

Дәріс 8.

Фридманның космологиялық моделі

Дәрістің мақсаты – Әлемнің құрылымы мен эволюциясын түсінуге негіз болатын Фридманның космологиялық моделі туралы толық түсінік беру. Модельдің негізгі аспектілерін, оның теңдеулерін және қазіргі заманғы бақылауларға қолданылуын қарастыру.

Дәрістің жоспары:

1. Фридманның космологиялық моделі.
2. Фридман теңдеулері.
3. Фридман метрикасындағы кеңістік түрлері.

Фридманның космологиялық моделі

1922 жылы Александр Фридман ұсынған Фридман моделі – адамзат тарихында алғаш рет жалпы салыстырмалылық негізінде Әлемнің дамуын сипаттаған бірегей космологиялық модель болып табылады. Фридман моделінде Әлем – уақыт өте келе кеңейетін кеңістік ретінде ұсынылады. Ол үлкен масштабта біртекті және изотропты болатын космологиялық принципке негізделген. Бұл модель 1929 жылы галактикаларға дейінгі өлшенген қашықтықтар мен олардың қызыл ығысуы негізінде Хаббл заңына сәйкес Әлемнің кеңеюі ашылған кезде алғашқы бақылау растауын алды [1].

Фридман моделі Әлемнің ақырғы жасы бар және ол үлкен жарылыс деп аталатын кеңістік пен уақыттың бір нүктесінен пайда болады деп болжайды. Сонымен қатар, Фридман метрикасы бақыланатын ғарыштық фондық сәулеленуді түсіндіреді және Әлемдегі галактикалардың таралуын болжайды.

Сонымен қатар, Фридман моделі ғарыштық микротолқынды фондық сәулелену, Әлемнің кеңеюі және галактикалардың құрылымы сияқты әртүрлі космологиялық құбылыстарды болжауға мүмкіндік береді.

Фридман моделі – Әлем біртекті және изотропты, яғни біртекті және барлық бағытта бірдей деп тұжырымдайды. Ол сондай-ақ, Әлемнің өзіндік "кеңеюін", ғарыштық астрономияның бақылауларымен расталған материяның таралуының ұлғаюын болжайды. Фридман моделі оларды "а" әрпімен көрсетілген масштабты фактор тұрғысынан сипаттайды. Масштабты фактор Әлемнің уақыт өте келе қаншалықты үлкен болғанын анықтайды. Басында, ол өте кішкентай болған кезде, масштаб факторы бір болды. Уақыт өте келе ол ұлғаяды, яғни Әлем кеңейеді [1, 2].

Фридман моделі, сонымен қатар Әлемде оның кеңеюіне әсер ететін материя мен энергия бар деп болжайды. Материя оның кеңеюін бәсеңдететін тартылыс күшіне ие, ал қараңғы энергия кеңеюді тездететін теріс қысым тудырады.

Фридман моделі Әлемнің болашақта қандай болатынын болжауға мүмкіндік береді. Егер материя жеткілікті болса, онда оның кеңеюі баяулайды, ол ақырында кішірейе бастайды, нәтижесінде "үлкен сығылу" немесе "үлкен

кері жарылыс" пайда болады. Егер қараңғы энергия басым болса, Әлемнің кеңеюі шексіз жалғасады.

Сондай-ақ, Фридманның космологиялық моделі, заттың тығыздығы, температурасы мен қысымының біртекті және изотропты таралуы жағдайы үшін жалпы салыстырмалылық теориясының (ЖСТ) теңдеулерін шешуге негізделген Әлемнің эволюциясын сипаттайтын теориялық модель [3].

