

Parçacıkların Gzlemlenmesinde Dedektörlerin Rolü

CERN-CMS DENEYİ HCAL ve diğerk Alt Dedektörler

Prof. Dr. Mithat KAYA

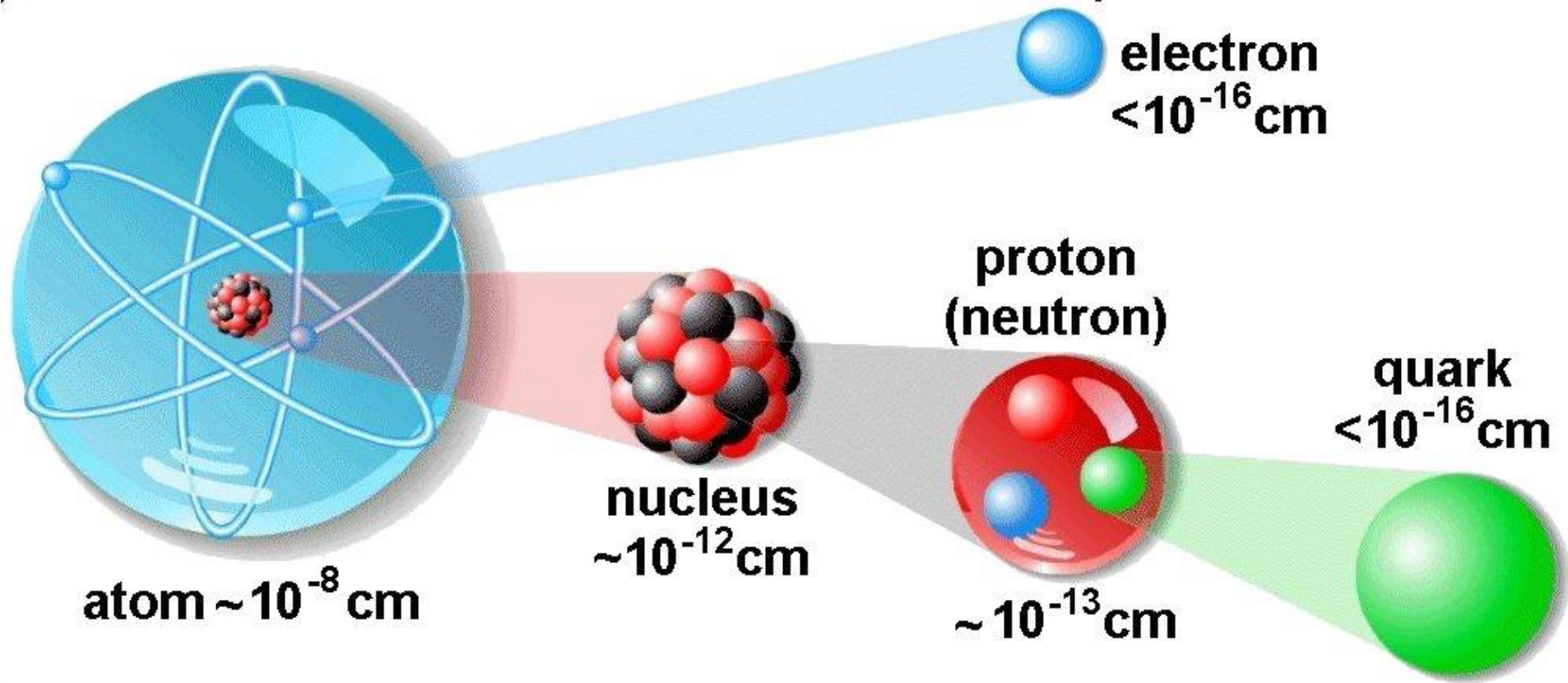
Marmara Universitesi

1. Biricik Bilim

Yüksek Enerji Fiziğİ Yaz Okulu

24-29 Agustos 2026

Atomun Yapısı



$$1 \text{ m} = 10^2 \text{ cm} = 10^3 \text{ mm} = 10^6 \text{ }\mu\text{m} = 10^9 \text{ nm} = 10^{12} \text{ pm} = 10^{15} \text{ fm}$$

Dedektörler Sadece kararlı parçacıkları ölçerler
($e^\pm$, $\mu^\pm$, γ , $\pi^\pm$, $K^\pm$, K^0 , $p^\pm$, n , ...)

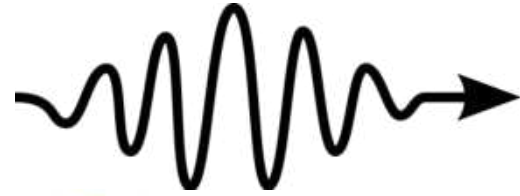
- **Yüklü parçacıklar**

Proton, elektron, pion, kaon, sigma ...

- **Güçlü etkileşen nötr parçacıklar**

Notron, pion(π^0), kaon(K^0) ...

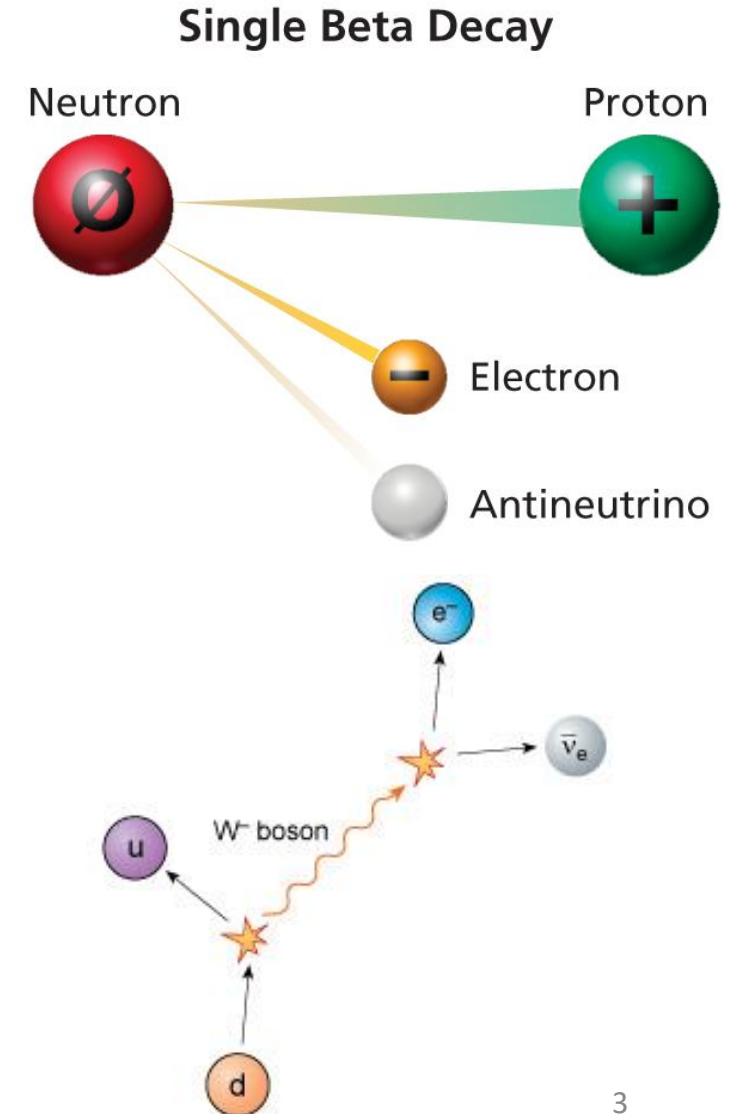
- **Fotonlar**



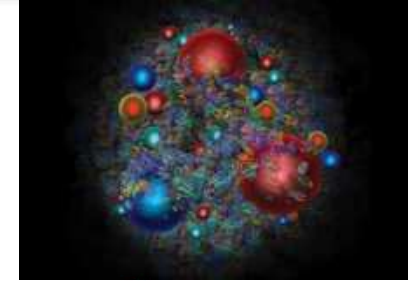
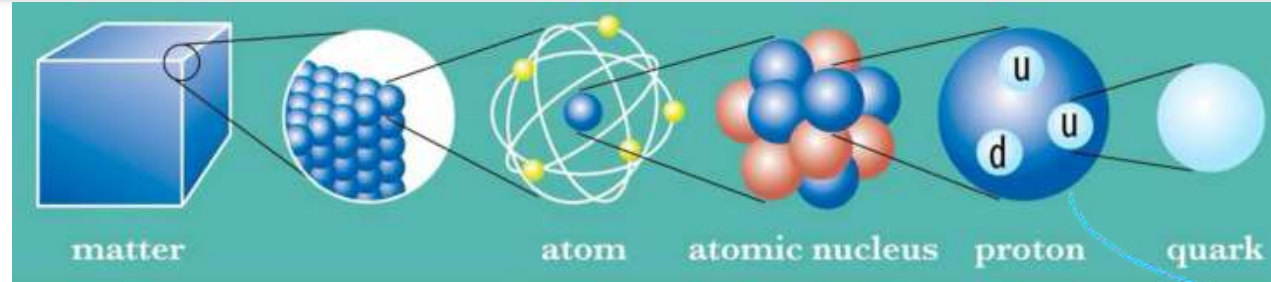
- **Müonlar**



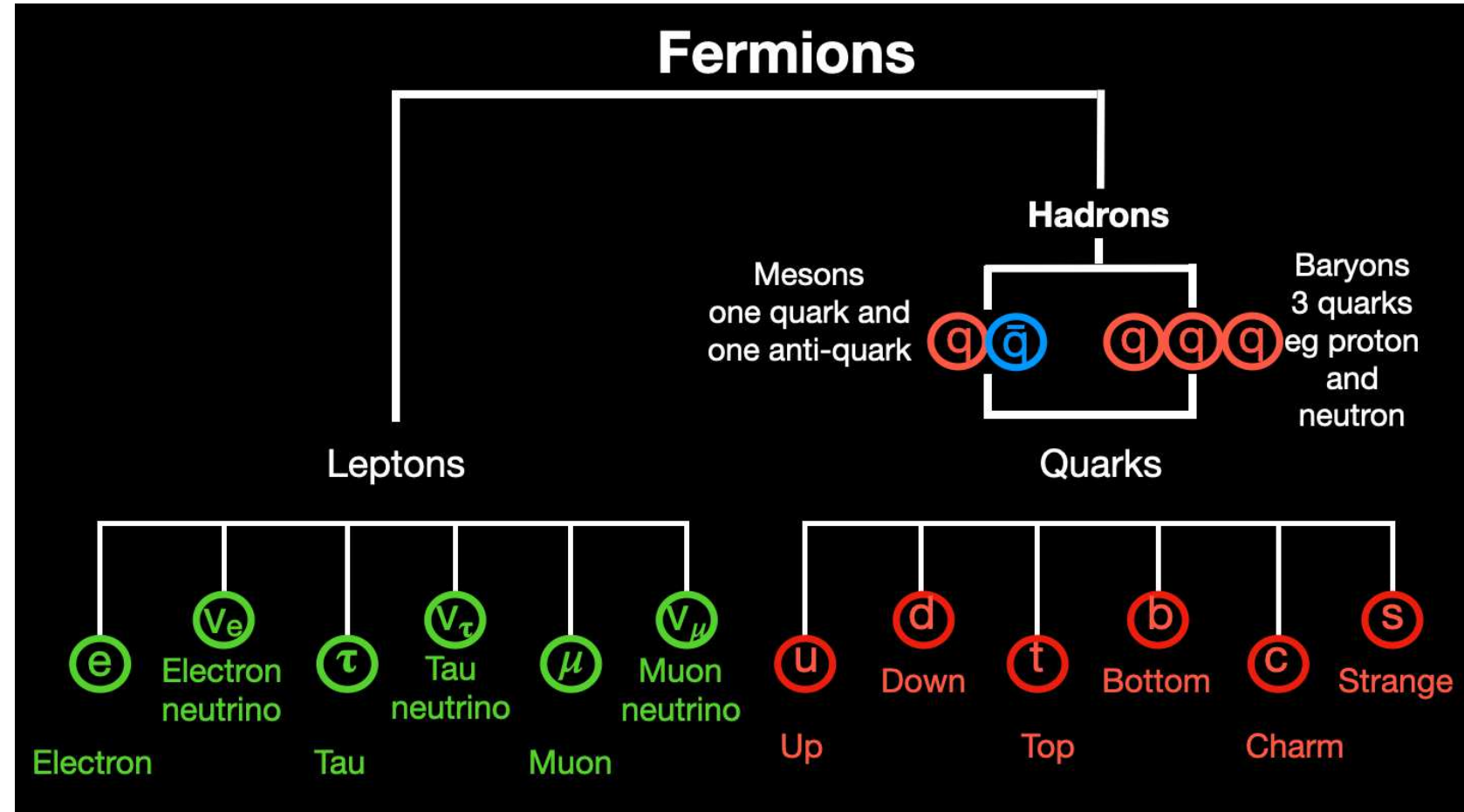
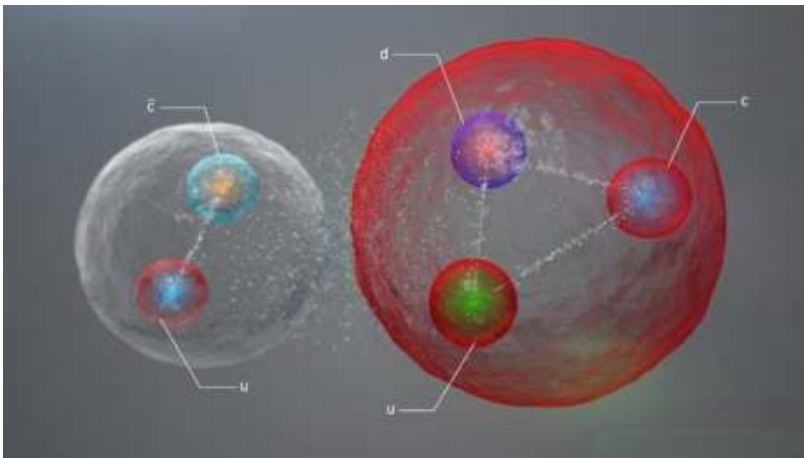
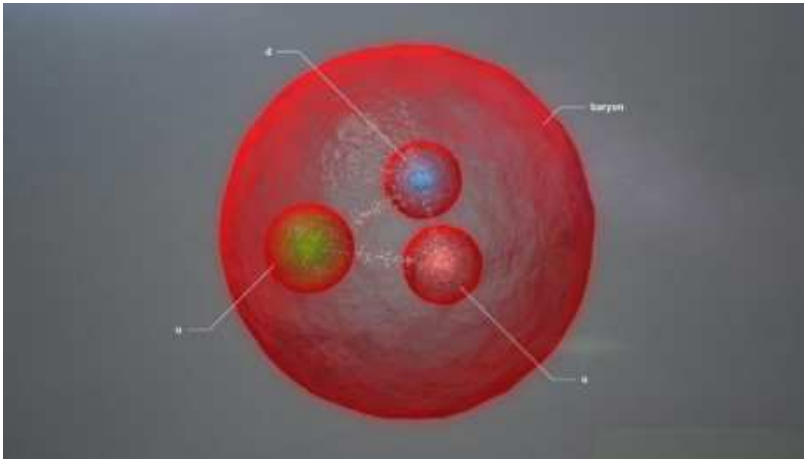
- **Nötrinolar**



Temel Parçacıklar

[illegible]

Temel Parçacıklar



Hadronlar(Baryon ve Meson)

Baryons qqq and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$

Baryons are fermionic hadrons.
There are about 120 types of baryons.

Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c^2	Spin
p	proton	uud	1	0.938	1/2
$\bar{p}$	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0.938	1/2
n	neutron	udd	0	0.940	1/2
Λ	lambda	uds	0	1.116	1/2
Ω^-	omega	sss	-1	1.672	3/2

Mesons $q\bar{q}$

Mesons are bosonic hadrons.
There are about 140 types of mesons.

Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c^2	Spin
π^+	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
K^-	kaon	$s\bar{u}$	-1	0.494	0
ρ^+	rho	$u\bar{d}$	+1	0.770	1
B^0	B-zero	$d\bar{b}$	0	5.279	0
η_c	eta-c	$c\bar{c}$	0	2.980	0

Dedektörler ile Parçacık Tanımlanması

Ölçülen Özellik	Nasıl Ölçülür / Belirlenir?	Kısa Açıklama
Momentum: P, P_T	İz dedektörü + manyetik alan	Yüklü parçacığın manyetik alandaki yörüngesinin eğriliği ölçülür. Lorentz kuvvetinden $p = qBR$ elde edilir. Pratikte: $p_T [\text{GeV}/c] \simeq 0.3 q B [\text{T}] R [\text{m}]$. Eğrilme yönü ayrıca yükün işaretini verir.
Kütle: m	Momentum + hız veya bozunma ürünlerinin dört-momentumları $ P ^2 = (m_0 c)^2$ $ P ^2 = \eta_{\mu\nu} P^\mu P^\nu = \frac{E^2}{c^2} - p_x^2 - p_y^2 - p_z^2 = \frac{E^2}{c^2} - p^2$ $\Rightarrow (m_0 c)^2 = \frac{E^2}{c^2} - p^2$ $\Rightarrow E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4$	Uzun ömürlü parçacıklarda p ve $\beta = v/c$ kullanılarak $m = \frac{p}{c} \sqrt{\frac{1}{\beta^2} - 1}$ hesaplanabilir. Kısa ömürlü parçacıklarda ise bozunma ürünlerinden invariant kütle hesaplanır: $m^2 c^4 = E^2 - p^2 c^2$.
Hız: v, β	TOF, dE/dx , Cherenkov ölçümü	TOF yönteminde uçuş mesafesi ve süresi kullanılır: $\beta = L/(ct)$. İyonizasyon kaybı dE/dx ve Cherenkov açısı da hız hakkında bilgi verir.
Enerji: E	Elektromanyetik ve hadronik kalorimetreler	Parçacığın maddeyle etkileşerek oluşturduğu shower ve bıraktığı enerji ölçülür. Elektron/fotonlar ağırlıklı olarak ECAL , hadronlar ise HCAL tarafından ölçülür.

Dedektörler ile Parçacık Tanımlanması

Ölçülen Özellik	Nasıl Ölçülür / Belirlenir?	Kısa Açıklama
Elektrik yükü q	Manyetik alandaki track eğriliği	Yüklü parçacığın hangi yönde büküldüğü yükün işaretini (+/-) belirler. Eğrilik büyüklüğü momentumla birlikte yük hakkında bilgi sağlar.
Ömür τ	Bozunma uzunluğu + momentum/boost	Ana çarpışma noktası ile bozunma noktası arasındaki mesafe ölçülür. $L = \beta\gamma c\tau$ ilişkisi kullanılarak parçacığın ömrü çıkarılabilir.
Spin s	Açısal dağılımlar ve bozunma korelasyonları	Spin genellikle doğrudan ölçülmez. Parçacığın üretim ve bozunma ürünlerinin açısal dağılımları incelenerek belirlenir.
Bozunma oranı / Branching Ratio	Belirli bozunma kanalındaki olay sayısı	Bir parçacığın farklı kanallara hangi olasılıkla bozunduğu ölçülür. Kabaca $BR(X \rightarrow f) = \Gamma(X \rightarrow f)/\Gamma_{\text{total}}$. Deneyde olay sayıları, verimlilikler ve kabul düzeltmeleri kullanılır.
Tesir kesiti σ	Olay sayısı + entegre luminosite	Bir sürecin gerçekleşme olasılığını ifade eder. Temel ilişki $N = \sigma \mathcal{L} \epsilon$; burada N olay sayısı, $\mathcal{L}$ entegre luminosite, ϵ ise toplam ölçüm verimliliğidir.

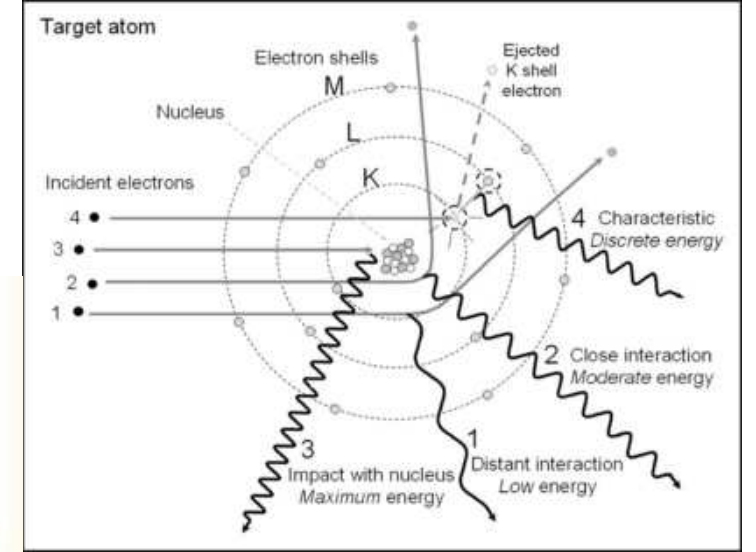
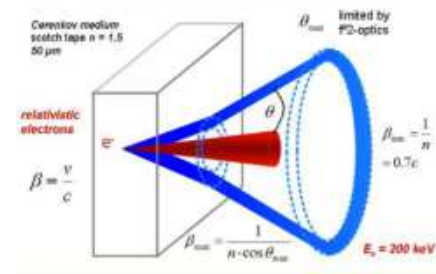
Parçacıkların Madde ile Etkileşmeleri

Yüklü parçacıklar her zaman elektron veya atomun çekirdeği ile etkileşirler

• Yüklü Parçacıkların Madde ile etkileşmesi

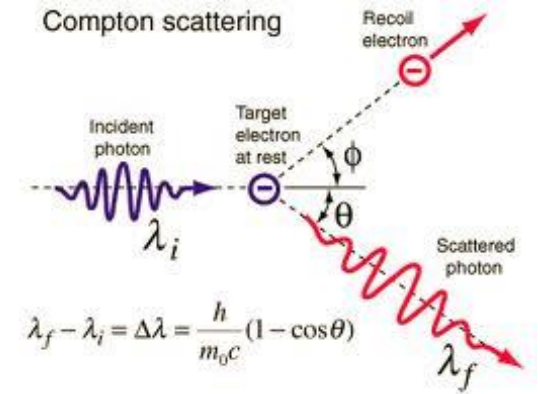
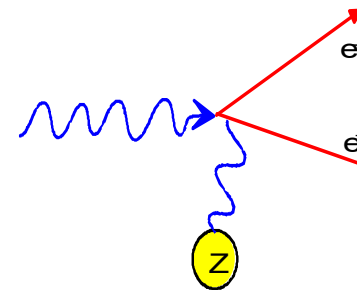
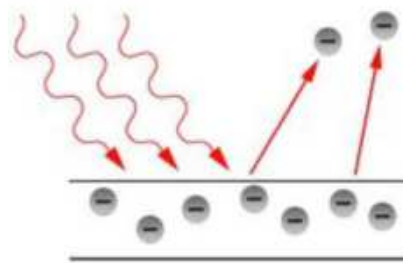
(Elektromanyetik etkileşme (Foton Salınımı))

- İyonlaşma veya uyarılma
- Bremsstrahlung (Çoklu etkileşmelerden dolayı enerji kaybı)
- Cerenkov Işıması
- Geçiş Radyasyonu (Transition Radiation)



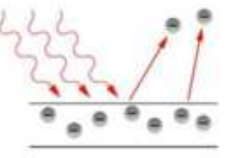
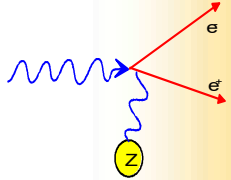
• Fotonların Madde ile Etkileşmesi

- Fotoelektrik Olay
- Çift oluşumu
- Kompton Saçılması



Parçacıkların Madde ile Etkileşimleri

Parçacık Türü	Madde ile Başlıca Etkileşim	Dedektörde Tipik Davranış	Örnek
Yüklü ağır parçacıklar	Atomlarla iyonizasyon ve uyarılma, Coulomb saçılması	İz dedektöründe track bırakır, enerji kaybı dE/dx ile ölçülebilir	$p, \pi^{\pm}, K^{\pm}$
Elektron / pozitron	İyonizasyon + bremsstrahlung	Tracker'da track, ECAL'de elektromanyetik shower oluşturur	e^{-}, e^{+}
Muon	Temel olarak iyonizasyon; bremsstrahlung çok daha zayıf	Tracker ve kalorimetreleri geçebilir, dıştaki muon sistemine ulaşır	$\mu^{\pm}$
Yüklü hadronlar	İyonizasyon + çekirdeklerle güçlü etkileşim	Tracker'da track, ardından HCAL'de hadronik shower	$\pi^{\pm}, K^{\pm}, p$
Foton	Fotoelektrik etki, Compton saçılması, çift oluşumu $\gamma \rightarrow e^{+}e^{-}$	Track bırakmaz; ECAL'de elektromanyetik shower oluşturur	γ
Nötr hadronlar	Atom çekirdekleriyle güçlü etkileşim	Tracker'da track yok; HCAL'de hadronik shower	n, K_L^0

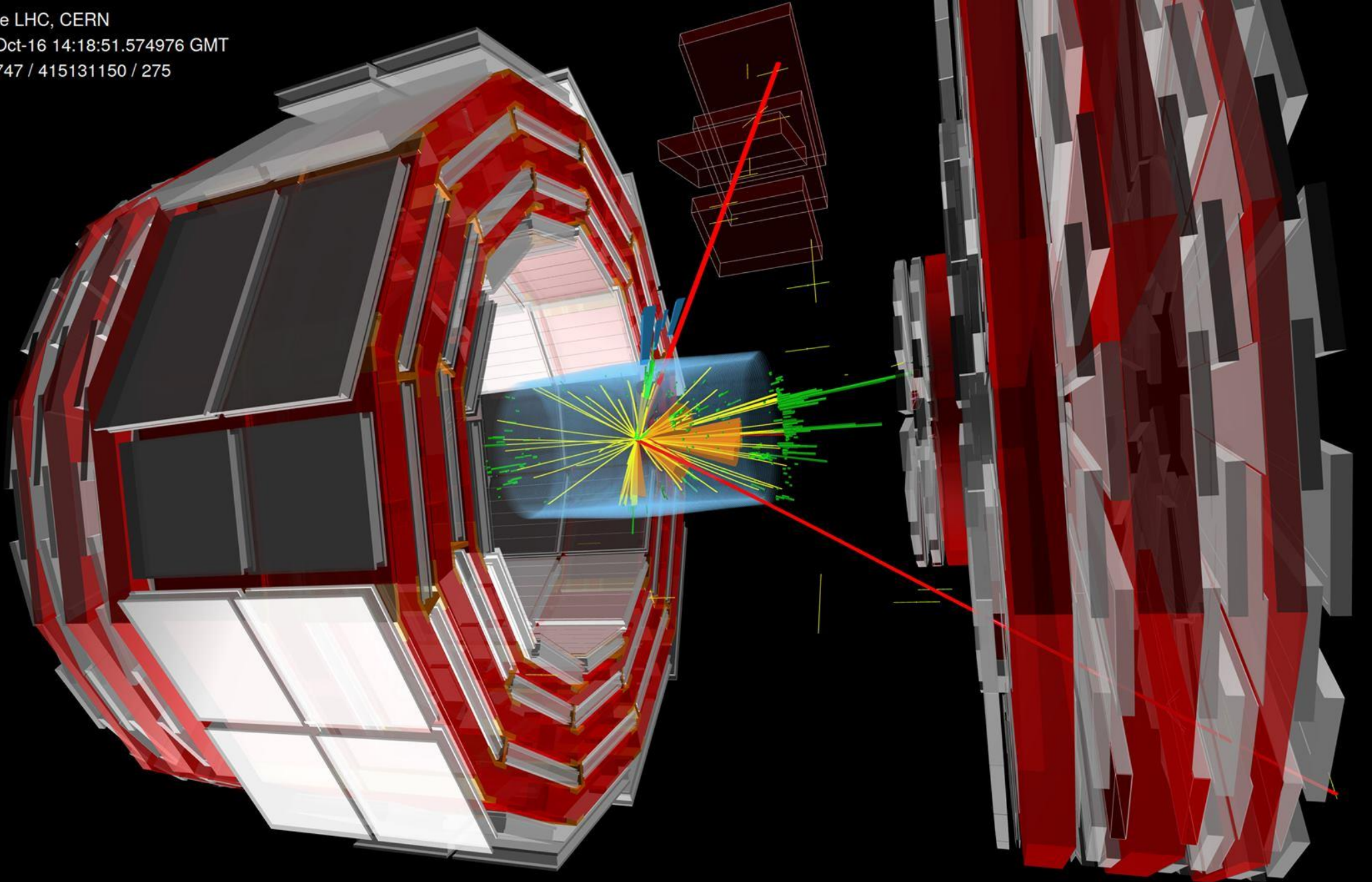


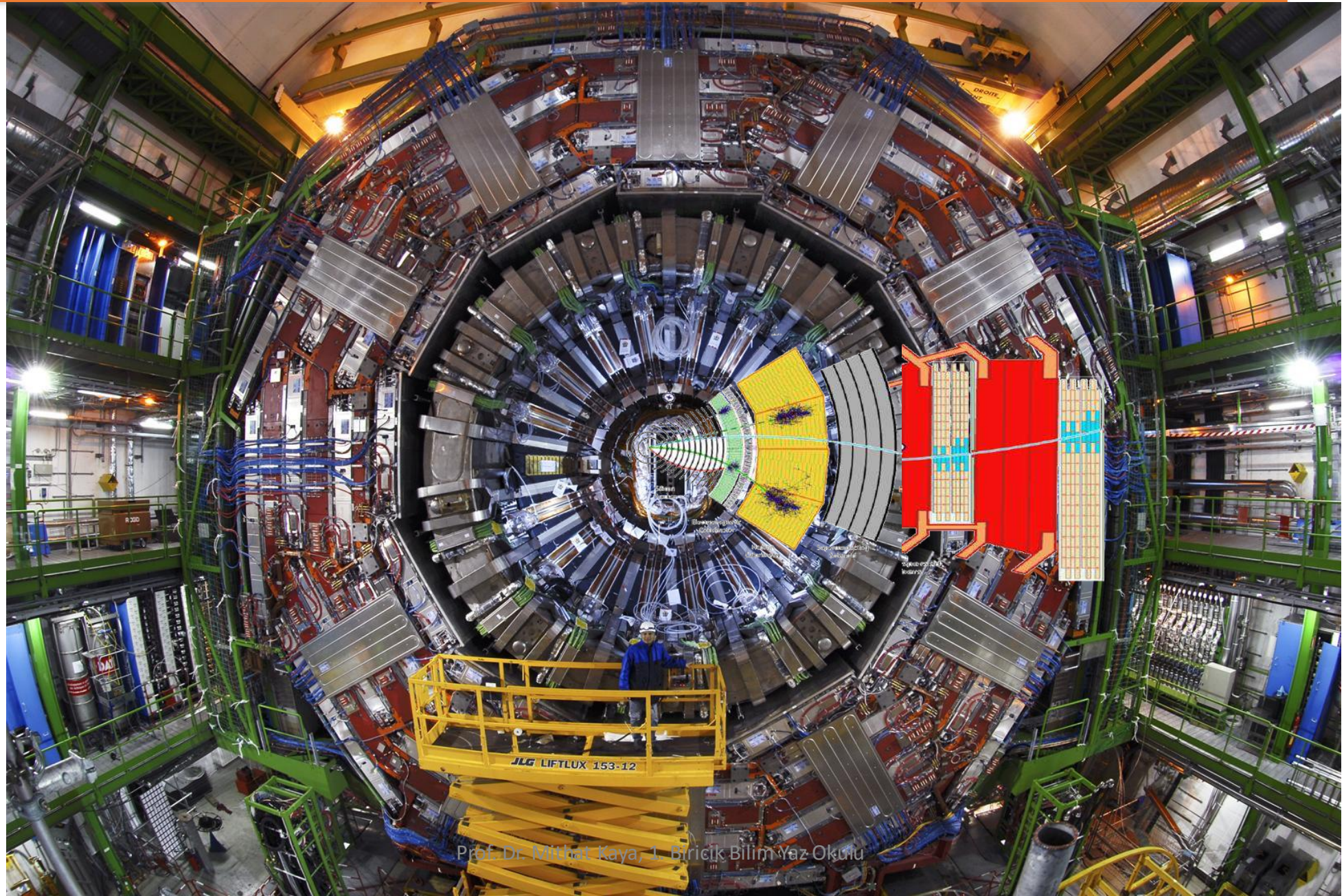
Parçacıkların Madde ile Etkileşimleri

Parçacık Türü	Madde ile Başlıca Etkileşim	Dedektörde Tipik Davranış	Örnek
Nötrino	Çok zayıf zayıf etkileşim	Dedektörden çoğunlukla etkileşmeden geçer; missing momentum ile dolaylı belirlenir	ν_e, ν_μ, ν_τ
Kısa ömürlü parçacıklar	Dedektör materyaliyle etkileşmeden önce bozunurlar	Kendileri doğrudan görülmez; bozunma ürünleri rekonstrükte edilir	Z, W, H, τ, π^0
Uzun ömürlü nötr parçacıklar	Yükleri olmadığı için iyonizasyon yapmaz; varsa güçlü/zayıf etkileşimle sinyal üretir	Etkileşim veya bozunma noktasında secondary vertex / shower oluşturabilir	K_S^0, Λ, n

Parçacıkların Madde ile Etkileşimleri

Etkileşim Türü	Hangi Parçacıklarda Önemli?	Sonuç
İyonizasyon / uyarılma	Tüm yüklü parçacıklar	Maddeye enerji bırakılır; dE/dx ölçülebilir
Bremsstrahlung	Özellikle elektron ve pozitron	Parçacık foton yayarak enerji kaybeder
Elektromanyetik shower	Elektron, pozitron, foton	Çok sayıda $e^{\pm}$ ve γ oluşur; ECAL'de enerji ölçülür
Hadronik etkileşim	Proton, pion, kaon, nötron vb.	Çekirdeklerle güçlü etkileşim sonucu hadronik shower oluşur
Çoklu Coulomb saçılması	Yüklü parçacıklar	Track yönü küçük açılarla sapar
Çift oluşumu	Yüksek enerjili foton	$\gamma \rightarrow e^+e^-$
Compton saçılması	Foton	$\gamma e^- \rightarrow \gamma e^-$
Zayıf etkileşim	Nötrinolar başta olmak üzere tüm parçacıklar	Çok düşük olasılıklı etkileşim; nötrinolar için temel algılama mekanizması





Parçacık Tanımlaması(PID)

Momentum ölçümü

Manyetik alanda
bükülmelerinden,

Elektromanyetik- Hadronik Duşlar

Duşların soğrulmasın'dan
enerji ölçülür

Müon Ölçümü

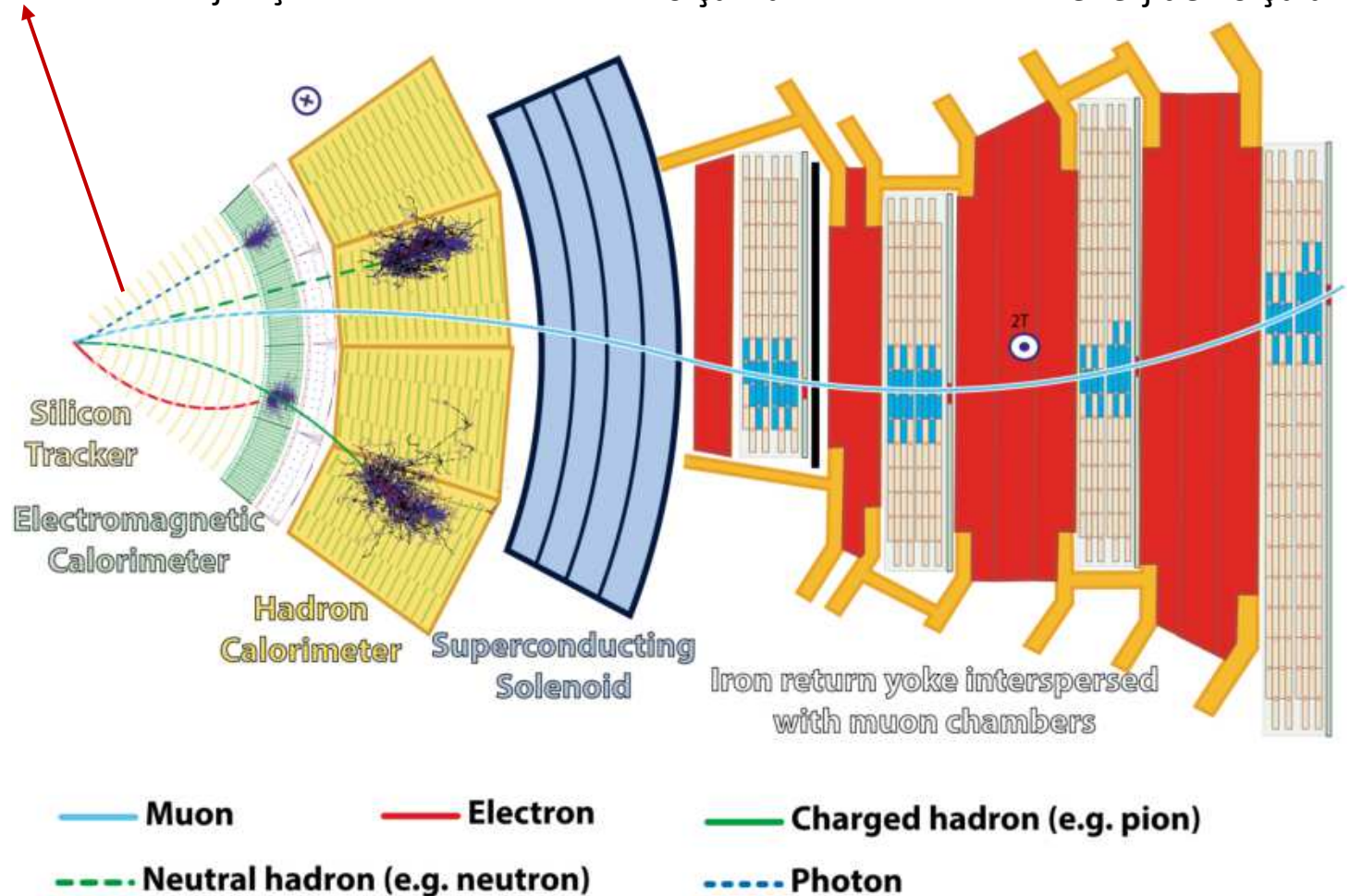
Müon odacıklarında iz
bırakma, momentum
ölçümü

