสมาของพลาสมาบางชนิด n_e คือความหนาแน่นอิเล็กตรอน n_n คือความหนาแน่นโมเลกุลที่เป็นกลาง และ T_e คืออุณหภูมิอิเล็กตรอน [Smirnov, 2001] [Huba, 2004]

พลาสมา	$n_e (\text{cm}^{-3})$	$n_n (\text{cm}^{-3})$	$T_e (\text{K})$
โฟโตสเฟียร์ของดวงอาทิตย์	10^{13}	10^{13}	6,000
ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ของโลก	10^5	10^{12}	250
เลเซอร์แก๊ส He-Ne	3×10^{11}	2×10^{16}	3×10^4
เลเซอร์แก๊ส Ar	10^{13}	10^{14}	10^5
โกลดิสชาร์จด้วยไฟฟ้ากระแสตรง	10^{10}	10^{14}	10^4
ดิสชาร์จด้วยความถี่วิทยุ	10^{12}	3.5×10^{14}	2×10^4
ดิสชาร์จด้วยไมโครเวฟ	10^{12}	10^{15}	3×10^4

พลาสมาไม่ใช่เฟสของสสารที่พบเห็นโดยทั่วไปบนพื้นผิวโลก จึงจำเป็นต้องถูกสร้างให้เกิดขึ้น การให้กำเนิดพลาสมาจากแก๊สที่สภาวะสมดุลอุณหภูมิต้องใช้ความร้อนสูงมาก แต่เรายังสามารถสร้างแก๊สนำไฟฟ้าเพียงจากการให้ความร้อนแก่อิเล็กตรอน กระบวนการนี้สามารถเกิดขึ้นได้กับระบบของแก๊สที่ถูกไอออนไนซ์ที่ได้รับสนามไฟฟ้าจากภายนอก เมื่ออิเล็กตรอนถูกบังคับให้เคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้า มันจะรับพลังงาน และถ่ายเทสู่อนุภาคอื่นในแก๊ส ผลก็คือค่าเฉลี่ยพลังงานของอิเล็กตรอนจะสูงกว่าพลังงานอุณหภูมิกของโมเลกุลที่เป็นกลางทางไฟฟ้าของแก๊ส อิเล็กตรอนจึงสามารถทำให้เกิดไอออนไนเซชันที่จำเป็นต่อการคงสภาพการไหลของกระแสไฟฟ้าในระบบ การดิสชาร์จในแก๊ส (gaseous discharge) หรือโกลวดิสชาร์จ (glow discharge) ที่เราจะศึกษากันในบทที่ 5 เป็นตัวอย่างที่สำคัญที่สุดของพลาสมาที่ได้รับการคงสภาพโดยสนามไฟฟ้าคงที่จากภายนอก



รูปที่ 1.1 พลาสมามีค่าตัวแปรลักษณะเฉพาะแตกต่างกันออกไปในช่วงกว้าง

ภาพปรับจาก [Lieberman and Lichtenberg, 1994] [John, 2005]

อะตอมของธาตุในกลุ่มอัลคาไลน์ เช่น โพแทสเซียม (K) โซเดียม (Na) และซีเซียม (Cs) มีค่าพลังงานไอออไนเซชันค่อนข้างต่ำ เราจึงสามารถสร้างพลาสมาของธาตุเหล่านี้ได้ โดยการให้ความร้อนโดยตรงที่อุณหภูมิระดับ 3,000 K (~ 0.25 eV) ดังในรูปที่ 1.1 แต่สำหรับแก๊สส่วนใหญ่ เรามักจำเป็นต้องให้ความร้อนจนแก๊สมีอุณหภูมิสูงขึ้นถึงระดับ 12,000 K (~ 1 eV) ก่อนที่การไอออไนเซชันจะมีองค์ของการไอออไนเซชันมากพอและเกิดเป็นโกลวดิสชาร์จ แต่เนื่องจากสสารส่วนใหญ่จะหลอมละลายที่อุณหภูมิต่ำกว่าระดับนี้มาก เราจึงไม่สามารถหาภาชนะบรรจุตัวแก๊สกลางซึ่งทนต่อการให้ความร้อนที่ส่งมาจากภายนอกที่เพียงพอต่อการเปลี่ยนเฟสของตัวกลางสู่พลาสมาได้ ด้วยเหตุดังกล่าว ความร้อนที่จะ

ใช้ในการเปลี่ยนเฟสจึงต้องมาจากภายใน เช่น โดยการให้สนามไฟฟ้าแก๊ส เพื่อเร่งอิเล็กตรอนอิสระให้เกิดการกระเจิง เกิดการชนในลักษณะต่าง ๆ และสร้างความร้อนเป็นแหล่งพลังงานแก๊สพลาสมา เราจะได้เห็นจากการศึกษาในบทที่ 3 ว่าการชนแบบยืดหยุ่นของอิเล็กตรอนจะทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนพลังงานได้น้อย อิเล็กตรอนจึงสามารถถูกเร่งให้มีอุณหภูมิสูงกว่าอนุภาคชนิดอื่นในพลาสมา อย่างไรก็ตามสนามไฟฟ้าที่ให้อาจต้องสูงมากพอ ขนาดของสนามไฟฟ้าที่จำเป็นจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของระบบและความดันของแก๊ส การคงสภาพพลาสมาไว้ จะเกิดขึ้นได้เมื่อกำลังไฟฟ้าที่ป้อนสู่พลาสมาสมดุลกับพลังงานที่สูญเสียออกไปจากระบบ นอกจากนั้นหากอัตราการสูญเสียอิเล็กตรอนสูงกว่าอัตราการเกิดจากกระบวนการไอออนไนเซชัน สภาพพลาสมาก็จะยุติลง การสร้างสนามไฟฟ้าอาจทำได้โดยการใช้ขั้วไฟฟ้าคู่ขนานภายในระบบ (บทที่ 5) หรืออาศัยเสาอากาศในลักษณะของการเหนี่ยวนำ ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก (บทที่ 6) รวมถึงการส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเข้าสู่ปริมาตรพลาสมาจากภายนอก (บทที่ 7)

งานวิจัยได้รายงานถึงอุณหภูมิระดับ 10^7 K (~ 800 eV) และความหนาแน่นอิเล็กตรอนในช่วง 10^{19} m³ ในระบบให้กำเนิดพลาสมาด้วยลำเลเซอร์ [Arora, et al., 2014] และในระบบที่ใช้การยิงไอออนและอิเล็กตรอนเข้าสู่โครงสร้างสนามแม่เหล็กที่ทำหน้าที่กักเก็บและสะท้อนอนุภาคกลับไปกลับมา (Plasma Mirrors Machine) [Swanson and Cohen, 2019] พลาสมาที่มีค่าอุณหภูมิสูงยิ่งถึงช่วง 10^8 K (~ 8 keV) สามารถเกิดขึ้นในระบบพลาสมาโฟกัส (Dense Plasma Focus Device) ซึ่งเป็นเครื่องกำเนิดพลาสมาอุณหภูมิสูงแบบพัลส์ ที่ใช้การปลดปล่อยพลังงานไฟฟ้าซึ่งเก็บสะสมไว้ในชุดตัวจุกกำลังสูง แก๊สที่อยู่ในขั้วไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอก พลังงานส่วนหนึ่งจะไปไอออนไนซ์แก๊สให้เป็นพลาสมา ในขณะเดียวกันการไหลของกระแสไฟฟ้าก็จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กมีทิศทางล้อมรอบขั้วไฟฟ้าแกนกลางในระบบ ซึ่งสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานนี้จะเร่งอนุภาคในพลาสมาให้มีพลังงานจลน์สูงยิ่งอย่างรวดเร็วด้วยการบีบอัด หรือพินช์ (pinch) จากแรงลอเรนซ์ที่ตำแหน่งปลายของขั้วไฟฟ้าแกนกลาง [Ngamrungsri, 2002] ระบบที่อาศัยการพินช์พลาสมาให้อุณหภูมิและความหนาแน่นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วคล้ายกับระบบพลาสมาโฟกัส เช่น ระบบที่ด้าพินช์ (Theta Pinch Device) เพียงแต่แรงที่กระทำต่อพลาสมาจะเกิดขึ้นจากพินช์ในแนวรัศมีโดยไม่มีขั้วแกนกลาง ก็สามารถทำให้เกิดพลาสมาที่มีค่าอุณหภูมิสูงยิ่งยวดเช่นกัน [Kamsing, 2005] [Lee, et al., 2014]

1.4 การแผ่รังสีของพลาสมา

ในการชนกันแบบยืดหยุ่นระหว่างอนุภาค พลังงานและโมเมนตัมบางส่วนของอนุภาคหนึ่งจะถูกแลกเปลี่ยนกับอนุภาคอื่น ปริมาณของพลังงานที่ถูกแลกเปลี่ยนจะขึ้นกับอัตราส่วนของมวลระหว่างอนุภาคที่มาชนกันนั้น ค่าพลังงานเฉลี่ยของการถ่ายเทระหว่างอนุภาคชนิดหนึ่งกับอีกชนิดหนึ่ง จะแปร

ตามความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างอนุภาค และความถี่ของการชน ในการชนแบบยืดหยุ่นระหว่างอิเล็กตรอนกับไฮดรอน พลังงานจะไม่ได้ถูกถ่ายเทระหว่างกันโดยสมบูรณ์ บางส่วนของพลังงานจะกลายเป็นการแผ่รังสี ซึ่งการแผ่รังสีดังกล่าวถูกเรียกว่า เบรมสตราห์ลุง (bremsstrahlung) หรือการแผ่รังสีเนื่องจากความเร็วเปลี่ยน การปลดปล่อยพลังงานแบบนี้เกิดจากการลดความเร็วหรือความหน่วงของอิเล็กตรอนในการชน ค่ากำลังของการแผ่รังสี P_{Br} ซึ่งเป็นอัตราส่วนพลังงานที่ถ่ายเทต่อหน่วยเวลา จะแปรตามค่ารากที่สองของอุณหภูมิอิเล็กตรอน [Huba, 2004] เป็น

$$P_{Br} = 1.69 \times 10^{-32} n_e \sqrt{T_e} \sum Z^2 n_i(z) \quad [1.4]$$

เมื่อ P_{Br} มีหน่วยเป็น watt.cm^{-3} อุณหภูมิอิเล็กตรอน T_e มีหน่วยเป็น eV และ Z คือเลขประจุของไฮดรอน โดยที่ $Z=0$ หมายถึงเป็นอนุภาคเป็นกลางทางไฟฟ้า ค่า n_e และ $n_i(z)$ คือความหนาแน่นอิเล็กตรอน และความหนาแน่นไฮดรอนที่มีเลขประจุ Z ตามลำดับ

ปรากฏการณ์ที่คล้ายคลึงกันนี้เกิดขึ้นในสนามแม่เหล็กเช่นกัน โดยที่อิเล็กตรอนจะหมุนควงรอบเส้นสนามแม่เหล็กเป็นรูปเกลียว (helix) ในทิศทางตามกฎมือขวา ความถี่ของการหมุนควงถูกเรียกว่าความถี่ไซโคลตรอน (cyclotron frequency, ω_C) การเคลื่อนที่ของประจุเป็นเส้นโค้งจะทำให้มีการปลดปล่อยพลังงาน การหมุนควงรอบเส้นสนามแม่เหล็กของอิเล็กตรอนจึงทำให้มีการการปลดปล่อยโฟตอนที่มีค่าพลังงานเท่ากับความถี่ไซโคลตรอนคูณด้วยค่าคงตัวของพลังค์ (Planck's constant, h)

$$E = h\omega_C / 2\pi \quad [1.5]$$

รูปแบบอื่นในการแผ่รังสีของพลาสมาประกอบด้วยรังสีแบบเส้น (line radiation) และการแผ่รังสีจากกระบวนการรีคอมบิเนชัน (recombination radiation) ค่าเวลาชีวิตเฉลี่ย (average lifetime) ของอะตอมหรือไฮดรอนในสถานะกระตุ้นจะสั้นมากเพียง 10^{-9} s เมื่ออิเล็กตรอนเปลี่ยนจากระดับพลังงานสูงสู่ระดับพลังงานที่ต่ำกว่า ก็จะมีการปลดปล่อยโฟตอนซึ่งมีความยาวคลื่นที่แปรตามความแตกต่างของค่าพลังงานระหว่างระดับพลังงานทั้งสอง การปล่อยโฟตอนเช่นนี้ถูกเรียกว่าการแผ่รังสีแบบเส้น เพราะเมื่อวิเคราะห์ด้วยสเปกโตรมิเตอร์ (spectrometer) จะเห็นเป็นเส้นสว่างในสเปกตรัม

ในกระบวนการอีกลักษณะหนึ่ง ซึ่งเกิดจากการที่อิเล็กตรอนอิสระเข้าชนและรวมตัวกับไฮดรอน และทำให้มีการปลดปล่อยโฟตอนออกมา กระบวนการนี้เรียกว่ารีคอมบิเนชันที่มีการปล่อยโฟตอน (photon radiative recombination) การแผ่รังสีเช่นนี้จะมีลักษณะเป็นสเปกตรัมต่อเนื่องที่มีค่าคัตออฟ (cutoff) ที่ความถี่ต่ำ โฟตอนที่ถูกปลดปล่อยออกมา อาจถูกดูดซับแล้วปล่อยออกจากอะตอมหรือโมเลกุลหนึ่งไปสู่อีกตัวหนึ่ง โดยที่ความยาวคลื่นสามารถเปลี่ยนแปลงแตกต่างไปจากโฟตอนเดิมได้ หากระยะทางที่เคลื่อนที่ไปภายหลังการปลดปล่อยจนถึงการถูกดูดซับมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับมิติขนาด

ของพลาสมา จะเรียกว่าพลาสมานั้นมีความหนาเชิงแสง (optically thick) ซึ่งทำให้โดยเฉลี่ยแล้วโฟตอนใด ๆ จะไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านพลาสมาไปได้โดยไม่ถูกดูดซับ ในกรณีนี้สเปกตรัมของการแผ่รังสีจะถูกพิจารณาเป็นเสมือนวัตถุดำ (blackbody) ที่อัตราการปลดปล่อยโฟตอนจะเท่ากับอัตราการดูดซับของมัน ตรงกันข้าม หากระยะทางที่โฟตอนเคลื่อนที่ไปภายหลังจากการปลดปล่อยจนถึงการถูกดูดซับมีค่ามากเมื่อเทียบกับมิติขนาดของพลาสมา จะเรียกว่าพลาสมานั้นมีความบางเชิงแสง (optically thin) ซึ่งสเปกตรัมของโฟตอนจะแตกต่างกันไปตามชนิดของการแผ่รังสี และโดยทั่วไปจะขึ้นกับอุณหภูมิของอิเล็กตรอน [Griem, 1997]

1.5 การวิเคราะห์ค่าตัวแปรพลาสมา

ดังที่กล่าวมาข้างต้น ตัวแปรพื้นฐานที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาพลาสมาได้แก่ อุณหภูมิและความหนาแน่นพลาสมา ความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก รวมถึงความเร็วของอนุภาคกลุ่มต่าง ๆ อุปกรณ์รับรู้ (sensor) ทางฟิสิกส์ที่ใช้เพื่อการตรวจวัดทางไฟฟ้าและทางแม่เหล็ก ซึ่งอาจเรียกรวม ๆ กันว่าหัววัด (probe) ได้ถูกออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อช่วยในการวิเคราะห์ขนาด และการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรพื้นฐานเหล่านั้น ขดลวดเหนี่ยวนำ และหัววัดแม่เหล็กแบบอื่น ๆ ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ค่าสนามแม่เหล็ก กระแสฟลักซ์ และความหนาแน่นประจุ นอกจากนี้องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นก็จะสามารถคำนวณหาได้โดยการใช้สมการของแมกซ์เวลล์ ในขณะที่ผลของหัววัดเชิงไฟฟ้าซึ่งเป็นบันทึกการเปลี่ยนแปลงของกระแสเมื่อศักย์ไบแอสที่จ่ายให้แก่หัววัดเปลี่ยนไป จะสามารถนำมาใช้วิเคราะห์ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอน อุณหภูมิอิเล็กตรอนและไอออน รวมถึงค่าศักย์พลาสมาได้ ในบทที่ 8 เราจะได้ศึกษารายละเอียดการวิเคราะห์ค่าตัวแปรพลาสมาจากข้อมูลหัววัดทางไฟฟ้าหลากหลายรูปแบบ

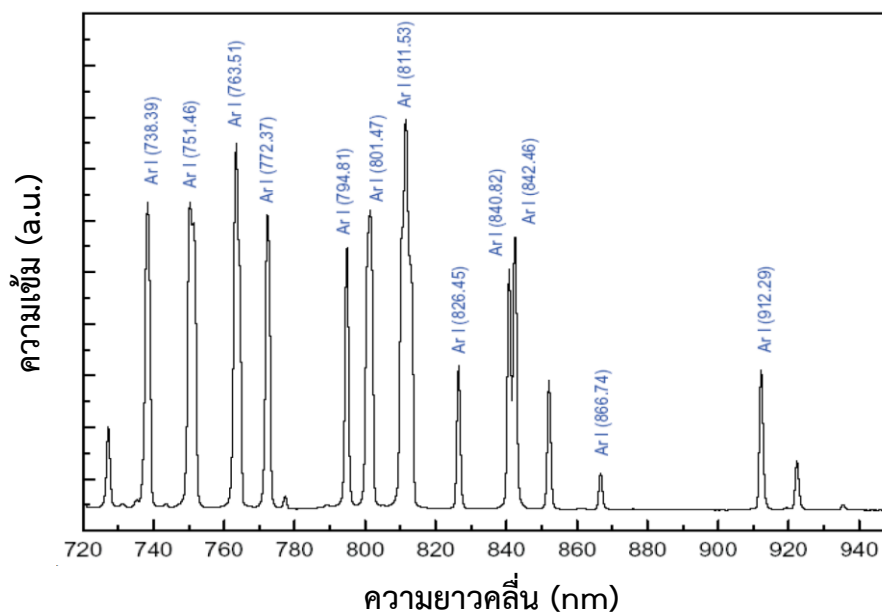
ในการวิจัยในห้องปฏิบัติการ การกระเจิง และการดูดซับลำของอนุภาคที่เป็นกลาง รวมถึงลำไอออนพลังงานสูง สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาค่าตัวแปรต่าง ๆ ของพลาสมา นอกจากนั้นโดยทั่วไปแล้ว การสะท้อน การกระเจิง การดูดซับ การหักเห และการแทรกสอด ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยพลาสมา ก็สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ตัวแปรพลาสมาต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาข้างต้นเช่นกัน [Jampaiboon, 2019] [Jampaiboon, Sirithipvanich, and Paosawatyanong, 2021] เทคนิคการใช้ลำอนุภาคและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในระดับห้องปฏิบัติการ ยังได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของพลาสมาในบริเวณขอบชั้นบรรยากาศโลก เช่นการใช้การแทรกสอดจากระยะไกลของการกระเจิงแบบไม่อาพันธ์ของคลื่นเรดาร์ (incoherent scatter radar technique) ในการศึกษาชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ [Ding, et al., 2018] [Zhang, et al., 1999] เป็นต้น

