

Graviti menentukan dinamik pada skala besar, kerana julatnya yang tak terhingga, dan kerana ia hanya mempunyai satu 'cas' (iaitu jisim) tanpa yang negatif yang boleh meneutralkan kesannya. Jadi kosmologi, atau evolusi alam secara umum, secara kasarnya ditentukan oleh graviti.

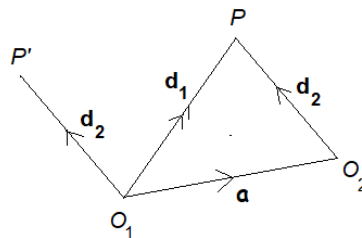
12.1 Prinsip Kosmologi

Satu andaian yang dibuat tentang semesta ialah ia isotrop. Secara kasar atau purata, perihalan yang sama diberikan bebas terhadap arah yang dilihat. Ini ditunjukkan oleh taburan jirim dan sumber radio. Sinaran mikrogelombang latar belakang semesta juga didapati isotrop $\sim 0.1\%$ pada skala sudut $1'$ hingga 180° .

Prinsip Kopernikus mengatakan bahawa kita tidak berada di kedudukan istimewa dalam semesta. Prinsip Kopernikus bersama keisotropan bermakna semesta itu homogen.

Kerelatifan am pada prinsipnya mampu menggambarkan kosmologi apa-apa taburan jirim. Bersama-sama, kehomogenan dan keisotropan membolehkan kita memanjangkan Prinsip Kopernikus kepada Prinsip Kosmologi. Prinsip Kosmologi menyatakan bahawa semesta adalah isotrop dan homogen untuk semua pencerap asas. Pencerap asas adalah pemerhati yang pegun terhadap substratum, iaitu pelecekan semua galaksi dan jasad-jasad lain menjadi seakan cecair yang seragam. Semua kedudukan spatial di alam semesta pada asasnya adalah setara.

12.2 Hukum Hubble



Jika pencerap O_1 melihat P yang jaraknya $\mathbf{d}_1$ daripadanya bergerak dengan halaju $\mathbf{v}_1 = \mathbf{v}_1(\mathbf{d}_1, t)$, dan O_2 yang berjarak $\mathbf{d}_2$ melihatnya dengan halaju $\mathbf{v}_2(\mathbf{d}_2, t)$, daripada kehomogenan semesta, dan semestinya berbentuk serupa. Misalnya,

$$\mathbf{v}_1(\mathbf{d}_2, t) = \mathbf{v}_2(\mathbf{d}_2, t).$$

Maka,

$$\mathbf{v}_1(\mathbf{d}_1 - \mathbf{a}, t) = \mathbf{v}_2(\mathbf{d}_1 - \mathbf{a}, t).$$

Tapi,

$$\mathbf{v}_2(\mathbf{d}_2, t) = \mathbf{v}_1(\mathbf{d}_1, t) - \mathbf{v}_1(\mathbf{a}, t)$$

atau

$$\mathbf{v}_2(\mathbf{d}_1 - \mathbf{a}, t) = \mathbf{v}_1(\mathbf{d}_1, t) - \mathbf{v}_1(\mathbf{a}, t).$$

Jadi,

$$\mathbf{v}_1(\mathbf{d}_1 - \mathbf{a}, t) = \mathbf{v}_1(\mathbf{d}_1, t) - \mathbf{v}_1(\mathbf{a}, t).$$

Maka ini menunjukkan bahawa $\mathbf{v}$ adalah fungsi linear terhadap $\mathbf{d}$. Bolehlah ditulis

$$\mathbf{v}(\mathbf{d}, t) = \mathbf{V}(t) \mathbf{d}$$

di mana $\mathbf{V}$ merupakan suatu tensor yang bebas daripada $\mathbf{d}$, yakni,

$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \beta_{11}(t) & \beta_{12}(t) & \beta_{13}(t) \\ \beta_{21}(t) & \beta_{22}(t) & \beta_{23}(t) \\ \beta_{31}(t) & \beta_{32}(t) & \beta_{33}(t) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}.$$

Komponen antisimetrian mewakili putaran, dan boleh dipilih kordinat di mana putaran ini sifar,

$$\beta_{ik}(t) = 0, \quad i \neq k.$$

Oleh kerana keisotropian semesta,

$$\beta_{11}(t) = \beta_{22}(t) = \beta_{33}(t)$$

yang kita wakikan dengan scalar $H(t)$, memberikan hukum Hubble,

$$\mathbf{v} = H(t) \mathbf{d}$$

di mana $H(t)$ ialah pekali Hubble.

Hukum Hubble ini ialah akibat daripada kehomogenan dan keisotropian semesta.

12.2 Letusan Besar

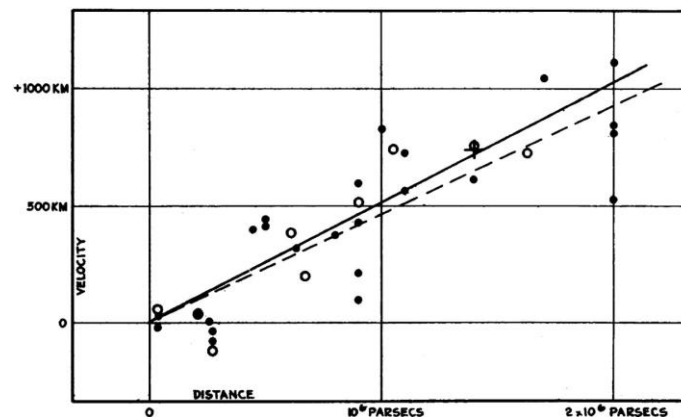
Anjakan merah dalam sinaran dari objek-objek astronomi boleh ditafsirkan sebagai akibat kesan Doppler ke atas pemancar yang mengundur relatif pemerhati. Ukuran anjakan merah z objek-objek astronomi lawan jaraknya d dari bumi menyokong hukum Hubble,

$$z = \frac{H_0}{c} d$$

di mana H_0 ialah pemalar Hubble,

$$H_0 = 75 \pm 25 \text{ km/s/Mpc.}$$

Ini menyorankan semesta yang mengembang.



Rajah halaju unduran terhadap jarak bagi galaksi, diberi oleh Hubble [Hubble, PNAS 15 (1929) 168]

Objek yang lebih jauh bermakna juga yang lebih tua, oleh kerana masa yang diambil cahayanya ke bumi. Hubungan jarak-halaju unduran menyetujui kembangan, di mana halaju unduran semakin bertambah terhadap masa.

