ปรากฏการณ์ชีเรนคอฟที่เกิดในเตาปฏิกรณ์ปรมาณู

CHERENKOV EFFECT IN NUCLEAR REACTOR

นาย รังสรรค์ วิริยะปานนท์

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ปรากฏการณ์ซีเรนคอฟที่เกิดในเตาปฏิกรณ์ปรมาณู

CHERENKOV EFFECT IN NUCLEAR REACTOR

T149459

นาย รังสรรค์ วิริยะปานนท์

ลงหมู่.....
เลขทะเบียน 149459
วัน,เดือน,ปี - 8 มี.ค. 2561
b 12884583
i.....

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CHERENKOV EFFECT IN NUCLEAR REACTOR

Mr. RUNGSON VIRIYAPANON

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE

IN APPLIED PHYSICS

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ ปรากฏการณ์ซีเรนคอฟที่เกิดในเตาปฏิกรณ์ปรมณู

CHERENKOV EFFECT IN NUCLEAR REACTOR

ชื่อนักศึกษา นาย รังสรรค์ วิริยะปานนท์

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา ฟิสิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ. วิชาญ เตชิตธีระ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ประจำปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร. ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี	
รศ. สาหร่าย เล็กชะอุ่ม	
อ. ธนภรณ์ ลีลาวัฒนานนท์	
รศ. วิชาญ เตชิตธีระ	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ ปรากฏการณ์ซีเรนคอฟที่เกิดในเตาปฏิกรณ์ปรมณู

CHERENKOV EFFECT IN NUCLEAR REACTOR

ชื่อนักศึกษา นาย รังสรรค์ วิริยะปานนท์

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา ฟิสิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ. วิชาญ เตชิตชีระ

บทคัดย่อ

ได้ศึกษาปรากฏการณ์ซีเรนคอฟที่เกิดขึ้นในเตาปฏิกรณ์ปรมณู อันเกิดเนื่องจากรังสีแกมมาเคลื่อนที่เข้าใกล้นิวเคลียสของโลหะหนัก แล้วเกิดปรากฏการณ์สร้างคู่ คือเกิดคู่ของอิเล็กตรอนและโพสิตรอน พิจารณาเฉพาะอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้น เมื่อผ่านเข้าไปในน้ำซึ่งทำหน้าที่ระบายความร้อน ก็จะทำให้เกิดไดโพลไฟฟ้าขึ้น และเมื่อเคลื่อนที่ผ่านพ้นไปสภาพไดโพลก็จะหายไป ทำให้เกิดการแผ่รังสีที่เรียกว่า dipole radiation ซึ่งจะเป็นเช่นนี้ไปเรื่อยๆในขณะที่วิ่งผ่านอะตอมอื่นๆไป แต่เนื่องจากรังสีที่แผ่ออกมาเคลื่อนที่ในน้ำได้ช้ากว่าอิเล็กตรอนจึงทำให้เกิดปรากฏการณ์คลื่นกระแทกเช่นเดียวกับที่เกิดในเรื่องเสียง นอกจากนี้ได้เขียนโปรแกรมภาษาซี เพื่อแสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าพลังงานของรังสีแกมมาสูงขึ้นค่ามุมสูงสุด(มุมซีเรนคอฟ)จะมีค่าลู่เข้าหามุม 39.7 องศา

คำสำคัญ : ปรากฏการณ์ซีเรนคอฟ , เตาปฏิกรณ์ปรมณู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำสำคัญ รังสีซีเรนคอฟ เตาปฏิกรณ์ปรมณู

Title CHERENKOV EFFECT IN NUCLEAR REACTOR

Student RUNGSON VIRIYAPANON

Degree Bachelor of Science

Major Program Physics

Academic Year 2556

Advisor Associated Professor Wicharn Techitdheera

ABSTRACT

Cherenkov radiation in nuclear reactor has been studied. A gamma ray move toward heavy metal generates a pair of electron-positron called pair production. Considering only the electron that move through a bulk of water (cooling media), it makes electric dipole when the electron approaches and disappear when the electron passed, its cause of dipole radiation. But in this case, speed of light from radiation is lower than speed of electron from a pair production process, so the shock wave effect occurs like the case of sound wave in air. On the other way, the C programming has been written to show that even the energy of gamma ray increases, the Cherenkov angle converges to the angle 39.7 degree.

Keywords : Cherenkov radiation , nuclear reactor

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.วิชาญ เตชิตธีระ สำหรับความช่วยเหลือในการทำโครงงานพิเศษครั้งนี้ และขอบคุณพ่อแม่ที่เป็นกำลังใจให้เสมอมา

รังสรรค์ วิริยะปานนท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VII
คำย่อและสัญลักษณ์	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	4
2.1 ปรากฏการณ์สร้างคู่	4
2.2 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านรังสีแกมมา	7
2.3 ความเร็วเฟส	9
บทที่ 3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	11
3.1 รังสีซีเรนคอฟ	11
3.2 Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope (IACT)	16
3.3 Reactor Power Level Sensing Device Using Cherenkov Radiation	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการงานวิจัยและอภิปรายผล	20
4.1 โปรแกรม Simulation	20
4.2 รหัสโปรแกรม ปรากฏการณ์ซีเรนคอฟ	20
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านรังสีแกมมา 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 คลื่นกระแทกของแสงรอบๆเตา	1
1.2 ลักษณะของการเกิด Cherenkov Radiation	1
2.1 ปรากฏการณ์สร้างคู่ พลังงานเปลี่ยนเป็นมวล	5
3.1 ลักษณะของการเกิดรังสีเชอร์เร็นคอฟ	12
3.2 ตัวอย่างเตาปฏิกรณ์ (OFF)	14
3.3 ตัวอย่างเตาปฏิกรณ์ (ON)	14
3.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์มวล- -สัมพัทธ์กับระดับพลังงานของโฟตอนที่เข้ามา	15
3.5 กราฟแสดงกราฟแสดงค่า cosθ รังสีซีเรนคอฟกับ ความเร็วเฟสของอิเล็กตรอน	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อและสัญลักษณ์

คำย่อ	ความหมาย
E	ค่าพลังงานโฟตอนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์
$E_{threshold}$	ค่าพลังงานเริ่มต้นที่จะทำให้เกิดกระบวนการสร้างคู่มีค่าเท่ากับ 1.021997855 MeV
r_n	ค่ารัศมีของนิวเคลียสของอะตอมที่ใช้ในปรากฏการณ์สร้างคู่ (ตะกั่ว = 15 fm)
r_a	ค่ารัศมีของอะตอมที่ใช้ในปรากฏการณ์สร้างคู่ (ตะกั่ว = 175 pm)
k	ค่าคงที่คูลอมบ์ มีค่าเท่ากับ 8.9876×10^{9} $N\,m^{2}\,C^{-2}$
$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{V^2}{C^2}}}$	ซึ่งค่าจะเป็นจำนวนจริงมีค่าเป็นบวกแสดงให้เห็นถึงปริมานที่เพิ่มขึ้นเมื่ออนุภาคมีความเร็วเข้าใกล้ความเร็วแสง
C	ความเร็วแสงในสุญญากาศมีค่า 2.99792458×10^{8} m/s
$\frac{m_0}{q}$	ค่ามวลต่อประจุจากการทดลองของทอมสันมีค่า $\frac{1}{1.76 \times 10^{8}}$ $kg\,C^{-1}$
q	ค่าประจุของอิเล็กตรอน = 1.6×10^{-19} C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

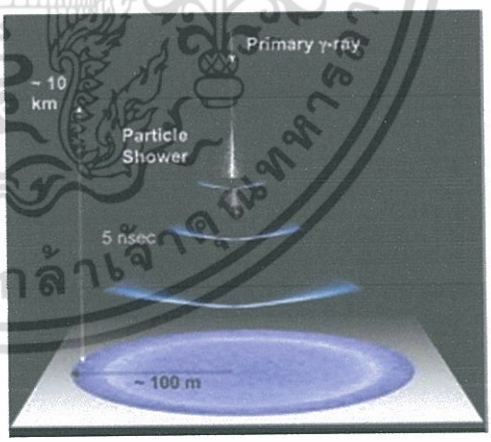
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในการศึกษาการมีอยู่ของอนุภาคพลังงานสูงจนกระทั่งมีความเร็วมากกว่าความเร็วเฟสของแสงในตัวกลางใดๆสามารถศึกษาได้จากแหล่งกำเนิดพลังงานสูงเช่นเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ เนื่องจากบริเวณรอบๆจะมีรังสีความเข้มข้นสูงรั่วไหลออกมาเป็นจำนวนมากทั้งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง รวมถึงกระทั่ง อนุภาคต่างๆที่มีมวลทั้งมีประจุไฟฟ้าและไม่มีประจุไฟฟ้าจะมีพลังงานจลน์สูงจนกระทั่งมีความเร็วมากกว่าความเร็วของแสงในน้ำจนเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่าคลื่นกระแทกของแสงหรือ Cherenkov Radiation ซึ่งจะเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่าน Visible Light ถึงย่าน UV จึงไม่แปลกที่เราจะเห็นบริเวณแกนของเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ทุกๆที่จะมีแสงสีม่วงหรือสีน้ำเงินอยู่รอบๆสระน้ำที่ใช้แช่เตาปฏิกรณ์นั้นเอง

