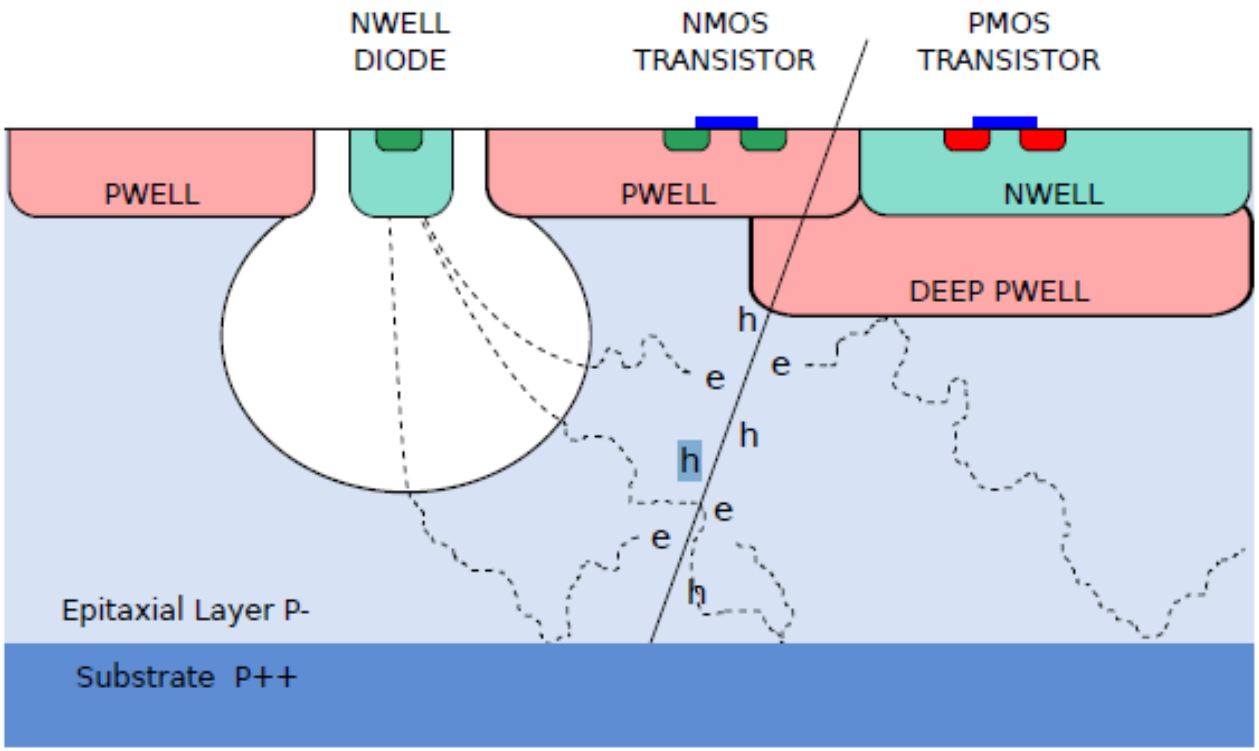
การสร้างแบบจำลองเครื่องตรวจวัดอนุภาคแบบ silicon sensor

