


## Karanlık Madde Araştırmaları için Kullanılan Dedektör Teknolojileri

Ali Aşkın\*

Munzur Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Tunceli, Türkiye

\*aliaskin@munzur.edu.tr 

Makale gönderme tarihi: 06.11.2017, Makale kabul tarihi: 25.04.2018

### Öz

Evrendeki baryonik olmayan madde içeriğinin bilinen baryonik madde içeriğinden fazla olduğunun kozmolojik gözlemlerle açığa çıkmasından sonra, bu gizemli maddenin deneysel tespiti amacıyla dünya genelinde artan bir deneysel çalışma söz konusudur. Karanlık madde konusunda en kabul gören teorik görüş bu maddelerin zayıf etkileşimli ağır parçacıklar (Weakly Interacting Massive Particles, WIMPs) olduğu yönündedir. Farklı çalışma grupları farklı teknolojiler ve teknikleri kullanarak dedektör sistemleri geliştirmekte ve çalıştırmaktadır. Bu çalışmada, karanlık madde araştırmaları için geliştirilen dedektörlerin çalışma prensipleri ve şu anda gelinen mevcut durumları değerlendirilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Karanlık madde, parçacık dedektörü, WIMP

## Detector Technologies used for the Dark Matter Searches

### Abstract

Since cosmological observations reveals that the non-baryonic content of the universe is beyond its baryonic content, a World wide increasing experimental effort is ongoing for the experimental detection of this mysterious matter. The most compelling dark matter candidates are in the form of weakly Interacting Massive Particles (WIMPs). Different research groups are using different technologies and techniques to develop and operate detector systems. In this work, the working principles and current status of the detectors developed for the dark matter searches are reviewed.

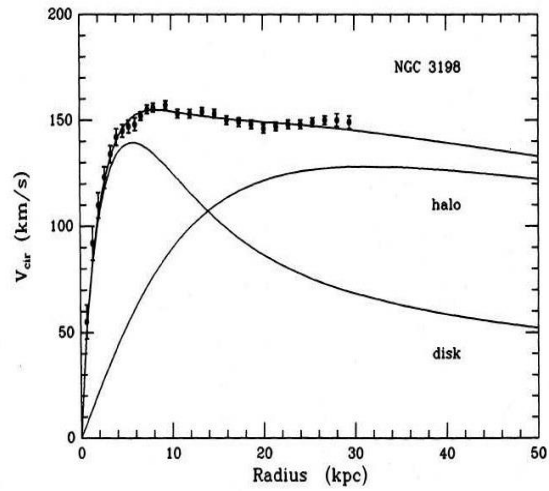
**Keywords:** Dark matter, particle detector, WIMP

### GİRİŞ

Elektromanyetik radyasyonu soğurmayan veya yaymayan karanlık maddenin varlığı ilk kez Coma kümesindeki kırmızıya kayma gözlemlerine bağlı olarak 1933 yılında Zwicky tarafından öne sürülmüştür (Zwicky, 1933). Karanlık maddenin varlığı ile ilgili galaktik boyuttaki başka bir kanıt disk galaksilerin dönme eğrilerinin analizinden açığa çıkmaktadır. Işık yayan maddenin çoğunluğunun galaksi merkezinde toplanması nedeniyle, galaksilerin hareketinin Newton dinamikleriyle açıklanması beklenir ve dairesel hız  $R^{-1/2}$  (R galaktik merkeze olan uzaklık) ile orantılı olmalıdır.

Ancak Şekil 1'de gösterilen NGC 6503 galaksisinin dönme eğrisinden anlaşılacağı gibi pek çok galakside bu durum sağlanmamıştır (Begeman, 1991).

Spiral galaksilerin dönme eğrileri belli mesafeden sonra sabit kalırken, yıldız yoğunluğu eksponansiyel olarak azalma göstermektedir. Bu



**Şekil 1.** NGC 6503 galaksisinin ölçülmüş rotasyon eğrisinin gaz, yıldızlar ve karanlık madde halesinin eğrisiyle beraber gösterimi (Begeman, 1991)

durum; ışık yaymayan maddenin ışık yayan madde ile beraber varlığını işaret etmektedir.

DOI: 10.29132/ijpas.349584

Karanlık maddenin varlığı ile ilgili diğer bir kanıt kütle-çekimsel lens olarak açıklanabilir. Bu durumda, galaksi kümeleri uzak galaksilerden yayılan ışığı uyguladıkları çekim alanı ile bükerek arka plandaki galaksinin farklı görüntülerini açığa çıkarır (Wambsganss, 1998). Karanlık maddenin varlığı ile ilgili güçlü bir kanıt galaksi kümelerinin çarpışmalarının gözlemlenmesi ile elde edilmiştir. Difüzyon yapan, X-ışını yayıcı galaksi kümeleri arasındaki sıcak plazma elektromanyetik olarak etkileşime girerek çarpışmada yavaşlarken, yıldızlar büyük bir engel olmadan bir birine geçerler ve yıldızlar arası gaz ile karşılaştırıldığında farklı bir dinamik sergilerler (Clowe ve ark., 2006) (Bradac ve ark., 2008). Kozmik mikrodalga artalanı (CMB) veya mikrodalga dalga boylu fotonlar, karanlık maddenin varlığını işaret eden diğer bir kanıttır. Bu fotonlar büyük patlamanın (Big Bang) sonucunda açığa çıkmışlardır. Wilkinson Mikrodalga Anisotropi Probu (WMAP) evrendeki toplam madde yoğunluğunu ölçmek amacıyla kullanılmaktadır ve bu probdan alınan veriler kullanılarak evrendeki toplam madde yoğunluk parametresi  $\Omega_m=0.266\pm 0.0299$  ve toplam baryonik madde yoğunluk parametresi ise  $\Omega_b=0.0449\pm 0.0028$  olarak bulunmuştur (Dunkley, 2009; Komatsu, 2011).

