

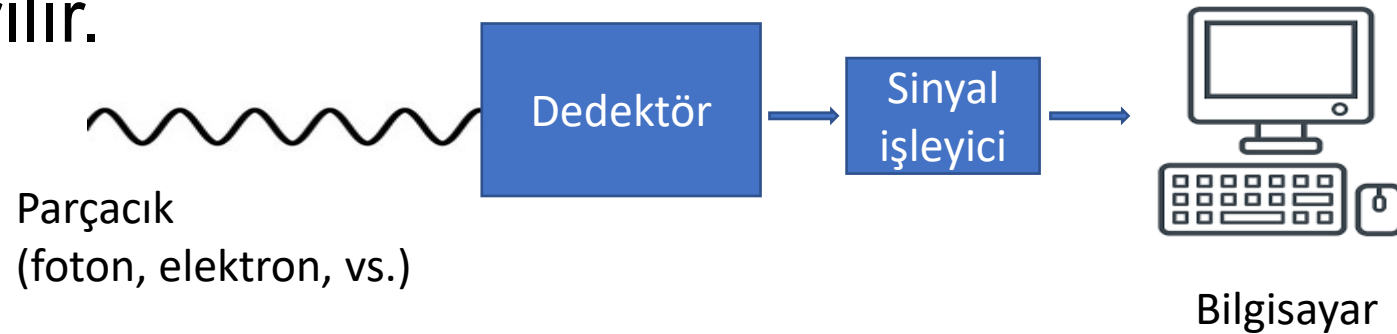
Parçacık Dedektörleri ve Alt Sistemleri

Prof. Dr. İsa DUMANOĞLU

Çukurova Üniversitesi Fizik Bölümü
dumanoglu@cu.edu.tr

- Giriş
- Biraz Tarihçe
- Sintilatörler
- Yarı iletken dedektörler
- Gaz Dedektörleri
- Kalorimetreler
- Büyük Dedektör Sistemleri
- Kaynakça

- Bir dedektörün çalışma prensibi ölçülmek istenilen parçacığın dedektörle etkileşmesine dayanır.
- Bir parçacık bir dedektörle etkileştiğinde ölçülebilir bir sinyal üretirse algılanır.
- Bu sinyal genellikle ışık veya iyonizasyon üretilmesi şeklinde gerçekleşir.
- Sonrasında bu sinyaller elektronik sinyallere çevrilir ve sayısallaştırılarak analiz edilmek ve depolanmak üzere bilgisayara aktarılır.



Dedektörler

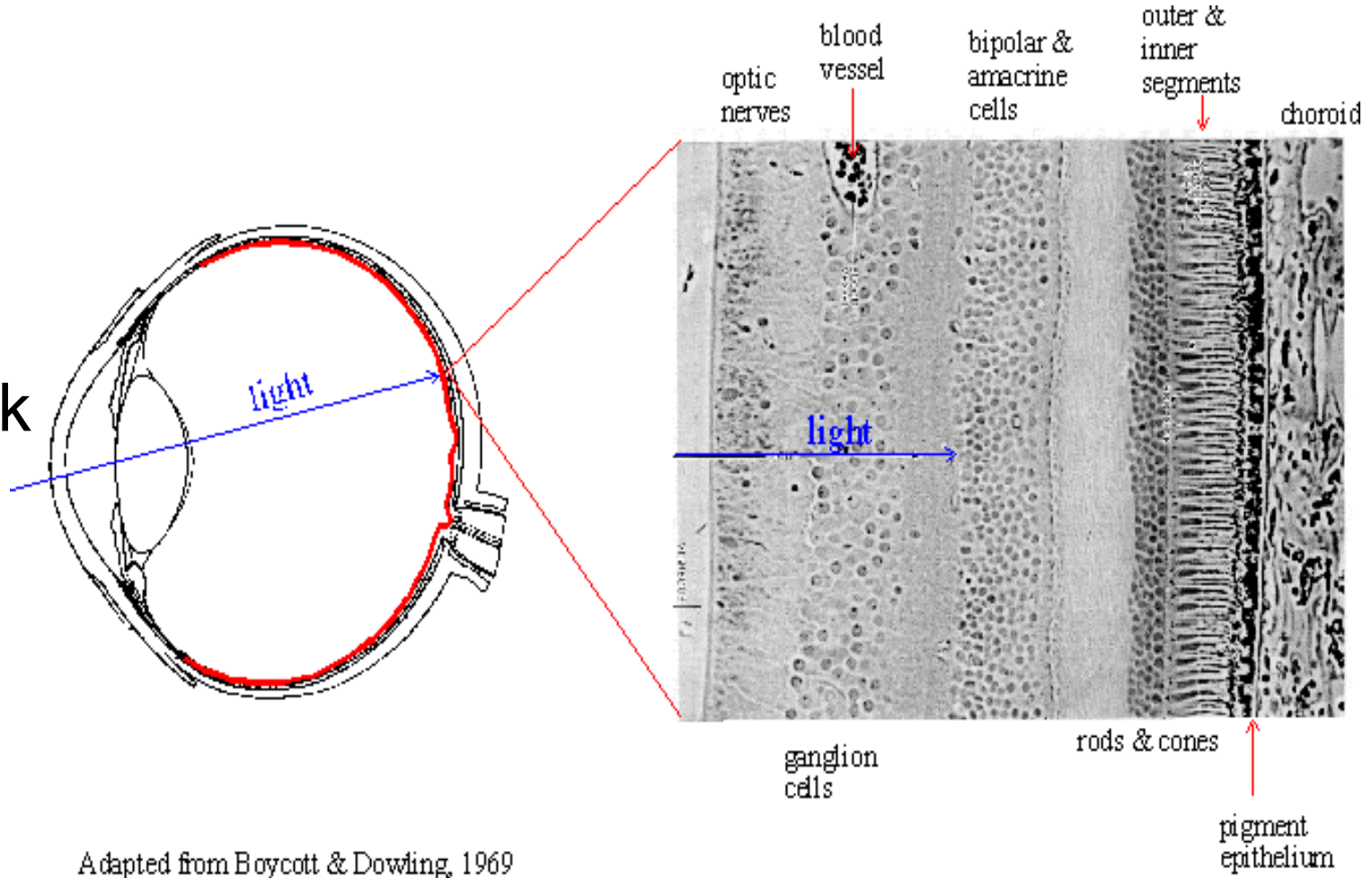
- Yarı-iletken dedektörleri
- Gaz dedektörleri
-

Kullanılan malzemelere göre

- Foton dedektörleri
- İzleyiciler
- Kalorimetreler
- Muon odacıkları
-

İşlevlerine göre

- Göz
- İlk foton dedektörü
- Yüksek foton duyarlılığı
- Çok iyi uzaysal çözünürlük
- Çok geniş dinamik aralık
- Enerji ayırt ediciliği
- 400-700nm
- Otomatik eşik ayarı



Adapted from Boycott & Dowling, 1969

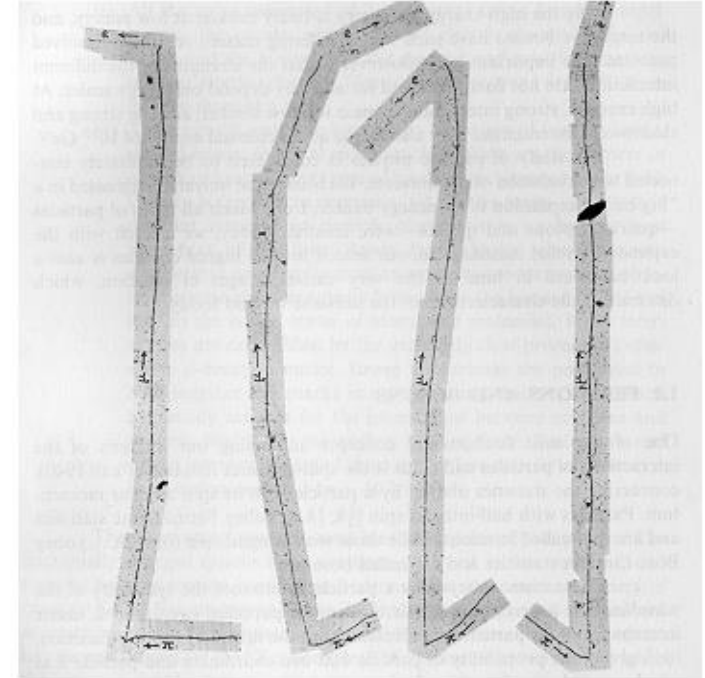
ELEKTROSKOP

- Statik elektrikle yüklenince yapraklar açılır.
- İçindeki havayı iyonize edecek bir etki olursa yapraklar kapanır.
- Yaprakların kapanma hızı iyonizasyonun miktarı hakkında fikir verir.
- Hess kozmik ışınları 1912'de bu yöntemle keşfetmiştir.
- Balonla atmosferde yükseklere çıkıldıkça elektroskopların yaprakları kozmik ışınların elektroskop içindeki havayı iyonize etmesinden dolayı kapanıyordu.

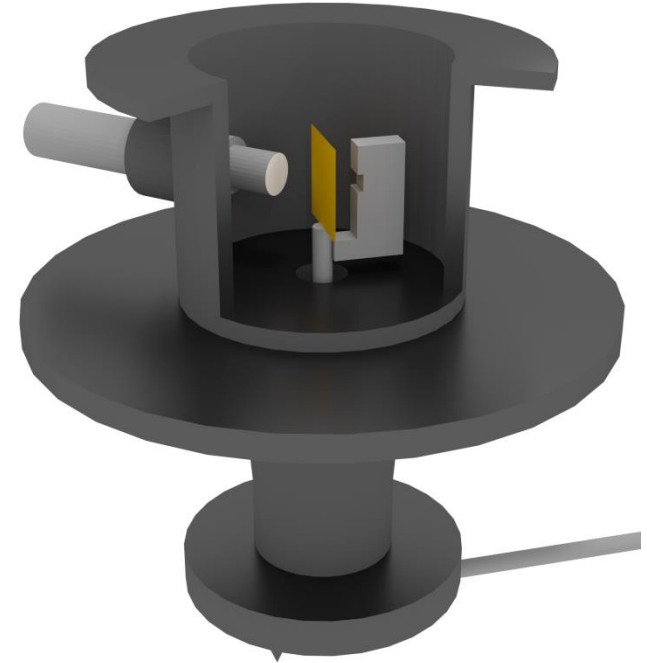
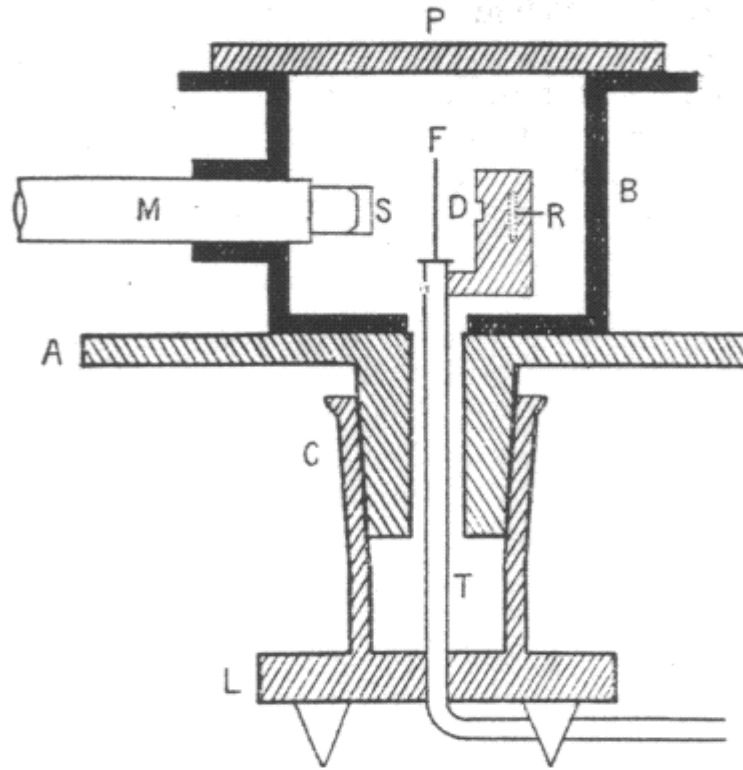
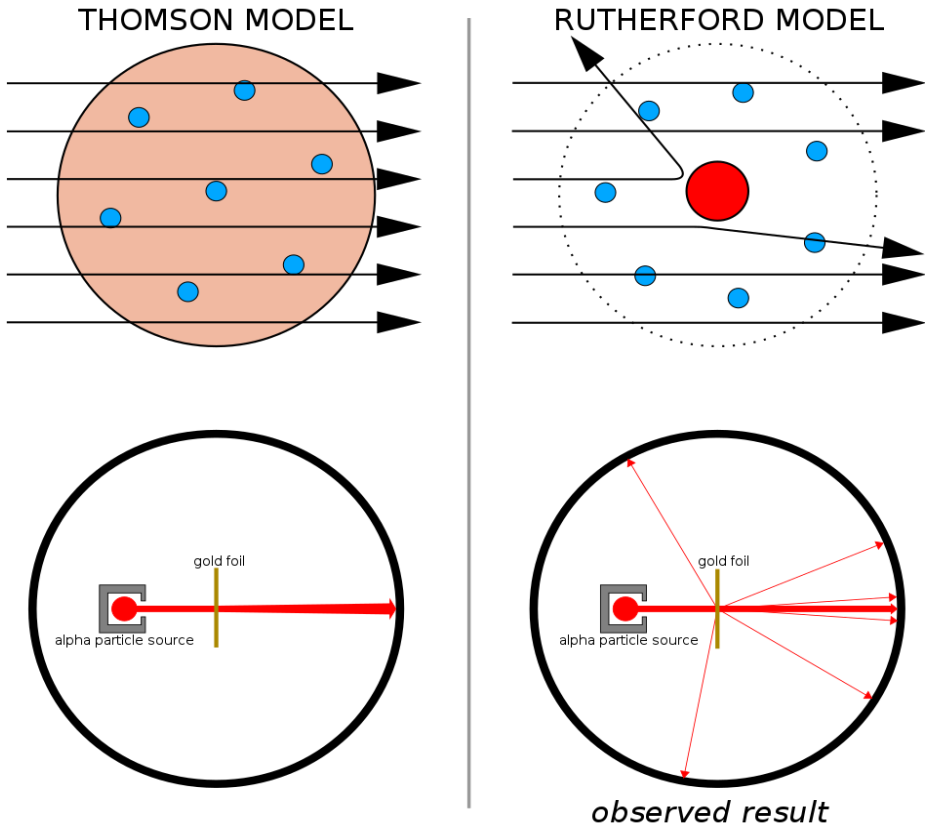


FOTOĞRAF FİLMİ

- Eski fotoğraf filmlerinin parçacıkları algılamak için kullanılması.
- Elektrik yüklü parçacık film içerisinden geçtiğinde parçacığın izi kaydedilir.
- Daha sonra filmin banyosu yapılarak parçacık izleri belirlenir.
- Emülsiyonda zaman bilgisi yoktur. Yani hangi izin ne zaman oluştuğunu belirlemek mümkün değildir.
- Muon ve pionların keşfinde kullanılmıştır.

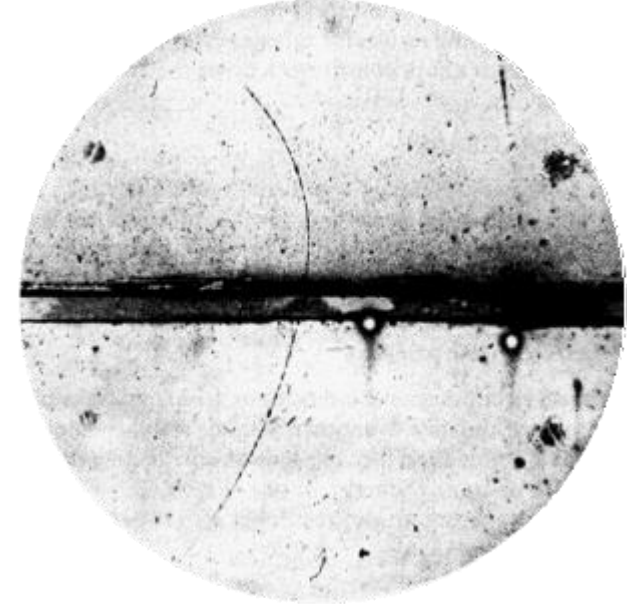


- Atomun yapısının keşfi(1911).
- Radyoaktif bir kaynaktan çıkan 5-10 MeV alfa parçacıkları altın yaprağa gönderilir.
- Yapraktan saçılan alfa parçacıkları ZnS bir ekrana çarpıklarında bir parıldama meydana gelir.
- Bu parıldamalar bir mikroskop yardımıyla incelenir.



- Süper doymuş su veya alkol buharı
- Yüklü parçacıklar yolu üzerindeki buhar atomlarını iyonize ederek bunları yoğunlaştırır.
- Oluşan bu damlacıklar parçacığın izini görselleştirir.

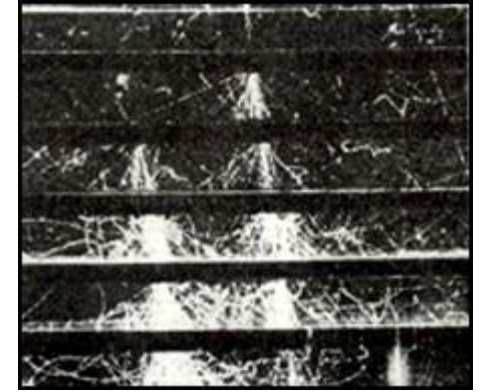
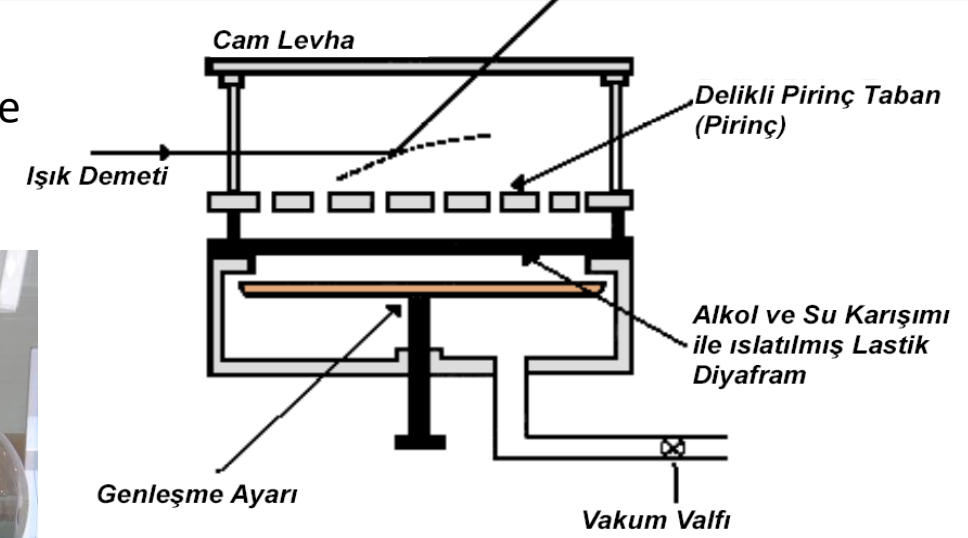
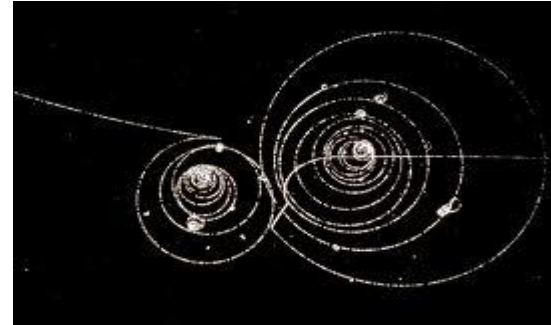
Positronun keşfi
Carl Andersen 1933



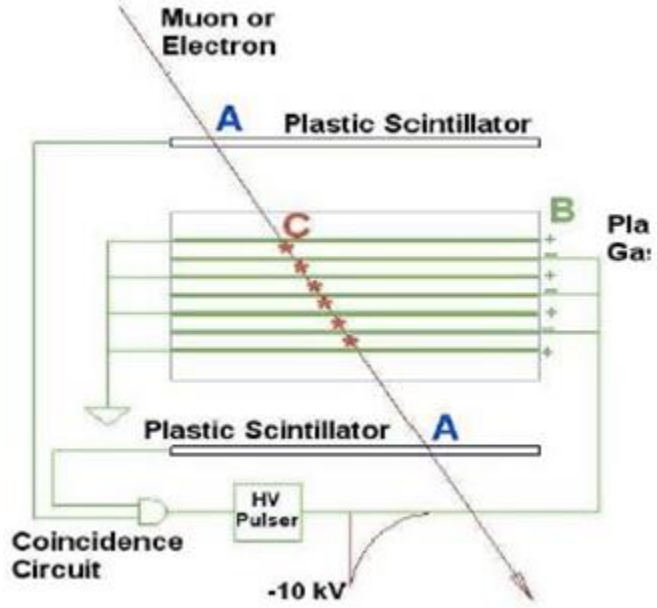
Manyetik alan 15000 Gauss,
Odacık çapı 15cm. 63 MeV'lik pozitron
6mm kalınlığında kurşundan geçerek
plakayı 23MeV'lik enerjiyle terk eder.



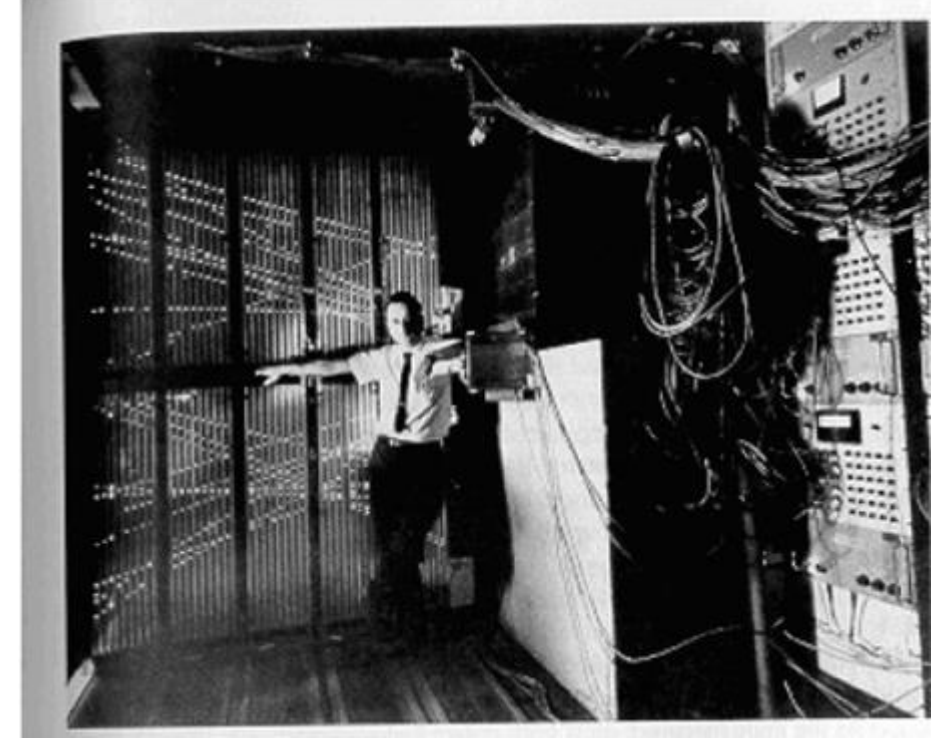
Bir manyetik alan uygulandığında yüklü parçacıkların yörüngeleri bükülür. Manyetik alanda hapsoldüklerinde helezonik yörüngeler izlerler.



Ardı ardına kurşun bloklar yerleştirilmiş sis odasında kozmik ışınların oluşturduğu çığ.



İçi Helyum, Neon veya ikisinin karışımıyla doldurulmuş bir kap ve kabın içerisine yerleştirilmiş paralel alüminyum metal plakalardan oluşur.



- **Yüklü bir parçacık, dedektörden geçerken yolu üzerindeki gaz atomlarını iyonize eder.**
- **Sintilatörler metal plakalar arasına uygulanan bir Yüksek Voltaj atımını tetikler.**
- **İyonizasyonun alüminyum plakalara yakın olduğu yerlerde bir kıvılcım oluşur.**

- **Bu kıvılcımın resmi çekilerek parçacık izleri belirlenir.**
- **Kıvılcım odaları 60'lı yıllarda geliştirilmiştir.**
- **Schwartz, Steinberger ve Lederman kıvılcım odalarını muon nötrinosunun keşfi (1962) için kullandılar.**

- İçerisinden yüklü parçacıklar geçtiğinde ışıma yapan malzemelerdir.
- Sintilatörden geçen yüklü parçacık sintilatör atom/moleküllerini uyarırlar.
- Elektronlar temel seviyeye dönerken ışık yayınlırlar.
- Sintilatörler genellikle sıvı veya plastik şeklindedir. Böylece istenilen şekle kolayca sokulabilirler.
- Organik ve inorganik olmak üzere de sınıflandırılırlar.
- Çubuk, levha, silindir gibi değişik geometride yapılabilirler.
- Ürettikleri ışığa saydam olmalıdırlar.
- Foton dedektörü (FÇT, SiFÇ, vs) ile birlikte kullanılırlar.

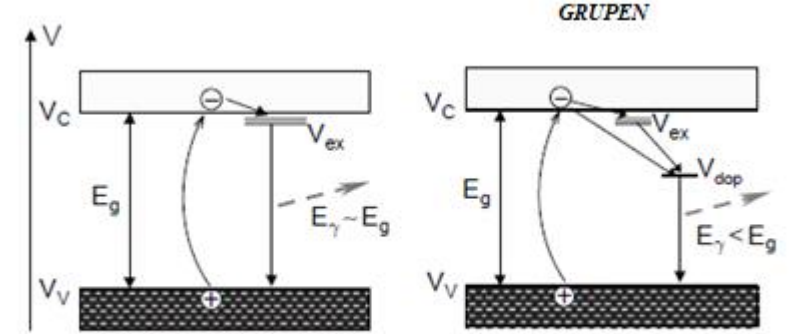


Fig. 5.23. Energy bands in a pure (left) and doped (right) crystal.

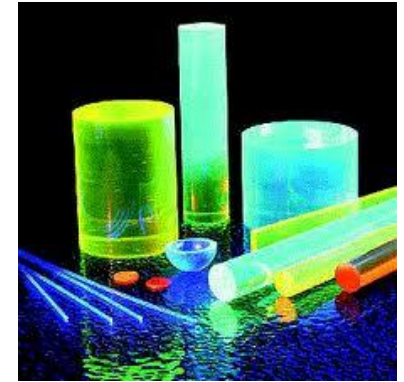


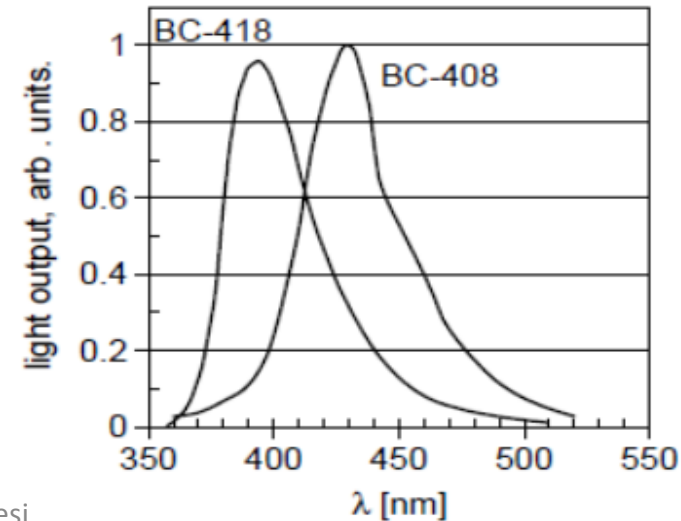
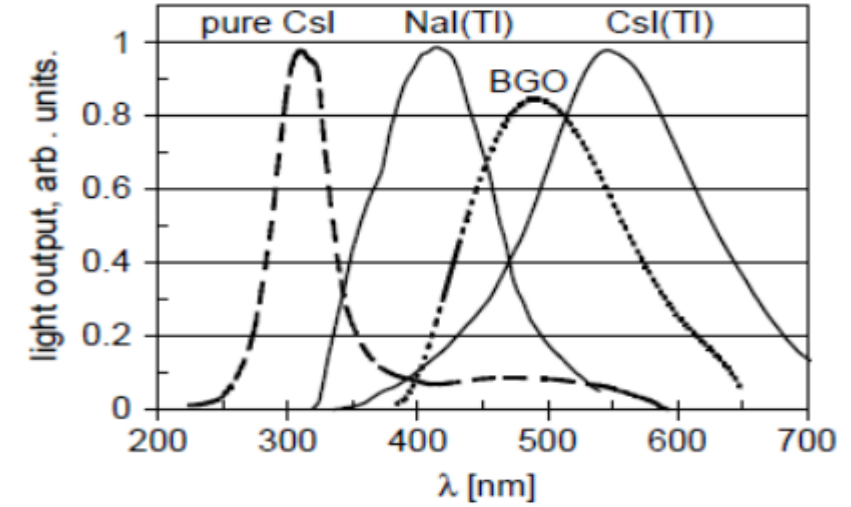
Table 5.2. Characteristic parameters of some inorganic scintillators [93–98]

| Scintillator | Density ρ [g/cm ³] | X_0 [cm] | τ_D [ns] | L_{ph}, N_{ph} [per MeV] | λ_{em} [nm] | $n(\lambda_{em})$ |
|----------------------------------------------------------|----------------------------------------|---------------|------------------|-------------------------------|------------------------|-------------------|
| NaI(Tl) | 3.67 | 2.59 | 230 | $3.8 \cdot 10^4$ | 415 | 1.85 |
| LiI(Eu) | 4.08 | 2.2 | 1400 | $1 \cdot 10^4$ | 470 | 1.96 |
| CsI | 4.51 | 1.85 | 30 | $2 \cdot 10^3$ | 315 | 1.95 |
| CsI(Tl) | 4.51 | 1.85 | 1000 | $5.5 \cdot 10^4$ | 550 | 1.79 |
| CsI(Na) | 4.51 | 1.85 | 630 | $4 \cdot 10^4$ | 420 | 1.84 |
| Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂ (BGO) | 7.13 | 1.12 | 300 | $8 \cdot 10^3$ | 480 | 2.15 |
| BaF ₂ | 4.88 | 2.1 | 0.7 | $2.5 \cdot 10^3$ | 220 | 1.54 |
| | | | 630 | $6.5 \cdot 10^3$ | 310 | 1.50 |
| CdWO ₄ | 7.9 | 1.06 | 5000 | $1.2 \cdot 10^4$ | 540 | 2.35 |
| | | | 20 000 | | 490 | |
| PbWO ₄ (PWO) | 8.28 | 0.85 | 10/30 | 70–200 | 430 | 2.20 |
| Lu ₂ SiO ₅ (Ce) (LSO) | 7.41 | 1.2 | 12/40 | $2.6 \cdot 10^4$ | 420 | 1.82 |

Table 5.3. Characteristic parameters of some organic scintillators [87, 93, 94, 102, 103]

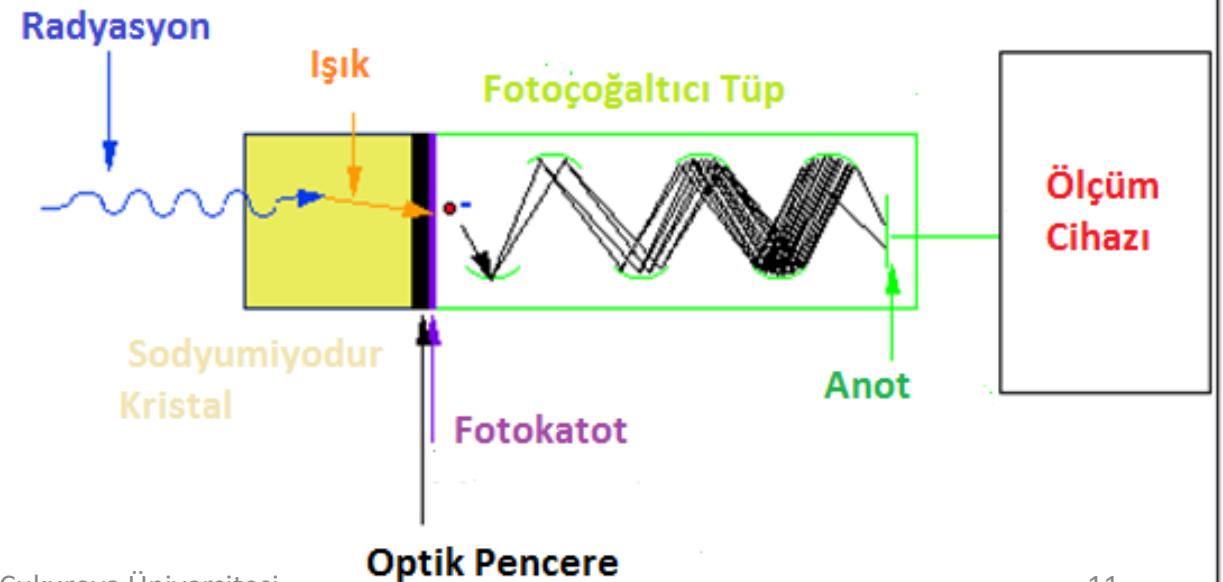
| Scintillator | base | density ρ [g/cm ³] | τ_D [ns] | L_{ph}, N_{ph} [per MeV] | λ_{em} [nm] | $n(\lambda_{em})$ |
|--------------------|------|----------------------------------------|------------------|-------------------------------|------------------------|-------------------|
| Anthracene | | 1.25 | 30 | 16 000 | 440 | 1.62 |
| BC-408 (BICRON) | PVT | 1.032 | 2.1 | 10 000 | 425 | 1.58 |
| BC-418 (BICRON) | PVT | 1.032 | 1.5 | 11 000 | 391 | 1.58 |
| UPS-89 (AMCRYS-H) | PS | 1.06 | 2.4 | 10 000 | 418 | 1.60 |
| UPS-91F (AMCRYS-H) | PS | 1.06 | 0.6 | 6 500 | 390 | 1.60 |

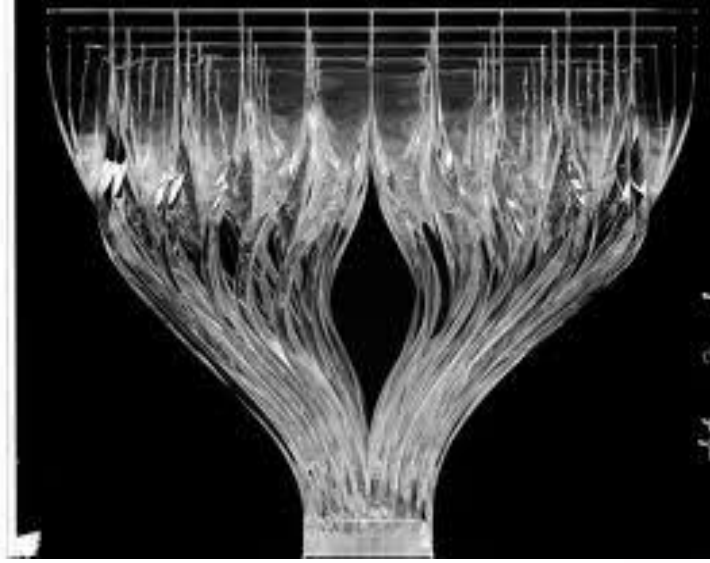
Dedektörler yapımı planlanırken sintilatörlerin yoğunlukları, yayımladıkları ışığın dalga boyu ve zaman sabiti, vs. gibi özelliklerinin dikkate alınması oldukça önemlidir.



