

Manyetik Tekkutuplar

Elektrik ve manyetizma birbiri ile bağlantılı olgular. Elektriğin kaynağının elektrik yüklü parçacıklar olduğu biliniyor. Elektrik yüklerinin hareketi aynı zamanda manyetizmanın da kaynağı. Ancak noktasal elektrik yüklerinin elektrik alan oluşturmasına benzer biçimde, manyetik alanlar oluşturan noktasal manyetik yüklerin de (manyetik tekkutuplar) olduğuna dair herhangi bir kanıt yok. Fakat pek çok araştırmacı doğada noktasal manyetik yüklerin olduğunu düşünüyor ve varlıklarını belirlemek için çalışmaya devam ediyor. Hatta bazı araştırmacılar sentetik manyetik tekkutuplar üretmeyi başardı.

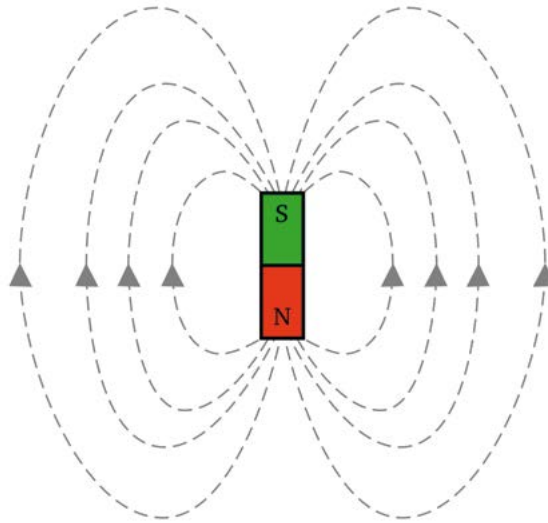
Gran Sasso Laboratuvarındaki
(İtalya) MACRO
(Monopole Astrophysics and
Cosmic Ray Observatory)
deneylerinde kullanılan
dedektörler.



Manyetizmanın Tarihi

Manyetizma, insanların eski çağlardan beri aşına olduğu bir olgudur. Adını ilk kez gözleendiği yer olan Manisa'nın eski adı Magnesiadan alır. Önceleri farklı işaretli (artı ve eksi) noktasal elektrik yüklerinin olmasına benzer biçimde farklı işaretli noktasal manyetik yüklerin de olduğu düşünölmüştü. Ancak bugüne kadar gözlemlenebilmiş herhangi bir manyetik tekkutup yoktur. Örneğin bir mıknatısın kuzey ve güney olarak adlandırılan iki kutbu vardır. Ancak mıknatıs ikiye bölündüğü zaman oluşan parçaların birinin manyetik "yükü" kuzey, diğerininki "güney" olmaz. Parçaların her ikisinin de yine bir kuzey kutbu, bir güney kutbu vardır yani parçalar çiftkutupludur. 1819'da Oersted'in elektrik akımlarının çevredeki elektrik yükleri üzerinde manyetik kuvvet oluşturduğunu keşfetmesiyle elektrik ve manyetizmanın birbiri ile ilişkili olduğu anlaşıldı. Bir yıl sonra Amper manyetizmanı kaynağı ile ilgili, kendi adı ile anılan hipotezi ileri sürdü: *Manyetizmanın kaynağı elektrik yüklerinin hareketidir. Manyetik tekkutuplar yoktur, fakat elektrik yüklerinin dairesel hareketi sonucunda manyetik çiftkutuplar oluşur.* Elektromanyetik kuramın gelişmesindeki en önemli aşamalardan biri Faraday'ın elektrik ve manyetik "alanlar" kavramlarını öne sürmesi oldu. Faraday değişen manyetik alanların elektrik alanları ürettiğini de (manyetik indüksiyon yasası) keşfetti. Bugün değişen elektrik alanların da manyetik alanlar ürettiğini biliyoruz. Ancak bu etki Faraday'ın 1800'lerin teknolojisiyle laboratuvar da gözlemleyemeyeceği kadar küçüktü. Fakat Maxwell elektromanyetik kuramın tutarlı bir biçimde matematiksel olarak ifade edilebilmesi için bu etkinin de gerekli olduğunu fark etti ve 1873'te tüm elektromanyetik yasalarını matematiksel denklemlerle ifade etti. Bugün Maxwell denklemleri olarak anılan bu denklemlerden çıkarılan en önemli sonuçlardan biri ışığın da bir elektromanyetik dalga olduğunu anlaşılması oldu. Elektromanyetik kuramın, bugüne kadar geliştirilmiş en başarılı kuram olduğu söylenebilir. Klasik mekaniğin aksine 20. yüzyıldaki en önemli bilimsel gelişmeler olan görelilik kuramı ve kuantum mekaniğinden sonra bile hiçbir değişikliğe uğramadı. Maxwell denklemleri, kendilerinden 30 yıl sonra geliştirilen görelilik kuramı ile tamamen uyumludur ve kuantum elektrodinamiğinde de aynen kullanılırlar.