รูปที่ 1.1

แสดงคลื่นกระแทกของแสงรอบๆเตา



รูปที่ 1.2

แสดงลักษณะของการเกิด Cherenkov Radiation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการศึกษาเรื่องอนุภาคพลังงานสูงนี้จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานเป็นเครื่องมือวัดกำลังของเตาปฏิกรณ์และยังเป็นพื้นฐานในการศึกษาเกี่ยวกับความเป็นไปได้ในการนำเอาอนุภาคพลังงานสูงนี้ไปใช้ประโยชน์

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาปรากฏการณ์ การแผ่รังสีซีเรนคอฟ (Cherenkov Radiation)
2. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสำคัญของการแผ่รังสี

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎี ปรากฏการณ์สร้างคู่ และการประลัยคู่
2. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสำคัญของการแผ่รังสี ในรูปของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

ช่วงเวลา	ขั้นตอนการดำเนินงาน
กรกฎาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2556	1. ศึกษาทฤษฎี ปรากฏการณ์สร้างคู่ และการประลัยคู่ 2. ศึกษาพลังงานจากรังสีแกมมาเพื่อใช้เป็นแหล่งกำเนิดพลังงาน
กันยายน – ตุลาคม พ.ศ. 2556	1. ศึกษาเรื่องพลังงานจลน์ของอนุภาคที่เกิดจากการสร้างคู่ 2. ศึกษาเรื่อง Phase Velocity ของแสงเมื่อเดินทางผ่านตัวกลาง ใดๆ
พฤศจิกายน – ธันวาคม พ.ศ.2556	1. สรุปผลเรื่องที่ศึกษามาทั้งหมดเขียนสมการหาความสัมพันธ์ 2. การประยุกต์ใช้และแนวคิดอื่นๆ 3. เขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับอนุภาคพลังงานสูงได้
2. สามารถนำไปประยุกต์ใช้เครื่องมือวัดกำลังไฟฟ้าของเตาปฏิกรณ์ หรืออนุภาคพลังงานสูงได้
3. มีความเป็นไปได้ที่จะสามารถนำไปผลิตกระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

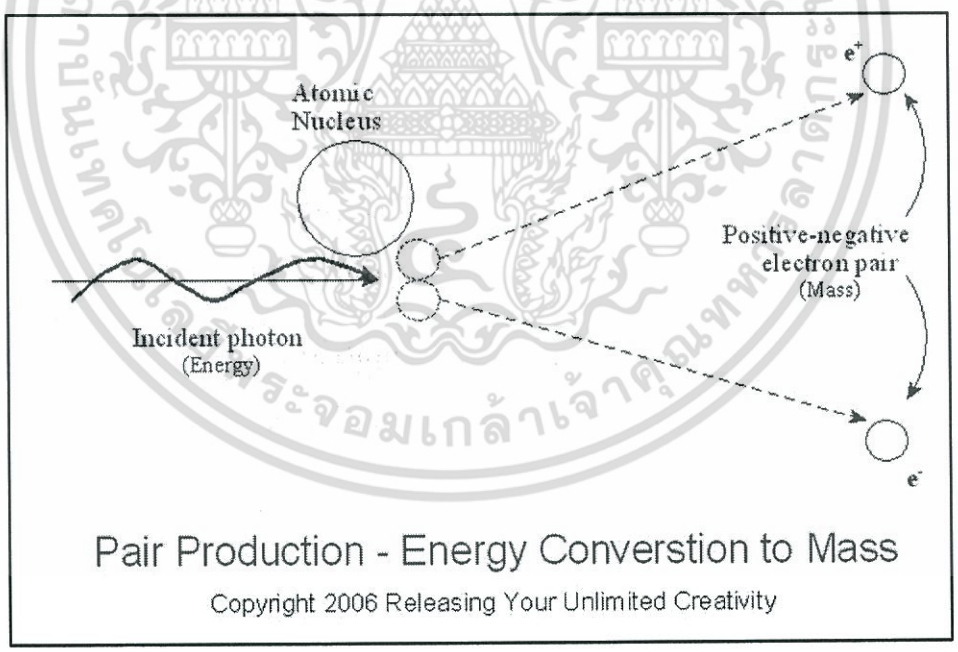
ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ปรากฏการณ์สร้างคู่

เป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่เปลี่ยนพลังงานในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ไปเป็นอนุภาค (Particle) และ ปฏิยานุภาค (Anti – Particle) 1 คู่ นั่นคืออิเล็กตรอนและโพสิตรอน

2.1.1 หลักการพื้นฐานของปรากฏการณ์สร้างคู่

ในปรากฏการณ์นี้คลื่นของพลังงานหรือ โฟตอน (ก้อนของพลังงาน) เคลื่อนที่เข้าใกล้บริเวณอะตอมของธาตุหนักๆ (เช่น ตะกั่ว ยูเรเนียมหรือธาตุที่มีเลขโปรตอนสูงๆ ~ 80-90) จะให้อิเล็กตรอนและโพสิตรอนออกมา 1 คู่ ต่อ 1โฟตอน ตามรูปที่ 2-1



รูปที่ 2.1 ปรากฏการณ์สร้างคู่ (พลังงานเปลี่ยนเป็นมวล)

อิเล็กตรอนและโพสิตรอนที่เกิดขึ้นมาเป็นอนุภาคที่มีมวลทั้งคู่และมีมวลเท่ากันนั่นคือเท่ากับ 9.10938291×10^{-31} กิโลกรัมและมีประจุไฟฟ้าเท่ากันทั้งสองตัวนั่นคือ $1.602176565\times10^{-19}$ คูลอมบ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และมีค่าประจุเป็นลบสำหรับอิเล็กตรอน และ บวก สำหรับโพสิตรอนตามสมการมวลสารสัมพัทธ์ของ Albert Einstein $E = mc^2$ เราได้มวลออกมาสองก้อนคืออิเล็กตรอนและโพสิตรอนต่อพลังงานหนึ่งโฟตอนเขียนสมการได้ว่า

$$E = 2m_e c^2 \qquad \text{----------(2.1)}$$

โดยที่ m_e= มวลของอิเล็กตรอนและโพสิตรอนมีค่าเท่ากันคือ 9.10938291×10^{-31} กิโลกรัม

C = ความเร็วแสงในสุญญากาศมีค่าเท่ากับ 2.99792458×10^8 m/s

ดังนั้นเราจึงสามารถคำนวณหาค่าพลังงานต่ำสุดที่จะทำให้เกิดปรากฏการณ์สร้างคู่

$E_{threshold}$= $1.637421013 \times 10^{-13}$ จูล

$E_{threshold}$= 1.021997855 MeV

นั่นหมายความว่าต้องมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพลังงานอย่างต่ำที่สุด 1.021997855 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ เคลื่อนที่เข้าไปบริเวณสนามไฟฟ้าของนิวเคลียสในอะตอมของธาตุหนักจึงจะเกิดอิเล็กตรอนและโพสิตรอนออกมา 1 คู่ และมีพลังงานจลน์ของอนุภาคแต่ละตัวมีค่าเป็นศูนย์ (ไม่มีความเร็ว) และในขณะเดียวกันพลังงานศักย์ของอนุภาคทั้งสองจะมีค่าสูงที่สุดเขียนได้ดังนี้

$$E_k + E_p = E - E_{threshold} \qquad \text{----------(2.2)}$$

โดยที่คิดพลังงานทั้งหมดในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์และ $E_k + E_p$ คือพลังงานรวมของอิเล็กตรอนและโพสิตรอนในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์และไม่คำนึงถึงการสูญเสียพลังงานในรูปความร้อน

อิเล็กตรอนและโพสิตรอนแต่ละตัวจะมีความเร็วเนื่องจากพลังงานจลน์และพลังงานจลน์ของคู่อนุภาคนี้จะเกิดจากพลังงานภายนอก(โฟตอนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพลังงานสูง)มาให้พลังงานกับคู่อนุภาคนี้ดังนั้นพลังงานทั้งหมดจึงถูกแบ่งไปให้อิเล็กตรอนและโพสิตรอนอย่างละเท่าๆกันแต่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เข้ามา (Incident Photon) มีพลังงานสูงมาก พลังงานจลน์ที่ถูกถ่ายโอนมาให้อนุภาคทั้งสองจึงอยู่ในกรอบของ Relativistic สมการพลังงานและพลังงานจลน์จึงมีค่า

$$\frac{1}{q}(mc^2 - m_0c^2) + \Delta E_p = \frac{E - E_{threshold}}{2} \qquad \text{----------(2.3)}$$

$$\frac{m_0c^2}{q}(\gamma - 1) + \Delta E_p = \frac{E - E_{threshold}}{2} \qquad \text{----------(2.4)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาเพียงแค่อิเล็กตรอนพบว่าพลังงานศักย์จะเป็นพลังงานที่โปรตอนในนิวเคลียสออกแรงกระทำต่อประจุอิเล็กตรอนเป็น Coulomb Force ดึงอิเล็กตรอนเอาไว้ด้วยพลังงานเท่ากับ dE_p ตลอดระยะรัศมีจากนิวเคลียส r_n จนไปถึงรัศมีของออะตอม r_a จากสมการที่ 2-3 เราได้พลังงานศักย์เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงต่อรัศมีและคิดพลังงานในหน่วย eV ได้

$$\frac{dE_p}{dr} = \frac{k(-q)(+q)}{(-q)r^2}$$

$$dE_p = \frac{kq}{r^2} dr$$

$$\int_{r_n}^{r_a} dE_p = kq \int_{r_n}^{r_a} \frac{dr}{r^2}$$

$$\Delta E_p = E_{p\,ra} - E_{p\,rn} = kq\left(-\frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_n}\right) \quad \text{----------(2.5)}$$

