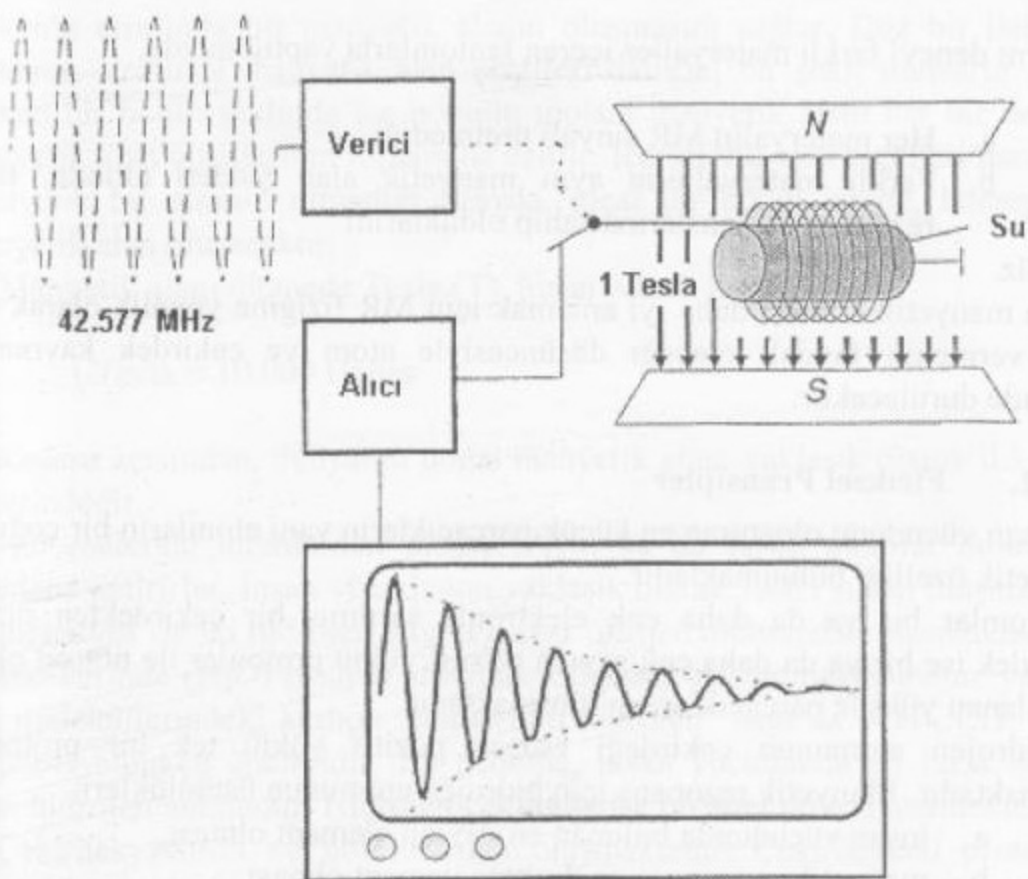


7. MANYETİK REZONANS (MR) CİHAZI

7.1. Giriş

Hastaya ait bir MR görüntüsünün nasıl elde edildiği, bu konunun fiziksel prensibinin ne olduğu sorularına cevap aramak amacıyla basit bir deney yapalım.

Homojen bir manyetik alanda su içeren bir fantomu RF bobininin içine koyalım. Bu RF bobinini bir anahtar yardımıyla alıcı ve verici bir sisteme bağlayalım. RF bobini ile sarılmış fantomu, simetri eksenini manyetik alan çizgilerine dik olacak şekilde homojen manyetik alan içine yerleştirelim.



Şekil 7-1 MR sinyalinin elde edilmesi

Su içeren fantomu çevreleyen RF bobinine, 1 Tesla büyüklüğündeki manyetik alan içinde verici tarafından, 42.577 MHz'lik frekansa sahip bir sinyal gönderilirse, ve RF bobini hemen alıcı konumuna getirilirse, RF sinyalinin üstel işlev şeklinde azaldığı görülür. Bu azalan sinyal MR sinyali olarak tanımlanmıştır.

Su için, 1 Tesla büyüklüğündeki manyetik alanda, MR sinyali sadece gönderme frekansında gözlenebilir. Bu frekans, rezonans frekansı olarak tanımlanmıştır.

$$B = 1 \text{ Tesla} \rightarrow f = 42.577 \text{ MHz}$$

$$B = 2 \text{ Tesla} \rightarrow f = 85.154 \text{ MHz}$$

Sonuç olarak rezonans frekansının manyetik alanın şiddeti ile doğru orantılı olduğu görülmektedir.

$$f \approx B \quad (7.1)$$

Aynı deneyi farklı materyaller içeren fantomlarla yaptığımızda,

- Her materyalin MR sinyali üretmediği,
- Farklı materyallerin aynı manyetik alan şiddeti altında, farklı rezonans frekanslarına sahip olduklarını

görüyoruz.

Bu manyetik etkileri daha iyi anlamak için MR fiziğine yönelik olarak özet bilgi vermenin faydalı olacağı düşüncesiyle atom ve çekirdek kavramları üzerinde durulacaktır.

7.2. Fiziksel Prensipler

İnsan vücudunu oluşturan en küçük parçacıkların yani atomların bir çoğunun manyetik özelliği bulunmaktadır.

Atomlar bir ya da daha çok elektronla sarılmış bir çekirdekten oluşur. Çekirdek ise bir ya da daha çok sayıda pozitif yüklü protonlar ile nötron olarak tanımlanan yüksüz parçacıklardan oluşmaktadır.

Hidrojen atomunun çekirdeği sadece pozitif yüklü tek bir protondan oluşmaktadır. Manyetik rezonans için hidrojen atomunun üstünlükleri:

- insan vücudunda bulunan en yaygın element olması,
- manyetik rezonansa en duyarlı element olması

olarak sıralanabilir.

Bu özelliğinden dolayı, hidrojen protonları MR görüntüleme tekniğinde kullanılmaktadır.

