

Detektör Tipleri

Sertaç ÖZTÜRK

İstinye Üniversitesi

sertac.ozturk@istinye.edu.tr

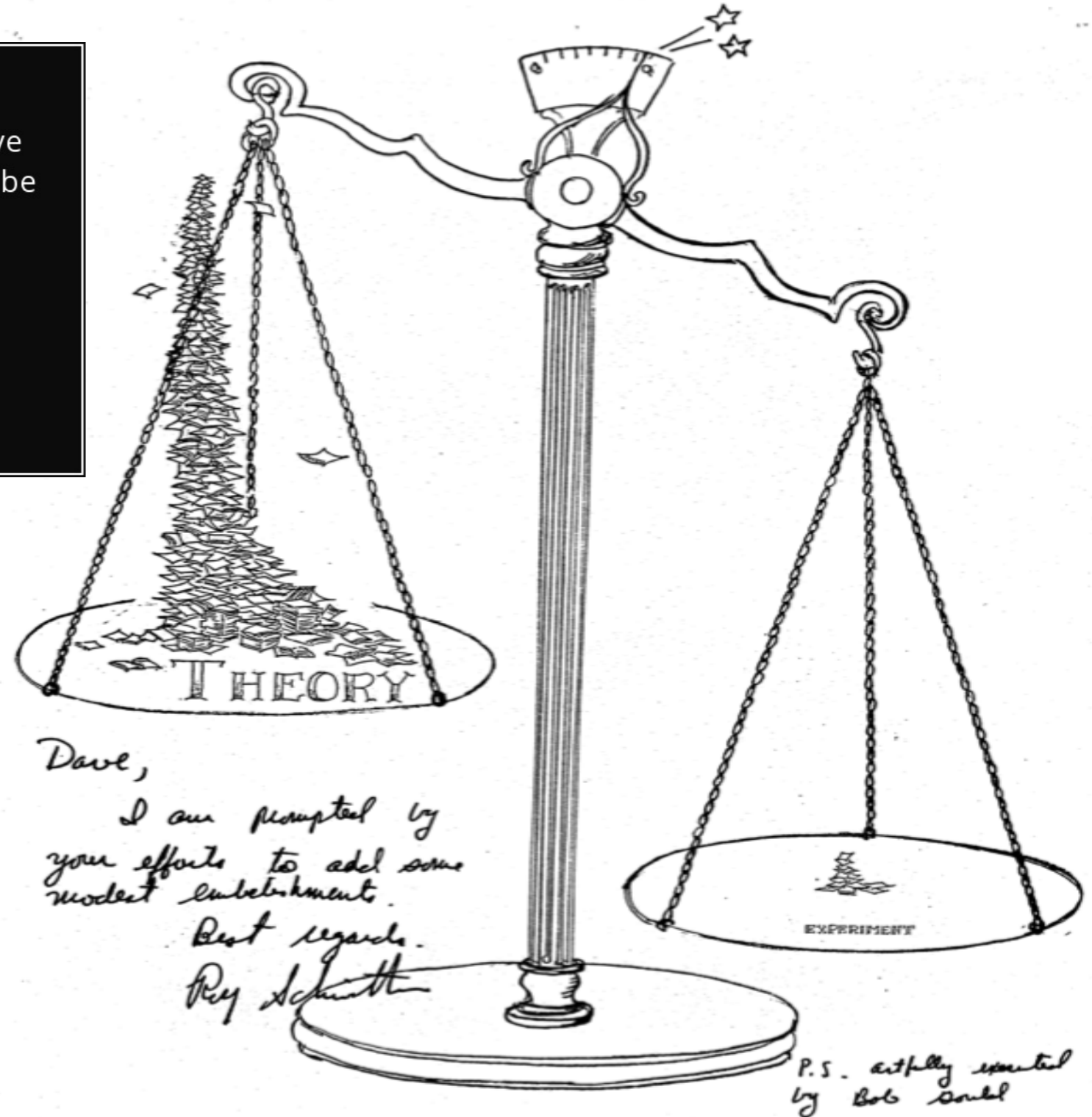
Kuram vs Deneysel



I have done a terrible thing, I have postulated a particle that cannot be detected.

— Wolfgang Pauli —

AZ QUOTES



Algıç Nedir?

dedektör  Algıç

isim, Fransızca détecteur

+ atom altı parçacıklar

Gaz, mayın, radyoaktif mineral, manyetik dalga vb.ni bulmaya, tanımaya yarayan cihaz, algılayıcı.

Yüklü parçacıkları belirlemeli

◆ Yüklü leptonlar, yüklü hadronlar

Yüksüz parçacıkları belirlemeli

◆ Foton, yüksüz hadronlar, nötrinolar

Parçacık kimliklendirme yapabilmeli

◆ gama/nötron ayrımı, hadron

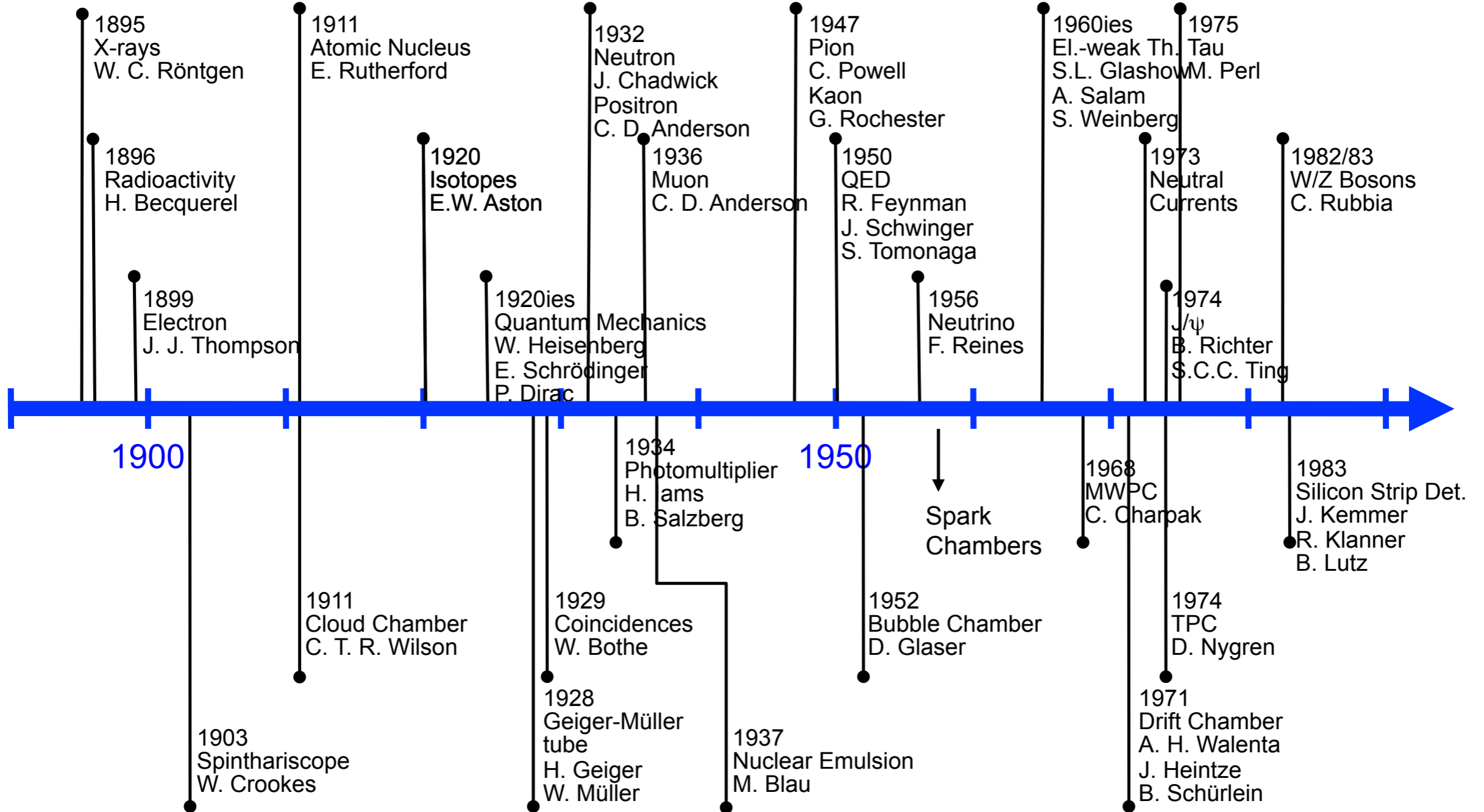
Herbir parçacığın enerji momentum ölçümünü çok hassas bir şekilde yapabilmeli

◆ 4-vektör (E, p_x, p_y, p_z) , (t, x, y, z)

Olay yapılandırma oranı yüksek olmalı

Mükemmel Algıç

Tarihsel Gelişim



Nobel Ödülleri

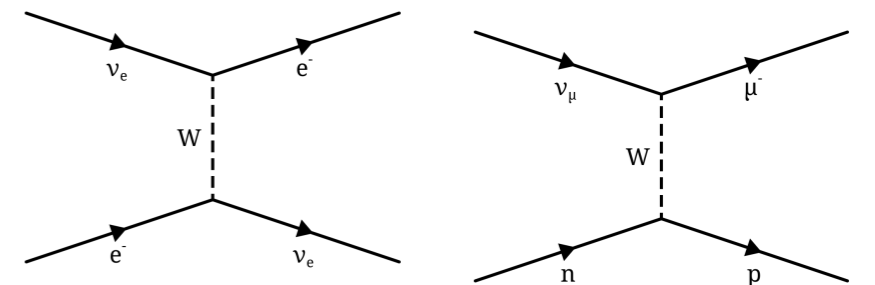
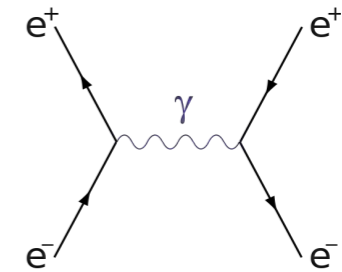
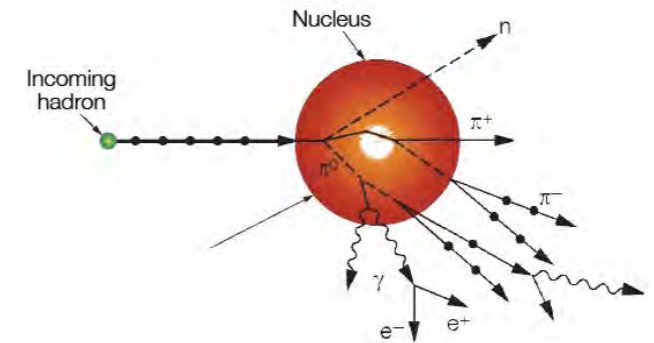
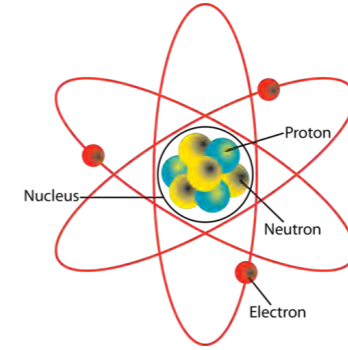
NOBEL PRIZES FOR INSTRUMENTATION

<http://www.lhc-closer.es/php/index.php?i=1&s=9&p=2&e=0>

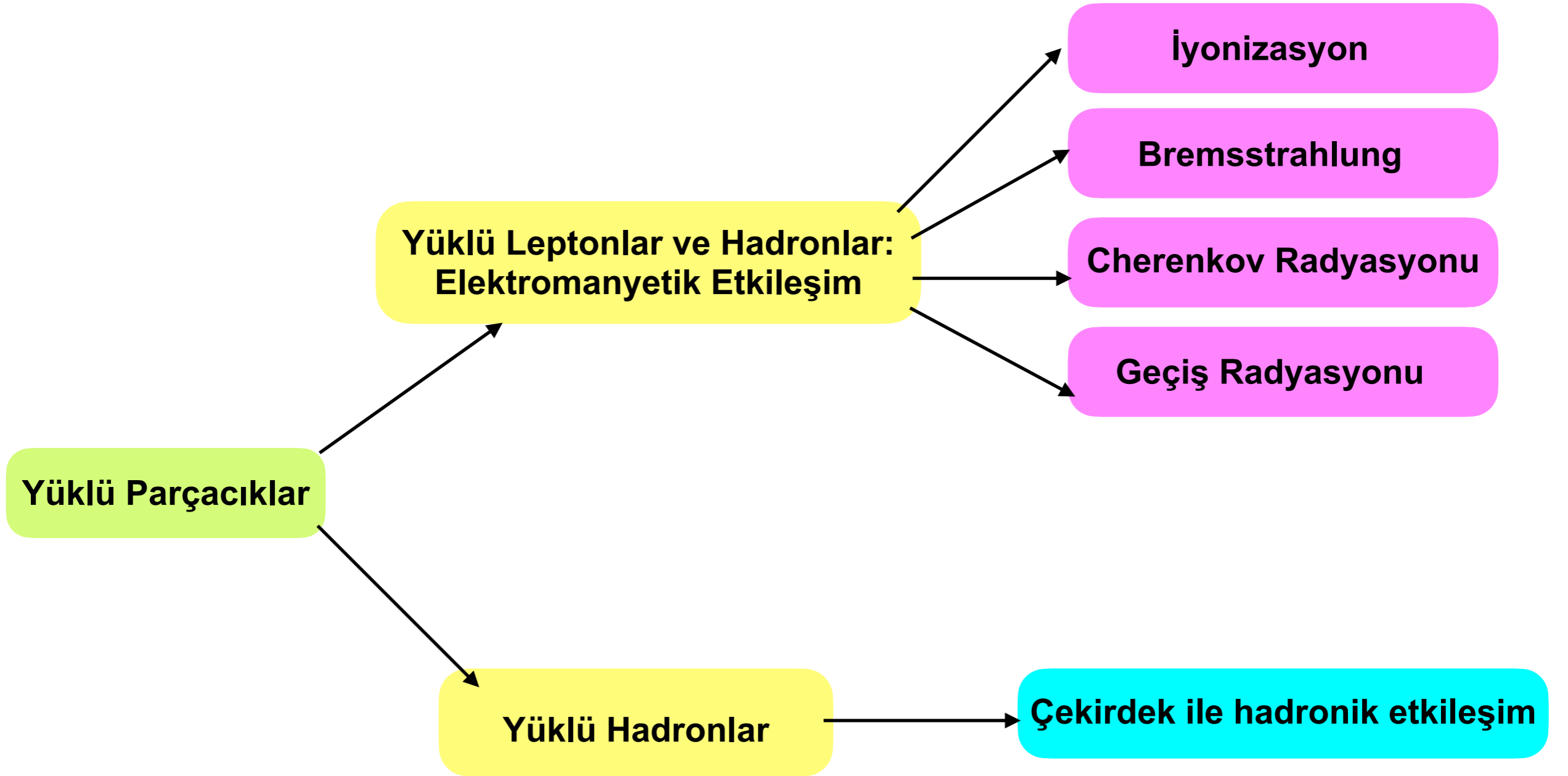
 <p>1927: <u>C.T.R. Wilson</u>, Cloud Chamber</p>	 <p>1939: E. O. Lawrence, Cyclotron</p>	 <p>1948: P.M.S. Blacket, Cloud Chamber</p>	 <p>1950: C. Powell, Photographic Method</p>
 <p>1954: Walter Bothe, Coincidence method</p>	 <p>1960: <u>Donald Glaser</u>, Bubble Chamber</p>	 <p>1968: L. Alvarez, Hydrogen Bubble Chamber</p>	 <p>1992: <u>Georges Charpak</u>, Multi Wire Proportional Chamber</p>

Algıçların Yapısı

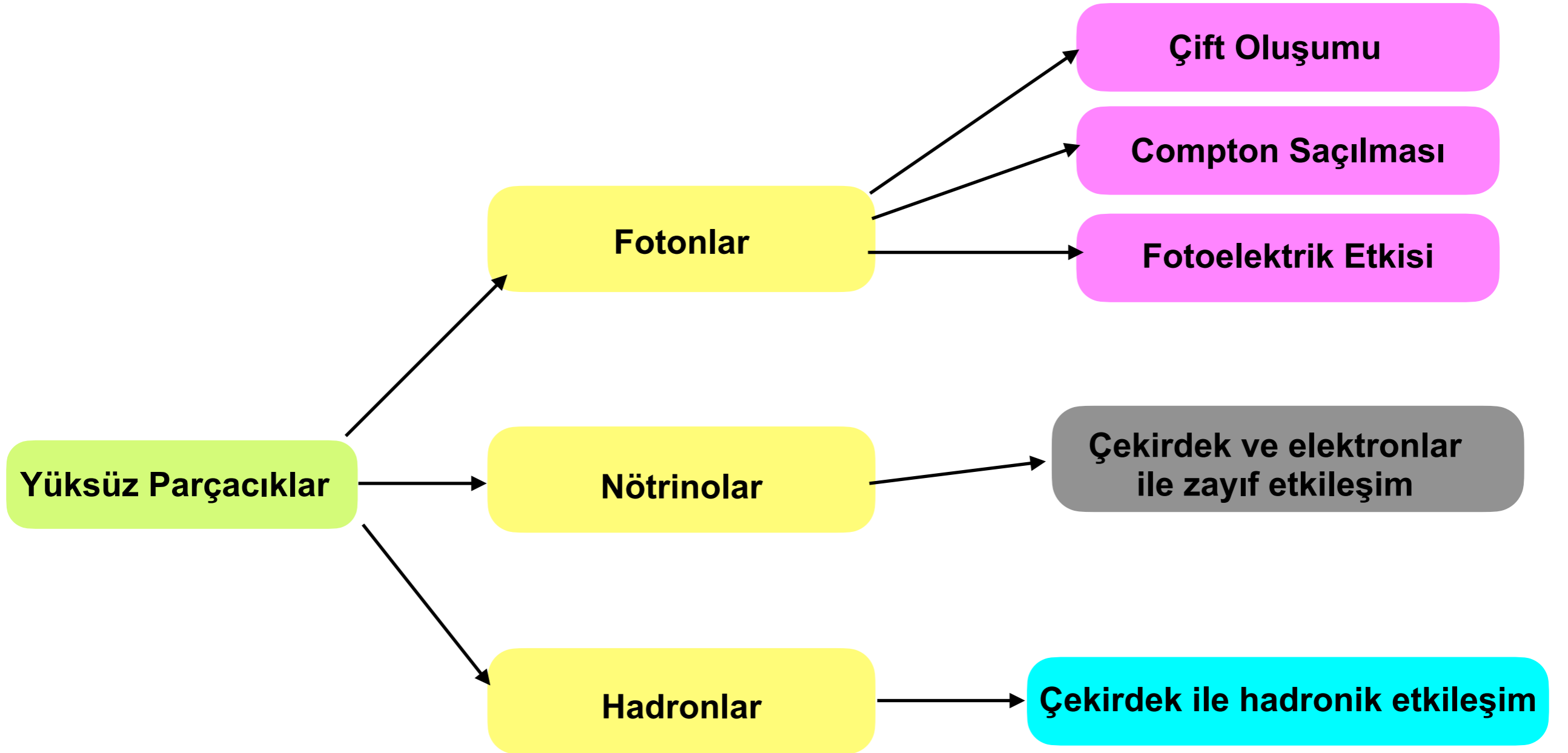
- ☑ Algıçlar atomlardan meydana gelir.
 - ◆ Çekirdek + elektron
 - ◆ Etkileşim parçacık türüne bağlıdır
 - ◆ Enerji kaybı enerjiye bağlıdır
- ☑ Hadronlar → Güçlü etkileşim → Çekirdek
- ☑ Yüklü parçacıklar ve fotonlar → EM etkileşim → Elektron ve çekirdek
- ☑ Nötrinolar → Zayıf Etkileşim → Elektron ve çekirdek



Yüklü Parçacıklar için Enerji Kaybı



Yüksüz Parçacıklar İçin Enerji Kaybı



Parçacıkların Belirlenmesi

☑ Algıçlar sadece kararlı parçacıkları görebilir.

☑ Detektörde ölçülebilen parçacıklar

◆ $e^\pm, \mu^\pm, \gamma, \pi^\pm, K^\pm, K^0, p^\pm, n$

☑ Bir parçacığı algıçta belirlemek için mutlaka algıç ile etkileşmeli ve enerjisinin bir kısmını veya tamamını bırakmalı.

☑ Yüklü parçacıkların direkt olarak etkileşimi ile sinyal oluşurken, yüksüz parçacıklar enerjilerini yüklü parçacıklara transfer ettiğinde sinyal gözlemlenir.

Particle	Life Time τ	$c\tau$
γ	∞	∞
e^-	∞	∞
ν	∞	∞
p^+	$>1.6 \cdot 10^{33} \text{ y}$	∞
n	887 s	$2.7 \cdot 10^8 \text{ km}$
μ^-	$2.2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$	659 m
π^+	$2.6 \cdot 10^{-8} \text{ s}$	7.8 m
K^+	$1.2 \cdot 10^{-8} \text{ s}$	3.7 m
K_L^0	$5.2 \cdot 10^{-8} \text{ s}$	15.5 m

Çözüm: Çok katmanlı Algıç

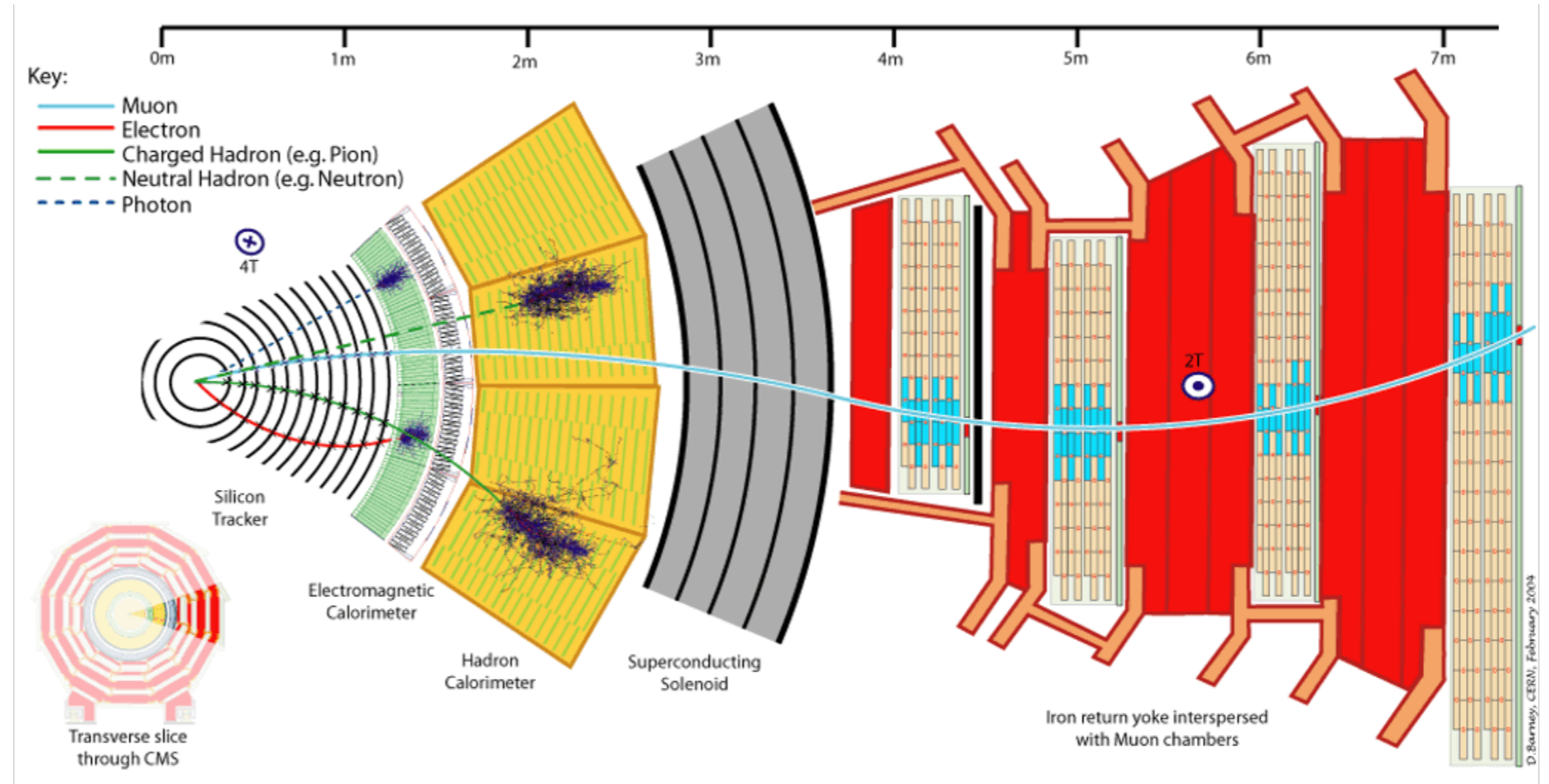
☑ İzci Algıç (Tracker): Momentum ve yük ölçümü

☑ Kalorimetre: Enerji ölçümü

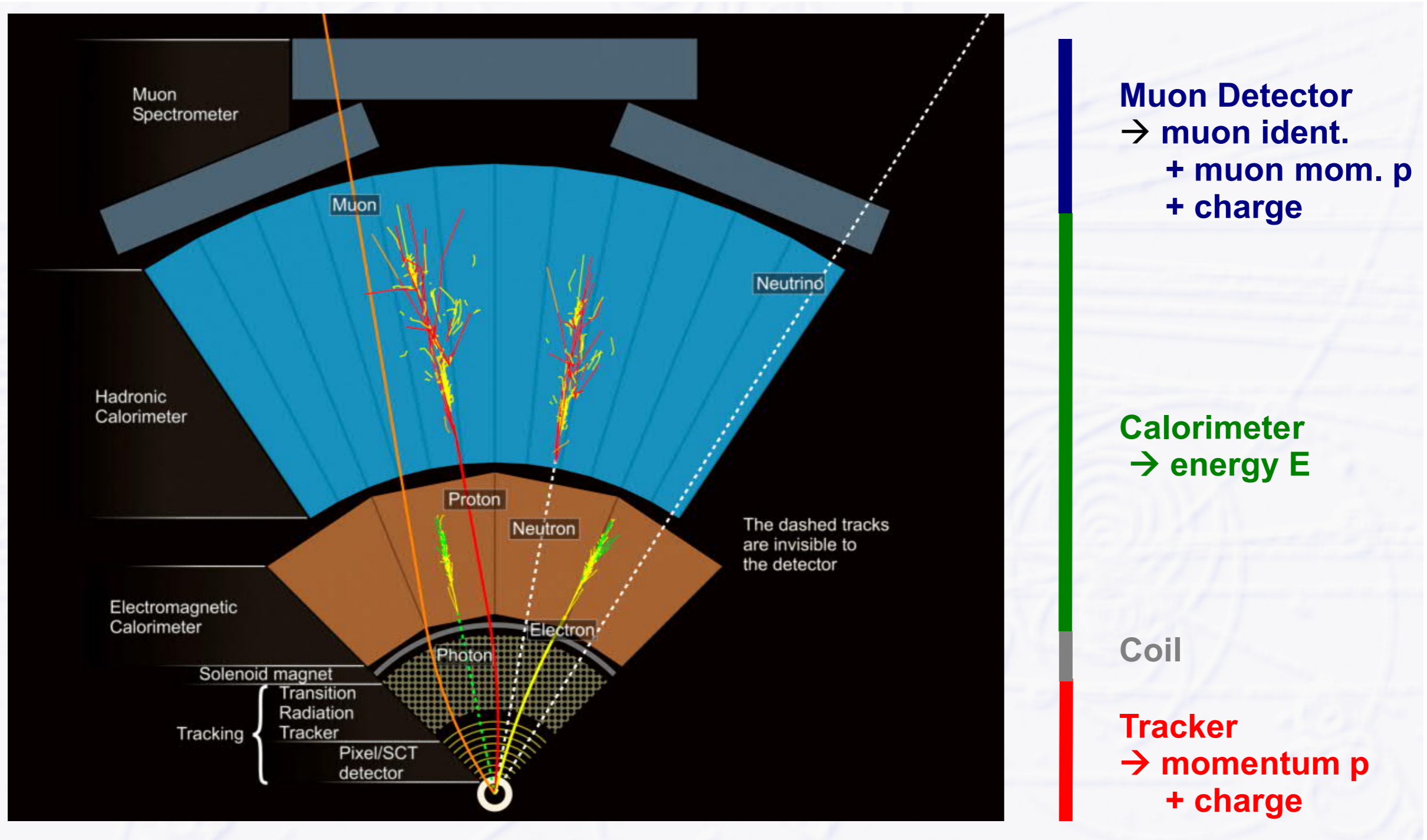
◆ Elektromanyetik kalorimetre (e^- , e^+ , γ)

◆ Hadronik kalorimetre (pion, kaon, p , n)

