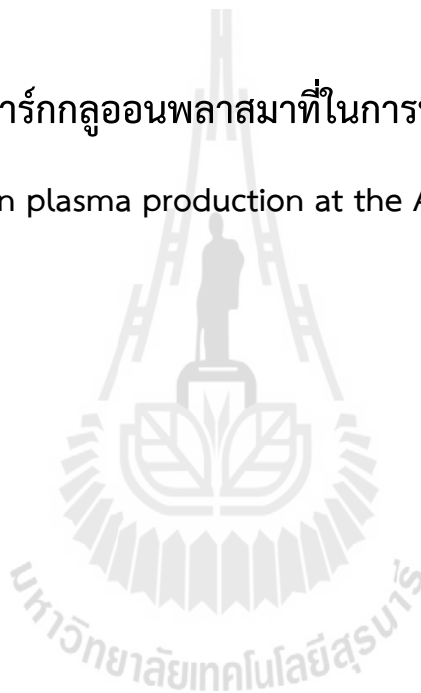




## รายงานการวิจัย

การศึกษาการเกิดควาร์กกลูออนพลาสมาที่ในการทดลอง ALICE ที่ CERN

(Study of quark-gluon plasma production at the ALICE experiment, CERN)



ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



## รายงานการวิจัย

การศึกษาการเกิดควาร์กกลูออนพลาสมาที่ในการทดลอง ALICE ที่ CERN  
(Study of quark-gluon plasma production at the ALICE experiment, CERN)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชีโนรัตน์ กอบเดช

สาขาวิชาฟิสิกส์

สำนักวิชาวิทยาศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. आयुทธ ลิ้มพิรัตน์

อาจารย์ ดร. ชรรค์ชัย โกลลทองกี

อาจารย์ วันเฉลิม พูนสวัสดิ์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2555

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กันยายน 2558

# กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ 2555 หมายเลขโครงการวิจัย SUT1-105-55-12-37

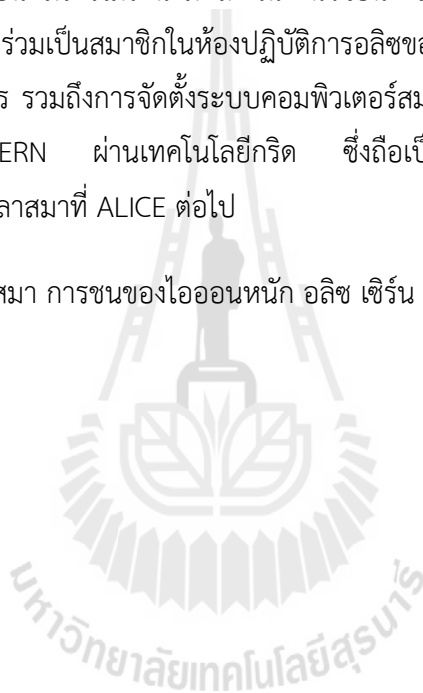
คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณทวี ศรีบุศย์ดี และคุณเกรียงศักดิ์ เหล็กดี จาก UNINET คุณอนุพงษ์ บรรจงการ คุณสุริยะ เอกอรุโอราพ และคุณสุนันฎฐา พรหมมา จาก NECTEC คุณกฤษ กุลนาวิน และคุณวัฒนา เวชวิริยกุล ศูนย์คอมพิวเตอร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



# บทคัดย่อ

อลิซ (ALICE) เป็นหนึ่งในห้องปฏิบัติการเครื่องตรวจหาอนุภาคสำหรับศึกษาการชนกันของไอออนหนักของเครื่องเร่งอนุภาค LHC ถูกออกแบบเพื่อทำการศึกษาค้นคว้าการมีอยู่ของควาร์ก-กลูออนพลาสมา ซึ่งเป็นสถานะหนึ่งในทฤษฎีควอนตัมโครโมไดนามิกส์ ในงานวิจัยนี้ จะกล่าวถึงระบบหัววัดต่าง ๆ ของห้องปฏิบัติการอลิซและการเข้าร่วมเป็นสมาชิกในห้องปฏิบัติการอลิซของ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เจื่อนไซต่าง ๆ ที่ต้องดำเนินการ รวมถึงการจัดตั้งระบบคอมพิวเตอร์สมรรถนะสูงที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีเพื่อเชื่อมโยงไปยัง CERN ผ่านเทคโนโลยีกริด ซึ่งถือเป็นเฟสแรกของการนำไปสู่การศึกษาปรากฏการณ์ควาร์ก-กลูออนพลาสมาที่ ALICE ต่อไป

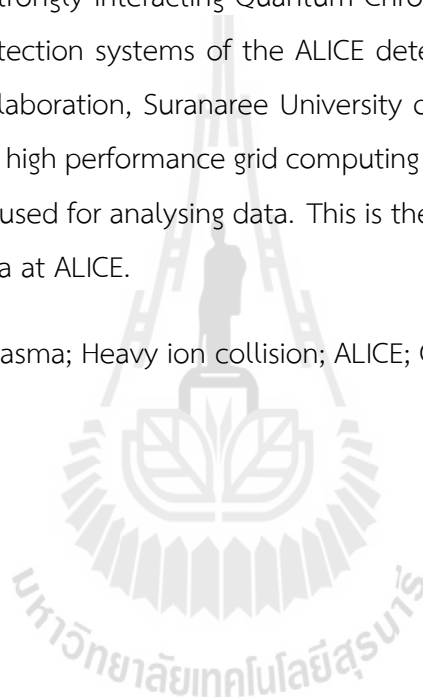
**คำสำคัญ** ควาร์ก-กลูออนพลาสมา การชนของไอออนหนัก อลิซ เซิร์น



# Abstract

ALICE is one of the main experiments in heavy ion collisions at the Large Hadron Collider (LHC) designed to perform dedicated research on Quark-Gluon Plasma (QGP), which is a deconfined state of strongly interacting Quantum Chromodynamics (QCD) matter. In this work, all different detection systems of the ALICE detector are given. To become a full member of ALICE collaboration, Suranaree University of Technology has to fulfill on commitment of setting up high performance grid computing system that would extend the global computer network used for analysing data. This is the first phase towards the study of the Quark-Gluon Plasma at ALICE.

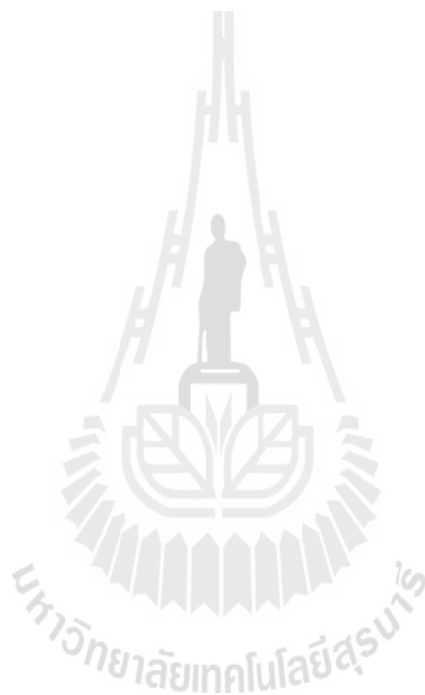
**Keywords:** quark-gluon plasma; Heavy ion collision; ALICE; CERN



# สารบัญ

กิตติกรรมประกาศ	I
บทคัดย่อ	II
Abstract	III
<b>1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย	1
1.2 แบบจำลองแบบถุง (Bag model)	3
1.3 การออกจากการกักกัน (Deconfinement)	4
1.4 การทดลองเกี่ยวกับควาร์ก-กลูออนพลาสมา	8
1.5 ร่องรอยการเกิด QGP (Signature of Quark Gluon Plasma)	10
1.6 ขอบเขตของการวิจัย	12
<b>2 ALICE</b>	<b>13</b>
2.1 วัตถุประสงค์ของอลิซ	14
2.2 ระบบการทำงานของหัววัด	15
2.3 รายละเอียดของระบบต่าง ๆ ในหัววัดอลิซ	15
2.3.1 ส่วนของการติดตามทางเดินของอนุภาค	15
2.3.2 ส่วนที่ใช้ระบุชนิดของอนุภาค (Particle identification detectors, PID)	20
2.3.3 ส่วนที่ใช้วัดพลังงาน (Calorimeters)	22
2.3.4 ส่วนที่ใช้ในการเลือกและวัดสมบัติโดยรวมของอันตรกิริยา (Forward and trigger detectors)	24
2.3.5 Muon Spectrometer	26
2.4 การปรับปรุงสมรรถนะของหัววัด ALICE	27

<b>3</b>	<b>ความก้าวหน้าและแผนการดำเนินงาน</b>	<b>29</b>
3.1	สถานการณ์ปัจจุบัน . . . . .	29
3.2	เงื่อนไขของการดำเนินโครงการ . . . . .	30
3.2.1	MoU ที่ 1 . . . . .	30
3.2.2	MoU ที่ 2 . . . . .	31
3.3	ระบบกริดของ ALICE ที่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี . . . . .	32
<b>4</b>	<b>ผลการดำเนินงานและแผนงานในเฟสที่ 2</b>	<b>39</b>
4.1	ผลการดำเนินงาน . . . . .	39
4.2	แผนงานในเฟสที่ 2 . . . . .	40
	<b>บรรณานุกรม</b>	<b>41</b>



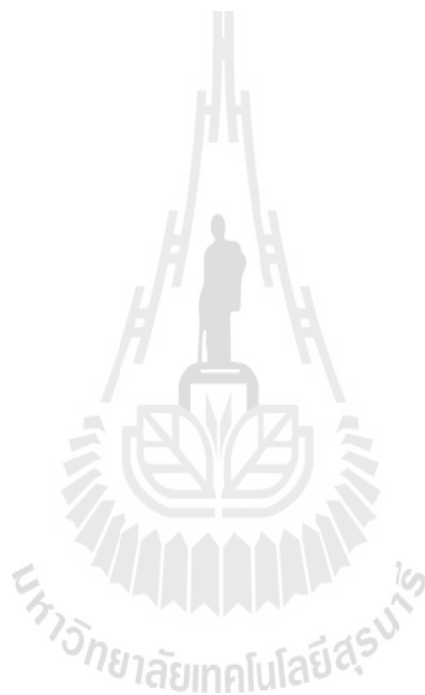
# สารบัญรูป

1.1	ภาพแสดงสภาพกักกันของควาร์ก โดยความพยายามที่จะแยกควาร์กออกจากกัน ส่งผลให้เกิดการสร้างอนุภาคใหม่ . . . . .	3
1.2	(a) ภาพแสดงสถานะสุญญากาศของ QCD ประกอบด้วยเซลล์ที่บรรจุด้วยคู่ของ กลูออนในสถานะ singlet (b) ควาร์กที่ถูกวางลงไปจะสร้างบริเวณหรือถุงใน สุญญากาศที่ว่างเปล่า . . . . .	3
1.3	ภาพแสดงสถานะสมดุลระหว่างความดันของสุญญากาศ B กับความดันที่เกิดจาก ควาร์ก . . . . .	4
1.4	ภาพแสดงการเข้าสู่สถานะควาร์ก-กลูออนด้วยการทำให้ระบบมีอุณหภูมิสูงและ/ หรือความหนาแน่นเพียงพอ . . . . .	4
1.5	(a) ภาพแสดงไพออนแก๊ส (b) ภาพแสดง QGP แก๊ส . . . . .	6
1.6	กราฟแสดงการหาอุณหภูมิที่เกิดจากเปลี่ยนสถานะของไพออนแก๊ส (b) ภาพแสดง QGP แก๊ส . . . . .	6
1.7	ภาพแสดงการเข้าสู่สถานะควาร์ก-กลูออนพลาสมาด้วยการทำให้ระบบมีอุณหภูมิ สูงและ/หรือความหนาแน่นสูงเพียงพอ โดยที่ Hadron gas ของระบบจะ ไม่มีสมมาตรแบบ chiral แต่สมมาตรแบบ chiral จะถูกทำให้กลับคืนมาเมื่อ ระบบสู่สถานะควาร์ก-กลูออนพลาสมา และออเดอร์พารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายคือ $\langle \bar{\psi}\psi \rangle$ , $\langle \psi\psi \rangle$ . . . . .	7
1.8	เปรียบเทียบผลการคำนวณเชิงทฤษฎีของการเปลี่ยนเฟสเป็นควาร์ก-กลูออนพลาสมาด้วย Lattice QCD และแบบจำลองแบบถุง (Bag model) . . . . .	8
1.9	เปรียบเทียบผลการคำนวณเชิงทฤษฎีของการเปลี่ยนเฟสเป็นควาร์ก-กลูออนพลาสมาด้วย Lattice QCD และแบบจำลองแบบถุง (Bag model) . . . . .	8
1.10	เปรียบเทียบผลการคำนวณเชิงทฤษฎีของการเปลี่ยนเฟสเป็นควาร์ก-กลูออนพลาสมาด้วย Lattice QCD และแบบจำลองแบบถุง (Bag model) . . . . .	9
2.1	แผนภาพแบบจำลององค์ประกอบต่าง ๆ ของห้วงอวกาศ . . . . .	14



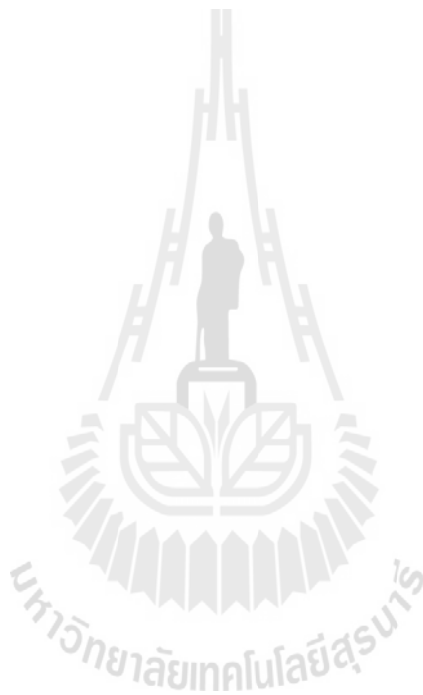
2.2	ภาพจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่ได้จากการตรวจจับอนุภาคของอลิซ โดยเส้นแต่ละเส้นแทนทางเดินของอนุภาค 1 อนุภาค . . . . .	15
2.3	แสดงส่วนประกอบของ Inner Tracking System (ITS) . . . . .	16
2.4	แสดงการชนกันของอนุภาค บริเวณที่ชนกันเรียกว่า จุดอันตรกิริยา (Interaction Point, IP) . . . . .	16
2.5	แสดงตัวอย่างการเกิดอนุภาคปฐมภูมิชนิด D-meson ที่ primary vertex และชนิด Kaon กับ Pion ที่ secondary vertex . . . . .	17
2.6	ภาพบางส่วนของ การติดตั้ง SPD (Credits: Antonio Saba) . . . . .	18
2.7	แสดงหลักการทำงานของ TPC . . . . .	19
2.8	ภาพแสดงขนาดและองค์ประกอบของ TPC . . . . .	19
2.9	ภาพการติดตั้งส่วนส่งต่อข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์ของ TPC . . . . .	20
2.10	ภาพขณะติดตั้ง TPC . . . . .	20
2.11	ภาพ Multigap Resistive Plate Chamber (MRPC) และ การประกอบเป็นโมดูลของ TOF . . . . .	21
2.12	ภาพการติดตั้ง HMPID สำหรับการทดลอง (Credits: Antonio Saba) . . . . .	22
2.13	ภาพหลักการทำงานและองค์ประกอบของ TRD . . . . .	23
2.14	เปรียบเทียบการชนกันของไอออนหนักแบบผ่านศูนย์กลางมวล (central collision) และแบบผ่านขอบด้านนอก (peripheral collision) จะเห็นได้ว่าการชนแบบผ่านขอบด้านนอก จะเหลือจำนวนนิวคลีออนที่ไม่เกิดการชนกัน (spectator nucleons) มากกว่า . . . . .	25
2.15	ภาพตัดขวางของ ZDC และการติดตั้ง ZDC ในอุโมงค์ของเครื่องเร่งอนุภาค LHC . . . . .	25
2.16	หลักการทำงานของ PMD . . . . .	26
2.17	เครื่องตรวจวัดมิวออน . . . . .	27
2.18	ภาพการติดตั้งแม่เหล็กขนาดใหญ่เข้ากับส่วนดูดซับแฮดรอนในขั้นตอนสุดท้าย . . . . .	27
3.1	รูประบบกริดที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ก) ตัวเครื่องและระบบสำรองข้อมูล ข) แผนภาพการติดตั้งระบบ . . . . .	32
3.2	รูปแผนภาพการเชื่อมต่อเครือข่ายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี . . . . .	32
3.3	รูปแผนภาพการเชื่อมต่อเครือข่ายในประเทศ . . . . .	33
3.4	ระบบสำหรับดูแลและตรวจสอบการทำงานของระบบกริดของ ALICE . . . . .	33
3.5	ปัญหา Error_IB . . . . .	33
3.6	ปัญหาอัตราสำเร็จของการทำงานต่ำ . . . . .	34
3.7	ปัญหาเส้นทาง ไป-กลับ ของข้อมูลไม่สมมาตร . . . . .	34
3.8	ปัญหา Bandwidth ต่ำ และ แกว่งขึ้นลง . . . . .	34

3.9	ปัญหา Bandwidth ต่ำ และ แกว่งขึ้นลง . . . . .	35
3.10	ข้อมูลของระบบกริดของ ALICE ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในฐานะข้อมูล Grid Operations Centre Data Base (GOCD) . . . . .	35
3.11	รูปภาพแสดงการแกว่งขึ้นลงของ bandwidth จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ไปยัง NECTEC . . . . .	36
3.12	เสถียรภาพของระบบระบบกริดของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี . . . . .	37
3.13	จำนวน success job นับตั้งแต่ปี 2012 จนถึงปัจจุบัน . . . . .	37
3.14	ประสิทธิภาพของระบบกริดของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี . . . . .	37



# สารบัญตาราง

1.1	แสดงสมบัติเฉพาะตัวทางฟิสิกส์ของควาร์ก . . . . .	2
1.2	เปรียบเทียบพลังงานและชนิดการชนของไอออนหนักที่เครื่องเร่งอนุภาคต่าง ๆ . . .	10



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

ควาร์ก (quark) มีสปิน  $1/2$  จัดเป็นเฟอร์มิออน ซึ่งสมบัติของควาร์ก ได้แสดงไว้ดังตาราง 1.1 ควาร์กถูกจำแนกโดย flavors โดยการค้นพบ flavor นำไปสู่หลักการที่ว่า ควาร์กเป็นอนุภาคมูลฐานที่เป็นองค์ประกอบของอนุภาคชนิดอื่น ปัจจุบันนี้มีการค้นพบควาร์ก 6 ชนิด คือ up down strange charm bottom และ top โดยแต่ละชนิดจะมีประจุสี (color charge) ได้อีก 3 แบบ คือ red (r) blue (b) และ green (g) ซึ่งสมบัติควาร์กได้แสดงไว้ในตาราง 1.1 มวลของควาร์กที่ปรากฏในตารางเป็นมวลที่ไม่เกี่ยวข้องกับการกักกัน (confinement) เมื่อควาร์กมีการรวมตัวกันเป็นแฮดรอน พบว่าแฮดรอนที่เกิดขึ้นนั้นมีมวลสูงกว่าผลรวมมวลของควาร์ก เนื่องจากมีการรวมผลของศักย์ยึดเหนี่ยวเข้าไป ยกตัวอย่างเช่น โปรตอน (uud) ซึ่งประกอบด้วย u ควาร์ก 2 ตัว มวล  $0.003 \text{ GeV}/c^2$  และ d ควาร์ก 1 ตัว มวล  $0.003 \text{ GeV}/c^2$  นั้น หากดูเพียงผลรวมของมวลควาร์กพบว่ามีค่าประมาณ  $(2 \times 0.003) + 0.006 = 0.012 \text{ GeV}/c^2$  หรือ 12 MeV เท่านั้น แต่มวลของโปรตอนที่วัดได้จากการทดลองพบว่ามีค่าประมาณ 938 MeV ซึ่งจะเห็นว่าเป็นความแตกต่างกันอย่างมากระหว่างค่าที่คำนวณได้กับค่าที่วัดได้

