Лекция 1_Кіріспе. Гармониялық шарты. Фок бойынша метриканы жіктеу. (Гармониялық шартың физикалық мағынасы. Фок бойынша метриканы жіктеу алғышарттары. Жіктеу параметрлерін таңдау)

Планеталардың қозғалысы механика заңдарына, ал олардың өзара әрекеттесуі бүкіләлемдік тартылыс заңына бағынатыны белгілі болғаннан кейін бірден Күн жүйесінің болашағы туралы мәселе туындады. Оның геометриясы мен сапалық ерекшеліктерін алдағы миллиондаған жылдар ішінде елестету мүмкін бе? Бүкіләлемдік тартылыс заңы ашылғанға дейін ***Әлем жүйесінің орнықтылығы*** туралы мәселе діни-философиялық жүйелер шеңберінде атүсті қарастырылып келді.

Ньютон бірінші болып Күн жүйесінің динамикалық моделін жасаған және оның сол уақытта толығымен нақты түрде шешілмейтін орнықтылығы туралы мәселеге бірден тап болды.

Одан әрі қарай орнықтылық тұжырымдамасы планеталардың қозғалысын зерттеумен қатар дами бастады. Алғаш рет планеталардың қозғалысының орнықтылығы мәселесін көрнекті екі ғалым, бірі механик-математик Лаплас [3] және екіншісі Лагранж [4] (1773) нақты түрде айналысты. Бұл зерттеулер, барлық ұйытқулар мен өзара әсерлерді есепке ала отырып, планеталар қозғалысының дифференциалдық теңдеулерін алудан және оларды шешу кезінде қандай тепе-теңсіздіктердің периодтық немесе ғасырлық түрлері орын алатыны, яғни жүйенің орнықты немесе орнықсыздығы дегені нені білдіретінін анықтаудан тұрады. Лаплас пен Лагранж Күн жүйесінің орнықтылығы мәселесін бірінші жуықтауда ғана шеше алды, әрине бұл анық жеткіліксіз болып шықты. Айта кету керек, сол кезеңдерде Күн жүйесінің орнықтылығын анықтауға арналған осы жұмыстардың барлығы астрономдар мен математиктердің бірнеше жүз мың жыл бойы планета орбиталарының эволюциясын анықтау бойынша ұзақ мерзімді еңбектерінсіз мүмкін болмас еді. Сонымен қатар, Лагранж егер қозғалыс кеңістіктің тұйық аймағында ғана орын алса орнықты болады деп пайымдады.

Лаплас-Лагранж теоремасы бойынша (1773, 1776) планета орбиталарының жартылай үлкен осьтерінің ғасырлық ұйытқуларының жоқтығына сүйенсек, олардың ұйытқу беретін массаларға қатысты өзгерісі ең аз шамаларының бірінші ретті мәндеріне дейін сипатталады деп болжай отырып тригонометриялық мүшелердің қосындысы түрінде беруге болады. Осы теоремаға сүйене отырып, 1773 жылы Лаплас Күн жүйесінің тұрақтылығы туралы теореманы тұжырымдады: егер планеталар бір бағытта қозғалса, олардың массалары бірдей тәртіпте болады, эксцентриситеттері мен көлбеулері аз, ал үлкен жарты осьтері орташа позицияға қатысты аздаған ғана тербелістер жасайды, сондықтан орбиталардың эксцентриситеттері мен еңкейюі берілген интервалда аз шамаға ие болады. Дегенмен, қазіргі уақытта бұл теорема тек тарихи тұрғыдан ғана қызығушылық ғана тудырады. Себебі, бұндай тұжырымды тек бірінші ретті ұйытқуларды ғана ескергендіктен Күн жүйесінің жасымен салыстырмалы уақыт аралықтарында қолдану тиімсіз. Сонымен қатар, Күн жүйесінің денелері массалары өзара айтарлықтай әртүрлі болып табылады.