- Sintilatörle etkileşen radyasyon sintilatörün ışık yayımlamasını sağlar.
- Yayımlanan bu ışık fotoçoğaltıcının katoduna çarpar.
- Buradan koparılan elektron çoğaltılarak anottan sinyal olarak alınır.
- Bu sinyal elektronik olarak işlenerek gelen radyasyon hakkında bilgi edinilir.
- Sintilatörlerin bu şekilde kullanımları oldukça yaygındır.

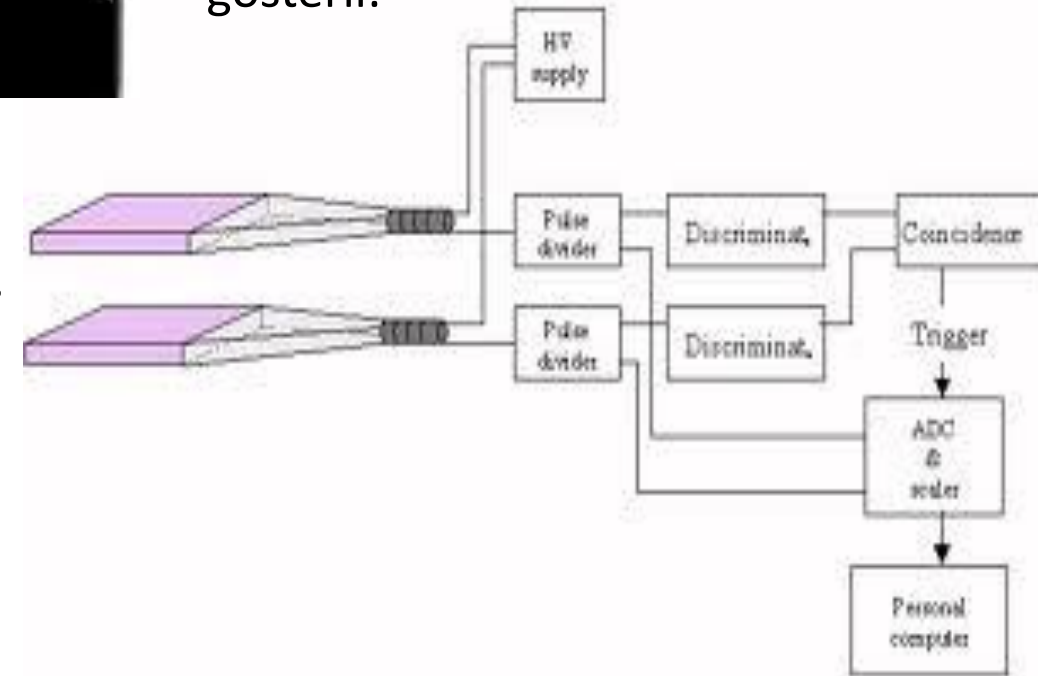
- Bu dedektörlerde kullanılan sintilatörü değiştirmek suretiyle değişik tipte radyasyonlar/parçacıklar algılanabilir.
- Örneğin, alfa parçacıklarını ölçmek için gümüşle aktive edilmiş ZnS, Beta parçacıklarını ölçmek için naftalin ve stilben, kullanılır.
- X ve gama ışınını ölçmek için talyumla aktive edilmiş NaI kristali kullanılır.





- Sintilatörlerin deneysel bir uygulaması.
- İki sintilatörden aynı anda bir sinyal algılamak yüklü bir parçacığın geçişini gösterir.

- Işık rehberleri ışığın yönlendirilerek bir yere toplanmasını sağlar.
- Bu yer genellikle ışığın elektrığe çevrileceği foto-algılayıcıdır (foto-çoğaltıcı tüp gibi)



Işığı elektrik sinyaline çevirirler.

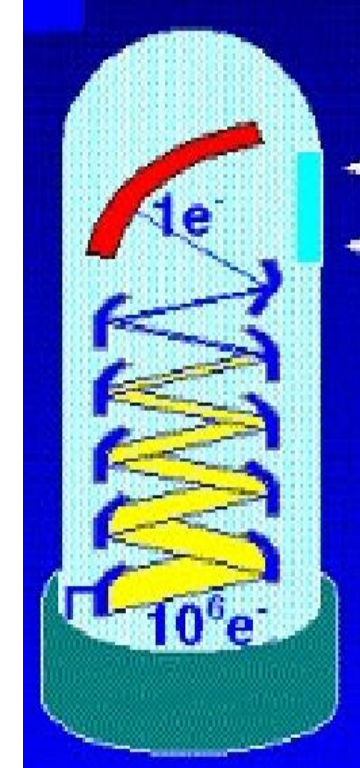
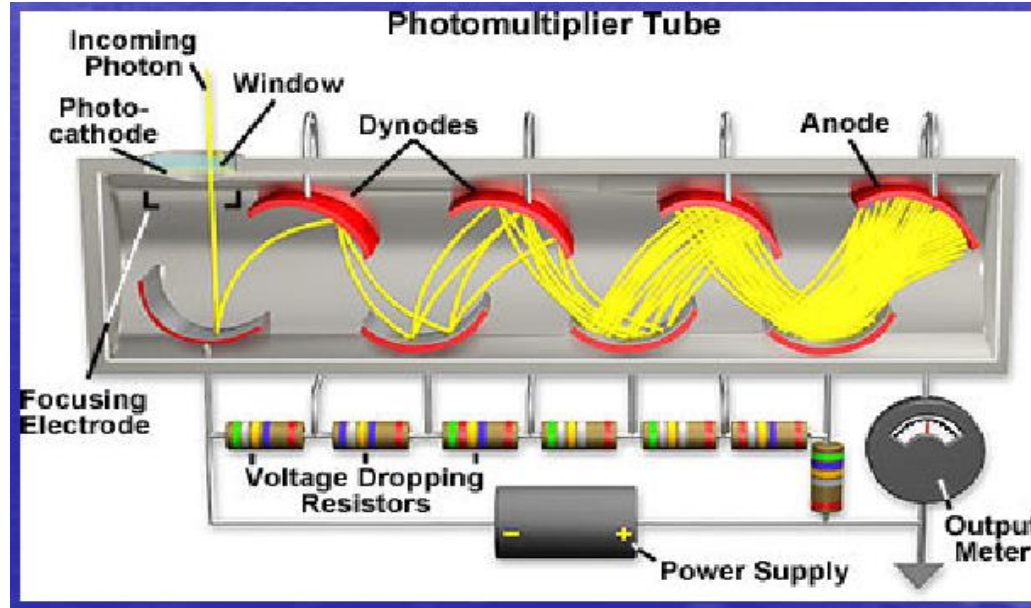
Bu süreç diğer dinotlarda tekrarlanır. Elektronlar anota ulaştığında toplanarak sinyal elde edilir.

Foto-katot üzerine düşen ışık enerjisi yeterli ise buradan bir elektron kopartır.

Amaca uygun olarak kullanılmak üzere çok değişik şekilde yapılırlar.

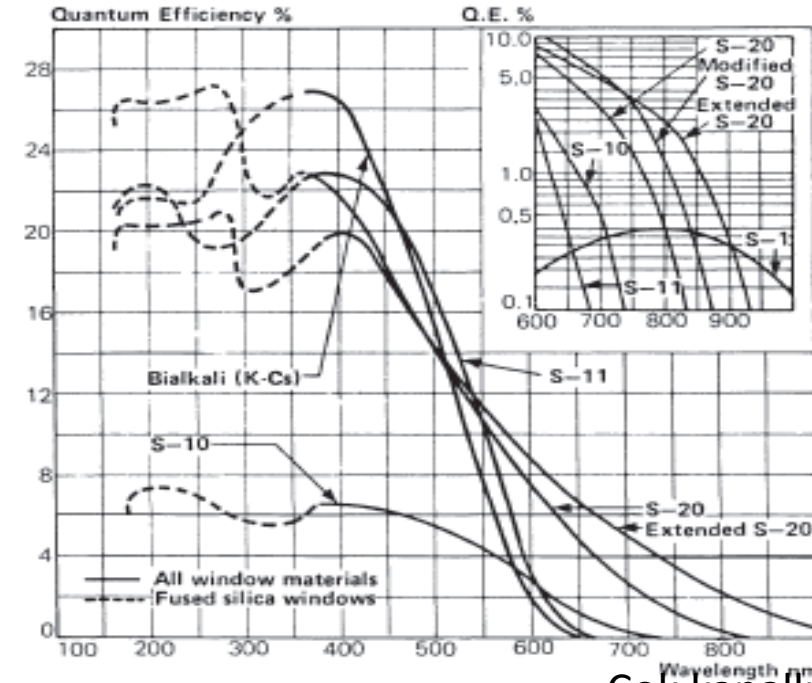
Dinotlara artan bir elektrik potansiyeli uygulanarak bu elektronlar hızlandırılarak dinotlara çarptırılır.

En çok sintilatörlerle birlikte kullanılırlar.





Dalgaboyuna göre kuantum verimlilik



Fotokatotların karakteristik özellikleri

Table 8.1. Photocathode characteristics (from RTC catalog [8.3])

| Cathode type | Composition | λ at peak response [nm] | Quantum efficiency at peak |
|--------------|-------------|---------------------------------|----------------------------|
| S1 (C) | Ag - O - Cs | 800 | 0.36 |
| S4 | SbCs | 400 | 16 |
| S11 (A) | SbCs | 440 | 17 |
| Super A | SbCs | 440 | 22 |
| S13 (U) | SbCs | 440 | 17 |
| S20 (T) | SbNa - KCs | 420 | 20 |
| S20R | SbNa - KCs | 550 | 8 |
| TU | SbNa - KCs | 420 | 20 |
| Bialkali | SbRb - Cs | 420 | 26 |
| Bialkali D | Sb - K - Cs | 400 | 26 |
| Bialkali DU | Sb - K - Cs | 400 | 26 |
| SB | Cs - Te | 235 | 10 |

Çok kanallı tabakalar

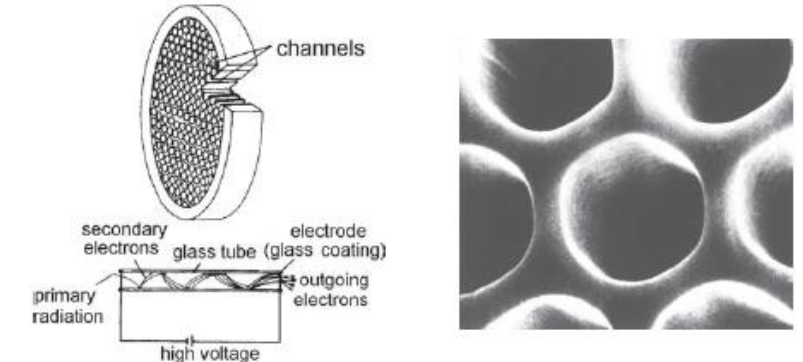
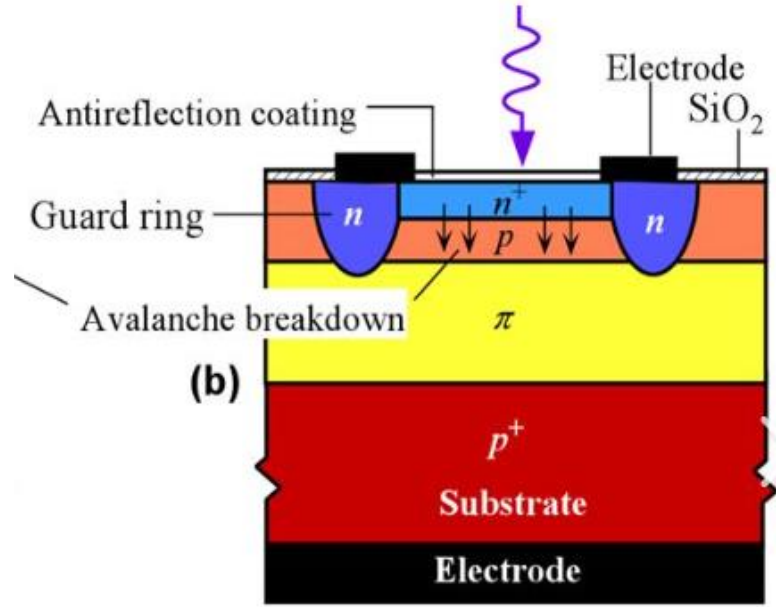
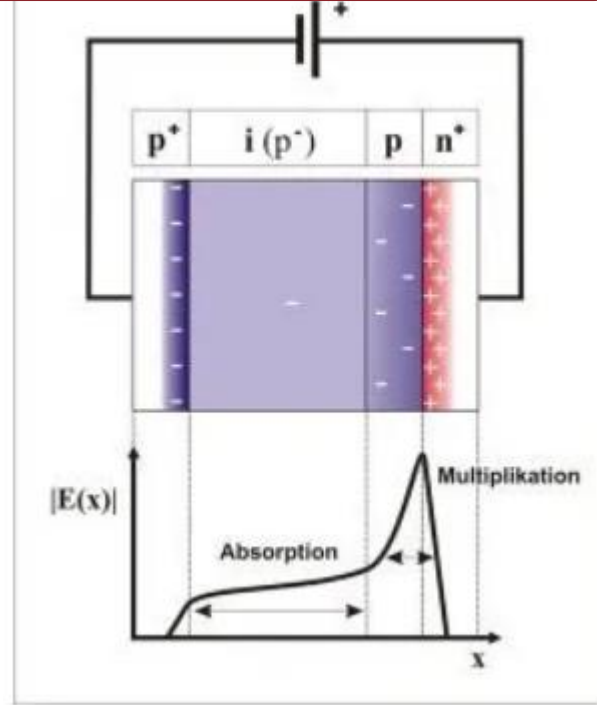


Fig. 5.34. Working principle of a channel plate [112] (left) and microphotograph of microchannels [121].



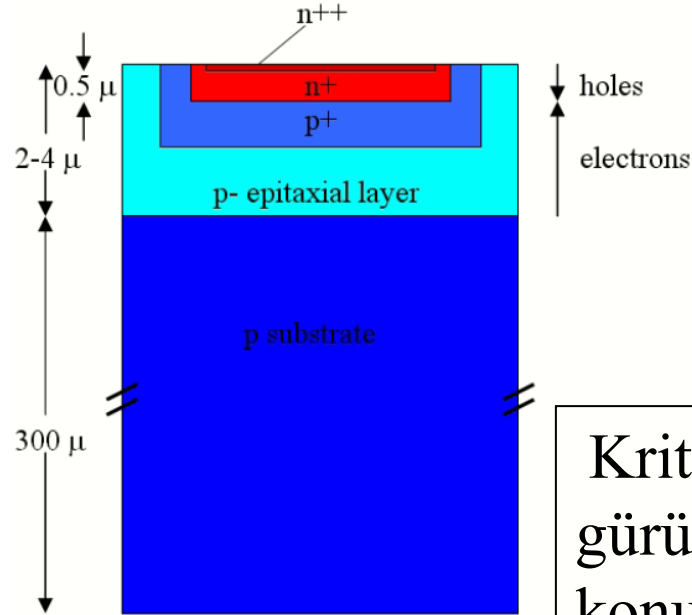
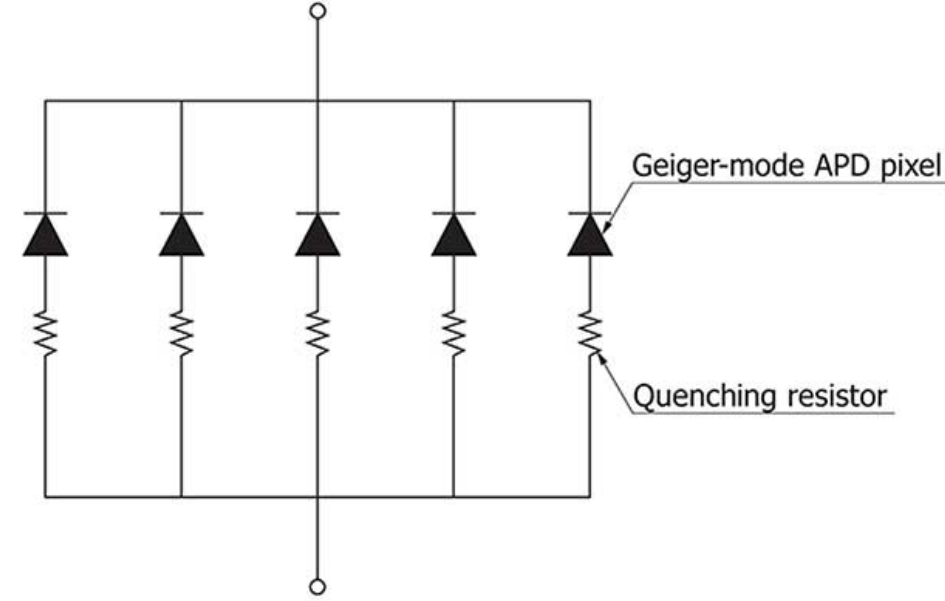
- APD'lerin yapısı PIN diyotlara benzer.
- Yüksek katkılı p+ ve n+ ve az katkılı p ve katkısız (i) bölgesinden oluşur.
- Katkısız bölgede tüketim kalınlığı PIN diyotlara nazaran daha incedir.
- p+ bölgesi anot, n+ bölgesi ise katot görevi görür.



- Çığ etkisiyle kırılma (Avalanche breakdown) diyot yüksek ters gerilime maruz bırakıldığında gerçekleşir.
- Ters öngerilim (bias voltage) tüketim(depletion) tabakasındaki elektrik alanı artırır.
- Gelen ışık n+ bölgesine girer ve yüksek dirençli p bölgesinde daha da soğrularak elektron-deşik çiftleri yaratır.
- Görece düşük elektrik alanı bu çiftleri birbirinden ayırır. Elektron ve deşikler doyum hızı ile daha yüksek elektrik alanın bulunduğu pn+ bölgesine sürüklenir.
- Bu yüksek hızlı yük taşıyıcılar diğer atomlarla çarpışarak yeni elektron-deşik çiftleri yaratır. Çok sayıdaki e-h çiftleri yüksek foto-akım oluşmasına yol açar.

| Çığ Fotodiyot | Fotoçoğaltıcı Tüp |
|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Farklı konsantrasyonda katkılanmış 4 tabakadan oluşur. | Foto-katot, dinot ve vakumlanmış cam tüpten oluşur. |
| Fotonları elektronlara çevirir. | Elektron üretmek için foton soğurma prensibine dayanır. |
| Yük taşıyıcılar üretmek için çığ çoklanması prensibine dayanır. | Elektron sayısını çoğaltır. |
| Yüksek duyarlılıklıdır. | Duyarlılıkları sınırlıdır. |
| Maliyetleri FÇT'lere kıyasla oldukça düşüktür. | Pahalı cihazdır. |

- Geiger modunda çalışan APD piksellerinden oluşan foton sayacıdır.
- Her piksel bir foton algıladığında bir sinyal üretir.
- Sinyal çıkışı bütün piksel sinyallerinin toplamından oluşur.
- Piksel boyutları genellikle $15 \times 15 \mu\text{m}^2$ den $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ kadar değişir.

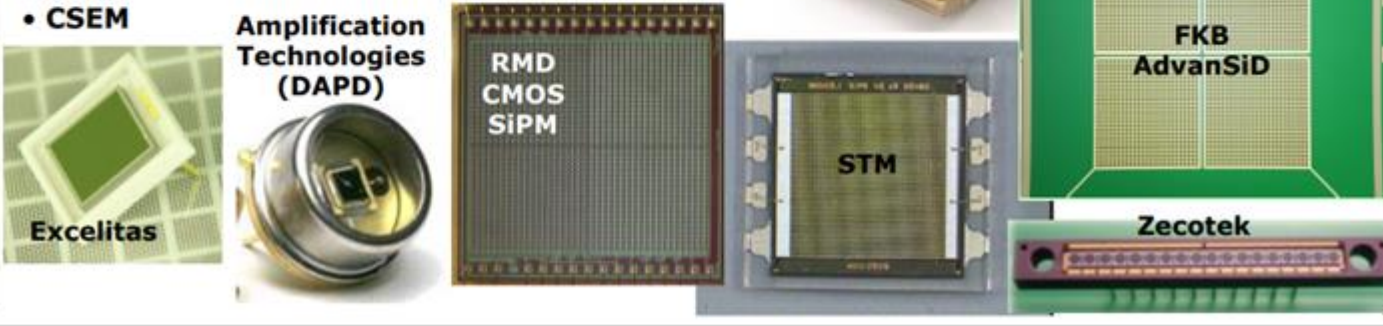


- **Yüksek kazanç**(10^5 - 10^7),
- **İyi zaman çözünürlüğü,**
- **Manyetik alana duyarlılık,**
- **Küçük boyutlar ,**
- **Düşük(<100V) çalışma voltajı.**

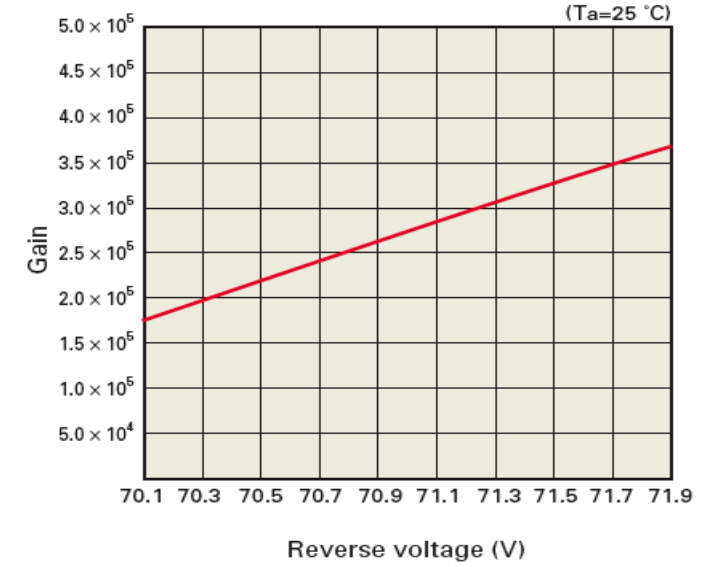
Kritik hususlar : Dinamik skala, gürültü(karanlık akım), optik çapraz-konuşma, tepki kararlılığı. Bunların voltaj ve sıcaklıkla değişimi

Many institutes/companies are involved in SiPM development/production:

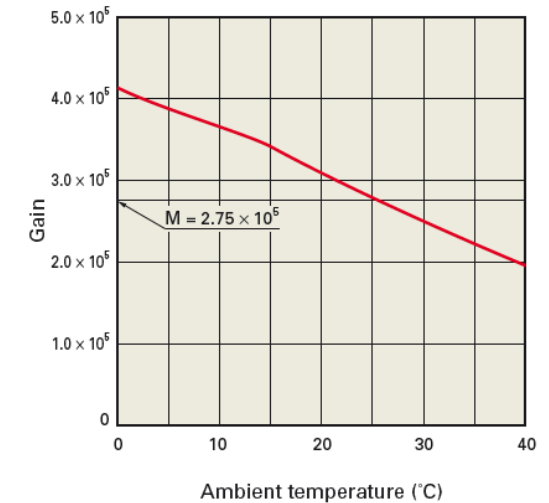
- CPTA, Moscow, Russia
- MePhi/Pulsar Enterprise, Moscow, Russia
- Zecotek, Vancouver, Canada
- Hamamatsu HPK, Hamamatsu, Japan
- FBK-AdvanSiD, Trento, Italy
- ST Microelectronics, Catania, Italy
- Amplification Technologies Orlando, USA
- SensL, Cork, Ireland
- MPI-HLL, Munich, Germany
- RMD, Boston, USA
- Philips, Aachen, Germany
- Excelitas tech. (formerly Perkin-Elmer)
- KETEK, Munich, Germany
- National Nano Fab Center, Korea
- Novel Device Laboratory (NDL), Beijing, China
- E2V
- CSEM



G.Collazuol - PhotoDet 2012

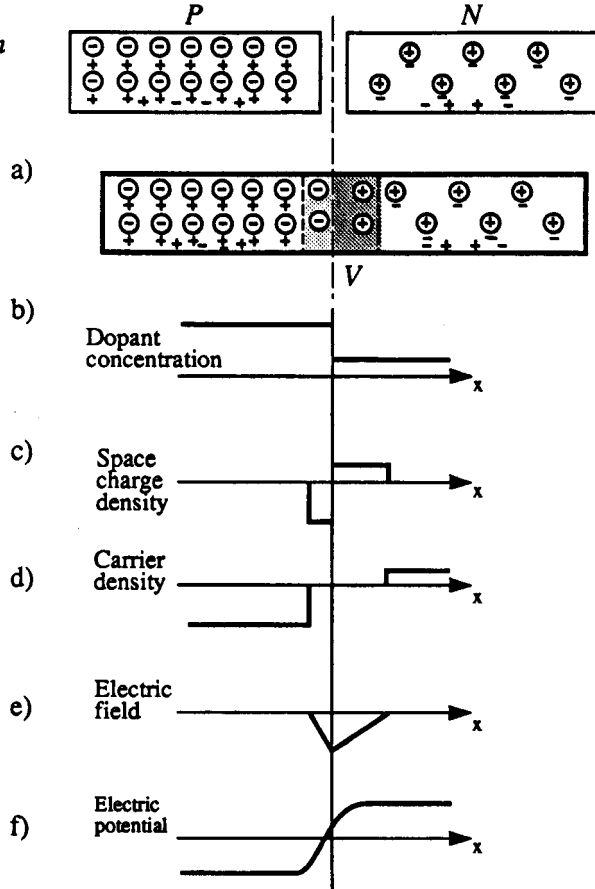


[Figure 7] Gain variation vs. temperature (at constant voltage)
(a) S10362-11-025U/C



⊖ Acceptor ion
⊕ Donor ion
+ Hole
- Electron

THE PN JUNCTION

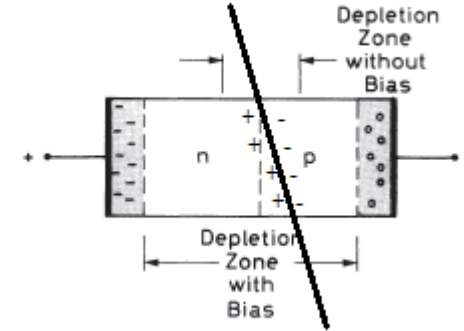
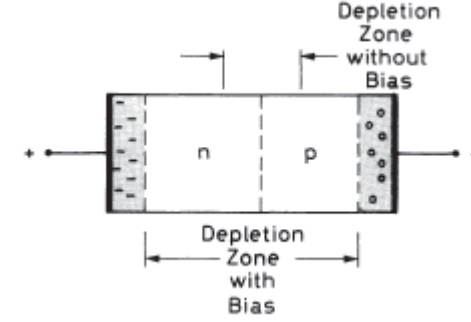


e^- 'ların p-, h^+ (deşik)'lerin n- bölgesine difüzyonu

→ Oluşan potansiyel farkı difüzyonu durdurur

İnce bir deplasyon bölgesi

Deplasyon bölgesinde serbest yük taşıyıcıları bulunmaz



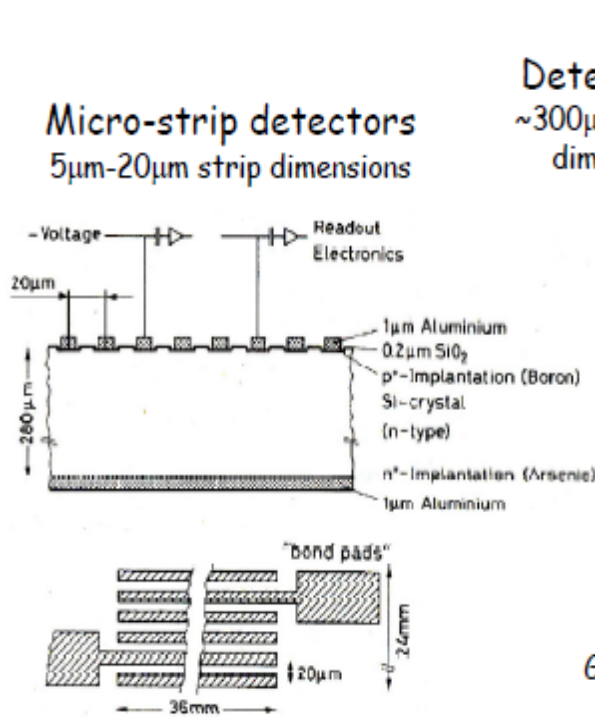
Ters polarizasyon uygulanarak ince tüketim bölgesi genişletilir.

- Tüketim bölgesinden yüklü bir parçacık geçecek olursa yolu üzerinde elektron deşik çiftleri oluşturur.
- Bu yüklerin toplanması bir sinyal oluşturur.