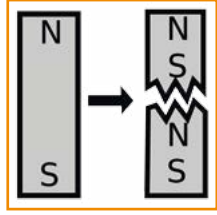
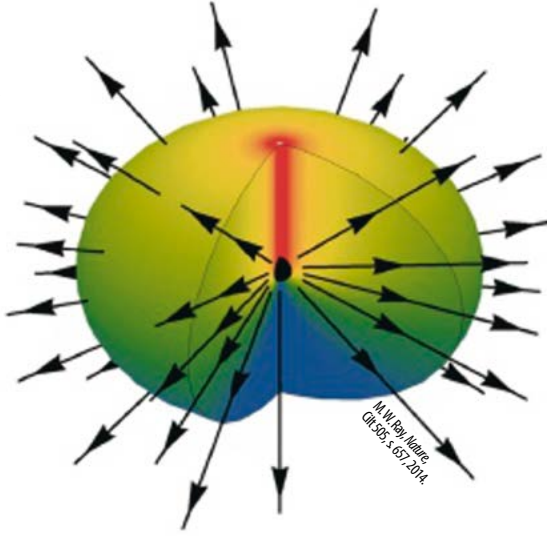
Elektromanyetik kuram hiçbir manyetik tekkutup içermeden de çok başarılı olmasına rağmen, bugün pek çok araştırmacı hâlâ manyetik tekkutupların var olduğunu düşünüyor ve onları bulmak için çalışmaya devam ediyor. Bu durumun önemli iki sebebi var.



Bir manyetik çiftkutupun çevresinde oluşturduğu manyetik alan

Birincisi elektromanyetik kuram manyetik tekkutupların var olduğu varsayılarak yeniden kurulduğu zaman, Maxwell denklemleri simetrik hale geliyor ve çözümleri hayli kolaylaşıyor. İkincisi ise manyetik tekkutupların varlığının elektrik yükleri ile ilgili henüz çözülememiş bir problemin cevabı olduğunun düşünülmesi. Bu problem elektrik yüklerinin neden kuantize olduğu ile ilgili. Bilindiği gibi doğada gözlemlenen tüm elektrik yüklerinin değerleri, bir elektron yükün tam katları. Bu durumun sebebi bilinmiyor, ancak Dirac 1931'de manyetik tekkutupların varlığının, elektrik yüklerinin neden kuantize olduğunu (neden herhangi bir değer alamadığını) açıklayabileceğini gösterdi. Dalga fonksiyonlarının fazlarının gözlemlenememesi konusunu ele alan Dirac, manyetik tekkutuplar gibi davranan tekilliklerin kuantum mekaniğine göre mümkün olduğunu buldu. Sonuçlar elektrik ve manyetik yüklerin değerlerinin çarpımının kuantize olması gerektiğini gösteriyordu: g temel manyetik yük, e temel elektrik yükü, h Planck sabiti ve c ışık hızı olmak üzere $ge = hc/4\pi$. Bu durum "tüm evrende" tek bir manyetik yükün bile var olmasının, elektrik yüklerinin kuantize olmasını açıklamaya yeteceğini ve temel manyetik yükün $g=68,5e$ olduğunu gösteriyor. Dirac makalesini "doğa bundan yararlanmadıysa şaşarım" diye bitirmişti, ancak uzun çabalar sonucunda hâlâ manyetik tekkutupların gözlemlenememesi üzerine kendisi de manyetik tekkutupların olmadığını düşünmeye başladı. Fakat başka kuramsal ve deneysel fizikçiler manyetik tekkutuplar üzerine çalışmaya devam etti. Schwinger, manyetik tekkutuplar ve dionlar (hem manyetik hem de elektrik yükü olan noktasal parçacıklar) içeren alan kuramları oluşturmaya çalıştıysa da başarısız oldu.