Bu bilinmeyen gizemli maddenin tespit edilebilmesi amacıyla yaklaşık 30 yıldan beri dünya genelinde deneysel çalışmalar, farklı yöntem ve dedektör sistemleri kullanılarak devam etmektedir. Zayıf etkileşimli ağır parçacıklar (Weakly Interacting Massive Particles, WIMPs) olgusu, karanlık madde bulmacası için önerilen çözümlerden bir tanesidir (Jungman, 1996) WIMP parçacıkları elektromanyetik etkileşim yapmayıp sadece zayıf etkileşim ve çekim etkisi ile etkileşime girmeleri nedeniyle tespit edilme olasılıkları küçük olmakla beraber mümkündür (Gaitskell, 2004). Bu ağır parçacıkların ( $m_w = 100 \text{ GeV } c^{-2}$ ) tespiti dedektörün atom çekirdeği ile yaptıkları nükleer tepmenin ölçülmesine bağlıdır. WIMP kütlesi ile dedektörü oluşturan atom çekirdeklerinin kütesinin aynı olduğu kabul edilirse, WIMP ve dedektör atom çekirdeğinin etkileşimi çekirdeğin tepmesine ve dedektör içinde enerji depolanmasına neden olur. WIMP parçacıkları rölativistik olmayan hızlarda hareket etmelerinden dolayı, dedektörde depolanan enerji

$$E_r = \frac{m_w^2 \cdot m_N}{(m_w + m_N)^2} * v^2 (1 - \cos \theta) \quad (1)$$

ile hesaplanabilir. Burada  $m_N$  çekirdek kütesini,  $m_w$  ve  $v$  sırasıyla WIMP kütesini ve hızını,  $\theta$  ise saçılma açısını göstermektedir.

WIMP-çekirdek etkileşimi ve dedektör içinde depolanan enerjinin küçük olması nedeniyle, karanlık madde araştırmalarında kullanılacak dedektörlerin artalan sinyallerinin bastırılması önemlidir. Bu nedenle, bu dedektörlerin kozmik müyonlara karşı yalıtılması için derin yeraltı laboratuvarlarına yerleştirilmesi gerekmektedir. Böylelikle dedektörün maruz kalacağı müyon seviyesi 6 kata kadar azaltılabilir. Ayrıca aynı anda birkaç farklı özellikteki sinyalin ölçülmesi ile dedektör elektronları ile etkileşim sonucu oluşan elektromanyetik artalan aktif olarak elenebilecektir. Bu sayede elektron ve gama etkileşimi sonucu açığa çıkan sinyallerin 3 kat azaltılması gerçekleştirilebilir.

## LİTERATÜR TARAMASI

Astroparçacık fiziği ve karanlık madde tespiti; günümüzde kullanılmakta olan dedektörlerin yapısı, çalışma prensipleri ve bu dedektörler ile yapılan deneylerden elde edilen sonuçların analiz, sentez ve yorumuna dayanmaktadır. Bu çalışmada, uluslararası bilimsel literatürde çeşitli çalışma grupları tarafından yayınlanmış araştırmalarında kullandıkları dedektör sistemleri ve elde ettikleri sonuçları açıklayan makaleler derlenmiştir.

### Karanlık Madde Tespit Dedektörleri

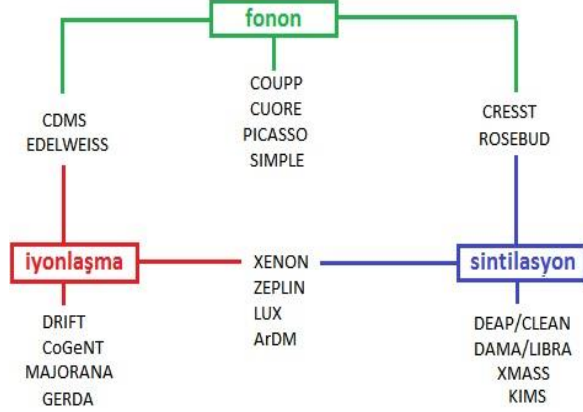
Bu bölümde karanlık madde araştırmalarında kullanılan dedektörlerin çalışma prensipleri ve deneylerden elde edilen sonuçlar açıklanacaktır. Şekil 2’de karanlık madde araştırmalarında kullanılan dedektörler tespit prensiplerine göre şematik olarak verilmiştir. Dedektör içinde depolanan enerji sintilasyon (foton), fonon (ısı), iyonlaşma veya bunların kombinasyonları ile ölçülebilmektedir.

### DAMA/LIBRA Deneyi

DAMA/LIBRA deneyi İtalya’da Gran-Sasso yer altı laboratuvarlarında yapılmış olan DAMA/NaI deneyinin devamıdır.

Derleme makale/Review article

DOI: 10.29132/ijpas.349584



Şekil 2. Parametre ölçümüne bağlı olarak çalışma yapan araştırma grupları

DAMA/NaI'dan veri alımı Temmuz 2002'de durdurulup DAMA/LIBRA deneyinin kurulmasına başlanmıştır. Yeni LIBRA (Large Sodium Iodid Bulk for Rare processes) deneyi, herbiri 9.7 kg olan 25 adet NaI(Tl) kristalinden oluşmaktadır. Her bir kristal iki ucundan düşük artalanlı foton çoğaltıcı tüplerle (photomultipliers, PMT) okunmaktadır. Kristal ve PMT modülleri ultra saflıktaki bakır kılıflara yerleştirilmiştir (Bernabei ve ark., 2008). Deney verileri analiz edildiğinde elde edilen sonuçlar modelden bağımsız karanlık maddenin yıllık modülasyon sinyaline göre galaktik hale'de varlığını doğrulamıştır (Bernabei ve ark., 2010).

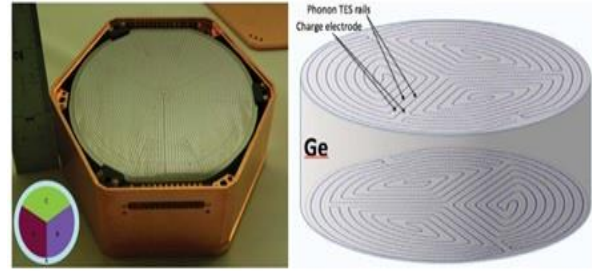
### Kriyojenik Deneyler

Kriyojenik bolometrelerde artalan oluşturan gama ve elektron sinyallerinin ayırımı için fonon sinyallerinin iyonlaşma sinyallerine oranı (Cryogenic Dark Matter Search (CDMS) (Sander ve ark., 2013) ve EDELWEISS deneylerinde) (Kéfélian, 2015) veya fonon sinyallerinin sintilasyon sinyallerine oranı (Cryogenic Rare Event Searches with Superconducting Thermometers (CRESST) deneyi (Pettricia ve ark., 2016)) kullanılabilir.