หากพิจารณาถึงอันตรกิริยาที่ควาร์กกระทำระหว่างกันภายในแฮดรอนว่าเป็นอันตรกิริยานิวเคลียร์อย่างเข้ม (strong interaction) แล้วจะพบว่าอันตรกิริยานี้เกิดจากการแลกเปลี่ยนอนุภาคเกจโบซอนชนิดหนึ่งซึ่งเรียกว่า กลูออน (gluon) โดยกลูออนสามารถจำแนกได้เป็น 8 ชนิดได้แก่ 6 ชนิดที่เกิดจาก color และ anti-color  $r\bar{g}, r\bar{b}, g\bar{r}, g\bar{b}, b\bar{r}, b\bar{g}$  และ อีก 2 ชนิดเลือกจาก  $r\bar{r}, g\bar{g}$  และ  $b\bar{b}$  (ตัวที่ 3 สามารถเขียนได้จากผลรวมเชิงเส้นของ 2 ตัว ที่เลือกไปแล้วได้)

เนื่องจากปัจจุบันยังไม่สามารถตรวจพบควาร์กอิสระและกลูออนได้ในธรรมชาติ การศึกษาควาร์กและกลูออนจึงต้องเริ่มจากระบบที่อยู่ภายใต้สภาวะการกักกัน (confinement) ที่มีขนาดประมาณ 1 fm ซึ่งทฤษฎีการรบกวน (perturbative theory) แบบปกติไม่สามารถนำมาใช้ได้ แนวทางในการศึกษาที่กำลังดำเนินการอยู่ในขณะนี้ มี 3 แนวทางหลักคือ

- 1) การคำนวณทาง lattice theory ซึ่งเป็นการคำนวณเชิงตัวเลขบนปริภูมิที่ไม่ต่อเนื่องแบบ lattice

อนุภาค	สัญลักษณ์	มวล GeV/c <sup>2</sup>	ประจุ	ความแปลก	บาร์ร็อน	ปฏิยานุภาค
up	$u$	0.003	$+\frac{2}{3}$	0	$+\frac{1}{3}$	$\bar{u}$
down	$d$	0.006	$-\frac{1}{3}$	0	$+\frac{1}{3}$	$\bar{d}$
strange	$s$	0.15	$-\frac{1}{3}$	-1	$+\frac{1}{3}$	$\bar{s}$
charm	$c$	1.3	$+\frac{2}{3}$	0	$+\frac{1}{3}$	$\bar{c}$
bottom	$b$	4.3	$-\frac{1}{3}$	0	$+\frac{1}{3}$	$\bar{b}$
top	$t$	175	$+\frac{2}{3}$	0	$+\frac{1}{3}$	$\bar{t}$

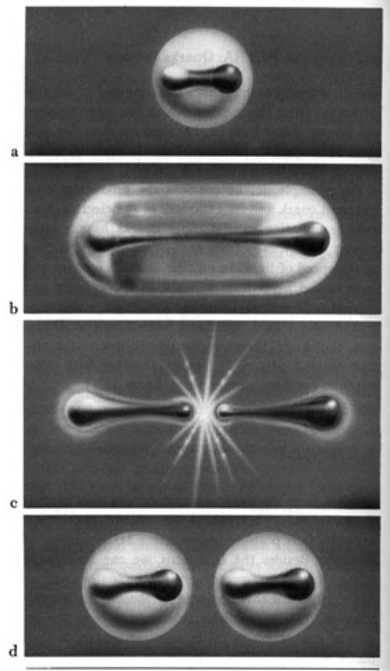
ตารางที่ 1.1: แสดงสมบัติเฉพาะตัวของควาร์ก

และมีข้อดีคือสามารถหลีกเลี่ยงการลู่ออกที่โมเมนตัมมีค่ามากได้ (ultraviolet divergence)

2) การคำนวณทาง effective theory เช่น chiral perturbation เป็นการประมาณค่าโดยใช้ค่ายังผลของ Lagrangian ที่มีสมมาตรแบบ chiral ในการคำนวณ

3) การคำนวณทาง quantum chromodynamics (QCD) ซึ่งเสนอว่าผลของสมมติแบบ non-abelian เป็นสาเหตุหนึ่งของการกักกันของควาร์ก โดยเส้นสนามจะถูกบีบอัดจนมีลักษณะเป็นท่อการไหล (flux tube) ที่มีค่าภาคตัดขวางในระดับ 1 ตารางเฟมโตเมตร และศักย์มีพิสัยยาวแปรผันตรงกับระยะตามสมการ  $V_{long} = kr$  และค่าคงตัวมีค่าประมาณ  $k \sim 1 \text{ GeV/fm}$  หากมีความพยายามที่จะแยกควาร์กออกจากกันจะเกิดพลังงานสะสมในเส้น ( $kr$ ) จนถึงจุดที่มากพอที่จะสร้าง ควาร์ก-ปฏิยานุภาคควาร์กคู่ใหม่ เส้นที่เชื่อมต่อนี้จึงขาดลง ทำให้เกิดเป็นอนุภาคแฮดรอนใหม่ขึ้นอีก 1 อนุภาค โดยใน QCD สุญญากาศที่ว่างเปล่า ถือเป็นสถานะที่มีพลังงานต่ำและประกอบด้วยเซลล์ที่มีคู่ของกลูออนในแบบ singlet เป็นองค์ประกอบและประพฤติตัวเหมือนของเหลว

อย่างไรก็ตามผลการศึกษาดังกล่าวทางทฤษฎีแบบต่าง ๆ ต้องถูกยืนยันด้วยผลการทดลอง ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไปในหัวข้อ 1.4 โดยหัวข้อถัดไปนั้นจะสรุปหลักการที่ใช้ในการคำนวณหาอุณหภูมิการเกิดปรากฏการณ์ควาร์ก-กลูออนพลาสมา

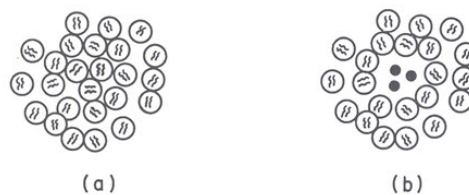


รูปที่ 1.1: ภาพแสดงสภาพกักกันของควาร์ก โดยความพยายามที่จะแยกควาร์กออกจากกันส่งผลให้เกิดการสร้างอนุภาคใหม่

(ที่มา:Fritzsch)

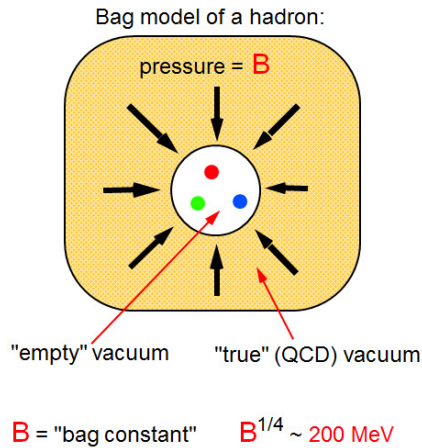
## 1.2 แบบจำลองแบบถุง (Bag model)

แบบจำลองแบบถุงเป็นแบบจำลองที่เสนอโดย Massachusetts Institute of Technology (MIT) กล่าวว่า ควาร์กถูกกักกันไว้ในทรงกลมกลวงคล้ายฟองหรือถุงของสุญญากาศที่ถูกบวมน รัศมีของฟองหรือ ถุง จะถูกกำหนดโดยสมดุลระหว่างความดันของสุญญากาศ  $B$  กับความดันที่เกิดจากควาร์ก โดยจากสเปกตรัมของแฮดรอนค่าความดันของสุญญากาศ  $B \sim (200\text{MeV})^4$



รูปที่ 1.2: (a) ภาพแสดงสถานะสุญญากาศของ QCD ประกอบด้วยเซลล์ที่บรรจุด้วยคู่ของกลูออนในสถานะ singlet (b) ควาร์กที่ถูกวางลงไปจะสร้างบริเวณหรือถุงในสุญญากาศที่ว่างเปล่า

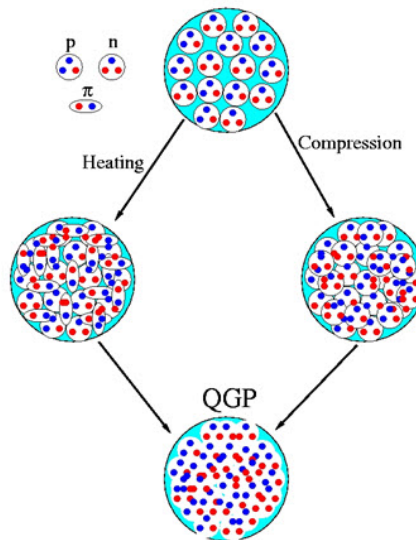
(ที่มา: Gottfried-Weisskopf, p. 399)



รูปที่ 1.3: ภาพแสดงสถานะสมดุลระหว่างความดันของสุญญากาศ  $B$  กับความดันที่เกิดจากควาร์ก  
(ที่มา: Antinori 2nd CERN school Thailand 2012)

### 1.3 การออกจากการกักกัน (Deconfinement)

ทฤษฎี lattice QCD ทำนายว่าการเปลี่ยนสถานะของควาร์กและกลูออนในแฮดรอนไปสู่สถานะที่ควาร์กและกลูออนสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ เป็นการออกจากการกักกัน สามารถเกิดขึ้นได้หากระบบมีอุณหภูมิสูงและ/หรือความหนาแน่นเพียงพอ ซึ่งที่สถานะใหม่นี้เรียกว่า ควาร์ก-กลูออนพลาสมา (quark-gluon plasma, QGP)



รูปที่ 1.4: ภาพแสดงการเข้าสู่สถานะควาร์ก-กลูออนด้วยการทำให้ระบบมีอุณหภูมิสูงและ/หรือความหนาแน่นเพียงพอ

(ที่มา: Antinori 2nd CERN school Thailand 2012)

การคำนวณหาอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนสถานะจากแฮดรอนแก๊สไปยังควาร์ก-กลูออนพลาสมานั้นทำได้โดย ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาแน่นพลังงาน ความดัน และอุณหภูมิ โดยที่อุณหภูมิสูง

พลังงานของอนุภาคมีค่าสูงกว่าพลังงานของมวลนิ่งมาก ความหนาแน่นพลังงานของแก๊สอิสระคำนวณจากฟังก์ชันการกระจายแบบควอนตัม

$$\begin{aligned}\epsilon_i &= \int \frac{3p_i}{(2\pi)^3} \frac{E_i}{e^{\beta E_i \pm 1}} \\ &= \begin{cases} \frac{\pi^2}{30} T^4 & (\text{boson}) \\ \left(\frac{7}{8}\right) \frac{\pi^2}{30} T^4 & (\text{fermion}) \end{cases} \end{aligned} \quad (1.1)$$

ซึ่งความหนาแน่นพลังงานของเฟอร์มิออนเป็น  $7/8$  ของโบซอน สำหรับระบบที่มีทั้งโบซอนและเฟอร์มิออน ต้องมีการรวมผลของ degeneracy ของอนุภาคต่าง ๆ ตามสมการ

$$\begin{aligned}\epsilon &= \sum_i g_i \epsilon_i \\ &= \left(g_b + \frac{7}{8} g_f\right) \frac{\pi^2}{30} (k_B T)^4 \end{aligned} \quad (1.2)$$

เมื่อ  $g_b$  และ  $g_f$  เป็นค่าแฟคเตอร์ degeneracy ของโบซอนและเฟอร์มิออนตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าความหนาแน่นพลังงานของควาร์ก-กลูออนพลาสมาขึ้นกับ  $g_b$  และ  $g_f$  ซึ่งการหาค่า  $g_b$  และ  $g_f$  นั้นได้มาจากการนับจำนวนองศาของความเสรีบวกกับสปิน flavor ประจุและสีของอนุภาค ในกรณีที่อนุภาคไม่มีอันตรกิริยากับอนุภาคอื่น ก็จะไม่ต้องนำมาคิดในการหา degeneracy

ในระบบของแฮดรอนที่มีทั้งควาร์กและกลูออนเป็นองค์ประกอบ  $g_b$  หาได้จากสถานะของกลูออนที่มี 2 สถานะของ helicity และ 8 สี ดังนั้นจึงมี  $g_b = 2 \times 8 = 16$  สำหรับ  $g_f$  หาได้จากสถานะของควาร์กซึ่งมี 3 สี, 2 สถานะของสปิน, 2 สถานะของประจุและจำนวน flavors เช่น กรณีของไพออนแก๊สที่มี 2 flavour คือ  $u$  และ  $d$  ดังนั้น  $g_f$  ของไพออนแก๊สจึงมีค่าเท่ากับ  $3 \times 2 \times 2 = 12$

สำหรับการคำนวณหาความดันของแก๊สอิสระนั้นสามารถทำได้เหมือนกับวิธีของการแผ่รังสีของวัตถุดำ และในกรณีของสัมพัทธภาพพบว่า

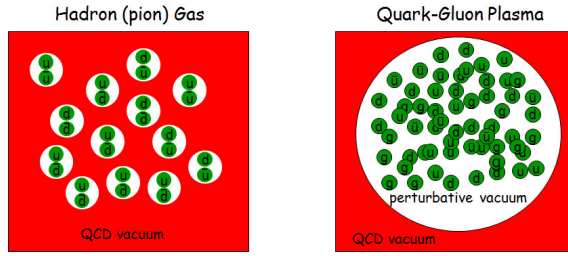
$$p = \frac{\epsilon}{3} \quad (1.3)$$

ดังนั้นหากต้องการคำนวณหาอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนสถานะของไพออนแก๊สไปเป็นควาร์ก-กลูออนพลาสมา ก็สามารทำได้โดยเปรียบเทียบความดันของแฮดรอนแก๊ส กับ QGP แก๊ส ตามแบบจำลองแบบดูง

$$p = \frac{\epsilon}{3} = \left(g_b + \frac{7}{8} g_f\right) \frac{\pi^2 T^4}{90}$$

ในที่นี้ใช้หน่วย  $k_B = 1$  และ  $T$  มีหน่วยเป็นพลังงาน





รูปที่ 1.5: (a) ภาพแสดงไพออนแก๊ส (b) ภาพแสดง QGP แก๊ส  
(ที่มา: Antinori 2nd CERN school Thailand 2012)

กรณีของไพออนแก๊ส

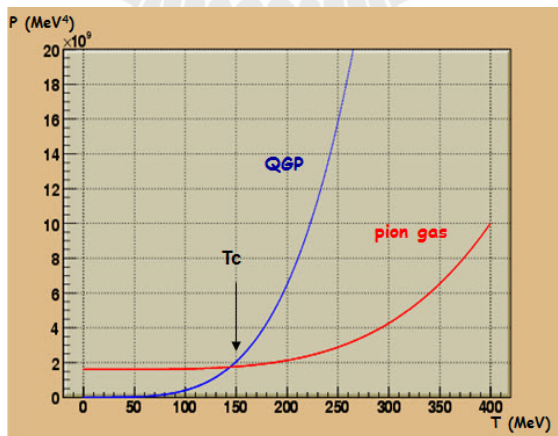
$$p_\pi = \frac{3}{90} \pi^2 T^4 + B, \quad g_b = 3, g_f = 0 \quad (1.4)$$

เนื่องจากไพออนถือเป็นสถานะถูกกระตุ้นของ QCD ในสุญญากาศ ดังนั้นจึงต้องรวมความดันของสุญญากาศ  $B$  ด้วย และในกรณีของ QGP แก๊ส

$$p_{QGP} = \frac{37}{90} \pi^2 T^4, \quad g_b = 16, g_f = 24 \quad (1.5)$$

ที่จุดเกิดการเปลี่ยนสถานะ สมการ 1.4 จะเท่ากับ 1.5 จึงได้

$$T_C = \left( \frac{90}{34\pi^2} \right)^{1/4} B^{1/4} \approx 150 \text{ MeV} \quad (1.6)$$

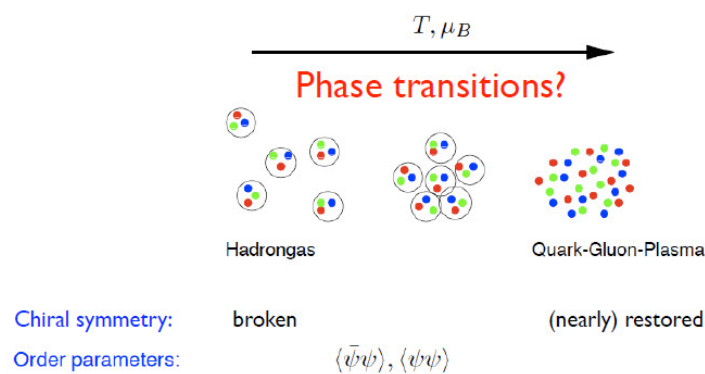


รูปที่ 1.6: กราฟแสดงการหาอุณหภูมิที่เกิดจากเปลี่ยนสถานะของไพออนแก๊ส (b) ภาพแสดง QGP แก๊ส  
(ที่มา: Antinori 2nd CERN school Thailand 2012)

หากเปลี่ยนไปเป็นอุณหภูมิในหน่วยเคลวินจะได้ว่า 1 eV มีค่าเท่ากับ  $1.16 \times 10^4$  เคลวิน ดังนั้นอุณหภูมิของการที่ทำให้เปลี่ยนสถานะจากไพออนแก๊สไปเป็น QGP แก๊ส คือประมาณ  $1.74 \times 10^{12}$  เคลวิน เมื่อเทียบ

กับอุณหภูมิที่ใจกลางดวงอาทิตย์ประมาณ  $1.5 \times 10^7$  เคลวินแล้วจะเห็นว่ามีค่าสูงกว่าถึงประมาณ 100,000 เท่า

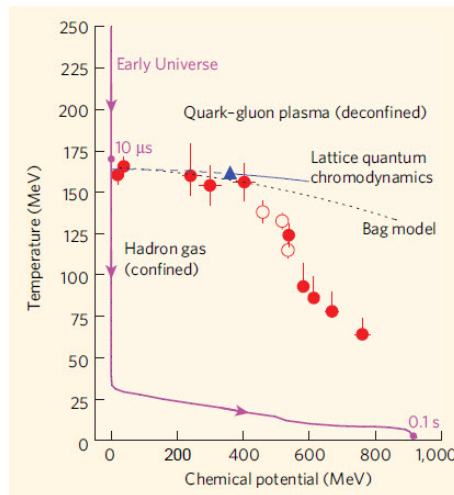
การคำนวณในตัวอย่างข้างต้นแสดงถึงอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะเมื่อพิจารณาให้ศักย์ไฟฟ้าเคมี บาริออน (baryon chemical potential,  $\mu_B$ ) มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ พบว่าอุณหภูมิวิกฤต (critical temperature,  $T_c$ ) มีค่าอยู่ในช่วง 150-200 MeV โดยปกติศักย์ไฟฟ้าเคมีเป็นค่าที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของพลังงานภายในเนื่องจากการเปลี่ยนโครงสร้างของระบบ ซึ่งในกรณีของศักย์ไฟฟ้าเคมีบาริออน เป็นค่าที่บอกถึงความหนาแน่นสุทธิของบาริออน (net baryon density) หากศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงทั้งอุณหภูมิและศักย์ไฟฟ้าเคมีบาริออน แล้วนำมาทำเป็นแผนภูมิการเปลี่ยนเฟสของ ควาร์ก-กลูออน พลาสมา โดยมีแกนตั้งคือ อุณหภูมิ ( $T$ ) และแกนนอนคือ ศักย์ไฟฟ้าเคมีบาริออน ( $\mu_B$ ) ทั้งสองแกนมีหน่วยเป็น MeV เหมือนกัน