นอกเหนือไปจากวิธีที่กล่าวมาแล้วข้างต้น เรายังสามารถได้ข้อมูลตัวแปรพลาสมาต่าง ๆ จากการปล่อยโฟตอน หรือการเปล่งแสงของพลาสมาเองอีกด้วย โดยความเป็นจริงแล้ว การศึกษาสเปกตรัมของโฟตอนจากพลาสมา เป็นวิธีการเดียวที่สามารถใช้วิเคราะห์พลาสมาในห้วงอวกาศที่ไกลกว่าระบบสุริยะออกไป ในทางปฏิบัติแล้ว เทคนิคทางสเปกโตรสโคปีหลากหลายแบบที่ครอบคลุมการวิเคราะห์สเปกตรัมของการแผ่รังสีทุกช่วงความยาวคลื่นได้ถูกนำมาใช้ในการหาค่าอุณหภูมิ และความหนาแน่นพลาสมาจากแหล่งกำเนิดต่าง ๆ [Griem, 1997] [Hebner, Miller, and Woodworth, 2000]

อุณหภูมิของไอออนสามารถหาได้จากการวัดความกว้างของเส้นสเปกตรัมของการเปล่งแสงของพลาสมา ด้วยการสังเกตปรากฏการณ์ซึ่งเรียกว่าการขยายออกแบบดอปเพลอร์ (Doppler broadening) โดยทั่วไป ความกว้างของเส้นสเปกตรัมจะแปรตามสภาพการเคลื่อนที่เชิงอุณหภูมิ การแผ่ออกของเส้นสเปกตรัมจากปรากฏการณ์ดอปเพลอร์เป็นผลของการแจกแจงความเร็ว (velocity distribution) ของอะตอมหรือโมเลกุลในพลาสมา ความเร็วที่ต่างกันของอนุภาคที่ปลดปล่อยโฟตอน จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงดอปเพลอร์ (Doppler shift) ที่ต่างกัน โฟตอนที่มาจากอนุภาคซึ่งมีความเร็วต่ำกว่าจะเลื่อนไปยังความถี่ที่ต่ำลง ในขณะที่โฟตอนจากอนุภาคซึ่งมีความเร็วสูงกว่าจะเลื่อนไปยังความถี่ที่สูงขึ้น ผลรวมทั้งหมดของการเปลี่ยนแปลงดอปเพลอร์ดังกล่าวจะทำให้เกิดการขยายออกของเส้นสเปกตรัมนั่นเอง [Bitter, et al., 1979] [Fonck, et al., 1983]

ในงานวิจัยจำนวนมาก การวิเคราะห์สเปกตรัมการเปล่งแสงของพลาสมา (optical emission spectroscopy) หรือ วิธี OES เป็นวิธีการที่ได้รับการใช้งานอย่างกว้างขวางในพลาสมาอุณหภูมิต่ำ [Malyshev and Donnelly, 1997] [Boffard, Lin, and DeJoseph, 2004] [Zhu and Pu, 2010] ซึ่งหากพิจารณาว่าฟังก์ชันการแจกแจงพลังงานของอิเล็กตรอนในพลาสมาเป็นแบบแมกซ์เวลล์-โบลต์ซมันน์ (Maxwell-Boltzmann distribution function) สเปกตรัมการเปล่งแสงของอะตอมหรือโมเลกุลที่ถูกกระตุ้นโดยการชนของอิเล็กตรอนในพลาสมา ดังในรูปที่ 1.2 จะสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาอุณหภูมิ และความหนาแน่นอิเล็กตรอนได้ ในการใช้วิธีเพื่อหาค่าของ T_e และ n_e โดยทั่วไปมักจะใช้เทคนิคการหาอัตราส่วนความเข้มของเส้นสเปกตรัม (line ratio technique) ในขั้นตอนแรกของวิธีนี้ จะอาศัยการสร้างโมเดลของการเปลี่ยนระดับของอิเล็กตรอนในอะตอมที่มีค่าพลังงานกระตุ้น 2 ระดับที่เป็นต้นกำเนิดของการเปล่งแสง โดยการพิจารณาสมดุลเชิงสถิติที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตซึ่งก็คือการเลื่อนระดับพลังงานขึ้น และกระบวนการผกกลับซึ่งก็คือการลดระดับพลังงานลงจะทำให้สามารถหาผลเฉลยของอัตราส่วนความเข้มของเส้นสเปกตรัมระหว่างระดับพลังงานทั้ง 2 นั้นได้ อัตราส่วนดังกล่าวจะเป็นฟังก์ชันของตัวแปรพลาสมาต่าง ๆ และทำให้เราสามารถทำการจำลองผลที่เหมาะสมที่สุด (fitting) ของค่าตัวแปรพลาสมาที่คำนวณทางทฤษฎีเข้ากับอัตราส่วนความเข้มของเส้นสเปกตรัมที่วัดได้ เทคนิค

วิธีอัตราส่วนเช่นนี้ได้ถูกใช้ในการศึกษาพลาสมาของระบบต่าง ๆ จำนวนมาก เช่น ระบบดิสชาร์จ์ด้วยความถี่วิทยุ [Melnikov, et al., 2019] ระบบดิสชาร์จ์ไมโครเวฟ [Rujisamphan, 2006] ในช่วงความดันต่ำจนถึงระดับความดันบรรยากาศ [Zhu, et al., 2009] ทั้งนี้ เราจะได้ศึกษารายละเอียดการวิเคราะห์สเปกตรัมการเปล่งแสงของพลาสมาในบทที่ 9



รูปที่ 1.2 สเปกตรัมการเปล่งแสงของพลาสมาของแก๊ส Ar ในช่วง 720 – 950 nm ยอดที่มีค่าความยาวคลื่นกำกับคือ Ar I ภาพปรับจาก [Rujisamphan, 2009]

1.6 พลาสมาในเทคโนโลยียุคปัจจุบัน

เป็นที่คาดหมายว่า การประยุกต์ใช้พลาสมาที่สำคัญที่สุดในอนาคต จะอยู่ในเทคโนโลยีของแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าของโลก วิธีการหลักที่ใช้ในการสร้างกำลังไฟฟ้าคือ การใช้ความร้อนเพื่อเปลี่ยนน้ำเป็นไอน้ำที่จะไปขับเคลื่อนกังหันไฟฟ้า ในปัจจุบันแหล่งความร้อนที่ใช้กันอยู่เกือบทั้งหมดจะใช้น้ำมัน ถ่านหิน หรือน้ำมัน แก๊สธรรมชาติ หรืออาจเป็นเตาปฏิกรณ์ฟิชชัน (fission reactor) อย่างไรก็ตาม การคาดการณ์ถึงการหมดลงของเชื้อเพลิงฟอสซิล (fossil fuel) รวมถึงประเด็นด้านความปลอดภัยและประสิทธิภาพของเตาปฏิกรณ์ฟิชชัน ทำให้ในช่วงระยะเวลาหลายสิบปีที่ผ่านมา [Smith and Cowley, 2010] การให้กำเนิดพลังงานจากเครื่องปฏิกรณ์ฟิวชัน (fusion reactor) จึงเป็นหัวข้อสำคัญในการทำงานวิจัยของนักวิทยาศาสตร์จากทั่วโลกอยู่ในขณะนี้