Jika semesta berkembang, maka ia bermakna pada waktu dahulu, semesta pernah berada dalam keadaan padat. Inilah asas teori letusan besar. Semesta 'bermula' dalam keadaan yang padat dan kemudian mengembang.

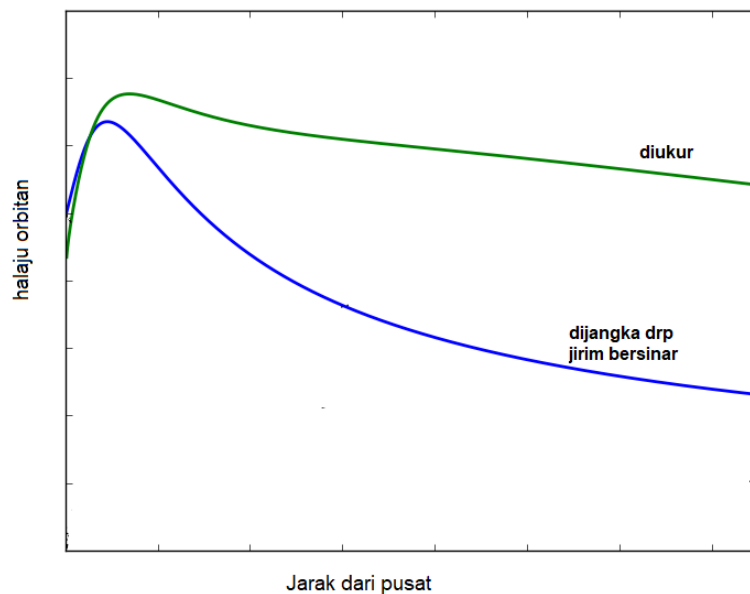
Untuk menerangkan kelimpahan unsur-unsur kimia itu hasil kosmologi, disarankan pada awalnya, semesta panas dan padat untuk membolehkan proses nukleosintesisan hidrogen asal. Semesta kemudiannya mengembang dan menyejuk.

Keadaan panas di masa lampau membawa kepada ramalan sinaran mikrogelombang latar kosmos. Pada masa panas, atom terion dan berkeseimbangan dengan sinaran (foton). Apabila keadaan cukup sejuk, keseimbangan ini pecah, dan sinaran nyahganding daripada jirim. Setelah sejuk, sinar ini dalam rantau mikrogelombang. Ia dikesan dan diukur, dengan suhu (jasad hitam) 2.7K dengan kehomogenan tinggi dan naikturun kecil. Ini penyokong kuat model letusan besar panas bagi kosmos.

Pengembangan alam semesta yang diperhatikan adalah hasil semulajadi (yang hampir tidak dapat dielakkan) daripada mana-mana model kosmologi homogen dan isotrop berdasarkan kerelatifan am. Dengan sendirinya sahaja, pengembangan Hubble tidak mencukupi untuk apa secara amnya dirujuk sebagai model kosmologi Letusan Besar. Keperluan nukleosintesis, dan sokongan mikrogelombang kosmos latar (CMB) menjadi tunggak fenomena Letusan Besar.

12.3 Jirim gelap dan tenaga gelap

Putaran galaksi berlingkar boleh memberikan kita kiraan jisim dalam galaksi tersebut, menurut hukum mekanik biasa. Juga, jisimnya boleh dianggarkan daripada luminositi bintang-bintang di dalamnya, menurut teori najam biasa. Didapati jisim kiraan dinamik dan jisim berluminositi tidak setuju, bahkan yang pertama itu lebih besar niainya daripada yang kedua.



Lengkung putaran galaksi, menunjukkan masalah jirim gelap.

Jirim gelap diukur daripada keluk putaran galaksi berlingkar ini, pelensaian gravitian olehnya, dan penggugusan galaksi, dan ia menyumbang lebihkurang 27% jirim semesta, pada $2.7 \times 10^{-27} \text{ kg m}^{-3}$.

Penemuan tenaga gelap pula membabitkan ukuran kembangan semesta. Tenaga gelap diukur daripada pecutan dalam kembangan semesta, daripada ukuran supernova jenis IA, yang punyai luminositi puncak yang konsisten, yang memberikan ukuran jarak yang agak tepat. Ia menyumbang lebihkurang 68% jirim semesta, pada $6.7 \times 10^{-27} \text{ kg m}^{-3}$.

Juga, seperti dibincangkan dalam bab graviti, persamaan Einstein untuk kerelatifan am membenarkan terma pemalar kosmologi Λ yang bukan sifar, akibat daripada kamiran. Ini memberi kesan seperti tenaga intrinsik vakum.

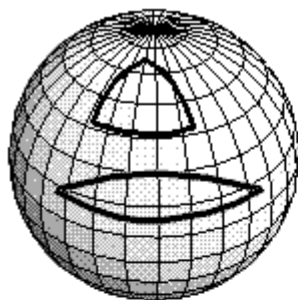
12.4 Pemerihalalan semesta

Geometri semesta diberikan oleh persamaan medan graviti Einstein. Penyelesaiannya bergantung kepada kandungan jirim dan tenaga.

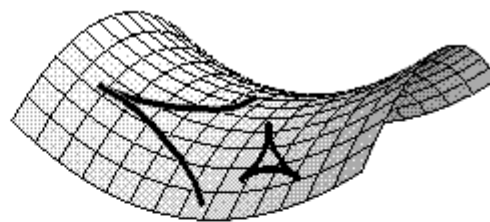
Kehomogenan dan keisotropian semesta membolehkan kita perolehi geometri keseluruhan dan evolusi semesta dari segi dua parameter kosmologi yang menyumbang kepada kelengkungan ruang Metriknya berbentuk

$$ds^2 = dt^2 - R^2(t) \left[\frac{dr^2}{1-kr^2} + r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2) \right],$$

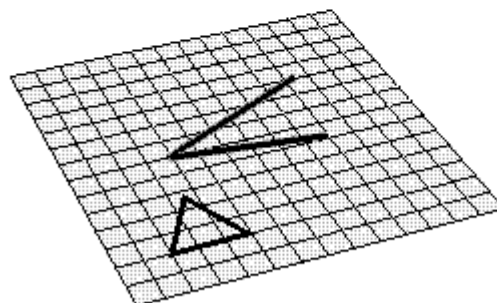
(dengan mengambil $c = 1$). k mendefinisikan kelengkungan semesta. Dengan menskala semula koordinat jejarian, kita boleh pilih pemalar kelengkungan k untuk ambil nilai diskret $+1$, -1 , atau 0 sepadan dengan geometri tertutup, terbuka atau datar. Kelengkungan sifar bersepadanan dengan permukaan datar, kelengkungan positif seperti permukaan sfera, dan kelengkungan negatif seperti permukaan pelana.