Кейінірек, 1809 жылы Пуассон екінші жуықтауда жартылай үлкен ось үшін шешім амплитудасы уақытқа пропорционал тригонометриялық мүшелерді ле қамтуы мүмкін екенін көрсетті. Пуассонша орнықтылықтың анықтамасы, бөлшектің бастапқы нүктенің шағын төңірегі арқылы шексіз рет өтуін талап етеді.

Орнықтылықтың ең сәтті тұжырымдамасын 19 ғасырдың аяғында орыс математигі А.М. Ляпунов (1857-1918) жасай алды десек те болады. Егер болмашы аз бастапқы ұйтқулар кезінде қандай да бір қозғалыс сипаттамаларының мәні, барлық келесі уақыт аралығында ұйытқымаған қозғалыс кезіндегі мәнінен айырмашылығы аз болса, онда осы сипаттамаға қатысты жүйенің қозғалысы орнықты деп аталады. Егер соншалықты аз (бірақ 0-ге тең емес) бастапқы ұйытқулар кезінде қарастырылып отырған сипаттаманың мәні уақыт өткен сайын өзінің ұйытқымаған қозғалыстағы мәнінен көбірек ауытқитын болса, онда осы сипаттамаға қатысты жүйе қозғалысы орнықсыз деп аталады. Қозғалыс орнықтылығын анықтайтын шарттар орнықтылық критерийлері деп аталады. Сондай-ақ бұл анықтама бүгінгі күнге дейін негізгі болып саналады.

Аспан механикасының есептерінде орнықтылық бірқатар айнымалылар тұрғысынан қарастырылады: үлкен жартылай ось (орбита өлшемі), эксцентриситет (орбитаның сығылыңқылығы) және орбитаның еңкеюі. Осы үш элементтің бірлескен түсініктемелері Ляпунов бойынша орнықтылығы анықтамасын береді. Демек, егер орбиталардың өлшемдері, пішіні және еңкеюі қарастырылып отырған барлық уақыт аралығында бастапқы мәніндеріе жақын болса Күн жүйесі Ляпунов бойынша тұрақты болып табылады.

Күн жүйесінің орнықтылығы туралы айтатын болсақ, олар, әдетте, үлкен планеталардың оның жасымен салыстырылатын шексіз немесе өте үлкен уақыт аралығындағы қозғалысының орнықтылығын білдіреді. Бұл жағдайда орнықсыздықтың экстремалды көріністері ретінде планеталардың Күн жүйесінен шығып кетуі, Күнге құлауы немесе басқа планетамен соқтығысуын айтуға болады. Әрине, мұндай оқиғалар Күн жүйесінің құрылымы мен динамикасын айтарлықтай өзгертуі мүмкін.

Соңғы уақыттарда Күн жүйесіндегі ұсақ денелердің динамикасына арналған көптеген зерттеулер пайда болды. Бұл объектілер үшін орнықсыздық мәселесі көбінесе олардың орбиталарының өлшемі, пішіні және еңкейюі айтарлықтай, көбіне бірнеше есе өзгеріске ұшырағанынан байқалады, және содан кейін ғана ол планеталар Күн жүйесінен шығып кетеді, Күнге құлайды немесе планетамен соқтығысады. Бұл объектілердің массалары аз, ал саны көп болғанына қарамастан, бір ғана объектінің, тіпті бір топтың орнықсыз қозғалысы жалпы Күн жүйесінің орнықтылығына әсер етпегенімен, жалпы оның құрылымын қалыптастыруда маңызды рөл атқарады. Аспан денелерінің қозғалысын зерттеудің классикалық әдісі ұйытқыған қозғалыстардың