### SuperCDMS

SuperCDMS deneyi CDMSII deneyinin devamı olarak Kanada Ontarioda bulunan SNOLAB yer altı laboratuvarlarında araştırmasını yapmaktadır. Bu deneyde kullanılan 76 mm çapında ve 26 mm kalınlığındaki 15 adet ultra saf germanyum dedektörünün toplam ağırlığı 10 kg'dır. Her bir germanyum dedektörünün alt ve üst yüzeylerine 4 adet fonon

ve iki adet sintilasyon ölçüm sensörleri fotolitografik yöntemler ve ince film teknolojisiyle oluşturulmuştur. Dedektör içinde parçacık etkileşimi meydana geldiğinde, elektron-boşluk çiftleri ve fononlar açığa çıkar. Fononlar kristal içinde yayılarak fonon sensörlerinde toplanır. Elektron boşluk çiftleri ise dedektör yüzeyine sürüklenerek yük toplama elektrotlarında toplanır (Sander ve ark., 2013).



Şekil 3. Solda bakır muhafaza kalıbı içinde yer alan SuperCDMS izip dedektör modülü sağda ise izip dedektörünün fonon ve yük sensörlerinin şematik gösterimi verilmiştir (Sander, 2013)

SuperCDMS ile alınan 1690 kg gün'lük veriler analiz edildiğinde beklenen artalanla uyumlu tek WIMP aday sinyali tespit edilmiştir. Bu analizler sonucunda Spin – bağımsız 12 GeV  $c^{-2}$ 'den büyük kütleler için WIMP-çekirdek etkileşim olasılığı  $1.4 \times 10^{-44} \text{ cm}^2$  ( $1.4 \times 10^{-8} \text{ pb}$ ) olarak belirtilmiştir (Agnese ve ark., 2017).

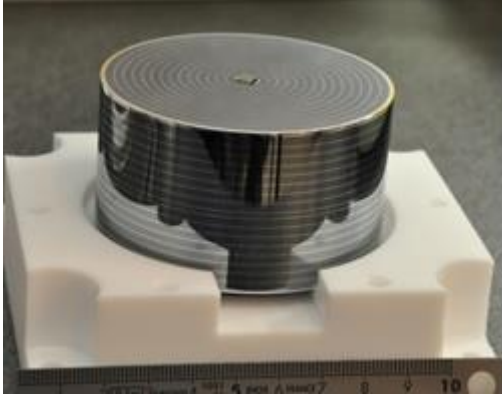
### EDELWEISS

EDELWEISS III deneyi Fransa'da, Laboratoire Souterrain de Modane (LSM) yer altı laboratuvarlarında kurulmuştur. Laboratuvar 4800 m kaya yüksekliği ile Kozmik müyonlara karşı yalıtım sağlamaktadır. Dedektörleri içinde bulunduran kryostat çevresel gama radyasyonuna karşı 20 cm'lik kurşun yalıtımla kaplanmıştır. Dedektörü nötronlara karşı yalıtım amacıyla, kurşun yalıtımın üzeri 50 cm kalınlığında polietilen kaplamayla kapatılmıştır. Deneyin günümüzdeki 3. aşamasında kullanılan EDELWEISS III dedektörleri yüksek saflıkta germanyum mono-kristal bolometrelerinden oluşmaktadır. Bu dedektörler termistör olarak kullanılan nötron transmutasyon dopingli Ge sensörleri ve bunları çevreleyen eş merkezli alüminyum halka elektrotlarından oluşmuştur. Dedektör içinde parçacık etkileşimi sonucu açığa

Derleme makale/Review article

DOI: 10.29132/ijpas.349584

çıkacak ısı ve sintilasyonun aynı anda ölçülmesi dedektör içinde elektron ile etkileşimi yapan gama ve beta sinyallerini çekirdek ile etkileşim yapan WIMP ve nötron sinyallerinden ayırmayı sağlar (Kéfélian, 2015). Şekil 4'te EDELWEISS III dedektörü gösterilmiştir.



Şekil 4. EDELWEISS III Ge bolometresi (EDELWEISS, 2017)

EDELWEISS III deneyi bilimsel veri almaya devam etmektedir. Projenin önceki aşaması olan EDELWEISS II deneyinin 386 kg gün'lük verileri analiz edildiğinde nükleer tepkime bandında toplamda 5 WIMP etkileşim aday sinyali tespit edilmiş ancak bu sinyallerin artalanına ait üst salınım sinyalleri olduğu açıklanmıştır (Armengaud, 2011).

### CRESST

CRESST deneyinde  $\text{CaWO}_4$  kristalleri parçacık tespiti amacıyla dedektör olarak kullanılmaktadır. Dedektör modülü  $\text{CaWO}_4$  kristali, kristal üzerinde ince film teknolojisi ile oluşturulan süper iletken tungsten termometresi (fonon sensörü) ve kristal içinde parçacık etkileşimi sonucu açığa çıkan sintilasyonu tespit etmek amacıyla silisyum foton sensöründen oluşmaktadır. Şekil 5'te CRESST dedektör modülü gösterilmiştir.

Dedektör modüllerinin sıcaklığı  $\text{He}_3/\text{He}_4$  kryostatı ile mili Kelvin seviyelerine indirgenerek tungsten termometrenin süper iletken fazına geçmesi sağlanır. Kristal içinde etkileşmeye giren parçacığın enerjisine bağlı olarak açığa çıkan fonon sinyalleri kristal içinde yayılır ve tungsten termometreye ulaşır.