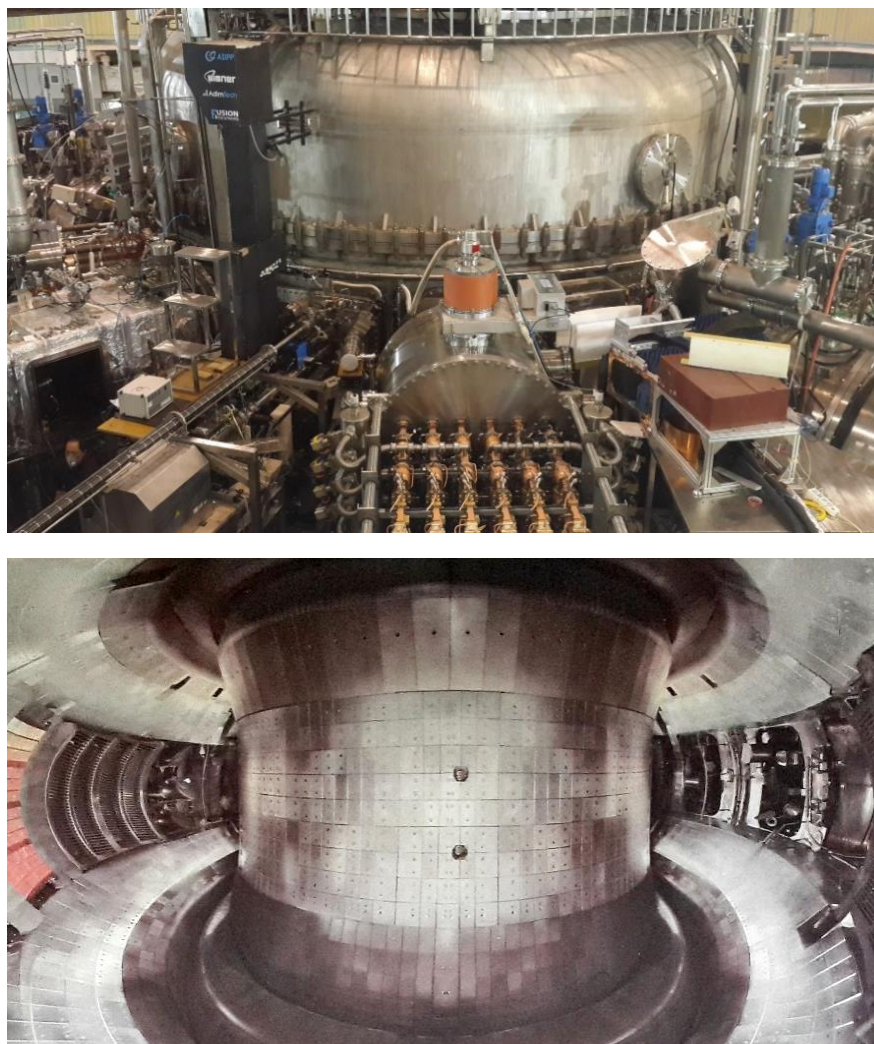
ปฏิกิริยาฟิวชันเกิดขึ้นในดวงอาทิตย์และดาวฤกษ์มาหลายพันล้านปี อย่างไรก็ตาม การสร้างปฏิกิริยาฟิวชันที่สามารถให้พลังงาน และคงสภาพอยู่ได้บนโลก มีความยากลำบากกว่าปฏิกิริยาฟิชชันอย่างยิ่ง การทำให้เกิดพลังงานสุทธิโดยเครื่องปฏิกรณ์ฟิวชันในห้องปฏิบัติการ จำเป็นต้องมีพลาสมาที่มี

อุณหภูมิในช่วงถึง 100×10^6 K (10^5 eV) นับเป็น 10 เท่าของค่าที่แกนกลางของดวงอาทิตย์ ในปัจจุบัน อาจกล่าวได้ว่า อุปกรณ์ฟิวชันที่ได้รับการพัฒนามากที่สุดคือเครื่องโทคาแมค (tokamak) ซึ่งเป็นคำย่อในภาษารัสเซีย หมายถึงสนามแม่เหล็กทรงห่วงยาง (toroidal magnetic field) โทคาแมคในยุคแรกเป็นเพียงอุปกรณ์ที่สร้างจากแนวความคิดพื้นฐานของหม้อแปลงไฟฟ้า ที่มีขดลวดปฐมภูมิที่ถูกกระตุ้นเพื่อทำให้เกิดกระแสไหลในขดทุติยภูมิ ในปัจจุบันมีโทคาแมคขนาดเล็กและใหญ่มากกว่า 100 เครื่องอยู่ในห้องปฏิบัติการต่าง ๆ ทั่วโลกเพื่อใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของพลาสมาอุณหภูมิสูงที่ได้รับการเก็บกัก (confinement) ไว้ หลักการทั่วไปของเครื่องโทคาแมค จะอาศัยโครงสร้างสนามแม่เหล็ก (magnetic configuration) อันเกิดจากผลของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดแม่เหล็กที่พันรอบภาชนะสุญญากาศ แกนกลางทรงโดนัท ร่วมกับผลจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลอยู่ภายในพลาสมา ซึ่งจะทำให้เกิดการเก็บกักพลาสมาอุณหภูมิสูงไว้ในภาชนะสุญญากาศแกนกลางนั้น การทำงานของหม้อแปลงขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กที่แกนกลางของหม้อแปลง แต่เป็นเพราะการที่ฟลักซ์จำนวนหนึ่งเท่านั้นที่สามารถปรากฏในแกนได้ อุปกรณ์โทคาแมคจึงทำงานลักษณะเป็นห้วง (pulse) ที่การทดลองในเครื่องโทคาแมคต่าง ๆ มักจะจำกัดอยู่ในแค่ช่วงเวลาไม่กี่วินาทีเท่านั้น ความก้าวหน้าล่าสุดที่รายงานไว้ในปี 2021 นี้ คือผลสำเร็จของเครื่องโทคาแมค HT7U (Experimental Advanced Superconducting Tokamak ชื่อย่อ EAST) ในเมืองเหอเฟย์ (Hefei) ประเทศจีนดังรูปที่ 1.3 ซึ่งแสดงอุณหภูมิแกนกลางได้ระดับ 120×10^6 K และในห้วงเวลานานกว่า 100 วินาที [Wang, et al., 2021] [Xu, 2021]

นอกเหนือจากความคาดหวังที่จะเป็นเทคโนโลยีในแหล่งพลังงานแห่งอนาคตแล้ว ในปัจจุบัน เทคโนโลยีพลาสมาถูกใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมต่าง ๆ อีกทั้งขอบเขตของการประยุกต์ใช้ก็ได้ถูกขยายออกไปอย่างต่อเนื่อง เราอาจจำแนกประโยชน์ของพลาสมาในเชิงเทคโนโลยีได้เป็น 2 ประการ ประการแรก พลาสมาสามารถสร้างสภาวะอุณหภูมิที่สูงกว่าที่จะสามารถทำได้ด้วยความร้อนจากเชื้อเพลิงทางเคมี ประการที่สอง พลาสมาประกอบด้วยไอออน อนุภาคมูลอิสระ รวมถึงอนุภาคอื่น ๆ ที่มีความตื่นตัวทางเคมีจำนวนมาก ดังนั้น ไม่ว่าจะเป็นการใช้งานพลาสมาโดยตรง หรือโดยใช้พลาสมาเข้าช่วย (plasma assisted) บางส่วน ในทางปฏิบัติเราก็จะสามารถจัดการกระบวนการโดยรวมให้มีประสิทธิภาพ หรือเกิดผลที่ต่างออกไปอย่างมาก ข้อได้เปรียบอีกประการหนึ่งก็คือการใช้พลาสมาจะทำให้เราสามารถส่งผ่านพลังงานจำเพาะ (พลังงานต่อหน่วยสาร) ได้มาก ด้วยวิธีการที่ไม่ซับซ้อนจนเกินไป

การใช้งานพลาสมาในลักษณะของตัวกลางส่งผ่านความร้อนที่เก่าแก่ที่สุดแบบหนึ่ง คือการเชื่อมและตัดโลหะ ค่าอุณหภูมิสูงสุดที่จะได้จากเปลวร้อนของเชื้อเพลิงทางเคมีจะมีค่าราว 3,000 K ซึ่งไม่เพียงพอต่อการใช้งานในวัสดุหลายชนิด การดีสชาร์จแบบอาร์ค (arc discharge) จากเครื่องเชื่อมอาร์คไฟฟ้า (electrical arc) สามารถทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นหลายอันดับ จึงทำให้การหลอม หรือการระเหยวัสดุ

เหล่านั้ันเกิดขึ้นได้ ด้วยเหตุนี้การเชื่อมอาร์กไฟฟ้าจึงถูกนำมาใช้ในการเชื่อมและตัดโลหะมาตั้งแต่ช่วงต้นของศตวรรษที่ 19 ในช่วงเวลาที่ผ่านมา เปลวพลาสมาที่สามารถส่งกำลังในช่วง 500 kW - 40 MW ได้ถูกนำมาใช้ในการหลอมขึ้นรูปโลหะ ในการหลอมเศษโลหะเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ รวมถึงการสกัดโลหะและถลุงแร่ต่าง ๆ [Mac Rae, 1989, 1992] [Mimura and Isshiki, 2002] [Hong, et al., 2011] เมื่อเปรียบเทียบการใช้ความร้อนจากแหล่งกำเนิดพลาสมาในการสกัดโลหะจากแร่ กับวิธีการดั้งเดิมซึ่งอาศัยความร้อนจากกระบวนการเชิงเคมี พบว่าในกระบวนการสกัดที่สามารถใช้แหล่งความร้อนเปรียบเทียบจากทั้ง 2 แบบ กระบวนการพลาสมาจะมีผลลัพธ์ที่ดีกว่าทั้งในด้านคุณภาพและปริมาณ อีกทั้งยังเกิดของเสียจากกระบวนการที่น้อยกว่า แม้ว่าจะจำเป็นต้องใช้การลงทุนที่สูงในตอนเริ่มต้น [Taylor and Pirzada, 1993] [Smirnov, 2001] [Sabat and murphy, 2017]