(A. Peisert, Instrumentation In High Energy Physics, World Scientific)

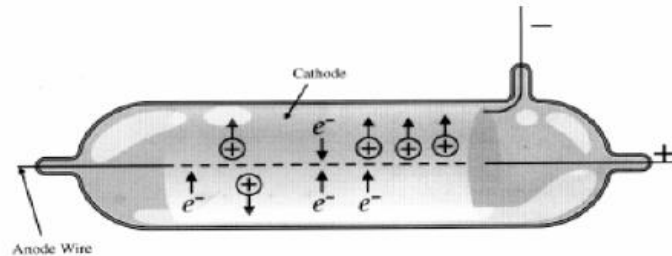
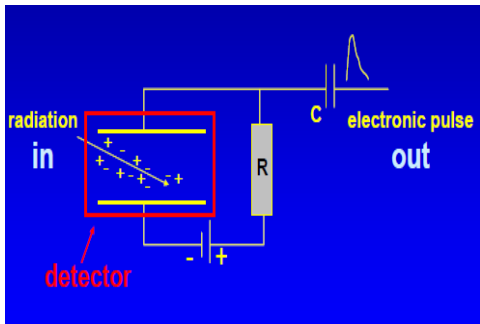
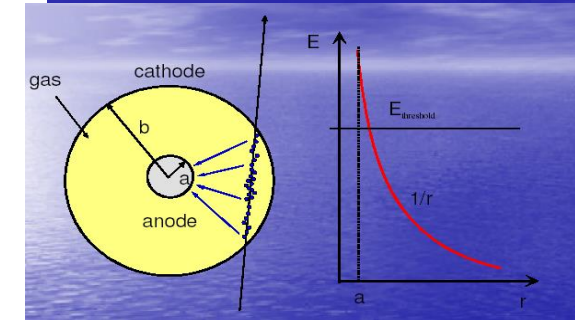
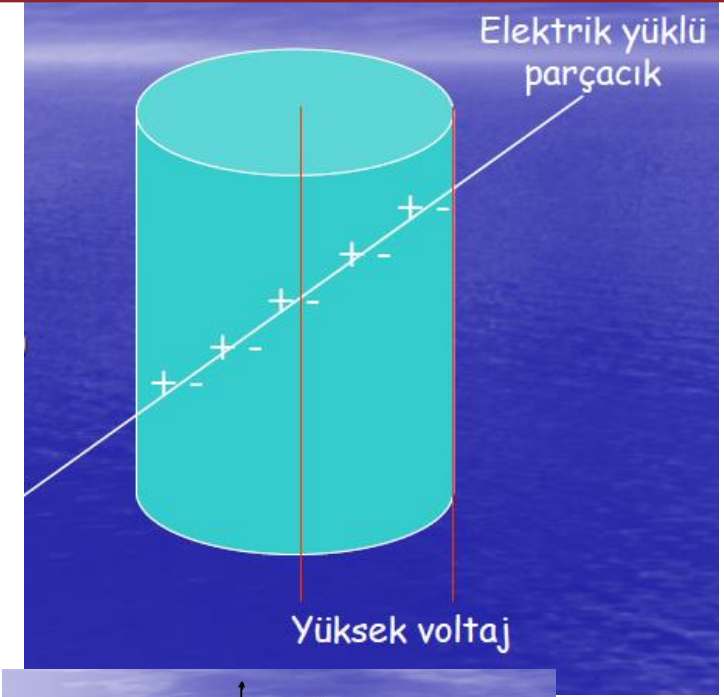
Position-Sensitive Si Detectors

Konum-duyarlı Silikon Dedektörler



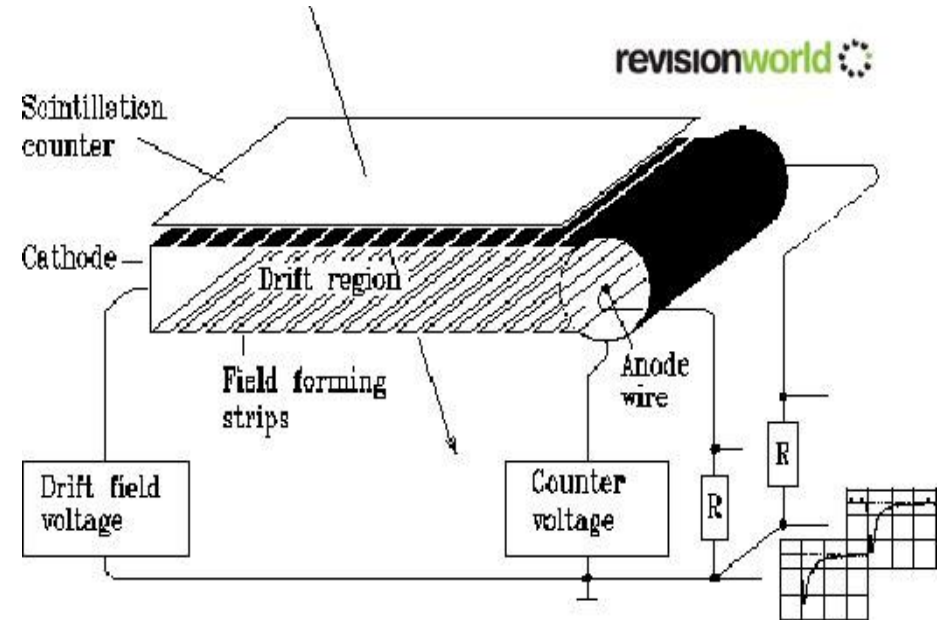
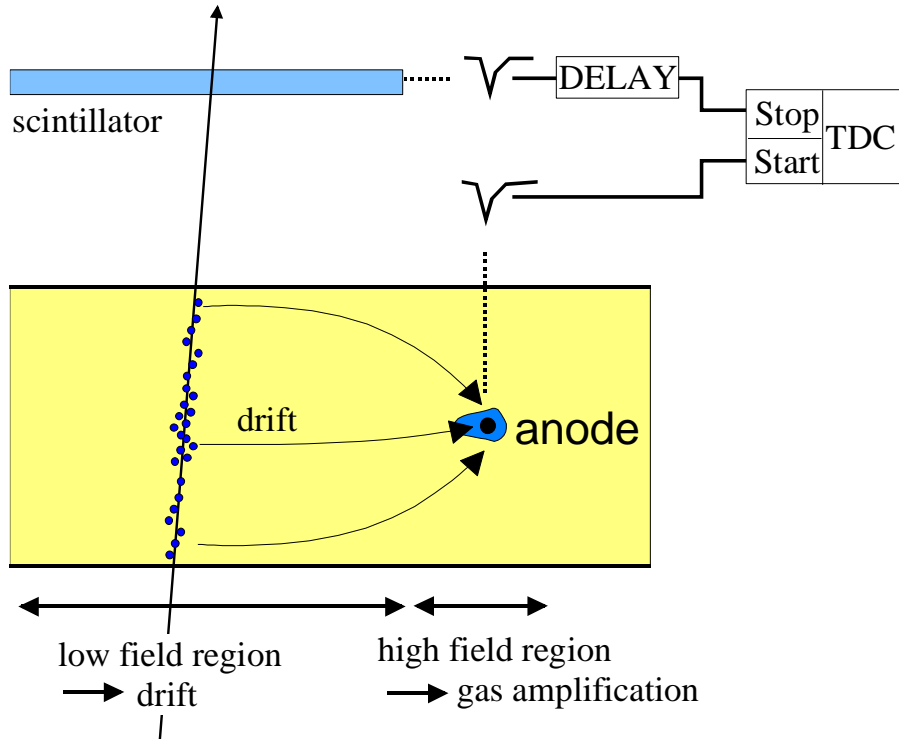
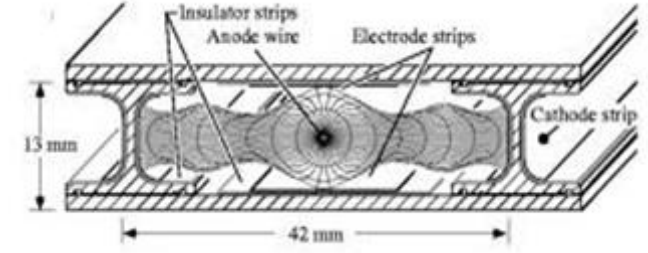
- Yarı iletken malzemelerden yapılırlar.
- n tipi bir gövde üzerini p+ tipi yarı iletkenin şerit veya piksel olarak biriktirilmesiyle oluşur.
- Gövdeden geçen radyasyon, gövdede elektron ve deşik çiftlerinin oluşmasına neden olur.
- Oluşan bu yükler bir potansiyel farkı uygulanarak toplanarak sinyal elde edilir.

- Yüklü parçacıklar geçtikleri yol üzerindeki gaz atomlarını iyonize eder.
- Pozitif iyonlar katoda negatif iyonlarsa anoda doğru hızlanarak hareket eder.
- Anot ve katotta oluşan sinyal parçacıkların algılanmasını sağlar.
- Gaz olarak genellikle yüksek kütleli soy gazlar (Ar gibi) kullanılır.
- Geiger-Müller sayacı tipik bir gaz dedektörüdür.
- Anotta oluşan sinyal sese de çevrilebilir.
- Parçacığın kimliği belirlenemese de aktivite ölçülerek radyasyonun şiddeti hakkında fikir sahibi olunabilir.

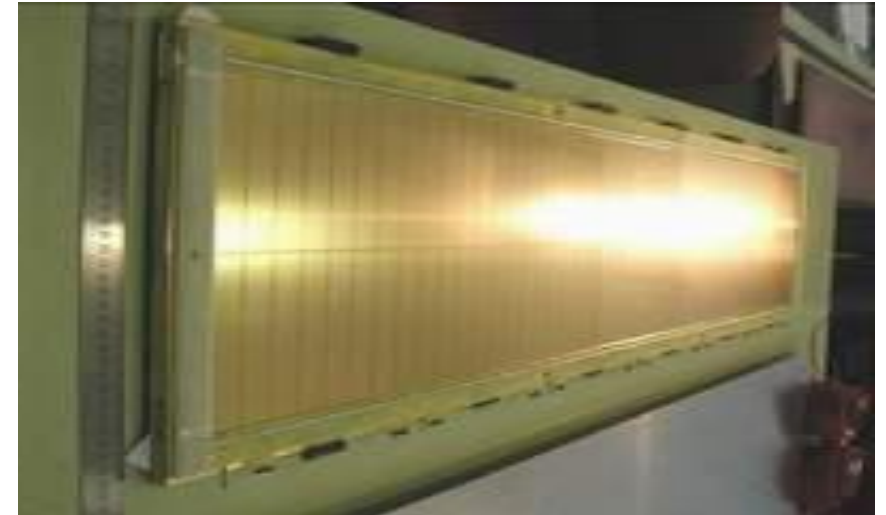
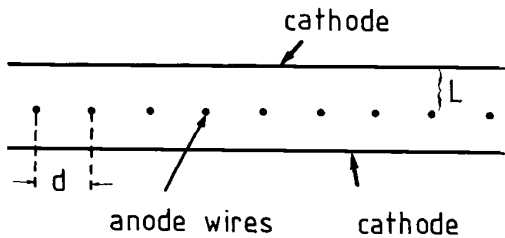
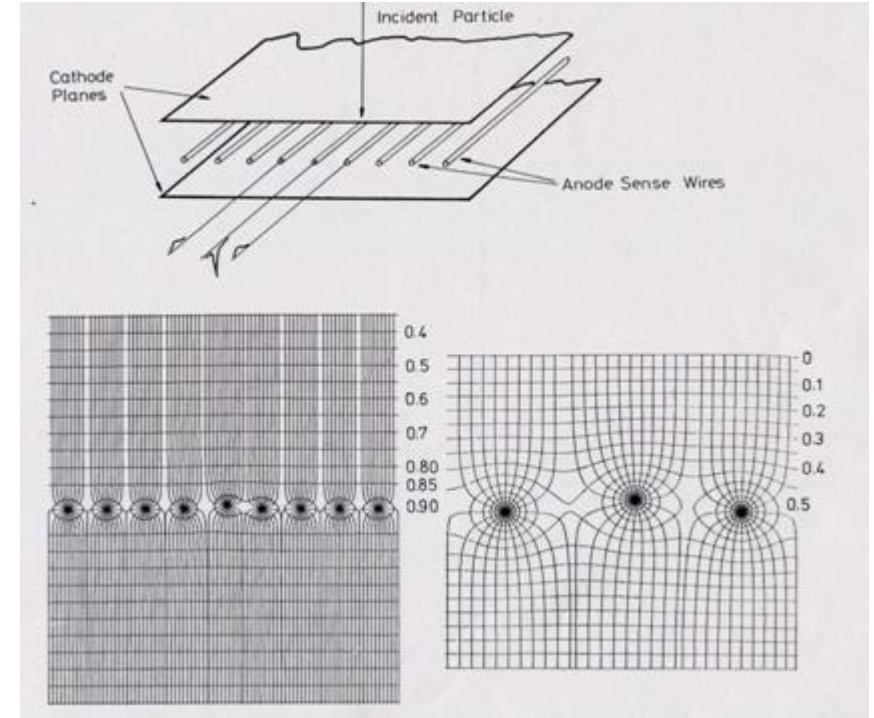


- İçerisinde gaz dolu (Ar) metal bir silindir ve eksenini boyunca gerilmiş bir odacıktan oluşur.
- Ortadaki tel $\sim +2$ kV, metal kap ise topraklanmıştır.

- Yapısı diğer telli -gazlı dedektörlere çok benzer.
- Çalışma prensibi parçacığın geçtiği an ile oluşan iyonların anoda gitmesi için geçen süreyi belirleyerek parçacıkların konumlarını ölçmeye dayanır.
- Zamanı başlat komutu diğer bir dedektör (sintilatör gibi) tarafından sağlanır.

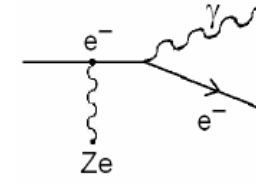


- Katot görevi yapan plakalar arasında anot tellerinin yerleştirilip içerisinde gaz ile doldurulmasıyla oluşur.
- Yüklü bir parçacığın geçmesiyle oluşan iyonizasyon yükleri toplanarak bir sinyal elde edilir.
- En büyük sinyalin hangi telden geldiği belirlenerek parçacığın geçtiği nokta belirler.
- Çok sayıda düzlem kullanılarak parçacığın yörüngesi bulunur.
- Ayrıca teller farklı düzlemlerde farklı yönlerde yerleştirilerek parçacığın geçtiği iki koordinat belirlenebilir.

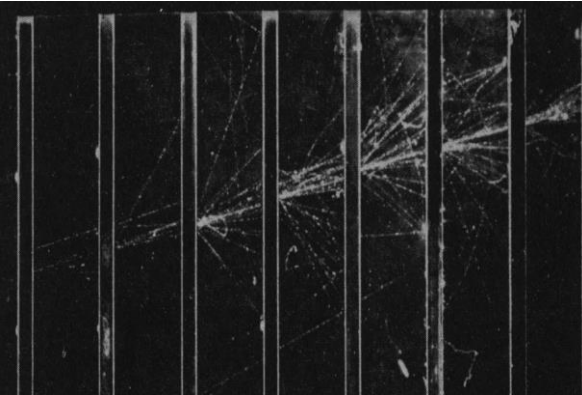
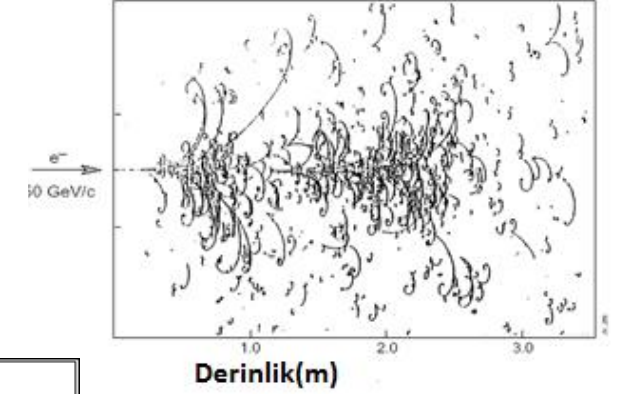
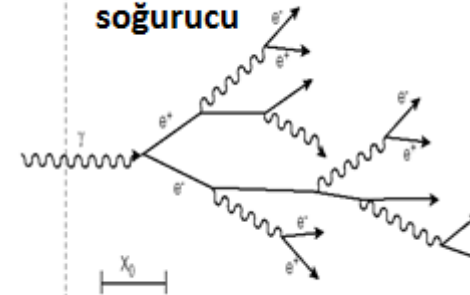
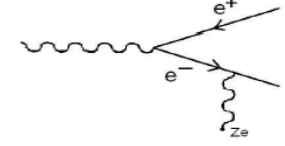


- Kalın bir soğurucu üzerine düştüklerinde yüksek enerjili elektronlar/fotonlar bir EM duş(çığ) oluştururlar.
- Duş, frenleme ışınması (bremsstrahlung) ve çift oluşumuyla gerçekleşir.
- Duşun gelişimi esnasında derinlik arttıkça ikincil parçacıkların sayısı artarken ortalama enerji azalır.
- Enerji kritik değere ulaştınca yeni parçacık üretimi durur ve duş gelişimi sönmeye başlar.
- Bu durumda parçacıklar iyonizyon ve uyarma yoluyla enerji kaybetmeye başlar.

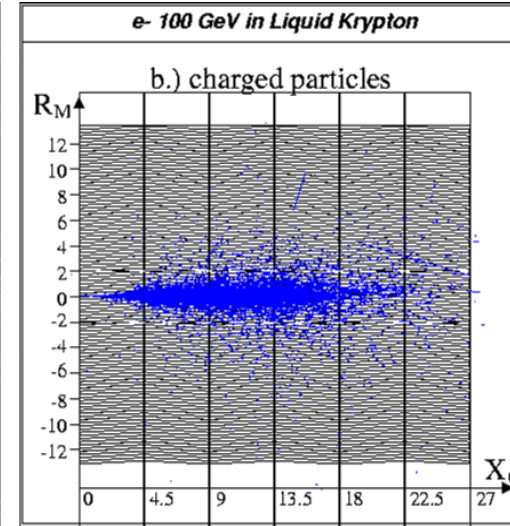
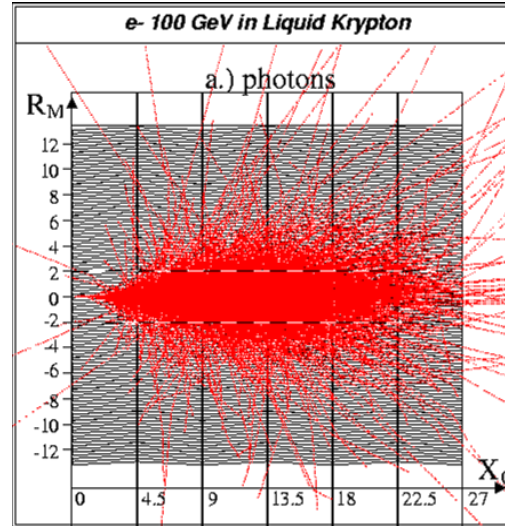
electron (Bremsstrahlung)



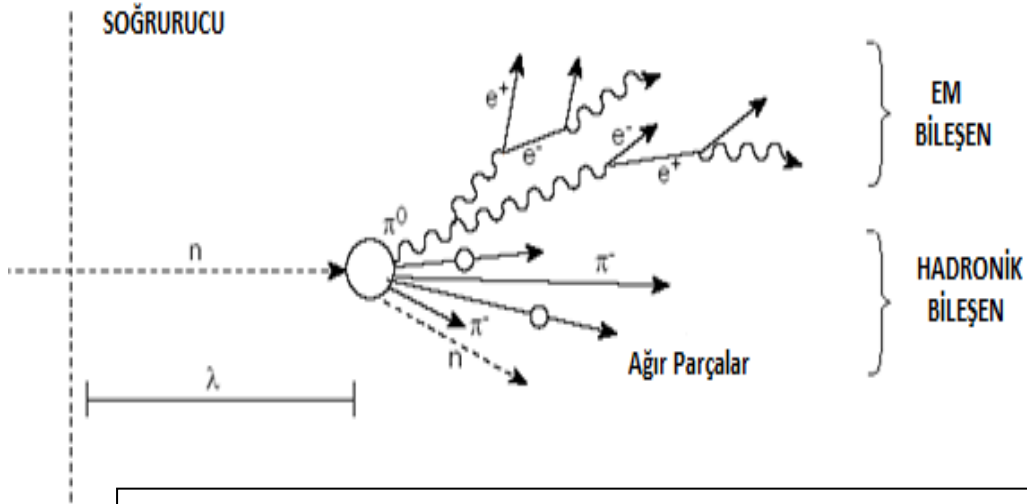
photon (Pair Production)



Kabarcık odasında ölçülen elektromanyetik duş.
Ara bölmeler kurşun plakalardan oluşuyor.



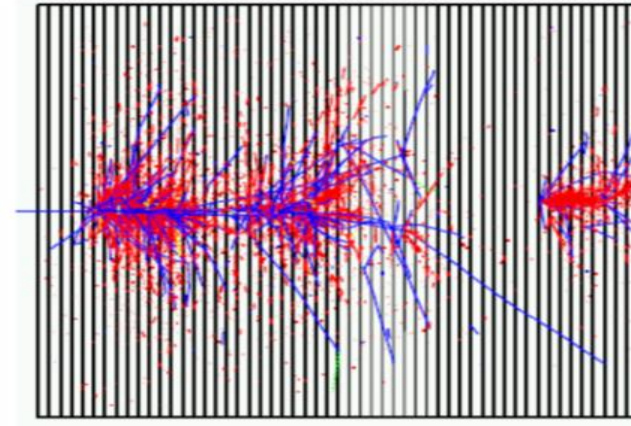
- 100 GeV'lik elektronların NA48 sıvı Kripton kalorimetresinde ürettiği duşun GEANT4 simülasyonu.
- Solda duştaki fotonlar, sağda elektronlar.



Nükleer Etkileşim Uzunluğu=Enerjitik bir hadronun bir nükleer etkileşime girmeden gidebileceği serbest yol.

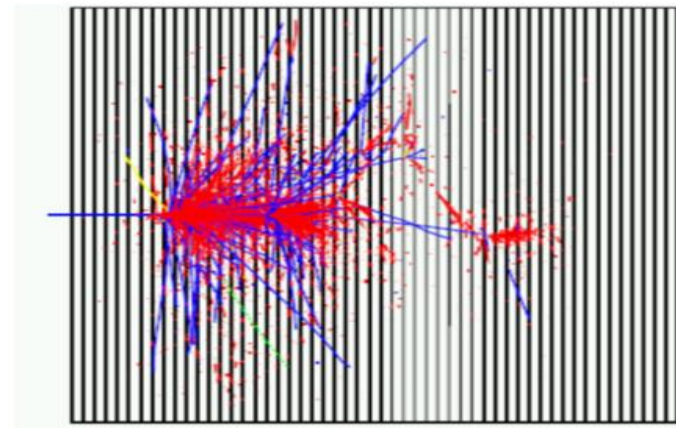
$$\lambda = 35A^{1/3} \text{ gcm}^{-2}$$

- Hadronik duşların ölçümü EM duşlara benzerdir.
- Hadronik duşlar EM duşlardan oldukça uzun ve geniştir.
- Oldukça değişik ve karmaşıktırlar.
- EM ve hadronik olmak üzere iki bileşeni vardır.



Maviler, yüklü hadronlar kırmızılar, em bileşenler

Hadronik duşlar elektromanyetik duşun aksine düzgün enerji birikimi göstermezler.



Kritik Enerji (ε) = Radyasyonla olan enerji kaybının iyonizasyonla olan enerji kaybına eşit olduğu enerji değeri.

Parçacığın enerjisi, *kritik enerji* değerine düştüğünde duş gelişimi durur.

$$\varepsilon = \frac{610MeV}{Z + 1.24}$$

Radyasyon uzunluğu (X_0) = Elektronun 1/e dışında bütün enerjisini ışına ile kaybettiği uzunluktur.

$$X_0 = \frac{716gcm^{-2}A}{Z(Z + 1)\ln(287/\sqrt{Z})}$$

Nükleer Etkileşim Uzunluğu (λ) = Enerjitik bir hadronun bir nükleer etkileşime girmeden gidebileceği serbest yol.

Bu parametreler parçacığın etkileştiği maddenin yapısına bağlıdır.

$\varepsilon(\text{Fe}) = 22 \text{ MeV}$
 $\varepsilon(\text{Cu}) = 20 \text{ MeV}$
 $\varepsilon(\text{Pb}) = 7.3 \text{ MeV}$
 $\varepsilon(\text{U}) = 6.5 \text{ MeV}$
 $\varepsilon(\text{Ar}) = 38 \text{ MeV}$

$$R_M = \frac{21MeV}{\varepsilon(MeV)} X_0$$

Moliere yarıçapı (R_M) = Kritik enerjideki bir elektronun bir radyasyon uzunluğu yol kat ettikten sonraki ortalama sapmasının ölçüsüdür.

Ortalama serbest yol = Enerjisi bir elektron-pozitron çifti yaratmaya yetecek bir fotonun çift yaratmadan önce gidebileceği ortalama yoldur $L_{\text{çift}} = 9X_0/7$

$$\lambda = 35A^{1/3} gcm^{-2}$$

- Enerji ölçmek için kullanılırlar.
- Kalorimetreler hem yüklü hem de yüksüz parçacıklara duyarlıdırlar.
 - Yüksüz parçacıklar madde ile etkileşir ve yüklü parçacık yaratırlar.
- Kalorimetrelerin boyutları enerjile logaritmik olarak değişir. Spektrometrelerin boyutlarıysa momentumun kareköküyle değişir.
 - Bu aynı mertebedeki ölçümler için kalorimetrelerin daha küçük olarak yapılmasını sağlar.
- Bölümlendirilmiş kalorimetreler duş hakkında daha çok bilgi verebilir. Böylece gelen parçacığın konumu ve açısı daha hassas ölçülebilir.
- Elektron, muon, hadron, ... parçacıklara verdiği tepkinin farklı olması parçacığın kimliğinin tanınması için kullanılabilir.
- Hızlı yanıt zamanları, yüksek parçacık oranlarında kullanılmalarına izin verir. LHC'de protonlar her 25ns'de bir kesişiyor.
- Enerjinin kalorimetredeki dağılım deseni hızlı online olay seçimi için kullanılabilir.
- Kayıp enerji ölçülebilir(Eğer detektör hermetikse). Bu ölçüm nötrino ve zayıf etkileşen parçacıklar için ipucu oluşturur.

- Tüm dedektör aynı matelyaldan yapılır. Örneğin NaI, BGO, CsI
- En büyük avantajları mükemmel enerji çözünürlüğüdür. Çünkü gelen parçacığın bütün enerjisi aktif ortamda depolanır.
- Boyuna ve enine şekillendirilmeleri çok kolay değildir. Bu da parçacık tanımlaması ve konum ölçümüne ihtiyaç duyulduğunda dezavantajdır.
- Telafi edici değildirler ve uygun matelyallerin çoğu büyük nükleer etkileşim uzunluğuna sahip olduğundan çok nadir olarak hadron kalorimetresi olarak kullanılırlar.

e= saf EM tepki
h=saf hadronik tepki

$e / h = 1$ Telafi edici

$e / h \neq 1$ Telafi etmeyici

- **Yarıiletken kalorimetreler**
 - İyonize izler yarıiletken materyalin iletim ve valans bandında elektrik sinyali üretimine yol açan elektron-deşik çiftleri oluşturur.
 - Örneğin germanyum ve silikon kristaller.
- **Çerenkov Kalorimetreleri**
 - Ortam saydam bir materyaldir.
 - Çıg içerisindeki relativistik elektron ve pozitronlar Çerenkov ışınımına yol açar.
 - Sinyal ışık formunda toplanabilir.
 - Yaygın kullanılan tipleri Kurşun-cam kalorimetrelerdir.
- **Sintilasyon kalorimetreleri**
 - Ortam iyonize yüklerin floresans yoluyla ışık ürettikleri bir ortamdır.
 - Örneğin BGO, CsI, PbWO₄ gibi.
- **Soy-gaz kalorimetreleri**
 - Ortam krojenik sıcaklıklarda çalışan soygazlardır (Ar, Kr, Xe).
 - Hem iyonizasyon hem de sintilasyon sonucu oluşan sinyaller toplanabilir.
 - Geniş skaladaki yüksek enerji uygulamaları yük toplama prensibine dayanır.

| | Nal(Tl) | CsI(Tl) | CsI | BGO | PbWO ₄ |
|------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------------|
| yoğunluk (g/cm ³) | 3.67 | 4.53 | 4.53 | 7.13 | 8.28 |
| X ₀ (cm) | 2.59 | 1.85 | 1.85 | 1.12 | 0.89 |
| R _M (cm) | 4.5 | 3.8 | 3.8 | 2.4 | 2.2 |
| bozunum zamanı(ns) | 250 | 1000 | 10 | 300 | 5 |
| yavaş bileşen | | | 36 | | 15 |
| yayınım tepesi(nm) | 410 | 565 | 305 | 410 | 440 |
| yavaş bileşen | | | 480 | | |
| ışık çıktısı γ/MeV | 4×10 ⁴ | 5×10 ⁴ | 4×10 ⁴ | 8×10 ³ | 1.5×10 ² |
| Fotoelektron çıktısı (Nal göre) | 1 | 0.4 | 0.1 | 0.15 | 0.01 |
| Radyasyon dayanıklılığı(Gy) | 1 | 10 | 10 ³ | 1 | 10 ⁵ |

| | Ar | Kr | Xe |
|---------------------------------|------|------|------|
| Z | 18 | 36 | 58 |
| A | 40 | 84 | 131 |
| X ₀ (cm) | 14 | 4.7 | 2.8 |
| R _M (cm) | 7.2 | 4.7 | 4.2 |
| Yoğunluk (g/cm ³) | 1.4 | 2.5 | 3.0 |
| İyonizasyon Enerjisi (eV/çift) | 23.3 | 20.5 | 15.6 |
| Kritik Enerji (MeV) | 41.7 | 21.5 | 14.5 |
| Doyumda sürüklenme hızı (mm/μs) | 10 | 5 | 3 |

Kritik Enerji= Radyasyonla olan enerji kaybının iyonizasyonla olan enerji kaybına eşit olduğu enerji değeri.

Parçacığın enerjisi, *kritik enerji* değerine düştüğünde duş gelişimi durur.

Radyasyon uzunluğu=Elektronun 1/e dışında bütün enerjisini kaybettiği uzunluktur.

Ortalama serbest yol = Enerjisi bir elektron-pozitron çifti yaratmaya yetecek bir fotonun çift yaratmadan önce gidebileceği ortalama yoldur $L_{\text{çift}} = 9X_0/7$

Moliere yarıçapı= Kritik enerjideki bir elektronun bir radyasyon uzunluğu yol kat ettikten sonraki ortalama sapmasının ölçüsüdür.

Nükleer Etkileşim Uzunluğu=Enerjitik bir hadronun bir nükleer etkileşime girmeden gidebileceği serbest yol.



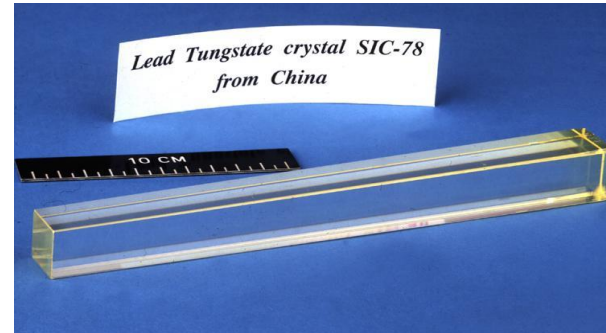
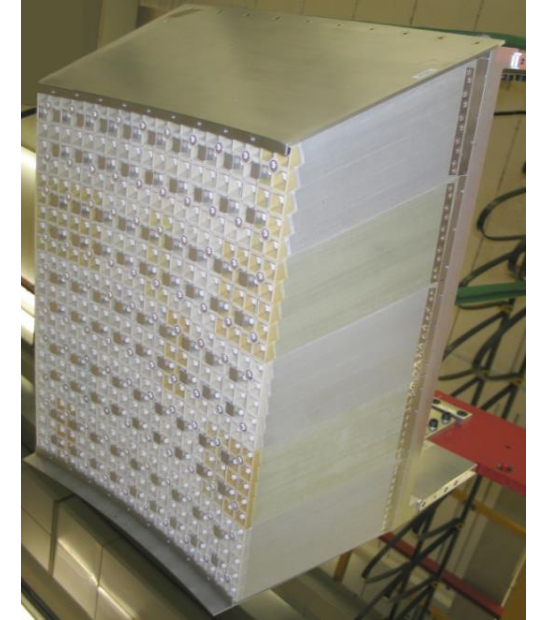
CMS'in Elektromanyetik Kalorimetresinin (EKAL) kristalleri

| | |
|-------------------------|------------------------|
| Yüksek yoğunluk | 8.28 g/cm ³ |
| Kısa radyasyon uzunluğu | 0.89 cm |
| Küçük Moliere yarıçapı | 2.19 cm |
| Kısa bozunum zamanı | 10 nsec |

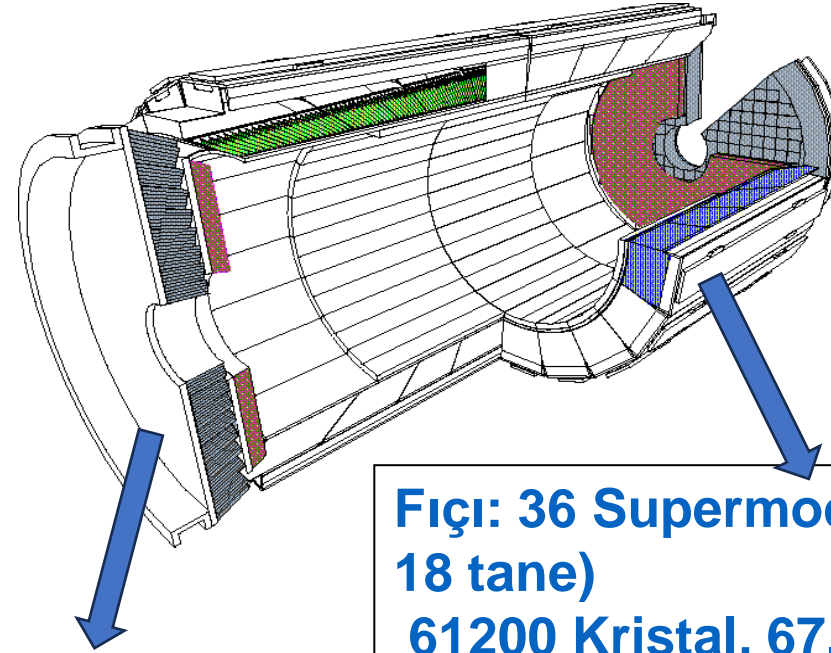
Yayınlanan ışığın tepe dalgaboyu 430 nm
Işık çıkışı (BGO'nun) ~ 5%
Radyasyon dayanıklı.