แทน 2-5 ลงใน สมการที่ 2-4 เราได้

$$\frac{m_0 c^2}{q}(\gamma - 1) + kq\left(-\frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_n}\right) = \frac{E - E_{threshold}}{2} \quad \text{---------(2.6)}$$

สมการที่ *2-6* เป็นสมการที่ใช้อธิบายพลังงานของอิเล็กตรอนที่ทำให้เกิดกระบวนการสร้างคู่ ได้อย่างแน่นอน(ไม่คิดผลของอิเล็กตรอนในอะตอม ซึ่งถ้าคิดก็จะทำให้พลังงานน้อยลง)โดยที่

E= ค่าพลังงานโฟตอนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์

$E_{threshold}$= ค่าพลังงานเริ่มต้นที่จะทำให้เกิดกระบวนการสร้างคู่มีค่าเท่ากับ 1.021997855 MeV

r_n= ค่ารัศมีของนิวเคลียสของอะตอมที่ใช้ในปรากฏการณ์สร้างคู่ (ตะกั่ว = 15 fm)

r_a= ค่ารัศมีของอะตอมที่ใช้ในปรากฏการณ์สร้างคู่ (ตะกั่ว = 175 pm)

k = ค่าคงที่คูลอมบ์ มีค่าเท่ากับ 8.9876×10^9 $N\,m^2\,C^{-2}$

$\gamma = 1 \Big/ \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ ซึ่งค่าจะเป็นจำนวนจริงมีค่าเป็นบวกแสดงให้เห็นถึงปริมานที่เพิ่มขึ้นเมื่ออนุภาคมีความเร็วเข้าใกล้ความเร็วแสง

C = ความเร็วแสงในสุญญากาศมีค่า 2.99792458×10^8 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\frac{m_0}{q}$ = ค่ามวลต่อประจุจากการทดลองของทอมสันมีค่า $\frac{1}{1.76x10^{8}}$ kg C^{-1}

q = ค่าประจุไฟฟ้าของอิเล็คตรอนมีค่า $1.6x10^{-19}$ Coulomb

สามารถคำนวณเพื่อหาพลังงานศักย์ของอิเล็กตรอนโดยใช้สมการที่ 2.6 พิจรณาเทอมของพลังงานศักย์อย่างเดียวและใช้เงื่อนไขเป็นอะตอมของตะกั่ว

$$\Delta E_p \beta^- = -1.44x10^{-9} x \left(- \frac{1}{175x10^{-12}} + \frac{1}{15x10^{-15}} \right) = -0.096 \text{ MeV}$$

ความหมายของพลังงานศักย์ที่มีค่าเป็นลบนี้สำหรับอิเล็กตรอนหมายความว่าอิเล็กตรอนจะถูกแรงดึงดูดจาก Coulomb Force ดึงดูดเอาไว้ด้วยพลังงานเท่ากับ 0.096 MeV ถ้าต้องการให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากนิวเคลียสไปเลยจำเป็นต้องให้พลังงานอย่างน้อยที่สุดเท่ากับ 0.096 MeV จึงจะได้อิเล็กตรอนอิสระจากอะตอมออกมา

ในทำนองเดียวกันกับโพสิตรอน $\Delta E_p \beta^+ = 0.096$ MeV

พลังงานศักย์มีค่าเท่ากันกับอิเล็กตรอนแต่มีค่าเป็นบวกหมายถึงแรงผลักระหว่างประจุจาก Coulomb Force ทำให้โพสิตรอนถูกผลักออกจากนิวเคลียสด้วยพลังงานเท่ากับ 0.096 MeV และพลังงานนี้จะเปลี่ยนไปเป็นพลังงานจลน์ทำให้โพสิตรอนมีพลังงานจลน์สูงกว่าอิเล็กตรอนอยู่ที่ 0.096 MeV

สามารถคำนวณหาพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน/โพสิตรอนได้จาก 2.6

$$\frac{m_0 c^2}{e}(\gamma - 1) = \frac{E - E_threshold}{2} - kq\left(-\frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_n}\right) \quad \text{----------(2.7)}$$

สมการที่ 2.7 แสดงให้เห็นถึง พลังงานจลน์คือผลต่างของพลังงานรวมของโฟตอนที่เข้ามา (*Incident Photon*) กับพลังงานศักย์ไฟฟ้าของอนุภาคทั้งสองซึ่งสามารถคำนวนหาความเร็วต่อไปได้

โดยคิดปริมาณทั้งหมดของสมการ (ตัว E) จะต้องอยู่ในหน่วย MeV เท่านั้น#

พลังงานศักย์ $kq\left(-\frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_n}\right)$ ทั้งอิเล็กตรอนและโพสิตรอนมีค่าเท่ากัน = 0.096 MeV

สำหรับอะตอมของตะกั่วซึ่งมีรัศมีนิวเคลียส = 15 fm และรัศมีของอะตอม 175 pm เท่านั้น

2.2 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านรังสีแกมมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรากฏการณ์สร้างคู่จะเกิดขึ้นได้จะต้องมีพลังงานโฟตอนอย่างน้อยที่สุด 1.021997855MeV ซึ่งเป็นพลังงานที่สูงและโฟตอนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูงระดับนี้ก็อยู่ในย่านรังสีแกมมาขึ้นไปดังแสดงในตารางที่ 2.1

1021.4 5	0.010	^{249}Es(102.2 m)	379.5(40.4), 813.2(9.2), 375.1(3.3)
1021.5 2	0.033 14	^{105}Cd(55.5 m)	961.84(4.69), 346.870(4.20), 1302.459(3.98)
1021.5 5	0.27 6	^{136}Nd(50.65 m)	108.90(32), 40.2(18.9), 574.8(10.4)
1021.5 3	1.4	^{145}La(24.8 s)	70.0(11), 355.8(3.8), 118.2(3.6)
1021.5 5	1.6 4	^{151}Ho(35.2 s)	527.4(63), 775.53(9.2), 209.5(5.69)
1021.5 5	0.18 3	^{209}Rn(28.5 m)	408.32(50.3), 745.78(22.8), 337.45(14.5)
1021.56 7	0.187 19	^{195}Hg(9.9 h)	779.80(7), 61.46(6.2), 585.13(1.99)
1021.6 5	0.14 6	^{77}Zn(2.08 s)	189.49(28.1), 473.94(19.7), 1832.0(12.4)
1021.6 8	>0.04	^{175}Ta(10.5 h)	207.4(14.0), 348.5(12.0), 266.9(10.8)
1021.62 5	0.0054 3	^{133}La(3.912 h)	278.835(2.50), 302.353(1.648), 290.06(1.413)
1021.67 12	0.87 5	^{207}At(1.80 h)	814.41(44.5), 588.33(19.2), 300.654(12.8)
1021.698	1.96 3	^{43}K(22.3 h)	372.760(87), 617.490(79.2), 396.861(11.85)
1021.7	1.465 14	^{10}C(19.255 s)	718.3(98.53)
1021.7 2	>0.0011	^{49}Cr(42.3 m)	90.639(53.20), 152.928(30.32), 62.289(16.39)
1021.77 17	†7.5 11	^{161}Pt(51 s)	289.29(†100), 111.97(†100), 230.15(†92)
1021.8 1	0.46 5	^{104}Tc(18.3 m)	358.0(89), 530.5(15.6), 535.1(14.7)
1021.8 7	0.137 24	^{107}In(32.4 m)	204.97(47), 505.51(11.9), 320.92(10.2)
1021.8	0.0026 10	^{149}Nd(1.728 h)	211.309(25.9), 114.314(19.2), 270.166(10.7)
1021.8 2	0.14 3	^{234}Pa(6.70 h)	131.30(18), 946.00(13.4), 883.24(9.6)
1021.9 5	0.0059 5	^{77}Ge(11.30 h)	264.44(54), 211.03(30.8), 215.50(28.6)
1021.9 7	0.08 3	^{90}Rb(258 s)	831.69(94), 1375.36(16.7), 3317.00(14.4)
1021.90 20	2.3 5	^{102}Nb(4.3 s)	296.611(79), 1633.10(41), 551.54(30)
1021.9 2	4.2 6	^{118}Cs(14 s)	337.4(100), 472.8(37.4), 586.6(15.4)
1021.93 25	0.19 3	^{204}Bi(11.22 h)	899.15(98), 374.72(82), 984.02(59)
1022.0 10	0.007 3	^{111}Pd(23.4 m)	580.00(0.8), 70.44(0.78), 1459.0(0.56)
1022.0 6	0.039 6	^{139}Xe(39.68 s)	218.59(56), 296.53(21.7), 174.97(11.3)
1022.0 4	0.51 7	^{161}Yb(4.2 m)	78.20(34), 599.88(25.9), 631.45(13.9)
1022 1	0.47 11	^{164}Tb(3.0 m)	168.838(25.4), 754.80(23.3), 215.07(21)
• 1022.06 6	0.078 6	^{153}Tb(2.34 d)	212.038(31.0), 170.504(6.8), 109.758(6.4)
1022.07 6	0.80 7	^{174}Ta(1.05 h)	206.50(58), 91.00(16.0), 1205.92(4.9)
1022.1 3	0.28 10	^{99}Pd(21.4 m)	136.00(73), 263.60(15.2), 673.38(6.9)
1022.1 2	†4.0 10	^{131}Sn(56.0 s)	1226.03(†100), 450.03(†90), 798.50(†86)
1022.1 3	0.9 2	^{150}Er(18.5 s)	475.8(100), 130.0(2.6), 1014.0(0.9)
1022.175 23	0.0556 21	^{166}Tm(7.70 h)	778.817(18.9), 2052.36(17.2), 184.410(16.1)
1022.2 3	0.27 14	^{94}Tc(52.0 m)	871.082(94), 1868.68(5.7), 1522.11(4.5)
1022.2 5	0.076 9	^{115}Ag(20.0 m)	229.08(18), 212.80(4.4), 472.70(4.0)
1022.24 12	0.39 3	^{133}Ce(4.9 h)	477.22(39), 510.36(20.7), 58.39(19.2)
• 1022.370 21	1.41 4	^{172}Lu(6.70 d)	1093.657(62.5), 900.724(29.8), 181.528(20.6)
1022.4 3	0.22 8	^{105}Mo(35.6 s)	85.4(25.0), 76.50(19.3), 147.8(14.8)
1022.4 4	0.11	^{154}Pm(1.73 m)	2057.76(17.1), 1393.9(14.4), 81.99(12.6)
1022.4 3	0.39 5	^{181}Au(11.4 s)	198.60(4.4), 2022.4(4.2), 79.40(4.2)
1022.43 5	0.00069 8	^{129}Te(69.6 m)	27.81(16.3), 459.60(7.70), 487.39(1.42)