รูปที่ 1.3 ภายนอกและภายในของเครื่อง HT7U-EAST ขนาดรัศมี major radius 1.22 m ซึ่งเริ่มการสร้างและทดสอบในช่วงปี 1994 (ภาพถ่ายจากสถานที่จริงโดยได้รับอนุญาต)

ระบบดิสชาร์จหลายแบบถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวสสาร การเป็นตัวกลางที่ทั้งสามารถส่งผ่านความร้อนได้ดี และมีอนุภาคที่มีความตื่นตัว (excited species) จำนวนมากของพลาสมาในกระบวนการดิสชาร์จ เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการปรับเปลี่ยนคุณลักษณะเชิงผิวของวัสดุ เมื่อพลาสมาเกิดอันตรกิริยากับพื้นผิว องค์ประกอบเชิงเคมีของผิวอาจไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ลักษณะเชิงกายภาพสามารถเปลี่ยนไปได้อย่างมาก หรืออาจเกิดขึ้นในลักษณะที่กลับกัน หรืออาจเกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งทางเคมีและกายภาพก็ได้ ขึ้นกับค่าตัวแปรพลาสมาและสภาวะของการดิสชาร์จ ในกรณีที่มีอนุภาคที่มีความตื่นตัวภายในพลาสมาเกิดอันตรกิริยาเชิงเคมีกับพื้นผิว ผิวหน้าชั้นบนที่สัมผัสพลาสมาสามารถเกิดองค์ประกอบเชิงเคมีที่แตกต่างไปจากตัวปริมาตรวัสดุ (bulk material) ดังเดิม ตัวอย่างเช่นในการชุบแข็งผิวของโลหะ (metal surface hardening) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีการสังสมของโลหะไนไตรด์ (metal nitride) [Paosawatyanong, et al., 2016] [Pongsopa, et al., 2011, 2012] [Taweesub, et al., 2010] หรือโลหะคาร์ไบด์ (metal carbide) บนผิวหน้าของโลหะที่ผ่านกระบวนการดิสชาร์จ ซึ่งสารประกอบเหล่านั้นเกิดขึ้นจากการที่ไอออน หรืออะตอมที่ตื่นตัวในพลาสมาแทรกเข้าสู่ชั้นผิวหน้าของโลหะนั้นเอง

กลไกอีกประเภทหนึ่งของอันตรกิริยาของพลาสมาที่พื้นผิววัสดุ จะเกิดขึ้นในลักษณะที่สสารที่เป็นวัสดุชั้นฐาน (substrate material) ไม่ได้ร่วมอยู่ในกระบวนการเชิงเคมี แต่จะเป็นการตกสะสม (deposition) ของสสารจากการดิสชาร์จเกิดเป็นฟิล์มบางบนผิวหน้าของวัสดุชั้นฐาน ฟิล์มบางนี้สามารถมีคุณลักษณะเชิงกล เชิงไฟฟ้า เชิงแสง เชิงคุณภาพ หรือเชิงเคมี ที่จะแก้ปัญหาหรือเป็นไปตามความต้องการพิเศษในบางลักษณะ ตัวอย่างสำคัญของกระบวนการที่ใช้กลไกแบบนี้คือการสปัตเตอริง (sputtering process) สปัตเตอริงเป็นการตกสะสมซึ่งอาศัยการเร่งอนุภาคในพลาสมาให้เข้าชนวัสดุเป้า (target material) และทำให้อะตอมของสสารที่เป็นเป้าหลุดออก กลุ่มอะตอมของสสารที่เป็นเป้าเหล่านั้นจะเคลื่อนเข้าสู่วัสดุชั้นฐานและตกสะสมเป็นฟิล์มบางขึ้น การเร่งอนุภาคที่เป็นกลางในดิสชาร์จให้มีพลังงานสูงระดับ 10 eV เพื่อใช้ในการสปัตเตอริงจะทำได้ยาก การเร่งไอออนภายใต้สนามไฟฟ้าทำได้ง่ายกว่า และสามารถควบคุมระดับพลังงานไอออนได้ตามต้องการ อิเล็กตรอนในพลาสมาก็มีประจุและถูกเร่งให้มีพลังงานสูงด้วยสนามไฟฟ้าได้ แต่อิเล็กตรอนมีมวลน้อยกว่าอะตอมของสสารที่เป็นเป้าหมายมาก ทำให้การถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัมสู่อะตอมของสสารที่เป็นเป้าไม่มีประสิทธิภาพนัก และมักไม่สามารถทำให้เกิดการสปัตเตอริงได้ ระบบที่สร้างขึ้นเพื่อใช้งานในห้องปฏิบัติการมักจะใช้สนามแม่เหล็กช่วยในการกักเก็บไอออนและอิเล็กตรอนที่หน้าเป้า ระบบเช่นนั้นจึงถูกเรียกว่าแมกนีตรอนสปัตเตอริง (magnetron sputtering) [Promros and Paosawatyanong, 2010] [Promros, et al., 2016]

แนวทางการประยุกต์ใช้พลาสมาที่สำคัญอีกลักษณะหนึ่งอยู่ในสาขาเคมีพลาสมา (plasma chemistry) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์สารประกอบทางเคมี รวมถึงการใช้พลาสมาในการเร่ง

กระบวนการเชิงเคมีทั้งในลักษณะของคะตะลิสต์ (catalyst) หรือการให้พลังงาน หรือการเติมองค์ประกอบเชิงเคมีที่เหมาะสมในขั้นตอนต่าง ๆ ตัวอย่างสำคัญในการใช้เคมีพลาสมาในระดับอุตสาหกรรมอยู่ในกระบวนการผลิตแอมโมเนียซึ่งอาศัยพลาสมาจากการดิสชาร์จด้วยความถี่วิทยุเป็นคะตะลิสต์ [Carreon, 2019] อีกตัวอย่างของกระบวนการเคมีพลาสมา คือ การผลิตไอโซนด้วยการดิสชาร์จระหว่างขั้วไฟฟ้าสองขั้วที่คั่นด้วยไดอิเล็กทริก (dielectric barrier discharge) [Boonduang and Limsuwan, 2013] [Yordwong and Boonyawan, 2018] เคมีพลาสมาได้รับการพัฒนาสู่ระดับอุตสาหกรรมมาแล้วระยะหนึ่ง สารประกอบต่าง ๆ ที่ได้รับการสังเคราะห์หรือปรับเปลี่ยนคุณลักษณะโดยกระบวนการเคมีพลาสมาในปัจจุบันรวมถึง อะเซทิลีน (C_2H_2) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) [Rattanasatien, et al., 2012] ซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotube) รวมถึงคาร์บอนคล้ายเพชร (diamond-like carbon) [Triroj, et al., 2020] [Paosawatyanong, et al., 2013, 2010] [Saeheng, et al., 2012] ในระดับคุณภาพต่าง ๆ และยังมีสารอื่น ๆ อีกจำนวนมาก แม้ว่าจำนวนของสารจากกระบวนการพลาสมาเหล่านั้นจะยังอยู่ในสัดส่วนที่น้อยเมื่อเทียบกับการผลิตในอุตสาหกรรมเชิงเคมีทั้งหมด สัดส่วนดังกล่าวก็เพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัดในช่วงเวลากว่า 20 ปีที่ผ่านมา ผลที่ได้จากกระบวนการเคมีพลาสมาสามารถอยู่ในรูปที่เป็นแก๊ส หรือในรูปของของวัตถุควบแน่น ที่เป็นผง เป็นก้อน หรือเป็นแผ่นฟิล์มบาง ตามแต่เทคนิคกระบวนการและระบบที่ใช้ในการดิสชาร์จ

เราสามารถนำเคมีพลาสมาในกระบวนการของสารประกอบอินทรีย์ เช่นเดียวกับกระบวนการของวัสดุอนินทรีย์ดังที่กล่าวมาข้างต้น การประยุกต์ใช้พลาสมาสำหรับสารประกอบอินทรีย์จะอยู่ในการผลิตพอลิเมอร์ แผ่นเยื่อบางของพอลิเมอร์ (polymer membrane) และการสังเคราะห์โครงสร้างพอลิเมอร์ในลักษณะพิเศษด้วยพลาสมาอุณหภูมิต่ำ เป็นต้น การใช้เคมีพลาสมามีความสำคัญและเป็นทางเลือกที่โดดเด่นในการสังเคราะห์พอลิเมอร์นำไฟฟ้าในโครงสร้างระดับนาโนเมตร การศึกษาสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีย์ได้รับความสนใจอย่างมากนับตั้งแต่มีการค้นพบในช่วงปี 1970 เนื่องจากคุณสมบัติพิเศษบางประการที่เหนือกว่าสารกึ่งตัวนำจากสารอนินทรีย์โดยทั่วไป วิธีการเตรียมพอลิเมอร์นำไฟฟ้าในรายงานยุคแรกจะเป็นการสังเคราะห์จากสารเคมีแบบดั้งเดิม หรือจากกระบวนการไฟฟ้าเคมี (electrochemical process) พอลิเมอร์ที่ได้จากวิธีการในแนวทางเดิม ภายหลังจากการแยกตกตะกอนมักจะอยู่ในรูปผง แผ่น หรือก้อน อย่างไรก็ตามด้วยการที่พอลิเมอร์นำไฟฟ้าจะไม่ละลายในตัวทำละลายส่วนใหญ่ ทำให้มีความยากลำบากในการขึ้นรูป อีกทั้งต้องใช้วิธีที่ซับซ้อนในการทำให้เป็นฟิล์มโดยเฉพาะฟิล์มที่มีความหนาในระดับ 100 นาโนเมตรลงมา การสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยพลาสมา (plasma polymerization) จากสารมอนอเมอร์ตั้งต้นที่เป็นของเหลวหรือไอ จะทำให้สามารถควบคุมฟิล์มบางของพอลิเมอร์ให้อยู่ในระดับนาโนเมตรและมีความเรียบสม่ำเสมอ อีกทั้งยังสามารถเจือสารโด๊ป (doping) เข้าไปในระหว่าง