รูปที่ 1.7: ภาพแสดงการเข้าสู่สถานะควาร์ก-กลูออนพลาสมาด้วยการทำให้ระบบมีอุณหภูมิสูงและ/หรือความหนาแน่นสูงเพียงพอ โดยที่ Hadron gas ของระบบจะไม่มีสมมาตรแบบ chiral แต่สมมาตรแบบ chiral จะถูกทำให้กลับคืนมาเมื่อระบบสู่สถานะควาร์ก-กลูออนพลาสมา และออเดอร์พารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายคือ  $\langle \bar{\psi}\psi \rangle, \langle \psi\psi \rangle$

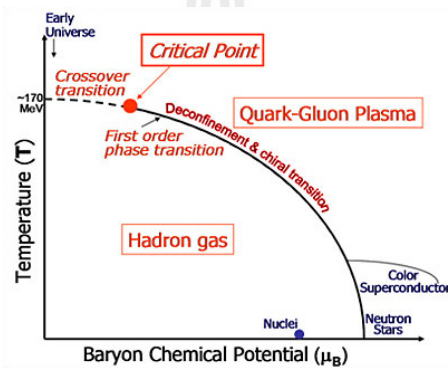
(ที่มา: Owe Philipsen)

การศึกษาและคำนวณเชิงทฤษฎีได้ถูกนำมาวาดเป็นแผนภาพการเปลี่ยนสถานะจากแก๊สแฮดรอนไปสู่สถานะของควาร์ก-กลูออนพลาสมา (รูปที่ 1.8, 1.9) โดยหากพิจารณาบริเวณที่ศักย์ไฟฟ้าเคมีบาริออนมีค่าเป็นศูนย์หรือพิจารณาค่าตามแกนตั้ง จะได้ค่าอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 170 MeV การเปลี่ยนสถานะจากแก๊สแฮดรอนไปสู่สถานะของควาร์ก-กลูออนพลาสมา และในทางกลับกันหากพิจารณาผลของความหนาแน่นเพียงอย่างเดียว โดยให้ค่าอุณหภูมิเป็นศูนย์หรือพิจารณาค่าตามแกนนอน จะได้ว่าที่ศักย์ไฟฟ้าเคมีบาริออนประมาณ 900 MeV สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะจากแก๊สแฮดรอนไปสู่สถานะของควาร์ก-กลูออนพลาสมาได้ ทั้งนี้ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและศักย์ไฟฟ้าเคมีบาริออนสามารถเขียนเป็นเส้นโค้งได้ดังรูป 1.9



รูปที่ 1.8: เปรียบเทียบผลการคำนวณเชิงทฤษฎีของการเปลี่ยนเฟสเป็นควาร์ก-กลูออนพลาสมาด้วย Lattice QCD และแบบจำลองแบบถุง (Bag model)

(ที่มา: Hans-Christian Schultz-Coulon)



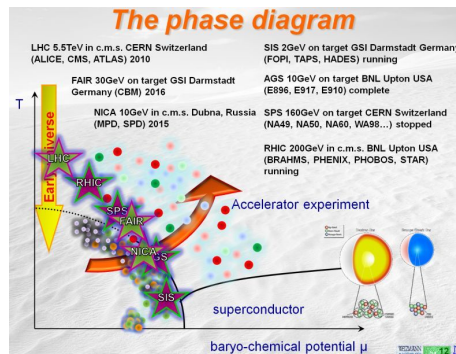
รูปที่ 1.9: เปรียบเทียบผลการคำนวณเชิงทฤษฎีของการเปลี่ยนเฟสเป็นควาร์ก-กลูออนพลาสมาด้วย Lattice QCD และแบบจำลองแบบถุง (Bag model)

(ที่มา: Tapan Nayak, <https://www.bnl.gov/rhic/news/040808/story3.asp>)

## 1.4 การทดลองเกี่ยวกับควาร์ก-กลูออนพลาสมา

การทดลองเพื่อศึกษาเกี่ยวกับการเกิดควาร์ก-กลูออนพลาสมานั้น สามารถทำได้ในหลายช่วงอุณหภูมิและความหนาแน่นของสสาร ซึ่งแต่ละห้องปฏิบัติการและศูนย์วิจัยทางด้านเครื่องเร่งอนุภาคต่อไปนี้ล้วนมีความแตกต่างกันสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) CERN (The European Laboratory for Particle Physics) ตั้งอยู่ที่บริเวณรอยต่อของฝรั่งเศสกับสวิตเซอร์แลนด์ ใช้เครื่องเร่งอนุภาค Large Hadron Collider (LHC) เร่งไอออนของตะกั่วให้มีพลังงานได้ถึง 5.5 TeV โดยมีห้องปฏิบัติการที่ทำการศึกษาคือ ALICE, ATLAS และ CMS และได้เริ่มดำเนินการวิจัยมาตั้งแต่ปี 2010 ซึ่งก่อนหน้านั้นในช่วงปี 1994-2003 ที่ Super Proton Synchrotron (SPS) ของ CERN ก็ได้ทำการศึกษาการชนที่พลังงาน 17-160 GeV มาแล้ว ตามรหัสการ



รูปที่ 1.10: เปรียบเทียบผลการคำนวณเชิงทฤษฎีของการเปลี่ยนเฟสเป็นควาร์ก-กลูออนพลาสมาด้วย Lattice QCD และแบบจำลองแบบถุง (Bag model)

(ที่มา: <http://www.weizmann.ac.il/weizsites/atlas/>)

ทดลองดังนี้ WA97, WA98 , NA44, NA45 , NA50 , NA52 , NA57 และ NA60

- 2) Brookhaven (Brookhaven National Laboratory) ตั้งอยู่ที่ Long Island, New York ประเทศสหรัฐอเมริกา RHIC (The Relativistic Heavy Ion Collider) สามารถเร่งไอออนหนักของทองคำให้มีพลังงานได้ 200 GeV โดยมีห้องปฏิบัติการที่ทำการศึกษาคือ BRAHMS, PHENIX, PHOBOS และ STAR ได้เริ่มดำเนินการวิจัยมาตั้งแต่ปี 2000 ซึ่งก่อนหน้านี้ เครื่องเร่ง AGS (The Alternating Gradient Synchrotron) สามารถเร่งอนุภาคโปรตอนให้มีพลังงานได้ถึง 33 GeV หรือถ้าเป็นไอออนหนักของออกซิเจน, ซิลิกอน หรือ ทองคำสามารถเร่งให้มีพลังงานได้ถึง 11-15 GeV และได้ทำการทดลอง E896, E910 และ E917 เสร็จสิ้นไปก่อนหน้านี้แล้ว
- 3) GSI Helmholtz Centre for Heavy Ion Research (GSI) ตั้งอยู่ที่เมือง Darmstadt เยอรมนี อยู่ระหว่างการดำเนินการก่อสร้างเครื่องเร่งอนุภาคแบบเป้านิ่ง (fixed target) ชื่อ FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) คาดว่าจะแล้วเสร็จในปี 2018 และสามารถเร่งไอออนหนักให้มีพลังงานประมาณ 30 GeV ซึ่งห้องปฏิบัติการที่กำลังจะสร้างเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ควาร์ก-กลูออนพลาสมาได้แก่ CBM และ PANDA โดยในขณะนี้เครื่องเร่งที่เปิดดำเนินการอยู่คือ The heavy-ion synchrotron หรือ SIS (Schwer-Ionen-Synchrotron) ที่สามารถเร่งไอออนหนักให้มีพลังงานการชนที่ 2 GeV และมีห้องปฏิบัติการ FOPI, TAPS และ HADES ที่กำลังดำเนินการอยู่
- 4) Joint Institute for Nuclear Research (JINR) ตั้งอยู่ที่เมือง Dubna ประเทศรัสเซีย อยู่ระหว่างการดำเนินการก่อสร้างเครื่องเร่งอนุภาคแบบเคลื่อนที่เข้าชน (collider) ชื่อ NICA (The Nuclotron based Ion Collider fAcility) คาดว่าจะแล้วเสร็จในปี 2017 และสามารถเร่งไอออนหนักให้มีพลังงานประมาณ 4-11 GeV การศึกษาปรากฏการณ์ควาร์ก-กลูออนพลาสมาทำโดยห้องปฏิบัติการ MPD CBM และ SPD

เมื่อ  $\sqrt{s_{NN}}$  หมายถึง พลังงานของการชนที่ศูนย์กลางมวล (center of mass system energy) ตัวห้อย  $NN$  หมายถึง ระบบของการชนกันระหว่างนิวคลีออน โดย  $s$  สามารถเขียนได้ดังสมการ

เครื่องเร่ง	ชนิดการชน	สถานที่	$\sqrt{s_{NN}}$ (GeV)
SPS	เป้านิ่ง	เจนีวา, CERN	$\sim 160$
LHC	เคลื่อนที่เข้าชนกัน	เจนีวา, CERN	$\sim 5500$
AGS	เป้านิ่ง	นิวยอร์ก, BNL	$\sim 10$
RHIC	เคลื่อนที่เข้าชนกัน	นิวยอร์ก, BNL	$\sim 200$
SIS	เป้านิ่ง	ดาร์มชตัดต์, GSI	$\sim 2$
FAIR	เป้านิ่ง	ดาร์มชตัดต์, GSI	$\sim 30$
NICA	เคลื่อนที่เข้าชนกัน	ดুবนา, JINR	$\sim 10$

ตารางที่ 1.2: เปรียบเทียบพลังงานและชนิดการชนของไอออนหนักที่เครื่องเร่งอนุภาคต่าง ๆ

$$s = (E_1 + E_2)^2 - (\vec{P}_1 + \vec{P}_2)^2 \quad (1.7)$$

และ  $E$  คือ พลังงานของอนุภาค และ  $\vec{P}$  คือ โมเมนตัมของอนุภาคที่เข้าชนกัน (incident particle),

$$\eta = \frac{1}{2} \ln \frac{P - P_z}{P + P_z} \quad (1.8)$$

หรือเขียนได้อีกแบบหนึ่งเป็น

$$\eta = \ln \cot \left( \frac{\theta}{2} \right) = -\ln \left( \frac{\theta}{2} \right) \quad (1.9)$$

โดยที่  $\theta$  คือมุมของการกระเจิง (scattering angle) ที่พลังงานสูงระดับสัมพัทธภาพ นักวิทยาศาสตร์จะประมาณค่าของ rapidity ด้วย pseudorapidity ( $y \approx \eta$ )

## 1.5 ร่องรอยการเกิด QGP (Signature of Quark Gluon Plasma)

มีการเสนอว่าสามารถตรวจสอบร่องรอยการเกิด QGP ได้โดยใช้วิธีต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- 1) การลดลง  $J/\psi$  ( $J/\psi$  suppression) จากการทดลอง NA50 ที่ CERN-SPS ในปี ค.ศ. 1995-1998 เป็นการชนกันของตะกั่วกับตะกั่วแบบเป้านิ่ง ที่พลังงาน 158 GeV ต่อนิวคลีออน โดยการชนแต่ละครั้งจะมีการเร่งไอออนของตะกั่วจำนวน  $5.5 \times 10^7$  ไอออน และมีจำนวนการชนเกิดขึ้นทั้งหมด 80 ล้านครั้ง ผลการทดลองพบว่าจำนวนของอนุภาค  $J/\psi$  ในการชนที่ผ่านจุดศูนย์กลางมวล (central collision) มีค่าน้อยกว่าแบบไม่ผ่านจุดศูนย์กลางมวล (peripheral collision) อนุภาค  $J/\psi$  นั้นเป็นอนุภาคเมซอนที่มีมวล 3096.9 MeV เกิดขึ้นจากการรวมกันของควาร์ก 2 ตัว คือ  $c\bar{c}$  Matsui และ Satz [2] เสนอว่าหากมี QGP เกิดขึ้นช่วงระยะเวลาสั้น ๆ หลังการชนแล้วจะทำให้เกิดการบดบังและกีดขวาง (screening) ไม่ให้  $c\bar{c}$  รวมตัวกันเป็นอนุภาค  $J/\psi$  จึงเป็นสาเหตุให้ตรวจวัด

อนุภาค  $J/\psi$  ได้น้อยกว่าปกติ และจากการคำนวณพบว่า การชนแบบผ่านจุดศูนย์กลางมวลจะมีค่าความหนาแน่นของพลังงาน (energy density) ประมาณ  $3.2-3.5 \text{ GeV}/fm^3$  และอัตราส่วนของ cross section

$$\left(\frac{\sigma_{J/\psi}}{\sigma_{DY}}\right)_{AA} \leq \left(\frac{\sigma_{J/\psi}}{\sigma_{DY}}\right)_{PA} \leq \left(\frac{\sigma_{J/\psi}}{\sigma_{DY}}\right)_{PP} \quad (1.10)$$

เมื่อ  $DY$  หมายถึง กระบวนการ Drell Yan <sup>1</sup>ถ้ามี QGP เกิดขึ้น จะได้ว่า

$$r_D < r_{J/\psi} \sim 0.3 \text{ fm}$$

โดยรัศมีกั้นของเดอบาย (Debye screening radius,  $r_D$ ) จะมีค่าน้อยกว่า  $r_{J/\psi}$  ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา (reaction zone) ที่มีขนาดเท่ากับรัศมีของลูกไฟ (fire ball)

- 2) การเพิ่มขึ้นของความแปลก (Strangeness Enhancement) จากการทดลอง WA97 ในปี ค.ศ. 1994-1996 เป็นการชนกันของตะกั่วกับตะกั่วแบบเป่านิ่งที่พลังงาน 158 GeV ต่อนิวเคลียส และ NA57 ในปี ค.ศ. 1998-2001 ซึ่งเป็นการชนกันของตะกั่วกับตะกั่วแบบเป่านิ่งที่พลังงาน 158 GeV ต่อนิวเคลียส และพลังงาน 40 GeV ต่อนิวเคลียสที่ CERN-SPS พบว่าจำนวนของอนุภาค  $\Lambda$ ,  $\Xi$ ,  $\Phi$  และ  $\Omega$  มีค่ามากกว่าปกติ ซึ่งอนุภาคที่เพิ่มขึ้นเหล่านี้ล้วนมีควาร์กชนิด s (strange) เป็นส่วนประกอบทั้งสิ้น เช่น  $\Lambda$  ประกอบด้วย  $uds$ ,  $\Xi$  ประกอบด้วย  $uss$ ,  $\Omega$  ประกอบด้วย  $sss$  และเมซอน  $\Phi$  ประกอบด้วย  $s\bar{s}$  ทั้ง ๆ ที่นิวเคลียสของตะกั่วมีเพียงนิวตรอนและโปรตอน ซึ่งเกิดจากการรวมตัวของควาร์กแบบ up และ down เท่านั้น ในการชนของโปรตอนกับโปรตอน หรือ การชนของอิเล็กตรอนกับโพสิตรอน สัดส่วนการเพิ่มของควาร์กแบบ strange มีเพียง 0.2 เท่านั้นไม่ว่าจะเพิ่มพลังงานขึ้นก็ตาม แต่ในกรณีของการชนระหว่างนิวเคลียสกับนิวเคลียสนั้นปรากฏว่าสัดส่วนการเพิ่มของควาร์กแบบ strange มีถึง 0.4 ซึ่งมากขึ้นเป็น 2 เท่า จากการศึกษาพบว่าควาร์กจะเกิดขึ้นก่อนกระบวนการสร้างอนุภาคแบบเฮดรอน ดังนั้น ควาร์กชนิด strange จึงเกิดขึ้นแล้วจึงมีการสร้างอนุภาค  $\Lambda$ ,  $\Xi$ ,  $\Phi$  และ  $\Omega$  ตามมาดังที่กล่าวมาแล้วว่า องค์ประกอบของนิวเคลียสมีเฉพาะควาร์กชนิด up และ down ดังนั้นการพบเฮดรอนที่มีควาร์กชนิด strange เป็นองค์ประกอบ จึงน่าจะมีสาเหตุมาจากการเกิด QGP
- 3) การเกินของไดเลปตอน หรือ โฟตอน (dilepton or photon excess) นอกจากการศึกษาที่ใช้การตรวจวัดอนุภาคเฮดรอนที่เกิดขึ้นแล้ว การศึกษาอนุภาคเลปตอนยังสามารถบอกได้ถึงเกิดการเกิดควาร์ก-กลูออนพลาสมาได้ เนื่องจากอนุภาคเลปตอนที่เกิดขึ้นจะมีอันตรกิริยากับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเท่านั้น หลังจากมีการชนแต่ละครั้ง อนุภาคเลปตอนสามารถที่จะเดินทางผ่านบริเวณที่เกิดการชนกันโดยไม่มีอันตรกิริยากับอนุภาคชนิดอื่นและนำข้อมูลเกี่ยวกับการชน เช่น อุณหภูมิ และความหนาแน่นพลังงานออกมาด้วย

<sup>1</sup>Drell Yan Procscs เป็นกระบวนการที่อธิบายถึง annihilation ของควาร์กกับปฏิยานุภาคของควาร์กที่เกิดขึ้นในการชนระหว่างเฮดรอน

อนุภาคเลปตอนที่เกิดขึ้นแบ่งเป็น

- (a) low-mass dileptons มีมวลอยู่ระหว่าง  $0.2 < m < 1$  GeV โดยอนุภาคเลปตอนเหล่านี้เกิดจากการ annihilate ของ ไพออน ไปเป็น virtual photon หรือ เมซอนชนิด  $\rho$  ต่อมาอนุภาคเหล่านี้จึงสลายตัวไปเป็นอนุภาคเลปตอน

$$\pi^+ + \pi^- \rightarrow \rho \rightarrow l^+l^- \quad (1.11)$$

นอกจากกระบวนการนี้แล้ว อนุภาคเลปตอนยังเกิดจากการสลายตัวของ vector meson ที่เกิดจากปรากฏการณ์ เรโซแนนซ์<sup>2</sup> ชนิดต่าง ๆ เช่น  $\rho$ ,  $\omega$  หรือ  $\phi$  โดยกระบวนการสลายตัวของ vector meson เหล่านี้ จะให้อนุภาคเลปตอน 2 อนุภาค ที่เรียกว่า dilepton production ตัวอย่าง dilepton ที่เกิดขึ้นได้แก่ อิเล็กตรอนกับโพสิตรอน หรือมิวออนกับปฏิยานุภาคของมิวออน เป็นต้น

- (b) intermediate mass dileptons มีมวลอยู่ระหว่าง  $1 < m < 3$  GeV เกิดจากการกระบวนการ Drell-Yan  $q\bar{q} \rightarrow l^+l^-$  และการสลายตัวของควาร์กชนิด charm

นอกจากนี้ จำนวนของไดเลปตอนสามารถบอกได้ถึงจำนวนการเกิดขึ้นของ vector meson ชนิด  $\rho$  ซึ่งเกี่ยวข้องกับ chiral symmetry restoration ที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดควาร์ก-กลูออนพลาสมา

