

Дәріс 6.

Жалпы салыстырмалылық теориясының негіздері

Дәрістің мақсаты – студенттерді Эйнштейннің жалпы салыстырмалылық теориясының негізгі ұғымдарымен және принциптерімен таныстыру. Кеңістік-уақыт, кеңістіктің қисаюы, гравитациялық өзара әрекеттесу сияқты негізгі ұғымдарды және олардың математикалық сипаттамасын қарастыру. Теорияның физикалық салдарын және оның классикалық Ньютон механикасынан айырмашылығын түсіндіру.

Дәрістің жоспары:

1. Жалпы салыстырмалылық теориясына кіріспе.
2. Эквиваленттілік принципі.
3. Жалпы салыстырмалық теориясының математикалық аппараты.
4. Эйнштейннің өріс теңдеуі.

Жалпы салыстырмалылық теориясына кіріспе

Жалпы салыстырмалылық теориясы (ЖСТ) – 20 ғасырдың басында Альберт Эйнштейн ұсынған теория. Бұл теория гравитациялық күшті кеңістік-уақыттың геометриялық қасиеті ретінде сипаттайды [1].

ЖСТ қазіргі уақытта ауырлық күшінің ең сәтті теориясы болып табылады, себебі ол бақылаулармен жақсы расталған және астрономияда, спутниктік навигация жүйелері сияқты инженерлік қосымшаларда жиі қолданылады. Жалпы салыстырмалылық теориясының алғашқы жетістігі Меркурий перигелийінің қалыптан тыс прецессиясын түсіндіру болды. Содан кейін, 1919 жылы Артур Эддингтон Күннің толық тұтылу сәтінде күнге жақын жарықтың ауытқуын байқағанын хабарлады, бұл жалпы салыстырмалылық теориясының болжамдарын сапалық және сандық түрде растады. Содан бері көптеген басқа бақылаулар мен эксперименттер теорияның көптеген болжамдарын растады, соның ішінде гравитациялық уақыттың кеңеюі, гравитациялық қызыл ығысу, гравитациялық өрістегі сигналдың кешігуі және гравитациялық сәулелену. Сонымен қатар, көптеген бақылаулар жалпы салыстырмалылық теориясының әлемдегі ең жұмбақ болжамдарының бірі – қара құрдымдардың болуын растау ретінде түсіндіріледі [1-3].

ЖСТ-ның негізгі идеясы-масса мен энергия гравитациялық өрістерді құра отырып, кеңістік-уақытты деформациялайды. Бұл объектілер–гравитациялық күштердің әсерінен кеңістік-уақыттың қисық траекториялары бойынша қозғалады дегенді білдіреді. ЖСТ бірнеше негізгі ұғымдарды қамтиды:

Эквиваленттілік принципі

Эйнштейннің эквиваленттілік принципі кез-келген объектілердің инерциялық массасы мен гравитациялық массасы тең деп тұжырымдайды. Бұл гравитациялық күшінің әсерінен объектінің қозғалысы оның массасына тәуелді емес дегенді білдіреді. Мысалы, әртүрлі массадағы екі объект Жердің тартылыс күшінің әсерінен бірдей үдеумен түседі.

Осы принцип бойынша гравитациялық өрістегі барлық физикалық құбылыстар, егер кеңістіктің тиісті нүктелеріндегі екі өрістің де кернеулігі сәйкес келсе және тұйық жүйенің барлық денелері үшін бастапқы шарттар бірдей болса, тиісті инерция күштерінің өрісіндегі сияқты жүреді.

Кванттық өріс теориясы тұрғысынан эквиваленттілік принципі массасыз бөлшектердің спинмен өзара әрекеттесу теориясы үшін Лоренцтің инварианттылығының салдары болып табылады, өйткені Лоренц инварианттылық талабы теорияның калибрлеу инварианттылығына әкеледі, ал жалпы коварианттылық принципі калибрлеу инварианттылығы принципін жалпылау болып табылады, яғни эквиваленттілік принципінің математикалық көрінісі деп есептеледі.

Осы принципті көрсету үшін Эйнштейн келесі ойша экспериментін ұсынды. Денелер гравитациялық денелерден шексіз алыс және үдеумен қозғалатын шағын лифтте болсын. Содан кейін лифттегі барлық денелерге инерция күші әсер етеді, ал осы күштердің әсерінен денелер тірекке немесе аспаға қысым түсіреді. Яғни, денелердің салмағы болады. Егер лифт қозғалмаса, бірақ біртекті өрістегі гравитациялық массаның үстінде ілулі болса, онда барлық денелер де салмаққа ие болады. Лифтте болған кезде бұл екі күшті ажырату мүмкін емес. Сондықтан барлық механикалық құбылыстар екі лифтте де бірдей болады [3].

Эйнштейн бұл ережені барлық физикалық құбылыстар үшін қорытындылады. Мысалы, гравитациялық өрістегі жарық сәулесінің ауытқуы жеделдетілген қозғалатын лифт сияқты жүреді. Яғни, эквиваленттілік принципі – еркін түсетін объект инерциялық санақ жүйесіндегі объектіден айырмашылығы болмайтындығын айтады. Бұл гравитациялық күш пен үдеу эквивалентті болуы мүмкін дегенді білдіреді.