Semesta berkelengkungan positif. Garisan berpisah dengan sudut mengecil. Sudut-sudut tigasegi berhasiltambah lebih daripada 180°



Semesta berkelengkungan negatif. Garisan berpisah dengan sudut membesar. Sudut-sudut tigasegi berhasiltambah kurang daripada 180°



Semesta datar. Garisan berpisah dengan sudut malar. Sudut-sudut tigasegi berhasiltambah 180°

Faktor skala kosmologi $R(t)$ menentukan jarak wajar di antara koordinat segerak. Anjakan merah kosmologi, akibat langsung daripada pengembangan Hubble, ditentukan oleh $R(t)$. Pemerhati tempatan yang mengesan cahaya dari pemancar jauh melihat anjakan merah dalam frekuensi, yang diberikan

$$z \equiv \frac{v_1 - v_2}{v_2} \approx u_{12}.$$

v_1 adalah frekuensi pemancar, sementara v_2 frekuensi dicerap, dan u_{12} ialah halaju relatif di antara pemancar dan pemerhati. Anggaran kepada u_{12} hanya sah pada skala kecil, yang bukan berkerelatifan. Untuk isyarat cahaya, metrik Robertson-Walker dan bahawa

$$ds^2 = 0$$

memberikan

$$v_{12} = \dot{R} \delta R = \frac{\dot{R}}{R} \delta t = \frac{\delta R}{R} = \frac{R_2 - R_1}{R_1}$$

di mana δr dan δt masing-masing adalah pemisahan jejarian dan masa di antara pemancar dan pemerhati. Kerana $R \delta R$ atau δt ialah jarak fizikan d , ini memberikan hukum Hubble, $\mathbf{v} = H\mathbf{d}$.

Daripada definisi anjakan merah, kita perolehi,

$$1 + z = \frac{v_1}{v_2} = \frac{R_2}{R_1}.$$

Faktor skala $R(t)$ memparameterkan kembangan semesta. Ia konsisten dengan fungsi di mana

$$H(t) = \frac{1}{R} \frac{dR}{dt}.$$

Gantikan untuk $\mathbf{v}(t)$,

$$\frac{d}{dt} \mathbf{d} = H(t) \mathbf{d},$$

dan, dengan $\mathbf{d} = d\hat{\mathbf{n}}$,

$$\frac{d}{dt} d = H(t) d.$$

Maka

$$\frac{d}{dt} d = \frac{1}{R} \frac{dR}{dt} d,$$

iaitu

$$\int \frac{d(d)}{d} = \int \frac{dR}{R},$$

ataupun

$$\ln d + \text{pemalar} = \ln R + \text{pemalar}.$$

Ini boleh ditulis

$$\ln \frac{d}{d_0} = \ln \frac{R}{R_0}$$

yang bermakna

$$d\hat{\mathbf{n}} = \frac{R}{R_0} d_0 \hat{\mathbf{n}}$$

ataupun

$$\mathbf{d} = \frac{R(t)}{R_0} \mathbf{d}_0$$

yang menunjukkan makna faktor skala itu.

12.5 Model kosmologi

Persamaan medan Einstein untuk graviti,

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = 8\pi G_N T_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu}.$$

G_N adalah pemalar gravitian Newtonan. Mengandaikan kandungan semesta adalah cecair sempurna, diberikan

$$T_{\mu\nu} = -p g_{\mu\nu} + (p + \rho) u_\mu u_\nu$$

di mana p ialah tekanan isotropan, ρ ketumpatan tenaga, dan $u = (1,0,0,0)$ adalah vektor halaju cecair isotrop dalam kordinat segerak, kita perolehi persamaan Friedmann,

$$H^2 \equiv \left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 = \frac{8\pi G_N \rho}{3} - \frac{k}{R^2} + \frac{\Lambda}{3}$$

dan

$$\frac{\ddot{R}}{R} = \frac{\Lambda}{3} - \frac{4\pi G_N}{3}(\rho + 3p).$$

Daripada dua persamaan ini boleh diperolehi,

$$\dot{\rho} = -3H(\rho + p).$$

Ini juga boleh didapati daripada keabadian tenaga

$$T^{\mu\nu}_{;\mu} = 0,$$

atau/dan juga sebagai akibat hukum pertama termodinamik. Ini boleh ditulis

$$\dot{\rho} = -3(1 + w)\rho \frac{\dot{R}}{R}.$$

di mana $w = p/\rho$, suatu pemalar.

Ketumpatan genting, iaitu bila $k = 0$ untuk keadaan $L = 0$,

$$\rho_c \equiv \frac{3H^2}{8\pi G_N},$$

bernilai $1.88 \times 10^{-26} h^2 \text{ kg m}^{-3}$, di mana parameter Hubble terskala, $h \equiv 0.01 H \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. Dalam lain perkataan, $H^{-1} = 9.778 h^{-1} \text{ Gtahun} = 2998 h^{-1} \text{ Mpc}$. Parameter ketumpatan kosmos, Ω_{tot} , didefinisi

$$\Omega_{\text{tot}} = \frac{\rho}{\rho_c}$$

memberikan persamaan Friedmann dalam bentuk

$$\frac{k}{R^2} = H^2(\Omega_{\text{tot}} - 1).$$

Perhatikan semesta tertutup bagi $\Omega_{\text{tot}} > 1$, $k = +1$, terbuka bagi $\Omega_{\text{tot}} < 1$, $k = -1$, dan datar bagi $\Omega_{\text{tot}} = 1$, $k = 0$.

Kalau dilihat persamaan Friedmann tanpa pemalar kosmologi,

$$\frac{k}{R^2} = \frac{8\pi G_N \rho}{3} - \left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2,$$

yang menjelaskan kembangan atau kecutan semesta yang diperihalkan oleh nilai k .

Ada sumbangan berlainan kepada ketumpatan. Kita boleh tulis, untuk masa sekarang,

$$\frac{k}{R_0^2} = H_0^2(\Omega_m + \Omega_r + \Omega_v - 1),$$

di mana Ω_m ialah parameter ketumpatan jirim takbertekan sekarang, Ω_r ialah parameter ketumpatan zarah berkerelatifan sekarang, dan Ω_v ialah parameter ketumpatan vakum sekarang.

