# Evren’in İlk Rölativistik Modelleri

- Genel göreliliğe göre momentum ve enerji dağılımı uzay-zamanın özellikle de eğriliğinin geometrik özelliklerini belirlemektedir.
- Bu ilişkinin doğası kesin olarak **genel görelilik alan denklemleri** denilen bir dizi denklem tarafından belirlenmektedir.
- Bu derste bu denklemlerin çözülmesi ya da türetilmesi beklenmemektedir. Ancak **kozmolojik sabit** olarak bilinen bir niceliğin tanıtılması adına denklemlerin nasıl kullanıldığının bilinmesi gerekmektedir.

# Einstein’ın Genel Görelilik Alan Denklemleri

- Einstein tarafından 1916’da ortaya konan denklem şu şekilde verilmektedir;

$$[G_{\mu v}] = \frac{-8\pi G}{c^4}[T_{\mu v}]$$

- Burada $[G_{\mu v}]$ uzay-zamanın eğriliği ve $[T_{\mu v}]$ ise momentum ve enerji dağılımını temsil etmekte olup bu sembollere **tensör** adı verilmektedir.
- Bu nicelikler zaman ve konumla değişebilmektedir.
- Uzayın ve zamanın her noktasında momentum ve enerjinin dağılımı göz önüne alındığında (yani $[T_{\mu v}]$), alan denklemleri pisagor teoreminin sonsuz küçük genellemesi doğrultusunda uzay-zaman geometrisinin detaylı bir tanımını türetmek için mümkün olabilecek geometrik niceliği $[G_{\mu v}]$ belirler.
- 1916 da Einstein bu denklemleri Güneş sistemindeki gezegen hareketlerini araştırmak ve Güneş tarafından Newtonian olmayan sapmayı tahmin etmek için kullanmıştır.

- Einstein 1917 de genel göreliliği sadece Güneş sistemi için değil tüm Evrenin uzay-zaman geometrisini tanımlamak için kullanmıştır.
- Bu çalışmasında, 1916 da yaptığı bir varsayımın kozmoloji için uygun olmadığı fark etmiş ve alan denklemlerine yeni bir terim ilave etmiştir;

$$[G_{\mu v}] + \Lambda[g_{\mu v}] = \frac{-8\pi G}{c^4}[T_{\mu v}]$$

- Burada $\Lambda$ terimi lambda olarak okunmakta olup **kozmolojik sabit** olarak adlandırılmaktadır. $[g_{\mu v}]$ ise diğer bir tensördür.
- $\Lambda$ yeterince küçük olduğu sürece $\Lambda[g_{\mu v}]$ teriminin varlığı, Einstein'ın 1916 da ki çalışmasında elde ettiği sonuçların hiçbirini geçersiz kılmaz, ancak kozmolojik hesaplamalar bağlamında $\Lambda$'nın pozitif bir değeri, uygun şartlarda kütle çekiminin çekme etkisini dengeleyebilecek veya hatta bastırabilecek bir itme eylemini ifade etmektedir.

- Eşitliğin sol tarafı hala uzay ve zamanın eğriliğini tanımlamaktayken sağ tarafı uzay ve zamanın içeriğini belirtmektedir.

- 1917 yılında Evrenin genişlediğine ya da çöktüğüne dair bir kanıt bulunmamaktaydı.
- Dolayısıyla, ilk kozmolojik modeli oluştururken Einstein zamanla her şeyin sabit kaldığı değişmediğini gösteren bir kozmolojik sabit $\Lambda$ için bir değer aramıştır.
- Ayrıca, kozmoloji ilkesinden faydalanarak Evrendeki maddenin ortalama yoğunluğunun (ρ) homojen (yani konumdan bağımsız) ve sabit (yani zamandan bağımsız) olması gerektiğini belirtmiştir.
- p = 0 olduğunu varsayarak basınç olasılığını göz ardı etmiştir.
- $[G_{\mu v}] + \Lambda[g_{\mu v}] = \frac{-8\pi G}{c^4}[T_{\mu v}]$ modifiye edilmiş alan denklemleriyle birlikte bu varsayımları kullanarak, Einstein ilk rölativisttik kozmolojik modeli oluşturmuştur.
- Bu model **Einstein modeli** olarak bilinmektedir.
- Maddenin kütle çekimini ve kozmolojik sabitin itme etkisini dengeleme ihtiyacı, Einstein'ın aşağıdaki ilişkiyi geliştirmesine neden olmuştur;