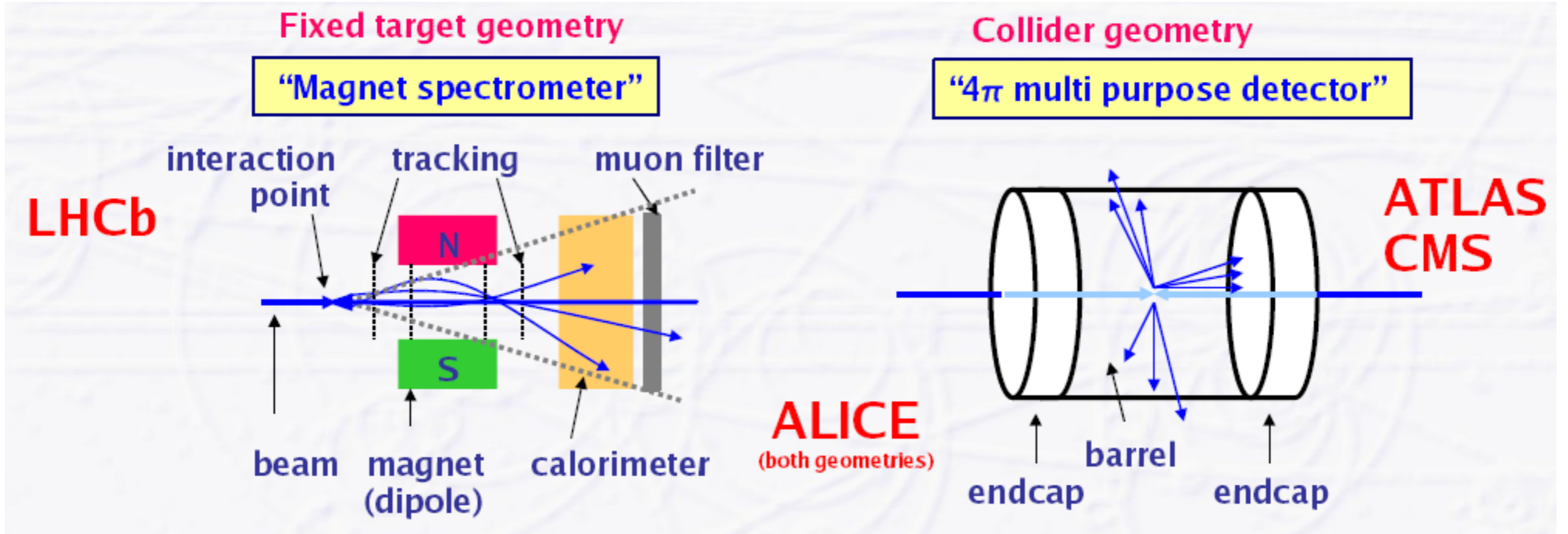
☑ Muon algıcı



ATLAS Algıcı



Yüksek Enerji Fiziği Algıçları



Babar algıcı: Asimetrik Yapı

İzci Algıçlar (Tracker)

☑ Gaz detektörler

◆ Gazın iyonlaşması

- ▶ Yaklaşık 100 e-/cm
- ▶ Zayıf sinyal ve yaklaşık 10^4 kat yükseltme

☑ Silikon algılar (yarı iletken algılar)

◆ Elektron - hole oluşumu

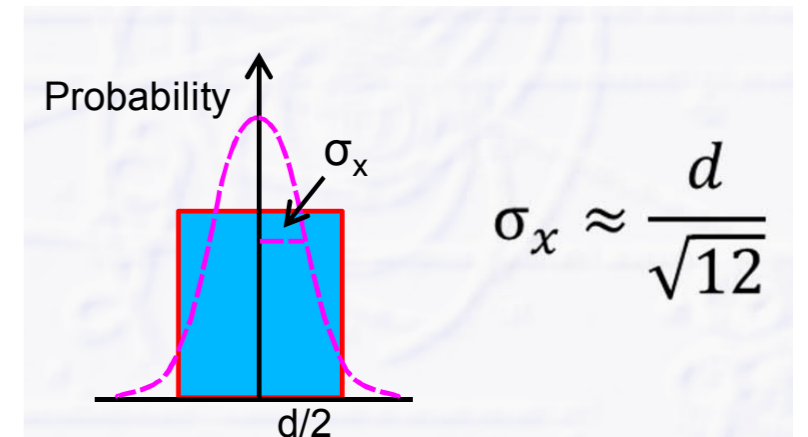
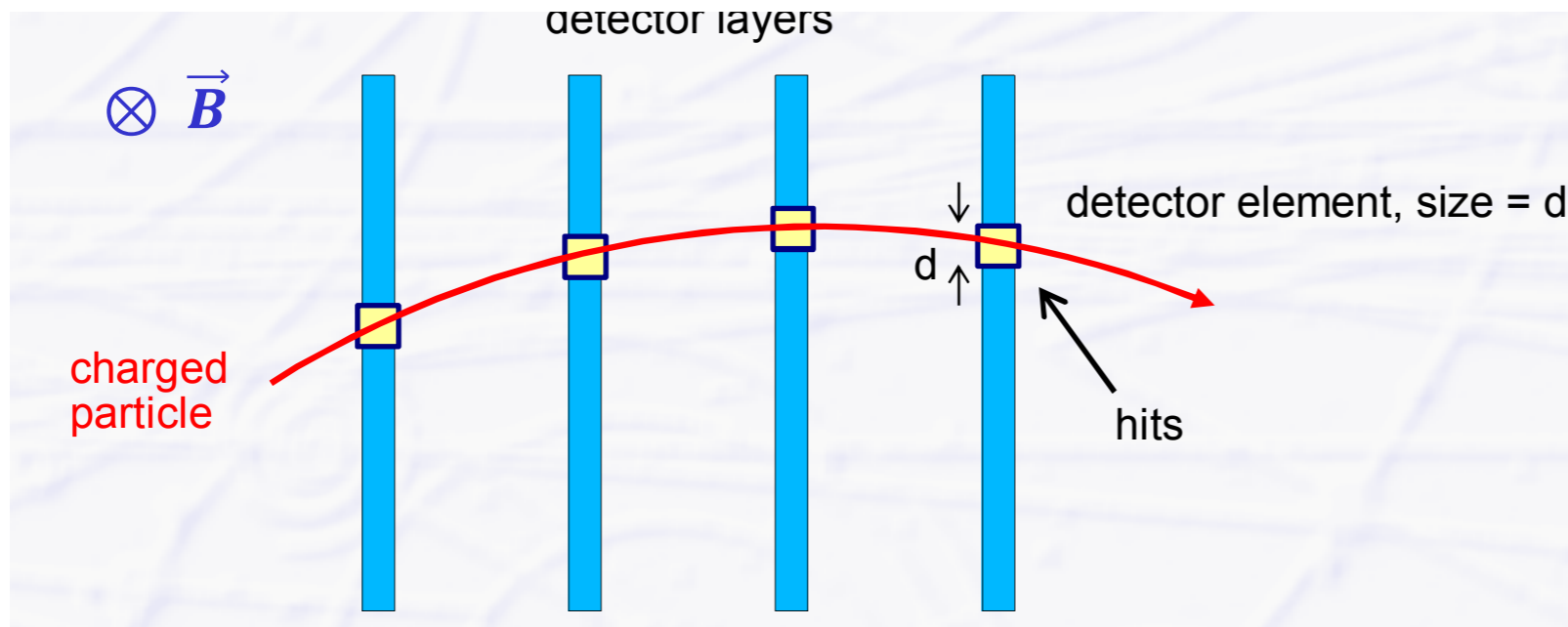
- ▶ Yaklaşık 100 e-/μm (10^6 daha fazla gazlı detektörden)
- ▶ 300 μm incelikte algıç yeterli sinyal oluşumu için yeterli

☑ Fiber dalgıçlar (nadir kullanılırlar)

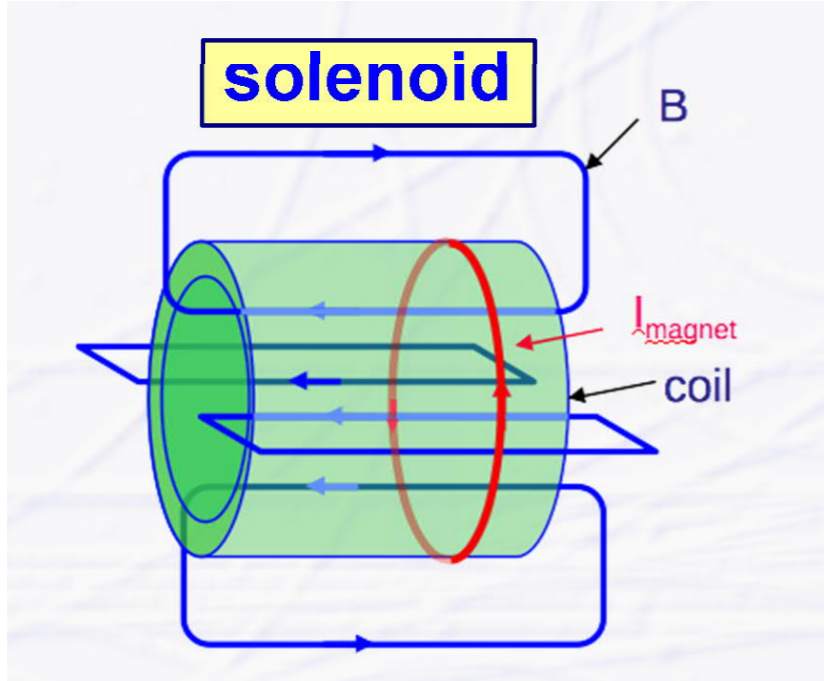
◆ Parıldayan fiberler

İzci Algıçların Mantığı

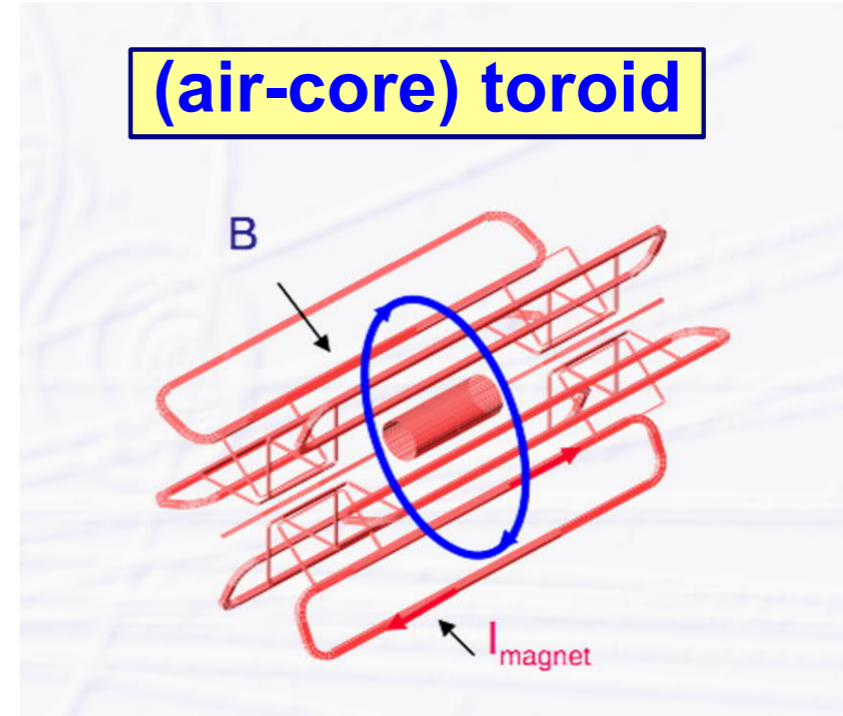
- ☑ Çoklu katmanlı yapıdadır.
 - ◆ Her katman 2B hit koordinatı verir (+ algı pozisyonu -> 3B)
- ☑ Manyetik alan yüklü parçacıkları yörüngesini eğer
- ☑ Kullanılan algı yüksek manyetik alanda çalışabilir olmalıdır.
- ☑ Her bir hitin çözünürlüğü algıç elementinin boyutuna bağlıdır.



Magnet

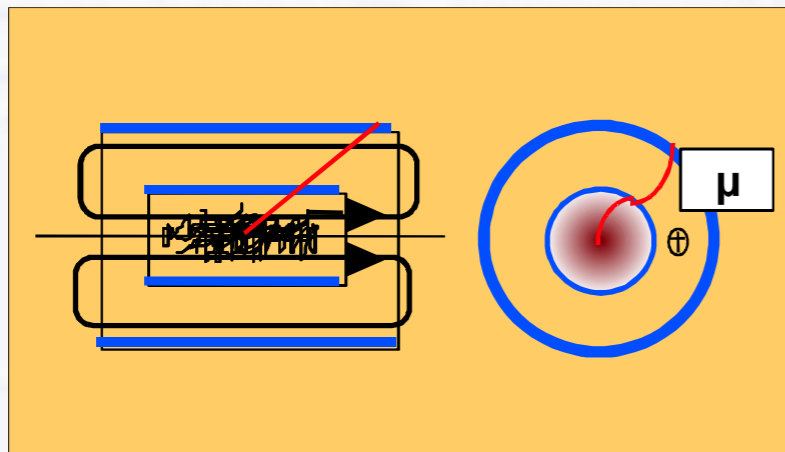


- + Geniş homojen manyetik alan
- + Kompakt ve basit yapı
- Maliyet
- Sınırlı alan

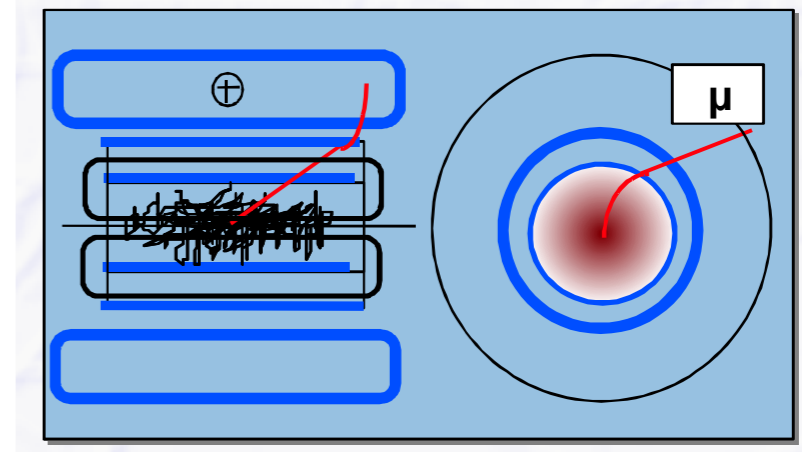


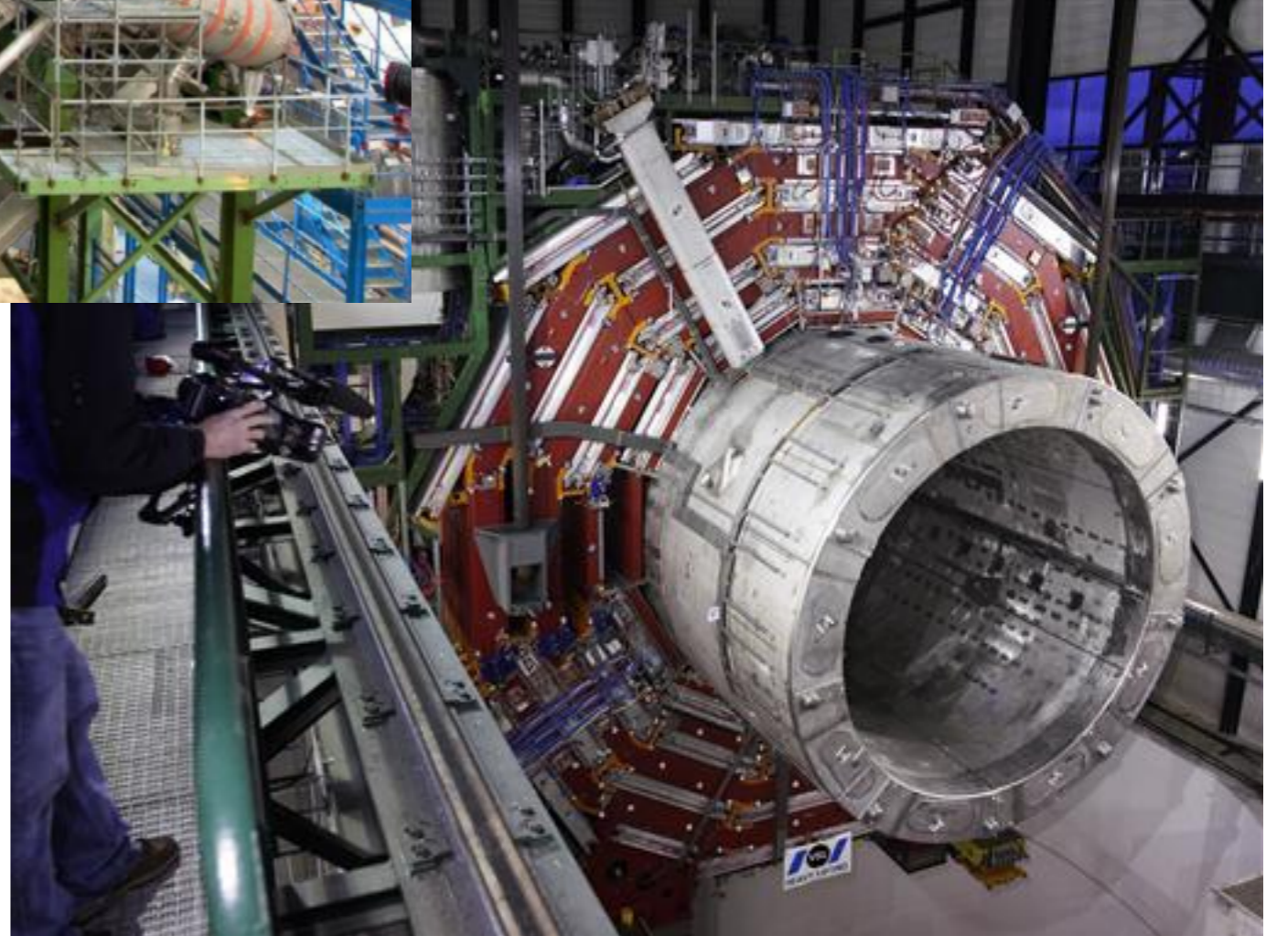
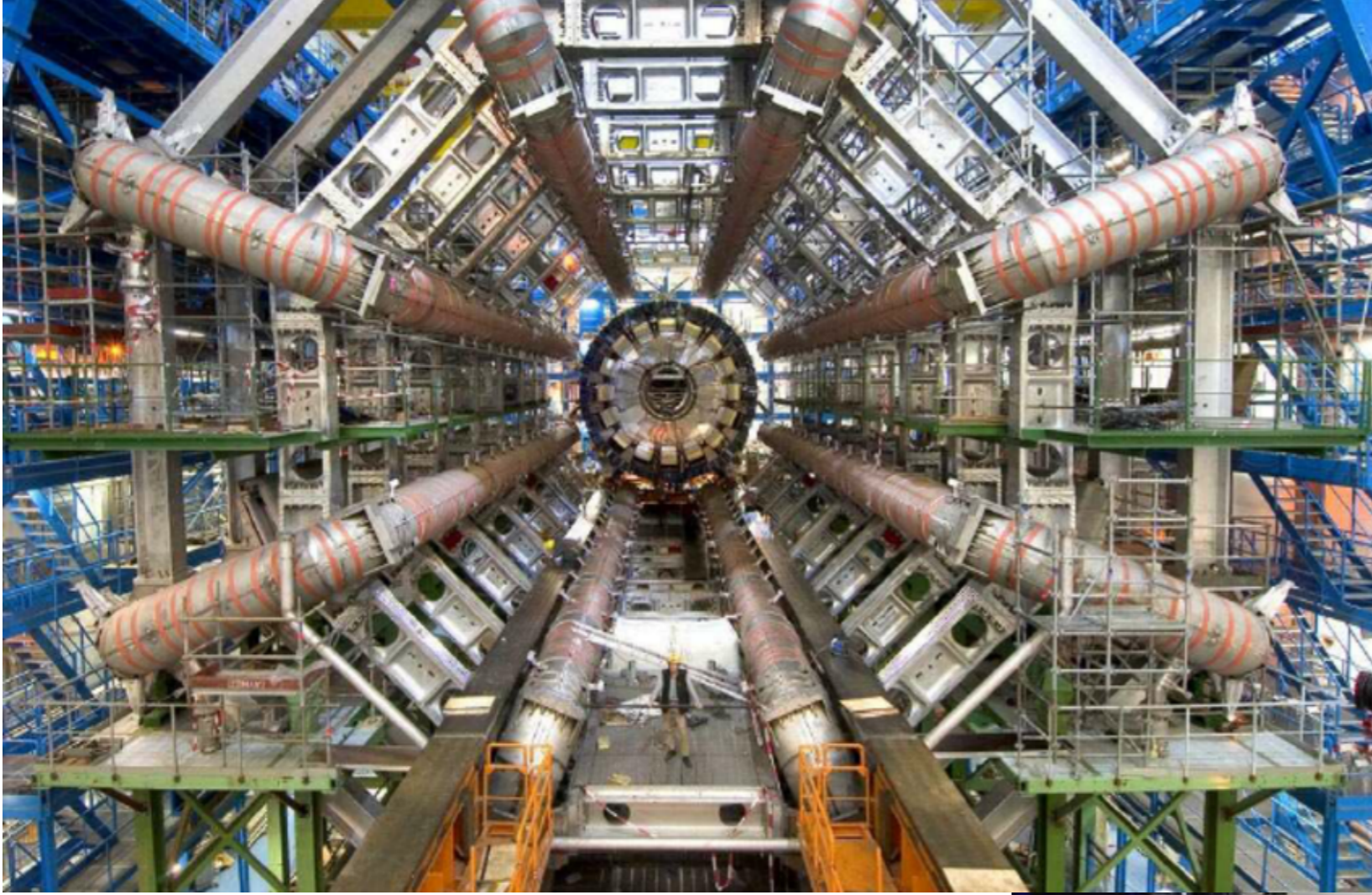
- + Daha geniş alan kapsamı
- + Az materyal, az maliyet
- Karmaşık yapı
- Non-uniform alan

CMS, ALICE



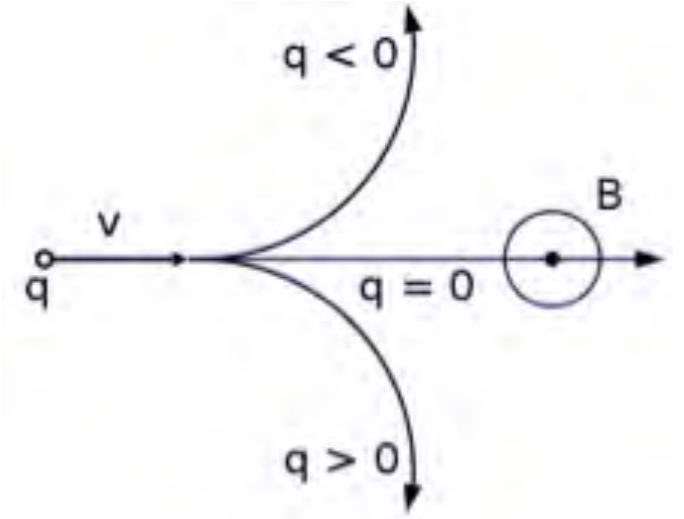
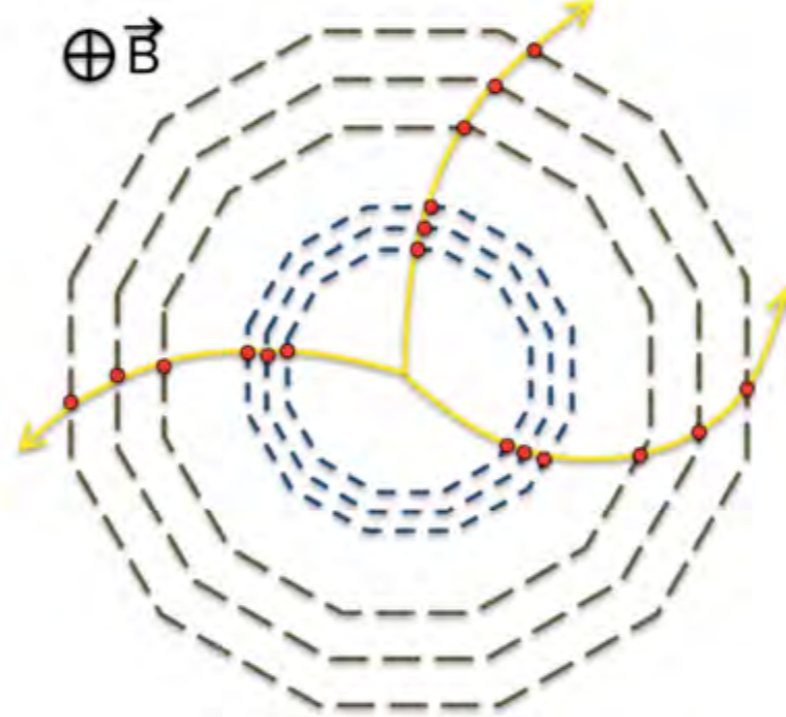
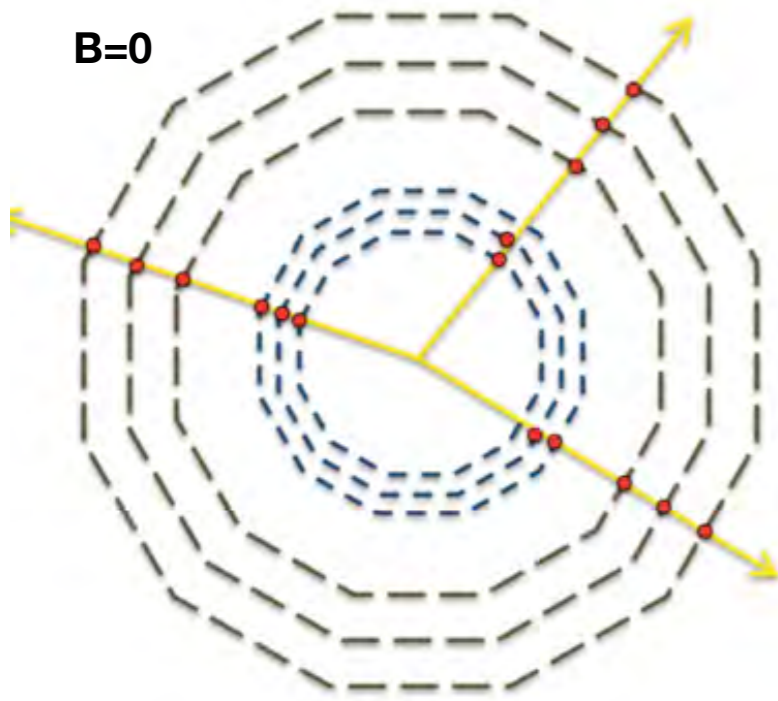
ATLAS





Momentum Ölçümü

$$\vec{F} = \underbrace{q\vec{E}}_{\text{Electric force}} + \underbrace{q\vec{v} \times \vec{B}}_{\text{Magnetic force}}$$