Dalam model Letusan Besar lazim, semesta boleh diperihalkan oleh samada dominasi oleh jirim atau oleh sinaran. Juga perlu dibenarkan dominasi oleh pemalar kosmologi atau apa-apa jirim gelap.

Persamaan untuk $\dot{\rho}$ boleh dikamirkan, memberikan

$$\rho \propto R^{-3(1+w)}.$$

Ini persamaan keadaan am yang bergantung kepada pemalar w . Bagi $w \neq 0$, ini boleh dimasukkan ke dalam persamaan Friedmann untuk memberikan

$$R(t) \propto t^{2/[3(1+w)]}.$$

Dalam semesta panas dan padat, sinaran (atau zarah-zarah berkerelatifan) mendominasi, dan $w = 1/3$.

$$R(t) \propto t^{1/2}$$

dan

$$H = \frac{1}{2t}.$$

Bagi semesta yang didominasi jirim, gas bitekanan ($w = 0$) memberikan $\rho \propto R^{-3}$ dan, jika $k = 0$,

$$R(t) \propto t^{2/3}$$

dan

$$H = \frac{2}{3t}.$$

Bagi semesta yang didominasi tenaga vakum, V_0 , ia terjelma sebagai pemalar kosmologi $\Lambda = 8\pi G_N V_0$. Dalam case ini, $w = -1$, dan persamaan Friedmann memberikan semesta yang mengembang secara eksponen,

$$R(t) \propto e^{(\sqrt{\Lambda/3})t}.$$

Kehadiran tenaga vakum boleh membawa kepada perubahan drastik dalam telatah semesta.

Model kosmologi piawai, Λ CDM (model jirim gelap sejuk dengan pemalar kosmologi Λ), ialah model utama dalam kosmologi moden dan yang paling berjaya setakat ini dalam menjelaskan pemerhatian astronomi, termasuk gerakan galaksi dan corak latar belakang mikrogelombang kosmos, walaupun, asal-usul tenaga gelap dan jirim gelap masih menjadi misteri. Ia berasaskan kerelatifan am dan merangkumi komponen utama berikut:

1. Pemalar Kosmologi (Λ) – mewakili tenaga gelap yang menyebabkan pengembangan alam semesta semakin pantas.
2. Jirim Gelap Sejuk (CDM) – jirim yang tidak bersalingtindak dengan cahaya tetapi bersalingtindak menerusi graviti. Jirim gelap dipilih sejuk kerana ia menjelaskan pembentukan struktur dari skala kecil ke besar secara hierarki, sejajar dengan pemerhatian. Bagi jirim gelap panas, pergerakan lajunya akan menghapuskan benih ketumpatan awal yang diperlukan untuk pembentukan galaksi.
3. Jirim Biasa (Baryon) – atom dan zarah yang membentuk bintang, planet, dan kehidupan.
4. Sinaran – termasuk foton (cahaya) dan neutrino.
5. Teori Letusan Besar – alam semesta bermula dari keadaan yang sangat panas dan padat sebelum berkembang.

12.5 Fasa-fasa kosmologi

Kita terangkan fasa-fasa utama berikut dalam model Λ CDM ini.

Pengembangan semesta menunjukkan kepada keadaan awal yang padat. Diandaikan ada kesingularan permulaan, dan kemudiannya semesta mengembang. Ini di rujuk sebagai Letusan Besar.

Alam semesta bermula dalam keadaan yang sangat panas dan padat. Fenomena graviti kuantum berlaku di sini jika ada. Ini dikatakan zaman Planck, iaitu 0 hingga $\sim 10^{-43}$ saat (masa Planck, yang mengaitkan pemalar kuantum dan pemalar graviti) selepas Letusan Besar.

Fasa ini berkait ketumpatan tenaga yang melampau. Ia dikaitkan dengan suhu 10^{32} K, iaitu suhu Planck: parameter berunit suhu yang membabitkan pemalar Planck. Suhu Planck ini,

$$T_P = \frac{m_P c^2}{k_B},$$

iaitu tenaga kerelatifan jisim Planck, dibahagi pemalar Boltzmann, dengan jisim Planck,

$$m_P = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}},$$

lalah skala tenaga di mana graviti dan mekanik kuantum menjadi sama penting.

Pada fasa ini, kemungkinan semua daya asas (graviti, keelektromagnetan, nuklear kuat dan nuklear lemah) bersatu sebagai satu daya tunggal. Zarah wujud sebagai naikturun kuantum dalam ruangmasa. Graviti kuantum mendominasi: kita perlukan teori graviti kuantum seperti teori supertangsi atau graviti kuantum gelung. Naikkturun kuantum ruangmasa berlaku – ada busa ruangmasa.

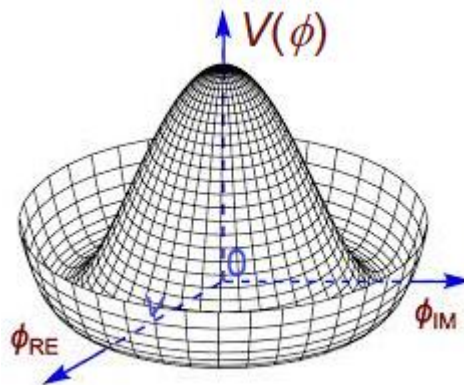
Era GUT (Teori Penyatuan Agung) berlaku selepas tamatnya era graviti kuantum pada masa Planck. Dalam tempoh ini, antara 10^{-44} saat hingga 10^{-36} saat selepas Letusan Besar, alam berada dalam fasa yang sangat lampau dan masih belum difahami sepenuhnya (GUT belum difahami sepenuhnya). Daya graviti terpisah, tetapi tiga daya lain (elektromagnet, kuat, lemah) masih bersatu dalam satu daya GUT. Naikturun tenaga dan medan skalar yang ada mula memainkan peranan besar.

Dalam era ini, mungkin berlaku perubahan fasa dalam vakum kuantum, yang menyebabkan pemecahan simetri spontan. Medan skalar mula mengisi semesta dengan tenaga vakum. Tenaga vakum ini boleh menyebabkan inflasi.

Fasa inflasi kosmos bermula 10^{-36} saat selepas Letusan Besar. Ia diakibatkan oleh suatu medan tenaga tertentu disebut inflaton. Medan skalar ini mungkin hasil daripada pecahan simetri daya asas. Contoh, medan topi Meksico

$$V(\phi) = \lambda(\phi^2 - v^2)^2$$

dengan ϕ sebagai medan inflaton. Pada suhu atau tenaga tinggi, medan ini menduduki $\phi = 0$, menyebabkan keadaan tenaga vakum tinggi (secara relatif). Ini merupakan keadaan simetri penuh yang metastabil bagi ϕ . Apabila alam semesta mula mengembang dan menyejuk ($E \sim 1/\lambda \sim 1/R$) dan inflasi teretus.