$$\Lambda = \frac{4\pi G\rho}{c^2}$$

- Einstein modeli genişlemediği için içinde bulunduğumuz Evreni temsil ettiği düşünülmemektedir.
- Aslında, Evrenin genişlediğinin keşfedilmesinden sonra Einstein kullandığı kozmolojik sabiti yaptığı en büyük hatası olarak nitelendirmiştir.
- Bununla birlikte, Einstein modelinin geometrik özellikleri araştırmaya değerdir, çünkü rölativisttik kozmolojinin olağanüstü olasılıklarının bazılarına dair fikir vermektedir.
- Einstein modelinde tanımlanan Evren **statik yani durağandır**, ne genişler ne de daralır.
- Bu model Evrende, uzay sonludur ve $\Lambda^{-3/2}$ ile orantılı bir toplam hacme sahiptir.
- Sonlu olmasına rağmen, Einstein modelindeki uzay sınırsızdır.
- Yani, herhangi bir doğrultuda bir duvara çarpmadan ya da herhangi bir son veya sınır ile karşılaşmadan istenildiği kadar seyahat edilebilir.
- Ancak, düz bir çizgide yeteri kadar uzağa gidilebilirse başlanılan noktaya geri dönülür.
- Bu nasıl mümkün olmaktadır? Düz bir çizgi nasıl kendi üzerine kapanmaktadır?

- Çok basit bir şekilde, burada bahsedilen düz çizgi eğri bir uzayda bulunmaktadır.
- Homojen ve izotropik Einstein modelinde, uzayın eğriliği her yönde ve her yerde aynıdır.
- Ayrıca, bu uniform eğrilik her noktada pozitif bir değere sahiptir.
- Yani, düz bir çizgi, uzunluğu boyunca kendi üzerine düzgün bir şekilde bükülmüş olacaktır.
- Pozitif eğriliğin gerçek değeri kozmolojik sabit $\Lambda$'nın değerine bağlıdır.
- Bunun sonucunda, herhangi bir bölgede olabildiğince düz olan bir çizgi, $\Lambda^{-1/2}$ ile orantılı olan bir mesafeden sonra kendi üzerine kapanmaktadır.
- Şekil, Einstein modelindeki uzay-zaman geometrisiyle ilgili bir fikir vermektedir.

- Eğer Einstein'ın modelinde belirtilen türde bir Evrende bulunuyor olsaydık, ışık modelde belirtilen uzay-zaman güzergâhında seyahat edeceği için, Dünyanın, Güneşin ve Samanyolunun uzak görüntülerini gözleme şansını yakalardık.

**SORU:** Einstein modelinde belirtilen türde bir Evrende bulunuyor olsaydık, kozmolojik sabiti nasıl elde edebilirdik?

**CEVAP:** Geniş ölçekte maddenin ortalama yoğunluğu $\rho$ ölçülerek ve bu değer

$$\Lambda = \frac{4\pi G\rho}{c^2}$$

denkleminde kullanılarak bulunurdu.

- Einstein modelinin önemli bir özelliği uzayın eğriliğinin her yerde pozitif olmasıdır.
- Bu eğrilik, geleneksel olarak bir **eğrilik parametresiyle** (k) gösterilmektedir ve bu parametre +1, 0 ve -1 değerlerini alabilir.
- Einstein modelinde k = +1'dir.
- Eğrilik parametresi Evren modellerinin en önemli önemli karakteristiklerinden bir tanesidir.
- Çünkü modelin geniş ölçekli geometrik özelliklerini kuvvetli bir şekilde etkilemektedir.
- k değeri, uzayın sonlu (k=+1) veya sonsuz (k = 0 veya -1) olup olmadığını hemen belirlemektedir.