Nötrinolar

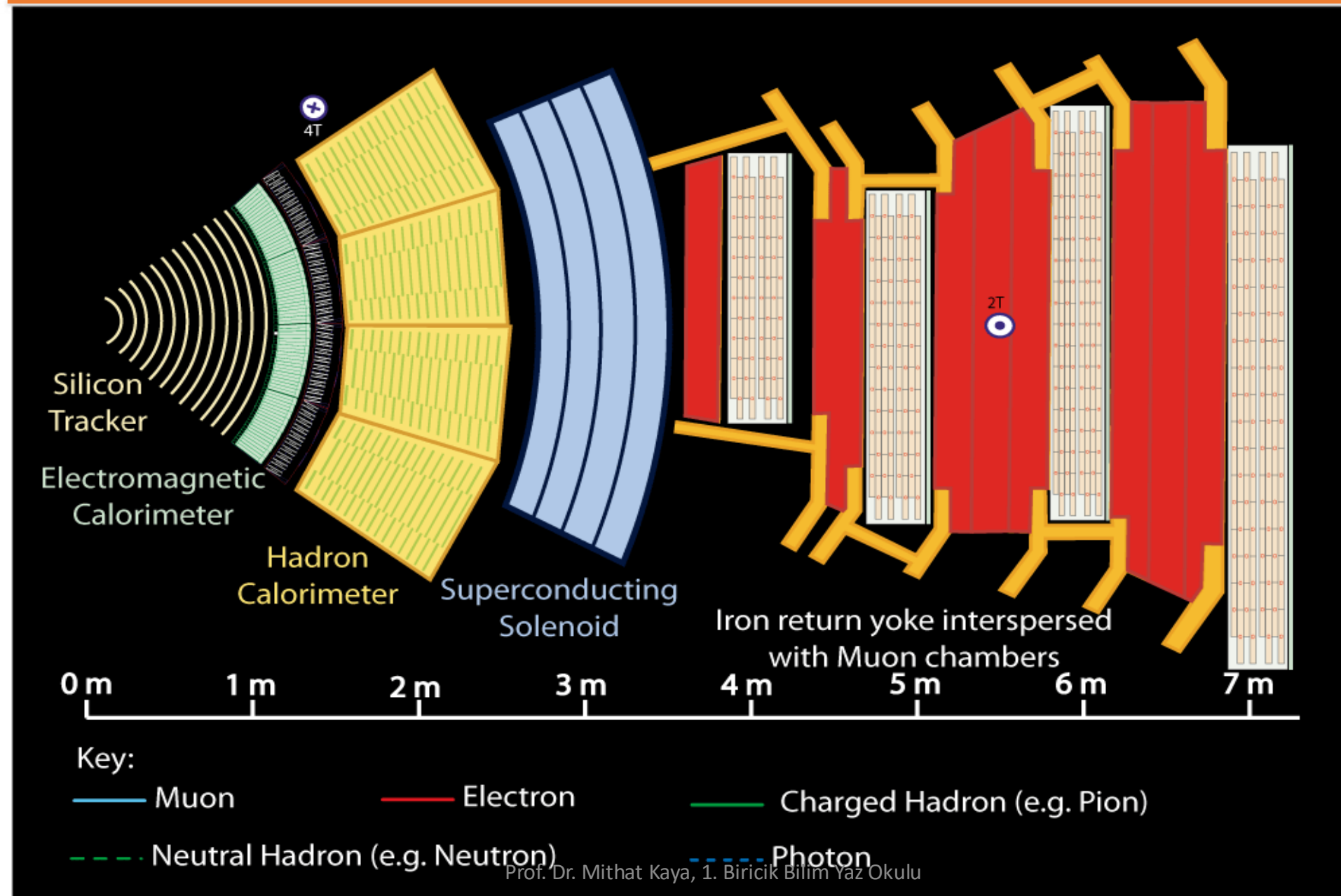
dedektörler ile
görünmezler, kayıp
enerjiden ölçülürler

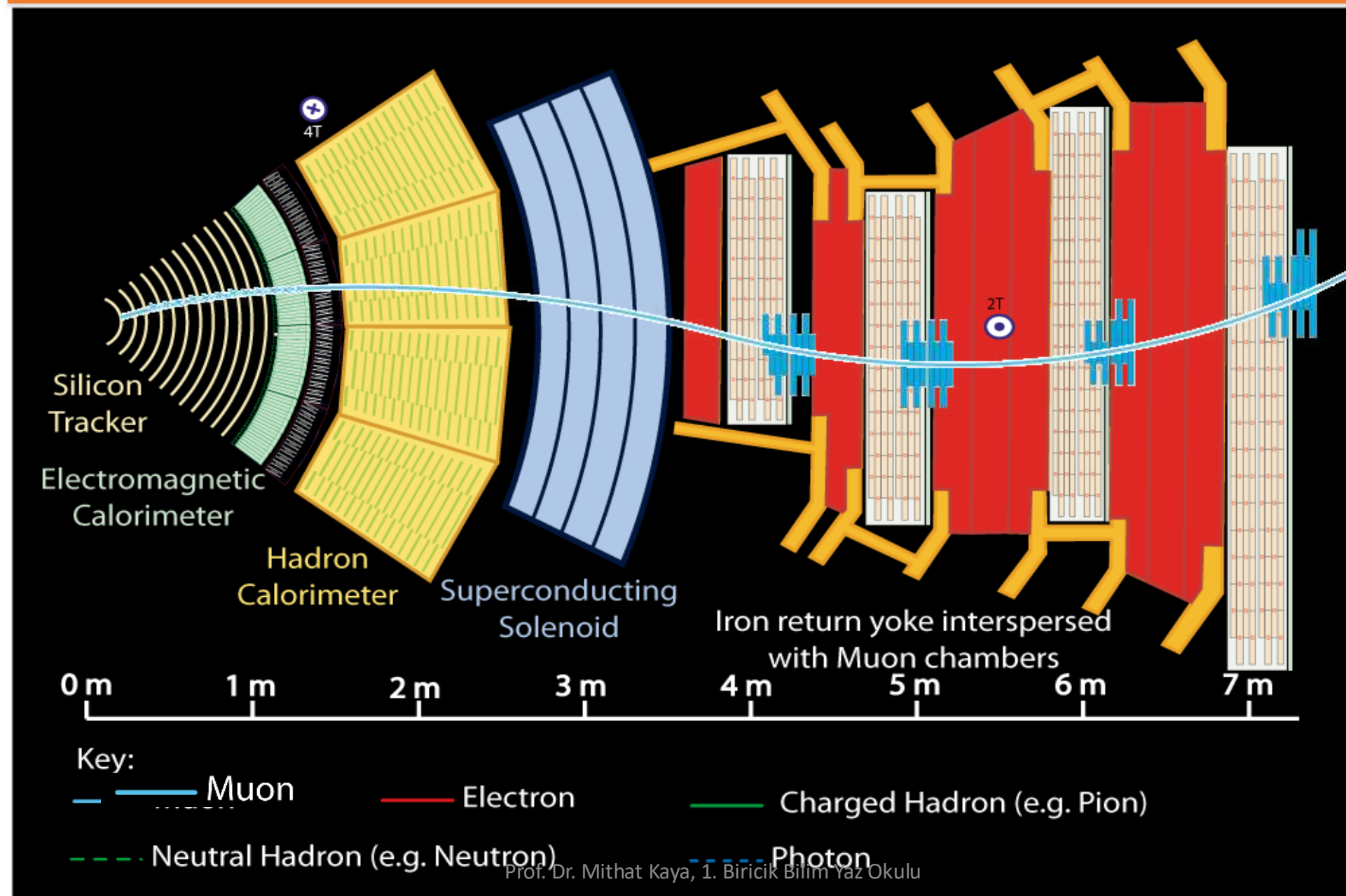
Parçacıkların Madde ile etkileşmesi:

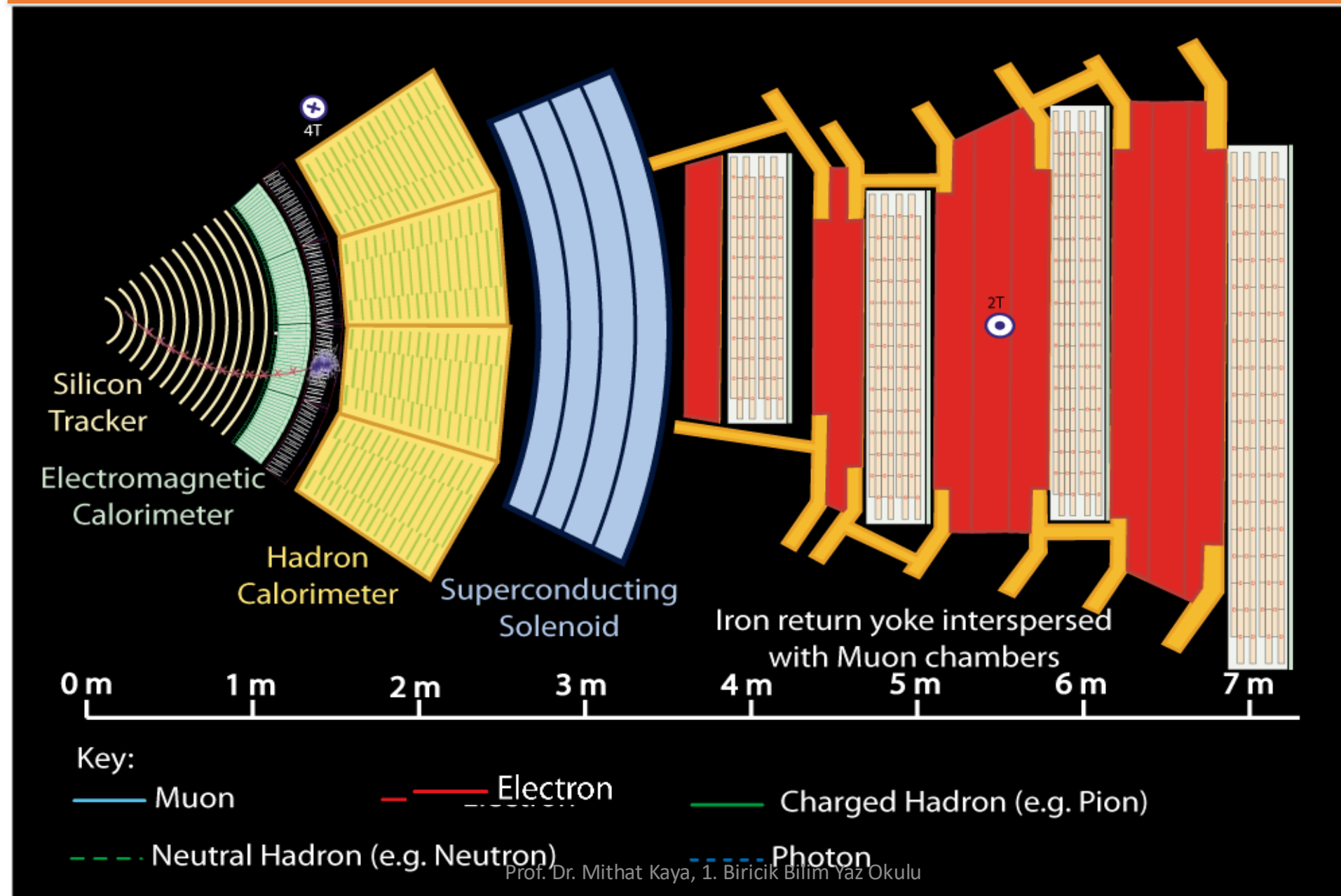
- **Elektronlar** elektromanyetik yollarla duş oluştururlar(Zayıf kuvveti ve elektromanyetik kuvveti hissederler, güçlü kuvveti değil)
- **Fotonlar** yüksüzdür. İzleri takip edilemez, elektromanyetik olarak duş oluşturur, elektromanyetik kuvveti hisseder
- **Müonlar** madde ile çok az etkileşirler, elektromanyetik ve zayıf kuvveti hissederler, duş oluşturmazlar sadece gazı iyonlaştırırlar
- **Hadronlar** güçlü kuvveti hissederler ve hadronik duş oluştururlar
- **Nötrinolar** zayıf kuvveti hissederler ve maddeyle etkileşmezler, detektörlerden etkileşmeden geçerler.



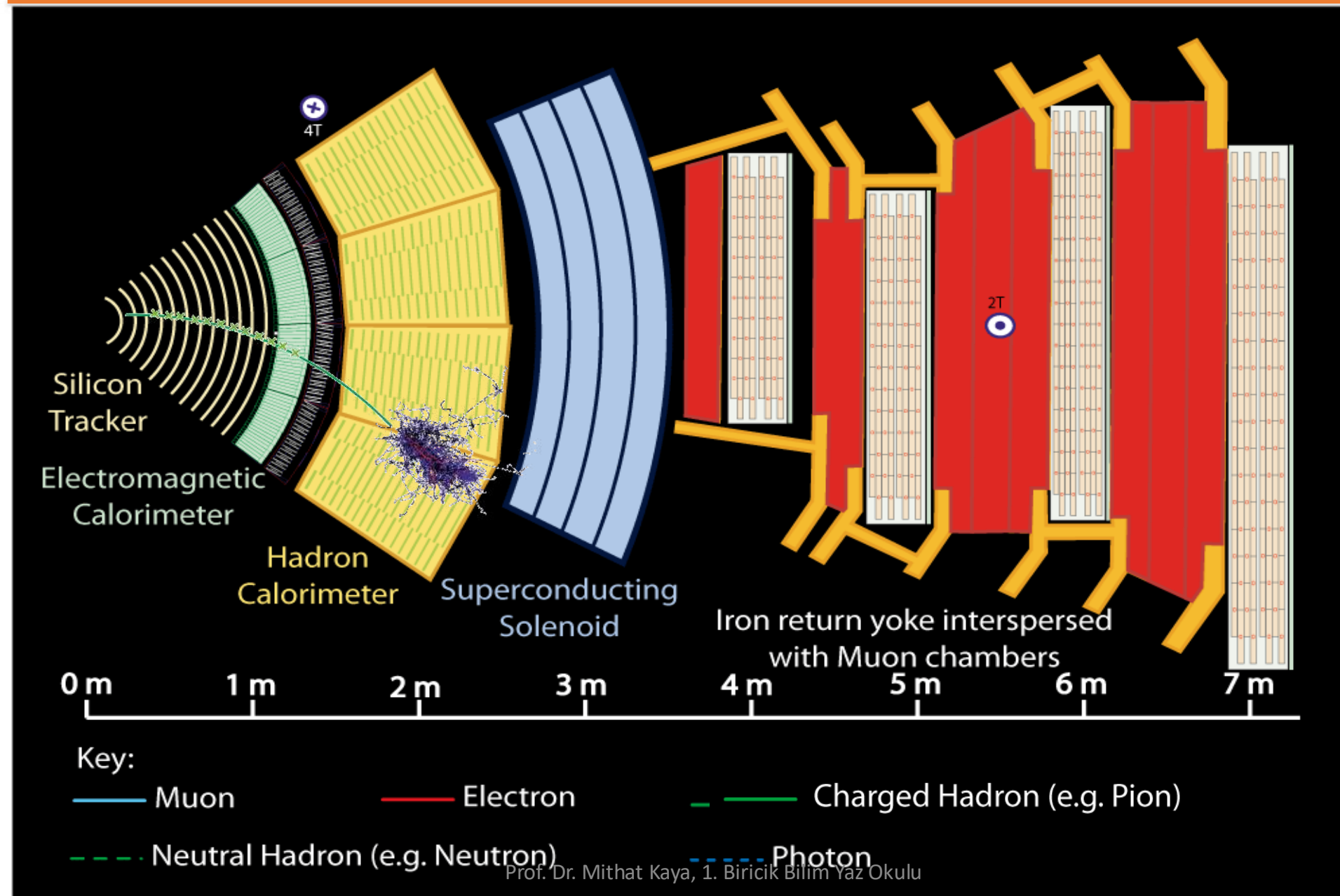
CMS Dedektörünün Kesit Görünümü

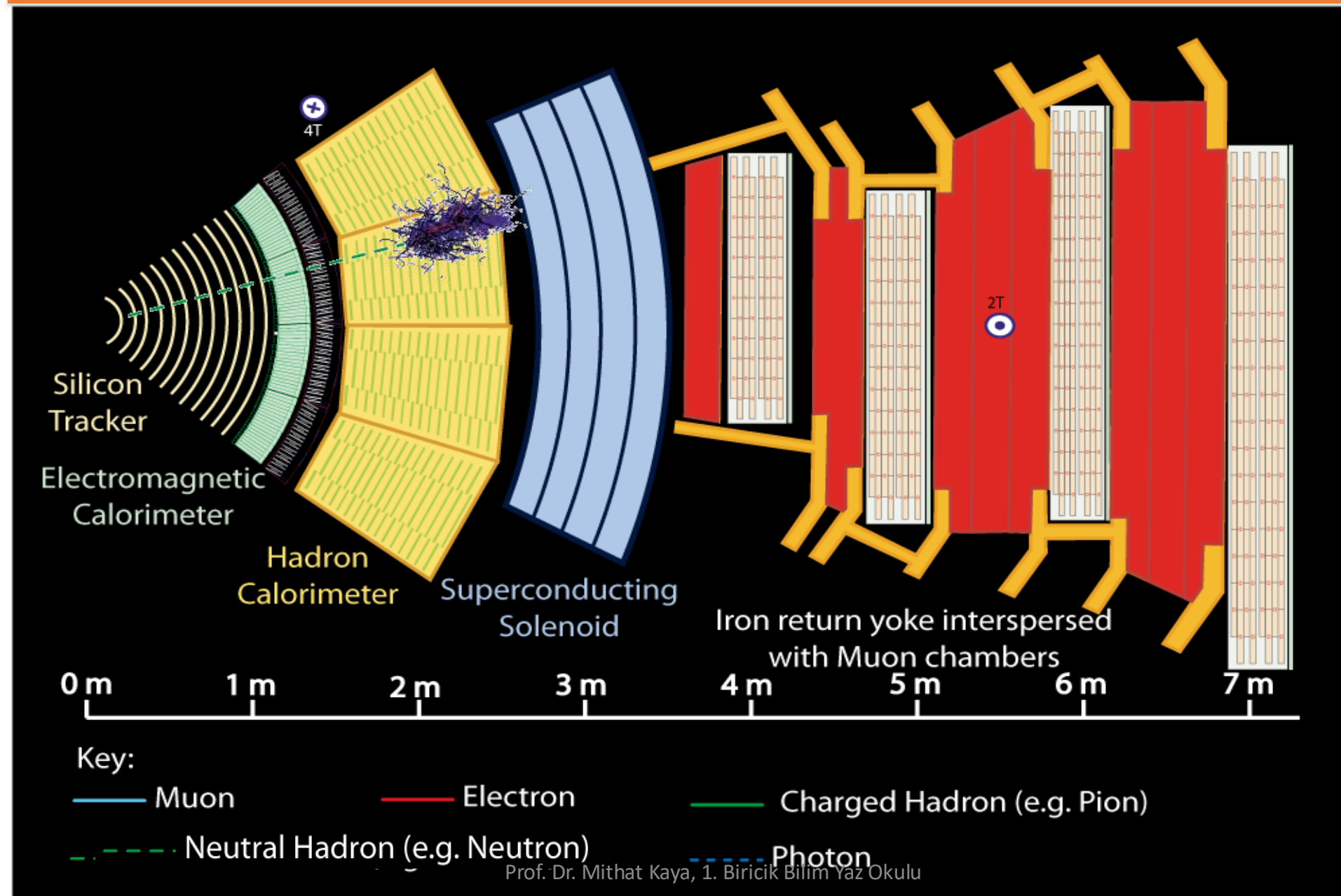


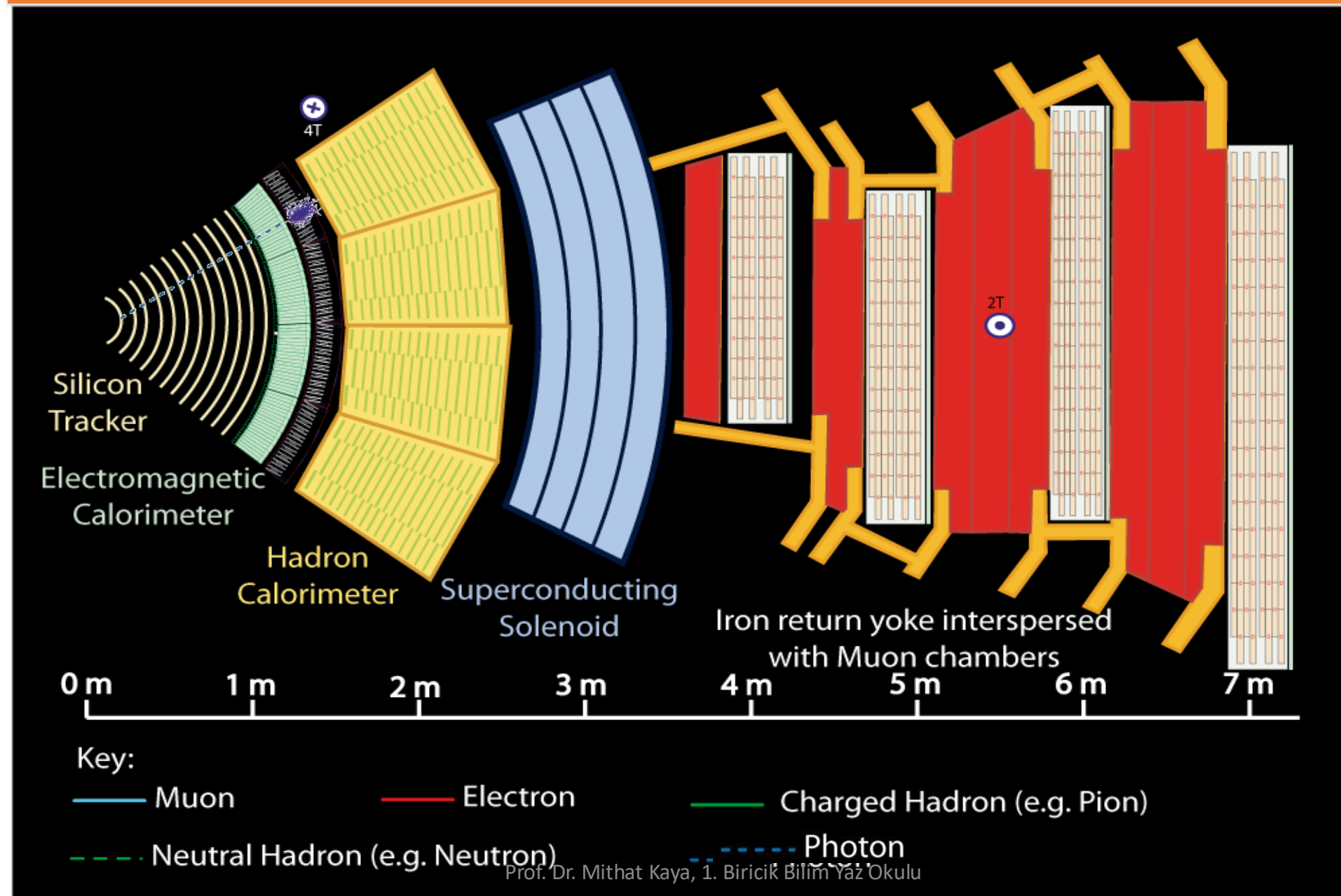




CMS'te Yüklü Hadronlar







Parçacık Seçme Metodu

Parçacıklar	İz dedektörleri Tracker	Elektromanyetik Kalorimetreler ECAL	Hadron Kalorimetreleri HCAL	Müon Odaları
Foton (γ)	Sinyal Yok	Sinyal Var	Sinyal Yok (Çok az, kaçak olabilir)	Sinyal Yok
Elektron/Pozitron ($e^\pm$)	Sinyal Var	Sinyal Var	Sinyal Yok (Çok az, kaçak olabilir)	Sinyal Yok
Yüklü Hadronlar (p , $\pi^\pm$, $K^\pm$...)	Sinyal Var	Sinyal Yok (Küçük/değişken)	Sinyal Var	Sinyal Yok*
Yüksüz Hadronlar (n , K_L^0 ...)	Sinyal Yok	Olası/değişken Nötron ve K_L^0 ECAL kristallerinde hadronik etkileşim yapıp sinyal bırakabilir;	Sinyal Var	Sinyal Yok
$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ neredeyse anında gerçekleştiği için çok belirgin ECAL sinyali	Sinyal Yok	Sinyal Var ($\gamma\gamma$)	Genelde Çok Az	Sinyal Yok
$K_S^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$	Dolaylı/Daughter parçacık izleri	Daugther parçacıklarımından sinyal gelir	Sinyal Var (çoğunlukla Daugther particles)	Sinyal Yok*
Müon($\mu^\pm$)	Sinyal Var	Sinyal Yok (Küçük/MIP)	Sinyal Yok (Küçük/MIP)	Sinyal Var
Nötrino, Görünmez kararlı nötr aday	Sinyal Yok (Kayıp Enerji ölçümleri bu parçacıklar hakkında bilgi verir)			

* Hadron punch-through Çok nadiren müon sisteminde aktivite üretebilir. MIP = minimum iyonize edici parçacık benzeri küçük enerji bırakımı.

Not: "SUSY parçacıkları" genel olarak görünmez değildir; yalnızca kararlı ve zayıf etkileşen nötr bir yeni-parçacık aday eksik enine momentumdan (p_{Tmiss}) dolayı Sıkılır.

CMS DETECTOR

Total weight : 14,000 tonnes
Overall diameter : 15.0 m
Overall length : 28.7 m
Magnetic field : 3.8 T

STEEL RETURN YOKE
12,500 tonnes

Silikon iz dedektörleri: $|\eta| \leq 2.5$
SILICON TRACKERS
Pixel (100x150 μm) $\sim 16\text{m}^2 \sim 66\text{M}$ channels
Microstrips (80x180 μm) $\sim 200\text{m}^2 \sim 9.6\text{M}$ channels

SUPERCONDUCTING SOLENOID
Niobium titanium coil carrying $\sim 18,000\text{A}$

MUON CHAMBERS
Barrel: 250 Drift Tube, 480 Resistive Plate Chambers
Endcaps: 468 Cathode Strip, 432 Resistive Plate Chambers

Eta coverage:
• $|\eta| < 1.6$: 4 layers of CSCs, RPCs, DTs
• the $|\eta| \geq 1.6$: CSCs only;

PRESHOWER
Silicon strips $\sim 16\text{m}^2 \sim 137,000$ channels

FORWARD CALORIMETER
Steel + Quartz fibres $\sim 2,000$ Channels

HF $3 \leq |\eta| \leq 5$ (forward)

CRYSTAL
ELECTROMAGNETIC
CALORIMETER (ECAL)
 $\sim 76,000$ scintillating PbWO_4 crystals

HADRON CALORIMETER (HCAL)

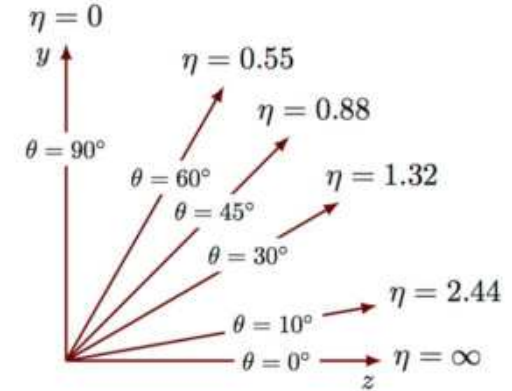
Brass + Plastic scintillator $\sim 7,000$ channels

Hadronic Barrel: HB $|\eta| \leq 1.4$ (barrel)

Hadronic Endcaps: HE $1.3 \leq |\eta| \leq 3$ (endcap)

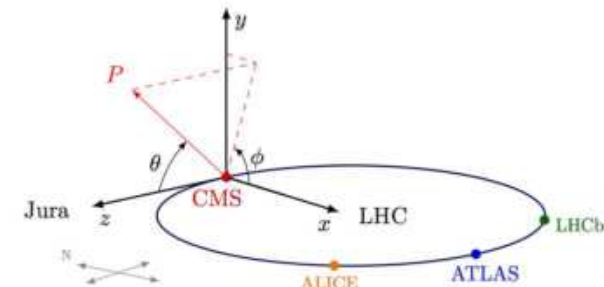
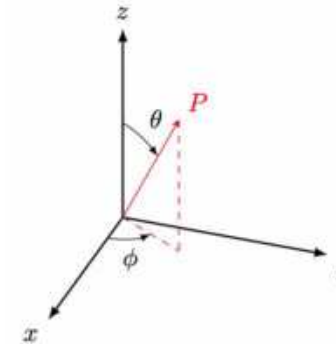
Hadronic Outer: HO $|\eta| \leq 1.26$ (outer)

Koordinat Sistemi



$$\eta \equiv -\ln \left[\tan \left(\frac{\theta}{2} \right) \right]$$

Parçacık fiziğinde, **sıfır açısı genellikle ışın eksenini boyuncadır** ve bu nedenle yüksek pseudorapidity değerlerine sahip parçacıklar, ışınla birlikte detektördeki boşluktan kaçarak genellikle kaybolur. (Wikipedia)

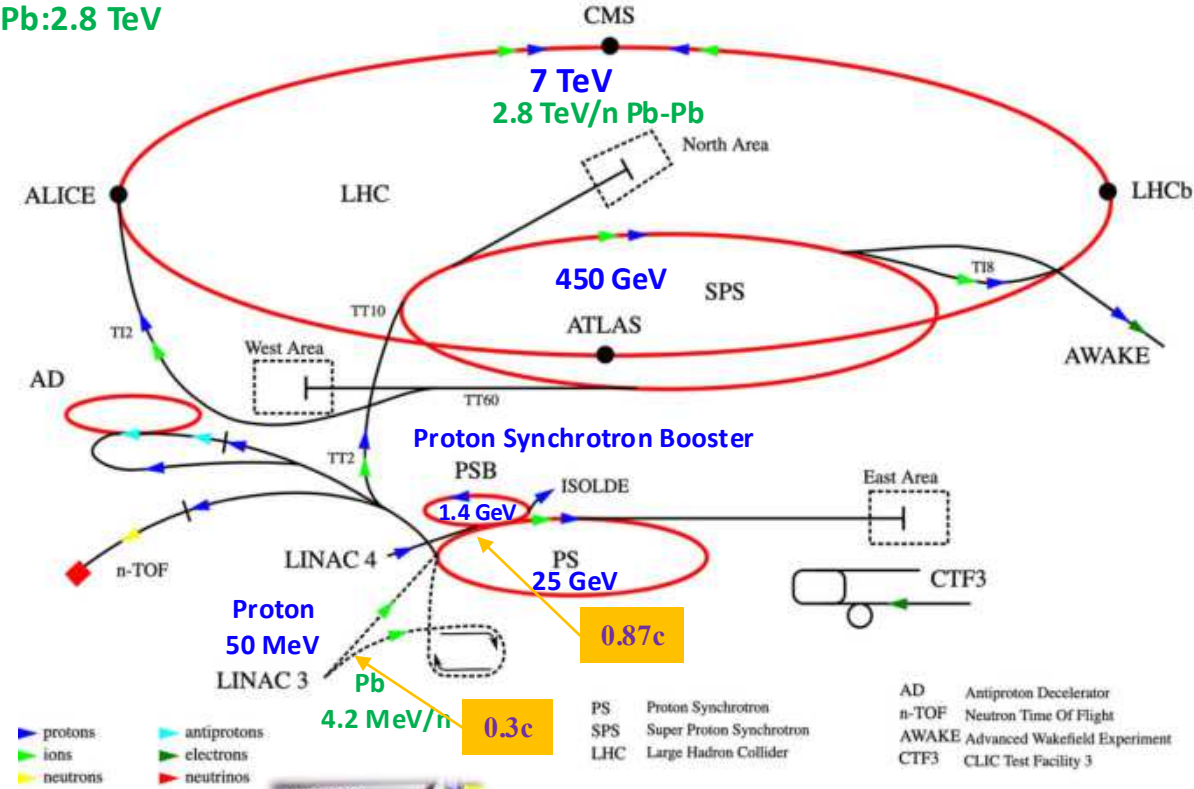
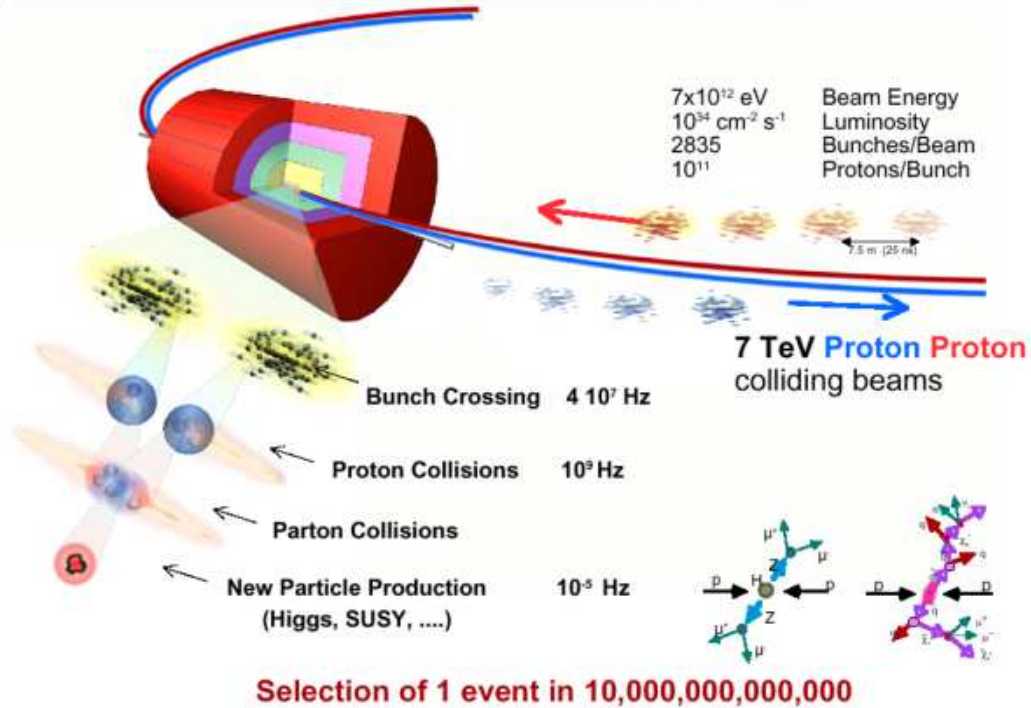


Hızlandırıcı-Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (LHC)