ตารางที่ 2.1 แสดงพลังงานที่สูงและโฟตอนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูงระดับนี้ก็อยู่ในย่านรังสีแกมมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ความเร็วเฟส

ความเร็วเฟส (Phase Velocity) คือ ความเร็วของหน้าคลื่นโดยพิจรณาความเร็วของเฟสใด เฟสหนึ่งก็ได้เป็นความเร็วจริงๆของคลื่นซึ่งจะคิดจากการเคลื่อนที่จากจุดๆหนึ่งบนคลื่นที่เคลื่อนที่ไปยังอีกตำแหน่งหนึ่งได้ระยะการกระจัด S ในเวลา $t_2 - t_1 = \Delta t$

ความเร็วเฟสบนคลื่นคำนวณได้จาก $v_p = \frac{S}{\Delta t} = \frac{\lambda}{T}$ ----------(2.8)

ความเร็วเฟสอาจหาได้จากเทอมความถี่เชิงมุม ω และ k คือ เลขคลื่น

$$v_p = \frac{\omega}{k} \qquad \text{----------(2.9)}$$

ในกลศาสตร์ควอนตัม อนุภาคสามารถแสดงเป็นคลื่นได้โดยมีเฟสซ้อนกันจาก de Broglie Hypothesis เราได้

$$v_p = \frac{\omega}{k} = \frac{E/\hbar}{p/\hbar} = \frac{E}{p} \qquad \text{----------(2.10)}$$

ใช้ ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานและโมเมนตัมเราได้

$$v_p = \frac{E}{p} = \frac{\gamma mc^2}{\gamma mv} = \frac{c^2}{v} = \frac{c}{\beta} \qquad \text{----------(2.11)}$$

โดยที่ c คือความเร็วแสงในสูญญากาศมีค่าประมาณ 2.99792458×10^8 m/s

β คือ อัตราส่วนของ $\frac{v}{c}$ เป็นความเร็วของอนุภาคต่อความเร็วแสง

v_p คือ ความเร็วเฟสของอนุภาคคลื่นในตัวกลางใดๆ

ถ้าพิจรณาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างเดียวซึ่งมีความเร็วในสุญญากาศเป็น c เราสามารถหาความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ไปยังตัวกลางใดๆ เป็นจำนวนเท่าของความเร็วแสงในสุญญากาศโดยการพิจรณาตามกฎของ Snail ว่าคลื่นเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางซึ่งมีดัชนีหักเหต่างกัน ความเร็วจะลดลงตามอัตราส่วนของดัชนีหักเหของตัวกลางทั้งสองดังสมการที่ 2.12

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{v_p}{c_2} \qquad \text{----------(2.12)}$$

จัดรูปใหม่ได้

$$v_p = c\frac{n_0}{n_x} \qquad \text{----------(2.13)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ 2.13 เป็นความเร็วเฟสของคลื่นแสงในตัวกลางใดๆเทียบกับอากาศหรือสุญญากาศผ่านตัวกลาง x ใดๆทำให้ความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าลดลงเป็นอัตราส่วนของดัชนีหักเหในสูญญากาศต่อดัชนีหักเหในตัวกลางใดๆ แสดงในเทอมเป็นจำนวนเท่าของ C และมีค่าน้อยกว่า C เสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 รังสีซีเรนคอฟ

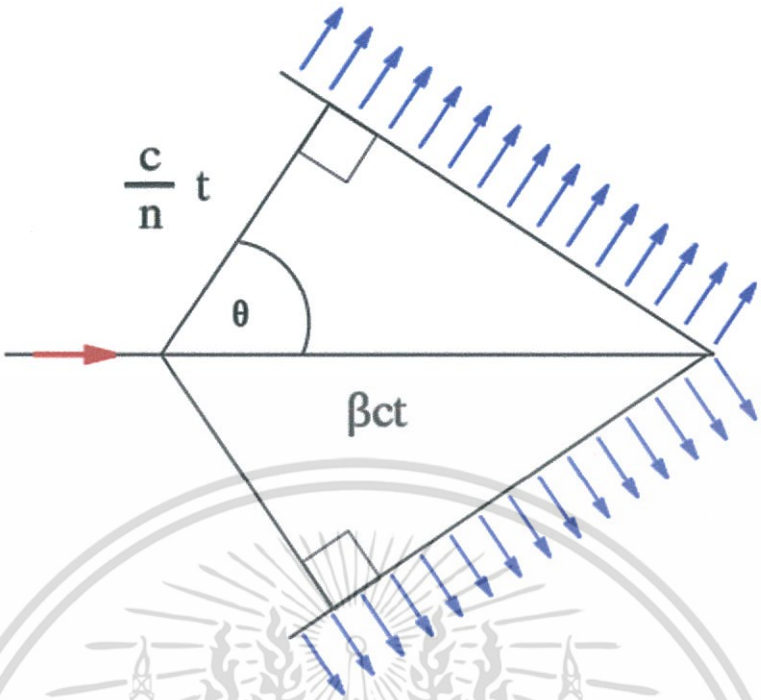
เป็นรังสีที่เกิดขึ้นรอบๆเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์โดยปรกติแล้วเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์จะใช้น้ำหรือน้ำมวลหนักเป็นสารหล่อเย็นและมีวัสดุป้องกันรังสีเป็นโลหะที่มีเลขอะตอมสูงเช่นตะกั่วและแน่นอนขณะที่เตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์เดินเครื่องจะมีรังสีซึ่งเกิดจากการสลายตัวและปฏิกริยานิวเคลียร์จำนวนมากผ่านตะกั่วจึงเกิดปรากฏการ์ณสร้างคู่ซึ่งทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนโพสิตรอนที่มีพลังงานจลน์สูงอย่างที่กล่าวไว้ข้างต้นซึ่งอาจจะมีความเร็วของอนุภาคสูงราวๆความเร็วแสง รังสีซีเรนคอฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่าน UV Visible Light เกิดจากการที่มีอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าความเร็วเฟสของแสงในตัวกลางใดๆในที่นี้คือน้ำซึ่งน้ำเป็นสารไดอิเล็กตริกและมีดัชนีหักเหเป็น 1.33 และอากาศซึ่งมีดัชนีหักเหเป็น 1 จากสมการที่ 2-13 จะได้ว่า

$$v_p = c\frac{n_0}{n_x}$$

ได้ความเร็วเฟสของแสงในน้ำเท่ากับ 0.75C ซึ่งมีความหมายว่า ความเร็วของแสงเมื่อเคลื่อนที่ในน้ำนั้นมีความเร็วลดลงเหลือพียงแค่ 75 % เท่านั้นเมื่อเทียบกับความเร็วแสงในสุญญากาศจะได้

$$\beta = \frac{n_0}{n_x} = \frac{v_p}{c} \qquad \text{----------(3.1)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่3.1 แสดงลักษณะของการเกิดรังสีซีเรนคอฟหรือคลื่นกระแทกของแสงมีหลายชื่อเช่น Superluminal หรือ FTL (Faster Than Light)เกิดขึ้นได้อย่างไร ?