Chinorat Kobdaj

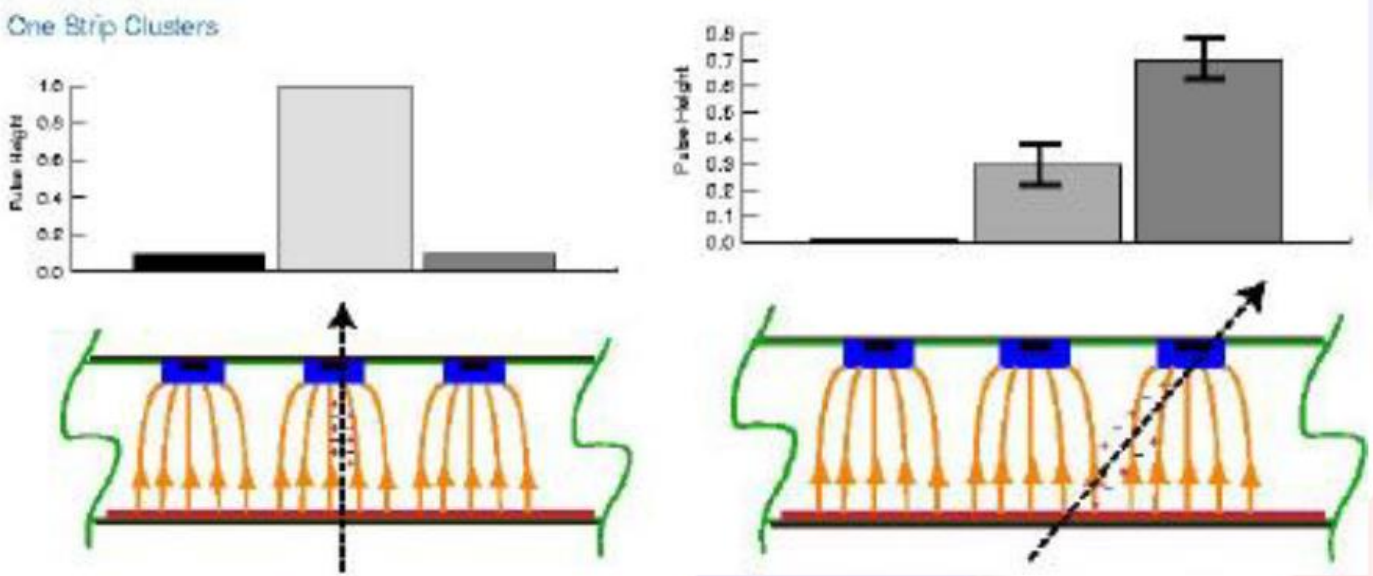
วันที่ 20 เมษายน 2567

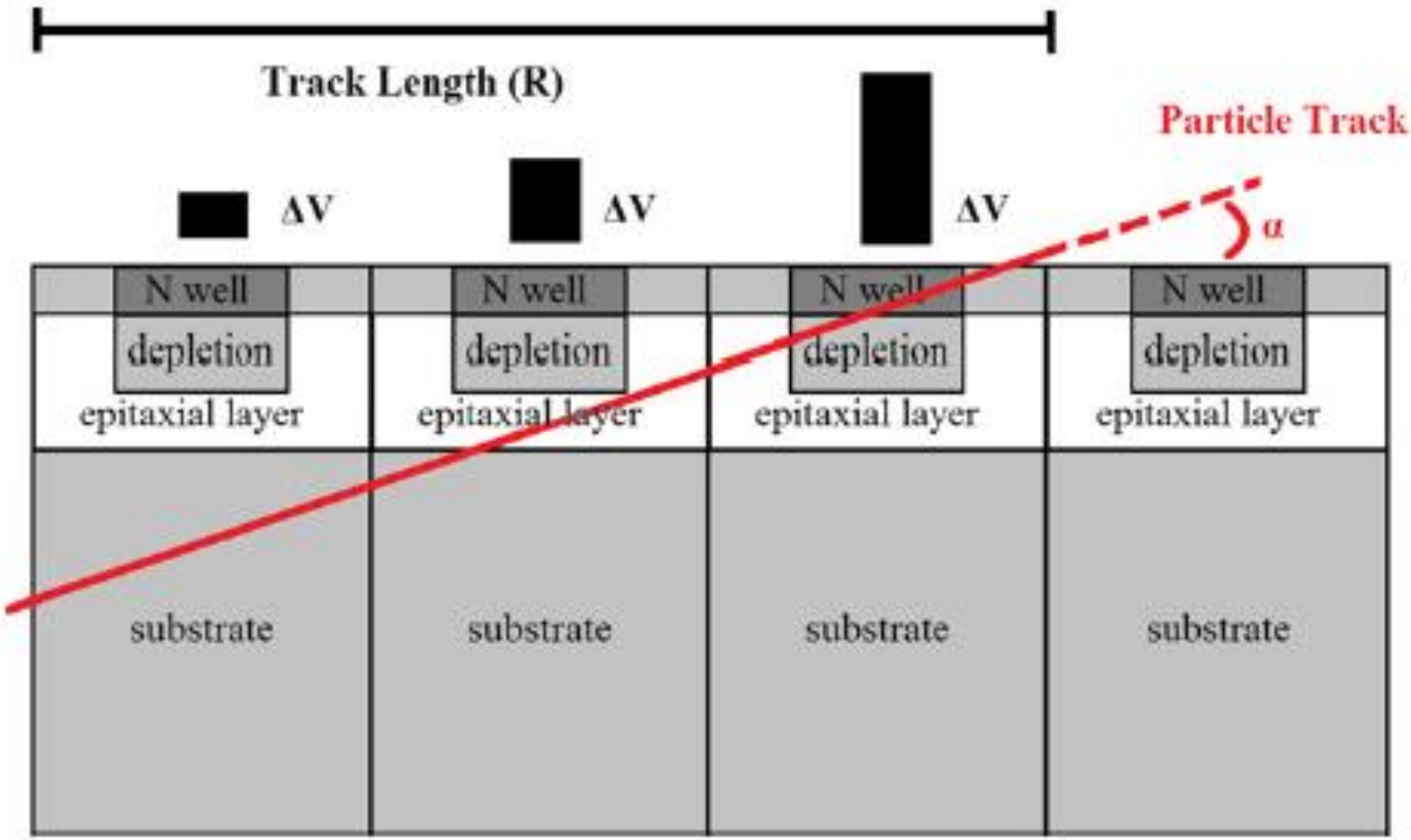
ลักษณะของผิวน้ำบอกถึงทิศทางการกระโดด

Tracking detector (Silicon detector)s

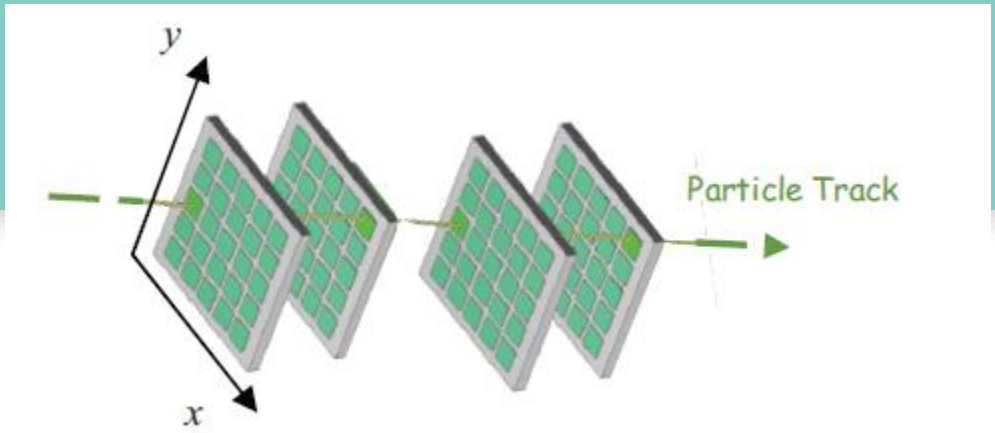


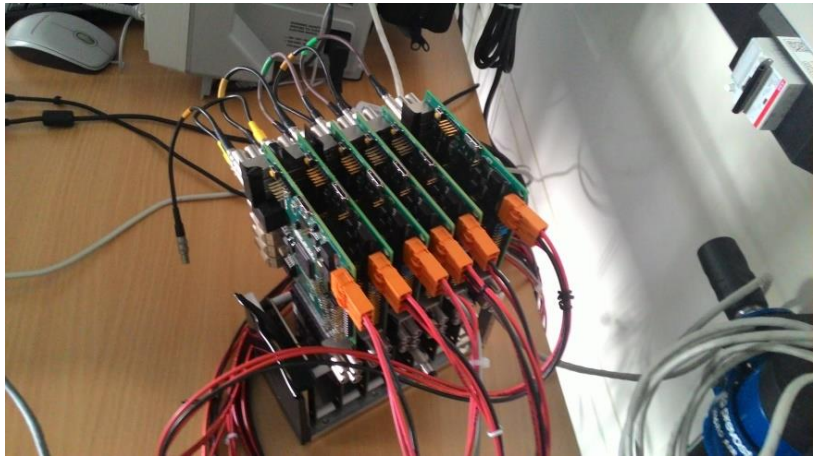
ALICE TDR


One Strip Clusters
Pulse Height
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
Pulse Height
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0.0



S. Meroli et al. / Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 650 (2011) 230–234





D. Biagetti, S. Meroli, A. Marras, D. Passeri, P. Placidi, L. Servoli, 2009 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record

ความคาดหวัง

จากการที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้เข้าร่วมวิจัยกับห้องปฏิบัติการอลิซ (ALICE) ณ องค์การวิจัยนิวเคลียร์ยุโรป (European Organization for Nuclear Research; CERN) จึงได้มีโอกาสเรียนรู้การออกแบบเซนเซอร์สำหรับตรวจจับอนุภาคฟิสิกส์พลังงานสูง และเล็งเห็นโอกาสในการพัฒนาและต่อยอดในด้านการออกแบบเซนเซอร์ประสิทธิภาพสูง ซึ่งต้องอาศัยองค์ความรู้ทางด้านฟิสิกส์อนุภาคและฟิสิกส์วัสดุ รวมถึงเครื่องมือที่ช่วยในการออกแบบที่เรียกว่าเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบ (TCAD) เพื่อที่จะ

- **ออกแบบเซนเซอร์สำหรับการรับภาพ เพื่อใช้ในทางการแพทย์**
- **ออกแบบเซนเซอร์ประสิทธิภาพสูงสำหรับตรวจจับอนุภาค**
- **ถ่ายทอดความรู้ให้กับ คณาจารย์ นักวิจัย นิสิต นักศึกษา และผู้สนใจทั่วไป เพื่อผลิตและพัฒนากำลังคนระดับสูงทางด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์ให้กับประเทศ**

การออกแบบเซนเซอร์ด้วยโปรแกรม Sentaurus TCAD

การทำงานของซอฟต์แวร์ TCAD ประกอบด้วยส่วนสำคัญดังนี้

Sentaurus Editor → Sentaurus Device → Sentaurus Visual

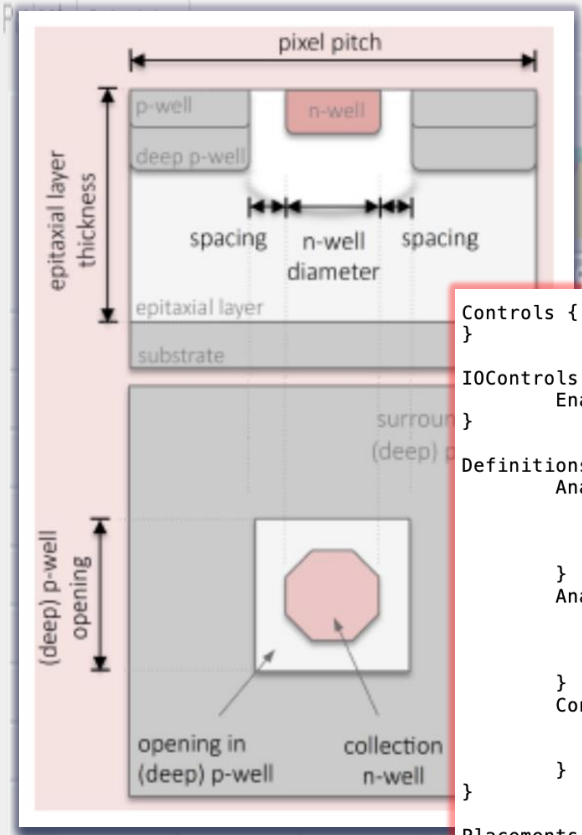
1. **การออกแบบโครงสร้างเซนเซอร์ด้วย Sentaurus editor** โดยการกำหนดโครงสร้างของตัวแปร เพื่อทำการปรับขนาดของแบบจำลองเซนเซอร์แต่ละชิ้น เช่น ขนาดของ N-well ระยะระหว่าง P-well และ N-well และการปรับความหนาของชั้น epitaxial layer เป็นต้น

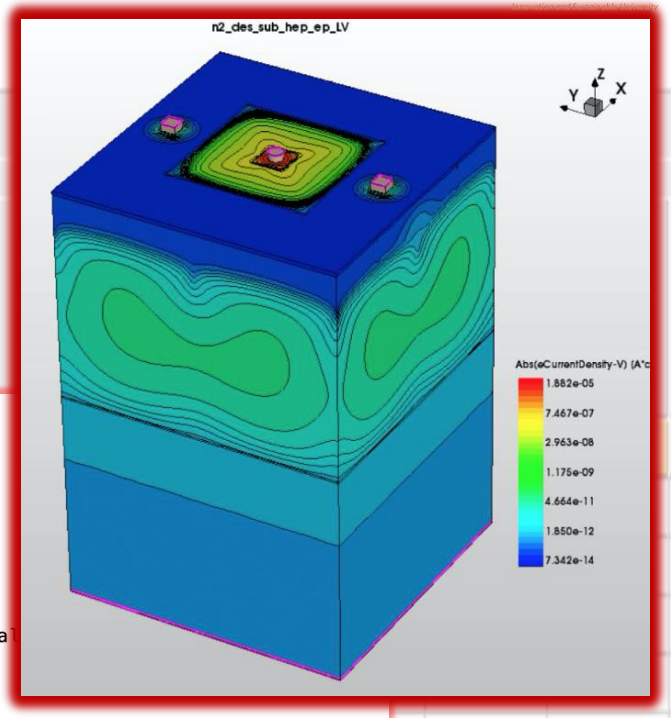
2. **การศึกษาเครื่องมือที่ใช้สำหรับวัดสมบัติอิเล็กทรอนิกส์ด้วย Sentaurus Device** เริ่มจากสร้างไฟล์ข้อมูลนำเข้าและส่งออกเพื่อทำการใส่ค่าต่าง ๆ ในไฟล์ boundary (.bnd) และไฟล์ mesh (.trd) หลังจากนั้นจะทำการใส่ค่าขั้วไฟฟ้า โดยการกำหนดโมเดลทางฟิสิกส์เพื่อทำการวิเคราะห์ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจากแบบจำลอง

3. **การวิเคราะห์ผลของแบบจำลอง Sentaurus Visual** เมื่อทำการออกแบบและได้ผลการออกแบบค่าขั้วไฟฟ้าแล้ว จะทำการวิเคราะห์ผลการออกแบบผ่านกราฟ 2D และ 3D ด้วย Sentaurus Visual การทำขั้นตอนนี้ จะช่วยลดเวลาและเพิ่มความแม่นยำในการ

การออกแบบเซนเซอร์ด้วยโปรแกรม Sentaurus TCAD

ตัวอย่างการออกแบบ

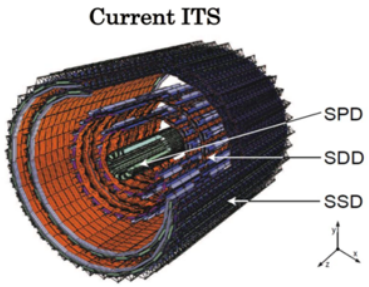





```
Controls {
}

IOControls {
        EnableSections
}

Definitions {
        AnalyticalProfile "DopAnode" {
                Species = "BoronActiveConcentration"
                Function = Gauss(PeakPos = 0, PeakVal = 1e+19, Val
                LateralFunction = Gauss(Factor = 0.8)
        }
        AnalyticalProfile "Doppspray" {
                Species = "BoronActiveConcentration"
                Function = Gauss(PeakPos = 0, PeakVal = 5e+16, ValueAtDepth = 5e+12, Depth = 1)
                LateralFunction = Gauss(Factor = 0.8)
        }
        Constant "ConstantProfileDefinition_1" {
                Species = "BoronActiveConcentration"
                Value = 5e+12
        }
}

Placements {
        Constant "ConstantProfilePlacement_1" {
                Reference = "ConstantProfileDefinition_1"
                EvaluateWindow {
                        Element = material ["Silicon"]
                }
        }
        Refinement "RefinementPlacement_1" {
                Reference = "RefinementDefinition_1"
                RefineWindow = material ["Silicon"]
        }
}
```

ความเป็นมาของโครงการวิจัย

ITS 1 (2008-2019)

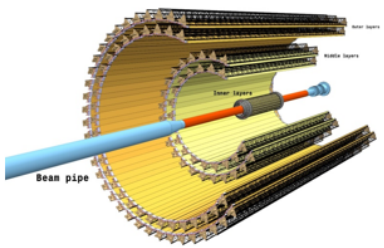


มี 6 ชั้น: มีเซนเซอร์ 3 แบบ SPD, SDD และ SSD

รัศมีของชั้นที่ 1 คือ 39 มม.