## 1.6 ขอบเขตของการวิจัย

เนื่องจากโครงการนี้เป็นโครงการระยะยาวและมีการแบ่งย่อยการดำเนินการออกเป็นหลายเฟส ซึ่งรายงานวิจัยฉบับนี้ถือเป็นเฟสที่ 1 ของการศึกษาการเกิดควาร์ก-กลูออนพลาสมาในการทดลองของ ALICE ที่ CERN ดังนั้นในบทที่ 2 จะกล่าวถึงระบบหัววัดต่าง ๆ ของห้องปฏิบัติการไอออนหนัก ALICE บทที่ 3 จะกล่าวถึงกระบวนการ ขั้นตอน และเงื่อนไขต่าง ๆ ในการเข้าเป็นสมาชิกของ ALICE ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี รวมถึงการจัดตั้งระบบคอมพิวเตอร์สมรรถนะสูงที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีเพื่อเชื่อมโยงไปยัง CERN ผ่านเทคโนโลยีกริด สำหรับในบทที่ 4 จะแสดงผลการวิจัยที่เกิดขึ้น ตลอดจนแผนงานในเฟสที่ 2 เพื่อนำไปสู่การศึกษาปรากฏการณ์ควาร์ก-กลูออนพลาสมาที่ ALICE ต่อไป

---

<sup>2</sup>ปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ ของฟิสิกส์พลังงานสูง เป็นการสร้างอนุภาคที่ไม่เสถียร ซึ่งจะแตกต่างจากปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ในฟิสิกส์ดั้งเดิม

## บทที่ 2

# ALICE

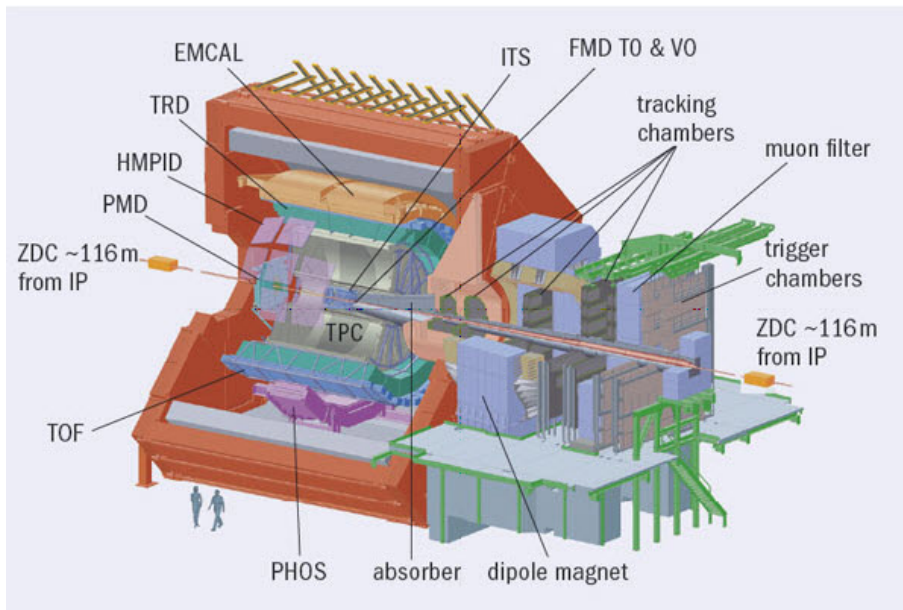
อลิซ (ALICE, A Large Ion Collider Experiment) เป็น 1 ใน 7 เครื่องตรวจหาอนุภาคที่ออกแบบเฉพาะสำหรับการศึกษาการชนกันของไอออนหนักของเครื่องเร่งอนุภาค LHC ที่ CERN เพื่อทำหน้าที่ศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับอันตรกิริยาอย่างแรงของสสารที่เกิดขึ้นจากการชนกันของไอออนหนัก โดยสสารที่ใช้ในการชนนี้ได้แก่ ไอออนของตะกั่ว (Pb) หรือ ไอออนของทองคำ (Au) เป็นต้น การชนกันนี้ทำให้เกิดสถานะที่มีความร้อนและความหนาแน่นพลังงานสูง ประมาณ 2000 ล้านเคลวิน หรือร้อนกว่าความร้อนที่แกนของดวงอาทิตย์ประมาณ 100,000 เท่า ก่อให้เกิดสถานะที่เรียกว่า ควาร์ก-กลูออนพลาสมา (quark-gluon plasma) หลังการชนประมาณ  $10^{-23}$  วินาที พลาสมานี้จะขยายตัวและเย็นลงที่อุณหภูมิประมาณ  $10^{12}$  เคลวิน เกิดการสร้างอนุภาคที่มีขนาดเล็กประมาณ  $10^{-18}$  เมตร จำนวนมากที่เรียกว่า อนุภาคปฐมภูมิ (primary particle) ซึ่งอนุภาคเหล่านี้ยังคงเคลื่อนที่ต่อไปด้วยความเร็วและโมเมนตัมที่สะสมอยู่ อนุภาคปฐมภูมิเหล่านี้จะเคลื่อนที่ได้ระยะทางระยะหนึ่ง แล้วจึงสลายตัวอีกครั้งไปเป็นอนุภาคทุติยภูมิ (secondary particle) โดยระยะที่เดินทางได้ก่อนจะสลายตัวนี้เรียกว่า ระยะทางการสลายตัว (decay length) ซึ่งจะมีระยะอยู่ประมาณ 5 - 50 ไมโครเมตร ทั้งนี้อนุภาคปฐมภูมิและอนุภาคทุติยภูมิล้วนเกิดจากการรวมตัวขององค์ประกอบพื้นฐานที่เรียกว่า ควาร์ก

ปัจจุบันห้องปฏิบัติการไอออนหนัก อลิซ มีสมาชิกเป็นนักวิทยาศาสตร์มากกว่า 1400 คน จาก 148 สถาบันใน 36 ประเทศ ซึ่งมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เป็นมหาวิทยาลัยแห่งแรกและแห่งเดียวในประเทศไทยที่เข้าร่วมเป็นสมาชิกแบบเต็มของ ALICE Collaboration เมื่อวันที่ 12 ตุลาคม 2555 และได้รับพระมหากรุณาธิคุณจากสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี เสด็จประทับเป็นองค์ประธานพิธีลงนามบันทึกข้อตกลงความร่วมมือระหว่างมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และ A Large Ion Collider Experiment (ALICE), CERN ณ วังสระปทุม เมื่อวันที่ 13 ธันวาคม 2555

อลิซเป็นหัววัดที่มีขนาดกว้าง 16 เมตร สูง 16 เมตรและยาว 26 เมตร หนักประมาณ 10,000 ตัน ถูกออกแบบและสร้างใช้ระยะเวลาประมาณเกือบ 20 ปี จากความร่วมมือของนักวิทยาศาสตร์และวิศวกรกว่า 1000 คน จาก 100 สถาบันใน 30 ประเทศ อลิซประกอบด้วยระบบตรวจจับที่แตกต่างกัน 18 ระบบ อาทิ เช่น ระบบ Time Projection Chamber(TPC), Inner Tracking System (ITS) และ Transition Radia-



tion Detector (TRD) ซึ่งประกอบด้วย volumetric pixel (voxel) 645 ล้านชิ้น แต่ละระบบจะใช้เทคนิคและการออกแบบเฉพาะตัว แผนภาพเครื่องวัดอลิซแสดงดังภาพที่ 2.1 ประกอบด้วยส่วนกลางที่ใช้ตรวจวัดเฮดรอน อิเล็กตรอนและโปรตอน ถัดไปเป็นระบบตรวจจับมิวออน



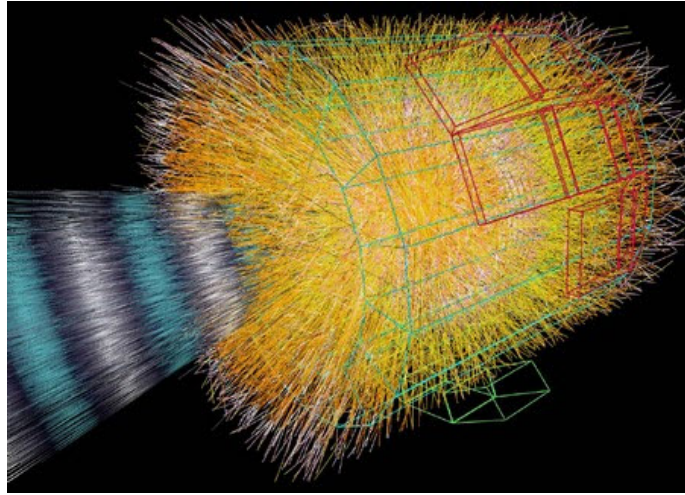
รูปที่ 2.1: แผนภาพแบบจำลององค์ประกอบต่าง ๆ ของหัววัดอลิซ  
(ที่มา:<http://alicematters.web.cern.ch/?q=ALICEoverview>)

ระบบทั้งหมดวางอยู่ในแม่เหล็กแบบโซเลนอยด์ขนาดใหญ่ที่นำมาจากเครื่องเร่งอนุภาค Large Electron-Positron Collider (LEP, ถูกสร้างเมื่อปี 2523) แม่เหล็กแบบโซเลนอยด์นี้สามารถให้สนามแม่เหล็กขนาด 0.5 เทสลา ที่กำลังสูง 4 เมกะวัตต์

## 2.1 วัตถุประสงค์ของอลิซ

วัตถุประสงค์หลักของอลิซ คือการตรวจหาอนุภาคยุคต้นกำเนิดเอกภพที่ยังหลงเหลืออยู่ ซึ่งการตรวจหาจำเป็นต้องมีการออกแบบหัววัดให้มีความสามารถดังนี้

- การสังเคราะห์ข้อมูลจากแนวทางเดินทั้งหมดของอนุภาคจำนวนไม่ต่ำกว่า 10,000 อนุภาค
- สามารถวัดค่าโมเมนตัมของอนุภาคเหล่านี้ได้ตั้งแต่ 100 MeV/c จนถึง มากกว่า 100 GeV/c
- ระบุชนิดของอนุภาคส่วนใหญ่ได้ว่าเกิดจากอันตรกิริยาแบบใดและเกิดขึ้นที่หัววัดชนิดใด
- สังเกตค่าการสลายตัวซึ่งจะนำไปสู่ควาร์กชนิด c และ b



รูปที่ 2.2: ภาพจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่ได้จากการตรวจจับอนุภาคของอลิซ โดยเส้นแต่ละเส้นแทนทางเดินของอนุภาค 1 อนุภาค

(ที่มา: <http://alicematters.web.cern.ch/?q=ALICEoverview>)

## 2.2 ระบบการทำงานของหัววัด

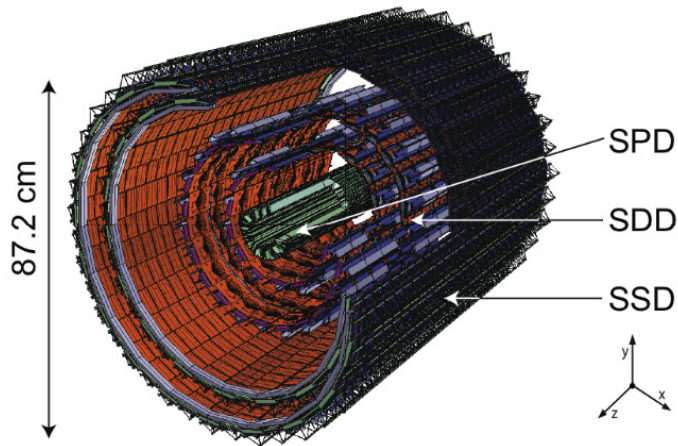
ระบบการทำงานของหัววัดอลิซนั้นสามารถ แบ่งได้เป็น 5 ส่วนหลัก คือ

- 1) ส่วนของการติดตามทางเดินของอนุภาคแบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือ ระบบติดตามทางเดินด้านใน (Inner Tracking System, ITS) กับ Time Projection Chamber (TPC)
- 2) ส่วนที่ใช้ระบุชนิดของอนุภาค ประกอบด้วย 3 ระบบ คือ Time of Flight (TOF), High Momentum Particle Identification Detector (HMPID) และ Transition Radiation Detector (TRD)
- 3) ส่วนที่ใช้วัดพลังงาน ประกอบด้วย 2 ระบบ คือ Photon Spectrometer (PHOS) และ Electromagnetic Calorimeters (EMCal)
- 4) ส่วนที่ใช้ในการเลือกและวัดสมบัติโดยรวมของอันตรกิริยา แบ่งเป็น 6 ระบบคือ T0, V0, Forward Multiplicity Detector (FMD), ACORDE, Zero Degree Calorimeters (ZDC) และ Photon Multiplicity Detector (PMD)
- 5) ส่วนที่ใช้ศึกษาอนุภาคมิวออน (Muon spectrometer)

## 2.3 รายละเอียดของระบบต่าง ๆ ในหัววัดอลิซ

### 2.3.1 ส่วนของการติดตามทางเดินของอนุภาค

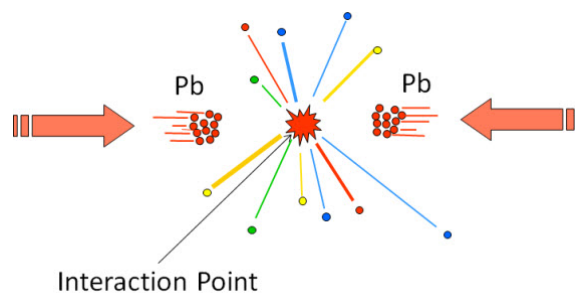
ทำหน้าที่บันทึกเส้นทางเดินของแต่ละอนุภาค เป็นส่วนที่อยู่บริเวณในสุดของหัววัด จะประกอบไปด้วย 2 ระบบ คือ ระบบติดตามทางเดินด้านใน (ITS) และ Time Projection Chamber (TPC)



รูปที่ 2.3: แสดงส่วนประกอบของ Inner Tracking System (ITS)  
(Aamodt, K et al.) JINST 5 (2010) P03003

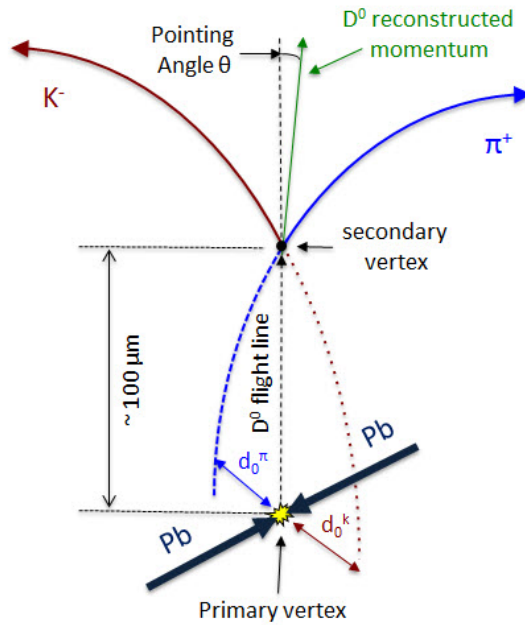
### ระบบติดตามทางเดินอนุภาคด้านใน (Inner Tracking System, ITS)

ITS เป็นระบบที่อยู่ชั้นในสุดใกล้กับท่อลำเลียงอนุภาค (Beam pipe) มีลักษณะเป็นทรงกระบอก ล้อมรอบบริเวณที่เกิดการชนกันของอนุภาคหรือที่เรียกว่า จุดอันตรกิริยา (Interaction point) ทำหน้าที่ตรวจจับอนุภาคที่เกิดขึ้นหลังการชนทั้งแบบปฐมภูมิ (อนุภาคที่เกิดขึ้น ณ จุดที่เกิดการชน) และทุติยภูมิ (อนุภาคที่เกิดขึ้นจากการสลายตัว ณ ตำแหน่งถัดออกไปอีกประมาณ 100 ไมโครเมตร จากจุดอันตรกิริยา) ซึ่งมีความแม่นยำในระดับ 10 ไมโครเมตร เพื่อนำข้อมูลไปประกอบการสร้างและอธิบายปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นหลังการชน เนื่องจากความหนาแน่นของอนุภาคบริเวณที่ใกล้กับจุดอันตรกิริยามีค่าสูง หัววัดซิลิกอน 4 ชั้นแรกจึงต้องมีความละเอียดในการวัดสูงมาก โดย 2 ชั้นในสุด มีการออกแบบเป็นหัววัดซิลิกอนแบบจุด (Silicon Pixel Detector-SPD) สำหรับ 2 ชั้นกลางเป็นหัววัดซิลิกอนแบบแผ่น (Silicon Drift Detector-SDD) ซึ่งจะทำการวัดพิกัดของการเคลื่อนที่ของอนุภาค และ 2 ชั้นนอกสุดเป็นหัววัดซิลิกอนแบบแถบ (Silicon Strip Detector-SSD) เมื่อรวมทั้ง 6 ชั้นแล้วจะมีพื้นที่ในการตรวจจับทั้งหมด 7 ตารางเมตรครอบคลุมเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคถึง 13 ล้านเส้นทาง



รูปที่ 2.4: แสดงการชนกันของอนุภาค บริเวณที่ชนกันเรียกว่า จุดอันตรกิริยา (Interaction Point, IP) ชนิดของเซนเซอร์แบบต่าง ๆ ที่จะใช้ในการตรวจจับ

- 1) หัววัดซิลิกอนแบบจุด (Silicon Pixel Detector, SPD) เป็นแผงตัวตรวจจับแบบบางขนาด



รูปที่ 2.5: แสดงตัวอย่างการเกิดอนุภาคปฐมภูมิชนิด D-meson ที่ primary vertex และ ชนิด Kaon กับ Pion ที่ secondary vertex

0.05x0.5 ตารางมิลลิเมตร สามารถตรวจจับเส้นทางของอนุภาคได้ 50 อนุภาคต่อ 1 ตารางเซนติเมตร ครอบคลุมเส้นทางการเคลื่อนที่ประมาณ 100 ล้านเส้นทาง แต่ละตัวจะเชื่อมต่อกับไมโครชิพเพื่อขยายสัญญาณให้มีความชัดเจน หัววัดจะถูกทำให้เย็นและมีน้ำหนักที่เบา หัววัดซิลิกอนแบบจุดนี้ประกอบด้วยชั้นของซิลิกอน 2 ชั้น อยู่รอบท่อลำแสงที่ระยะห่างจากแกนลำแสง 39 มิลลิเมตรและ 76 มิลลิเมตรตามลำดับ หัววัดนี้มีบทบาทสำคัญในการระบุตำแหน่งของจุดที่เกิดอันตรกิริยา โดยมีความถี่ในการวัดทุก ๆ 100 ns และสามารถส่งข้อมูลไปยังส่วนประมวลผลกลางของอลิซ (CTP- Central Trigger Processor) ภายในเวลาประมาณ 800 ns หลังการเกิดอันตรกิริยา ตัว SPD ประกอบด้วยโครงสร้างสนับสนุนเป็นใยคาร์บอน ท่อทำความเย็น และแผ่นซิลิกอนมีขนาดที่บางมากเพียง 0.2 มิลลิเมตร และระบบการส่งข้อมูลจะใช้อะลูมิเนียมแทนทองแดงเพื่อให้มีมวลรวมต่ำ

- 2) หัววัดซิลิกอนแบบแผ่น (Silicon Drift Detector, SDD) ถัดจาก SPD เนื่องจากความหนาแน่นของอนุภาคที่ตรวจพบยังคงมีสูง ดังนั้นหัววัดที่ใช้จึงต้องมีความสามารถในการวัดตำแหน่งของอนุภาคแบบ 2 มิติ ขนาดของซิลิกอนที่ใช้มีขนาด 88x73 ตารางมิลลิเมตร โดยใช้จำนวนชั้นซิลิกอนทั้งหมด 260 ชั้น การติดตั้งต้องพิจารณาถึงระบบไฟฟ้าและระบบทำความเย็น เนื่องจากชั้นซิลิกอนค่อนข้างไวต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิ SDD จะถูกติดตั้งไว้ที่ชั้นกลางของ ITS เพื่อวัดพลังงานของโฟตอนที่ผ่านเข้ามาแล้วทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนในเซนเซอร์
- 3) หัววัดซิลิกอนแบบแถบ (Silicon Strip Detector, SSD) ทำหน้าที่ตรวจจับเปรียบเทียบและเชื่อมโยงเส้นทางจาก ITS ไปยัง Time Projection Chamber (TPC) ซึ่งเป็นหัววัดที่อยู่ชั้นถัดไป สำหรับ SSD