3662 kristal içeren Kapak D kalorimetresi



• CMS ECAL



5×5 Süperkristal

**Fiçı: 36 Supermodül (her yarı-fiçıda
18 tane)**

61200 Kristal, 67.4ton

**~ 24 x 24 x 230 mm³ (25.8 X0)
çığ foto-diyot**

Kapaklar:

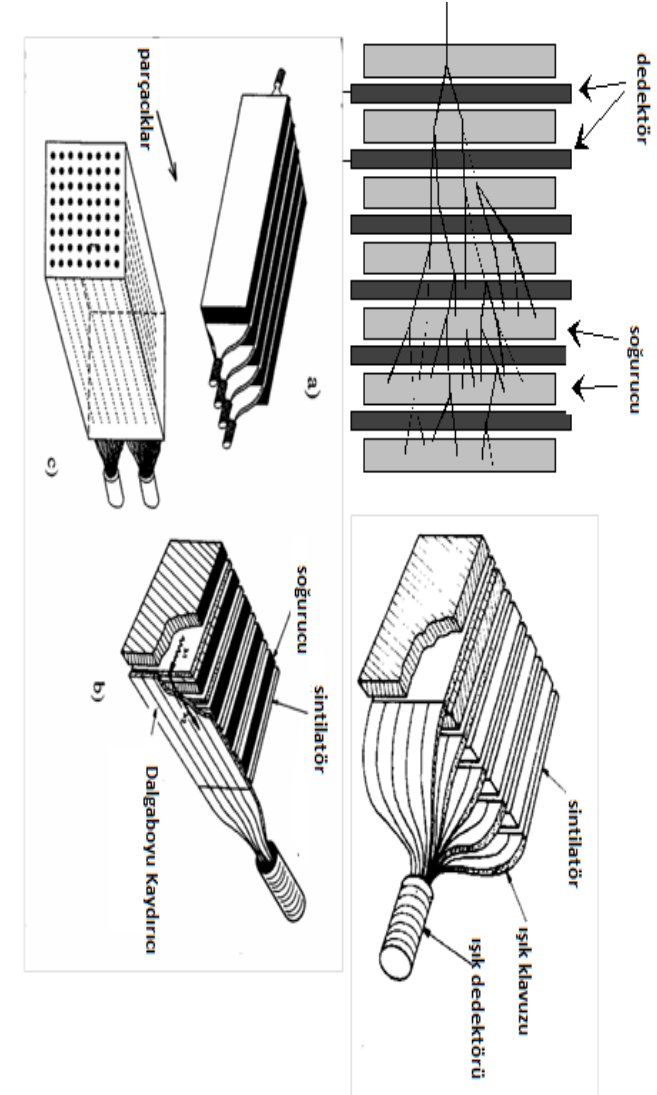
14648 Kritical, 22.9 ton

30 x 30 x 220 mm³ (24.7 X0)

Vakum foto-triyot



- Çözünürlüklerinin homojen kalorimetrelerden daha kötü olmasına rağmen, örnekleme kalorimetrelerinin boyuna ve enine bölümlendirilmeleri görece olarak kolaydır.
- Daha iyi konum çözünürlüğü ve parçacık tanımlaması sunarlar.
- Hızlandırıcılarda universal olarak hadron kalorimetreleri olarak kullanılırlar.
- Kabul edilebilir dedektör kalınlıklarında (<2m) yeterli etkileşim uzunluğu sağlarlar.
- **Telefi edici yapılabilirler.**
- Kullanılan aktif elemana göre sınıflandırılabilirler.
- Sıklıkla kullanılan soğurucu materyaller: Kurşun, demir, bakır ve uranyum.

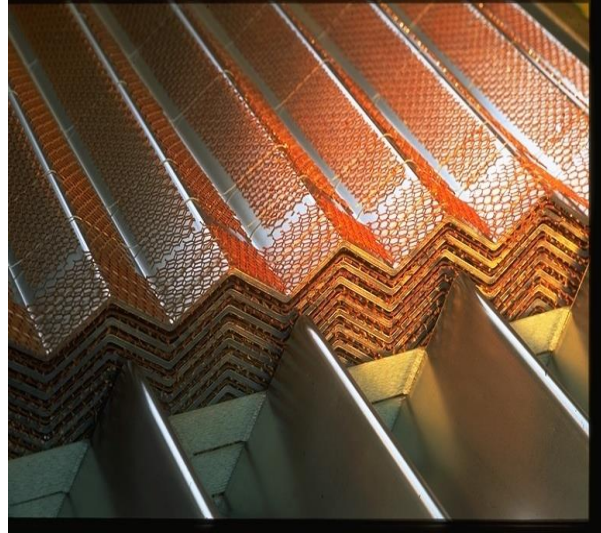
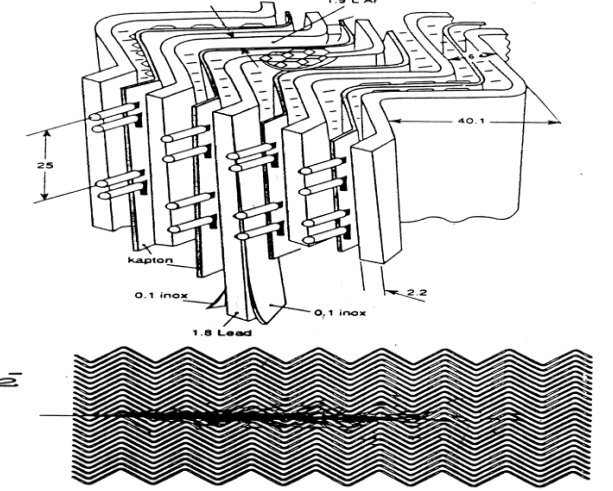


- Kullanılan örnekleme kalorimetre çeşitleri
- Kullanılan aktif materyale göre sınıflandırılırlar:
 - Sintilasyon kalorimetreleri
 - Gaz kalorimetreleri
 - Katıhal kalorimetreleri
 - Sıvı kalorimetreler

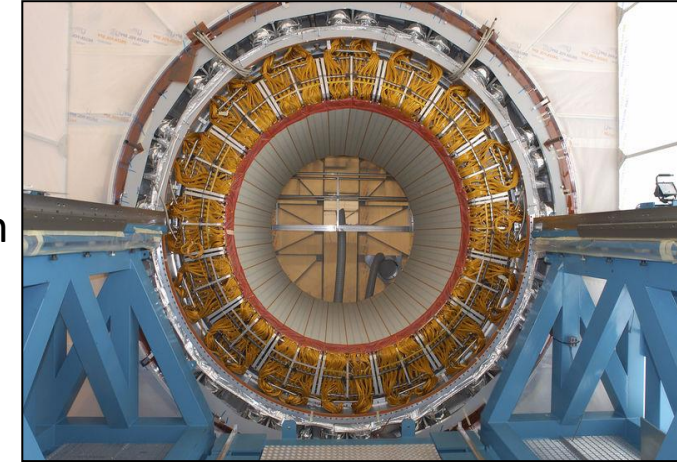
Argonu sıvı durumda tutmak için
Kalorimetre -184°C'de tutulur.

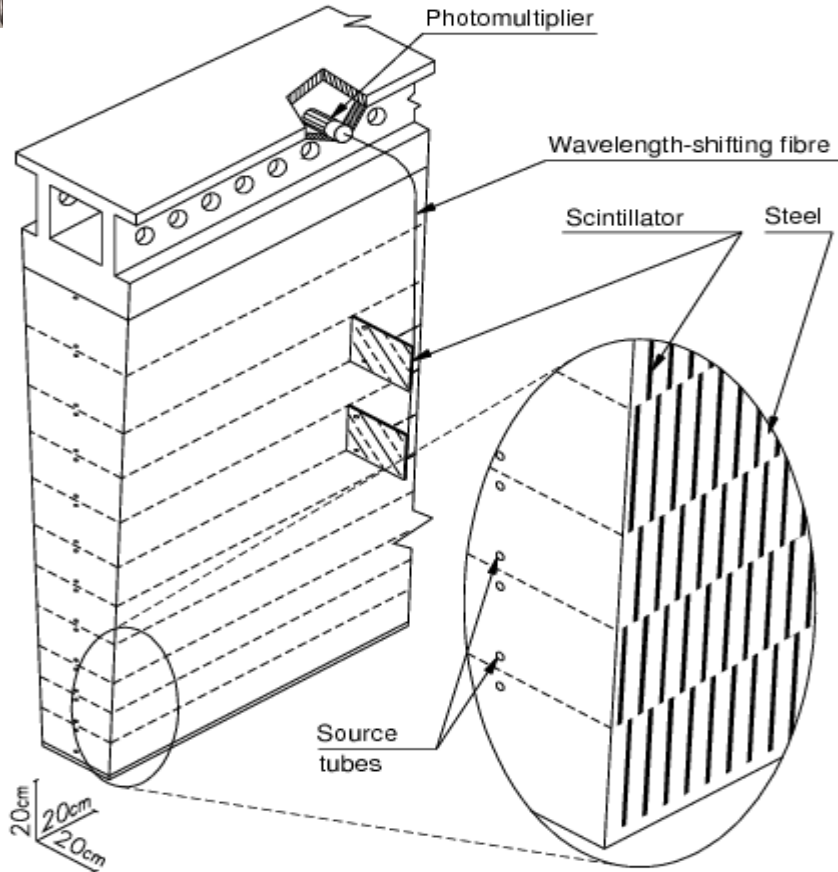
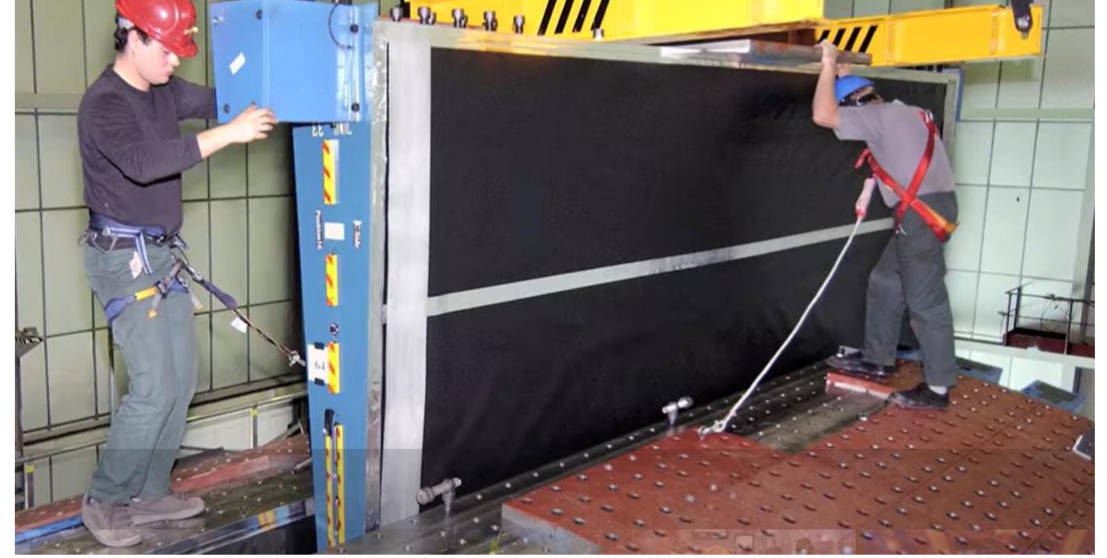
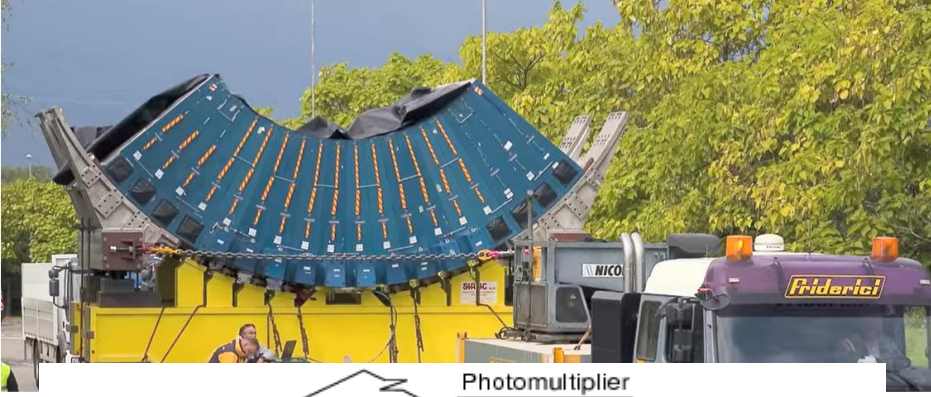
Akordiyon Yapı
Kurşun plakalar
Cu /kaptan elektrotlar (HV ve sinyal için)
Boşluklarda sıvı Argon.

ATLAS SIVI-ARGON EM KALORİMETRE

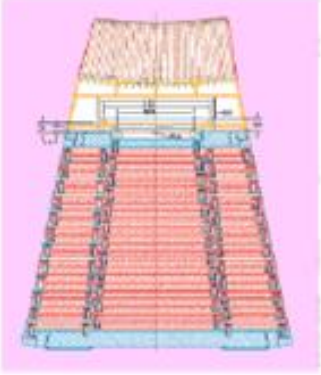


- Fıçı 6.4m uzunluğunda ve 53cm kalınlığında, 110,000 kanal.
- İleri, Elektromanyetik ve Hadronik Kapak kalorimetreler LAr kalorimetrelerdir.
- EM kapakların her birinin kalınlığı 0.632m ve yarıçapı 2,077m
- İleri kalorimetre yarıçapı 0.455m ve kalınlığı 0.450 m olan 3 modüle sahiptir.

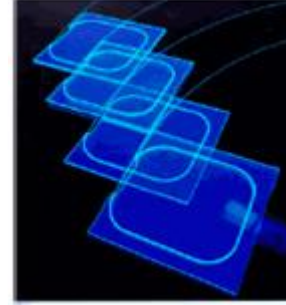




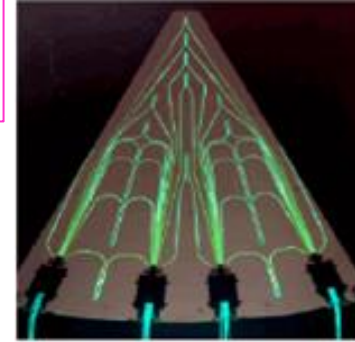
- Karo(Tile) Kalorimetre yaklaşık 2.6m uzunluğunda **420,000 plastik sintilatörden(40ton) karodan oluşur.**
- Uzatılmış iki fiçı kalorimetre ise 2.6m uzunluğundaki 64 kamadan oluşur.
- Sintilatörde üretilen ışık fotoçoğaltıcı tüplere dalgaboyu kaydırıcı fiberlerle taşınır.
- 9500 tane fotoçoğaltıcı tüp vardır.
- 2900 ton ile ATLAS'ın en ağır parçasıdır.



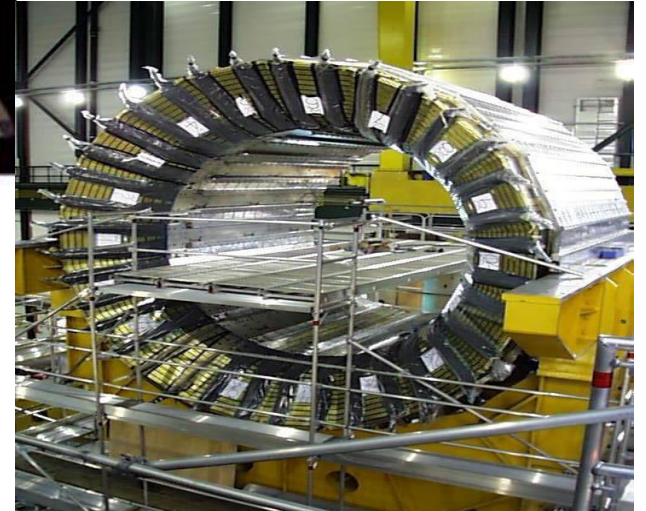
- Yüksek yoğunluğundan dolayı soğurucu olarak prinç (%70 Cu ve %30 Zn) kullanılır.
- Fıçı hadronik kalorimetre 4.3 m uzunluğunda iki parçadan oluşur.
- Fıçı yüksek manyetik alan bölgesinde bulunur.
- Mıknatis içerisindeki fıçı kalınlığı yeterli olmadığı için mıknatis dışına da sintilatör tabakaları yerleştirilmiştir.
- Birleşik fıçı dedektörünün kalınlığı $\sim 11\lambda$



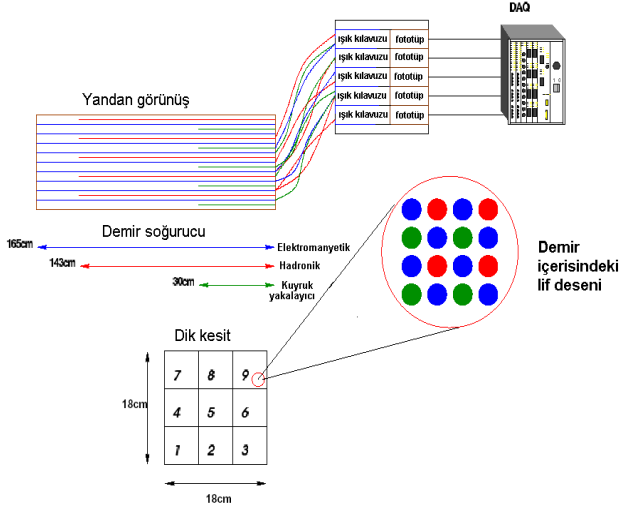
- Karolardan yayımlanan ışık 410-425nm (mavi-mor)
- Dalgaboyu kaydırıcılar bunu yeşile (490nm) çevirir
- Yeşil ışık saydam fiber rehberler tarafından megakaronun sınırında bulunan bağlayıcılara(connectors) taşınır.



- Megakarolar büyük sintilatör tabakalarıdır.
- Bunlar $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.87 \times 0.87$ boyutlarındaki karolara bölünür.
- Megakarolardan gelen ışık sinyalleri dalgaboyu kaydırıcı fiberler ile algılanır.
- Fiber çapı 1mm dir.

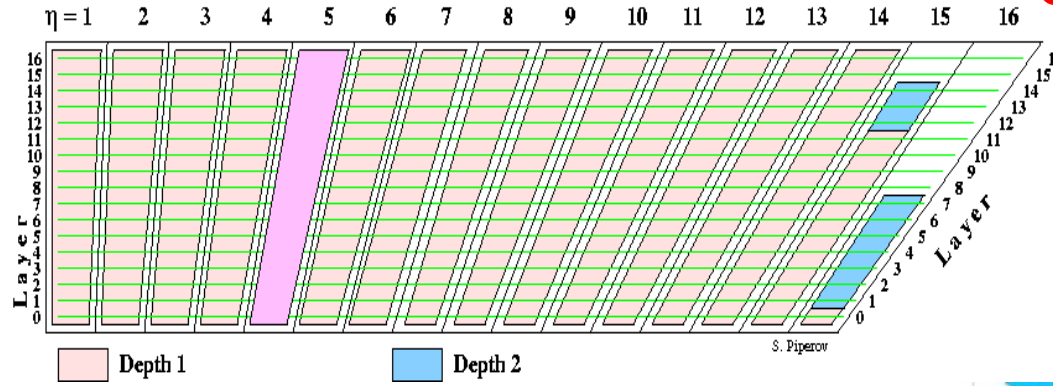
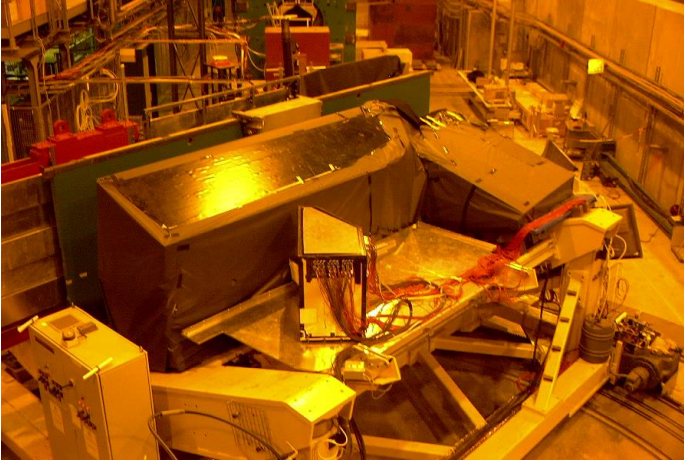


CMS ÇOK İLERİ KALORİMETRE



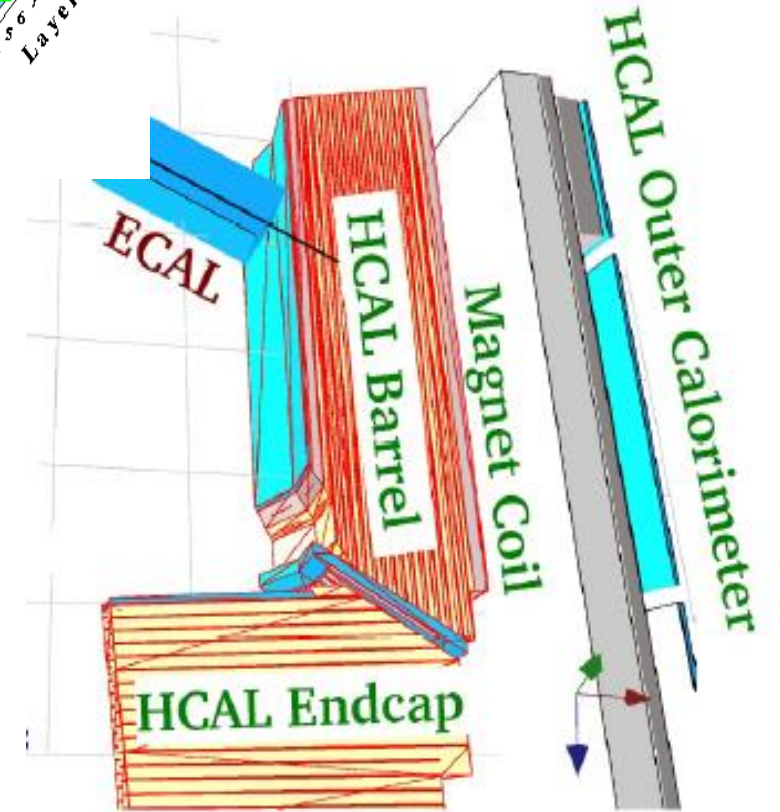
- Demir içerisine yerleştirilmiş optik fiberlerden oluşur.
- Sinyal üretimi çerenkov mekanizmasıyla gerçekleşir.
- Fiber içerisinde üretilen ışık yine bu fiberler aracılığıyla fototüplere taşınır.
- Radyasyon dayanıklıdır.
- Türkiye'nin CMS deneyinde en çok katkı yaptığı kalorimetredir



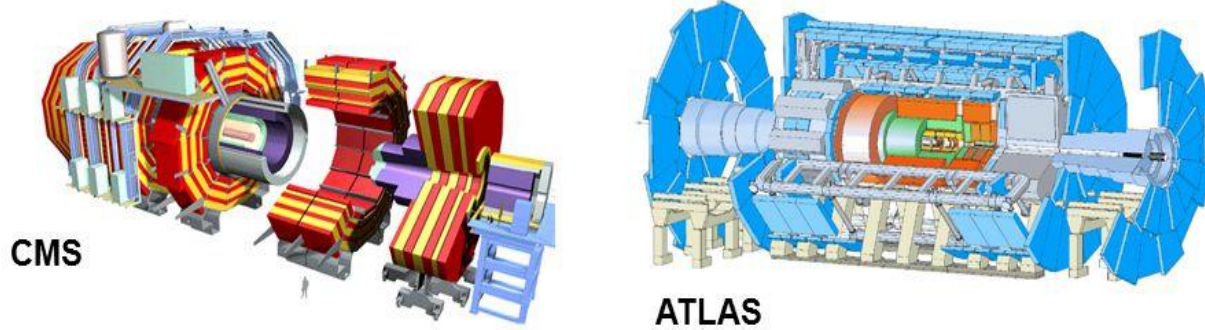


CMS IŞIN DEMET TESTLERİ

- Detektörler planlanırken maliyet-hassiyet optimizasyonu yapılır.
- Çok hassas \Rightarrow çok pahalı
- Çok ucuz \Rightarrow yetersiz hassasiyet
- Planlanan dedektörlerin simülasyonları yapılır.
- Önce protipler yapılır, ışın demet testleriyle test edilir.
- Test sonuçlarına göre gerekli düzenleme/değişiklikler yapılarak tam boyutlu dedektör inşasına başlanır.



The LHC detectors

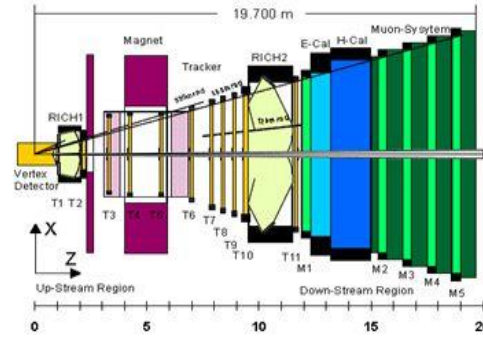
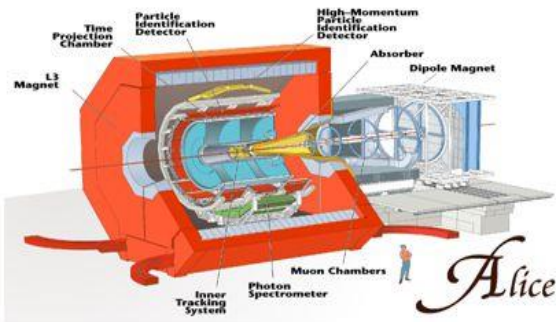


CMS

ATLAS

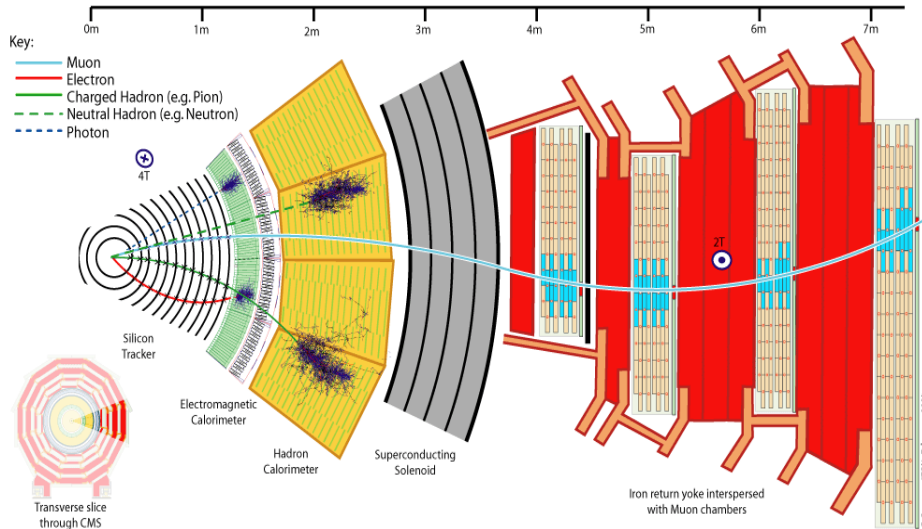
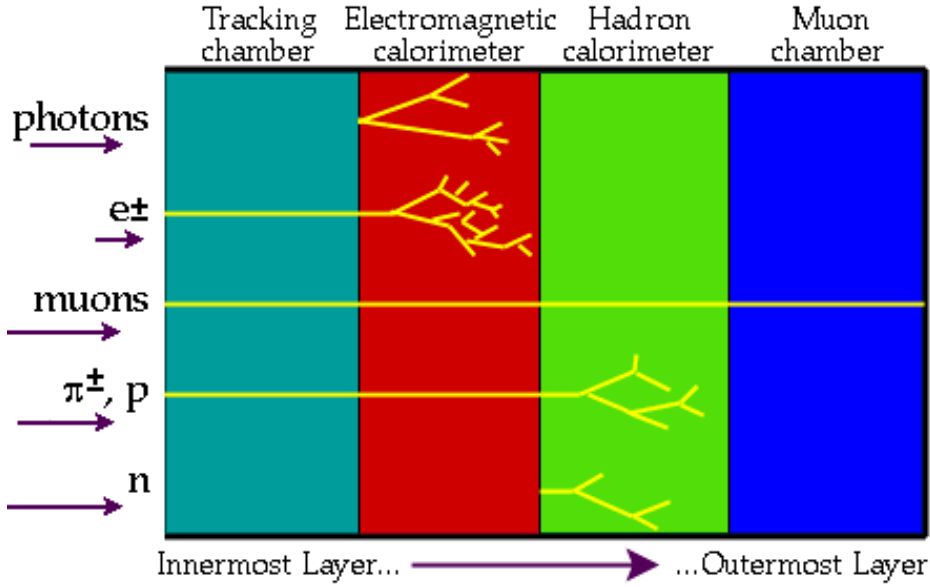
3.5 Petabytes/year $\approx 10^9$ events/year

- CMS ve ATLAS genel amaçlı
- Higgs, SM, SM Ötesi
- LHCb ve ALICE özel amaçlı
- LHCb, B Fiziği
- ALICE Ağır İyon Fiziği

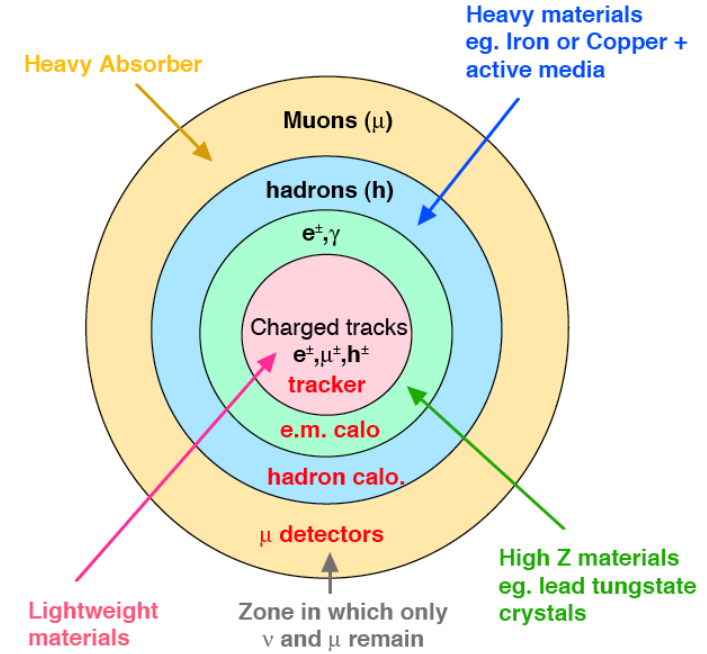
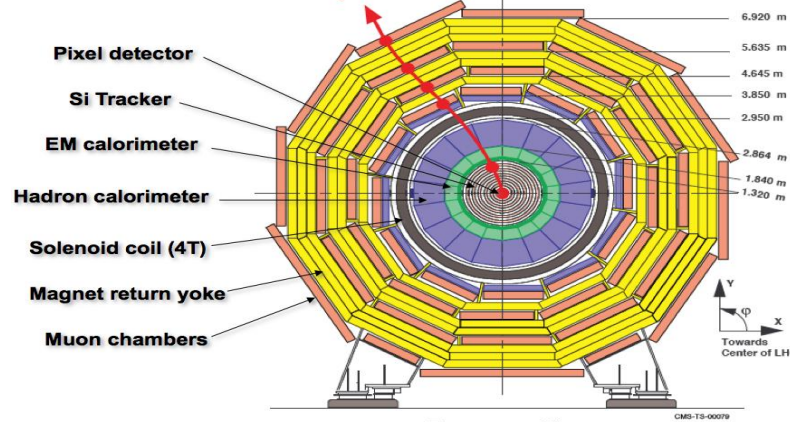


LHCb





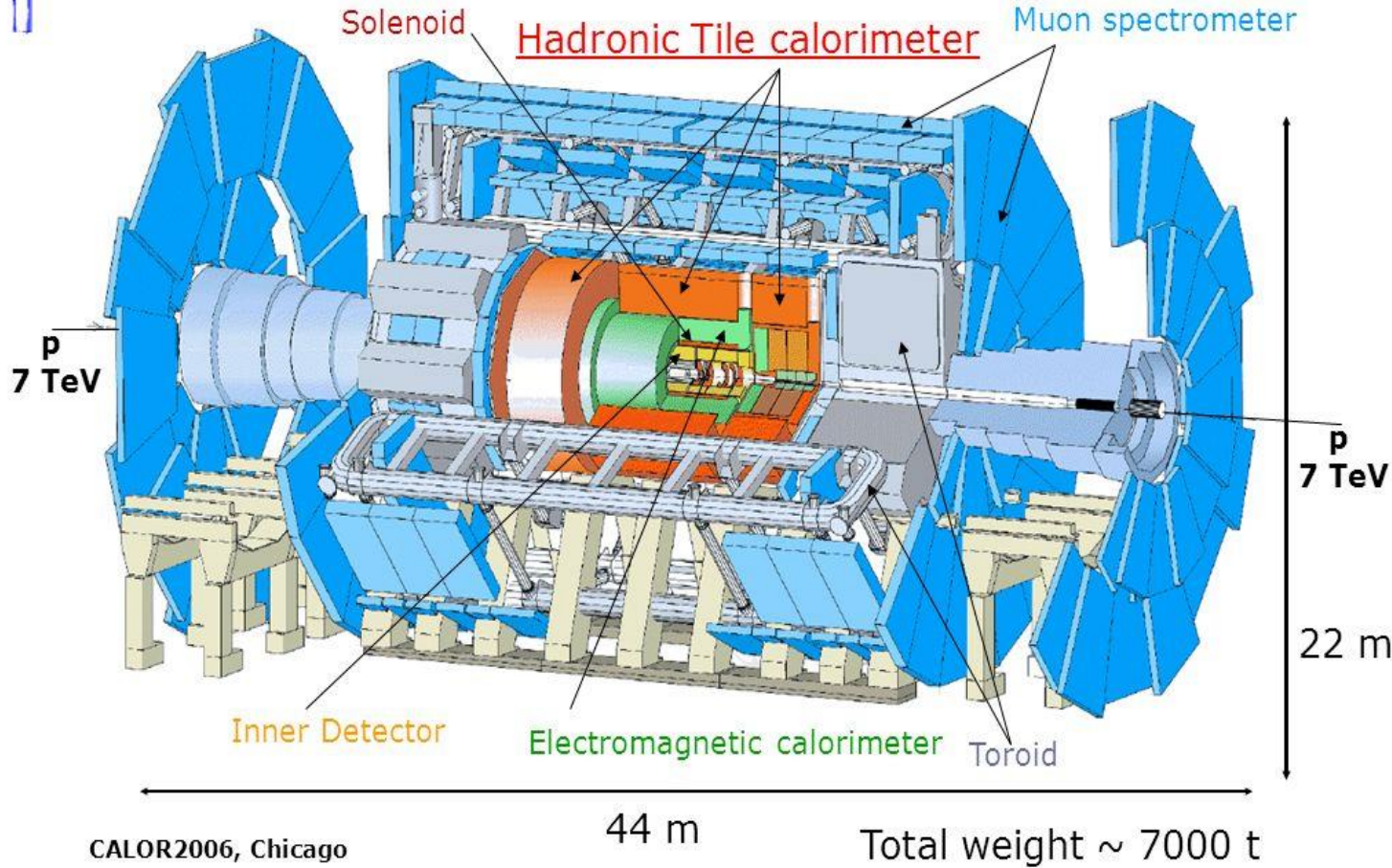
- Soğansı yapı
- İzleyici, EM , HAD kalorimetre
- En dışta muon dedektörü



- Yüklü parçacıklar izleyicide
- Elektron ve fotonlar EM kalorimetrede
- Hadronlar (proton, nötron, pion, vs) hadronik kalorimetrede
- Muonlar en dıştaki muon dedektöründe ölçülür.
- Manyetik alan parçacık izlerini bükerek momentum ölçümünü sağlarlar.