теңдеулерінің шешімін қатарлардың кесінділері түрінде көрсету болып табылады. Алайда, 19 ғасырдың аяғында Анри Пуанкаре (1854-1912) аспан денелерінің қозғалысын сипаттау үшін қолданылатын қатарлардың өзара алшақтығын көрсетті. Сондықтан оларды шексіз уақыт аралығындағы Күн жүйесінің мән жайын сипаттау үшін пайдалану мүмкін емес. Дегенмен, Күн жүйесі кең, бірақ шектеулі эволюциялық ауқымға ие болғандықтан осы фактілер астрофизикалық зерттеулерде қауіпті құбылыс болып табылмайды. Бірақ Пуанкаре алған классикалық қатарлардың қолданылу аясы Күн жүйесінің жасынан әлдеқайда қысқа болып шықты. Бұл қолайсыздық өткен ғасырдың 60 жылдары басында, Ресей математиктері А.Н. Колмогоров пен В.И. Арнольд және американдық математик Дж.Мозер КАМ-теория деп аталатын теорияны жасау арқылы шешімін тапты. Оның күн жүйесіне қолданылуы келесі теореманы береді: егер планеталардың массалары жеткілікті аз болса, сонымен қатар орбиталардың эксцентриситеттері мен еңкеюі аз болса, онда көптеген бастапқы жағдайлар үшін (резонанс және сол сияқты басқа құбылыстардан басқа) қозғалыс шартты түрде периодты болады, эксцентриситеттері мен еңкейюі аз болып қала береді де, ал жартылай үлкен осьтер мәндері өздерінің бастапқы мәндеріне маңында үнемі тербеледі, яғни Күн жүйесі шексіз уақыт аралығында Ляпуновша орнықты болады. Өкінішке орай, резонанстар нақты Күн жүйесінде өте маңызды рөл атқарады. Сондықтан КАМ-теориясының тұжырымдарын тұтастай алғанда Күн жүйесіне, оның өмір сүруінің барлық аралығы ішінде қолдануға болмайды. Резонанстардың пайда болу шарттары қандай? Ең бастысы - жиіліктердің үйлесімділігі. Резонанстардың екі негізгі түрі бар: объектілердің орташа қозғалыстарының салыстырмалылығына байланысты пайда болатын орташа қозғалыстардың резонансы және көтерілу түйіндерінің бойлықтарының орташа қозғалыстары мен объектілердің перицентрлік аргументтері арасындағы ғасырлық резонанс. Төмен ретті резонанстар жиілік қатынасын алым мен бөлгіштің шағын мәндері бар рационал бөлшек түрінде көрсетуге болатын кезде айқын көрінеді, мысалы, 2/1, 3/1, 3/2, 4/3 және т.б. Резонанстар болған жағдайда динамикалық жүйенің эволюциясы келесідей жүруі мүмкін:
1) Жүйе резонанс арқылы өтеді, бұл жағдайда орбитаның элементтері күрт өзгерістерге ұшырайды, мысалы, эксцентриситеті немесе еңкеюі;
2) Жүйе резонанста тұрып қалады және позициялық элементтермен (бас ось, эксцентриситет, еңкеюі) бірге немесе жеке жеке тербелістерді, кейде біршама үлкен амплитуданы бастан кешіретін қозғалыстың либрациялық режимі бар жаңа күйге өтеді. Осы сценарийлердің кез келгені объектінің жаңа орбитаға өтуіне әкелуі мүмкін. Бұл жағдайда қозғалыс Ляпуновша орнықсыз болады.

Динамикалық жүйенің хаотикалық режимі қалай қалыптасады? Әдетте, хаотикалық қозғалыс тәртібі көршілес резонанстық аймақтардың қабаттасуы нәтижесінде резонанстардың өзара әрекеттесуінің салдары болып табылады.

Бұл жағдайда хаос аймағы қалыптасады, ол жүйенің негізгі динамикалық параметрлері, атап айтқанда, орбитаның позициялық элементтері, олардың мәндерінің өте тез өзгеруімен және жүйенің кейінгі күйімен алдыңғысынан іс жүзінде тәуелсіз сипатталады. Хаотикалық қозғалысты резонанстар болмаған кезде де байқауға болады, мысалы, гравитациялық әсерлесу мен шағын денелердің үлкен планеталарға жақындауы кезінде. Бұл жағдайда, яғни гравитациялық әсерлесу немесе жақындаудан кейін дененің қозғалыс бағыты бастапқы шарттарға тікелей байланысты болады. Екі немесе үш маневрден кейін бір нүктеден басталған денелер айтарлықтай әртүрлі орбиталарда орналасуы мүмкін. Басталу позициясындағы немесе сәтіндегі осындай аздаған айырмашылықтың өзі зерттеу тұрғысынан қарастырғанда әртүрлі соңғы нәтижелерге әкелуі мүмкін.