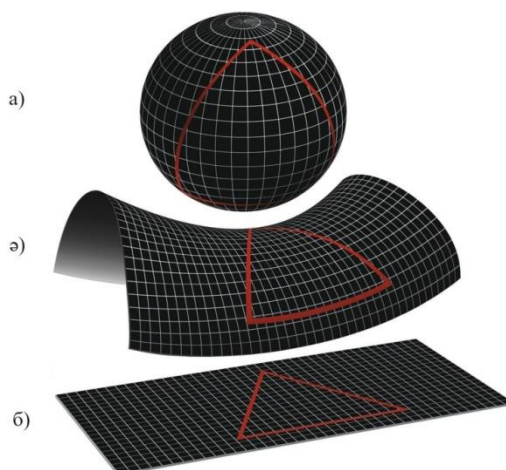
Модель 1922-1924 жылдары А.А. Фридманның еңбектерінде ұсынылған. "Кеңістіктің қисаюы туралы" алғашқы мақала 1922 жылы "Zeitschrift für Physik" журналында жарияланды. бұл жұмыстың негізгі қорытындысы-заттың тығыздығы, температурасы мен қысымының изотропты және біртекті таралуы үшін ЖСТ теңдеулерінде тек стационарлық емес шешімдер бар [4]. Мұндай қасиеттері бар Әлемнің кеңеюі, кішіреюі немесе бастамасы болуы керек дегенді білдіреді.

Фридман теңдеулері

Фридман моделі 1929 жылы галактикаларға дейінгі өлшенген қашықтықтар мен олардың қызыл ығысу негізінде Хаббл Заңына сәйкес Әлемнің кеңеюі ашылған кезде алғашқы бақылау растауын алды. 100 Мпс-тен жоғары масштабта байқалған Әлемдегі материяның таралуының біртектілігі мен изотропиясы кеңістік-уақыттың максималды симметриялы метрикасы бар ЖСТ теңдеулерінің шешіміне сәйкес келеді [1]. Жалпы алғанда мұндай метрика Фридман метрикасы деп аталады:

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

мұндаы ds -ұзындық өлшемі бар төрт өлшемді кеңістік-уақыт аралығы; c -вакуумдағы жарық жылдамдығы; $a(t)$ - ұзындық өлшемі бар масштабты фактор; r, θ, φ -сфералық координаттар жүйесіндегі кеңістіктік координаттар (және r -өлшемсіз координат); t -уақыт. Қисықтық параметрі (немесе қисықтық константасы) k - тек дискретті мәндерді қабылдайды $+1, -1$ немесе 0 , бұл үш өлшемді кеңістіктің жабық, ашық немесе жазық (Евклид) геометриясына сәйкес келеді (Сурет-1).



Сурет-1. а) Жабық кеңістік, ә) Ашық кеңістік, б) Жазық кеңістік

Фридман моделінің бөлігі ретінде, Әлемдегі материяның күй теңдеуі біртекті идеалды сұйықтықпен сипатталады $p(\rho) = w\rho c^2$, мұндағы ρ – тығыздық, p – заттың қысымы, c – вакуумдағы жарық жылдамдығы, w – Әлемді толтыратын материяның әр түрлі типтері үшін әр түрлі мәндері бар пропорционалдылық коэффициенті. Мысалы, қарапайым зат пен релятивистік плазма үшін бұл параметр сәйкесінше $w_m = 0$ және $w_r = 1/3$ мәндерін қабылдайды. Қараңғы энергия жағдайы үшін күй теңдеуі келесідей:

$$p_q = w_q \rho_q c^2. \quad (2)$$

Мұндағы, p_q -қараңғы энергияның қысымы, ρ_q -қараңғы энергияның тығыздығы, w_q -пропорционалдылық коэффициенті, оның мәні қазіргі бақылау деректеріне сәйкес $-1,06 \leq w_q \leq -1,0$ аралығындағы мәндерге ие. Қараңғы энергияның табиғаты белгісіз болғандықтан, w_q коэффициенті қараңғы энергияның күй теңдеуінің параметрі деп аталатын жеке Әлемдік космологиялық параметр ретінде анықталады. Егер қараңғы энергия космологиялық константамен сипатталса (Λ), онда $w_q = -1$.

Фридманның космологиялық моделінің негізі ретінде Эйнштейн теңдеулерінен алынған үш Фридман теңдеуі саналады, олар кеңістік-уақыттың біртектілігі мен изотроптығын болжайды. Фридман теңдеулері масштабты фактордың $a(t)$ уақытқа және космологиялық модель параметрлеріне тәуелділігін көрсетеді. Екі негізгі параметр-қысықтық параметрі k , үш өлшемді кеңістіктің геометриясын анықтайтын және космологиялық тұрақты Λ , Эйнштейн теңдеулеріне кіретін іргелі тұрақтысы. Күй теңдеуі кейде Фридманның төртінші теңдеуі деп аталады [1].