Şimdi de hidrojen atomunun manyetik özelliğinin nereden kaynaklandığını inceleyelim. Proton, nötron ve elektronlar *dönü* olarak bilinen önemli bir özelliğe sahiptirler (*dönü* ≈ *kendi eksenini etrafında dönme*). Kendi eksenini etrafında dönen her parçacık manyetik özelliğe sahiptir. Dönen partiküller elektriksel yüke de sahiptir. Hareket halindeki yükler elektrik akımı olarak tanımlanır. Zamanla değişen elektrik alanı, zamanla değişen bir manyetik alan yaratır. Ters durum da geçerlidir.

Elektromanyetik ışımaya bakarak elektrik ve manyetik alan vektörlerinin salınım yüzeylerinin birbirlerine dik olduklarını söyleyebiliriz. MR deneyinde sadece manyetik alan vektörü (B_1), incelenecek cisimle etkileşim halindedir.

Elektromanyetik spektrum, X-ışınları tanıya yönelik sistemlerde kullanılan görülebilir ışık üzerindeki çok yüksek frekanslardan, MR sistemlerinde kullanılan düşük frekanslı radyo dalgalarına kadar geniş bir alanı kapsamaktadır.

Işıma enerjisi frekansla doğru orantılıdır.

$$E = h \cdot f \quad (7.2)$$

Burada E enerjiyi, h Planck sabitini, f ise frekansı tanımlamaktadır.

Elektrik alan, iletken bir ortamda akım akmasına neden olur. Bu ise iletkenin etrafında bir manyetik alanın oluşmasını sağlar. Düz bir iletkende, iletkenin etrafında manyetik alan çizgileri dairesel bir şekil oluşturur. Şayet, iletken bir bobin şeklinde ise bobinin toplam manyetik alanı her bir iletkenin manyetik alan çizgilerinin toplamına eşittir. İçeride ise alan çizgileri paraleldir. Manyetik bir etkinin olmadığı uzayda, ideal bir bobin içinde, homojen bir manyetik alan oluşacaktır.

Manyetik alanı ölçmede Tesla (T), birim olarak kullanılır:

$$1 \text{ Tesla} = 10.000 \text{ Gauss}$$

Mukayese açısından, dünyanın doğal manyetik alanı yaklaşık olarak 0.5 Gauss değerindedir.

Her materyal atomlardan oluşur. Aynı ya da farklı atomlar molekülleri meydana getirirler. İnsan vücudunun yaklaşık olarak %60'ı sudan oluşmaktadır. Su molekülü ise iki hidrojen atomu ile bir oksijen atomundan oluşmaktadır. Su moleküllerinde (H_2O) oksijen atomuna kimyasal bağ ile bağlanmanın yanı sıra, yağ moleküllerindeki karbon atomlarının hidrojen bağı da (CH_2 , CH_3 - grupları) oldukça önemlidir. Bu nedenle, insan vücudunda en fazla bulunan atom hidrojen atomudur. Hidrojen çekirdeği ise bir adet proton içermektedir.

Çekirdek proton ve nötronlardan oluşmaktadır. Çekirdekteki protonların sayısı kimyasal elementi belirler. Eşit sayıda protona sahip olan fakat nötron sayıları farklı olan çekirdekler izotoplar olarak adlandırılır. Tek sayıda protonlara ve/veya nötronlara sahip olan çekirdekler ölçülebilir bir manyetik momente sahiptir. Çekirdeği çevreleyen manyetik alan bir bobinin etrafındaki manyetik alanla mukayese edilebilir düzeydedir.

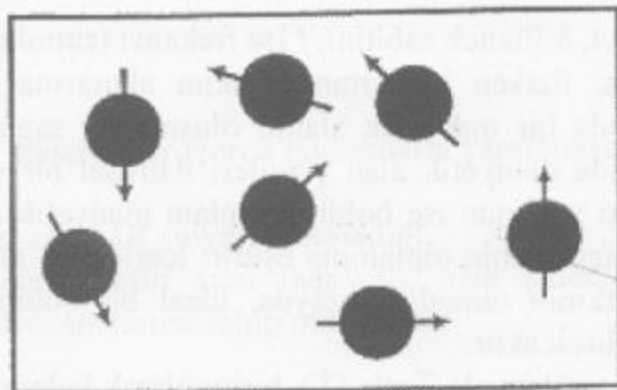
Bir bobinde olduğu gibi manyetik alan elektrik yüklü parçacıkların (elektronlar) dairesel hareketi ile oluşmaktadır. Çekirdek uzayda kendi eksenini etrafında dönen küçük bir top gibi algılanabilir. Bu modele göre çekirdeğin yüklü parçacıkları, dönmeden dolayı dairesel bir akıma da neden olur.

Bir çekirdeğin açısal momentumu dönü olarak tanımlanmıştır. Bir proton $\frac{1}{2}\hbar$ düzeyinde bir dönüye sahiptir. Burada;