Сонымен қатар, зерттеулерде көршілес траекториялардың шашырау жылдамдығын талдау үшін Ляпунов уақыты деп аталатын ерекше сипаттама қолданылады. Ол іргелес траекториялар арасындағы қашықтық e есе арта түсетін уақыт аралығын анықтайды. Осындай ең күшті хаотикалық сипаттама Күн жүйесінің кішкентай денелерінде көп байқалады.

Осылайша, ғылымдар қозғалыс орнықтылығының математикалық нақты және дәйекті теориясын құруға Пуанкаре мен Ляпуновқа қарыздар деп айтсақ та болады. Ал қозғалыс орнықтылығы теориясының қазіргі түрін негізінен Арнольд берді, оны Күн жүйесі қозғалыс орнықтылығы мәселесін іс жүзінде шешті деп санайды. Бірақ, математикалық зерттеулердің ең күрделі осындай жоғары нәтижесіне қарамастан, мәселенің түпкілікті шешімі әлі күнге дейін табылды деп айтуға болмайды.

Шынында да, Күн жүйесінің орнықтылығы негізінен классикалық механика шеңберінде қарастырылады, дегенмен жалпы салыстырмалылық теориясы (ЖСТ) Күн жүйесінің қозғалысы мен өзара әрекеттесуін сипаттайтын қазіргі заманғы теория болып саналады.

Жалпы салыстырмалылық теориясында сапалық және жуық зерттеу әдістері ерекше маңызды рөл атқарады. Бұл жалпы салыстырмалық теориясының математикалық аппаратының күрделілігімен және соның нәтижесінде жалпы салыстырмалық теориясының негізгі және басқа теңдеулерінің нақты шешімдерінің көмегімен теорияның маңызды физикалық нәтижелерін алудың мүмкін еместігімен түсіндіріледі.

Денелердің қозғалысының тұрақтылығы мәселесін Жалпы салыстырмалылық теориясында қатаң және дұрыс тұжырымдау классикалық механикаға қарағанда қиынырақ болып шығады. Пайда болған қиындықтар кеңістік-уақыттың Римандық V_4 сипатына байланысты. Бұрын ұйытқыған және ұйытқымаған траекториялардағы нүктелер, егер олар бір уақытта қарастырылса, сәйкес деп саналды. Ал, V_4-де мұндай абсолютті параметр жоқ болғандықтан, қай нүктелер сәйкес деп аталатынын нақты көрсету қажет. Сәйкестендіру әртүрлі жолдармен орнатылуы мүмкін. Сонымен қатар, жанама әсерлер болған жағдайда, вектордың альтернативті нүктеде бір көзқараспен сәйкес келуін талап ететін ұйытқымаған және ұйытқыған траекториялардағы нүктелерде жанама әсерлерді анықтау қажет. Бірақ бұдан V_4 - абсолютті параллелизм пайда бола салмайды, ал тензорлардың параллельді көшіру тәртібі екі жақты (тасымалдау жолына тәуелділік, Леви-Цивита, Ли және т.б. параллель көшіру) жүргізіледі. Сондықтан тензорларға қандай пропорционалды тасымалдану қолданатынымызды әрқашан анықтап алуымыз қажет.

Классикалық механикада әдетте зерттелетін қозғалыстар түрін сипаттайтын нақты дифференциалдық теңдеулер белгілі болса, Жалпы салыстырмалылық теориясында қозғалыстың нақты теңдеулері тек сынақ денелер үшін белгілі. Мысалы олар, геодезия теңдеулері, спині бар бөлшек үшін Папапетру қозғалыс теңдеулері, зарядталған бөлшек үшін қозғалыс теңдеулері және т.б.