ถ้าพิจารณาอิเล็กตรอนที่ได้มาจากมากระบวนการสร้างคู่จะพบว่าจะยังคงมีพลังงานสูงและเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าแสงในน้ำ อิเล็กตรอนเหล่านี้มีประจุไฟฟ้าซึ่งจะสร้างสนามไฟฟ้าแผ่ออกไปรอบๆในขณะที่มันเคลื่อนที่ในน้ำเราพบว่าสนามไฟฟ้าที่เกิดจากอิเล็กตรอนนี้จะทำให้โมเลกุลของน้ำเกิดการ โพลาไรซ์ (Polarized) หรือทำให้เกิดไดโพลไฟฟ้าเกิดขึ้น เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านไปสภาวะไดโพลดังกล่าวก็จะหายไป และทำให้เกิดการแผ่รังสีไดโพลเกิดขึ้น ซึ่งรังสีดังกล่าวจะเกิดตามรอยการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน แต่เนื่องจากแสงเคลื่อนที่ในน้ำได้ช้ากว่าอิเล็กตรอน จึงทำให้เกิดปรากฏการณ์คลื่นกระแทกของแสง คล้ายๆกับที่เกิดในเรื่องของเสียงนั่นเอง ส่วนแสงที่เปล่งออกมาจากไดโพลไฟฟ้าดังกล่าวจะมีความยาวคลื่นอยู่ในย่านที่แสงสีฟ้า

แสงสีฟ้า (ลูกศรสีฟ้า) คลื่นที่ด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วเฟสของแสงในน้ำคือ 0.75 c จากเงื่อนไขข้างต้นเราได้ $0.75c<v_p<c$ ซึ่งไม่ขัดต่อทฤษฎีสัมพัทธภาพความเร็วของอนุภาค(ลูกศรสีแดง)มีความเร็วมากกว่าความเร็วเฟสของแสงในน้ำ(แต่น้อยกว่าความเร็วแสงในสุญญากาศ) อนุภาคเคลื่อนที่จากซ้ายไปขวาได้ระยะทางเท่ากับ $x_p=v_pt=\beta ct$ และรังสีรังสีซีเรนคอฟ(ลูกศรสีฟ้า)เคลื่อนที่ในแนวทำมุมและได้ระยะทางเท่ากับ

$$x_{em}=v_{em}t=\frac{c}{n}t \quad \text{----------(3.2)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น นำสมการที่ 2-16 หารด้วย 2-15 เราได้

$$\cos\theta = \frac{1}{n\beta} \qquad \text{----------(3.3)}$$

โดยที่ $\cos\theta$ เป็นมุมที่หน้าคลื่นของรังสีซีเรนคอฟแผ่ออกไป และ n คือดัชนีหักเหของแสงในตัวกลางใดๆ β เป็น อัตรส่วนของความเร็วเฟสของคลื่นต่อความเร็วแสง $\frac{v_p}{c}$

สามารถคำนวณหาพลังงานที่รังสีซีเรนคอฟแผ่ออกไป dE ต่อระยะที่เคลื่อนที่ dx ต่อหนึ่งหน่วยความถี่เชิงมุม $d\omega$ (Frank-Tamm Equation)

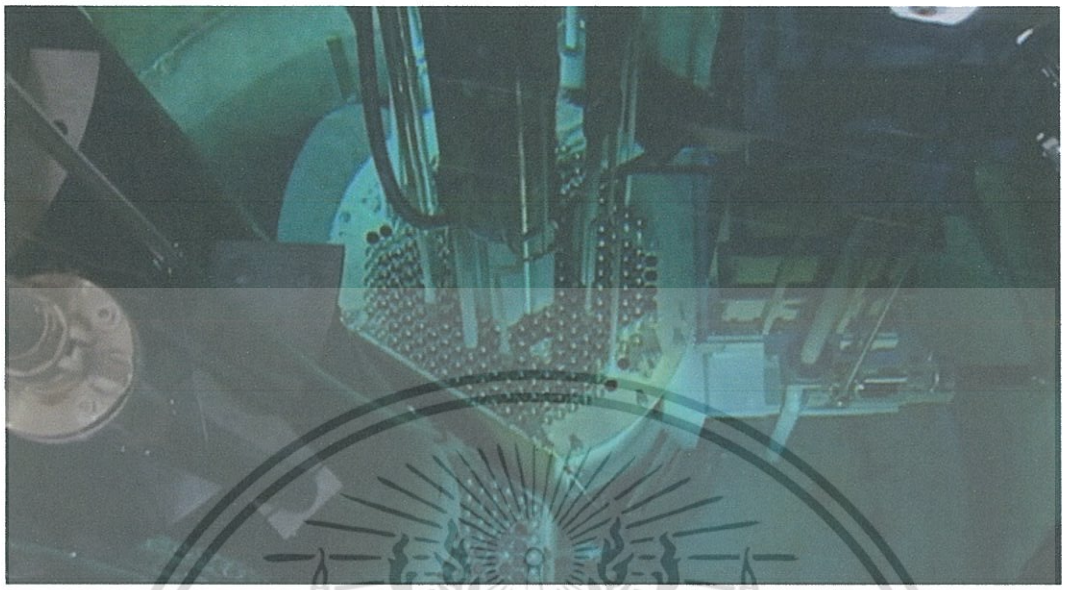
$$\frac{dE}{dx} = \frac{q^2}{4\pi}\int_{v>\frac{c}{n(w)}}^{0} \mu(\omega)\omega\left(1-\frac{c^2}{v^2n^2(\omega)}\right)d\omega \qquad \text{---------(3.4)}$$

q เป็นประจุอิเล็กตรอน v เป็นความเร็วของอนุภาคและ c เป็นความเร็วของแสงในสุญญากาศ รังสีซีเรนคอฟไม่ได้มีลักษณของสเปคตรัมที่แผ่รังสีออกไปที่เป็นคุณลักษณะเฉพาะ(Characteristic Spectrum)โดยความเข้มของสเปคตรัมของรังสีซีเรนคอฟจะเป็นไปตามความถี่เชิงมุมซึ่งก็คือเป็นไปตามค่าดัชนีหักเหและค่า Permeability สรุปได้ว่ารังสีซีเรนคอฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่เปลี่ยนไปตามตัวกลางความถี่ที่สูงกว่าจะให้รังสีซีเรนคอฟที่เข้มมากกว่า

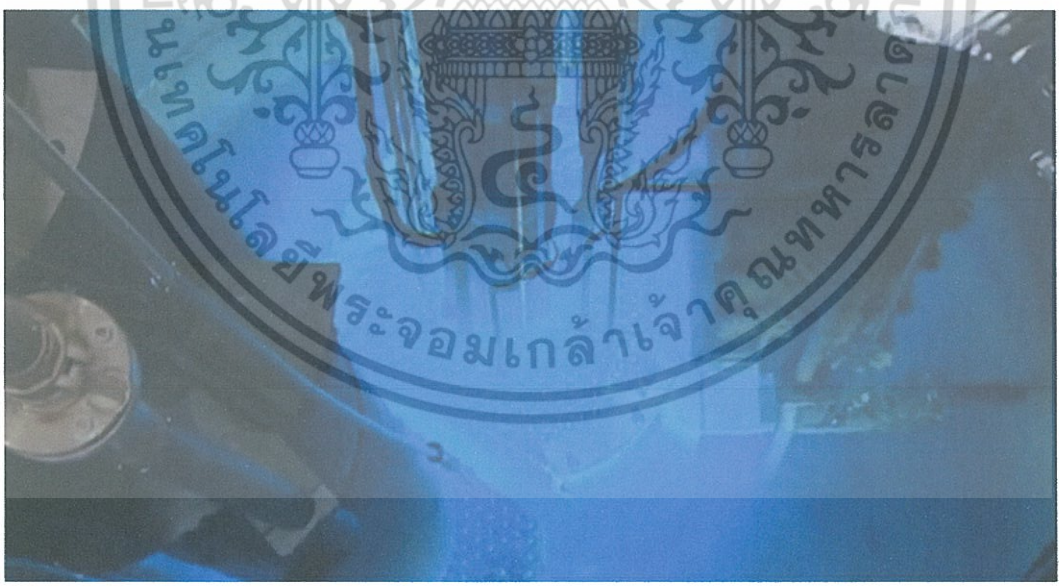
ดังนั้นรังสีซีเรนคอฟจึงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่เปลี่ยนไปเล็กน้อยตามตัวกลาง ยกตัวอย่างได้เช่นในเตาปฏิกรณ์ที่ใช้ตัวกลางที่เป็นน้ำมวลเบา (Light Water) เช่น PWRs (Pressurized water reactors) รังสีจะเป็นสีฟ้า ถ้าในเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ประเภท CANDU Reactor (Canada Deuterium Uranium Reactor)ที่ใช้น้ำมวลหนัก (Heavy Water) หรือ Deuterium Two Oxide เป็นตัวกลางรังสีซีเรนคอฟจะมีสีม่วงเนื่องจากดัชนีหักเหที่มากกว่าทำให้ความถี่ของรังสีซีเรนคอฟเปลี่ยนไปนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพตัวอย่าง



รูปที่ 3.2 แสดงเป็นเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์สำหรับงานวิจัย Annular Core Research Reactor ขณะไม่ได้เดินเครื่อง



รูปที่ 3.3 แสดงเป็นเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์สำหรับงานวิจัย Annular Core Research Reactor ขณะเดินเครื่อง

เกิดรังสีซีเรนคอฟหรือคลื่นกระแทกของแสงเป็นแสงสีฟ้ารอบๆแกนกลางของเตาปฏิกรณ์ ปรากฏการณ์ซีเรนคอฟเป็นประโยชน์อย่างมากในการนำไปประยุกต์สร้างเป็นเครื่องวัดอนุภาคที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงเพราะสามารถตรวจจับได้ง่ายเนื่องจากรังสีซีเรนคอฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านUltraVioletและตอบสนองต่อตาของมนุษย์นำทฤษฎีที่กล่าวไว้มา Simulation ปรากฏการณ์ซีเรนคอฟ