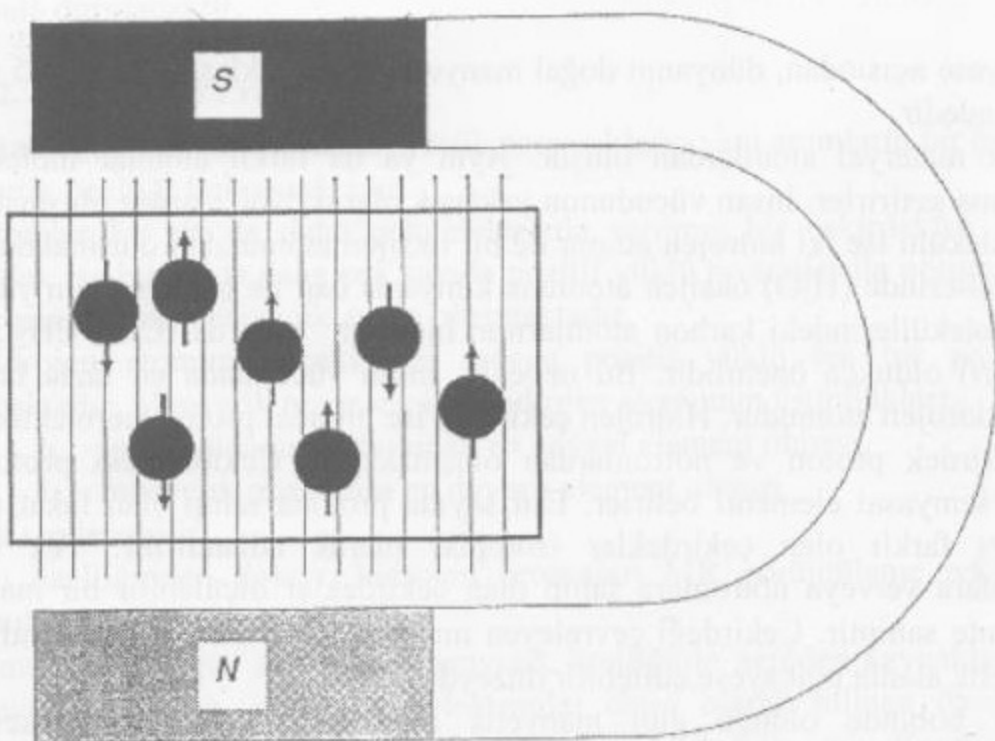
$$\hbar = h / 2\pi \quad (7.3)$$

olarak tanımlanmaktadır.

Manyetik alanın bulunmadığı durumlarda hidrojen çekirdeğinin dönü vektörleri gelişigüzel bir şekilde farklı yönleri gösterirler. Bundan dolayı, tüm dönü vektörlerinin toplamı cisim üzerinde ölçülebilir, net bir manyetik alan meydana getirmez.



Şekil 7-2 Manyetik olmayan ortamda dönü vektörlerinin konumu



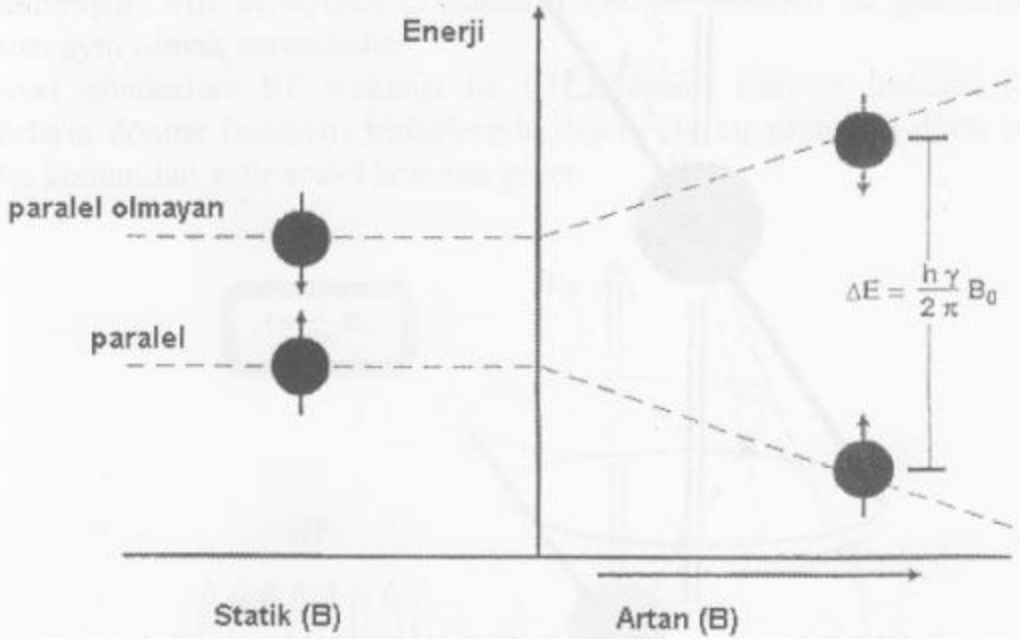
Şekil 7-3 Manyetik ortamda dönü vektörlerinin konumu

Homojen bir manyetik alanda hidrojen çekirdeğinin dönü vektörleri, yani protonlar manyetik alana sadece paralel ya da antiparalel bir şekilde uzanabilir.

Manyetik alana paralel olarak uzanan proton sayısının daha fazla olduğu durumlarda net manyetizma manyetik alanın yönü ile aynı olacaktır.

7.3. Enerji Seviyeleri

Dönü vektörleri manyetik alana antiparalel olarak uzanan protonlar, paralel olarak uzanan protonlara göre biraz daha yüksek enerji seviyesindedir. Bundan dolayı protonlar, paralel durumdan antiparalel duruma geçiş için, iki seviye arasındaki enerji farkı ΔE ile orantılı bir enerjiye ihtiyaç duyarlar.



Şekil 7-4 Paralel ve paralel olmayan dönü vektörleri için enerji seviye çizelgesi

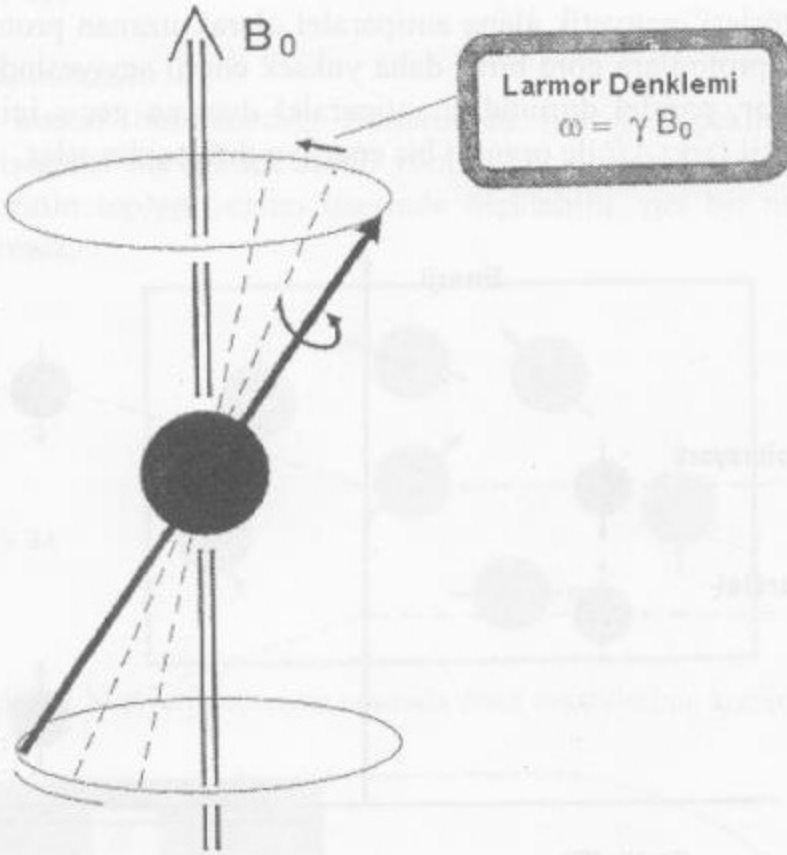
İki seviye arasındaki enerji farkı (ΔE) manyetik alanın şiddeti ile doğru orantılı olarak artar. Manyetik alana paralel veya antiparalel olarak uzanan protonların sayısı Boltzmann ifadesi ile verilmektedir. Burada her iki durumdaki protonların oranı, ΔE enerji farkı ve dolayısıyla uygulanan manyetik alana (B_0) bağlıdır.