ATLAS: A Toroidal LHC Apparatus

ATLAS detector



3000

Scientific authors



181

Institutions



42

Countries



1200

Doctoral students

Turkey

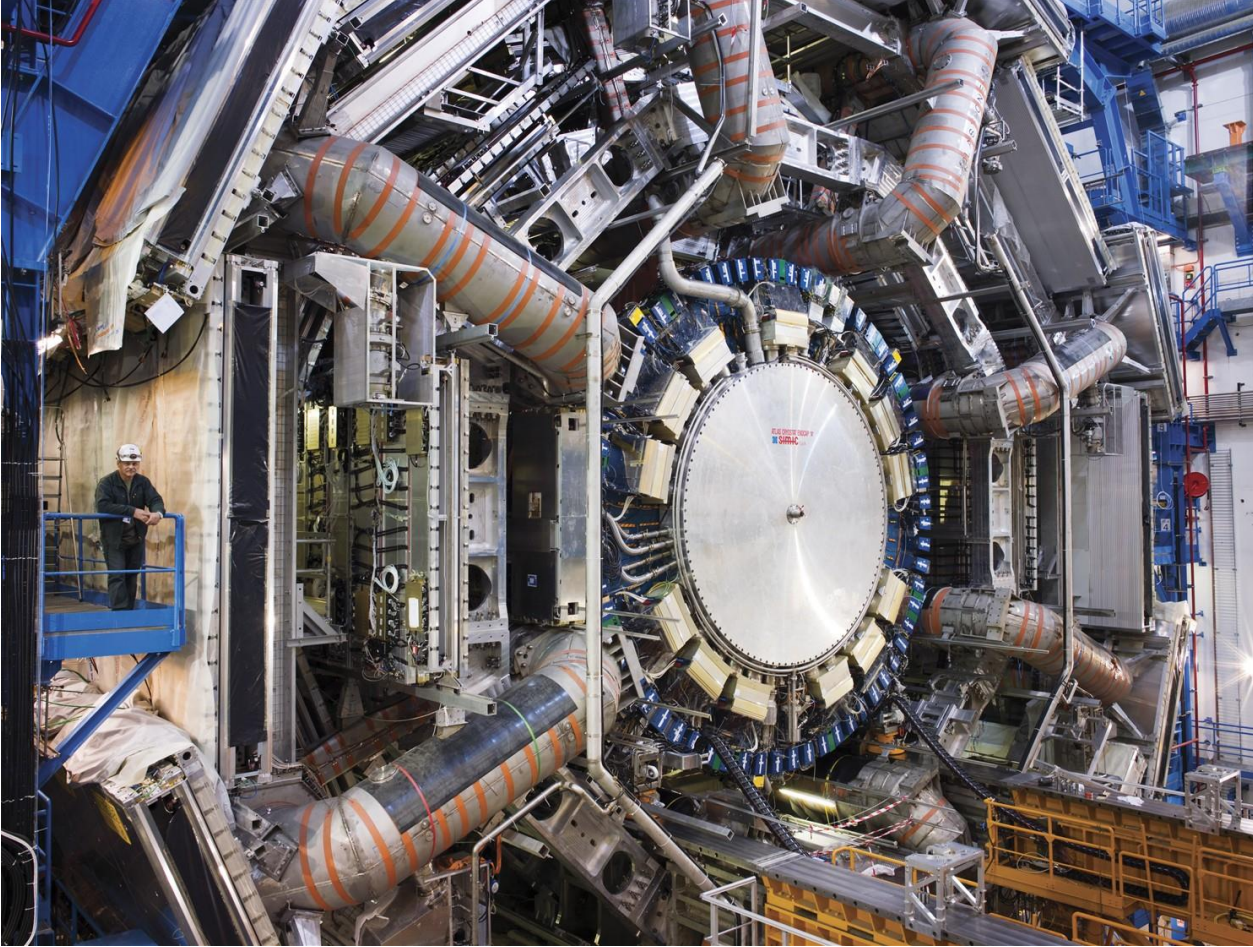
2 ATLAS institutions (6 institutes)

37 (16) ATLAS members (authors) of which 7 students

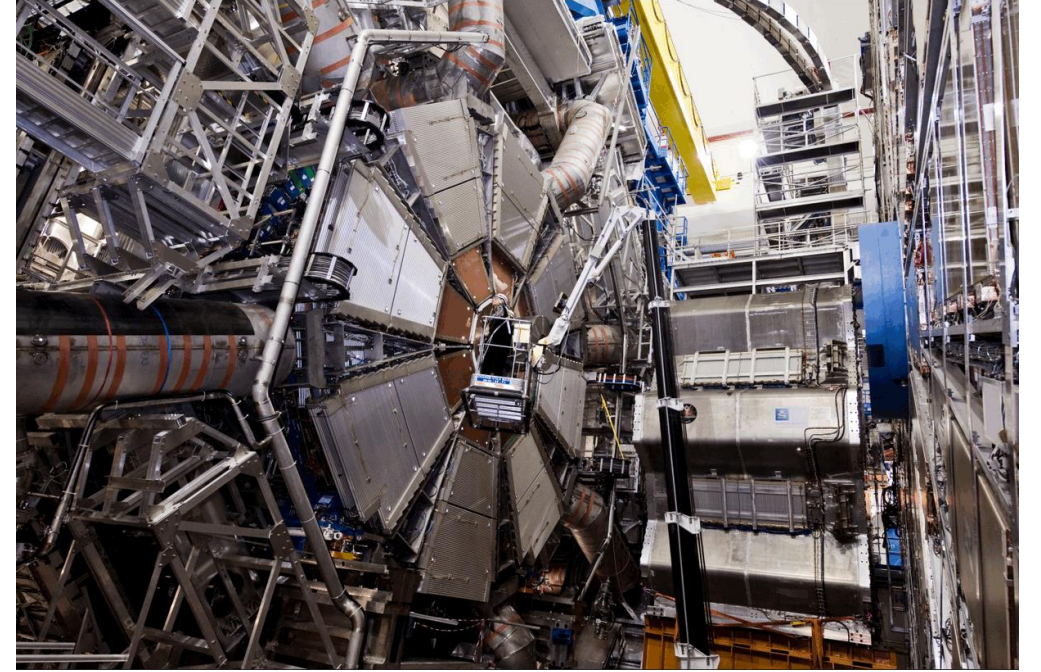
Funding agency (contact physicist): Turkey (Metin Arik, Serkant Cetin)

Member institutions:

- **Bogazici cluster:** Department of Physics, Bogazici University, Istanbul [↗](#), Department of Physics Engineering, Gaziantep University, Gaziantep [↗](#), Istinye University, Sariyer, Istanbul [↗](#), Department of Physics, Istanbul University, Istanbul [↗](#)
- **Ankara cluster:** Division of Physics, TOBB University of Economics and Technology, Ankara [↗](#), Department of Physics, Ankara University, Ankara [↗](#)



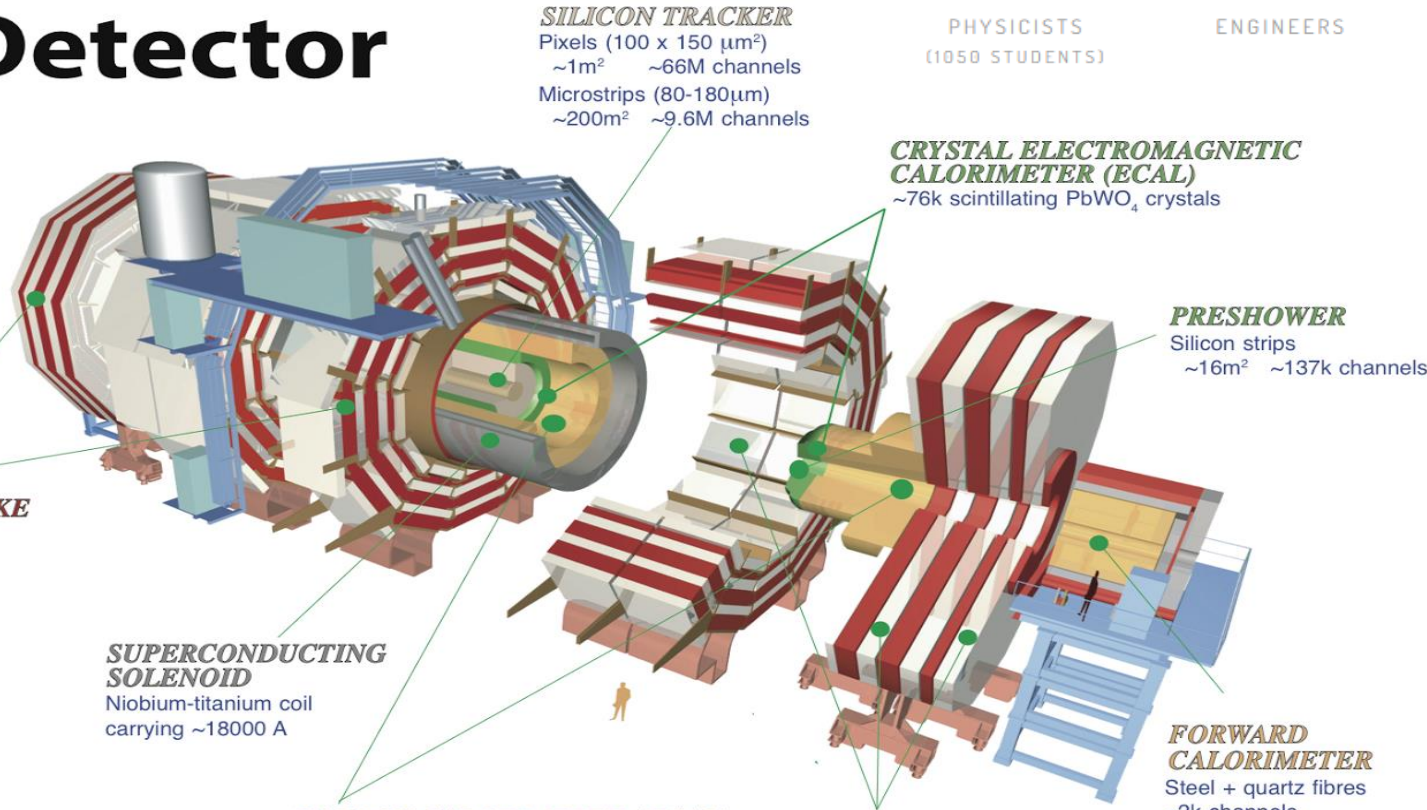
ATLASIN FIÇI KISMINDAN BİR GÖRÜNTÜ



ATLASIN KAPAK KISMINDAN BİR GÖRÜNTÜ

CMS Detector

Pixels
Tracker
ECAL
HCAL
Solenoid
Steel Yoke
Muons



SILICON TRACKER
Pixels (100 x 150 μm^2)
~1m² ~66M channels
Microstrips (80-180 μm)
~200m² ~9.6M channels

CRYSTAL ELECTROMAGNETIC CALORIMETER (ECAL)
~76k scintillating PbWO₄ crystals

PRESHOWER
Silicon strips
~16m² ~137k channels

STEEL RETURN YOKE
~13000 tonnes

SUPERCONDUCTING SOLENOID
Niobium-titanium coil carrying ~18000 A

HADRON CALORIMETER (HCAL)
Brass + plastic scintillator
~7k channels

FORWARD CALORIMETER
Steel + quartz fibres
Aluminum

Total weight : 14000 tonnes
Overall diameter : 15.0 m
Overall length : 28.7 m
Magnetic field : 3.8 T

3103
PHYSICISTS
(1050 STUDENTS)

1031
ENGINEERS

269
TECHNICIANS

241
INSTITUTES

54
COUNTRIES &
REGIONS

2053
PHD PHYSICISTS
(1689 MEN, 364 WOMEN)

1050
PHYSICS DOCTORAL STUDENTS
(792 MEN, 258 WOMEN)

1031
ENGINEERS
(895 MEN, 136 WOMEN)

978
UNDERGRADUATES
(708 MEN, 270 WOMEN)

A typical CMS physics paper will be signed by the PhD physicists and a significant fraction of the doctoral students meaning it will typically have about 2100 signatures.



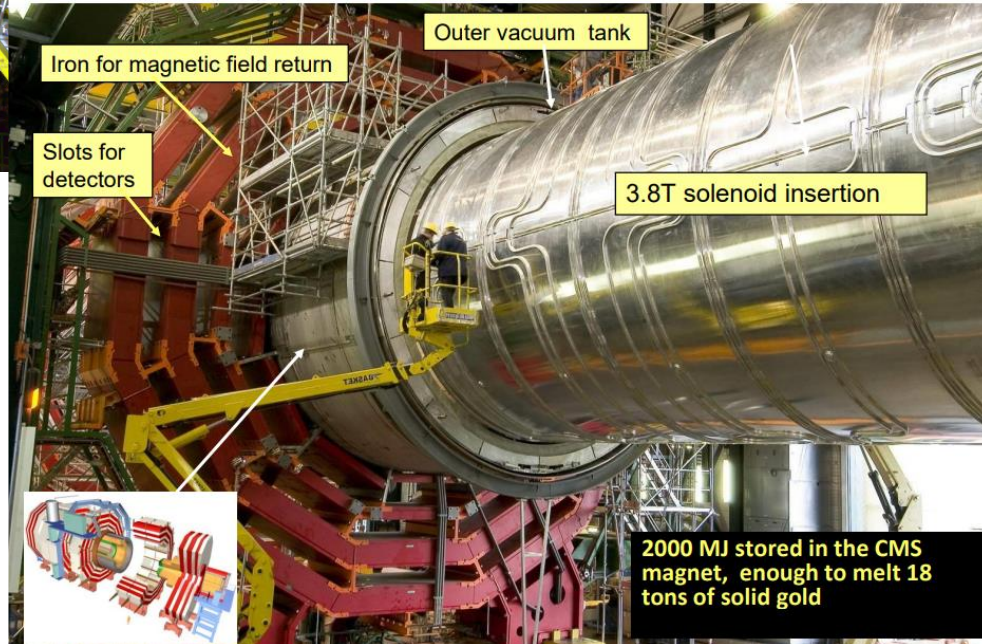
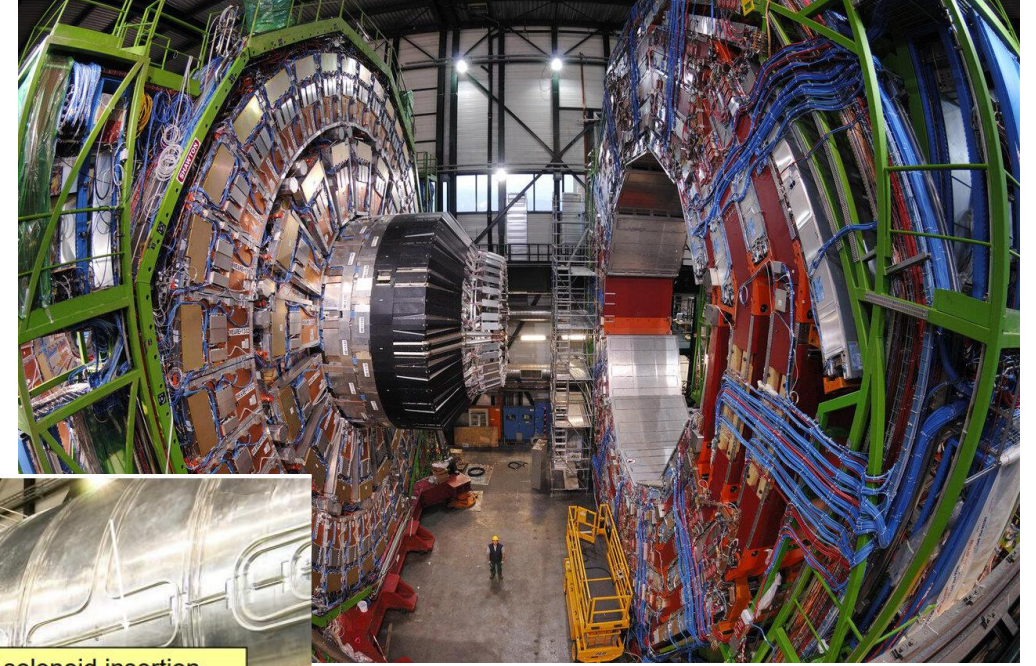
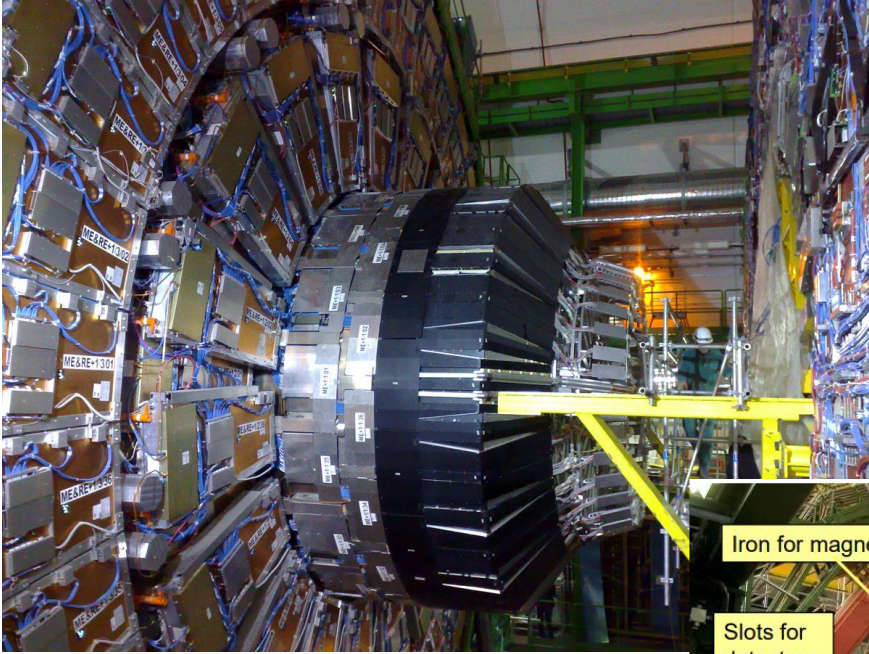
ISTANBUL-UNIV - Istanbul University, Istanbul
18 **CMS Members** including 17 scientists: 9 Physicist(s) 1
engineer(s) 7 graduate(s)
1 Undergraduate(s), 0 Administrative(s), 0 Technician(s)

ADANA-CUKUROVA - Çukurova Univ., Adana
35 **CMS Members** including 27 scientists: 13 Physicist(s) 0
engineer(s) 14 graduate(s)
8 Undergraduate(s), 0 Administrative(s), 0 Technician(s)

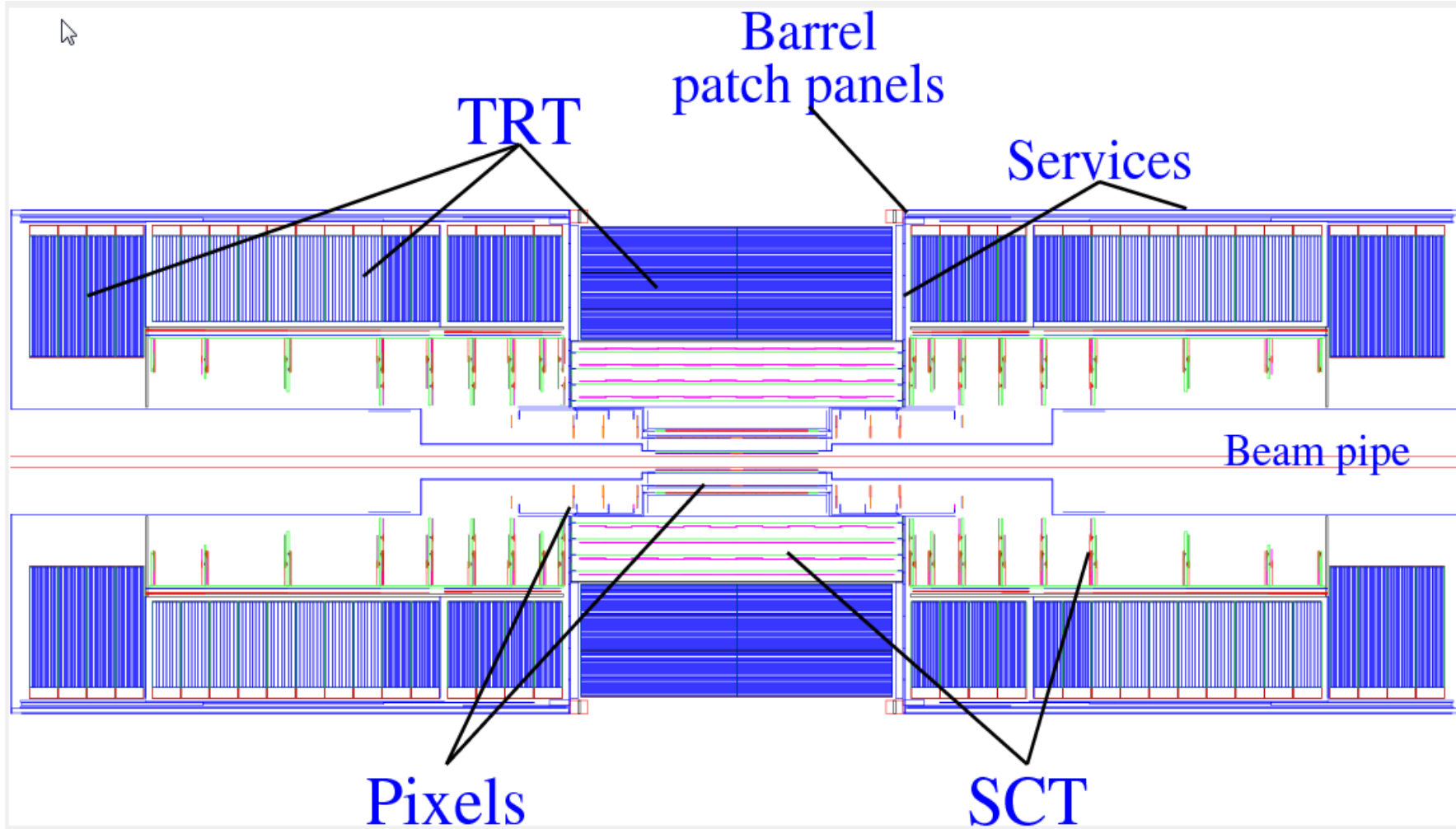
ANKARA-METU - Middle East Technical Univ., Ankara
26 **CMS Members** including 20 scientists: 13 Physicist(s) 3
engineer(s) 4 graduate(s)
6 Undergraduate(s), 0 Administrative(s), 0 Technician(s)

BOGAZICI - Bogazici Univ., Istanbul
21 **CMS Members** including 13 scientists: 6 Physicist(s) 5
engineer(s) 2 graduate(s)
8 Undergraduate(s), 0 Administrative(s), 0 Technician(s)

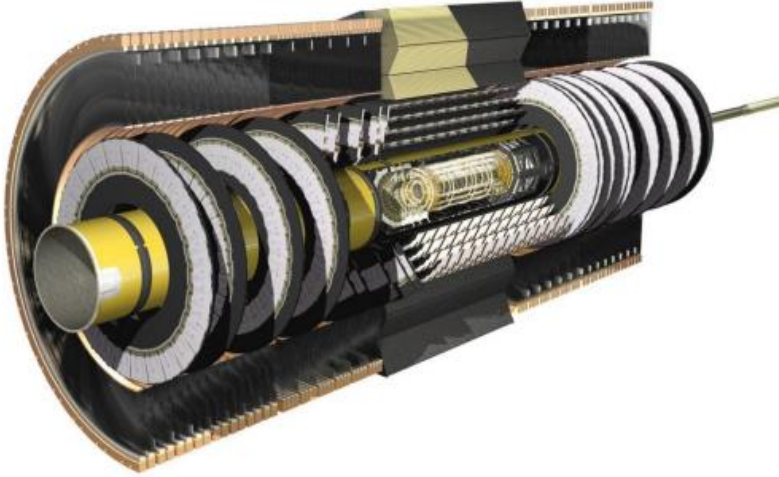
ISTANBUL-TECH - ITU, Istanbul
10 **CMS Members** including 6 scientists: 5 Physicist(s) 0
engineer(s) 1 graduate(s)
4 Undergraduate(s), 0 Administrative(s), 0 Technician(s)



CMS'NIN KAPAK KISMINDAN BİR GÖRÜNTÜ



Tracking $|\eta| < 2.5$ $B=2T$



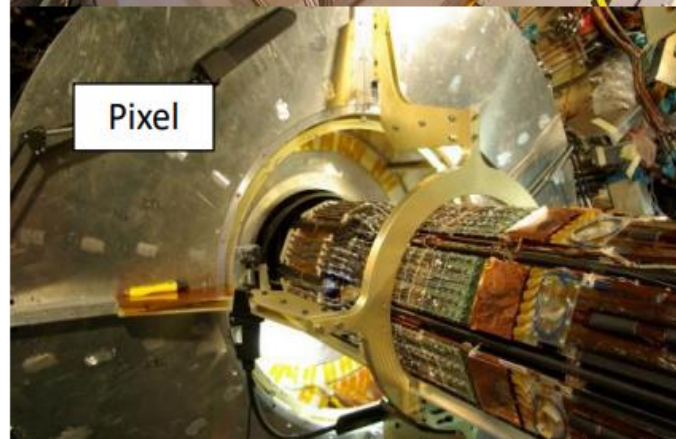
Silicon pixels (**Pixel**): $0.8 \cdot 10^8$ channels

Silicon strips (**SCT**): $6 \cdot 10^6$ channels

Transition Radiation Tracker (**TRT**):

straw tubes (Xe), $4 \cdot 10^5$ channels
 e/π separation

$$\sigma/p_T \sim 5 \cdot 10^{-4} p_T \oplus 0.01$$

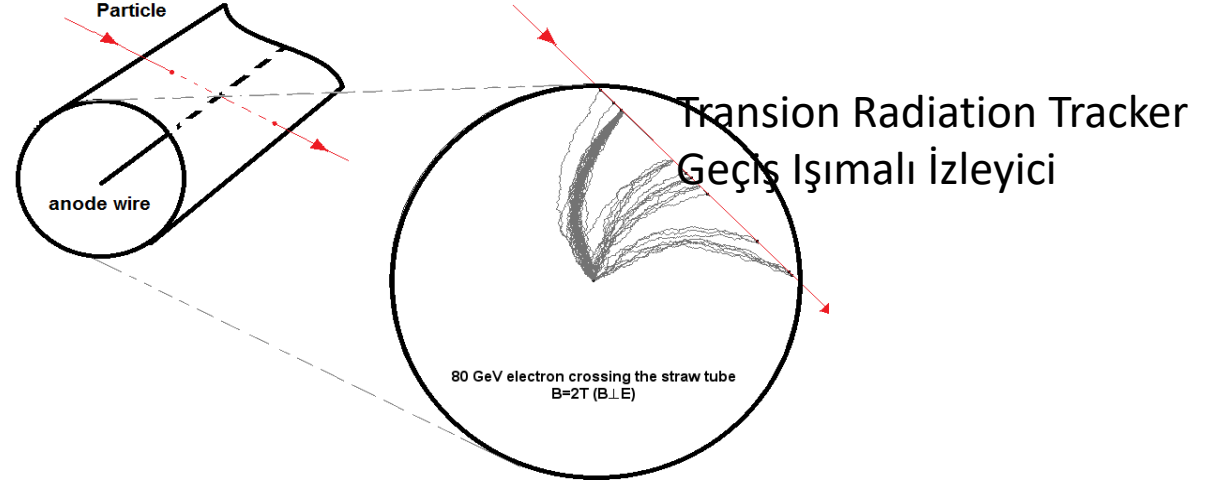
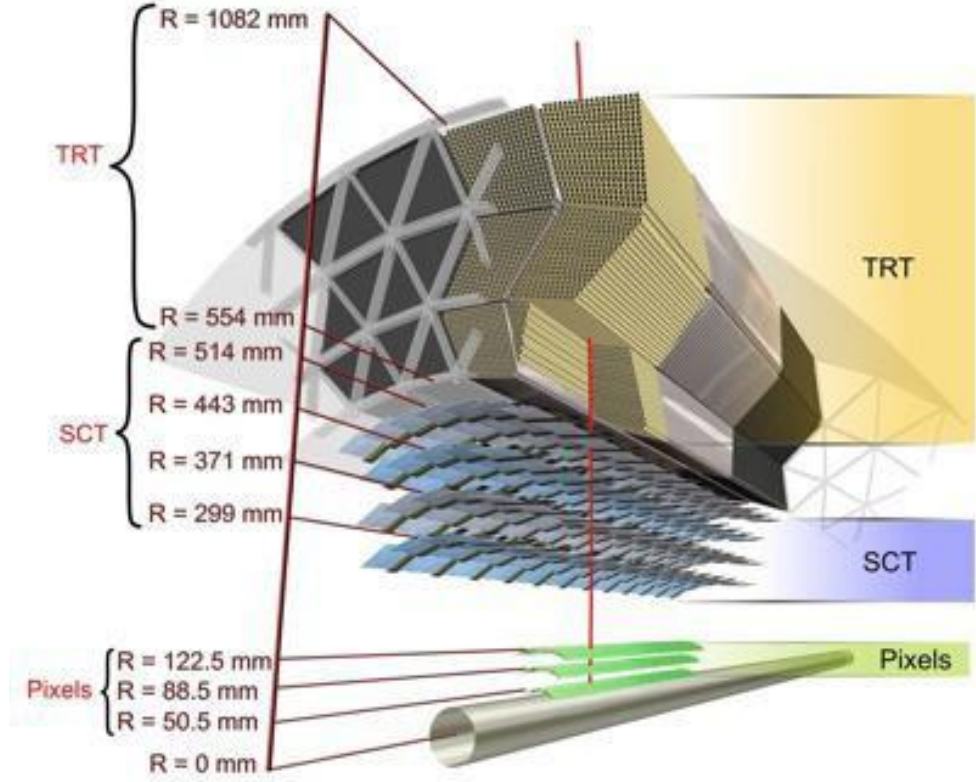