Салыстырмалы массалары бар денелер жағдайында қозғалыс орнықтылығы мәселесінің қатаң тұжырымы әлі анық емес, өйткені бұл жағдайда қозғалыстың нақты теңдеулері белгісіз және олар белгілі бір жуықтауда ғана алынған. Салыстырмалы массалық денелер үшін орнықтылық есебін жалпы салыстырмалық теориясында құрастыру келесідей болады. Ілгерілемиелі және айналмалы қозғалыс теңдеулеріндегі релятивистік түзетулер Ньютондық қозғалыс теңдеулеріне қатысты тұрақты ұйытқулар ретінде қарастырылады. Басқаша айтқанда, Ньютон қозғалысының орнықтылығы ЖСТ тұрғысынан (Ньютоннан кейінгі бірінші жуықтау тұрғысынан) анықталады. Денелердің қозғалысының орнықтылығын ЖСТ-ның өзінде, тіпті постньютондық жуықтауда қарастыру, ең болмағанда, постньютоннан кейінгі жуықтауда қозғалыс теңдеулерін меңгеруді талап етеді.

Сонымен, ЖСТ -дағы денелердің қозғалысының орнықтылығы осы уақытқа дейін жеткілікті түрде зерттелмеген. Бұл мәселеге қатысты еңбектер де көп емес.

Сонымен, біз жалпы салыстырмалылық теориясында орнықтылықтың ұйытқулар, яғни релятивистік ұйытқулар тұрақты түрде әсер ететін түрімен айналысамыз. Оның үстіне ЖСТ механикасында қарастырылатын есептердің көпшілігі релятивистік ауытқулардың Ньютон күшімен салыстырғанда аздығына байланысты квазикеплерлік болып табылады. Бұл жағдай ЖСТ-дағы денелердің қозғалысы мәселесінің есептерін және басқа мәселелерін зерттеудің арнайы, оңтайлы, қарапайым әдістерін іздеуге мүмкіндік береді.

Мысал ретінде ЖСТ-дағы денелердің қозғалысының Ляпуновша орнықтылығы мәселесін қарастырайық. Мұндай мәселенің қойылуы 1965 жылы Әбділдин еңбегінде орын алды [1, 2]. Бұл жұмыс Тбилиси, 20-28 сәуір 1965 жылы 2-ші гравитация конференциясында ұсынылды. Бұл есептің маңыздылығы А.Траутманның шолуында (УФН, 89 том, 1, 4, 1966 ж.) атап өтілді. Енді осы жұмыстың маңызды тұстарын атап өтетін болсақ, олар келесідей болып табылады:

- ЖСТ-дағы денелердің қозғалысы мәселесінде оның Ляпуновша орнықтылығы көтерілді;
- Ляпуновша орнықтылық орбитаның векторлық элементтеріне $\vec{M}$ (импульс моменті) және $\vec{A}$ (Лаплас векторы) қатысты қарастырылады.

Бұл векторлар кеплер қозғалысы үшін сақталады. ЖСТ механикасында релятивистік ұйытқулар болған жағдайда $\vec{M}$ және $\vec{A}$ векторлары баяу өзгереді де және осы векторларға тәуелді қозғалыс теңдеулері пайда болады.

Осы жұмыстан кейін 1967 жылдан бастап ЖСТ-дағы қозғалыстың Ляпуновша орнықтылығы идеясын К.А. Пирагас жүйелі түрде зерттеді [3,4,5]. Ляпунов әдісін ЖСТ есептеріне қолдануда 1971 жылы басталған А.П. Рябушконың зерттеулері үлкен үлес қосты [6,7,8].