Эквиваленттілік принципі жалпы салыстырмалылық теориясының және жалпы ауырлық күшінің көптеген релятивистік теорияларының негізгі принципі болып саналады, өйткені эквиваленттілік принципіне сәйкес гравитациялық өрісті инерциялық емес анықтамалық жүйе ретінде қарастыруға болады.

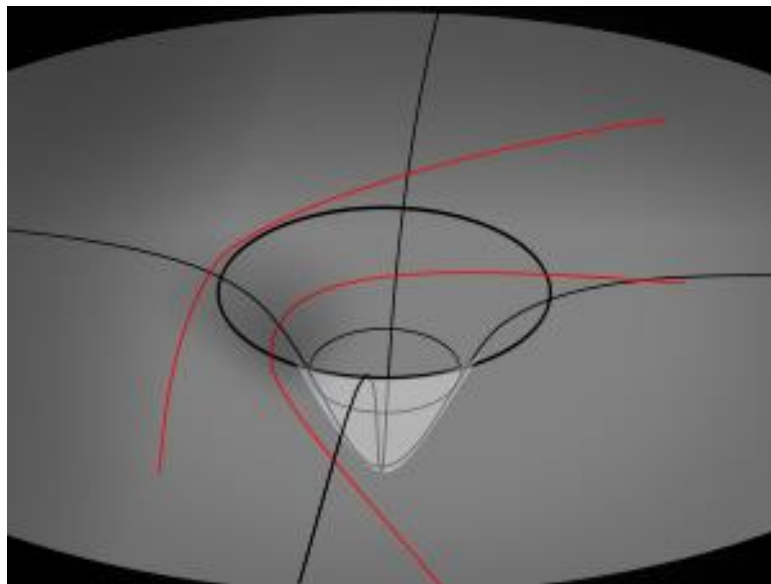
Жалпы салыстырмалылық теориясы бойынша гравитацияның метрикалық теорияларында кеңістік-уақыт қисық болады. Жалпы салыстырмалық теориясында қисайған кеңістік-уақыттың қасиеттері теориялық және эксперименталды тұрғыда сынақ бөлшектердің қозғалысын зерттеу арқылы анықталып, тұжырымалады. Сынақ бөлшек – бұл объектінің идеалдандырылған түрі болып табылады. Себебі, оның массасы тым аз болғандықтан, кеңістік-уақыттың қисаюына айтарлықтай әсер етпейді. Сонымен қатар, сынақ бөлшек бейтарап, яғни зарядталмаған және сфералық-симметриялы болып саналады. Сәйкесінше, сынақ бөлшек электромагниттік өріспен әсерлеспейді, сонымен қатар айналу моментінің әсері жоқ деп те саналады [3, 4].

Арнайы салыстырмалылық теориясындағы (АСТ) кез-келген инерциялық емес анықтамалық жүйе әлі де жазық, қисық емес кеңістік уақытына негізделген. Толық сәйкестік метрикалық теорияларда ғаламдық инерциялық

анықтамалық жүйелер жоқ екендігімен анықталады, барлық жүйелер инерциялық емес. Тіпті жергілікті инерциялық анықтамалық жүйеге көшу кеңістік-уақыт қисықтығымен байланысты гравитациялық әсерлерді (мысалы, геодезиялық ауытқу) жоймайды. Егер зерттелетін жүйенің өлшемдерін таңдаса ғана әлдеқайда аз болады.

Кеңістік-уақыттың қисаюы объектілердің неліктен гравитацияның әсерінен қозғалатынын түсіндіреді. Ол сондай-ақ, гравитациялық уақыт сияқты әсерлерді болжайды, мұнда уақыт та массасы жоғары объектілердің жанында ауытқуға ұшырайды.

Егер екі жақын нүктеден екі денені бір-біріне параллель озғалысқа келтірсек, онда гравитациялық өрісте олар бірте-бірте жақындай бастайды немесе бір-бірінен алыстай бастайды [5]. Бұл әсер геодезиялық сызықтардың ауытқуы (девиациясы) деп аталады (Сурет-1).



Сурет-1. Геодезиялық сызықтардың ауытқуы.

Эйнштейннің өріс теңдеулері

Эйнштейннің өріс теңдеулері жалпы салыстырмалылықтың негізгі теңдеулері болып табылады. Олар гравитацияның кеңістік-уақытпен өзара әрекеттесуін сипаттайды:

$$G_{\alpha\beta} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\alpha\beta}, \quad (1)$$