รังสีซีเรนคอฟจะเกิดใต้น้ำและในน้ำต้องมีอนุภาคบีตาพลังงานสูงวิ่งอยู่และต้องมีพลังงานโดยเฉลี่ยไม่ต่ำกว่า 1.022 MeV กระบวนการเกิดอนุภาคบีตาในน้ำเป็นไปตามสมการที่ 2-6

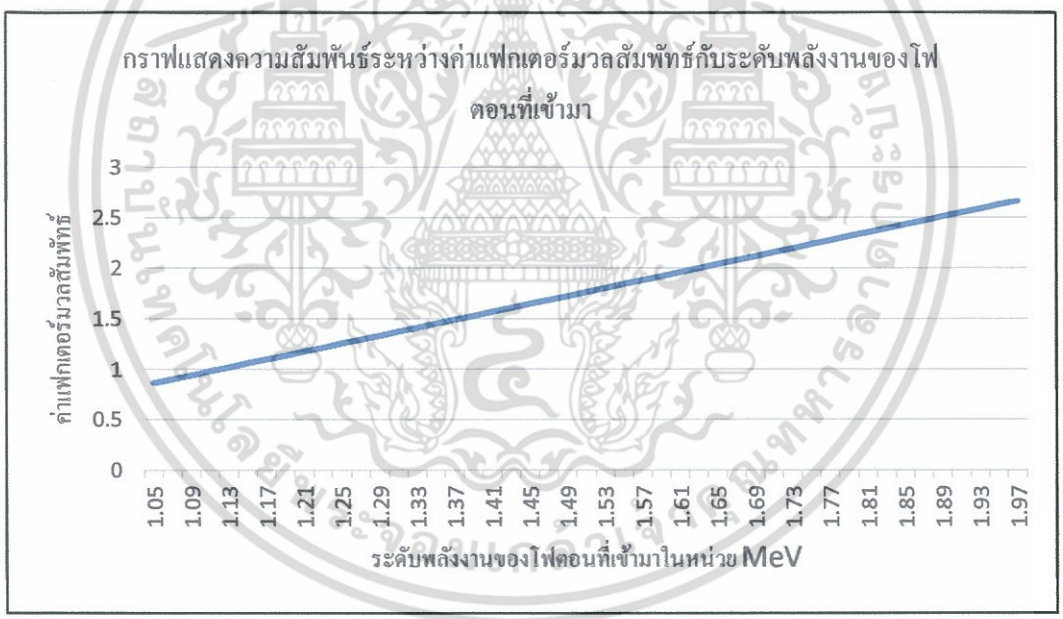
$$\frac{m_0c^2}{q}(\gamma\text{-}1)=\text{E-Ethreshold-kq}(-\frac{1}{r_a}+\frac{1}{r_n})$$

$$0.511(\gamma\text{-}1) = E - 1.022 - 0.096$$

$$0.511\,\gamma - 0.511 = E - 1.118$$

$$0.511\,\gamma = E - 0.607$$

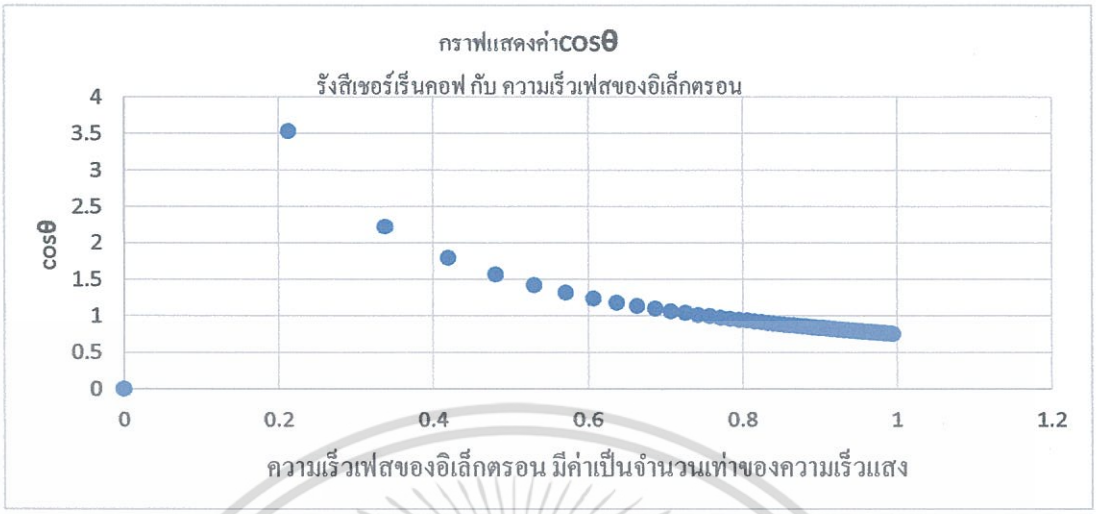
นำไปสร้างสมการเส้นตรงโดยให้ E เป็นตัวแปรต้น γ เป็นตัวแปรตาม



รูปที่ 3.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์มวลสัมพัทธ์กับระดับพลังงานของโฟตอนที่เข้ามา

จากข้อมูลจากกราฟเบื้องต้นเราสรุปได้ว่าระดับพลังงานที่สูงขึ้นของโฟตอน(รังสีแกมมา) จะส่งผลให้ความเร็วของอิเล็กตรอนมีค่าสูงขึ้น แต่ไม่เกิน ความเร็วแสงในสุญญากาศ แต่เนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ได้ช้าลงเมื่อตัวกลางเป็นน้ำ ความเร็วแสงในน้ำคือ 0.75c จากกราฟเราจะเห็นว่าอิเล็กตรอนที่มีความเร็วสูงกว่า 0.76c ที่มีอยู่จะเป็นตัวทำให้เกิดรังสีรังสีซีเรนคอฟหรือคลื่นกระแทกของแสง โดยที่รังสีซีเรนคอฟที่เกิดขึ้นจะมีมุมที่หน้าคลื่นกระทำกับเส้นปรกติคือ

เอกสารนี้ [illegible] ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 กราฟแสดงกราฟแสดงค่า cosθรังสีซีเรนคอฟกับ ความเร็วเฟสของอิเล็กตรอน

ค่า cosθ ที่ถูกต้องจะมีค่าตั้งแต่ 0 จนไปถึง 1 จากกราฟจะได้ว่าค่า cosθ ที่ถูกต้องจะอยู่ในค่าย่านต่ำกว่า 1 ลงมาทั้งหมดและมีค่าลู่เข้า 0.7575 ซึ่งก็คือค่าอัตราส่วนของระยะทางการเคลื่อนที่ของแสงต่อระยะทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน(ในเวลาที่เท่ากัน)

3.2 Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope (IACT)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจจับอนุภาคพลังงานสูงที่มีพลังงานสูงมากๆในระดับ 50 GeV ถึง 50 TeV ซึ่งพลังงานที่สูงขนาดนี้หมายถึงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่าน Cosmic Ray มาจากนอกโลกและมีพลังงานสูงมากเคลื่อนที่มากระทบกับชั้นบรรยากาศของโลก ซึ่งประกอบไปด้วยโมเลกุลต่างๆ เมื่อโฟตอนพลังงานสูงเหล่านี้ เคลื่อนที่เข้าใกล้นิวเคลียสของโมเลกุลในอากาศจะเกิดปรากฏการณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

สร้างคู่ ให้อิเล็กตรอนและโพสิตรอนออกมาหรือรู้จักในชื่อ Extensive Air Shower (EAS) เกิดที่ระยะความสูงราวๆ 10-20km เหนือผิวโลก อนุภาคเหล่านี้จะมีพลังงานจลน์สูงมากๆ แต่ เนื่องจากตัวกลางไม่ใช่แค่บรรยากาศธรรมดา แต่เป็น โมเลกุลของแก๊สต่างๆ ปะปนอยู่ด้วย ทำให้ค่า ดัชนีหักเหของแสงมีค่ามากกว่า 1 ผลคือ ความเร็วของอนุภาคเหล่านี้มีความเร็วสูงกว่าความเร็วเฟสของแก๊สที่เป็นตัวกลางในขณะนั้น จะเกิดแสงวาบ ของรังสีซีเรนคอฟ ประมาน 5 – 20 ns และจะสามารถตรวจจับได้

หลักการทำงานของเครื่อง คือใช้กระจกวางเรียงต่อกันให้มีขนาดใหญ่และใช้เลเซอร์สีแดงปรับโฟกัสให้แสงทั้งหมดมารวมกันที่จุดๆเดียว ซึ่งจุดๆนั้นจะวาง Sensor ประเภท Photomultiplier เอาไว้ เมื่อมีแสงวาบ ของรังสีซีเรนคอฟมาตกกระทบกระจก จะสะท้อนแสงทั้งหมดไปยังตัว Sensor และ ส่งต่อไปยังวงจรขยายที่มีความถี่ ในระดับ GHz (นาโนวินาที) จึงได้ Output ออกมา