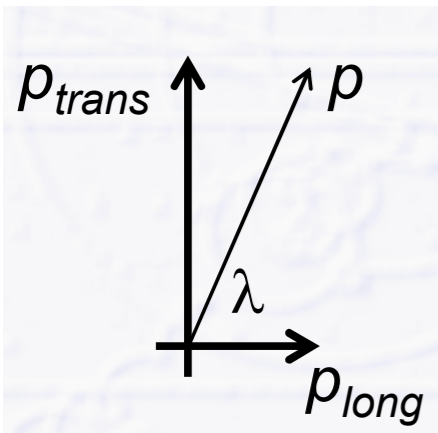


$$P_T = 0.3 \times B \times R$$

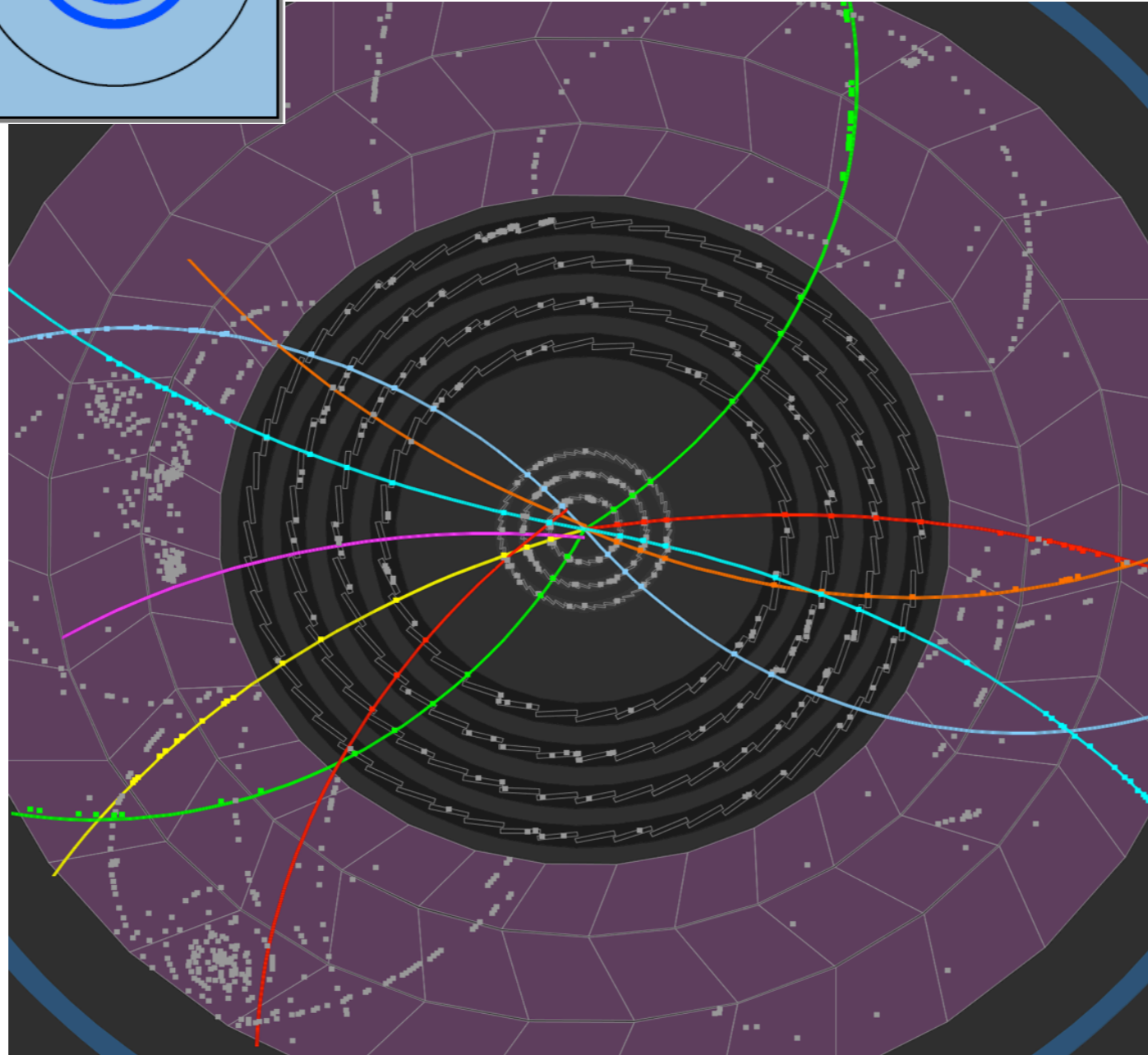
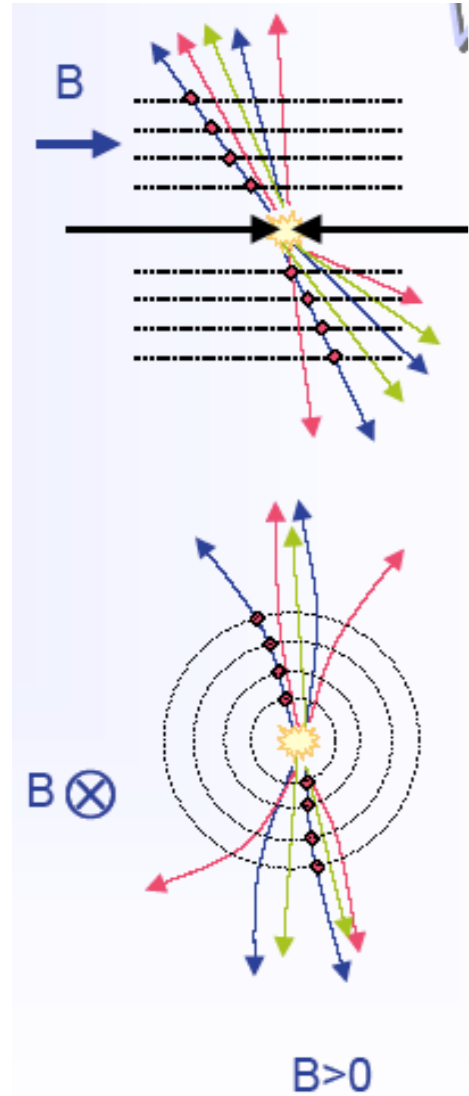
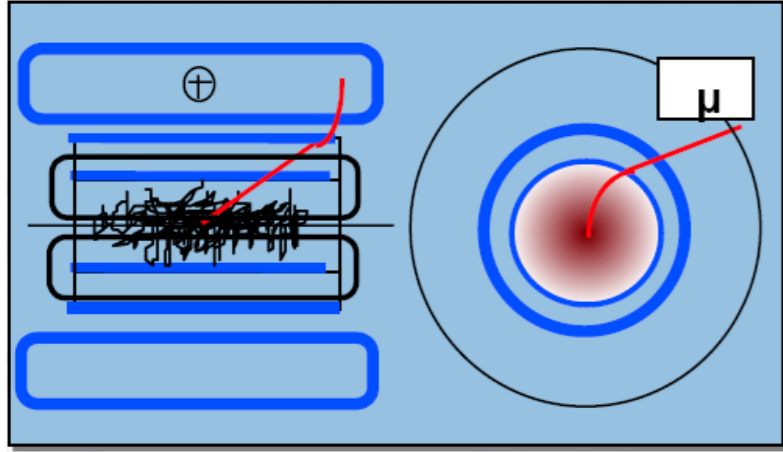
CMS deneyi için bakarsak:

Çarpışma noktasının elektromanyetik detektöre uzaklığı 1.3 m
Manyetik alan 4 T

$$P_T = (0.3 \times 4 \times 1.3) / 2 \approx 0.8 \text{ GeV}$$

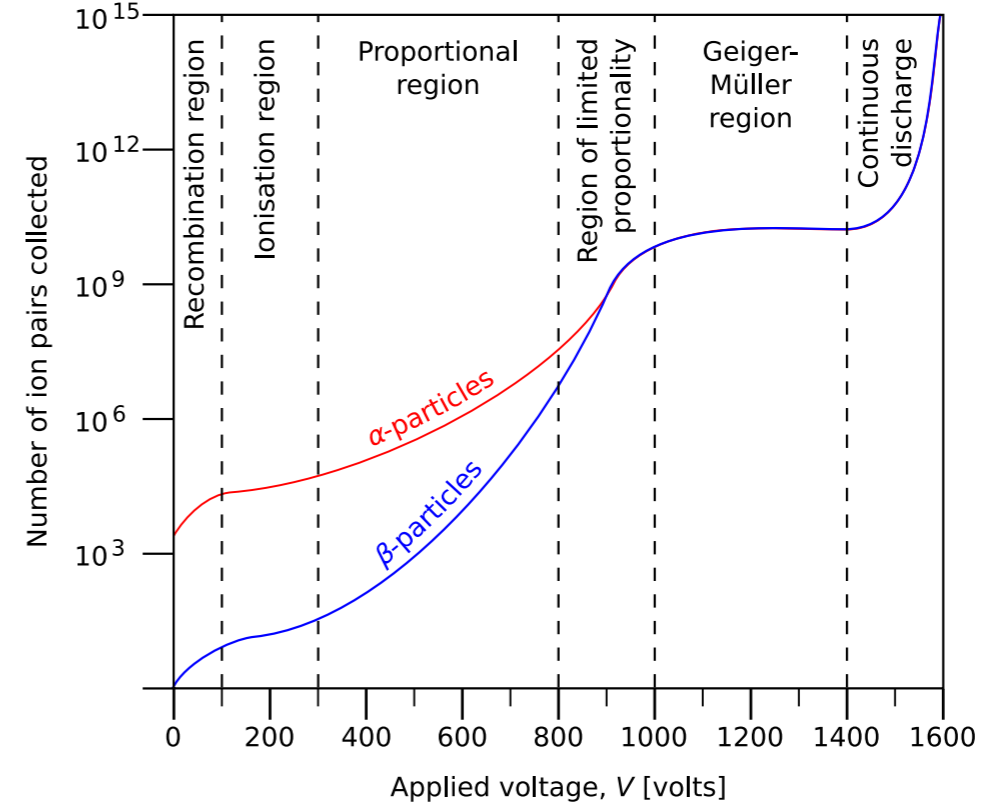
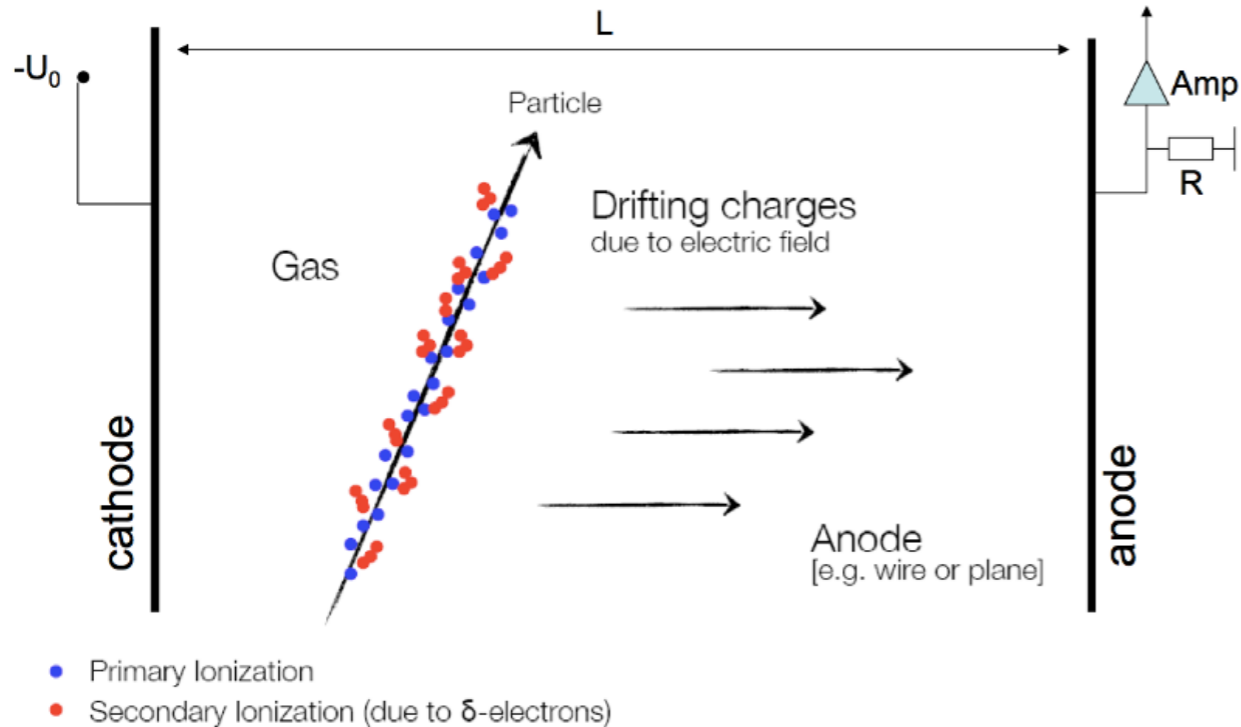
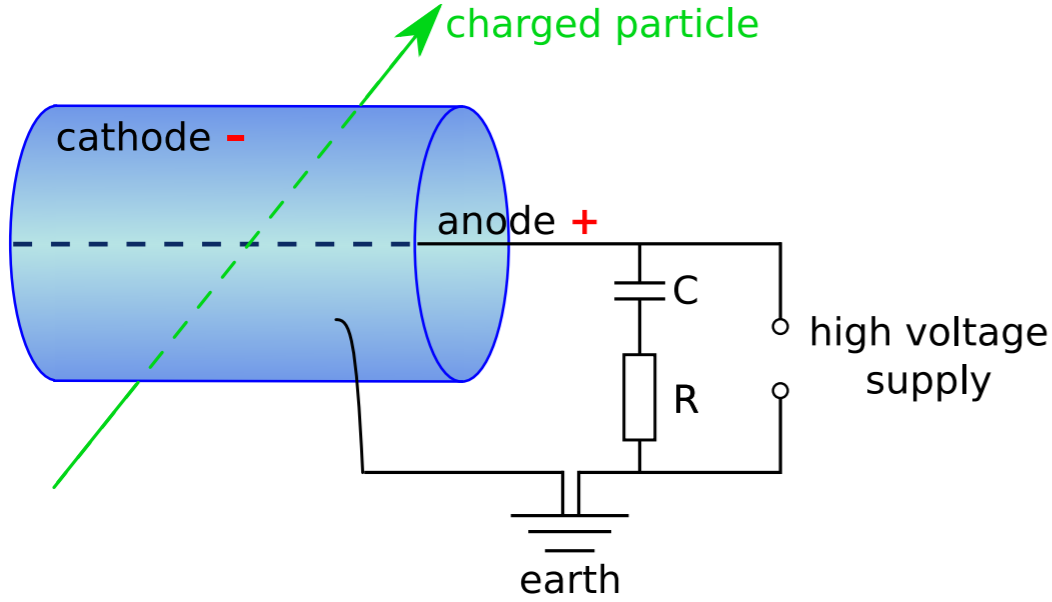


$$p = \frac{p_t}{\sin \lambda}$$



ATLAS
EXPERIMENT
2009-12-06, 10:03 CET
Run 141749, Event 405315
Collision Event

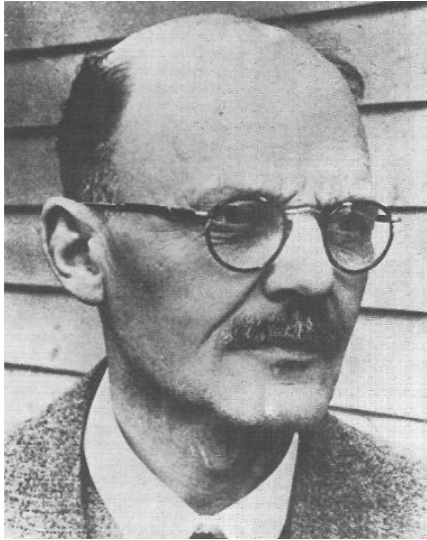
Gazlı Algıçlar



- ☑ Rekombinasyonu bölgesi: $G < 1$, üretilen tüm iyonların toplanmasına yetecek kadar güçlü bir elektrik alan yok.
- ☑ İyonizasyon bölgesi: $G = 1$, voltaj artık yüklü parçacığın oluşturduğu tüm iyon çiftlerinin toplanmasını sağlamak için yeterlidir. Ancak voltaj henüz ikincil iyonlaşmaya neden olacak kadar güçlü değil.
- ☑ Orantılı bölge: $G \approx 10^3 - 10^5$, İkincil iyonizasyon ilk iyonizasyon ile orantılı artar.
- ☑ Limitli orantılı bölge: $G \approx 10^5 - 10^8$, ikincil iyonizasyonda doyum gerçekleşir.
- ☑ Geiger (doyum) bölge: $G > 10^8$, sinyal birincil iyonizasyondan bağımsızdır.
- ☑ Deşarj bölgesi: Plazma tüpü meydana gelip yük boşalır.

Geiger-Müller Tüpü

- ✓ 1928, Hans Geiger ve Walter Müller
- ✓ Tüp asal gaz (He, Ne, Ar) + organik buhar (alkol) ile doludur.
- ✓ Yüksek elektrik alanla Geiger bölgesinden çalışır.
- ✓ $G \approx 10^8-10^{10}$



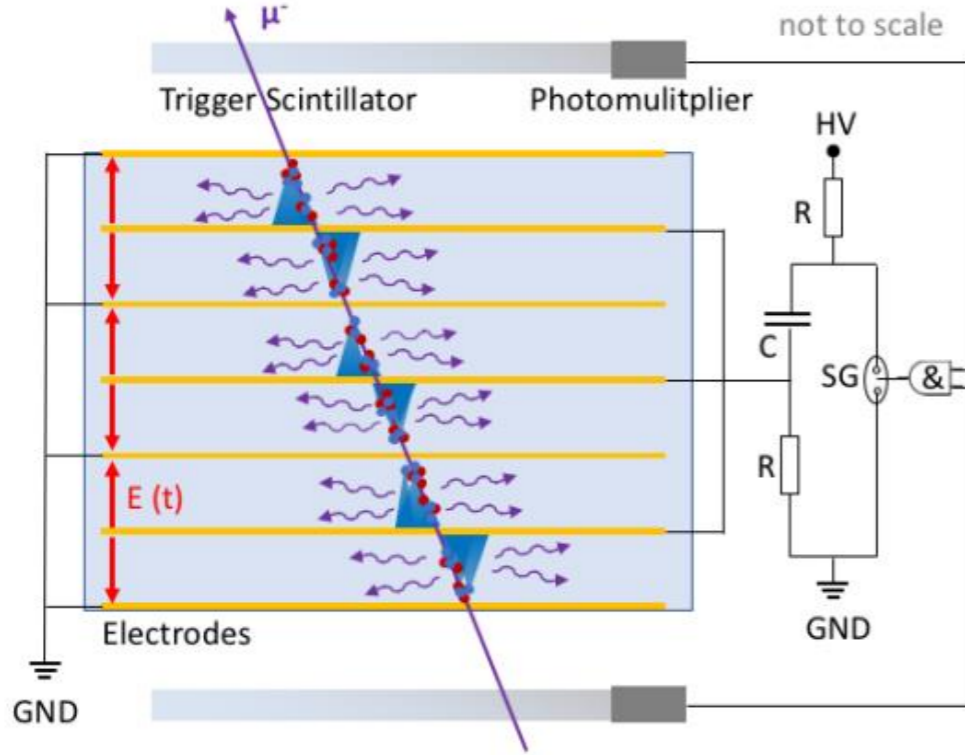
Hans Geiger
(1882-1945)



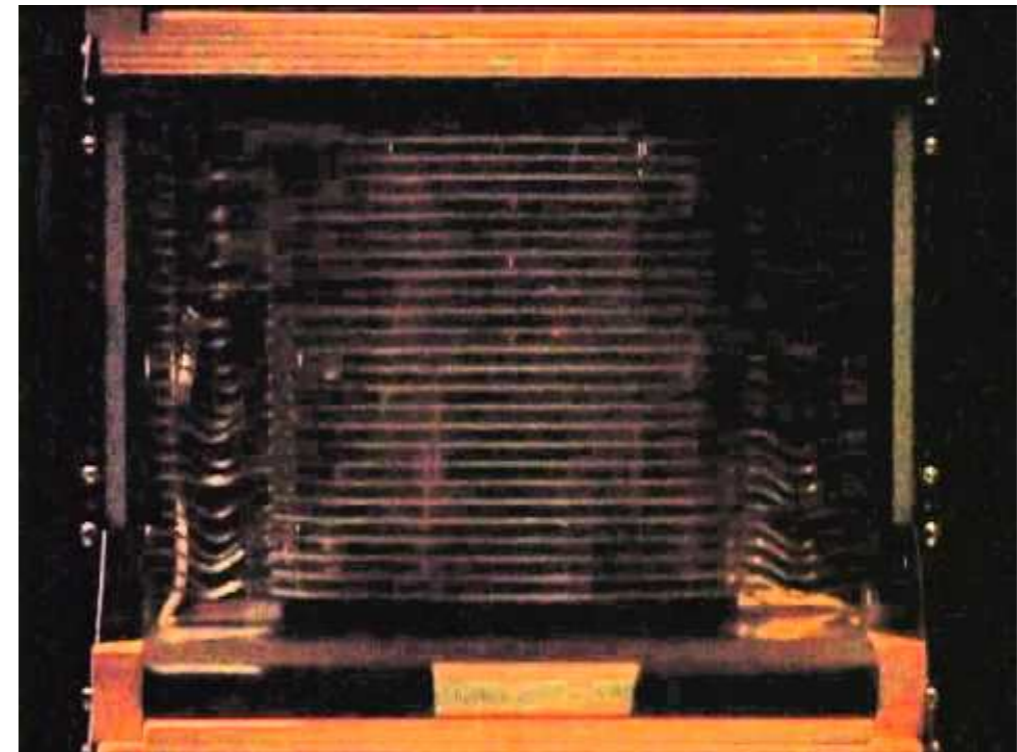
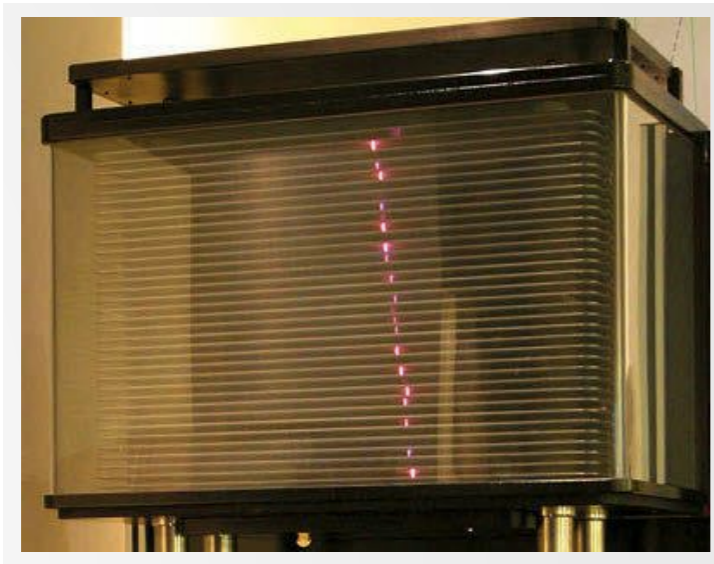
Walt(h)er Müller
(1905-1979)



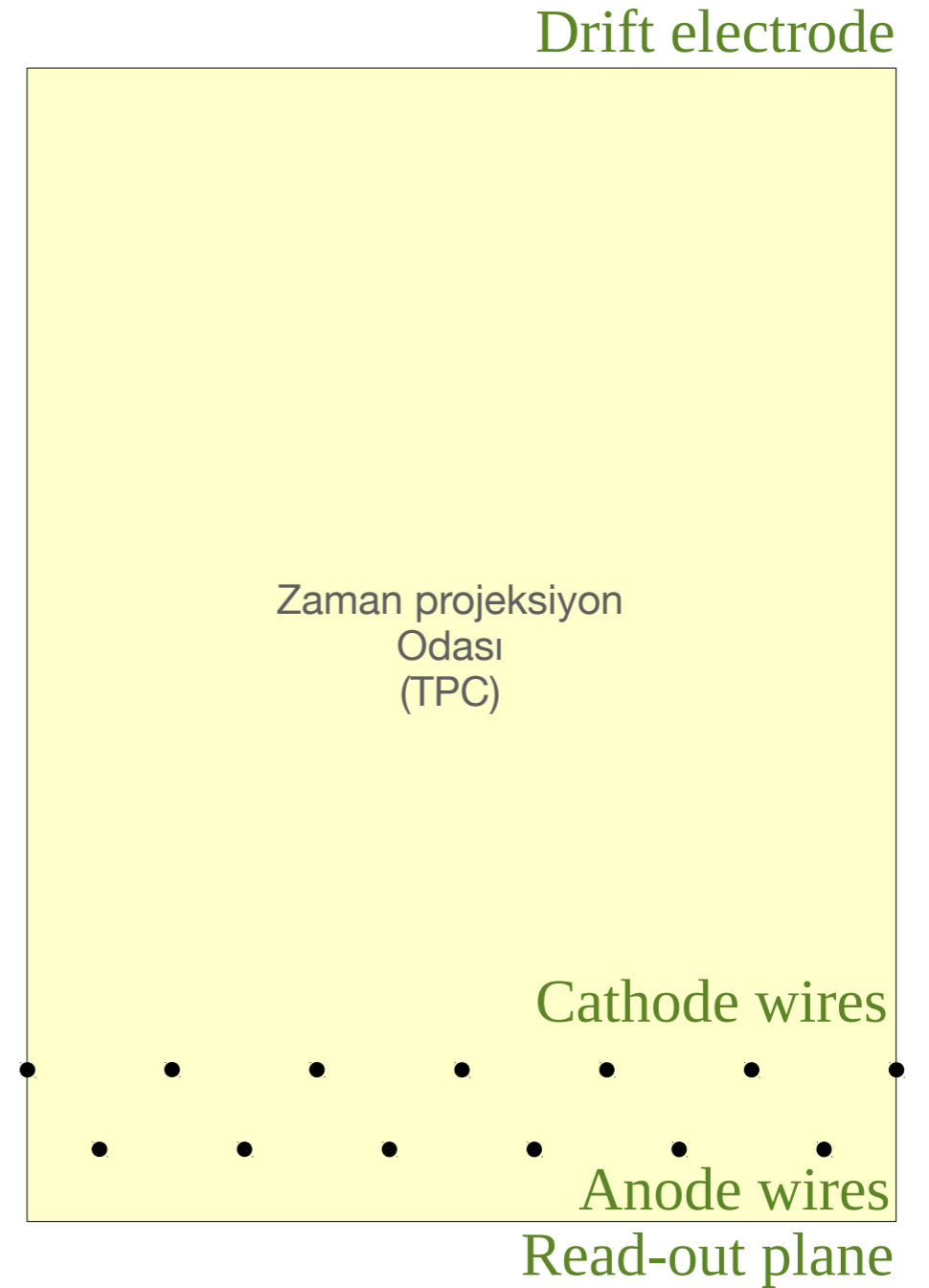
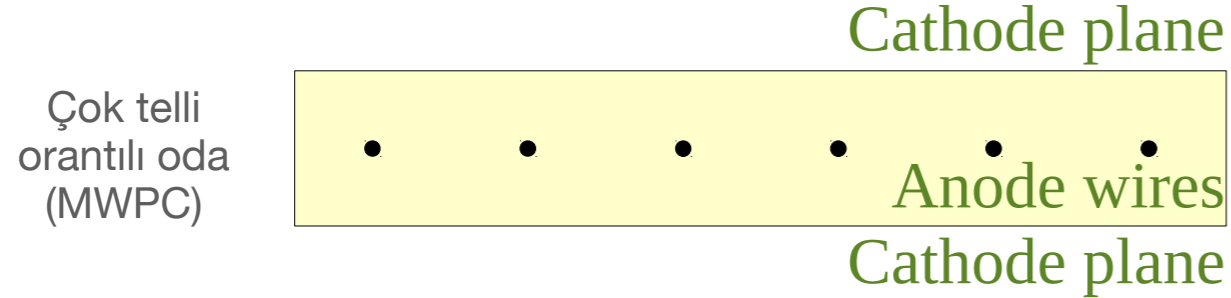
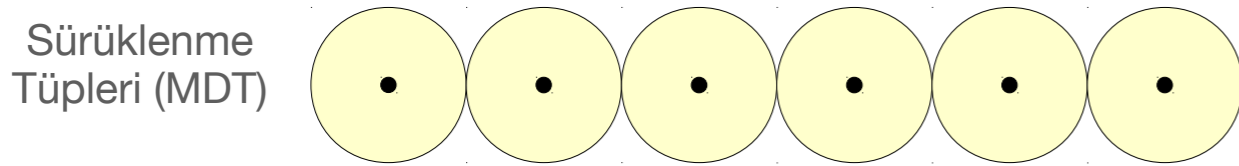
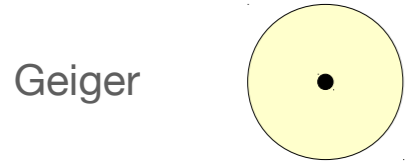
Kıvılcım Odası



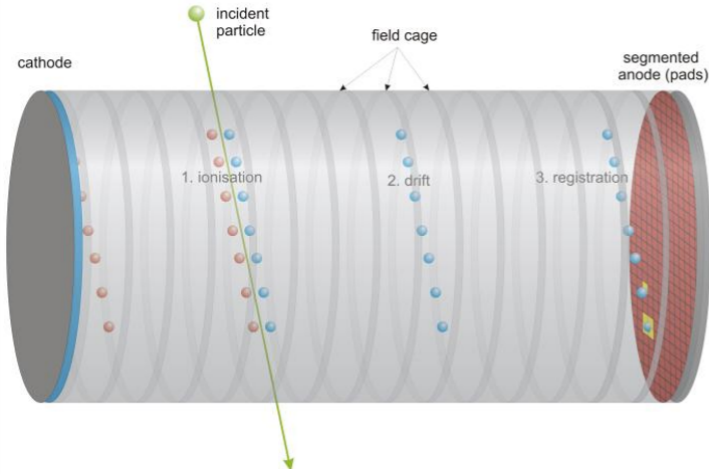
- ✓ Paralel plakalar ve gaz karışımı (Ne+He)
- ✓ Kısa süreli voltaj sağlamak için tetikleme sistemi
- ✓ Sınırlı deşarj modu
- ✓ Görünür parçacık izi