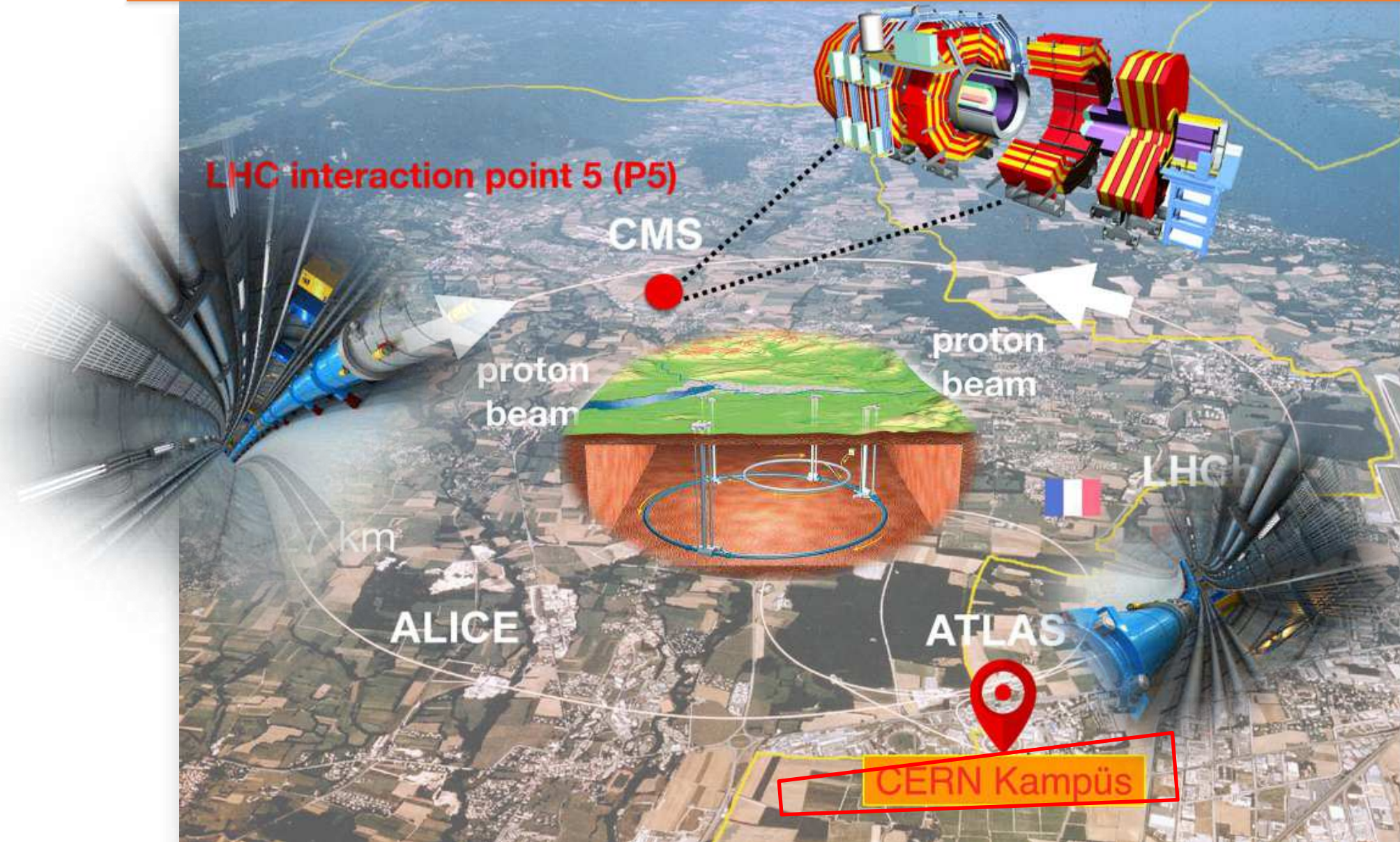


Uzunluğu: 27 Km
Konumu: 100 m yerin altında
Manyetik Alan: ~8 T
Enerji: p-p 7 TeV Pb-Pb: 2.8 TeV

Proton'un bu noktadaki hızı 0.999999991c



CERN-CMS Dedektörü



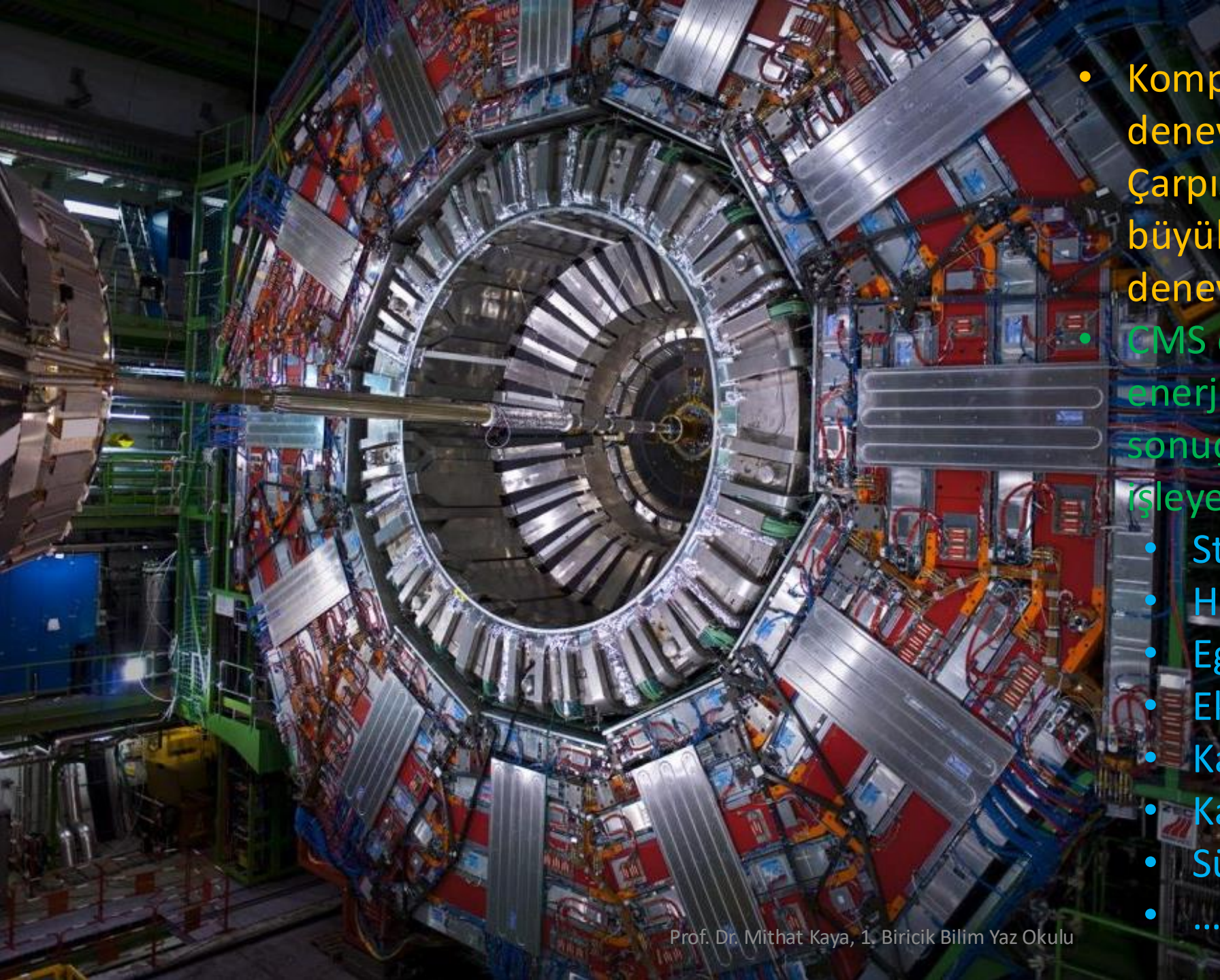
CERN Kampüsü

100 den fazla ülkeden 10 000 Bilim adamı ve mühendis çalışmaktadır









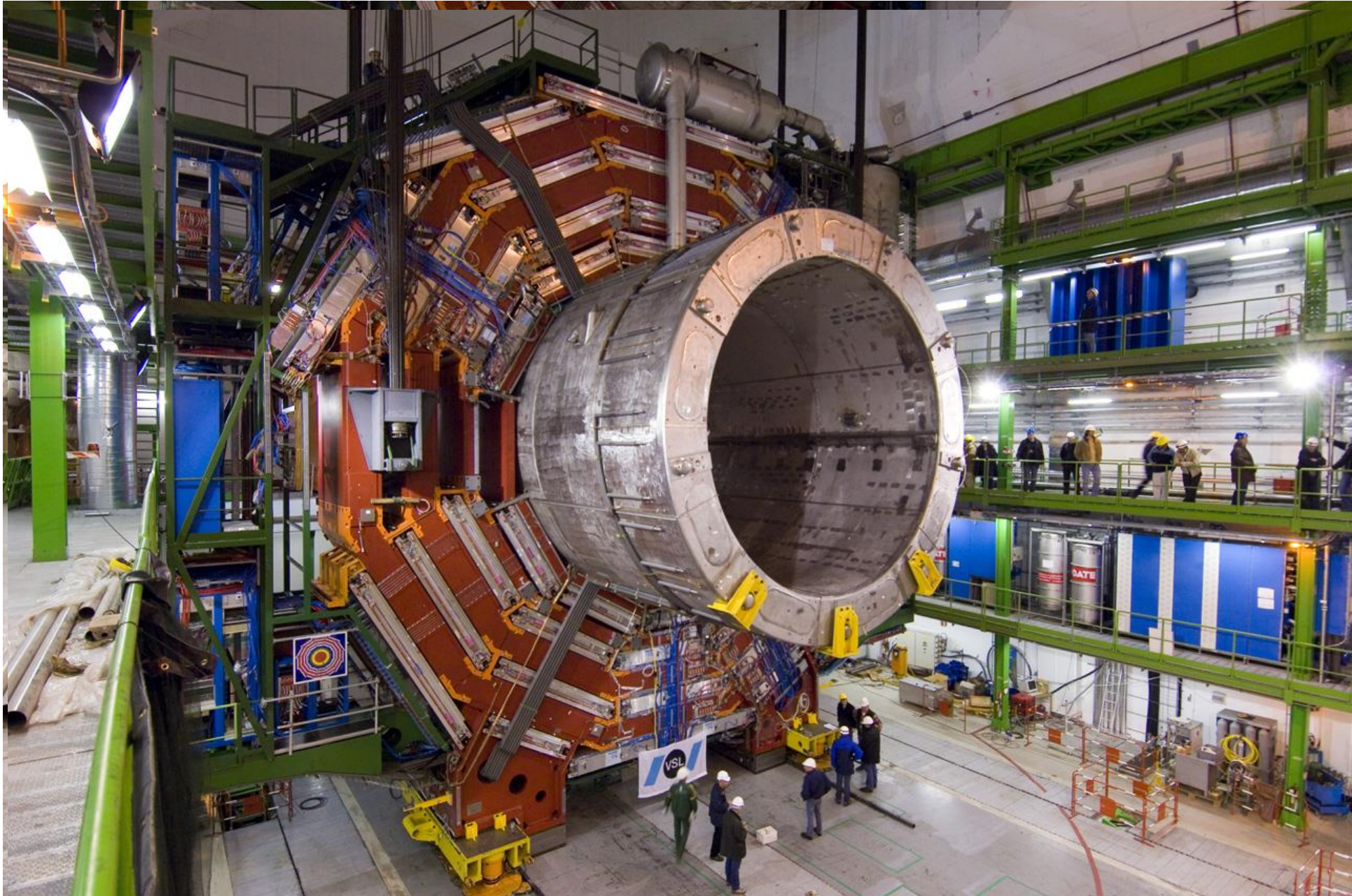
- Kompakt Müon Solenoid (CMS) deneyi, CERN'deki Büyük Hadron Çarpıştırıcısında (LHC) bulunan iki büyük genel amaçlı parçacık fiziği deneylerinden biridir.
- CMS deneyinin amacı, aşırı yüksek enerjili proton çarpışmalarının sonuçlarından elde edilen verileri işleyerek Fizik çalışmaları yapmak:
 - Standart Model Fiziği
 - Higgs bozonunu
 - Egzotik parçacıklar
 - Ekstra boyutlar
 - Karanlık madde
 - Karanlık Enerji
 - Süpersimetri
 -



- CMS dedektörünün alışılmadık bir özelliği de, LHC deneylerinin diğer dev dedektörleri gibi yerinde inşa edilmeyiştir.
- Fransa'da Cessy yakınlarında 100 m yerin altında kurulan deney alanına indirilip yeniden monte edilmeden önce zemin seviyesinde 15 bölüm halinde inşa edilmiş olmasıdır.

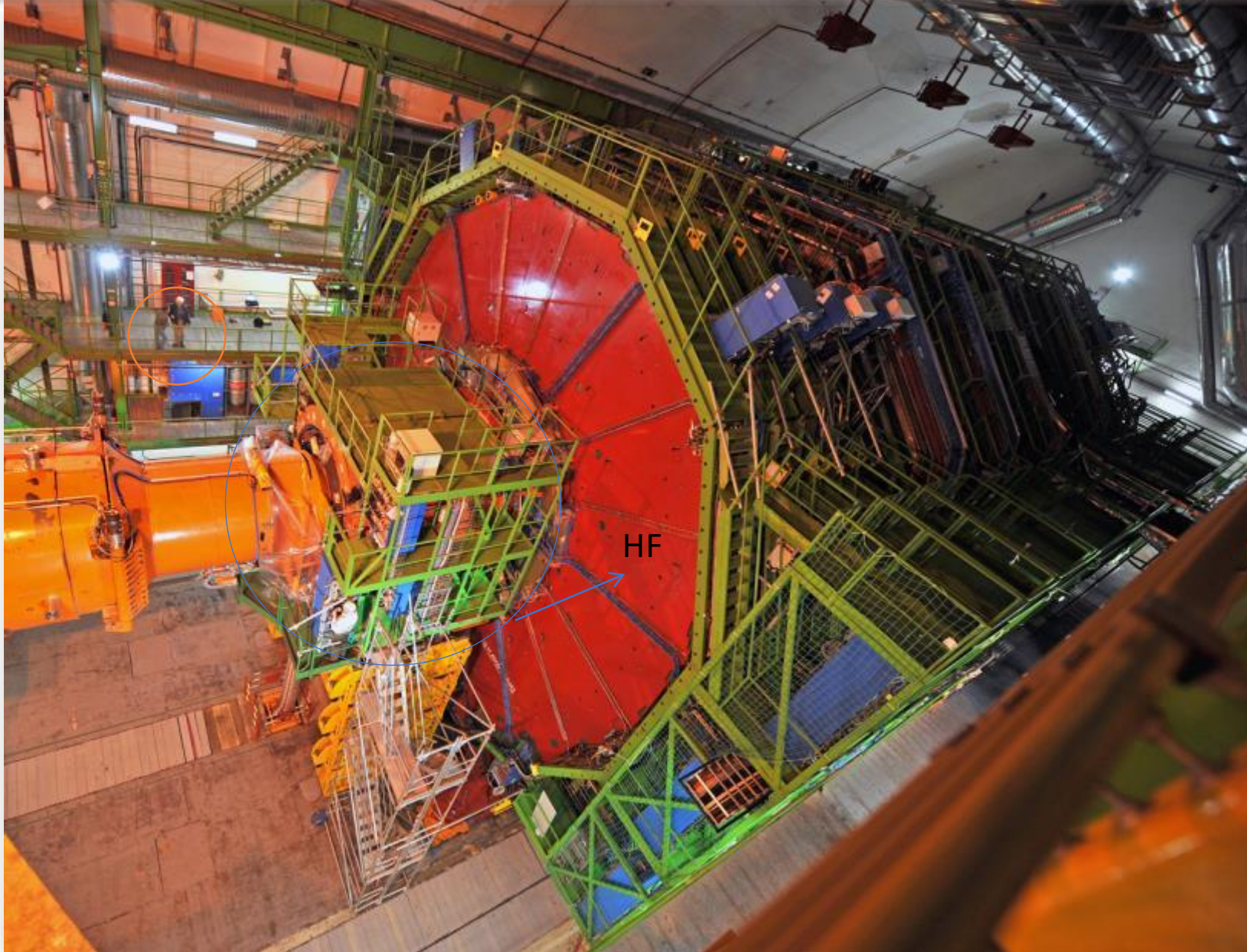








CMS Deneyi 100 m yerin altında

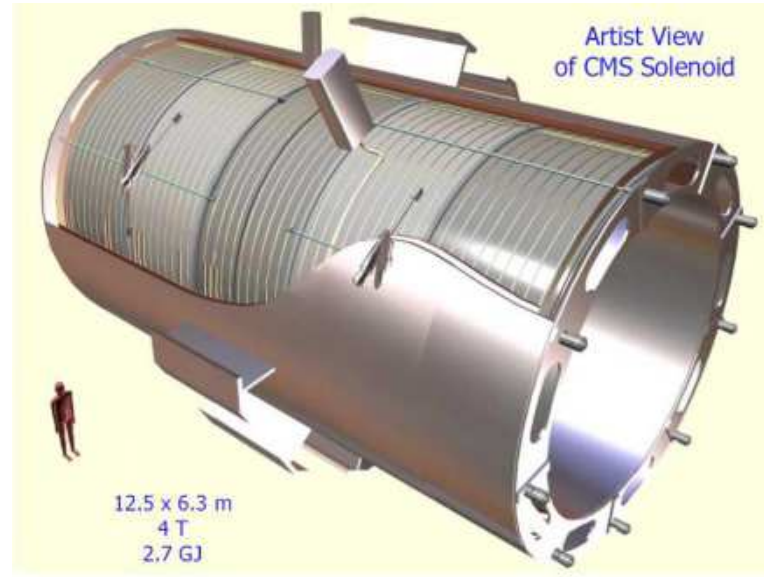
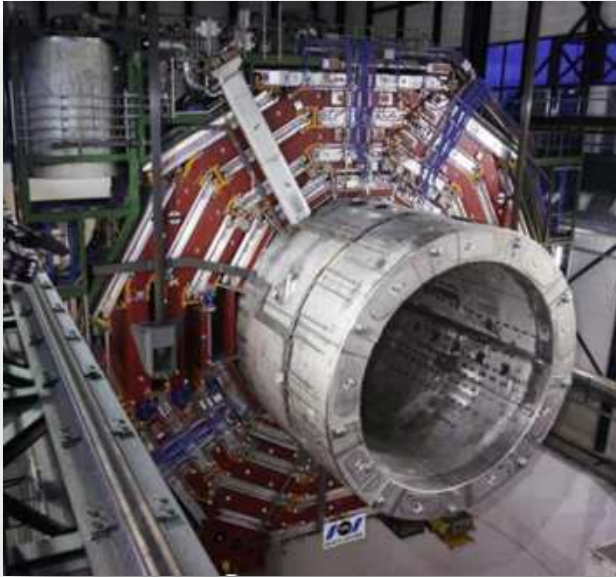


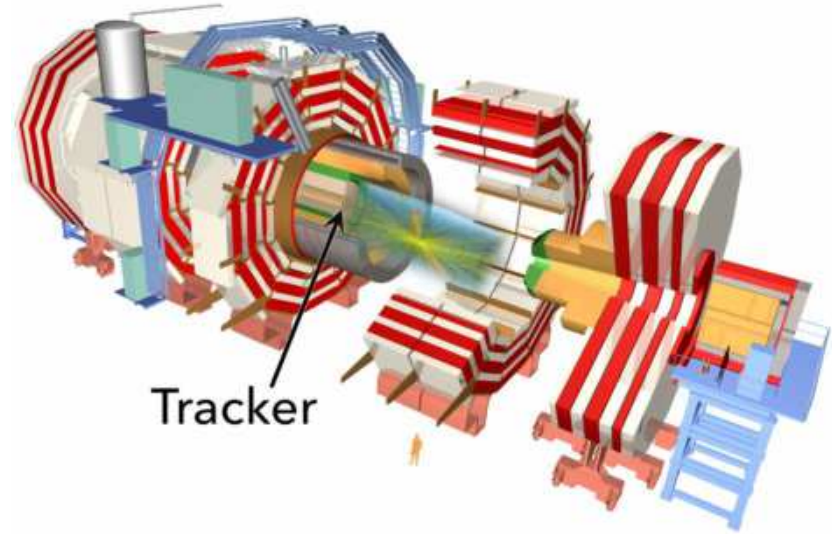
Yüksek çözünürlüklü, çok hızlı ve yüksek enerjili parçacıkların çarpışmalarını 3D'de resmini çeken bir kamera. 100 milyon pixel çözünürlükte sn de 40 milyon **Quantum dünyasında** resim çekme kapasitesine sahip



- **CMS dedektör sistemi solenoid magnet içine ve etrafına yerleştirilmiştir.** Magnet süperiletken kablolardan oluşan silindirik bir yapıya ve **4 Teslalık Manyetik** alana sahiptir.
- **CMS detektörünün yapısı silindirik soğansı ve simetriktir.**
- Dedektör 21 metre uzunluğunda, 15 metre genişliğinde ve 15 metre yüksekliğindedir. 14000 Ton ağırlığındadır.
- CMS deneyi, mühendis, teknisyen, öğrenci ve destek personelinin dahil olduğu tarihteki en büyük uluslararası bilimsel işbirliklerinden biridir.

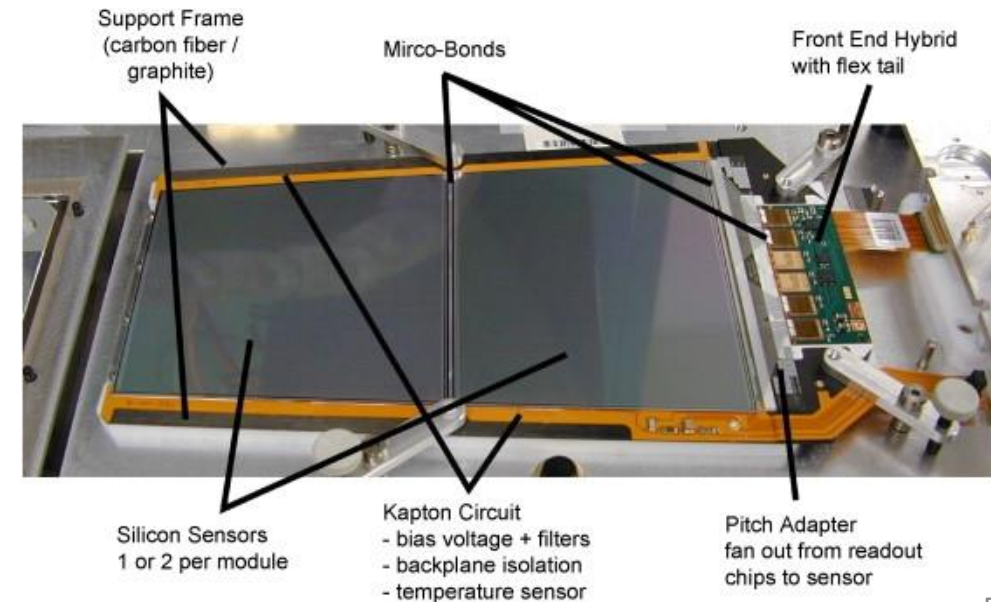
- CMS Solenoid Magneti, depolanan enerji açısından şimdiye kadar yapılmış en büyük ince solenoid olma özelliğini taşımaktadır.
- Güçlü Manyetik Alan $B = 4 \text{ T}$ (3.8 T çalıştırılan)
- Güçlü Akım : 20 kA
- Süperiletken teller: Niobium-titanium (NbTi ($\sim 4 \text{ K}$))
- $-270 \text{ }^\circ\text{C}$ kadar soğutulur
- İz dedektörlerini ve Kalorimetreleri içine alır
- Yüklü parçacıkların momentum ölçümleri ve ayrımları yapılır.



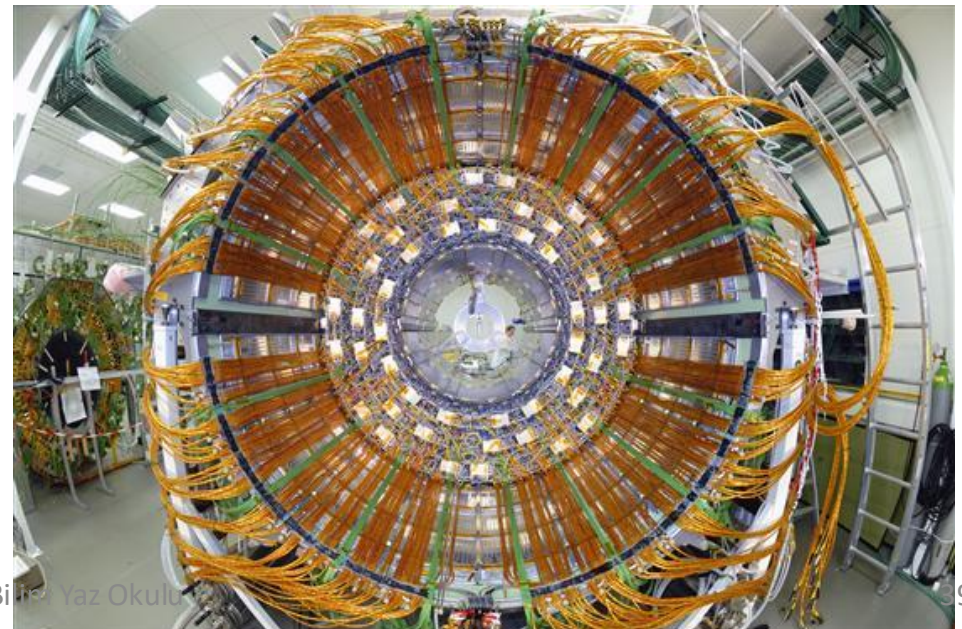


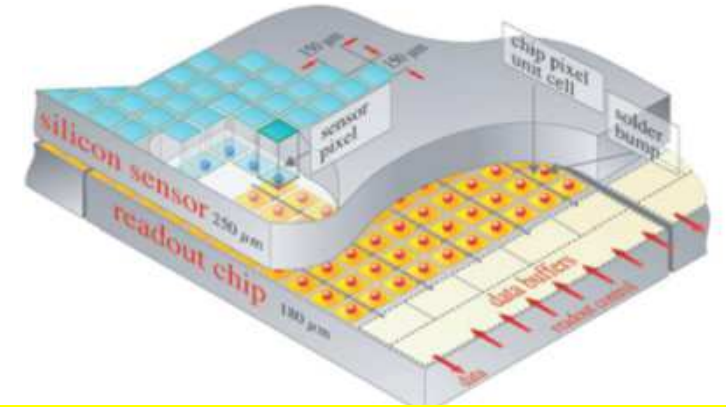
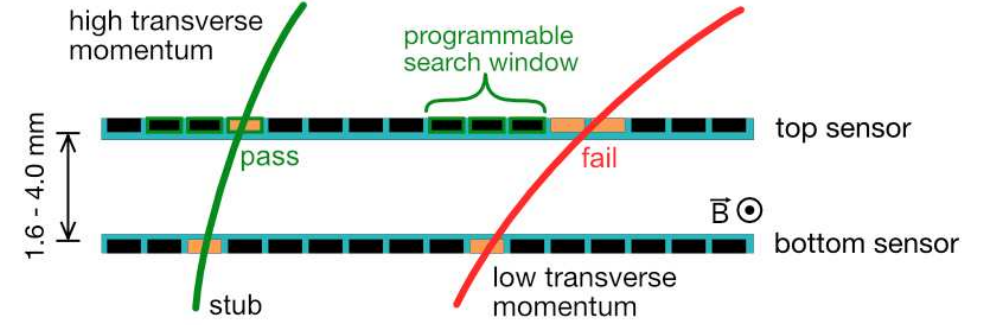
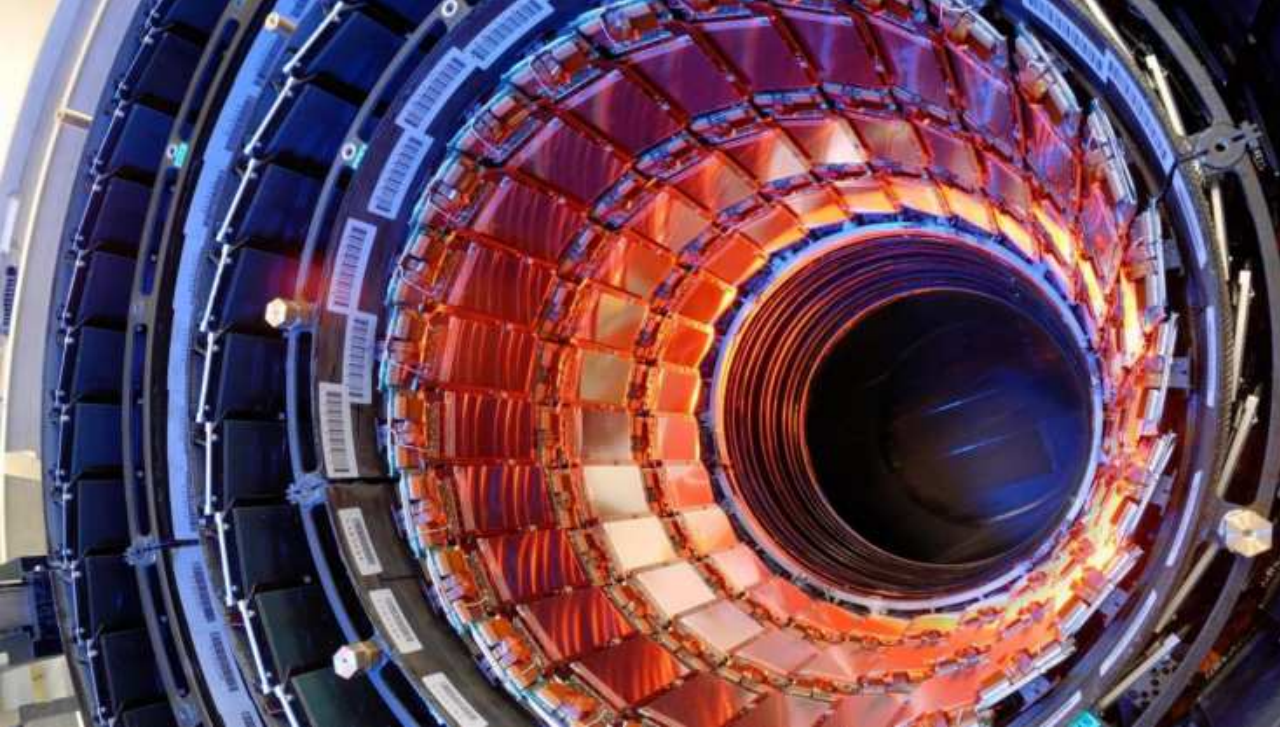
Tracker

İz dedektörleri son başlık modülü



- CMS deneyinin merkezini silikon iz dedektörleri oluşturmaktadır.
- Bunlar etkileşme mesafesine en yakın olan dedektörlerdir.
- Protonların çarpıştığı ışın eksenini tamamen sarmaktadırlar.
- Bu dedektörler yüklü parçacıkların **izleri ve momentumları** hakkında bilgi verirler.
- İz dedektörleri **Fıçı (Barrel)** ve **sonbaşlık (Endcap)** diye adlandırılan 2 bölümden oluşmaktadır ve toplam 15148 dedektör modülü içermektedir.
- Sinyaller, özel bir okuma sistemi olan **ASIC** ile okunur. Sensörler ve elektronikler, karbon fiber yapılarla desteklenir.
- **ASIC** (*Application Specific Integrated Circuits - Uygulamaya Özel Entegre Devreler*)

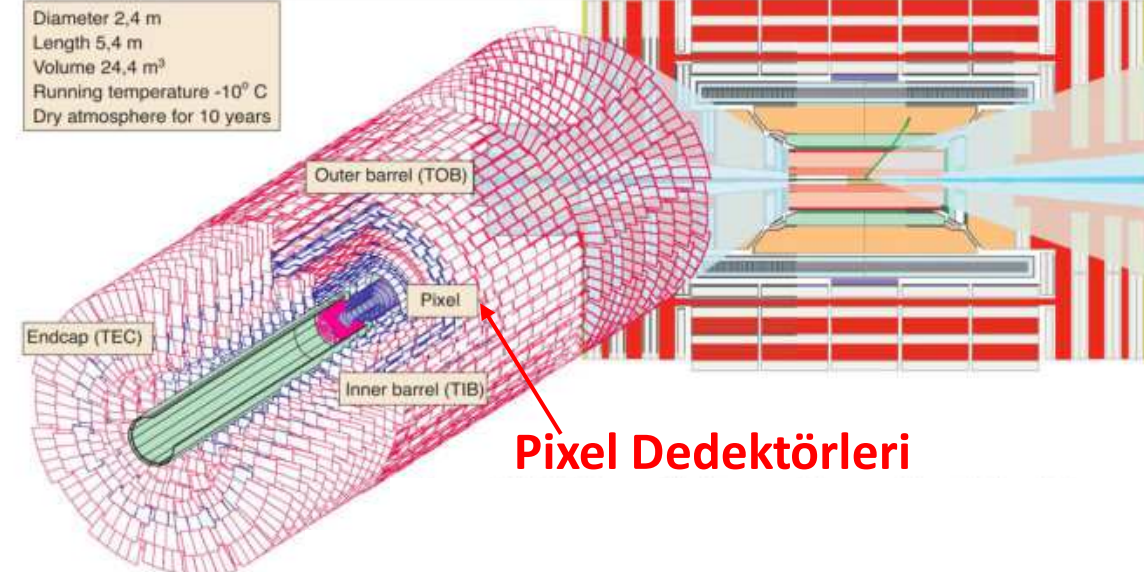




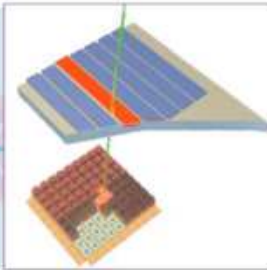
- Bir parçacığın momentumunu hesaplamanın bir yöntemi, manyetik bir alandan geçen yolunu izlemektir; yol ne kadar kıvrılırsa, parçacığın sahip olduğu momentum o kadar azdır.
- CMS iz dedektörleri, bir dizi kilit noktada konumlarını bularak yüklü parçacıkların izlediği yolları kaydeder.

CMS İZ Dedektörü-Pixel ve Silikon Şerit

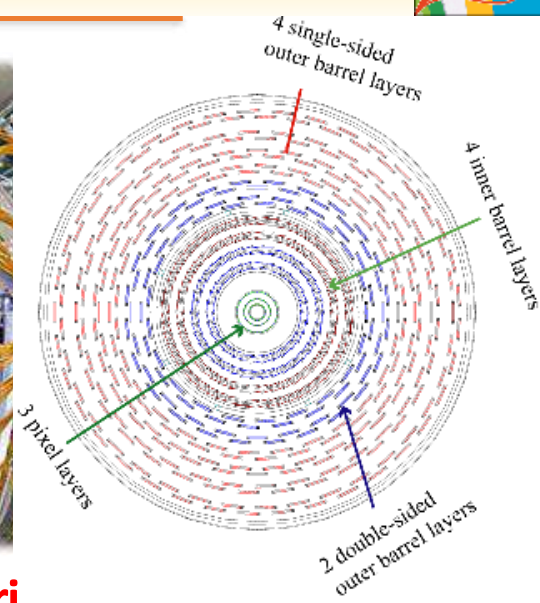
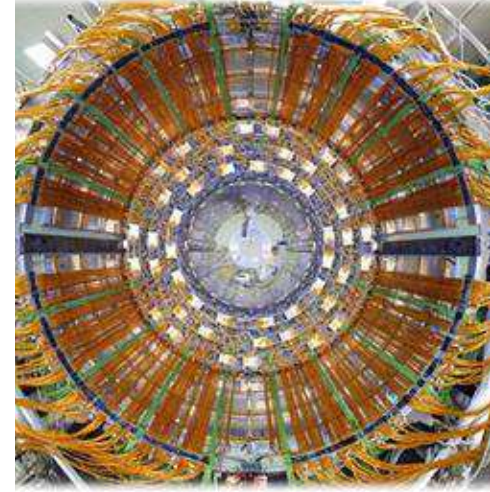
Diameter 2,4 m
Length 5,4 m
Volume 24,4 m³
Running temperature -10° C
Dry atmosphere for 10 years



Silicon strip detector



Pixel detector



Pixel Dedektörleri

Silikon Şerit (Strip) Dedektörleri

- En küçük Yarıçaplı olanıdır. Işın yoluna olan uzaklığı 4-11 cm arasındadır.
- Dedektor, herbiri yaklaşık 100x150 μm (yaklaşık 2 saç teli kalınlığında) boyutlarında olan 124 milyon bağımsız piksel hücresinden oluşur.
- Etkileşme bölgesi silikon pixel dedektörlerinden oluşan iki fıçı (barel) katmanı ile çevrelenmiştir.
- İki son başlık diski (endcap disks) 6 cm den 15 cm'ye kadarlık bir yarıçapı kapsamaktadır.