$$B_0 = kT$$

B_0 ifadesi sıcaklığa bağlı bir ifadedir. Bu ifadede k , Boltzmann sabitini T ise Kelvin olarak termal enerjinin miktarını belirtmektedir. MR çalışmalarında hastanın vücut ısısı 310°K olarak sabitlenmiştir. Boltzmann ifadesine bakıldığında, antiparalel ve paralel protonların sayıları arasındaki farkın iki enerji seviyesi arasındaki ΔE enerji farkı ve bundan dolayı da B_0 manyetik alanına bağlı olduğu görülmektedir.

7.4. Larmor Frekansı

Dönü vektörler manyetik alana tam olarak paralel ya da antiparalel değildirler. Bu vektörler manyetik alan eksenini ile belirli bir açı yaparlar.



Şekil 7-5 Ana manyetik alanda dönü vektörünün Larmor frekansı

Bununla birlikte, dönü vektörlerin manyetik alan üzerine paralel ya da antiparalel olarak yansımış değerini deneysel olarak ölçmek mümkündür. Manyetik alanla aynı yönde ve paralel olan bileşenler "longitudinal", manyetik alana dik olan bileşenler de "transversal" bileşenler olarak tanımlanırlar. Dönü vektörlerin transversal bileşenlerinin toplam etkisi ihmal edilebilir düzeydedir. Çünkü, protonlar manyetik momentumdan dolayı dünyanın yerçekimi etkisinde hızla dönen toplar gibi manyetik alan içinde hareket ederler. Dönü vektörler çekirdek bölgesinde B_0 manyetik alanı ile orantılı bir frekansta manyetik alan eksenini etrafında dönerler.

$$\omega = \gamma \cdot B_0 \quad f = \frac{\gamma}{2\pi} B_0 \quad \omega = 2\pi f \quad (7.4)$$

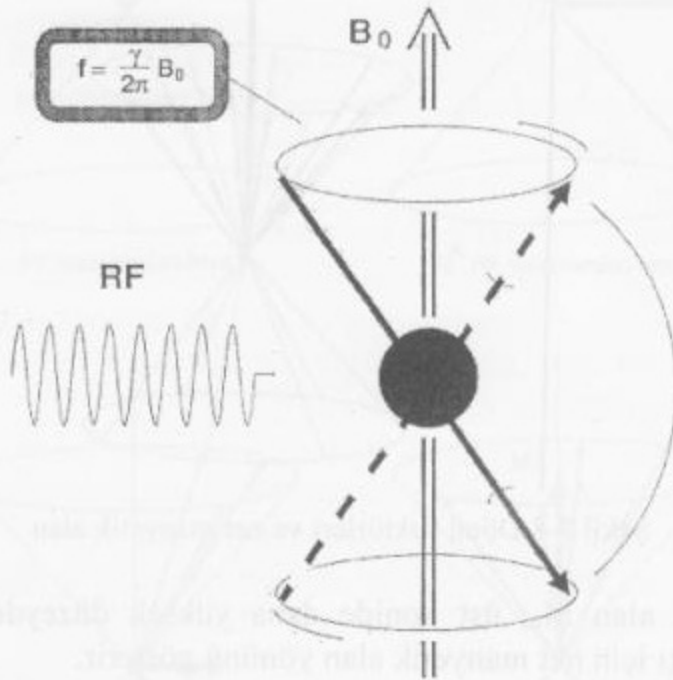
Dönü vektörlerin dönme frekansı Larmor frekansı olarak tanımlanmıştır. Bu ifadede γ orantı sabiti gyromanyetik oran olarak tanımlanmıştır ve çekirdeğin

boyutu ile ilgili özel bir değerdir. Hidrojen atomu için bu değerler aşağıda verilmektedir.

$$\gamma = 2.67522 \cdot 10^8 \frac{1}{sT} \quad f = 42.577 \frac{MHz}{T} B_0 \quad (7.5)$$

1 Tesla değerindeki bir manyetik alanda protonların dönü vektörleri 42.577 MHz değerinde bir frekansla dönerler. MR deneyinde özellikle bu frekans karakteristik MR sinyalini elde etmek amacıyla su dolu bir örneğe uygulanmıştır. MR deneyinde protonların Larmor frekansı ile gönderilen RF frekansı aynı olmak zorundadır.

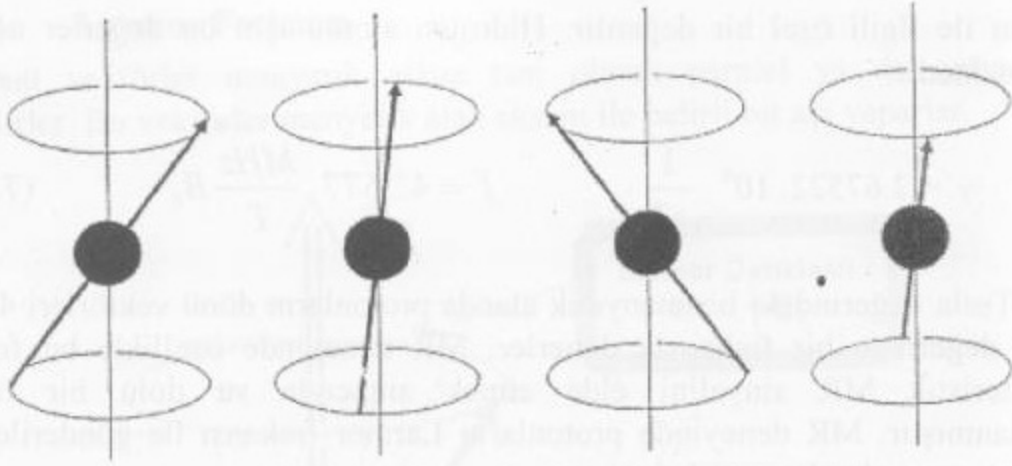
Şayet gönderilen RF frekansı ile (B_1 bileşeni) Larmor frekansı (dönü vektörlerin dönme frekansı) birbirleriyle ilişkili ise bir protonun dönü vektörü paralel konumdan antiparalel konuma geçer.