Rb atomlarından elde edilen Bose-Einstein yoğuşuğu kullanılarak elde edilen sentetik manyetik tekkutup.



Bir manyetik çiftkutup ikiye bölündüğü zaman iki manyetik tekkutup değil iki manyetik çiftkutup elde edilir.

Bu durum başlangıçta umutsuzluğa neden olduysa da Abelyen olmayan ayar kuramlarının manyetik tekkutuplar içeren çözümleri de olduğunun anlaşılmasıyla araştırmalar ivme kazandı. Büyük birleşik kuramların (elektromanyetik, güçlü ve zayıf etkileşimleri birleştiren kuramların) geliştirilmesiyle, bu durumun evrenin ilk zamanlarında manyetik tekkutupların oluşmuş olması gerektiğine işaret ettiği anlaşıldı. Eğer bu doğruysa kozmik ışınlar içinde manyetik tekkutuplar da olmalıdır. 1960'ların sonlarından başlayarak hem manyetik tekkutuplar içeren kuramlar oluşturmak hem de manyetik tekkutupları gözlemleyebilmek için pek çok çalışma yapıldı. Kuramsal araştırmaların kısmen de olsa başarılı olduğu söylenebilir, ancak bugüne kadar manyetik bir tekkutup ne laboratuvar ortamında ne de kozmik ışınlarda gözlemlendi. Ancak bazı araştırmacılar manyetik tekkutuplar gibi davranan malzemeler üretmeyi başardı. Gelişmiş yöntemler kullanılarak malzemelerin içinde kurulan yapılar "noktasal" olmadıkları için gerçek anlamda manyetik tekkutup değiller, ancak çevrelerinde noktasal manyetik yüklere benzer biçimde manyetik alanlar oluşturuyorlar.

Manyetik Tekkutup Araştırmaları

Maxwell denklemlerine göre tüm elektrik ve manyetik alanların kaynağı, elektrik yükleri ve bu elektrik yüklerinin hareketidir. Özetle:

- elektrik yükleri çevrelerinde elektrik alan oluşturur
- elektrik yüklerinin hareketi manyetik alan oluşturur
- değişen elektrik alanlar manyetik alan üretir
- değişen manyetik alanlar elektrik alan üretir

Eğer bir manyetik tekkutup varsa, bu Maxwell denklemlerinin iki şekilde değiştirilmesine sebep olacaktır:

- manyetik tekkutuplar çevrelerinde manyetik alan oluşturacaktır
- manyetik yüklerin hareketi elektrik alan oluşturacaktır

Ayrıca en küçük kütleli manyetik yük kararlı olacak ve manyetik yük korunacaktır.

Yıllardır pek çok deneyci manyetik tekkutupların varlığını ispatlamaya çalışıyor. Bu araştırmalar doğrudan ve dolaylı araştırmalar olarak ikiye ayrılabilir. Doğrudan araştırmalar manyetik tekkutupların varlığının sebep olduğu değişiklikleri, dolaylı araştırmalar ise gerçekleşen fiziksel süreçlerin ara basamakları sırasında oluşabilecek sanal manyetik yüklerin sebep olduğu değişiklikleri gözlemlemeye çalışır.