กระบวนการพลาสมาเพื่อปรับเปลี่ยนลักษณะสื่อนำไฟฟ้าของฟิล์มได้โดยสะดวก ระบบดิสชาร์จหลายแบบเช่น ระบบดิสชาร์จด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ ระบบดิสชาร์จด้วยความถี่วิทยุ และระบบดิสชาร์จด้วยไมโครเวฟ ได้ถูกนำมาใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มบางและการเจือสารโคปของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าหลายกลุ่ม เช่น พอลิอะนิลีน (polyaniline, PANI) พอลิไพโรล (polypyrrole) [Paosawatyanong, et al., 2011] [Paosawatyanong, Tapaneeyakorn, Bhanthumnavin, 2010] และพอลิไทโอเฟน (polythiophene) [Paosawatyanong, Luyaphand, Bhanthumnavin, 2012] [Paosawatyanong, Kamphiranon, Bhanthumnavin, 2010] เป็นต้น

กระบวนการไฟฟ้าเคมีของพลาสมาอุณหภูมิต่ำได้ถูกนำมาใช้เพื่อปรับเปลี่ยนคุณลักษณะเชิงผิวของเส้นใย และสิ่งทอเพื่อให้มีคุณลักษณะพิเศษต่าง ๆ เช่นการใช้พลาสมาของแก๊สออกซิเจนและซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์เพื่อปรับปรุงสภาพการซึมซับน้ำ และความสามารถในการติดสีย้อมของผ้าไหม ผ้าฝ้าย ผืนพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) เส้นใยเซลลูโลส และเส้นใยนาโนของพอลิเมอร์ต่าง ๆ [Pransilp, et al., 2012, 2016] [Paosawatyanong, Kamlangkla and Hodak, 2010] [Kamlangkla, et al., 2010] [Hodak, et al. 2008] นอกจากนั้นการใช้ข้อมูลของสารประกอบฟอสเฟตร่วมกับแก๊สตัวกลางในพลาสมายังสามารถปรับปรุงผ้าและเส้นใยให้มีความทนต่อการถูกติดไฟได้อีกด้วย [Paosawatyanong, Jermutjarit, and Bhanthumnavin, 2012, 2014] ในบทที่ 10 ซึ่งเป็นบทสุดท้าย เราจะได้ศึกษาตัวอย่างงานวิจัย และการประยุกต์ใช้พลาสมาในเทคโนโลยีปัจจุบันหลายลักษณะที่ได้อ้างถึงในหัวข้อ 1.7 นี้

โดยสรุปแล้ว เมื่อประเมินภาพรวมของงานวิจัย และผลสัมฤทธิ์ที่เกิดขึ้นทั้งด้านการสร้างองค์ความรู้ใหม่ และการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมของพลาสมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เราจะเห็นว่าเทคโนโลยีพลาสมาได้สร้างรากฐานที่มั่นคง ทั้งจะได้เสนอโอกาส และแนวทางพัฒนาที่สำคัญใหม่ต่อไปอีกในอนาคต

บรรณานุกรม

- Alfvén, H., Existence of Electromagnetic-Hydrodynamic Waves, Nature (1942) 150, 405-406
- Arora, V., Naik, P. A., Chakera, J. A., Bagchi, S., Tayyab, M., and Gupta, P. D., Study of 1–8 keV K- α X-ray Emission from High Intensity Femtosecond Laser Produced Plasma, AIP Advances (2014) 4, 047106
- Bitter, M., Goeler, S., Horton, R., Goldman, M., Hill, K. W., Sauthoff, N. R. and Stodiek W., Doppler-Broadening Measurements of X-Ray Lines for Determination of the Ion Temperature in Tokamak Plasmas, Phys. Rev. Lett. (1979) 42, 304-306
- Boffard, J. B., Lin, C. C., and DeJoseph, C. A., Application of Excitation Cross Sections to Optical Plasma Diagnostics, J. Phys. D: Appl. Phys. (2004) 37, R143–R161
- Bohm, D., and Pines, D., A Collective Description of Electron Interactions. I. Magnetic Interactions, Phys. Rev., 1951, 82(5), 625-634
- Bohm, D., and Pines, D., A Collective Description of Electron Interactions. II. Collective vs Individual Particle Aspects of the Interactions, Phys. Rev., 1952, 85, 338-353
- Bohm, D., and Pines, D., A Collective Description of Electron Interactions. I. Coulomb Interactions in a Degenerate Electron Gas, Phys. Rev., 1953, 92(3), 609-625
- Boondung, S. and Limsuwan, P., Effect of Generation Heat on Ozone Generation in Dielectric Cylinder-Cylinder DBD Ozone Generator, Energy and Power Engineering (2013), 5, 523-527
- Carreon, M. L., Plasma Catalytic Ammonia Synthesis: State of the Art and Future Directions, J. Phys. D: Appl. Phys. (2019) 52 483001
- Chapman, B., Glow Discharge Processes Sputtering and Plasma Etching, John Wiley & Sons, 1980
- Chen, F. F., Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion Volume 1: Plasma Physics, 2nd Ed., Springer, 1983
- Debye, P., and Hückel, E., The Theory of Electrolytes I Freezing Point Depression and Related Phenomena [Zur Theorie der Elektrolyte I Gefrierpunktserniedrigung und

Verwandte Erscheinungen], Physikalische Zeitschrift (1923) 24, 185–206 (Translated and typeset by Braus, M. J., 2020)

- Dendy, R., Plasma Physics: An Introductory Course, Cambridge University Press, 1993
- Ding, Z., Wu, J., Xu, Z., Xu, B., and Dai, L., The Qujing Incoherent Scatter Radar: System Description and Preliminary Measurements (2018) Earth Planets Space 70, 87
- Encyclopaedia Britannica, 15th ed., “Plasma State”, Encyclopaedia Britannica: Chicago, 1989
- Fonck, R. J., Goldston, R. J., Kaita, R. and Post, D. E., Plasma Ion Temperature Measurements via Charge Exchange Recombination Radiation, Appl. Phys. Lett. (1983) 42, 239-241
- Griem, H. R., principles of Plasma Spectroscopy, Cambridge University Press, 1997
- Hebner, G. A., Miller, P. A., Woodworth, J. R., Overview of Plasma Diagnostic Techniques in Handbook of Advanced Plasma Processing Techniques, (eds. Shul R. J., Pearton, S. J.) Springer, 2000
- Hodak, S. K., Supasai, T., Paosawatyanong, B., Kamlangkla, K., and Pavarajarn, V., Enhancement of the Hydrophobicity of Silk Fabrics by SF₆ Plasma, Appl. Surf. Sci. (2008) 254, 4744 – 4749
- Hong, Y. C., Shin, D. H., Lee, S. J., Kim, Y. J., Lee, B. J., and Uhm, H. S. , Generation of High-Power Torch Plasma by a 915-MHz Microwave System, IEEE Trans. Plasma Sci. (2011) 39(10), 1958-1962
- Huba, J. D., NRL Plasma Formulary, Naval Research Laboratory, 2004
- Gurnett, D. A., and Bhattacharjee, A., Introduction to Plasma Physics with Space and Laboratory Applications, Cambridge University Press, 2005
- Jampaiboon, N., Multipole Resonance Probe Measurement in Plasma, Master of Physics Thesis, Chulalongkorn University, 2019
- Jampaiboon, N., Sirithipvanich, C., and Paosawatyanong, B., Multipole Resonance Probe Measurement in Plasma, J. Phys.: Conf. Ser. (2021) 1719, 012056
- John, P. I., Plasma Sciences and the Creation of Wealth, Tata McGraw-Hill, 2005