Фридман теңдеулерінің классикалық механикада қарапайым аналогы бар. Бірінші теңдеу меншікті кинетикалық энергия мен гравитациялық өрістеі сынақ бөлшегінің меншікті потенциалдық энергиясы арасындағы байланысты анықтайды:

$$\frac{\dot{a}^2}{a^2} = \frac{8\pi G}{3} \rho - \frac{kc^2}{a^2} + \frac{\Lambda c^2}{3}, \quad (3)$$

мұндағы ρ – Әлемдегі материяның орташа тығыздығы, G -гравитациялық тұрақты, a шамасындағы нүкте уақыттың бірінші туындысын білдіреді.

Екінші теңдеу үш өлшемді кеңістіктің кеңеюінің үдеуін анықтайды:

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + \frac{3p}{c^2} \right) + \frac{\Lambda c^2}{3}, \quad (4)$$

Мұндағы a шамасындағы екі нүкте уақыттың екінші туындысын білдіреді.

Үшінші теңдеу-заттың сақталу заңы, сұйықтық механикасында ол үздіксіздік теңдеуі деп те аталады:

$$\rho = -3 \frac{\dot{a}}{a} \left(\rho + \frac{p}{c^2} \right). \quad (5)$$

Осы үш теңдеудің кез келгені қалған екеуінің салдары болып табылады. Ал, $\Lambda = 0$ жағдайында, Әлем стационарлық емес болуы керек, яғни ол не кеңейі немесе кішірейі керек. Бұл жағдайда Әлемнің эволюциясы мен түпкілікті күйі тек K қисықтық параметрімен анықталады. Фридманның бірінші теңдеуі келесідей жазылады:

$$H_0^2 a_0^2 (\Omega - 1) = kc^2, \quad (6)$$

мұндағы a -масштаб факторының қазіргі мәні, H -Хаббл параметрінің қазіргі мәні, Ω – Әлемнің орташа жалпы тығыздығының (бариондық заттың, сәулеленудің, қараңғы материяның және қараңғы энергияның тығыздығын қоса алғанда) критикалық тығыздыққа қатынасына тең Әлемнің тығыздық параметрі [3].

Фридман метрикасындағы кеңістік түрлері

$K = +1$ кезінде Әлемнің үш өлшемді кеңістігі жабық геометриялы болып келелі (Риман кеңістігі), Әлемнің кеңейі ерте ме, кеш пе тоқтап, қысылумен ауыстырылады, ол соңында үлкен қысумен аяқталады (Сурет-2, а) Әлемнің жалпы тығыздығы сыни тұрғыдан үлкен ($\Omega > 1$).

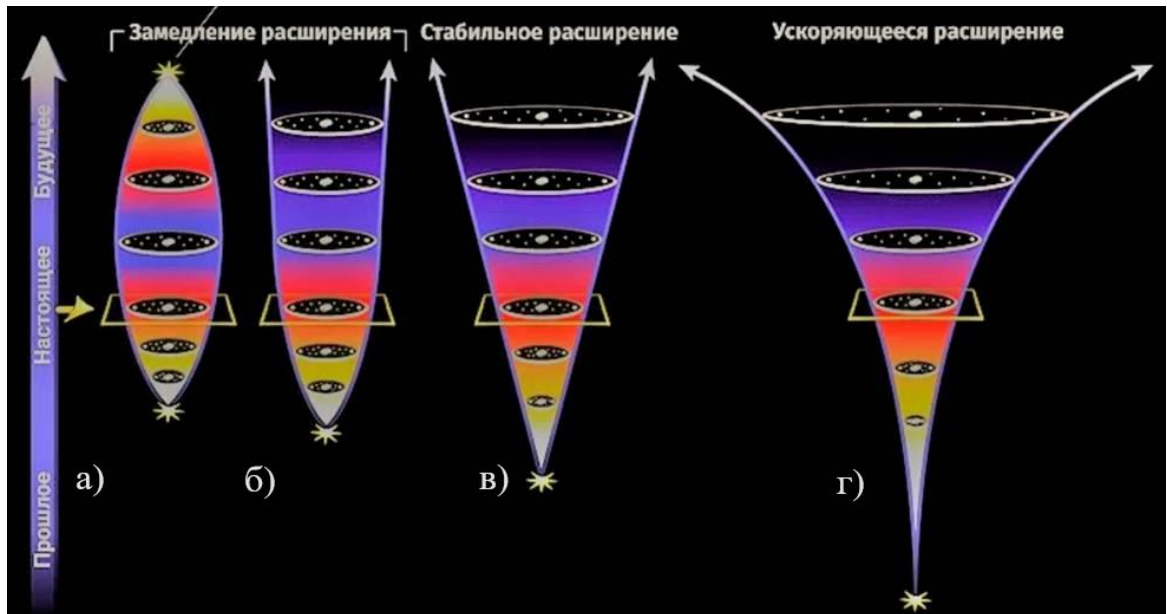
$K = 0$ кезінде Әлемнің үш өлшемді кеңістігі жазық (евклидтік) геометрияға ие, Әлемнің кеңейі мәңгілікке жалғасады және бұл кеңейі жылдамдығы шексіздікте нөлге ұмтылады (Сурет-2,б). Әлемнің толық тығыздығы критикалық ($\Omega = 1$).