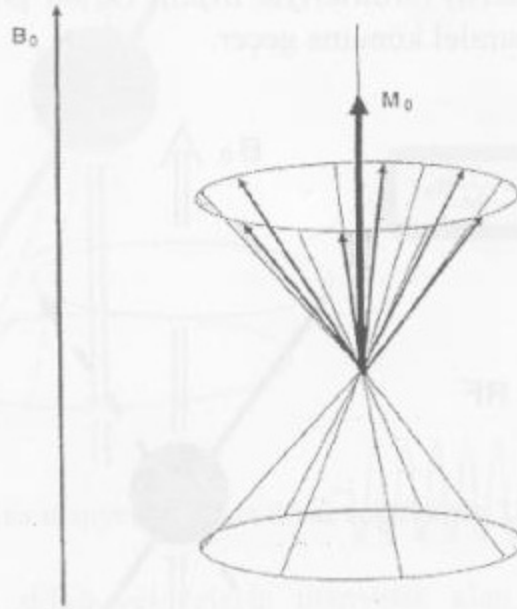
Şekil 7-6 RF alanının etkisinde dönü vektörünün konumu

Bu aşamada RF alanından ΔE kadar bir enerji çekilir. Manyetik alanda dönü vektörlerin faz açıları birbirleriyle ilişkili değildir.

Küçük bir hacimde paralel ve antiparalel konumdaki dönü vektörler iki yüzeyi üzerinde istatistiksel faz açılarından dolayı eşit bir şekilde dağılırlar. Eşit dağılımın doğal bir sonucu olarak dönü vektörlerin transversal bileşenleri birbirlerini yok ederler. Sadece manyetik alan yönündeki bileşenlerin (longitudinal bileşenler) etkisi toplanır.



Şekil 7-7 Manyetik alanda dönü vektörlerinin faz açılarının durumu,



Şekil 7-8 Dönü vektörleri ve net manyetik alan

Net manyetik alan M_0 , üst konide daha yüksek düzeyde paralel proton yoğunluğu olacağı için net manyetik alan yönünü gösterir.

7.5. RF Alanının Etkisi

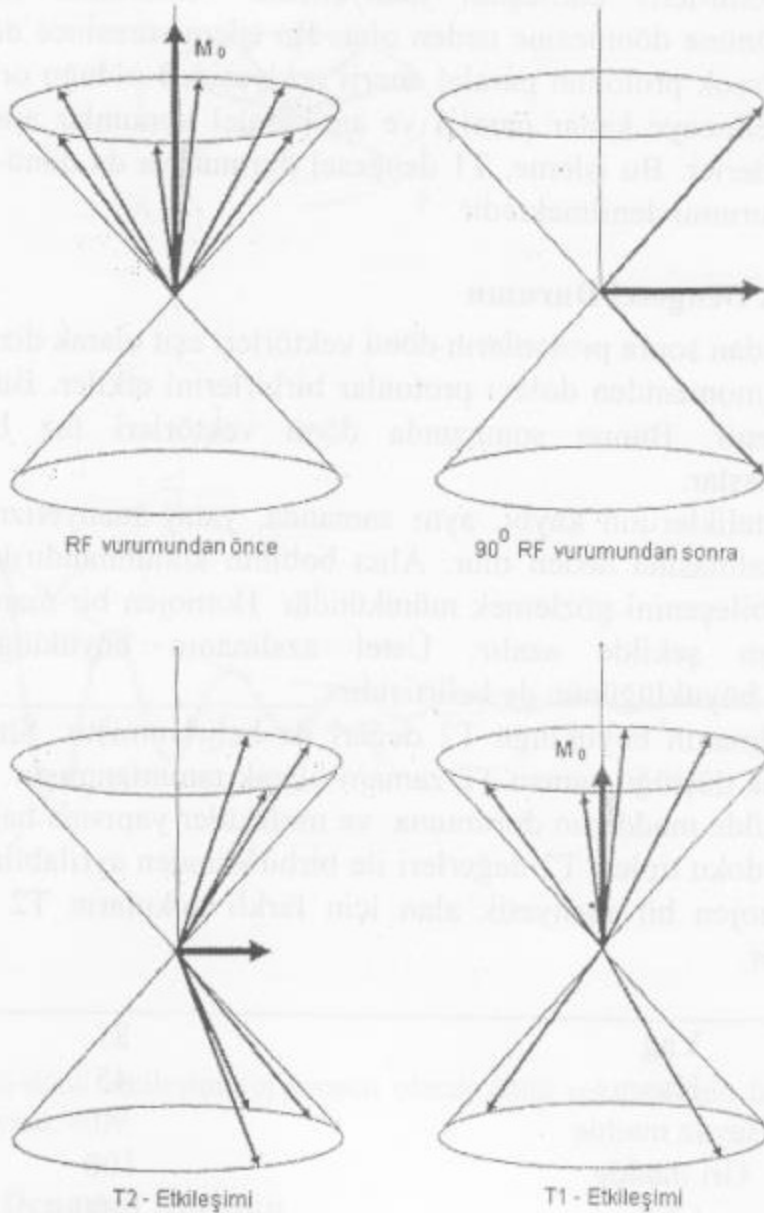
Radyo frekansı nedeniyle oluşan B_1 manyetik alan vektörünün etkisi altında net manyetik alan vektörü M_0 , iki bağımsız hareketi aynı anda gösterir. Net manyetizma vektörü RF'e ait B_1 manyetik alan vektörü etrafında dönerken aynı zamanda B_0 manyetik alanı etrafında da döner. İki hareketin toplam etkisi Şekil 7-9'da gösterilmiştir. Manyetizma vektörünün ucu topun yüzeyi üzerinde spiral bir iz takip eder. Transversal yüzeye doğru olan sapmanın hızı (burada x-y düzlemi) RF alanının şiddeti ya da B_1 vektörünün büyüklüğü ile belirlenmiştir.