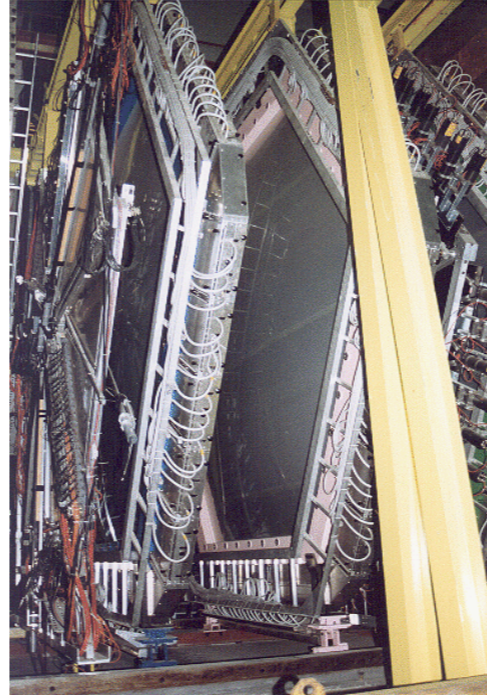
Tüpten kompleks algılara



TPC, MWPC ve DT

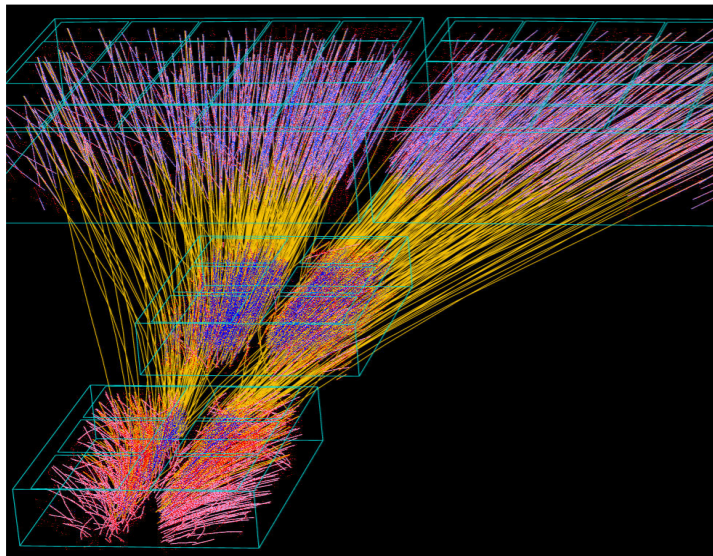
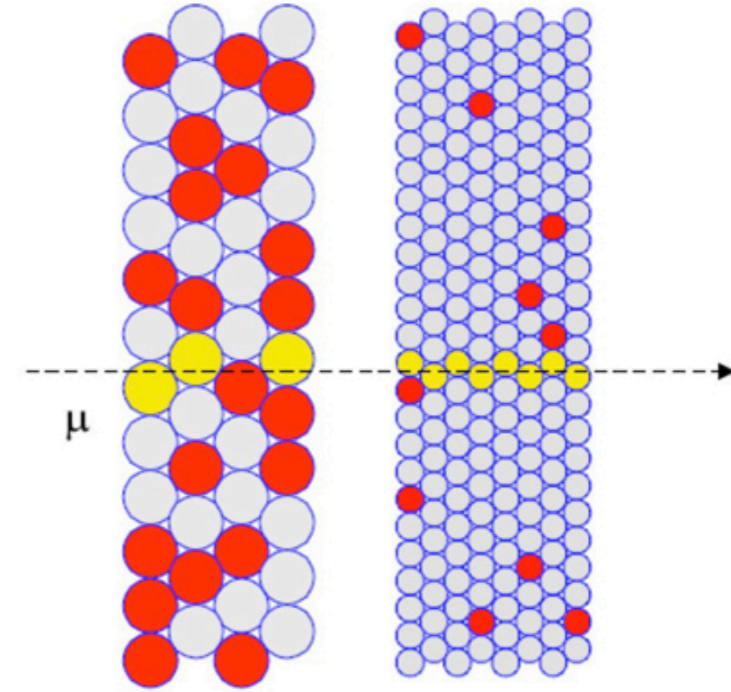


David Nygren

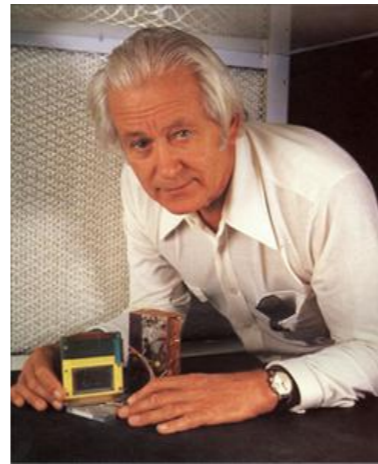


MDT
30 mm Ø

sMDT
15 mm Ø



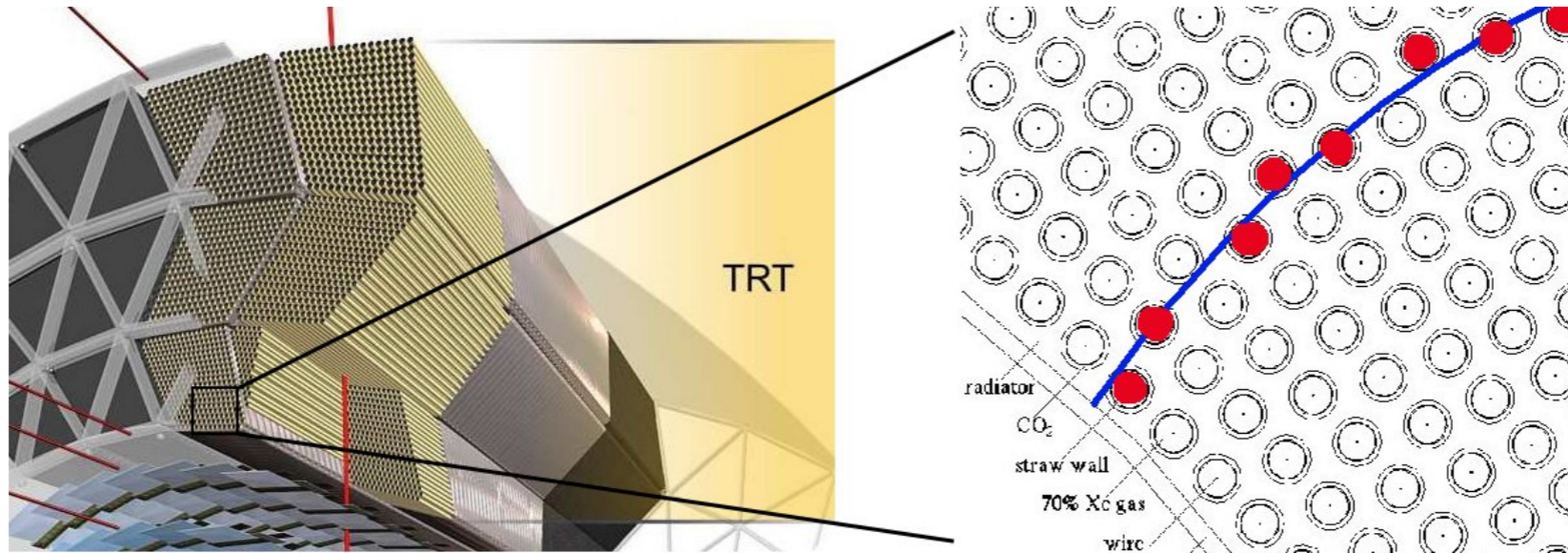
NA49



Georges Charpak
(1924-1992-2010)

İzci Olarak Gazlı Algıçlar

	CMS	ATLAS	ALICE	LHCb
Teknoloji	Silikon	Silikon+Sürüklenme Tüpleri (DT)+TRT	Silikon+Zaman Projeksiyon Odası (TPC)	Silikon+Sürüklenme Tüpleri (DT)



Geçiş Işınması

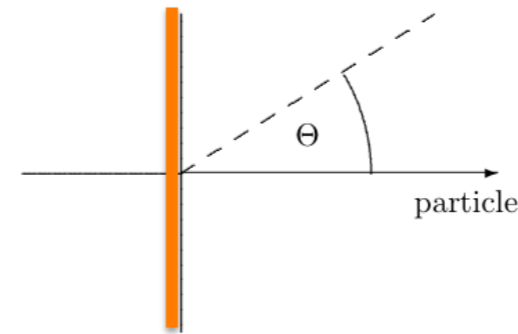
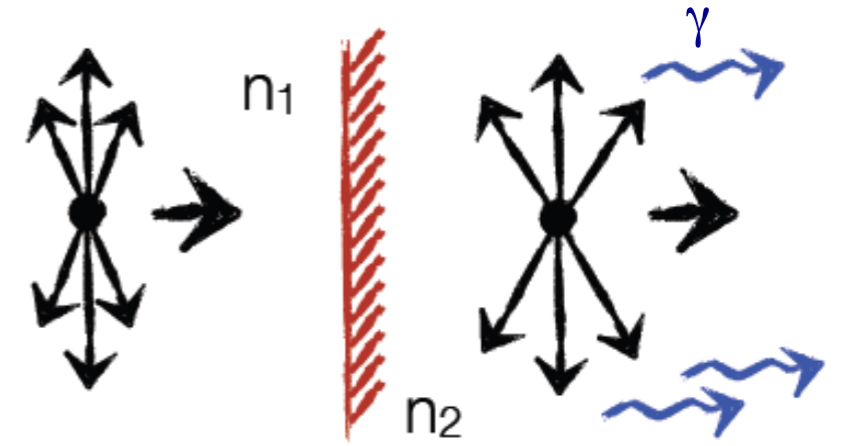
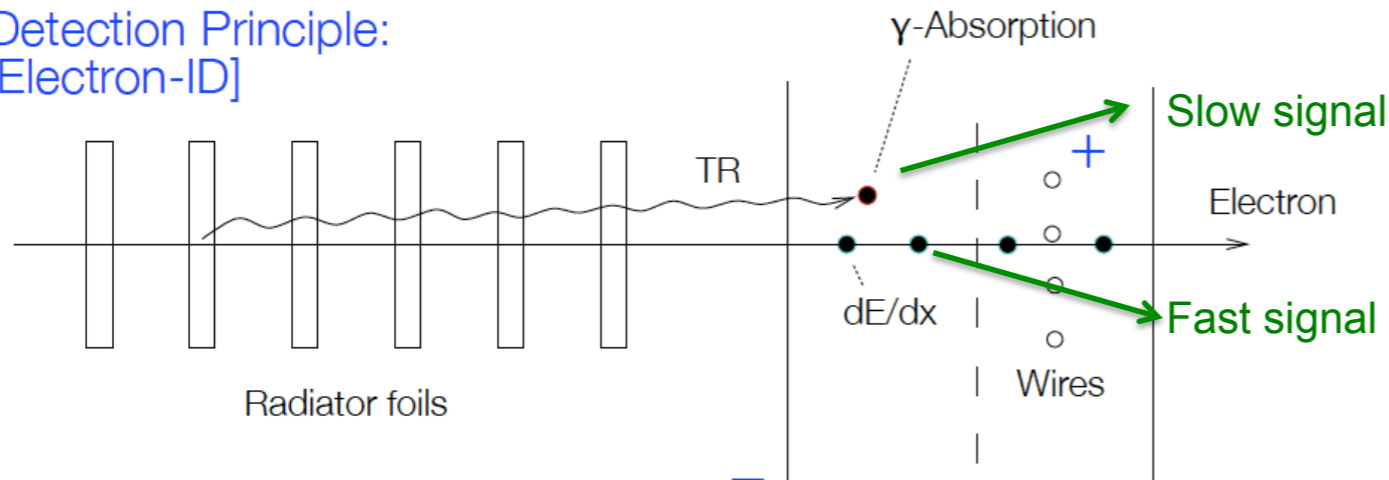
☑ Geçiş ışınması yüksek enerjili yüklü bir parçacığın kırılma indisi (dielektrik sabiti) farklı iki ortam arasında yaptığı geçiş sırasında ortaya çıkar.

◆ Elektrik alanının yeniden ayarlanması

☑ Tek bir sınırdan yayımlanan toplam enerji

$$S = \frac{1}{3} \alpha z^2 \gamma \hbar \omega_p \quad (\hbar \omega_p \approx 20 eV)$$

Detection Principle:
[Electron-ID]



$$\theta = 1/\gamma$$

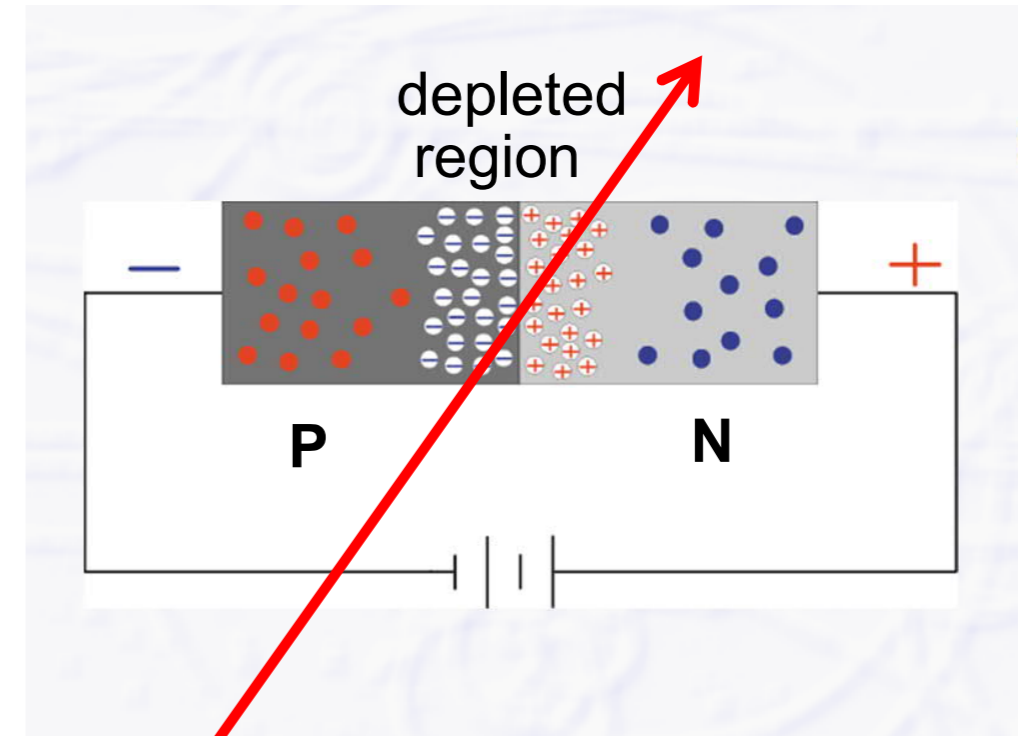
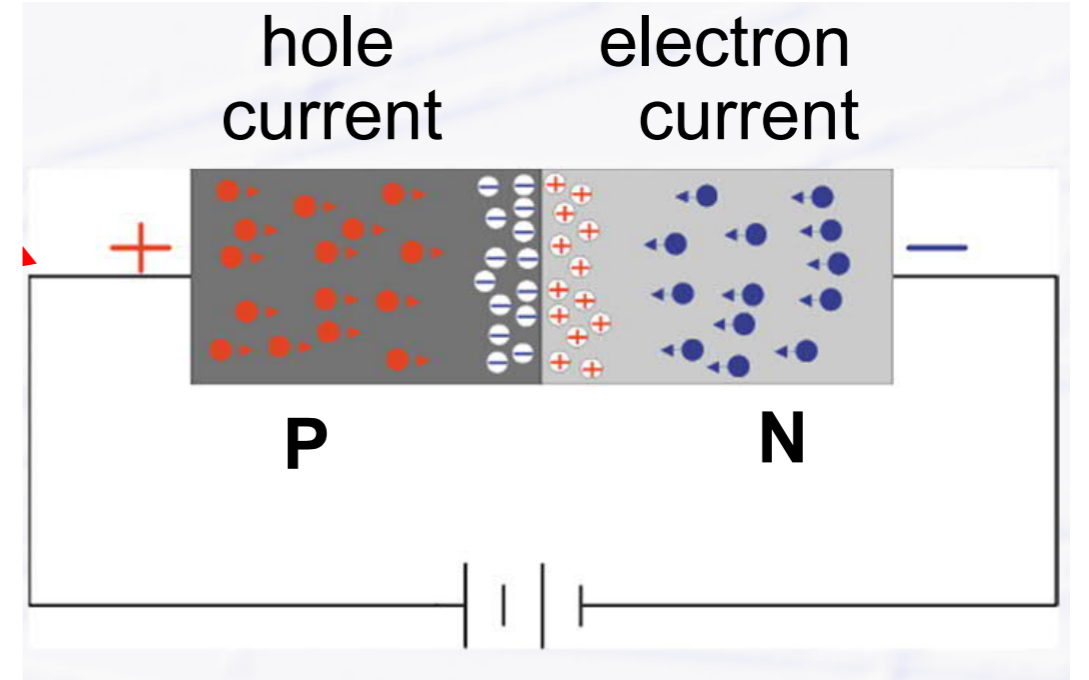
γ , geçiş ışınması enerjisi
 $\gamma > 1000$ efektif değer

☑ Düşük Z li geçiş materyalleri ve yüksek Z li gaz dedektörü beraber kullanılır.

☑ $E > 20$ keV x-ışınları radyatör katmanlarından sorulmadan geçebilir.

Silikon Algıçlar

- ☑ Yarı iletken algıçlar
- ☑ P-tipi ve n-tipi yarı iletkenlerin birleşimi, aslında diyot yapısı
- ☑ Parçacık algıcı olarak kullanılırken ters besleme uygulanır.
- ☑ Yüklü parçacıklar ara bölgede sinyal oluşturmaya yetecek kadar e-hole çifti oluşturur.
- ☑ 300 μm kalınlıkta yaklaşık. 20k-30k e-hole çifti



Silikon Şerit Algıçlar

☑ Geniş silikon algıçlar

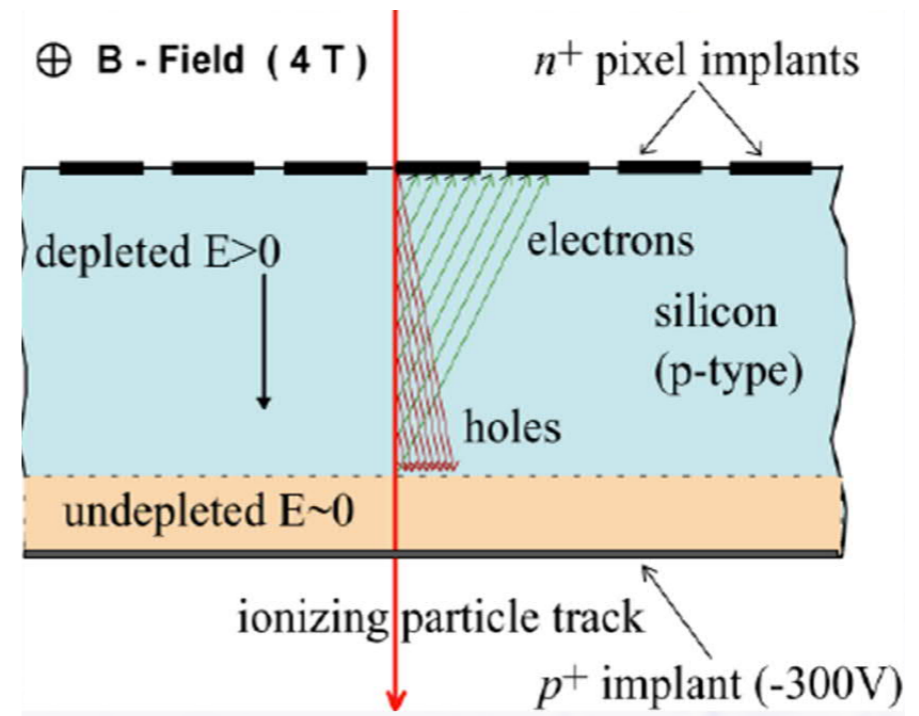
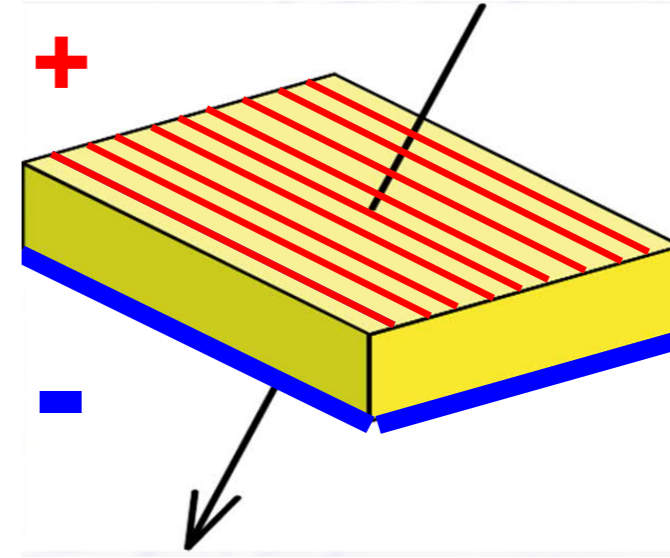
- ◆ 10x10 cm², 300 µm kalınlık

☑ Yoğun şerit yoğunluğu

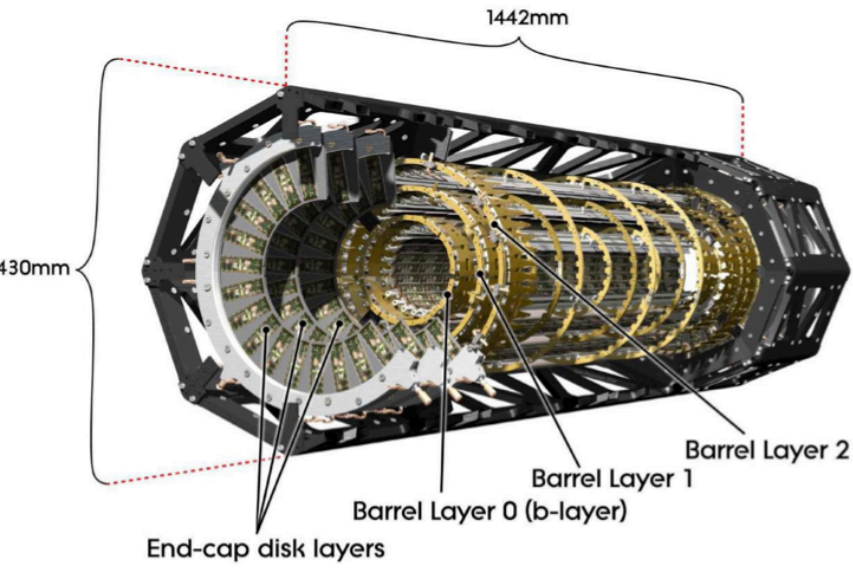
- ◆ 20 µm aralık

- ◆ Pozisyon ölçümünde yüksek duyarlılık

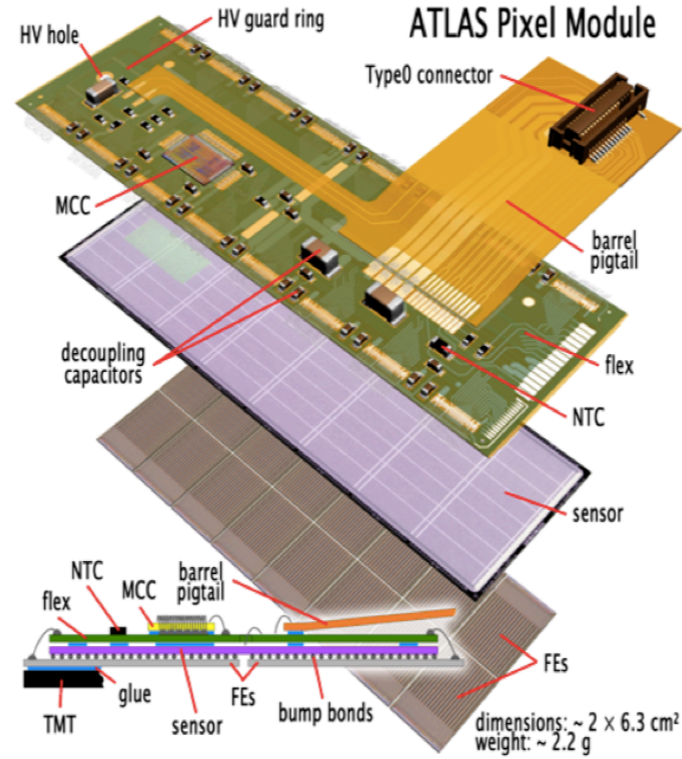
▶ $\sigma_x = 20 \mu\text{m} / \sqrt{12} = 5.8 \mu\text{m}$



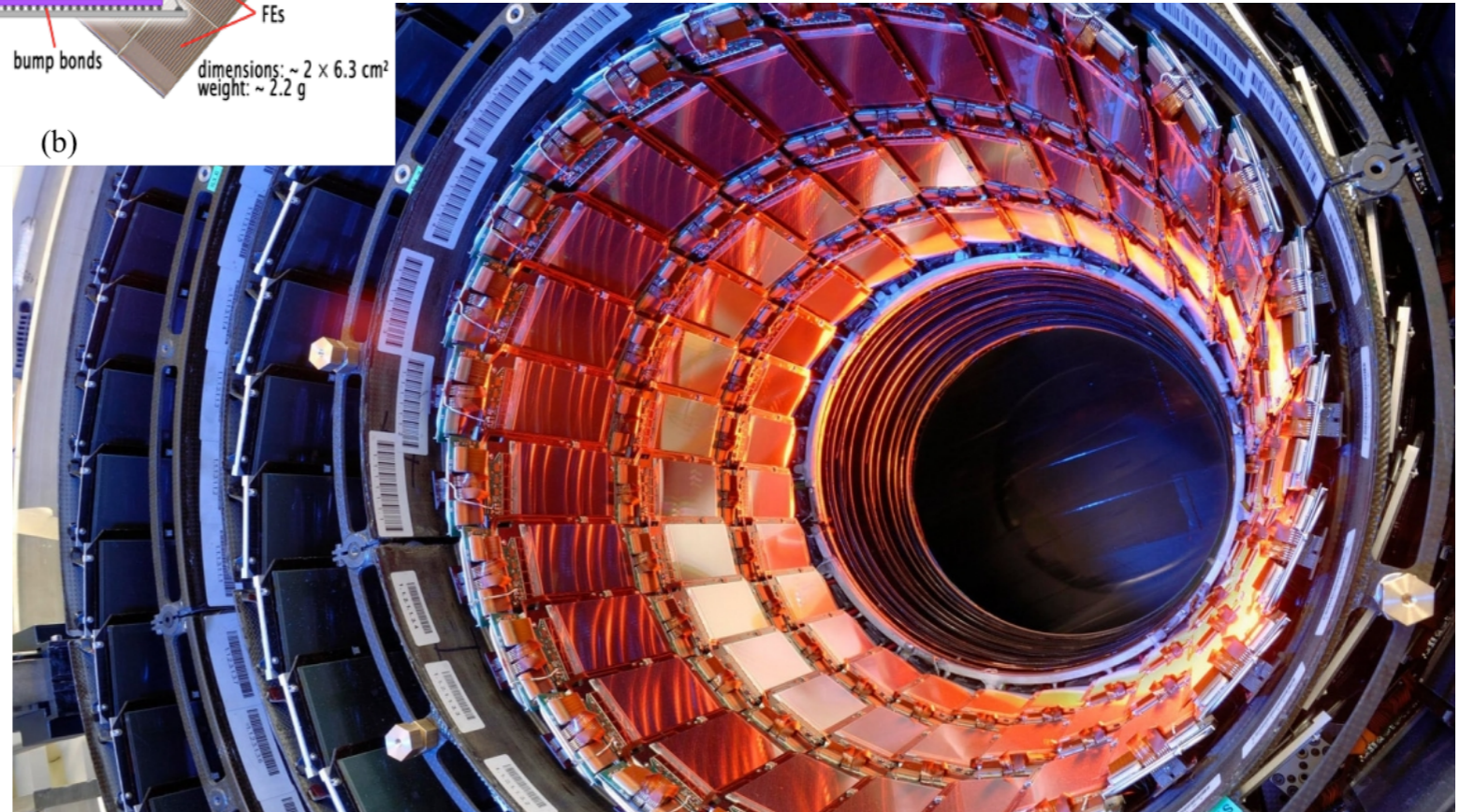
CMS ve ATLAS Silikon İzçiler



(a)



(b)



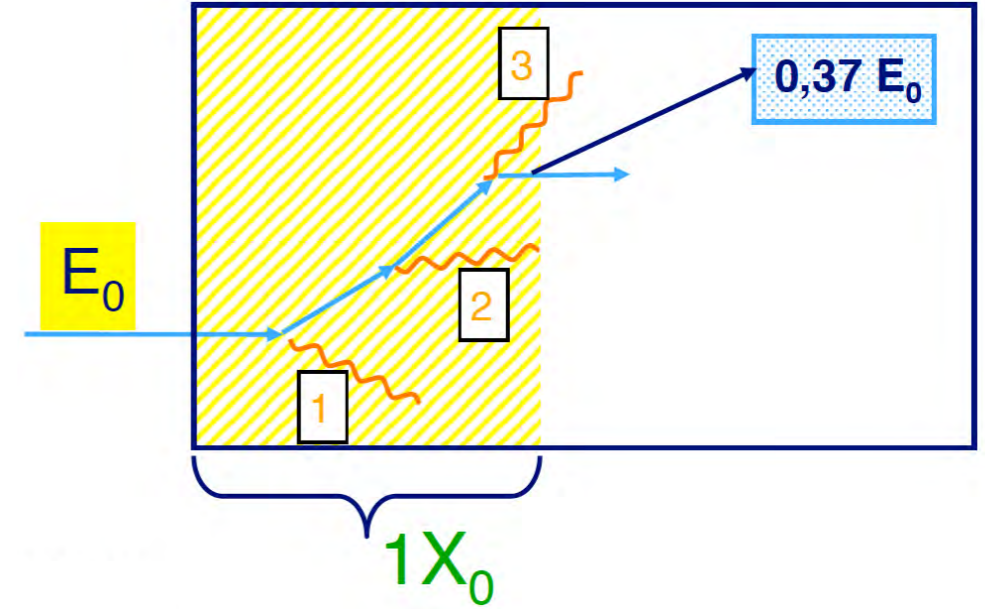
Kalorimetre

- ✓ Enerji ölçümü için kullanılır.
- ✓ Elektron için Bremsstrahlung yoluyla meydana gelen enerji kaybı:

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle_{Brems} = \frac{E}{X_0} \quad X_0 = \frac{A}{4\alpha N_A Z^2 r_e^2 \ln \frac{183}{Z^{1/3}}}$$

$$E = E_0 e^{-x/X_0}$$

- ✓ X_0 = ışınım uzunluğu
- ✓ X_0 aynı zamanda bir fotonun madde içerisinde bir elektron-pozitron çiftine dönüşmesi için gereken ortalama yolun 7/9'una eşittir.