Protonların çarpışmasıyla oluşan yüklü parçacıkları algılamak ve izlerini yapılandırmak

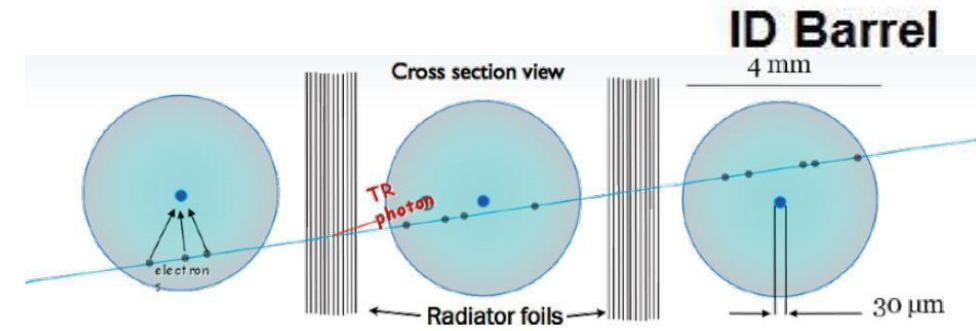
- 4,088 iki yüzlü modül
- 6 milyon okuma şeridi (kanal)
- 4 silindirik fıçı ve 18 düzlemsel kapak diskler olmak üzere $60m^2$ silikon.
- Silikon üzerinde her bir $80\mu m$ 'de bir okuma şeridi
- $25 \mu m$ (insan saçından ince) çözünürlük

Parçacıkların üretim noktalarını ve momentumlarını belirlemek

- 92 milyon piksel/kanal
- $1.9m^2$ silikon, 15 kW güç tüketimi
- Dış (en iç) düzlemde düzlemlerde 50×400 (50×250) μm^2 piksel boyutu
- 4-fıçı düzlemi ve her düzlemde 1736 sensör
- Her bir kapakta 3 disk ve her diskte 288 modül
- $10 \mu m$ çözünürlük (kum tanesinden küçük)

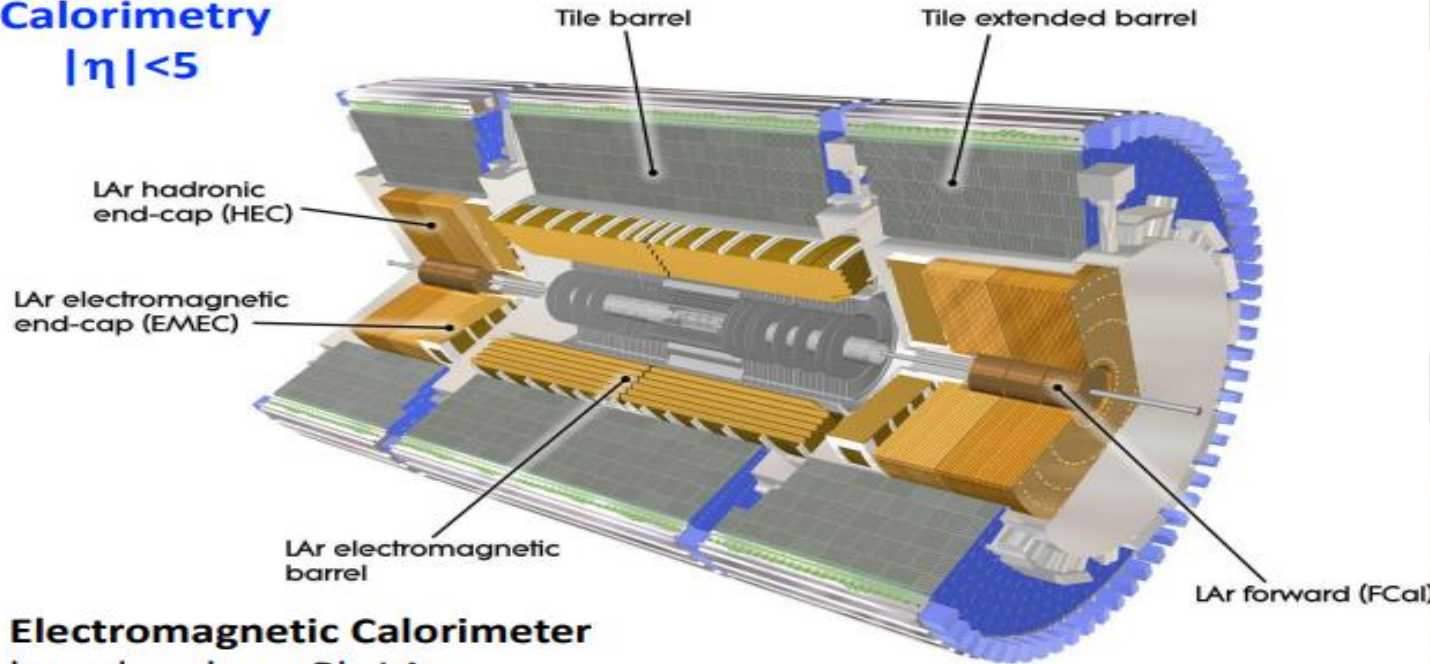


- TRT 300000 ince duvarlı sürüklenme tüplerinden oluşur.
- 4mm çaplı kamış ve merkezindeki 30 μ m altın kaplı tungsten telden oluşur.
- Tüpler gaz karışımıyla (70 % Xe, 27 % CO₂,)doldurulmuştur.
- Tüpten geçen yüklü parçacıklar gaz atomlarını iyonize ederek algılanabilen bir elektriksel sinyal oluşturur.
- Bu sinyaller parçacık izlerinin yapılandırılması için kullanılır.



- Tüplerin(fıçı) arasına polimer fiber ve folyo(kapak) yerleştirilmiştir.
- Farklı dielektrik malzemeyi geçen relativistik parçacıklar geçiş ışınması yaparlar.
- Bu etki relativistik faktöre, $\gamma = E/m$, bağlıdır ve elektronlar için en güçlüdür.
- Tipik foton enerjileri 5–30 keV.
- Bu X-ışınları Xe atomları tarafından soğurularak çıkış sinyalinin yükselmesini sağlar.
- Elektron, pion gibi parçacıkların ürettikleri sinyal karşılaştırılarak parçacık kimlik belirlemesi yapılır.
- Çözünürlüğü 120 μ m.
- Çözünürlüğün silikon izleyicilerden kötü olmasına rağmen TRT'nin olduğu yerlerde iz yoğunluğu düşük olduğu için oldukça iyi bir çözünürlüktür.

Calorimetry $|\eta| < 5$



Electromagnetic Calorimeter

barrel, endcap: Pb-LAr

$\sim 10\%/ \sqrt{E}$ energy resolution e/γ

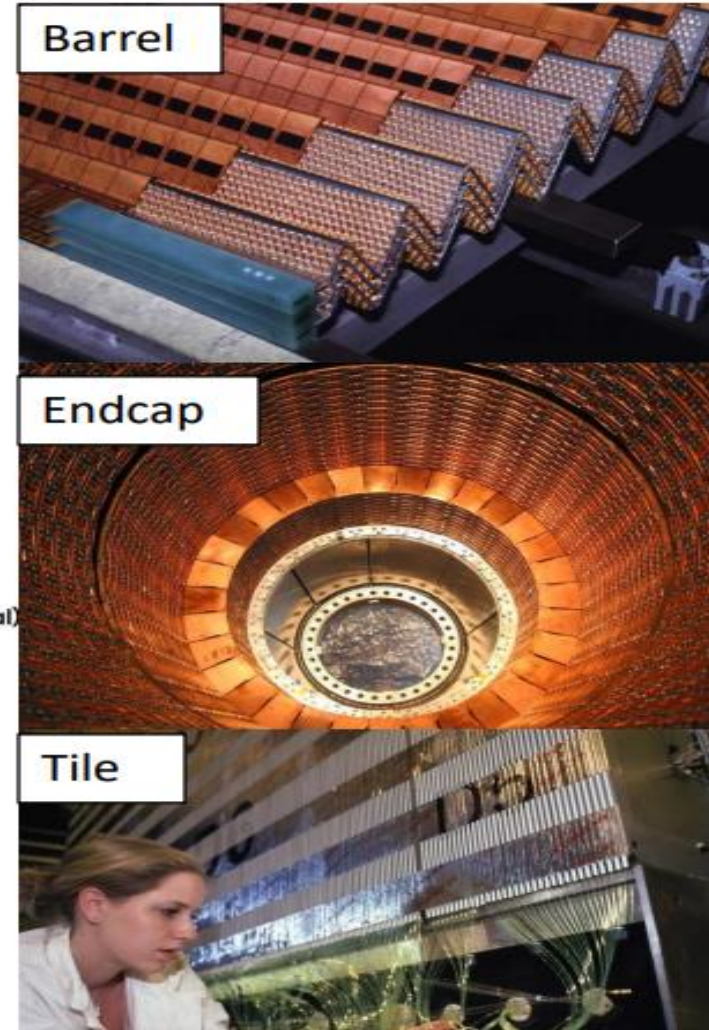
180000 channels: longitudinal segmentation

Hadron Calorimeter

barrel Iron-Tile EC/Fwd Cu/W-LAr (~ 20000 channels)

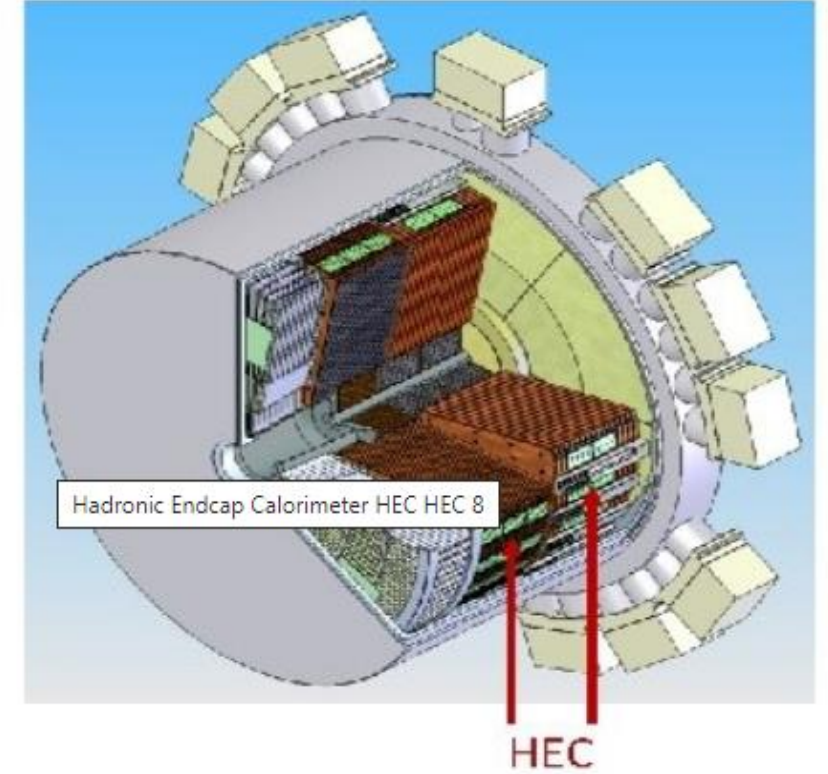
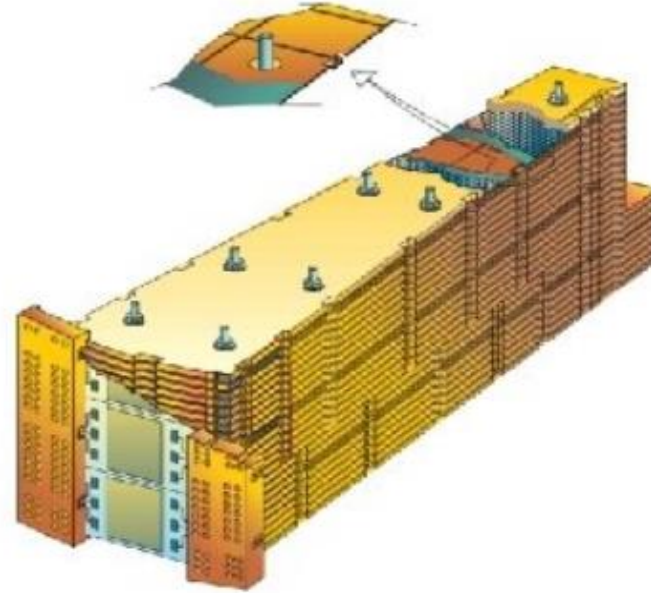
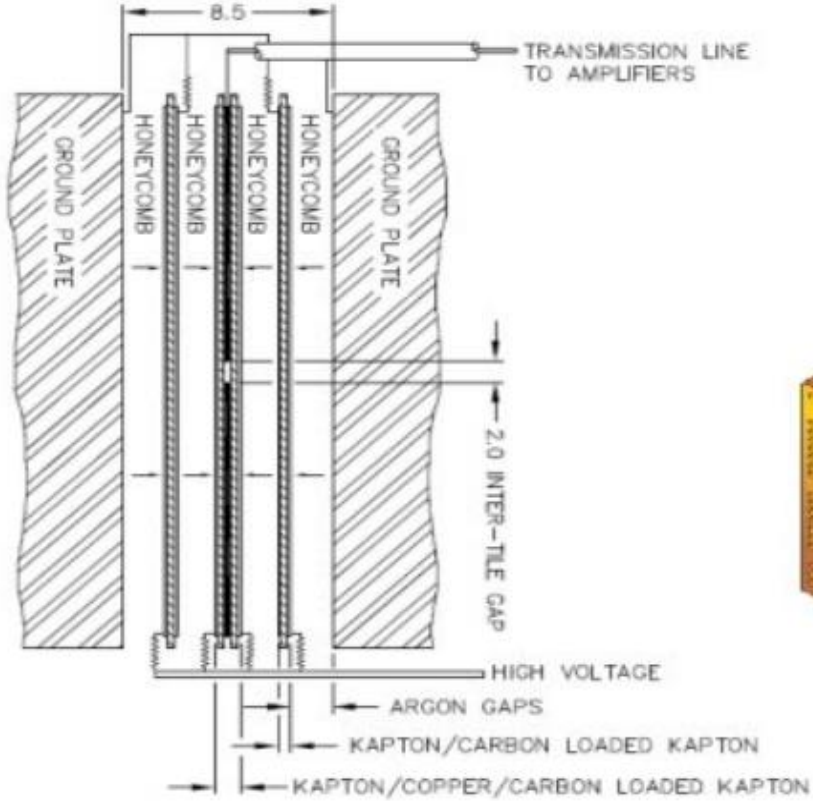
$\sigma/E \sim 50\%/ \sqrt{E} \oplus 0.03$ pion (10λ)

Trigger for e/γ , jets, Missing E_T



<https://atlas.cern/Discover/Detector/Calorimeter>

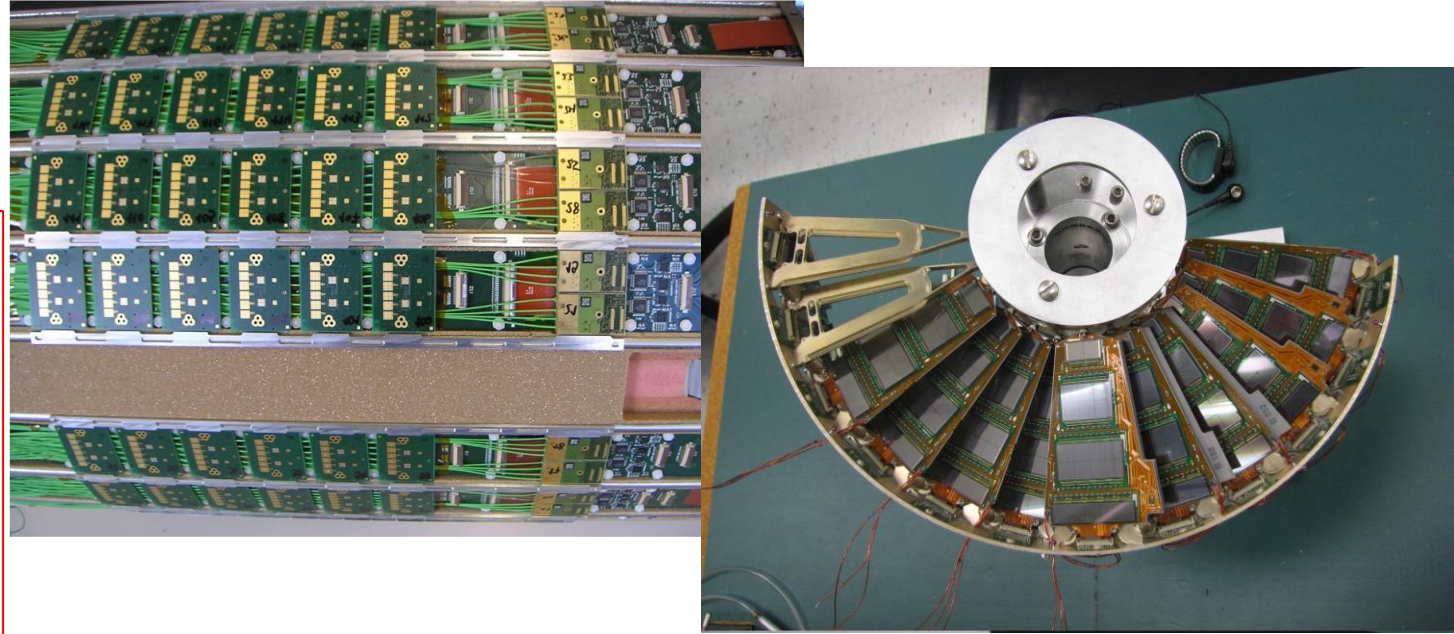
ATLAS HADRONİK KAPAK KALORİMETRE



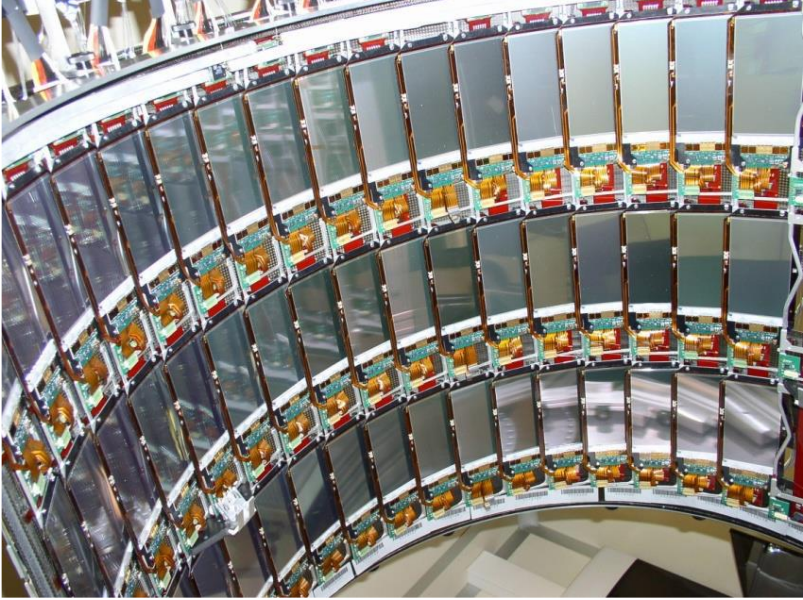


Piksel dedektörü izleme sisteminin etkileşim bölgesine en yakın olan parçasıdır. Bu sistem, izlerin daha hassas olarak ve ikincil etkileşme köşelerinin iyi belirlenebilmesi için önemli olan küçük vuruş parametrelerinin çözünürlüğünün belirlemesinden sorumludur. $100 \times 150 \mu\text{m}^2$ hücre boyutu ile hem $r-\phi$ hem de z yönünde benzer iz çözünürlüğü elde etmeyi sağlar.

Dedektör, **üç katmanlı fiçi** (BPix) ile **iki tane disk kapaktan** (FPix) oluşur. BPix katmanları 53 cm uzunluğunda olup ortalama yarıçapları sırasıyla 4.4, 7.3 ve 10.2 olacak şekilde yerleştirilmiştir. FPix diskler yaklaşık 6 ile 15 cm çapına uzanır ve $z = \pm 34.5\text{cm}$ ve $z = \pm 46.5\text{cm}$ olmak üzere her iki tarafta yer alır. BPix $0,78 \text{ m}^2$ ve FPix $0,28 \text{ m}^2$ alanlarını kapsayan sırasıyla 48 milyon ve 18 milyon piksel içerir.



[\(276\) CMS Pixel tracker installation 2021 - YouTube](#)



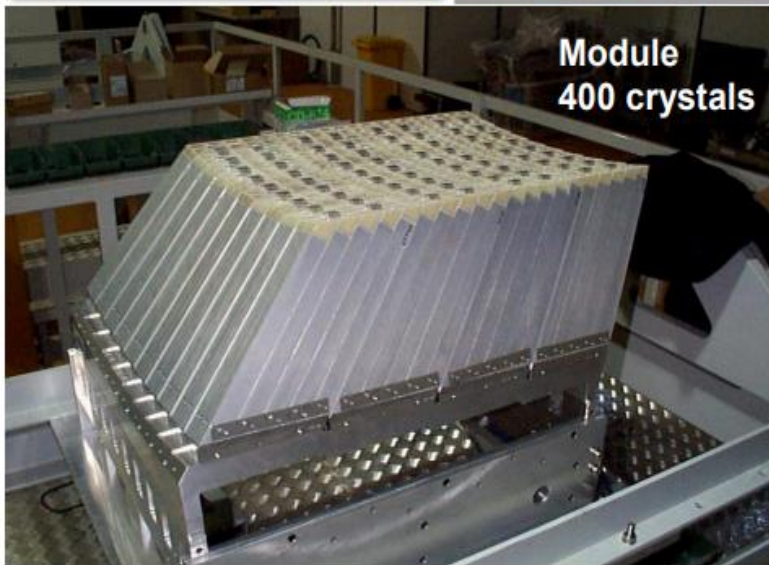
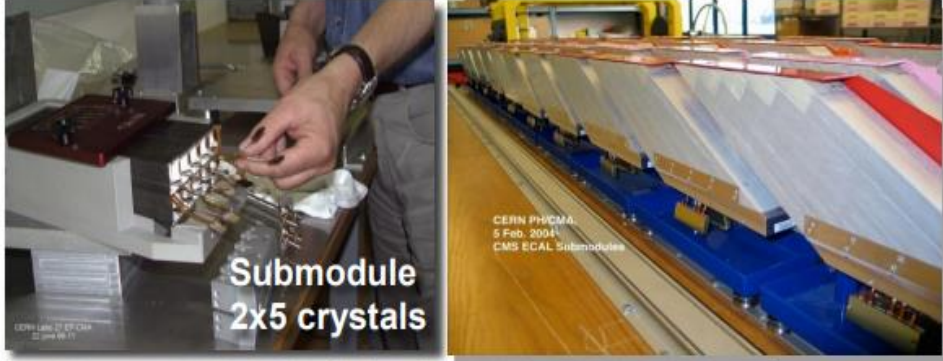
Şerit dedektörü, piksel dedektörü ile birlikte yüksek ışıklılıkta 1 GeV/c üstündeki dikine enerjili tüm parçacıkların izlerinin desenini görmek, yeniden yapılandırılmasını sağlamak ve momentumlarını ölçmek için kullanılmaktadır.

15200 yüksek hassiyetli modül
Her modül bir veya iki silikon sensor, mekanik destek ve okuma elektroniklerinden oluşur.
Toplam 10 milyon silikon şerit
Bu şeritleri okuyan 72000 mikroelektronik çip

Bu şeritler, iç (dış) tabakalarda kalınlığı 320 μm (500 μm) olan n-tipi lehva(disk) üzerine işlenir.
Şerit genişliği 80 μm to 205 μm aralığında değişir.
Fiçi bölgesinde 25 -110 cm yarıçap ve z ekseni boyunca 120 cm olmak üzere **10 adet** izleyici tabakası bulunur.
Kapak bölgesinde ise 110 cm yarıçaplı ve z ekseni boyunca 280 cm olmak üzere **12 disk** vardır.



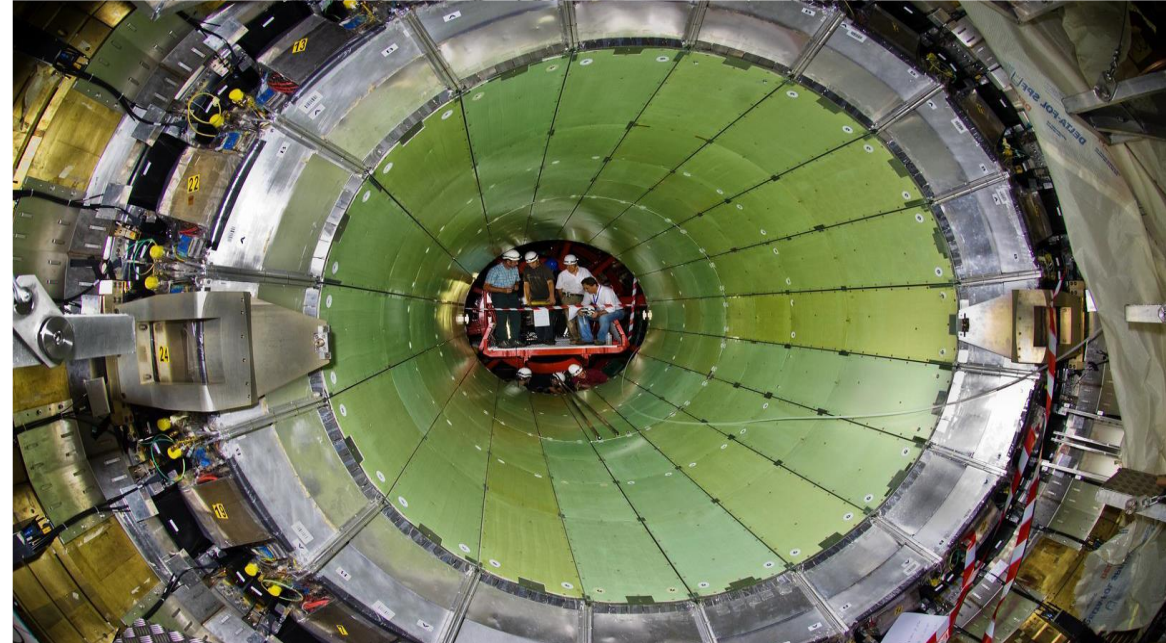
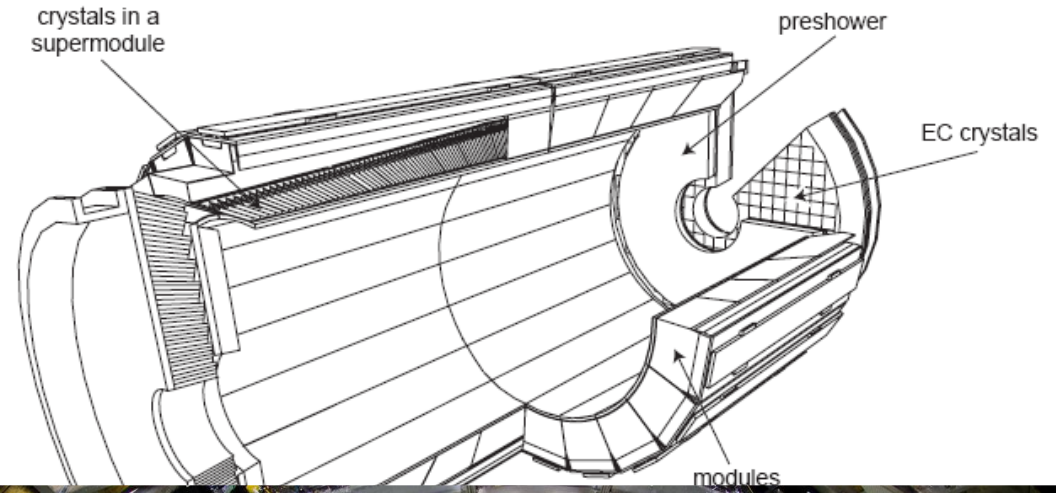
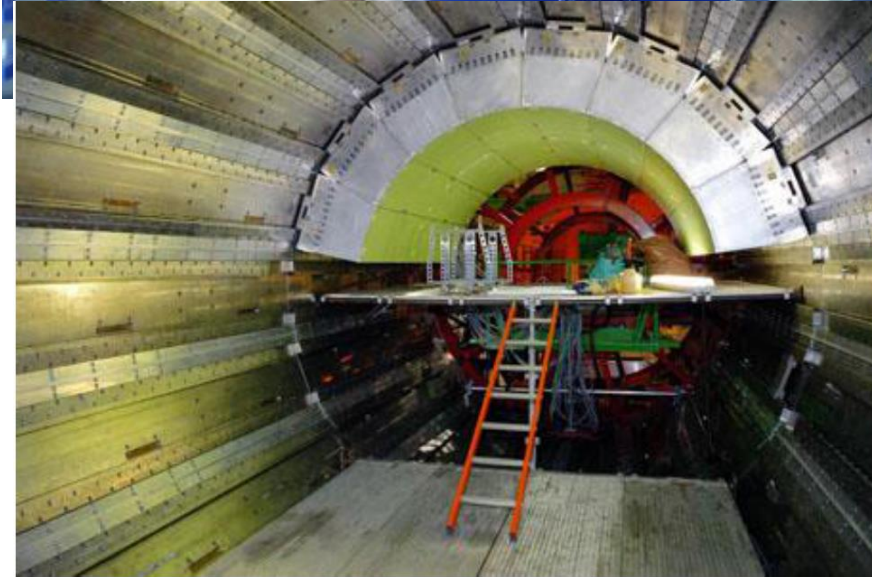
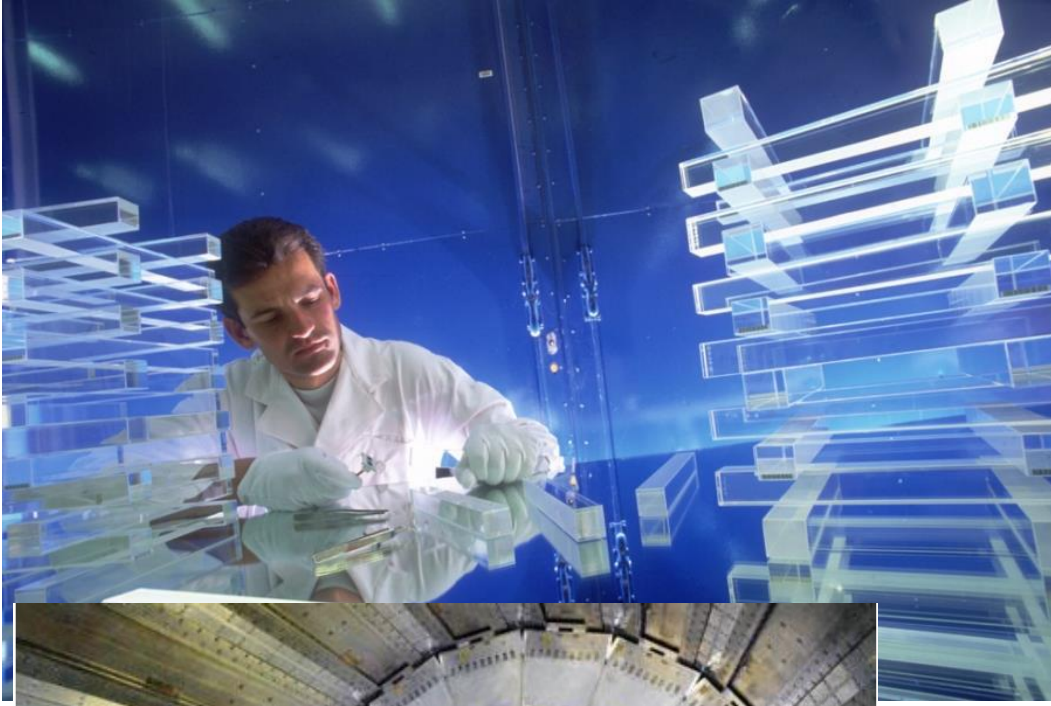
- EKAL yüksek yoğunluklu, hızlı, radyasyona dayanıklı ve iyi çözünürlüklü homojen kristal bir kalorimetredir.