% ความหนาของวัสดุ
1.14% สำหรับ SPD
1.13%สำหรับ SDD
0.83% สำหรับ SSD

ITS 2 (2021-2024)

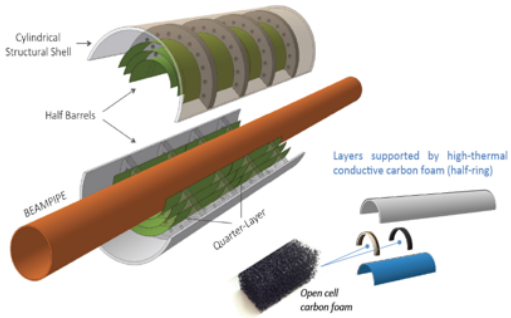


มี 7 ชั้น : เป็นเซนเซอร์แบบ SPD ทั้งหมด

รัศมีของชั้นที่ 1 คือ 23 มม.

% ความหนาของวัสดุ
0.3% สำหรับชั้น 1-3
0.8% สำหรับชั้น 4-7

ITS 3 (2027-2030)



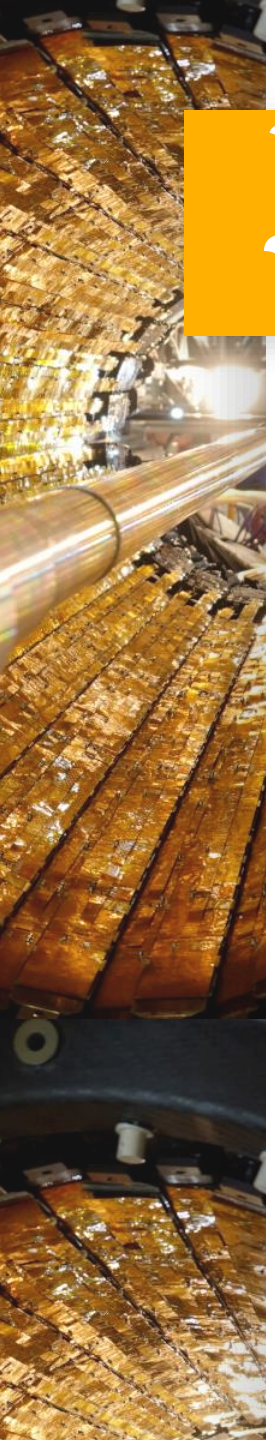
มี 3 ชั้น : เป็นเซนเซอร์โค้งงอ
มี 4 ชั้น : เป็นเซนเซอร์ SPD

รัศมีของชั้นที่ 1 คือ 16 มม.

% ความหนาของวัสดุ
0.05% สำหรับชั้น 1-3
0.8% สำหรับชั้น 4-7

SPD: Silicon Pixel Detector
SDD: Silicon Drift Detector
SSD: Silicon Strip Detector

Ultra-thin chip (<50 um): flexible with good stability



วัตถุประสงค์เชิงกิจกรรมของโครงการ

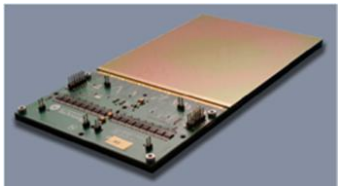
- เรียนรู้เทคโนโลยีการออกแบบและทดสอบสมบัติของเซนเซอร์จากอลิซเซิร์น เพื่อให้นักวิจัยไทยสามารถออกแบบเซนเซอร์ CMOS แบบโค้งงอ ที่มีความบางระดับไมโครเมตร
- ทำการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ทั้ง Lab Test และ Beam Test ว่ามีการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลและทางอิเล็กทรอนิกส์หรือไม่อย่างไร
- นำข้อมูลการทดสอบไปใช้ในการออกแบบเซนเซอร์รุ่นใหม่ ของโครงการ Inner Tracking System (ITS3) รุ่นที่ 3 โดยจะใช้เป็น input สำหรับการจำลองผลการทำงานของเซนเซอร์ ITS3 ด้วยชุดโปรแกรม TCAD และ GARFIELD++ เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพของการทำงานของการออกแบบ

แผนการดำเนินงาน

2020

ทดสอบองค์ประกอบทางเทคโนโลยีของหัววัดซิลิกอน

- ทำการจำลองคุณสมบัติและองค์ประกอบระดับพิกเซลโดยใช้ TCAD
- ศึกษาการทนรังสีของเซนเซอร์



2021

ทดสอบคุณสมบัติระดับพิกเซล

- ศึกษาขนาดของเม็ดพิกเซลและรูปร่างของพิกเซลที่เหมาะสม
- พัฒนาฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ เพื่อออกแบบการทดสอบคุณลักษณะของเซนเซอร์

2022

ออกแบบและสร้างต้นแบบหัววัดขนาดใหญ่

- ออกแบบบล็อกของหัววัดเบื้องต้น
- ทดสอบการทำงานเบื้องต้นของเซนเซอร์ในระดับห้องปฏิบัติการ

2023

ออกแบบและสร้างต้นแบบขนาดเต็ม

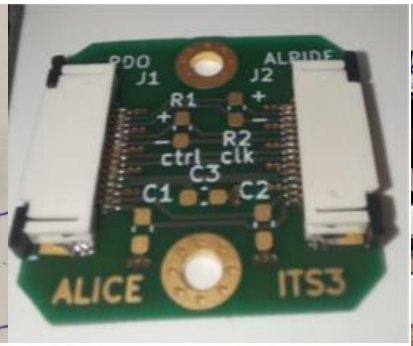
- การสร้างและทดสอบคุณสมบัติของหัววัดขนาดจริง

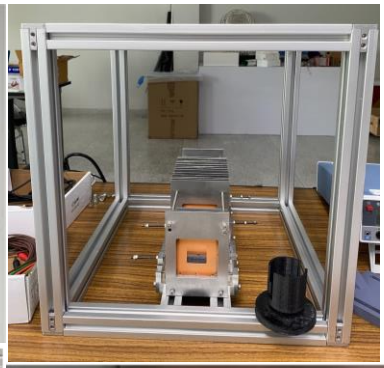
2024

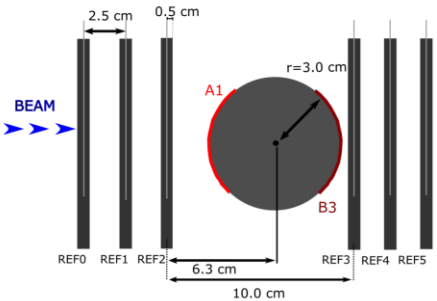
สร้าง ทดสอบและปรับเทียบหัววัดรูปแบบสุดท้ายก่อนนำไปติดตั้งจริง

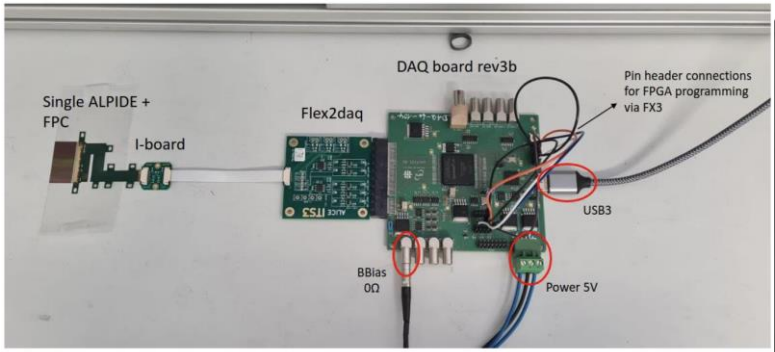
ศึกษาการออกแบบเซนเซอร์

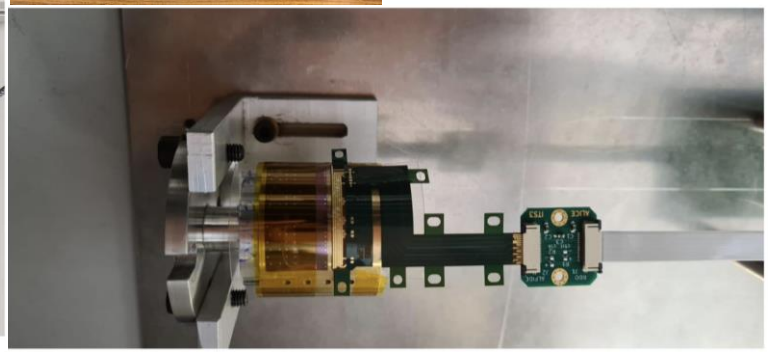
- **ระบบตรวจทดสอบสำหรับเซนเซอร์แบบโค้งงอ -** ระบบทดสอบสำหรับเซนเซอร์แบบโค้งจะประกอบไปด้วยเซนเซนเซอร์ต้นแบบ ALPIDE ที่เชื่อมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่น (Flexible Circuit Board) เพื่อส่งสัญญาณแบบแอนะล็อกของอนุภาคไปยัง Flex2daq บอร์ด โดยมี I-board เป็นตัวช่วยส่งข้อมูล จากนั้นแปลงสัญญาณเป็นดิจิทัลส่งไปยัง DAQ board เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลทางฟิสิกส์แล้วจึงส่งไปยังคอมพิวเตอร์