Şekil 5. CRESST dedektör modülü. Kristal içinde açığa çıkan sintilasyonu tespit etmek için kullanılan silisyum foton sensörü (Sol).  $\text{CaWO}_4$  kristali ve üzerinde bulunan tungsten fonon termometresi (sağ) (CRESST, 2016)

Anlık olarak termometrenin sıcaklığındaki değişim termometre üzerinden geçen akımın değişmesine neden olur. Dedektör içinde parçacık etkileşimi sonucu açığa çıkan fotonlar, kristali görmekte olan silisyum foton sensörü aracılığı ile tespit edilir. CRESST deneyinin ikinci fazında (CRESST II), Temmuz 2013 ve Ağustos 2015 yılları arasında alınan karanlık madde verileri analiz edilmiş, elde edilen sonuçlar hafif karanlık madde için elde edilen nükleer etkileşim eşik tespit değerinin 307 eV olduğunu göstermiştir (Pettricia ve ark., 2016).

### Sıvı Soygaz Dedektörleri

Sıvı ksenon (liquid Xenon, LXe) ve Sıvı Argon (liquid Argon, LAr) gibi sıvı soygazların karanlık madde araştırmalarında tercih edilme nedenleri;

- Yüksek sintilasyon verimi ve aynı anda sintilasyon ve iyonlaşma sinyallerinin ölçümüne olanak vermesi ile dedektör içinde meydana gelen etkileşimlerin ayrılmasına (elektron veya çekirdek ile etkileşim) imkân sağlaması sayesinde etkileşime giren parçacığın tanınması,
- $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  gibi doğal radyoaktif kirliliğin çok düşük olması. Gazların filtrelenmesi ile bu radyoaktif kaynakların kolaylıkla temizlenmesi,
- Çok büyük çaplarda (ton seviyesinde) dedektörlerin kurulmasına imkân vermesidir.

İki fazlı (sıvı ve gaz) parçacık tespit tekniği 1970'li yılların başında sıvı argon için önerilmiştir (Dolgoshein, 1973). Sıvı soygazların WIMP araştırmalarında kullanılması ilk kez



DOI: 10.29132/ijpas.349584

(Barabash ve ark., 1989) tarafından 1989 yılında önerilmiştir.

İki fazlı dedektör içinde meydana gelen parçacık etkileşimleri soygaz atomlarının uyarılmasına ve iyonlaşmasına neden olur. Atomlar, uyarılmış moleküller (dimer veya eksimer  $Xe_2^*$ ,  $Ar_2^*$ ) ile uyarılır ve sintilasyon yaparlar. Elektrik alanı uygulanmadığında dedektör içinde parçacık etkileşimi sonucunda oluşan elektronlar ve iyonlar rekombinasyon sintilasyonu olarak adlandırılan ikinci bir sintilasyon açığa çıkarır ve eksimer oluştururlar. Elektrik alanı uygulandığı takdirde açığa çıkan elektronların uzaklaştırılması ile bu sintilasyon kısmen bastırılır. Bu elektronlar elektrik alanı içinde sıvı ve gaz birleşme yüzeyine doğru sürülür ve sıvı fazından gaz fazına aktarımı sağlanır. Gaz fazına geçen bu elektronlar elektrik alanı içinde hızlanarak gaz atomlarına çarpar ve onları uyararak elektro-ışımaya (ElectroLuminescence, EL) neden olur. EL 'nin miktarının iyonlaşan atomlarla orantılı olması nedeniyle buna orantısal sintilasyonda denir. Ksenon için sintilasyon dalga boyu 175 nm ve Argon için 125 nm'dir. Sintilasyon ve EL sinyallerini tespit etmek için foton çoğaltıcı tüpler (Photomultipliers, PMT) kullanılır.

Elektron etkileşimleri ve nükleer etkileşimler sonucu açığa çıkan iyonlaşma dolayısıyla sintilasyon ve EL miktarları farklı olması nedeniyle, sintilasyonun EL'ye oranı elektron ve gama etkileşimlerini nükleer etkileşimlerden ayırmada etkin bir yöntemdir (Aprile ve ark., 2012).

### ZEPLIN-III

ZEPLIN (Zoned Proportional Scintillation in Liquid Noble Gases ) deneyi iki fazlı (sıvı/gaz) dedektör sistemine dayalı olup, deneyinin III. aşamasında 50 kg LXe kullanılmıştır. Dedektör geometrisi disk yapıda olup en iç kısımda bulunan 12 kg'lık bölüm parçacık etkileşiminin tespit edilmesi amacıyla tespit hacmi olarak kullanılmış, 12 kg'lık kısmı çevreleyen 38 kg LXe ise 12 kg'lık tespit hacmini artalan sinyallerine karşı yalıtım amacıyla kullanılmıştır. Dedektörün disk yapısı yüksek elektrik alanı ve yüksek sintilasyon verimi için optimize edilmiştir. 31 adet 2-inch PMT sıvı ksenon içine batırılarak tespit hacminde parçacık etkileşimi sonucunda açığa çıkan sintilasyonu tespit etmek amacıyla kullanılmıştır. Dedektör içinde açığa

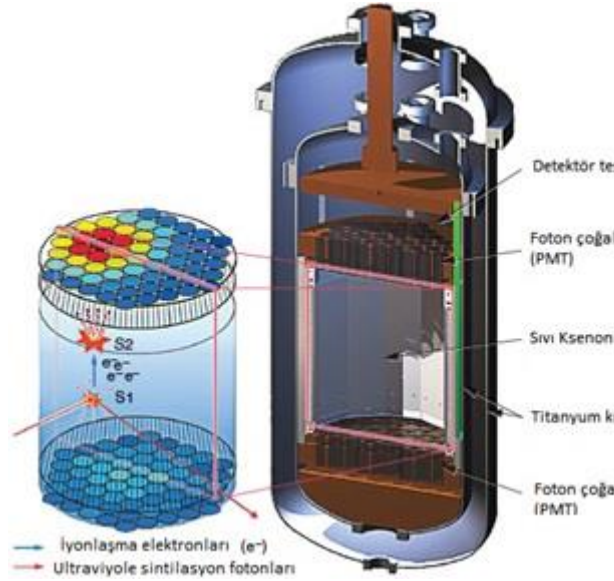
çıkan elektronların gaz fazına geçirilmesi amacıyla LXe'nin bulunduğu sıvı bölge alt ve üst kısımlarından transparan ızgara elektrotlarla donatılmıştır. Bu elektrotlar LXe içinde iyonlaşma sonucu açığa çıkan elektronları gaz fazına sürmek için tespit hacmi içinde  $3.9 \text{ kV cm}^{-1}$  büyüklüğünde bir elektrik alanı oluşturma amacıyla kullanılır. Gaz fazında bulunan 3. ızgara elektrotu ise gaz fazına geçen elektronları gaz ksenon içinde hızlandırmak için  $7.8 \text{ kV cm}^{-1}$  büyüklüğünde bir elektrik alanı oluşturmak amacıyla kullanılmıştır. ZEPLIN III dedektörü ile alınan 847 kg gün' lük veri analiz edilmiştir. Spin-bağımsız WIMP etkileşimleri için elde edilen hassasiyet  $60 \text{ GeV c}^{-2}$  enerjide  $8.1 \times 10^{-8} \text{ pb}$  (piko barn) olarak yayınlanmıştır (Lebedenko ve ark., 2009).