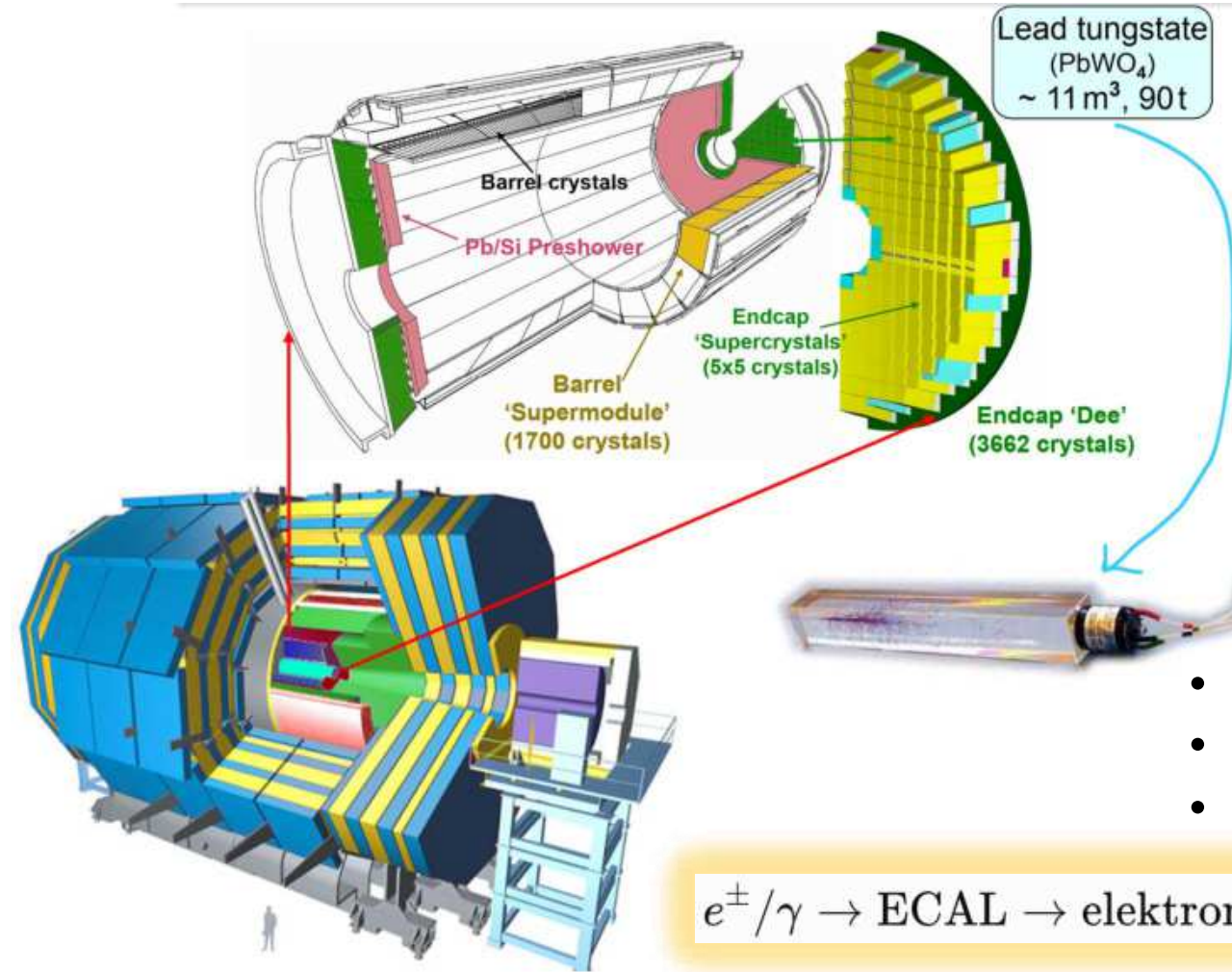


- Silikon şerit iz dedektörleri, her biri üç küçük diskten oluşan iki iç son başlık(inner endcaps) (TID) kabuklara monte edilmiş dört iç fıçı(inner barrel) (TIB) katmanından oluşur.
- Dış Fıçı(outer barrel) (TOB) altı eşmerkezli katmandan oluşur ve son olarak iki son başlık (endcaps)(TEC) izleyiciyi kapatır.
- Her biri dedektör içindeki yeri için farklı tasarlanmış silikon modüllere sahiptirler.
- İzleyicinin bu kısmı, 80.000 mikro elektronik yonga tarafından okunan toplam 10 milyon dedektör şeridi ile 15.200 yüksek hassasiyetli modül içerir.
- Her modül üç unsurdan oluşur: bir sensör seti, mekanik destek yapısı ve okuma elektroniği.

- Silikon sensörler, hızlı tepkileri ve iyi uzaysal çözünürlükleri nedeniyle küçük bir alanda birçok parçacığı algılamak için oldukça uygun dedektörlerdir. Bu dedektörler vertex dedektörü olarak kullanılır.
- Silikon dedektörler piksellerle aynı şekilde çalışır: yüklü bir parçacık malzemeyi geçerken atomlardan elektronu koparır ve uygulanan elektrik alanı içinde bu elektronlar hızlandırılarak birkaç nanosaniye de çok küçük bir akım oluşturur.
- Bu küçük miktardaki akım daha sonra **APV25(Analogue Pipeline Voltage) yongaları** tarafından büyütülür ve elde edilen ‘elektronik sinyal’ parçacığın yolunu oluşturmamızı sağlar.

Elektromanyetik Kalorimetre (ECAL)

CMS dedektöründe başlıca **elektronların ve fotonların enerjisini ve geliş konumunu ölçmek** için kullanılır. Tracker'ın hemen dışında, HCAL'in ise içinde yer alır.



Temel görevi	Elektron $e^\pm$ ve fotonların γ enerjisini ölçmek
Çalışma prensibi	Parçacığın oluşturduğu elektromanyetik shower'ın kristallerde ürettiği sintilasyon ışığı ölçülür
Malzeme	Kurşun tungstat kristali, PbWO ₄
Kristal sayısı	Toplam 75.848 kristal
Barrel	61.200 kristal
Endcap	Yaklaşık 15.000 kristal
Yoğunluk	PbWO ₄ için yaklaşık 8.3 g/cm ³
Okuma sistemi	Oluşan ışık fotodedektörlerle elektrik sinyaline dönüştürülür
Dedektördeki konumu	Tracker ile HCAL arasında
Özellikle önemli olduğu fizik	$H \rightarrow \gamma\gamma$, elektron ve foton rekonstrüksiyonu

- Hızlı Işık Yayınımı: 25 ns de ~80%
- Yayınım dalga boyu ~425 nm (Görünür Bölge)
- Kristaller Kısa radyasyon uzunluğuna sahip: $X_0 = 0.89\text{cm}$

$e^\pm/\gamma \rightarrow \text{ECAL} \rightarrow \text{elektromanyetik shower} \rightarrow \text{sintilasyon ışığı} \rightarrow \text{elektrik sinyali} \rightarrow E$

Elektron ECAL kristaline girdiğinde çekirdeklerin elektrik alanında **bremsstrahlung** fotonları üretir:

$$e^- \rightarrow e^- + \gamma$$

Bu fotonlar da kristal içerisinde elektron-pozitron çiftleri oluşturabilir:

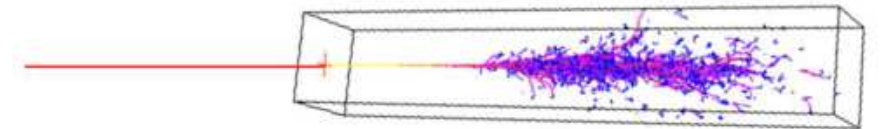
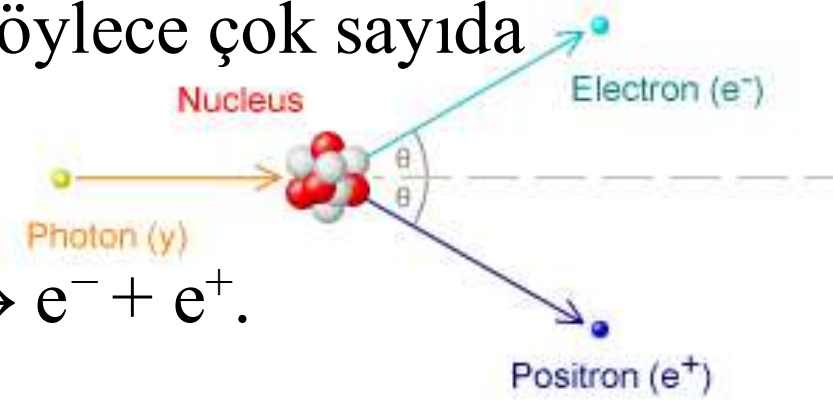
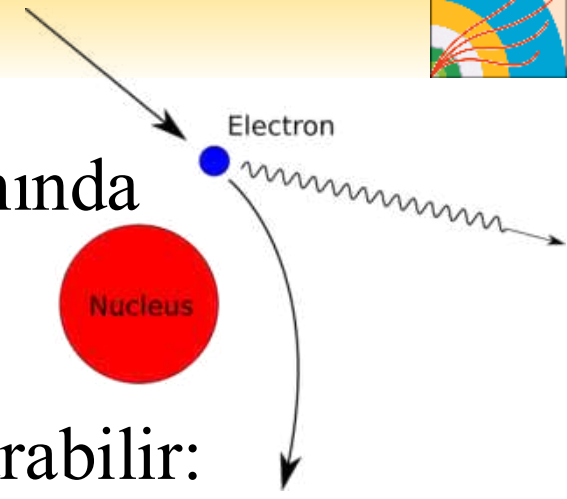
$$\gamma \rightarrow e^- + e^+$$

Yeni oluşan elektronlar tekrar bremsstrahlung yapar. Böylece çok sayıda e^- , e^+ , γ oluşur. Buna **elektromanyetik shower** denir.

Foton için süreç genellikle çift oluşumuyla başlar: $\gamma \rightarrow e^- + e^+$.

Ardından: $e^\pm \rightarrow e^\pm + \gamma$ ve süreç tekrarlanır.

Dolayısıyla ECAL'de tek bir parçacık yerine küçük bir parçacık **duşu** (shower) oluşur.



Enerji Elde Edilmesi:

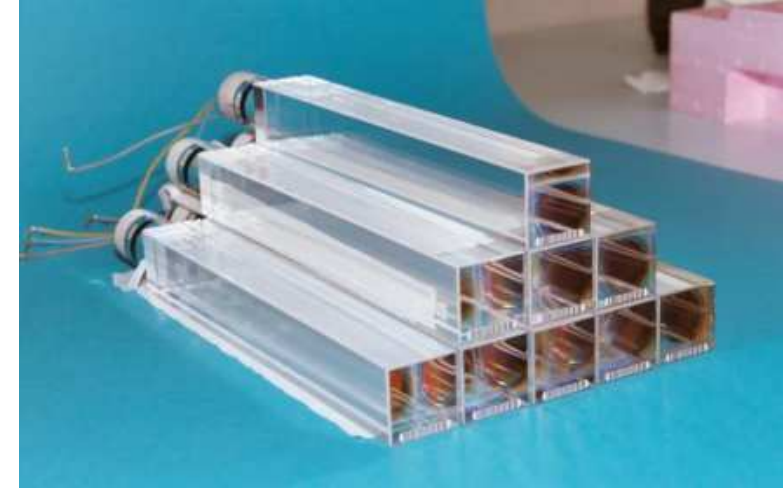
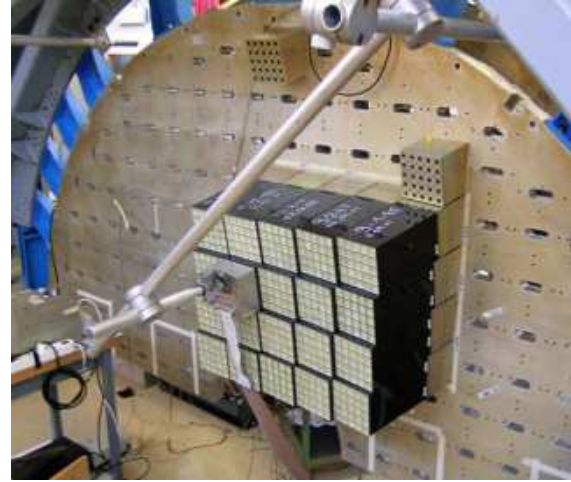
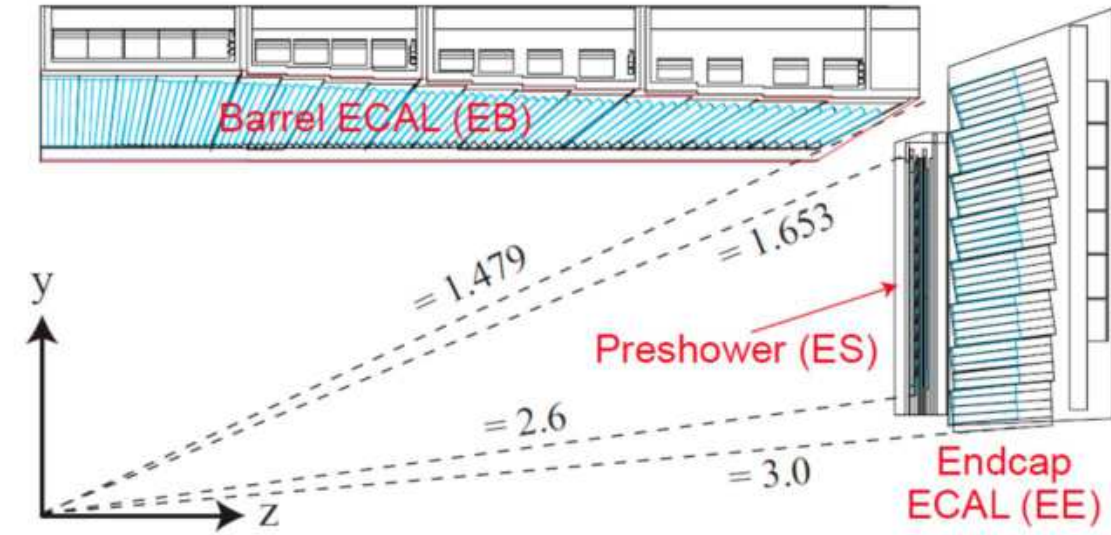
- Shower'daki parçacıklar PbWO₄ kristallerine enerji aktarır. Kristaller bu enerjiyi görünür ışık şeklinde yayar; buna **sintilasyon** denir.
- Bırakılan enerji arttıkça üretilen ışık miktarı da artar. Kristalin arkasındaki fotodedektör bu ışığı algılayarak elektrik sinyaline donusturur.
- Elektrik sinyalinin büyüklüğünden parçacığın bıraktığı enerji hesaplanır.
- CMS'nin kullandığı PbWO₄ kristallerinin yüksek yoğunluklu ve hızlı sintilasyon yapan bir malzeme olması ECAL'in kompakt ve hızlı olmasını sağlar.

Elektron ve foton ayrımı:

Burada tracker çok önemlidir.

- **Elektron:** Tracker'da iz var+ECAL'de EM shower var
- **Foton:** Tracker'da iz yok+ECAL'de EM shower var

Bu nedenle ikisi ECAL'de benzer shower oluştursa da tracker bilgisi parçacık tanımlamasında kullanılır.



- ECAL, Elektron ve Foton çıktıları olan bütün parçacıkların ölçümünde kullanılır. Örneğin

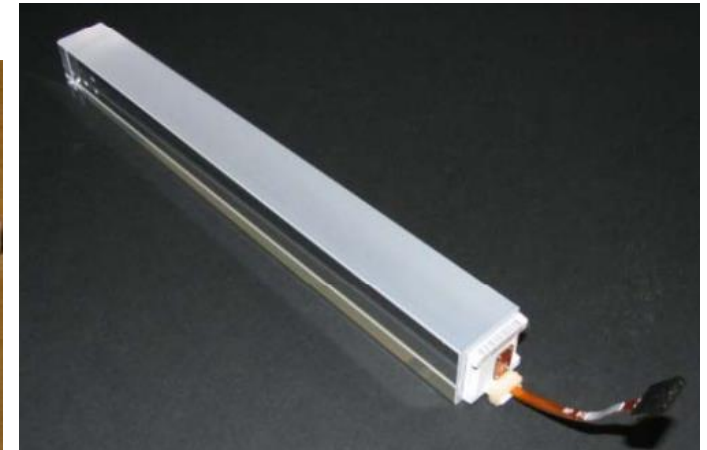
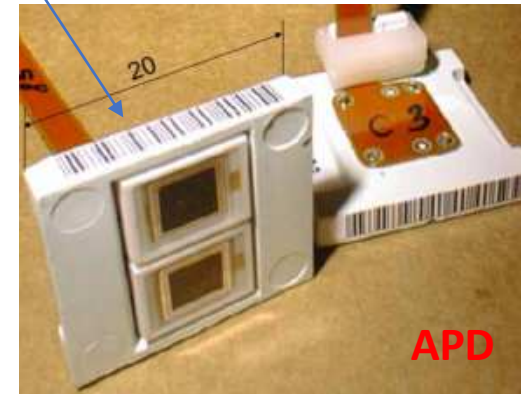
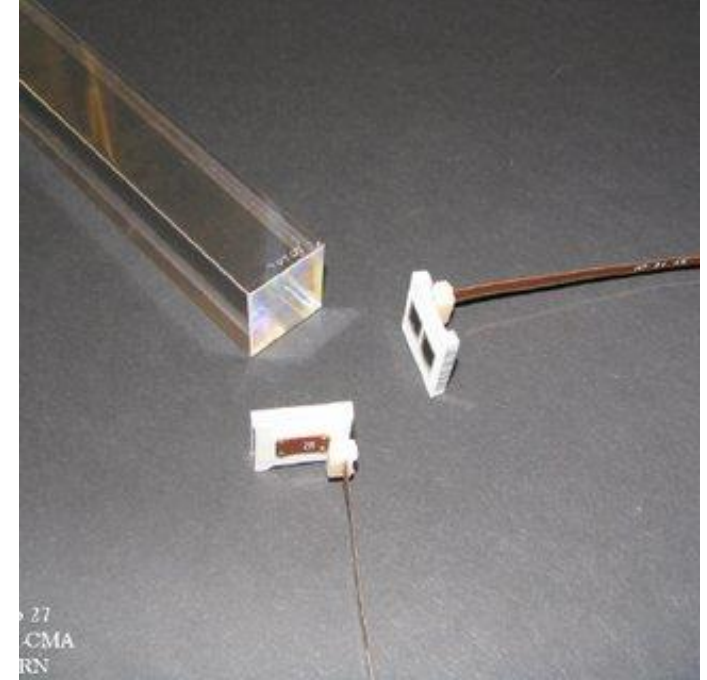
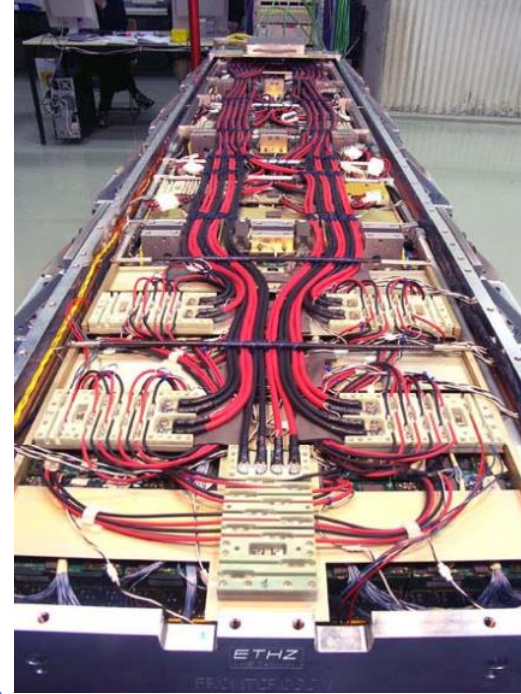
- $H \rightarrow \gamma \gamma$
- $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$

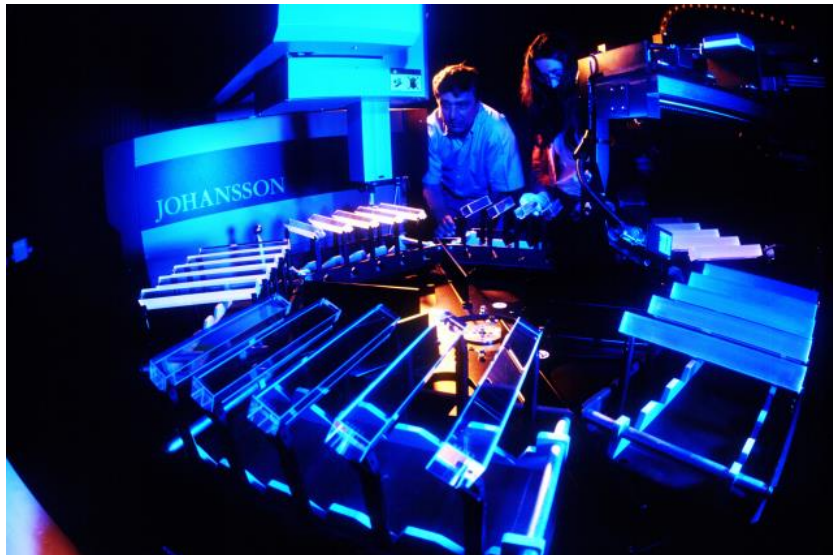
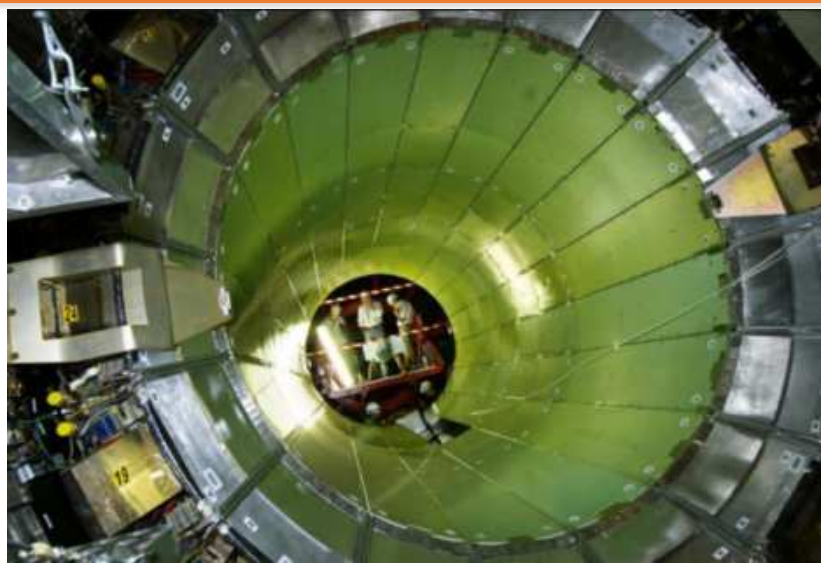


- Parçacık enerji ölçümleri için Lead tungstate kristaller ($PbWO_4$) kullanılır.
- 420 nm de **Mavi-Yeşil** sintilasyon ışık yayar.
- Işık Okuma sistemi(Fotoçoğaltıcılar):
- Barel bölümü APDs(Avalanche photodiodes)(123 K)
- Endcap: VPTs (Vacuum phototriodes)(17 K)

- Barrel: $|\eta| < 1.48$
- Ecal Barrel (Fıçı) 36 Süpermodule ve 61200 kurşun tungstate kristalden (PbWO_4)($2 \times 2 \times 23 \text{ cm}^3$) yapılmıştır.
- Bu kristallerden elde edilen ışık (scintillation light) APD (Avalanche Photodiodes-Hamamatsu)ler tarafından okunur.
- Her bir Kristal için iki APDs kullanılmıştır (Yandaki Şekil)
- APD ler verimli çalışması için 350-450 V luk yüksek voltaj uygulanır.
- Kalorimetrenin performansı Elektron/Foton enerjilerinin çözünürlüğü ile belirlenir.

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

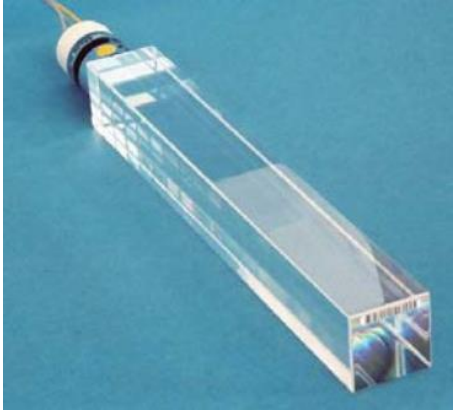




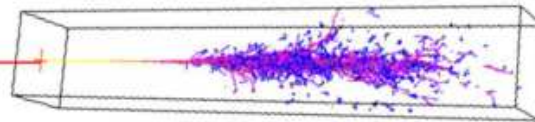
ECAL Sonbaşlık (Endcap)

Not:Run-3'te kullanılan kristal endcap kalorimetreleri HL-LHC için değiştiriliyor. CMS'nin yeni **High-Granularity Calorimeter (HGCal)** sistemi mevcut endcap kalorimetrelerinin yerini alacak; barrel kristal ECAL ise korunup elektroniği yükseltilecek.

- Eta uzunluğu $1.479 \leq \eta \leq 3.0$ ve Etkileşme noktasından olan uzaklığı: 3.14 m

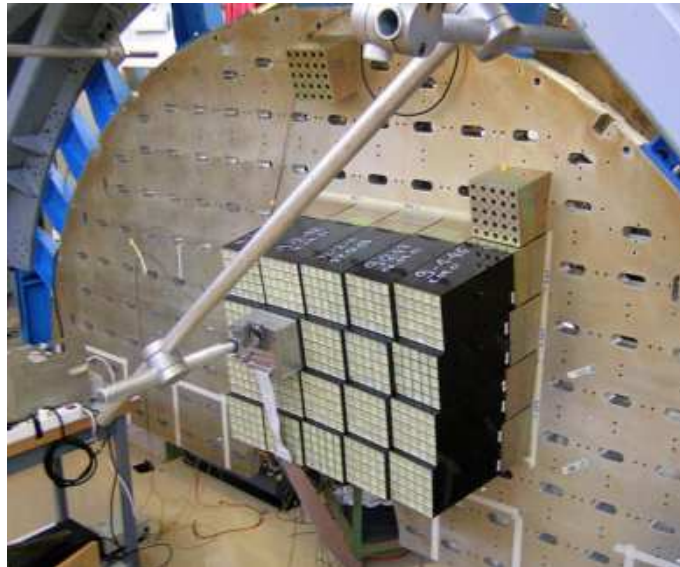
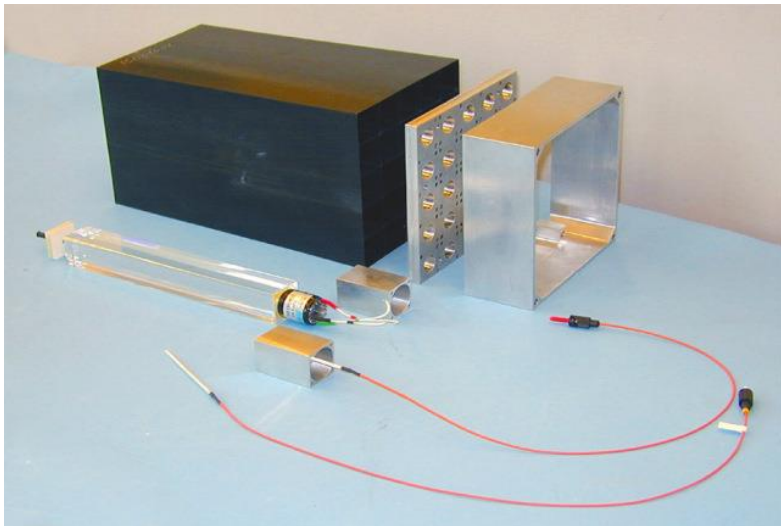
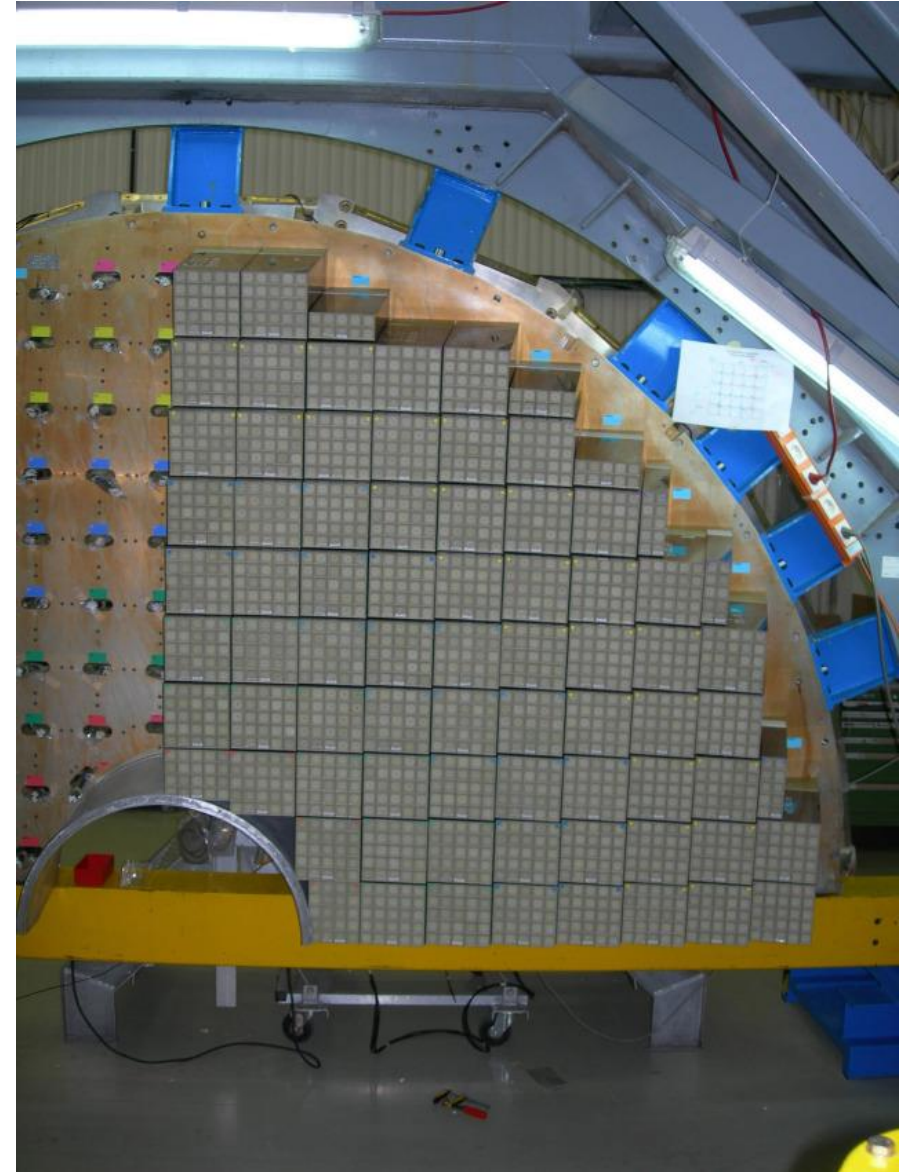
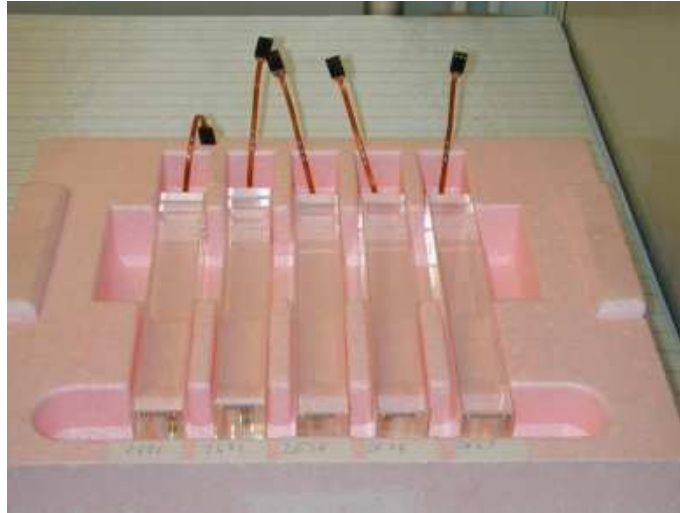
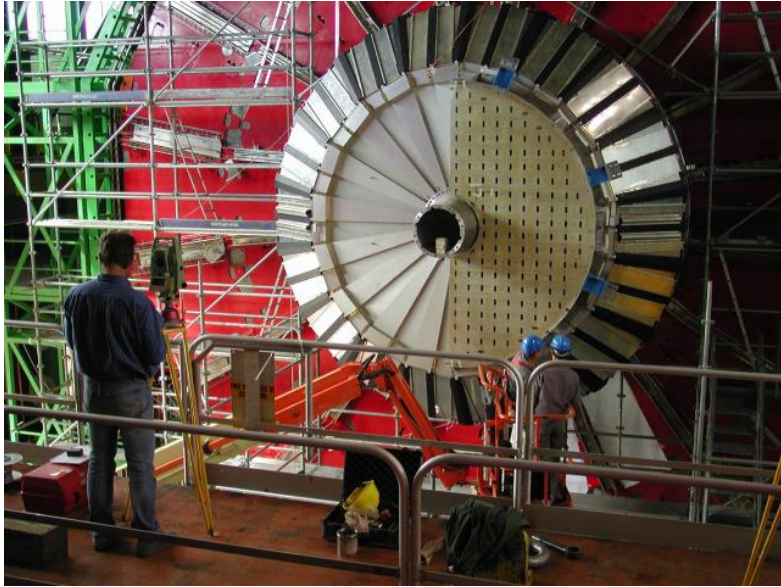


VPT

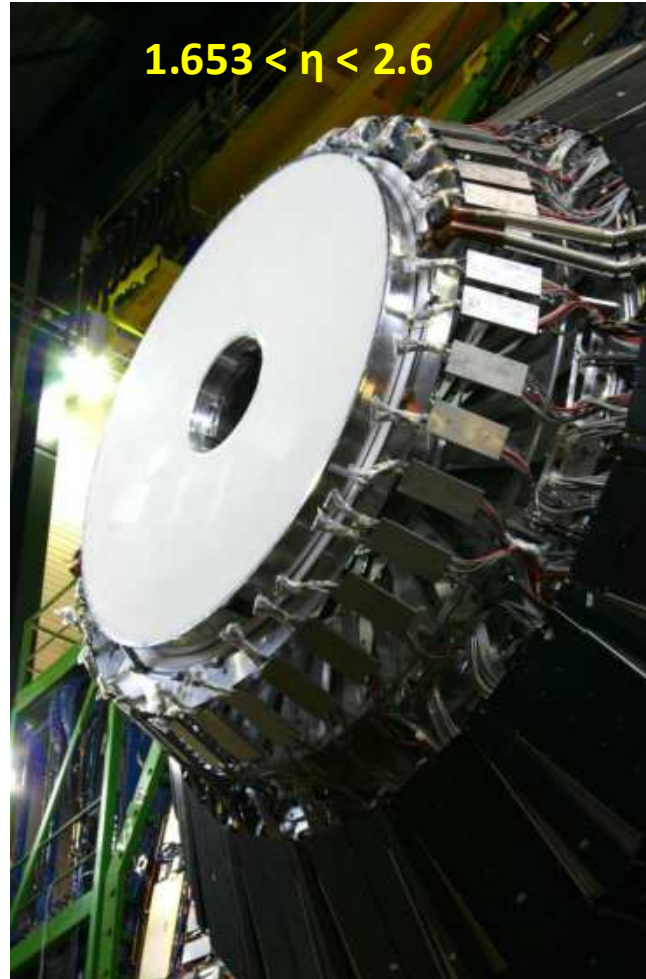


Endcaps: Toplam 4 Dees
14648 Kristal (3x3x22cm³)