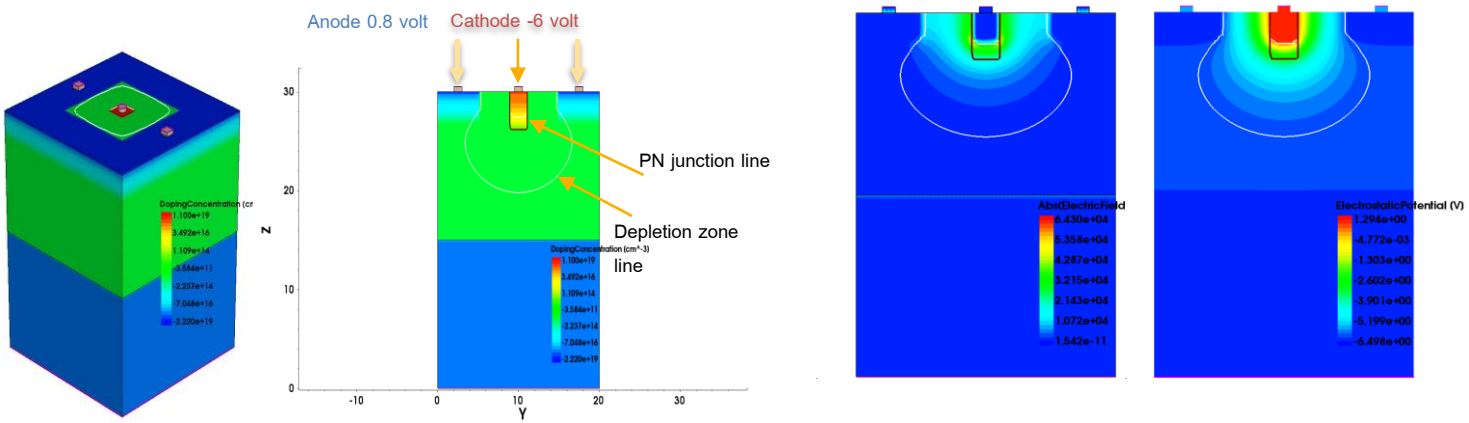






การออกแบบจำลอง CMOS pixel sensor ขนาด 20x20x30 ลูกบาศก์ไมโครเมตร

- การสร้างแบบจำลองของ pixel sensor ด้วย TCAD

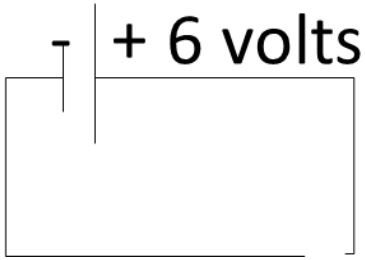


ศึกษาขนาดของ Depletetion region ที่การ bias แบบต่าง ๆ เพื่อดูความเข้มของสนาม ในแต่ละ pixel ที่สร้างขึ้น

Part 1

Hardware

New sensor design

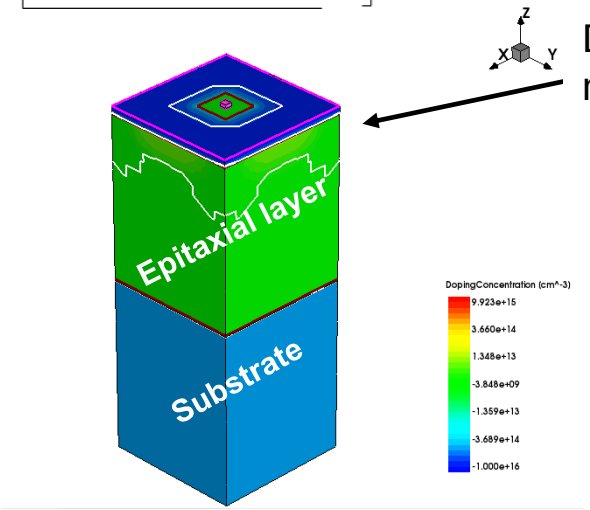


CMOS ALPIDE-like sensor designed by TCAD

P well
(Boron doping as P type)

N well diode
(Arsenic doping as N type)

Metal surface
(Contact)

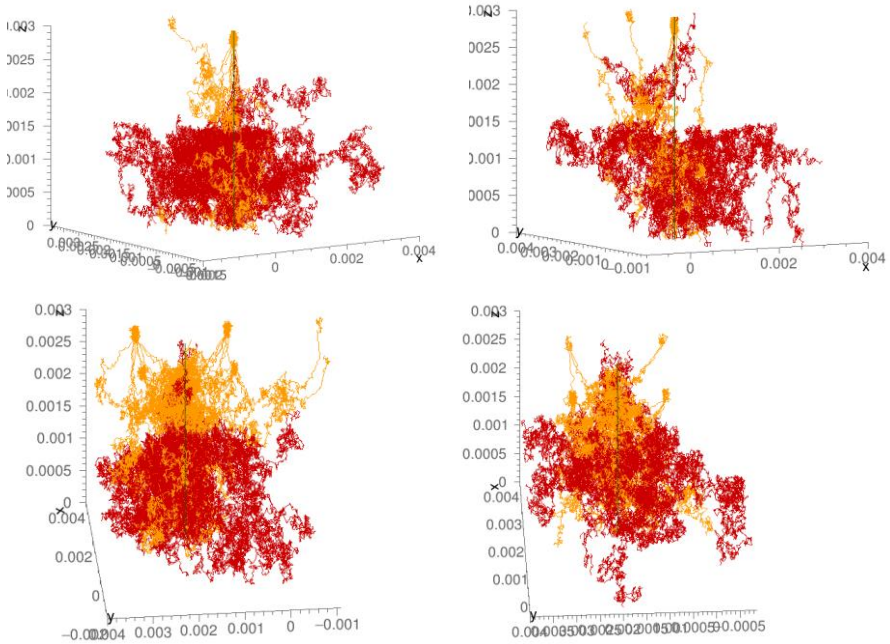


Depletion region is the area where moving charges are forbidden.

Next step -> Fabrication at TMEC

การออกแบบจำลอง CMOS pixel sensor ขนาด 20x20x30 ลูกบาศก์ไมโครเมตร

- การศึกษาการเคลื่อนที่ของ คู่ อิเล็กตรอน-โฮล ใน เซนเซอร์ ด้วย Garfield++

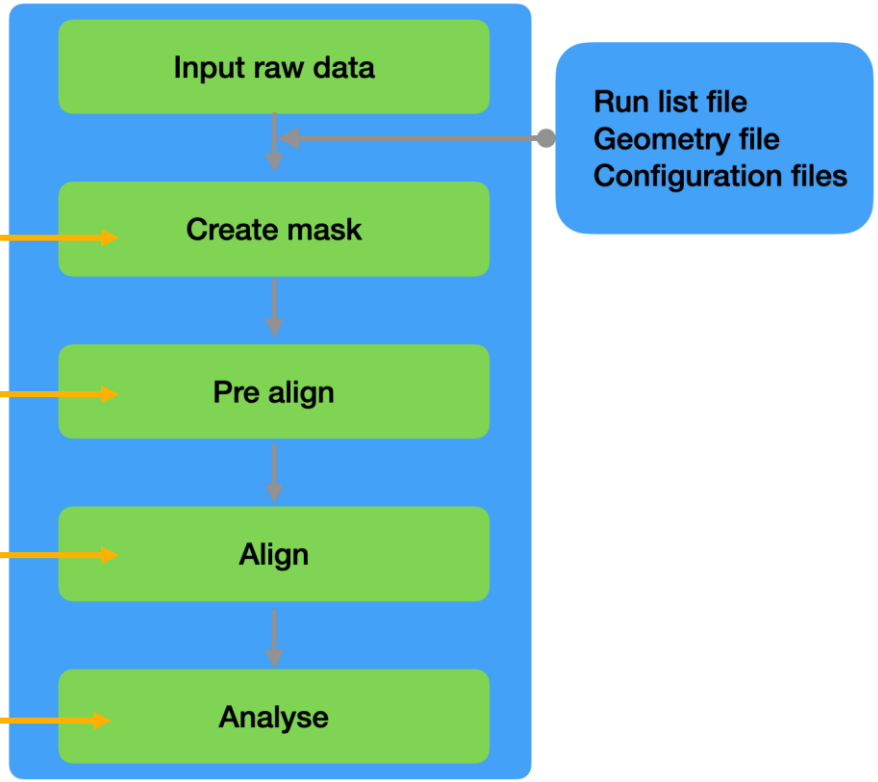


ศึกษาการเคลื่อนที่ของคู่อิเล็กตรอน-โฮล โดยเส้นสีส้มแสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน เข้าสู่บริเวณ Depletetion region ด้านบนของ sensor

เส้นสีแดง แสดงการเคลื่อนที่ของ โฮล

การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าประสิทธิภาพในการตรวจจับอนุภาคของเซนเซอร์ด้วยโปรแกรม Corryvrevkan

- ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูล Corryvreckan

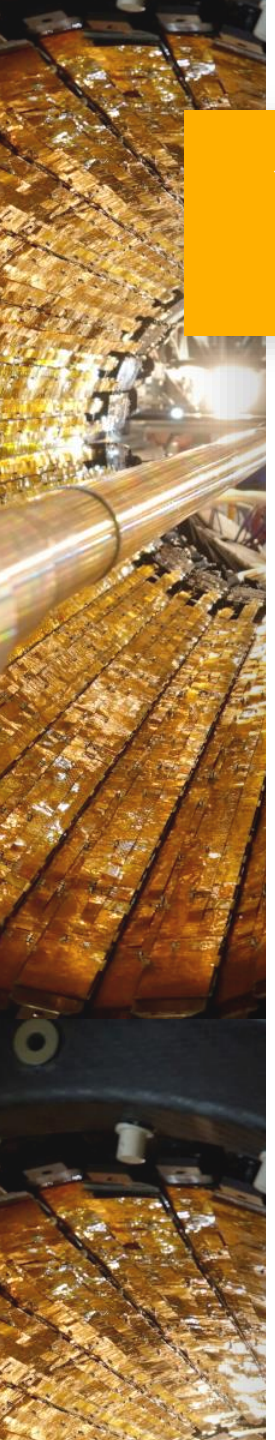


นำข้อมูลดิบมาคัดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากการทำการทดลองออกให้เหลือเพียงสัญญาณของอนุภาคที่ตรวจวัดได้

ขั้นตอนในการจัดเรียงข้อมูลเพื่อติดตามเส้นทางเดินของอนุภาคโดยใช้ระนาบอ้างอิง (reference plane) ของระบบตรวจวัดอนุภาค

เรียงข้อมูลเส้นทางการเดินของอนุภาคของ Pre align กับ DUT (Device Under Test) ของระบบตรวจวัดอนุภาค

ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลทางฟิสิกส์ที่ได้จากการ Align โดยการเปรียบเทียบตำแหน่งคลัสเตอร์ซึ่งเป็นตำแหน่งที่อนุภาคชนกับตำแหน่งเส้นทางเดินของอนุภาคที่เกิดขึ้นบน DUT เพื่อวัดประสิทธิภาพในการตรวจจับอนุภาคของเซนเซอร์ DUT ในระบบตรวจวัดอนุภาค



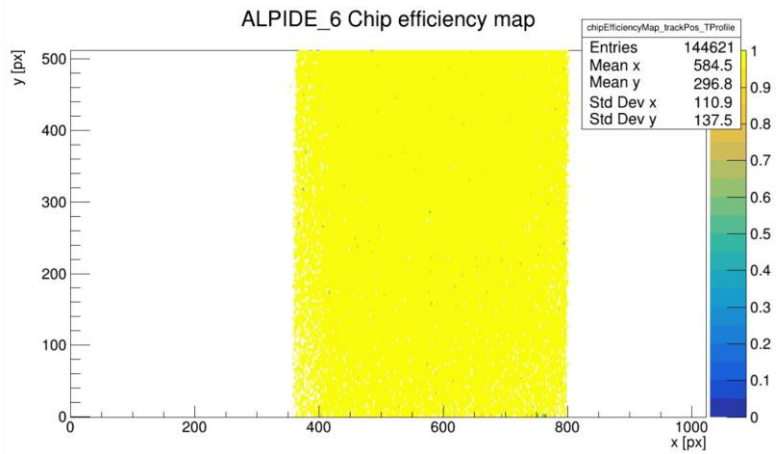
การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าประสิทธิภาพในการตรวจจับอนุภาคของเซนเซอร์ด้วยโปรแกรม Corryvrevkan