Sapmanın derecesi yani *Flip* açısı ise RF alan şiddeti B_1 , RF vurumunun süresi Δt ve gyromanyetik oran γ tarafından belirlenmiştir.

$$\phi = \gamma \cdot B_1 \cdot \Delta t$$

(7.6)

Şayet, RF vurumu manyetizma vektörünü x-y düzlemine saptırırsa bu 90° vurum olarak tanımlanır. RF sinyali kesildiğinde manyetizma vektörü Larmor frekansında x-y düzleminde geri döner ve alıcı bobinlerde MR sinyali oluşturur. 90° vurum ile mukayese edildiğinde RF bobinlerindeki B_1 manyetik vektörü iki katına çıkarılırsa manyetizma vektörü manyetik alanla tamamen ters yönde oluşacaktır. Bu RF vurumu 180° vurum olarak tanımlanmıştır.



Şekil 7-9 RF vurumu öncesi ve sonrası, T1 ve T2 etkileşim süreçlerinde net manyetizma vektörünün konumu

90° vurumdan sonra eşit sayıda protonlar antiparalel ve paralel konumdadırlar. İlave olarak tüm protonların fazları da aynıdır. Bu durum

bileşke manyetizma vektörünün neden x-y düzleminde olduğunu açıklamaktadır.

Belirli bir zaman periyodundan sonra bu uyarılan dönü sistemi orijinal konumuna döner. Manyetizma vektörü tekrar manyetik alanın yönünü gösterir. Bu durum iki birbirinden bağımsız dengesel durumun oluşmasına neden olmaktadır:

- a) Dönü-dönü etkileşimi manyetizma vektörünün x-y bileşeninin azalmasına neden olur. Bu işlem, T2 dengesel durumu ya da dönü-dönü dengesel durumu olarak tanımlanmaktadır.
- b) Dönü-letis etkileşimi manyetizma vektörünün manyetik alan yönüne dönmesine neden olur. Bu işlem süresince dönü vektörleri birçok protonun paralel enerji seviyesinde olduğu orijinal konuma gelinceye kadar paralel ve antiparalel konumlar arasında hareket ederler. Bu işleme, T1 dengesel durumu ya da dönü-letis dengesel durumu denilmektedir.

7.6. T2 Dengesel Durumu

90° vurumdan sonra protonların dönü vektörleri eşit olarak dizilmiştir.

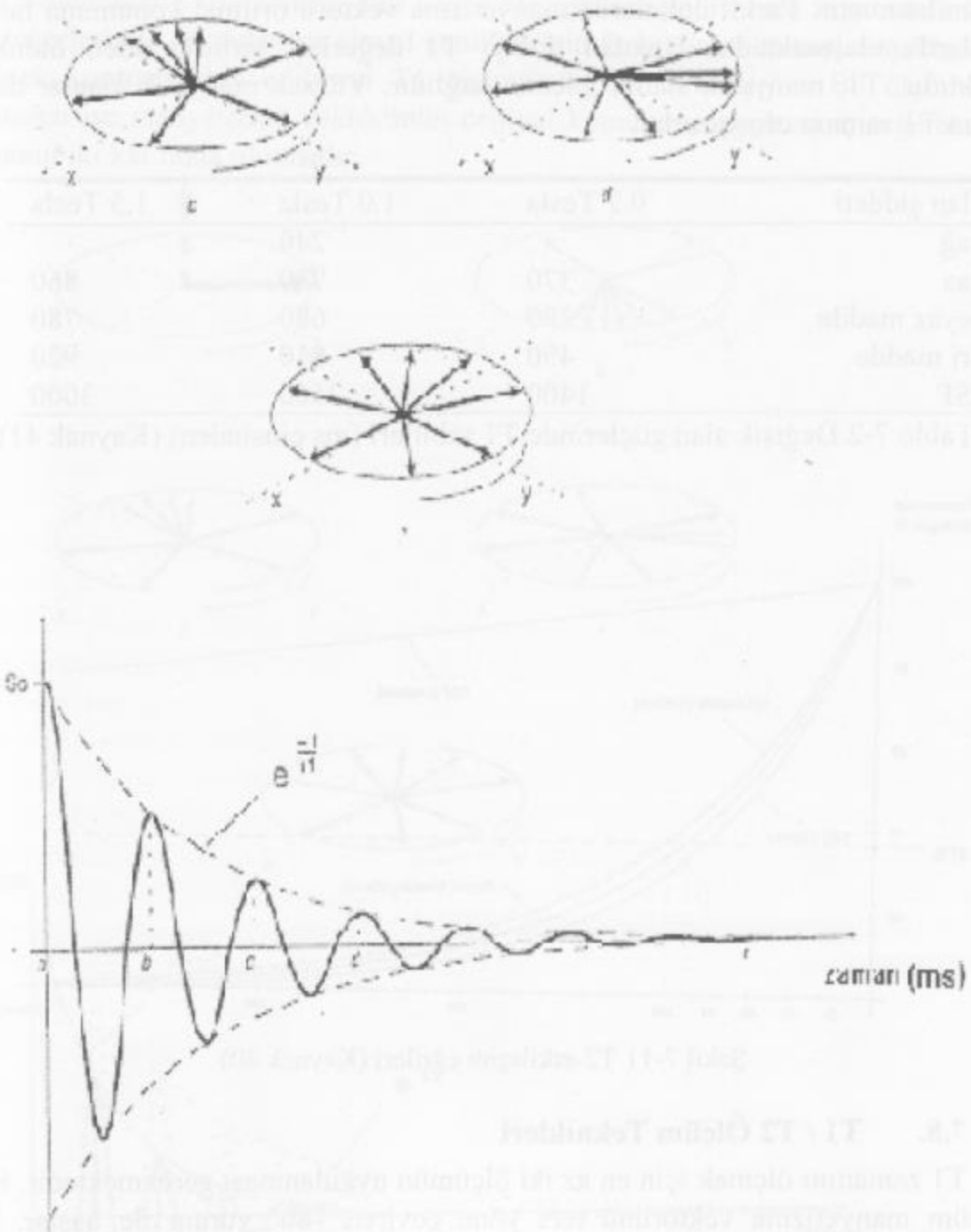
Manyetik momentden dolayı protonlar birbirlerini etkiler. Buna dönü-dönü etkileşimi denir. Bunun sonucunda dönü vektörleri faz birlikteliklerini kaybetmeye başlar.