Ал, $K = -1$ кезінде Әлемнің үш өлшемді кеңістігі ашық геометрияға ие (Лобачевский кеңістігі), Әлемнің кеңейі мәңгілікке жалғасады және бұл кеңейі жылдамдығы шексіздікте нөлдік емес шамаға ұмтылады. Әлемнің жалпы тығыздығы критикалықтан аз ($\Omega < 1$). Егер тығыздық критикалықтан едәуір аз болса, онда Әлемнің кеңейінің баяулауы аз болады және Әлем біркелкі кеңейеді (сурет-2, в) [4].

Жағдай $\Lambda = 0$ болған кезде өзгереді немесе жалпы жағдайда $\rho + 3p/c^2 < 0$. $\Lambda < 0$ шамасы қосымша гравитациялық тартылыс күшінің барын білдіреді. $\Lambda > 0$ шамасы гравитациялық итерудің қосымша күшінің болуына тең және Әлемнің үдемелі кеңейіне әкелуі мүмкін (Сурет-2, г).

Ал, космологиялық тұрақтысы $\Lambda > 0$ және $\Lambda < 0$ кезде, материя болмаған жағдайдағы ЖСТ теңдеулері сәйкесінше де Ситтер және анти-де Ситтер моделі деп аталады.

Егер күй теңдеуінде $w_q > -1$ болса, онда бұл квинтэссенция деп аталатын қараңғы энергияның барын білдіреді. Оның тығыздығы кеңейімен төмендейді, бірақ заттың немесе сәулеленудің тығыздығына қарағанда баяу болады. Мұндай күй теңдеуімен Әлем ешқашан шексіз үлкен болмайды. Сонымен қатар, оқиғалардың тұрақты көкжиегі қалыптаспайды [4].



Сурет 2. Әлемнің кеңеюі

Егер $w_q < -1$ болса, онда бұл фантом энергиясы деп аталатын қара энергияның бар екенін білдіреді. Мұндай энергияның тығыздығы Әлемнің шексіздікке дейін кеңеюімен өседі. Тұрақты оқиға көкжиегі пайда болмайды, бірақ галактикалар арасындағы қашықтық шексіз үлкен болады. Ал, күй теңдеуі параметрі бар қараңғы энергия үшін W кеңейту кезінде тығыздық тұрақты болып қалады және оқиғалардың тұрақты көкжиегі пайда болуы мүмкін.

Космологиялық көкжиектің қалыптасуы Әлемнің келесі екі қарама-қарсы сипаттамасының тепе-теңдігіне тікелей байланысты: оның геометриясын анықтайтын Әлемнің толық массасы (k қисықтық параметрі) және қараңғы энергияның табиғаты (Λ космологиялық тұрақтысы немесе w қараңғы энергия параметрі). Осы шамалар Әлемнің кеңею қарқынын анықтайды. Қорыта келгенде Фридманның космологиялық моделі қазіргі стандартты космологиялық модельдің негізі болып табылады.

Әдебиеттер тізімі:

1. Сажин М.В. Современная космология в популярном изложении. – М.: Едиториал УРСС, 2002. – 240 с.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Теория поля. – М.: Физматлит, 2003.
3. Rindler W. Relativity. Special, general, and cosmological. – Oxford University Press, 2006.
4. Фок В.А. Теория пространства, времени и тяготения. – М.: Гос. изд. тех.-теор. лит., 1955.