- Corryvreckan เป็นเฟิร์มแวร์ที่ถูกออกแบบมาวิเคราะห์ข้อมูลทางฟิสิกส์เพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพในการตรวจวัดอนุภาคของเซนเซอร์ที่ได้จากโปรแกรม EUDAQ ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้สำหรับเก็บข้อมูลจากการทดสอบระบบตรวจวัดอนุภาคที่ทางกลุ่มวิจัยของอลิซ (ALICE) เป็นผู้พัฒนาออกมาใช้สำหรับโครงการ ALICE ITS upgrade ปัจจุบันกลุ่มวิจัยของอลิซได้พัฒนาโปรแกรม EUDAQ ซึ่งสามารถเก็บข้อมูลได้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นและสามารถเก็บข้อมูลของเซนเซอร์ ALICE ที่มีลักษณะโค้งงอได้โดยใช้ชื่อว่า EUDAQ2

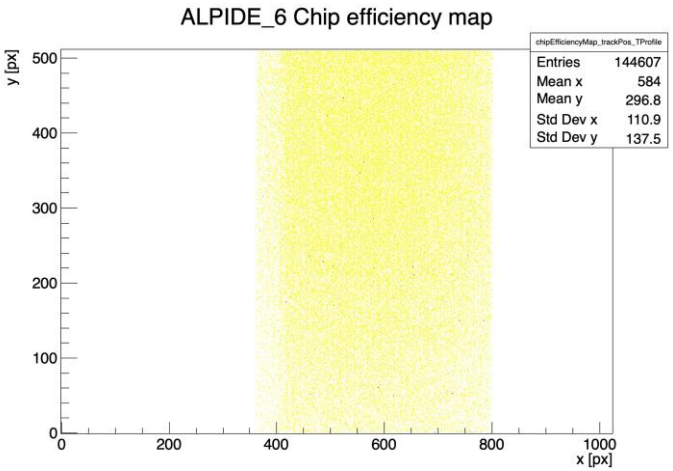
การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าประสิทธิภาพในการตรวจจับอนุภาคของเซนเซอร์ด้วยโปรแกรม Corryvrevkan

- ผลการวิเคราะห์ข้อมูลประสิทธิภาพการตรวจจับอนุภาคของเซนเซอร์ ALPIDE แบบโค้งงอด้วยโปรแกรม Corryvreckan

กราฟแสดงการตรวจจับอนุภาคของเซนเซอร์ ALPIDE แบบโค้งงอ ที่ตำแหน่งพิกเซล 350,800 แกน x และ 0,500 แ



กลุ่มวิจัยของอลิซ

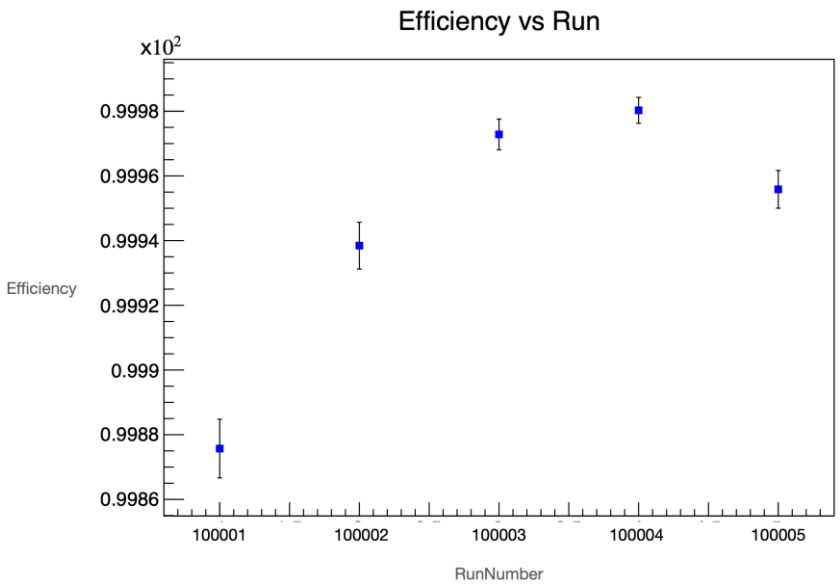


กลุ่มวิจัยของมทส.

การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าประสิทธิภาพในการตรวจจับอนุภาคของเซนเซอร์ด้วยโปรแกรม Corryvrevkan

- ผลการวิเคราะห์ข้อมูลประสิทธิภาพการตรวจจับอนุภาคของเซนเซอร์ ALPIDE แบบโค้งงอด้วยโปรแกรม Corryvreckan

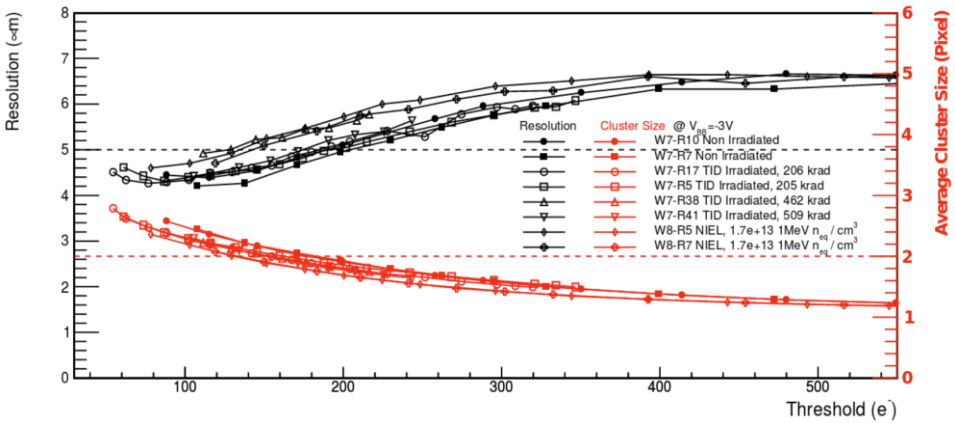
กราฟแสดงประสิทธิภาพการตรวจจับอนุภาคของเซนเซอร์ ALPIDE แบบโค้งงอ แต่ละชุดข้อมูลตั้งค่าการอ่านสัญญาณของเซนเซอร์แตกต่างกัน



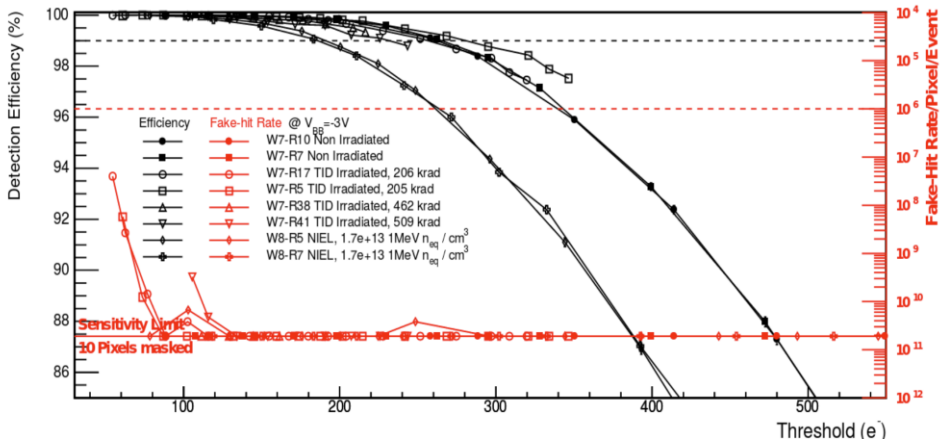
ชุดข้อมูลจะมีค่าประสิทธิภาพในการตัวจับอนุภาคของเซนเซอร์แตกต่างกัน เนื่องจากแต่ละชุดข้อมูลตั้งค่าการอ่านสัญญาณของเซนเซอร์แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามจากผลลัพธ์ที่ได้จะเห็นว่าประสิทธิภาพการตรวจจับอนุภาคของเซนเซอร์มีค่ามากกว่าร้อยละ 99 ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขของคุณสมบัติของเซนเซอร์ที่จะถูกนำไปใช้ในโครงการ ITS3 upgrage

การศึกษาประสิทธิภาพของเซนเซอร์ ALPIDE เมื่อถูกนำมาดัดให้โค้งงอ

1. ประสิทธิภาพของเซนเซอร์เมื่อถูกใส่กระแสไฟฟ้าแบบย้อนกลับ



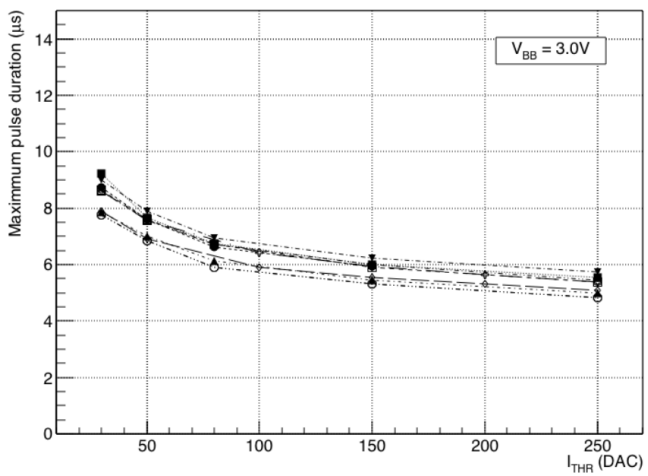
กราฟแสดงค่าประสิทธิภาพการตรวจวัดและอัตราสัญญาณหลอกของเซนเซอร์ ที่กระแสฟ้าฟ้าย้อนกลับ V_{BB} = -3 V เปรียบเทียบคุณสมบัติก่อนและหลังจากการฉายด้วยรังสี (ที่มา Suljic, M. (2017). Study of Monolithic Active Pixel Sensors for the Upgrade of the ALICE Inner Tracking. [Online]. Available: https://cds.cern.ch/record/2303618.)