### LUX

LUX (Large Underground Xenon) deneyi WIMP karanlık madde parçacıklarını tespit etmek amacıyla 250 kg LXe'yi dedektör tespit hacminde kullanmıştır. Dedektör iki fazlı olup sıvı ve gaz fazından oluşmaktadır. Dedektör içinde meydana gelen parçacık etkileşimleri vakum ultraviyole (VUV) dalga boylu birinci sintilasyona (S1) ve iyonlaşmaya neden olur. İyonlaşma sonucu açığa çıkan elektronlar uygulanan elektrik alanı içinde sıvı-gaz birleşme yüzeyine doğru sürülerek gaz fazına geçirilir ve burada daha büyük bir elektrik alanı içinde hızlandırılarak gaz ksenon atomlarıyla çarpışır ve ikinci sintilasyonu (S2) açığa çıkarır. S1 ve S2 sintilasyon fotonları dedektörün alt ve üst kısımlarına yerleştirilmiş PMT' ler aracılığı ile tespit edilir. S1 ve S2 sintilasyonuna bağlı PMT sinyalleri etkileşimin olduğu noktanın 3 boyutlu tespiti amacıyla kullanılabilir. S1 ve S2 sinyallerinin oranlanması ile elektron etkileşimlerini nükleer etkileşimlerden ayırarak dedektör artalan sinyallerinin ayrılması sağlanır. Şekil 6'da LUX dedektörünün şematik resmi ve çalışma prensibi gösterilmiştir. Spin-bağımsız WIMP-çekirdek etkileşimleri için  $50 \text{ GeV c}^{-2}$  enerjide dedektör hassasiyeti  $2.2 \times 10^{-10} \text{ pb}$  olarak yayınlanmıştır (Akerib ve ark., 2017).

### XENON1T

XENON1T deneyi İtalya'da bulunan Laboratori Nazionalli del Gran Sasso (LNGS) yer altı laboratuvarlarında karanlık madde tespiti için çalıştırılmaktadır.



Şekil 6. LUX dedektörünün çalışma prensibi (sol) ve dedektörün şematik çizimi (sağ) (Akerib ve ark., 2017)

Dedektör iki fazlı olup, yapımında toplam olarak 3200 kg ultra saflıkta sıvı ksenon kullanılmıştır ve 1 ton sıvı ksenon dedektör merkezinde tespit hacmi içinde bulunmaktadır. 1 tonluk kısmı çevreleyen 2.2 tonluk sıvı ksenon ise artalan sinyalleri için yalıtım ve veto bölgesi olarak tasarlanmıştır. Dedektör içinde meydana gelen parçacık etkileşimleri vakum ultraviyole (VUV) dalga boylu birinci sintilasyona (S1) ve iyonlaşmaya neden olur. İyonlaşma sonucu açığa çıkan elektronlar uygulanan  $1.1 \text{ kV cm}^{-1}$  büyüklüğündeki elektrik alanı içinde sıvı-gaz birleşme yüzeyine doğru sürülerek gaz fazına geçirilir. Gaz fazına geçiş yapan elektronlar  $10 \text{ kV cm}^{-1}$  değerinden daha büyük bir elektrik alanı içinde hızlandırılarak gaz ksenon atomları ile çarpışır ve ikinci sintilasyonu (S2) açığa çıkarır. Dedektör içinde meydana gelen etkileşimler sonucu açığa çıkan hızlı S1 sintilasyon sinyali ve orantısız S2 sintilasyon sinyalinin tespit etmek amacıyla 248 adet 3 inç Hamamatsu R11410-21 PMT' si dedektörün alt ve üst kısımlarına yerleştirilmiştir. S2/S1 sinyallerinin oranı nükleer (çekirdek) etkileşimleri, elektron,  $\gamma$  ve  $\beta$  etkileşimlerinden ayırmak için kullanılır. PMT'ler tarafından tespit edilen sintilasyonun oranlanması ile etkileşimin meydana geldiği noktanın x ve y koordinatları, ayrıca S1 ve S2 arasındaki zaman farkı kullanılarak dedektör içinde meydana gelen etkileşimin derinliği (z

koordinatı) tespit edilebilir. XENON1T dedektörü ton boyutlarında tasarlanıp çalıştırılan ilk dedektördür. Dedektörün yapımında kullanılan her malzemenin sahip olduğu doğal radyoaktivite ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  ve  $^{60}\text{Co}$ ) değerleri yüksek saflıkta Germanyum (HPGe) gama spektroskopisi kullanılarak ölçülmüş (Baudis ve ark., 2011) ve yapımında en düşük doğal radyoaktiviteye sahip malzemeler kullanılmıştır. Gaz ksenonu sıvılaştırmak ve dedektörün çalışması esnasında sıvı fazında kalmasını sağlamak amacıyla iki adet Iwatani PC-150 Pulse Tube Refrigerator (PTR) kullanılmıştır (Giboni ve ark., 2006). Gaz ksenon içinde var olabilecek kripton kirliliği, kripton distilasyon ünitesiyle,  $\text{H}_2\text{O}$  ve  $\text{O}_2$  gibi elektro-negatif kirleticiler ise yüksek sıcaklıklı Zirkonyum gaz saflaştırıcı (SAES PS4-MT50-R) aracılığı ile sıvılaştırma işleminden önce temizlenmiştir. Çevresel radyoaktiviteye karşı dedektörü yalıtım amacıyla, dedektör 9.6 metre çapında bir su tankının merkezine yerleştirilmiştir. 84 PMT su tankı içinde meydana gelen sintilasyonu tespit ederek Cherenkov müyon vetosu görevi görmektedir. XENON1T dedektörü ile Kasım 2016 ve Ocak 2017 tarihleri arasında alınan  $34.2 \text{ kg gün}^{-1}$  veri karanlık madde tespiti için analiz edilmiş ve  $35 \text{ GeV c}^{-2}$  enerjili WIMP' ler için dedektör hassasiyeti  $7.7 \times 10^{-47} \text{ cm}^2$  ( $7.7 \times 10^{-11} \text{ pb}$ ) olarak yayınlanmıştır. Böylelikle XENON1T karanlık madde tespiti amacıyla çalıştırılan en hassas dedektördür (Aprile ve ark., 2017). Şekil 7'de XENON1T dedektörünün şematik gösterimi verilmiştir (Aprile, 2017).