- Şekilde gösterildiği üzere, bu parametre ayrıca kozmolojik olarak büyük üçgenlerin iç açıları toplamının $180^o$ den küçük, büyük ya da $180^o$ ye eşit olup olmayacağını, bir çemberin çevresinin yarıçapıyla nasıl ilişkili olduğunu ve uzaydaki paralel çizgilerin paralel devam edip etmeyeceğini de belirler.

- Einstein’ın ilk rölativistik kozmolojik modelini yayınlamasından bir yıl sonra, **de Sitter** tamamen farklı bir Evren modeli önermiştir.
- de Sitter modelinde yine Evren kozmoloji ilkesine göre homojen ve izotropik olarak kabul edilmekte ancak durağan olmadığı belirtilmektedir.
- Modelde maddenin etkisi göz ardı edilmektedir.
- Yani, $\bar{\rho} = 0 \; ve \; \bar{p} = 0$ olduğu varsayılır.
- Dolayısıyla, uzayın geometrik özellikleri yalnızca kozmolojik sabit tarafından belirlenmektedir.
- Modern bir bakış açısıyla, de Sitter modelinde k = 0 ve pozitif bir $\Lambda$ değeri uzayın hızlanan bir oranda ve hiç sonlanmayacak bir şekilde genişlemesi anlamına gelmektedir.
- Buna göre, gerçekte Evrende ne kadar az madde olursa olsun, bulunduğu bölgedeki genişleme ile birlikte taşınır ve bu da gözlenebilir kırmızıya kaymalara neden olurdu.
- Ne yazık ki, bu yorum de Sitter’ın keşfinin yapıldığı zamanlarda net değildi.
- Dolayısıyla yapılan keşfin, bir diğer durağan Evren modeli olduğuna inanılıyordu ki, bu modelde sabit ışınım kaynaklarının yeterince uzak oldukları sürece kırmızıya kaymış tayf çizgilerine sahip olacakları gibi garip bir özellik benimsenmişti.

- Uzayın genişlemesini matematiksel olarak tanımlamanın bir yolu uzay boyunca genişleyebilen ya da daralabilen bir koordinat gridi kullanmaktır.
- Bu koordinatlar **co-moving** ya da **comoving** (birlikte hareket eden) olarak isimlendirilmektedir.
- Comoving koordinatların kullanılması nedeniyle, genişleyen bir uzaydaki tipik noktalar birbirlerinden uzaklaşmalarına rağmen değişmeyen koordinatlara sahiptir.
- Koordinatların kendileri uzayın genişlemesini tanımlamadıkları için başka bir parametrenin daha tanımlanması gerekmektedir.
- R(t) olarak verilen bu parametre **ölçek çarpanı** olarak bilinmektedir.
- Parantez içindeki t ölçek çarpanının zamana göre değişebildiğini göstermektedir.
- Yani, Evren genişlerken veya daralırken ölçek faktörü de artmakta ya da azalmaktadır.

- Eğer R(t) zamanla artarsa, $t_2$ zamanındaki değeri $t_1$ zamanındaki değerinden daha büyüktür.
- Sabit koordinatlara sahip iki nokta arasındaki fiziksel uzaklık ta artacaktır çünkü “genişleme” bunun olması gerektiğini belirtmektedir.
- Eğer R(t) zamanla azalırsa, tipik noktalar arasındaki fiziksel uzaklık azalır ve uzayın daraldığı söylenebilir.

- Comoving koordinatların kullanılması, birbirinden oldukça küçük bir miktarda ayrılmış iki nokta arasındaki koordinat farkları dx, dy ve dz arasındaki herhangi bir doğrudan ilişkiyi ve bu noktalar arasındaki gerçek fiziksel mesafeyi, ds, ortadan kaldırmaktadır.
- t zamanında, iki nokta arasındaki gerçek uzaklığı bulmak için ölçek çarpanı R(t) göz önünde bulundurulmalıdır.
- Sıfır eğriliğe sahip genişleyen düz bir uzay için bu durum aşağıdaki şekilde ifade edilebilir;

$$(ds)^2 = [R(t)]^2 \, [\,(dx)^2 + (dy)^2 + (dz)^2\,]$$

Şekil 5.19

- Bu denklem, iki nokta arasındaki koordinat uzaklığı dr ise t zamanında aralarındaki fiziksel uzaklığın;

$$ds = R(t)\, dr$$

olduğunu ifade etmektedir. Burada;

$$dr = (\,(dx)^2 + (dy)^2 + (dz)^2\,)^{1/2}$$

- de Sitter modelinde, alan denklemleri ölçek faktörünün zamanla üstel olarak arttığını göstermektedir (Şekil 5.19).