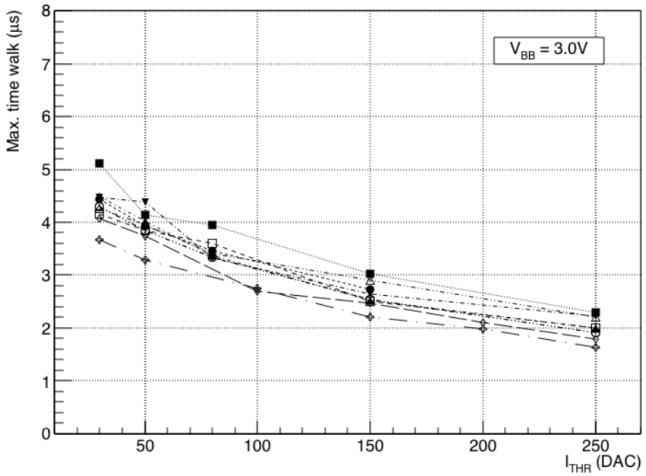


กราฟแสดงค่าความละเอียดของเซนเซอร์ ที่ค่ากระแสไฟฟ้าย้อนกลับ V_{BB} = -3 V เปรียบเทียบคุณสมบัติก่อนและหลังจากการฉายด้วยรังสี (ที่มา Suljic, M. (2017). Study of Monolithic Active Pixel Sensors for the Upgrade of the ALICE Inner Tracking. [Online]. Available: https://cds.cern.ch/record/2303618.)

การศึกษาประสิทธิภาพของเซนเซอร์ ALPIDE เมื่อถูกนำมาดัดให้โค้งงอ

1. ประสิทธิภาพของเซนเซอร์เมื่อถูกใส่กระแสไฟฟ้าแบบย้อนกลับ

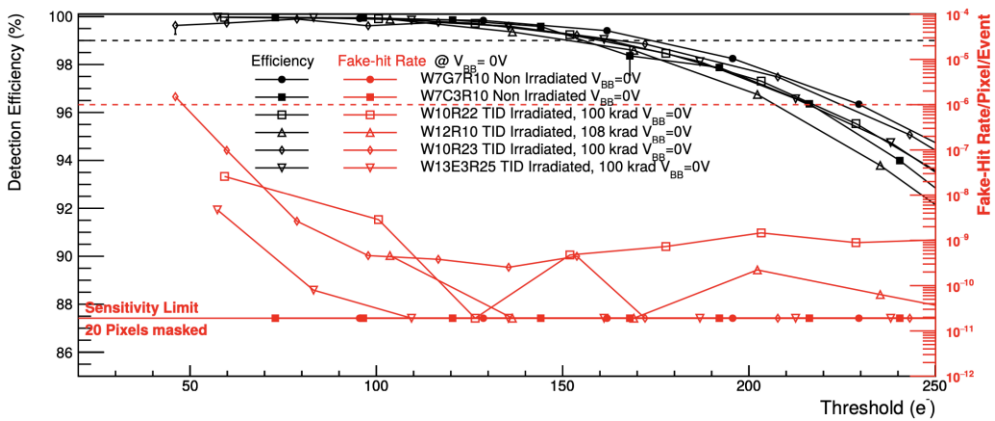




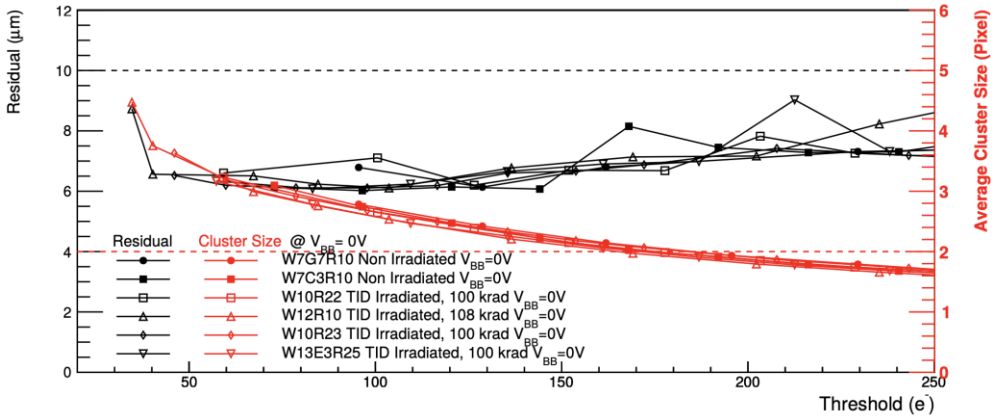
กราฟแสดงค่ารูปแบบสัญญาณ ที่ค่ากระแสไฟฟ้าย้อนกลับ V_{BB} = -3 V (ที่มา Suljic, M. (2017). Study of Monolithic Active Pixel Sensors for the Upgrade of the ALICE Inner Tracking. [Online]. Available: https://cds.cern.ch/record/2303618.)

การศึกษาประสิทธิภาพของเซนเซอร์ ALPIDE เมื่อถูกนำมาดัดให้โค้งงอ

2. ประสิทธิภาพของเซนเซอร์เมื่อไม่มีกระแสไฟฟ้าแบบย้อนกลับ



กราฟแสดงค่าประสิทธิภาพการตรวจวัดและอัตราสัญญาณหลอกของเซนเซอร์ ที่กระแสฟ้าฟ้าย้อนกลับ V_{BB} = 0 V เปรียบเทียบคุณสมบัติก่อนและหลังจากการฉายด้วยรังสี (ที่มา Suljic, M. (2017). Study of Monolithic Active Pixel Sensors for the Upgrade of the ALICE Inner Tracking. [Online]. Available: https://cds.cern.ch/record/2303618.)

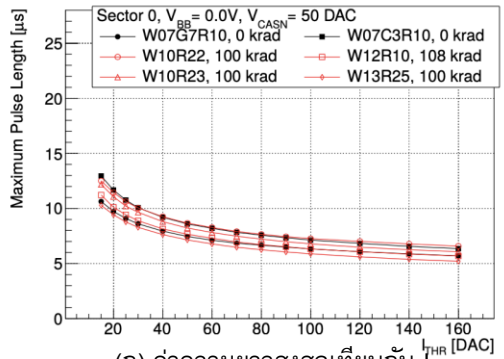


กราฟแสดงค่าความละเอียดของเซนเซอร์ ที่ค่ากระแสไฟฟ้าย้อนกลับ V_{BB} = 0 V เปรียบเทียบคุณสมบัติก่อนและหลังจากการฉายด้วยรังสี (ที่มา Suljic, M. (2017). Study of Monolithic Active Pixel Sensors for the Upgrade of the ALICE Inner Tracking. [Online]. Available: https://cds.cern.ch/record/2303618.)

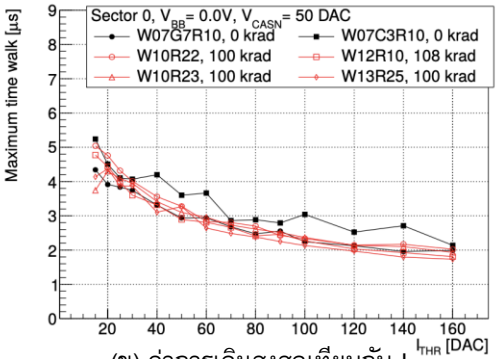
การศึกษาประสิทธิภาพของเซนเซอร์ ALPIDE เมื่อถูกนำมาดัดให้โค้งงอ

2. ประสิทธิภาพของเซนเซอร์เมื่อไม่มีกระแสไฟฟ้าแบบย้อนกลับ

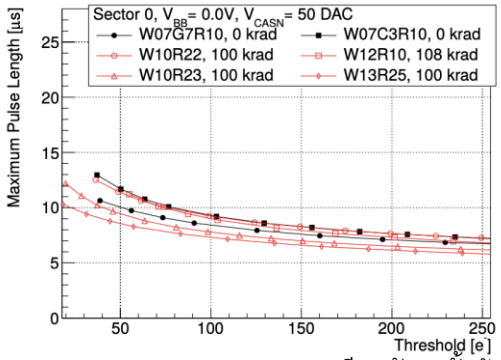
แสดงกราฟค่ารูปแบบสัญญาณของเซนเซอร์ ที่ค่ากระแสไฟฟ้าย้อนกลับ VBB = 0 V เปรียบเทียบค่าความยาวสูงสุดและค่าการเดินสูงสุดเทียบกับค่า ITHR และค่าขั้นต้น (ที่มา Suljic, M. (2017). Study of Monolithic Active Pixel Sensors for the Upgrade of the ALICE Inner Tracking. [Online]. Available: https://cds.cern.ch/record/2303618.)



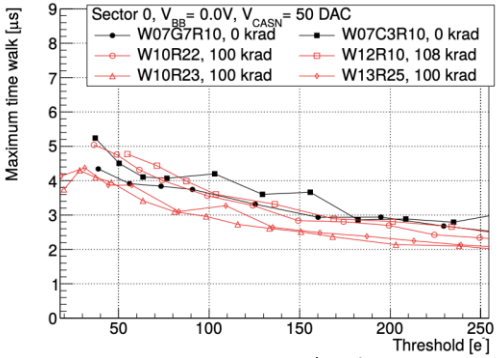
(ก) ค่าความยาวสูงสุดเทียบกับ I_{THR}



(ข) ค่าการเดินสูงสุดเทียบกับ I_{THR}



(ค) ค่าความยาวสูงสุดเทียบกับค่าขั้นต้น



(ง) ค่าการเดินสูงสุดเทียบกับค่า

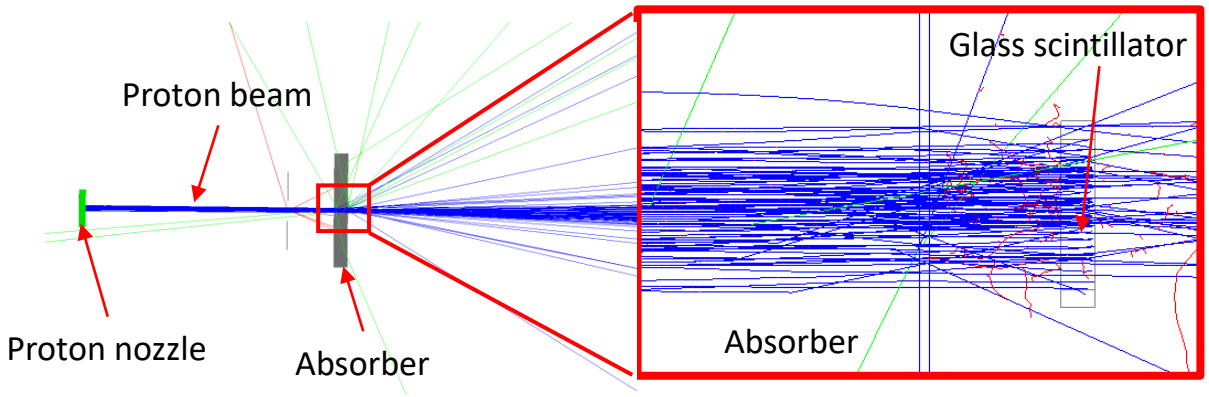
Glass scintillator

GATE

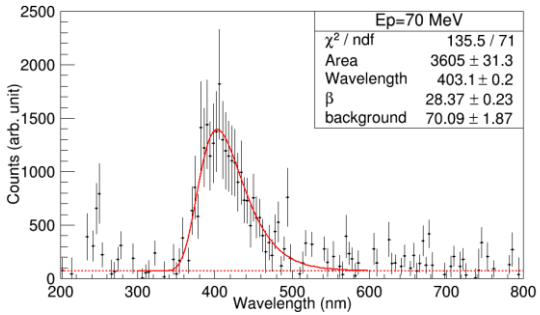
G4beamline

GEANT4

GATE and G4beamline are toolkit based on GEANT4 which they are used for dose calculation in radiation therapy.