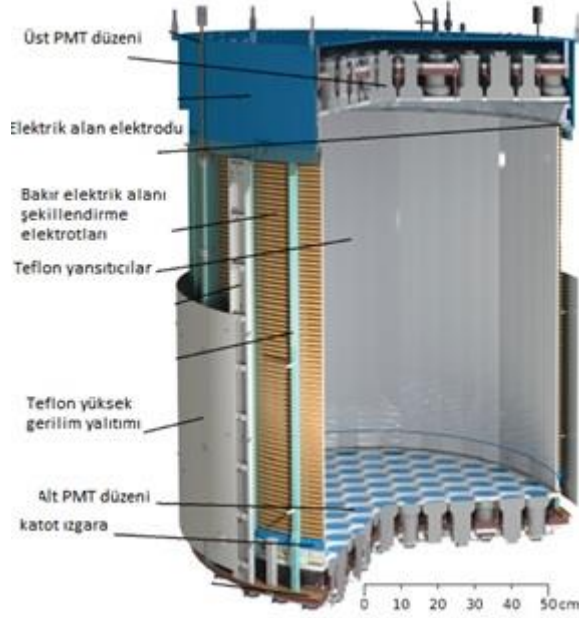
## XMASS

XMASS dedektörü Japon ve Kore araştırma enstitüleri ve üniversitelerinin ortak çalışmaları ile yapılmış ve Japonya'da bulunan Kamioka yer altı laboratuvarlarında çalıştırılmaktadır. XMASS dedektörü çok amaçlı bir dedektör olup karanlık madde tespit amacının yanında pp döngüsünde açığa çıkan solar nötrinoları ve nötrinossuz çift beta bozunmalarını (neutrinoless double beta decay) tespit amacı ile çalıştırılmaktadır (Martens, 2009). XMASS dedektörü tek fazlı (sıvı) olup dedektör geometrisi küre şeklindedir. Dedektör içinde 800 kg sıvı ksenon kullanılmıştır ve 100 kg sıvı ksenon dedektör tespit hacmini oluşturmakta, geri kalan 700 kg ise çevresel radyoaktiviteye karşı tespit hacmini yalıtılmaktadır. Dedektör içinde parçacık

Derleme makale/Review article

DOI: 10.29132/ijpas.349584

etkileşimleri sonucu açığa çıkan sintilasyonu tespit etmek amacıyla 812 Hamamatsu R10789 PMT'si kullanılmıştır.

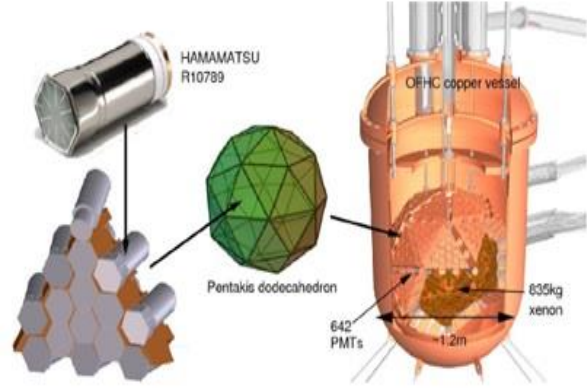


Şekil 7. XENON1T dedektör yapısının şematik olarak gösterimi. Sıvı Ksenonun doldurulduğu dedektör tespit hacmi teflon yansıtıcılar ile kapatılmış bölgedir (Aprile ve ark., 2017)

Sıvı ksenonu ve PMT'leri içinde bulandıran bakır küre su tankı merkezinde asılı olarak bulunmaktadır. Su tankı Cherenkov radyasyonunu tespit etmek ve müyon vetosu amacıyla PMT'ler ile donatılmıştır. Şekil 8'de XMASS dedektör şematığı gösterilmiştir.

XMASS dedektörüne ait tahmin edilen artalan, Monte – Carlo simülasyonlarından elde edilen sonuçlara göre  $1 \times 10^{-4}$  etkileşim  $\text{kg}^{-1} \text{keV}^{-1} \text{gün}^{-1}$ 'dir. Bu artalan seviyesine bağlı olarak beklenen dedektör hassasiyeti  $\sim 10^{-9}$  pb olarak yayınlanmıştır (Martens, 2009).

PTFE yansıtıcılar ince bir tetraphenylbutadiene (TPB) dalga boyu kaydırıcı tabaka ile kaplanarak vakum ultraviyole dalga boyundaki LAr sintilasyonunun dalga boyu PMT'lerin duyarlı olduğu dalga boyu bölgesine kaydırılmıştır. Dedektörün çalışma prensibi sıvı ksenon dedektörleri ile benzerdir. LAr içinde meydana gelen parçacık etkileşimleri birinci sintilasyon S1 ve iyonlaşmaya neden olur. İyonlaşma sonucu açığa çıkan elektronlar elektrik alanı içinde gaz fazına geçirilerek burada ikinci sintilasyon, S2'nin açığa çıkmasını sağlar.