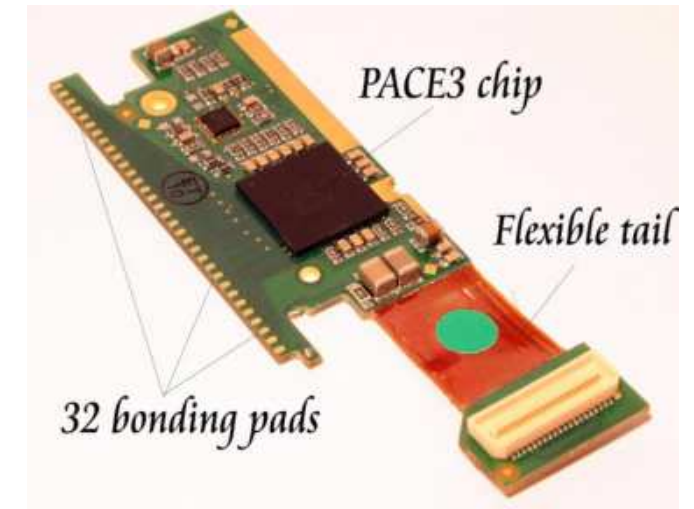


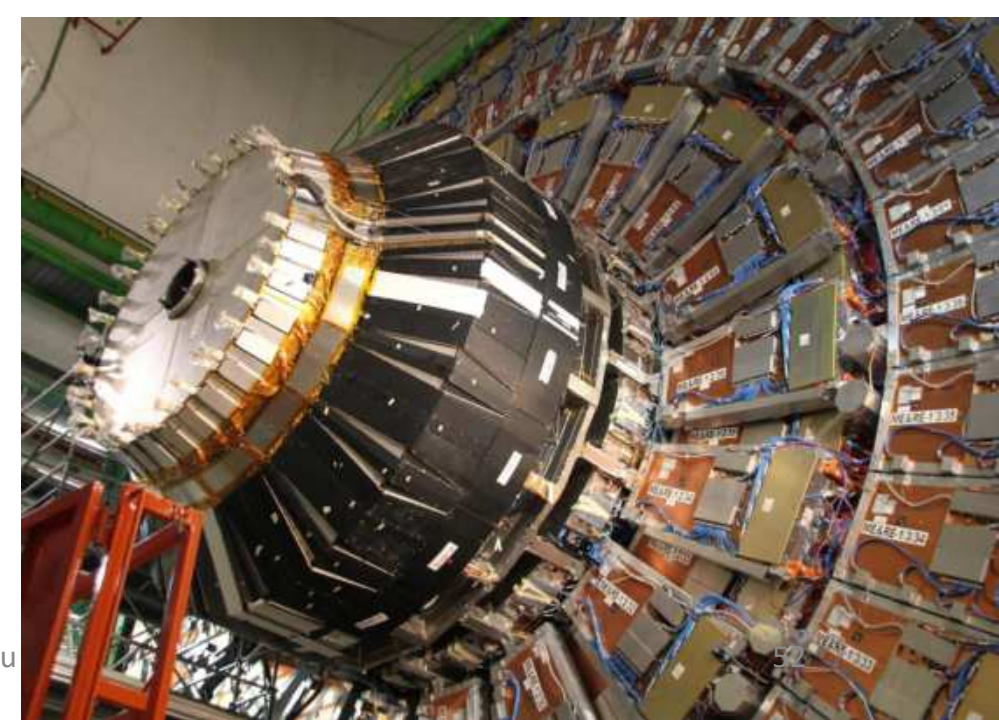
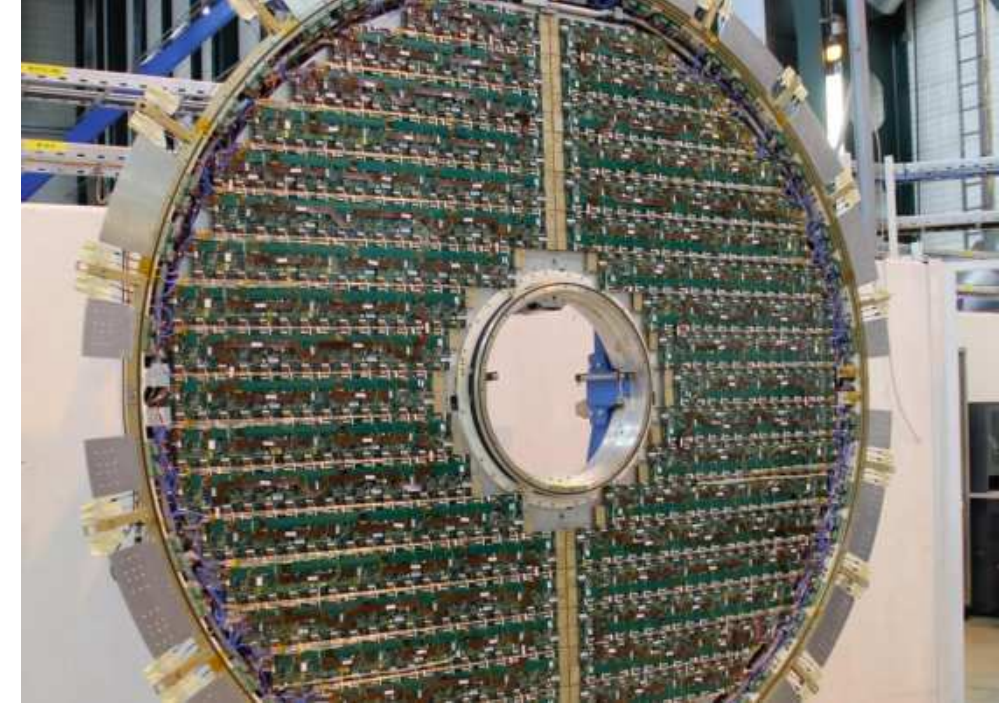
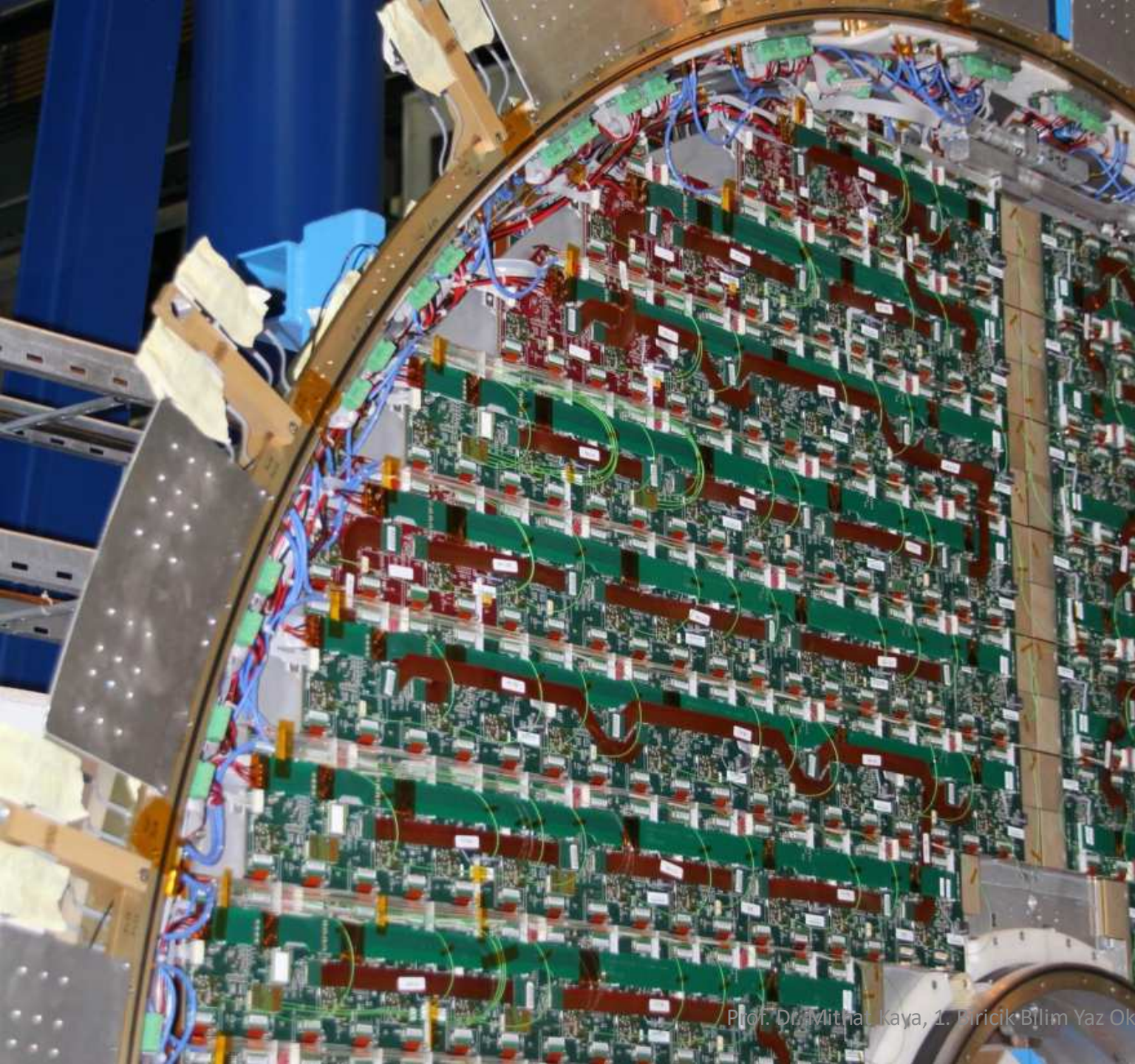


- Her biri son başlığın (Ecal-Endcap) önünde bulunan Ecal preshower dedektörleri silikon stripler içermektedirler ve iki katman olarak dizayn edilmiş.
- Higgs 'in en önemli kanallarından birisi olan $H \rightarrow \gamma \gamma$ iki yüksek enerjili foton bozunumu için Ecal dedektörleri kullanılmaktadır.
- Nötr pilyonlar, π^0 , birbirine yakın (küçük açılarda) iki düşük enerjili foton yayabilir ve bu endcap tarafından iki yüksek enerjili foton gibi algılanabilir.
- Bu gibi olayları ortadan kaldırmak için sonbaşlıkların önüne preshower dedektörleri yerleştirilmiştir.

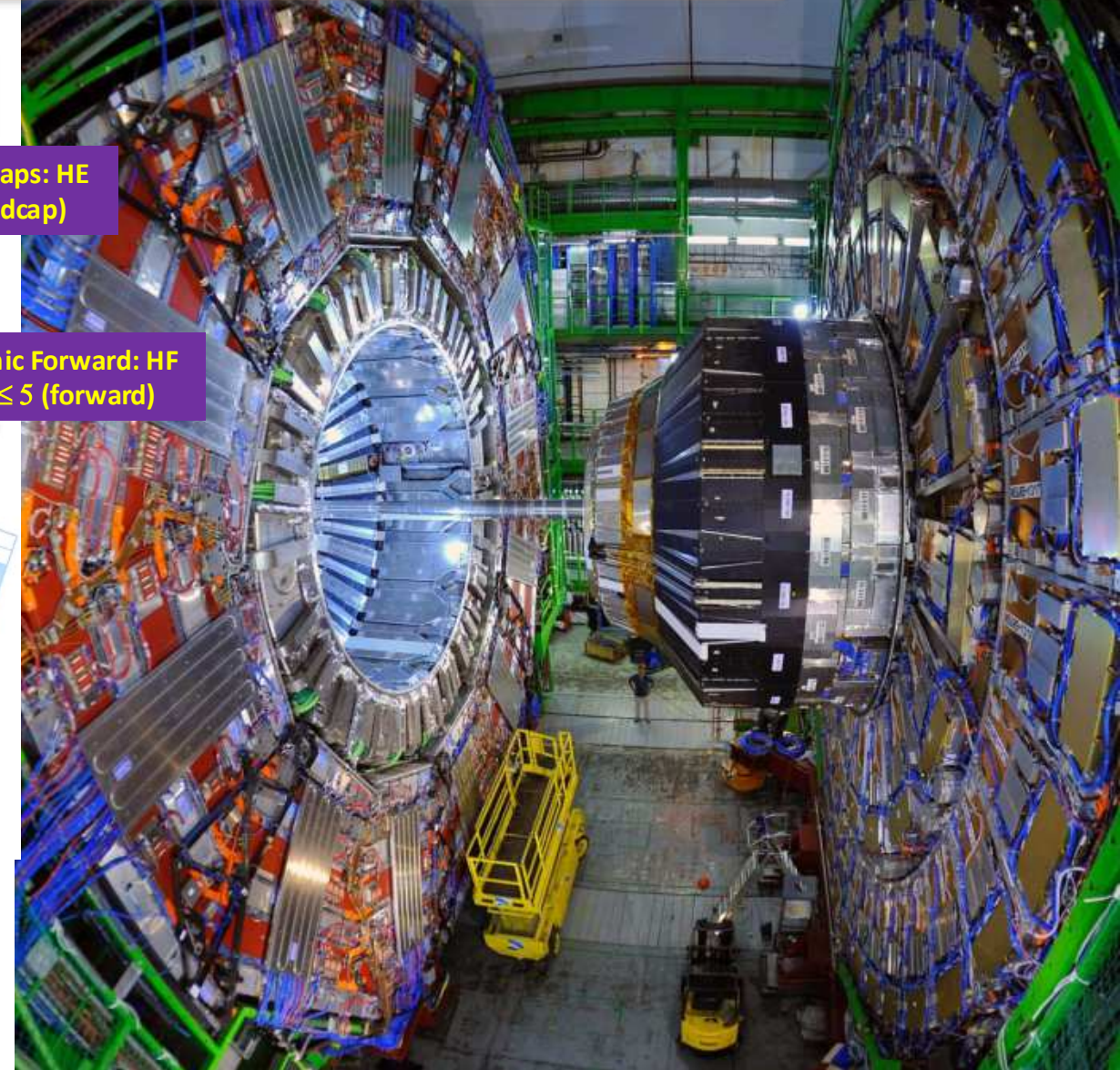
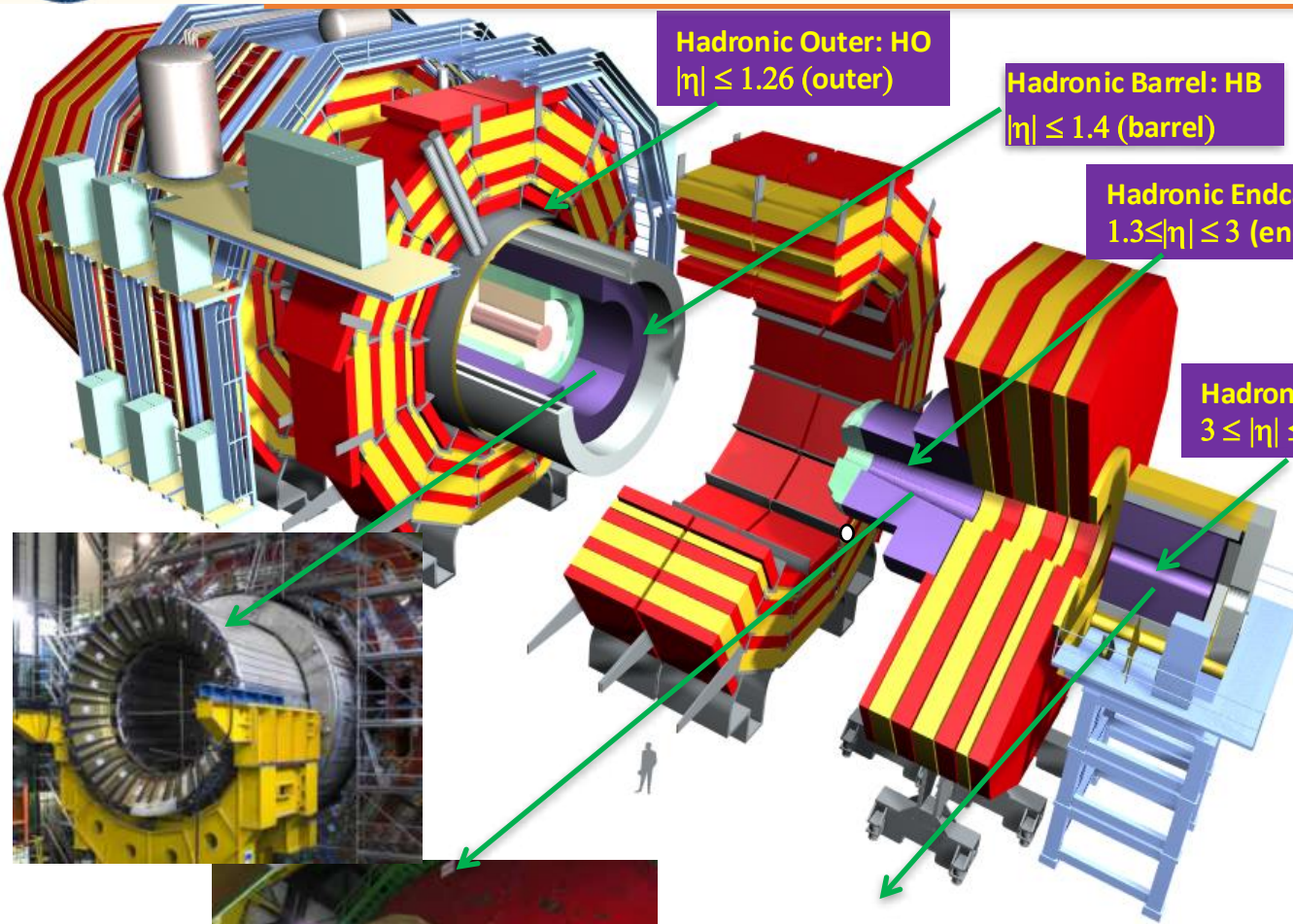


32 şerit, Her bir silikon sensor $61 \times 61 \text{ mm}^2$ aktif alana sahip olup 32 şerid'e bölünmüştür. Her silikonun nominal kalınlığı $310 \mu\text{m}$ kadardır





Hadron Kalorimetresi (HCAL)



- HCAL (Hadron Calorimeter), CMS dedektöründe başlıca **hadronların enerjisini ölçmek** için kullanılır.
- **Proton, nötron, pion ve kaon gibi kuarklardan oluşan parçacıklar HCAL'de güçlü etkileşim yaparak hadronik shower oluştururlar.**
- HCAL ayrıca dedektörün mümkün olduğunca “hermetik” olmasına katkı sağlar; böylece nötrino gibi görünmeyen parçacıklar **missing transverse momentum** üzerinden dolaylı olarak belirlenebilir.
- **CMS'nin barrel ve endcap HCAL bölümleri yoğun absorber ve plastik sintilatör tabakalarının ardışık diziliminden oluşur.**

• Temel görevi	Hadronların enerjisini ve konumunu ölçmek
• Başlıca parçacıklar	$p, n, \pi^\pm, K^\pm, K_L^0, \dots$
• Çalışma tipi	Sampling calorimeter
• Absorber malzemesi	Başlıca pirinç ve çelik
• Aktif malzeme	Plastik sintilatör tabakaları
• Sinyal	Sintilasyon ışığı
• Okuma sistemi	Wavelength-shifting fiber + APDs ve SiPM fotodedektörler
• Konumu	ECAL'in dışında; büyük kısmı solenoid mıknatısın içinde
• Önemli kullanım	Hadron/jet enerjisi ve missing transverse momentum ölçümü

Hadron $\rightarrow$ absorber $\rightarrow$ hadronik shower $\rightarrow$ sintilatör $\rightarrow$ ışık $\rightarrow$ PMT $\rightarrow E$

Örneğin yüksek enerjili bir pion, π^+

- HCAL'e geldiğinde absorber içindeki bir atom çekirdeğiyle **güçlü etkileşim** yapabilir.
- Bunun sonucunda çok sayıda ikincil parçacık oluşur: π , p , n , K , γ ,...
- Bu parçacıklar tekrar başka çekirdeklerle etkileşir ve yeni parçacıklar üretir.
- Sonuç: **Hadronik shower oluşur.**

- HCAL, ECAL'den önemli bir açıdan farklıdır. ECAL'de PbWO4 kristali hem parçacığı durdurur hem de ışık üretir.
- HCAL'de ise iki farklı malzeme sırayla kullanılır:
Absorber + Sintilatör + Absorber + Sintilatör + ...

Absorber tabakası

- Pirinç veya çelik gibi yoğun malzemeler kullanılır.
- Görevi: Hadronik Etkileşimi ve Shower'ı oluşturmak
- Hadron çekirdekle etkileşir: $h+A \rightarrow X$ ve çok sayıda ikincil parçacık üretilir.

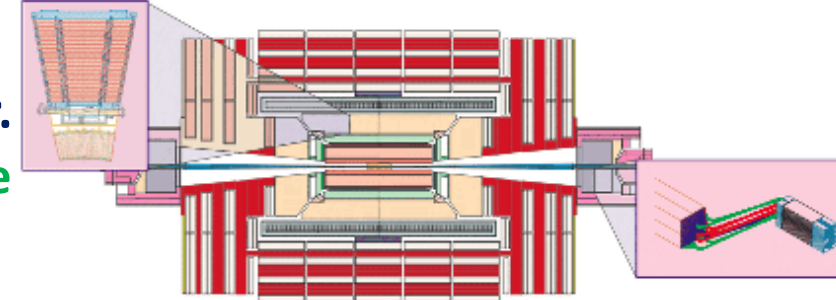
Sintilatör tabakası

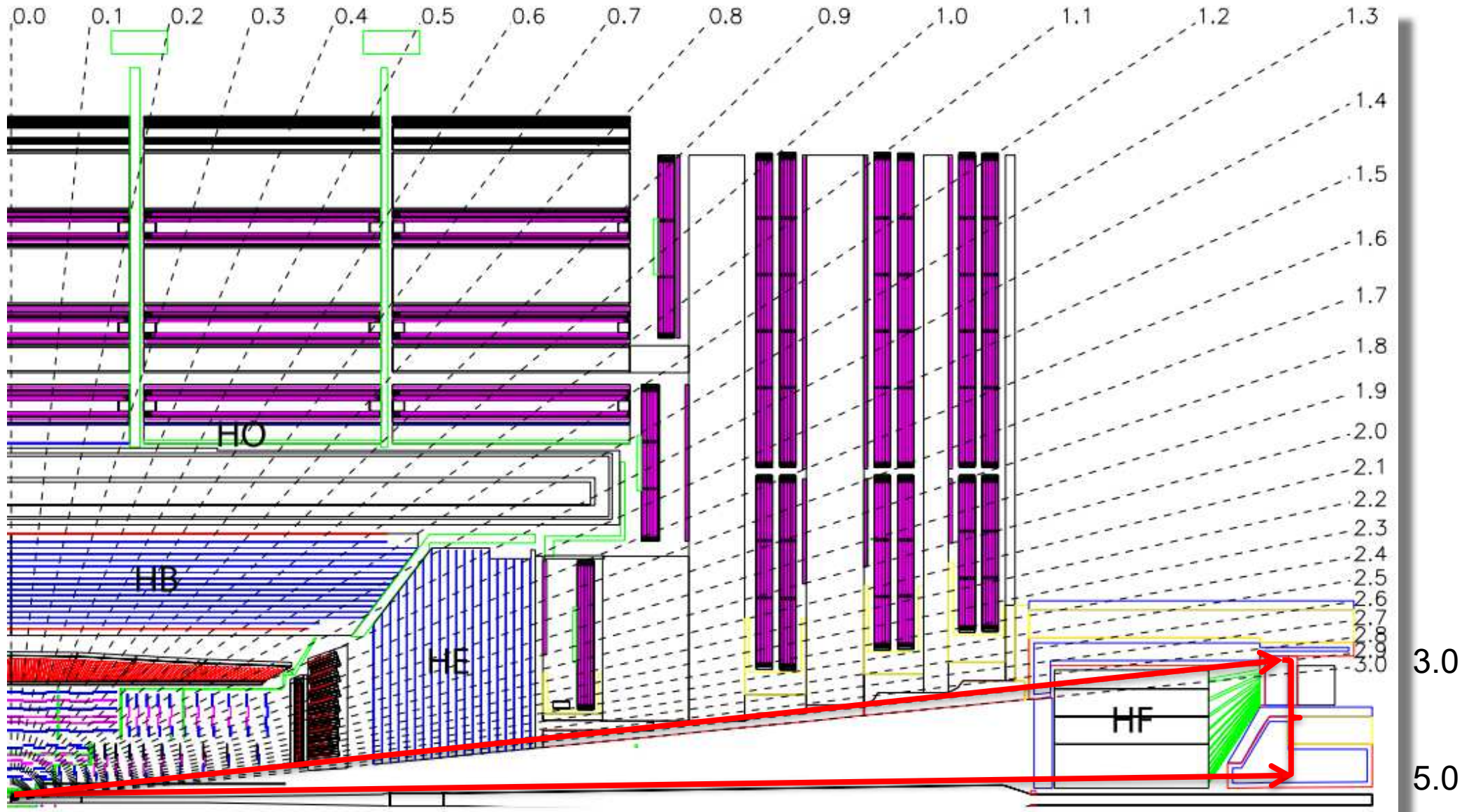
- Plastik sintilatör ise aktif dedektör malzemesidir.
- Shower parçacıkları sintilatörden geçerken enerji bırakır ve ışık oluşur:
- $E_{\text{deposited}} \rightarrow$ sintilasyon ışığı.
- Bu yüzden HCAL'e **sampling calorimeter** denir: shower'ın tamamını sürekli ölçmez; shower'ı farklı derinliklerdeki aktif katmanlarda “örnekler”.

- Sintilatörlerde oluşan ışık küçük optik fiberler tarafından toplanır.
- CMS'de **wavelength-shifting fibers (WLS)** kullanılır.
- mavi/mor sintilasyon ışıgı $\rightarrow$ WLS fiber $\rightarrow$ yeşil ışıık.
- Fiberler ışıgı fotodedektörlere taşır.
- Temel olarak: **Toplanan ışıık miktarı $\propto$ bırakılan enerji** olduğu için elektrik sinyalinden enerji tahmin edilir

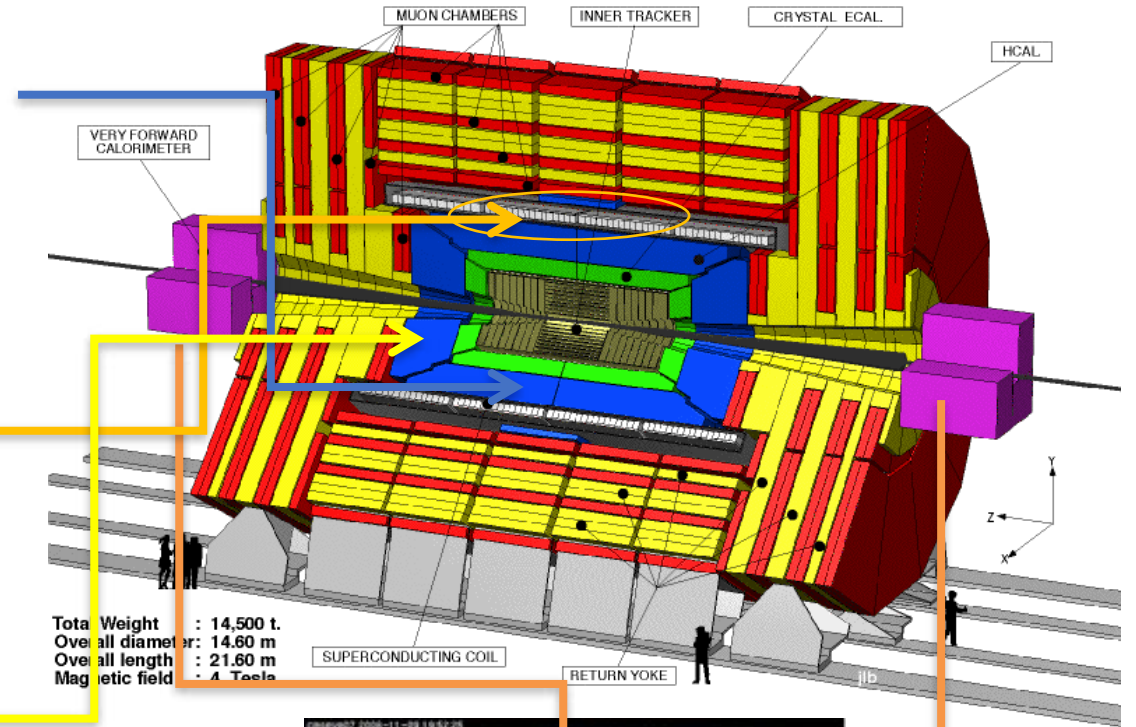
Bölüm	Açılımı	Görevi
HB	Hadron Barrel	Merkezi bölgede hadron enerjisini ölçer
HE	Hadron Endcap	Dedektörün ileri/geri endcap bölgelerini kapsar
HO	Hadron Outer	HB'den kaçan shower enerjisini yakalamaya yardımcı olur
HF	Hadron Forward	Beam hattına çok küçük açıyla çıkan ileri parçacıkları ölçer

- Hadron Kalorimetreleri (HCAL) quark ve gluon dan oluşan hadronların (proton, nötron, pion, kaon vb.) enerjilerini ölçmek için dizayn edilmiştir.
- Ayrıca nötrino gibi etkileşmeyen parçacıkları da kayıp enerji ölçümleri ile dolaylı yoldan ölçümlemlerini yapabilmektedir.
- Hadron Kalorimetreleri aynı zamanda elektron, foton ve müon gibi parçacıkların tanımlanmasını Ecal ve Müon sistemi ile iletişim kurarak yapar.
- Yapısal olarak HCAL dedektörleri **11 ayrı Bileşenden** oluşmaktadır. Bunların bir kısmı (**HB, HE**) Selonoid magnetin içerisinde bir kısmı (**HO, HF**) ise magnetin dışında bulunmaktadır.
- HCAL barrel olarak (HB and HO), endcap olarak (HE) ve ileri bölgede (HF) bölümleri bulunmaktadır.
 1. Pozitif ve Negatif barrel : HB+ ve HB-.
 2. Pozitif ve Negatif endcaps : HE+ ve HE-.
 3. Pozitif ve Negatif ileri kalorimetre: HF+ ve HF-.
 4. Beş daireli dış kabuk(Hadronic Outer-HO) : HO2-, HO1-, HO0, HO1+,and HO2+.



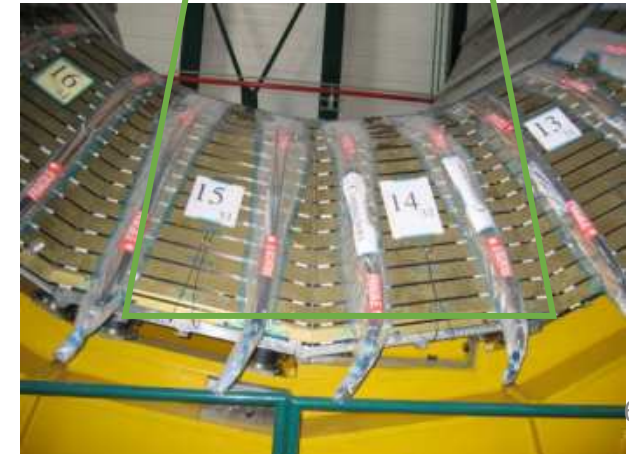
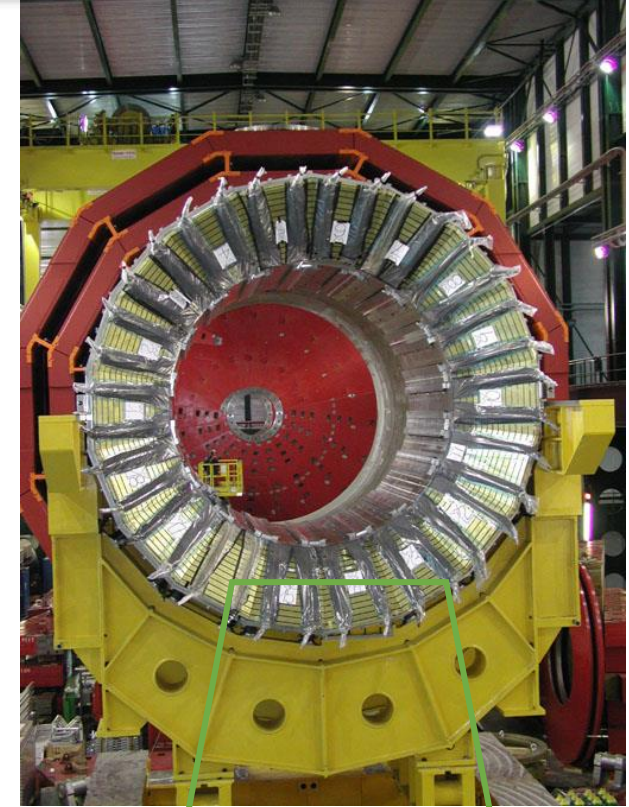
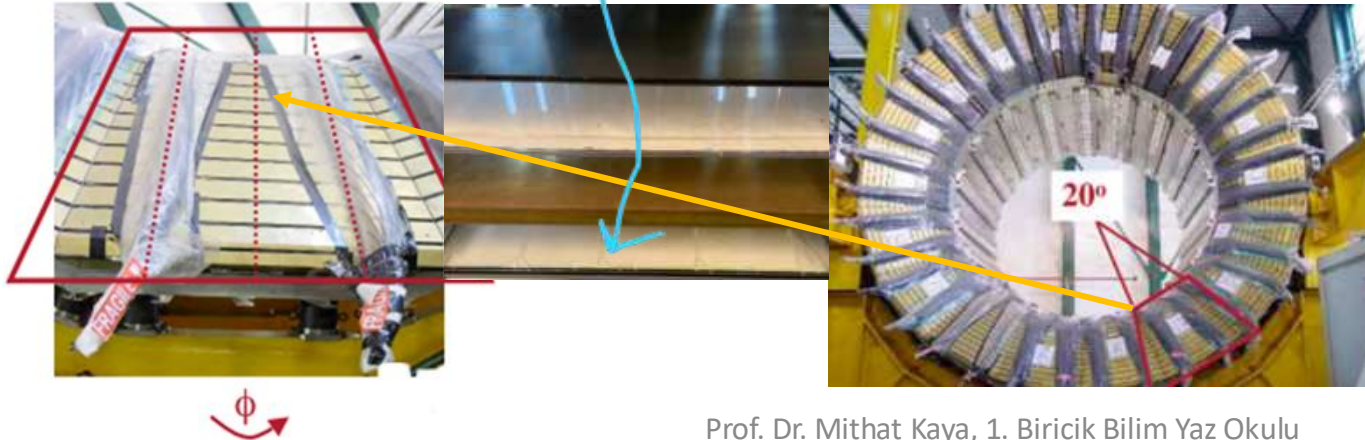


- 36 fıçı (barrel) “takoðu(wedges)”, her biri 26 ton ve magnetin içine yerleştirilmiştir
- HO(Hadronic Outer) dedektörlerinin birkaç katmanı magnetin dışına yerleştirilmiştir. Bunun nedeni ise HB dedektörlerinden sızabilecek enerjiyi ölçmek
- Aynı şekilde, 36 sonbaşıık takoðu (Endcap wedge), solenoid mıknatısın uçlarından çıkan parçacıkların enerjilerini ölçer
- İki tane ileri hadron kalorimetresi CMS dedektörünün her iki ucuna yerleştirilmiştir. Bunların amacı ise çarpışma bölgesinden çıkan sayısız parçacığı ışın hattına göre sığ açılarda toplamak.

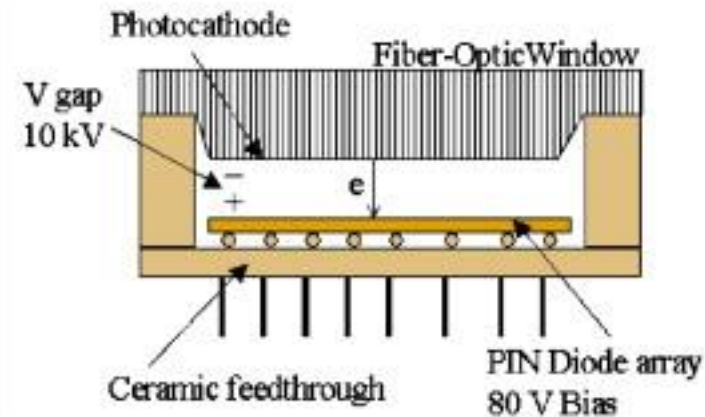
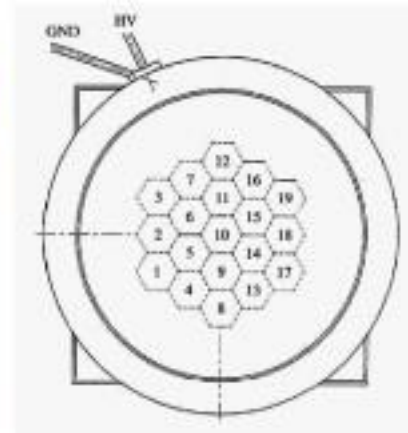
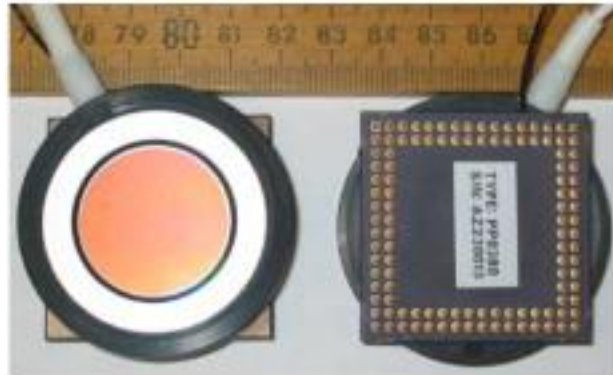


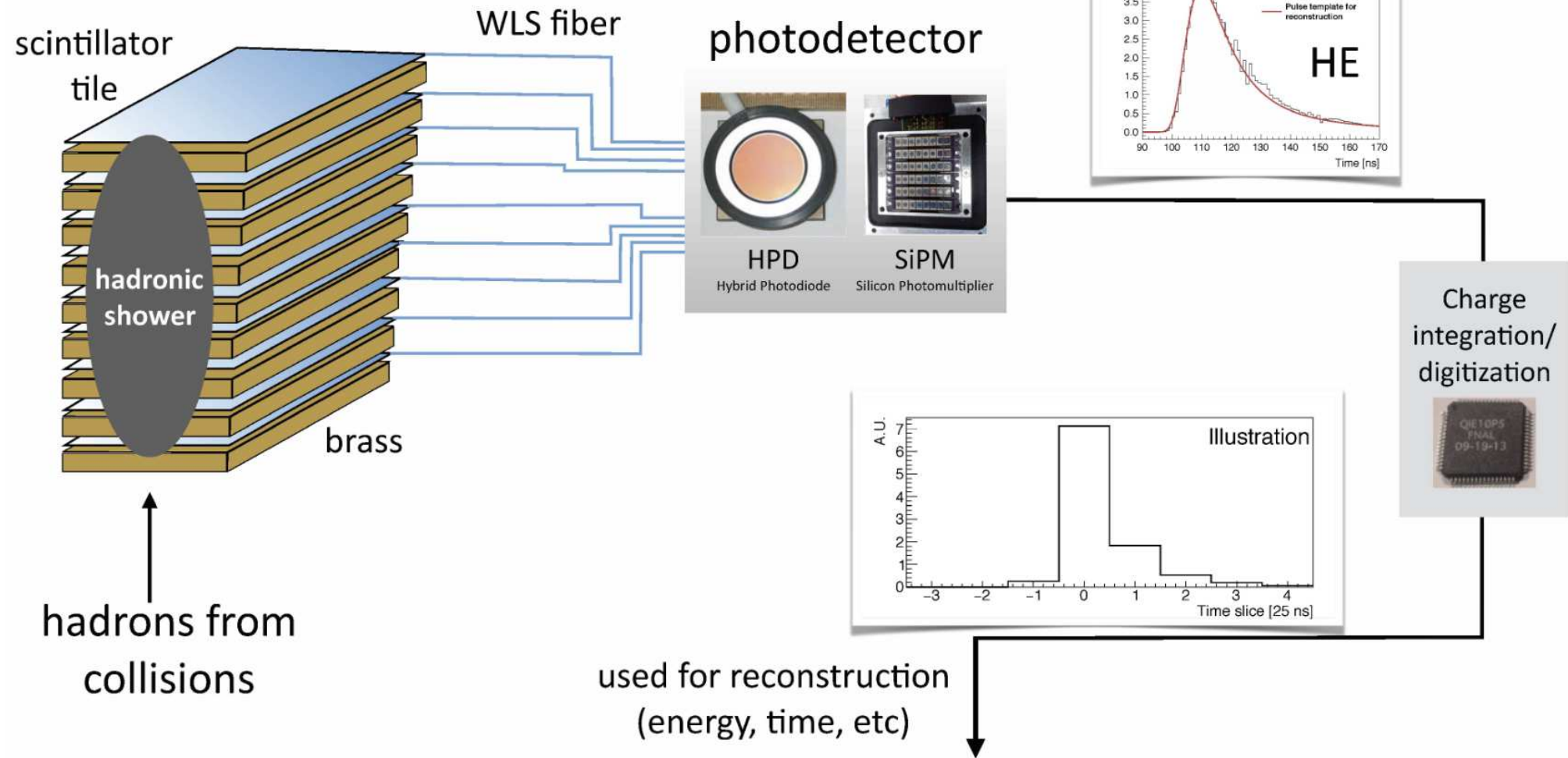
Hadronik Fıçı(Hadronic Barrel-HB)

- HB aktif bölge için sintilatör, pasif bölge için ise Brass kullanmaktır.
- İki yarım fıçıda (HB+, HB-), her biri 18 benzer 20 derecelik olan takozlar (wedge) bulunmaktadır. Her bir takoz 4 azimuthal açıya ($\Delta\phi=5^\circ$) bölünmüştür.
- Takozlar, ışın eksenine paralel yassı pirinç alaşımlı emici plakalardan oluşmuştur.
- İç ve dış emiciler sağlamlık açısından paslanmaz çelikten yapılmıştır.
- 17 aktif plastik sintilatör karoları çelik ve pirinç emici plakaların arasına yerleştirilmiştir.
- Tekli sintilatör plakaları dalga boyu öteleme (WS) fiberi ile donatılmıştır.