Material	Z	X_0 (cm)	E_c (MeV)
H ₂ Gas	1	700000	350
He	2	530000	250
Li	3	156	180
C	6	18.8	90
Fe	26	1.76	20.7
Cu	29	1.43	18.8
W	74	0.35	8.0
Pb	82	0.56	7.4
Air	7.3	30000	84
SiO ₂	11.2	12	57
Water	7.5	36	83

Kalorimetrede Enerji Çözünürlüğü

✓ Parçacık duşunda oluşan parçacık sayısı etkileşim enerjisi ile doğru orantılıdır.

◆ $N \propto E/\sqrt{E_c}$ ($E_c \approx 10$ MeV)

◆ Enerji ölçümündeki istatistiksel hata $\sigma \propto \sqrt{N}$

◆ Enerji ölçümündeki görelî hata $\frac{\sigma_E}{E} \propto \frac{1}{\sqrt{E}}$

✓ Algıçtaki homojensizlikler ve elektronik gürültüden gelen katkıları ile birlikte

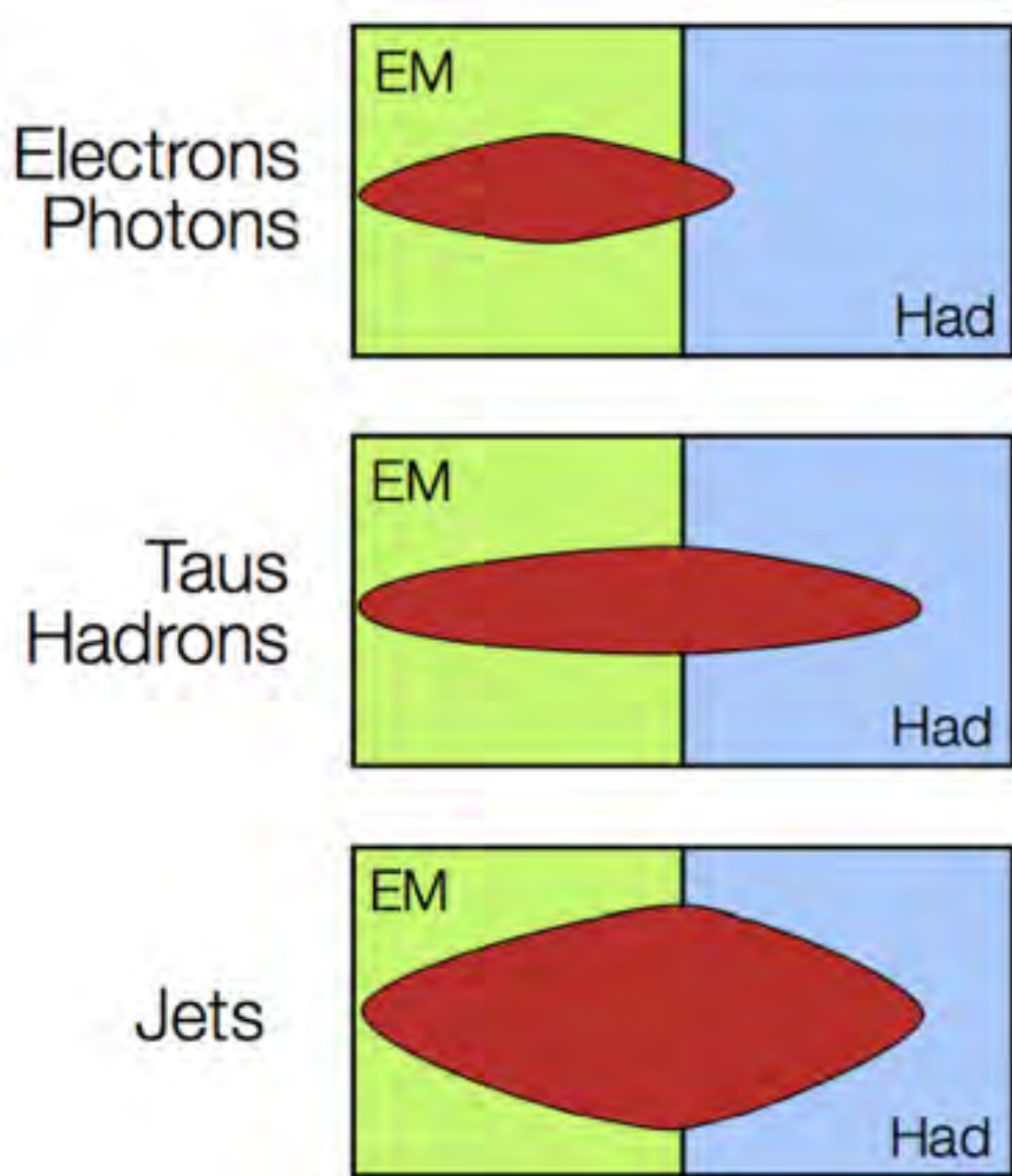
$$\frac{\sigma}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus b \oplus \frac{c}{E}$$

a: stochastic terim

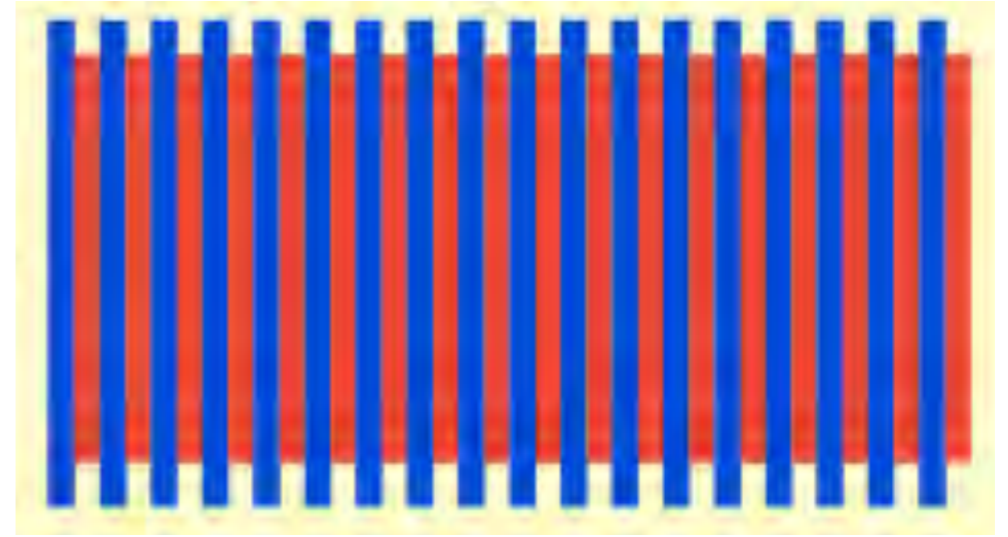
b: Sabit terim (homojensizlik, vs.)

c: gürültü terimi (elektronik gürültü)

Kalorimetre Tipleri



Örnekleme Kalorimetre



Pb ve plastik sintilatör

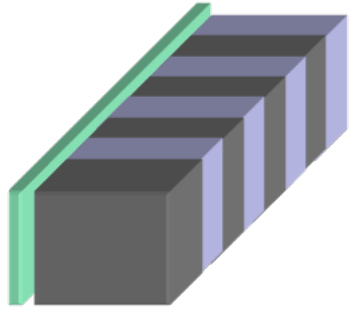
Homojen Kalorimetre



PbWO₄, BGO, LYSO, ...

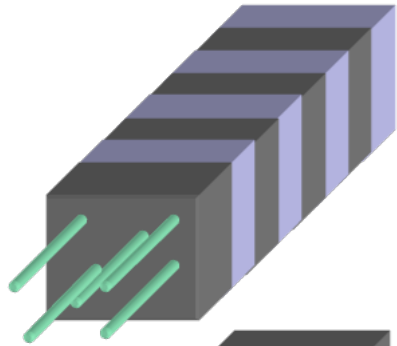
Kalorimetre Tipleri

Elektromanyetik Kalorimetre



Sandviç

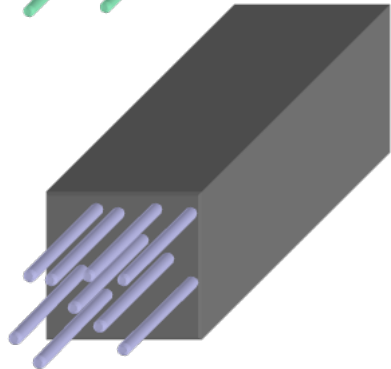
	CMS	ATLAS	ALICE	LHCb
Teknoloji	PbWO ₄ kristal	Pb/LAr akordiyon	Pb-sintilatör shashlik	Pb-sintilatör shashlik



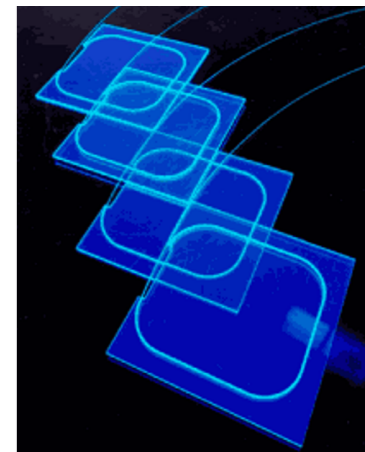
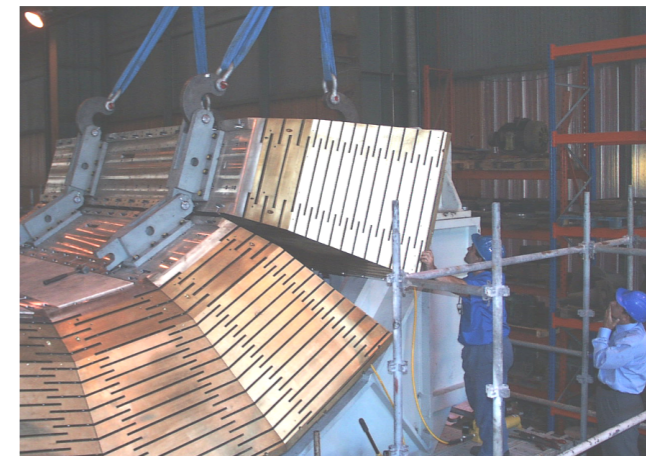
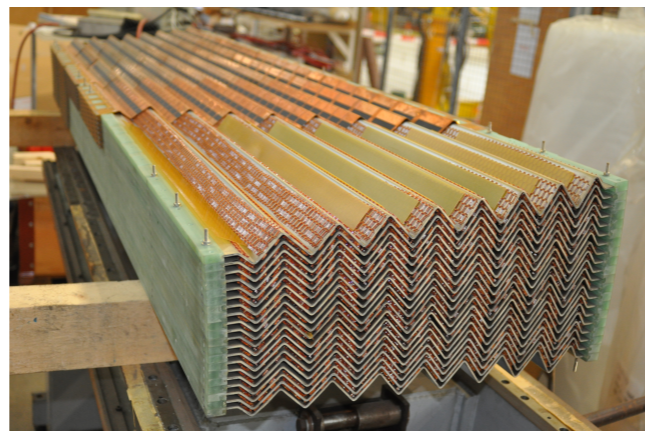
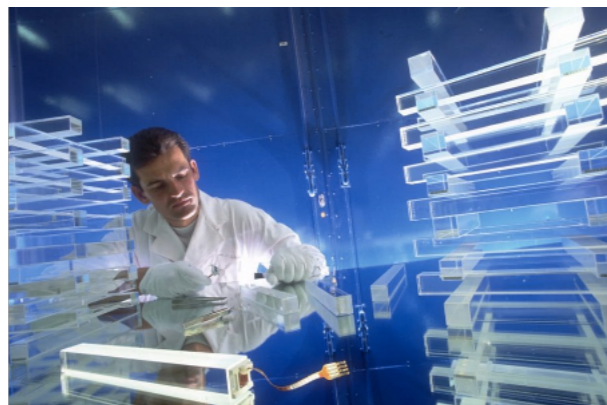
Shashlik

Hadronik Kalorimetre

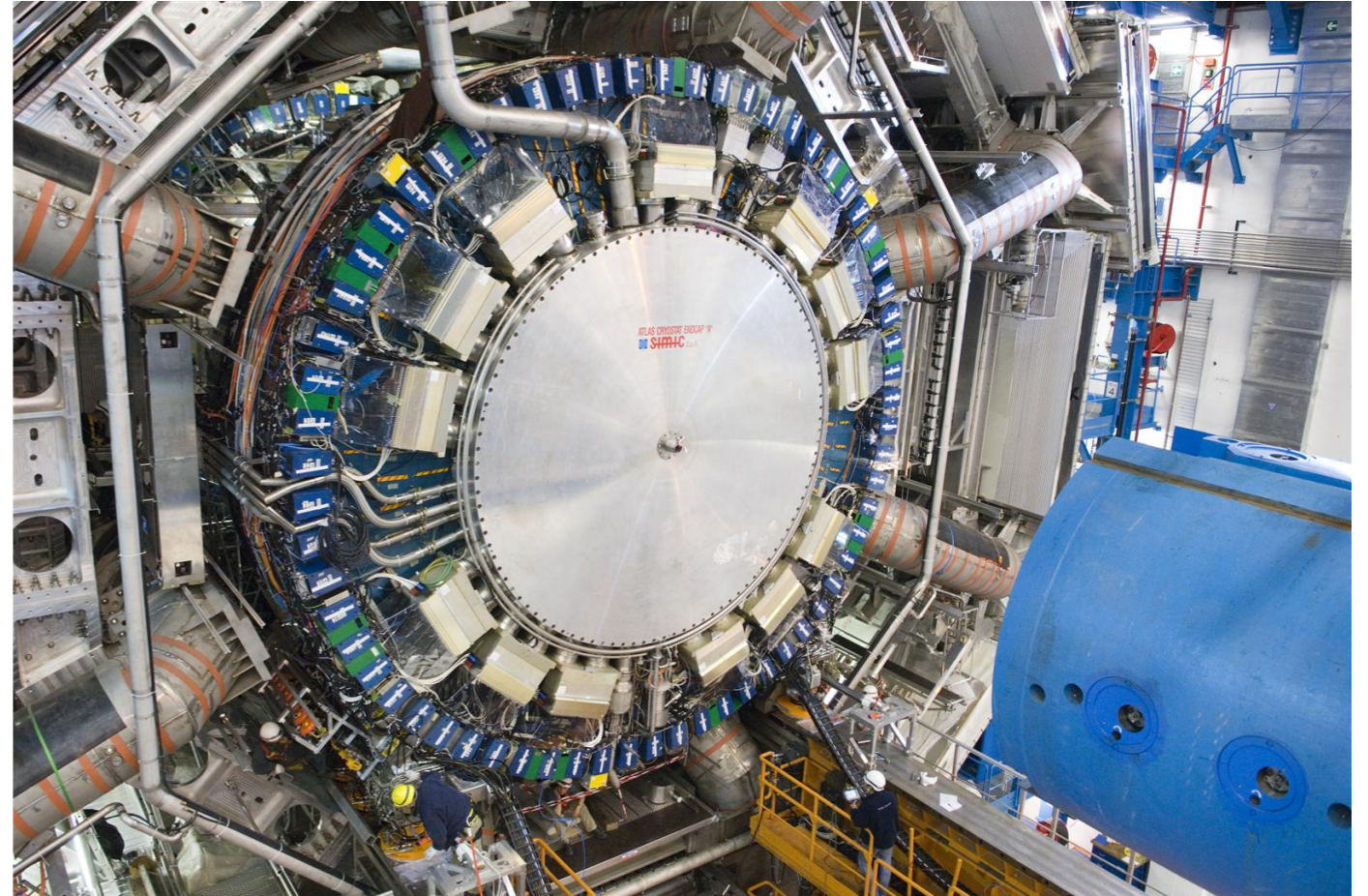
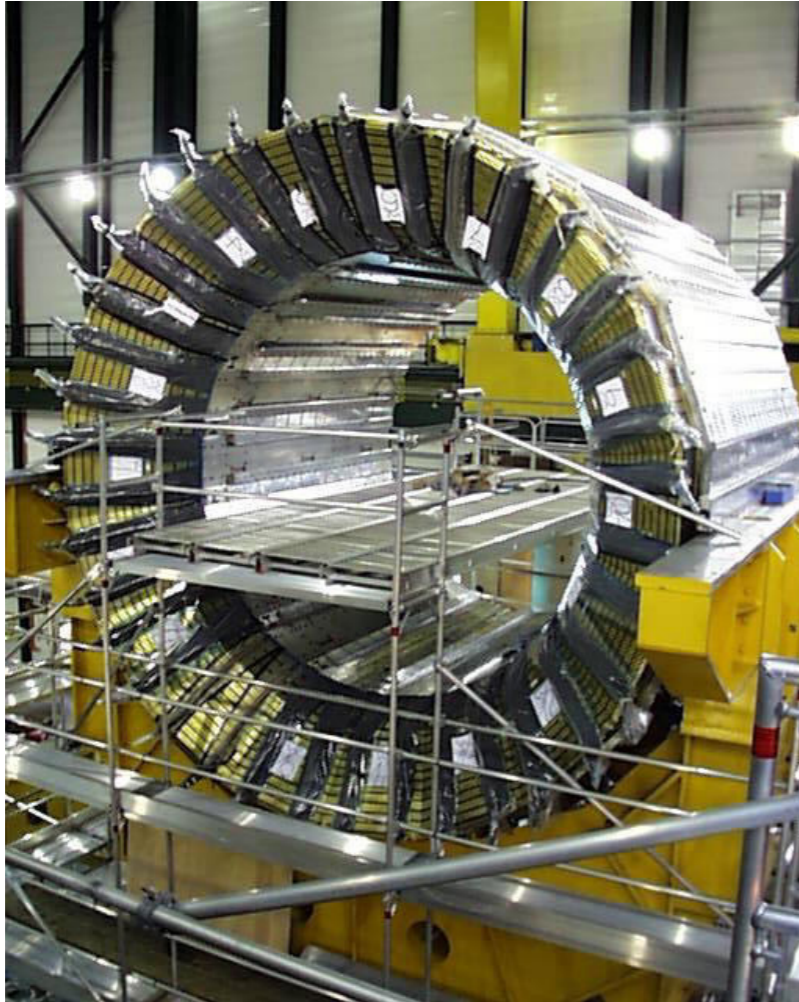
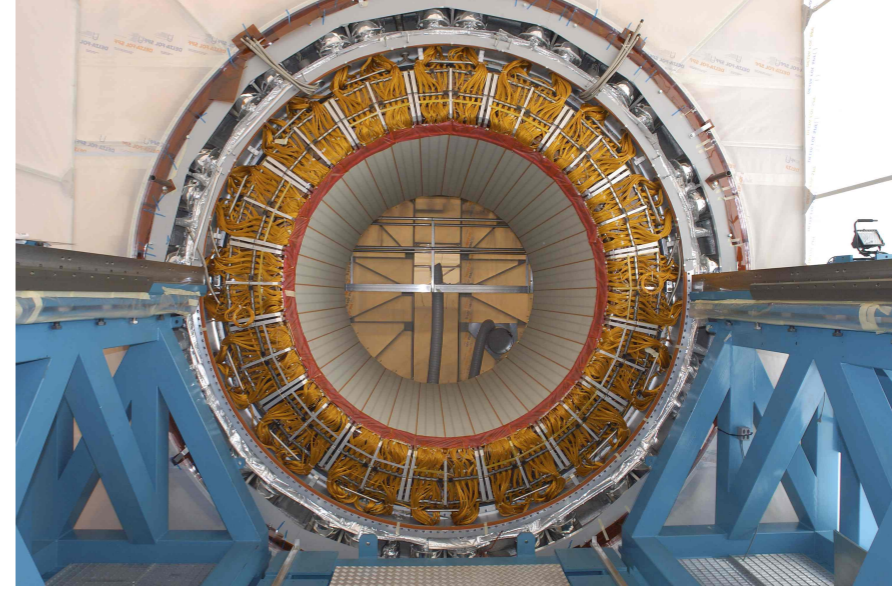
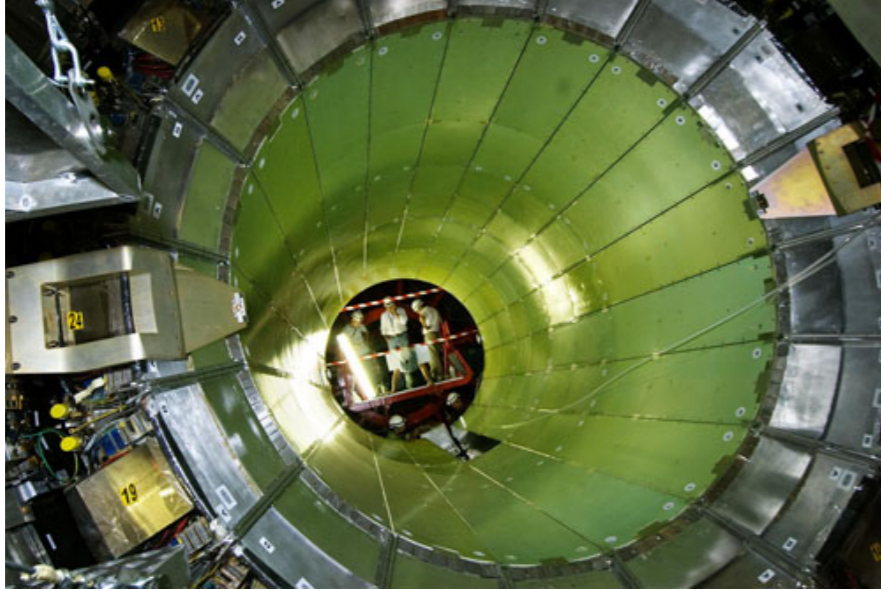
Teknoloji	CMS	ATLAS	ALICE	LHCb
Barrel	Brass-scintillator tile	Fe-scintillator tile		Fe-scintillator tile
Forward	Brass-scintillator tile	Cu/LAr CuW/LAr	W-quartz fiber	



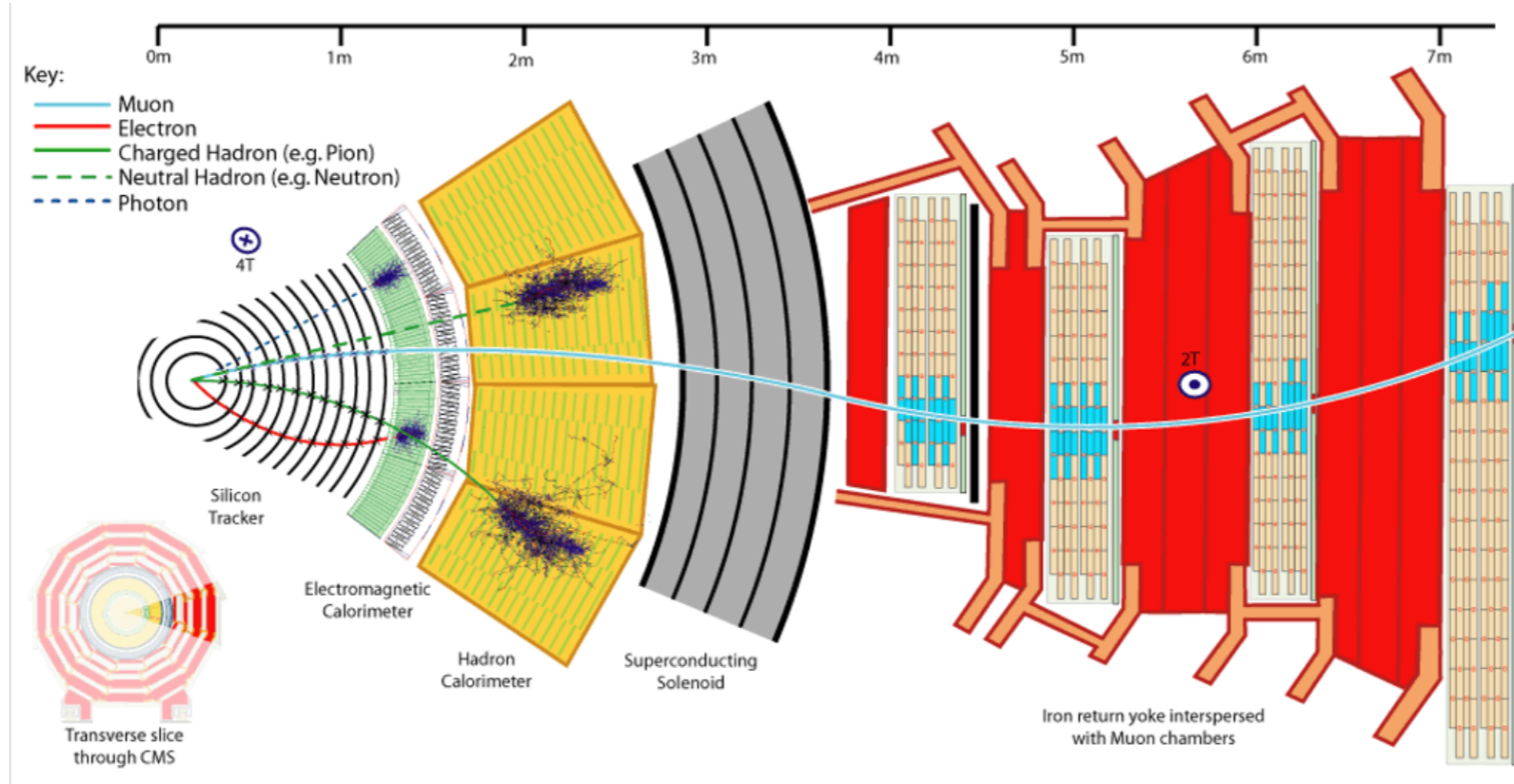
Spagetti



CMS ve ATLAS Kalorimetreleri

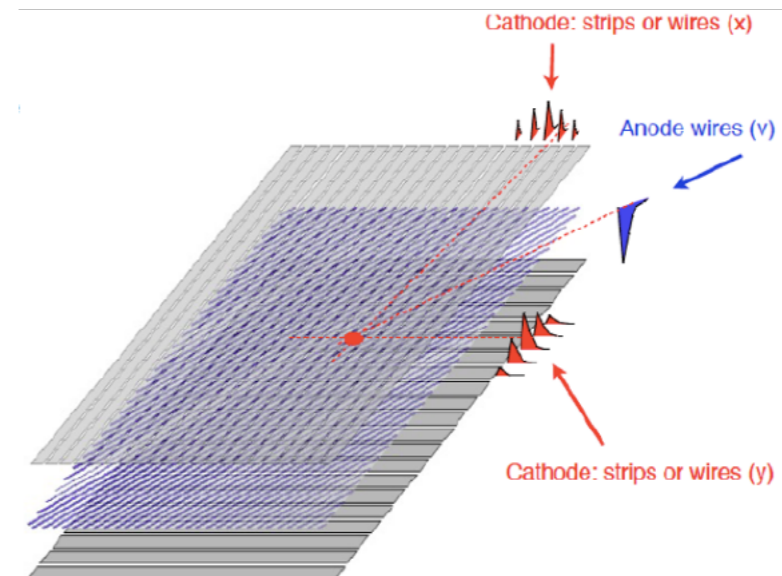
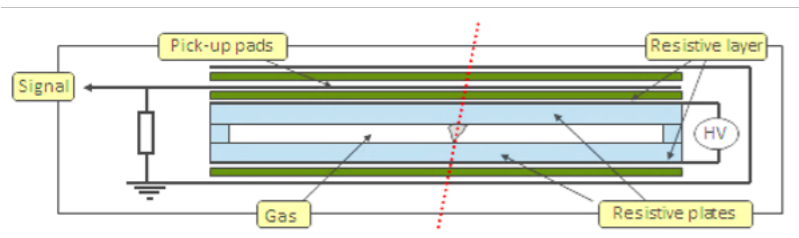
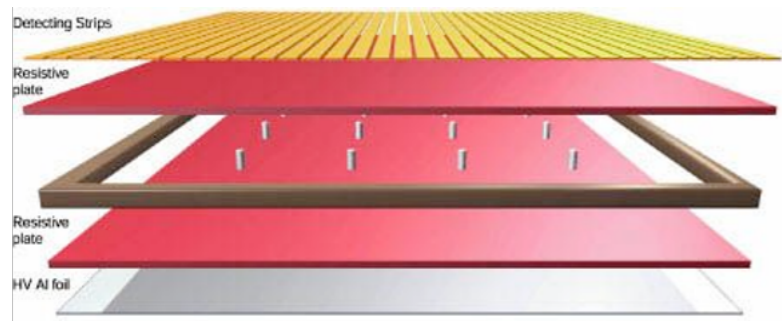
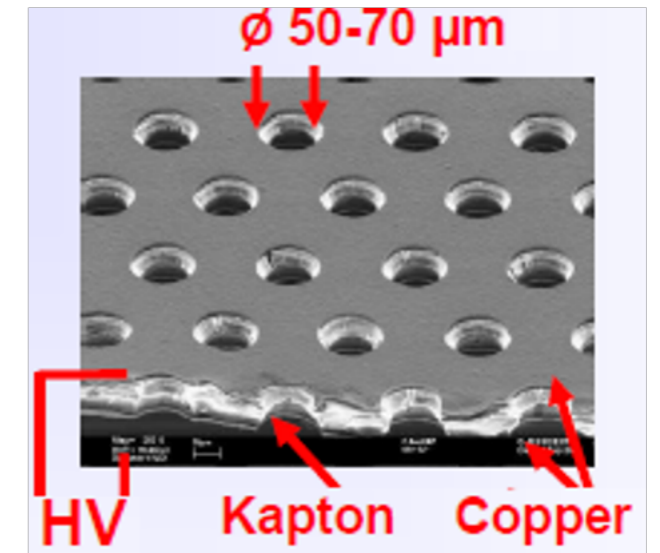
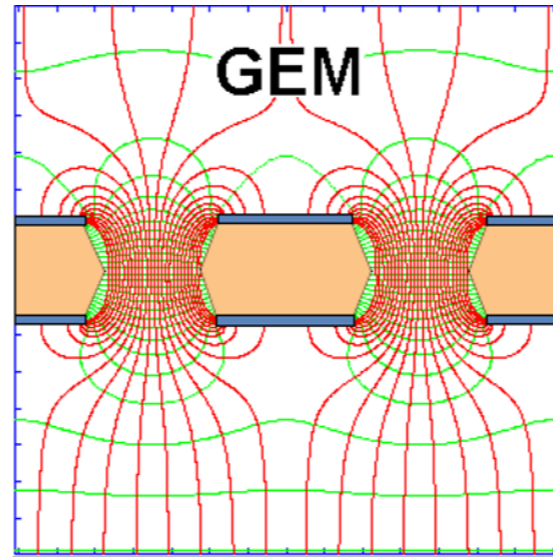
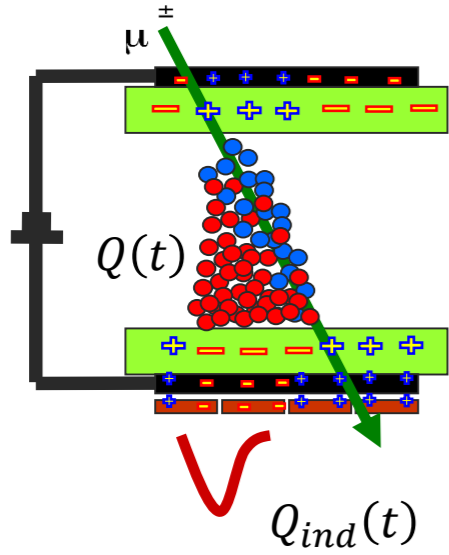