- Eğrinin dikliği, kozmolojik sabitin değeri tarafından belirlenen bir oranda artmaktadır. Çünkü, genişlemeyi $\Lambda$ yönlendirmektedir.
- Bu durum de Sitter modelinde şu şekilde gösterilebilir;

$$R \propto e^{Ht}$$

$$H = \sqrt{\frac{\Lambda c^2}{3}}$$

- Ayrıca, bu modelde kullanılan H sabitinin Hubble sabitine eşit olduğu ortaya çıkmıştır.
- Dolayısıyla, Evrendeki maddenin yoğunluğu göz ardı edilseydi, ve de Sitter'ın modeli (doğru yorumlandığında) kozmik genişlemeye ilişkin iyi bir açıklama getirseydi, o zaman uzak galaksilerin gözlemlerinden H değeri ortaya çıkartılabilir, böylece de $\Lambda$ kozmolojik sabitinin değeri belirlenebilirdi.

SORU: Einstein modelinde ölçek katsayısından bahsedilmemiştir. Ancak eğer bahsedilecek olsaydı bu katsayının davranışıyla ilgili ne söylenebilirdi?

CEVAP: Einstein modelinde ölçek katsayısı R sabittir. Dolayısıyla, R – t grafiği yatay bir çizgi olacaktır.

# Friedmann-Robertson-Walker Evren Modelleri

- Friedmann, homojen ve izotropik olarak maddeyle dolu olan Evrende ölçek katsayısı R(t)’nin evrimini elde edecek denklemleri oluşturmuştur.
- Bu denklemler, Einstein ve de Sitter modellerinin genel görelilik denklemleri ve kozmoloji ilkesi ile tutarlı genişleyen ve daralan modellerin çok daha geniş bir sınıfının özel durumları olduğunu göstermiştir.
- Ancak, Friedmann bu dönüm noktasının farkına varamamıştır.
- Sonrasında Robertson ve Walker ayrı ayrı bu modelleri tanımlamanın ve genel özelliklerini sağlamanın gelişmiş yollarını buldular.
- Friedmann-Robertson-Walker (FRW) modellerinden herhangi birinde uzay-zamanın geometrik özellikleri, koordinatları sonsuz küçük miktarlar olan dx, dy ve dz ile farklılık gösteren ve merkezden $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$ uzaklığında bulunan iki olayın uzay-zaman ayrımı, ds, için tek bir ifadeden çıkarılabilir;

$$(ds^2) = \frac{[R(t)]^2}{\left(1 + \frac{kr^2}{4}\right)^2} \; [(\mathrm{dx})^2 + (\mathrm{dy})^2 + (\mathrm{dz})^2] - \mathrm{c}^2(\mathrm{dt})^2$$

- Bu denklem, **Robertson-Walker metriği** olarak bilinen bir formdur.

- Bu denklemle ilgili bilinmesi gereken 3 şey vardır.
    - İlki, bu denklem, düz bir uzay-zaman geometrik özelliklerinin tam bir açıklaması olan $(ds^2) = [(\mathrm{dx})^2 + (\mathrm{dy})^2 + (\mathrm{dz})^2] - \mathrm{c}^2(\mathrm{dt})^2$ denkleminin genelleştirilmiş halidir.
    - İkincisi, -1, 0, +1 değerleri alan ve eğriliği karakterize etmekte kullanılan eğrilik parametresi k'yı içermektedir.
    - Üçüncüsü ise, genişleme ve daralmayı zamanın bir fonksiyonu olarak tanımlayan R(t) ölçek katsayısını içermektedir.

- Yukarıda verilen genelleştirilmiş denklem tüm FRW modelleri uygular, ama herhangi özel bir model üzerinde çalışmak için k değerini ve kesin bir R(t) formunu belirlemek gerekmektedir.