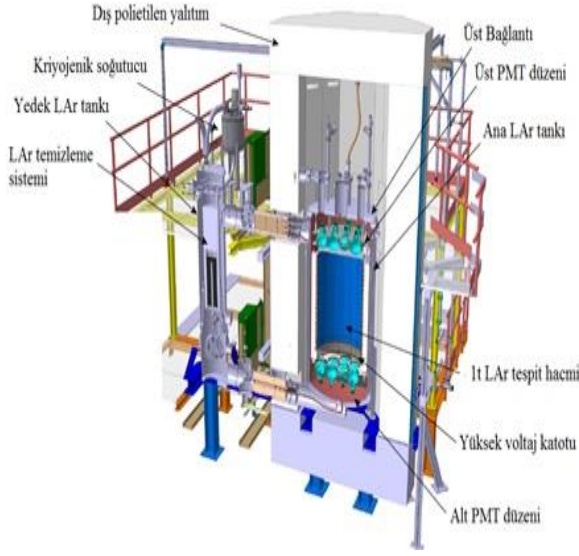


Şekil 8. XMASS dedektör yapısı (Martens, 2009)

S1 ve S2 sintilasyon fotonlarının tespit edilmesi amacıyla dedektör alt ve gaz fazının bulunduğu üst kısmından 24 adet 8" (inç) çaplı kriyojenik Hamamatsu R5912-02MOD-LRI PMT' ler ile donatılmıştır. Dedektörün yapısında kullanılan malzemelerin doğal radyoaktivite değerleri HPGe spektroskopi sistemiyle ölçülmüş ve düşük radyoaktiviteli malzemeler dedektör inşasında kullanılmıştır. Gaz Argonun saflık seviyesini arttırmak ve içinde bulunan kirleticilerden arındırmak amacıyla oda sıcaklığında çalışan MicroTorr MC4500-902FV gaz saflaştırıcı kullanılarak temizlenmiştir. Gaz Argonun sıvılaştırılması için 266 W soğutma gücünde 3 adet GiffordMacMahon cryorefrigerators, CRYOMEC AL300 kriyojenik soğutucu kullanılmıştır (Calvo ve ark., 2016). Şekil 9'da ArDM dedektörünün şematığı gösterilmiştir.

ArDM dedektörü kararlı şartlarda 6 ay süreyle sadece sıvı fazında çalıştırılarak test edilmiş ve alınan veriler incelendiğinde fonksiyonelliği ve performansı onaylanmıştır. ArDM dedektörü iki fazlı çalışma için yenilenmekte ve yüksek voltaj kaynağı, elektrik alan kafesleri ile yeni yansıtıcıların eklenmesi çalışmaları devam etmektedir (Calvo ve ark., 2017).





Şekil 9. ArDM deneyinin şematik gösterimi (Calvo ve ark., 2016)

## SONUÇ

Bu çalışmada çeşitli karanlık madde deneyleri ve deneylerde kullanılan dedektör teknolojileri derlenmiştir. Deneysel teknikler hızlı bir şekilde gelişmektedir ve yüksek hassasiyetli yeni dedektörler önümüzdeki yıllar içinde karanlık maddenin deneysel olarak tespiti için veri alınmasına başlayabilecektir. Günümüze kadar yapılan çalışmalarda elde edilen dedektör hassasiyeti  $10^{-11}$  pb seviyelerindedir ve çalışma grupları  $10^{-12}$  pb seviyelerinin altına inmeyi hedeflemektedir. Böylelikle süper simetri (SUSY) modelince tahmin edilen bütün  $m_w$  parametre uzayı kontrol edilebilecektir. Bu hedefin gerçekleşmesi sadece ton ve multi-ton seviyelerinde dedektörler ile mümkün olabilecektir. WIMP-çekirdek etkileşimlerinde dedektör içinde depolanan enerjinin çok küçük olması nedeniyle, dedektörün enerji tespit eşliğinin çok düşük olması gerekir. Dedektörün sahip olduğu artalanın düşük olması tespiti zor olan WIMP sinyallerinin tespit olasılığını arttıracaktır. Bu nedenle dedektör yapımında kullanılacak malzemelerin dikkatli seçilmesi ve düşük radyoaktifiteli malzemelerin kullanımı önemlidir. Karanlık madde tespiti için dizayn edilen dedektörlerin ihtiyaç duyduğu özellikler fotonik ve kriyojenik alanlarında yeni teknolojilerin gelişmesine neden olmuş, düşük artalanlı ve kriyojenik sıcaklıklarda çalışabilecek

PMT'ler ile mekanik çalışma sistemli kriyojenik soğutucular geliştirilmiştir.

## KAYNAKLAR

- Agnese, R., Aramaki, T., Arnquist, I.J., Baker, W., Balakishiyeva, D., Banik, S., Barker, D., Thakur, R. B., Bauer, D. A. ve ark., 2017. Results from the super cryogenic dark matter search (SuperCDMS) experiment at Soudan. <https://arxiv.org/abs/1708.08869>, 29 Ağustos 2017.
- Akerib, D., Alsum, S., Araujo, H.M., Bai, X., Bailey, A.J., Balajthy, J., Beltrame, P., Bernard, E.P., Bernstein, A. ve ark., 2017. Results from a search for dark matter in the complete LUX exposure. *Physical Review Letters*, 118:021303.
- Aprile, E., Arisaka, K., Arneodo, F., Askin, A., Baudis, L., Behrens, A., Brown, E., Cardoso, J. M. R., Choi, B., Cline, D. ve ark., 2012. The XENON100 dark matter experiment. *Astroparticle Physics*, 35(9):573-590.
- Aprile, E., Aalbers, J., Agostini, F., Alfonsi, M., Amaro, F.D., Anthony, M., Arneodo, F., Barrow, P., Baudis, L., Bauermeister, B. ve ark., 2017. First dark matter search results from the XENON1T experiment. <https://arxiv.org/abs/1705.06655>, 23 Kasım 2017.
- Aprile, E., 2017. The XENON1T Dark matter experiment. <https://arxiv.org/pdf/1708.07051.pdf>, 23 Ağustos 2017.
- Armengaud, E., Augier, C., Benoit, A., Berge, L., Blümer, J., Broniatowski, A., Brudanin, V., Censier, B., Chardin, G., ve ark., 2011. Final results of the EDELWEISS-II WIMP search using a 4-kg array of cryogenic germanium detectors with interleaved electrodes. *Physics Letters B*, 702:329-335.
- Barabash, A.S., Bolozdynya, A. I., 1989. How to detect the dark matter of the galaxy if it is made up weakly interacting neutral particles with masses 1-10 GeV.c<sup>2</sup>. *JETP Letters*, 6(49):356-359.
- Baudis, L., Ferella, A.D., Askin, A., Angle, J., Aprile, E., Bruch, T., Kish, A., Laubenstein, M., Manalaysay, A., Undagoita, T.M., Schumann, M., 2011. Gator: a low-background counting facility at the Gran Sasso Underground Laboratory. *Journal of Instrumentation*, 06:08010.
- Begeman, K.G., Broeils, A.H., Sanders, R.H., 1991. Extended rotation curves of spiral galaxies: Dark haloes and modified dynamics. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 249(3):523-537.