Keupayaan topi Meksiko. Pada tenaga tinggi, keadaan $\phi = 0$ yang bersimetri penuh boleh diduduki.

Pada tenaga rendah, keadaan dengan V rendah dicari. V terendah bila $(\phi^2 - v^2) = 0$. Secara relatif, keadaan $\phi = 0$ punyai tenaga lebih besar berbanding keadaan $(\phi^2 - v^2) = 0$.

Medan inflaton lambat meluncur menuruni keupayaan. Ini disebut golekkan perlahan. Ketika ini, tenaga vakum yang hampir tetap bertindak sebagai tekanan negatif (atau tenaga gelap sementara), menyebabkan ruang mengembang secara eksponenan,

$$R(t) \propto e^{(\sqrt{8\pi G_N V_0/3})t}$$

seperti di atas. Inilah fasa inflasi, di mana alam semesta membesar lebih 50-60 e-lipat dalam tempoh sangat pendek. Keupayaan pada $\phi = 0$ menyebabkan tenaga vakum tinggi.

Kembangan inflasi, atau penggelembungan, ini dapat menyelesaikan beberapa masalah dalam kosmologi. Ia dapat menerangkan kerataan semesta seperti yang dilihat, dan kenapa kurangnya ada ekakutub magnet daripada cacat topologi semesta. Ia juga dapat menyelesaikan masalah ufuk, iaitu persoalan bagaimana semesta begitu homogen (misalnya, dalam taburan mikrogelombang latar) walaupun bahagian-bahagiannya (terutama yang jauh) tidak sepatutnya sempat berhubung antara satu sama lain semenjak permulaan masa.

Apabila $\phi = v$, ϕ berhenti berubah, dan tenaga bertukar menjadi jirim seperti dalam pecahan simetri spontan. Inflasi 50-60 e -lipat diperlukan untuk penyelesaian masalah kerataan, ekakutub magnet dan ufuk, jadi inflasi dianggarkan berakhir sekitar 10^{-32} saat selepas Letusan Besar.

Apabila inflasi berakhir, tenaga medan inflaton mereput menjadi zarah-zarah unsur. Alam semesta kembali dipenuhi dengan jirim dan sinaran. Zarah-zarah yang dihasilkan mengalami perlanggaran dan menghasilkan plasma panas. Tenaga dari medan inflaton bertukar menjadi haba, meningkatkan suhu alam semesta. Inilah fasa pemanasan semula.

Semesta terus mengembang dan suhu terus turun. Secara anggaran, suhu ini boleh dikira dari ketumpatan tenaga pada akhir inflasi. Pemanasan semula dianggap selesai bila kadar reputan inflaton Γ_ϕ menjadi kira-kira sama dengan kadar pengembangan alam. Pada kala itu, pemalar Hubble,

$$H_{\text{reh}} \sim \Gamma_\phi.$$

Persamaan Friedmann dengan unit Planck semulajadi,

$$H^2 = \frac{8\pi G_N}{3} \rho.$$

Bagi semesta didominasi sinaran, mengira darjah kebebasan boson dan fermion, dan seperti hukum Stefan, ketumpatan tenaga

$$\rho = \frac{\pi^2}{30} g_* T^4,$$

di mana g_* adalah bilangan darjah kebebasan berkesan, memberikan

$$H^2 = \frac{8\pi G_N}{3} \left(\frac{\pi^2}{30} g_* T^4 \right).$$

Jadi, suhu pada pemanasan semula, setelah digantikan G_N dengan ungkapan untuk jisim Planck M_{Pl} dalam unit semulajadi,

$$T_{\text{reh}} \approx \left(\frac{90}{\pi^2 g_*} \right)^{1/4} \sqrt{\Gamma_\phi M_{\text{Pl}}}.$$

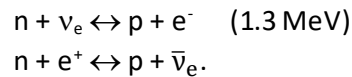
Menganggarkan $g_* \sim 100$, dan bergantung kepada andaian bagi nilai Γ_ϕ , $T_{\text{reh}} \sim 10^{15} - 10^{23}$ K.

Setelah pemanasan semula, alam semesta dipenuhi oleh lepton (elektron, neutrino, dan sepsis lagi berat), dan plasma kuark-gluon, di mana kuark bebas bersama gluon tanpa terikat menjadi hadron, pada suhu berkaitan. Zaman kuark ini berlaku sehingga $T \sim 10^{12}$ K atau $kT \sim 150$ MeV, apabila berlakunya perubahan fasa QCD daripada plasma kuark-gluon kepada gas hadron. Menggunakan hubungan di antara H dan T daripada persamaan Friedmann dan ungkapan untuk ketumpatan tenaga sinaran, dan menggunakan $H = 1/(2t)$ bagi era sinaran, akhirnya zaman kuark ialah pada $t = 10^{-6}$ saat setelah Letusan Besar.

Kemudian, zaman hadron dan lepton berlaku. Kuark mengalami pengurungan, membentuk proton dan neutron. Antizarah (antiproton, antineutron) turut terbentuk daripada antiquark. Wujud neutron, antineutron, proton, antiproton, lepton dan foton dalam keseimbangan termodinamik.

yyZarah dan antizarah musnahabis di antara mereka yang berjiran. Untuk semester yang berisi zarah, iaitu berlakunya asimetri baryon, perlulah bilangan baryon dicanggahi. Ini berlaku bila simetri C dan CP dicanggahi, dan keseimbangan terma terputus. Begitu juga yang berlaku di antara elektron dan positron, untuk menghasilkan kelebihan zarah ke atas antizarah. Perhatikan bagi keseimbangan cas, bilangan p yang tersisa sama dengan bilangan e^- yang tersisa.