Faz birlikteliklerinin kaybı, aynı zamanda, yatay manyetizma bileşeninin genliğinin azalmasına neden olur. Alıcı bobinin konumlandırılması ile yatay manyetizma bileşenini gözlemek mümkündür. Homojen bir manyetik alandaki sinyalde aynı şekilde azalır. Üstel azalmanın büyüklüğü dönü-dönü etkileşiminin büyüklüğünün de belirtisidir.

Üstel azalmanın büyüklüğü T2 değeri ile belirlenmiştir. Sinyal genliğinin %37 düzeyine düştüğü zaman T2 zamanı olarak tanımlanmıştır. T2 değeri çok güçlü bir şekilde maddenin durumuna ve moleküler yapısına bağlı olduğundan dolayı farklı doku tipleri T2 değerleri ile birbirlerinden ayrılabilir. Şekil 7-11'de homojen bir manyetik alan için farklı dokuların T2 denge eğrileri görülmektedir.

Yağ	85
Kas	45
Beyaz madde	90
Gri madde	100
CSF	1400

Tablo 7-1- T2 sabitleri (ms cinsinden) (Kaynak 41).



Şekil 7-10 Dönü-dönü etkileşiminin sonucu olarak dönü vektörlerinin faz birlikteliğini kaybetmesi (Kaynak 40)

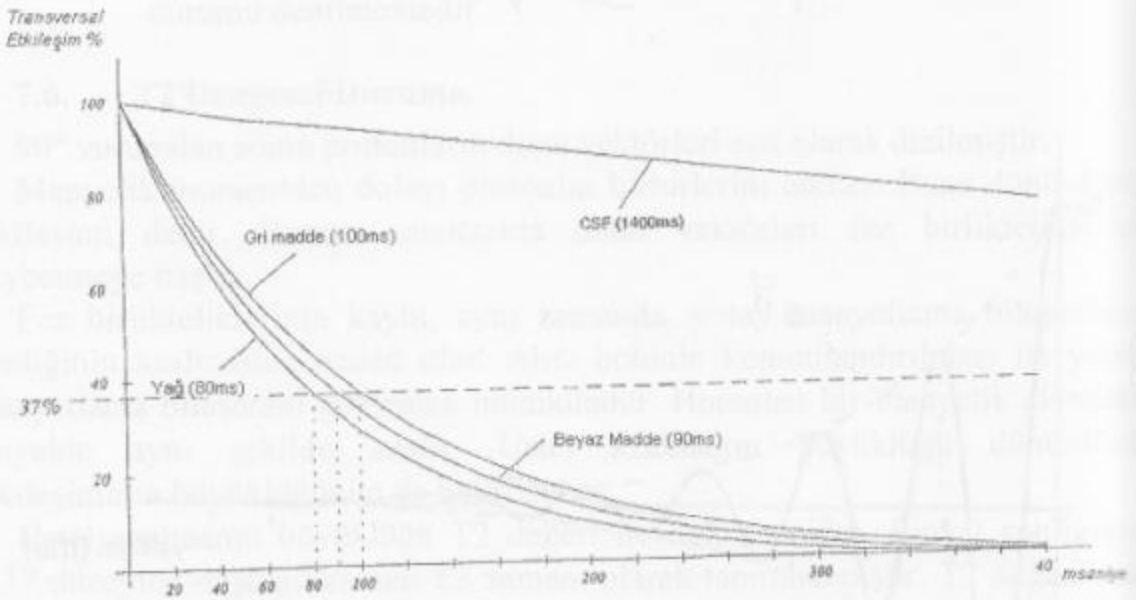
7.7. T1 Dengesel Durumu

Dönü-dönü etkileşimi dönü-letis dengesel durumundan daima daha hızlıdır. Şekil 7-10-b başlangıçta T2 dengesel durumunu daha sonra Şekil 7-10-d'de daha yavaş biten dönü-letis dengesel durumunu göstermektedir. Manyetizma vektörünün dönüşü (T1 dengesel durumu) üstel işlev şeklindedir. Sistem ısısal dengeye kavuşur. Üstel eğri, kapasitörün dolma eğrisine benzer bir şekle

sahiptir. Manyetizma vektörünün %63'lük değere ulaştığı an T1 zamanı olarak tanımlanmıştır. Farklı dokularda manyetizma vektörü orijinal konumuna farklı hızlarda ulaşmaktadır. Bundan dolayı T1 değerleri birbirlerinden oldukça farklıdır. T1, manyetik alanın gücüne bağlıdır. Yüksek manyetik alanlar daha uzun T1 zamanı oluştururlar.