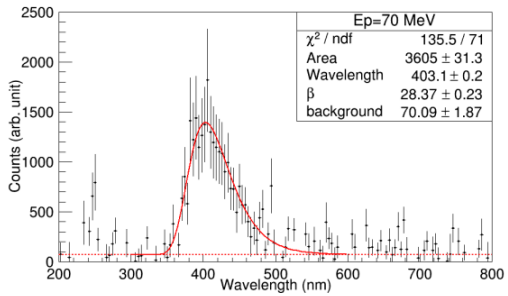


Energy deposition

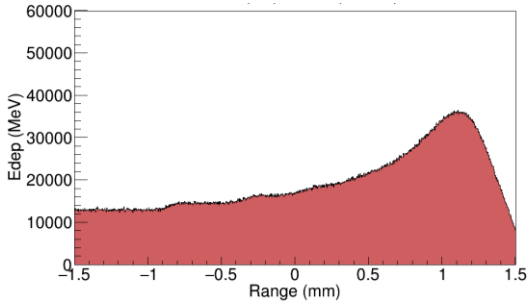


The simulation of deposited energy of proton beam to the glass scintillator

Glass scintillator



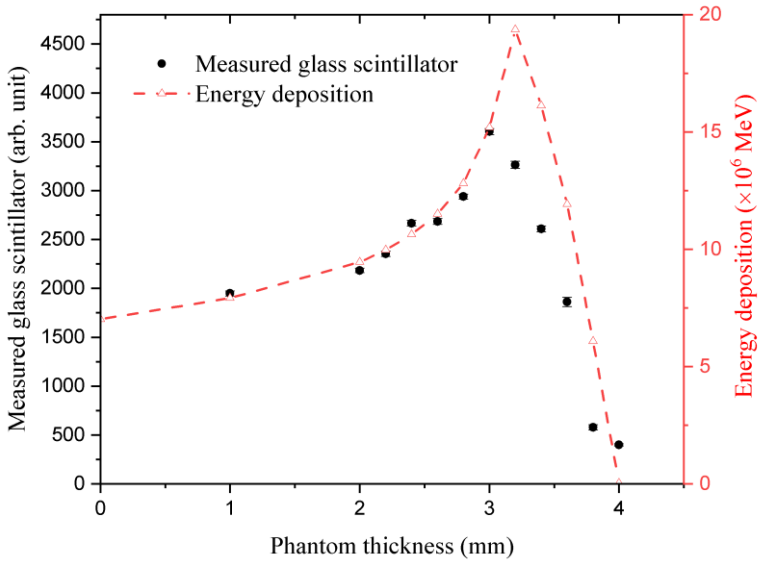
Emission spectra



Energy deposition

Comparison

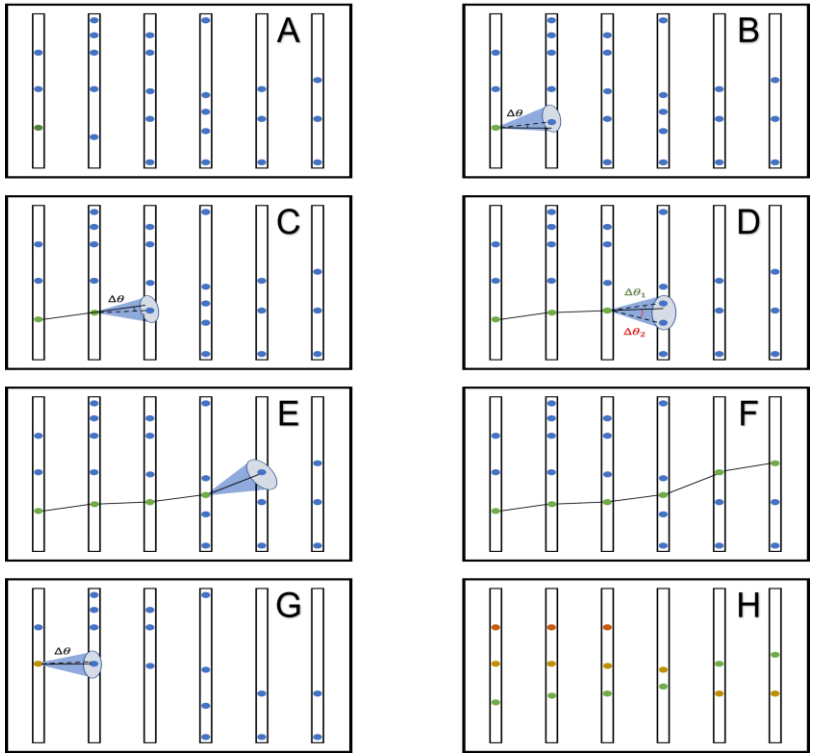
Comparison



Comparison between measured emission light and energy deposition of proton beam

Track following

The algorithm had been used in pCT prototype of Bergen.



A. Select a seed

B. Cone search

C. Collect a hit

D. Choose the nearest

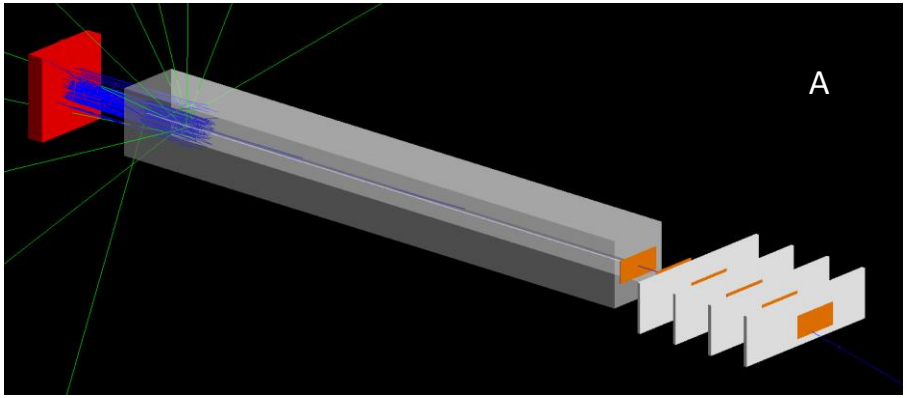
E. Collect the nearest

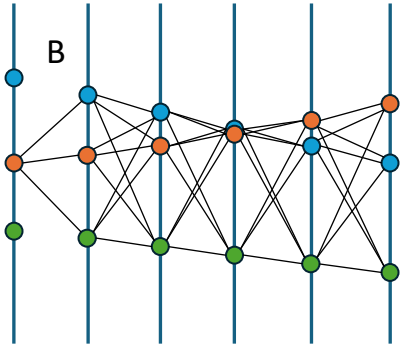
F. Remove a track data

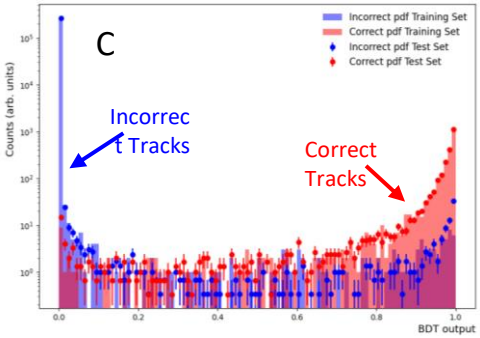
G. Select new seed the Repeat A - F

H. All tracks

Track Finding with Machine Learning







Utilize the ML model to find proton tracks passing through the complicated-structure detectors.

A. Simulate the proton beam hitting 6 layers of ALPIDEs using G4Beamline.

B. Prepare a scattering angle dataset of all possible tracks of proton reconstructed from hits on ALPIDEs.

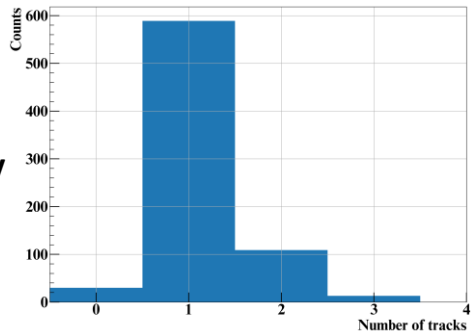
C. Train the decision tree-based ML model that can distinguish the correct track of protons.

Tools: G4Beamline, Hipe4ML, XGBoost
Model type: Decision tree, Binary classification

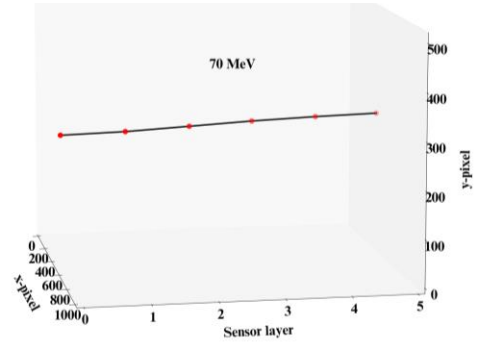
Track Result

70 MeV

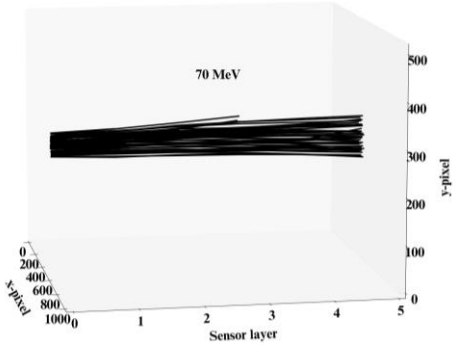
Number of tracks distribution



Single frame

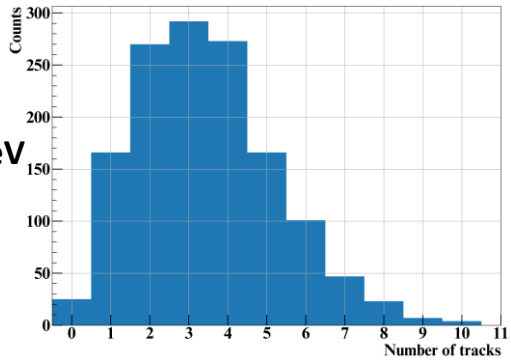


Multiple frames (50)

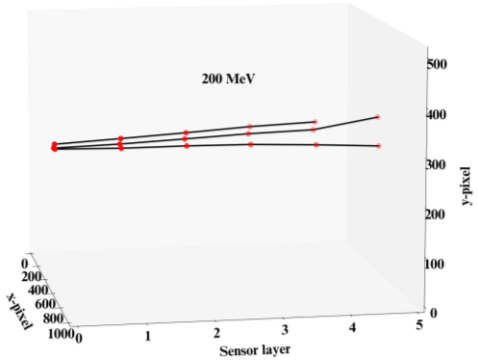


200 MeV

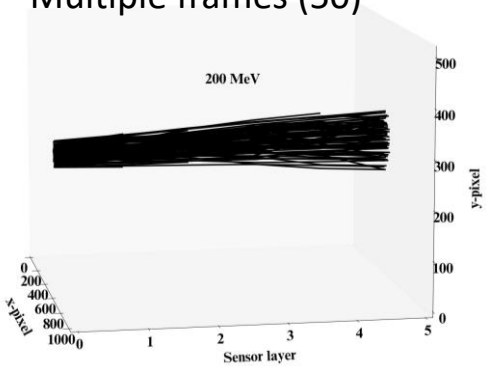
Number of tracks distribution



Single frame



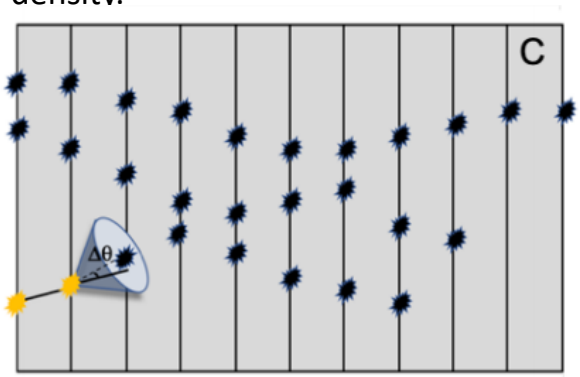
Multiple frames (50)



Track efficiency

- The angle of the search cone is determined by S_{max} and its value determines the amount of deflection that is allowed during track reconstruction.
- Too small values of S_{max} lead to prematurely discarded track candidates, and too large values cause confusion by including the wrong candidates where there should be none.
- Find the angular change for each candidate in the next layer and calculate

  $S_n = \sqrt{\sum_{layer}^{n} \left(\Delta\theta_{layer}\right)^2}$, where n indicates the proton density.



https://dx.doi.org/10.1088/1361-6560/abca03

Discard

$S_n > S_{max}$

Accept

$S_n \leq S_{max}$

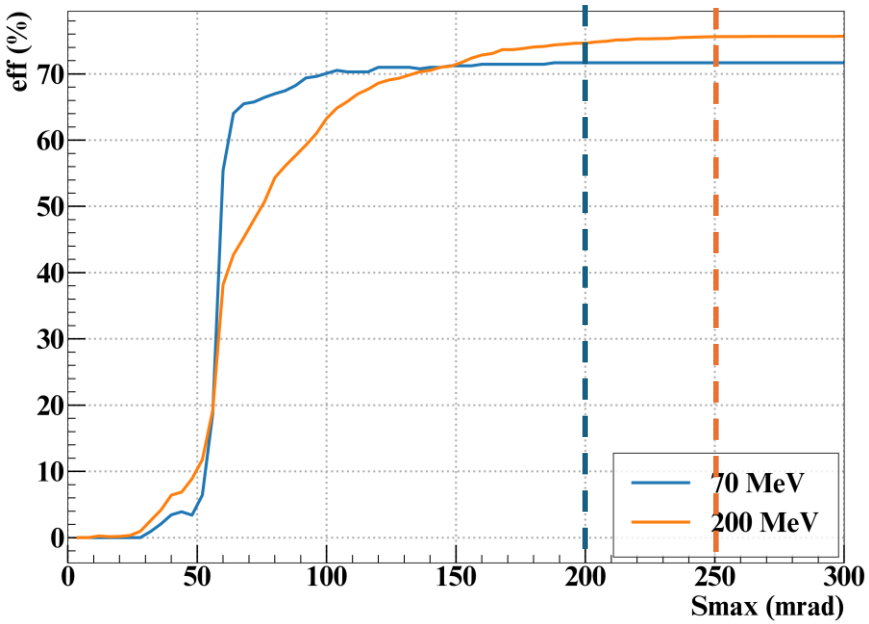


Image reconstruction

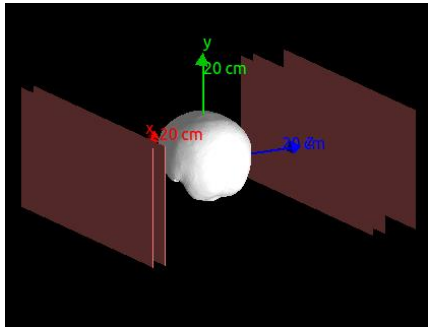
External

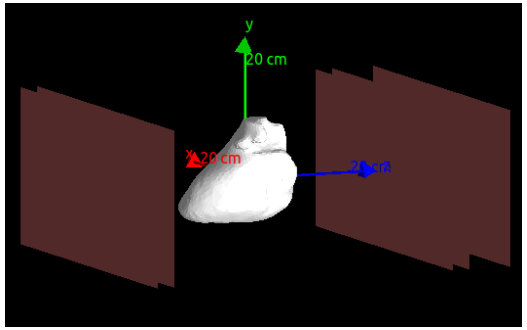
ICRP, 2020. Adult mesh-type reference computational phantoms. ICRP Publication 145. Ann. ICRP 49(3).

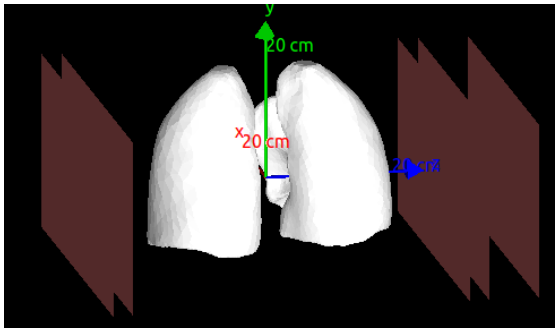
Internal

https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20145

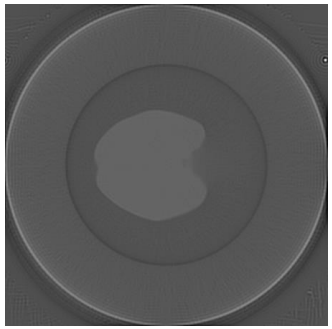
GEANT4 simulation



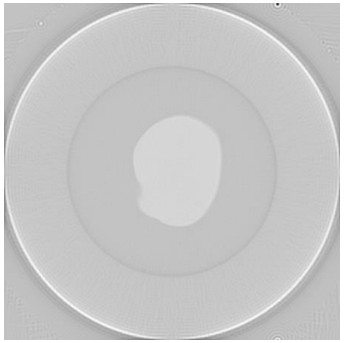




pCT image reconstruction

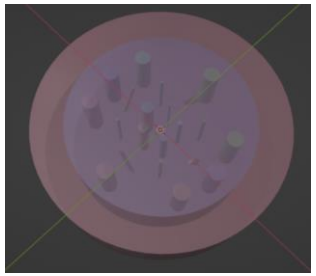


Brain



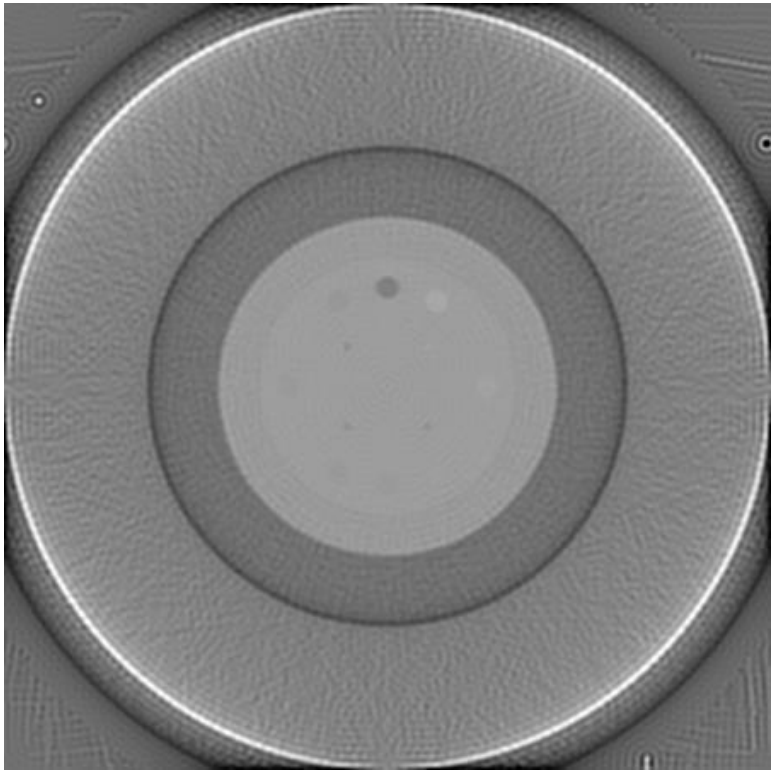
Heart

Lung



3D model

GEANT4 Simulation



CTP404 Image reconstruction with FBP and MLP