Semesta berkembang dan menyejuk lagi. Jirim berbentuk plasma – kebanyakannya ion dan elektron. Sinaran masih mendominasi, $R(t) \propto t^{1/2}$. Seketika sebelum $t = 1$ s, kita ada keseimbangan salingtindak lemah, dalam kata



Nisbah bilangan neutron per proton diberikan faktor Boltzmann bagi beza tenaga proses n ke p (iaitu beza tenaga),

$$\frac{n_n}{n_p} = e^{-\frac{(m_n - m_p)c^2}{kT}}.$$

Pada suhu 10^{11} K misalnya, $n_n/n_p = 0.86$. Apa yang menghalang semua neutron berubah menjadi proton? Daripada fizik salingtindak lemah, skala masa bagi proses berkenaan ialah

$$t_W \approx \left(\frac{T}{10^{10}}\right)^{-5} \text{ saat.}$$

t_W ini adalah masa di antara salingtindak per baryon. Ini diberikan oleh jejak bebas min baryon dibahagi halaju cahaya, iaitu $1/(\sigma_W n c)$, di mana ketumpatan bilangan baryon, $n \propto R^{-3} \propto T^3$, dan keratan rentas daya lemah, $\sigma_W \approx g_W^2 \hbar^4 (kT)^{-2} \propto T^2$, memberikan $t_W \propto T^{-5}$ itu. (Pekali perkadaran didapati daripada pengiraan tepat.)

Umur semesta adalah

$$t = \left(\frac{T}{10^{10}}\right)^{-2} \text{ saat.}$$

Proses berhenti bila $t_W = t$. Ini ditunjukkan berikut ini. Jika dn ialah bilangan kali suatu baryon bersalingtindak dalam masa dt , maka $dn = dt/t_W$. Tapi $t = T^{-2}$ saat, bila T dalam unit 10^{10} K. Maka

$$dt = -2T^{-3} dT$$

dan dengan itu

$$dn = -2T^2 dT.$$

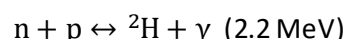
Bilangan salingtindak semenjak bila $T = T_1$,

$$n = -2 \int_{T_1}^{T_{\text{sekarang}}} T^2 dt = \frac{2}{3} (T_1^3 - T_{\text{sekarang}}^3) \approx T_1^3.$$

Keadaan $n < 1$ bermaksud proses telah berhenti semenjak suhu T_1 . Untuk itu, $T_1^3 \approx 1$, iaitu $T_1 \approx 1$, ataupun $T_1 = 10^{10}$ K. Jadi, proses berhenti bila $t_W = t$.

Letakkan $T_1 = 10^{10}$ K dalam persamaan Boltzmann memberikan nisbah $n_n/n_p = 0.22$ pada ketika “pembekuan” nilai nisbah ini.

Proses



ke kiri berhenti bila $T < 10^9$ K. Ini selepas berhentinya proses reputan- β n di atas walaupun tenaganya lebih tinggi, kerana ketumpatan γ yang besar di sebelah kanan.

Nukleosistesis berlaku apabila n dan p stabil. Neutron dan proton bergabung memberikan nukleus unsur-unsur ringan seperti hidrogen, helium dan litium. Ini berlangsung sehingga $t =$ beberapa minit. Maka wujud plasma – nukleus bogel, elektron, dan sinaran yang bersalingtindak dengan zarah-zarah bercas ini. Semesta masih didominasi sinaran.

Semesta mengembang lagi.

Zaman lepton berlaku pada masa 1 – 10 saat di mana

, tetapi kebanyakannya mengalami pemusnahabisan zarah-antizarah dengan jirannya, menyebabkan hanya sedikit jirim biasa yang tersisa. Ini menjadi asas bagi alam semesta moden. Zaman Lepton (1 – 10 saat), di mana elektron dan positron terbentuk dalam jumlah besar tetapi akhirnya mengalami pemusnahabisan zarah-antizarah, meninggalkan lebih kecil elektron, kemudiannya berlaku. Neutrino yang terhasil menerusi daya lemah mula terlepas dan berhenti bersalingtindak dengan jirim lain, membentuk latar belakang neutrino kosmos (CvB). Zaman Lepton ini pada suhu 10^{10} K.

Suhu kini lebih kurang 10^{15} K.

ke tahap yang membolehkan nukleosintesis primordial berlaku. Fasa ini menentukan keadaan awal bagi nukleosintesis Letusan Besar (BBN), iaitu proses yang menghasilkan unsur-unsur ringan seperti hidrogen dan helium, dan mempengaruhi corak mikrogelombang latar belakang kosmos (CMB), yang memberikan petunjuk penting tentang sifat inflasi.

Selepas reheating:

- * Alam semesta menjadi penuh dengan plasma panas zarah dan radiasi.

- * Ia mengembang dan menyejuk, dengan suhu $T \propto \frac{1}{a(t)}$ di mana $a(t)$ ialah faktor skala alam semesta.

3. Pemanasan Semula (berakhir sekitar 10^{-32} saat atau lebih lama)

-

4. Zaman Hadron dan Lepton ($\sim 10^{-6}$ saat selepas Letusan Besar)

- Suhu menurun. Mula-mula, Zaman Kuark ($10^{-32} - 10^{-6}$ saat) berlaku. Suhu $\sim 10^{15}$

5. Nukleosintesis Letusan Besar (~ 1 saat hingga beberapa minit selepas Letusan Besar)

- Alam semesta terus berkembang dan menyejuk. Unsur ringan seperti hidrogen, helium, dan litium mula terbentuk.

6. Zaman Sinaran ($\sim 10,000$ tahun selepas Letusan Besar)

- Tenaga alam semesta didominasi oleh foton dan neutrino.

7. Zaman Jirim ($\sim 10,000$ hingga 9 bilion tahun selepas Letusan Besar)

- Jirim (terutamanya jirim gelap) menjadi dominan dan memacu pembentukan struktur kosmos seperti galaksi dan gugusan galaksi.

7. Nyahgandingan Sinaran-Jirim dan Pembentukan CMB ($\sim 380,000$ tahun selepas Letusan Besar)

- Suhu menurun kepada ~ 3000 K. Elektron bergabung dengan proton untuk membentuk atom neutral, dalam proses rekombinasi. Foton dibebaskan, dan kini dilihat sebagai Latar Mikrogelombang Kosmos (CMB).

8. Zaman Kegelapan ($\sim 380,000$ hingga 150 juta tahun selepas Letusan Besar)

- Tiada sumber cahaya utama kerana bintang pertama belum terbentuk. Hanya CMB.

9. Pengionan semula (~ 150 juta hingga 1 bilion tahun selepas Letusan Besar)

- Generasi pertama bintang dan galaksi mula terbentuk. Cahaya daripada bintang dan galaksi awal mengionkan semula hidrogen neutral, membentuk plasma sekali lagi. Proses ini membolehkan cahaya dari galaksi awal melaluinya tanpa dihamburkan, menjadikan alam semesta lebih telus

PENYAJAK, SAJAKMU

kini kian meningkat di kepalamu

tidak tercapai tanganku tangkapnya

kami tak ingin ia naik lagi

kamu ingin ia naik lagi

kami ingin ia naik lagi

kami tak terkucup penyajak, sajaknya

dan sajakku.

kepada cahaya tampak. Bukti pengionan semula ialah daripada spektrum kuasar di mana pemerhatian garis serapan Lyman- α dalam spektrum kuasar jauh menunjukkan bahawa gas antara galaksi telah diionkan, dan daripada pola kekutuban CMB di mana data dari misi teleskop angkasa WMAP dan Planck menunjukkan kesan pengionan semula terhadap kekutuban sinaran CMB.