Muon Algıci



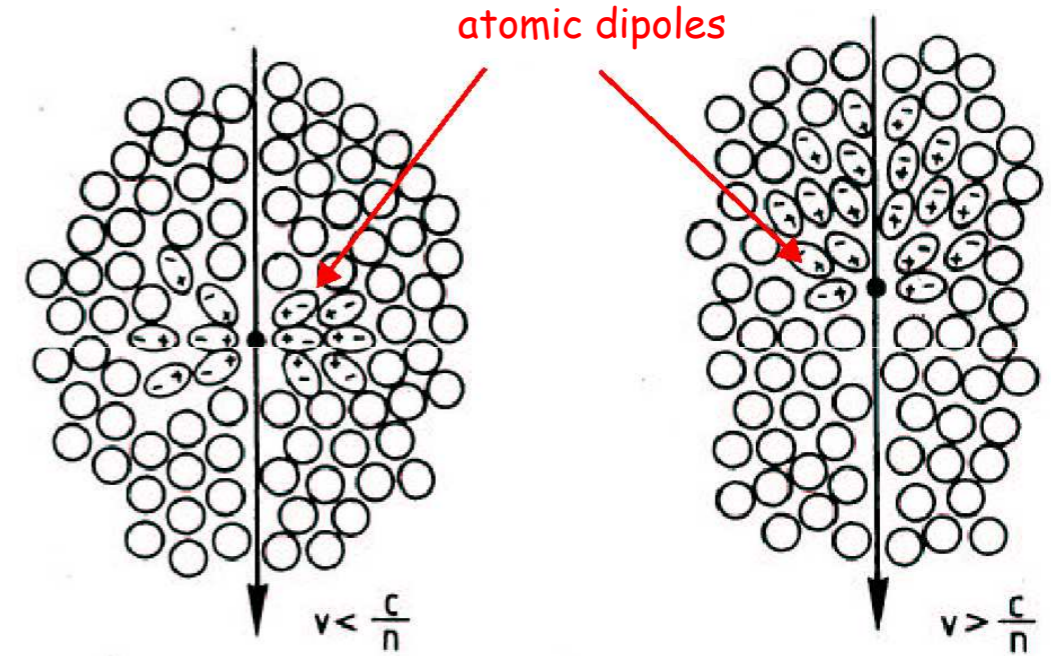
	CMS	ATLAS	ALICE	LHCb
Teknoloji	<p>Sürüklenme tüpleri (DTs)</p> <p>Katot şerit odaları (CSCs)</p> <p>Dirençli levha odaları (RPCs)</p>	<p>Sürüklenme tüpleri (DTs)</p> <p>Katod şerit odaları (CSCs)</p> <p>Dirençli levha odaları (RPCs)</p> <p>Thin Gap Chambers (TGCs)</p>	<p>Katod şerit odaları (CSCs)</p> <p>Dirençli levha odaları (RPCs)</p>	<p>Çok telli orantılı sayaçlar (MWPCs)</p> <p>Gaz elektron çoklayıcılar (GEMs)</p>

Muon Algıçları



Cherenkov Işınımı

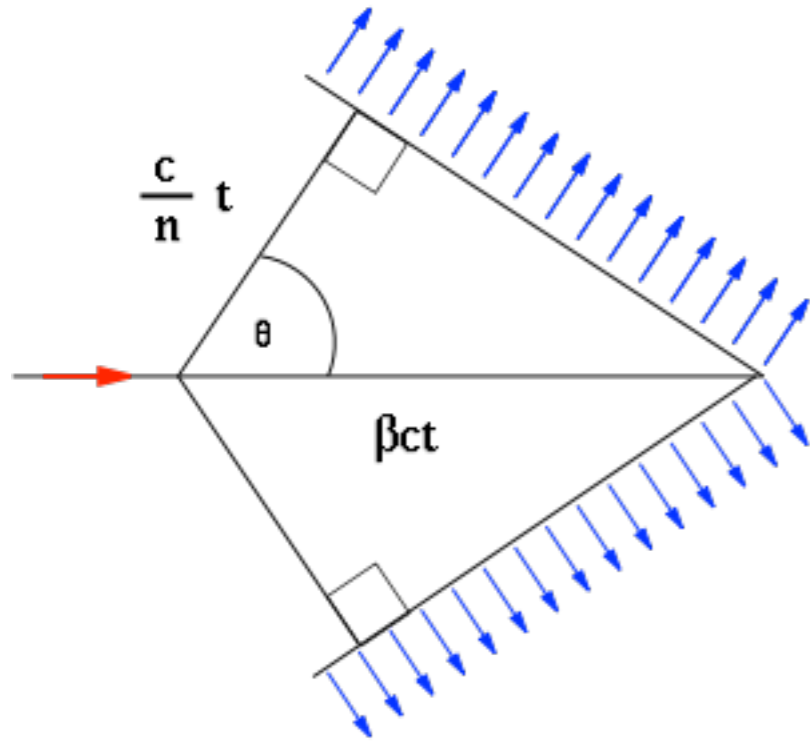
- ☑ Işık madde ortamından geçerken hızı azalır.
 - ✓ kırılma indisi katsayısı n .
 - ✓ $n = c/v$
- ☑ Yüklü bir parçacık madde ortamından geçerken bazı atomik elektronları polarize eder.
- ☑ Eğer parçacığın hızı, ışığın o ortam içindeki hızında c/n fazla ise bir elektromanyetik şok dalgası meydana gelir. Buna Cherenkov radyasyonu denir.
- ☑ Cherenkov radyasyonunda kaynaklı enerji kaybı küçüktür.
 - ✓ $dE/dx \sim 1-5\%$



$v < c/n$ dipoller
simetrik,
net radyasyon yok

$v > c/n$ dipoller
asimetrik,
Cherenkov
radyasyonu

Cherenkov Radyasyon Açısı



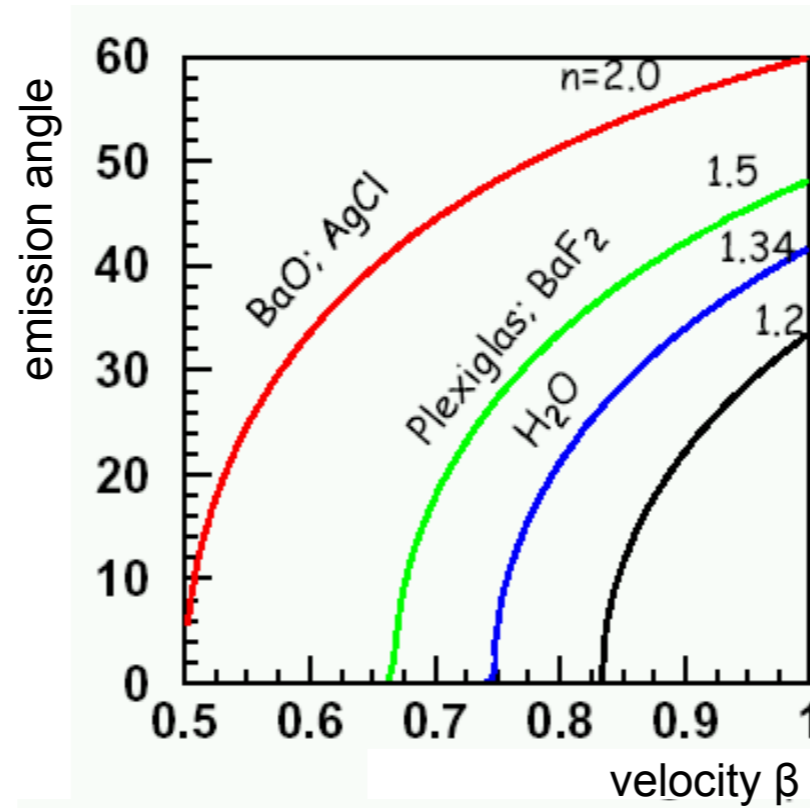
$$\cos \theta_c = \frac{c}{n \beta c} = \frac{1}{n \beta}$$

✓ Yayınlanma açısı θ_c parçacığın hızına ve ortamın kırılma indisi katsayısına bağlıdır.

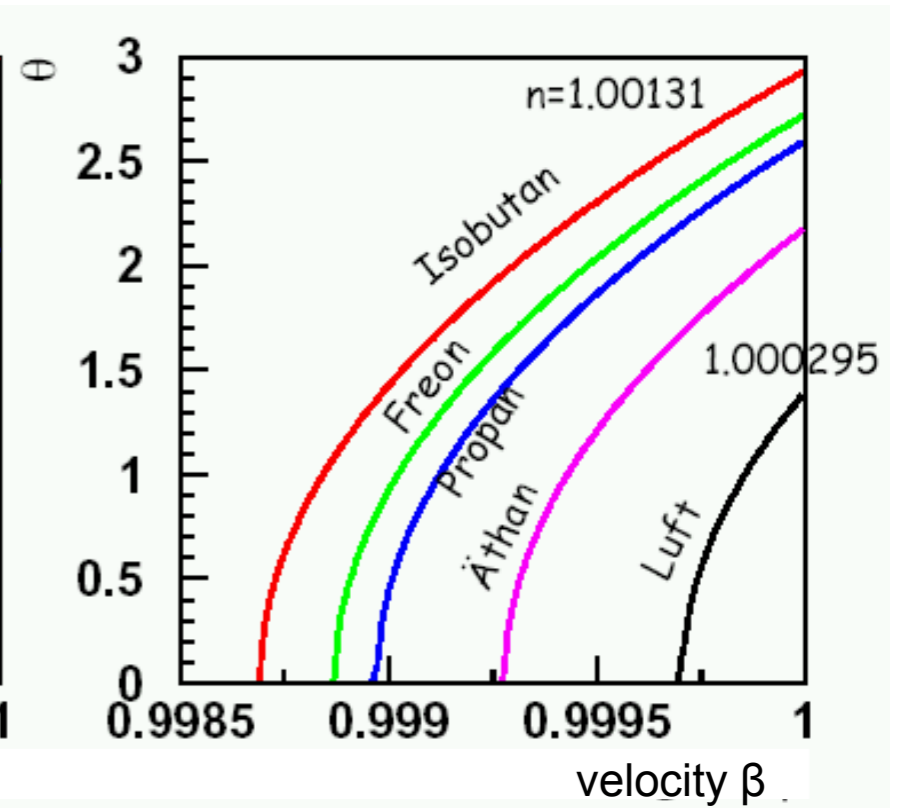
✓ $\beta_{eşik} = 1/n \Rightarrow$ açılma açısı $\theta_c \approx 0^\circ$

✓ en fazla açılma açısı: $\beta \approx 1 \Rightarrow \arccos \theta_c = 1/n$

Liquids, solids



Gases



	$\theta_{c, \max}$	$\sin^2(\theta_{c, \max})$
Hava	1.38°	5.8×10^{-4}
CO ₂	1.72°	9.0×10^{-4}
Su	41.4°	0,44

Cherenkov Radyasyon Enerjisi

- ☑ Cherenkov radyasyonu için eşik enerjisi.

$$E_{thresh}(n, m) = mc^2 \frac{n}{\sqrt{n^2 - 1}}$$

- ✓ Bu enerjide fotonlar parçacık ile aynı yönde yayımlanır.
- ✓ Enerji arttıkça açı meydana gelir.

- ☑ $\Delta n = n - 1 \ll 1$ için,

$$E_{thresh}(n, m) = \frac{mc^2}{\sqrt{2\Delta n}}$$

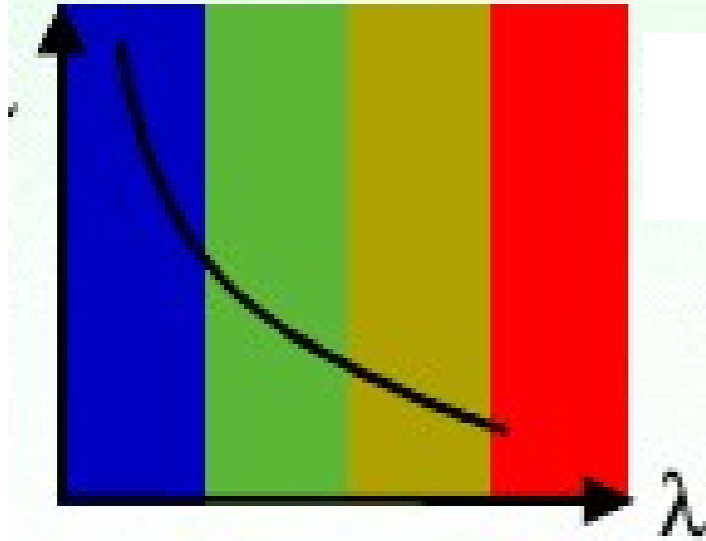


	Hava ($\Delta n = 2.9 \times 10^{-4}$)	CO ₂ ($\Delta n = 4.5 \times 10^{-4}$)	Su ($n = 1.33$)
e	20.75 MeV	16.7 MeV	0.75 MeV
μ	4.4 GeV	3.52 GeV	159 MeV
π	5.6 GeV	4.5 GeV	204 MeV
p	39 GeV	31 GeV	1.4 GeV

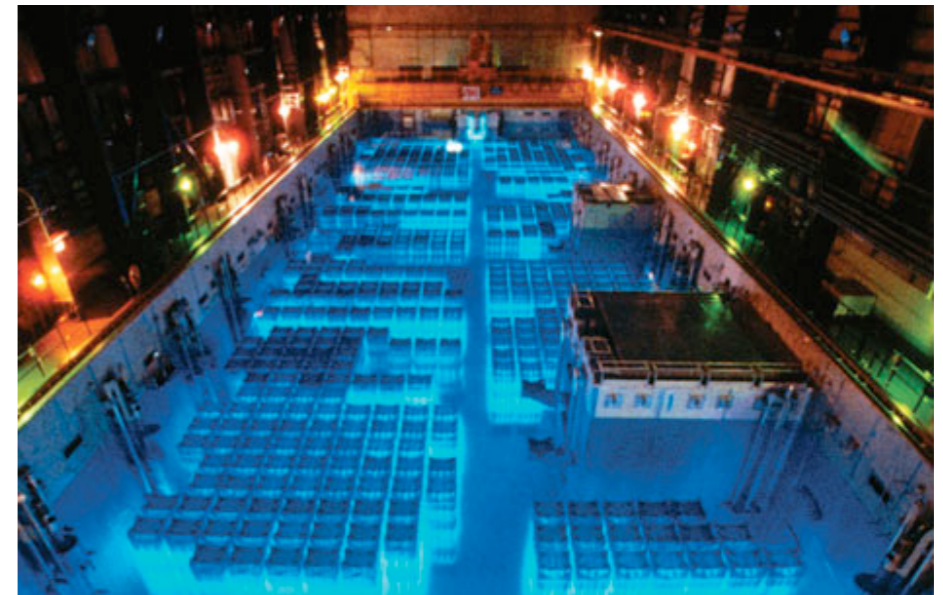
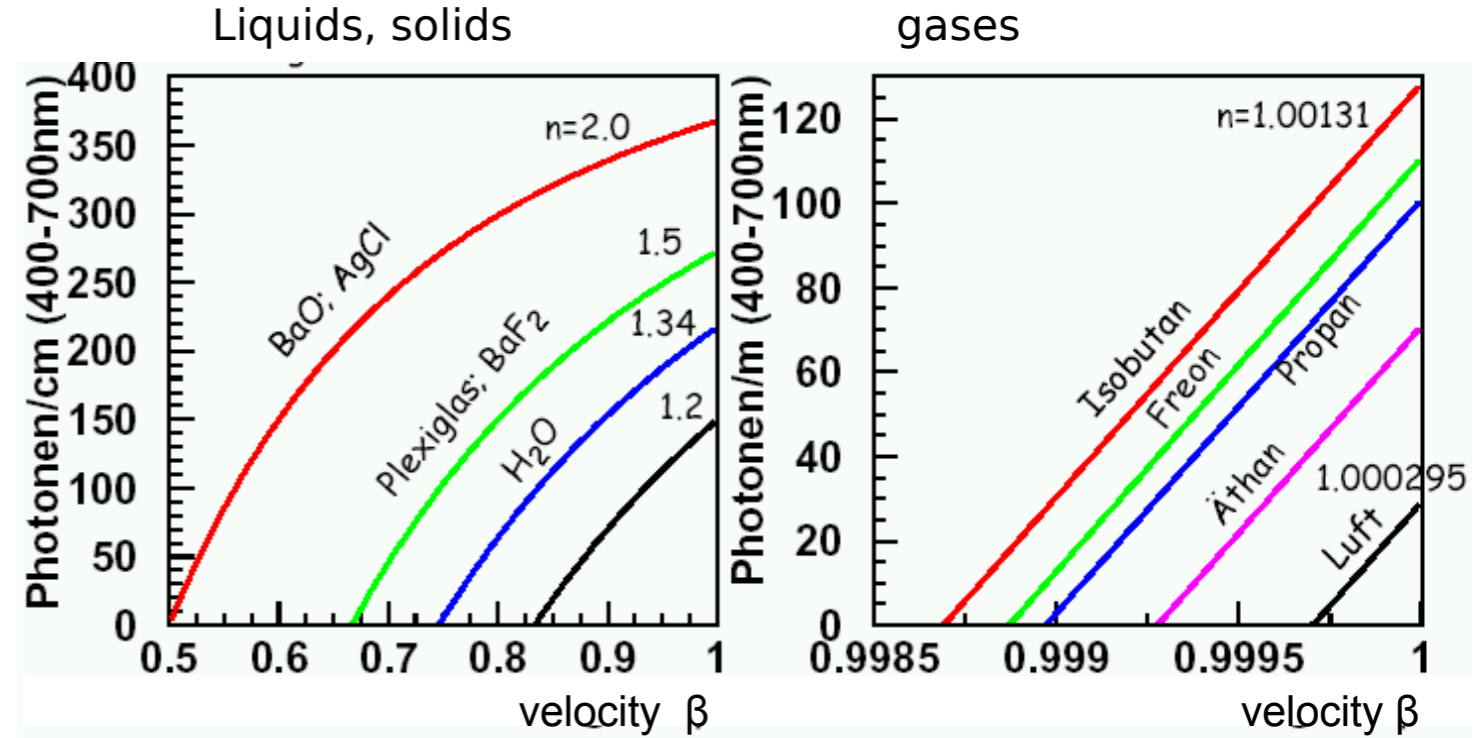
Cherenkov Radyasyon Fotonları

$$\frac{d^2 N}{dE dx} \approx 370 \sin^2 \theta_c(E) eV^{-1} cm^{-1}$$

$dN/d\lambda$



Yayımlanan foton sayısı $\sim 1/\lambda^2$
görünebilir ve morötesi ışık



Nötron Etkileşimleri

- ☑ Yüksüzdür. Geçtikleri ortamı direkt iyonize etmezler.
- ☑ Çekirdek ile etkileşim sonucu ortaya çıkan ikincil radyasyonlar ile belirlenebilir.
- ☑ Temelde dört farklı enerji bölgesi vardı
 - ◆ Yavaş nötronlar: 0 - 0.4 eV
 - ▶ Ultra soğuk, soğuk, termal ve sıcak
 - ◆ Epitermal nötronlar: 200 keV'e kadar
 - ◆ Hızlı nötronlar: 200 keV-20 MeV
 - ◆ Yüksek enerji: 20 MeV den büyük
- ☑ Elastik saçılma, inelastik saçılma, nötron yakalama

Nötron Elastik Saçılma

$n + X \rightarrow n + X$

Çekirdek ile esnek çarpışarak enerji kaybederler. Kayıp enerji optik foton olarak açığa çıkar.

Esnek çarpışma başına enerjideki logaritmik azalma

$$\xi = \ln \frac{E_0}{E} = 1 + \frac{(A-1)^2}{2A} \ln \left(\frac{A-1}{A+1} \right) \quad n_{saçılma} = \frac{\ln(E_0/E)}{\xi}$$

A atom numarasıdır. Hidrojen en iyi nötron durdurucusudur.

Hızlı bir nötronun (1 MeV) termal nötrona (0.025 eV) dönüşmesi için

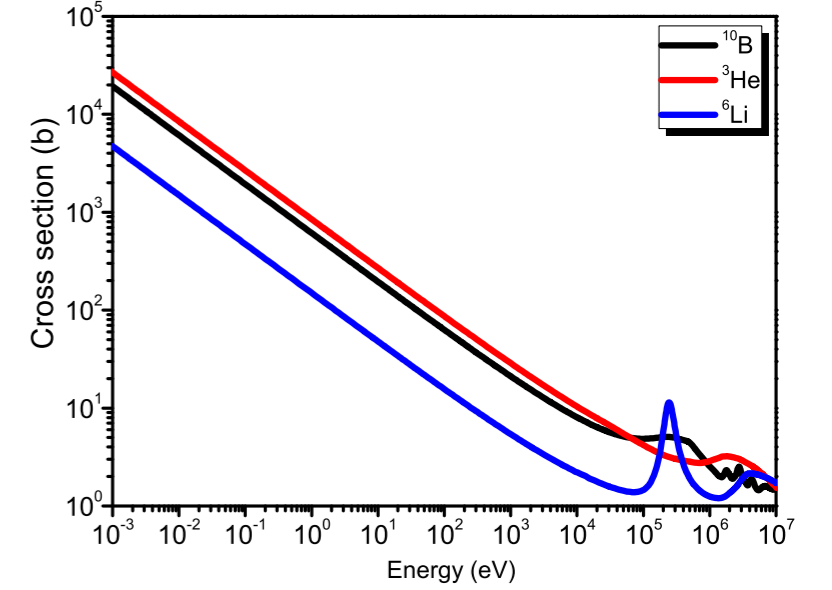
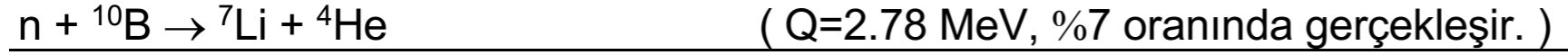
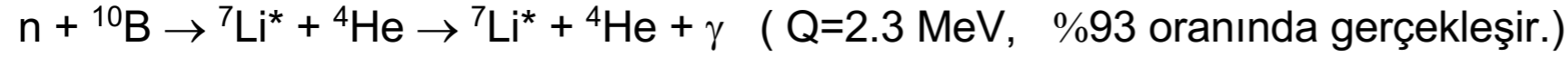
Hidrojen için 18 kez saçılma

Karbon için 200 kez saçılma

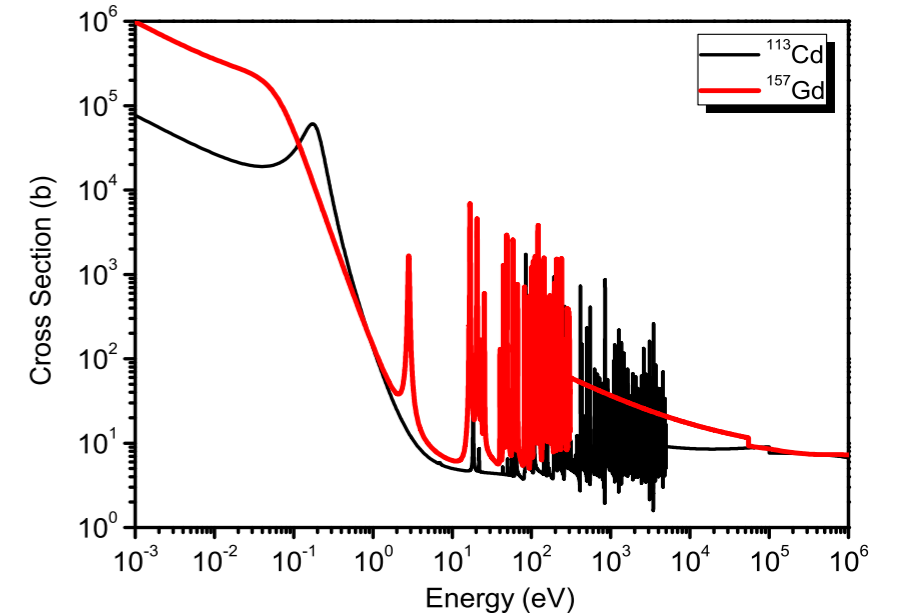
Demir için 500 kez saçılma

Nötron İnelastik Saçılma ve Nötron Yakalama

İnelastik Saçılma



Nötron Yakalama



Nötrino Etkileşimleri

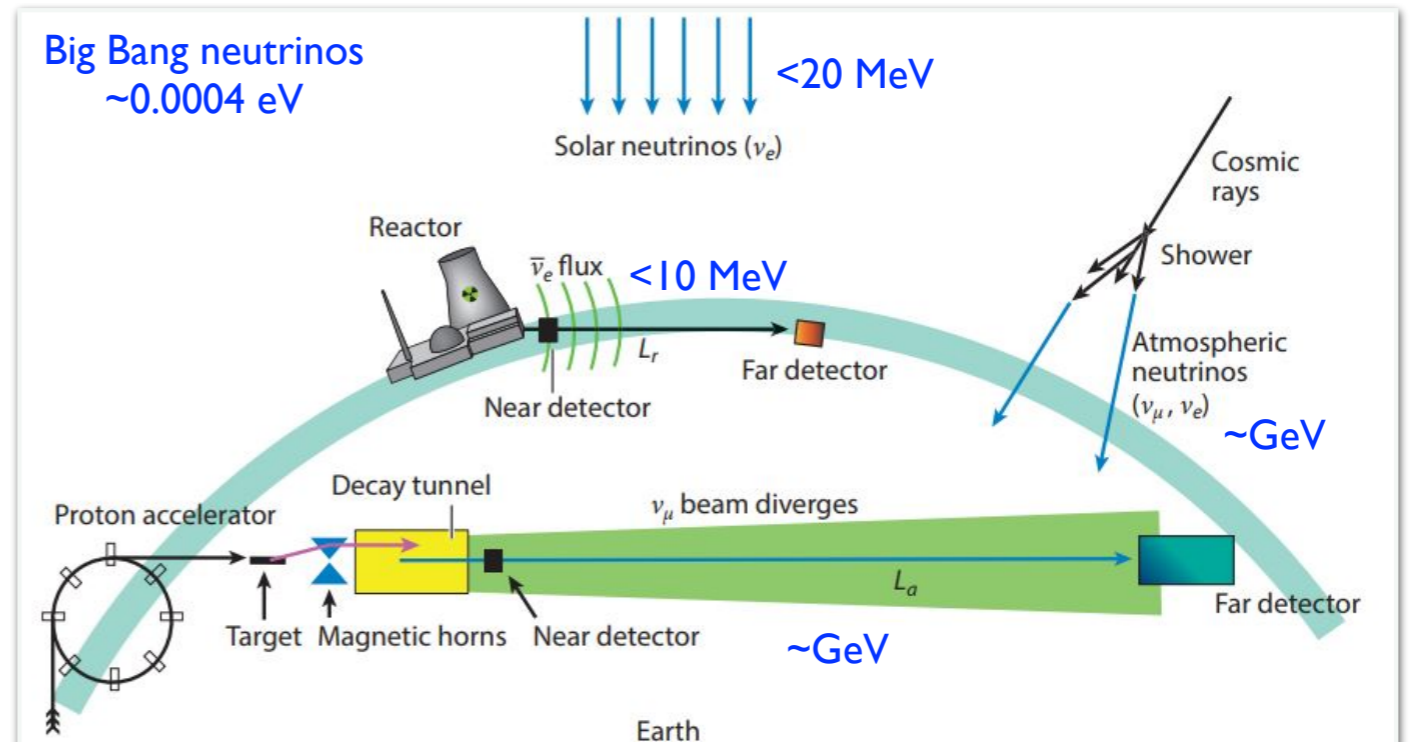
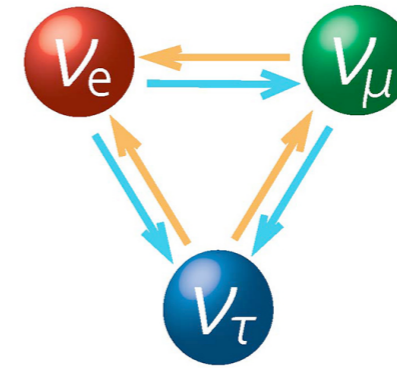
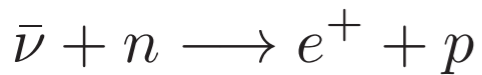
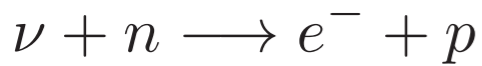
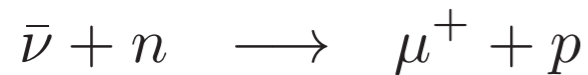
☑ Nötrinolar neredeyse kütsesiz, temel ve zayıf etkileşen parçacıklardır.