- Basınçtan bağımsız ($p = 0$) bir yoğunluğa ($\rho$) sahip madde ile uniform olarak doldurulmuş Evrende, R(t)'nin formu Friedmann denklemleri olarak bilinen karışık bir denklemin çözülmesiyle elde edilebilir.

- Bu önemli denklem R değeri, R'nin değişim oranı, k eğrilik parametresi, $\rho$ kozmik yoğunluk ve $\Lambda$ kozmolojik sabit ile ilişkilidir ve aşağıdaki şekilde formüle edilmektedir;

$$\dot{R}^2 = \frac{8\pi G R^2}{3}\left(\rho + \frac{\Lambda c^2}{8\pi G}\right) - kc^2$$

- Denklemde verilen k ve $\Lambda$ değerlerine göre R(t)'nin davranışı elde edilebilmektedir.

- Bunlar Şekilde şematik olarak gösterilmiştir. Her bir R-t grafiği farklı k eğrilik parametresi ve $\Lambda$ kozmolojik sabite karşılık gelmektedir.
- Her bir değer seti için grafik, basınçtan bağımsız madde ile uniform olarak doldurulmuş homojen ve izotropik bir Evrende uzaysal genişleme veya daralmanın gelişimini göstermektedir.
- Örneğin, $\Lambda < 0$ ile gösterilen kolon kozmolojik sabitin sıfırdan küçük olduğu tüm durumları içermektedir. Bu kolunda bulunan üstteki grafik k = +1'e, ortadaki grafik k = 0'a ve en alttaki grafik ise k = -1'e karşılık gelmektedir.

- Bu üç durumda, grafiklerde $t = 0$ için R değeri 0’dır.
- Sonrasında bir maksimum değere yükselir ve sonlu bir zaman sonra 0’a azalır.
- Diğer bir deyişle, tüm bu modeller genişleyen, maksimum genişlemeye ulaşan ve sonrasında tekrar daralan sonlu bir yaşam süresine sahip bir Evreni tanımlamaktadır.
- Yalnızca $k = +1$ olduğu durumda uzay sonlu bir toplam hacme sahiptir.
- Diğer tüm modellerde olduğu gibi bu durumda bile model homojen ve izotropiktir.
- Dolayısıyla, uzayın ne bir merkezi, ne sınırı ne de kenarı vardır.

- Şekildeki ikinci kolon özellikle ilgi çekicidir.
- Kaybolan bir kozmolojik sabite ($\Lambda = 0$) sahip modelleri kapsamaktadır.
- Son yıllara kadar en gerçekçi Evren modelleri olduklarına inanılmaktaydı.
- k = +1 olan ilk modelde uzayın sonlu olduğu belirtilmektedir ve ilgili R-t grafiği sonlu bir yaşam süresi olan bir genişleme ve daralma döngüsünü göstermektedir.
- t = 0 zamanında R = 0 ile başlayan bu ve diğer modellerde, genişlemenin ilk kısmı **big bang** olarak bilinmektedir.
- Döngünün diğer ucunda yer alan çökme ise **büyük çöküş** olarak bilinmektedir.
- Büyük çöküş, Evrenin ölümü için muhtemel bir senaryo olarak varsayılmakta olup, Evrenin son derece yüksek yoğunluk ve sıcaklığa sahip bir duruma çökeceği düşünülmektedir.
- $\Lambda = 0$ modellerinin hepsi big bang ile başlamakta fakat sadece k = +1 modeli büyük çöküş ile bitmektedir.
- Bu model **kapalı model** olarak bilinmektedir.

- $\Lambda = 0$ durumundaki diğer iki modelde, uzay sonsuzdur ve sonsuza kadar genişlemektedir.
- k = -1 modeli **açık model** olarak adlandırılmaktadır.
- Bu modelde, t sonsuza yaklaştıkça, R-t ilişkisi R $\propto t$ gibi basit bir forma yaklaşır.
- k = 0 modeli açık ve kapalı modeller arasındaki özel bir durumu temsil etmekte ve **kritik model** olarak bilinmektedir.
- Bu durumda, R ve t arasındaki ilişki t'nin tüm değerleri için R $\propto t^{2/3}$ şeklini alır.
- Kritik model aynı zamanda Einstein-de Sitter modeli olarak ta bilinmektedir.