DOI: 10.29132/ijpas.349584

- Bernabei, R., Belli, P., Bussolotti, A., Cappella, F., Cerulli, R., Dai, C.J., d'Angelo, A., He, H.L., Incicchitti, A., Kuang, H.H. ve ark.**, 2008. The DAMA/LIBRA apparatus. *Nuclear Instrumentation and Methods A*, 592(3):297-315.
- Bernabei, R., Belli, P., Bussolotti, A., Cappella, F., Cerulli, R., Dai, C. J., d'Angelo, A., He, H.L., Incicchitti, A., Kuang, H. H. ve ark.**, 2010. New results from DAMA/LIBRA. *The European Physical Journal C*, 67:39-49.
- Bradac, M. Allen, S. W., Treu, T., Ebeling, H., Massey, R., Morris, R. G., Linden, A., Applegate, D.**, 2008. Revealing the properties of dark matter in the merging cluster MACS J0025.4–1222. *The Astrophysical Journal*, 687:959-967.
- Calvo, J., Cantini, C., Crivelli, P., Daniel, M., Diluise, S., Gendotti, A., Horikawa, S., Montes, B., Mu, W., Murphy, S., Natterer G. ve ark.**, 2016. The ArDM Liquid Argon Time Projection Chamber at the Canfranc Underground Laboratory: a ton-scale detector for Dark Matter Searches. <https://arxiv.org/abs/1612.06375>, 19 Aralık 2016.
- Calvo, J., Cantini, C., Crivelli, P., Daniel, M., Diluise, S., Gendotti, A., Horikawa, S., Montes, B., Mu, W., Murphy, S., Natterer G. ve ark.**, 2017. Commissioning of the ArDM experiment at the Canfranc underground laboratory: first steps towards a tonne-scale liquid argon time projection chamber for Dark Matter searches. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 03:003.
- Clowe, D., Bradac, M., Gonzales, A.H., Markevitch, M., Randall, S. W., Jones, C., Zaritsky, D.**, 2006. A direct empirical proof of the existence of dark matter. *The Astrophysical Journal Letters*, 648:109-113.
- CRESST**, 2016. Cryogenic rare event searches with superconducting thermometers. <http://cresst.de/>. 10 Ekim 2017
- Dolgoshein, B.A.**, 1973. Electronic method of particle registration in two-phase liquid-gas systems. *Physics of Elementary Particles and Atomic Nuclei*, 4(1):167-186.
- Dunkley, J., Komatsu, E., Nolta, M.R., Spergel, D.N., Larson, D., Hinshaw, G., Page, L., Bennett, C.L., Gold, B. ve ark.**, 2009. Five-year wilkinson microwave anisotropy probe\* observations: likelihoods and parameters from the WMAP data. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 180:306-329.
- EDELWEISS**, 2017. <http://edelweiss.in2p3.fr/>. Edelweiss-III Experiment for direct detection of WIMP dark matter. 15 Eylül 2017
- Gaitskell, R.J.**, 2004. Direct detection of dark matter. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 54:315-359.
- Giboni, K.L., Aprile, E., Choi, B., Haruyama, T., Lang, R.F., Lim, K.E., Melgarejo, A.J., Plante, G.**, 2006. Xenon recirculation-purification with a heat exchanger. *AIP Conference Proceedings*, 823:1695.
- Jungman, G. Kamionkowski, M., Griest, K.**, 1996. Supersymmetric dark matter. *Physics Reports.*, 267(5):195- 373.
- Kéfélian, C.**, 2015. Status of the EDELWEISS-III dark matter search. *Journal of Physics: Conference Series*, 606:012002.
- Komatsu, E., Smith, K.M., Dunkley, J., Bennett, C.L., Gold, B., Hinshaw, G., Jarosik, N., Larson, D., Nolta, M. R., Page, L., Spergel, D.N. ve ark.**, 2011. Seven-year Wilkinson microwave anisotropy probe (WMAP) observations: Cosmological interpretation. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 192:18.
- Lebedenko, V.N., Araujo, H.M., Barnes, E.J., Bewick, A., Cashmore, R., Chepel, V., Currie, A., Davidge, D., Dawson, J. ve ark.**, 2009. Results from the first science run of the ZEPLIN-III dark matter search experiment. *Physical Review D*, 80:052010.
- Martens, K.**, 2009. The XMASS experiment at the Kamioka Observatory. *Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP)*, Gran Sasso, İtaly, 1-5 Temmuz.
- Petriccia, F., Angloher, G., Bento, A., Bucci, C., Canonica, L., Defay, X., Erb, A., Feilitzsch, F. ve ark.**, 2016. New results on low-mass dark matter from the CRESST-II experiment. *Journal of Physics: Conference Series*, 718:042044.
- Sander, J., Ahmed, Z., Anderson, A.J., Arrenberg, S., Balakishiyeva, D., Thakur, R.B. ve ark.**, 2013. SuperCDMS Status from Soudan and Plans for SNOLab. *AIP Conference Proceedings*, 1534:129-135.
- Wambsganss, J.**, 1998. Gravitational lensing in astronomy. *Living Reviews in Relativity*, 1:12.
- Zwicky, F.**, 1933. Die rotverschiebung von extragalaktischen nebeln. *Helvetica Physica Acta*, 6:110-127.