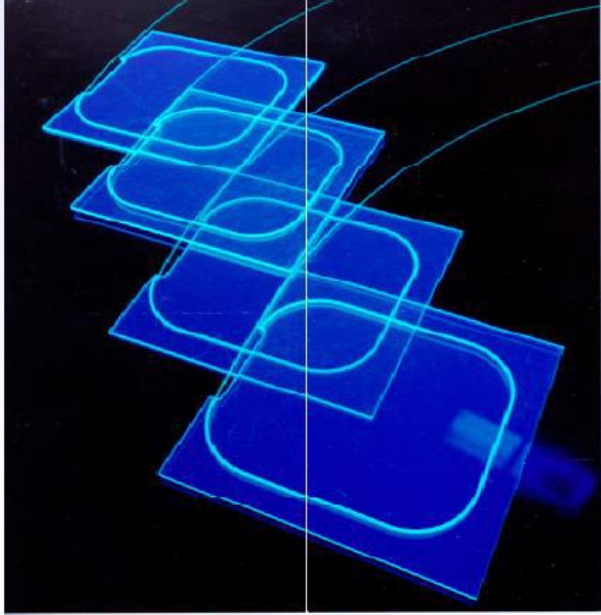
Total 36 Supermodules

- EKAL'da yüksek yoğunluğa ($8,28 \text{ g/cm}^3$), kısa radyasyon uzunluğuna ($0,89 \text{ cm}$) ve küçük Moliere yarıçapına ($2,2 \text{ cm}$) sahip kurşun tungstant (PbWO_4) kristalleri kullanılmaktadır

- EKAL ~76000 PbWO_4 ışıltayıcı kristalinden yapılmıştır.
- EKAL her biri 1700 kristal içeren 36 süper modülden oluşan merkezi Elektromanyetik Fıçı
- Her biri 7324 kristal içeren Elektromanyetik Kapak kısımlarından oluşmuştur.



Scintillators fill slots and are read out via WLS fibres by HPDs (B = 4T!)

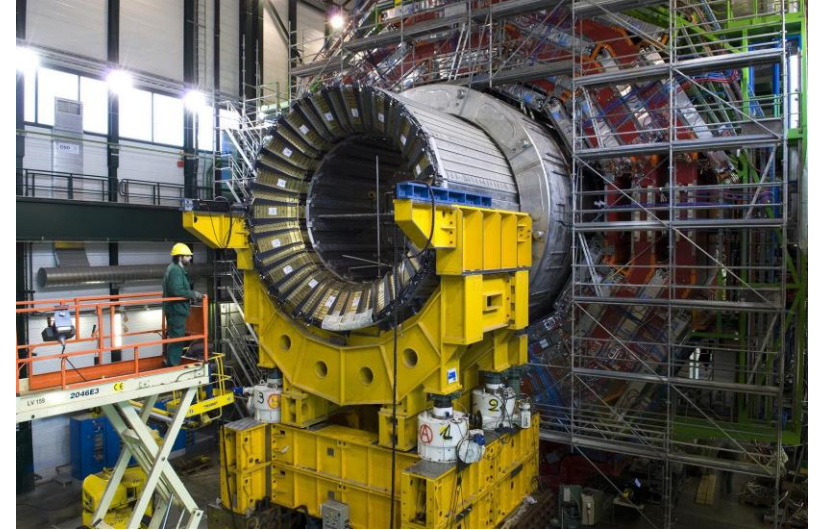


HKAL'ın alt dedektörleri:

- Hadronik Fıçı ve kapak
- Hadronik Dış Kalorimetre
- İleri Hadronik Kalorimetre

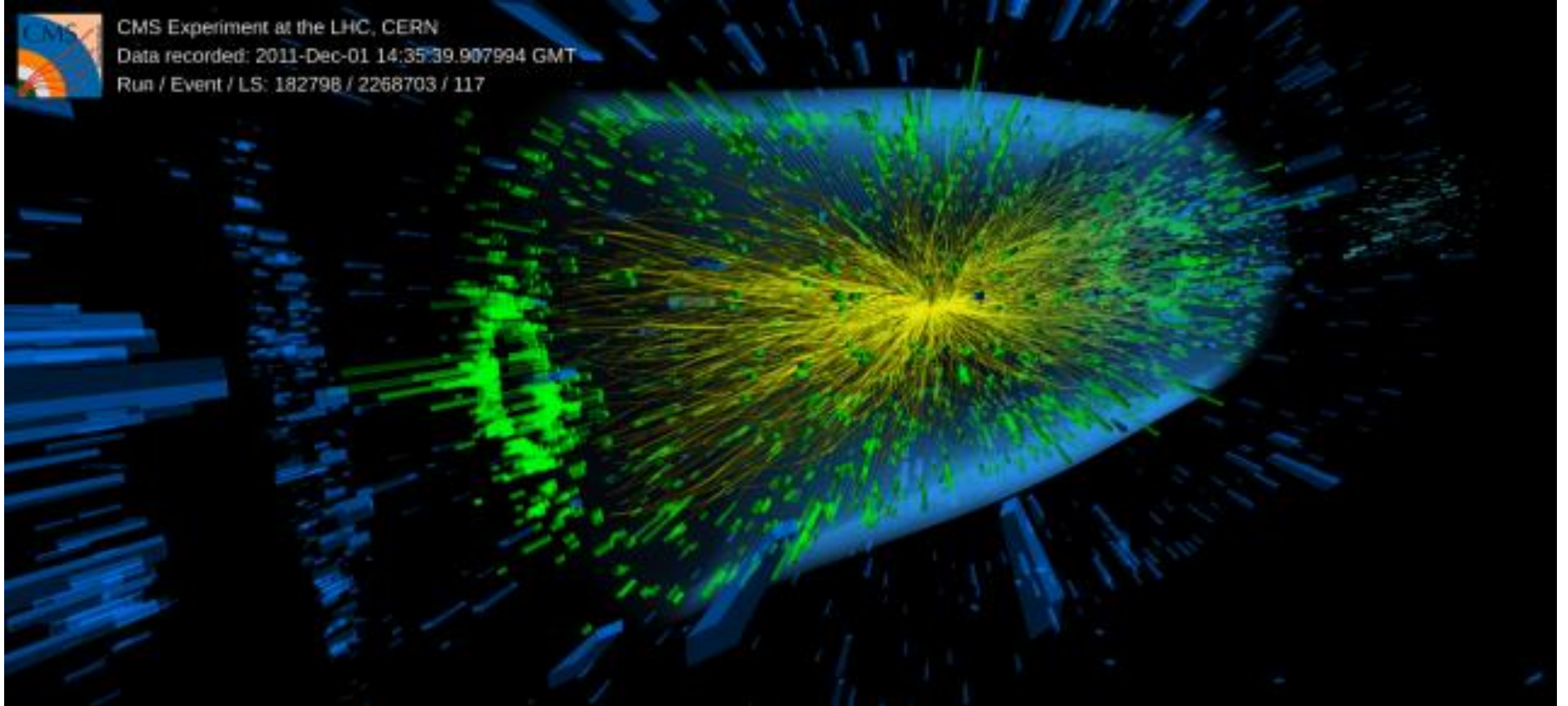
Hadronik kalorimetreler dizayn edilirken şu özellikler dikkate alınmıştır:

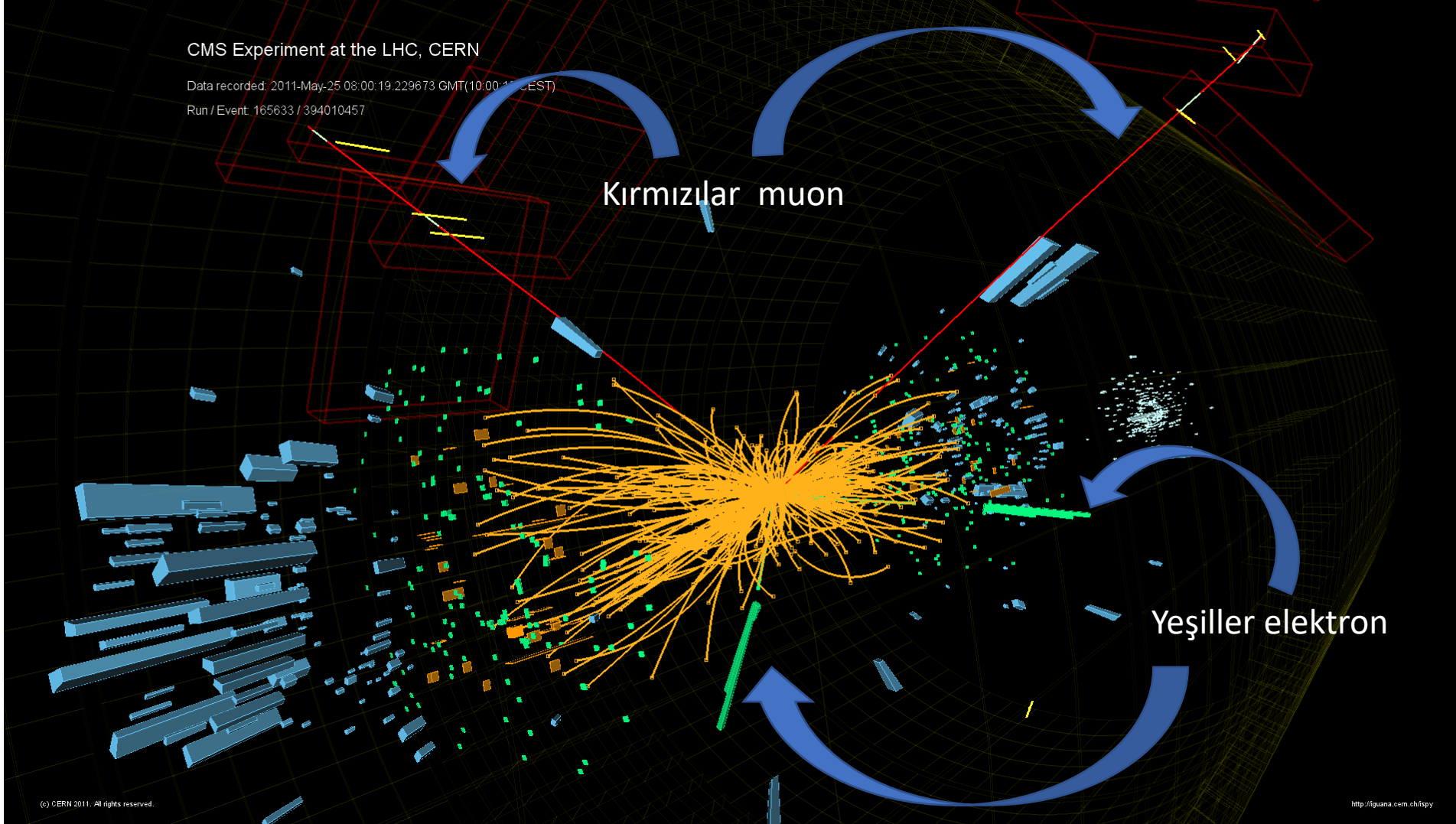
- iyi bir dikine taneciklik,
- orta derecede enerji çözünürlüğü,
- yüksek sızdırmazlık,
- hadron duşunu kapsayacak uzunluk.



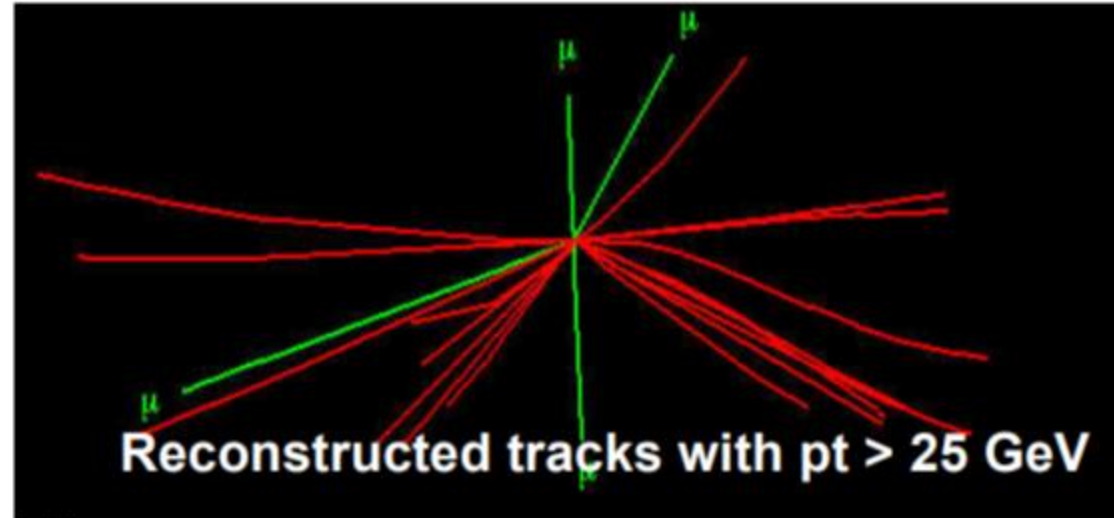
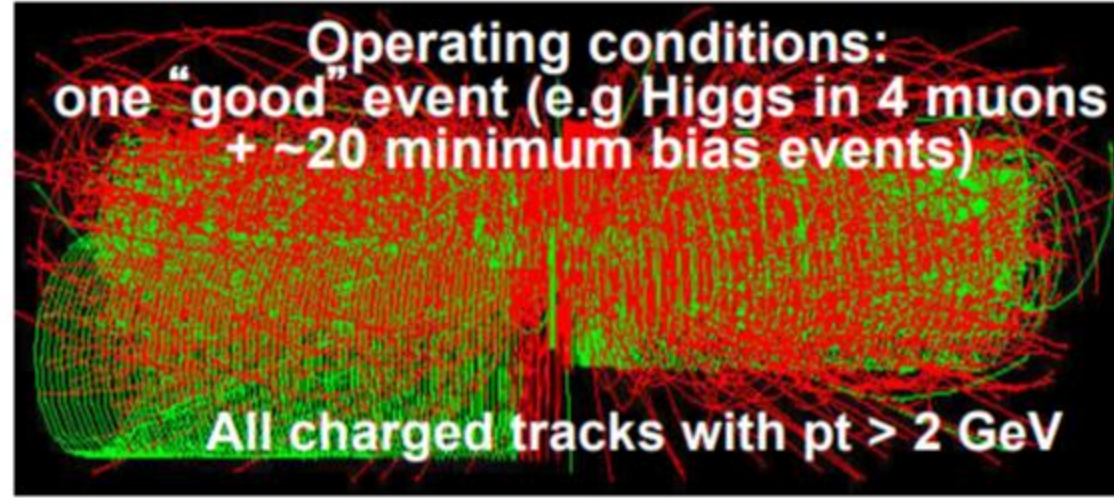
- Soğurucu malzeme olarak da prinç (%70 Cu ve %30 Zn) kullanılmıştır.
- Sağlam bir destek için en ön(arka) soğurucu tabaka 40 mm (75mm) kalınlığında paslanmaz çelikten yapılmıştır.
- En ön plakayı 50.5 mm kalınlığında 8 tane ve bunları da 56.5 mm kalınlığında 6 tane pirinç takaba takip eder.
- Her iki tabaka arasında aktif plastik sintilatör döşeme bulunmaktadır.

İzleyicelerde ve kalorimetrelerde neden çok sayıda kanala gereksinim olduğunu bu resim açıklar mı?

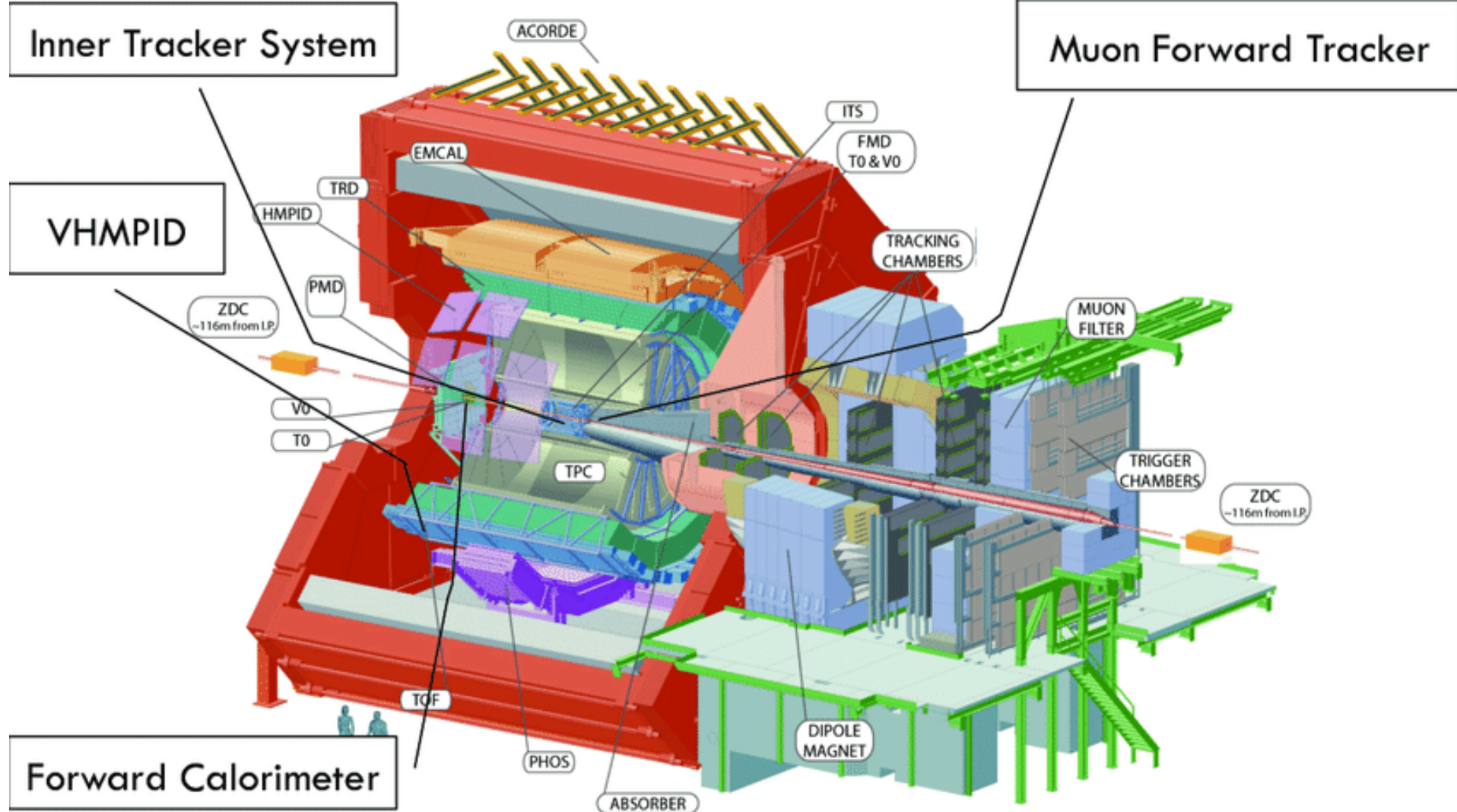


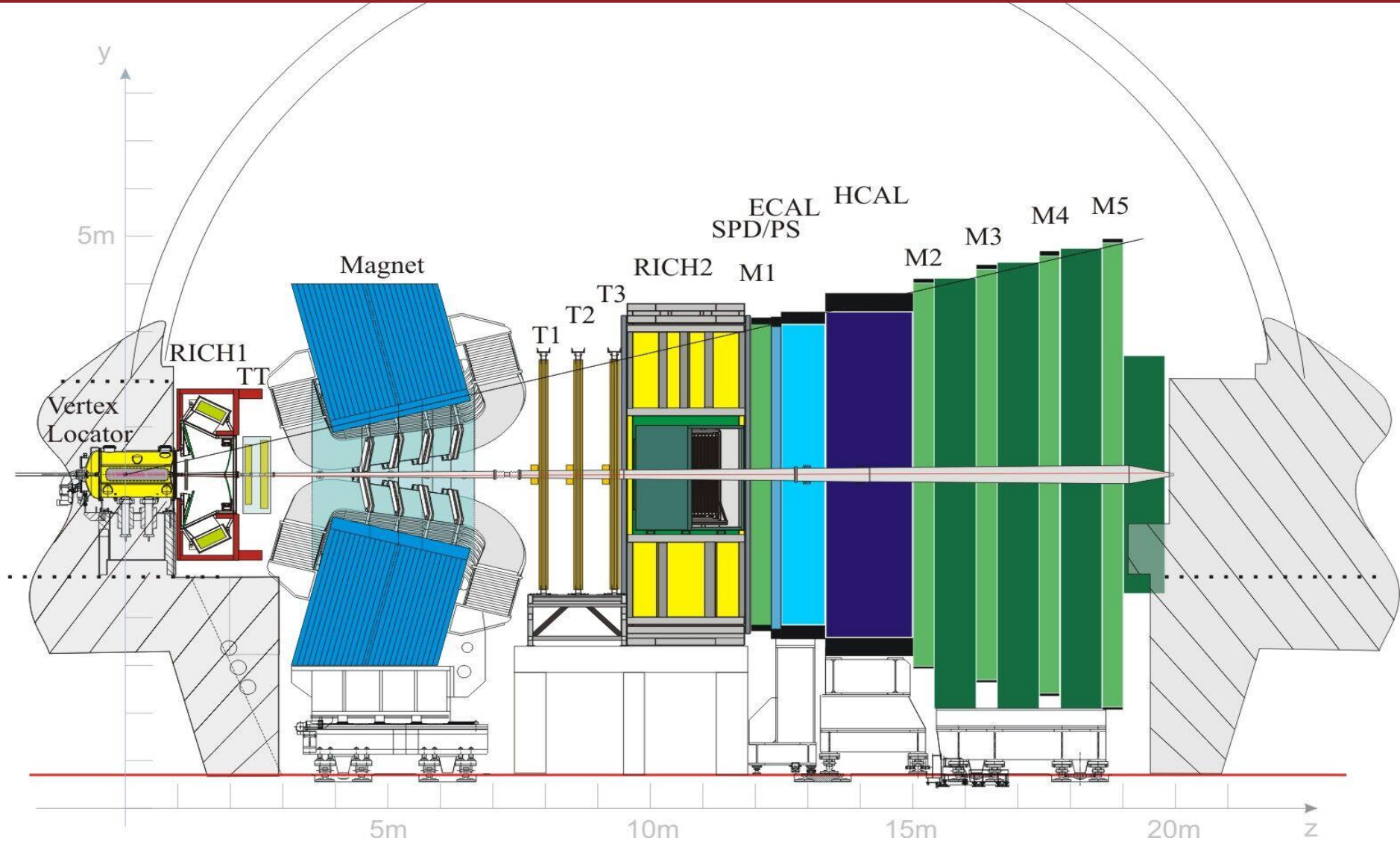


- Her demet kesişiminde yaklaşık 20 ilginç olmayan çarpışma üst üste biner.
- $|\eta| < 2.5$ ve $\langle Pt \rangle \approx 0.5$ GeV olan 1000 parçacık üretilir.
- $PT > 25$ GeV kısıtı uygulayarak ilginç bir olayı yalıtabilir miyiz?
- Böyle bir kısıt uygulandığında geriye alt resimle görülen izler kalır.
- Geriye kalan izler bir Higgs adayının bozunumundan gelen 4 muon olabilir mi?



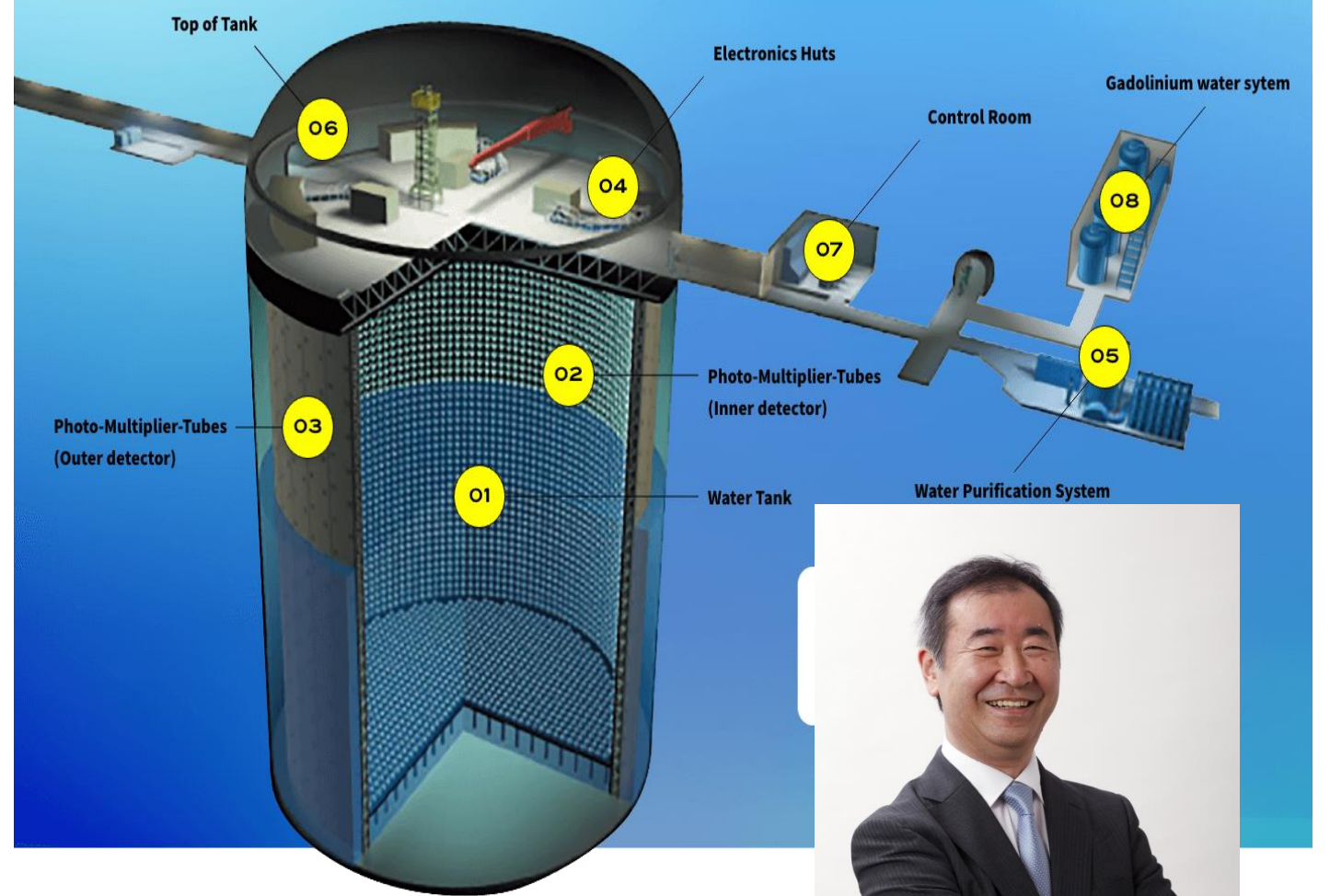
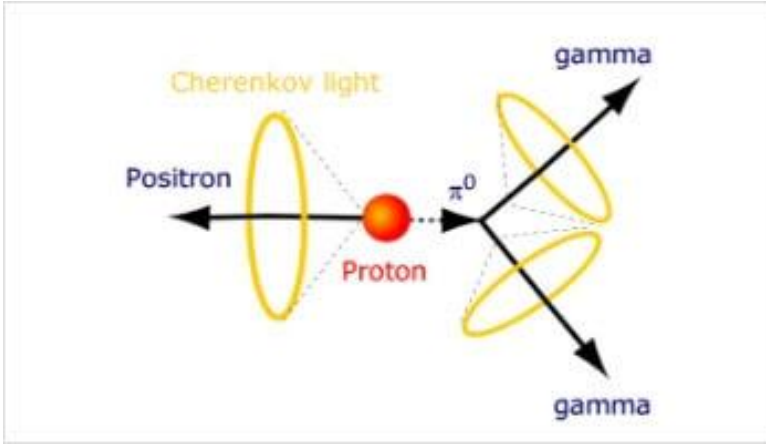
ALICE: A Large Ion Collider Experiment





- Radyasyon hasarları
- Uzun süre çok yüksek parçacık akılarına maruz kalan dedektör bölümleri yıpranmaya başlar.
- Bu bölgeler çarpışma noktasına ve demet eksenine yakın olan olan ve ileri bölgelerdir.
- Radyasyon hasarının dışında da uzun kullanıma bağlı olarak dedektörler korozyon, kullanılan gazlarda safsızlıkların oluşması, yüksek elektrik alanı gibi etkilerden dolayı yıpranırlar.
- Bu etkiler dedektörlerin performansını düşürür.
- Görevini yapamayacak hale geldiklerinde ise artık değiştirilmeleri gerekir.
- Bu değişiklikler yapabilmek için deneylerin uzun süre ara vermesi gerekir.
- İstenilen değişiklikler yapıldıktan sonra deneyler tekrar çalışmaya başlar.
- Çok uzun süre çalışan ve artık araştırma ömürleri dolan dedektörler (DELPHI, ALEPH, vs) durdurulup yerilerine yenileri yapılmak üzere sökülürler.

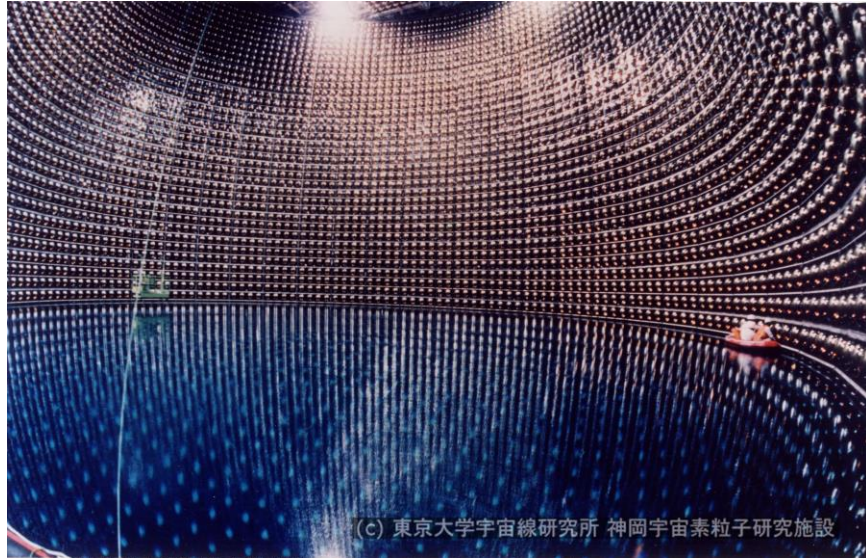
- Amaç
- Nötrinoları anlamak
- Evrenin nötrinolarla gözlenmesi
- Proton bozunumunun araştırılması
- Süpernova nötrinolarının kalıntılarının gözlenmesi



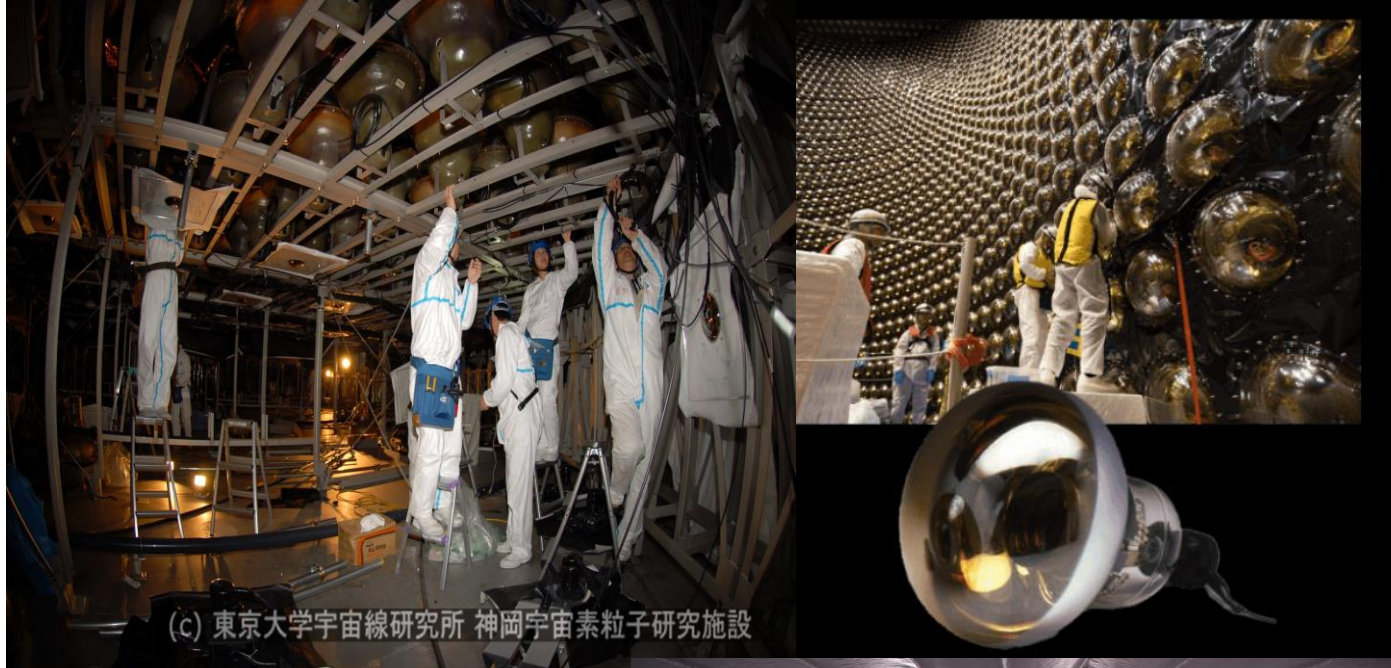
“neutrino salınımı” 1998.
Profesör Takaaki Kajita 2015
Nobel Fizik Ödülü



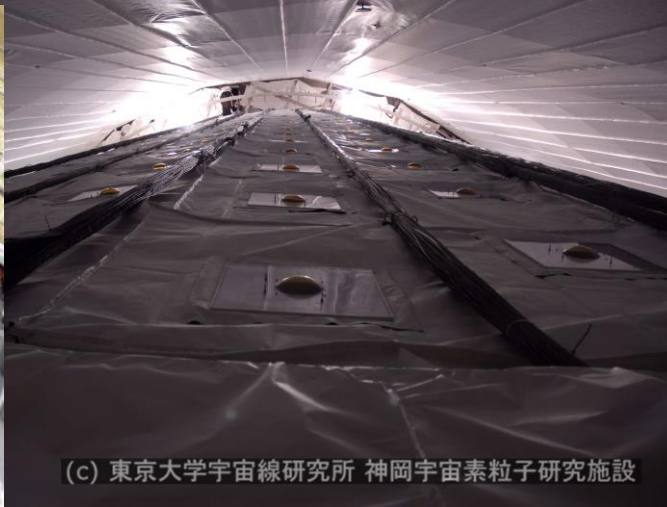
<https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/sk/experience/virtual/>



- Super Kamiokande Japonya'da Jifu şehri, Hida kentinde yerin 1000 m altındaki Kamioka madeninde konuşlandırılmıştır.
- Dünyanın en büyük sulu Çerenkov detektörüdür.
- Yapımı 1991'de başlamış ve gözlemlere 1 Nisan 1996'da başlamıştır.
- Super-Kamiokande Amerika, Polanya, Kore, Çin, Kanada, İngiltere, İtalya, Fransa ve Vietnamdan **50 enstitü ve 200 kişilik** uluslararası bir işbirliğinden oluşmuştur.
- Super-Kamiokande **39,3 m çap** ve **41.4m yüksekliğinde** çelik bir tank,
- Bu tanka doldurulmuş **50ton su**
- Çerenkov ışığını algılayacak tank duvarlarına yerleştirilmiş yaklaşık **13000 PMT**



(c) 東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設



(c) 東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設

- Foto Çoğaltıcı Tüpler
- **İç bölge**
- 11129 PMT
- 20-inç(~50 cm) fotoduyarlı bölge
- Dünyanın en büyük PMTsi
- PMT'ler 70cm aralıklarla duvarların %40'nı kaplayacak şekilde yerleştirilmiştir.
- Duvarlarda PMT'lerin arasındaki boşluklar siyah plastik madde ile kapatılmıştır.
- **Dış bölge**
- 1885 PMT
- 8inç(~20 cm) çap
- Dıştaki PMT'ler fotonları daha verimli toplamak için dalgaboyu kaydırıcı tabaklara tutturulmuştur.