- Şekilde geri kalan tüm grafiklerde kozmolojik sabit sıfırdan büyüktür $(\Lambda > 0)$.
- k = +1 için tartışılması gereken oldukça farklı birçok durum bulunurken, diğer durumlar tek bir kolonda toplanmıştır.
- **NOT:** Şekilde $\Lambda_E$ kozmolojik sabitin $\Lambda$ özel bir değerini temsil etmektedir. ρ yoğunluğuna sahip durağan bir Evren için;

$$\Lambda_E = \frac{4\pi G\rho}{c^2}$$

**SORU:** Einstein modelini karakterize eden R-t grafiğini şekilde yerleştiriniz. İlgili $\Lambda$ ve k değerlerini yazınız.

**CEVAP:** Einstein modeli için R-t grafiği, şekilde $\Lambda > 0$ modelinde orta kolonda üstte gösterildiği gibi düz bir çizgidir. Şekle göre k = +1 ve $\Lambda = \Lambda_E$ ile uyumludur.

**SORU:** Şekilde de Sitter modeliyle ilişkili herhangi bir grafik görüyor musunuz?

**CEVAP:** de Sitter modeline ait R-t ilişkisi şekilde verilmemiştir. Ancak, $\Lambda > 0$ ve k = 0 modelinin bir **kısıtlayıcı durumu** olarak de Sitter modeli şekilde sunulmaktadır.

- $\Lambda > 0$ modeli, k = +1 ve $\Lambda > 0$ ancak $\Lambda < \Lambda_E$ olduğu durum (yani $0 < \Lambda < \Lambda_E$ ) incelenecek olursa, grafikte 2 olası davranış olduğu görülmektedir.
- İlki, t = 0 zamanında R’nin sıfırdan başladığı, maksimum bir değere kadar arttığı ve sonlu bir zamanda tekrar sıfıra azaldığı durumdur.
- İki eğriden üstte olan eğrinin gösterdiği alternatif davranışta ise Big Bang’a eşdeğer bir olay olmadığı için t = 0 olarak belirlenecek belirgin bir zamanın bulunmadığı durum gösterilmektedir.
- Bu model daha ziyade, sonsuza kadar uzanan bir daralma döneminin "sıçrama" (ölçek katsayısı minimum değerine ulaştığında) ve ardından sonsuza kadar uzanan bir genişleme dönemine yol açtığı sonsuz yaşlı bir modeldir.
- İçinde bulunduğumuz Evren, k = +1 ve $0 < \Lambda < \Lambda_E$ olan bir FRW modeliyle temsil ediliyorsa Evrenin gerçek davranışı (üstteki ya da alttaki eğriyi takip edip etmediği) uzak geçmişindeki davranışıyla elde edilebilir. Eğer Evren gerçekten Big Bang ile başladıysa, üstteki eğri göz ardı edilecektir.

- İncelenecek diğer bir durumda, kozmoloji sabiti modelin statik olmasına izin veren belirli bir $\Lambda_E$ değerine sahiptir.
- Daha önce belirtildiği üzere, Einstein modelinin statik davranışı bu durumda izin verilen davranış modlarından biridir ve bu, R-t grafiğinde düz bir çizginin varlığıyla gösterilmiştir.
- Ancak, şeklin bu kısmında diğer iki eğri tarafından gösterildiği gibi başka türden davranışlar da olasıdır.
- Alttaki eğri tarafından gösterilen olasılık, R'nin sıfırdan başladığı ve arttığı, gitgide Einstein modeli tarafından belirlenen değere yaklaştığı bir olasılıktır.
- Üstteki eğriyle gösterilen diğer olasılık ise statik duruma çok yakın başlayan, ancak bir miktar genişleyen bir Evreni tanımlamaktadır.
- Başlangıçta olan bu türden en ufak genişleme bile, sonuçta genişleyen bir evrenin, genişleme etkili olmadan önce sonsuz bir geçmişe sahip olmasını mümkün kılarak, sürekli bir genişlemeye götürecektir.
- Bu son davranış biçimi **Eddington-Lemaitre modelini** karakterize etmektedir.