☑ Üç tür nötrino vardır.

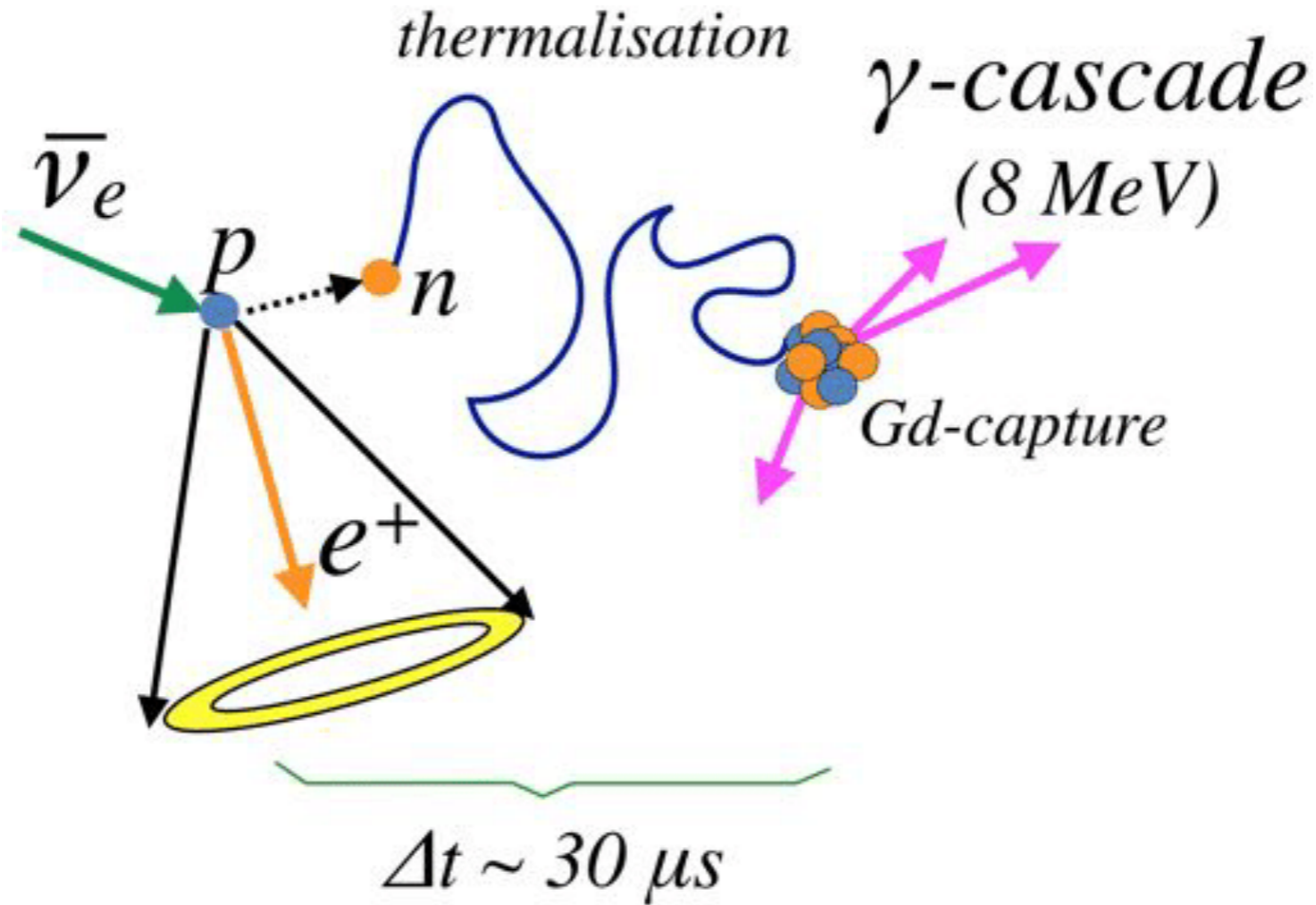
◆ Nötrino osilasyonu

☑ Etkileşim tesir kesiti çok düşük.

☑ Nötrino etkileşimleri:



Reaktör Nötrinosu Etkileşimi



Sintilasyon (Parıldama)

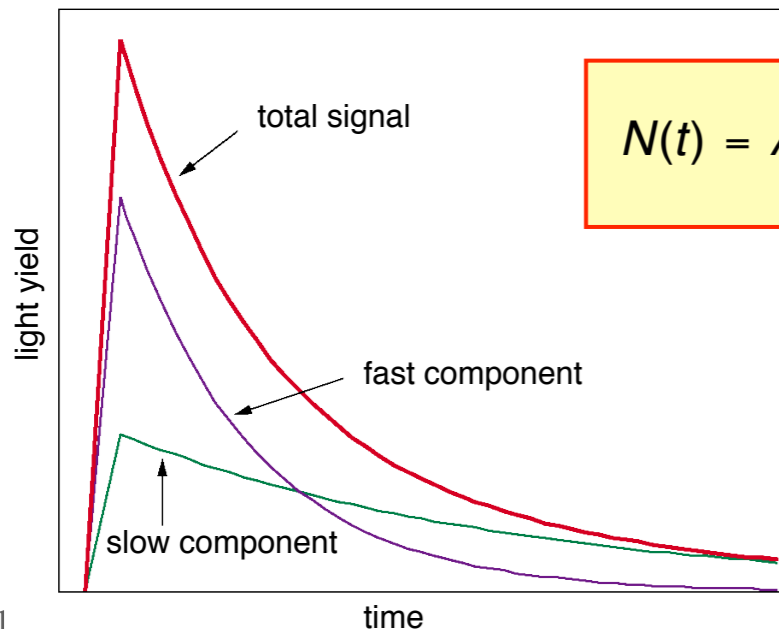
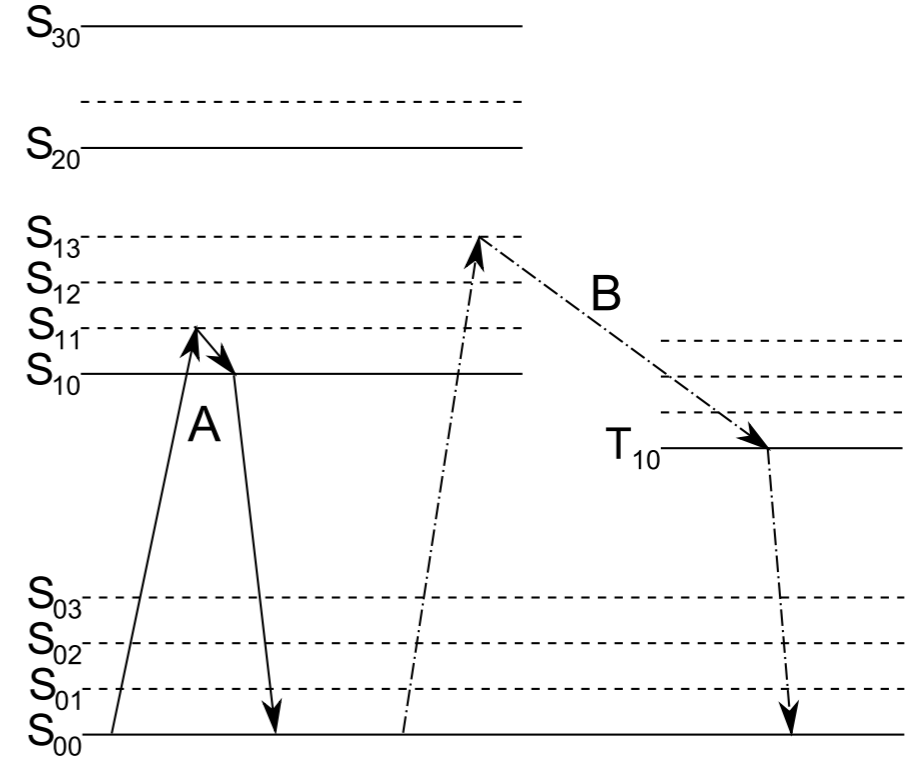
☑ Sintilasyon, atomların ve moleküllerin radyasyon ile uyarılmasının ardından fotonların yayımlanmasıdır.

◆ Floresans (singlet, ns) ve fosforesans (triplet, (μs – ms arası))

☑ Sintilasyon yapan malzemeden yapılan detektörlere sintilatörler denir.

◆ İnorganik kristal, organik kristal, organik sıvı, plastik, cam

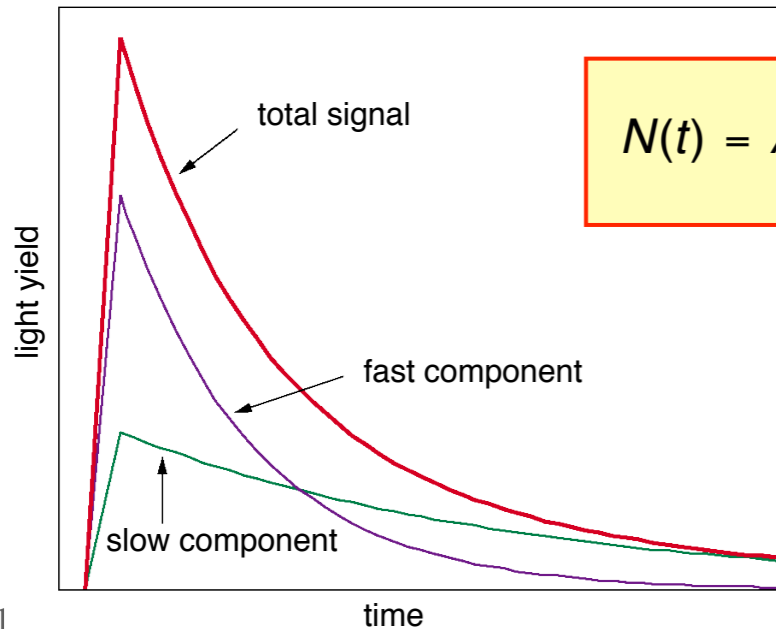
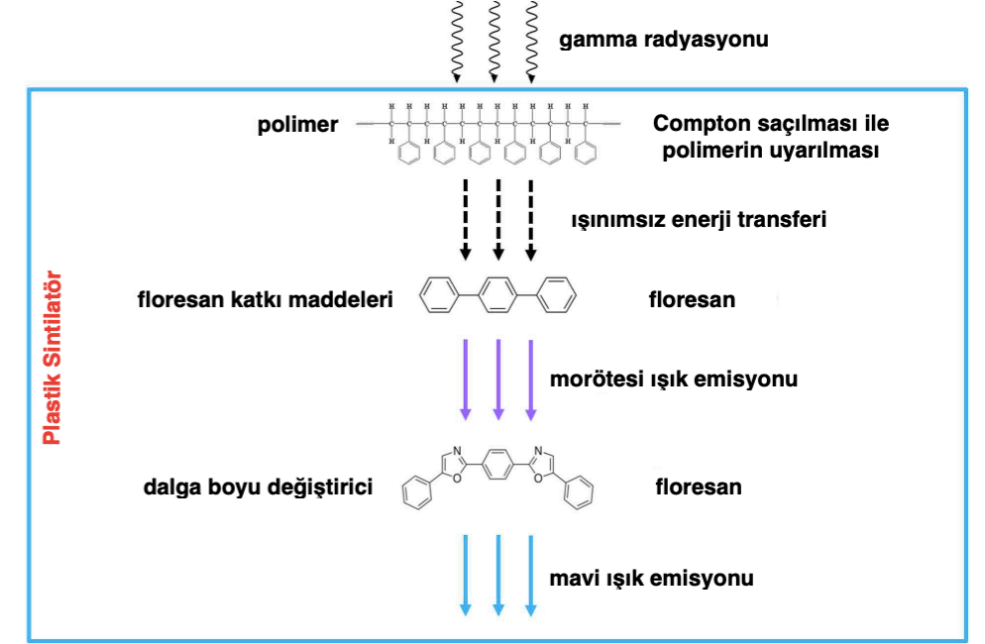
◆ Hızlı tepki süresi, hassas enerji ölçümü, ucuz ve güvenilir



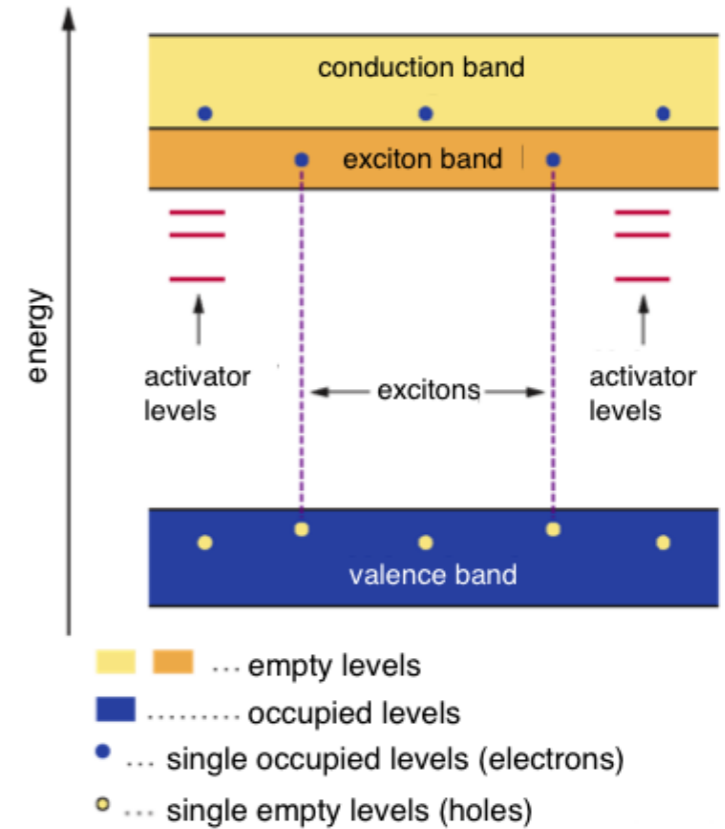
$$N(t) = A \cdot \exp\left(\frac{-t}{\tau_f}\right) + B \cdot \exp\left(\frac{-t}{\tau_s}\right)$$

Sintilasyon (Parıldama)

- ☑ Sintilasyon, atomların ve moleküllerin radyasyon ile uyarılmasının ardından fotonların yayımlanmasıdır.
- ☑ Sintilasyon yapan malzemeden yapılan detektörlere sintilatörler denir.
 - ◆ İnorganik kristal, organik kristal, organik sıvı, plastik, cam
 - ◆ Hızlı tepki süresi, hassas enerji ölçümü, ucuz ve güvenilir



$$N(t) = A \cdot \exp\left(\frac{-t}{\tau_f}\right) + B \cdot \exp\left(\frac{-t}{\tau_s}\right)$$



Sintilatörler

Name	Formula	Density (g/mm ³)	Z _{eff}	Light yield (ph/MeV)	Primary Decay time (ns)	Emission (nm)
LSO:Ce	Lu ₂ SiO ₅ :Ce	7.40	66	35,000	32	420
GSO:Ce	Gd ₂ SiO ₅ :Ce	6.71	59	20,000	60	440
LPS:Ce	Lu ₂ Si ₂ O ₇ :Ce	6.2	64	23,000	30	380
GPS:Ce	Gd ₂ Si ₂ O ₇ :Ce	5.5	58	30,000	46	380
BGO	Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂	7.13	74	8,000	300	480
YAP:Ce	YAlO ₃ :Ce	5.35	34	20,000	24	365
LuYAG:Pr	Lu _{2.25} Y _{0.75} Al ₅ O ₁₂ :Ce	6.20	60	33,000	20	310
GGAG:Ce	Gd ₃ Ga ₃ Al ₂ O ₁₂ :Ce	6.5	54	47,000	51	540

PROPERTIES	EJ-200	EJ-204	EJ-208	EJ-212
Light Output (% Anthracene)	64	68	60	65
Scintillation Efficiency (photons/1 MeV e ⁻)	10,000	10,400	9,200	10,000
Wavelength of Maximum Emission (nm)	425	408	435	423
Light Attenuation Length (cm)	380	160	400	250
Rise Time (ns)	0.9	0.7	1.0	0.9
Decay Time (ns)	2.1	1.8	3.3	2.4
Pulse Width, FWHM (ns)	2.5	2.2	4.2	2.7
H Atoms per cm ³ (×10 ²²)	5.17	5.15	5.17	5.17
C Atoms per cm ³ (×10 ²²)	4.69	4.68	4.69	4.69
Electrons per cm ³ (×10 ²³)	3.33	3.33	3.33	3.33
Density (g/cm ³)	1.023	1.023	1.023	1.023

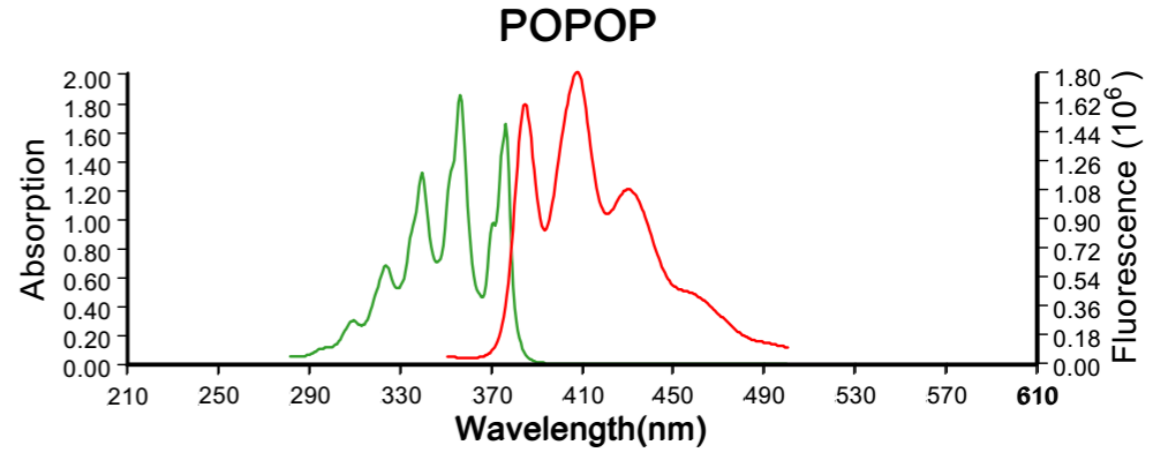
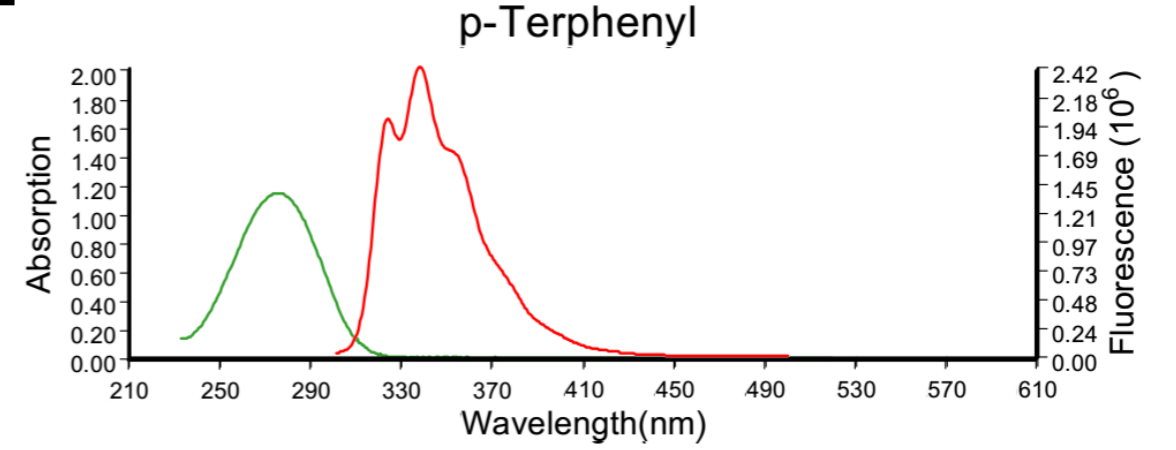
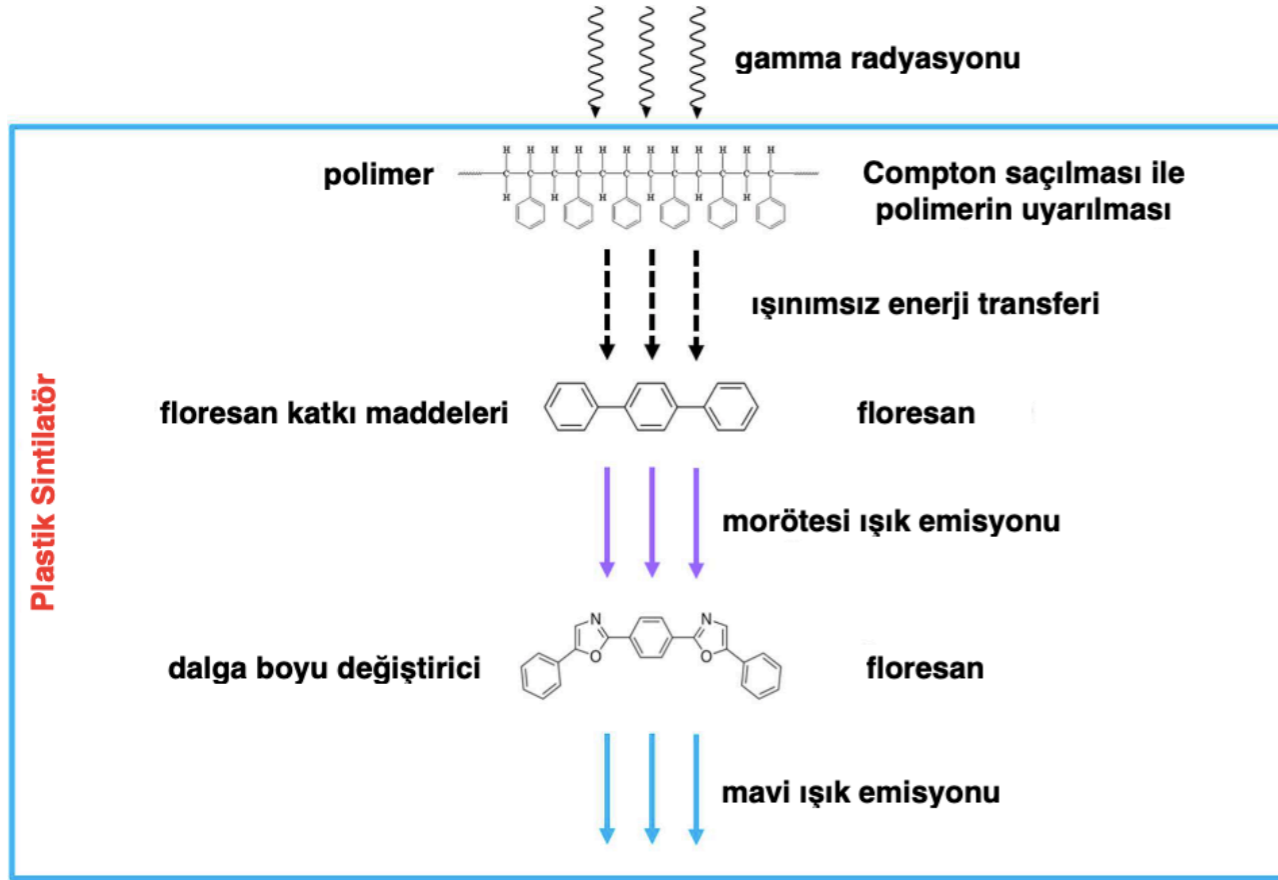
☑ İnorganik sintilatörlerde

- ◆ Işık çıktısı yüksek enerjili parçacıkların enerji depozisyonu ile neredeyse lineerdir.
- ◆ Yüksek Z ile gama detektörü olarak sıklıkla kullanılır
- ◆ Üretimi zor ve pahalıdır.