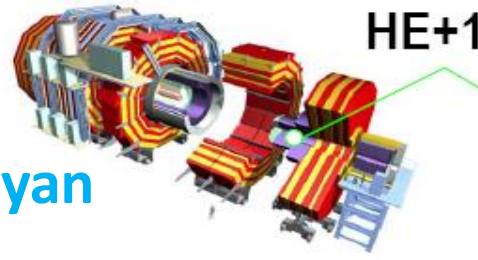
- HCAL readout sisteminde Hybrid Fotodedektörler (HPD) ve konvansiyonel Fototüpler kullanılmaktadır
- HB, HE ve HO için Sintilatörlerden elde edilen ışık önce plastik fiberlere ve sonrada HPD'lere gönderilir.
- HPD'lerin tepkisi doğrusaldır ve yüksek manyetik alanda çalışabilirler.
- HPD'ler 19 kanala sahiptir ve 10 kV potansiyel uygulanır.



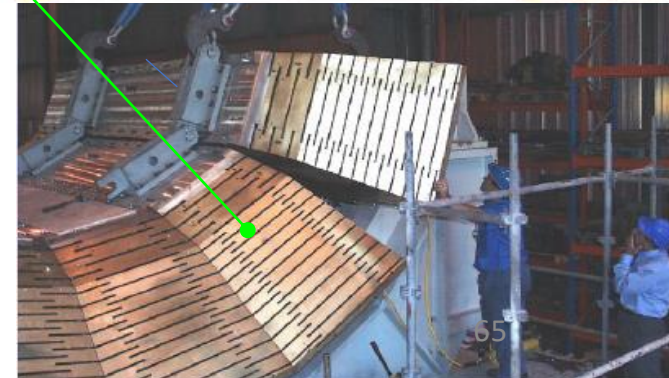
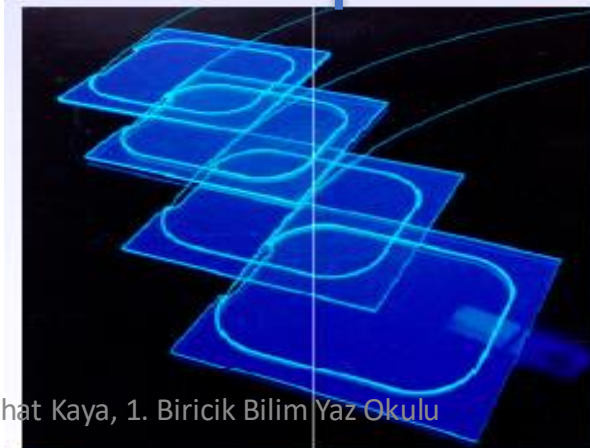


<https://www.mdpi.com/2571-712X/9/1/1>

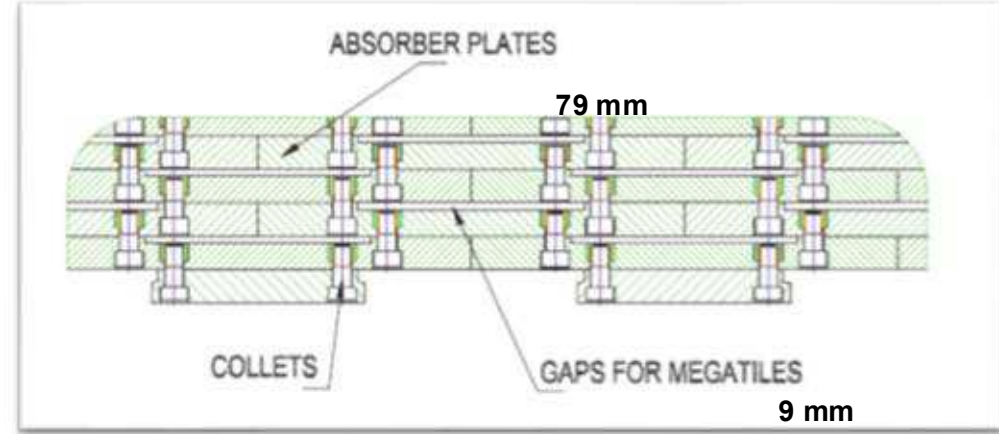
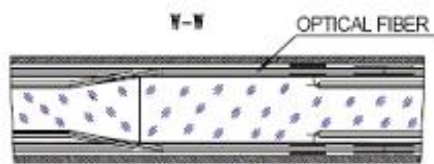
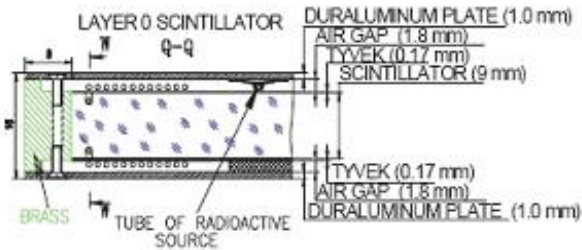
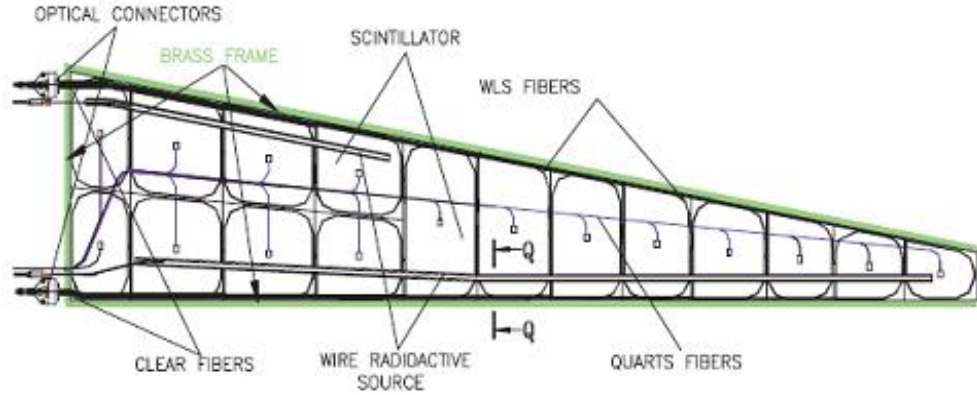
- 4 Teslalık Magnetin her iki ucuna yerleştirilmiştir.
- Emiciler (Absorbers) manyetik olmayan C26000 kartuş pirinçten (%70 Cu ve %30 Zn) yapılmıştır.
- Genel anlamda CMS detektörü, müonlar, elektronlar, fotonlar, hadron jetleri ve nötrinolar veya sonuçta ortaya çıkan egzotik parçacıklar içeren son durumlar ile çeşitli imzaları içeren çok çeşitli temel problemleri incelemek için tasarlanmıştır.
- HE bu parçacıkların % 34'ünü tanımlamak için kullanılmaktadır



18 wedges



Toplam 20916 Karo(tile) ve 1368 Büyükkaro (Megatile) kullanılmıştır.



- Karolardan yayılan ışık mavi-mor olup dalga boyu $\lambda = 410-425$ nm aralığındadır.
- Bu ışık dalga-kaydırma fiberleri ile $\lambda = 490$ nm yeşil ışığa yükseltiliyor.
- Bu ışık, şeffaf fiber dalga kılavuzları aracılığıyla Büyük karoların uçlarındaki konektörlere iletilir.
- Elde edilen ışık HPD ve fotoçoğaltıcılarla okuma elektronğine gönderilir



- 50 yıldan fazla Rus Askeri depolarında bulunan ve deniz donanmasında kullanılan piringç kapsüller HCAL'ın yapımında kullanılmak üzere eritilip tekrar şekillendirilmişlerdir.



Örneğin: π^+ ölçümleri için:

- Tracker'da track+HCAL'de hadronik shower görürüz.

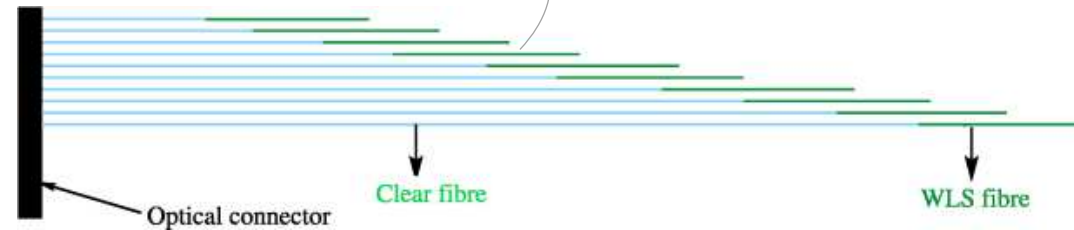
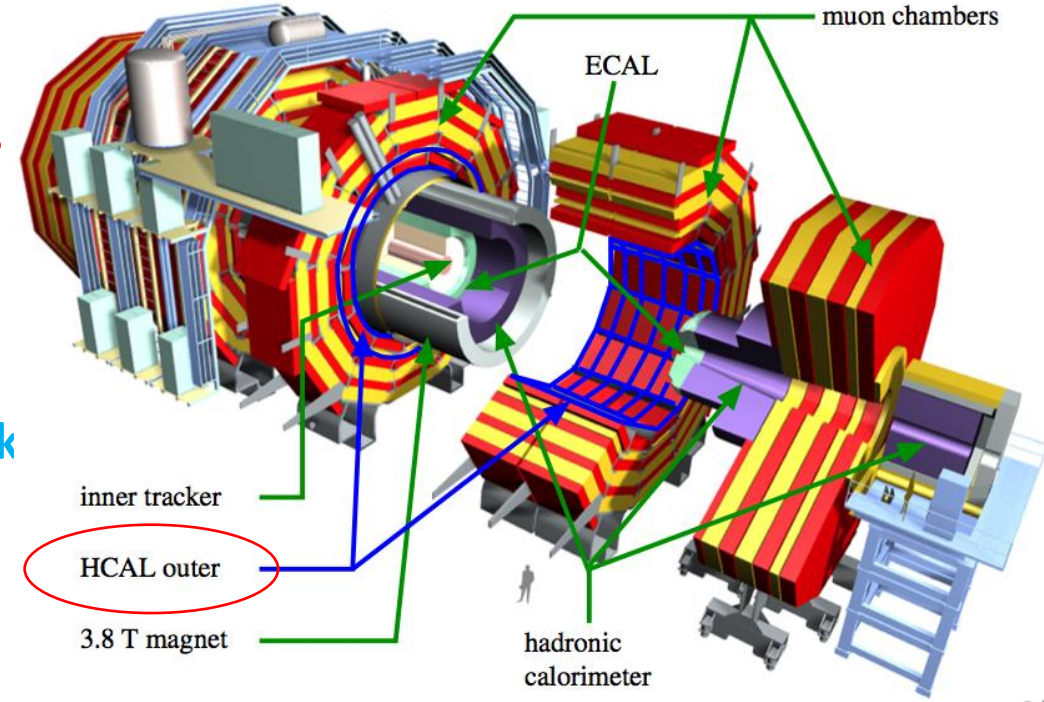
Nötron için ise:

- nötron elektriksel olarak nötr olduğundan tracker'da iz bırakmaz:
- Tracker da iz yok+HCAL'de hadronik shower var
- Bu yüzden **tracker + ECAL + HCAL** bilgilerinin birlikte kullanılması parçacık tanımlamada çok önemlidir.

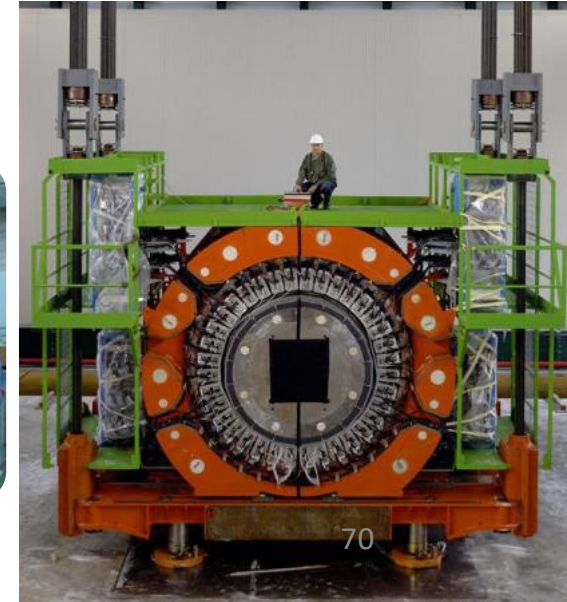
HCAL ve jetler: HCAL'in çok önemli görevlerinden biri de **jet enerjisi ölçümüdür.**

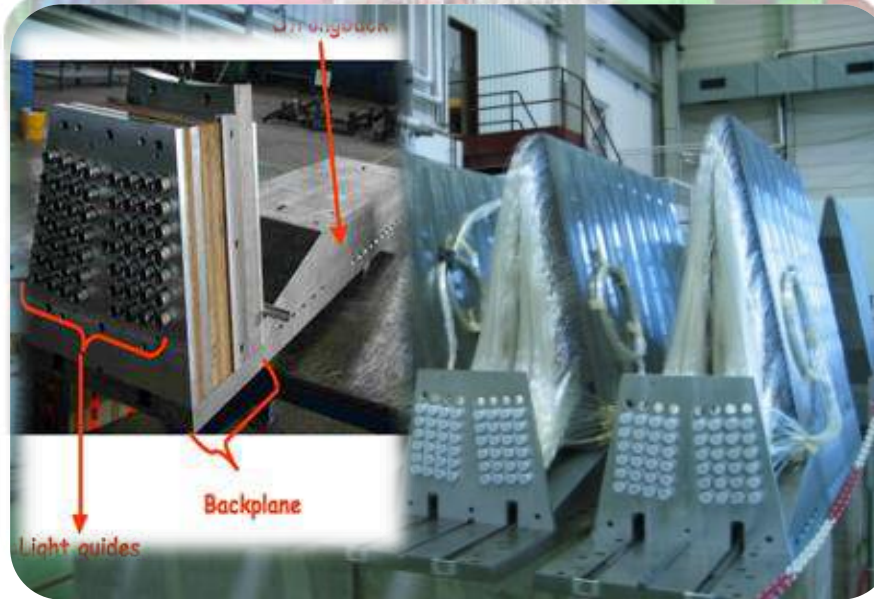
- **Bir kuark veya gluon dedektörde tek başına görülmez:**
- **$q/g \rightarrow \text{hadronization} \rightarrow \pi, K, p, n, \dots$ ve sonuçta: jet oluşur.**
- Jet içindeki hadronların önemli bir kısmının enerjisi HCAL tarafından ölçülür.
- HCAL CMS'de ki diğer dedektörler ile birlikte kullanılarak parçacık tanımlaması yapılır
 - Tracker + ECAL + HCAL + Muon sistemi bilgileri birleştirilir. Bu CMS'nin **Particle Flow** yaklaşımının temelidir.

- Magnet içerisindeki HCAL yeterince kalın olmadığından dolayı yüksek enerjili duşların hepsini tutması mümkün olmamaktadır.
- Bunun için magnet dışına ekstra sintilatör katmanları yerleştirilmiştir (HOB).
- 1 cm kalınlığında Bicron BC408 sintilatör karoları kullanılmıştır
- HO sintilatörleri 4 çeyreğe bölünmüştür ve her bir çeyrekteki ışık dalga boyu oteleme (WLS-wave length shifter) fiberleri ile okunur.



- İki tane ileri kalorimetresi (HF+, HF-) CMS'in her iki ucuna, etkileşme noktasından $\pm 11\text{m}$ uzaklığa yerleştirilmiştir.
- $3.0 < |\eta| < 5.0$ pseudorapidity bölgesini kapsamaktadır.
- Bu bölgedeki yüksek LHC radyasyon seviyelerine direnmek için, radyasyona karşı sert bileşenlerle inşa edilmişlerdir: çok yüksek dozlarda (Grad düzeyinde) hayatta kalması için uzunlamasına kuvars fiberli çelik emiciler kullanılmıştır.
- HF, kuvars fiberlerindeki duş parçacıkları tarafından yayılan ve aynı fiberden fotoçoğaltıcı tüplere (PMT) taşınan Çerenkov ışığını algılayarak, hadronik jetleri birkaç TeV enerjisine kadar ölçebilir.





HF Celik bloklar içine fiber yerleştirilmesi





HF+ ve HF- için 216 Baseboard ve 1728 adet ise 4 Anotlu Fotoçoğaltıcılar (Photo Multiplier Tubes-PMT) kullanılmıştır

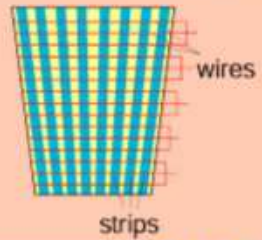


Cathode Strip Chambers & Resistive Plate Chambers

Drift Tubes & Resistive Plate Chambers

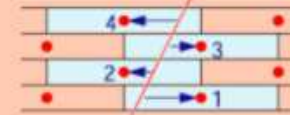
Wires =
anodes

Cathode Strip Chamber



Strips =
cathodes

Drift Tubes



Endcap

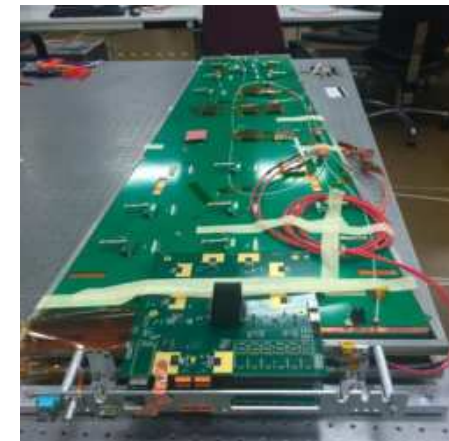
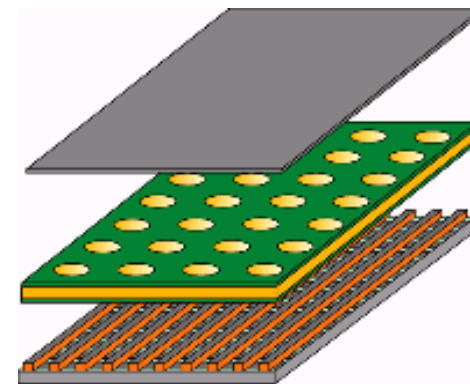
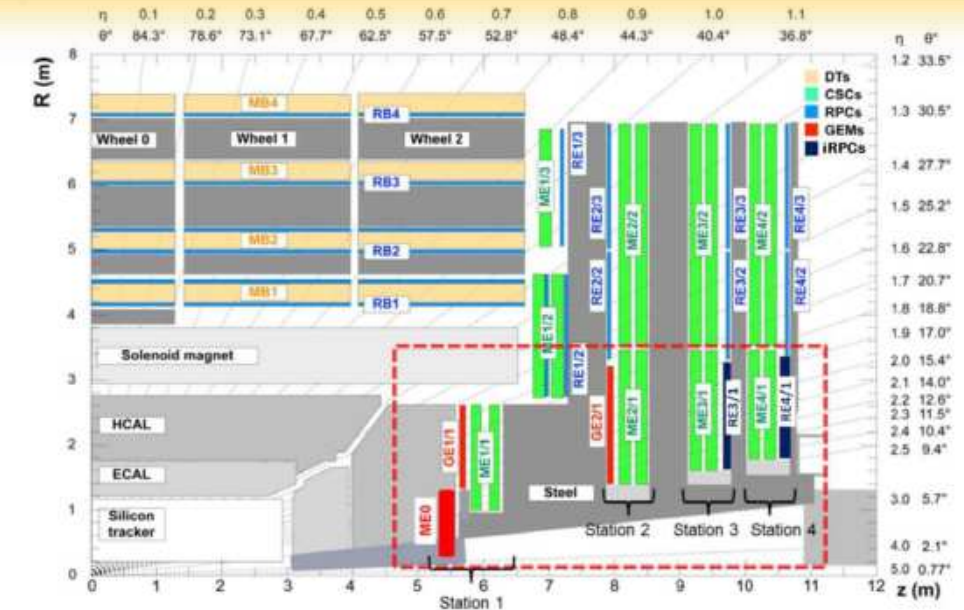
Barrel



Resistive Plate
Chambers

Tracker'da track → ECAL/HCAL'de az enerji kaybı → Muon sisteminde track

- CMS Muon Sistemi, kalorimetreleri geçebilen muonların dış dedektör katmanlarında oluşturduğu iyonizasyon sinyallerini ölçerek muonların konumunu, izini ve momentumunu belirler;
- DT, CSC, RPC ve GEM teknolojilerini kullanır.



Ref:<https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.05.127>

http://www.lnf.infn.it/seminars/talks/murtas_28_11_02.pdf

- **DT (Drift Tubes):** Barrel bölgesinde kullanılır. Muon gazı iyonize eder; elektronların tele ulaşma süresinden muonun geçtiği konum hesaplanır.
- **CSC (Cathode Strip Chambers):** Endcap bölgelerinde, parçacık yoğunluğunun daha yüksek olduğu yerlerde kullanılır. Hassas konum ve zaman bilgisi sağlar.
- **RPC (Resistive Plate Chambers):** Çok hızlıdır; yaklaşık ns ölçeğinde zaman bilgisi sağlayarak özellikle **muon trigger** sistemine yardım eder.
- **GEM (Gas Electron Multiplier):** Özellikle ileri bölgelerde yüksek parçacık yoğunluğunda çalışmak için kullanılır ve muon izlerinin hassas ölçümünü destekler.



The last installation of Gas Electron Multiplier (GEM) detectors on the second CMS endcap took place in September. (Image: CERN)

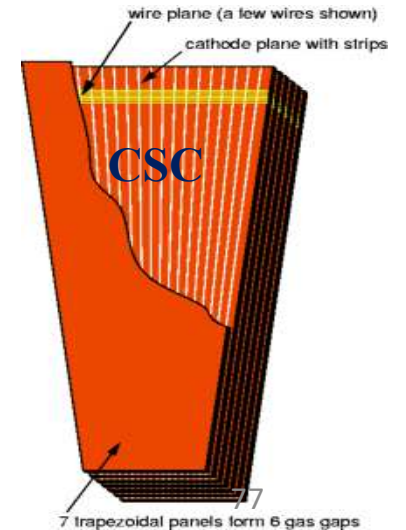
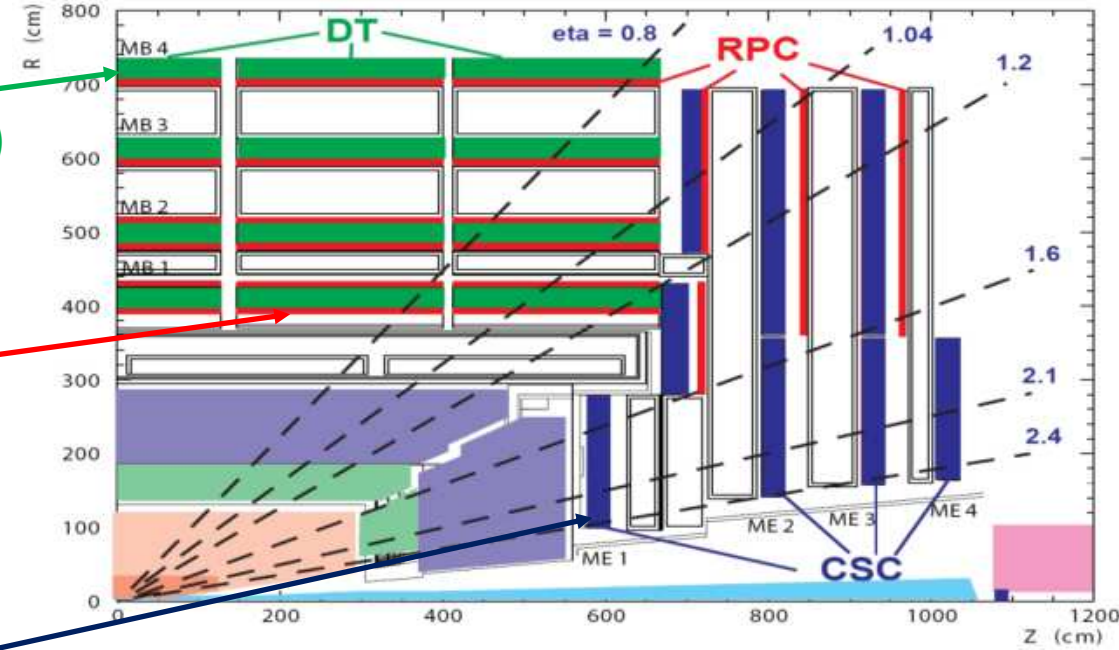


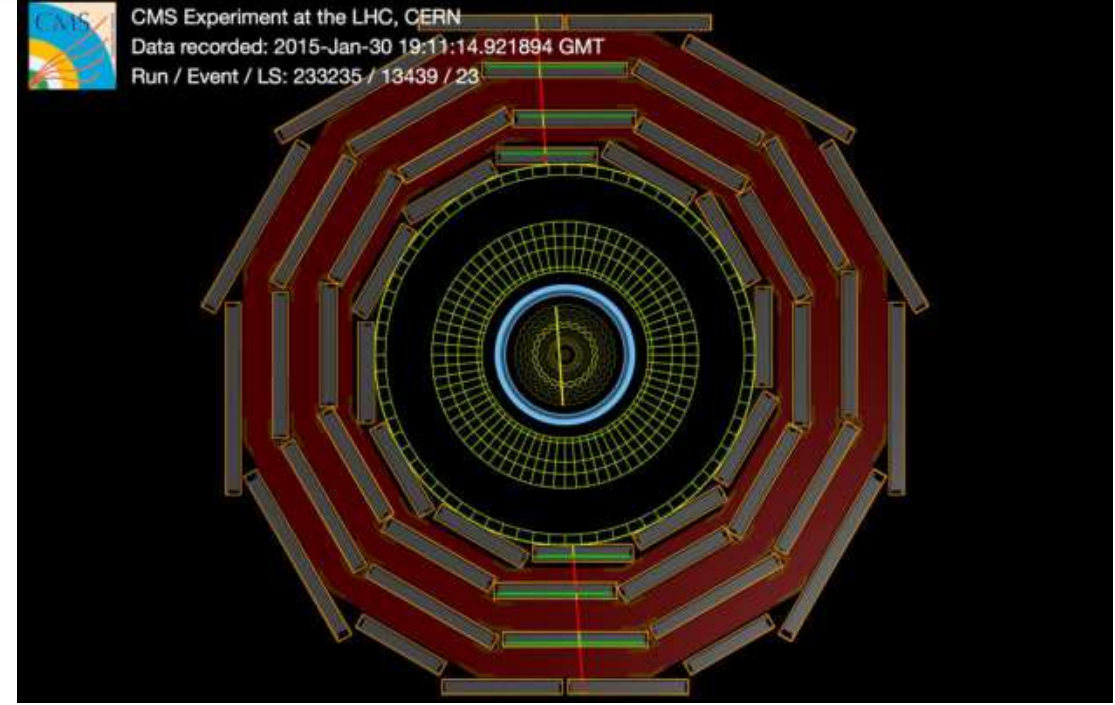
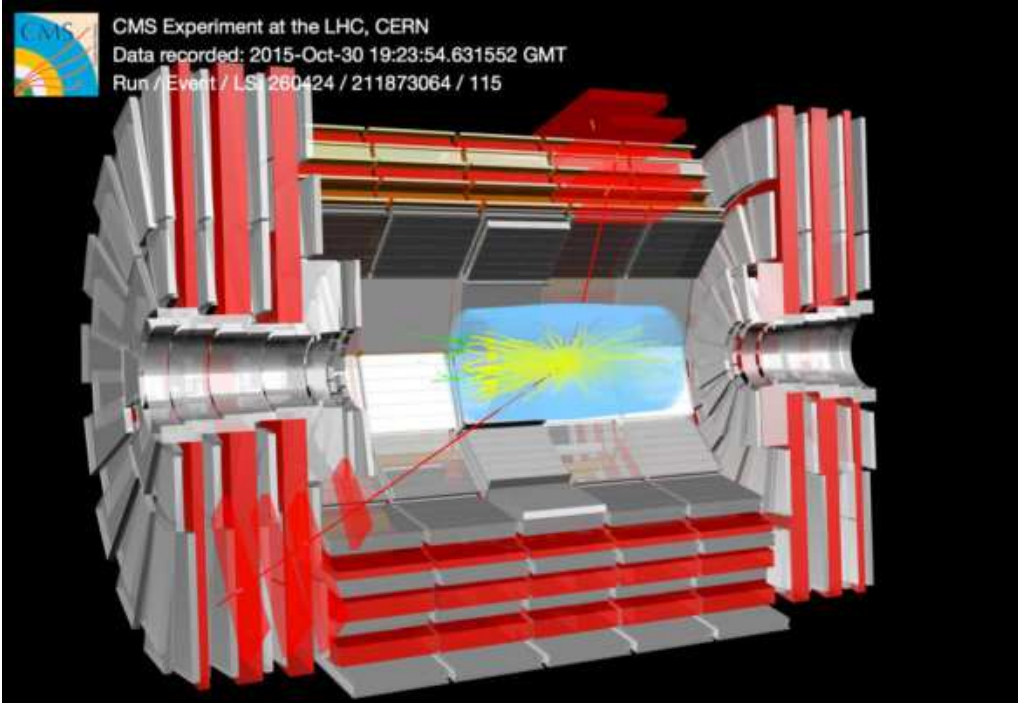
Assembly of the GEM detectors at CERN in clean room (Image: CERN)

CMS dedektörü özellikle müon ölçümü için optimize edilmiştir.

Müon dedektör sisteminde:

- **Sürüklenme Tüpü(Drift Tube-DT) Odaları (barrel bölgesinde yer alır)**
 - 250 Oda (Chambers), 180k Kanal
 - İyi müon çözünürlüğü ($r-\phi \sim 100\mu\text{m}$, $Z \sim 150\mu\text{m}$, angle $\sim 1\text{mrad}$)
 - Yavaş tepki (140 ns'e kadar)
 - Düşük oranlı bölgede kullanım için ekonomik
- **Dirençli Plaka Odaları (Resistive Plate Chambers-RPC) (Barrel ve Endcap bölgesinde yer alır)**
 - 1020 Oda (Chambers)
 - Müon uzaysal çözünürlüğü: $r-\phi \sim 1.5\text{ cm}$
 - Hızlı tepki, Zaman çözünürlüğü $< 3\text{ns}$
 - Birinci Seviye tetikleyiciye adanmıştır
- **Katot şerit odaları (Cathode Strip Chambers-CSC) Sonbaşlık(Endcap) bölgesinde yer alır.(For tracking and Triggering)**
 - 468 Oda(Chambers), 450k Kanal
 - Her bir oda için 1 tel katman ve 1 katot katman (şerit-strips)
 - İyi müon uzaysal çözünürlüğü ($r-\phi \sim 75-150\mu\text{m}$, $< 2\text{mm}$ at Trigger level)
 - Tel aralıkları yakın (uzay çözünürlüğü $100\mu\text{m}$)
 - Hızlı tepki, Zaman çözünürlüğü 4 ns
 - Yüksek Oranlar için iyi



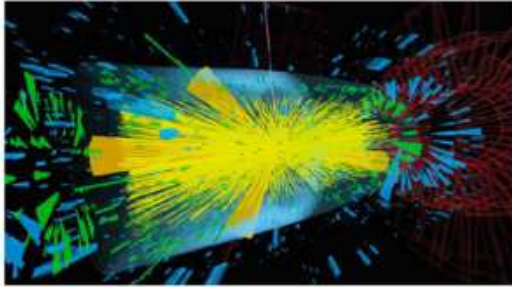


- Bu görüntü, 2015 yılında toplanan proton çarpışma verilerinde CMS detektörü tarafından şimdiye kadar gözlemlenen en büyük kütleli müon çiftine sahip bir çarpışma olayını göstermektedir.
- Di-muon sisteminin kütlesi 2,4 TeV'dir.
- 0.7 TeV'lik enine momentuma sahip bir müon, merkez bölgedeki Drift Tüplerinden geçerken, 1.0 TeV'lik enine momentumlu ikinci müon, ön bölgedeki Katot Şerit Odalarına çarpıyor.
- Her iki müon da yüksek enine momentum müon seçim kriterlerini karşılıyor.
- Dedektör testi, Kozmik müon,
 - Atmosferden gelen müonun Vertex dedektörlerinde ve müon dedektörlerinde görülen izleri

CMS Tetikleme(Trigger) Sistemi

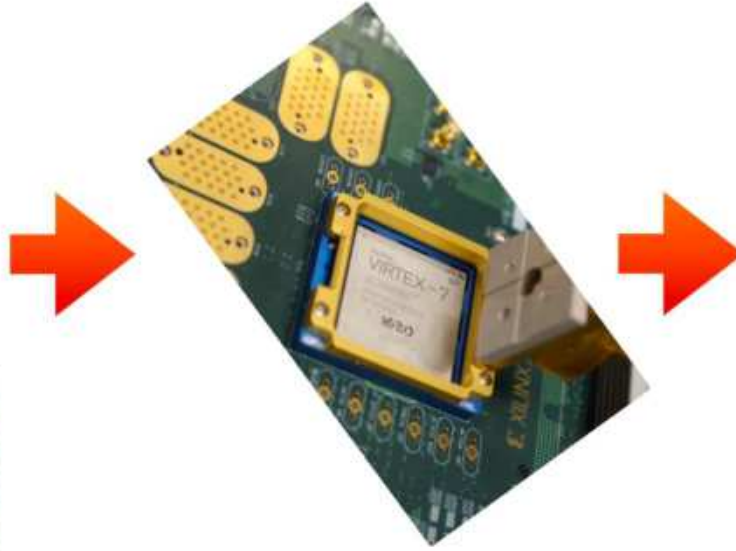
- CMS te 2 Seviyeli Tetikleme Sistemi Kullanılmaktadır. Birinci Seviye L1 (Level 1) ve
- İkinci Seviye L2 Yüksek Seviyeli Tetikleme (HLT-High Level Trigger) Sistemi