รูปที่ 2.6: ภาพบางส่วนของการติดตั้ง SPD (Credits: Antonio Saba)

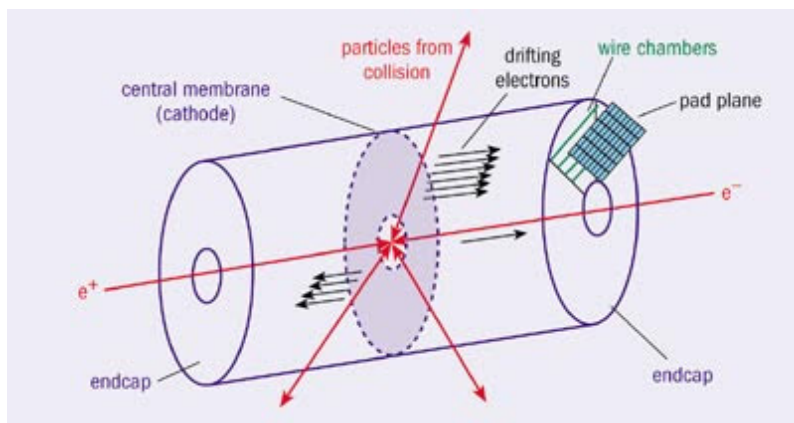
(ที่มาจาก [http://aliceinfo.cern.ch/Public/Objects/Chapter2/DetectorComponents/silicon\\_pixel\\_detector.htm](http://aliceinfo.cern.ch/Public/Objects/Chapter2/DetectorComponents/silicon_pixel_detector.htm))

นั้นมีทั้งหมด 1698 โมดูล แต่ละโมดูลประกอบด้วยแถบสองด้านที่มีเซนเซอร์ซิลิกอนติดอยู่ ระยะห่างระหว่างแถบจะเท่ากับ 95 ไมครอนและมุมระหว่างด้าน p-n เท่ากับ 35 มิลลิเรเดียน ทำให้ SSD สามารถทำการวัดเส้นทางของอนุภาคแบบ 2 มิติได้ที่ความละเอียดระดับ 20 ไมครอนถึง 800 ไมครอน

### Time Projection Chamber (TPC)

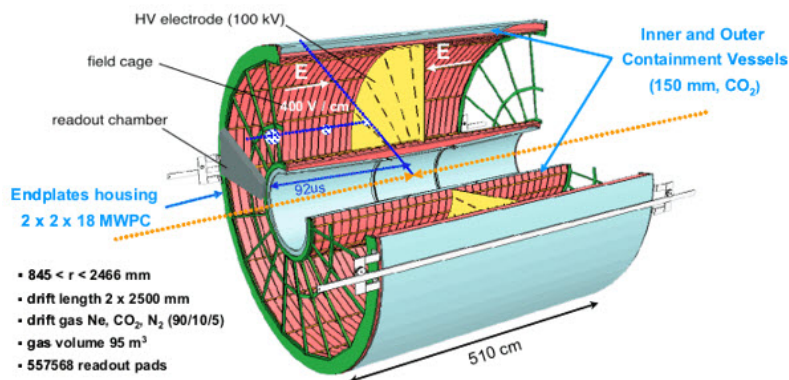
TPC เป็นระบบหลักที่อยู่ถัดมา ทำการวัดในแบบ 3 มิติที่เน้นประสิทธิภาพและความแข็งแรงทนทาน ถึงแม้ว่าความเร็วในการบันทึกข้อมูลปริมาณมากจะไม่สูงนัก แต่มีข้อดีคือสามารถทำสำเนาข้อมูลได้ ทำให้มั่นใจได้ว่าข้อมูลที่สำคัญจะไม่มีสูญหาย การทำงานของ TPC ดังภาพที่ 2.7 ใช้หลักที่ว่าอนุภาคที่มีประจุ เมื่อเดินทางผ่านแก๊สจะทำให้แก๊สบริเวณนั้นแตกตัวเป็นไอออน ส่วนที่เป็นอิเล็กตรอนอิสระจะเคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้าไปที่ปลายของ TPC ซึ่งจะถูกขยายสัญญาณและบันทึกไว้ TPC สามารถทำการวัดตำแหน่งของทางเดินของอนุภาคและเก็บพิกัดแบบ 2 มิติ โดยระยะห่างของแต่ละทางเดินจะคำนวณจากเวลาที่อิเล็กตรอนอิสระใช้ในการเดินทางไปยังบริเวณรับสัญญาณ

TPC ของอลิซมีชื่อว่า “Workhorse” มีลักษณะเป็นห้องทรงกระบอกมีแกน (field cage) ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์แบบที่ใช้ในการสร้างยานอวกาศ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.6 เมตรและยาว 5.4 เมตร ภายในบรรจุไว้ด้วยแก๊สไนออน 90% คาร์บอนไดออกไซด์ 10% (ต่อมาได้เพิ่มไนโตรเจนอีก 5%) มีระบบเร่งและตรวจจับสัญญาณจากอิเล็กตรอนอิสระโดยใช้สนามไฟฟ้าและมีสนามแม่เหล็กซึ่งมีทิศตามความยาว



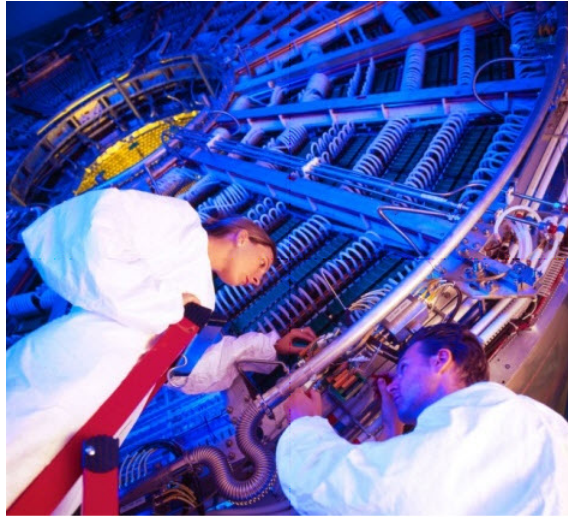
รูปที่ 2.7: แสดงหลักการทำงานของ TPC  
(ที่มา <http://cemcourier.com/cws/article/cern/29014>)

ของกระบอกขนานไปกับสนามไฟฟ้าทำหน้าที่ควบคุมทิศทางและลดการแพร่กระจายของอิเล็กตรอนอิสระ ห้องทรงกระบอกถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนโดยตรงกลางจะมีแผ่นขั้วไฟฟ้ามีลักษณะเป็นแผ่นเรียบความหนา 0.2 มิลลิเมตรกันอยู่ ที่ปลายทั้งสองด้านของทรงกระบอกมีแผ่นปิด (end plates) และวงจรวัดอิเล็กตรอนที่ใช้ในการตรวจวัดอิเล็กตรอนอิสระแบบ multi-wire proportional chambers (MWPC) โดยวงจรวัดอิเล็กตรอนที่ใช้บน MWPC ได้ถูกย่อให้มีความหนาที่ว่างขนาดภายใน TPC และเชื่อมต่อกับเส้นใยแก้วนำแสงจำนวน 260 เส้นเพื่อนำข้อมูลส่งออกมาดังภาพที่ 2.8

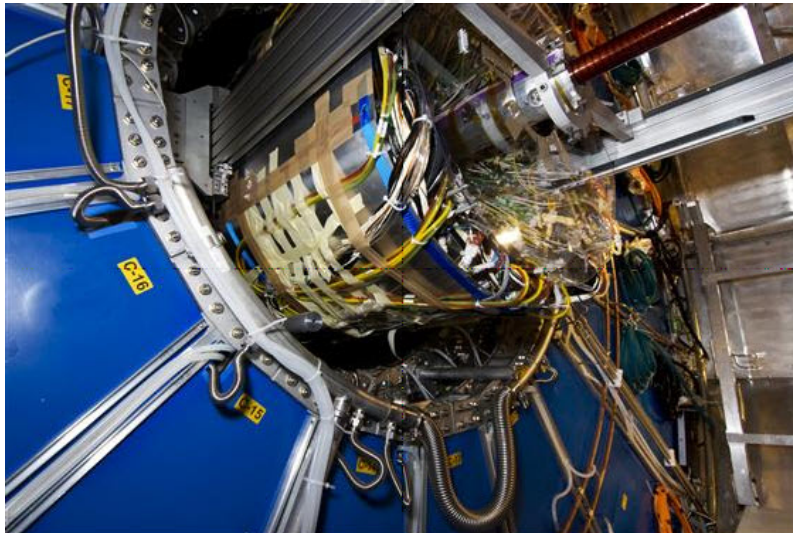


รูปที่ 2.8: ภาพแสดงขนาดและองค์ประกอบของ TPC  
(ที่มา [http://www.thelivingmoon.com/42stargate/03files/Alice\\_Portal.html](http://www.thelivingmoon.com/42stargate/03files/Alice_Portal.html))

เนื่องจาก TPC มีแก๊สเป็นองค์ประกอบหลักดังนั้นประสิทธิภาพในการทำงานจึงขึ้นกับปัจจัยทางอุณหภูมิและความดัน ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมอุณหภูมิให้คงตัวโดยให้ความแตกต่างของอุณหภูมิไม่เกิน 0.1°C ต่อปริมาตรทั้งหมดของห้องบรรจุแก๊สของ TPC ที่มีขนาด 90 ลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 2.9: ภาพการติดตั้งส่วนส่งต่อข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์ของ TPC  
(ที่มา <http://cds.cern.ch/record/1011028/files/tpc-2006-006.jpg?subformat=icon-1440>)



รูปที่ 2.10: ภาพขณะติดตั้ง TPC

(ที่มา [http://alicematters.web.cern.ch/sites/alicematters.web.cern.ch/files/images/ALICE\\_silicon\\_pix2.jpg](http://alicematters.web.cern.ch/sites/alicematters.web.cern.ch/files/images/ALICE_silicon_pix2.jpg))

### 2.3.2 ส่วนที่ใช้ระบุชนิดของอนุภาค (Particle identification detectors, PID)

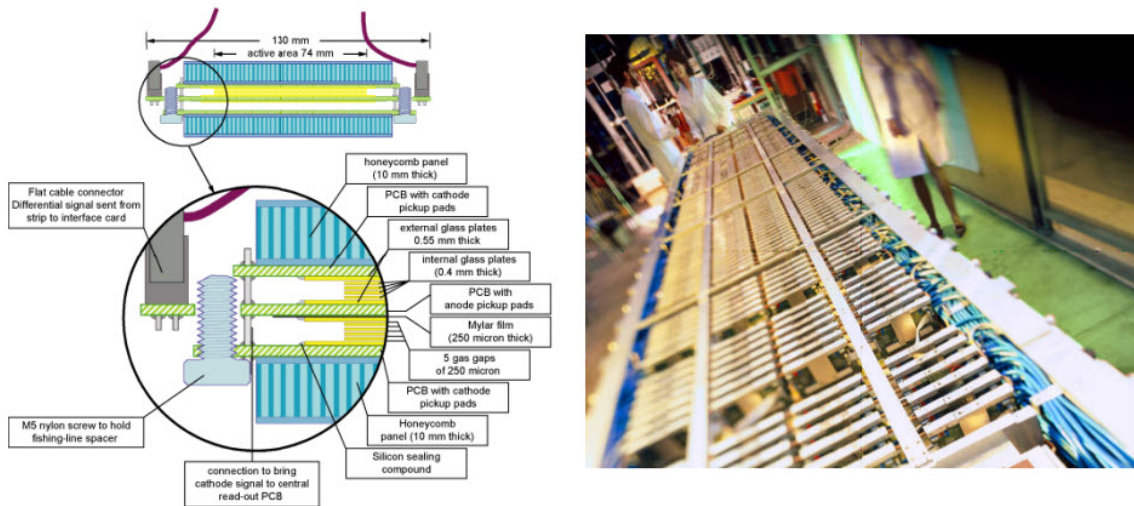
นอกจากข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับเส้นทางเดินของอนุภาคที่ได้จาก ITS และ TPC แล้ว การระบุชนิดของอนุภาคต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น ต้องมีการออกแบบหัววัดเพิ่มเพื่อตรวจสอบชนิดของอนุภาคดังนี้

#### Time of flight (TOF)

เป็นระบบที่ใช้คำนวณเวลาที่อนุภาคเดินทางจากจุดที่เกิดการชนมายังหัววัดเพื่อนำไปคำนวณค่าโมเมนตัมและมวลของอนุภาค ระบบ TOF ถูกออกแบบให้ใช้ในการจำแนกอนุภาคไพออน เคออน และโปรตอนที่มีพลังงานประมาณ 2-3 GeV/c ประสิทธิภาพของ PID อยู่ในระดับความละเอียดที่  $50 \times 10^{-12}$



วินาที และครอบคลุมกว่า 150,000 ช่องสัญญาณการตรวจวัดบนพื้นที่ 160 ตารางเมตร TOF มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกครอบคลุมมุมขั้ว (polar angle) ระหว่าง 45 องศาและ 135 องศา มีโครงสร้างแบบแยกเป็นส่วนได้ 18 ส่วน แต่ละส่วนแบ่งออกเป็น 5 โมดูล ภายในโมดูลมี Multigap Resistive Plate Chamber (MRPC) ทั้งหมด 1638 ชั้น โดย MRPC ถูกออกแบบให้ประกอบด้วยชั้นของกระจกทนไฟฟ้าที่มีจำนวนร่อง 10 ร่อง กว้าง 0.25 มิลลิเมตร (ภาพที่ 2.11) ซึ่งจะทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กที่ใช้ในการขยายสัญญาณหรือจับเวลาทำงานได้ดีขึ้น

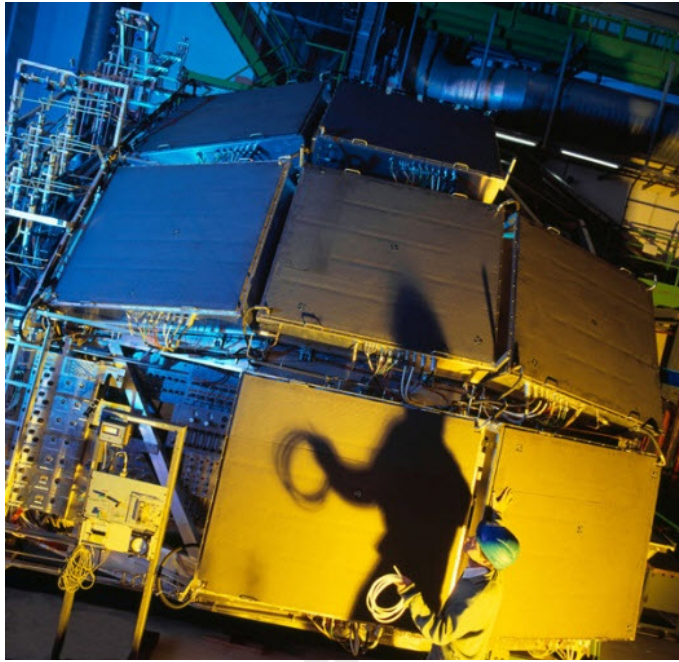


รูปที่ 2.11: ภาพ Multigap Resistive Plate Chamber (MRPC) และ การประกอบเป็นโมดูลของ TOF (ที่มา [http://aliceinfo.cern.ch/Public/en/Chapter2/Chap2\\_TOF.html](http://aliceinfo.cern.ch/Public/en/Chapter2/Chap2_TOF.html))

### High Momentum Particle Identification Detector (HMPID)

เป็นการระบุชนิดของอนุภาคโมเมนตัมสูงโดยใช้การแผ่รังสี “เชอเรนคอฟฟ์” (Cherenkov Radiation) ซึ่งค้นพบโดย เชอเรนคอฟฟ์ ว่าเมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ในตัวกลาง เช่น แก๊สหรือของเหลว ความเร็วของอนุภาคสามารถมีค่ามากกว่าความเร็วแสงในตัวกลางนั้นได้และอนุภาคที่มีความเร็วสูงนี้จะไปกระตุ้นตัวกลางให้ปลดปล่อยแสงที่เรียกว่า “แสงเชอเรนคอฟฟ์” ซึ่งทิศทางของแสงที่ถูกปลดปล่อยออกมานี้จะขึ้นกับความเร็วของอนุภาคและค่าดัชนีหักเหของแสงในตัวกลาง จากการวัดทิศทางของแสงเชอเรนคอฟฟ์ ทำให้สามารถระบุความเร็ว มวล รวมไปถึงชนิดของอนุภาคนั้นได้ แต่เนื่องจากปริมาณแสงเชอเรนคอฟฟ์ที่ปลดปล่อยในกระบวนการนี้น้อยมาก คือประมาณ 20 ถึง 30 โฟตอนเท่านั้น ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาในการวัดและเพื่อให้สามารถระบุตำแหน่งได้อย่างถูกต้องแม่นยำในระดับมิลลิเมตร ทีมพัฒนาของ HMPID จึงได้ออกแบบสร้างขั้วไฟฟ้าโดยเคลือบด้วยฟิล์มซีเซียมไอโอดีน (CsI) ขนาด 1 ตารางเมตรโดยใช้หลักการที่ว่าฟิล์มซีเซียมไอโอดีนจะให้ไอเล็กตรอนอิสระเมื่อมีโฟตอนมาตกกระทบที่ผิวและการวัดไอเล็กตรอนอิสระที่เกิดขึ้นนี้ทำให้สามารถตรวจพบแสงเชอเรนคอฟฟ์ได้ที่ความน่าจะเป็นสูงถึง 25 เปอร์เซ็นต์ การพัฒนานี้ถือเป็นส่วนประกอบที่สำคัญสำหรับหัววัดเชอเรนคอฟฟ์ที่ใหญ่ที่สุดในโลกเครื่องแรกเท่าที่เคยมีการสร้างเครื่องเร่งอนุภาคมาก่อน





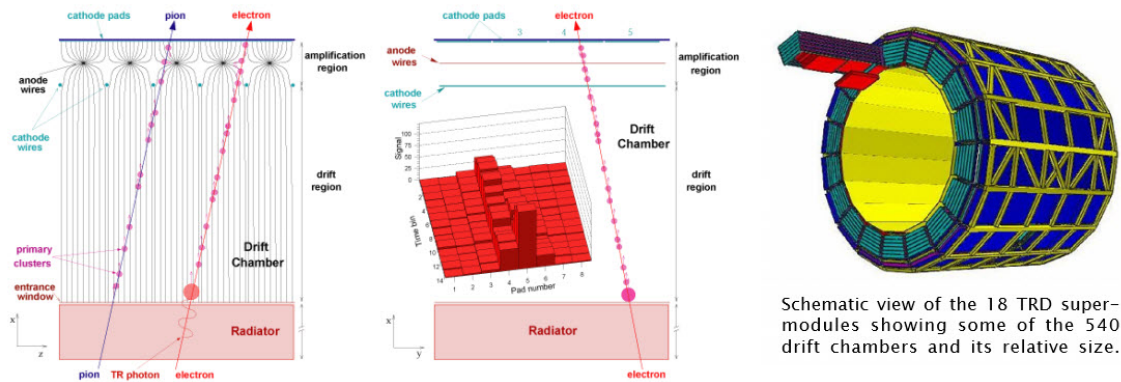
รูปที่ 2.12: ภาพการติดตั้ง HMPID สำหรับการทดลอง (Credits: Antonio Saba)  
(ที่มา [http://aliceinfo.cern.ch/Public/en/Chapter2/Chap2\\_HMPID-en.html](http://aliceinfo.cern.ch/Public/en/Chapter2/Chap2_HMPID-en.html))