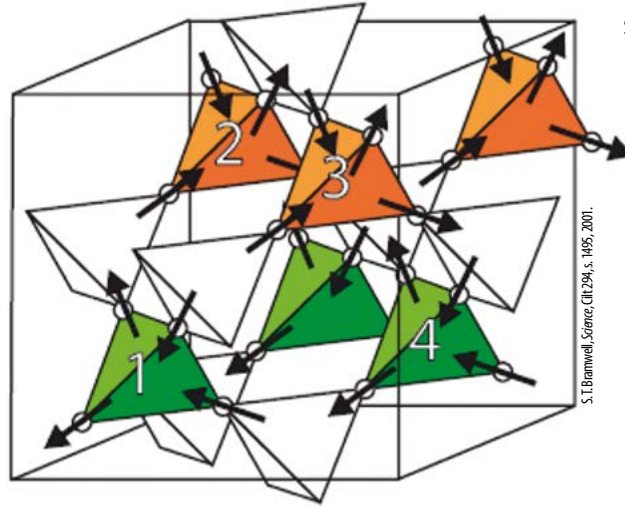
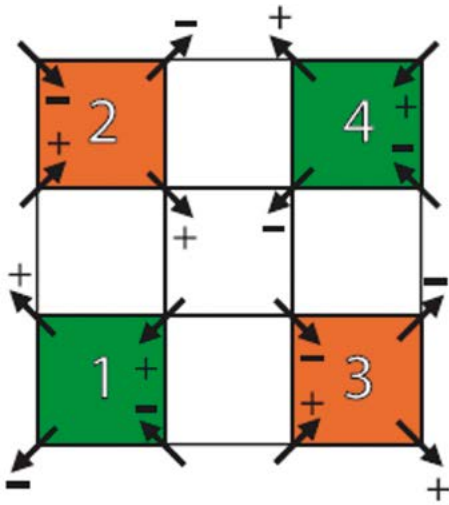
Doğrudan gözlem yöntemlerinden biri ferromanyetik malzemelerin içinde hapsolmuş manyetik tekkutupları bulmaya çalışmak. Ancak bu yöntemin başarılı olma ihtimali düşük. Çünkü bir manyetik tekkutupun kristal yapıdaki bir katıya bağlanması için keV (kilo elektron volt) ölçeğinde enerji gerekli, ancak bir manyetik tekkutupun atom ölçeğinde mesafe kat ederek edineceği enerji ise sadece eV'ler ölçeğinde.

Bugüne kadar yüzlerce kilogram malzeme kullanılmasına rağmen manyetik bir tekkutup varlığına dair herhangi bir veri elde edilemedi. Sonuçlar manyetik bir tekkutup varsa bile (manyetik yük parçacığı)/(çekirdek parçacığı) oranının 10^{-29} 'dan küçük olduğunu gösteriyor.

Manyetik tekkutup gözlemlemek için kullanılan bir diğer yöntem süperiletken detektörlerin içinden geçen manyetik tekkutupları belirlemek. Eğer bir süperiletken halkanın içinden manyetik bir tekkutup geçerse, manyetik akıda yaşanacak değişiklik sonucunda bir elektrik alan oluşacak ve süperiletkenden akım geçmeye başlayacaktır. Süperiletkenlerin elektriksel direnci sıfır olduğu için bu akımın şiddeti büyük olacaktır. Noktasal manyetik tekkutuplara benzer biçimde manyetik alanlar oluşturan bobinler ile yapılan deneyler, kuramsal hesaplarla büyük bir uyum içinde. Bu durum bugüne kadar hiçbir olumlu veri elde edilememesine rağmen bu yöntemin başarılı olabileceğini gösteriyor.

Sentetik Manyetik Tekkutuplar

Bugüne kadar noktasal manyetik yükler gözlemlenememiş olsa da araştırmacılar noktasal manyetik yükler gibi çevrelerinde manyetik alan oluşturan malzemeler üretmeyi başardı. Bu bağlamda öne çıkan iki çalışmadan bahsedilebilir. Birincisi Oxford Üniversitesi, Princeton Üniversitesi ve Max Planck Karmaşık Sistemler Fiziği Enstitüsünden bir grup



Spin buzları

S. I. Barmwell, Science, Cilt 294, s. 1495, 2001.

araştırmacı tarafından “spin buzları” kullanılarak yapılan bir araştırma. Spin buzları, temel enerji seviyesi çoklu yapıda olduğu için sıcaklık 0 K'e yaklaşırken entropinin sıfıra yakınsamadığı malzemelerin bir örneğidir. Bu isimle adlandırılmalarının nedeni malzemedeki atomların spinlerinin yönelimlerinin buzun kristal yapısına benzer biçimde düzenlenmesidir. Normalde bu malzemeler temel enerji seviyesindeyken, her bir kristal hücresinin içine doğru yönelmiş iki spin ve kristal hücresinden dışarıya doğru yönelmiş iki spin vardır. Eğer her bir spin bir çift noktasal manyetik yükten oluşmuş gibi düşünülürse, temel enerji seviyesindeki bir kristaldeki tüm yerlerin manyetik yükünün sıfır olduğu söylenebilir. Ancak malzeme uyarılarak dört spinden herhangi birinin yönü tersine çevrildiği zaman, manyetik tekkutuplara benzeyen yapılar oluşur. Dr. C. Castelnovo ve çalışma arkadaşlarının Dy_2TiO_7 ve $Ho_2Ti_2O_7$ kullanarak yaptığı deneyler, malzemeler içinde oluşturulan yapıların manyetik Coulomb etkileşimi gösterdiğini ve manyetik yükler gibi elektromotor kuvvet ürettiklerini gösterdi. Ancak kristal yapı içinde manyetik tekkutuplar gibi davranan atom büyüklüğündeki bu yapılar, kristal yapıdan ayrıştırılıp tek tek incelenemiyor.