40M events/s



% 0.25

100K events/s



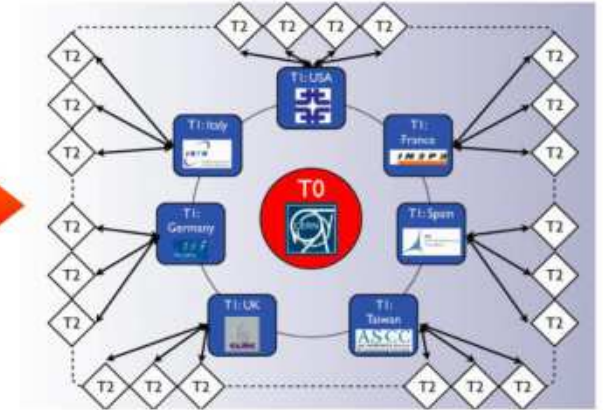
Level-1 Trigger

% 0.0025

1K events/s



High-Level Trigger

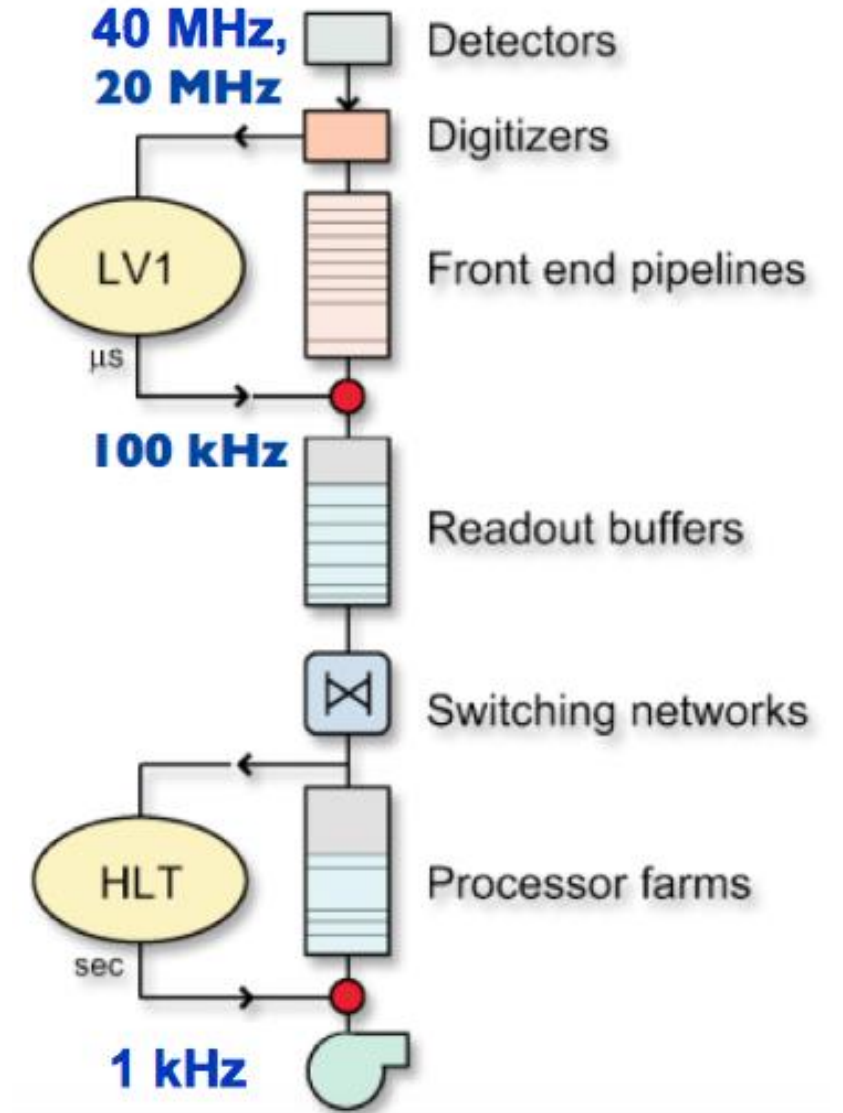


Offline analysis
at Tier-0
1 MB/event

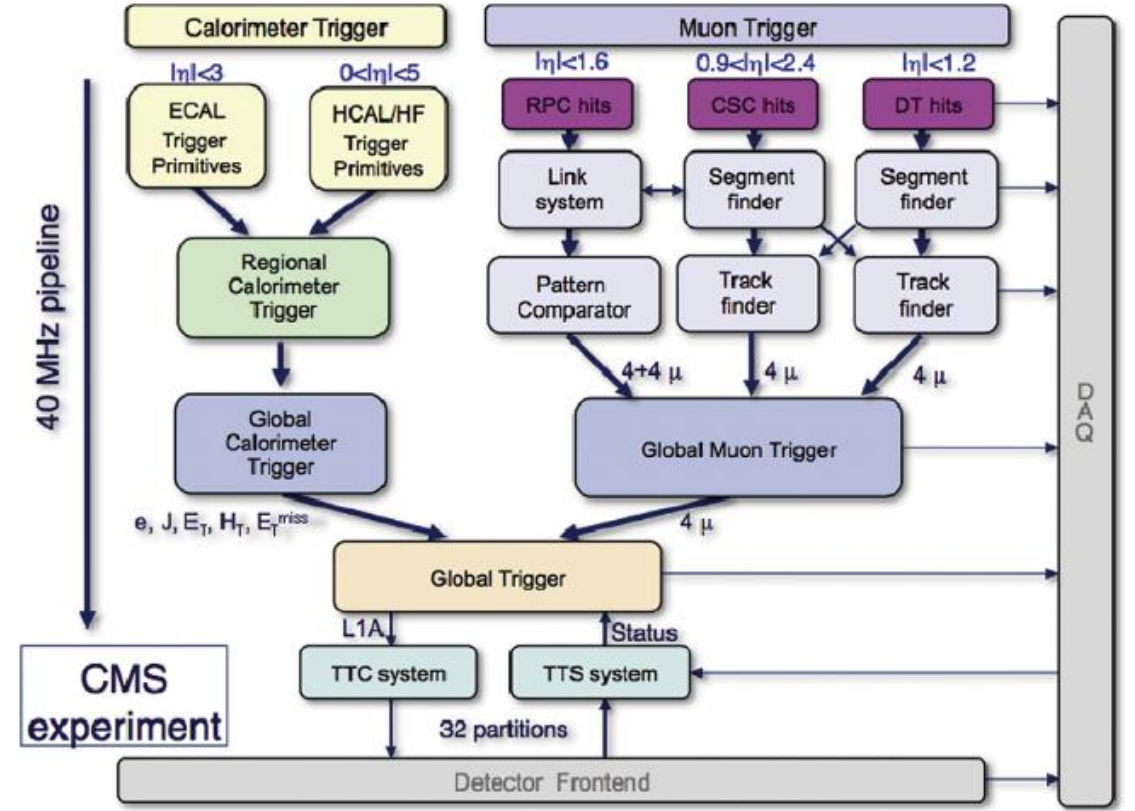
- Dedektörlerden Alınan Olayların (event) %99'undan fazlası geri çevrilmektedir, yani seçme kriterlerini geçmemektedir.
- Olay seçimi ve Karar aşaması L1 için yaklaşık 4 μ s HLT için ise 300 milisaniye sürmektedir.
- Bununun için 30000 CPU lu bilgisayarlar ağı kullanılmaktadır.
- Alınan verilerin % 99.9975 'i atılmasına rağmen gerçek fizik yapmak için gerekli veriler tutulmaktadır.

CMS İki Seviyeli Tetikleyiciye sahip(Level 1-Level 2)

- **L1 Tetikleyicisi (Level 1 Trigger)**
 - Elektronik Tabanlıdır
 - Her demet geçişi için Olay Oranını 20-40 MHz den 100 kHz'e indirir
- **Yüksek Seviyeli Tetikleyicisi (High Level Trigger)**
 - Yazılım Tabanlıdır. Çok geniş bir bilgisayar çiftliğine sahiptir(Large Computer farm)
 - L1 kararları dedektörden geçtikten sonra HLT Tetikleyicide inşa (Full Reconstruction) edilerek kalıcı depolama sistemine yazılır.
 - Olay oranı ~1kHz'e iner

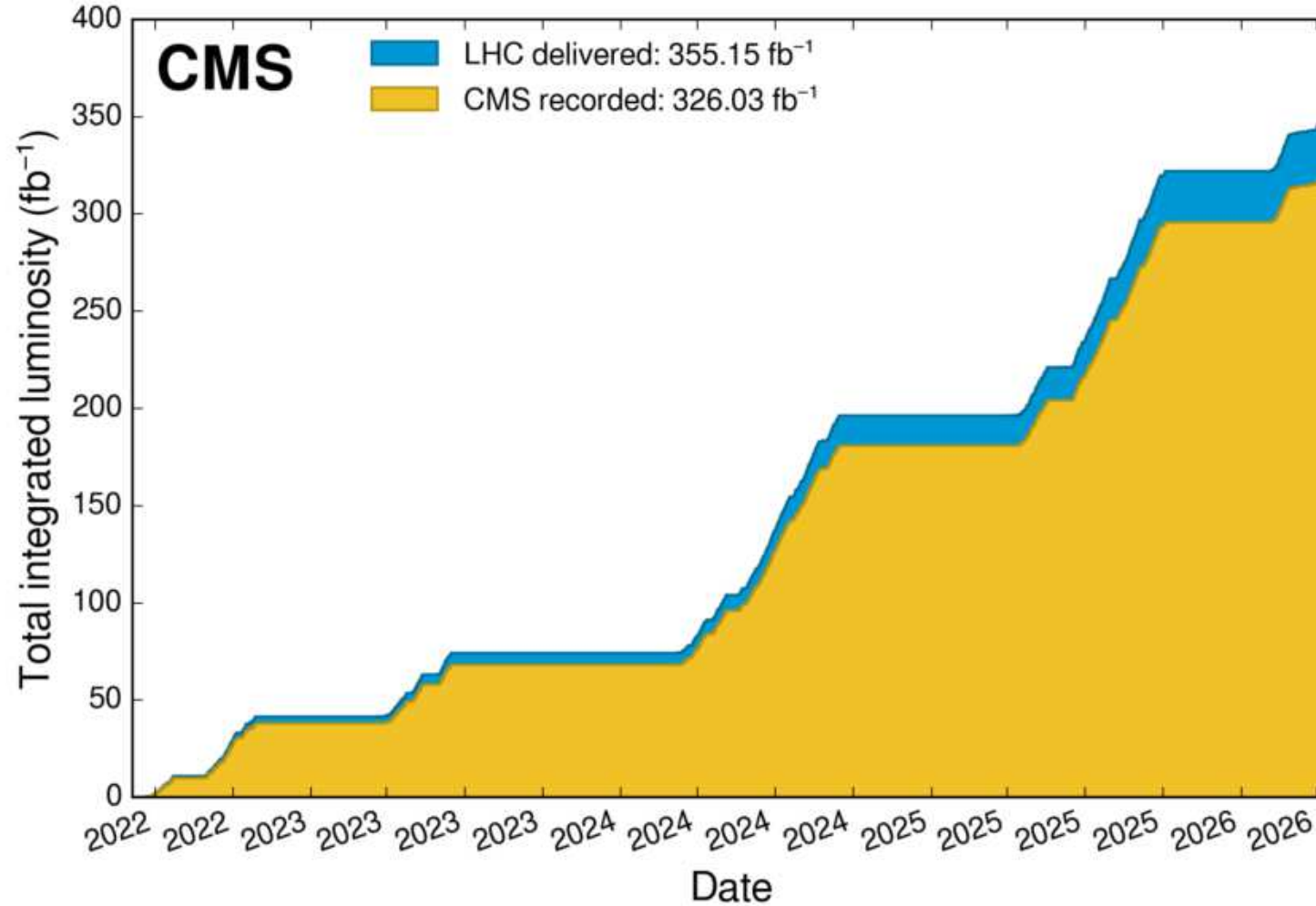


- L1 Kararları için CMS üç müon Dedektör Sistemini ve kalorimetre sistemini kullanmaktadır
- **Kalorimetre Tetikleme Objeleri**
 - Elektromanyetik Kalorimetre (ECAL), (5x5 Ecal Kristal)
 - Hadronik Kalorimetre (HCAL Tower)
 - İleri hadronik Kalorimetre (HF Tower)
- **Müon Tetikleme Objeleri ise**
 - Drift Tubes (DTs),
 - Katot şerit Odaları (CSCs)
 - Dirençli Plaka Odaları (RPCs)



Kalorimetrelere gelen datalar Bölgesel Kalorimetre Tetikleyicide toplanır daha sonrada Global Tetikleyiciye gönderilir. Müon dedektörlerinden gelen tetikleme kararları ise Global Müon Tetikleyicisinde toplanır Ve en iyi 4 müon adayını Global Tetikleyiciye gönderir. **CMS Silikon tracker'lar henüz L1 için kullanılmamaktadır.**

Total integrated luminosity over Run 3



CMS Dedektörünün performansı ve CMS kolaborasyonunun başarılı ve öz verili çalışmasından dolayı bu kadar veri toplanmıştır.

Show all

Total

Exotica

Standard Model

Supersymmetry

Higgs

Top

Heavy Ions

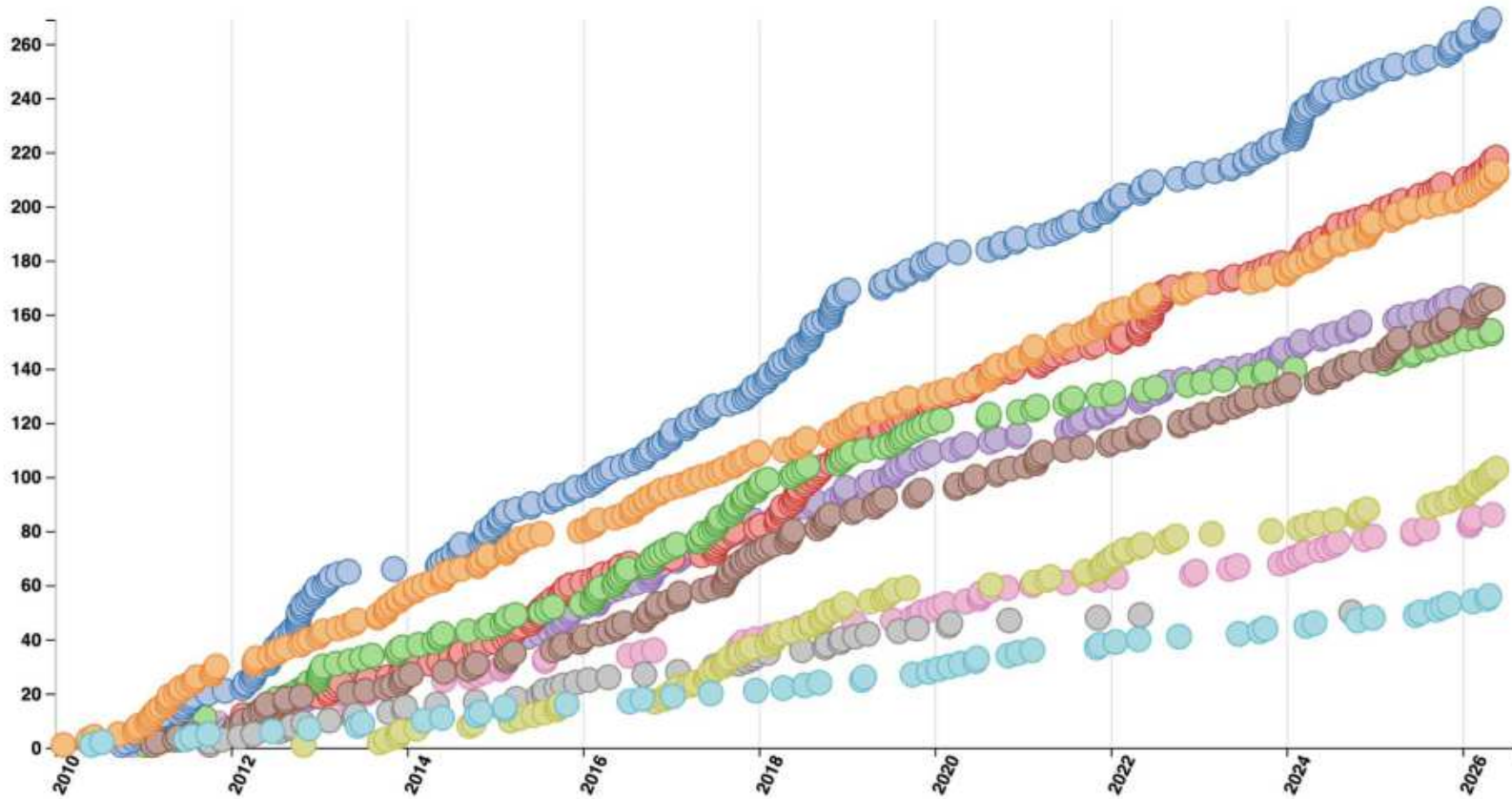
B and Quarkonia

Forward and Soft QCD

Beyond 2 Generations

Detector Performance

1482 collider data papers submitted as of



Farklı Fizik Çalışmalarına göre Makale dağılımını yandaki grafikten görebilirsiniz:





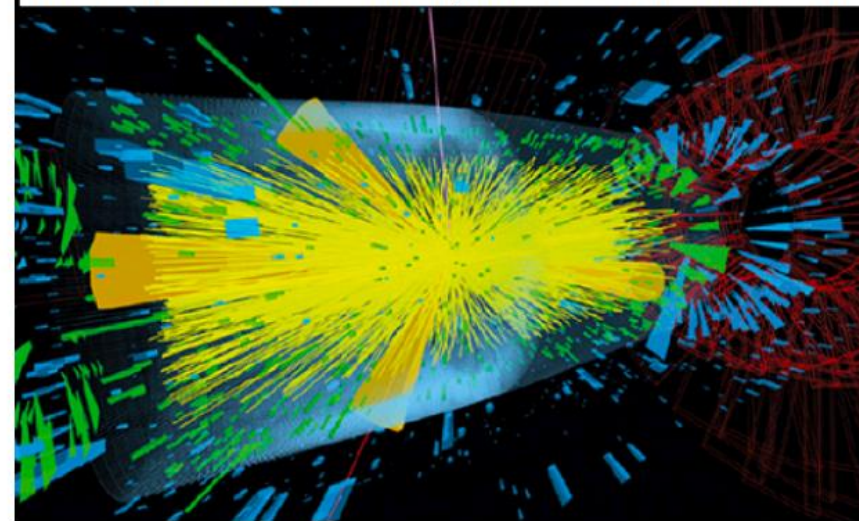
- **Mevcut CMS dedektörü**, demet geçişi (bunch crossing) başına yaklaşık **25–60 proton-proton çarpışmasının (pile-up)** gerçekleştiği ve Toplam tasarım ışınlanması (Integrated Luminosity): **500 fb⁻¹**e kadar olacak şekilde tasarlanmıştır.
- **Run 1 (2010–2012): $\approx 25 \text{ fb}^{-1}$** , **Run 2 (2015–2018): $\approx 140 \text{ fb}^{-1}$** , **Run 3 (2022–2026): $\approx 350\text{--}360 \text{ fb}^{-1}$** , Run(1-3) sonunda yaklaşık **520 fb⁻¹** Veri toplanmış olacaktır.
- **HL-LHC de ise $\mathcal{L}_{int} \sim 3000 \text{ fb}^{-1}$ kadar yani Run1-Run3'ün yaklaşık 6 katı kadar veri toplanması beklenmektedir**
- **Nominal $5\text{E}34 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ luminosity → 140 Çarpışma (Herbir demet geçişinde-bunch crossing-25 ns)**
- **“Ultimate” $7.5\text{E}34 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ luminosity → 200 Çarpışma → Run2 den 3-4 kat daha fazla (Run2 40-60 pileup)**

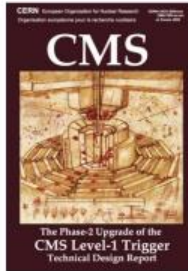
HL-LHC: O(140) p-p collisions in one bunch crossing

140 Pileup için Simüle edilmiş olay Durumu (Kırmızı noktalar Vertex(102), yeşil çizgiler Düşük Momentumlu (Soft) Parçacıklar)

O(6cm)

HL-LHC: A lot of activity in the CMS detector

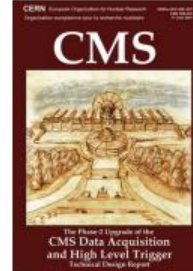




L1-Trigger

<https://cds.cern.ch/record/2714892>

- Tracks in L1-Trigger at 40 MHz
- Particle Flow selection
- 750 kHz L1 output
- 40 MHz data scouting



DAQ & High-Level Trigger

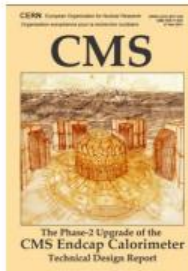
<https://cds.cern.ch/record/2759072>

- Full optical readout
- Heterogenous architecture
- 60 TB/s event network
- 7.5 kHz HLT output

Barrel Calorimeters

<https://cds.cern.ch/record/2283187>

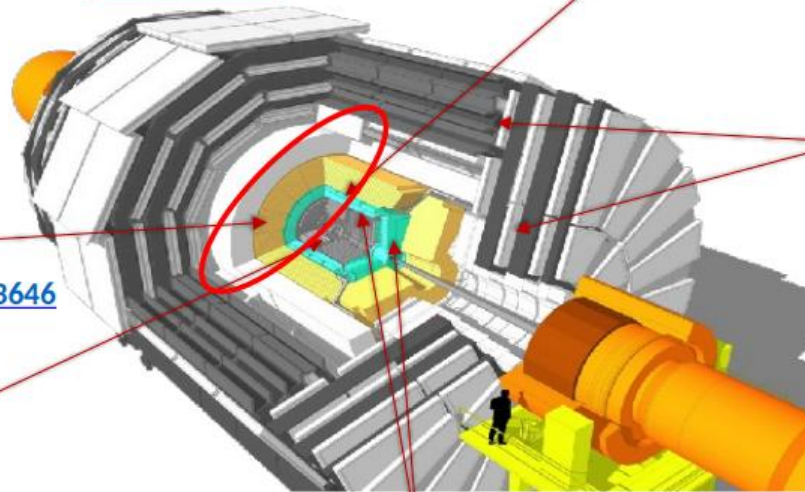
- ECAL crystal granularity readout at 40 MHz with precise timing for e/γ at 30 GeV
- ECAL and HCAL new Back-End boards



Calorimeter Endcap

<https://cds.cern.ch/record/2293646>

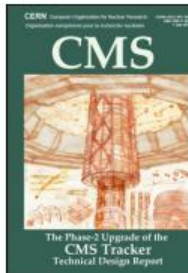
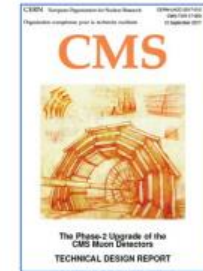
- 3D showers and precise timing
- Si, Scint+SiPM in Pb/W-SS



Muon systems

<https://cds.cern.ch/record/2283189>

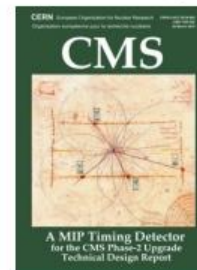
- DT & CSC new FE/BE readout
- RPC back-end electronics
- New GEM/RPC $1.6 < \eta < 2.4$
- Extended coverage to $\eta \approx 3$



Tracker

<https://cds.cern.ch/record/2272264>

- Si-Strip and Pixels increased granularity
- Design for tracking in L1-Trigger
- Extended coverage to $\eta \approx 3.8$



MIP Timing Detector

<https://cds.cern.ch/record/2667167>

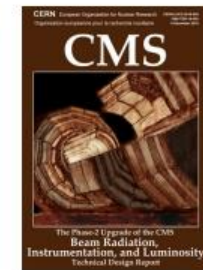
Precision timing with:

- Barrel layer: Crystals + SiPMs
- Endcap layer: Low Gain Avalanche Diodes

Beam Radiation Instr. and Luminosity

<http://cds.cern.ch/record/2759074>

- Beam abort & timing
- Beam-induced background
- Bunch-by-bunch luminosity: 1% offline, 2% online
- Neutron and mixed-field radiation monitors



https://indico.in2p3.fr/event/33627/contributions/155282/attachments/94256/144538/HGCAL_LCeard_EPS25.pdf

CMS Faz-II yükseltmesi kapsamında **Tracker, Endcap Kalorimetreleri (HGCAL), Müon Sistemi, Trigger ve DAQ sistemleri tamamen yenilenecek**; ayrıca pile-up ayrıştırması için yeni bir **MIP Timing Detector (MTD)** eklenecektir. Bu yükseltmeler CMS'in HL-LHC koşullarında çalışmasını sağlayacaktır.

1. İz Sürücü (Tracker) Sistemi

- Mevcut piksel ve şerit dedektörleri tamamen değiştirilecektir.
- Daha yüksek granülerlik ve radyasyon dayanımı sağlanacaktır.
- İlk kez Level-1 tetik(Trigger) sistemine iz bilgisi gönderilecektir.

2. Uç Kapak Kalorimetreleri (Endcap Calorimeters)

- Mevcut ECAL ve HCAL endcap dedektörleri kaldırılacaktır.
- Yerlerine **HGCAL (High Granularity Calorimeter)** kurulacaktır.
- HGCAL, hem enerji hem de zaman ölçümü yapabilen yüksek granülerlikli bir kalorimetre olacaktır.

3. Müon Sistemi

- Mevcut müon odalarının bir kısmı yenilenecek ve yenileri eklenecektir.
- Özellikle ileri pseudorapidity (yüksek η) bölgelerinde kapsama alanı artırılacaktır.
- Müon tetikleme ve konum çözünürlüğü iyileştirilecektir.

4. MIP Timing Detector (MTD)

- CMS'e tamamen yeni bir alt dedektör eklenecektir.
- Minimum iyonlaştırıcı parçacıkların geliş zamanını yaklaşık **30 ps hassasiyetle** ölçecektir.
- Bu sayede pile-up olaylarının ayrıştırılması mümkün olacaktır.

5. Tetik (Trigger) Sistemi

- Level-1 Trigger sistemi tamamen yeniden tasarlanacaktır.
- Daha karmaşık olay seçimi yapılabilecektir.
- İz sürücü ve zamanlama bilgileri tetik kararına dahil edilecektir.

6. Veri Toplama Sistemi (DAQ)

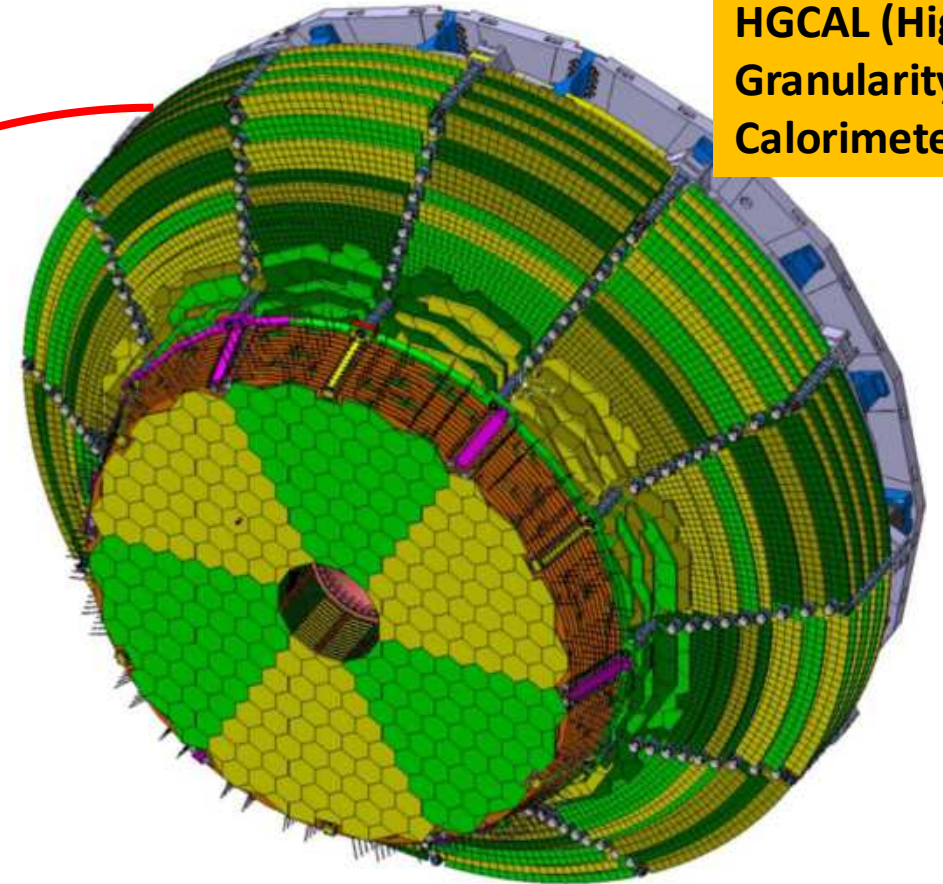
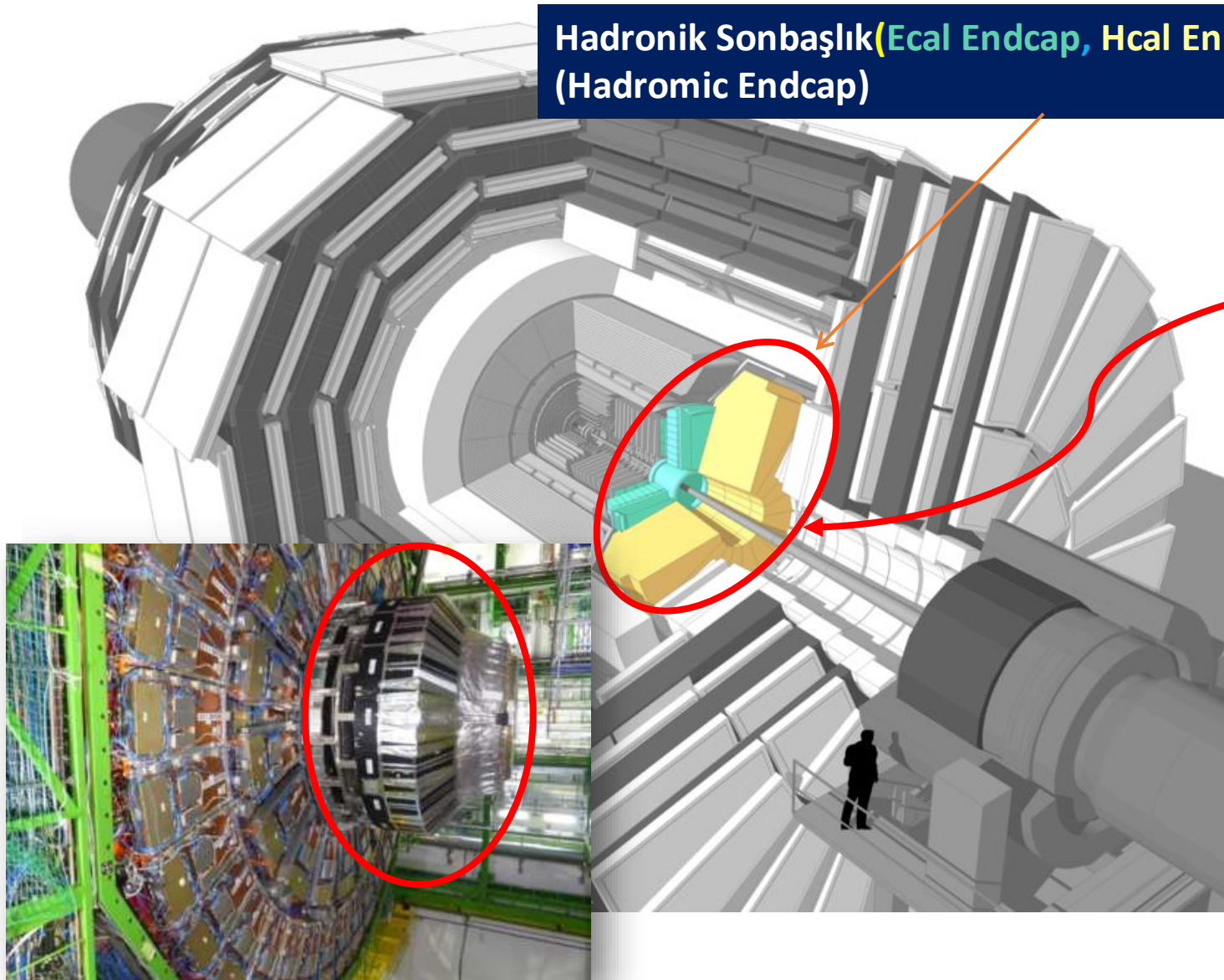
- Veri aktarım kapasitesi büyük ölçüde artırılacaktır.
- Yaklaşık **50.000 yüksek hızlı optik bağlantı** kullanılacak ve toplam veri hızı **80 Tb/s** seviyesine ulaşacaktır.

ENDCAP kalorimetreleri ile HGCAL yer deđiřtirecek

Hadronik Sonbaşlık (Ecal Endcap, Hcal Endcap)
(Hadronic Endcap)

CMS, HL-LHC için uç kapak
kalorimetrelerini Yüksek Tanecikli
Kalorimetre ile deđiřtirecek.