### Transition Radiation Detector (TRD)

จากหลักการที่ว่า เมื่ออนุภาคที่มีประจุเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อของตัวกลางที่มีค่าไดอิเล็กตริกต่างกันจะปลดปล่อยรังสีออกมา โดยความเข้มและมุมของรังสีที่ปลดปล่อยจะขึ้นกับมวลของอนุภาค จึงทำให้นักฟิสิกส์สามารถใช้การตรวจวัดรังสีนี้ในการจำแนกอนุภาคที่มีประจุและมีพลังงานใกล้เคียงกันแต่มีมวลต่างกันออกจากกันได้ ซึ่งใน TRD วิธีนี้ได้ถูกนำมาใช้ในการจำแนกอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงกว่า 1 GeV เกิดจากกระบวนการต่าง ๆ หลังการชนของไอออนหนักจากอนุภาคชนิดอื่น ๆ กว่า 20,000 อนุภาคได้ TRD เป็นชั้นที่อยู่ถัดออกมาและได้ถูกติดตั้งไว้โดยรอบของ TPC จำนวนทั้งหมด 18 โมดูล มีความสามารถในการจำแนกอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงออกจากโพออนโดยใช้ระยะเวลาสั้นกว่า 6 ไมโครวินาที แต่ละโมดูลประกอบด้วยบริเวณแผ่รังสี (radiator) และบริเวณให้อนุภาคเคลื่อนที่ (drift chamber) หนา 30 มิลลิเมตรบรรจุไว้ด้วยแก๊สผสมระหว่างซีนอนกับคาร์บอนไดออกไซด์สัดส่วน 85%:15% ที่ปลายของ drift chamber จะมีวงจรรขยายสัญญาณแบบ MWPC ต่อกับแผ่น (pads) อ่านค่าเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีพื้นที่เฉลี่ยประมาณ 6 ตารางเซนติเมตร TRD ทั้ง 18 โมดูล มี drift chamber ทั้งหมด 540 ชั้น ครอบคลุมพื้นที่ 700 ตารางเมตร ใช้ช่องสัญญาณรับส่งข้อมูลกว่า 1.2 ล้านช่อง

### 2.3.3 ส่วนที่ใช้วัดพลังงาน (Calorimeters)

ในฟิสิกส์อนุภาค calorimeters เป็นหัววัดที่ใช้วัดพลังงานของอนุภาค โดยใช้หลักการที่ว่า เมื่ออนุภาคพลังงานสูงชนเข้ากับหัววัดจะทำให้เกิดการสร้างกลุ่มของอนุภาค (particle shower) ขึ้น ซึ่งอนุภาคเหล่านี้ได้เคลื่อนที่ต่อเข้าไปใน calorimeters และมีการสูญเสียพลังงานไปเรื่อย ๆ จนหยุดนิ่งหรือทะลุผ่านออกไป



รูปที่ 2.13: ภาพหลักการทำงานและองค์ประกอบของ TRD

(ที่มา [http://aliceinfo.cern.ch/Public/en/Chapter2/Chap2\\_TRD.html](http://aliceinfo.cern.ch/Public/en/Chapter2/Chap2_TRD.html) และ J. Mercado for the ALICE TRD Collaboration)

ในที่สุด การระบุชนิดของอนุภาคพลังงานสูงที่วิ่งเข้ามาในหัววัดครั้งแรกทำได้จากการวัดค่าพลังงานที่สะสมใน calorimeters และรูปแบบของการสร้างกลุ่มของอนุภาคที่เกิดขึ้น Calorimeters แบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ calorimeters ชนิดแม่เหล็กไฟฟ้า และ calorimeters ชนิดแฮดรอน โดย calorimeters ชนิดแม่เหล็กไฟฟ้าถูกออกแบบมาเพื่อวัดพลังงานของอนุภาคที่มีอันตรกิริยาแบบแม่เหล็กไฟฟ้า สำหรับ calorimeters ชนิดแฮดรอนนั้น ได้ถูกออกแบบมาให้วัดพลังงานของอนุภาคที่มีอันตรกิริยาแบบนิวเคลียร์อย่างแรง

### Photon Spectrometer(PHOS)

เป็น calorimeters ชนิดแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความละเอียดสูง ทำหน้าที่ตรวจวัดอุณหภูมิการชนของไอออนหนักโดยติดตั้งอยู่ห่างจากจุดที่เกิดการชน 4.6 เมตร ทำจากผลึกตะกั่วทังสเตน ( $PbWO_4$ ) จำนวน 17920 แท่งที่มีความหนาแน่นเหมือนตะกั่วแต่มีความโปร่งแสงเหมือนแก้ว ผลึกตะกั่วทังสเตนนี้ทำงานได้ดีถึงแม้จะมีความหนาแน่นของอนุภาคสูง โดยขณะทำงานต้องควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด สำหรับทางด้านหน้าของ PHOS มี multi-wire chamber ทำหน้าที่แยกอนุภาคที่มีประจุออกจากโฟตอน

### Electromagnetic Calorimeter(EMCal)

เป็น calorimeters ชนิดแม่เหล็กไฟฟ้า ทำหน้าที่วัดกลุ่มของอนุภาคที่เรียกว่าเจ็ต (jet) ซึ่งเกิดจาก ควาร์กและกลูออนหรือที่รวมเรียกว่าพาร์ตอน (parton) โดยเจ็ตเหล่านี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับความหนาแน่นและองค์ประกอบของบริเวณที่เกิดการชนกันของไอออนหนัก ในการปรับปรุงความสามารถในการวัดคุณสมบัติของเจ็ต อลิซได้ทำการติดตั้ง EMCal ในปี 2008 EMCal ทำจากสารเรืองแสงที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบและเส้นใยที่สามารถเปลี่ยนความยาวคลื่นแสงตามยาวได้ การอ่านค่าทำโดยใช้ Avalanche Photo Diode (APD) EMCal มีขนาดใหญ่กว่า PHOS แต่มีความละเอียดในการวัดต่ำกว่า PHOS เพื่อให้เหมาะกับการวัดอัตราการเกิดเจ็ตและลักษณะเฉพาะของเจ็ตที่เกี่ยวข้องกับอนุภาคที่มีประจุ EMCal มีจุด

เด่นที่สามารถตรวจวัดโฟตอนในขณะที่ TPC มีจุดเด่นในการบันทึกแนวทางเดินและโมเมนตัมของอนุภาคที่มีประจุ นอกจากนี้ EMCal ยังสามารถใช้เพื่อแยกอิเล็กตรอนจากแฮดรอน เนื่องจากอิเล็กตรอนจะสูญเสียพลังงานเกือบทั้งหมดใน EMCal ในขณะที่แฮดรอนแทบจะไม่สูญเสียพลังงานใน EMCal เลย

### 2.3.4 ส่วนที่ใช้ในการเลือกและวัดสมบัติโดยรวมของอันตรกิริยา (Forward and trigger detectors)

ประกอบด้วยหัววัดเฉพาะทางที่มีขนาดเล็กจำนวนหนึ่งที่ใช้ในการคัดเลือกและวัดสมบัติโดยรวมของอันตรกิริยาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น

#### T0

ทำหน้าที่ระบุเวลาและแจ้งสัญญาณเพื่อทำการวัดตำแหน่งของจุดยอด (vertex) และ ลักษณะของการชนแบบผ่านจุดศูนย์กลางมวล (centrality) T0 เป็นเครื่องตรวจวัดความไวสูง ทำการวัด ณ ตำแหน่งศูนย์กลางของการชน สามารถวัดเวลาในการชนได้แม่นยำมาก (น้อยกว่า  $2 \times 10^{-11}$  วินาที) ด้วยตัวนับการแผ่รังสี เซอเรนคอฟจำนวน 12 ตัวถึง 2 ชุด (T0-C และ T0-A) ติดตั้งไว้รอบ ๆ ท่อนำแสง

#### V0

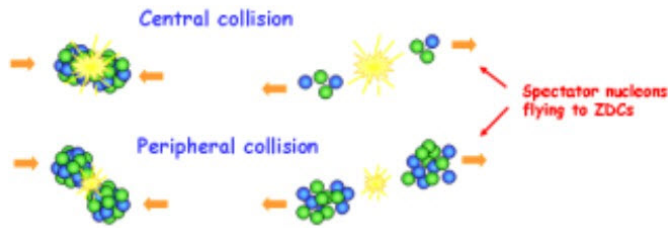
ทำหน้าที่เลือกเหตุการณ์ที่ได้จากการชนกันจริง โดยจะคัดกรองสัญญาณที่มาจากปฏิกิริยาพื้นหลังของอนุภาคกับแก๊สที่ไหลในท่อนำแสงออกไป ลักษณะตัววัดเป็นแท่งเรียงซ้อนกันสองชุด V0L และ V0R

#### Forward Multiplicity Detector (FMD)

ออกแบบมาเพื่อวัดจำนวนอนุภาคมีประจุที่ถูกสร้างขึ้นในการชนกันของไอออนหนักและถูกปลดปล่อยออกมาที่มีมุมขนาดเล็กเมื่อเทียบกับทิศทางของลำอนุภาค หัววัดนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับจำนวนและการกระจายตัวของอนุภาคมีประจุที่มี rapidity ในช่วง  $1.7 < |\eta| < 5.1$  สอดคล้องกับมุมระหว่าง  $0.75$  องศาถึง  $21$  องศาในทิศทางของลำอนุภาค โดยอนุภาคจะถูกตรวจนับด้วยหัววัดที่ทำจากวงแหวนซิลิกอนที่ถูกติดตั้งไว้ในท่อนำแสงจำนวน 3 จุด

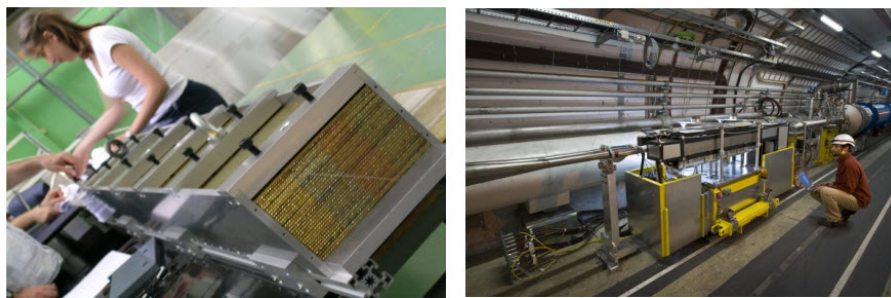
#### ALICE cosmic ray detector (ACORDE)

เป็นหัววัดรังสีขนาดใหญ่จำนวน 60 อันวางอยู่บนแม่เหล็ก L3 ใช้ในการตรวจจับรังสีคอสมิกและสามารถให้ข้อมูลที่แม่นยำเกี่ยวกับรังสีคอสมิกที่มีพลังงานหลักประมาณ 1015-1017 eV



รูปที่ 2.14: เปรียบเทียบการชนกันของไอออนหนักแบบผ่านศูนย์กลางมวล (central collision) และแบบผ่านขอบด้านนอก (peripheral collision) จะเห็นได้ว่าการชนแบบผ่านขอบด้านนอก จะเหลือจำนวนนิวคลีออนที่ไม่เกิดการชนกัน (spectator nucleons) มากกว่า

(ที่มา [http://aliceinfo.cern.ch/Public/en/Chapter2/Chap2\\_ZDC-en.html](http://aliceinfo.cern.ch/Public/en/Chapter2/Chap2_ZDC-en.html))



รูปที่ 2.15: ภาพตัดขวางของ ZDC และการติดตั้ง ZDC ในอุโมงค์ของเครื่องเร่งอนุภาค LHC

(ที่มา [http://aliceinfo.cern.ch/Public/en/Chapter2/Chap2\\_ZDC-en.html](http://aliceinfo.cern.ch/Public/en/Chapter2/Chap2_ZDC-en.html))

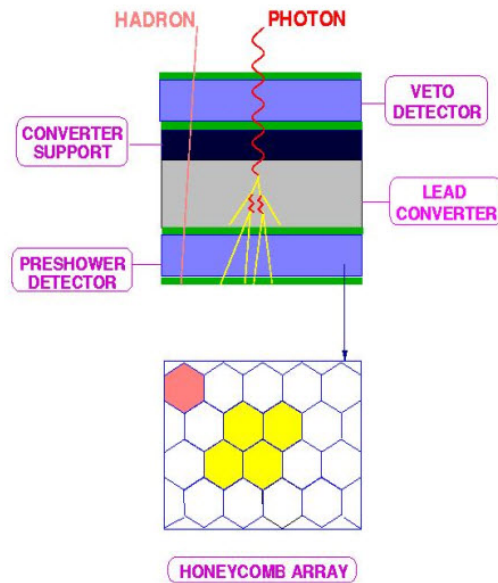
### Zero Degree Calorimeters(ZDC)

ทำหน้าที่วัดนิวคลีออนของไอออนหนักที่ไม่มีการชนกัน ทำให้สามารถระบุลักษณะของการชนได้ว่าเป็นการชนที่ผ่านจุดศูนย์กลางมวลหรือไม่ ซึ่งหากเป็นการชนที่ไม่ผ่านจุดศูนย์กลางมวล จะทำให้ ZDC วัดจำนวนนิวคลีออนที่ไม่เกิดการชนกันได้มากกว่า (ภาพที่ 2.15) ZDC เป็นหัววัดขนาดเล็กจำนวน 2 หัววัด ถูกติดตั้งอยู่ในอุโมงค์ของเครื่องเร่งอนุภาค LHC ตามแนวของท่อลำเลียงแสงห่างจากจุดที่เกิดการชนกันไปด้านละ 115 เมตร ZDC แต่ละหัววัดประกอบด้วย calorimeter สำหรับวัดโปรตอนและนิวตรอนอย่างละ 1 ชุด ZDC สร้างจากแผ่นโลหะที่ทำเป็นร่องไว้ใส่เส้นใยควอทซ์ โดยแผ่นโลหะผสมทั้งสแตนเลสใช้สำหรับชุดตรวจวัดนิวตรอนและแผ่นทองเหลืองจะใช้สำหรับชุดตรวจวัดโปรตอน

### Photon Multiplicity Detector(PMD)

เป็นหัววัดโฟตอนที่ทำกรตรวจวัดจำนวนและการกระจายตัวของโฟตอนในการชนของไอออนหนักแต่ละครั้ง โดยชั้นแรกของ PMD จะเป็นหัววัด veto ที่กั้นไม่ให้อนุภาคที่มีประจุเข้ามาในหัววัดแต่อนุญาตให้โฟตอนและเฮดรอนที่เป็นกลางทางไฟฟ้าเคลื่อนที่เข้ามาได้ (ภาพที่ 2.16) สำหรับโฟตอนที่ทะลุไปยังชั้นที่สองที่ทำจากตะกั่ว (lead converter) จะทำให้เกิดกลุ่มของอนุภาคแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic

shower) ขึ้นและเกิดมากขึ้นในบริเวณที่มีโครงสร้างเป็นแบบรังผึ้ง



รูปที่ 2.16: หลักการทำงานของ PMD  
(ที่มา [http://www.jammuuniversity.in/physics/hep\\_jammu.htm](http://www.jammuuniversity.in/physics/hep_jammu.htm))

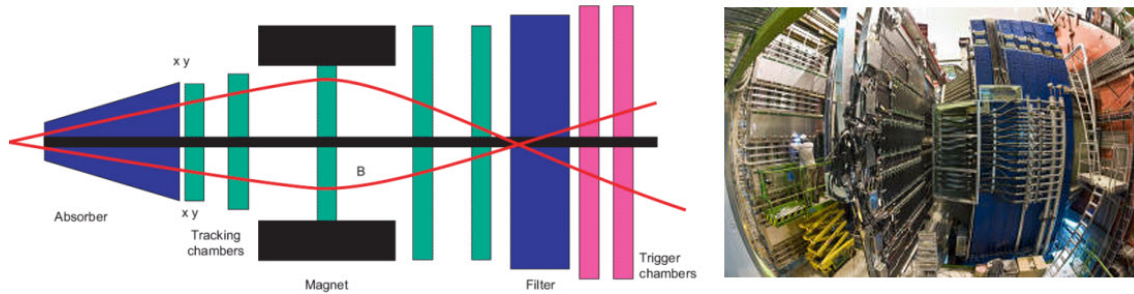
### 2.3.5 Muon Spectrometer

ออกแบบมาเพื่อทำหน้าที่ตรวจวัดมิวออนที่ได้จากการสลายตัวของเมซอนชนิด  $J/\Psi$ ,  $\Psi'$  และ  $\Upsilon$  โดย Muon spectrometer ติดตั้งอยู่ด้านหลังของโซเลนอยด์หลักที่อยู่ตรงกลางทำมุมประมาณ 2-9 องศา กับแนวลำอนุภาคและมีแม่เหล็กขั้วคู่ขนาด 4 เมกะวัตต์ที่สามารถสร้างสนามแม่เหล็กได้สูงสุด 0.7 เทสลา (ภาพที่ 2.17) มีระบบดูดซับ (Absorber) ทำหน้าที่ดูดซับแฮดรอนโดยคัดกรองให้เฉพาะมิวออนเท่านั้นที่ผ่านเข้ามาได้ การตรวจวัดมิวออนกระทำที่บริเวณ Tracking chambers ของขั้วคาโทด ซึ่งแบ่งเป็นทั้งหมด 10 ชั้น แต่ละชั้นของคาโทดจะมีสองระนาบ มีการส่งข้อมูล 2 มิติแบบคู่ขนาน บริเวณนี้ถูกออกแบบให้มีลักษณะบางและไม่มีส่วนประกอบของโลหะ แผ่นคาโทดมีขนาด 25 ตารางมิลลิเมตรถึง 5 ตารางเซนติเมตร ครอบคลุมพื้นที่ขนาด 100 ตารางเมตรและสามารถวัดการเกิดปฏิกิริยาได้ทั้งสิ้นกว่าหนึ่งล้านช่องสัญญาณ แผ่นคาโทดถูกวางห่างจากบริเวณการเกิดปฏิกิริยา 5-14 เมตรและมีความแม่นยำในการวัดระดับ 100 ไมโครเมตร Trigger chambers จำนวน 4 ชั้นได้ถูกติดตั้งไว้ที่บริเวณท้ายของ Muon spectrometer อยู่ด้านหลังผนังเหล็กกล้าหนัก 300 ตัน (Filter) เพื่อตรวจจับหรือคัดแยกคู่มิวออนจากการสลายตัวของอนุภาค  $J/\Psi$ ,  $\Psi'$  และ  $\Upsilon$  บริเวณนี้ทำจากเทคโนโลยีแผ่นตัวต้านทานพัฒนาโดย LHC ซึ่งสามารถรับบันทึกข้อมูลได้มากกว่า 20,000 ช่องสัญญาณบนพื้นที่ 140 ตารางเมตร

ในการคัดเลือกมิวออนบางตัวจากจำนวนอนุภาคทั้งหมดกว่า 1000 ชนิดที่เกิดจากการชน นอกจากตัวดูดซับที่คัดกรองและดักจับอนุภาคอื่นก่อนที่จะมาถึงหัววัดมิวออนแล้ว ตัวดูดซับยังต้องป้องกันให้มี