☑ Organik sintilatörlerde

- ◆ Plastik, kristal, sıvı
- ◆ Hızlı tepki zamanı
- ◆ Üretimi kolay, esnek ve ucuz

Plastik Sintilatörler



✓ Polimer taban

✓ Flor katkıları

✓ Birincil flor (%1-%30),
dalgaboyu kaydırıcı
(%0.001 - %0.4)

İsim	T _g (°C)	d (g/cm ³)	n (kırılma indisi)	λ _{em} (nm)
Polyviniltoluene (PVT)	93-118	1.02	1.59	315
Polistiren (PS)	100	1.04-1.065	1.59	310
Pleksi (PMMA)	105	1.19	1.49	400-700
Polietilen tereftalat (PET)	78	1.33	1.57	385
Polyethylene naftalat (PEN)	122	1.36	1.65	425

İsim	Kısaltma	λ _{abs} (nm)	λ _{em} (nm)	φ	T (ns)
1,4-bis(5-phenyl-2-oxazolyl)benzene	POPOP	365	415-417	0.85	1.3
1,4-bis(2-methylstyryl)benzene	Bis-MSB	347-350	420	0.96	1.6

İsim	Kısaltma	λ _{abs} (nm)	λ _{em} (nm)	φ (Kuantum verimlilik)	T (ns)
p-Terphenyl	PTP	288;276	335;339	0.85	1.2
2,5-Diphenyloxazole	PPO	303;308	365;375	0.8	1.6
2-phenyl-5-(4-biphenyl)-1,3,4-oxadiazole	PBD	305;302	360;365	0.8	1.2

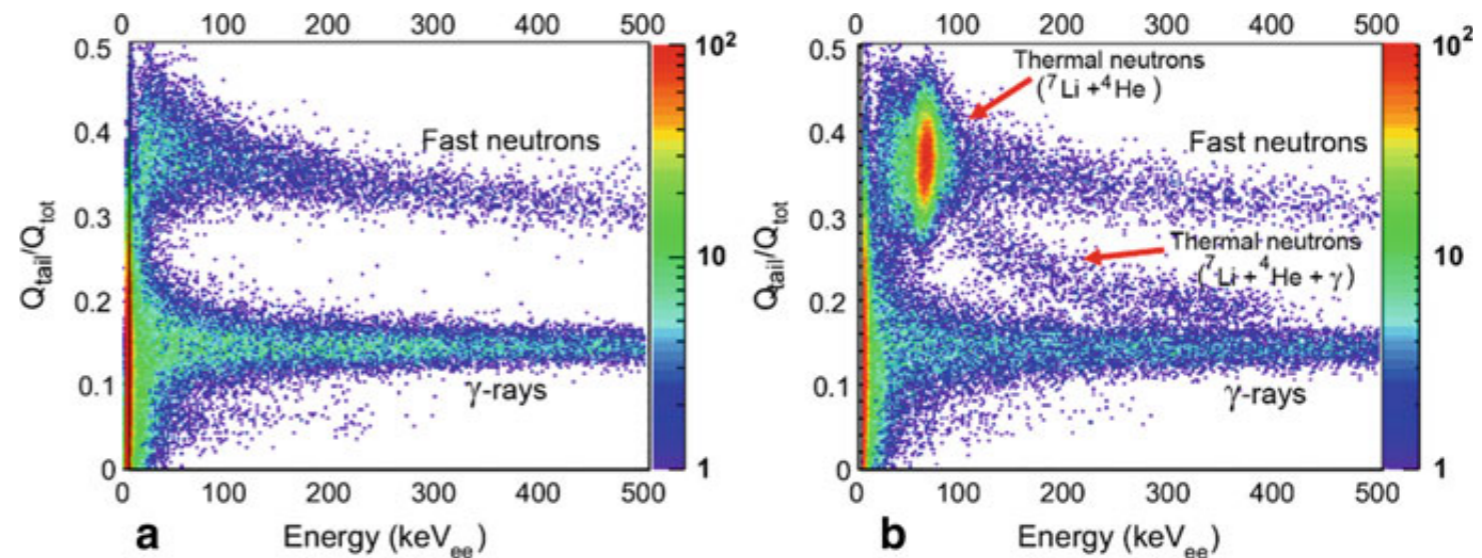
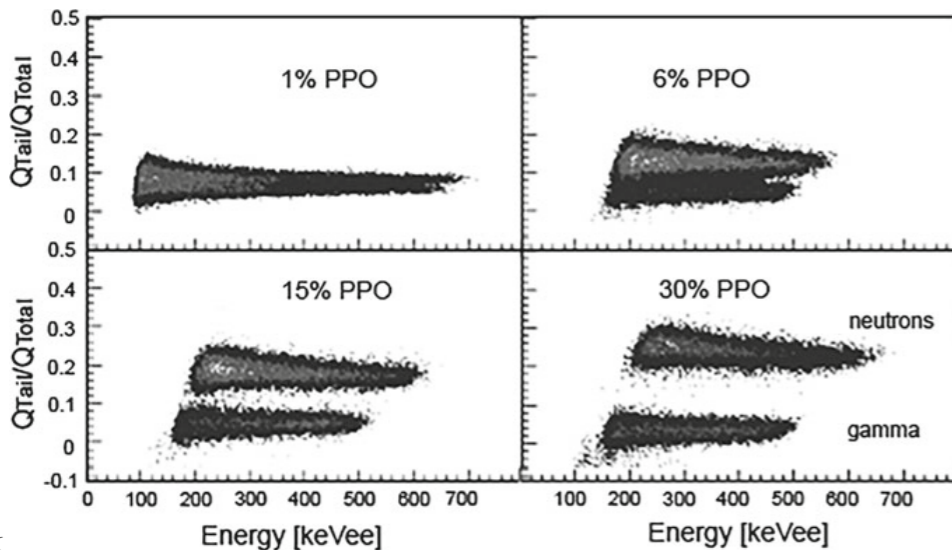
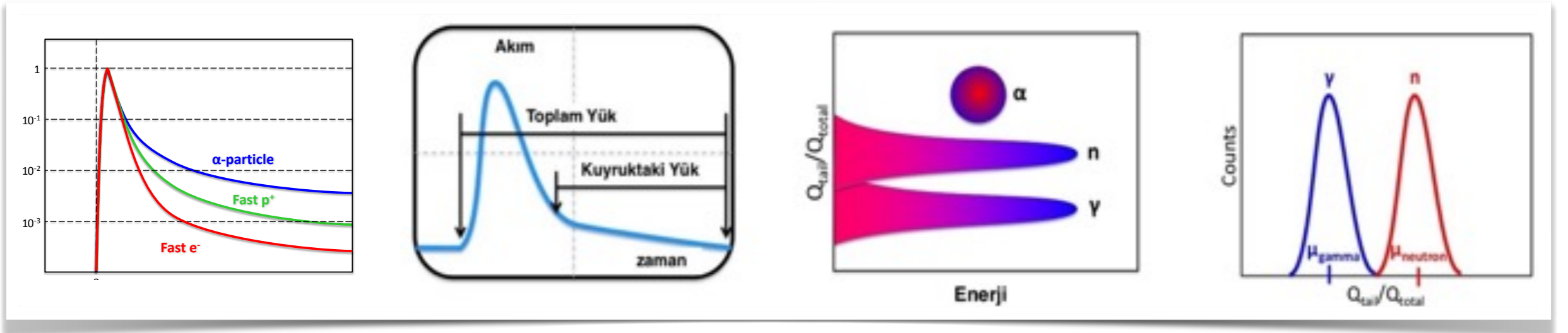
Plastik Sintilatör Üretimi

- ☑ Taban seçimi
 - ✓ Stiren, vinlytoulene, vs.
 - ✓ Sıvı form, inhibitor katkısı
 - ✓ Saflaştırma işlemi
- ☑ Flor katkısı seçimi
 - ✓ PPO/PTP, POPOP/bis-MSB, vs.
- ☑ Yöntem seçimi
 - ✓ Termal Polimerizasyon
 - ✓ Hücre dökümü
- ☑ Polimerizasyon başlatıcısı seçimi
 - ✓ AINB, benzoyl peroxide
- ☑ Polimer çapraz bağlayıcı
- ☑ Argon ve azot atmosferinin sağlanması
- ☑ Termal döngünün belirlenmesi
- ☑ Parlatma işlemi
- ☑ Veri alınması



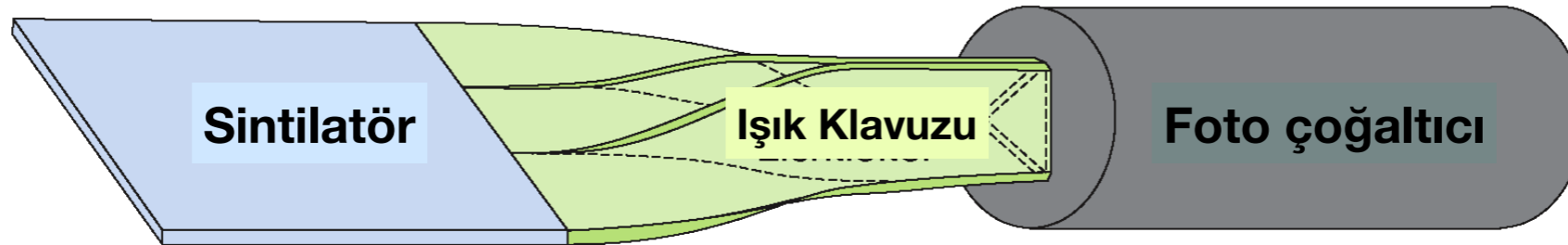
Puls Şekil Ayırıcı

- ✓ PSD = Pulse Shape Discrimination
- ✓ Gama/Nötron ayırımı
- ✓ Yüksek oranda birincil (%20-%30) ve ikincil (%0.3) flor katkısı
- ✓ Hızlı ve termal nötrona duyarlı plastik sintilatör nasıl yaparsınız?



Basit Detektör Yapısı

- ☑ Basit bir detektör sintilatör, ışık klavuzu ve bir fotoçoğaltıcıdan oluşur.
- ◆ Sintilatör: Radyasyonu görünür ışığa çevirir. Plastik sintilatörler, inorganik sintilatörler, cam sintilatörler, sıvı sintilatörler, ..
- ◆ Işık Klavuzu: Görünür ışığı fotoçoğaltıcıya taşır. Işık klavuzu, dalga boyu kaydırıcı, fiberler, ..
- ◆ Fotoçoğaltıcı: Görünür ışığı elektrik akımına çevirir. Fotoçoğaltıcı tüp, silikon fotoçoğaltıcı, hibrit foto diyot, ...

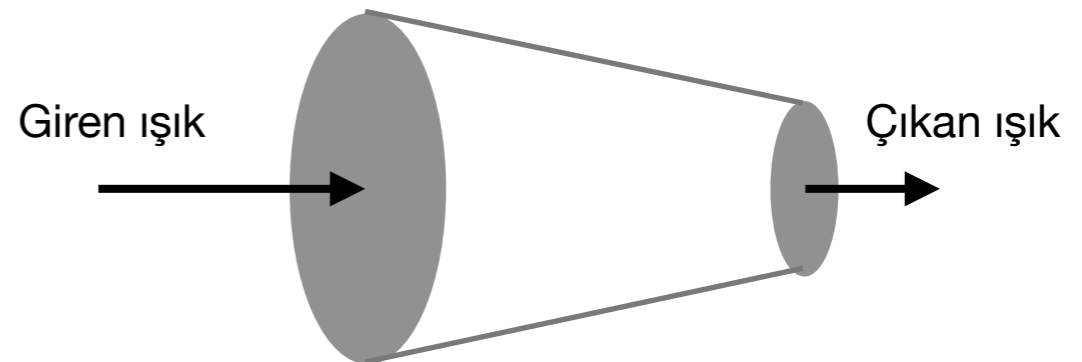


Işık Klavuzu

- ☑ Çoğunlukla sintilatörler fotoçoğaltıcılara direkt olarak bağlanamaz.
 - ◆ Yüksek manyetik alan, biçimsel sınırlamalar, vs.
- ☑ Sinlatörleri fotoçoğaltıcılara bağlar.
- ☑ Maksimum ışık transferi çıktı ile girdi alanlarının oranlarıyla orantılıdır.
- ☑ PMMA (pleksi) en yaygın kullanılan materyaldir.

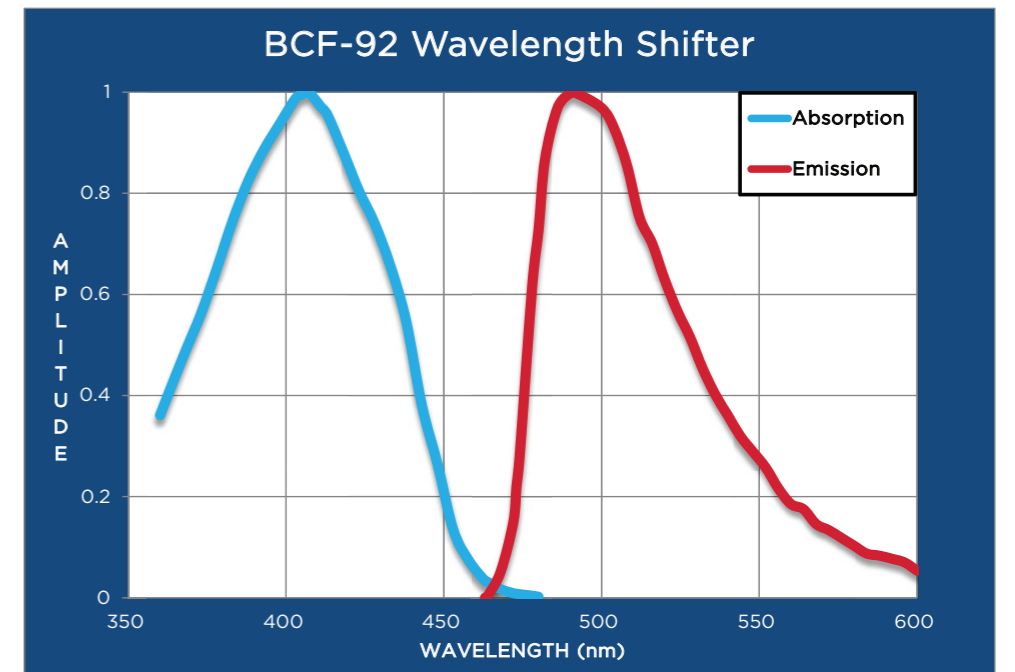
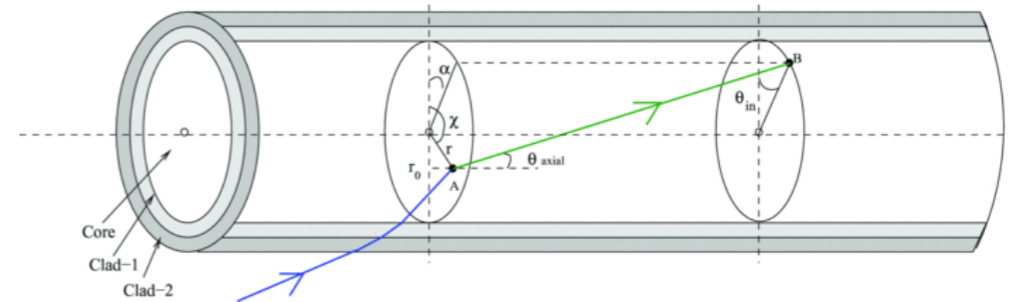
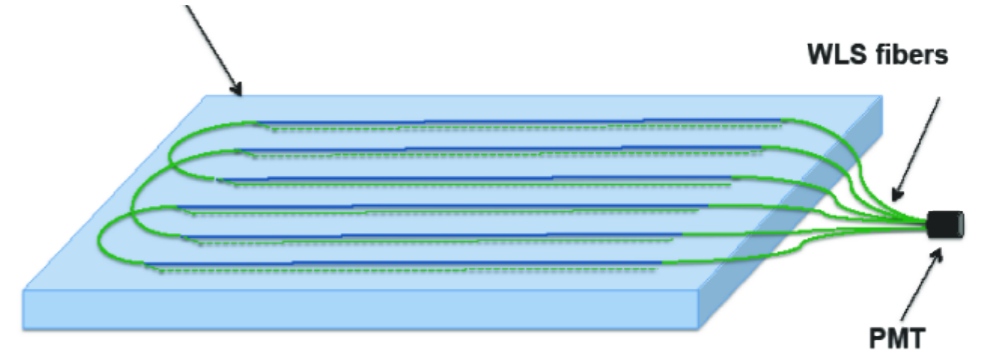


$$\frac{I_{out}}{I_{in}} \leq \frac{A_{out}}{A_{in}}$$



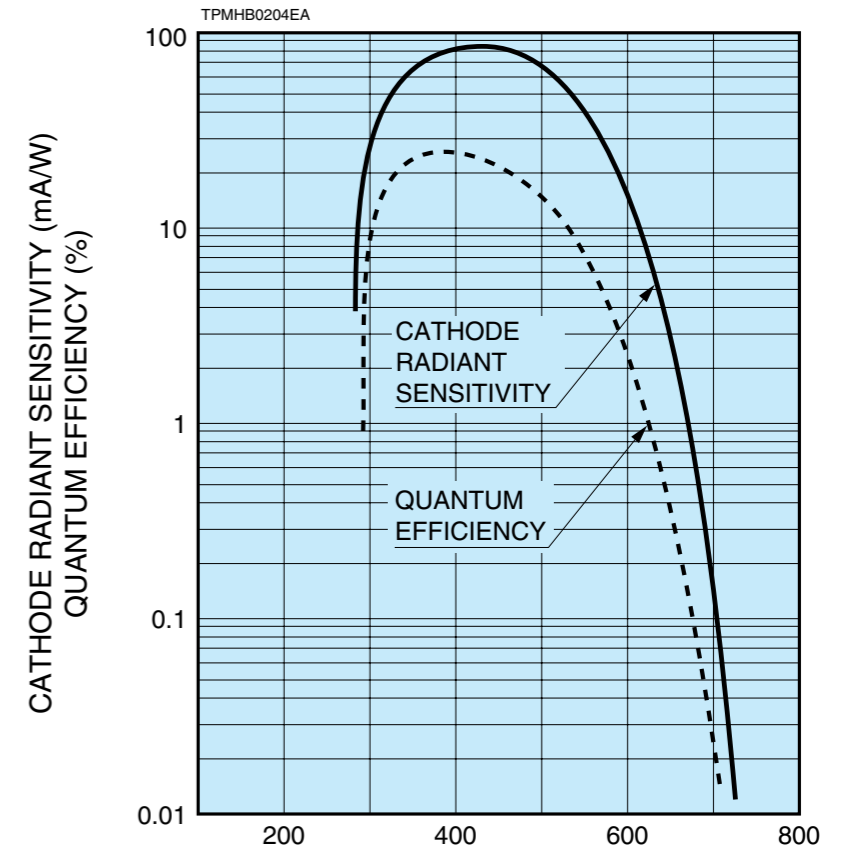
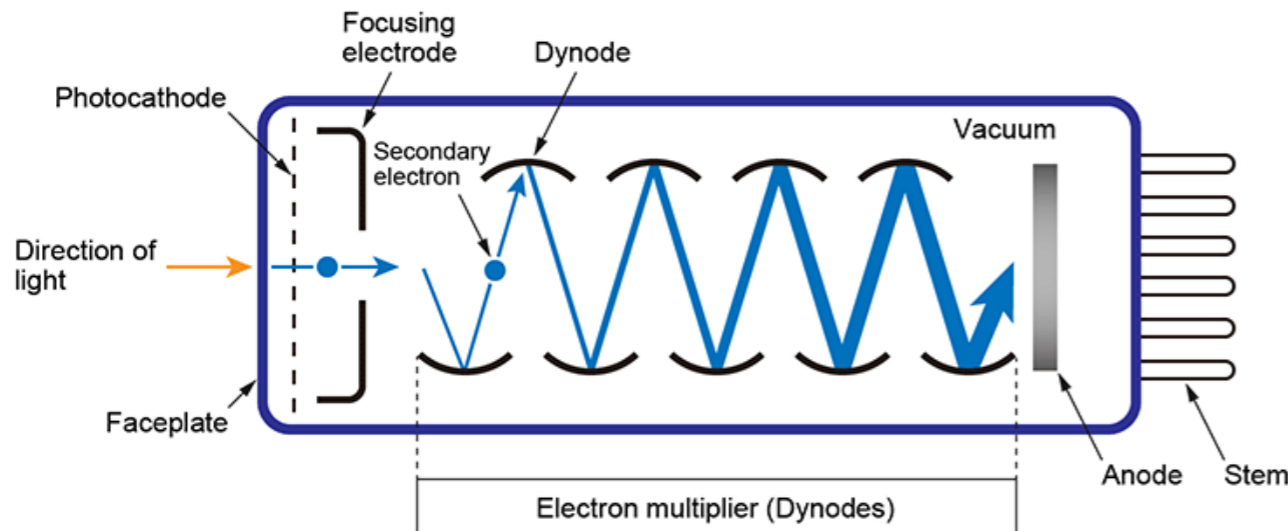
Dalga Boyu Kaydırıcı Fiberler (WLS)

- ☑ Sintilatörlerden fotoğöçaltıcıya ışığı aktarmak için kullanılır.
 - ◆ Karmaşık yapıli dedektörlerde.
- ☑ Işığın dalga boyunu değiştirir.
 - ◆ $h\nu \rightarrow h\nu'$
- ☑ Bir çekirdek ve etrafını saran iki (veya bir tane) katmanlı yapıdır.
- ☑ Işık yaklama verimliliği %2-%3 civarındadır.



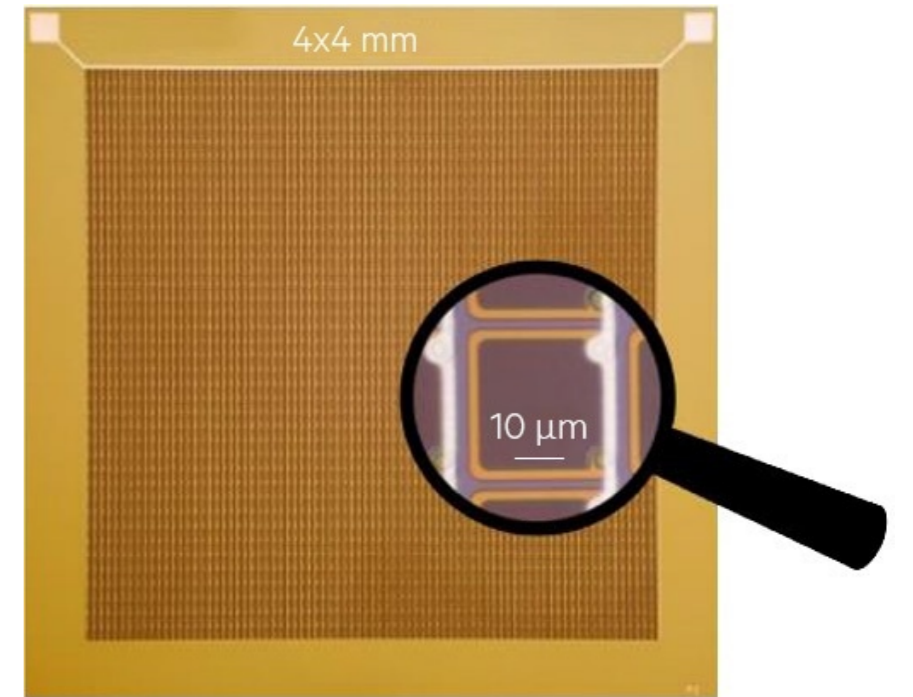
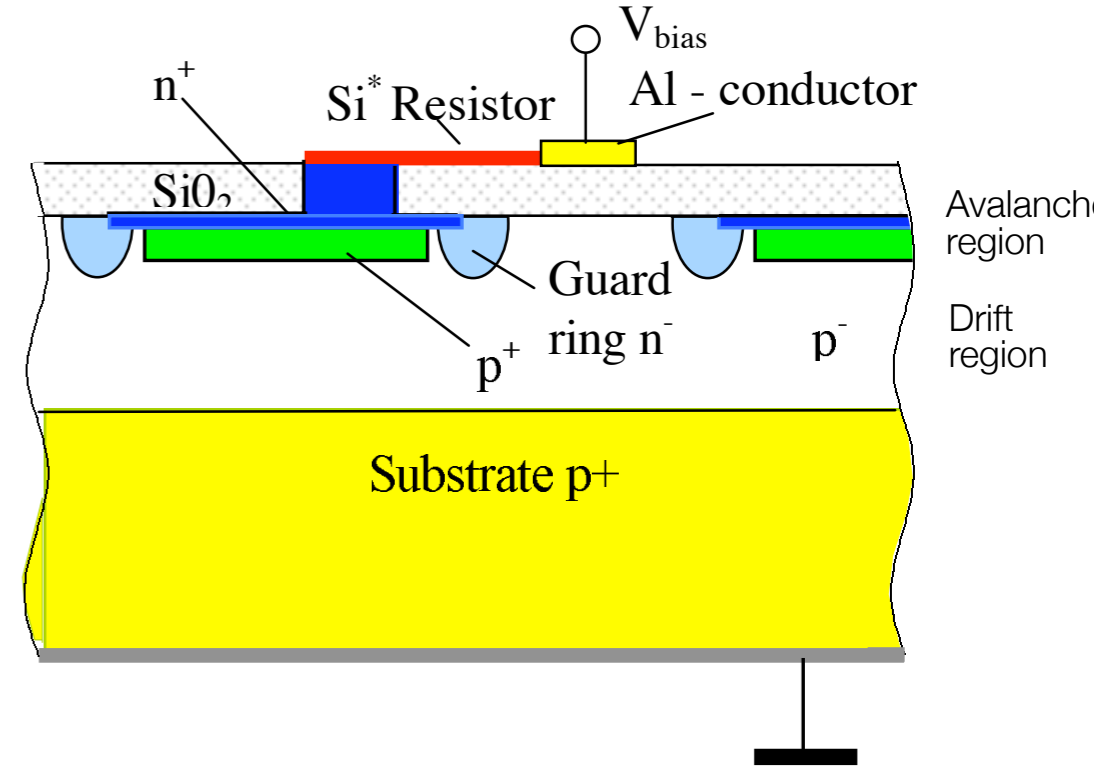
Fotoçoğaltıcı Tüp (PMT)

- ☑ Işığın elektrik akımına çevirir.
- ◆ Katoda çarpan ışık fotoelektrik etki ile elektron koparır.
- ◆ Dinotlara çarpan elektronlarda ikinci elektronlar üretir.
- ◆ En son anoda bir elektron duşu ulaşır.
- ☑ Çeşitli şekil ve boyutlarda olabilirler.
- ☑ Yüksek voltaj gerektirir (1200-1700 V)
- ☑ Kazanç, kuantum verimlilik, sinyal zamanı, karanlık akım önemli parametrelerdir.



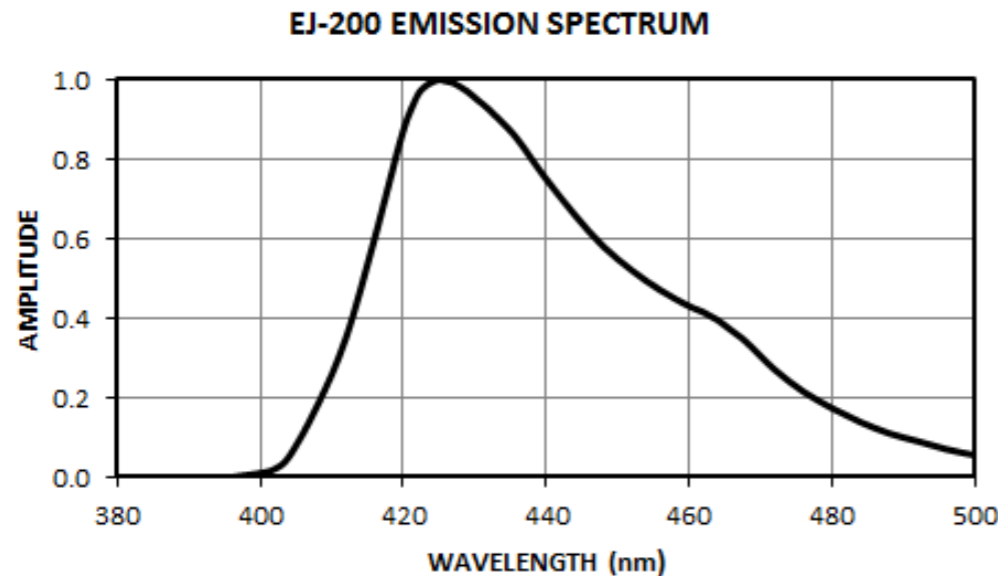
Silikon Fotoçoğaltıcı

- ☑ Işığın elektrik akımına çevirir.
- ◆ Yarı iletken
- ☑ Piksellerden meydana gelir.
- ◆ 1000 piksel/mm²
- ☑ Yüksek kazanç, hızlı zaman tepkisi
- ☑ Düşük çalışma voltajı
- ☑ Manyetik alandan etkilenmez.
- ☑ Küçük yüzey alanı.



Seçim yaparken

PROPERTIES	EJ-200	EJ-204	EJ-208	EJ-212
Light Output (% Anthracene)	64	68	60	65
Scintillation Efficiency (photons/1 MeV e ⁻)	10,000	10,400	9,200	10,000
Wavelength of Maximum Emission (nm)	425	408	435	423
Light Attenuation Length (cm)	380	160	400	250
Rise Time (ns)	0.9	0.7	1.0	0.9
Decay Time (ns)	2.1	1.8	3.3	2.4
Pulse Width, FWHM (ns)	2.5	2.2	4.2	2.7
H Atoms per cm ³ (×10 ²²)	5.17	5.15	5.17	5.17
C Atoms per cm ³ (×10 ²²)	4.69	4.68	4.69	4.69
Electrons per cm ³ (×10 ²³)	3.33	3.33	3.33	3.33
Density (g/cm ³)	1.023	1.023	1.023	1.023
Polymer Base	Polyvinyltoluene			
Refractive Index	1.58			
Softening Point	75°C			
Vapor Pressure	Vacuum-compatible			
Coefficient of Linear Expansion	7.8 × 10 ⁻⁵ below 67°C			
Temperature Range	-60°C to 60°C			
Light Output (L.O.) vs. Temperature	At 60°C, L.O. = 95% of that at 20°C No change from -60°C to 20°C			



GENERAL

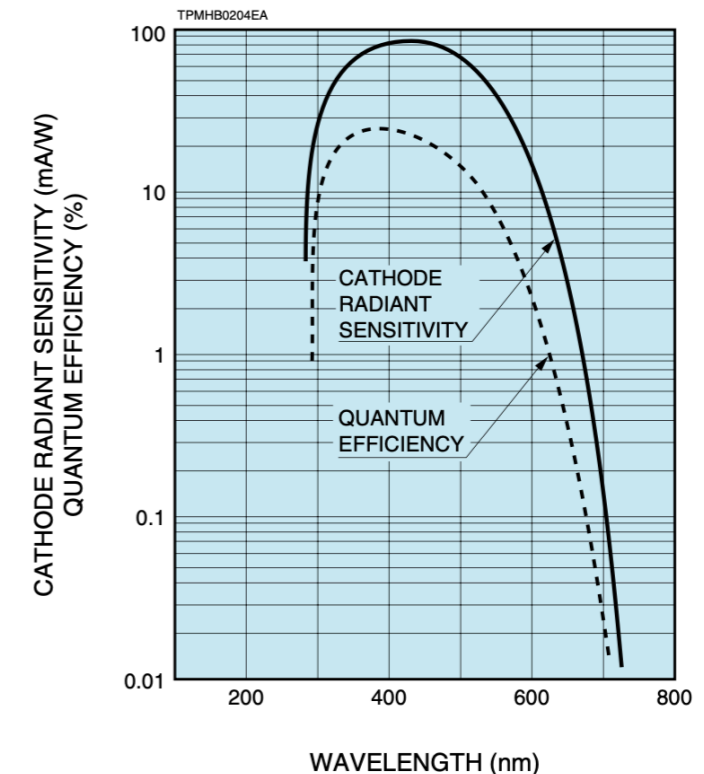
Parameter	Description	Unit
Spectral Response	300 to 650	nm
Wavelength of Maximum Response	420	nm
Photocathode	Material	Bialkali
	Minimum Effective Area	φ34
Window Material	Borosilicate glass	—
Dynode	Structure	Linear focused
	Number of Stages	10
Direct Interelectrode	Anode to Last Dynode	3
Capacitances	Anode to All Other Electrodes	7
Operating Ambient Temperature	-30 to +50	°C
Storage Temperature	-30 to +50	°C
Base	JEDEC No. B12-43	—
Suitable Socket	E678-12A (supplied)	—

MAXIMUM RATINGS (Absolute Maximum Values)

Parameter	Value	Unit
Supply Voltage	Between Anode and Cathode	1750
	Between Anode and Last Dynode	350
Average Anode Current	0.1	mA

CHARACTERISTICS (at 25 °C)

Parameter	Min.	Typ.	Max.	Unit
Cathode Sensitivity	Luminous (2856 K)	70	95	—
	Radiant at 420 nm	—	88	—
	Blue Sensitivity Index (CS 5-58)	9	11	—
	Quantum Efficiency at 420 nm	—	27	—
Anode Sensitivity	Luminous (2856 K)	10	100	—
Gain	—	1.1 × 10 ⁶	—	—
Anode Dark Current (after 30 min storage in darkness)	—	3	20	nA
Time Response	Anode Pulse Rise Time	—	2.7	—
	Electron Transit Time	—	37	—
	Transit Time Spread (FWHM)	—	4.5	—
Pulse Linearity (±2 % deviation) *	—	150	—	mA



Kaynaklar