- Kamlangkla, K., Paosawatanyong, B., Pavarajarn, V., Hodak, J.H., Hodak, S.K., Mechanical Strength and Hydrophobicity of Cotton Fabric after SF₆ Plasma Treatment, *Appl. Surf. Sci.* (2010) 256 (20), 5888-5897
- Kamsing, P., (2005) Measurement of Plasma Properties from a Theta Pinch Device [Master Thesis] Chulalongkorn University
- Lee, S., Saw, S. H., Lee, P. K, Akel, M. ,Damideh, V., Khattak, N. D., Mongkolnavin, R., and Paosawatanyong, B., A Model Code for the Radiative Theta Pinch, *Phys. Plasmas* (2014) 21(7), 072501
- Lieberman, M. A., and Lichtenberg, A. J., Principles of Plasma Discharges and Materials Processing, John Wiley & Sons, 1994
- Mac Rae, D. R., Plasma Arc Process Systems, Reactors, and Applications, *Plasma Chem. Plasma Process.* (1989) 9(1,Suppl), 85S-118S
- Mac Rae, D. R., Plasma-Arc Technology for Ferroalloys Part II, Proceedings of the 6th International Ferroalloys Congress, Johannesburg (1992) 21-35
- Malyshev, M. V., and Donnelly, V. M, Trace Rare Gases Optical Emission Spectroscopy: Nonintrusive Method for Measuring Electron Temperatures in Low-Pressure, Low-Temperature Plasmas, *Phys. Rev. E* (1999) 60, 6016–6029
- Melnikov, A. D., Usmanov, R. A.,Gavrikov, A. V., Liziakin, G. D., Smirnov, V. P., Timirkhanov, R. A., and Vorona, N. A., Application of Line-Intensity-Ratio Method for Measurement of Electron Temperature of Radio-Frequency Plasma of Argon in Magnetic Field inside the Plasma Separator, *J. Phys.: Conf. Ser.* (2019) 1147, 012131
- Mimura, K., and Isshiki, M., Hydrogen Plasma Arc Melting in Purification Process and Characterization of Ultra High Purity Metals: Springer Series in Materials Processing, (eds. Waseda, Y., and Isshiki, M.) Springer, 2002
- Ngamrunroj, D., (2002) Plasma Focus Modification for Material Surface Treatment [Master Thesis] Chulalongkorn University
- Paosawatanyong, B., Pongsopa, J., Visutti pitukul, P., Bhanthumnavin, W., Nitriding of Tool Steel using Dual DC/RFICP Plasma Process, *Surf. Coat. Technol.* (2016) 306, 351-357

- Paosawatyanong, B., Jermutjarit, B., Bhanthumnavin, W., Graft Copolymerization Coating of Methacryloyloxyethyl Diphenyl Phosphate Flame Retardant onto Silk Surface, *Prog. Org. Coatings* (2014), 77(10), 1585-1590
- Paosawatyanong, B., Rujsamphan, N., Bhanthumnavin, W., Microwave Plasma Source for Fabrication of Micro- and Nano-Crystalline Diamond Thin Films for Electronic Devices, *Japan. J. Appl. Phys.* (2013) 52, 01AC05
- Paosawatyanong, B., Jermutjarit, P., Bhanthumnavin, W., Surface Nanomodification of Cotton Fiber for Flame Retardant Application, *J. Nanosci. Nanotech.* (2012) 12, 748-753
- Paosawatyanong, B., Luyaphand, P. and Bhanthumnavin, W., Conductive Poly(3-methylthiophene) Thin Films, *Rare Metal Mat. Eng.* (2012) 41(s1), 64-68
- Paosawatyanong, B., Tapaneeyakorn, K., Lapsongphol, D. and Bhanthumnavin, W., Polypyrrole Nanofilm with Improved Conductivity, *Appl. Mech. Mater.* (2011) 55-57, 1332-1335
- Paosawatyanong, B., Kamlangkla, K., and Hodak, S.K., Hydrophobic and Hydrophilic Surface Nano-Modification of PET Fabric by Plasma Process, *J. Nanosci. Nanotech.* (2010) 10, 7050 – 7054
- Paosawatyanong, B., Kamphiranon, P., Bannarakkul, W., Srithana-anant, Y., and Bhanthumnavin, W., Doping of polythiophene by microwave plasma deposition, *Surf. Coat. Technol.* (2010) 204, 3053 – 3058
- Paosawatyanong, B., Muakngam, A., Thitianan, S., Electrical Characteristics of DLC Deposited by RF Inductively Coupled Plasma Process, *Adv. Mater. Res.* (2010) 93-94, 699 – 702
- Paosawatyanong, B., Tapaneeyakorn, K., and Bhanthumnavin, W., AC Plasma Polymerization of Pyrrole, *Surf. Coat. Technol.* (2010) 204, 3069 – 3072
- Pongsopa, J., Visuttipitukul, P. and Paosawatyanong, B., Surface Hardening of Aluminium-Copper Alloy 2011 by RF Plasma Nitriding Process, *Key Engineer. Mater.* (2011) 462, 1097 – 1102
- Pongsopa, J., Visuttipitukul, P. and Paosawatyanong, B., Effect of hydrogen in RF plasma nitriding on Al-6wt%Cu alloy, *Appl. Mech. Mater.* (2011) 55-57, 1063-1066

- Pongsopa, J. Visuttipitukul, P., Bhanthumnavin, W. and Paosawatyanong, B., Low Temperature Plasma Nitriding of H13 Steel for Improved Surface Hardness, *Rare Metal Mat. Eng.* (2012) 41(s1), 69-73
- Pransilp, P., Pruettiphap, M., Bhanthumnavin, W., Paosawatyanong, B., Kiatkamjornwong, S., Surface modification of cotton fabrics by gas plasmas for color strength and adhesion by inkjet ink printing, *Appl. Surf. Sci.* (2016), 364, 208 – 220
- Pransilp, P., Kiatkamjornwong, S., Bhanthumnavin W. and Paosawatyanong, B., Plasma Nano-Modification of PET Fabric for Pigment Adhesion Enhancement, *J. Nanosci. Nanotech.* (2012) 12, 481-488
- Promros, N., Sittimart, P., Patanoo, N., Kongnithichalerm, S., Horprathum, M., Bhanthumnavin, W., Paosawatyanong, B., Physical Properties of Copper Films Deposited by Compact-Size Magnetron Sputtering Source with Changing Magnetic Field Strength, *Key Engineer. Mater.* (2016) 675, 193 – 196
- Promros, N., and Paosawatyanong, B., Silver Thin Films Deposited by Compact Magnetron Sputtering System, *Adv. Mater. Res.* (2010) 93-94, 413 – 416
- Rattanasatien, C., Tonanon, N., Bhanthumnavin, W. and Paosawatyanong, B., Coating of DLC Nanofilm on Alumina by MW-PECVD Process, *J. Nanosci. Nanotech.* (2012) 12, 642-647
- Roth, J. R., *Industrial Plasma Engineering Volume 1 Principles*, Institute of Physics Publishing, 1995
- Rujisamphan, N., (2006) *Design and Construction of Microwave PECVD and Preliminary Characteristics of Synthesized Polycrystalline Diamond Film* [Master Thesis] Chulalongkorn University.
- Sabat, K. C., and Murphy, A. B., Hydrogen Plasma Processing of Iron Ore, *Matall. Mater. Trans. B* (2017) 48(3), 1561-1594
- Saeheng, A., Tonanon, N., Bhanthumnavin, W., Paosawatyanong, B., Sulphur Doped DLC Films Deposited by Magnetron Sputtering. *Can. J. Chem. Eng.* (2012) 90, 909-914
- Pransilp, P., Kiatkamjornwong, S., Bhanthumnavin W. and Paosawatyanong, B., Plasma Smith, C. L., and Cowley, S., *The Path to Fusion Power*, *Phil. Trans. R. Soc. A* (2010) 368, 1091–1108

- Smirnov, B. M., Physics of Ionized Gases, John Wiley & Sons, 2001
- Swanson, C., and Cohen, S. A., Spontaneous Multi-keV Electron Generation in a Low-RF-Power Axisymmetric Mirror Machine, Phys. Plasmas (2019) 26, 060701
- Taweesub, K., Visuttiptukul, P., Tungkasmita, S., Paosawatyanong, B., Nitridation of Al-6%Cu alloy by RF Plasma Process, Surf. Coat. Technol. (2010) 204, 3091 – 3095
- Taylor, P. R., and Pirzada, S. A., Plasma Technology in Extractive and Process Metallurgy, Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review (1993) 12, 257-269
- Tonks, L., and Langmuir, I., Oscillations in Ionized Gases, Physical Review (1929) 33, 195-211
- Triroj, N., Saensak, R., Porntheeraphat, S., Paosawatyanong, B., Amornkitbamrung, V., Diamond-Like Carbon Thin Film Electrodes for Microfluidic Bioelectrochemical Sensing Platforms, Anal. Chem. (2020) 92(5), 3650–3657
- Wang, L., Xu, G. S., Hu, J. S., et al., Progress of Divertor Heat and Particle Flux Control in EAST for Advanced Steady-State Operation in the Last 10 Years. J. Fusion Energ. (2021) 40, 3
- Xu, H., Xu, W., Wu, D., Li, M., et al., ECRH System Upgrade Design using Dual Frequency Gyrotrons for EAST, Fusion Engineering and Design (2021) 164, 112222
- Yordwong, P. and Boonyawan, D., Ozone Conversion for Dielectric Barrier Discharge Plasma using Vitamin C, J. Phys.: Conf. Ser. (2018) 1144, 012079
- Zhang, S. R., Fukao, S., Oliver, W. L., and Otsuka, Y., The Height of the Maximum Ionospheric Electron Density over the MU Radar. J. Atmos. Solar. Terr. Phys. (1999) 61(18), 1367–1383
- Zhu, X. M., Pu, Y. K., Balcon, N., and Boswell, R., Measurement of the Electron Density in Atmospheric-Pressure Low-Temperature Argon Discharges by Line-Ratio Method of Optical Emission Spectroscopy J. Phys. D: Appl. Phys. (2009) 42, 142003
- Zhu, X. M., and Pu, Y. K., Optical Emission Spectroscopy in Low-Temperature Plasmas Containing Argon and Nitrogen: Determination of the Electron Temperature and Density by the Line-Ratio Method, J. Phys. D: Appl. Phys. (2010) 43, 403001