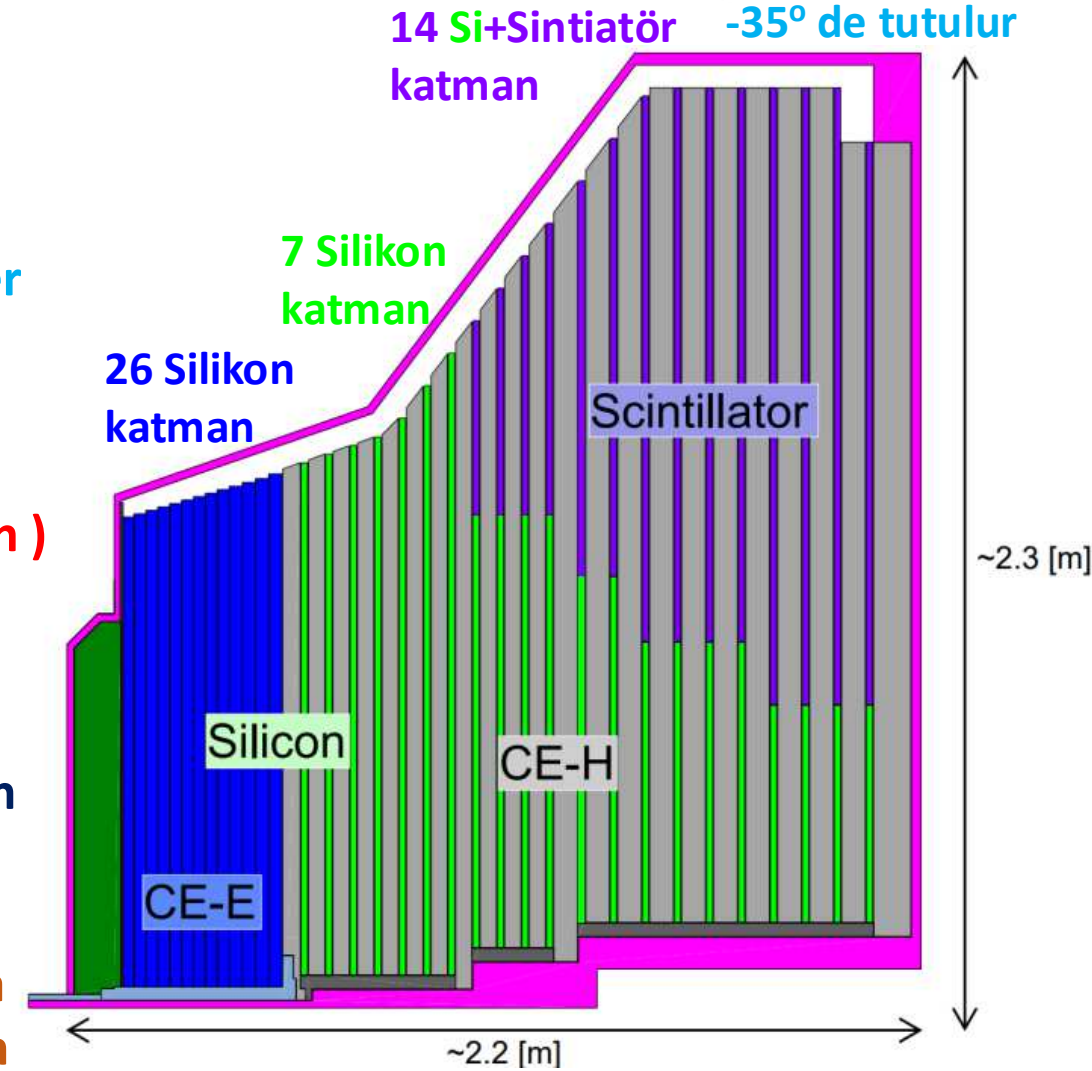
HGCAL (High-Granularity
Calorimeter)

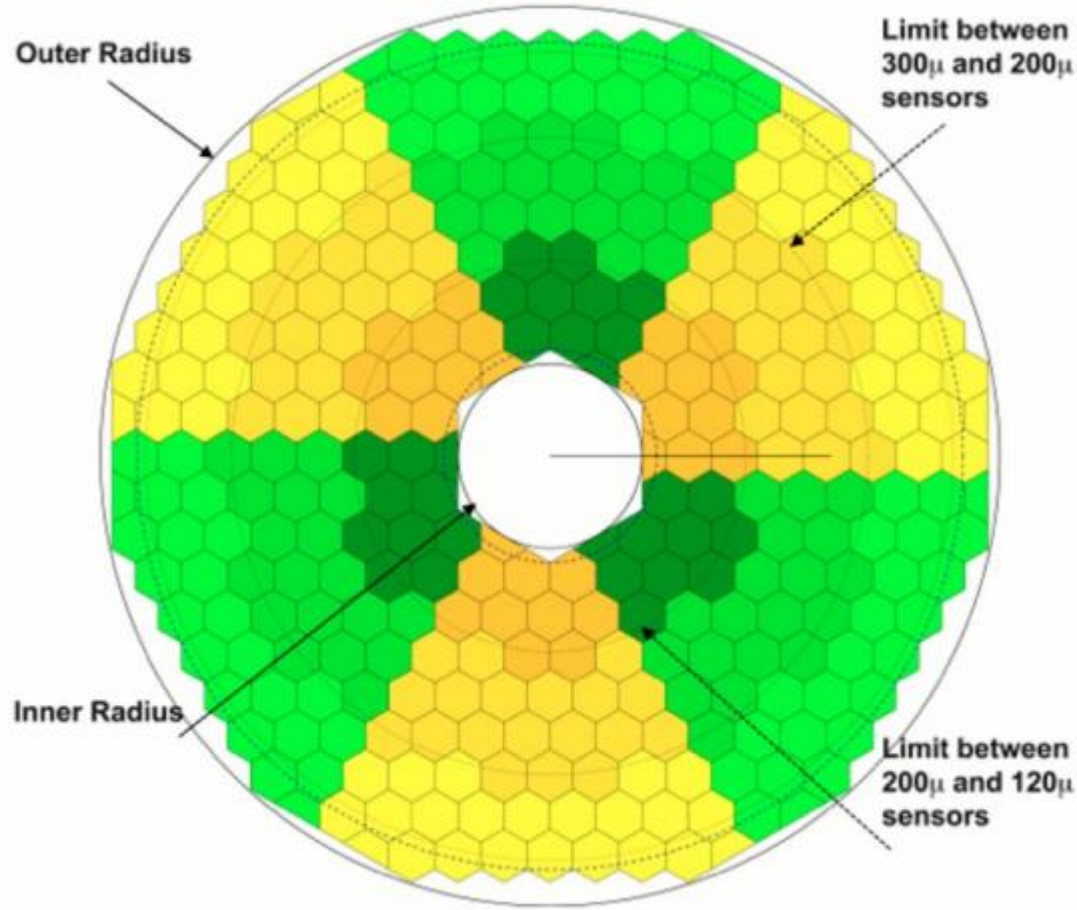


Değişimin Nedenleri

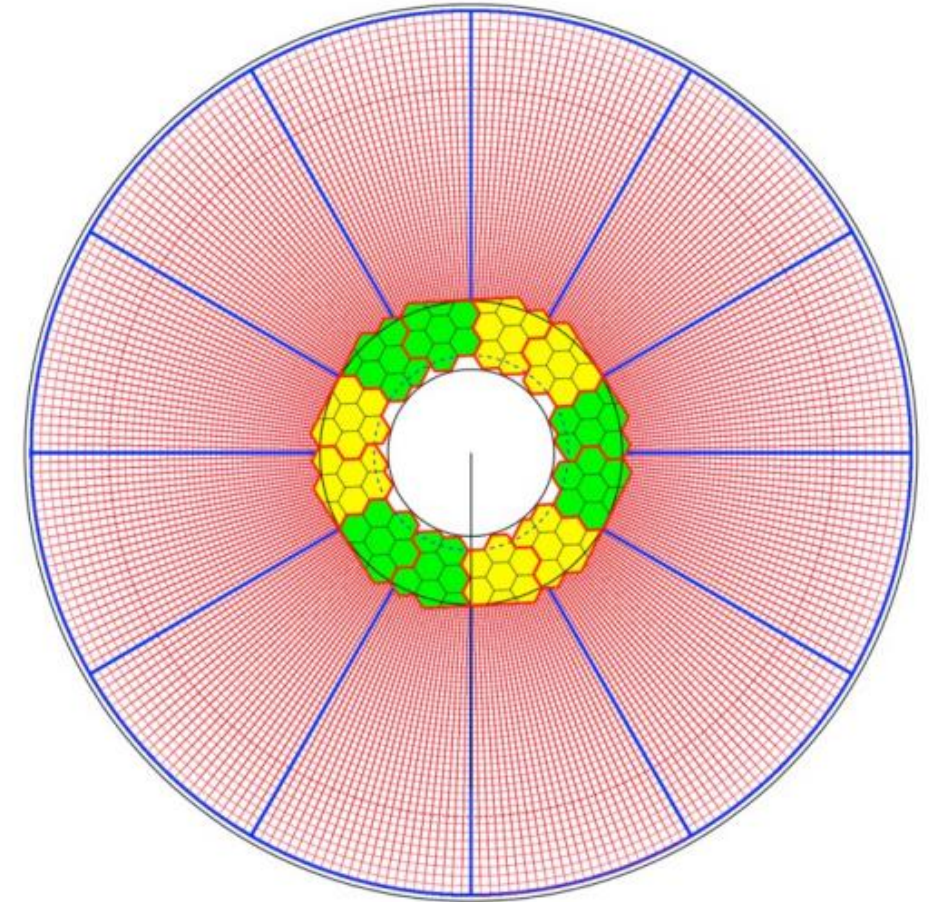
- Değiştirilecek kalorimetre radyasyona dayanıklı olmalı ve beklenen yığılmayla (pile-up-200 e kadar) başa çıkabilmelidir.
- **Yüksek Radyasyon:** HL-LHC döneminde endcap bölgesi çok yüksek radyasyona maruz kalacak. Mevcut ECAL ve HCAL bu koşullarda yeterli performansı sürdüremeyecektir.
- **Yüksek pile-up ortamı:** Aynı bunch crossing içinde yaklaşık 200 proton-proton çarpışması gerçekleşecek. Mevcut kalorimetrelerin granülerliği bu kadar karmaşık olayları ayırmak için yeterli değildir.
- **Daha yüksek uzaysal çözünürlük:** HGCal milyonlarca silikon hücre içerir. Parçacık duşlarının (showers) 3 boyutlu yapısını görüntüleyebilir.
- **Zaman ölçümü:** HGCal yaklaşık 30 ps zaman çözünürlüğü sağlayarak pile-up olaylarını ayırabilir.
- **Particle Flow ve shower ayrımı:** Yakın geçen parçacıkların oluşturduğu shower'lar daha iyi ayrıştırılır. Jet, elektron, foton ve missing transverse energy ölçümleri iyileşir.

- HGCAL 47 Katmanlı Örneklemeli Kalorimetresidir (Sampling Calorimeter).
- HGCAL'de pasif katman olarak kurşun, bakır ve paslanmaz çelik; aktif katman olarak ise silikon sensörler ve sintilatörler kullanılır.
- Elektromanyetik kalorimetre, CE-E (Calorimeter Endcap Electromagnetic) hepsi silikon sensörlerden yapılmıştır.
- Pasif bölge olarak Cu/CuW/Pb (Bakır/Bakır-Tungsten/Kurşun) emiciler kullanılmıştır. 26 katmandan oluşur.
- Hadronik kalorimetre (CE-H): Silikon sensörler ve sintilatör karolardan oluşmuştur.
- Pasif bölge olarak çelik emiciler kullanılmıştır. 21 katmandan oluşur.
- CE-H (Calorimeter Endcap Hadronic) kalorimetresi, yüksek radyasyonun görüldüğü iç bölgelerde silikon sensörler, daha düşük radyasyona maruz kalan dış bölgelerde ise sintilasyon karoları (scintillating tiles) kullanılır.

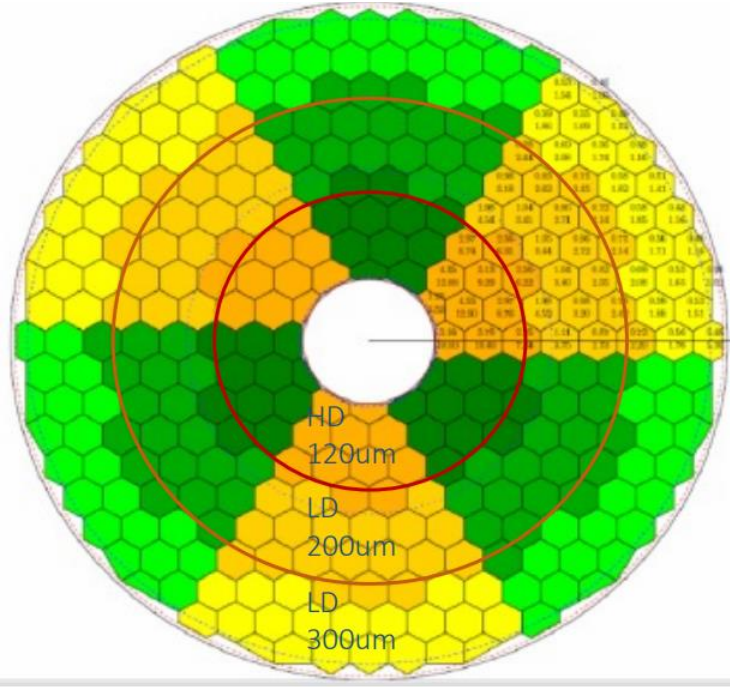




CE-E'de yalnızca silikondan oluşan katman, 60° kasetleri ve farklı sensör kalınlıklarını göstermektedir.



CE-H'te karışık katman; Yüksek η değerinde silikon ve düşük η değerinde sintilatör+SiPM bulunmaktadır.(30° lik kasetler kullanılır)



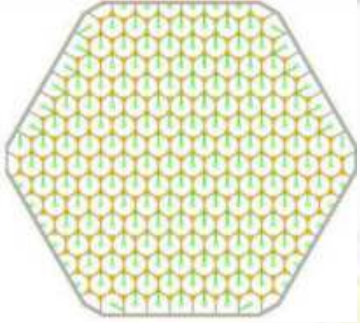
Üç farklı sensör kalınlığı kullanılmaktadır:

- 300 µm (Low Density-LD)
- 200 µm (Low Density-LD)
- 120 µm (High Density-HD)

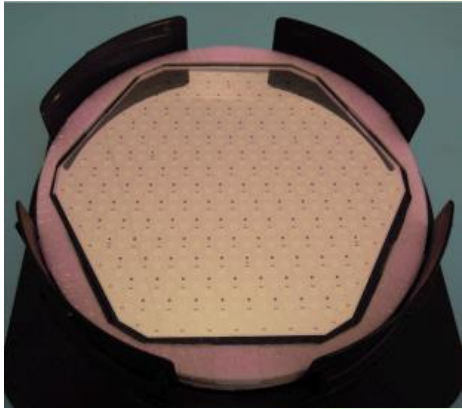
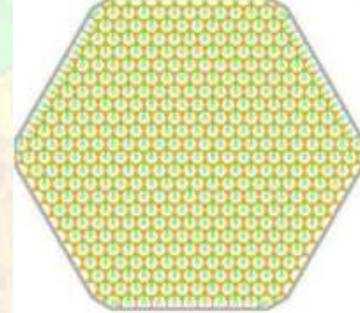
Daha ince sensörler, yüksek radyasyon altında daha iyi yük toplama verimliliği (CCE) sağlar.

- 8 inçlik (8") waferlardan elde edilen aktif silikon alanını en üst düzeye çıkarmak için altıgen (hexagonal) geometri kullanılmıştır.
- N-on-P (P-tipi) sensör teknolojisi, yüksek radyasyon seviyelerine dayanıklıdır ve $1.5 \times 10^{16} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ nötron eşdeğeri akı sonrasında dahi yeterli sinyal yükü toplama verimliliğini (Charge Collection Efficiency - CCE) korur.
- İki farklı hücre (pad) boyutu bulunmaktadır:
 - Yaklaşık $1 \text{ cm}^2 \rightarrow$ Düşük Yoğunluklu (Low Density – LD-300 µm ve 200 µm kalınlığında) sensörler kullanılmaktadır.
 - Yaklaşık $0.5 \text{ cm}^2 \rightarrow$ Yüksek Yoğunluklu (High Density – HD-120 µm kalınlığında) sensörler, radyasyon seviyesinin ve parçacık yoğunluğunun (occupancy) en yüksek olduğu iç bölgelerde kullanılmaktadır.

LD ve HD Silikon Sensörleri



İki Farklı Pad Boyutuna sahiptirler
Bunlar her biri ayrı ayrı okunacak
olan, 0,5 ila 1,1 cm² boyutlarında
altıgen şekilli yüzlerce hücreye
bölünecektir.



Low-Density sensor

Yaklaşık 200 Hücre(cells)

Pad boyutu=1.1 cm²

Aktif Kalınlık (Float-Zone, FZ)=300 & 200 μ m
Farklı radyasyon seviyelerine sahip bölgeler
için optimize edilmiştir.



High-Density sensor

Yaklaşık 450 Hücre(cells)

Pad boyutu=0.5 cm²

Aktif Kalınlık (epitaxial)
=120 μ m



LD



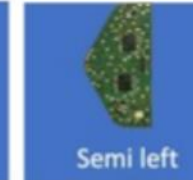
Full



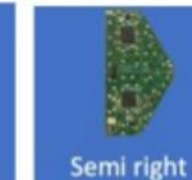
Half top



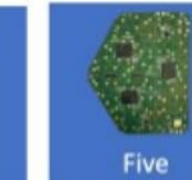
Half bottom



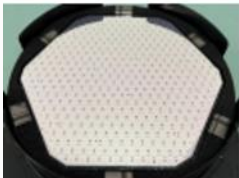
Semi left



Semi right



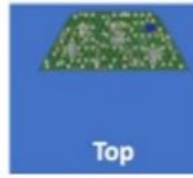
Five



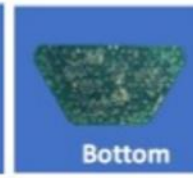
HD



Full



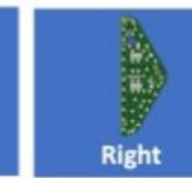
Top



Bottom



Left

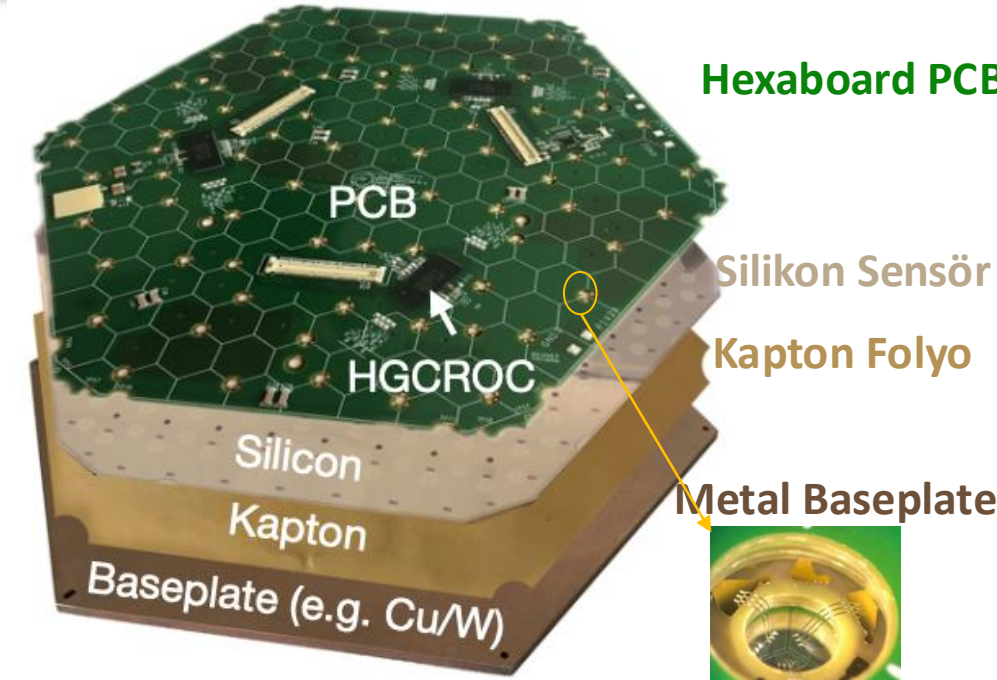


Right

- Silikon sensör, bir yüzünden **mekanik destek ve ısı transferi sağlayan taban plakaya (baseplate)** monte edilir.
- Sensörün diğer yüzüne ise **Hexaboard** adı verilen ön uç elektronik kartı yerleştirilir.
- Hexaboard üzerinde, sensörden gelen sinyalleri işleyen **HGCROC (High Granularity Calorimeter Read-Out Chip)** okuma ASIC'leri bulunur.
- Sensör üzerindeki her bir hücre (pad), Hexaboard üzerinde açılmış özel **basamaklı delikler (stepped holes)** aracılığıyla HGCROC girişlerine **wire-bond** bağlantıları ile bağlanır.

Hexaboard'un Görevleri

- Sensörlerden gelen yük sinyallerini toplamak
- Sinyalleri yükseltmek ve şekillendirmek
- Enerji ve zaman ölçümlerini gerçekleştirmek
- Verileri dijital hale getirerek arka uç elektroniğine aktarmak
- Sensör ile okuma elektroniği arasında elektriksel arayüz oluşturmak



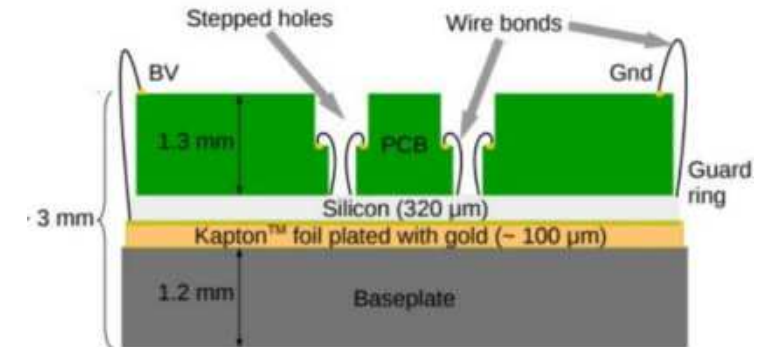
Hexaboard PCB

Silikon Sensör

Kapton Folyo

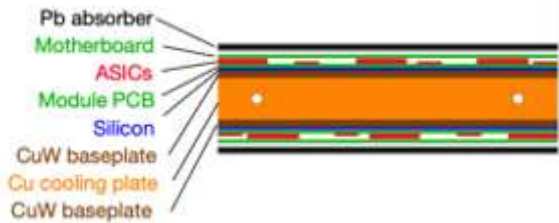
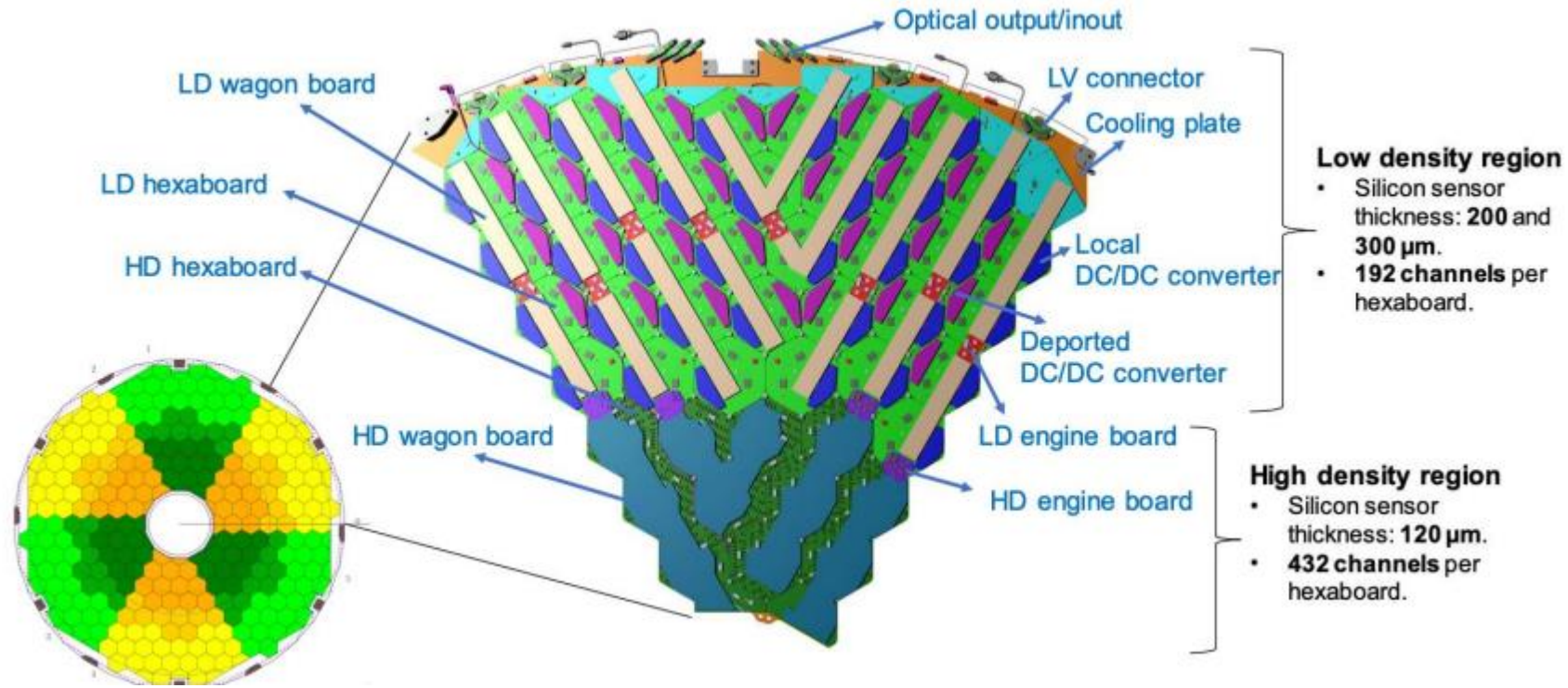
Metal Baseplate

Tel bağlama için kademeli delikler



A micrograph showing a SiPM (Silicon Photomultiplier) and an LED (Light Emitting Diode) assembly on a green substrate. The SiPM is labeled 'v53' and the LED is labeled 'x53'. A ground symbol is also present.





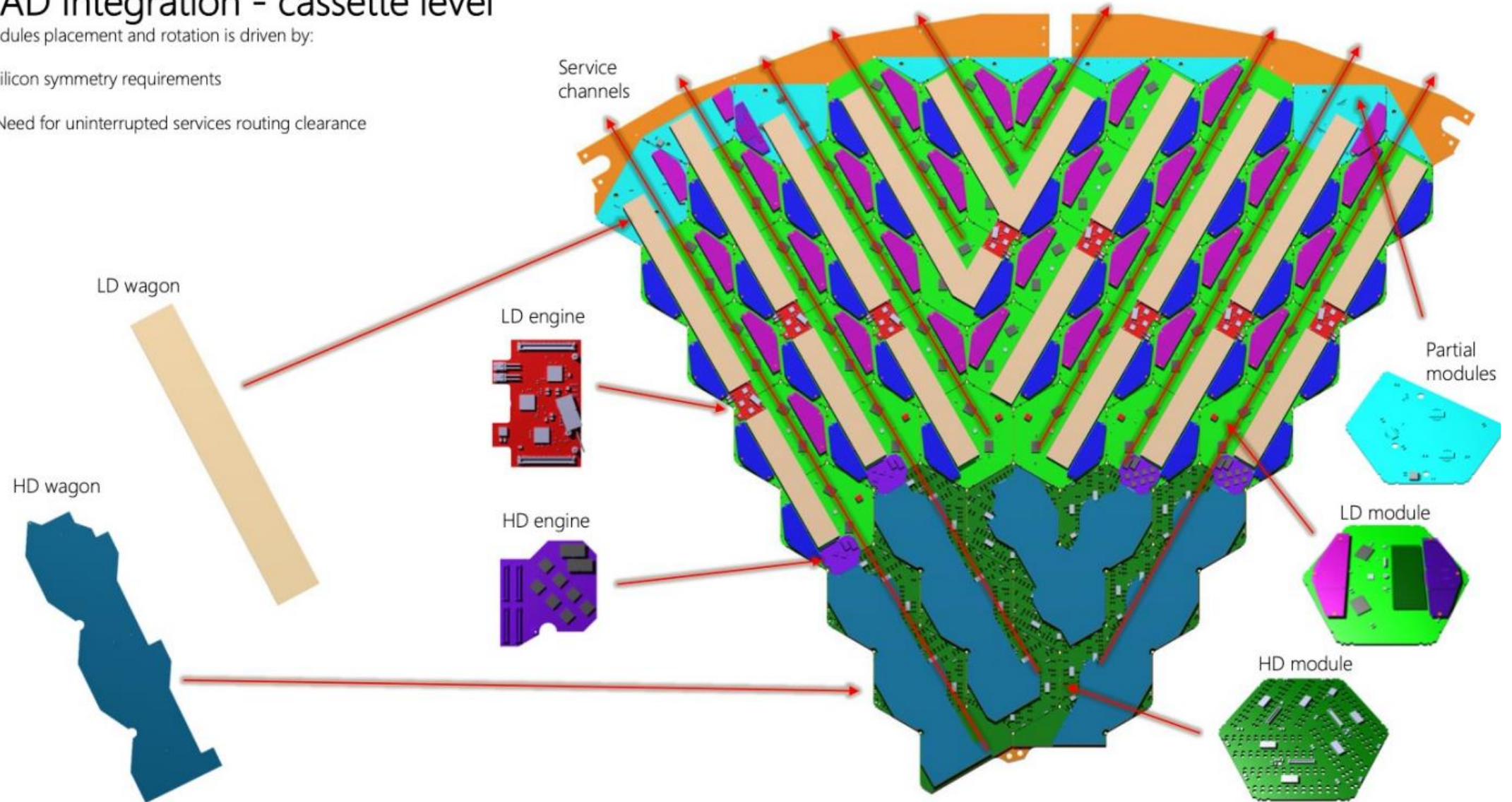
Modüllerin ve yardımcı bileşenlerin entegrasyonu.

- Kendinden destekli sandviç yapılar (emici elemanlarla).
- Modüller, bakır soğutma plakasının her iki tarafına yerleştirilir ve kurşun plakalarla kapatılır.

CAD Integration - cassette level

Modules placement and rotation is driven by:

- 1) Silicon symmetry requirements
- 2) Need for uninterrupted services routing clearance

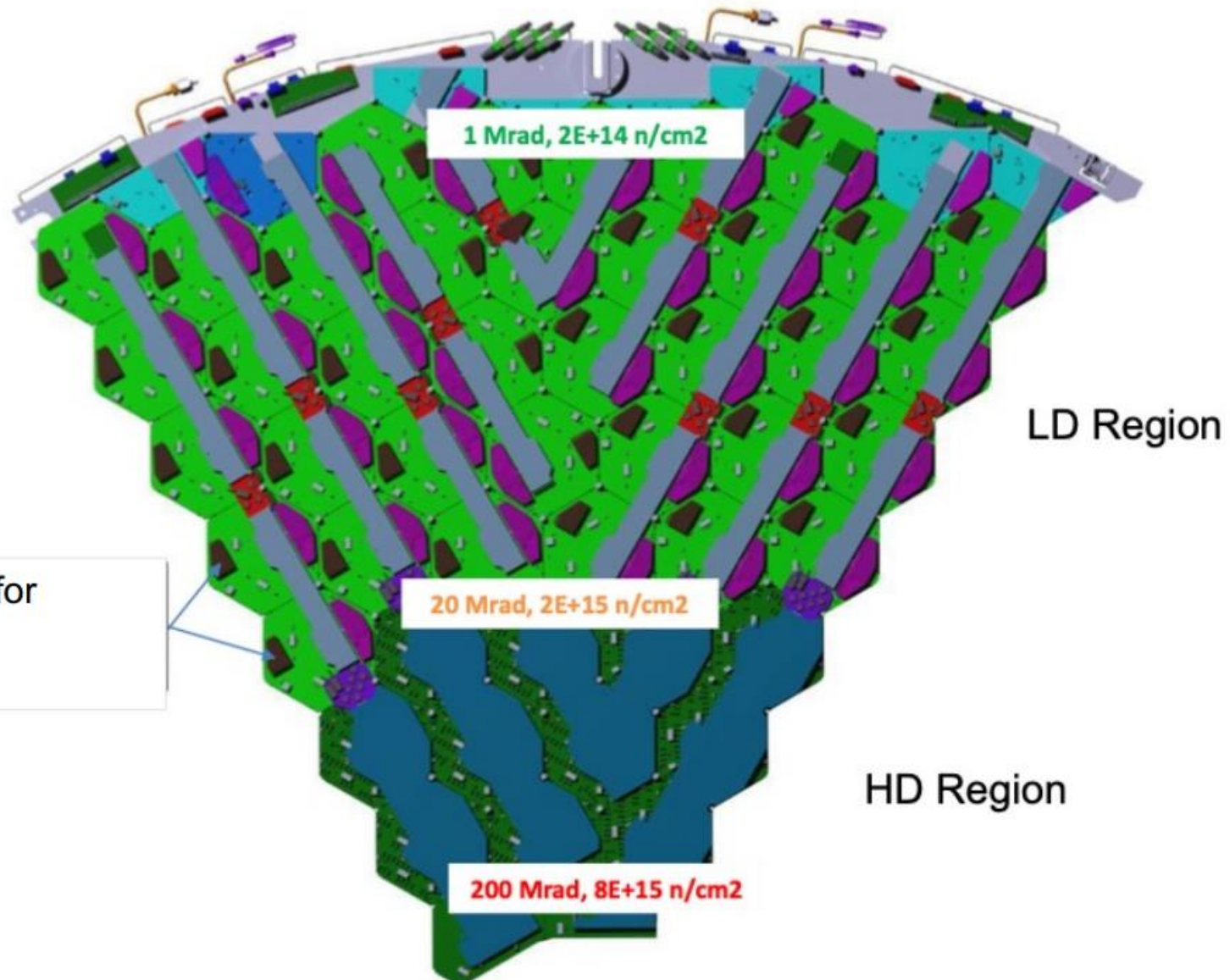


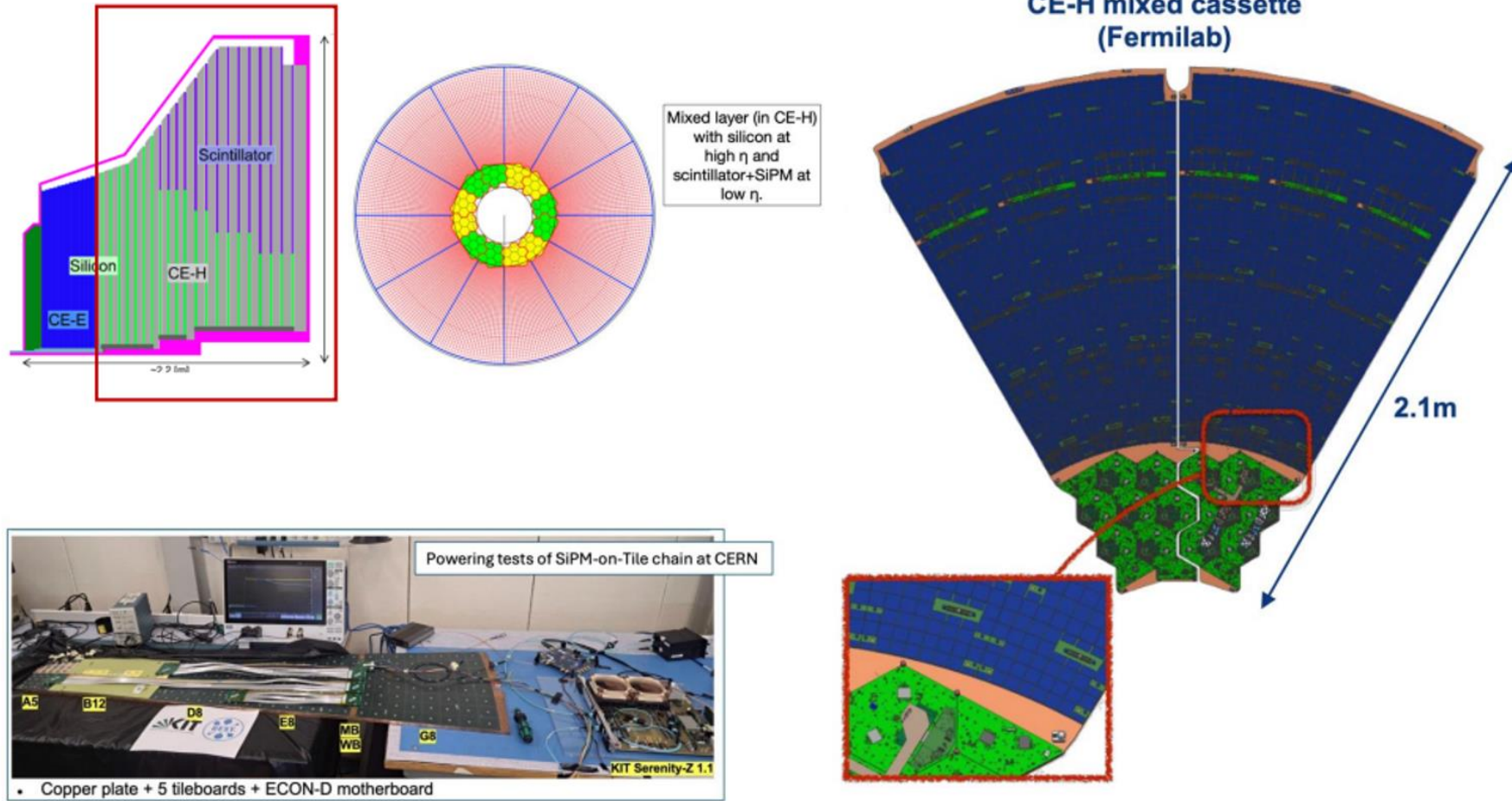
Kasetlerin Radyasyona Maruz kalacağı Değerler

Radiation Environment

Affects the placement of
certain components;
VTRx+ and DCDC converters

Deported DCDC modules for
powering the HD region





CE-H kasetleri tek taraflıdır ve hem tamamen silikon hem de karışık (sintilatör ve silikon sensör) tiplerinde mevcuttur.



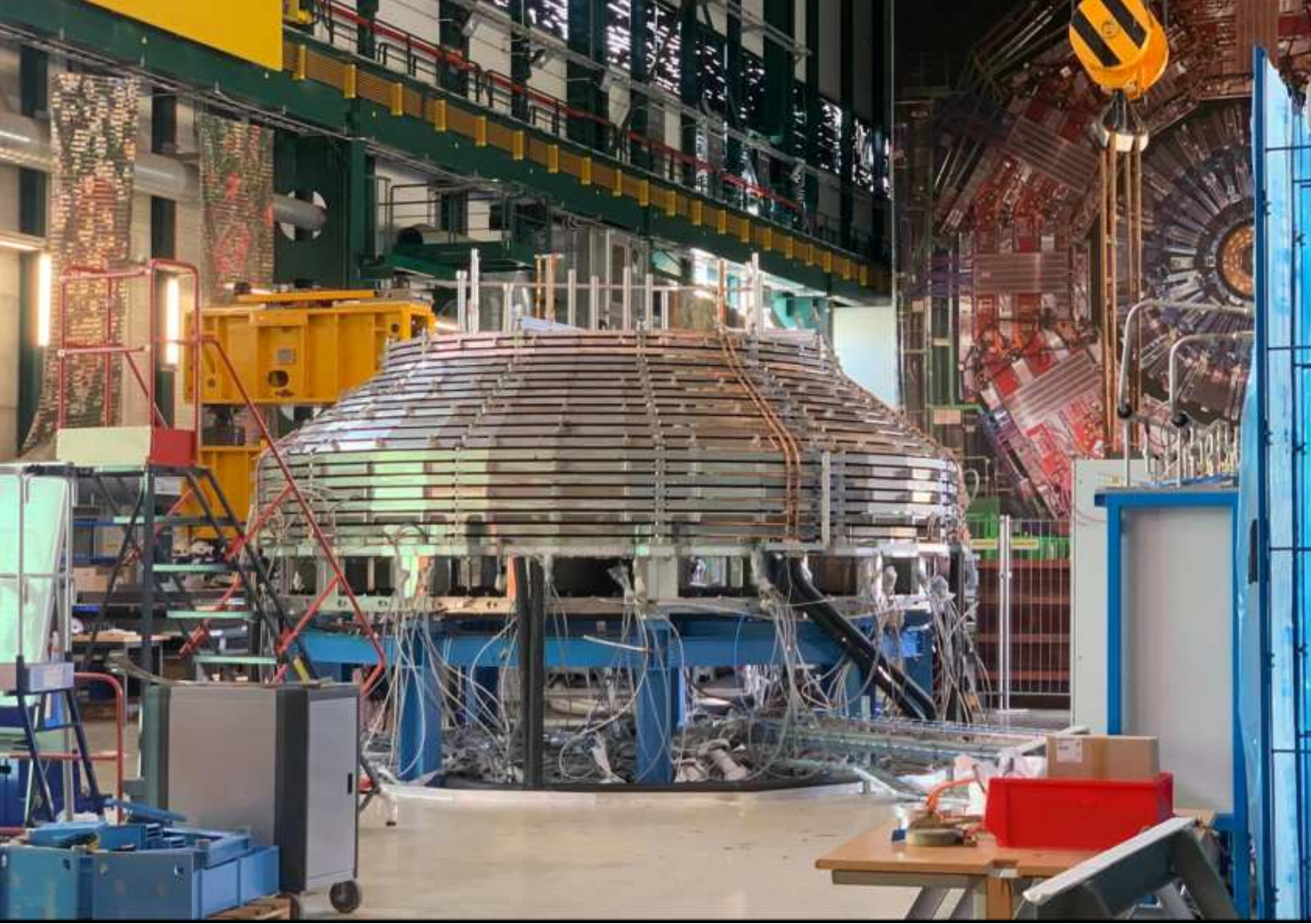


CE-E Layer 25 at CERN



CE-H 7B at FNAL





P5 CMS Assembly Hall in Cessy, France. Absorberlar Pakistanda yapılarak Kasım 2025 te CERN'e getirildi.

Beni Dinlediğiniz için

Teşekkür Ederim