Sentetik manyetik tekkutuplar üzerine başka bir çalışma yakın zamanda ABD'li ve Finlandiyalı bir grup araştırmacı tarafından yapıldı. Çalışma daha önce Helsinki Teknoloji Üniversitesinde çalışan V. Pietila ve M. Möttöne adlı araştırmacıların yaptığı kuramsal hesaplara dayanıyor. 2009'da *Physical Review Letters*'de yayımlanan makalede ileri sürülen yöntem, Bose-Einstein yoğunlaşmasına uğramış ve spini 1 olan parçacıklar kullanılarak manyetik tekkutuplar üretilebileceğini öne sürüyordu. Böyle bir sistem, harici manyetik alanların yokluğunda, biri ferromanyetik diğeri antiferromanyetik iki fazda bulunabilir.

Ancak yeteri kadar güçlü harici manyetik alanlar uygulandığında sistemin spini manyetik alan yönünde hizalanır. Araştırmacılar, böyle bir sistemde harici manyetik alanın ayarlanmasıyla -noktasal manyetik yükler gibi- çevresinde manyetik alan oluşturan yapıların elde edilebileceğini kuramsal olarak gösterdi. Kısa bir süre önce bu yöntemi ^{87}Rb atomlarının oluşturduğu Bose-Einstein yoğunluğu üzerinde sınavan araştırmacılar, kuramsal hesaplarla uyumlu sonuçlar elde etti. Yoğunluğun yoğunluğunun görüntüleri, Dirac tarafından geliştirilen kuramdakilere benzeyen sentetik manyetik yükler oluştuğunu gösteriyor. Ancak çalışma sırasında uyarılmış durumdaki Rb atomları kullanıldığı için, oluşturulan yapıların ne kadar kararlı olduğunu belirlemek amacıyla bozunma hızının da ölçülmesi gerekiyor. Elde edilen manyetik tekkutup benzeri yapıların gelecekte daha önce incelenememiş pek çok olgunun araştırılmasında yararlı olacağı düşünülüyor.

Sonuç: Sonuç olarak yıllardır yapılan pek çok araştırmaya rağmen hâlâ gerçek anlamda bir manyetik tekkutup bulunamadığını söyleyebiliriz. Ancak tüm evrende tek bir manyetik tekkutup bile var olmasının elektrik yüklerinin neden kuantize olduğunu açıklayabilecek olması, pek çok fizikçinin doğada manyetik tekkutupların var olduğunu düşünmesine neden oluyor. Eğer manyetik yük taşıyan noktasal parçacıklar gerçekten varsa, belki parçacık hızlandırıcılar kullanılarak üretilmeleri mümkün olabilir. Ancak en hafif manyetik tekkutup kütlesi, şu anda kullanılmakta olan ya da ileride kurulabilecek hiçbir parçacık hızlandırıcının üretemeyeceği kadar büyük olabilir. Hem kuramsal tahminler hem de bugüne kadar parçacık hızlandırıcılarda manyetik tekkutupların gözlemlenememiş olması da buna işaret ediyor.

Kaynaklar

- Milton, K. A., “Theoretical and experimental status of magnetic monopoles”, arXiv:hep-ex/0602040v1, 2006.
- Dirac, P. A. M., “Quantized singularities in the electromagnetic field”, *Proceedings of The Royal Society A*, Cilt 133, s. 60-72, 1931.
- Pietila, V., Möttöne, M., “Creation of Dirac monopoles in spinor Bose-Einstein condensates”, *Physical Review Letters*, Cilt 103, Makale Numarası 030401, 2009.
- Ray, M. W., ve ark., “Observation of Dirac monopoles in a synthetic magnetic field”, *Nature*, Cilt 505, s. 657-660, 2014.
- Castelnovo, C., ve ark., “Magnetic monopoles in spin ice”, *Nature*, Cilt 451, s. 42-45, 2008.