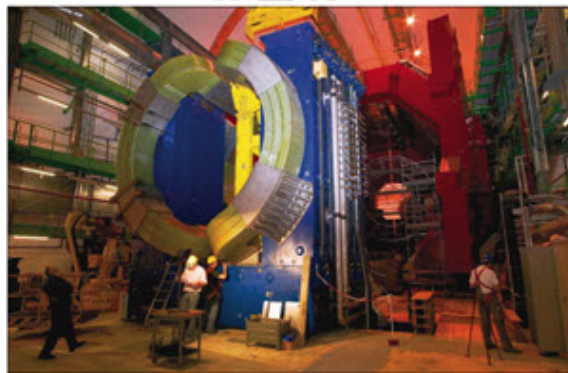


วอนผ่านได้โดยไม่เกิดการกระเจิงและลดปริมาณฟลักซ์ของโฟตอนและนิวตรอนที่ยังหลงเหลือซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของ TPC ลดลง ในภาพที่ 2.18 ที่แสดงถึงความซับซ้อนในการติดตั้งเครื่องวัดขนาด 40 ตัน ยาว 4 เมตรที่ยื่นเข้าไปใน TPC ใกล้ตำแหน่งที่เกิดการชน ระบบนี้ออกแบบโดยใช้ทั้งสแตนเลสภายในของแกนท่อนำแสง ตามด้วยตัวดูดซับทรงกรวยที่ทำจากคาร์บอนความหนาแน่นสูงและท่อหุ้มด้วยตะกั่วเพื่อใช้ดูดซับโฟตอน



รูปที่ 2.17: เครื่องตรวจวัดมิวออน

((ที่มา [http://aliceinfo.cern.ch/Public/Objects/Chapter2/ DetectorComponents/0801015\\_01-A4-at-144-dpi\\_small.jpg](http://aliceinfo.cern.ch/Public/Objects/Chapter2/ DetectorComponents/0801015_01-A4-at-144-dpi_small.jpg))



รูปที่ 2.18: ภาพการติดตั้งแม่เหล็กขนาดใหญ่เข้ากับส่วนดูดซับเฮดรอนในขั้นตอนสุดท้าย

(ที่มา [http://images.iop.org/objects/ccr/cern/47/10/22/CCmag\\_10\\_07.jpg](http://images.iop.org/objects/ccr/cern/47/10/22/CCmag_10_07.jpg))

## 2.4 การปรับปรุงสมรรถนะของหัววัด ALICE

หัววัดต่าง ๆ ของ ALICE ได้เริ่มใช้งานมาตั้งแต่ปี 2008 จึงมีอุปกรณ์และเซนเซอร์บางส่วนได้เสื่อมสภาพลงเนื่องจากได้รับรังสีที่เกิดขึ้นหลังการชนกันของอนุภาคเป็นระยะเวลาานาน ประกอบกับห้องปฏิบัติการไอออนหนักออลิซมีความต้องการที่จะปรับปรุงสมรรถนะของหัววัดให้สูงขึ้น เพื่อให้หัววัดอนุภาคที่เกิดขึ้นหลังการชนได้ครอบคลุมมากขึ้น แผนการปรับปรุงได้เริ่มดำเนินการโดยคาดว่าจะแล้วเสร็จและพร้อมติดตั้งในปี 2018 ซึ่งเป็นปีที่ CERN มีการปิดระบบระยะยาวเพื่อทำการซ่อมแซมและปรับปรุงครั้งที่ 2 โดยระบบที่จะมีการปรับปรุงใหม่ได้แก่

- ระบบติดตามทางเดินอนุภาค (Inner Tracking System)
- ระบบการอ่านข้อมูล (read out electronics)
- ระบบท่อลำเลียงแสง (beam pipe)
- ระบบติดตามจุดยอดสำหรับมิวออน (Muon Forward Tracker)
- ระบบ Time projection chamber
- ระบบ forwards triggers
- ระบบ online และ offline

ซึ่งทีมนักวิจัยชุดนี้จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีได้เข้าไปมีส่วนร่วมในการพัฒนาและปรับปรุงระบบติดตามทางเดินอนุภาค (Inner Tracking System) โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาอนุภาคไฮเปอร์ทริตอนและแลมบ์ดาซี เพื่อหาสัญญาณและเงื่อนไขที่สำคัญของการเกิดควาร์ก-กลูออนพลาสมาที่ ALICE ต่อไป



## บทที่ 3

# ความก้าวหน้าและแผนการดำเนินงาน

ในบทนี้จะอธิบายถึงการดำเนินการของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีในส่วนของที่เกี่ยวข้องกับ ALICE ว่า ได้ดำเนินการอะไรไปแล้วบ้างและใช้เงินสนับสนุนจากแหล่งใดบ้าง

### 3.1 สถานภาพปัจจุบัน

ด้วยสำนึกในพระมหากรุณาธิคุณของสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี ที่ทรงสนับสนุนงานวิจัยโครงการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับองค์การวิจัยนิวเคลียร์ยุโรปหรือเซิร์น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีจึงได้สนองพระราชดำริโดยเข้าไปมีส่วนร่วมในงานวิจัย ณ ห้องปฏิบัติการไอออนหนักกอลิซ, เซิร์น โดยได้เข้าเป็นสมาชิกแบบสมบูรณ์เมื่อวันที่ 12 ตุลาคม 2555 และได้รับพระมหากรุณาธิคุณจาก สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี เสด็จประทับเป็นองค์ประธานพิธีลงนามบันทึกข้อตกลงความร่วมมือระหว่างมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และ A Large Ion Collider Experiment (ALICE), CERN ณ วังสระปทุม เมื่อวันที่ 13 ธันวาคม 2555

การดำเนินการที่ผ่านมาและงบประมาณสนับสนุนในส่วนต่าง ๆ สามารถสรุปโดยสังเขปได้ดังนี้

- 1) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีได้เข้าเป็นสมาชิกแบบเต็มของ ALICE โดยจ่ายค่าแรกเข้า 50,000 ฟรังก์สวิส หรือประมาณ 1,700,000 บาท ใช้งบสำรองทั่วไปของอธิการบดี ปี 2555
- 2) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีได้จัดซื้อเครื่องคอมพิวเตอร์สมรรถนะสูงและหน่วยสำรองข้อมูล เพื่อติดตั้งระบบกริดแบบ TIER 2 เชื่อมโยงไปยัง ALICE, CERN งบประมาณ 6 ล้านบาท ใช้งบสำรองทั่วไปของอธิการบดี ปี 2555
- 3) นักวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีไปปฏิบัติงานวิจัย ที่ ALICE, CERN เป็นระยะเวลา 1 ปี โดยใช้สิทธิ์การไปเพิ่มพูนความรู้ทางวิชาการของนักวิจัยปี 2555-2556 คิดเป็นเงิน 800,000 บาท
- 4) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีจ่ายค่าสมาชิกรายปีของปี 2557 จำนวน 8,723 CHF หรือประมาณ 325,000 บาท



- 5) การดำเนินการตามข้อ 1-4 ใช้งบประมาณของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี รวมเป็นเงินทั้งสิ้น 8,825,000 บาท
- 6) สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ส่งนักวิจัยหลังปริญญาเอก 1 คน ไปปฏิบัติงานที่ ALICE, CERN ระยะเวลา 1 ปี ในช่วงปี 2556-2557 คิดเป็นเงินประมาณ 800,000 บาท โดยใช้งบประมาณของสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)
- 7) ศูนย์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้งบประมาณในการวิเคราะห์สมบัติของ silicon wafer และผลิต dummy chip ให้กับ ALICE, CERN คิดเป็นมูลค่า 1,500,000 บาท
- 8) ALICE สนับสนุนด้านการเงินให้กับนักศึกษาจากประเทศไทยไปทำวิจัยที่ CERN
  - i. ปี 2555 จำนวน 6,192 ฟรังก์สวิส
  - ii. ปี 2556 จำนวน 8,256 ฟรังก์สวิส
  - iii. ปี 2557 จำนวน 8,256 ฟรังก์สวิส
- 9) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีกำลังจัดทำโครงการวิจัยร่วมกับศูนย์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เพื่อเสนอขอรับการสนับสนุนจากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ จำนวนทั้งสิ้น 18 ล้านบาท

## 3.2 เงื่อนไขของการดำเนินโครงการ

การดำเนินโครงการในฐานะของสมาชิก ALICE, CERN ต้องปฏิบัติตามเงื่อนไข ของ 2 MOU ดังนี้

### 3.2.1 MoU ที่ 1

Memorandum of Understanding for Collaboration in the Construction, the Maintenance and Operation of the ALICE Detector, Participation of Suranaree University of Technology เป็น MoU เน้นทางด้านฟิสิกส์ ซึ่งลงนาม ณ วังสระปทุม เมื่อวันที่ 13 ธันวาคม 2555

- 1) ค่าสมาชิกแรกเข้าของ มทส. 1,700,000 บาท หรือ 50,000 ฟรังก์สวิส ได้ดำเนินการไปแล้ว
- 2) ค่าธรรมเนียมสมาชิก ALICE Collaboration รายปีสำหรับดำเนินการ ซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนนักวิจัยทางด้านฟิสิกส์ที่เข้าร่วมในโครงการ โดยประมาณ 300,000-400,000 บาทต่อคนต่อปี ขึ้นกับอัตราแลกเปลี่ยนและค่า operation cost ของ CERN ในแต่ละปี
- 3) ค่าใช้จ่ายในการเข้าร่วมกิจกรรมทางวิชาการของ ALICE

(a) ALICE week เป็นการประชุมโดยจัดขึ้นที่ CERN ปีละ 3 ครั้ง ทุก ๆ 4 เดือน เพื่อแลกเปลี่ยนความรู้ สรุปลงการดำเนินงานและผลการวิเคราะห์ล่าสุด รายงานสถานะของ LHC, ระบบซอฟต์แวร์และโครงสร้างพื้นฐานคอมพิวเตอร์ของ ALICE ซึ่งการประชุมนี้มีระยะเวลา 1 สัปดาห์ และมีรายละเอียดโปรแกรมดังนี้

- วันที่ 1-2 การประชุมของ Physics Working Group ต่าง ๆ
- วันที่ 3 การประชุมคณะกรรมการเกี่ยวกับ upgrade project และผลการดำเนินการของระบบหัววัดต่าง ๆ ของALICE
- วันที่ 4 การประชุมคณะกรรมการด้าน เทคนิค บริหาร การเงิน
- วันที่ 5 การประชุมคณะกรรมการความร่วมมือ

(b) ALICE physics week เป็นการประชุมทางวิชาการด้านฟิสิกส์ ปีละ 1 ครั้ง เพื่อนำเสนอผลที่ได้จากการวิเคราะห์ของ Physics working group ต่าง ๆ ค่าใช้จ่ายในการเข้าร่วมกิจกรรมทางวิชาการของ ALICE หัวข้อนี้ประมาณ 80,000 บาทต่อครั้งต่อคน รวม 320,000 บาทต่อปีต่อคน

4) ค่าจัดประชุมสัมมนาสำหรับในประเทศไทยปีละ 1 ครั้ง งบประมาณ 350,000 บาทต่อปี

5) ค่าใช้จ่ายบริหารจัดการศูนย์ฯ (จ้างเลขานุการฯ) 15,000 บาทต่อเดือน รวม 180,000 บาท ต่อปี

### 3.2.2 MoU ที่ 2

Memorandum of Understanding for Collaboration in the Deployment and Exploitation of the Worldwide LHC Computing Grid เป็น MoU เน้นทางด้านคอมพิวเตอร์ ซึ่งลงนาม ณ วังสระปทุม เมื่อวันที่ 10 ตุลาคม 2556

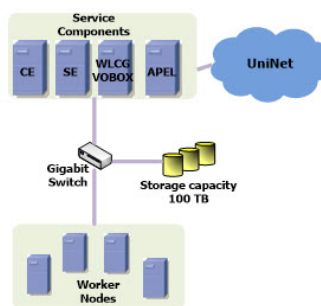
- 1) จัดหาและติดตั้งระบบกริดคอมพิวเตอร์ที่ศูนย์คอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีใช้งบประมาณ 6,000,000 บาท ซึ่งได้ดำเนินการไปแล้ว
- 2) ค่าซ่อมแซม ทดแทน และ upgrade เครื่องคอมพิวเตอร์ ในปี 2559 ประมาณ 2,000,000 บาท
- 3) ค่าใช้จ่ายในการเข้าร่วมประชุมคณะกรรมการจัดสรรทรัพยากรสำหรับประเทศสมาชิก โดยจัดขึ้นที่ CERN ปีละ 2 ครั้ง ทุก ๆ 6 เดือน ครั้งแรกช่วงเดือนมีนาคม และครั้งที่ 2 ช่วงเดือนตุลาคม งบประมาณที่ใช้ 80,000 บาทต่อครั้งต่อคน รวม 160,000 บาทต่อปี
- 4) ค่าจ้างนักวิเคราะห์ระบบเพื่อทำหน้าที่ดูแลระบบกริด 1 คน 20,000 บาทต่อคนต่อเดือน รวม 240,000 บาทต่อปี ได้รับอัตราจากส่วนการเจ้าหน้าที่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีแล้ว

### 3.3 ระบบกริดของ ALICE ที่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ส่วนที่ 1 ข้อมูลพื้นฐาน ระบบกริดของ ALICE ที่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



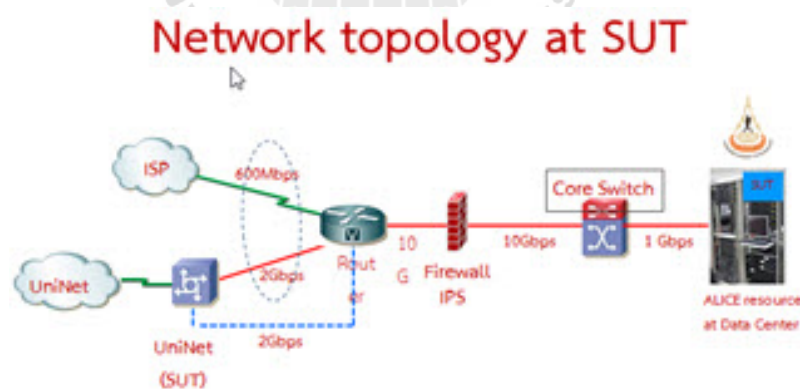
ก)



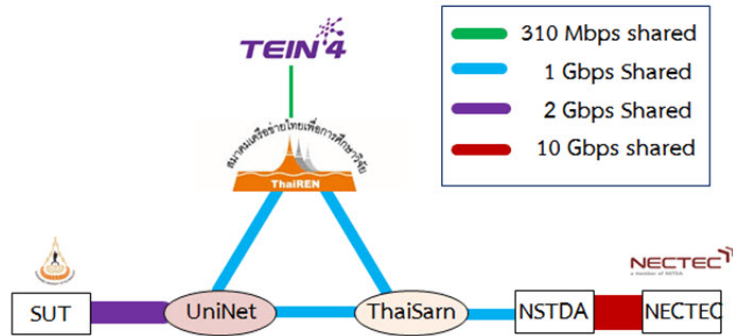
ข)

รูปที่ 3.1: รูประบบกริดที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ก) ตัวเครื่องและระบบสำรองข้อมูล ข) แผนภาพการติดตั้งระบบ

- 1) ใช้เครื่อง IBM รุ่น x3755 M3 ติดตั้งโดยใช้ระบบ virtualization มีจำนวนแกนประมวลผล 128 Cores และหน่วยความจำ 4 GB ต่อ 1 Core
- 2) ใช้ระบบสำรองข้อมูล รุ่น IBM DCS 3700 ขนาด 100 TB
- 3) วางระบบไว้หลัง Firewall Palo-Alto รุ่น PA-5050 เพื่อป้องกันการโจมตีจากภายนอก
- 4) เชื่อมต่อไปยัง CERN ผ่านเครือข่าย UNINET และ ThaiREN (รูปที่ 3.3)



รูปที่ 3.2: รูปแผนภาพการเชื่อมต่อเครือข่ายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

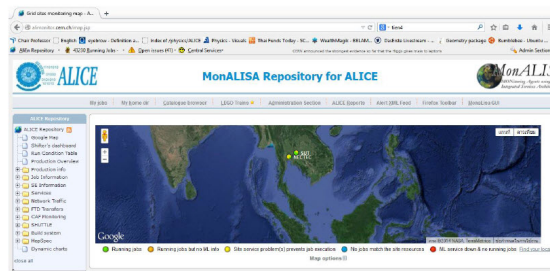


รูปที่ 3.3: รูปแผนภาพการเชื่อมต่อเครือข่ายในประเทศ

## ส่วนที่ 2 การดำเนินงาน ปัญหาและอุปสรรค

การดูแลและตรวจสอบการทำงานของระบบกริดของ ALICE ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สามารถทำได้โดยระบบ MOnalisa ในช่วงแรกของการดำเนินการเชื่อมต่อไปยังระบบของ ALICE พบปัญหาต่าง ๆ

Site monitor <http://alimonitor.cern.ch/map.jsp>



รูปที่ 3.4: ระบบสำหรับดูแลและตรวจสอบการทำงานของระบบกริดของ ALICE

ที่มา: <http://alimonitor.cern.ch/map.jsp>

ดังต่อไปนี้

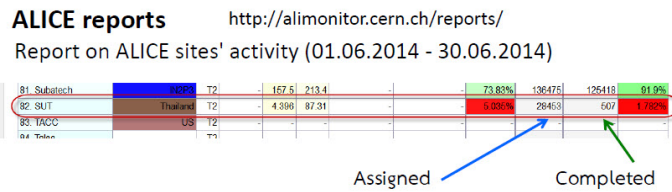
- 1) มี Error\_IB สูงมาก ซึ่งปัญหานี้เป็น error ที่เกิดจากการอ่านและดึงข้อมูลจาก ALICE เพื่อมาใช้ในการคำนวณ (รูปที่ 3.5)



รูปที่ 3.5: ปัญหา Error\_IB

ที่มา: <http://alimonitor.cern.ch/siteinfo/?site=SUT>

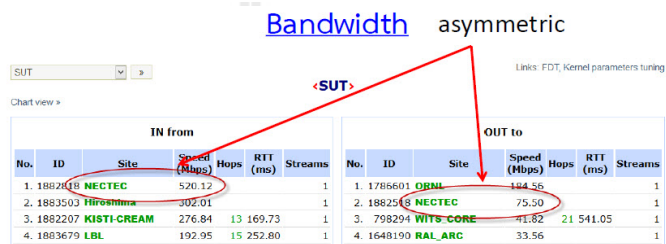
2) อัตราสำเร็จของการทำงาน อยู่ที่ประมาณ 5 (รูปที่ 3.6)



รูปที่ 3.6: ปัญหาอัตราสำเร็จของการทำงานต่ำ

ที่มา: <http://alimonitor.cern.ch/reports/>

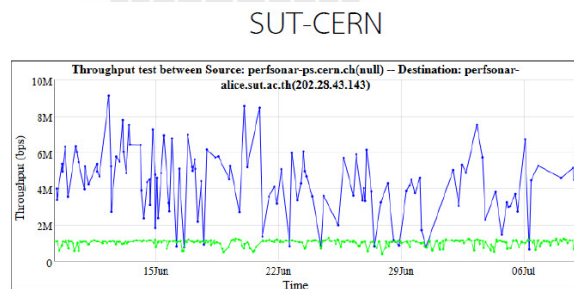
3) เส้นทาง ไป-กลับ ของข้อมูลไม่สมมาตร โดย bandwidth ของข้อมูลไปยัง ALICE และเดินทางกลับจาก ALICE มีความแตกต่างกันมาก (รูปที่ 3.7)



รูปที่ 3.7: ปัญหาเส้นทาง ไป-กลับ ของข้อมูลไม่สมมาตร

ที่มา: <http://alimonitor.cern.ch/speed/index.jsp?site=SUT>

4) Bandwidth ไปต่างประเทศต่ำมากประมาณ 1-5 Mbps และมีการแกว่งขึ้นลงตลอดเวลา (รูปที่ 3.8) นอกจากนี้การโอนย้ายข้อมูลขนาด 40 TB ยังใช้เวลามากกว่า 7 เดือน (รูปที่ 3.9)