บทที่ 2 ทฤษฎีจลน์ของแก๊สและพลาสมา

เราได้ทราบแล้วว่า พลาสมาคือแก๊สที่ประกอบด้วยอนุภาคที่มีประจุและอนุภาคที่เป็นกลาง อนุภาคเหล่านั้นคือ อิเล็กตรอน ไอออนบวก ไอออนลบ อะตอม และโมเลกุล ซึ่งในพลาสมาหนึ่ง ๆ สามารถมีอนุภาคเหล่านี้ทุกชนิดหรือบางชนิดอยู่ร่วมกันในระบบ พลาสมาจะมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้าโดยรวม ทั้งนี้เพราะหากมีความไม่สมดุลของประจุจะทำให้มีสนามไฟฟ้า และจะเกิดแรงเคลื่อนย้ายอนุภาคที่มีประจุไปในทางที่จะกำจัดความไม่สมดุลนั้น ผลที่เกิดขึ้นคือ ความหนาแน่นอิเล็กตรอนรวมกับความหนาแน่นไอออนลบจะเท่ากับกับความหนาแน่นไอออนบวกในพลาสมา

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ตัวแปรสำคัญในพลาสมาตัวแปรหนึ่ง คือ องศาของการไอออนไนซ์ (degree of ionization) ซึ่งหมายถึงสัดส่วนของโมเลกุลของแก๊สที่ได้กลายเป็นอนุภาคที่มีประจุต่อจำนวนโมเลกุลของแก๊สที่ยังมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า พลาสมาที่มีองศาของการไอออนไนซ์น้อยกว่า 1 มาก ๆ จะเรียกว่าถูกไอออนไนซ์อย่างอ่อน (weakly ionized) เราพบว่าในพลาสมาซึ่งมีการไอออนไนซ์อย่างอ่อน จำนวนอนุภาคเป็นกลางที่มีอยู่มากจะครอบงำพฤติกรรมของพลาสมาโดยรวม ในขณะที่ภายในพลาสมาซึ่งถูกไอออนไนซ์โดยสมบูรณ์ (fully ionized) คือมีองศาของการไอออนไนซ์เข้าใกล้ 1 นั้น อนุภาคที่เป็นกลางแทบไม่มีหรืออาจมีบทบาทน้อยมาก

การให้กำเนิดและคงสภาพพลาสมาไว้ จำเป็นต้องอาศัยพลังงานที่เพียงพอต่อการไอออนไนซ์ (ionization) ในสภาวะคงตัว อัตราการไอออนไนซ์จะสมดุลกับอัตราการสูญเสียไอออน และอิเล็กตรอนที่ออกไปจากพลาสมาโดยกระบวนการรีคอมบายน (recombination) และการแพร่ไปสู่ขอบ (boundary) นอกบริเวณปริมาตรพลาสมา (plasma volume) พลาสมามักจะถูกอ้างถึงว่าเป็นสถานะที่ 4 หรือเฟสที่ 4 ของสสาร ทั้งนี้เพราะพลาสมาสามารถเกิดขึ้นโดยการให้พลังงาน (โดยเฉพาะในรูปความร้อน) แก่แก๊ส อย่างไรก็ตามจะไม่ปรากฏการเปลี่ยนเฟสอย่างชัดเจนในการเปลี่ยนจากแก๊สที่เป็นกลางสู่พลาสมา

แม้ว่าพลาสมาจะไม่ใช้เฟสที่ปรากฏให้พบเห็นโดยทั่วไปบนโลก พลาสมากลับเป็นเฟสของสสารที่มีมากที่สุดในจักรวาล พลาสมาที่เราศึกษากันในห้องปฏิบัติการนั้น จะถูกให้กำเนิดและคงสภาพอยู่ได้ด้วยสนามไฟฟ้าที่อาจมาจากศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง หรืออาจโดยศักย์ไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ความถี่ของศักย์ไฟฟ้าที่เป็นนิยมนำมาใช้ในการไอออนไนซ์ในห้องปฏิบัติการทั่วไปได้แก่ 13.56 MHz ในช่วงความถี่วิทยุ และ 900 MHz หรือ 2.45 GHz ในช่วงคลื่นไมโครเวฟ

ในบางครั้งพลาสมาในห้องปฏิบัติการอาจถูกอ้างถึงด้วยชื่อที่แตกต่างกัน เช่น ดิสชาร์จทางไฟฟ้า (electrical discharge) ดิสชาร์จในแก๊ส (gaseous discharge) หรือโกลวดิสชาร์จ (glow discharge) ดั้งเดิมคำว่าดิสชาร์จมักจะหมายถึงพลาสมาที่เกิดจากการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในแก๊สโดยตรง ซึ่งใน

ยุคแรกเริ่มนั้น การให้กระแสผ่านแก๊สจะทำได้โดยการสร้างความต่างศักย์สูงระหว่างขั้วอิเล็กโทรดสองขั้วในท่อแก้วที่บรรจุแก๊สความดันต่ำไว้ แม้ว่าในปัจจุบันจะมีวิธีการให้กำเนิดพลาสมาด้วยกระบวนการที่หลากหลายแต่คำว่าดิสชาร์จก็ยังเป็นที่นิยมใช้อยู่อย่างกว้างขวาง โดยความเป็นจริงแล้ว ในบางบริเวณของดิสชาร์จ เช่น ในบริเวณชีท (sheath) พฤติกรรมของไอออนและอิเล็กตรอนจะไม่ใช่ไปตามนิยามของพลาสมาอย่างที่เรารู้ได้ศึกษาในรายละเอียดต่อไป แต่กระนั้นในทางปฏิบัติความแตกต่างนี้จะไม่ส่งผลต่อสภาพพลาสมาโดยรวมอย่างมีนัยสำคัญนัก พลาสมาที่เราศึกษาในห้องปฏิบัติการจะเป็นส่วนหนึ่งในการดิสชาร์จ เราจึงมีโอกาที่จะพบการใช้คำที่หลากหลายสลับกันไปมาอยู่เสมอ

2.1 อุณหภูมิและฟังก์ชันการแจกแจง

เราจะได้พบในการศึกษาต่อไปว่าอิเล็กตรอนมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งในพลาสมา จึงมักนิยามที่จะจำแนกพลาสมาด้วยความหนาแน่นและพลังงานของอิเล็กตรอนที่มีอยู่ ความหนาแน่นอิเล็กตรอนในพลาสมาจะมีการกระจายตามระดับพลังงาน (หรืออีกนัยหนึ่งก็คือตามอุณหภูมิ) อย่างไม่สม่ำเสมอ แต่จะเป็นไปตามการแจกแจงเชิงสถิติในทางฟิสิกส์ (statistical distribution) ในการอ้างถึงระดับพลังงานของพลาสมาเราจึงมักพบการใช้ค่าเฉลี่ยของพลังงานของอิเล็กตรอนเป็นตัวแปรสำคัญ เพื่อให้เกิดความเข้าใจมากขึ้น เราจะเริ่มการศึกษาจากการแจกแจงเชิงสถิติของความเร็ว และของพลังงาน

2.1.1 ฟังก์ชันการแจกแจงความเร็ว

อนุภาคต่าง ๆ ภายในแก๊สและพลาสมาไม่ได้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่เท่ากัน หากว่าค่าเฉลี่ยของความเร็วของกลุ่มอนุภาคเป็น $\bar{u}$ อนุภาคหนึ่ง ๆ ในกลุ่มการกระจายตัวของอนุภาคชนิดนั้น ย่อมสามารถมีความเร็วสูงหรือต่ำกว่าค่า $\bar{u}$ ได้ สำหรับการเคลื่อนที่ภายในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian coordinate system) ที่ความเร็วของอนุภาคประกอบไปด้วยอัตราเร็วในแนวแกน (x,y,z) เป็น u_x, u_y และ u_z ค่าพลังงานจลน์จะเขียนได้เป็น

$$E = \frac{1}{2} m u^2 = \frac{1}{2} m (u_x^2 + u_y^2 + u_z^2) \quad [2.1]$$

การศึกษาทางฟิสิกส์แสดงให้เห็นว่า หากในจำนวนอนุภาคทั้งหมดต่อหน่วยปริมาตร n มีอยู่ n_x อนุภาคที่มีความเร็วระหว่าง u_x ถึง $u_x + du_x$ แล้ว การแจกแจงจำนวนของอนุภาคจะเป็นฟังก์ชันของความเร็วใน 1 มิติ ที่มีรูปสมการเป็น

$$f(u_x) = \frac{dn_x}{du_x} = n \left(\frac{m}{2\pi k_B T} \right)^{1/2} \exp \left(\frac{-m u_x^2}{2k_B T} \right) \quad [2.2]$$

โดย k_B คือค่าคงตัวโบลต์ซมันน์ (Boltzmann constant) มีค่า 1.38×10^{-23} J/K และ T คืออุณหภูมิ