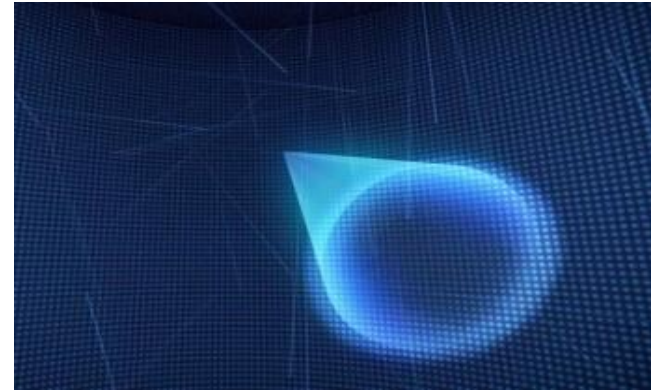
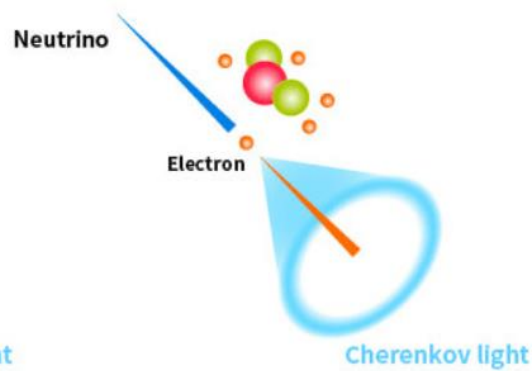
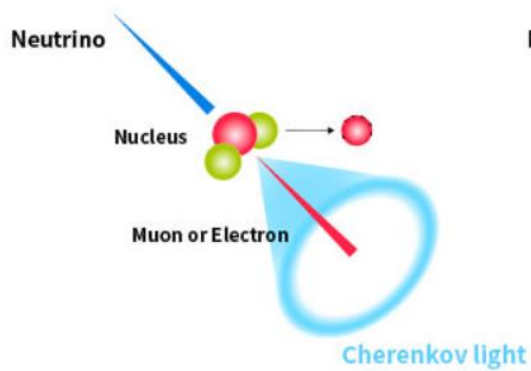
$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$$

$$\bar{\nu}_\mu + p \rightarrow n + \mu^+$$

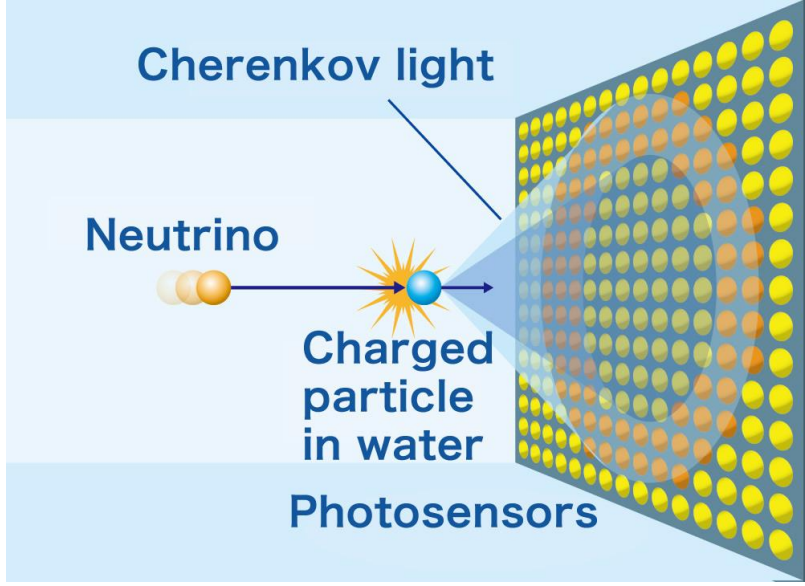
$$\bar{\nu}_\tau + p \rightarrow n + \tau^+$$

$$\nu_e + n \rightarrow p + e^-$$

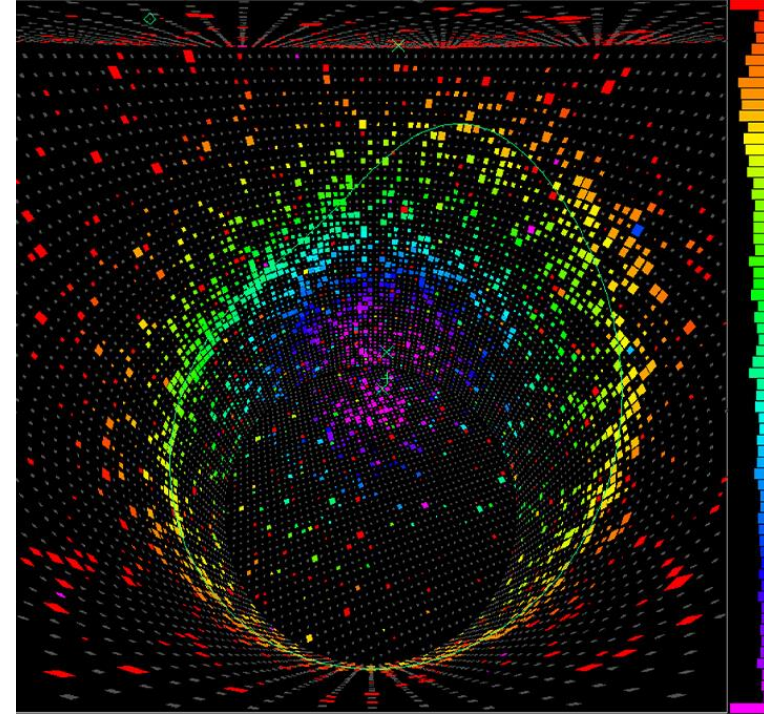
- Yüklü bir parçacık, suda ışığın sudaki hızından ($v=c/n$) daha yüksek bir hıza sahip olduğunda, Cherenkov ışığı yayımlanır.
- Cherenkov ışığı, yüklü parçacık yönünde koni şeklinde yayımlanır.
- Tankın duvarındaki PMT'ler Cherenkov ışığını algılar.
- PMT'ler kendilerine ulaşan ışık miktarını ve algılama zamanını belirler.
- PMT'lerden gelen bilgiler kullanılarak parçacığın enerjisi, yönü, etkileşme noktası, vs, belirlenir.



The generated charged particles emit Cherenkov light.

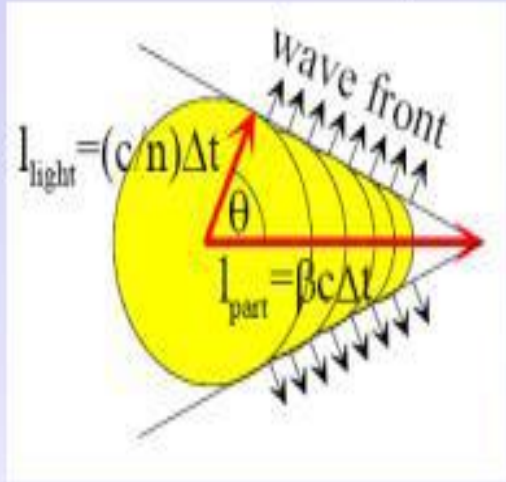


- Yüzük yarıçapı, kalınlığı, ışığın PMT'lere ulaşma zamanı, vs gibi veriler kullanılarak Çerenkov ışıması yapan parçacık hakkında bilgiler belirlenir.



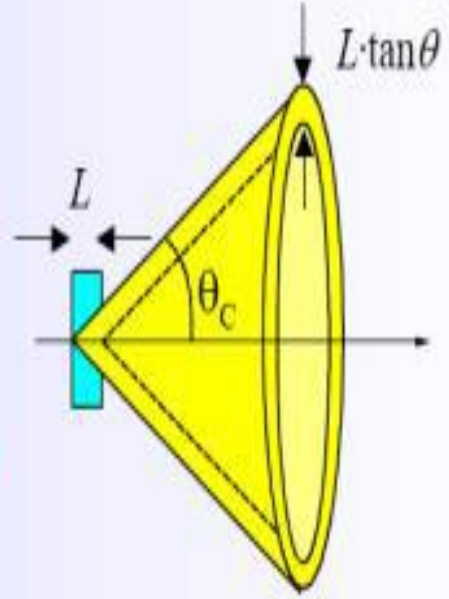
- Tankın dış yüzüne yerleştirilen sintilatörler sayaçları ve yukarıda bahsedilen bilgiler kullanılarak tanka ulaşmayı başaran muonlar da dışlanabilir.

with velocity $\beta \geq \beta_{thr} = \frac{1}{n}$ n : refractive index



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

with $n = n(\lambda) \geq 1$



Birim uzunluk başına yayımlanan Çerenkov fotonu sayısı

$$\frac{dN}{dx} = 2\pi\alpha z^2 \cdot \sin^2 \theta_c \cdot \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)$$

$\lambda_1=400\text{nm}$ ve $\lambda_2 =700 \text{ nm}$ optik aralığı ve tek yüklü ($z=1$) parçacık için

■ $\beta_{thr} = \frac{1}{n} \rightarrow \theta_c \approx 0$ Cherenkov threshold

■ $\theta_{max} = \arccos \frac{1}{n}$ 'saturated' angle ($\beta=1$)

$$\frac{dN}{dx} = 490 \sin^2 \theta_c \text{ cm}^{-1}$$

- Çerenkov açısı, θ_c , parçacığın hızına ve Çerenkov yayımlayıcının kırılma indisine(n) bağlıdır.
- $\beta=1$ limitinde Çerenkov açısı en büyük değerine ulaşır.

Table 5.4. *Compilation of Cherenkov radiators [1, 143]. The index of refraction for gases is for 0 °C and 1 atm (STP). Solid sodium emits light at wavelengths below 2000 Å [144, 145]*

| Material | $n - 1$ | β threshold | γ tl |
|----------------------------|----------------------|-------------------|-------------|
| Solid sodium | 3.22 | 0.24 | 1. |
| Diamond | 1.42 | 0.41 | 1. |
| Flint glass (SFS1) | 0.92 | 0.52 | 1. |
| Lead fluoride | 0.80 | 0.55 | 1. |
| Aluminium oxide | 0.76 | 0.57 | 1. |
| Lead glass | 0.67 | 0.60 | 1. |
| Polystyrene | 0.60 | 0.63 | 1. |
| Plexiglas (Lucite) | 0.48 | 0.66 | 1. |
| Borosilicate glass (Pyrex) | 0.47 | 0.68 | 1. |
| Lithium fluoride | 0.39 | 0.72 | 1. |
| Water | 0.33 | 0.75 | 1. |
| Liquid nitrogen | 0.205 | 0.83 | 1. |
| Silica aerogel | 0.007–0.13 | 0.993–0.884 | 8. |
| Pentane (STP) | $1.7 \cdot 10^{-3}$ | 0.9983 | 17. |
| CO ₂ (STP) | $4.3 \cdot 10^{-4}$ | 0.9996 | 34. |
| Air (STP) | $2.93 \cdot 10^{-4}$ | 0.9997 | 41.2 |
| H ₂ (STP) | $1.4 \cdot 10^{-4}$ | 0.99986 | 59.8 |
| He (STP) | $3.3 \cdot 10^{-5}$ | 0.99997 | 123 |

Çerenkov yayımlacı olarak kullanılan materyeller ve özellikleri

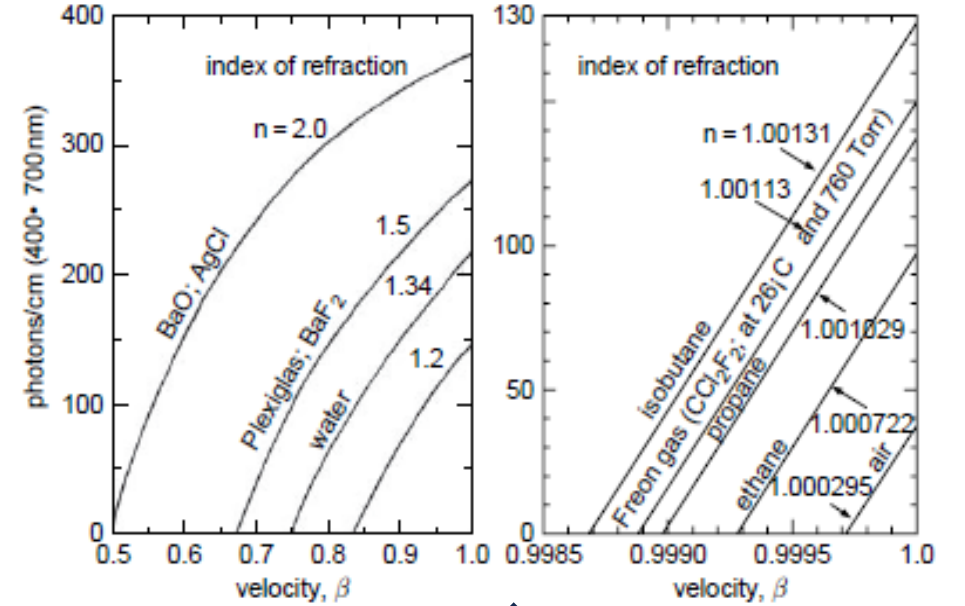
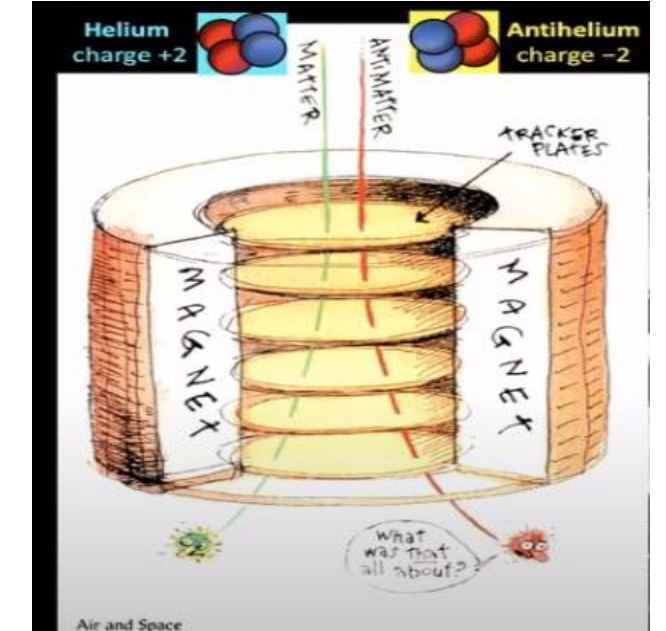
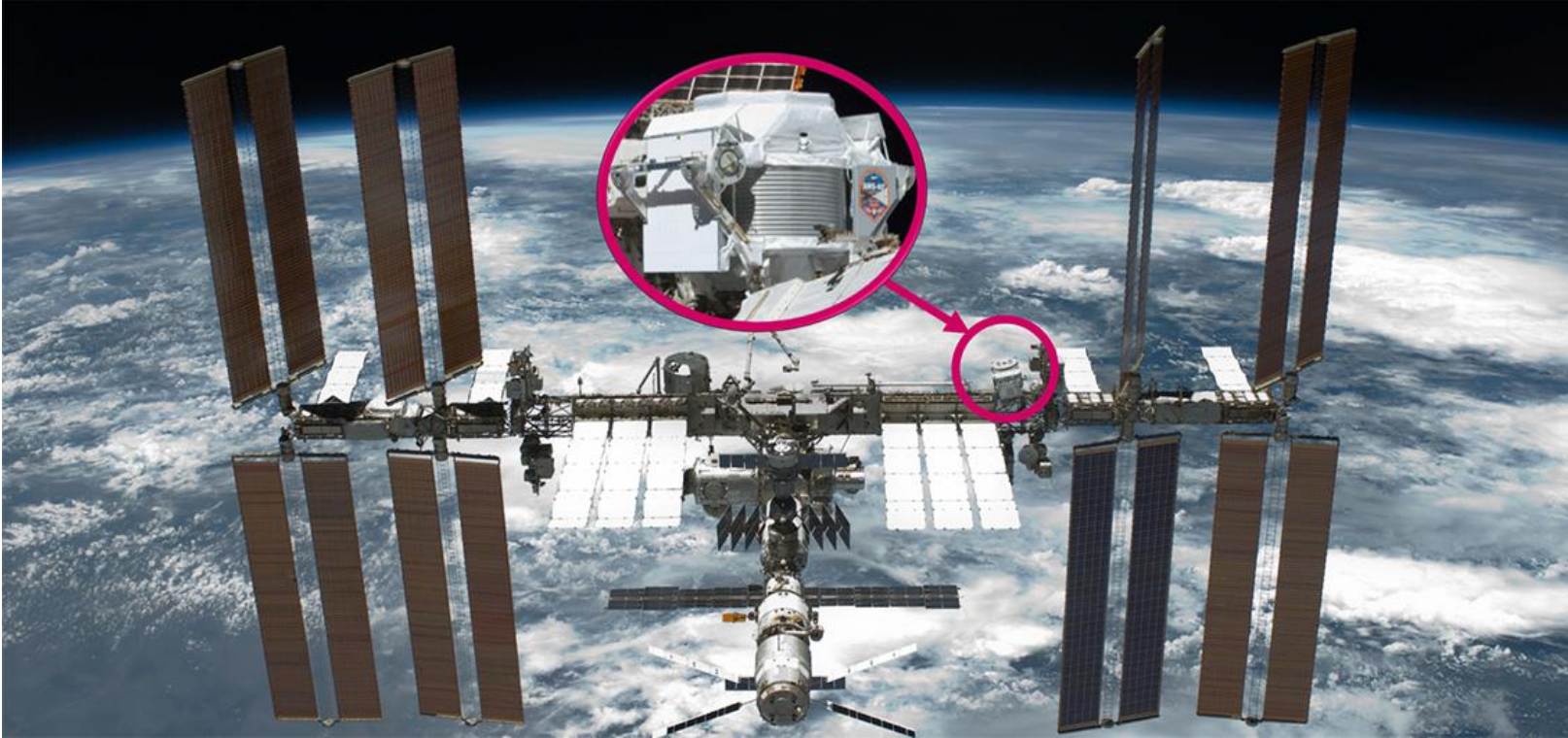


Fig. 5.40. Number of produced Cherenkov photons per unit path length for various materials as a function of the particle velocity [142].

Farklı materyellerde parçacığın hızının fonksiyonu olarak birim uzunluk başına yayımlanan foton sayısı.

- Alfa Manyetik Spektrometre Uluslararası Uzay İstasyonunu(ISS)
- Antimadde, Karanlık madde, hassas kozmik ışın çalışmaları ve evrendeki başka yeni olguları araştırmak üzere tasarlanmıştır.
- Uzaydaki ilk parçacık fiziği detektörüdür.
- TeV enerji bölgesinde $\sim 1\%$ hassasiyetle ölçmek üzere tasarlanmıştır.



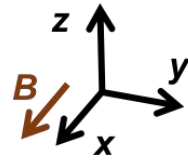
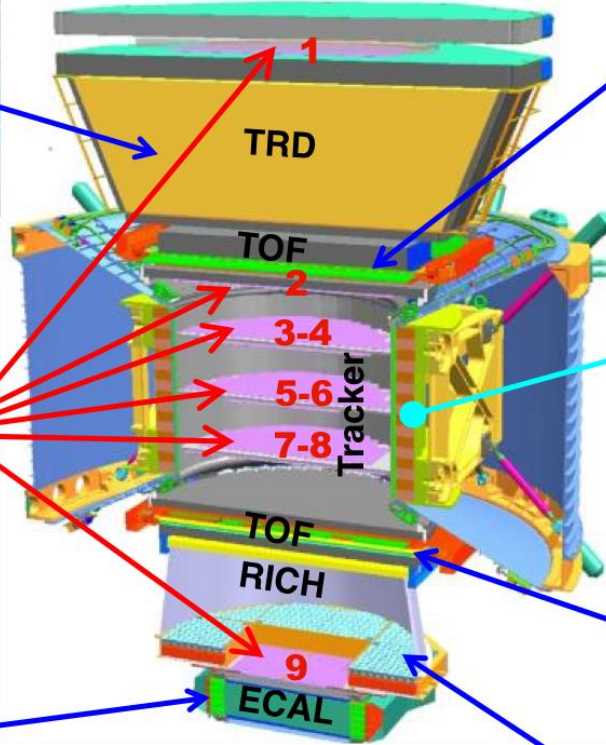
TRD
Identify e^+ , e^-



Silicon Tracker
 Z, P



ECAL
 E of e^+ , e^-



Time of Flight
 Z, E



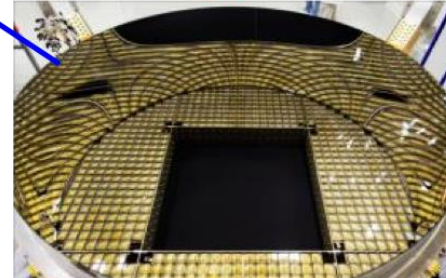
Magnet
 $\pm Z, P$



Time of Flight
 Z, E

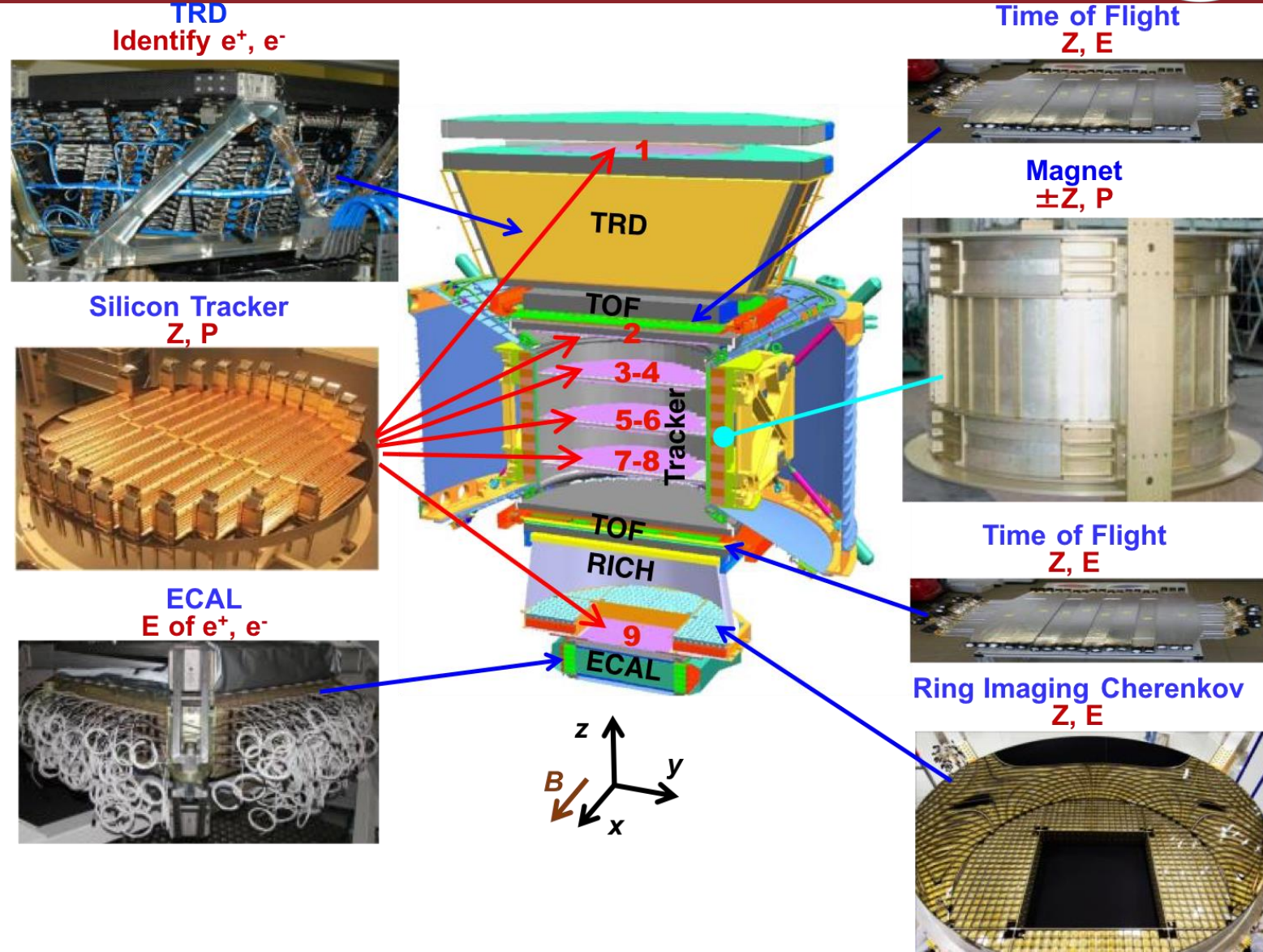


Ring Imaging Cherenkov
 Z, E



- AMS kalıcı bir mıknatıs ve onu çevreleyen bir dizi parçacık detektörlerinden oluşmuştur.
- En tepede geçiş ışıklı(TRD) detektör bulunur.
- TRD elektron ve pozitronları tanımlamak ve protonları(10^3 mertebesinde) dışlamak ve çekirdekleri enerji kayıp oranına (dE/dx) dayanarak ayırt etmek için kullanılır.
- Mıknatısın içinde, üzerinde ve altında 200000 kanal içeren 9 silikon izleyici tabakası bulunur.
- Mıknatıs ile birlikte yükün işaretini ölçmek ve parçacıkların momentumu ölçmek için kullanılır.
- $Z=6$ ve 10 için 5 mikron
- $Z=1$ için 10 mikron

- Miknatıs borusunun üzerinde ve altında Uçuş Zamanı (TOF) sayacı bulunur.
- AMS Yüklü parçacık tetikleyicisi görevi görür
- Gelen parçacıkların yönünü, hızını ve yükünü (dE/dx) ölçer
- Miknatısın etrafı AMS'e yandan gelen kozmik ışınları dışlamak için veto sayaçları bulunur. 0.99999 verimlilik
- Aşağıdaki TOF'un hemen altında Çerenkov Yüzük Görüntüleme(RICH) sayacı ve Elektromanyetik Kalorimetre bulunur.
- RICH içinden geçen parçacıkların yük ve hızını ölçer.
- Elektromanyetik kalorimetre elektron ve pozitronların(Tev enerjili) enerjilerini($\sim 2\%$ çözünürlük) ve yönlerini ($E > 100$ GeV için 0.5° çözünürlük)



- RICH iki yayıcıdan(radiator) oluşur. Merkezi yayıcı 16 tane NaF($n = 1.33$) kristal($85 \times 85 \times 5 \text{ mm}^3$) ve bunları çevreleyen 92 tane silikon köpük(aerogel) ($n = 1.05$) bloklar($115 \times 115 \times 25 \text{ mm}^3$)
- Bu sayede hızları $\beta > 0.75$ olan parçacıklar NaF ve $\beta > 0.953$ olanlar ise köpük ile RICH parçacık hızlarını 0.1%'den daha iyi bir hassasiyetle ölçer.
- 10 880 tane fotosensör (çok kanallı PMT).
- ECAL 600kg kurşun ve 50000 tane ışıldayıcı fiberden oluşur.
- 17 radyasyon uzunluğundadır (X_0) ve 1296 ölçüm hücresinden oluşur.
- ECAL ve izleyici birlikte elektron ve pozitronlar 10^4 mertebesinde ayırt edilir.
- Toplam 300000 elektronik okuma kanalı 650 mikro işlemci ile işlenerek veri herhangi bir fizik bilgisi kaybı olmadan ~ 1000 mertebesinde indirgenir.
- İstasyondan dünyaya veri akış hızı 10 Mbit/s
- Uzay istasyonuna gönderilmeden önce CERN'deki demet (elektron, proton ve pionlar) testleri yapılmıştır.
- Toplamda 2000 farklı kombinasyonla(parçacık, enerji, parçacıkların gelme açısı ve konumu) test edilmiştir.
- Bu demet test sonuçları AMS uzayda performansını izlemek ve analizlerle kalitesini test etmek için kullanılmaktadır.

- Dedektörler parçacıklar ile etkileşerek onları algılayıp özelliklerini belirlemek için kullanılan aygıtlardır.
- Planlanan amaca göre maliyet ve performansları optimize edilerek çok değişik malzemelerden ve şekillerde yapılabilirler.
- Büyük dedektörler sistemleri birçok alt dedektörün bir araya gelmesi ile oluşur.
- En içte parçacıkların izlerini belirleyen izleyiciler ve en dışta da muon dedektörleri bulunur.
- Hızlandırıcıda kullanılan dedektörler olduğu gibi nötrinoları ve kozmik parçacıkları ölçmek üzere hızlandırıcı dışında da detektörler bulunur.
- Dedektörleri geliştirmek için yapılan araştırmalar teknolojin sınırlarını zorlayarak yeni keşiflere yol açar.
- Ülke olarak bu konuda yapılan araştırmaların geliştirilmesine ve yaygınlaştırılması için daha çok çabaya ve desteğe ihtiyacımız vardır.
- Bu konuda siz gençlerimize de önemli görevler düşmektedir.

- Howard Fenker, <https://userweb.jlab.org/~hcf/detectors>
- W. R. Leo, Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments, 2nd edition, Springer, 1994
- C. Grupen, Particle Detectors, Cambridge University Press, 1996
- K. Kleinknecht, Detectors for Particle Radiation, 2nd edition, Cambridge University Press, 1998
- R.S. Gilmore, Single particle detection and measurement, Taylor&Francis, 1992
- Particle Data Book (Phys. Rev. D, Vol. 54, 1996)
<https://pdg.web.cern.ch/pdg/2010/reviews/rpp2010-rev-passage-particles-matter.pdf>
- R. Bock, A. Vasilescu, Particle Data Briefbook
<http://www.cern.ch/Physics/ParticleDetector/BriefBook>