- Bununla birlikte, Lemaitre özellikle $\Lambda > \Lambda_E$ ve k = +1 olan Evren modelinin üzerinde durmuştur ki bu model **Lemaitre modeli** olarak bilinmektedir.
- Model, t = 0 anında R'nin sıfırdan başlayarak bir sınırı olmadan arttığı ve uzayın herhangi bir zamanda sınırlı bir toplam hacminin olduğu homojen ve izotropik bir Evreni tanımlamaktadır.
- Ayrıca modelde genişleme, R-t grafiğinin neredeyse düz olduğu bir sahte-statik evreden geçer; böylece hiç olmazsa gerçekten statik olmasa da, en azından bir süre statik bir evrene benzeyebilir.
- Lemaitre, bu modelin son evrelerinin gözlemlediğimiz genişleyen Evreni temsil edebileceğini savunmuştur.
- Bu Evrende ara evrenin yıldızların ve galaksilerin oluşması için gerekli zamanı sağladığı ve erken, oldukça sıkıştırılmış dönemin, Evrende kesinlikle var olan bazı çekirdeklerin ortaya çıkmasını açıklayacak kadar sıcak ve yoğun olacağı belirtilmektedir.
- Lemaitre'nin önerilerinin detayları günümüzde kabul görmese de ilk çekirdeklerin erken Evrenin sıcak ve yoğun bir evresinde oluştuğu fikri benimsenmektedir.
- Dolayısıyla, Lemaitre, terim olarak kullanmasa bile Big Bang'in önemini tanımasıyla bilinmektedir.

- Birçok farklı kaynaktan elde edilen bir dizi kanıt k = 0 ve $\Lambda > 0$ olduğunu göstermektedir.
- Bu modelin gerçek Evreni en iyi temsil eden model olduğu düşünülebilir. R-t grafiğinden görüleceği üzere, bu model Big Bang ile başlayan ve sonsuza kadar genişlemeye devam eden uniform bir Evreni tanımlamaktadır.
- Genişleme bazı evrelerde yavaşlamaya uğramakta ancak Lemaitre modelinde olduğu gibi sahte-statik bir davranış göstermemektedir.
- Yavaşlamadan sonra genişleme hızı sürekli olarak artmaktadır ve bu nedenle model **hızlanan model** (accelerating model) olarak adlandırılmaktadır.
- Şekildeki son grafik $\Lambda > 0$ ve k = -1 ile uyumludur.
- Bu türden uniform bir Evrende, uzay sonsuzdur ve negatif eğrilikli bir geometriye sahiptir.
- Bu model Big Bang ile başlayan bir diğer modeldir. Hızlanan modelde olduğu gibi, ölçek katsayısı sıfırdan başlayarak büyür, büyümesini geçici olarak yavaşlatır ve sonra tekrar hızlanır.

**SORU:** FRW modelleri bağlamında, hangi $\Lambda$ ve k değerleri veya parametre aralıkları aşağıdaki karakteristiklere sahip Evrenlerle uyumludur?

(a) Ne homojen ne de izotropik olan bir Evren
(b) Bir Big Bang olasılığı olmayan Evren
(c) Bir Big Bang olasılığı olan fakat en azından başka bir olasılığı daha olan Evren ($\rho > 0$ olarak varsayın)
(d) Uzayda Big Bang'in olduğu belirli bir noktanın olaydan çok sonra hala elde edilebildiği bir Evren
(e) Herhangi bir zamanda, uzayın geniş ölçekli geometrik özelliklerinin düz bir geometriye sahip üç boyutlu bir uzayın geometrik özellikleriyle aynı olduğu bir Evren
(f) Uzayın sonlu bir hacme sahip olduğu ve başlangıçta paralelken sonunda birbiriyle birleşen düz çizgilerin olduğu bir Evren
(g) Big Bang'in olduğu ancak uzayın hacminin ilk zamanlardan beri sonsuz olduğu bir Evren.