3.3 REACTOR POWER LEVEL SENSING DEVICE USING CHERENKOV RADIATION

เป็นการนำรังสีซีเรนคอฟ ที่เกิดขึ้นรอบๆเตาปฏิกรณ์ ไปใช้ในการตรวจวัดระดับกำลังของเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ โดยอาจจะใช้ Sensor ตรวจวัดแบบง่ายๆ อย่างเช่น APD หรือ Photo Detector แบบอื่นๆ ที่มี Sensitivity สูงๆ ตรวจจับความเข้มแสงของรังสีซีเรนคอฟที่ปล่อยออกมาจากเตาปฏิกรณ์ เนื่องจากกำลังของเตาปฏิกรณ์จะแปรผันตรงกันกับความเข้มของแสงสีฟ้าที่เกิดขึ้นและนำไปเทียบค่ามาตรฐานกับวิธีการเดิมที่มีอยู่ก่อนแล้ว เช่น Thermal Balance และ Fuel and Pool Temperature การวัดด้วยวิธีนี้มีข้อดีคือ สะดวก และบำรุงรักษาง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 โปรแกรม Simulation

ใช้โปรแกรมดังกล่าวในการเขียนจำลองลักษณะของปรากฏการณ์ซีเรนคอฟ และ คำนวณหาค่า ค่าความต่างศักย์หยุดยั้งซึ่งเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าที่ต้องป้อนให้กับเนื้อตะกั่ว เพื่อหยุดอิเล็กตรอนที่เกิดจากกระบวน Pair Production ให้มีพลังงานจลน์เท่ากับศูนย์

4.2 รหัสโปรแกรม ปรากฏการณ์ซีเรนคอฟ

```
#include<stdio.h>
#include<conio.h>
#include<math.h>
void main () {
clrscr();
double E, nn, v, air, e, y, nair, Vp, ccc, Ve, RR, AA, TT, zeta, B, EE, ASD, D ;
nair = 1.000293 ;
air = 298925574 ;
printf("###### Calculating The Cherenkov Effect Caused by Electron ######\n\n");
printf("Enter Value of Refractive Index in dieelctric medium \n ");
scanf("%lf",&nn);
Vp=air*(nair/nn);
printf("The Phase Velocity of Light in Dieelctric Medium is  %lf  m/s \n ",Vp);
printf("equal to %lf c \n",ccc=Vp/air);
printf("Enter Value of Incident Photon in MeV  \n");
printf("### This Value Must Be Greater Than 1.021997855 Million Electron Volts ###\n");
printf("### For Threshold Energy in Pair Production Process ###\n");
```

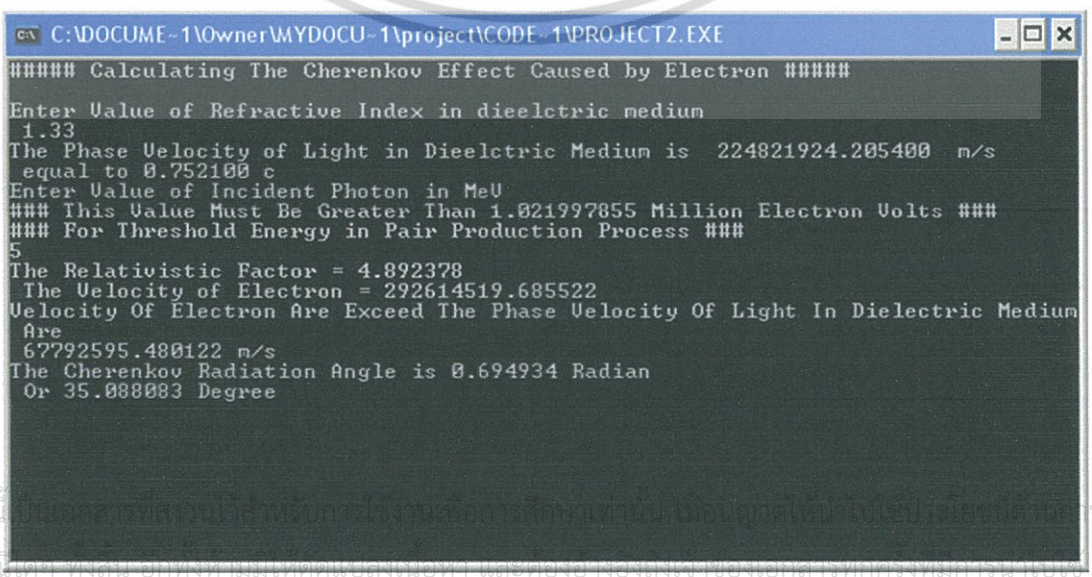
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
scanf("%lf",&E);
y = E/1.021997855;
printf("The Relativistic Factor = %lf \n ",y);
RR = 1/pow(y,2);
AA = 1-RR;
printf("The Velocity of Electron = %lf \n",Ve = air*sqrt(AA));
TT = Ve - (air*ccc);
printf("Velocity Of Electron Are Exceed The Phase Velocity Of Light In Dielectric Medium Are \n %lf m/s
\n",TT);
B = Ve/air;
EE = nn*B;
ASD = 1/EE;
printf("The Cherenkov Radiation Angle is %lf Radian \n ",zeta = acos(ASD));
D = (180*zeta)-90;
printf("Or %lf Degree \n ",D);
getch();
}
```

4.2.1 คอมไพล์ รหัสโปรแกรม ปรากฏการณ์ซีเรนคอฟ

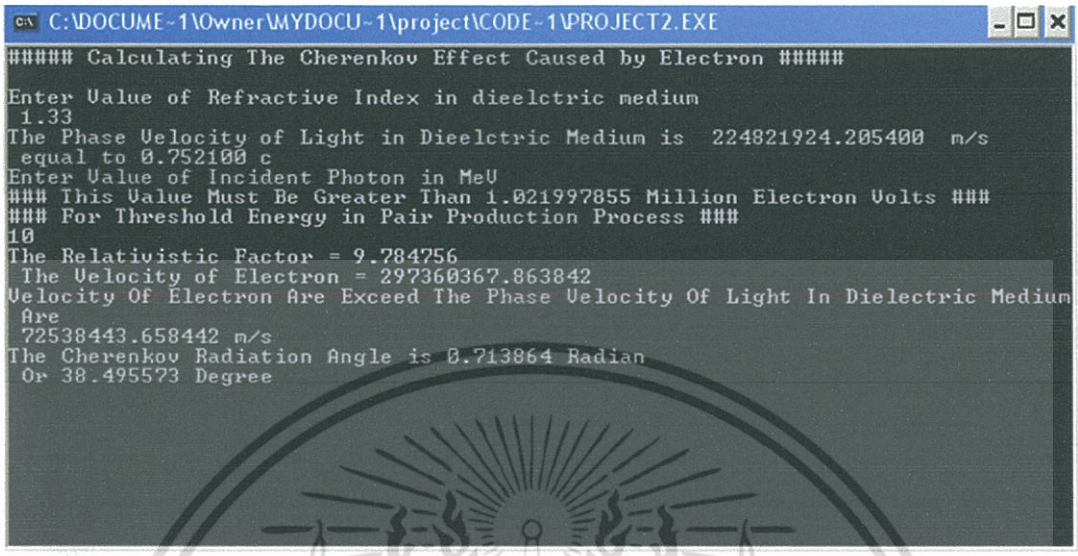
เกิดในน้ำ ดัชนีหักเหมีค่าเท่ากับ 1.33 และพลังงานของ Incident Photon เท่ากับ 5

Me

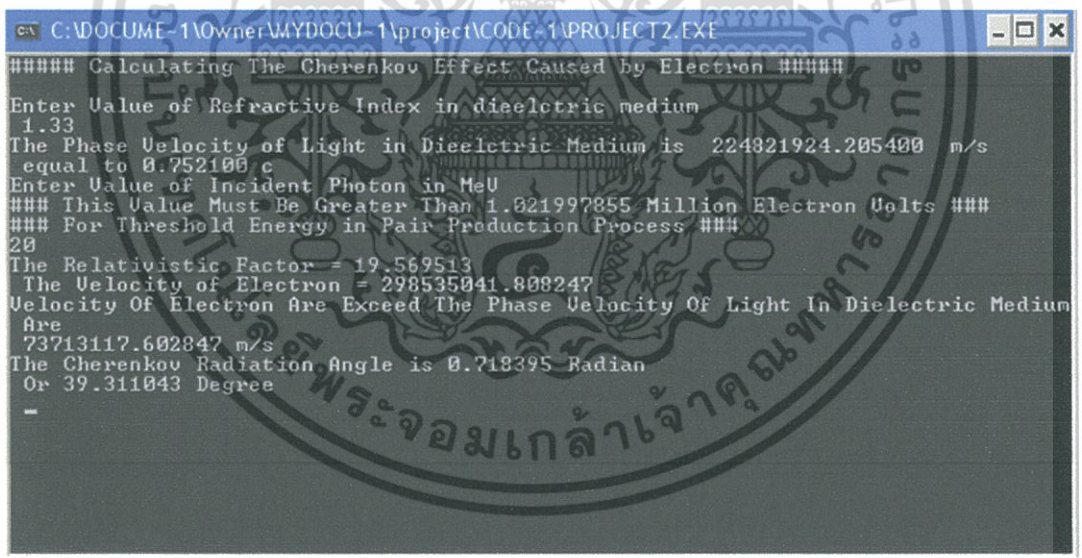


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดในน้ำ ดัชนีหักเหมีค่าเท่ากับ 1.33 และพลังงานของ Incident Photon เท่ากับ 10 MeV

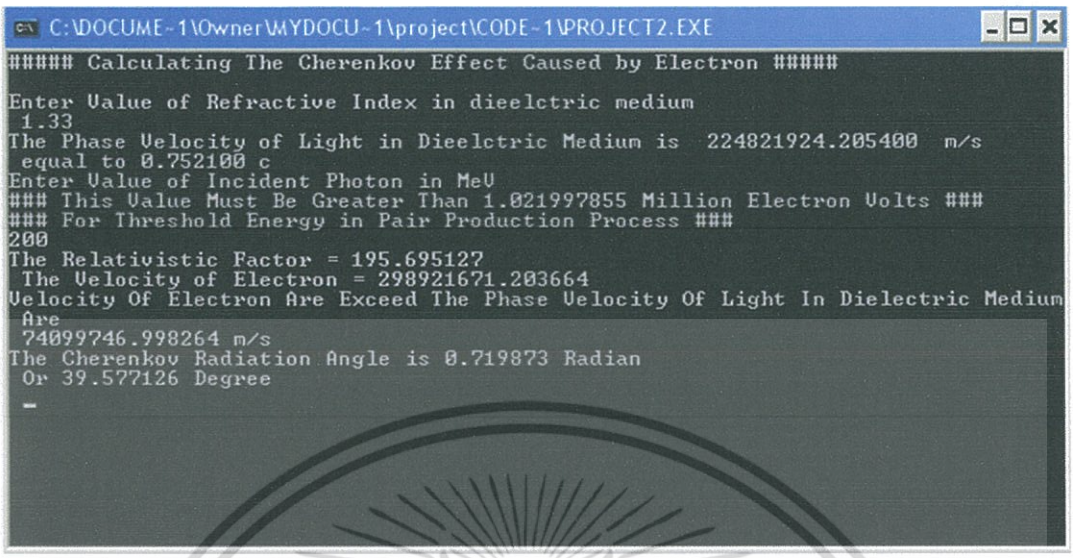


เกิดในน้ำ ดัชนีหักเหมีค่าเท่ากับ 1.33 และพลังงานของ Incident Photon เท่ากับ 20 MeV



เกิดในน้ำ ดัชนีหักเหมีค่าเท่ากับ 1.33 และพลังงานของ Incident Photon เท่ากับ 200 MeV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



สรุปได้ว่า ค่ามุมซีเรนคอฟมีค่าสูงที่สุดที่ ประมาน 39.57 องศา เมื่อระดับพลังงานของ Incident Photon มีแนวโน้มสูงขึ้น

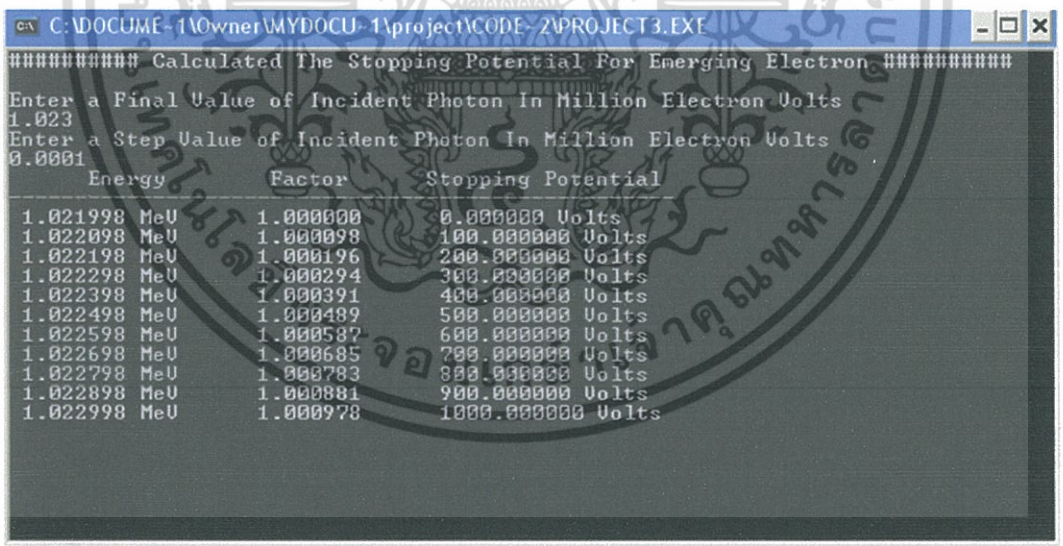
4.2.2 รหัสโปรแกรม ค่าความต่างศักย์หยุดยั้ง