мұндағы, G – гравитациялық тұрақты, π – Пи саны, $T_{\alpha\beta}$ – энергия-импульс тензоры, $G_{\alpha\beta}$ – Эйнштейн тензоры және ол келесіге тең:

$$G_{\alpha\beta} = R_{\alpha\beta} - \frac{1}{2} R g_{\alpha\beta}, \quad (2)$$

мұндағы, $R_{\alpha\beta}$ – Риччи тензоры, R – Риччи скаляры, $g_{\alpha\beta}$ – метрикалық тензор. Эйнштейн теңдеуінің сол жағы кеңістік-уақыттың геометриясын, ал оң жақ бөлігі материяны сипаттайды [1-5]. Бұл теңдеу кеңістік-уақыт пен материя байланысты екенін, яғни кеңістік-уақыттың қасиеттері материяның қасиеттеріне тәуелді екенін білдіреді. Негізінде Эйнштейннің өріс теңдеуі жалпы жағдайда екінші ретті, біртекті емес, он алты дербес туындылы, бейсызық дифференциалдық теңдеулердің жүйесі болып табылады. Бейсызық болғандықтан гравитациялық өріс үшін суперпозиция принципі орындалмайды [4]. Бұл принцип Эйнштейн теңдеулерін линеаризациялауға мүмкіндік беретін әлсіз гравитациялық өрістер үшін орындалады. Теңдеулердің біртектісіздігі қарастырылатын материяның энергия-импульс тензорына негізделген. Алайда, теңдеулердің құрамындағы тензорлар симметриялы болғандықтан төртөлшемді кеңістік-уақытта теңдеулер саны онға тең. Сондай-ақ, Бьянки теңдігі арқылы теңдеулер саны алтыға дейін қысқартуға болады. Жоғарыдағы (2)-теңдеудің екі жағынан із алатын болсақ, теңдеудің тағы бір эквивалентті түрін аламыз:

$$R_{\alpha\beta} = \frac{8\pi G}{c^4} \left(T_{\alpha\beta} - \frac{1}{2} T g_{\alpha\beta} \right). \quad (3)$$

Ал Бьянки теңдігіне байланысты Эйнштейн теңдеулерінен материяның энергия-импульс тензорына қатысты төрт теңдеу алуға болады:

$$\nabla_{\beta} T_{\alpha\beta} = 0. \quad (4)$$

Бұдан шығатын теңдеулер материяның қозғалысын сипаттайды. Осылайша, Эйнштейн теңдеулері қозғалыстағы материяның сипаттамаларын дәл анықтайды.

Эйнштейн теңдеуін шешу – метрикалық тензорды $g_{\alpha\beta}$ анықтауды білдіреді. Теңдеуді шешу барысында шекаралық, координаттық шарттарды анықтап және массивті нысанды, үлестірілген материяны және бүкіл ғаламды сипаттайтын энергия-импульс тензорын жазу қажет. Қазіргі уақытта Эйнштейн теңдеуінің көптеген шешімдері бар. Өйткені, теңдеу дәлдігі бойынша жуықталған және нақты шешімдер болып екі түрге бөлінеді. Сонымен қатар, энергия-импульс тензордың түріне байланысты теңдеудің вакуумдық, өрістік, космологиялық және толқындық түрлері де бар [2, 5]. Эйнштейн теңдеулерінің ең маңызды дәл шешімдеріне мыналар жатады: Шварцшильд шешімі (сфералық симметриялы зарядталмаған және айналмайтын массивтік объектінің айналасындағы кеңістік-уақыт үшін), Райснер-Нордстрем шешімі (зарядталған сфералық симметриялы массивтік нысан үшін), Керр шешімі (айналмалы массивтік объектінің кеңістік-уақыты үшін), Керр-Ньюмен шешімі (зарядталған, айналмалы массивтік объект үшін), сондай-ақ Фридманның космологиялық шешімі (жалпы ғалам үшін) және дәл гравитациялық-толқындық шешімдер.

Эйнштейннің өріс теңдеулерінің алғашқы нақты шешімін 1916 жылы Карл Шварцшильд анықтаған болатын. Бұл шешім – Шварцшильд метрикасы деп аталады, бұл метрика тек массасы бар, айналмайтын, сфералық-симметриялы объекті сипаттайды. Шварцшильд метрикасы көптеген планеталар мен жұлдыздар, соның ішінде Күн мен Жер сияқты баяу айналатын астрономиялық нысандарды сипаттау үшін маңызды болып табылады [4]. Бұл шешім ассимптоталық жазық болып табылады. Сондай-ақ, Шварцшильд шешімі бірнеше жалпы салыстырмалық теориясының эффектілерін дәл есептеуге мүмкіндік береді: планетарлық орбиталарының прецессиясы, Күннің айналасындағы жарықтың ауытқуы, гравитация жиілігінің дәл ығысуы, Шапиро жарығының уақыттық кешігуі және орбиталық гироскоптардың прецессиясы.

Әдебиеттер тізімі:

1. Sean C., Spacetime and geometry. An introduction to general relativity. – San Francisco: Wesley, 2004. – 513p.
2. Шапиро С. Л., Тьюколски С. А. Черные дыры, белые карлики и нейтронные звезды. – М.: Мир, 1985.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Теория поля. – М.: Физматлит, 2003.
4. Rindler W. Relativity. Special, general, and cosmological. – Oxford University Press, 2006.
5. Фок В.А. Теория пространства, времени и тяготения. – М.: Гос. изд. тех.-теор. лит., 1955.