ฟิสิกส์ของ
เครื่องเร่งอนุภาค
และ
เครื่องตรวจวัดอนุภาค

ปิติ องค์มงคลกุล
วิทยาลัยนานาชาติ มหาวิทยาลัยมหิดล

OUTLINE

- เครื่องเร่งอนุภาค Particle Accelerator

- เครื่องตรวจวัดอนุภาค Particle Detector

เครื่องเร่งอนุภาค

- เอาอนุภาคมาจากไหน
- เร่งมันยังไง
- ทำยังไงให้มันชนกันดี ๆ

PARTICLE SOURCES

e^-

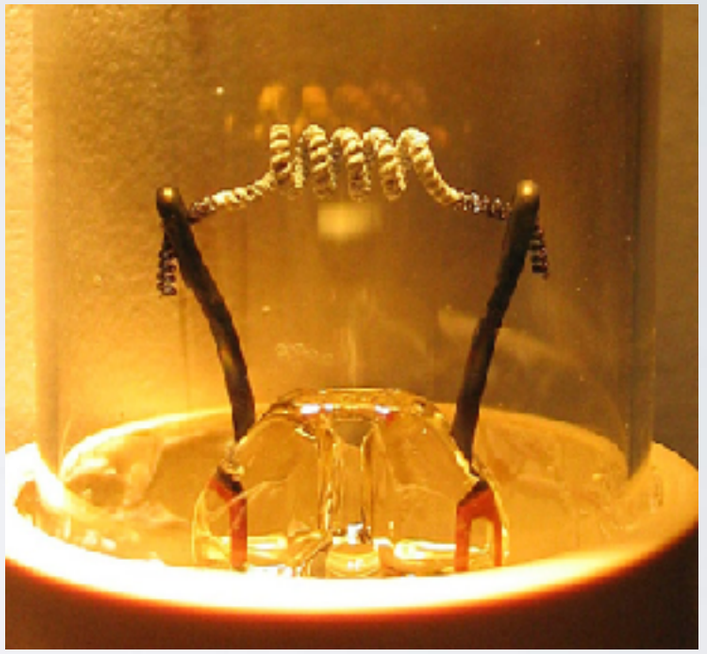
e^+

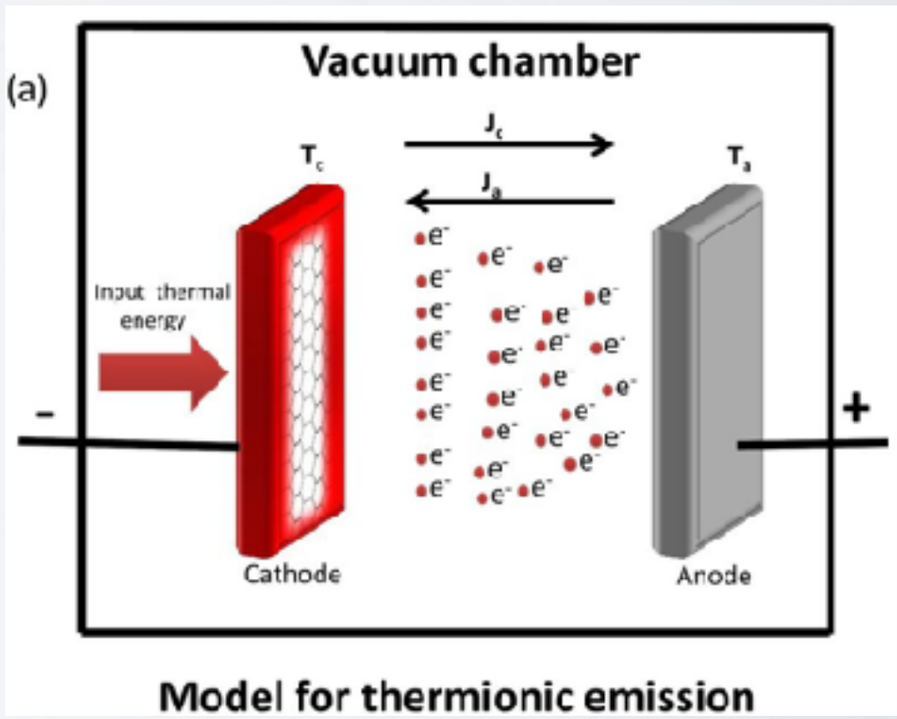
p^+

p^-

ELECTRON SOURCE

- Thermionic emission
  - หลอดไฟ นี่เอง
  - Thermal energy เยอะกว่า work function
  - เริ่มเตะ electron ออกมา
  - จับเร่งด้วยสนามไฟฟ้า

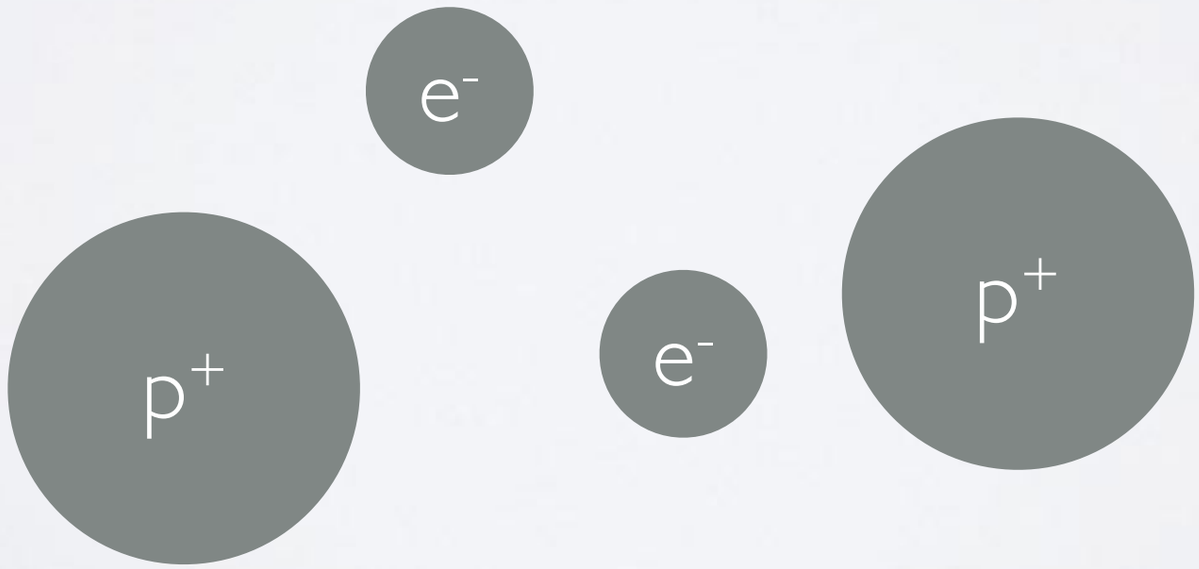




Model for thermionic emission

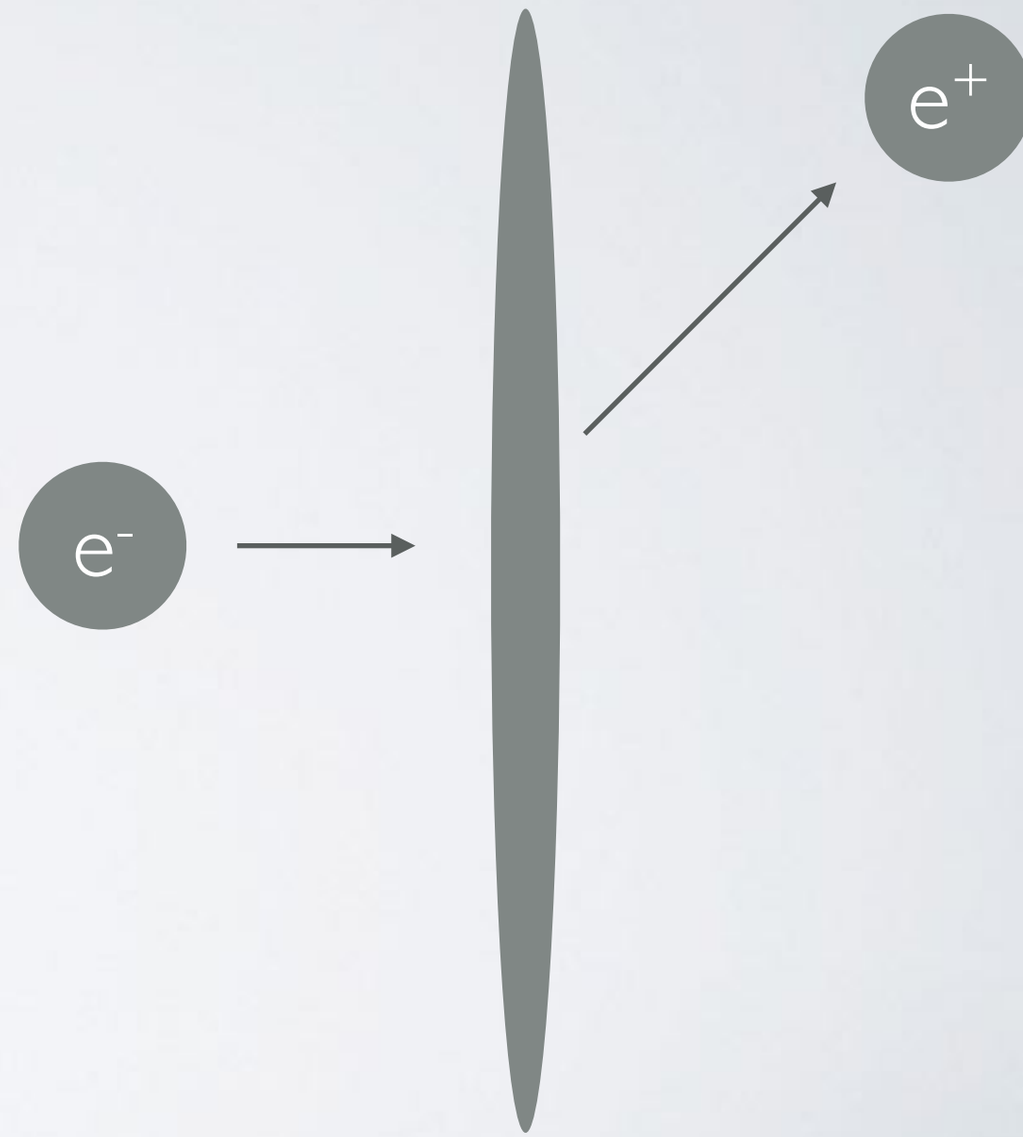
PROTON SOURCE

- Concept คือ เอา Hydrogen Gas H_2 และเตะ electron ออกไปให้หมด
- e^- ออกมาก่อนตัวนึงด้วยการจับยิง electron เข้าไป
  - กะว่าฟลุ๊คเตะ eletron ออก
- เร่งเบื้องต้นด้วยสนามไฟฟ้า



ของแปลก ๆ ที่เหลือล่ะ

- มาจาก การเอา Electron หรือ Proton ที่ได้มา เร่งนิดหน่อย
- ชนกับ Fixed Target อย่างเช่น Renium Tungsten
- มีของออกมามากมาย แต่ ใช้ mass spectrometer เลือกเฉพาะที่ต้องการ

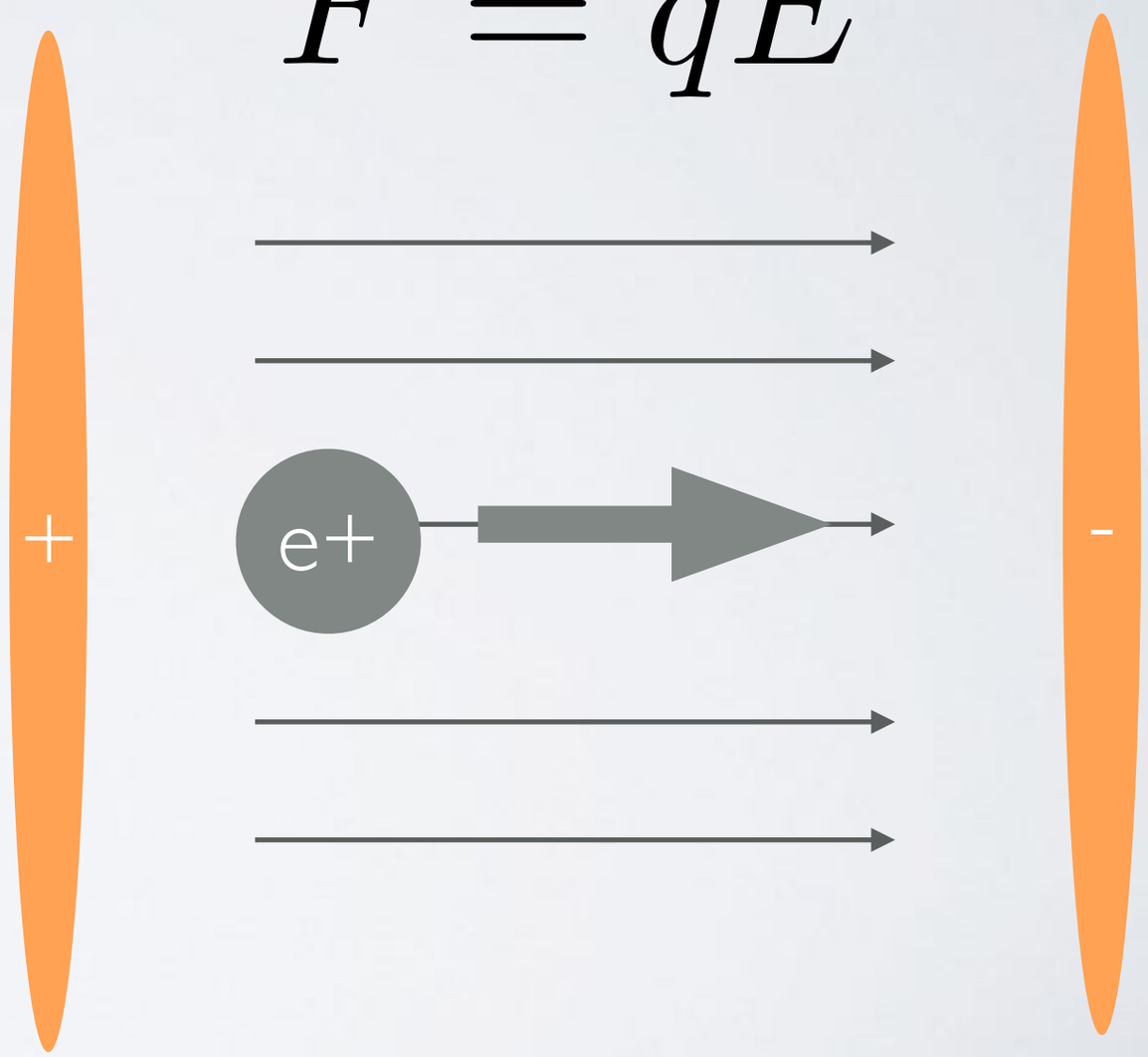


วิธีการเรียงอนุภาค

สนามไฟฟ้าคงที่

- ประจุบวกวิ่งไปตามสนามไฟฟ้า
- ถ้า scale เล็ก ๆ ทำง่ายมาก เลย ใช้สำหรับการเร่งเบื้องต้น
- แต่ ใหญ่ ๆ ยากมากที่จะทำแล้วไม่ spark ก่อน
- เก่งสุดที่พอทำได้
  - 25×10^{6} Volt/meter
- ถ้าจะเร่งตรง ๆ ให้ได้ LHC 14TeV
  - ~170 กิโลเมตร
  - กรุงเทพ-เขา ใหญ่

$$\vec{F} = q\vec{E}$$



RF CAVITY

- Static Electric Field ใหญ่ ทำยาก
- Radio Frequency Cavity
- ยิง สนามแม่เหล็กไฟฟ้าไป ที่ Resonance Frequency
- สนามไฟฟ้า ใหญ่ขึ้นเรื่อย ๆ

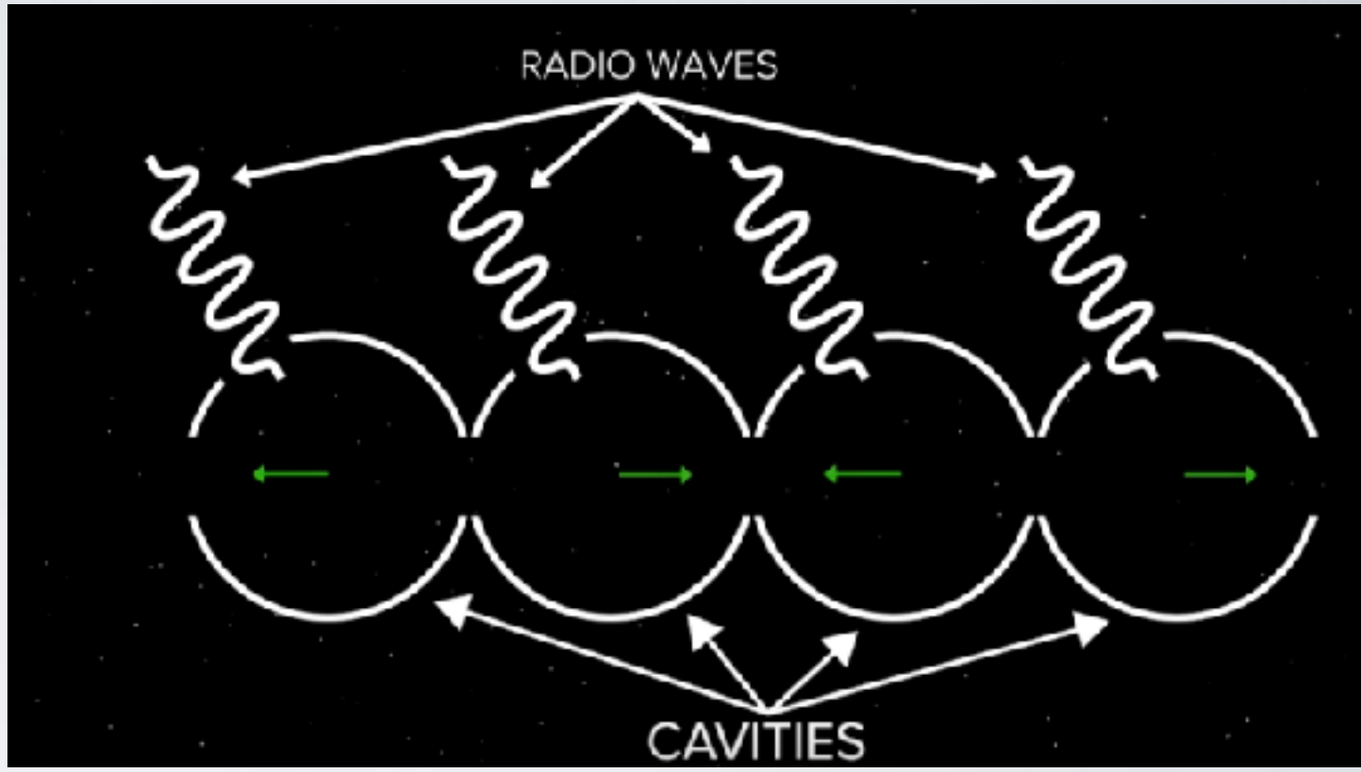
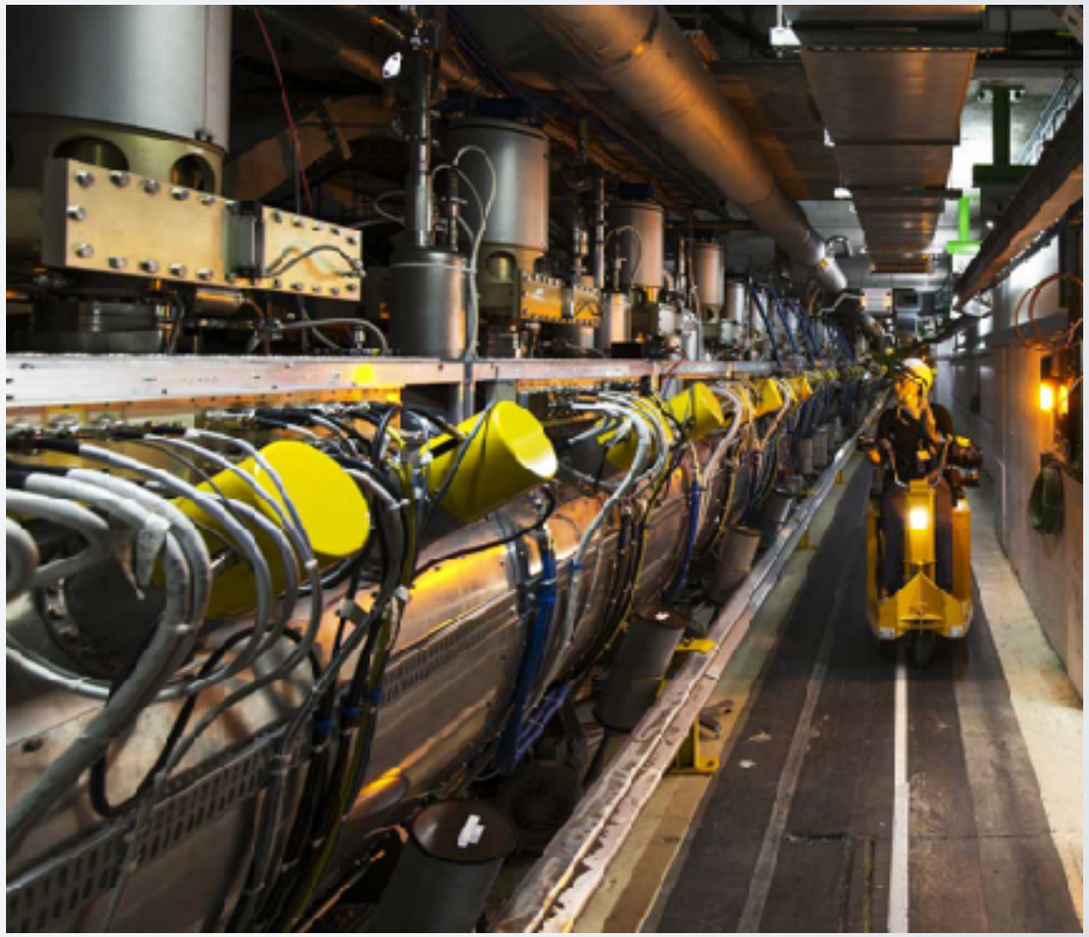


Image from Fermilab Youtube Channel

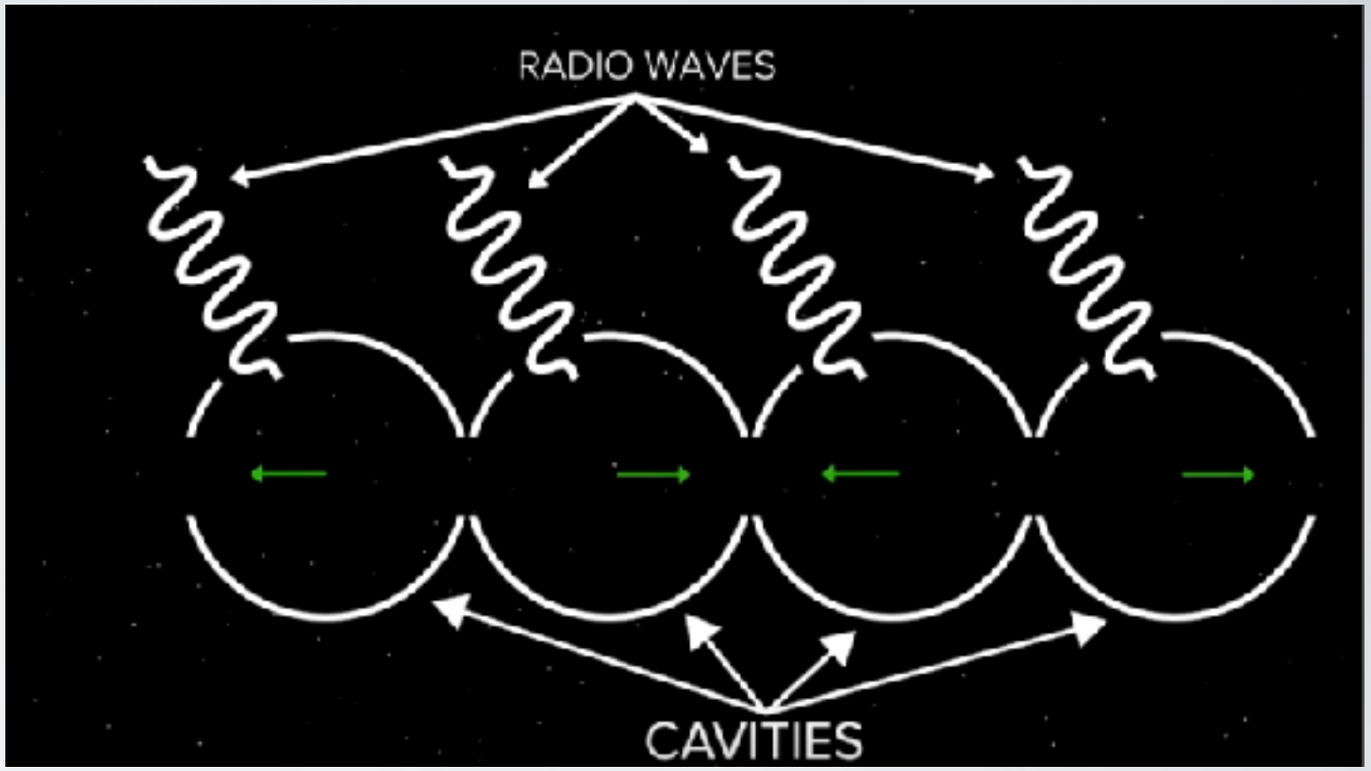


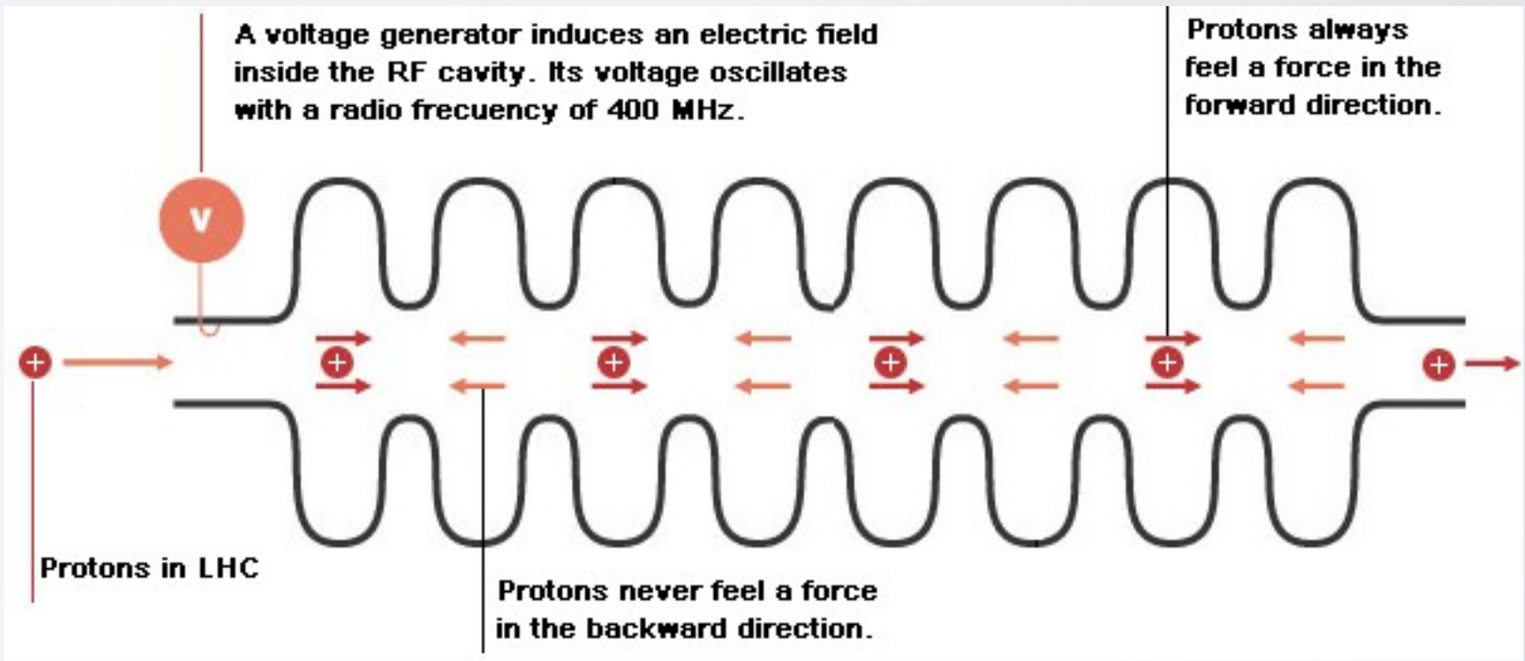
RF CAVITY2

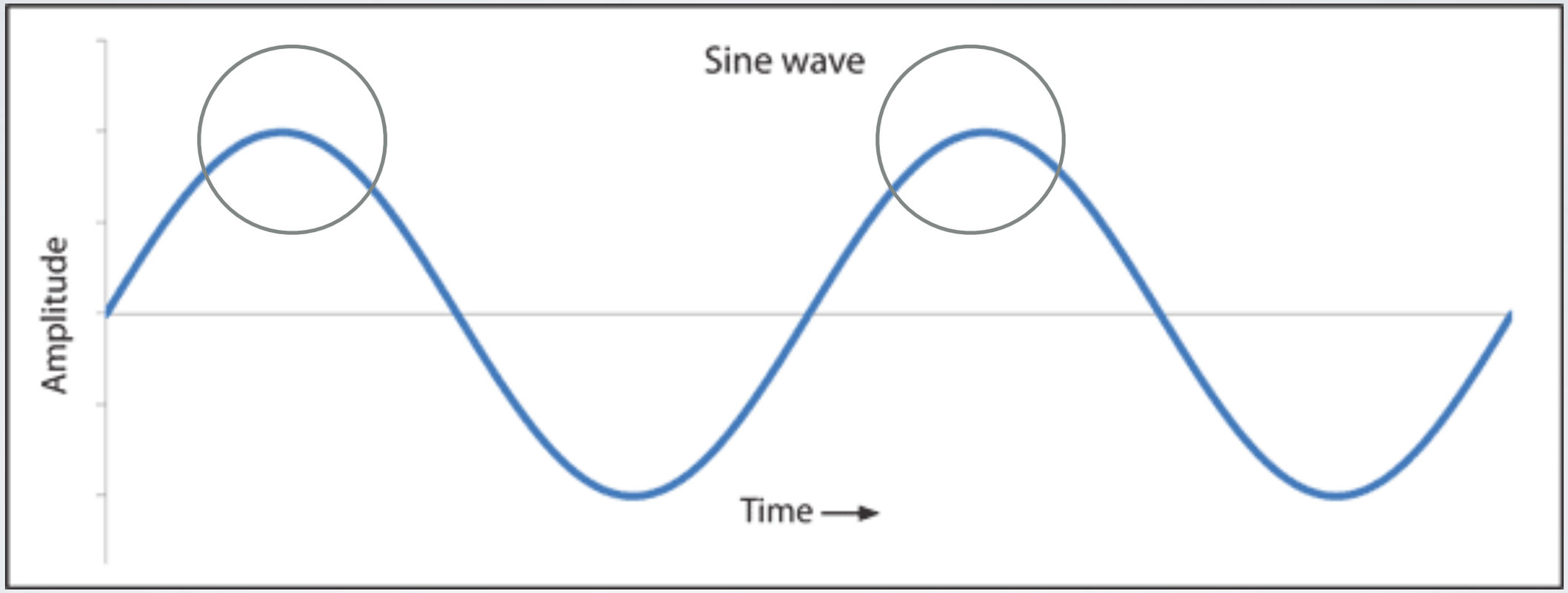
- แต่สนามในแต่ละ cavity เปลี่ยนตามเวลา สลับซ้ายขวา

- ต้องยิงเข้าไปให้ถูกจังหวะ
  - ~~Continuous~~
  - Bunch

- อนุภาคเราก็จะถูกเร่งตลอดเวลา



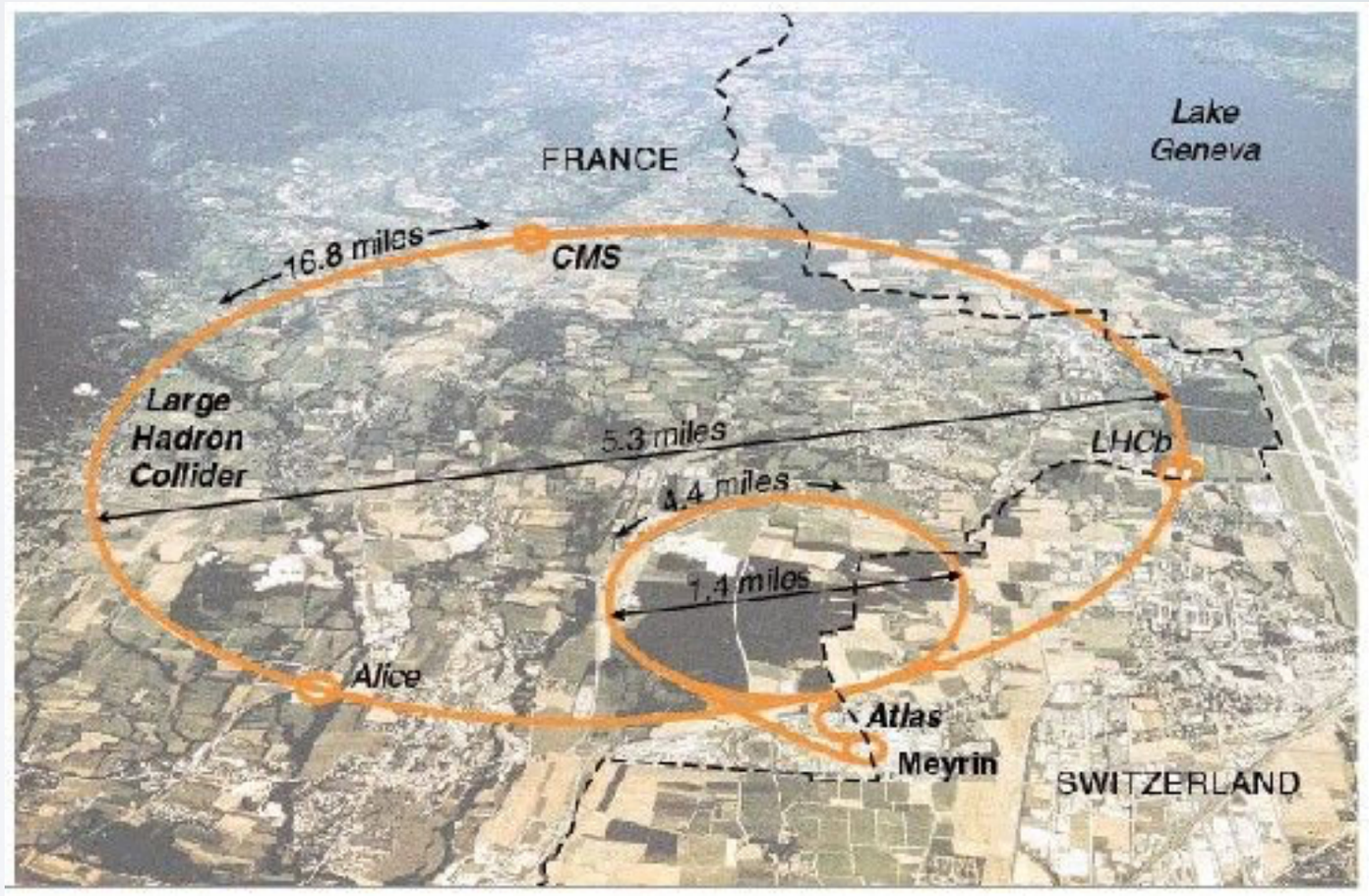


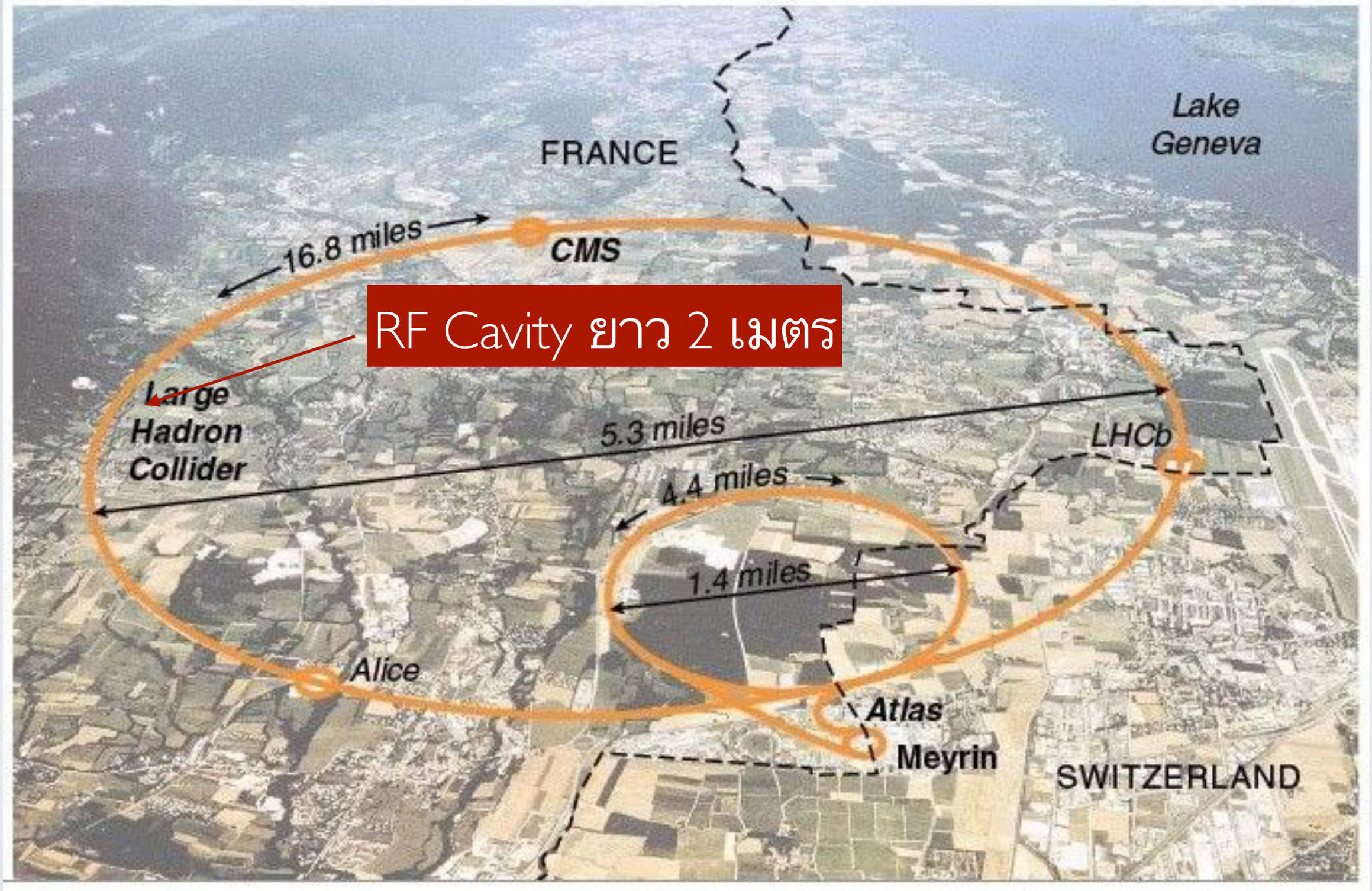


ยิงโปรตอนเข้าไปใน Cavity ตอนที่ E ไปทางที่เราต้องการเยอะ ๆ

CIRCULAR VS LINEAR

- ทั้ง RF Cavity และ Electric field ก็เร่งทางตรง เหมือนกัน
- ทำไมต้องกลม
- ทำไม ใหญ่ขนาดนั้น




FRANCE
Lake
Geneva
16.8 miles
CMS
RF Cavity ยาว 2 เมตร
Large
Hadron
Collider
5.3 miles
LHCb
4.4 miles
1.4 miles
Alice
Atlas
Meyrin
SWITZERLAND

SIZE

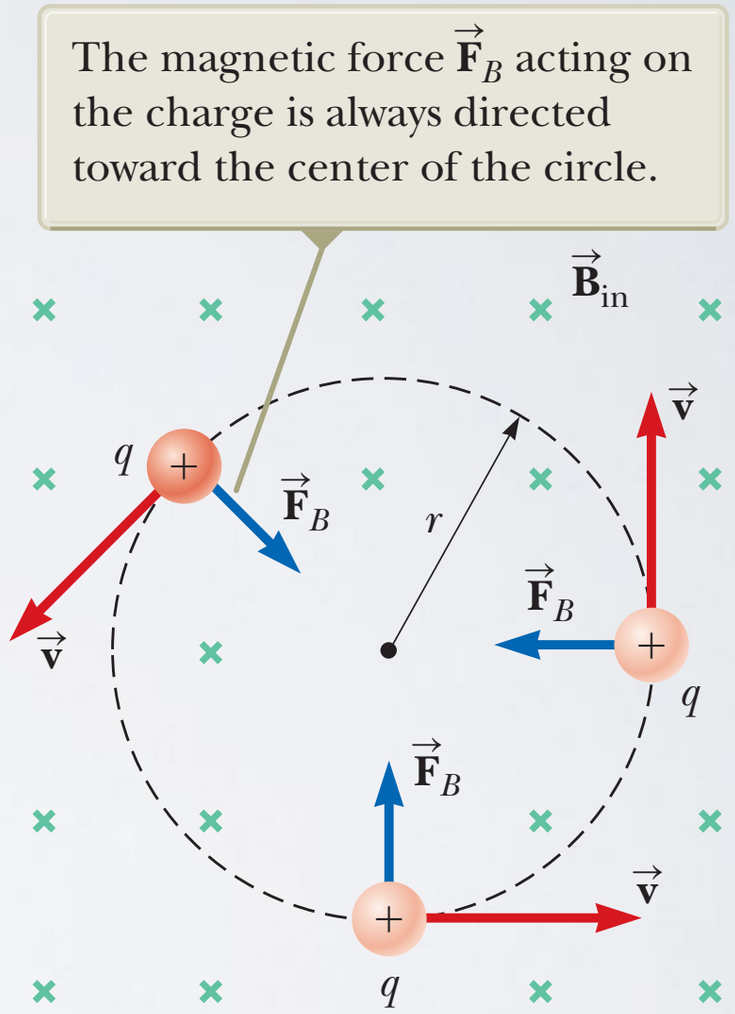
$$F_c = \frac{mv^2}{r} = qvB$$

$$r = \frac{p}{qB}$$

- ทำประจุให้วิ่งโค้งใช้สนามแม่เหล็ก คงที่ ไม่เปลี่ยนตามตำแหน่ง

- Superconducting Magnet **เท่าที่มีความสามารถ** mass produce **ได้ทำได้** ~8 Tesla

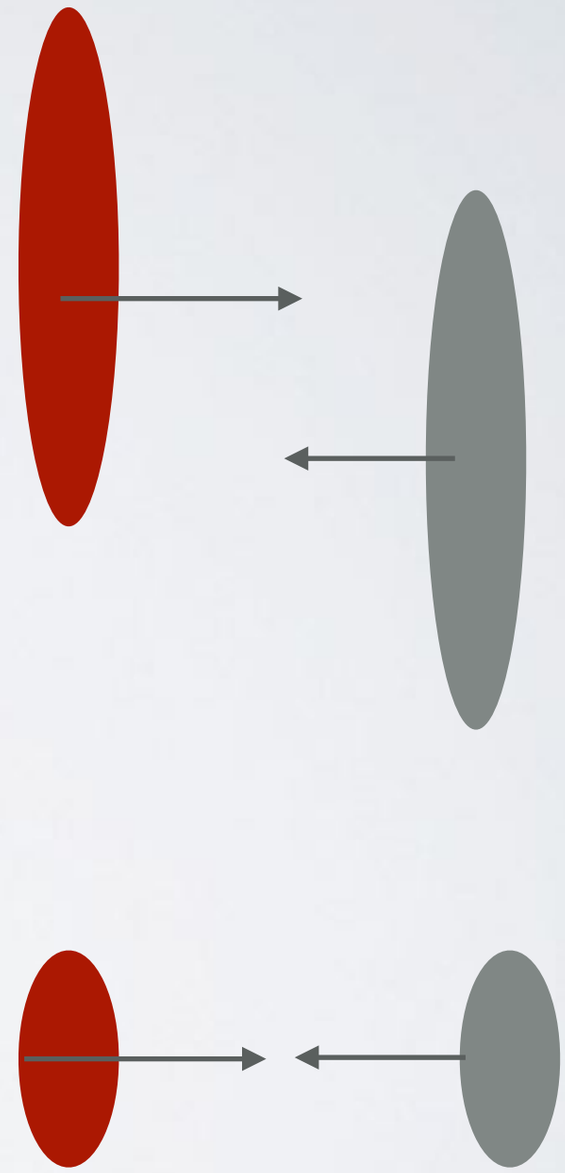
- r ~ km ***ต้องคิด** relativistic



FOCUSING ELEMENT

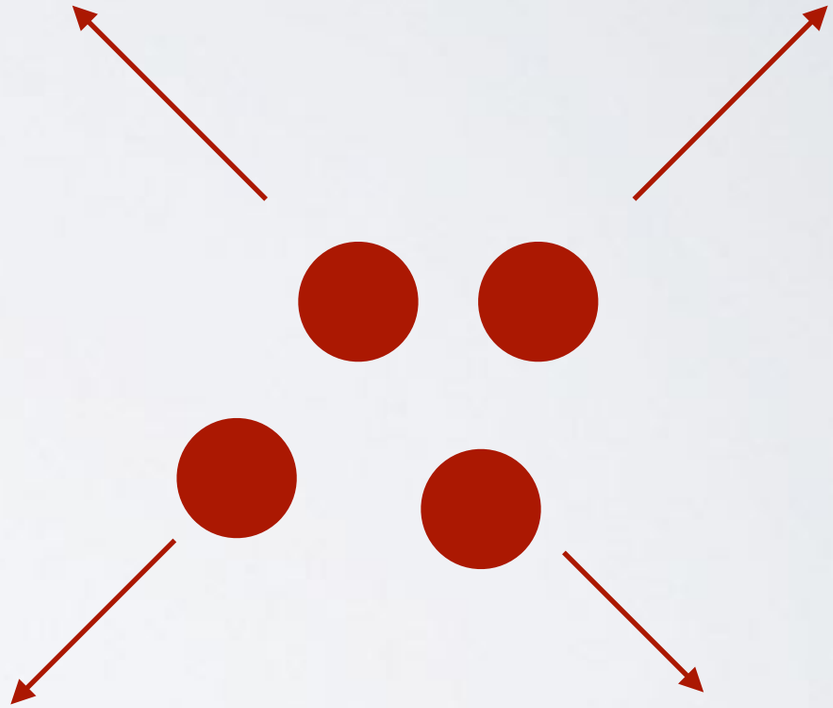
WHY FOCUS

- I bunch มีอนุภาคเต็มไปหมด
- ถ้ายิงมั่ว ๆ โดนบ้างไม่โดนบ้าง
- Focus ให้ crossection มันเล็ก ๆ
- ตรงกัน
- เลนส์นูนของ เครื่องเร่งอนุภาค

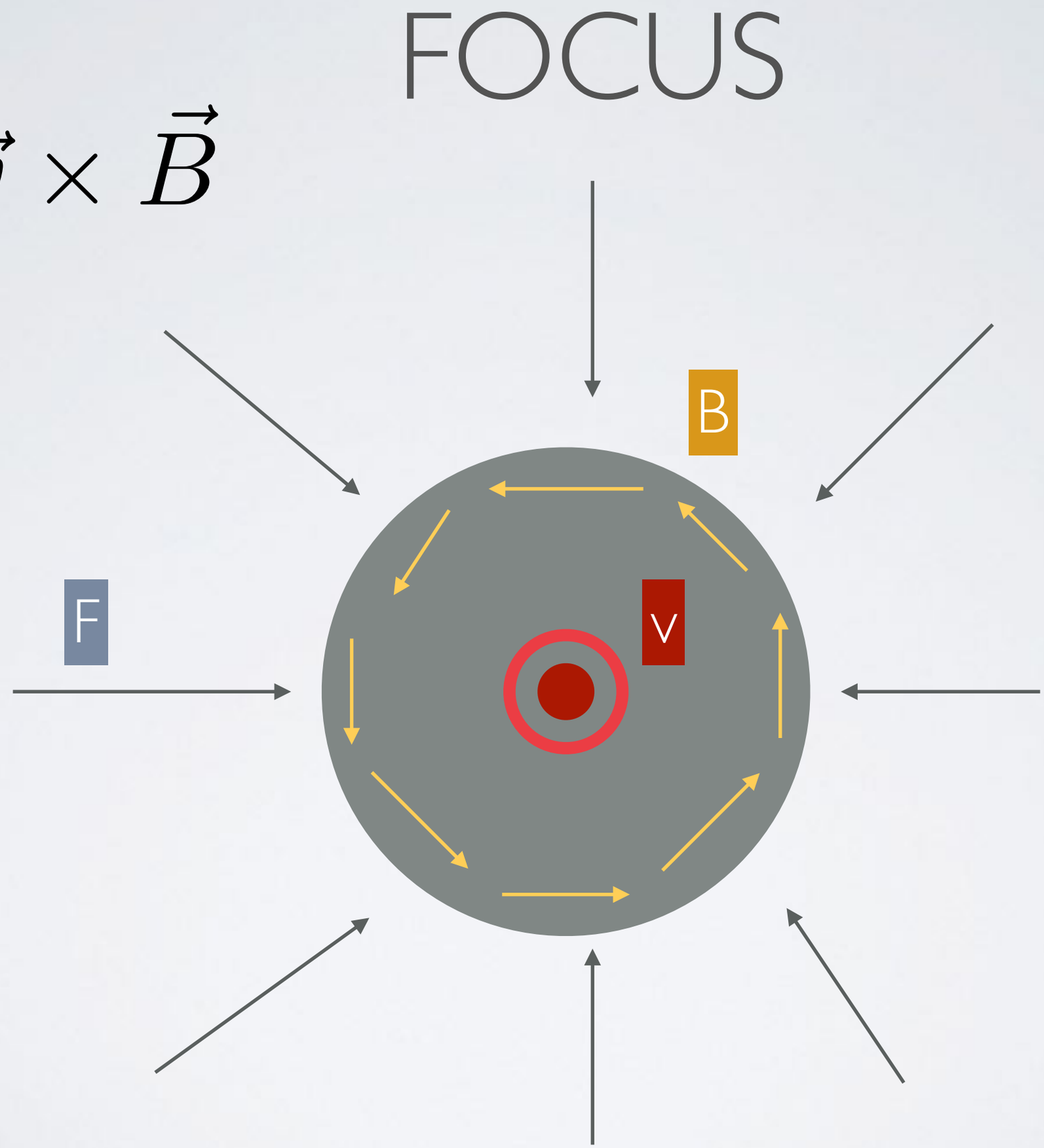


DEFOCUS

- ประจุที่มาเป็น Bunch มัน แบบเดียวกัน
- ผลักกัน
- สักพักจะ บานออก

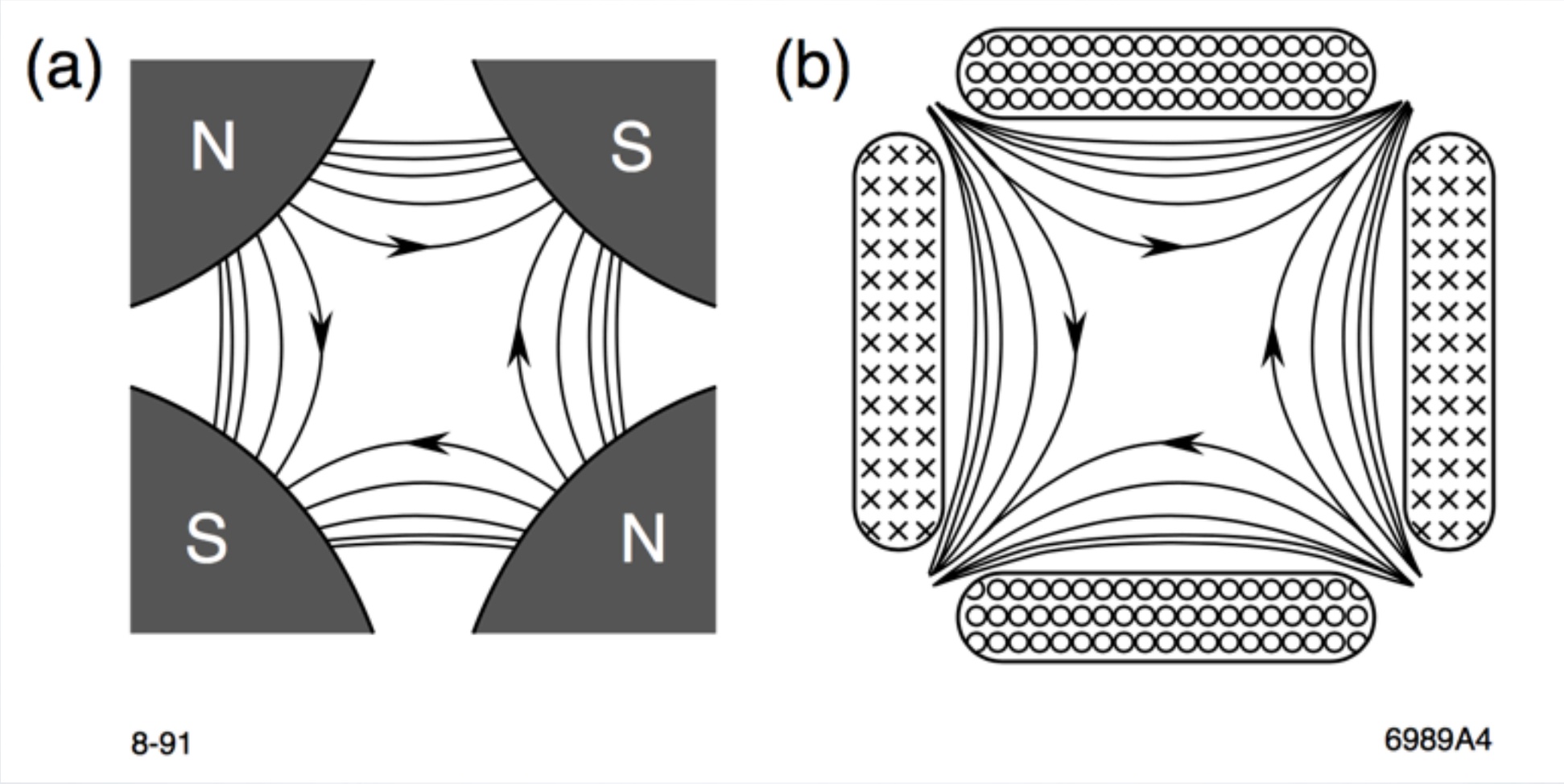


$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$



QUADRUPOLE

ไม่สามารถ engineer สนามแม่เหล็กแบบนั้นได้ อันนี้ใกล้เคียง บีบแกนนึง บานออกอีกแกน ถ้าทำจังหวะ ถูก ๆ ก็จะ Focus ได้ พอสมควร

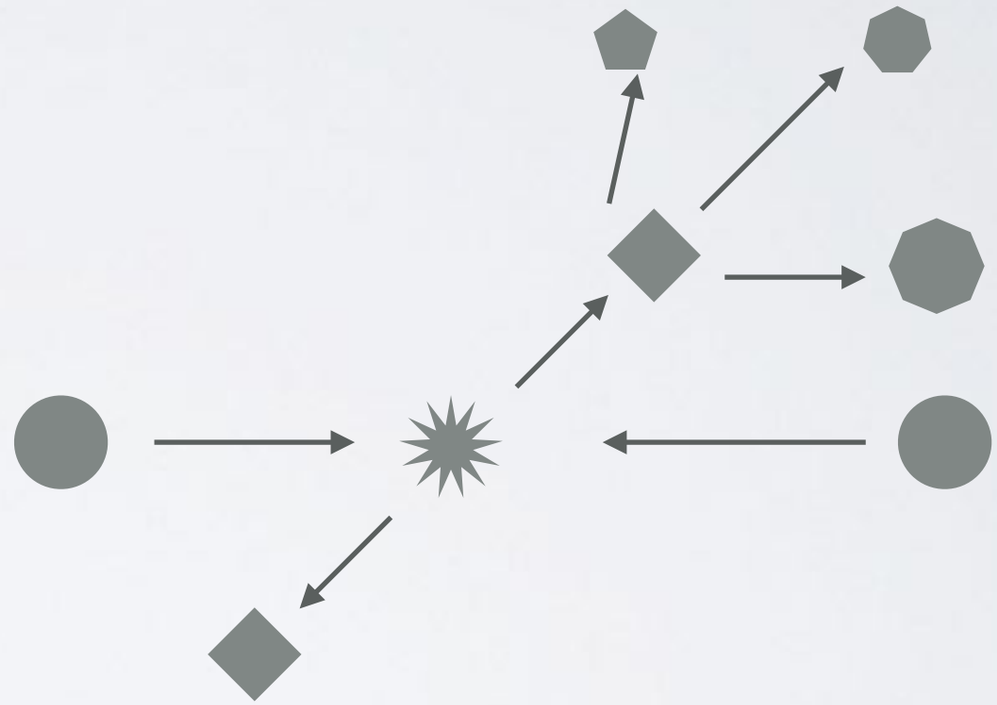


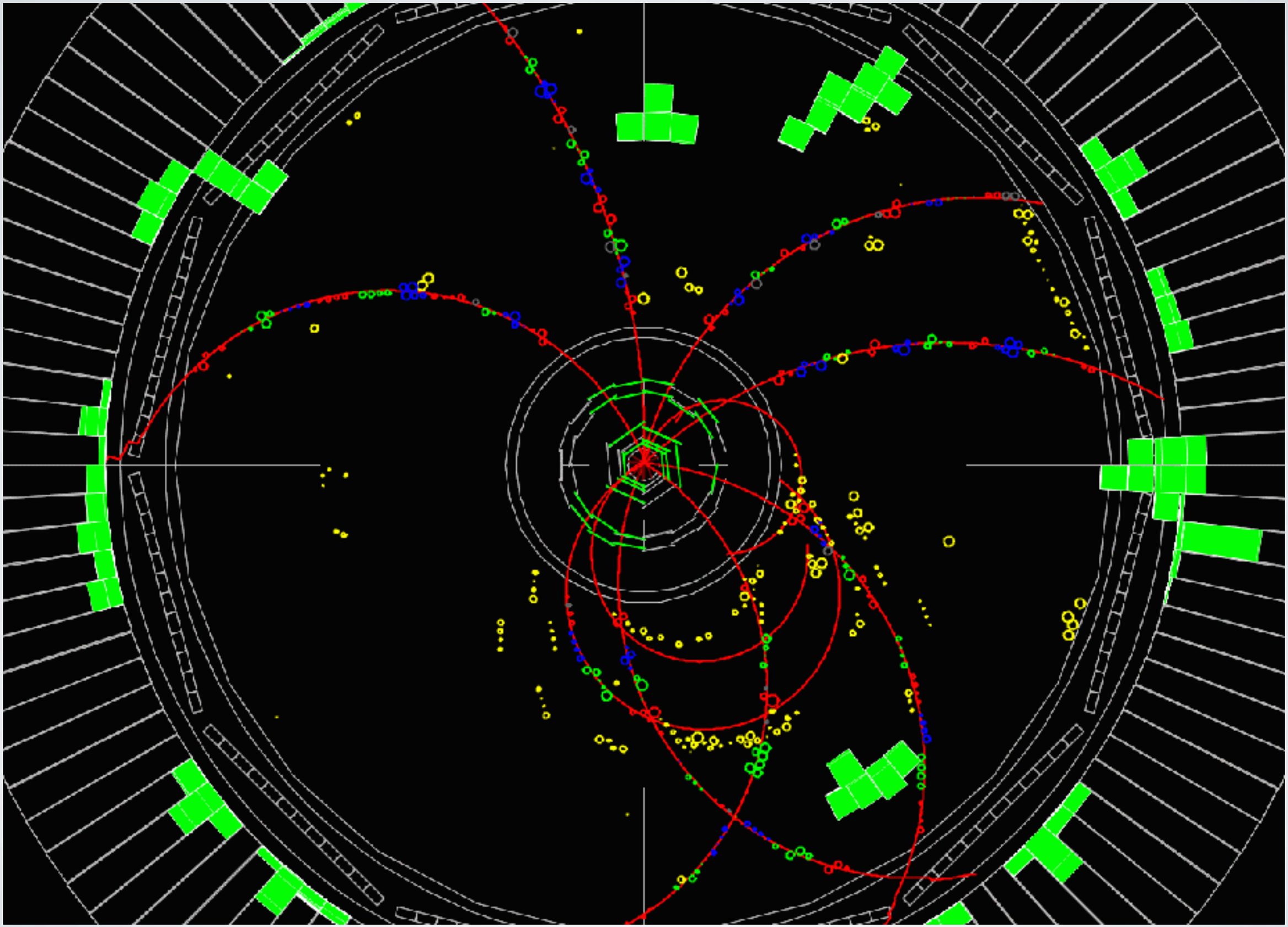
สรุปย่อ

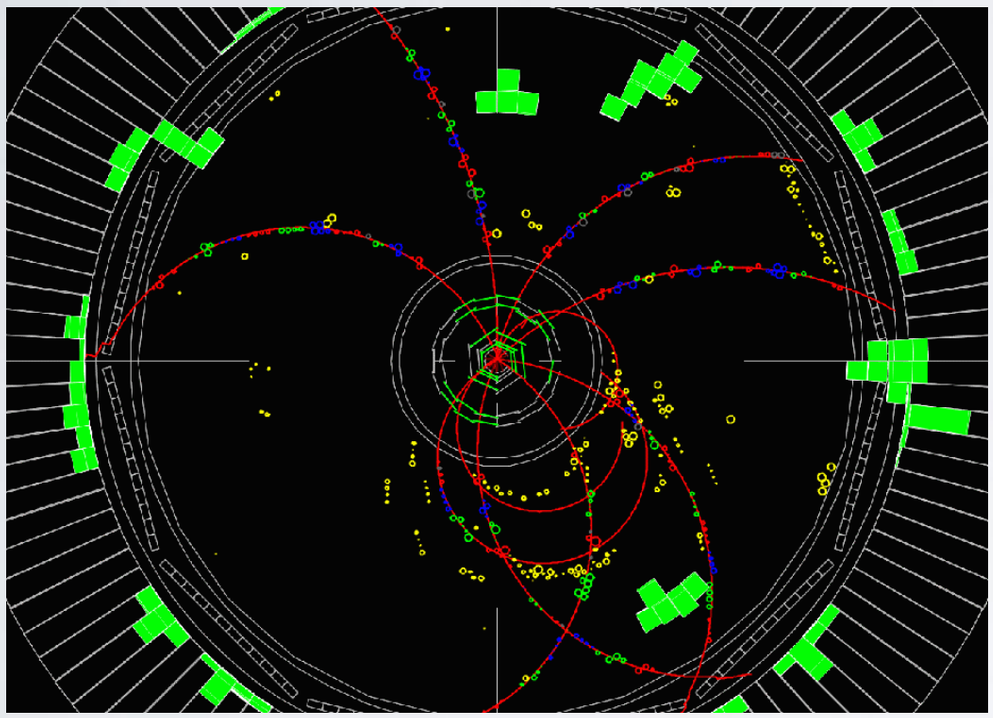
- เอามาจากไหน - Thermionic Emission, H_2
- เร่งยังไง - Static Electric Field, RF Cavity
- ทำไมต้องกลม - ไม่งั้น เปลือง
- ทำไมต้องใหญ่ - ทำแม่เหล็กได้แค่นั้น
- Focus ยังไง - Quadrupole, Sextupole Magnet

เครื่องตรวจวัดอนุภาค

- อนุภาคเกิดตรงไหน
- สิ่งที่ออกมา
- ขนาดของโมเมนตัม
- ทิศทางของโมเมนตัม
- พลังงาน เท่าไหร่
- เป็นอนุภาคชนิดไหน





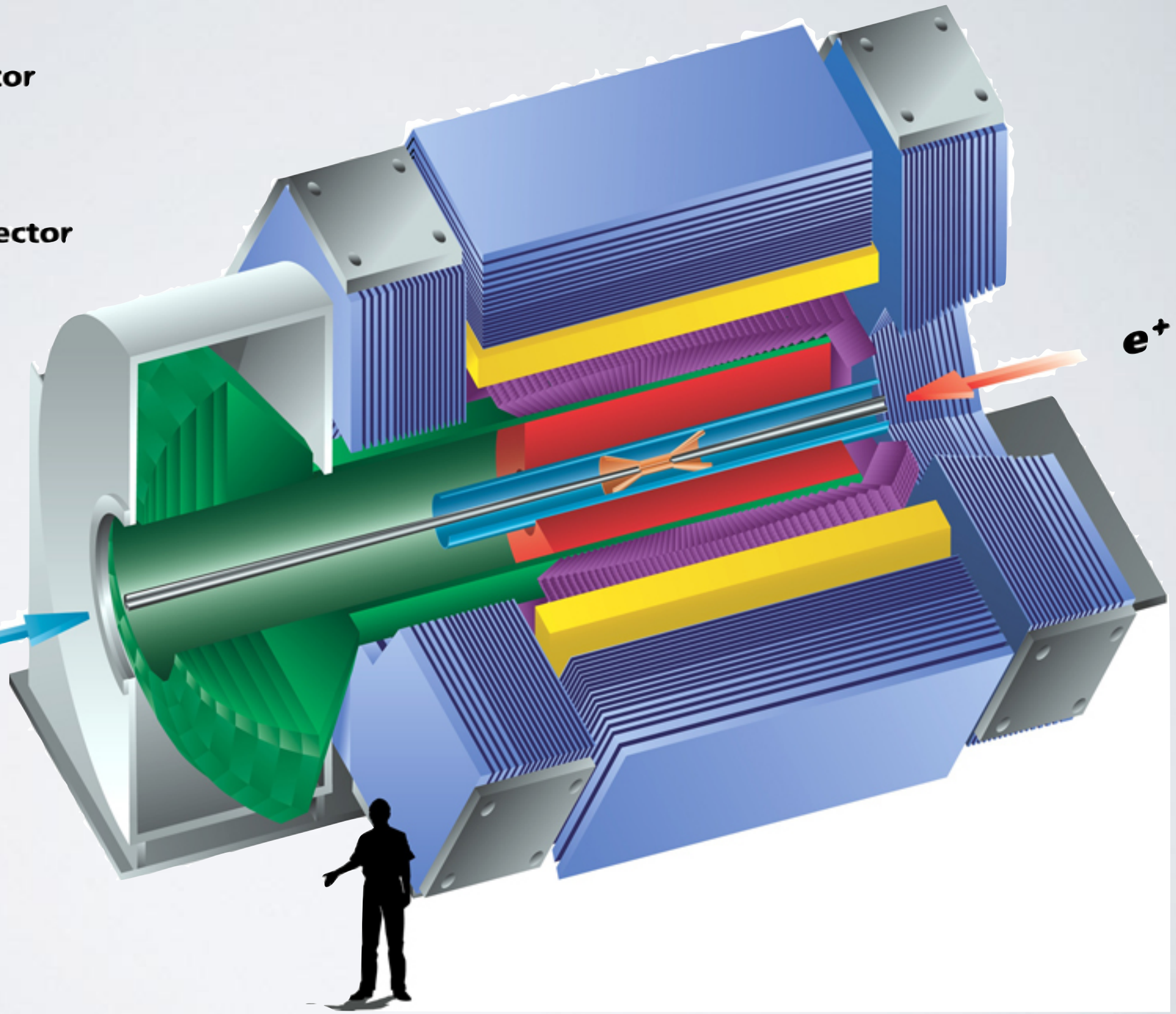


$$B^0 \rightarrow J/\psi + K_0$$

Note: Don't really know what this event is

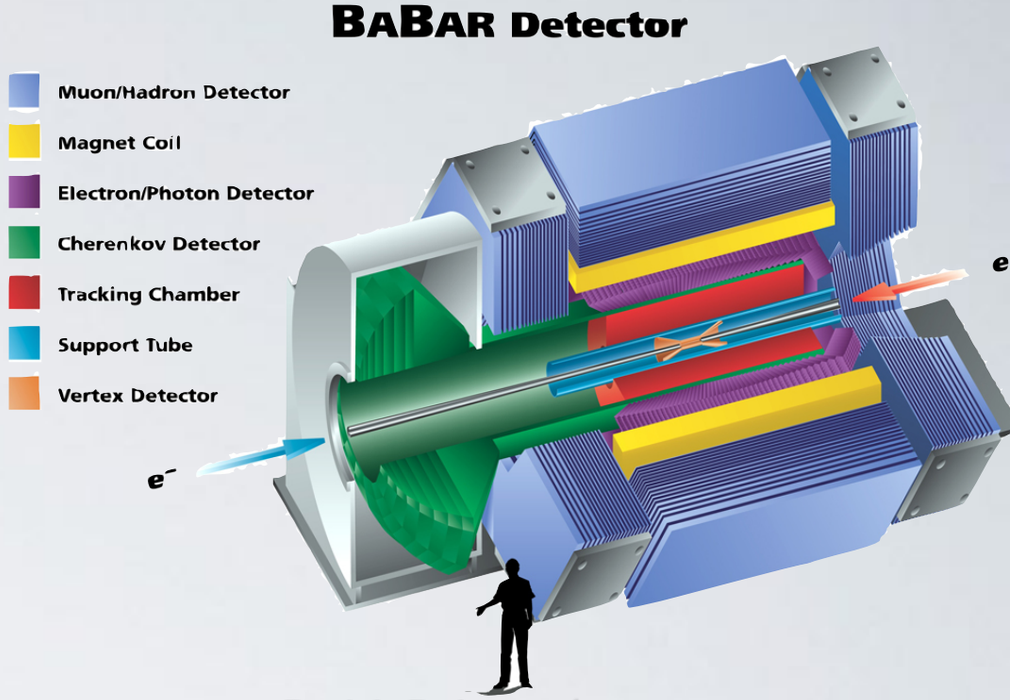
BaBar Detector

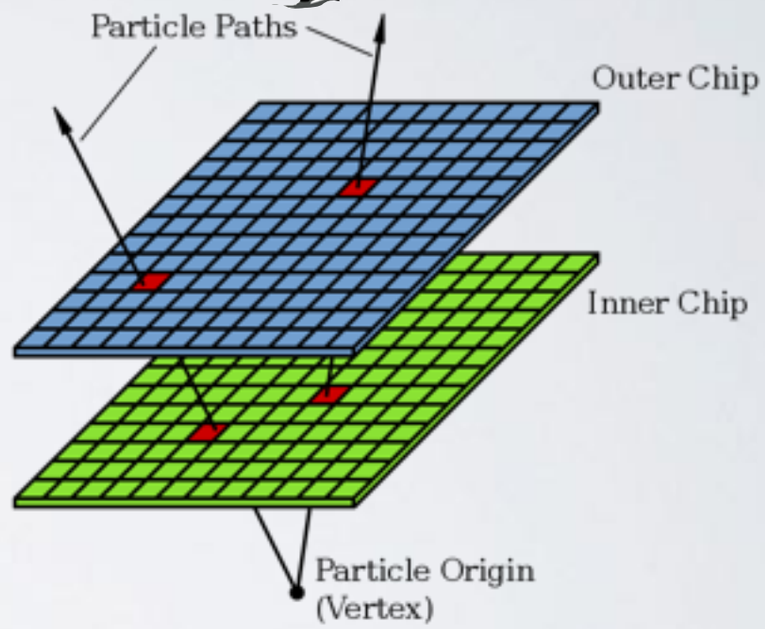
- Muon/Hadron Detector
- Magnet Coil
- Electron/Photon Detector
- Cherenkov Detector
- Tracking Chamber
- Support Tube
- Vertex Detector

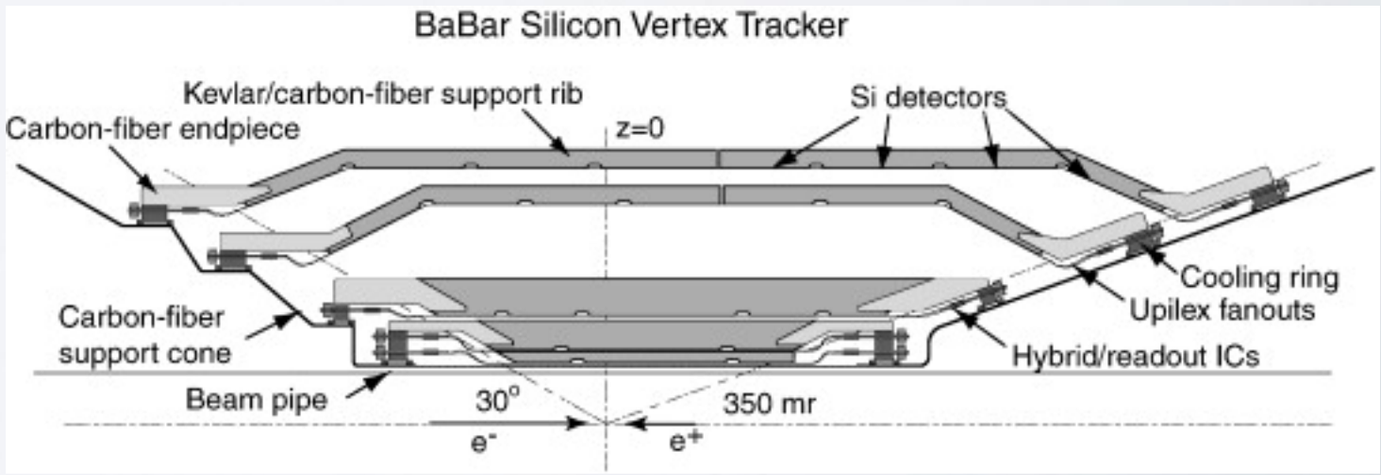


VERTEX DETECTOR

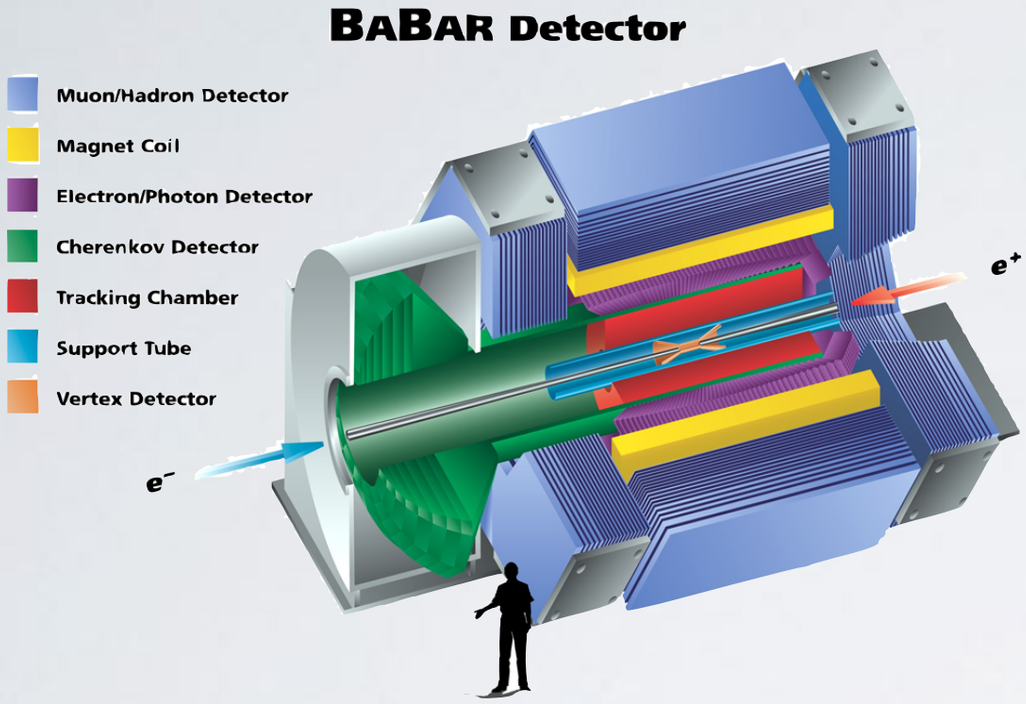
- กล้อง Digital ซ้อนกันหลาย ๆ อัน
- Pixel เยอะ
- บอกทางเดิน particle ได้แม่นยำมากมาก
- ทิศทางของโมเมนตัม



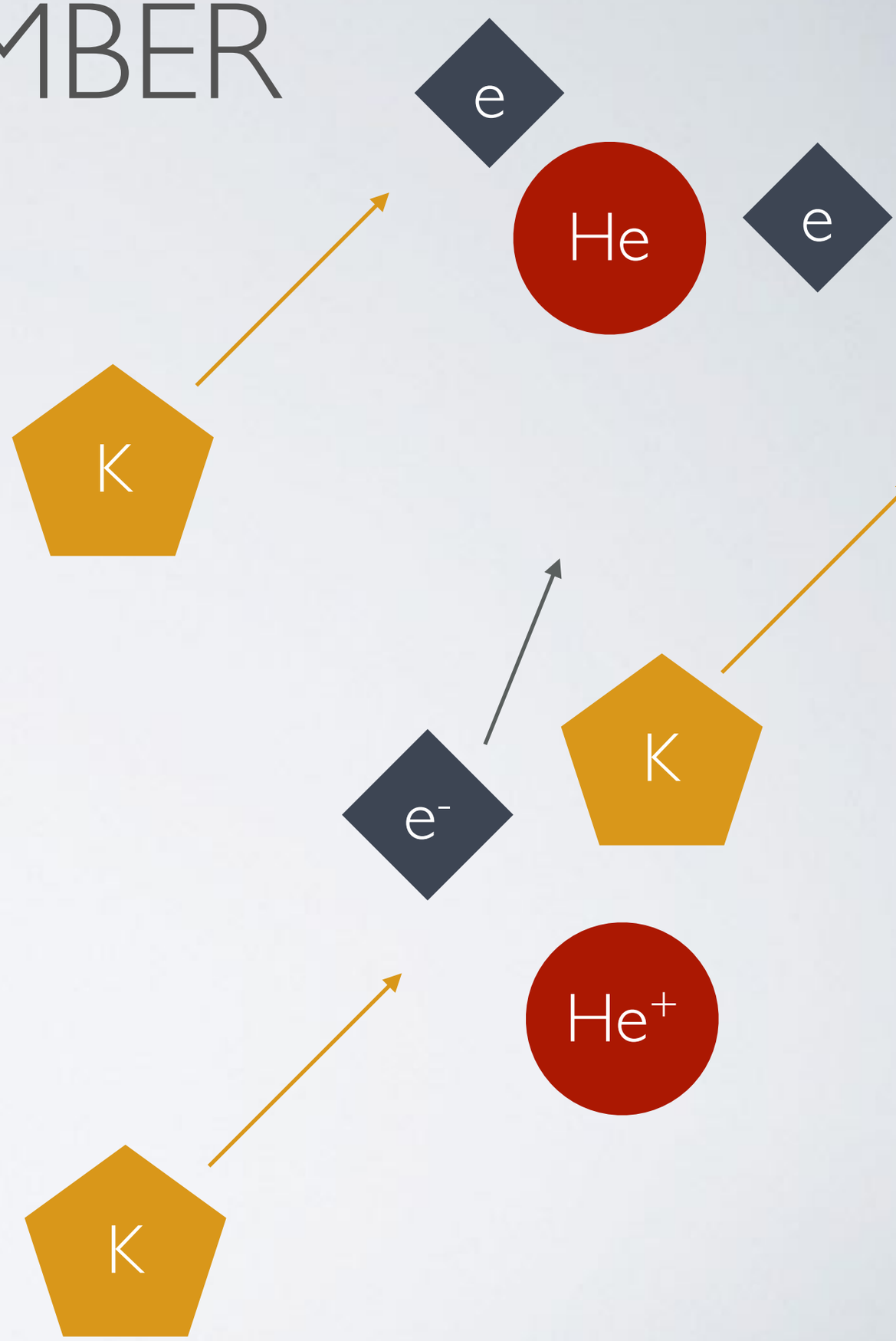




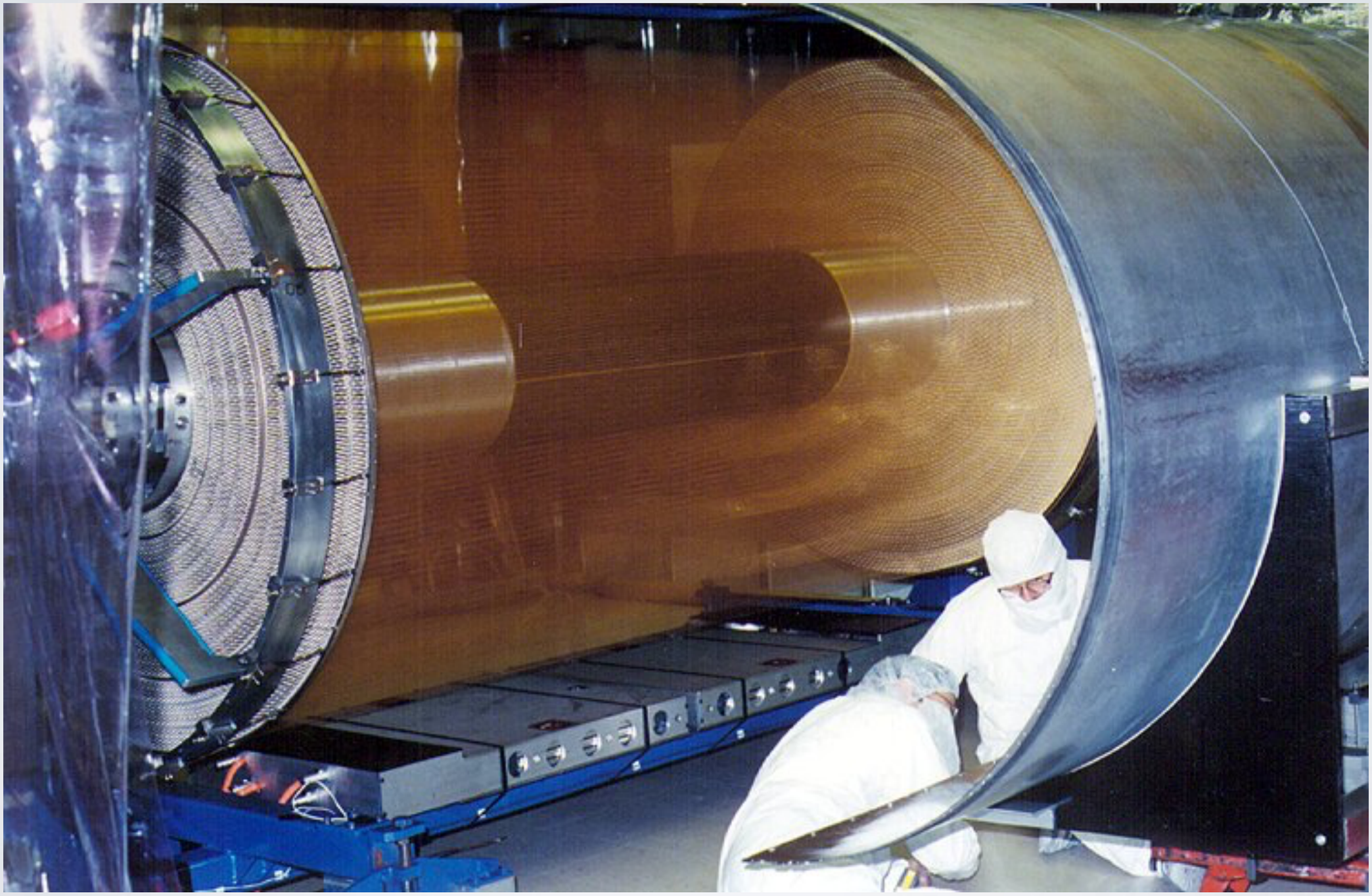
TRACKING CHAMBER



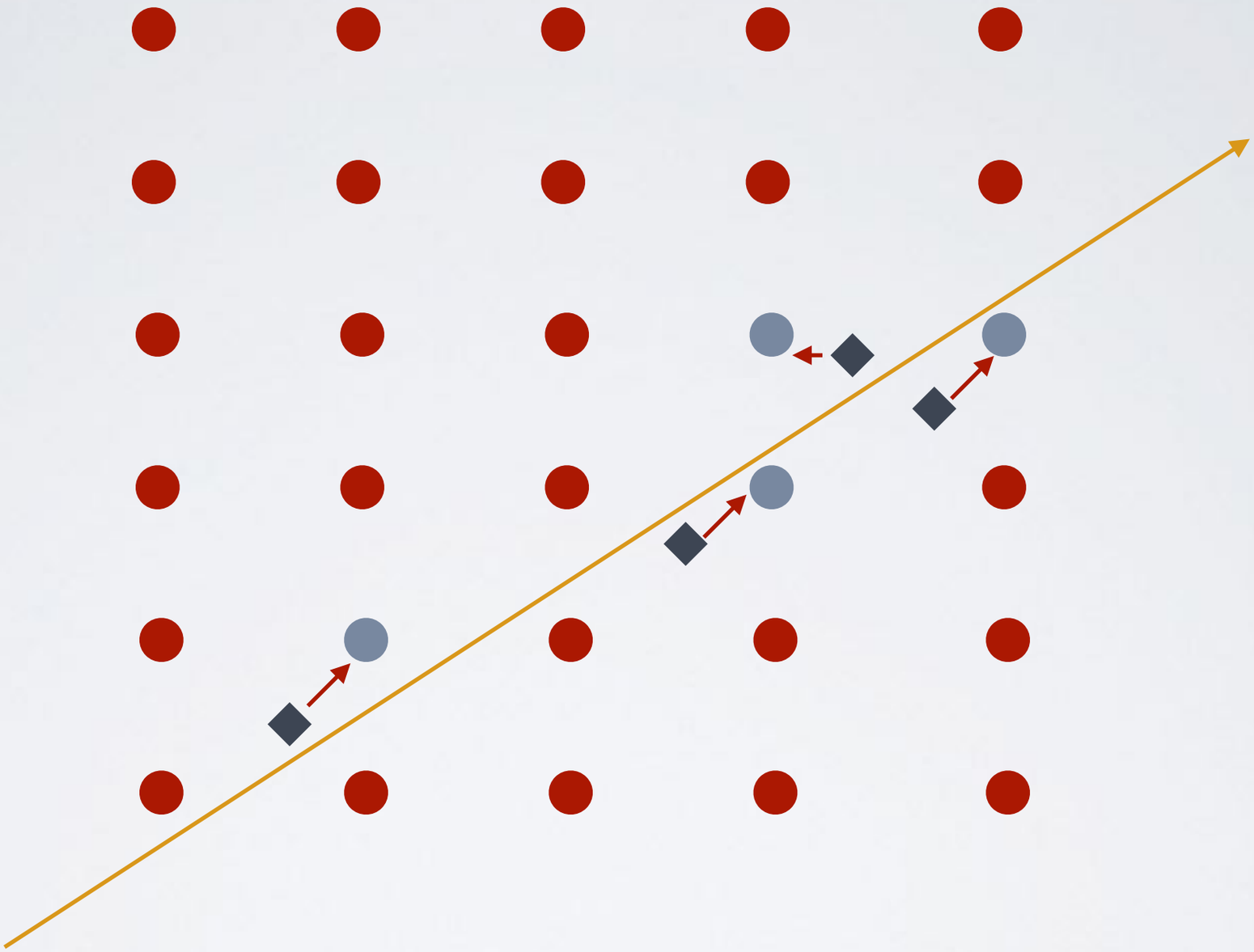
- Drift Chamber
- Helium Gas
- Particle เตะ Electron ออกจาก Gas
- Electron ที่ถูกเตะออก วิ่งไปหาสายไฟ
- สายไฟ register electron ที่วิ่งมาชน



SENSE WIRE



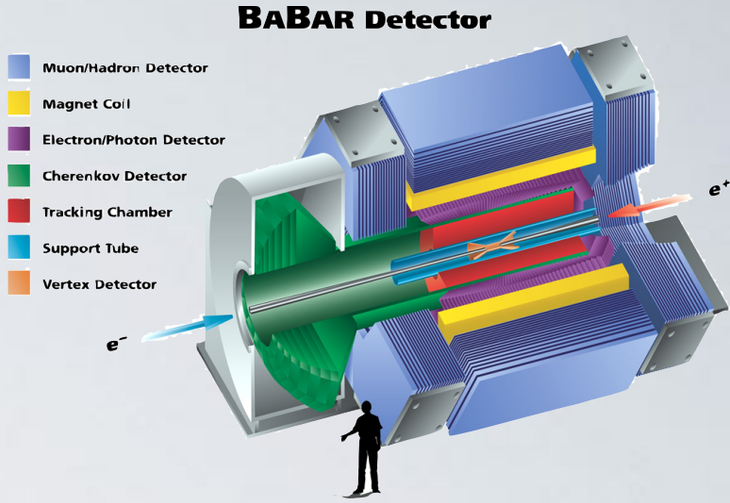
สายไฟ

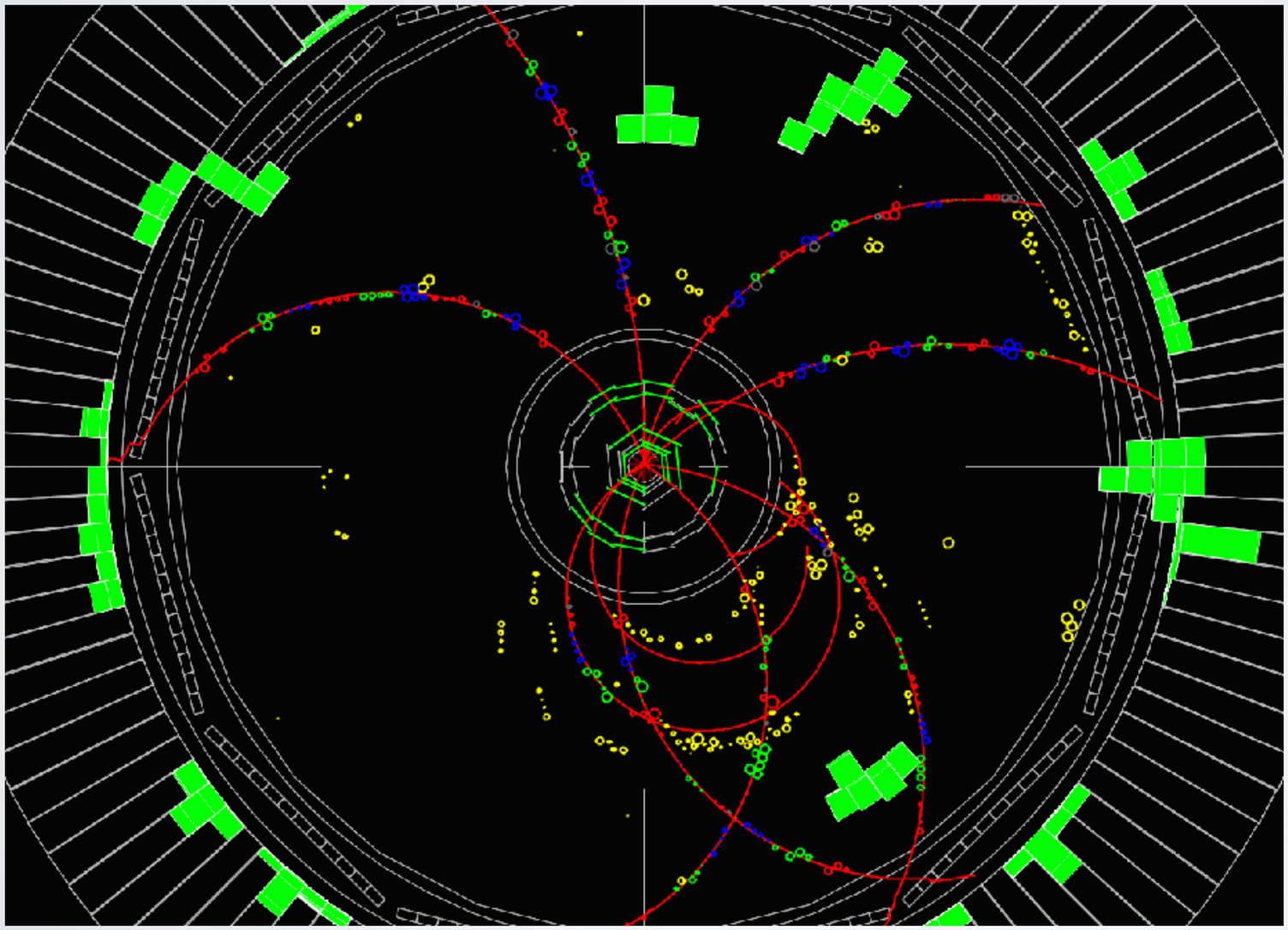


K

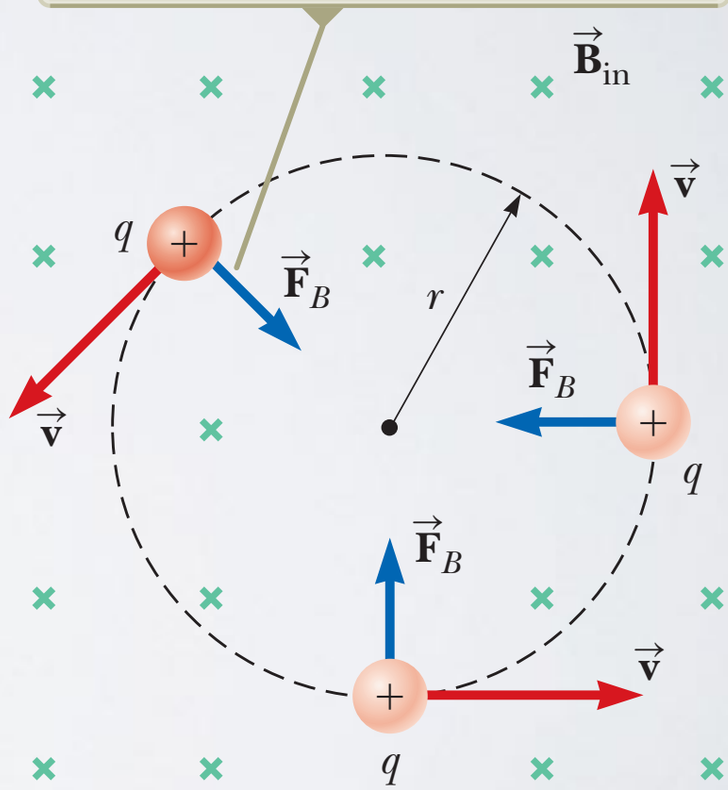
จริง ๆ แล้วบางเส้นก็ V บวก บางเส้นก็ V ลบ

แต่มันโค้ง!!??!!!



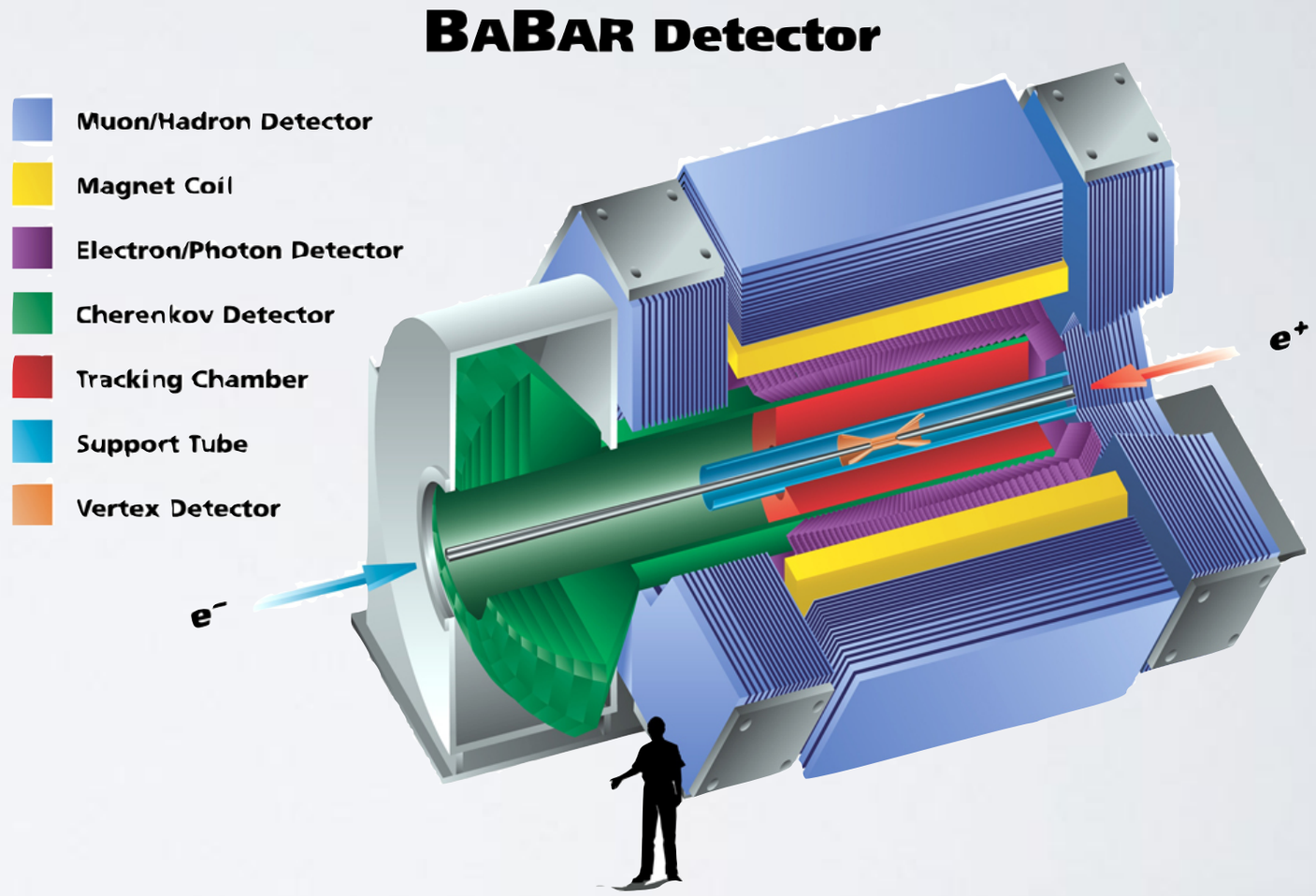


The magnetic force $\vec{\mathbf{F}}_B$ acting on the charge is always directed toward the center of the circle.



TRACKING CHAMBER

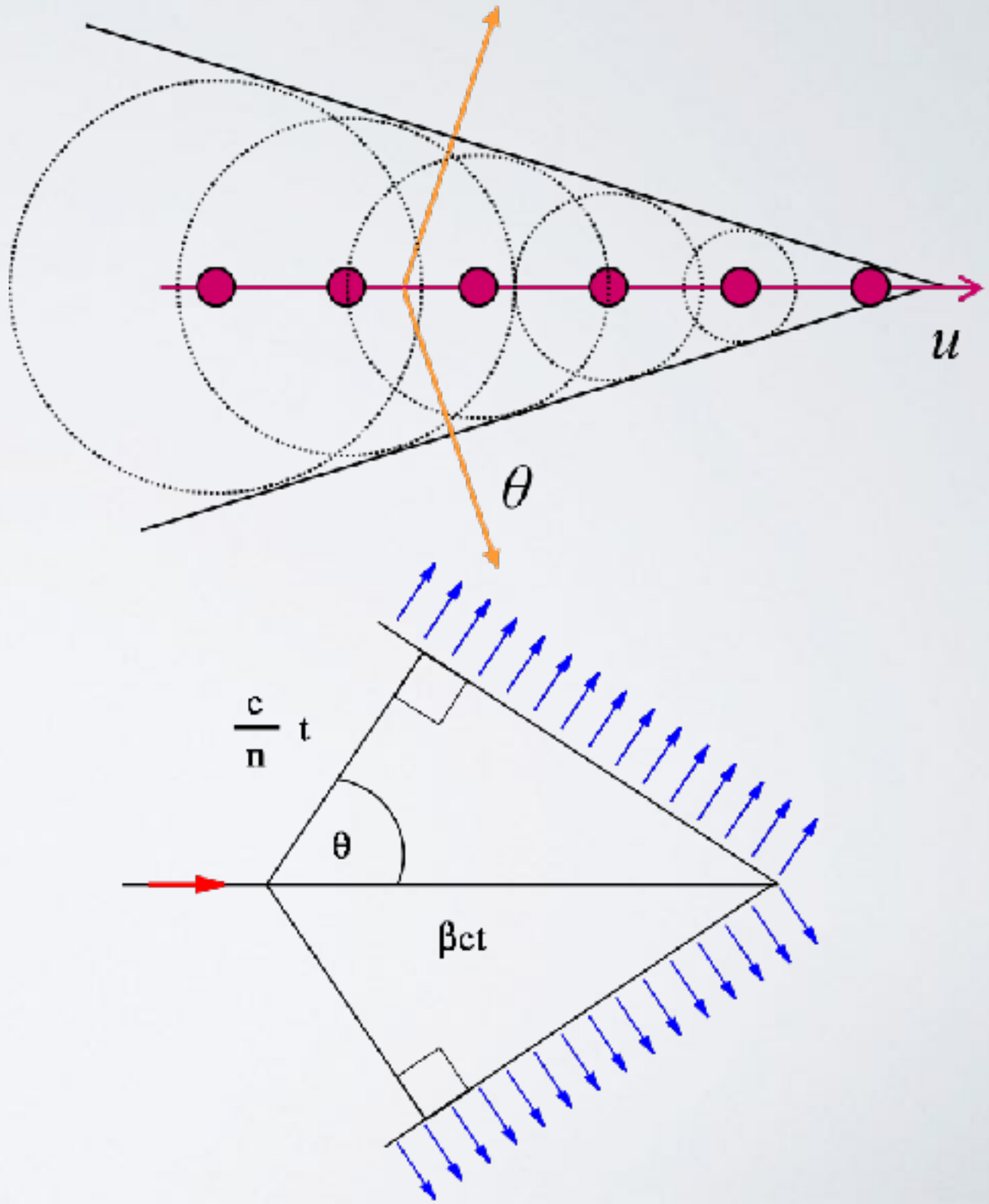
- มีแม่เหล็กอยู่รอบ ๆ
- วัดโมเมนตัมได้
- และจริง ๆ มันเอาไว้วัดขนาดโมเมนตัมเป็นหลัก
- ของแถมคือประจุ

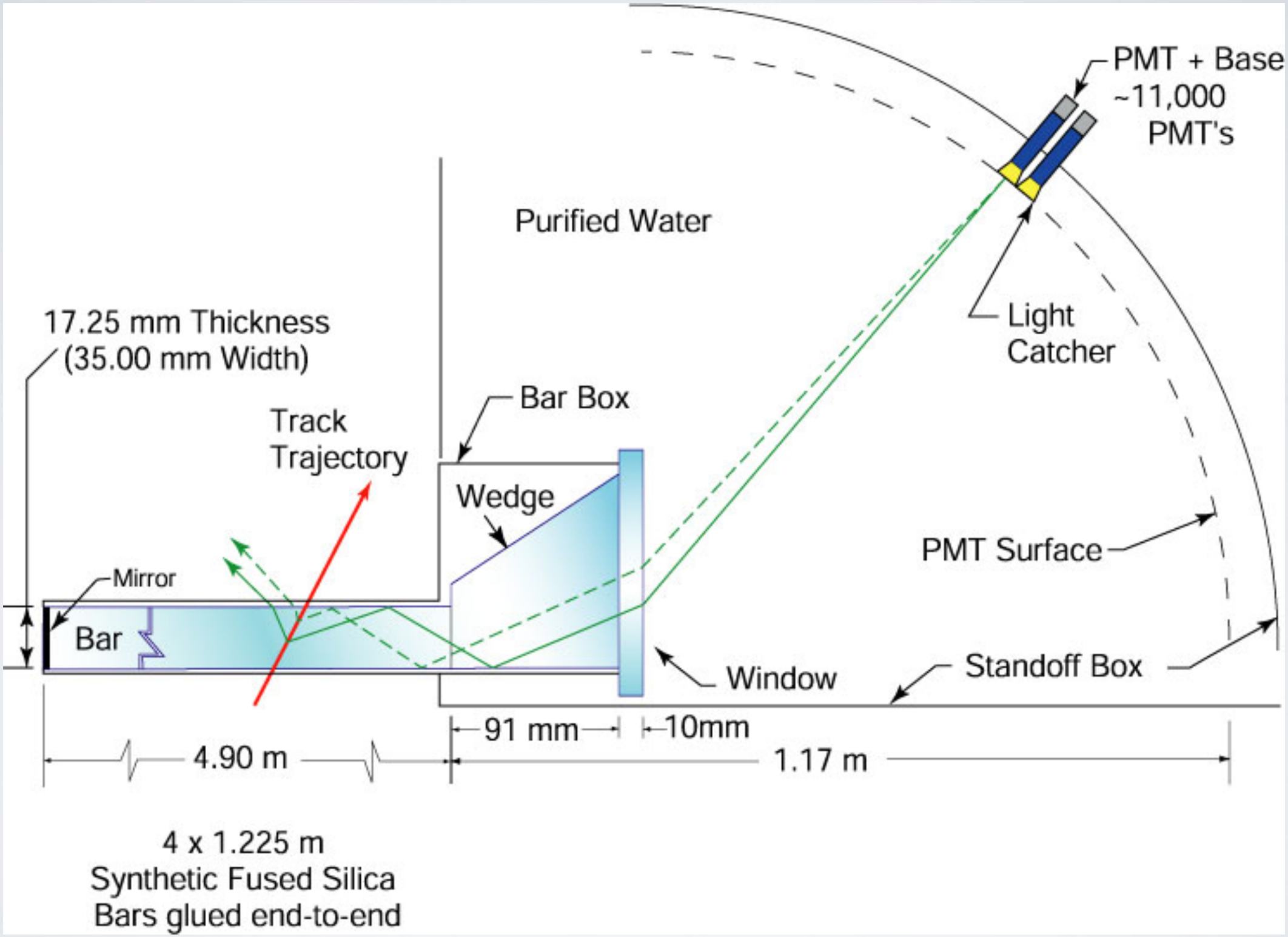


$$F_c = \frac{mv^2}{r} = qvB \qquad r = \frac{p}{qB}$$

CHERENKOV DETECTOR

- แล้วแต่ Experiment ว่าต้องใช้ไหม
- ใช้หลักการว่า อนุภาคเดินทางในตัวกลาง เร็วกว่าความเร็วแสงในตัวกลางนั้น จะปล่อยคลื่นแสงออกมา
- Sonic Boom ของ แสงนี่เอง
- มุมของโคนแสงบอกความเร็วอนุภาคได้




PMT + Base
~11,000
PMT's
Purified Water
17.25 mm Thickness
(35.00 mm Width)
Light
Catcher
Bar Box
Track
Trajectory
Wedge
PMT Surface
Mirror
Bar
Window
Standoff Box
91 mm
10mm
4.90 m
1.17 m
4 x 1.225 m
Synthetic Fused Silica
Bars glued end-to-end

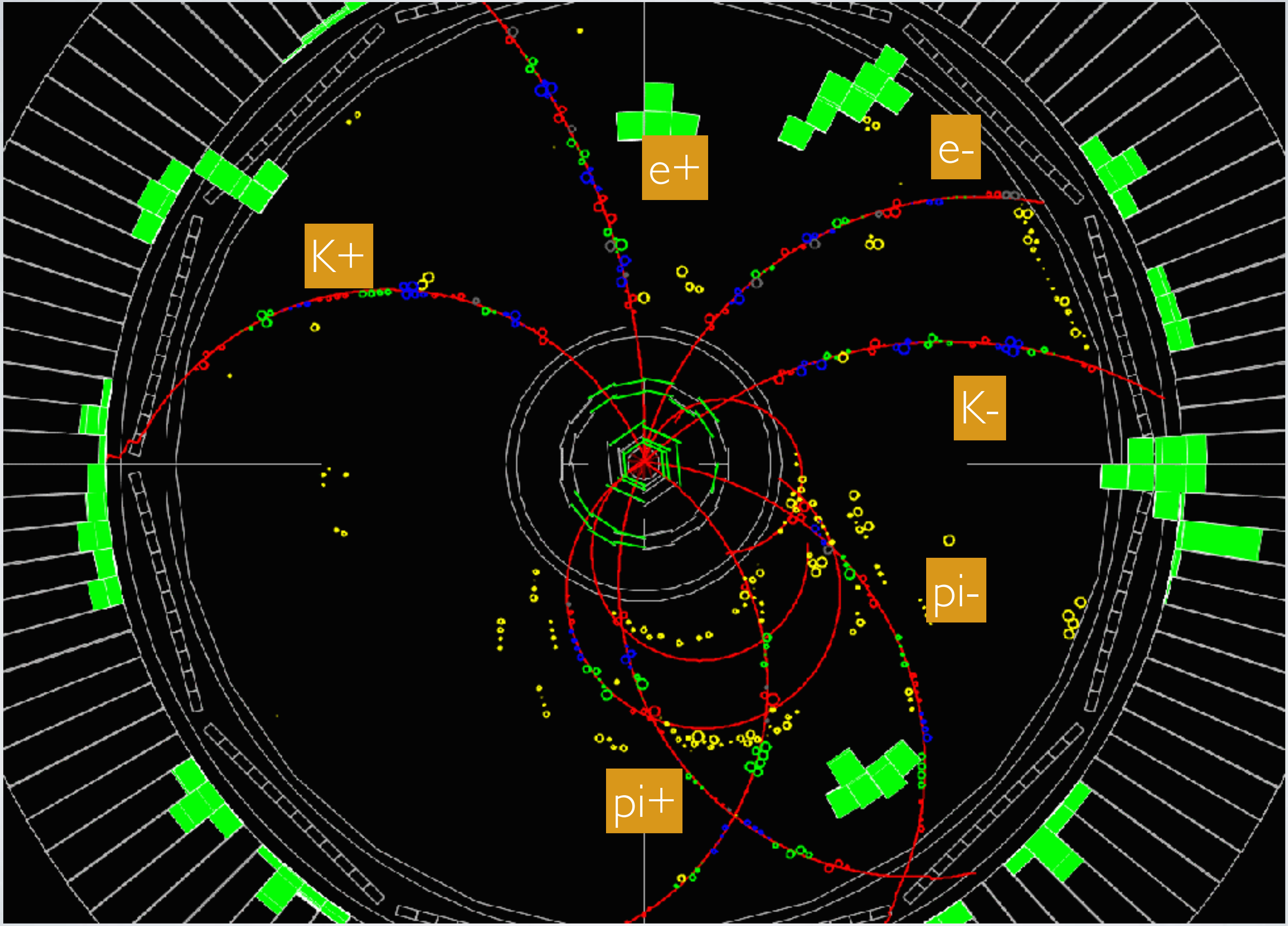
รู้ความเร็ว ไปทำไม

Momentum จาก Drift Chamber

&

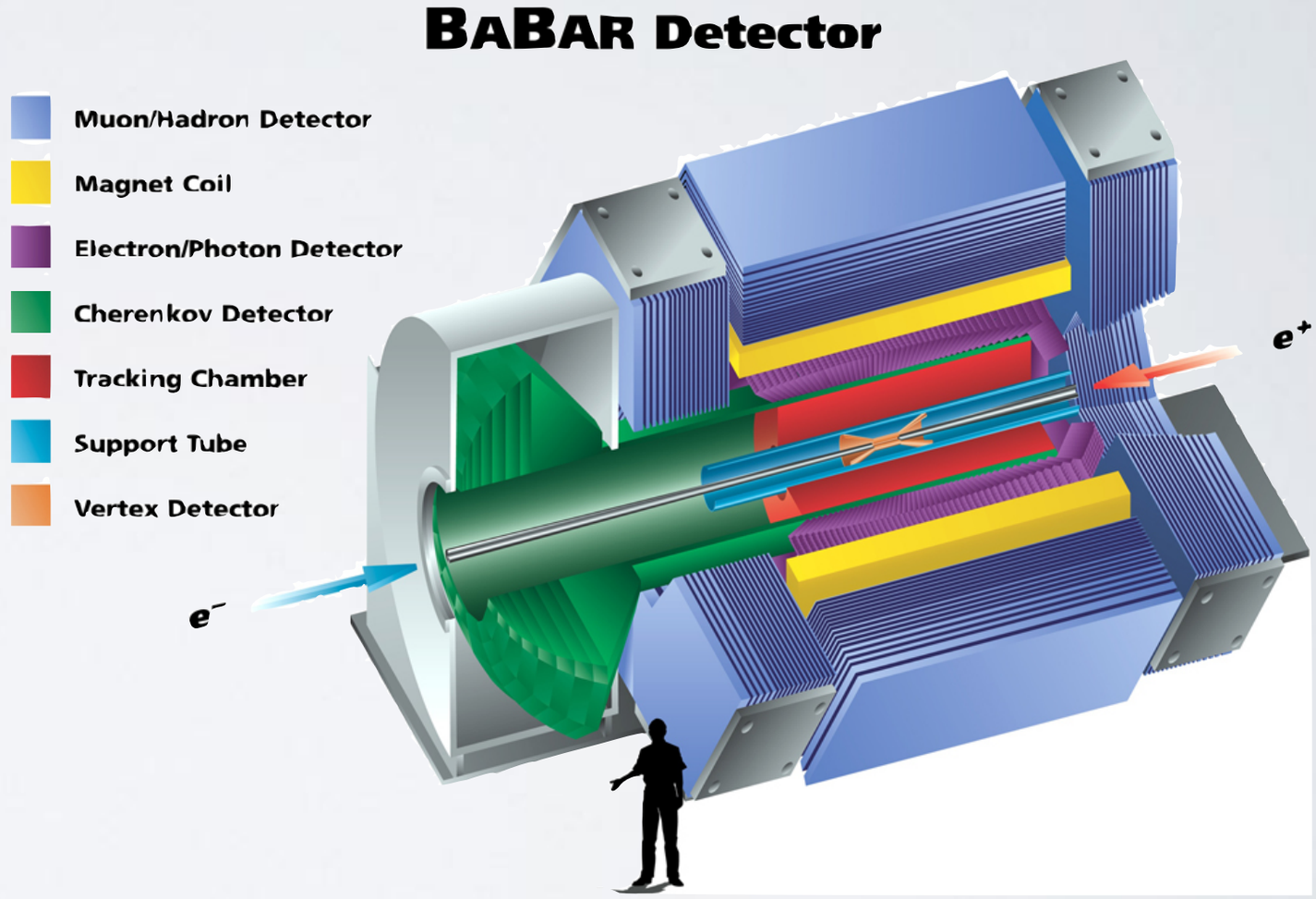
ความเร็ว จาก Cherenkov Detector

มวลของอนุภาค


e+
e-
K+
K-
pi-
pi+

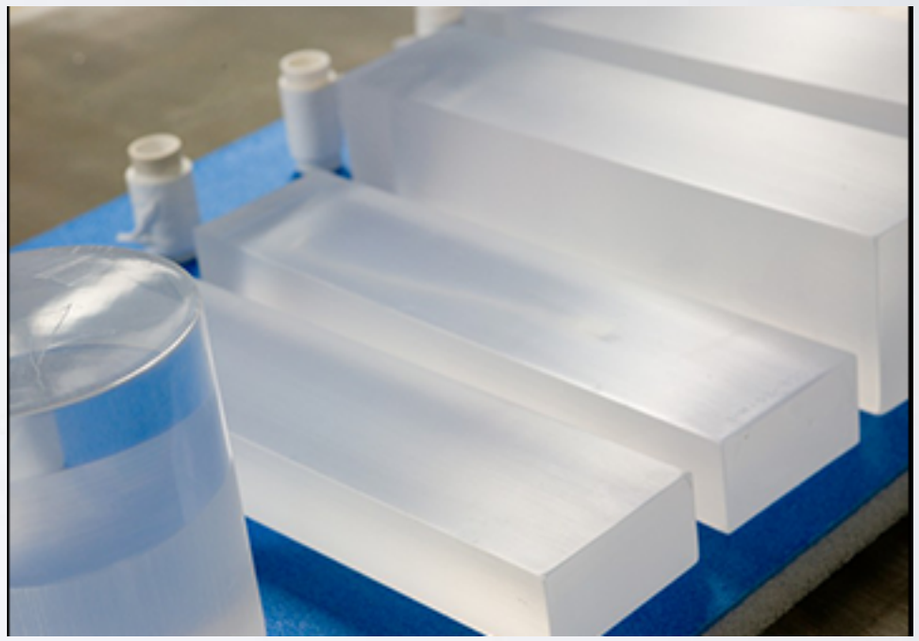
ELECTROMAGNETIC CALORIMETER

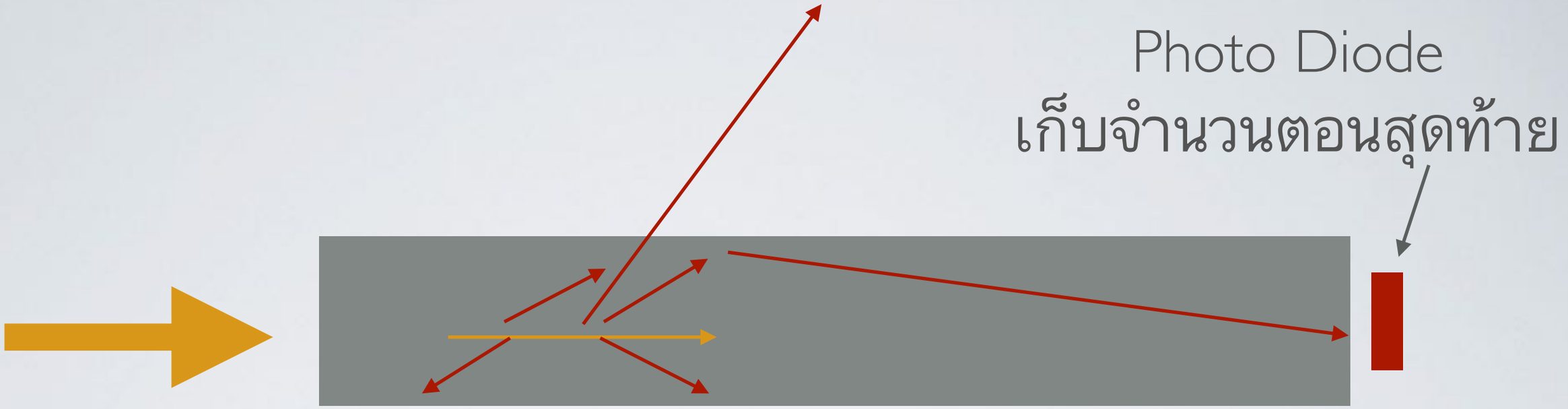
- Photon หลุดรอดแทบทุกอย่าง เพราะไม่มี ประจุ
- ต้องมี Photon Detector



SCINTILLATION

- หลักการคือ เอา material ที่ dense
- ทึบ ในย่านความถี่ที่เรากะว่าจะวัด
- ใส ในย่านที่แสงที่เราวัดได้
- วัดแสง ในย่านความที่ visible เรา ใช้ diode ทำได้



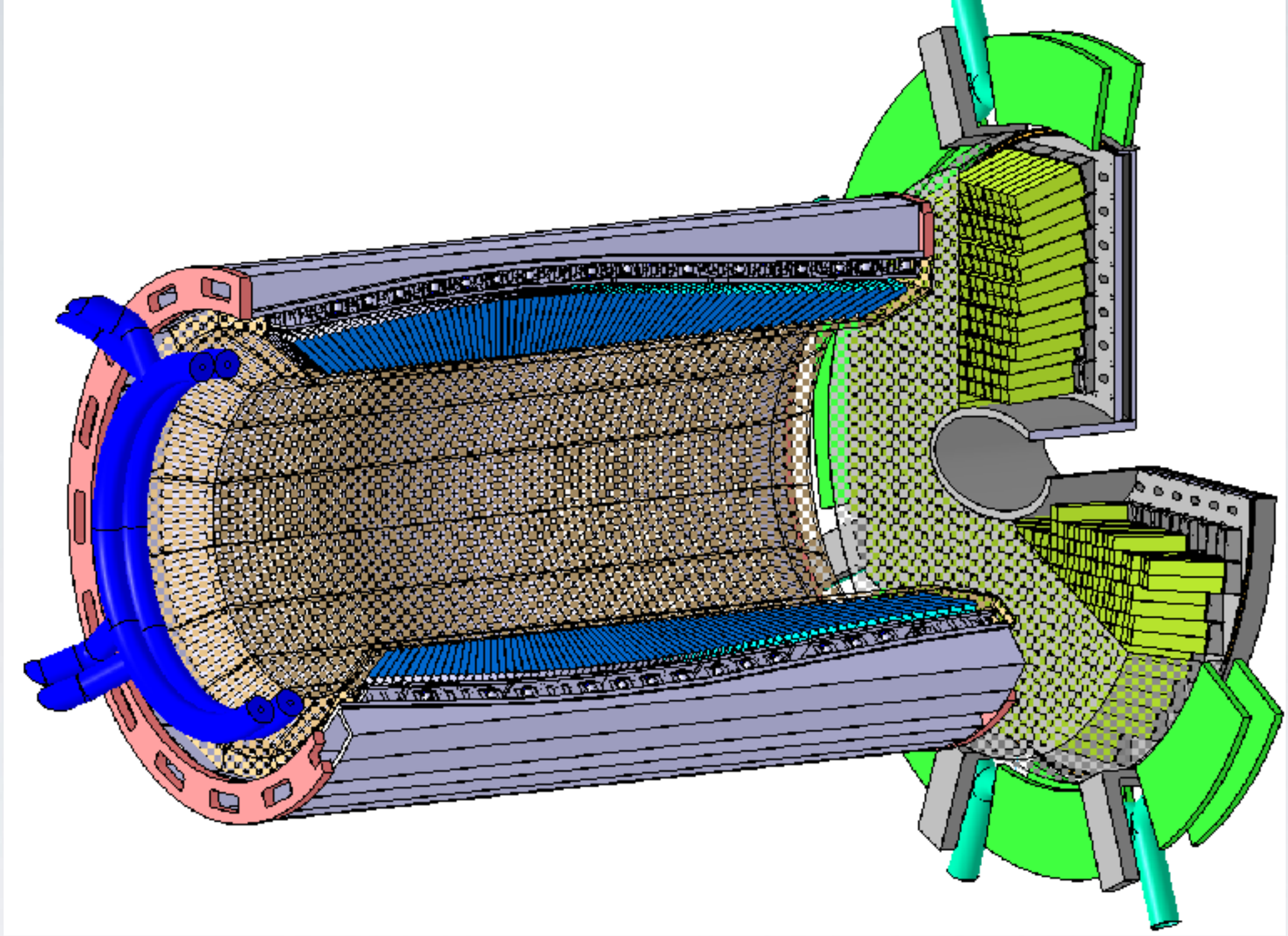


High Energy Particle

Deposit Energy

Convert to visible

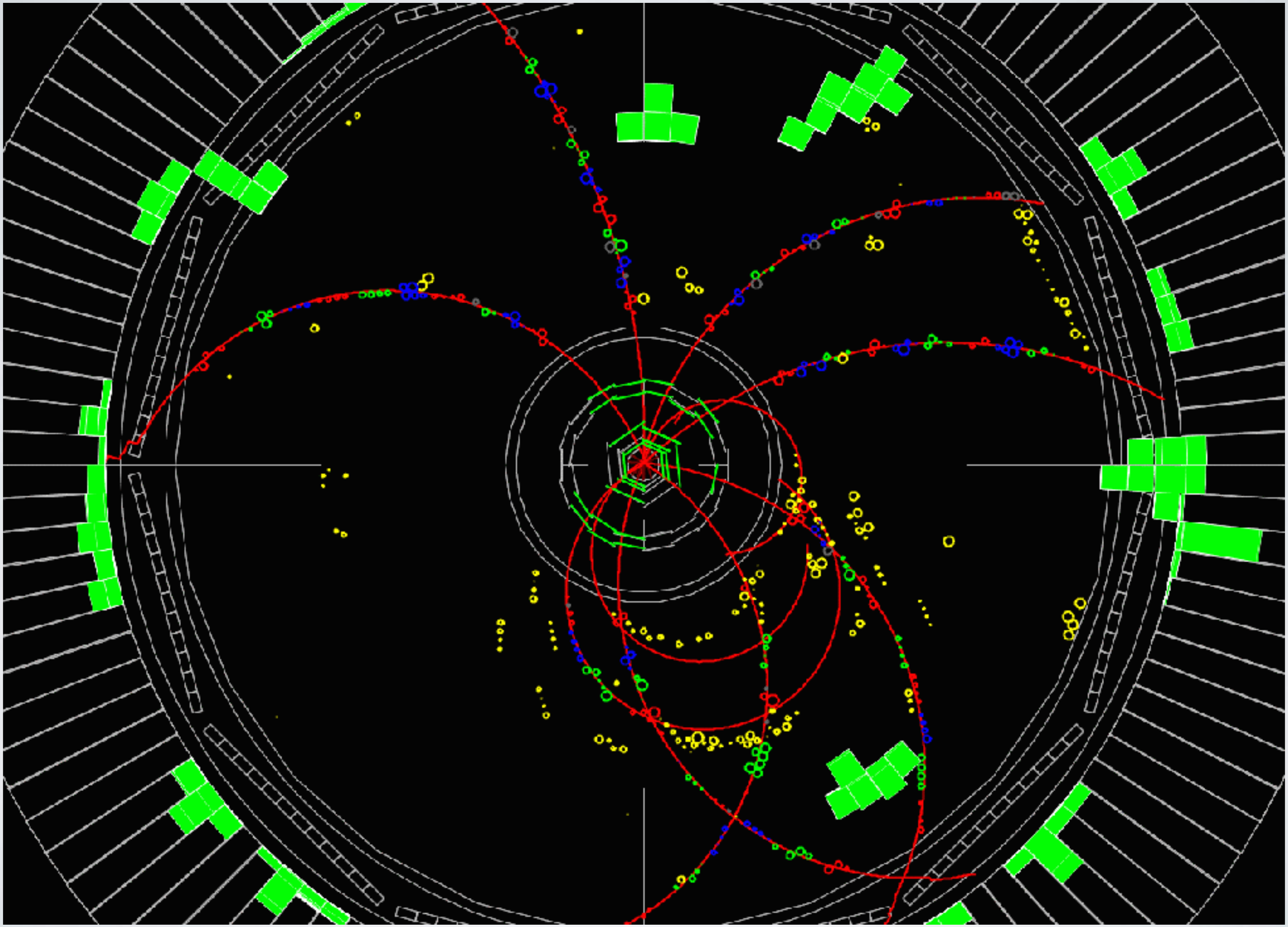
- อนุภาค/Photon พลังงานสูงเข้ามา
- ชนกับทุกอย่างที่มี ใน Crystal ทิ้งพลังงานไว้ excite Crystal molecule
- Crystal ปล่อยคืนออกมา ในย่าน Visible
- บางส่วนสะท้อน ใน Crystal แล้วไปถึง Photo Detector สุดท้าย
    - เหมือน ccd กล้อง Digital แต่ Sensitive กว่ามากมากมาก และ แพงมาก
- นับตอนสุดท้ายได้ Photon ในย่าน Visible เท่าไหร่
- จำนวน Photon แปรผันค่อนข้างตรงกับ พลังงาน



มีเยอะมาก

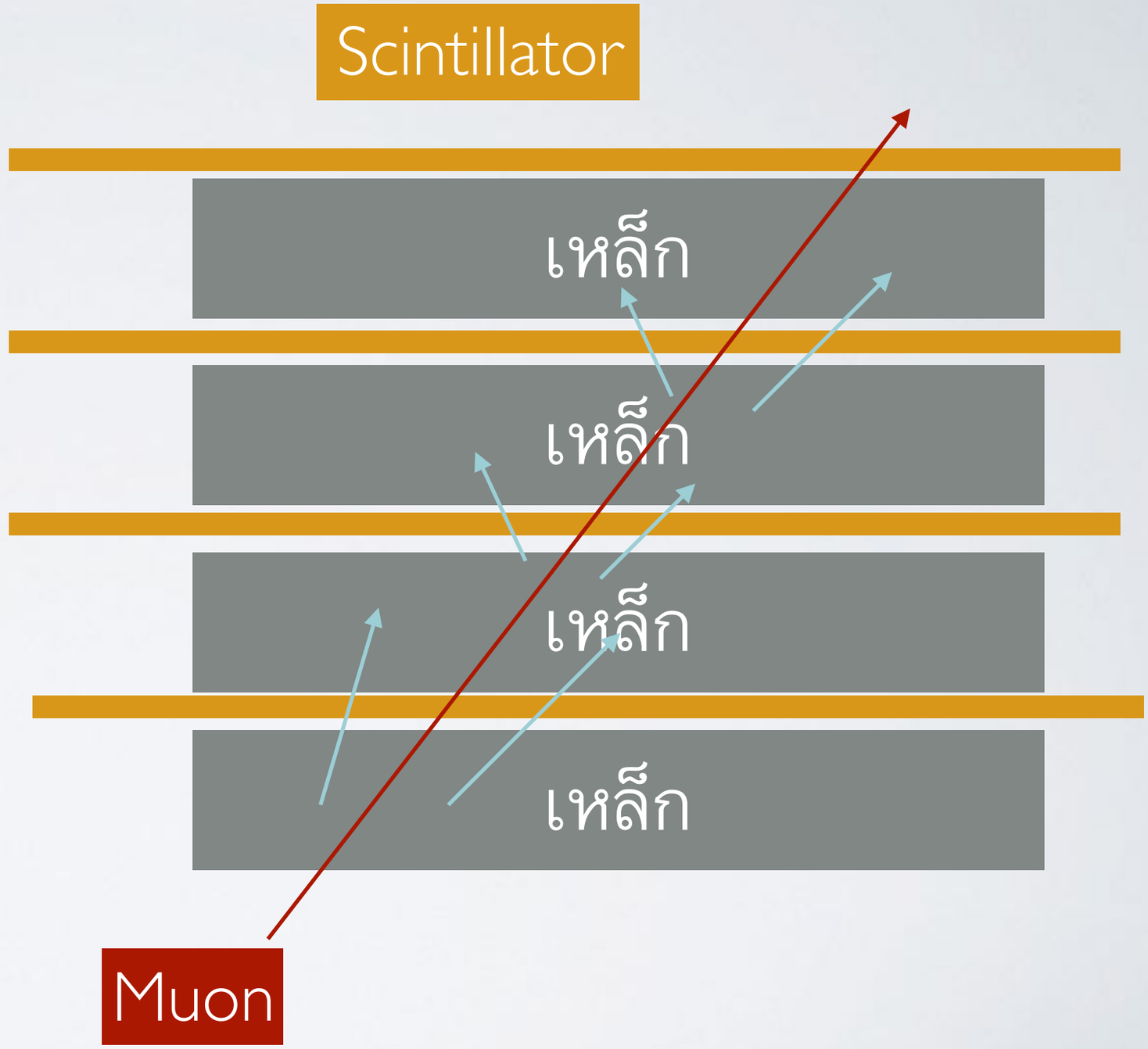
BaBar มี 5,760 ชุด CMS 61,200

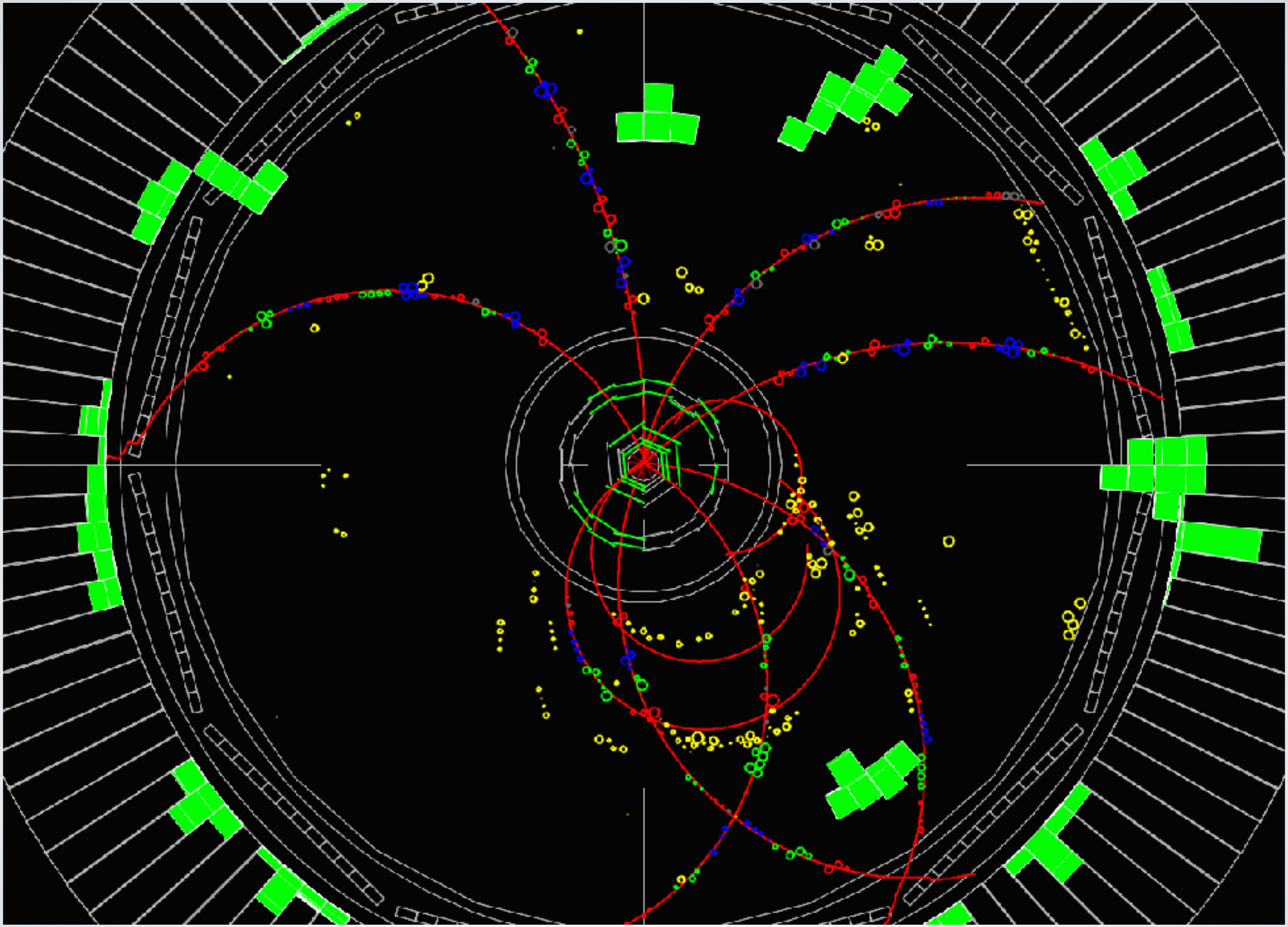
รูปมาจาก PANDA



MUON/HADRON DETECTOR

- Muon + Long Live Hadron
- มันหนัก เวลาชน Scintillation Crystal Particle ไม่รู้สึกอะไร
- ไม่ทิ้งพลังงานอะไรไว้มาก
- เลยต้องมีของที่ หนาแน่นมาก ๆ
- มีของ ให้ชนเยอะ หลบไม่ได้
- ชนแล้วเกิด Shower ของ Charge particle ซึ่งตรวจจับด้วย Scintillator

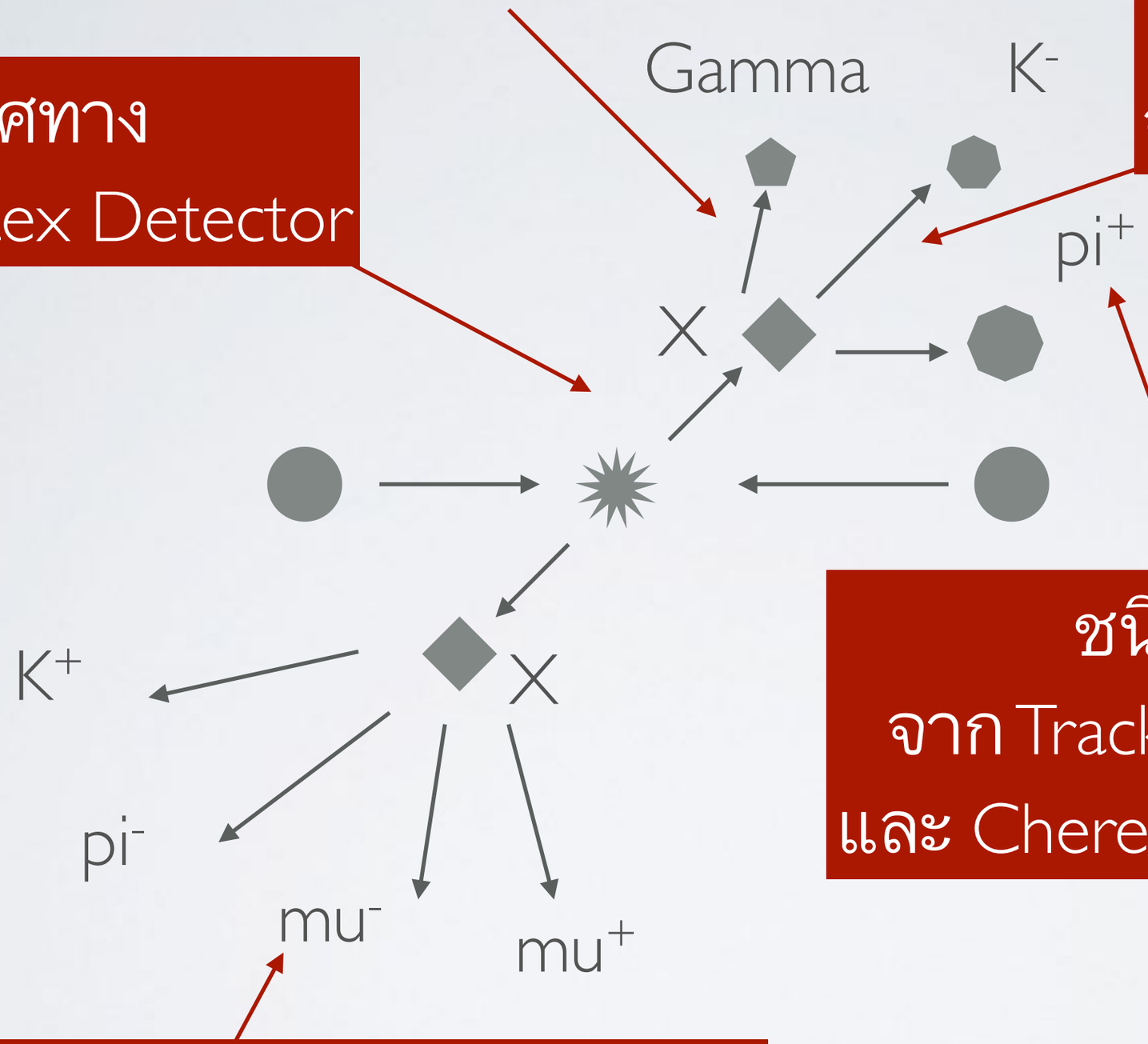




พลังงานของ Photon
จาก Electromagnetic Calorimeter

ทิศทาง
จาก Vertex Detector

ขนาด Momentum
จาก Tracker Chamber

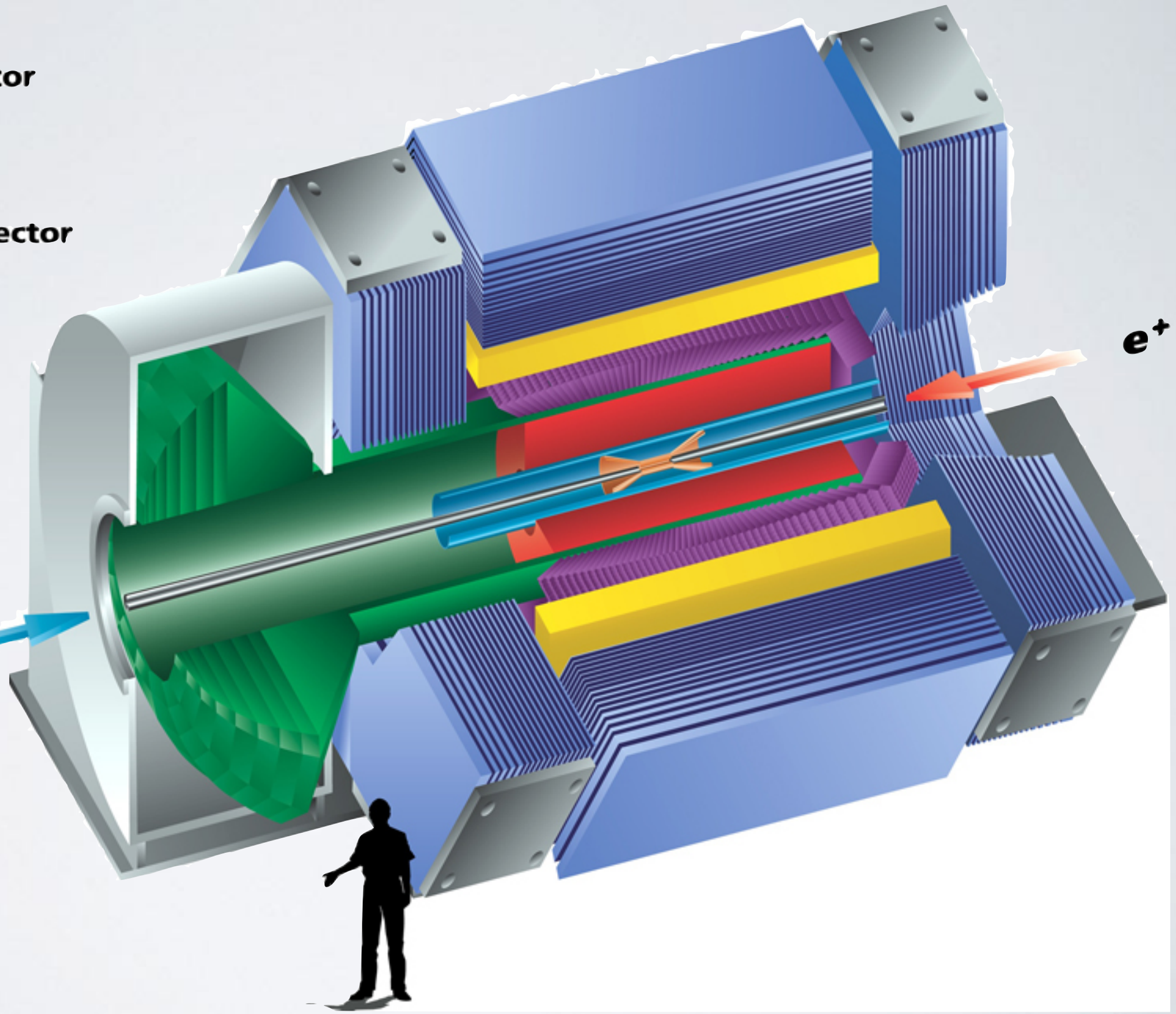


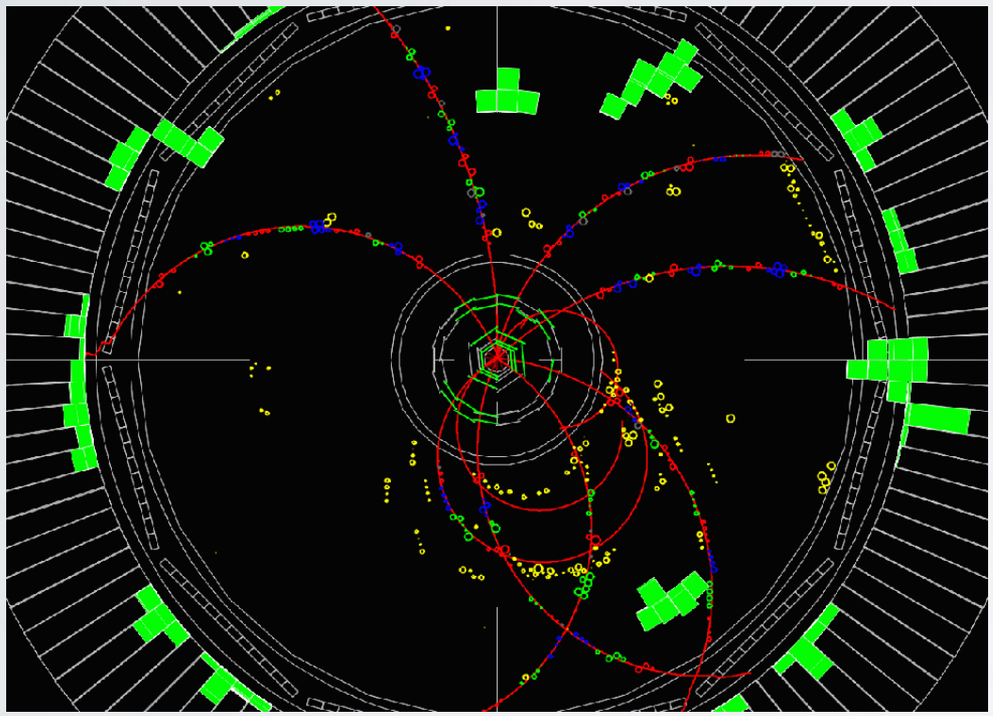
ชนิดจาก
จาก Tracker Chamber
และ Cherenkov Detector

พลังงาน Muon
จาก Muon/Hadron Calorimeter

BaBar Detector

- Muon/Hadron Detector
- Magnet Coil
- Electron/Photon Detector
- Cherenkov Detector
- Tracking Chamber
- Support Tube
- Vertex Detector





$$B^0 \rightarrow J/\psi + K_0$$

$$J/\psi \rightarrow e^+ + e^-$$

Note: Don't really know what this event is

สรุป

- เครื่องเร่งอนุภาค
- เอาอนุภาคมาจากไหน
- เร่งอย่างไร
- Focus ได้อย่างไร

- เครื่องตรวจวัดอนุภาค
- วัดทิศทาง
- วัดโมเมนตัม
- หาชนิดอนุภาค
- วัดพลังงาน