```
#include<stdio.h>
#include<conio.h>
#include<math.h>
#include<float.h>
void main () {
clrscr();
double E, y, V, T,Tf,Tstep,T0 ;
int i,n;
printf("########## Calculated The Stopping Potential For Emerging Electron
##########\n\n");
printf("Enter a Final Value of Incident Photon In Million Electron Volts\n");
scanf("%lf",&Tf);
printf("Enter a Step Value of Incident Photon In Million Electron Volts\n");
scanf("%lf",&Tstep);
printf("    Energy      Factor     Stopping Potential \n");
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
printf("-------------------------------------------------\n");

T0 = 1.021997855;

n = (Tf - T0)/Tstep + 1;

for(i = 0; i<n; i++) {

T=(T0+(i*Tstep));

if(T<2)

y = T/T0;

else

y = T/T0;

V = T0*(y-1)*1000000;

printf(" %lf MeV      %lf      %lf Volts \n",T,y,V);

}

getch();

}
```

4.2.2 คอมไพล์ รหัสโปรแกรม ค่าความต่างศักย์หยุดยั้ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 ปรากฏการณ์ซีเรนคอฟ

เมื่อค่าดัชนีหักเหในตัวกลางมีค่าเท่ากับ ดัชนีหักเหเท่ากัน ที่ระดับพลังงานของ โฟตอนที่มาตกกระทบตะกั่ว มีค่าน้อยมากๆใกล้เคียงระดับพลังงานเริ่มต้น 1.022 ล้านอิเล็กตรอนโวลท์ จะไม่เกิด ซีเรนคอฟเนื่องจากพลังงานจลน์ไม่เพียงพอที่จะเร่งให้อิเล็กตรอนมีความเร็วสูงกว่าความเร็วเฟสของสงในน้ำ ประมาน0.75 c แต่เมื่อระดับพลังงานของโฟตอนสูงขึ้น จะมีอิเล็กตรอนจำนวนมากที่มีพลังงานจลน์สูงพอและลอดทะลุกำแพงแสงไปจนเกิดเป็รังสีสีฟ้าขึ้นรอบๆ เป็นกรวยแสง เรียกว่าซีเรนคอฟ

5.2 ค่าความต่างศักย์หยุดยั้ง

เมื่อระดับพลังงานของโฟตอนที่เข้ามาตกกระทบแผ่นตะกั่วมีค่าเพิ่มขึ้น เล็กน้อย จากระดับพลังงานเริ่มต้น(1.022 ล้านอิเล็กตรอนโวลท์) จะทำให้ต้องใช้พลังงานศักย์ไฟฟ้าในการหยุดยั้งอิเล็กตรอนที่มีพลังงานจลน์ค่อนข้างสูง จึงจะทำให้อิเล็กตรอนจำนวนนี้คลื่อนที่ช้าลงจนหยุดนิ่ง เรียกว่า ค่าความต่างศักย์หยุดยั้ง มีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ และ แนวโน้มค่อนข้างจะสูงขึ้นเรื่อยๆเป็นล้านโวลท์เมื่อระดับพลังงานของโฟตอนที่ตกกระทบแผ่นตะกั่ว มีค่าสูงจนสามารถทำให้เกิดปรากฏการณ์ซีเรนคอฟได้

5.3 จำนวนของอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้น

ขึ้นกับความเข้มของรังสีแกมมา ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง

5.4 ระดับพลังงานของโฟตอน

ไม่มีผลต่อจำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้น แต่จะส่งผลให้เกิดซีเรนคอฟ เมื่อมีระดับสูงและต้องใช้ค่าความต่างศักย์หยุดยั้ง ที่สูงขึ้นตามระดับพลังงานของรังสี จึงจะสามารถหยุดอิเล็กตรอนเอาไว้ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5 ดัชนีหักเหในตัวกลาง ความเร็วเฟสของแสง และ มุมของซีเรนคอฟ

ดัชนีหักเหในตัวกลางจะเป็นตัวกำหนด ความเร็วแสงในตัวกลางนั้นๆ มีค่าคงที่ ถ้าในน้ำคือ 0.75c และจะเป็นตัวกำหนดค่ามุมสูงสุดของซีเรนคอฟ โดยที่ค่ามุมจะเริ่มที่มุม 0 องศา คือไม่เกิดซีเรนคอฟ และมีค่ามุมกางขึ้นสูงขึ้นเรื่อยๆ จนไปถึงค่ามุมสูงสุด ในน้ำคือ ประมาน 39.7 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

https://en.wikipedia.org/wiki/Cherenkov_radiation

https://en.wikipedia.org/wiki/Frank%Tamm_formula

http://ie.lbl.gov/decay.html

http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Cherenkov+Radiation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง