

AYLIK POPÜLER BİLİM DERGİSİ

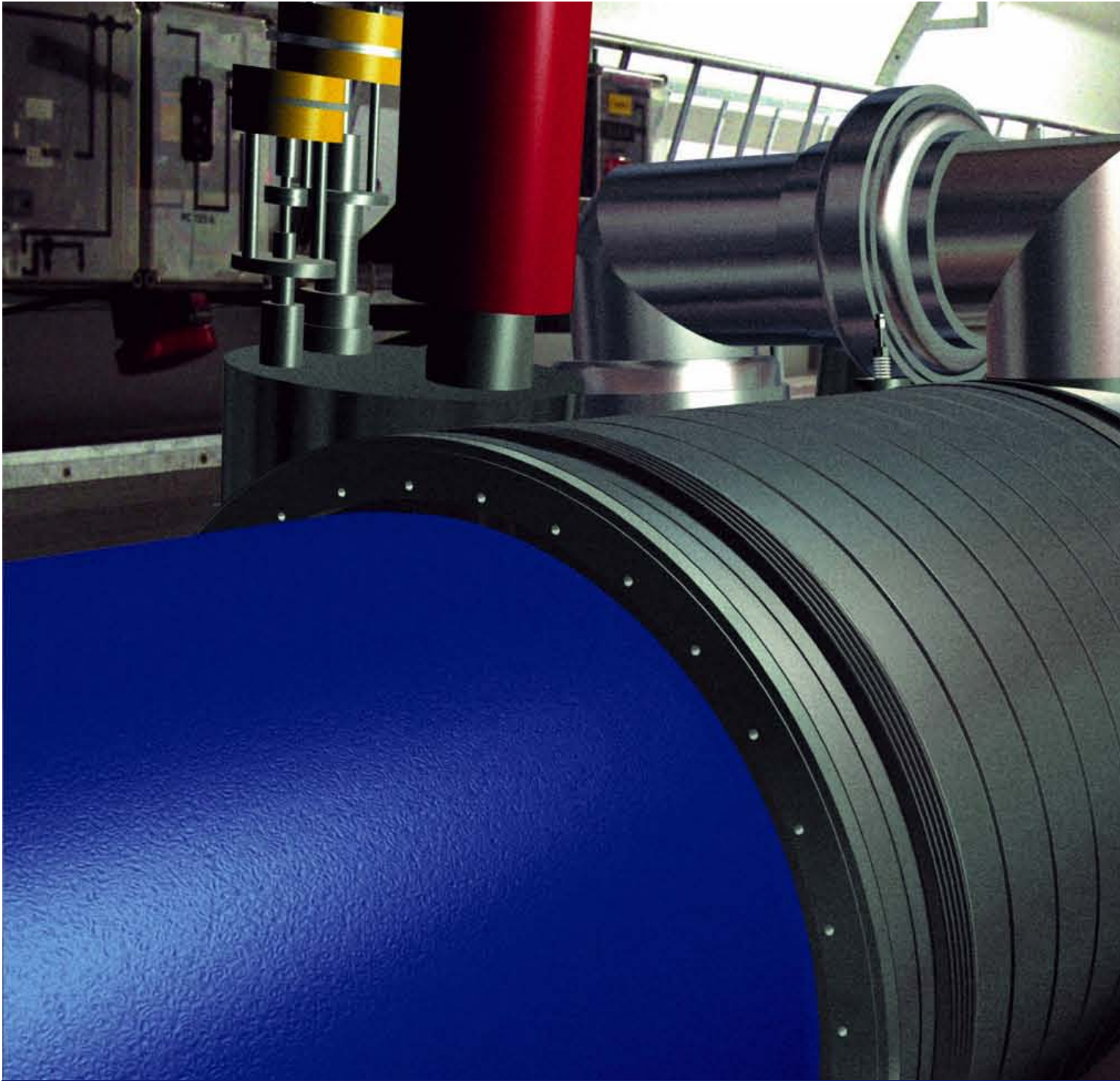
BİLİM ve TEKNİK



YENİ UFUKLAR

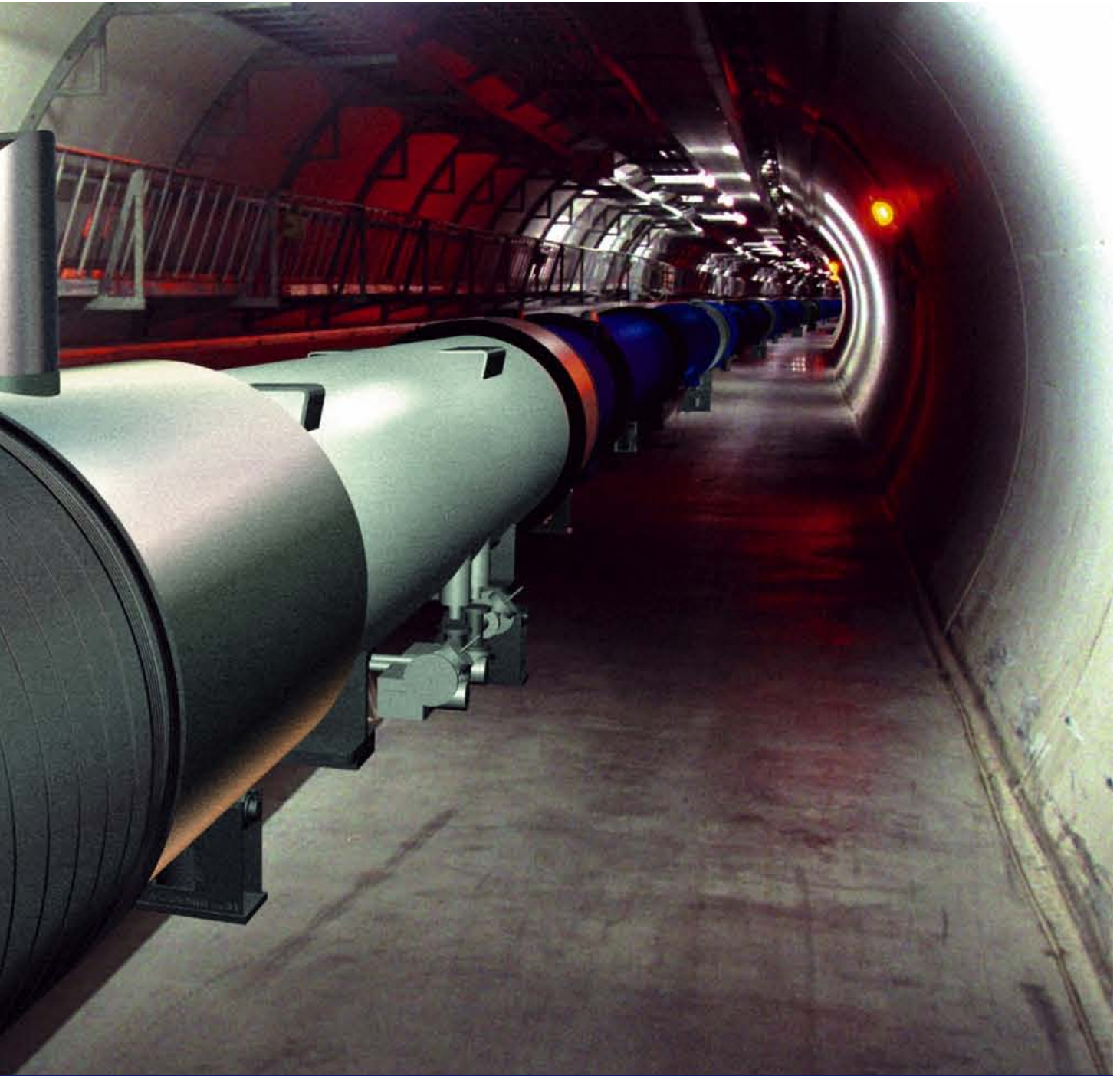
HIZLANDIRICILAR

EKİM 2004 SAYISININ ÜCRETSİZ EKİDİR
HAZIRLAYAN : Vural ALTIN - BTD Yayın Kurulu Üyesi



PARÇACIK HIZI

Hızlandırıcılar, çekirdeğin iç yapısına doğru yöneltmiş dev mikroskoplar gibidir. Nasıl ki optik mikroskoplar, küçük cisimler üzerine çok sayıda foton fırlatıp, saçılanlarını yakalamak suretiyle cismin görüntüsünü sergilemeye çalışırsa, hızlandırıcılar da; çekirdeğin üzerine parçacıklar gönderip, çarpışma sonrasındaki sapma ya da saçılma biçimlerini belirleyerek, hedefin iç yapısı hakkında ipuçları verir. Aynı amaçla bazen, çekirdekler birbirleriyle çarpıştırılır. İlk kez Rutherford'un geçen yüzyılın başlarında, radyoaktif radyum çekirdekleri tarafından 'doğal olarak' hızlandırılmış bulunan alfa parçacıklarını altın çekirdeklerine doğru yönlendirmesinde olmuş olduğu gibi. Bazen de; elektron, pozitron ya da proton gibi; yüklü olmaları sayesinde, görece kolay hızlandırılabilen parçacıklar kullanılır. Parçacıklar adeta, birer yoklama ucu ('probe') gibidirler. İç yapısını merak ettiğimiz bir nesnenin orasını burasını yoklamak için kullandığımız birer iğne benzeri. İğne hedef içerisinde ne kadar

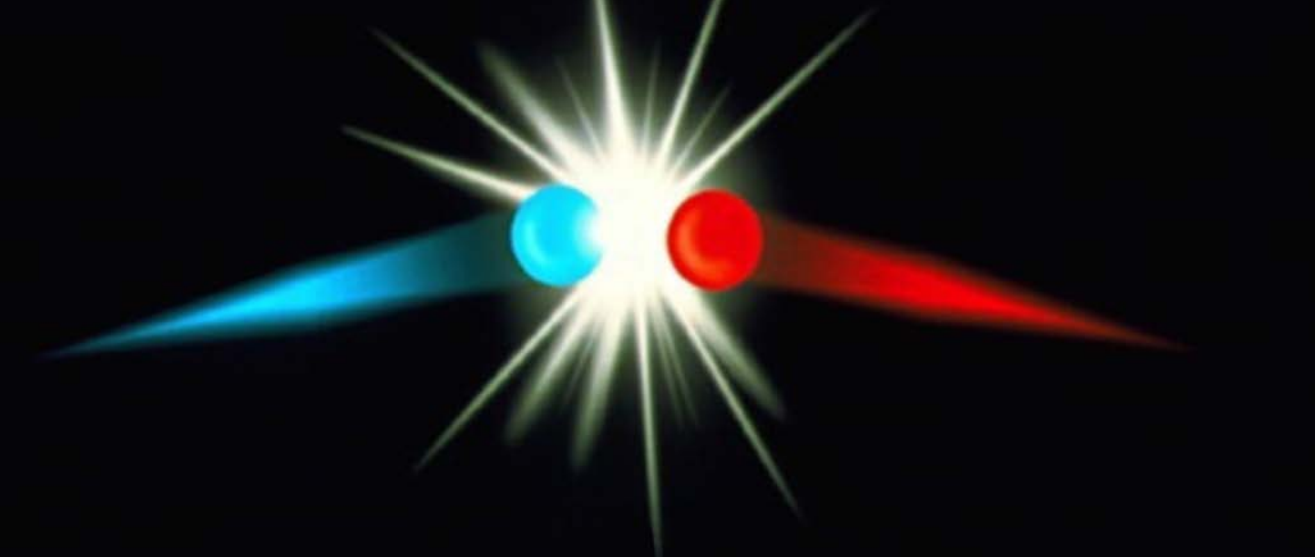


LANDIRICILARI

derinlere nüfuz edebilirse, o kadar çok bilgi verir. Dolayısıyla bu parçacıkların, hızlı olması gerekir. Hele çekirdeğin, 'güçlü kuvvet kalıntıları'nın bir arada tuttuğu sağlam yapısı göz önünde bulundurulursa; ışık hızına yakın hızlarda...

Tabii, yalnızca çekirdeğin değil, yoklama ucu olarak kullanılan, örneğin protonların da bir iç yapısı var. Güçlü kuvvetin kalıntılarıyla değil, ta kendisiyle bir arada duran bu çok daha sağlam yapıların kurcalanması çok daha zor. Bir uçla bir yapıyı yoklarsınız da, ucun kendisiyle ne yaparsınız?... Geriye tek çare kalır: Protonları birbirleriyle ya da karşıtlarıyla çarpıştırmak. Tıpkı, bilmediğimiz iç yapısını merak ettiğimiz ve fakat içini açıp bakmayı beceremediğimiz bir elektronik aygıtı, adeta öfkeyle duvara fırlatıp, yere düşen parçalarına bakarak, nelerden oluştuğunu anlamaya çalışmamızın çaresizliğinde olduğu gibi. Görüldüğü kadar fena bir yöntem değildir aslında.

HIZLANDIRICILAR



Yüklü parçacıkların hızlandırılması, elektrik alanlarıyla ve ilk bakışta kolay görünen bir yöntemle yapılır. Ancak hızlandırma işleminin önünde, görelilik kuramının koyduğu ciddi bir engel vardır. Parçacıklar hızlandıkça kütleleri artar ve daha fazla hızlandırılmaları, giderek zorlaşır. O kadar ki; durağan halden kaldırılıp ışık hızının %99'una ulaştırılmış bir parçacığın hızını %99.9'a ulaştırmak için, ilk aşamadakinin 3 mislinden fazla enerji harcamak gerekir. Bu nedenle; protonları tek bir ışın halinde hızlandırıp sabit bir hedefle çarpıtmak yerine, ayrı tüplerde ve zıt yönlerde iki ışın halinde hızlandırıp kafa kafaya çarpıtmak, enerji sarfi açısından daha ekonomiktir.

Hızlandırma işlemi, doğrusal ya da dairesel bir yörünge üzerinde yapılabilir. Her iki yaklaşımın da, birbirlerine göre, artıları ve eksileri var. Doğrusal hızlandırıcılara kısaca 'linac' ('linear accelerator') deniyor. Dairesel hızlandırıcılarına birkaç çeşidi var. Kullandığı manyetik ve elektrik alanlar sabit olanlara 'siklotron,' değişken olanlara 'senkrotron,' biri sabit diğeri değişken olanlaraysa 'siklosenkrotron' deniyor. Doğrusal hızlandırıcılarda, parçacıkları daha fazla hızlandırmak, hızlandırıcının boyunu uzatmakla mümkün. Bu, inşaat maliyetlerini artıran bir unsur. Buna karşılık, dairesel hızlandırıcılarda, ayrıca bir merkezkaç kuvveti altında ivmelenen parçacıkların ışıdığı 'senkrotron ışınması' büyük enerji kayıpları

na yol açabiliyor.

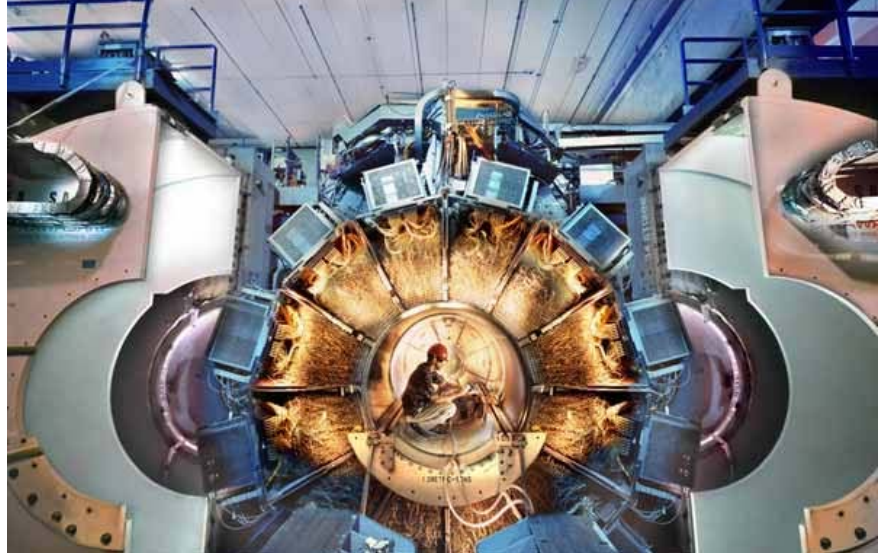
Halen çalışır durumda olan en güçlü doğrusal hızlandırıcı, ABD'nin Stanford Üniversitesi'ndeki SLAC ('Stanford Linear Accelerator'). Uzunluğu 3,2km'yi bulan bu hızlandırıcı, elektronları 25GeV (GigaelektronVolt-milyar elektronVolt) enerji eşdeğerine kadar hızlandırabiliyor. Dolayısıyla, elektron-pozitron çarpışma deneylerinde, kütle merkezi enerjileri 50GeV'a ulaşabiliyor. Elektronlar, bir lazer ışını yarıiletken üzerine düşürülerek, pozitronlarsa, elektron demetlerini tungsten bir hedefle çarpıtılarak üretiliyor. Yüklü parçacıklar, bakır bir ışın tüpü içerisinde seyahat ederken, hızlandırma işlemi, yol boyunca sabit aralıklarla yerleştirilmiş bulunan 'kalistron'ların üretti-

ği mikrodalgalar aracılığıyla yapılıyor. Kalistronlar, mutfaklarımızdaki mikrodalga fırınlar gibi, ancak onların 1 milyon mislinden fazla güce sahip. Ürettikleri dalgalar, 'dalga rehberleri' aracılığıyla, ışınlama tüpü üzerindeki 'rezonans odaları'na yönlendiriliyor ve parçacıklar bu odalardan geçerken, içerde salınıp duran elektromanyetik dalga'nın elektrik bileşeni üzerinde, adeta surf yaparak hızlanıyorlar. Aynı demet içerisindeki parçacıkların birbirinden uzaklaşıp çepere çarpmamaları için, tüpün merkezine yakın konumlarda tutulmaları lazım. Bu amaca yönelik güdümlenme, yol boyunca yine periyodik olarak yerleştirilmiş bulunan dört kutuplu ('quadropole') mıknatısların merkezleme etkisiyle sağlanıyor. Ayrıca,



parçacıkların hızlanma sırasında hava molekülleri ya da yabancı parçacıklarla çarpışarak enerji kaybetmemeleri için, ışın tüpünün vakumlanmış olması gerekiyor. Bunu; hat üzerindeki döner pompalarla, sıvı hidrojen ya da helyum desteğiyle çalışan ve civardaki hava moleküllerini sıvılaştırarak üzerlerine yapışmasını sağlayan 'soğuk tuzak'lar başarıyor. Tabii bir de, gerek mıknatısların, gerekse yüklü parçacıkların hareketinin ürettiği manyetik alanların tüp-te yol açtığı ısınmalar var. Buna karşı, tüp ve mıknatıslar, dış yüzeylerinden geçen boruların içinden geçirilen suyla soğutuluyor. SLAC'ın en büyük dedektörü, çarpışma sonucunda ortaya çıkan değişik türden parçacıkları belirleme yeteneğine sahip çeşitli katmanlardan oluşan SLD ('Stanford Large Detector'). Yaklaşık 6 katlı bir bina yüksekliğinde ve 4000 ton ağırlığında...

SLAC'ın 'linac'ına Avrupa'da rakip bir doğrusal hızlandırıcı projesi var. Almanya'nın, maliyetinin yarısını üstlenerek başını çektiği TESLA (TeV-Energy Superconducting Linear Accelerator - Trilyon ElektronVolt Enerjili Süperiletken Doğrusal Hızlandırıcı) projesi, maliyetinin diğer yarısını paylaşmak isteyen katılımcı ülkelere açık. Projenin, 2004 yılı sonuna kadar kesinleşmesi bekleniyor. 15'er km'lik iki hızlandırma kesimi içeren, 33km uzunluğa sahip. Yerin 10-30 m altında inşa edilecek olan tünelinin çapı 5m kadar. Süperiletken mıknatıslar kullanacak ve 'Yüksek Enerji Doğrusal Elektron Pozitron Hızlandırıcısı'nda, kütle merkezi enerjileri 90 ila 800GeV arasında olacak.



Şimdiye kadar yapımına başlanmış olan en büyük dairesel hızlandırıcı, ABD'nin 1989 yılında onaylanan, 14km yarıçapı ve 87 km çeperiyle, ışın başına 20TeV'luk enerji düzeyini başarması planlanan SSC ('Superconducting Super Collider') hızlandırıcısı idi. 8,25 milyar dolarlık tahmini maliyetinin yüksek olduğu gerekçesiyle, tünelinin 22,5km'si inşa edildikten sonra 1993 yılında, projenin tamamlanmasından vazgeçildi.

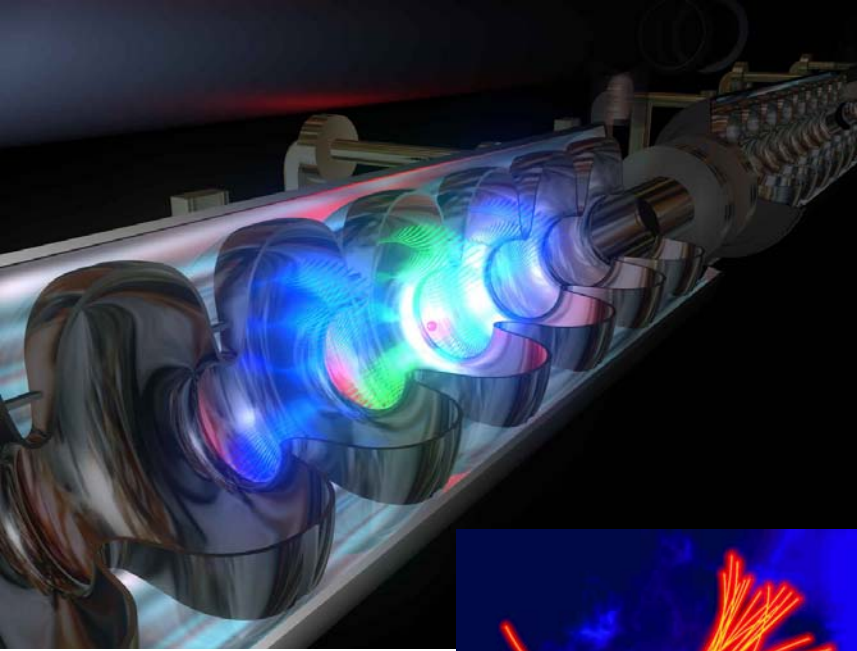
Ulaşılan enerji düzeyi açısından en güçlü dairesel hızlandırıcı, ABD'nin Fermi Ulusal Hızlandırıcı Laboratuvarı'ndaki Tevatron. 6,3 km'yi bulan çapıyla, parçacıkları 1 TeV enerji düzeyine kadar taşıyıp, ışık hızının 320 km/sa yakınına kadar hızlandırabiliyor. Dolayısıyla proton ve karşıprotonların kafa kafaya çarpışmalarında, kütle merkezindeki enerji 1,96TeV'a ulaşabiliyor. Fakat, boyut olarak en büyük dairesel hızlandırıcı, Avrupa ülkelerinin ortak araştırma merkezi olan CERN'deki, 'Büyük Elektron Pozitron' hızlandırıcısı (LEP, Large Electron Positron) idi. 2000 yılında etkinliği durdurulup tüpünün sökülmesine başlan-

dı. Yerine daha güçlü, 'Büyük Hadron Çarpıştırıcısı' (LHC, 'Large Hadron Collider') yapılacak. 2007 yılında çalışır hale gelmesi beklenen LHC işletmeye alındığında, dünyanın en büyük ve en güçlü hızlandırıcısı olacak. LHC'de protonların, kuarklar ve gluonlardan oluşan bileşenleri arasındaki çarpışmaların enerjisi ortalama olarak 10 TeV düzeylerine, daha önceki LEP ya da Fermilab Tevatron'dakinin yaklaşık 10 katına ulaşacak.

Bir hızlandırıcıda enerji arttıkça, parçacıkların De Broglie dalgaboyu $1/E$ ile azalıyor. Oysa çarpışma tesir kesiti, dalgaboyunun karesi, yani $(1/E)^2$ ile orantılı. Dolayısıyla, LHC'deki tesir kesitleri $1/100$ oranında küçülmüş olacak. Bu durumda, LEP'tekine eşdeğer etkinlikte bir çarpıştırma programı sürdürebilmek için, hızlandırıcının, saniyede çarpışma sayısı ile orantılı olan 'parlaklığı'nın (L , 'luminosite') E^2 ile orantılı olarak artması gerekiyor. Daha önceki hızlandırıcılarda $L=10^{32} \text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ iken, LHC'de bu değer $L=10^{34} \text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ olacak. Bunun için, zıt yönlerde dönen ışınları taşıyan tüplerin her birini, her biri 10^{11} parçacıktan oluşan 2835 ışın demetiyle doldurmak gerekiyor. Sonuç olarak, ortaya çıkan ışın akımı ($I_b=0,53A$) değerleri, kriyojenik (-273 °C'deki mutlak sifıra yakın) sıcaklıklarda çalışan hassas süperiletken mıknatıslardan yapılmış bir alet için çözülmesi güç bir sorun oluşturuyor.

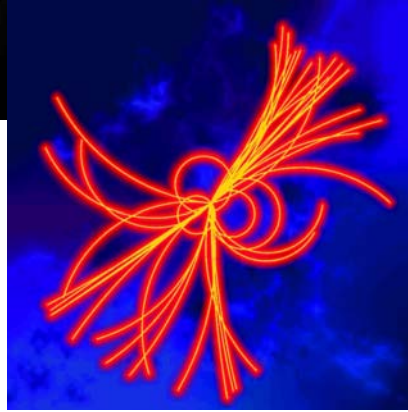
İki parçacık demeti bir dedektörün merkezinde buluştuklarında, demetlerdeki parçacıkların yalnızca çok küçük bir kısmı kafa kafaya çarpışarak istenen olaylara yol açar. Diğerlerinin tümü, karşı demetin güçlü elektromanyetik alanı tarafından saptırılır. Daha yoğun demetler için daha güçlü olan bu saptırmalar, devirden devire artar ve sonuç olarak parçacık kaybına yol açar.





bilir. Bu 'ışın etkisi' daha önceki çarpıştırıcılarda incelenmiş ve deneyimler, ışının ömrünü yeterince uzun tutabilmek için, ışın yoğunluğunun belli bir 'ışın-ışın limiti'ni aşmaması gerektiğini göstermiş durumda. LHC, istenen parlaklığa (kafa kafaya çarpışmaların fazlalığı) ulaşabilmek amacıyla, bu sınıra mümkün olduğunca yakın çalışacak. Eski PS ve SPS'den oluşan enjektörleri, gereken ışın yoğunluğunu sağlayacak kapasiteyle donatılıyor.

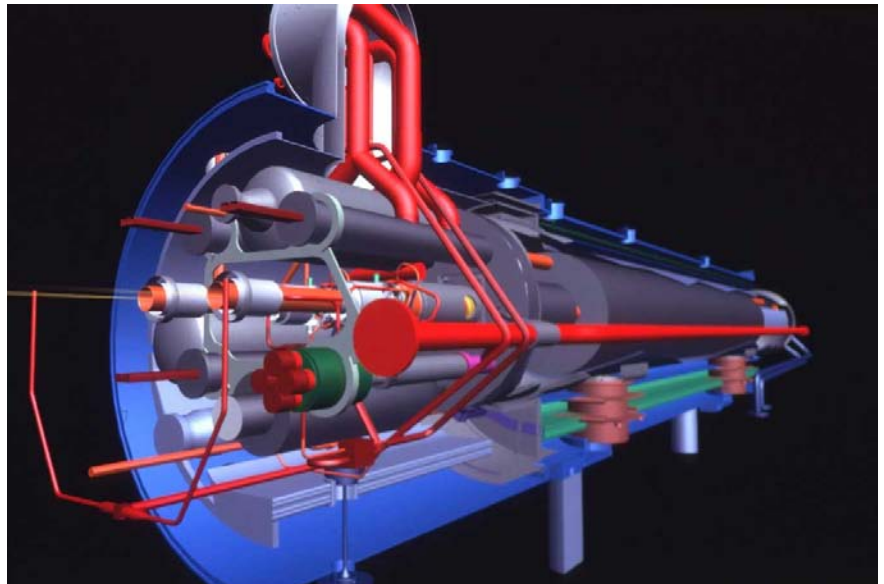
LHC'nin 27 km uzunluğundaki ışın tüpü boyunca ışık hızına yakın hızlarda seyahat ederlerken, 2835 proton demetinden her biri arkasında, ardından gelen demetleri etkileyen bir elektromanyetik 'çalkantı alanı' ('wake-field') bırakır. Bu nedenle, demetlerden herhangi birinin konum ya da enerjisinde başlangıçta yer alan bir sapma, diğer gruplara aktarılır ve doğal salınımlar, belli bazı koşullar altında artarak, ışın kaybına yol açabilir. 'Kollektif kararsızlık' denen böyle durumlar, yüksek parlaklık temini için gereken daha büyük ışın akımı nedeniyle, LHC'de daha ciddi bir sorun oluşturabilecek. Etkileri, ışını çevreleyen elementlerin elektromanyetik özelliklerinin özenli kontrolüyle asgariye indirilmiş bulunuyor. Örneğin, çalışmama koşullarına geri dönüş anlamındaki 'soğuma'sı sırasında hızlandırıcının büzüşmesini mümkün kılan binlerce körük kıvrımı, ışına karşı zırhlanmış. Paslanmaz çelikten yapılmış olan ışın tüpünün içi, ışın tarafından çeperinde uyarılan 'duvar akımları'na karşı direnci azaltmak amacıyla saf bakırla kaplanmış. Bu önlemlerin tüm kararsızlıkları bastırabilmesi beklenmediğinden, kalanların sönmüldürülmesi (damping) için, karmaşık geribesleme sistemleri ve doğrusal olmayan mercekler tasarlanıyor.



Işınlardan yüksek enerjide, 10 saat süreyle depolanması öngörülmüyor ve parçacıklar bu sırada hızlandırıcının etrafında 400 milyon kere dönecek. Bu arada, ışın tüpünün merkeziyle çakışan yörünge etrafındaki doğal salınımların genliğinin fazla artmaması gerekiyor. Çünkü bu, ışını seyreltip aletin üretebildiği parlaklığı azaltır. Bunun başarılması, ışın-ışın etkileşimi nedeniyle zaten zordu. Ayrıca; aletin yönlendirici ve odaklayıcı manyetik alanlarındaki istenmeyen, ama kaçınılmaz olan ve doğrusal olmayan minik bileşenleri; demetlerin hareketini biraz kaotik hale koyabilir ve parçacıklar, çok sayıda tur-

dan sonra kaybedilebilir. Böylesi bir kayba yol açacak kaosun başlangıcına yönelik çalışmalar yapıldı. LHC'de, manyetik alan geometrisindeki kusurların kararsızlığa yol açan etkilerinin, enjeksiyon enerjilerinde daha belirgin olacağı görüldü. Çünkü enjeksiyon aşamasında, süperiletken kablolardaki akım kalıntılarının etkileri ağırdı ve ışın bu sırada, bobin kesitinin daha büyük bir kesrini işgal ediyordu. Dolayısıyla, 'dinamik açıklık' (dynamic aperture) denen, parçacıkların gereken sürelerle kararlılıklarını koruyabilecekleri bobin kesiti kesrinin hesaplanması gerektiği. Bunun, enjekte edilen ışının boyutlarını yeterli bir güvenlik marjıyla aşması lazım. Oysa halen, parçacıkların doğrusal olmayan alanlardaki uzun vadeli davranışlarını yeterli duyarlılıkla öngörebilen hiçbir kuram yok. Dolayısıyla, hızlı bilgisayarlarla benzetişimler yapılarak, yüzlerce parçacığın adım adım, binlerce LHC miknatısından geçerek, milyon kereye kadar turlaması izlenecek. Benzetişim sonuçları, miknatısların tasarım ve üretim aşamasındaki kalite toleranslarının tanımlanması için kullanılıyor.

Alınan tüm önlemlere karşın, ışın ömrü sınırlı olmak zorunda. Yani parçacıkların bir kısmı ışın tüpüne doğru dağılıp kaybolacak. Bu olayda parçacık enerjisi malzemede ısıya dönüşür ve süperiletken miknatısların soğumasına yol açarak, hızlandırıcının çalışmasını saatler boyunca kesintiye uğratabilir. Bundan kaçınmak için; bir 'ışın kesitini daraltma' ('kolimasyon') düzeneği, kararsız parçacıkları ışın tüpü duvarı-

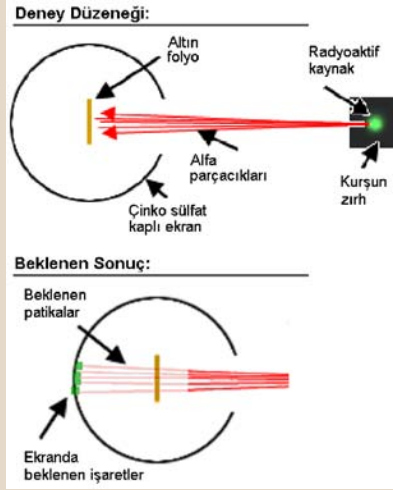


na ulaşmadan önce yakalayacak ve kayıpları, iyi zırhlanmış ve süperiletken unsurlardan uzak bölgelere hapsetmeye çalışacak. LHC ilk kez, büyük bir ışın akımını çok yüksek enerji düzeylerinde ve en karmaşık süperiletken teknolojisiyle birlikte kullanıyor. Dolayısıyla, daha önceki hızlandırıcılardan çok daha verimli bir kolimasyon sistemine gereksinimi var.

Çağdaş bir hızlandırıcı ya da çarpıştırıcı, dev bir yatırım olması nedeniyle, bir araştırma aracı olarak uzun sürelerle yarar sağlamak zorunda ve değişen araştırma gereksinimlerine ayak uydurabilmek durumundadır. Örneğin CERN'in SPS hızlandırıcısı önce bir proton-karşıt proton çarpıştırıcısına, sonra LEP için lepton enjektörüne ve şimdi de LHC için bir proton enjektörüne dönüştürülmüş bulunuyor. LHC ile ilgili olarak, en az maliyetle en yüksek performansı yakalamaya yönelik teknik tercihler, bileşenlerinin çoğu birbirine yakın konumlandırılmış ve sürekli bir kriyostat içerisine yerleştirilmiş olduğu için, aletin uyum yeteneğini ciddi şekilde azaltabilir. Tasarımcılar bunu göz önünde bulundurarak, gelecekteki olası iyileştirmeler ve beklenmedik araştırma taleplerine ayak uydurabilmeyi sağlamak amacıyla, alet düzenine olabildiğince esneklik katmaya çalışıyor.

Elektron-pozitron çarpıştırıcılarındaki parçacıklar her saniye, ışımda depolanmış olan enerjiden çok daha fazlasını, 'senkrotron ışınması' kanalıyla kaybederler. Bu kayıpların RF sistemi tarafından sürekli olarak telafi edilmesi gerekir ve sonuç olarak, bu olay; bir yandan salınımların sönümlenmesine yardımcı olurken, diğer yandan ulaşabilecek enerji düzeylerini sınırlar. LHC'de, parçacık kütlelerinin büyük olması nedeniyle, aynı sürede ışınlanan enerji miktarı az olduğundan, bu etkiler önemsizdir. Ancak daha yüksek, 100TeV civarındaki proton hızlandırıcılarında önem kazanırlar. Fakat LHC'de ışınlanan, yaklaşık 3.7kW'lık güç, düşük bir yüzde oluşturmakla beraber; kriyojenik sıcaklıklardaki ışın tüpü tarafından soğurulacağı için, gözardı edilemez. Bu ısıl girdi, soğutma sisteminin güç düzeyini etkiler ve önemli bir maliyet unsuru oluşturur. Ayrıca, senkrotron ışınımı tüp duvarlarına, çok sayıda ultraviyole foton olarak çar-

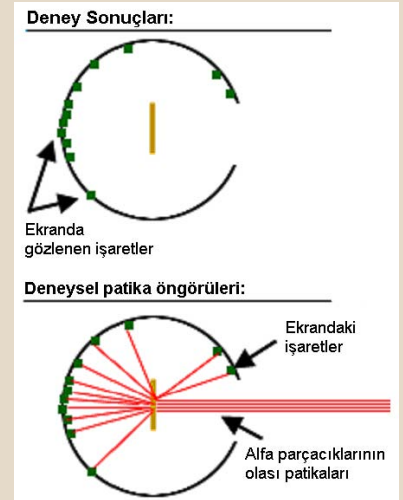
Kuram ve Deneysel Gözlem



Geçen yüzyılın başlarında atomun, karpuzunkine benzer bir yapıya sahip olduğu düşünülüyordu. Buna göre; artı yüklü protonlar, yaklaşık küresel bir doku oluşturuyor, eksi yüklü elektronlar da, karpuzun çekirdeklerine benzer şekilde, bu dokunun içine serpiştirilmiş halde bulunuyordu. Öte yandan, radyoaktivite Henry Becquerel tarafından daha önce keşfedilmişti ve Pierre Curie ile eşi, alfa etkin radyoaktif maddeler çalışmaları yapıyordu. İngiliz bilimadamı Ernest Rutherford, 'atomun karpuz modeli'nin doğruluğunu sınamak için bir deney tasarladı. Bu tasarıma göre; kurşun bir zırh içerisinde, alfa etkin maddeden bir miktar konacak ve ışınlanan alfa parçacıklarının (helyum atomu), zırhta açılan minik bir delikten ince bir demet halinde çıkmaları sağlanacaktı. Alfa ışın demetinin önüne, küçük ve ince bir altın folyo konulacak; folyonun etrafı da, iç yüzeyi çinko sülfatla kaplı, diyalim küresel bir ekrana sarılacaktır. Böylece, folyonun içinden geçen alfa

parçacıkları, çinko sülfat kaplı yüzeye ulaşmış parçacıklarında, bu maddenin fosforesan etkiyle parıldamasına yol açsınlar da, folyodan geçerken ne kadar sapmış oldukları anlaşılabilir. Altın atomları, az sayıda minik çekirdekli bir karpuz olarak modellendiğine göre; Rutherford'un beklentisi; alfa parçacıklarının folyodan geçerken, çok az miktarda sapmalara uğramaları ve ekranın, folyonun öte tarafındaki dar bir bölge üzerinde toplanmış parıldamalara yol açmalarıydı. Deney sonuçları, hiç de beklendiği gibi çıkmadı...

Ekranı gözlenen parıldamalar, alfa parçacıklarının çok çeşitli yönlerde sapmış olduklarını; hatta bazılarının, adeta geri sekerek, ekranın, ikinci değil de birinci yarımküresine çarptığını gösteriyordu. Rutherford'un bu gözlemlerden çıkardığı sonuç, atomun merkezinde sert bir çekirdek yapısının bulunması gerektiğiydi. Bu kısım, artı yüklü protonlardan oluşuyor, çok daha küçük kütleli elektronlar da, çekirdek etrafındaki yörüngelerde dolaşıyordu. Rutherford'un yaptığı, gözleriyle göremediği kapkaranlık bir dünyada, etrafı tanımaya çalışmaktı. Ödülü de büyük oldu. Atomun modeli değişti. Karpuz olmaktan çıktı...



par. Bu fotonlar, malzeme bünyesindeki gaz moleküllerini açığa çıkartarak, tüpün içerisindeki kalıntı gaz basıncını arttırdığı gibi, foto-elektron oluşumuna yol açar. Fotoelektronlar, proton demetlerinin güçlü elektrik alanı tarafından, ışın tüpü boyunca ivmelendirilir ve sonuç olarak, kriyojenik yükün artmasına ve ek bazı kararsızlıklara yol açar.

Tabii, böyle, dev boyutlardaki bir uluslararası projenin aşması gereken pek çok güçlüğün olması doğal ve hep-sini buraya sığdırmak olanaksız. Ancak 2007'de devreye girmesinden sonra, bazılarının yanıtlar getirebileceği soruların boyutları da büyük. Fermilab'ın sitesinde fevkalade güzel bir şekilde dillendirilmiş olanları şöyle:

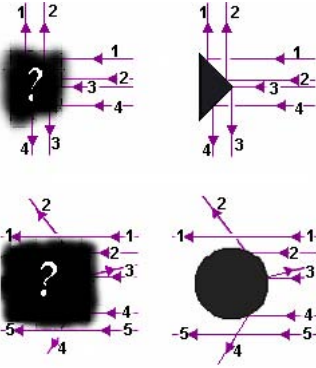
Parçacıkların niye kütlesi var? Nöt-

rino kütesinin kaynağı farklı mıdır? Kuarklarla leptonların gerçek doğası nedir? Neden üç ayrı nesil temel parçacık var? Gerçekten temel olan kuvvetler hangileridir? Kuantum gravitasyonu parçacık fiziğine nasıl dahil edilebilir? Madde ile karşıt madde arasındaki fark nedir? Evreni bir arada tutan 'karanlık madde' parçacıkları nedir, nelerdir? Evrendeki yapıları birbirinden uzaklaştıran 'karanlık enerji' nedir? Evrenin, bildiklerimizin ötesinde gizli boyutları var mı? Acaba bir 'universe' yerine, çok boyutlu bir 'megaverse'in mi parçasıyız? Evren nelerden oluşuyor ve evrende neler, nasıl olup bitiyor?

Hangilerinin yanıtlarını ne zaman bulabileceğimizi; tabii ki yine zaman gösterecek, dördüncü boyut...

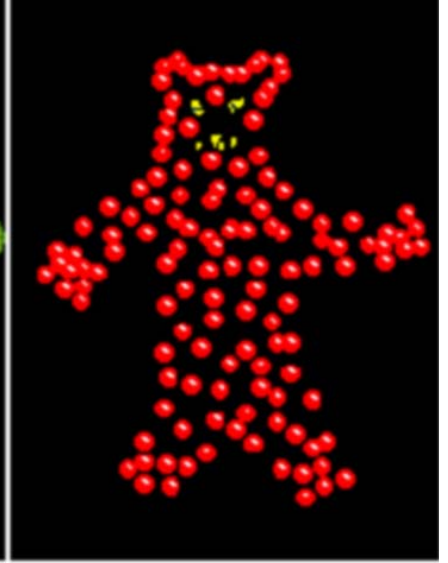
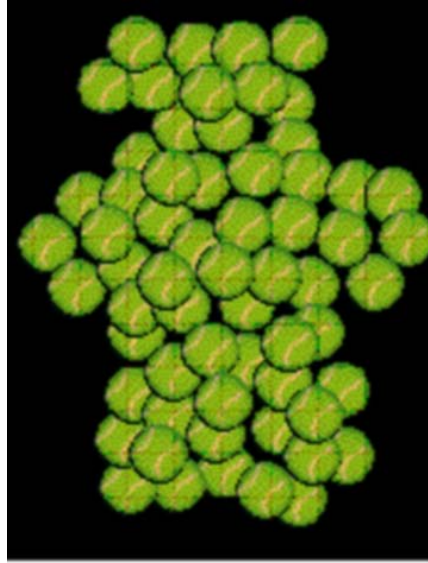
KARANLIK

Varsayalım bir tenis maçından dönerken, uçsuz bucaksız ve kapkaranlık bir mağarada kayboldunuz. “Olur mu öyle şey?” demeye fırsat bulamadan, hırıltılı bir hayvan sesi duymaya başladınız. Yanınızda, bir çanta dolusu tenis topundan başka bir şey, el feneri filan yok. Ses giderek yaklaşıyor ve çıkaranın hangi hayvan olduğunu merak ediyorsunuz. Şeklini bir bilerseniz, ne menem şey olduğunu hemen çıkartacak ve belki rahatlayıp, belki de kaçacaksınız. Nasıl anlarsınız?...



Şekli bilinmeyen bir cisme doğru parçacıklar fırlatarak, bu parçacıkların nasıl saptırıldıklarına bakmak suretiyle, cismin şekli hakkında bilgi edinilebilir. Örneğin yukarıdaki şekilde olduğu gibi... Dolayısıyla; eldeki tenis toplarını teker teker ve hızla sesin geldiği tarafa doğru fırlatarak, duvarlara çarpıp tok sesler çıkaranları saymaksızın, canlının yumuşak dokusundan geri sekenlerin, yaklaşık hangi noktalardan dönüp geldiklerini saptamaya çalışmak, eldeki sınırlı olanaklar çerçevesinde iyi sayılabilecek bir yöntem olabilir. Bu, bize söz konusu hayvanın vücut profilini, yaklaşık olarak verecektir. Hatta, toplardan her birinin gidiş ve geliş süreleri de kaydedilebiliyorsa, bu süreler arasındaki farklar ve topların hızlarından hareketle, hayvanoglunun üç boyutlu bir resmini çıkarmak bile mümkündür.

Fakat tenis topları çok büyük olasılıkla, mağaraya sığabilecek bir hayvanın boyutlarına oranla oldukça iridir ve vücut profilini ancak kaba hatlarıyla verebilir. Oysa aynı işlem masa tenisi toplarıyla tekrarlanabilseydi, şekilde



görüldüğü gibi, profil daha ayrıntılı olarak belirlenebilirdi. Hele minik bilyalar, gerçi hayvanı rahatsız edip saldırganlaştırır, ama çok daha ayrıntılı bilgi sağlardı. Öte yandan, eğer hayvana zarar vermek istemiyorsak, bilyaları fazla hızlı fırlatmamamız gerekir. Hele hele; hayvancağızın şeklini, bir tabancanın namlusundan çıkan mermilerle yoklamaya, hiç kalkışmamamız...

Tabii en rahat ve kolayı, bir kaynağı bulup, hayvanın üzerine yeterli sayıda foton fırlatmak olurdu. Cisimleri biz çoğu zaman böyle algılıyoruz; yansıtıkları ışınlar sayesinde onları görebiliriz. Dolayısıyla, eğer çantamızda bir el feneri olmuş olsaydı, merakımızı hemen giderebilir ve hem de hayvanı, hemen hemen hiç rahatsız etmemiş olurduk. Gün ışığının ulaştığı yerlerde, görmek istediğimiz cisimlerin üzerine fırlatacak foton aramak zorunda kalmıyoruz bile. Güneş bunu bizim için, zaten yapıyor.

Baktığımız cisimden yansıyan ışınlar, göz merceğiyle cisim arasında, kesik bir koni oluşturuyor: Koninin geniş tabanı cismin, kesik ucu da merceğin üzerinde. Mercek bu ışınları retina üzerinde odakladığından, gözün içinde de bir koni oluşuyor. Bu sefer geniş taban, mercek; kesik uç da retina üzerinde. Retinanın, üzerine ışın düşen görme hücreleri, bu ışınlar üzerinde bir ön işlem yapıyor ve ürettikleri elektrokimyasal sinyaller, optik sinir aracılığıyla

beynin görme merkezine gönderiliyor. Görme merkezi de bu sinyallerden hareketle, kafatasımızın içerisinde, cismin bir görüntüsünü inşa ediyor. Bu sürecin çalışabilmesi için; retinaya yeterli miktarda ışığın, yeterli sayıda görme hücresi üzerine yayılmış bir şekilde düşmesi gerekir. Çünkü, her ne kadar çoğu zaman retinadaki tek bir noktadan söz edilirse de, tek bir görme hücresinin ayrıntılı bir görüntüyü algılaması mümkün olmadığı gibi, sürece katılan hücrelerden her birinin, belli bir eşik miktarının üzerinde ışıkla uyarılması lazımdır.

Ancak, baktığımız cisim küçüldükçe ya da uzaklaştıkça, görme konileri daralıyor ve sonuç olarak, retinaya düşen görüntü noktalaşarak, diğer görüntü işlemleri arasında kayboluyor. Bu sorunu aşmak için, ışınlar arasındaki açılarını açarak koni tabanlarını yayvanlaştırmak mümkün. Optik mikroskop ya da teleskoplardaki mercekler de, ışınları kırarak suretiyle bunu yapıyor zaten. Fakat bu sefer de, cisimden gelen ışınlar daha geniş bir alana yayılmış olduklarından, retinaya ulaşan miktar, eşik düzeyinin altına düşebiliyor. Görüntü solgunlaşıyor, yine kayboluyor. Bu yüzdendir ki, optik mikroskoplar; güçlü bir ışık kaynağıyla birlikte, cismin üzerine daha fazla ışık gönderip yansıtmak suretiyle çalışırlar. Ya da çoğu teleskopta olduğu gibi; cisimden gelen ışınlar, uzunca bir süre için

TA ARAYIŞ



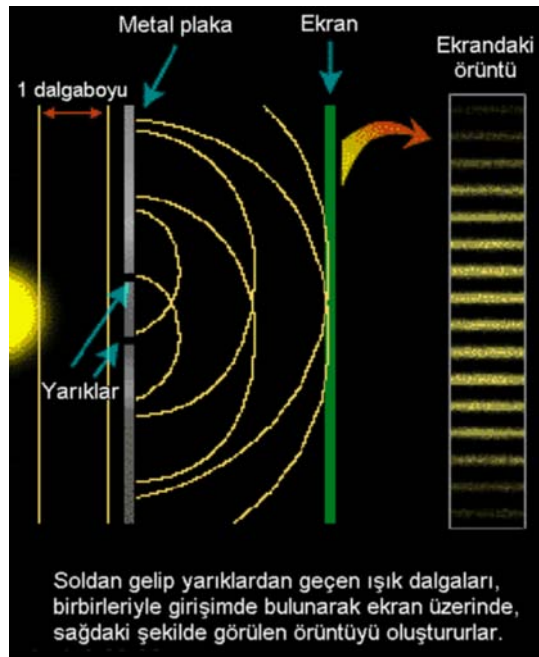
toplanır ve görüntü inşasına, yeterince birikim sağlandıktan sonra geçilir.

Işığın bir de dalga davranışı var tabii. Nasıl ki bir su tankında, yan yana iki çubuğun aşağı ve yukarı hareketleriyle oluşturulan dairesel su dalgaları, üst üste binip birbirleriyle girişimde bulunuyorlarsa; iki ayrı yarıktan geçirilen ışık dalgaları da, yandaki şekilde görüldüğü gibi bir girişim örüntüsü veriyor. Dolayısıyla biz görmek için cisimlere ışık tuttuğumuzda, aslında üzerlerine elektromanyetik dalgalar gönderip yüzeylerinden yansıtmış ve gözümüze geri gelenler üzerinde işlem yapmış oluyoruz. Bu durumda, gönderilen ışığın dalga boyunun, cismin boyutlarından büyük olmaması gerekir. Çünkü aksi halde dalga, cismin varlığından pek etkilenmez ve geriye, net bir görüntünün oluşabilmesi için gereken miktar ve nitelikte yansıma gelmez. Tıpkı denizde yüzen bir şişe mantarının, yakından geçen bir tankerin yol açtığı dalgaları etkileyip, geri yansıtamadığı gibi. Böylesine kocaman dalgalarla küçük bir mantarın şeklini belirlemeye çalışmak, iri bir ağacın gövdesini kürdan olarak kullanmaya kalkışmak gibidir. Bir 'çözünürlük' sorunu doğar ve dolayısıyla, daha küçük cisimleri görebilmek için, daha kısa dalgalı kullanmak gerekir. Fakat retina tabakasındaki görme hücrelerinin duyarlılığı, $3,9-7,6 \times 10^{-7}$ m aralığındaki 'görünür ışık' dalga boylarına ayarlıdır ve bu dalgalı aralığındaki ışıkla, hücreden daha küçük yapıları görebilmek mümkün değildir. Oysa hücre boyutları yaklaşık 10^{-4} m kadarken, atomun boyutları 10^{-10} m düzeyinde.

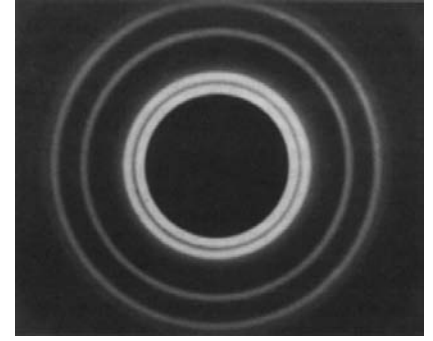
Gerçi, x ve gama ışınları gibi; dalgalı çok daha küçük ve hatta çekirdeğin 10^{-15} m'lik boyutlarını altına inen, ışık ışınları da var.

Bu göremediğimiz ışınların sağladığı görüntüler, uygun kimyasallar aracılığıyla görünür hale getirilebilir. Örneğin, Röntgen filmi çekimlerinde olduğu gibi. Fakat bir fotonun dalga boyu küçülürken, enerjisi ters orantılı olarak artıyor ve 10^{10} m'lik dalga boyunda 10 keV'a (kilo elektronVolt - 1000 eV) ulaşıp, 10^{15} m'lik dalgalı boyunda da 1 GeV'u buluyor. Bu yüksek enerjilere sahip fotonlarla, örneğin atomun yapısını incelemeye çalışmak, bir bakıma yukarıdaki mağara örneğinde olduğu gibi, ayının şeklini makinalı tüfek ateşiyle belirlemeye kalkışmaya benziyor. İncelenmeye çalışılan yapı; ağır şekilde etkilenip, ciddi biçimde değişiyor...

Cisimlerin üzerine dalgalar gönderip yansıtmak, hala iyi bir inceleme yöntemi ve bu iş için ille de ışık dalgaları kullanmak gerekmiyor. Örneğin, yarasalar bunu ses dalgalarıyla da yapıyorlar. Çıkardıkları 'sesüstü' seslerin yankılarını kulaklarıyla algılayıp, etraflarındaki cisimlerin ne kadar yakınında olduğunu anlayabiliyor; hatta yankıların iki kulağa geliş zamanları arasındaki farkı değerlendirerek, açıl konumları ve belki üç boyutlu görüntüleri hakkında da bilgi sahibi olabiliyorlar. Bunu da bayağı hızlı ve uçarken yapıyorlar: zifiri karanlık bir mağaranın içerisinde, vıızt vııızt!...



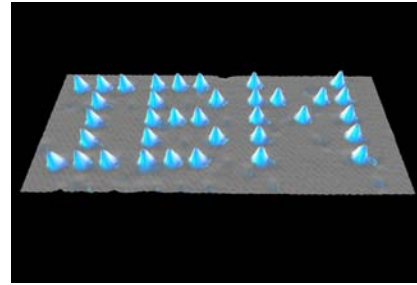
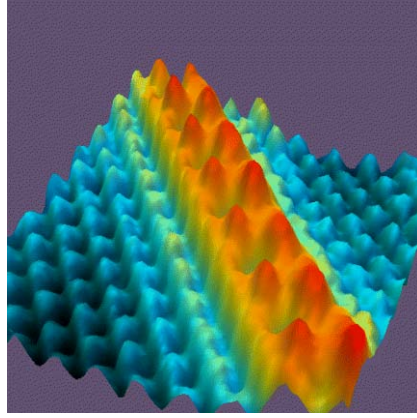
Gerçi bildiğimiz gibi, insan kulağı bir alt sınır olarak; genliği atom boyutu, yani 10^{-10} m kadar küçük olan ses dalgalarını dahi algılayabiliyor. Ancak genlik başka şey... Seslerin dalga boyları büyük olduğu gibi, kendileri de zaten, atom ya da molekül gruplarının birlikte hareketlerinden oluşuyor. Birkaç mm ayrıntıya kadar organ görüntüsü verebilirler, ama atomun incelenmesinde kullanılmaları olanaksız. Bunun için, enerjisi fazla yüksek olmayan, küçük dalgalar lazım.



Bu aşamada akla, madde dalgaları geliyor. Maddenin dalga boyuyla momentumu arasındaki ilişki, DeBroglie bağlantısıyla $\lambda=h/p$ olarak veriliyor. Buna göre; örneğin oda sıcaklığındaki (295 K) ideal bir gazın içinde serbestçe dolaşan bir elektronun ortalama kinetik enerjisi ($E=3kT/2$) $6,2 \times 10^{-19}$ erg ya da 0,04eV, momentumu ($p^2=2mE$) ise, yaklaşık 10^{20} g-cm/s kadardır. Yani $\lambda=3,3 \times 10^{-7}$ cm kadar olur ve elektronun kinetik enerjisi arttıkça bu dalga boyu, kinetik enerjinin kare köküyle, ters orantılı olarak azalır. Kısacası elimizde; enerjisi düşük, dalgalı boyu da atom düzeyinde küçük dalgalar vardır. Bu dalgaların varlığından; bir plaka üzerindeki iki ayrı deliğe doğru gönderilen elektronların, plakanın gerisindeki bir ekran üzerinde, üstteki şekilde görüldüğü gibi bir girişim örüntüsü oluşturmasından dolayı emin olabiliyoruz. Tıpkı su ve ışık örneklerinde olduğu gibi...

Dolayısıyla, atom ve molekül boyutundaki yapıların görüntülenmesi istendiğinde, 'elektron

tarama' mikroskopları kullanılır. Böyle bir mikroskopta, tarama ucu denen, çok küçük ve ince bir iletken vardır. Bu uç, basınçla karşılaştığında minik elektrik akımları üreten ('piezoelektrik') bir 'tarayıcı aygıt'a takılıdır. Tarayıcının içerdiği elektronik bileşenler, uca elektrik akımı sağladıkları gibi; hem tarayıcısının hareketlerini yönetip, hem de hareket duyargasından gelen sinyalleri almaktadır. Nihayet bir bilgisayar, tüm sistemi denetlemekte ve toplanan verileri işleyerek, görüntüye dönüştürmektedir. Böyle bir STM mikroskobu ('scanning tunneling microscope'), yaklaşık şöyle çalışıyor: Tarayıcı aygıt, tarama ucunu iletken bir yüzey üzerinde hızla gezdirirken, içerdiği elektronik bileşenler, uca elektrik akımı sağlamaktadır. Tarayıcı, tarama ucunu, örnek yüzeyindeki tüm (x,y) noktaları üzerinden, sistemli bir şekilde geçirir. Uç bir atoma rastlandığında, atomla uç arasındaki elektron akışı değişir ve bilgisayar, bu akım değişikliğini, tarama ucunun, yani atomun x-y koordinatlarıyla birlikte kaydeder. Tarama işlemi sona erdiğinde bilgisayar, topladığı verilerden hareketle, atomların konumlarına karşılık gelen akım değerlerini, yüzey üzerinde grafiklendirir. Bu bir bakıma, eski fonograflardaki çalışma yöntemi gibidir ve tarama ucu iğneye, atomlar da plağın üzerindeki girinti çıkıntılara benzetilebilir. STM ucu, 'tünelleme' yapan akımını, atomların konumunu belirleyen duyarlı bir algılayıcı olarak kullanarak, yüzeydeki atomların eş-



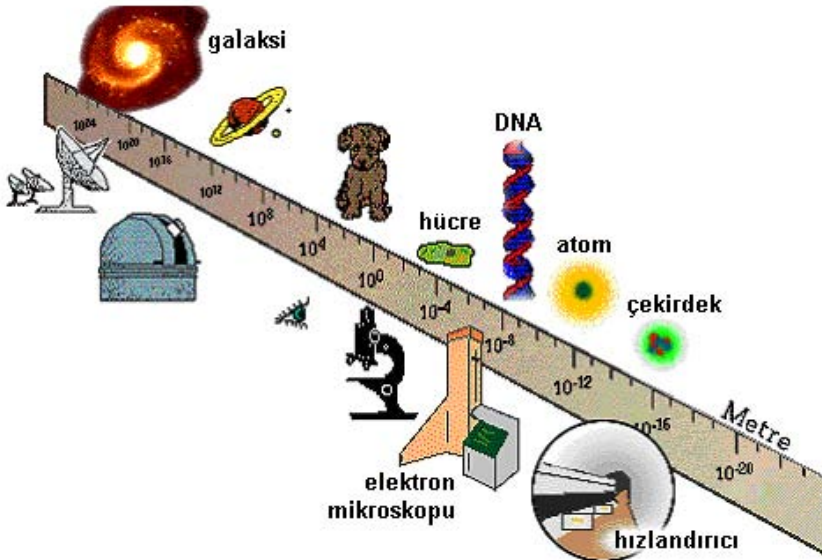
yükseklik çizgileri üzerinde dolaşır ve sonuç olarak, yüzeyin topoğrafyasını çıkarır. Bu mikroskopların yeni modelleriyle, atomları görmenin yanında, istenilen şekilde konumlandırmak da mümkündür. Yukarıdaki şekillerden üsttekinde, 7x7 nm'lik (nanometrelik - metrenin milyarda biri), mavi renklendirilmiş galyum-arsenid yüzeyi üzerindeki, kırmızı renklendirilmiş olan tek bir sezyum atomu zinciri zigzagları görülüyor. Altta ki şekildeyse, tek tek atomlardan oluşturulmuş bir marka var. Fakat en iyi elektron mikroskobu dahi, atomların ancak bulanık görüntülerini verebiliyor. İç yapıları hakkın-

daysa hiç bilgi veremiyor. Atomun ve çekirdeğin yapısını incelemek için başka araçlar, daha kısa boylu madde dalgaları lazım...

Aslında, birkaç atomdan oluşan madde yapıları, oda sıcaklığında dahi çok yüksek momentumlara ve dolayısıyla da, kısa dalga boylarına sahip oluyorlar. Ancak böyle iri kıyım kütleler, çekirdeği kurcalamak için hiç uygun değil. Bu tıpkı bir arkadaşınızın şekli; elinize bir balyoz alıp sallayarak, orasını burasını yoklayarak belirlemeye çalışmaya benzer. Böyle bir yaklaşımın, arkadaşınızı bazı boyutlarından yoksun bırakmak gibi bir sakıncası vardır. Dolayısıyla, maddenin yapısını ve çekirdeği incelemek için, elektron ya da proton gibi, eldeki en küçük parçacıkları kullanmak gerekiyor. Ancak bu parçacıklar da, yükleri nedeniyle, çekirdekle etkileşime giriyor. Örneğin elektron saçılmaya uğrayarak, çekirdeğin yapısı hakkında bilgi vermek yerine, içine çekilip yutulularak, incelenmeye çalışılan yapıyı değiştiriyor. Hele proton, benzer yüklü olduğu için, çekirdek tarafından itiliyor ve çekirdeğe yeterince yaklaşabilmesi için, yüksek hızlara sahip olması gerekiyor. Bu durumda da, elektronun 1,830 katı olan kütlesiyle, çekirdeğin parçalanmasına yol açıyor. Yüksüz olan nötronlarsa, yüksüz oldukları için; örneğin bir manyetik alanla yakalanıp, elektrik alanıyla yönlendirilemiyorlar ve kendi bildikleri doğrultularda gidiyorlar.

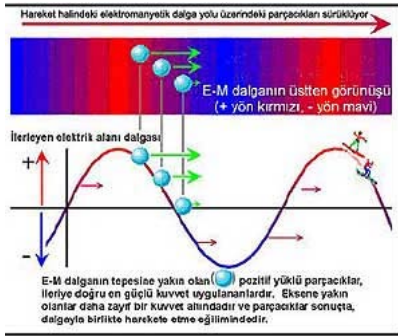
Gerçi çekirdeği parçalamak suretiyle, yapısı hakkında ek bilgiler edinilebilir. Hele ilgi konusu olan, örneğin protonun kendi yapısıysa, o zaman yüksek hızlı protonları kafa kafaya çarpıştırıp, sonuçta nelerin ortaya çıktığına bakmak gerekir. Ancak, öylesine yüksek hızlara sahip protonlar yalnızca, atmosferin üst katmanlarına ulaşan kozmik ışınlarda bulunuyor. Bizse yedeyiz. Dolayısıyla bu parçacıkları, yerde hızlandırmak, yani hızlandırıcılar kullanmak lazım. İki amaçla: Birincisi, parçacıkları çekirdeklerin üzerine gönderip saçılmalarına ya da çekirdek parçalanmalarına bakmak suretiyle, çekirdeğin yapısını araştırmak. İkincisiyse, parçacıkların kendilerini kafa kafaya çarpıştırarak, neler olduğuna bakmak suretiyle, parçacıkların iç yapılarını anlamaya çalışmak.

Farklı boyutlardaki nesnelere nasıl bakarız:



HIZLANDIRICI TİPLERİ VE ÇALIŞMA İLKELERİ

Hızlandırmak için elektron ya da proton bulmak, oldukça kolay. Proton, hidrojeni iyonlaştırmak suretiyle elde edilebiliyor. Öte yandan, bazı metaller ısıtıldıklarında, bir kısmı zaten serbest dolaşmakta olan dış kabuk elektronlarının kinetik enerjisi artıyor ve bunlardan bazıları, metal yüzeyinden kaçıp bir elektron ışını oluşturuyorlar. Hızlandırılan elektronların, örneğin tungsten çekirdekleriyle çarpıştırılması, pozitron üretiyor.

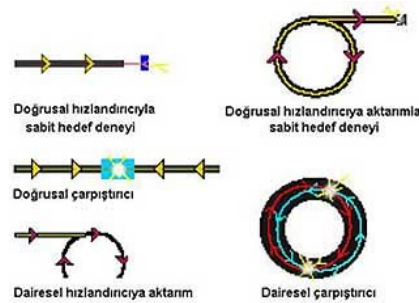


Daha sonra bu yüklü parçacıklar, bir elektrik alanının içine yönlendirilip, alanın uyguladığı kuvvetle (qE) ivmelenendirilebilir. Üzerlerine uygun frekansta elektromanyetik dalga gönderildiğinde, dalganın elektrik alanı bileşeni, yolu üzerinde rastladığı parçacıklara itme kuvveti uygular. Kuvvetin yönü, pozitif yüklü parçacıklar için elektrik alanının yönüyle aynı, negatif yüklü olanlar içinse ters yöndedir. Dalganın tepesine ya da dibine rastlayan parçacıklara en büyük, orta kısmına rastlayanlarıysa daha küçük kuvvetler uygulanır. Sonuç olarak parçacıklar, yüklerinin işaretine bağlı olarak, bir ya da diğer yönde süpürülmektedir.

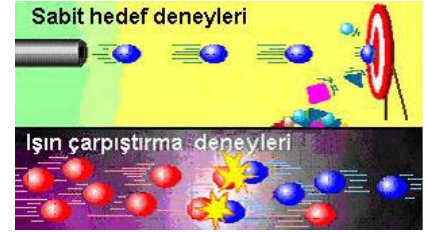
Manyetik alan bileşeni, parçacıkların hareketlerine dik yönde kuvvet uyguladığından, parçacıklar doğru üzerinde değil, spiraller üzerinde kayarlar. Dolayısıyla, manyetik alan kuvvetlerinin kinetik enerji artışına bir katkısı, genelde zaten olmadığı gibi, burada da yoktur. Parçacıklar, ana hareket yönlerine dik düzlemde de hız bileşenlerine sahip olabildiklerinden,

zamanla bu düzlemde bir dağılma gösterirler. Dolayısıyla arada bir ve özellikle de çarpıştırma öncesinde, bir araya getirilmeleri gerekir. Bu amaçla tüp boyunca, ara konumlarda yerleştirilmiş, odaklayıcı 'manyetik mercekle' bulunur. Daha ağır olan protonları hızlandırmak, elektronlara oranla daha zordur.

Parçacıkların yolları üzerinde atom ya da moleküllere rastlayıp çarparak hız kaybetmemeleri için, hızlandırma işinin, vakumlanmış bir tüpün içinde yapılması gerekir. Eğer tüp bir doğru şeklindeyse, bu doğrusal bir hızlandırıcı olur. Parçacıkların ne kadar yüksek enerjilere çıkması isteniyorsa, tüpün de o kadar uzun olması gerekir. Bu durum, tüpün yerleştirileceği tünelin maliyetini artırır. Bunun alternatifi, ek bir manyetik alan uygulamak suretiyle, parçacıkları dairesel yörüngeler üzerinde döndürerek hızlandırmaktır. Bu seçeneğe göre inşa edilen dairesel hızlandırıcılara, hızlandırma işlemi için kullanılan alan türlerine ve şekillerine bağlı olarak, 'siklotron' ya da 'senkrotron' denir.



Parçacıkları R yarıçapındaki bir tüpün içinde tutabilmek için; manyetik alanın ilgili parçacık üzerinde ve parçacığın hareketine dik yönde etki ettirdiği kuvvetin ($qv \times B/c$), merkezkaç kuvvetine (mv^2/R) eşit olması gerekir. Bu eşitliğin verdiği yarıçap değeri ($R = mv/c/qB$) sabit kalmak zorunda olduğundan, parçacıklar hızlandıkça, onları yörüngelerinde tutmaya çalışan manyetik alanın şiddeti artırılmak durumundadır. Dolayısıyla, dairesel tüp üzerindeki bazı konumlarda, güçlü



elektromagnets bulunur. Dairesel hızlandırıcıların maliyetini yükselten unsur da budur.

Hızlandırılan parçacık demetleri; ya sabit hedeflerle çarpıştırıldıkları 'sabit hedef,' ya da kafa kafaya getirilerek çarpıştırıldıkları 'ışın çarpıştırma' deneylerinde kullanılır. Parçacıklar hızlandırılma sürecinde, ivmelenen her yüklü parçacığın yaptığı gibi, ışınarak enerjilerinin bir kısmını kaybederler. 'Senkrotron ışıması' denen bu kaybın miktarı, parçacıklar hızlandıkça giderek artar ve dairesel hızlandırıcılarda, ek bir merkezkaç ivmesinin de varlığı nedeniyle, daha yüksektir. Buna karşılık doğrusal hızlandırıcılarda, hızlandırılmış olan demetlerin, başarıyla çarpıştırılmamaları halinde, hızlandırılmaları için harcanmış olan çabanın tümüyle boşa gitmesi söz konusudur. Oysa dairesel hızlandırıcılarda, demetleri daha sonraki turlardan birinde tekrar bir araya getirmek imkanı vardır.

Doğrusal hızlandırıcılar, sabit hedef deneylerinde kullanıldıkları gibi, ışın çarpıştırılmalarında da kullanılabilirler. Bazen ön hızlandırıcı olarak kullanılırlar ve hızlandırdıkları parçacıklar dairesel hızlandırıcıya aktarılırlar. Dairesel hızlandırıcılar da keza; doğrusal bir tüpe aktarımla sabit hedef deneylerinde ya da doğrudan ışın çarpıştırıcı olarak kullanılabilirler. Tabii, çarpışmadan geriye kalan ya da çarpışma sırasında ortaya çıkan ürünlerin belirlenmesi, deneylerin ana hedefidir. Bu amaçla çok çeşitli parçacık belirleyicileri (dedektör) kullanılmak durumundadır. Sabit hedef deneylerindeki hedef çoğu zaman, bu belirleyicinin içindeki bir malzemedir.

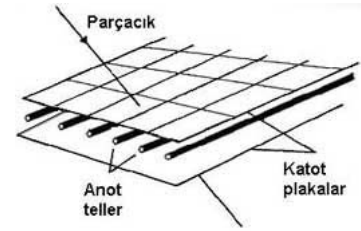
DEDEKTÖR ÇEŞİTLERİ

Dedektörler, duyarlarla algılanamayan olayları belirlemeye yarar. Kullanılmalarının amacı; parçacıkların patikalarının, saçılma açılarının, enerji ve kimliklerinin saptanmasıdır. Çünkü deneylerde çarpıştırılan parçacıkların türü, elektrik yükü ya da spin gibi iç yapısal özellikleri, genellikle önceden biliniyor olur. Çarpışma anına kadar izledikleri patikalarsa, hızlandırıcı tüpün geometrisinden bellidir. Öte yandan, enerji ve momentum gibi fiziksel değişkenlerinin değerleri, hızlandırma aşamasında saptanmış ya da hesaplanmıştır. Oysa çarpışma sonucunda ortaya çıkan çeşitli parçacıkların; elektrik yükü, kütle ve spin gibi yapısal özelliklerinin belirlenerek kimliklerinin saptanması; izledikleri patikaların belirlenmesi suretiyle, nereden gelip nereye doğru gittiklerinin anlaşılması ve böylelikle saçılma açılarının saptanması; taşıdıkları enerji ve momentum gibi fiziksel değişkenlerinin değerlerinin, bir şekilde ölçülmesi gerekir. Bu ölçümler, iz saptama odaları aracılığıyla yapılır.

İz saptama odalarının dört çeşiti var. Sis odası olarak bilinen birinci türde; bölmenin içi, 'aşırı soğutulmuş' buharla dolu. Aşırı soğutulmuş buhar kaynama noktasının biraz altına kadar dikkatle soğutulmuş olup, bu arada sıvı hale geçme sürecini başlatma olanağını bulamamış olan kararsız bir molekül sistemi oluşturuyor. Yüklü parçacıklar bölmeden geçerken, buhar molekülleriyle etkileş-

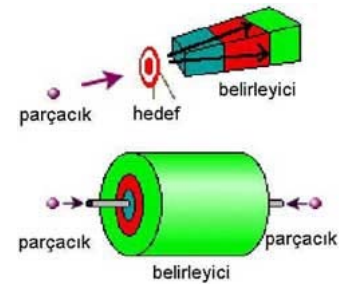
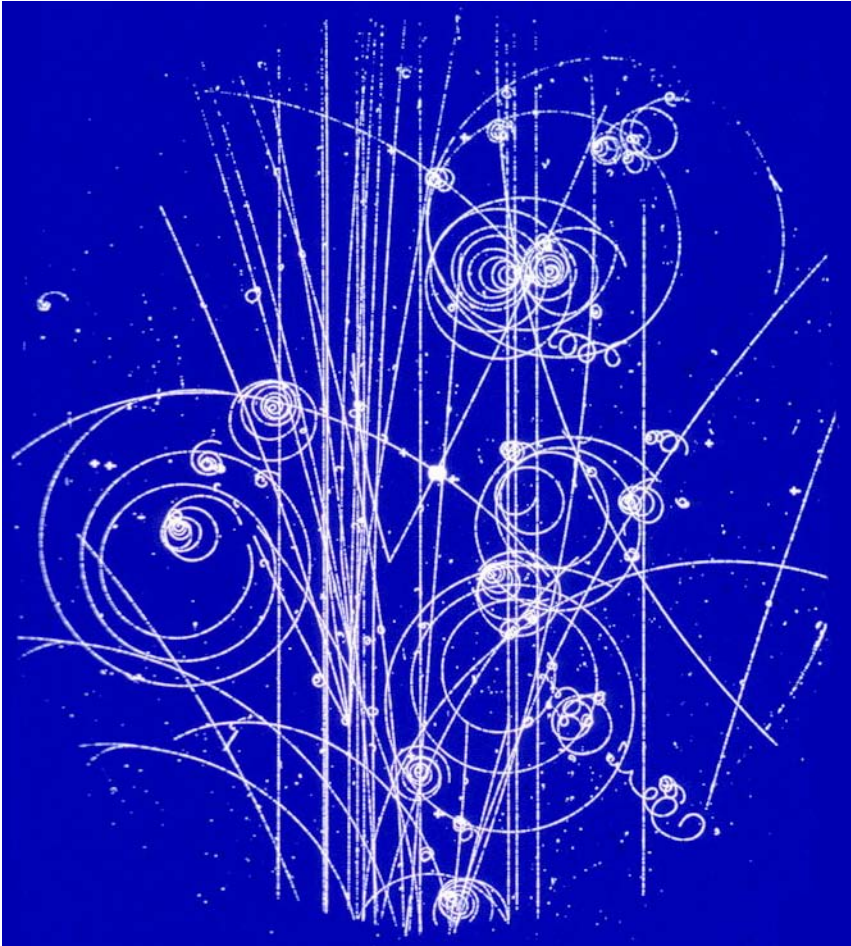
me girerek, onların sıvı hale geçmesine yol açıyor. Böylelikle, parçacık patikaları üzerinde sıvı zerrecikleri oluşuyor. Bu izlerin fotoğrafı çekilerek daha sonra inceleniyor. Kabarcık odası da denen ikinci tipte; bölme süper soğutulmuş buhar yerine, kaynama noktasının hemen üstüne kadar 'süper ısıtılmış' bir sıvıyla, örneğin hidrojenle dolu. Yüklü parçacıklar sıvının içerisinden geçerken, keza civardaki moleküllerle etkileşimde bulunuyor ve bu sefer onların buharlaşmasına yol açıyorlar. Dolayısıyla parçacık patikalarını, kabarcık zincirleri halinde fotoğraflayıp, daha sonra incelemek mümkün. Aşağıdaki şekilde, sıvı hidrojenle dolu bir kabarcık odası var ve manyetik alanda kıvrılmış parçacık patikaları, oldukça net olarak seçilebiliyor. Ancak bu tipler artık pek kullanılmıyor.

Daha yaygın olarak kullanılan ve 'tel odası' ya da 'çok telli, oranlı sayıcı' (MWPC-multiwired proportional counter) olarak bilinen üçüncü tip; içi gaz dolu bir bölmeden oluşuyor. Bölmenin içinde; birbirine paralel iletken tellerden oluşan anot düzlemleriyle, bu düzlemler arasında katot görevi gören, keza iletken bir plaka bulunuyor. Katot plakalar arasındaki uzaklık 2 cm kadar; aynı anot düzleminde yatan tellerin birbirlerinden uzaklığıysa 2 mm oluyor ve birbirini izleyen anot düzlemleri, hatları birbirine dik olacak şekilde yerleştiriliyor. Bir parçacık bölmeye girdiğinde, yolu üze-



rindeki gaz atomlarını iyonlaştırıyor. Artı yüklü iyonlar katot plakaya yönelirken; eksi yüklü olanlar, en yakındaki anot tele ulaşıyor ve telde bir akım oluşturuyor. Parçacık yol boyunca ilerledikçe, hangi yatay ve dikey tellerden akım geçtiğine bakılarak, geçtiği noktaların koordinatlarını belirlemek mümkün oluyor. Bu tel odalarının bir de, 'sürüklenme odaları' (drift chamber) denen ve parçacığın oluşturduğu iyonların anot tellerine sürüklenmesi için gereken süreyi de hesaba katarak, iyonların hangi noktada oluştuğunu, dolayısıyla da parçacığın patikasını daha büyük bir duyarlılıkla saptayanları var.

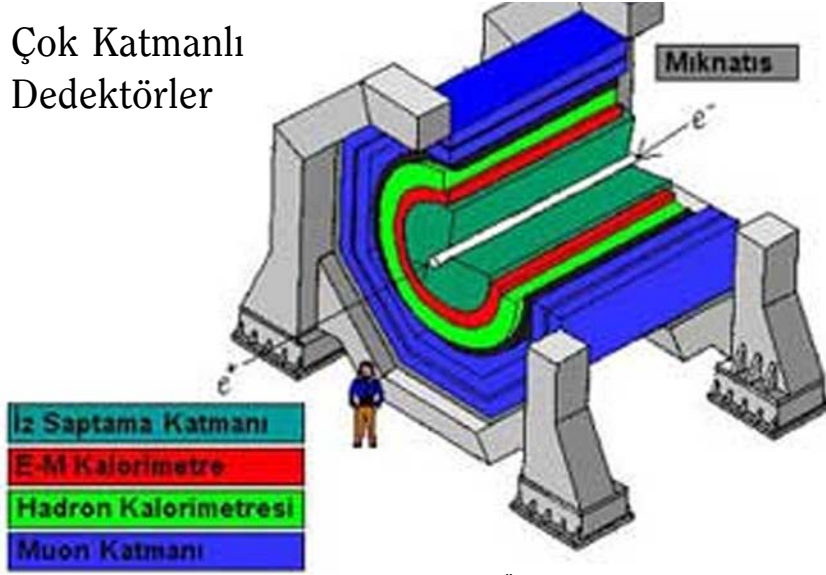
İz saptayan belirleyicilerin dördüncü tipi, yarı iletken plakalardan oluşuyor. Plakalar üzerinde; yatay ve dikey yönlere iletken hatlar, bu hatların uçlarında da elektrot çiftleri var. Parçacıklar plakaya çarptığında, yüzeyde eşik ve elektron çiftleri oluşturuyor. Bu yük taşıyıcıları bir elektrik alanının etkisi altında ayrıştırılarak, zıt elektrotlarda toplanıyor. Sonuç olarak elektrotlar arasında, ölçülebilir bir akım elde edilmiş oluyor ve parçacığın çarpma konumu; akım uyarılan iki elektrot çifti arasındaki iki iletken hattın hayali kesişme noktasından hareketle belirleniyor. Yarıiletken belirleyiciler çok duyarlı olup, parçacık konumunu 10 mikrometre (metrenin binde biri) hata payıyla saptayabiliyorlar. Bunlar karşılık, radyasyondan etkilenmek gibi bir sakıncaları var. Pahalıya ma-



loluyor ve daha çok, kısa ömürlü parçacıkların incelenmesinde kullanılıyorlar.

Sabit hedef deneylerinde hedef olarak, örneğin sıvı hidrojen kullanılır ve üretilen parçacıklar genellikle, çarpıtılan ışın demetinin doğrultusuna yakın yönlere, ileriye doğru dağılırlar. Dolayısıyla bu deneylerde kullanılan belirleyiciler, koni şeklinde olup, hedefin arkasına yerleştirilir. Işın çarpıştırma deneylerindeyse; birbirine yakın yörlümlerde ve fakat zıt yönlere hızlandırılan parçacıklar, bir noktada karşı karşıya getirilip, birbirleriyle çarpıştırılır. Üretilen parçacıklar her yönde dağılacığından, belirleyiciler küresel ya da çok daha sık olarak silindirik şeklindedir.

Çok Katmanlı Dedektörler



Çağdaş belirleyiciler, bir çarpışma olayının farklı yönlerini saptamaya yönelik, çok çeşitli bileşenlerden oluşur. Bu bileşenler, olayda açığa çıkan parçacıklar hakkında en fazla bilginin edinilebileceği şekilde yerleştirilmiştir. Öyle ki, parçacıklar farklı bileşen katmanlarından ardi ardına geçerler ve bir parçacık ancak; ya bir belirleyicide, ölçülebilir bir etkileşime girince, ya da gözlenebilir parçacıklara bozununca belirlenmiş olur. Belirlenmesine çalışılan ana unsurlar, parçacıkların patikaları ve taşıdıkları enerji düzeyidir.

Enerji ölçümü sırasında parçacıklar durdurulduklarından ya da başka parçacıklara dönüştürüldüklerinden, önce konumlarının izlenmesiyle patikalarının belirlenmesi ve enerji ölçümlerinin daha sonra yapılması gerekir. Öte yandan genellikle; müonlar hadronlardan, hadronlar da; fotonlardan ya da elektron ve pozitron gibi hafif parçacıklardan çok daha fazla miktarda enerji taşırlar.

Dolayısıyla, aynı malzeme içerisinde katedebilecekleri mesafeler, yani erimleri ya da durdurulmalarının zorluk düzeyleri, farklı farklıdır. Bu grupların birbirinden ayrılabilmesi için; önce foton, elektron ya da pozitron; sonra hadron, en sonunda da müon enerjilerinin ölçülmesi gerekir.

Yukarıdaki şekilde, örnek bir çarpışma deneyinin yer aldığı bir hızlandırıcı tüpünün etrafındaki belirleyicinin çeşitli katmanları gösteriliyor. İçten dışa doğru dört katman var:

1. İz saptama katmanı,
2. Elektromanyetik kalorimetre,
3. Hadron kalorimetresi,
4. Müon kalorimetresi ya da katmanı.

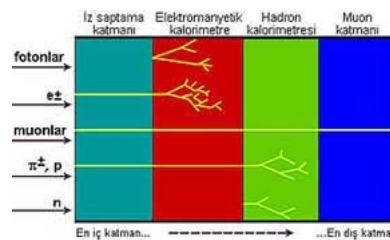
Her katmanda, çeşitli sayı ve tiplerde belirleyiciler bulunuyor ve o katmandan geçen parçacıkların özelliklerini saptıyor. Parçacıklar içten dışa doğru ilerlerken, bu katmanların bir ya da daha fazlasıyla etkileşimde bulunabiliyor ve sonuçta, türünün taşıdığı fiziksel özelliklere bağlı olarak, katmanların birinde durdurulmuş oluyor.

Sağ alttaiki şekilde, hangi parçacık türlerinin hangi katmanlarda etkileşime girerek belirlendiği gösteriliyor. Yalnızca iz saptama odalarından oluşan birinci katmanda, yalnızca yüklü parçacıklar, yükleri sayesinde iz bırakıyorlar. Örneğin, foton ya da nötron gibi yüksüz parçacıklarsa, bu katmanla etkileşime girmediklerinden, iz bırakmaksızın ilerliyor ve burada farkedilemeden ikinci katmana geçi-

yorlar. Öte yandan, iz saptama dedektörleri, parçacıkların hemen hemen hiç etkilenmeyeceği şekilde yapılırlar. Dolayısıyla, bu katmanda yer alan etkileşimler, kayda değer miktarda enerji kaybına yol açmaz ve parçacıklar hiçbir şey olmamış gibi yollarına devam ederler. Sonuç olarak, parçacıkların hepsi, enerjilerinde ve hareket doğrultularında hiçbir değişikliği olmadığı varsayımıyla, ikinci katmana ulaşırlar. Ancak bu arada, yüklü olanların varlığı ve nereden gelip nereye gittikleri belirlenmiş oluyor.

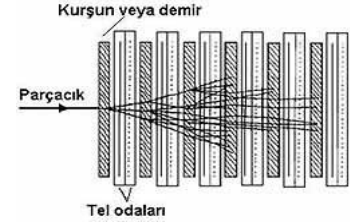
Fotonlar, elektromanyetik etkileşimin ağır bastığı ikinci katmanda durduruluyor. Ayrıca, elektron ve pozitron gibi yüklü, ama hafif olduklarından dolayı görece az miktarda enerji taşıyan parçacıklar da öyle... Dolayısıyla, bu parçacıkların enerjileri, elektromanyetik kalorimetreyi oluşturan ikinci katmanda belirlenmiş oluyor. Oysa müon, pion ya da proton gibi ağır ve yüklü parçacıklar, bu katmanda iz bırakmakla beraber, taşıdıkları yüksek enerji sayesinde ve bu enerjinin çok küçük bir kısmını kaybederek, üçüncü katmanı oluşturan hadron kalorimetresine ulaşıyorlar. Nötronlara yüksüz olduklarından, elektromanyetik etkileşime zaten girmiyor ve üçüncü katmanı oluşturan hadron kalorimetresine, ilk halleriyle ulaşıyorlar. Sonuç olarak, proton ve nötron gibi baryonlarla, pion gibi mezonlar; yani hadronların tümü, hadron kalorimetresinde durdurulmuş oluyor. Bir sonraki dördüncü katmana yalnızca, çok yüksek enerji düzeylerine sahip, orta ağırlıktaki II. nesil leptonu olan müonlar ulaşabiliyor. Bu yüzden de bu sonuncusuna, 'müon katmanı' deniyor. Şimdi bir de katmanların yapısına bakalım...

Birinci katmanın en iç kısmında genellikle, yarıiletken saptayıcılar bulunuyor. Çünkü konumun en büyük doğrulukla belirlenmesi gereği burada. Dışarıya doğru yarıçapı büyüyen hayali silindiri yüzyleyi üzerine, sıra sıra telli odalar yerleştiriliyor. Sıralar birbirine göre biraz kaydırılmış durumda. Böyle



ki, parçacıklar en az birinden geçmek zorunda kalın ve yüklü olanların patikaları kaydedilmiş olsun. Çünkü bu katmandan sonra gelen kalorimetrelerde, parçacığın enerjisi ölçülürken, patikalar hakkındaki bilgiler kayboluyor.

Kalorimetreler benzer şekilde çalışıyor ve alttaki şekilden de görüleceği üzere; kurşun ya da demir gibi ağır ve yoğun bir metalden yapılmış bir dizi plakayla, her plakanın arkasındaki, telli oda işlevi gören gaz hacimlerinden oluşuyor. Soldan gelen parçacık bir plakaya girdiğinde, plakanın atomlarıyla arasında etkileşimler başlıyor.



Bu etkileşimler sırasında parçacığın enerjisi azalırken, ortaya küçük bir 'ikincil parçacıklar yağmuru' çıkıyor. Sonrasında hemen hep birlikte, o plakadan sonra gelen telli odaya girip, buradaki gaz ortamında iyonlaşmalara yol açıyorlar. Görece düşük miktarda enerji taşıyan ikincil parçacıklar, bu iyonlaşmalar sonucunda durdurulurken, birincil parçacık bu süreçten pek etkilenmeksizin yoluna devam edip, bir sonraki plakaya giriyor ve ta ki tüm enerjisini kaybedip durdurulana ya da başka parçacıklara dönüşene kadar, aynı süreci tekrarlayıp duruyor. Sonuçta, telli odalarda kaydedilmiş olan etkinlik düzeyi ölçümlerinin toplamından, parçacığın katman girişindeki enerjisi hesaplanabiliyor.

İz saptama katmanının dışında; elektron, pozitron ya da fotonları durdurarak enerjilerini ölçen elektromanyetik kalorimetre bulunuyor. Bu kalorimetrede kurşun plakalar kullanılıyor ve kalorimetrenin adı, bu katmanda yer alan ve ikincil parçacıklara yol açan etkileşimlerin elektromanyetik türde olmasından kaynaklanıyor. Bu nedendir ki, elektromanyetik kalorimetre, yüksüz fotonlarla, yüklü elektron ve pozitron gibi hafif parçacıkları durdurabiliyor. Hadronlarla müonlarysa, pek etkileyemiyor. Hadronlar, kurşun yerine demir plakalar kullanan hadron kalorimetresinde durduruluyor. Bu arada uzun mesafeler katettiklerinden, hadron kalorimetreleri, elektromanyetik kalorimetrelere çok daha kalın oluyor. Kuarklardan oluşan hadronlar, enerjilerinin tümünü bu katmandaki demir atomlarıyla güçlü etkileşime girerek kaybediyorlar ve kalorimetrenin adı buradan geliyor. Yollarına devam eden müonların enerji ölçümüyse, en dıştaki, demir ya da alüminyum plakalar kullanan müon kalorimetresinde yapılıyor. Müon kalorimetresi girdi olarak, hadron kalorimetresinden parçacık yağmuruyla yol açmaksızın geçmiş olan yüklü parçacıkları alıyor. Onlar da, elektronun yaklaşık 200 katı (106MeV) kütleyle sahip bulunan ve 2,2 mikrosaniye ortalama ömürle bozun kararsız bir lepton olan müonlar oluyor ve burada, atomlarla çarpışmaları sırasında, 'ikincil parçacık' yağmurlarına yol açıyorlar. Yalnızca nötrinolar, dört katmanı da geçip gidiyor ve bunların enerjileri ölçülmek yerine, ölçülemediğinden, enerjinin korunumu ilkesinden hesaplanıyor.



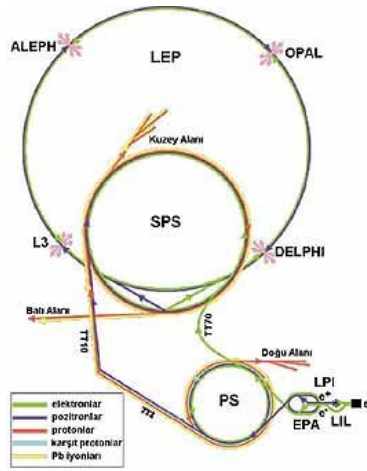
Dünyadaki en büyük hızlandırıcılardan birisi; Avrupa ülkelerinin, Fransa-İsviçre sınırında ortaklaşa inşa etmiş oldukları CERN (Centre d'Europe pour Rescherches Nuclear) parçacık fiziği laboratuvarlarında bulunuyor. Daha doğrusu bulunuyordu. Tesis, çeşitli doğrusal ve dairesel hızlandırıcılardan oluşuyordu. Yapımına 1950 yılında başlamış, fakat zamanla, daha büyük ve güçlü hızlandırıcıların eklenmesiyle geliştirilmiş olan LEP (Büyük Elektron - Pozitron Çarpıştırıcısı) 2000 yılından itibaren 27 km'lik halka biçimli tüneline, çok daha güçlü olan ve elektron ve pozitronlardan çok daha ağır olan protonları çarpıştırarak şimdiye kadar bulunamamış egzotik kuramsal parçacıklar bulunacağı umulan LHC'ye (Büyük Hadron Çarpıştırıcısı) bırakmaya hazırlanıyor.

Eski hızlandırıcılar hala, yenileriyle birlikte, ön hızlandırma amacıyla kullanılıyor. Yukarıdaki resimde tesisin havadan görünüşü, sağ alttaki şekildeyse içerdiği çeşitli bileşenlerin şeması var. Laboratuvarında elektron ve pozitron gibi görece hafif parçacıkların yanında, protonlar ve kurşun gibi ağır iyonlar da hızlandırılıyor. Fakat en büyük hızlandırıcısı, daha çok elektron-pozitron yokedilişi deneylerinde kullanılmak amacıyla yapılmış.

Bunun için, ısıtılan bir metalin saldırdığı elektronlar, sağ alt köşedeki 'ön enjektör' sisteminin (LPI, Lep Pre-Injecto) doğrusal hızlandırıcısında (LIL, Lep pre-Injector Linear accelerator) 200 MeV enerji düzeyine hızlandırılıyordu. LIL'in orta kısmında, bu elektronların bir kısmı saptırılıp, kalanı ağır bir metalle çarpıştırılmak suretiyle pozitronlar elde ediliyordu. Elde edilen pozitronlarla elektronlar, doğrusal hızlandırıcının sonraki aşamalarına yönlendirilip, 600 MeV'a kadar hızlandırılıyordu. Daha sonra bir süre için, ön enjektör sisteminin 'elektron pozitron aküsü'nde (EPA, Electron Positron Accumulator) yörüngelere oturtulup, ters yönlere

dönmeye bırakılıyorlardı. Öyle ki, sırada daha fazla elektron ve pozitron üretilip biriktirilebilirdi. Yeterince birikim sağlandığında, elektronlar ve pozitronlar, dairesel bir hızlandırıcı olan 'proton senkrotronu'na (PS, Proton Synchrotron) gönderiliyordu. İki parçacık demeti; aynı tüpün içerisindeki, birbirinden yeterince uzak yörüngelerde ve zıt yönlere döndürülerek, 3.5 GeV'a kadar hızlandırılıyordu.

Daha sonra, elektronlar TT70, pozitronlar da TT2 ve TT10 bağlantı hatları üzerinden, daha büyük bir dairesel hızlandırıcı olan 'süper proton senkrotronu'na (SPS, Super Proton Synchrotron) yönlendiriliyordu. Parçacık demetleri burada 22 GeV'a hızlandırıldıktan sonra, en büyük dairesel hızlandırıcı olan 'büyük elektron pozitron' hızlandırıcı-çarpıştırıcısına (LEP, Large Electron Positron collider) gönderiliyordu. İki demet burada 104 GeV'a kadar hızlandırılıp, sonunda çarpıştırılıyordu. Hızlandırma işlemi, sağ üstte bir örneğin resmi görülen 'süperiletken radyofrekans odaları'nda yapılıyordu. Böyle bir odada oluşturulan ve yüksek frekansla salınan elektrik alanı, içinden geçen parçacıklara hızlandırılıyordu.

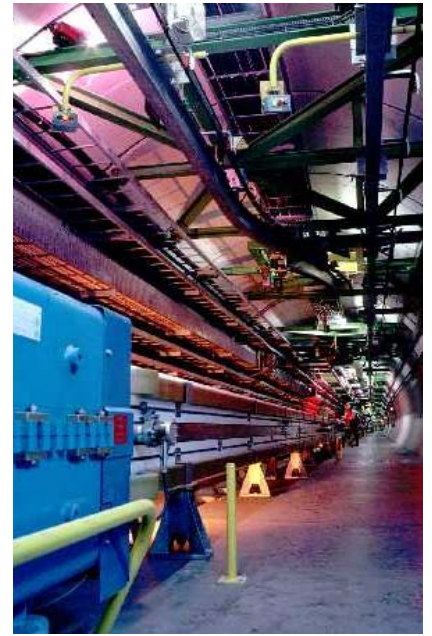


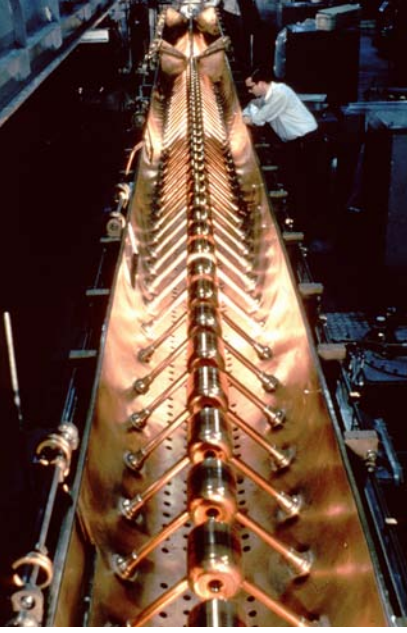
Örneğin, elektron gibi yüklü bir parçacık, 1 V'luk gerilime eşdeğer bir elektrik alanı üzerinden ivmeleştirildiğinde, 1eV'luk kinetik enerji kazanıyor ve GeV düzeylerine tırmanabilmesi için, toplam olarak milyarlarca voltluk gerilimden geçirilmesi gerekiyor. Dolayısıyla, işlemin tamamı, ışın tüpü boyunca aralıklarla yerleştirilmiş bulunan, bir ya da daha fazla radyofrekans odasında, kademeli olarak gerçekleştiriliyordu. Her aşamadaki salınımların frekansı, parçacıklara ek kinetik enerji kazandıracak şekilde ayarlanıyordu. Yandaki görev yapan bir doğrusal hızlandırıcı kesiti görülmüyor. Bu kesit, protonları 50MeV'a kadar hızlandırabiliyor. LEP hızlandırıcısındaysa, 100GeV'ın üzerine çıkılabiliyordu.

LEP, CERN laboratuvarlarındaki en büyük elektron hızlandırıcısıydı. Dairesel çevresi 27 km ve ışınlama tüpünün tamamı, yerin en az 100 m altında inşa edilmiş olan bir tünele yerleştirilmişti. İçerisinde 3368 miknatısla 272 süperiletken ivmendirme adımı vardı. Deneyler sırasında bütün bu parçaların, -269 °C'ye kadar soğutulup bu sıcaklıkta tutulması gerekiyordu.

Gereken yüksek enerjileri sağlamak için, parçacıklar dairesel yörüngelerde defalarca döndürülüp ivmendiriliyordu. Miknatıslar, parçacıkları belli yörüngelerde kalmaya zorlarken, özel elektrik alanları, parçacıkların enerjisini her dönüşte biraz daha artırıyordu. Parçacıklar LEP'in çevresinde, dört ivmendirme aşamasından geçiyor ve her dönüşlerinde 400MeV enerji kazanarak, 104GeV'a kadar çıkabiliyorlardı. Altta resimde LEP tüneline bir kısım görülüyor ve yarıçapı çok büyük olduğundan, neredeyse düzmuş gibi görünüyor.

Tüpün içerisinde aynı anda dört elektron ve pozitron demeti, ışık hızına çok yakın hızlarla





LHC'de kullanılacak olan dipol mıknatısların modeli

dolaşabiliyordu. Elektron-pozitron demetlerini, hızlandırıcının çevresindeki dört ayrı noktada çarpıştırmak mümkündü. Deneylerin yapıldığı bu noktalarda, dört büyük dedektör vardı. Bilmadamları, çarpışma sırasında olup bitenleri kaydeden bu dedektörler sayesinde, hangi parçacıkların, hangi enerji ve momentumla üretildiklerini inceleyebiliyorlardı. Bu dört dedektörün en büyüğü DELPHI idi. DELPHI, 1989 yılında LEP'le birlikte çalışmaya başlamış. 2000 yılındaysa, aynı tünelde LHC hızlandırıcısının yapımına başlanmak üzere, veri alımı durdurulup, devre dışı bırakılmış. Aşağıda, üst ortada ve sağ altta bulunan resimlerde görüldüğü gibi, silindirik şeklindeki bir merkez ve iki yan kapak kısmından oluşuyor. Çapı ve uzunluğu yaklaşık 10 m, toplam ağırlığı 3500 ton. En önemli bileşenleri, çeşitli tiplerdeki 20 alt dedektörü.

En dışta müon odasının, uzun ve düz alüminyum plakalar şeklindeki bazı bölmeleri görünüyor. Onun altındaki, parlak görüntülü demirden tabaklar şeklindeki kalın halka, had-

ron kalorimetresi. Hadron kalorimetresiyle ondan sonra gelen elektromanyetik kalorimetre arasında büyük bir süperiletken mıknatıs var. Bu mıknatısların oluşturduğu manyetik alanlar, parçacıkları sapıtırmak momentumlarının ölçülmesini mümkün kılıyor. İçe doğru ilerlerken art arda gelen bölme dizileri, aralarında boşluk kalmaması için, tam olarak üst üste getirilmeyip, kısmen çakıştırılmış.

Aşağıda soldaki resimde, DELPHI dedektörünün ışın tüpüne en yakın konumda bulunan Vertex dedektörünün içi görülüyor. Dış katmanın yarıçapı 10 cm kadar. Merkezdeki dikdörtgen plakalar, silikondan yapılmış yarıiletken belirleyiciler. Dedektörün 'zaman kestirimi bölgesi'nde, ('TPC, Time Projection Chamber'), 'sürüklenme odası' tekniği kullanılmış. Dolayısıyla, parçacık konumları büyük bir duyarlılıkla belirlenebiliyor.

LEP 1989-2000 yılları arasında çalıştıktan sonra, aynı tünelde; LHC ('Large Hadron Collider') adlı daha büyük bir hızlandırıcının

yapılması için söküldü. LHC, LEP'ten farklı olarak, proton demetlerini çarpıştıracak. Bu sayede 14TeV'luk çarpışmalar mümkün olacak. İnşaatı devam etmekte olan LHC'nin 2007 yılında tamamlanıp, çalıştırılmaya alınması bekleniyor. Yukarıdaki şekilde, LHC'de kullanılacak olan dipol mıknatısların modeli var. Birincil parçacık demetleri LEP'te aynı tüp içerisinde hızlandırılarak, LHC'de ayrı tüpler içinde hızlandırılacak.

Yeni LHC hızlandırıcısında, LEP'teki DELPHI'ye benzer iki büyük dedektöre ek olarak, iki özel dedektör daha bulunacak. Bu son ikisinin adları ATLAS ve LHC. ATLAS dedektörünün yapısı, DELPHI'ninkine benzer, fakat çok daha büyük. Tamamlandığında yüksekliği 22, uzunluğu 44 m olacak. Altta en sağdaki şekilde bu dedektörün binası, yan kapakları ve silindirik kısmının iç kesiti görülüyor. Oranlı çizilmiş insan şekillerinden dedektörün büyüklüğünü kestirmek mümkün.