10. Zaman Tenaga Gelap (~ 9 bilion tahun selepas Letusan Besar – kini)

- Tenaga gelap mula mendominasi, menyebabkan pengembangan alam semesta semakin cepat.

12.6 Letusan Besar dan inflasi kosmos

Ini

Perihalkan jirim dalam semesta dengan ketumpatan jisim $\rho(t)$. Pertimbangkan kesan graviti ke atas jisim m jarak d dari suatu titik O . Jisim ini merasai graviti daripada jirim dalam sfera berjejari d keliling

O, tetapi tiada kesan graviti daripada jirim di luar kebuk sfera tersebut, menurut teorem Birkhoff. Hukum gerakan Newton dan hukum graviti Newton memberikan,

$$m\ddot{\mathbf{d}} = -\frac{4\pi Gm\rho(t)}{3}\mathbf{d}.$$

Tapi

$$\mathbf{d} = \frac{R(t)}{R_0}\mathbf{d}_0$$

maka

$$\ddot{R} = -\frac{4\pi G\rho(t)}{3}R(t)$$

Oleh kerana $\rho(t) \propto R(t)^{-3}$ iaitu

$$\rho(t) = \rho_0 \frac{R_0^3}{R^3(t)},$$

maka

$$\ddot{R} = -\frac{4\pi G}{3}\rho_0 R_0^3 R^{-2}(t).$$

Persamaan ini memberikan telatah faktor skala. Ia memerihalkan semesta. Perhatikan bahawa penyelesaian statik tidak disokong. Semak bahawa

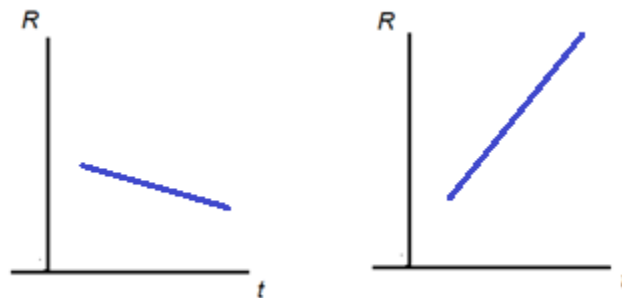
$$\dot{R}^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho_0 R_0^3 R^{-1}(t) - k,$$

k pemalar, memberikan persamaan ini bila dibezakan terhadap t . Kamiran persamaan ini memberikan model-model semesta.

Bagi kes $k = 0$ dan $\rho_0 = 0$, model Milne diperolehi. Dalam model ini,

$$R(t) = \pm k_1 t + k_2$$

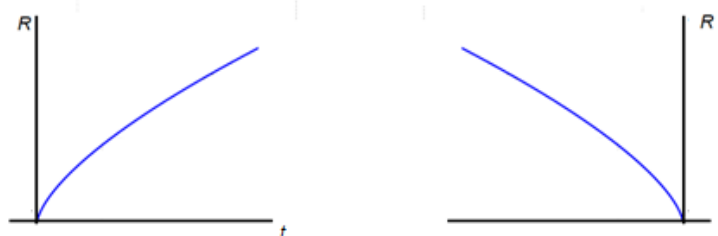
di mana k_1 dan k_2 adalah pemalar. Dua contoh dirajahkan di bawah.



Model Einstein-de Sitter (EdS) didapati bila $k = 0$ dan $\rho_0 > 0$. Ia diberikan oleh

$$R(t) = \pm(6\pi G\rho_0)^{1/3} R_0 t^{2/3} + k_3$$

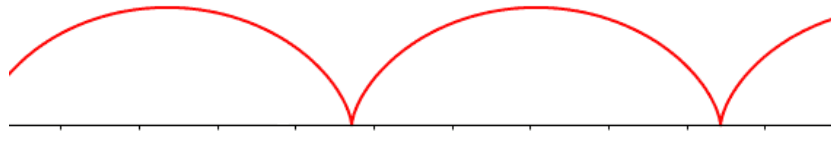
di mana k_3 malar, iaitu $R \propto t^{2/3}$, seperti dirajahkan di bawah.



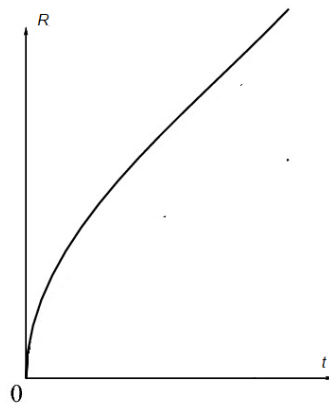
Model-model tertutup berlaku apabila $k > 0$ dan $\rho_0 > 0$. Ini memberikan semesta yang mengayun. Ia mengembang sehingga $\dot{R} = 0$, iaitu bila

$$R = R_{max} \equiv \frac{8\pi G\rho_0 R_0^3}{3k},$$

dan kemudian menguncup. Penyelesaiannya berbentuk sikloid, seperti di bawah.



Dalam model-model terbuka pula, $k < 0$ dan $\rho_0 > 0$. R diperihali fungsi hiperbolik. Untuk t kecil, fungsi ini berkadar $t^{2/3}$ seperti model Einstein-de Sitter. Pada t besar, ia ,menurut t , seperti model Milne. Ini ditunjukkan di bawah.



Maka model kosmologi dibahagikan kepada samada yang berkembang atau menguncup, dan yang tutup atau terbuka.

Kembangan Hubble merupakan bukti bagi semesta berkembang. Sokongan lain datang daripada reputan radioaktif, yang menyatakan unsur-unsur kimia terbentuk lebih-kurang 4×10^9 tahun lampau, dan evolusi najam, yang menyarankan usia bintang-bintang tertua adalah lebih-kurang 5×10^9 tahun.