Direction	Max throughput(bps)	Mean throughput(bps)	Min throughput(bps)
Src-Dst	9.17M	4.38M	661.44K
Dst-Src	1.3M	1.04M	383.82K

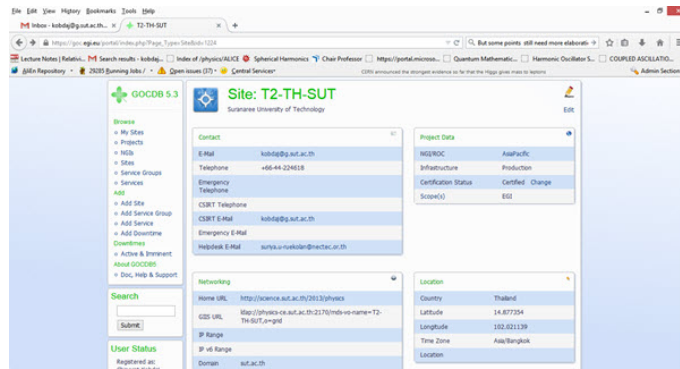
รูปที่ 3.8: ปัญหา Bandwidth ต่ำ และ แกว่งขึ้นลง

ที่มา: <http://alimonitor.cern.ch/speed/index.jsp?site=SUT>

5) ทำการเปลี่ยนชื่อที่ลงทะเบียนในฐานข้อมูล Grid Operations Centre Data Base (GOODB) เป็น T2-TH-SUT (รูปที่ 3.10)

ID	Path	Target SE	Status	Progress	Files	Total size	Started	Ended
5864	/alice/data/2013LHC13F000196535/collection	ALICE::SUT::SE	Done	<div style="width: 100%;"></div>	5909	5.022 TB	01 Oct 2014 14:38	10 Oct 2014 07:44
5849	/alice/data/2013LHC13F000196972/collection	ALICE::SUT::SE	Done	<div style="width: 100%;"></div>	6600	6.163 TB	20 Dec 2013 11:47	13 Aug 2014 14:39
5848	/alice/data/2013LHC13F000195644/collection	ALICE::SUT::SE	Done	<div style="width: 100%;"></div>	7966	7.055 TB	20 Dec 2013 11:47	13 Aug 2014 13:53
5847	/alice/data/2013LHC13F000195593/collection	ALICE::SUT::SE	Done	<div style="width: 100%;"></div>	7967	7.236 TB	20 Dec 2013 11:46	13 Aug 2014 13:38
5846	/alice/data/2013LHC13F000195463/collection	ALICE::SUT::SE	Done	<div style="width: 100%;"></div>	10623	9.676 TB	20 Dec 2013 11:46	13 Aug 2014 06:24
5845	/alice/data/2013LHC13F000195568/collection	ALICE::SUT::SE	Done	<div style="width: 100%;"></div>	10624	9.913 TB	20 Dec 2013 11:46	13 Aug 2014 06:54
<b>6 requests</b>					<b>49789</b>	<b>45.06 TB</b>		

รูปที่ 3.9: ปัญหา Bandwidth ต่ำ และ แกว่งขึ้นลง  
ที่มา: <http://alimonitor.cern.ch/transfers/?target=sut>

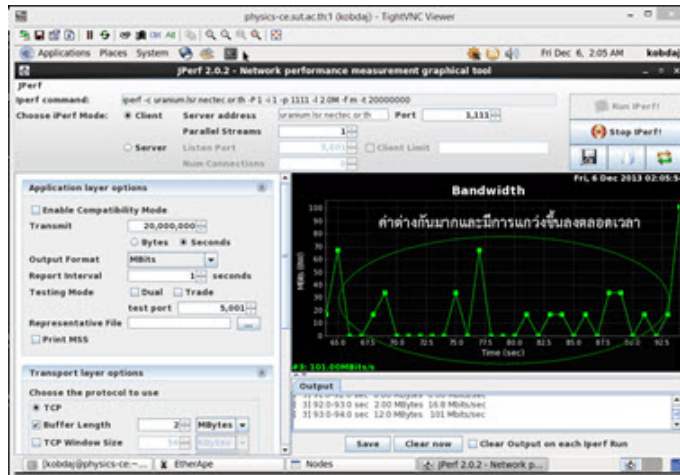


รูปที่ 3.10: ข้อมูลของระบบกริดของ ALICE ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในฐานข้อมูล Grid Operations Centre Data Base (GOCDB)

### ส่วนที่ 3 การแก้ไข

จากปัญหาต่างๆในการดำเนินโครงการ ทีมนักวิจัยได้ดำเนินการแก้ไขปัญหาตามลำดับ โดยได้รับความร่วมมือจากหน่วยงานต่าง ๆ สามารถสรุปได้ดังนี้

- ประสานงานกับทีมงานคุณทวี ศรีบุญยดี จาก UNINET เพื่อขยาย Bandwidth ให้เป็น 2 Gbps ให้กับทางศูนย์คอมพิวเตอร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- ทางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีได้ทำการทดสอบโดยใช้โปรแกรม iperf ทดสอบ bandwidth ไปยัง NECTEC โดยความช่วยเหลือของคุณอนุพงษ์ บรรจงการ และคุณสุริยะ เอกอรุโอรภาพ จาก NECTEC โดยใช้คำสั่ง `iperf -c uranium.lsr.nectec.or.th -w 2m -p 1111 -t 30 -P 1` จากเครื่อง physics-ce.sut.ac.th (202.28.43.131) ผลปรากฏว่า มีการแกว่งขึ้นลงของ bandwidth ตลอดเวลาและมีค่าสูงสุดไม่เกิน 125 Mbps (รูปที่ 3.11)
- ทางศูนย์คอมพิวเตอร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีโดยคุณกฤษ กุลนาวิน และคุณวัฒนา เวชวิริยกุล ได้ทำการตรวจสอบในรายละเอียด ดังนี้
  - ทำการเปลี่ยน switch จาก 3Com มาเป็น Cisco 2960 รุ่นล่าสุดที่มี ปรากฏว่าการรับส่งข้อมูลก็ยิ่งเท่าเดิม และได้ทดสอบโดย iperf ใน switch ตัวเดียวกันปรากฏว่าค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 800-900 Mbps ปัญหาจึงไม่ได้มาจากประเด็นอุปกรณ์ switch



รูปที่ 3.11: รูปภาพแสดงการแกว่งขึ้นลงของ bandwidth จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ไปยัง NECTEC

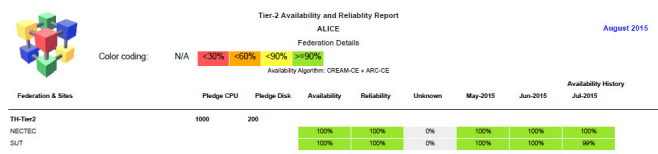
- ทำการเปลี่ยนจากสาย UTP มาเป็น Fiber Optic ผลก็ยิ่งเหมือนเดิม ปัญหาจึงไม่ได้มาจากสายส่งสัญญาณ
- ตรวจสอบว่าอาจเกิดปัญหาคอขวดที่ Firewall ซึ่งได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน คือ
  - 1) ทำการตั้ง Linux Server ภายใน DMZ ของ Firewall ซึ่งจะต้องมีการรับ-ส่งข้อมูลจากเครื่องที่ทดสอบ ผ่าน Firewall ไปยัง Server ปลายทาง ปรากฏว่าค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 800-900 Mbps จึงไม่ใช่ประเด็นอุปกรณ์ Firewall ขาภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
  - 2) ทำการทดสอบโดยนำเครื่อง Linux Server ไปติดตั้งที่ทางออกอุปกรณ์ Router ที่เชื่อมต่อ กับ UNINET โดยตรงไม่มีการผ่าน Firewall ใดๆทั้งสิ้น และทำการทดสอบไปยัง NECTEC ปรากฏว่าไม่มีความแตกต่าง
- เพื่อทำการตรวจสอบอย่างละเอียด ทางศูนย์คอมพิวเตอร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้รับความช่วยเหลือจากคุณอนุพงษ์ บรรจงการ และคุณสุริยะ เอกอรุโอรภาพ จาก NECTEC ติดตั้ง perfsonar server ด้วยชื่อ perfsonar-alice.sut.ac.th ip=202.28.43.143/26
- กำหนดค่า IP ของระบบกริดของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในช่วง 202.28.43.131-254 เพื่อที่จะกำหนดสิทธิ์ให้ใช้งานเครือข่ายได้ทุกอย่าง ทั้งการรับและส่งข้อมูลขนาดใหญ่
- วางระบบไว้หน้า firewall เพื่อมิให้ถูกจำกัด bandwidth โดย firewall
- ปรับปรุงระบบเครื่องสำรองไฟฟ้าและระบบป้องกันไฟกระชาก
- ตรวจพบเครื่อง sut-kvm02 ซึ่งมีปัญหาด้าน hardware จึงได้ตัดออกไปจากระบบ พร้อมทั้งแจ้งทาง IBM เข้ามาดำเนินการแก้ไข



## ส่วนที่ 4 ผลสำเร็จ

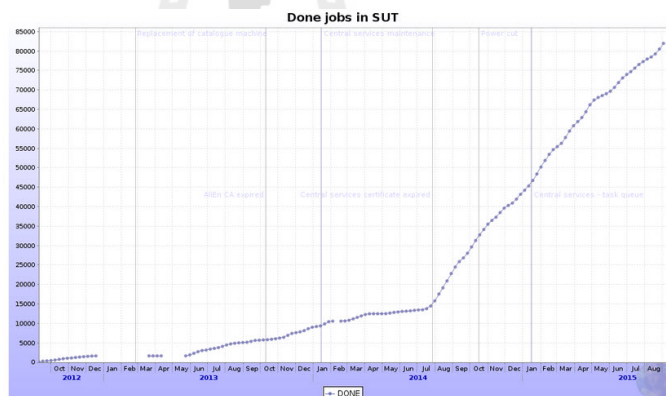
หลังจากการดำเนินการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้น ปรากฏว่าสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) การดำเนินงานเกี่ยวกับ Availability and Reliability ของระบบกริดของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (SUT) พบว่ามีความเสถียรสูงทั้ง Availability และ Reliability คิดเป็น 99-100% ในช่วงเดือน พฤษภาคม-สิงหาคม 2558 (รูปที่ 3.12)



รูปที่ 3.12: เสถียรภาพของระบบระบบกริดของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ที่มา: <http://wlcg-sam.cern.ch/reports>

- 2) จำนวน success job นับตั้งแต่ปี 2012 จนถึงปัจจุบัน มีมากกว่า 80,000 jobs (รูปที่ 3.13) หรือหากคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของงานที่เข้ามา run ในช่วง 7 มีนาคม 2015 - 6 กันยายน 2015 จะมีผลสำเร็จ คิดเป็น 71.63



รูปที่ 3.13: จำนวน success job นับตั้งแต่ปี 2012 จนถึงปัจจุบัน

ALICE reports

Report on ALICE sites' activity (07.03.2015 - 06.09.2015)

Site	Group	Tier	Pledged KS12K	Delivered CPU	Occupancy Wall	Missing KS12K Wall/Pledged	Efficiency Pledged - Wall CPU/Wall	Job statistics Assigned	Completed	Efficiency
89_SUT	Thailand	T2	-	266.7	289.3	-	92.18%	35153	25180	71.63%

รูปที่ 3.14: ประสิทธิภาพของระบบกริดของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ที่มา: [http://alimonitor.cern.ch/stats?page=reports/tab\\_last\\_6months](http://alimonitor.cern.ch/stats?page=reports/tab_last_6months)

- 3) การเชื่อมต่อไปยัง site ต่าง ๆ ในประเทศ เช่น mercury-2.lsr.nectec.or.th ไม่มีปัญหา ในประเทศ download speed มีค่าอยู่ในช่วง 300-500 Mbit/s และ upload speed มีค่าอยู่ในช่วง 200-250



Mbit/s

4) การเชื่อมต่อไปต่างประเทศ โดยสรุปพบว่า

- โซนเอเชียแปซิฟิก download speed มีค่าอยู่ในช่วง 100-400 Mbit/s และ upload speed มีค่าอยู่ในช่วง 20-60 Mbit/s
- โซนยุโรปและอินเดีย download speed มีค่าอยู่ในช่วง 20-100 Mbit/s และ upload speed มีค่าอยู่ในช่วง 5-12 Mbit/s

5) เส้นทาง การเชื่อมต่อไปต่างประเทศพบว่ามี 2 เส้นทางหลักที่ใช้ในการเชื่อมต่อระบบ คือ

- เส้นทางไป ยุโรป ส่วนใหญ่ผ่านเครือข่าย -> the Trans-Eurasia Information Network (TEIN) -> the pan-European research and education network (GÉANT)
- เส้นทางไป ที่อื่น ๆ ผ่านเครือข่าย the Asia Pacific Advanced Network (APAN)

### ส่วนที่ 5 แนวทางการดำเนินงานขั้นต่อไป

เนื่องจากระบบ Hardware ของ SUT มีความเสถียรทั้ง Availability และ Reliability ดังนั้นการดำเนินงานในเฟสต่อไปคือการแก้ปัญหา bandwidth ระหว่างประเทศ โดยประสานงานกับ UNINET, ThaiRen และ TEIN\*CC เพื่อรองรับการเชื่อมต่อเข้ากับ Large Hadron Collider Open Network Environment หรือ LHCONE ต่อไปในปี 2559 รวมถึงเตรียมพร้อมสำหรับการปรับปรุงระบบ Network ให้เป็น IPV6 ต่อไป



## บทที่ 4

# ผลการดำเนินงานและแผนงานในเฟสที่ 2

### 4.1 ผลการดำเนินงาน

ข้อมูลผลงานตีพิมพ์ เป็นงานวิจัยทำร่วมกับบอริช ที่ออกในนาม the ALICE Collaboration ในการชนกันของไอออนหนัก เพื่อค้นหาอนุภาคต่าง ๆ เช่น  $J/\psi$  โฟออน เคออน และแลมบ์ดาเป็นต้น ที่เป็นสัญญาณการเกิดของควาร์ก-กลูออนพลาสมา โดยตั้งแต่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีได้เข้าไปเป็นสมาชิกแบบเต็มเมื่อปี 2555 ที่ผ่านมา และในระหว่างเดือนกรกฎาคม 2555 - มิถุนายน 2556 ที่หัวหน้าโครงการได้ไปปฏิบัติวิจัยที่ CERN เป็นระยะเวลา 1 ปี ได้มีชื่อปรากฏผลงานวิจัย ดังนี้

- 1) ALICE Collaboration, “Centrality dependence of the pseudorapidity density distribution for charged particles in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV”, Physical Letters B 726, 610-622 (2013).
- 2) ALICE Collaboration, “Multiplicity dependence of the average transverse momentum in pp, p-Pb, and Pb-Pb collisions at the LHC”, Physical Letters B 727, 371-380 (2013).
- 3) ALICE Collaboration, “Charmonium and e+e- pair photoproduction at mid-rapidity in ultra-peripheral Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV”, Eur. Phys. J. C 73, 2617 (2013).
- 4) ALICE Collaboration, “ $K_S^0$  and  $\Lambda$  production in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV”, Phys.Rev.Lett. 111, 222301 (2013).
- 5) ALICE Collaboration, “Long-range angular correlations of  $\pi$ , K and p in p-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV”, Phys.Lett. B 726, 164-177(2013).

## 4.2 แผนงานในเฟสที่ 2

ศึกษาการเกิดควาร์ก-กลูออนพลาสมา โดยเน้นไปที่การศึกษาอนุภาคที่มีควาร์กชนิด  $s$  และ  $c$  เป็นองค์ประกอบได้แก่ อนุภาคไฮเพอร์ทริตอน ( ${}^3_{\Lambda}H$ ) และแลมบ์ตาซี ( $\Lambda_c$ ) การศึกษาอนุภาคไฮเพอร์ทริตอนและแลมบ์ตาซี หลังการชนกันของไอออนหนักจะช่วยให้เข้าใจแรงนิวเคลียร์อย่างแรงและสมบัติของควาร์ก  $s$  กับ  $c$  มากขึ้น แต่ที่ผ่านมากการวัดการเกิดอนุภาคไฮเพอร์ทริตอนและแลมบ์ตาซีทำได้ยาก เนื่องจากอนุภาคทั้งสอง 2 ชนิดนี้มีมวลมาก มีอายุสั้น มีโมเมนตัมตามขวางต่ำ มีระยะทางในการสลายตัวสั้น และสูญเสียพลังงานได้ง่ายเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง ทั้งนี้เนื่องจากในช่วง 14 กุมภาพันธ์ 2556 - 2 มิถุนายน 2558 เป็นช่วงที่ LHC ได้ปิดเพื่อทำงานปรับปรุงและซ่อมแซมหรือที่เรียกว่า Long Shutdown 1 (LS1) โดยเมื่อเริ่มเดินเครื่องอีกครั้งในวันที่ 3 มิถุนายน 2558 ระบบสามารถเร่งพลังงานของโปรตอนได้ถึง 6.5 TeV และทำให้เกิดพลังงานการชนของจุดศูนย์กลางมวล  $\sqrt{s_{NN}}$  ประมาณ 13 TeV สำหรับโปรตอนและสำหรับการชนของไอออนหนักจะสามารถเร่งพลังงานของแต่ละนิวคลีออนได้ถึง 2.56 TeV ทำให้มีระดับพลังงานการชนของจุดศูนย์กลางมวล  $\sqrt{s_{NN}}$  มีค่าประมาณ 5.02 TeV ชุดข้อมูลต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นตั้งแต่วันที่ 3 มิถุนายน 2558 จะเรียกว่า run2

และในปี 2561 จะมีการทำ Long Shutdown 2 (LS2) จนถึงปลายปี 2562 เพื่อทำการปรับปรุงระบบติดตามทางเดินอนุภาคของห้องปฏิบัติการ ALICE ใหม่ทั้งหมด ซึ่งหวััด ITS จะสามารถให้ข้อมูลกระบวนการสร้างอนุภาคไฮเพอร์ทริตอนและแลมบ์ตาซีได้ดีกว่าข้อมูลของ run2 เนื่องจากหวััดได้ถูกออกแบบให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นโดยจะสามารถวัดอนุภาคที่มีค่าโมเมนตัมตามขวางต่ำและอายุสั้นได้ดีขึ้น



# เอกสารอ้างอิง

- [1] <http://alicematters.web.cern.ch/?q=ALICEoverview>
- [2] Kurt Gottfried and Victor F. Weisskopf, Concepts of Particle Physics, Oxford University Press, 1986.
- [3] Federico Antinori, 2nd CERN school Thailand, Nakhon Ratchasima, 2012.
- [4] Hans-Christian Schultz-Coulon, <http://www.kip.uni-heidelberg.de/coulon/>.
- [5] Owe Philipsen, [http://www1.uni-frankfurt.de/fb/fb13/itp/15\\_people\\_/55\\_philipsen/](http://www1.uni-frankfurt.de/fb/fb13/itp/15_people_/55_philipsen/).
- [6] Tapan Nayak, <https://www.bnl.gov/rhic/news/040808/story3.asp>.
- [7] <http://www.weizmann.ac.il/weizsites/atlas/>.
- [8] ALICE Collaboration, B. Abelev, et al., J.Phys. G 41, 087002 (2014).
- [9] Yaping Wang, for the STAR collaboration), J.Phys.Conf.Ser. 535, 012022 (2014).
- [10] ALICE Collaboration, B Abelev, et al., J.Phys. G 41, 087001 (2014).