Alan şiddeti	0.2 Tesla	1.0 Tesla	1.5 Tesla
Yağ		240	
Kas	370	730	860
Beyaz madde	390	680	780
Gri madde	490	810	920
CSF	1400	2500	3000

Tablo 7-2 Değişik alan güçlerinde T1 sabitleri (ms cinsinden) (Kaynak 41)



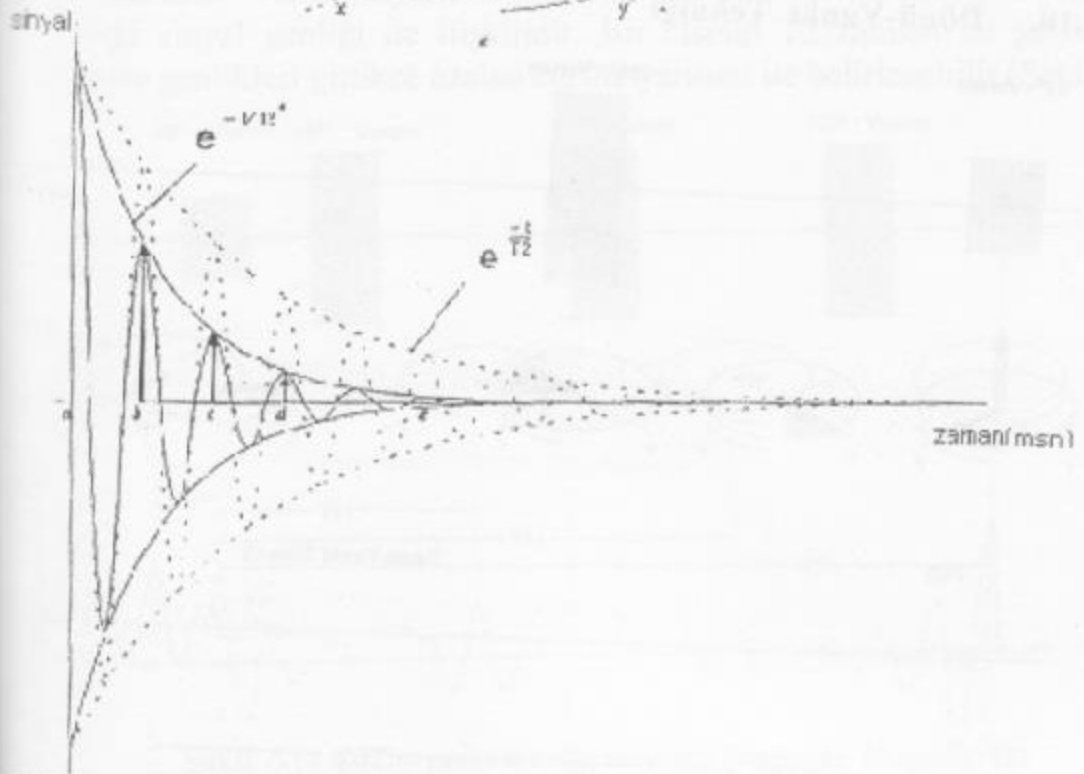
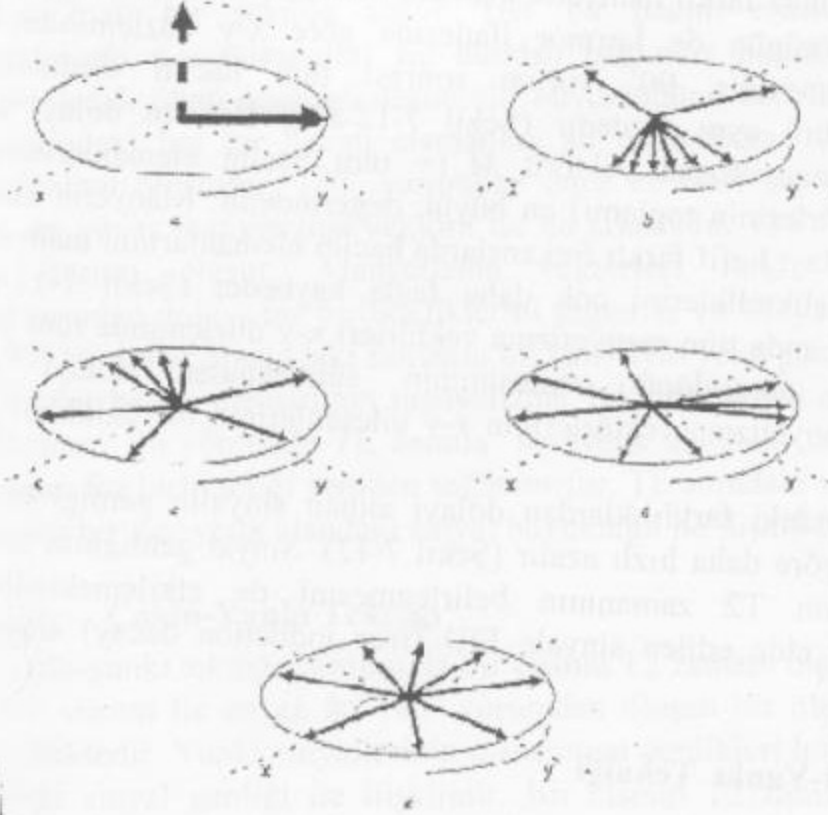
Şekil 7-11 T2-etkileşim eğrileri (Kaynak 40)

7.8. T1 / T2 Ölçüm Teknikleri

T1 zamanını ölçmek için en az iki ölçümün uygulanması gerekmektedir. Her ölçüm manyetizma vektörünü ters yöne çeviren 180° vurum ile başlar. Bu noktadan manyetizma vektörü yavaşça orijinal konumuna doğru hareket eder.

Dengelenme sadece manyetik alan yönünde yer aldığı için (180° vurumdan sonra manyetizma vektörü x-y bileşenine sahip değildir) 90° vurum T1 (ters çevirme zamanı) zamanından sonra uygulanmak zorundadır. 90° vurum manyetizma vektörünün dengelenmiş kısmını x-y düzlemine taşır. Alıcı bobinde ölçülen sinyal genliği x-y düzleminde manyetizma vektörünün büyüklüğü ile orantılıdır. Bu nedenle ölçülen sinyal genliği T1 zamanına (180° ve 90° vurumlar arasındaki zaman) bağlı olarak manyetizma vektörünün dengelenme eğrisi olarak aynı üstel şekli göstermektedir.

T1 ölçümünde kontrast iki katı kadar daha yüksektir. Burada kontrast farklı T1 değerlerinde iki dokunun sinyal genliklerinin farkı olarak tanımlanmaktadır. Yüksek kontrast elde edilmesi T1 ölçümünün bir avantajıdır. Bu ölçümün sakıncası ise manyetizma vektörünün orijinal konumuna geçmesi için gereken zamanın iki kat fazla olmasıdır.



Şekil 7-12 Manyetik alandaki farklılıklar nedeniyle dönü vektörlerindeki değişim ve sinyal genliğinin azalması (Kaynak 40)