Juga, paradoks Olber mempersoalkan kegelapan langit malam. Jika semesta diandaikan infiniti dalam saiznya, maka dalam arah manapun dilihat, akhirnya garis penglihatan kita sampai kepada badan bercahaya itu bintang. Fluks daripada 1 bintang pada jarak r ialah,

$$F = \frac{L}{4\pi r^2}$$

di mana L ialah luminositinya. Jumlah fluks daripada bintang-bintang dalam petala jarak r dan tebal dr ialah

$$\frac{L}{4\pi r^2} n 4\pi r^2 dr = L n dr$$

dengan ketumpatan bilangan bintang n , memberikan jumlah fluks dari semesta

$$\int_0^\infty L n dr = \infty.$$

Ini bermakna, langit (malam) seharusnya terang-benderang. Fluks boleh dihadkan jika dianggap usia semesta τ terhad, menjadikan had atas kamiran sebagai $c\tau$.

Reputan radioaktif, taburan unsur kimia, evolusi najam, dan langit malam gelap sebenarnya menyarankan usia semesta terhad. Kembangan Hubble menyokong semesta yang mengembang secara lebih langsung.

Kalau Kembangan berlaku, ia bermakna semesta lebih padat dan hangat pada masa dahulu, dan menyejuk dengan perjalanan masa. Pada fasa cukup hangat, jirim berbentuk plasma di mana atom terion, elektron dan sinaran berkeseimbangan. Selepas fasa ini, sinaran nyahganding, dan membentuk sinaran latar belakang yang wujud kepada hari ini. Ia telah menyejuk, dan memuncak pada frekuensi mikrogelombang. Sinaran mikrogelombang latar ini dikesan, dan merupakan sokongan kuat untuk pengembangan semesta.

Kalau semesta mengembang, adakah ia terbuka atau tertutup? Kita gantikan pekali Hubble

$$H(t) = \frac{\dot{R}}{R}$$

ke dalam persamaan untuk evolusi R di atas, memberikan

$$H^2(t) = \frac{8\pi G}{3} \rho_0 \left(\frac{R_0}{R}\right)^3 - \frac{k}{R^2}.$$

Untuk $t = t_0 = \text{sekarang}$, $H(t) = H_0$, $R(t) = R_0$,

$$H_0^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho_0 - k'$$

dengan $\rho_0 = \text{ketumpatan semasa semesta}$, dan $k' = k/R_0^3$. Semesta terbuka untuk $k < 0$ iaitu $k' < 0$, ataupun,

$$\rho_0 < \frac{3H_0^2}{8\pi G}$$

dan sebaliknya untuk semesta tertutup. Ketumpatan genting,

$$\rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G}.$$

Ini ialah ketumpatan semesta EdS. Nilai ρ_c ini ialah dalam lingkungan $0.9 \times 10^{-26} \text{ kg m}^{-3}$, bergantung kepada nilai H_0 yang digunakan.

Ketumpatan semasa ρ_0 dikira daripada 3 komponen jirim: jirim biasa atau jirim baryonan, jirim gelap, dan tenaga gelap. Ketumpatan jirim baryonan dianggarkan daripada luminositi dan bilangan galaksi yang dicerap, disokong ukuran naikturun suhu dan kekutuban mikrogelombang latar akibat salingtindak dengan jirim terion, dan ramalan daripada model sintesis nukleus kosmologian dan ukuran kelimpahan unsur-unsur kimia ringan. Ia bernilai lebihkurang $0.5 \times 10^{-27} \text{ kg m}^{-3}$ dan menyumbang 4-5% daripada ketumpatan jumlah. Jirim gelap pula diukur daripada keluk putaran galaksi berlingkar, pelensaian gravitian olehnya, dan penggugusan galaksi, dan ia menyumbang lebihkurang 27%, pada $2.7 \times 10^{-27} \text{ kg m}^{-3}$. Tenaga gelap diukur daripada pecutan dalam kembangan semesta, daripada ukuran supernova jenis IA, yang punyai luminositi puncak yang konsisten, yang memberikan ukuran jarak yang agak tepat. Ia menyumbang lebihkurang 68%, pada $6.7 \times 10^{-27} \text{ kg m}^{-3}$. RJumlah ketiga-tiga ini memberikan ρ_0 yang hampir kepada nilai ρ_c . Jadi dianggap $\rho_0 = \rho_c$ dan dengan itu semesta datar, di antara tertutup dan terbuka.

12.4 Fasa-fasa

Kita andaikan semesta EdS, di mana $\rho_0 = \rho_c$. Daripada $H(t) = \dot{R}/R$, menggunakan $\dot{R}$ dan R daripada persamaan untuk R terhadap t untuk EdS, kita perolehi,

$$t = \frac{2}{3} (H(t))^{-1}.$$

Ini memberikan umur semesta

$$\tau = \frac{2}{3} \frac{1}{H_0}$$

iaitu $\sim 10^{10}$ tahun, yang bersetuju dengan keradioaktifan dan teori najam.

Kembangan semesta dikaitkan dengan penyejukan. Ini kerana foton diregang akibat kembangan,

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = \frac{R}{R_0}.$$

Bagi sinaran berjarak gelombang λ_e yang disinarkan kepada kita, kita terima dengan jarak gelombang λ_o , kita lihat dengan anjakan merah

$$z = \frac{\lambda_o - \lambda_e}{\lambda_e} = \frac{R_o - R_e}{R_e}$$

iaitu

$$\frac{R_o}{R_e} = z + 1.$$

Katakan jarak penyinar pada masa sinaran ialah r_e dan jaraknya sekarang ialah r_o .

$$dr = \frac{R}{R_o} dr_o$$

ataupun

$$dr_o = c \frac{R}{R_o} dt$$

jadi

$$r_o = c R_o \int_{R_e}^{R_o} \frac{dR}{R \dot{R}}.$$

Bagi semesta EdS, $\rho_0 = \rho_c$, maka

$$R = \left(\frac{3}{2} H_o\right)^{2/3} R_o t^{2/3}.$$

Akhirnya kita perolehi

$$r_o = \frac{2c}{H_o} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+z}}\right).$$

Perhatikan untuk sebesar mana z pun, r_o terhad kepada $2c/H_o$ maksimum. Ini bersamaan ~ 8000 Mpc, jarak terjauh yang kitab oleh cerap sekarang.

Apabila jarak bertambah, jarak gelombang cahaya bertambah. Ini menyebabkan puncak sinaran jasad hitam lebih rendah frekuensinya, iaitu suhu lebih rendah. Boleh dikaitkan

$$kT \sim h\nu = hc/\lambda$$

12.5 Inflasi

Masalah kedataran ruangmasa, uniformity of temp, dan ketiadaan ekakutub magnet, boleh diselesaikan dengan inflasi.

theory

But then cmbr not entirely uniform – measure – proof of inflation