Дегенмен Пирагас пен Рябушконың жұмыстары координаталық түрде жасалды, сондықтан есептердің қозғалыс теңдеулері мен қозғалыс орнықтылығы мәселелерін зерттеу өте ауқымды болды және аса тиімділік байқалмады. Әрине, бұл ЖСТ-дағы денелер қозғалысының релятивистік теңдеулерін табудың бізге белгілі жағдайын еске түсіреді. ЖСТ-дағы денелердің қозғалысы мәселесін зерттеудің бастапқы кезеңінде Эйнштейннің гравитациялық теңдеулерінен денелердің қозғалыс теңдеулерін шығаруға арналған Эйнштейн-Инфельд-Гофман әдісі (ЕІН әдісі) [9] болды. Есептеулердің соншалықты ауқымды болғанын, авторлар зерттеулерге қажетті материалдарды алу үшін АҚШ-тағы Принстон университетінің мұрағатында сақталған жұмыстың қолжазбасына жүгінуді жөн көрді. Сол кезеңдерде Фок өзінің алғашқы әдісін [10] жасап, оның нәтижелерін, бірақ бұл жұмыста та өте ауқымды болса да, баспа түрінде жариялап үлгерген болатын. Кейіннен Фок өзінің екінші әдісін жасап шығарды және мұнда жүргізілген есептеулер белгілі бір дәрежеде жеңілдетілді [11].

Қазіргі уақытта жалпы салыстырмалық теориясындағы дене қозғалысы мәселесінің бірқатар негізгі есептерән зерттеу үшін Эйнштейннің гравитациялық өріс теңдеулерінен дене қозғалысының релятивистік теңдеулерін қорытып шығару ережесі қажет емес екені жалпы түсінікті болды. Яғни, аралдық массалар жүйесіне арналған бірінші Фок жуықтауының нақтыланған метрикасын білу жеткілікті және қозғалыстың қажетті релятивистік теңдеулерін автоматты түрде жазуға болады [12,13].

Салыстырмалылық теориясы — физикалық процестердің кеңістік-уақыттық қасиеттерін зерттейтін теория.

20-ғасырдың басында Альберт Эйнштейннің жасаған жалпы салыстырмалылық теориясы (ЖСТ) деп те аталатын Гравитация теориясы (GT) біздің гравитация, кеңістік пен уақытты түсінуімізге зор ықпал етті. Гравитацияны зерттеу тарихы ежелгі гректерден бастап көптеген ғасырларға созылады, бірақ ең маңызды жетістікті 17-ғасырда Исаак Ньютон жасады. Ньютон бүкіл әлемдік тартылыс заңын: Әлемдегі әрбір дене басқа денелерге олардың массасына пропорционал және олардың арасындағы қашықтықтың квадратына кері пропорционал күшпен тартылады деп тұжырымдады. Бұл теория қалыпты жағдайда жақсы жұмыс істейді деп есептегенмен, бірақ ол гравитациялық өрістердегі жарықтың шағылуы және сынуы сияқты кейбір физикалық құбылыстарды түсіндіре алмады.

Сондай-ақ, салыстырмалық принципі оптика мен физикаға және физикалық басқа салаларына қатысты екендігі белгілі болды. Салыстырмалық принципі өзінің мәнін кеңейтіп, мынадай анықтамаға ие болды: оқшауланған материалдық жүйеде кез келген процесс бірдей жүреді, және ол жүйе бір қалыпты түзу сызықты қозғалыс жағдайында болуы керек. Немесе физиканың заңдары барлық инертті жүйелерде бірдей формаға ие.

Бір инертті жүйеден келесіге ауысу Лоренц қайта өзгертулері арқылы жүзеге асырылады. Бірақ жарық жылдамдығы тұрақтылығы туралы мәліметтер қайтадан жаңа түсініктерді қажет ететін мәселелерге әкеліп тіреді. 1904 жылы Х. Лоренц қозғалыстағы дене өзінің қозғалыс бағыты бойынша қысқаратындығын және әртүрлі жүйелерде байқалатын уақыт аралықтары өлшенетінін айтты. Бірақ, келесі жылы А.Эйнштейн Лоренц қайта құруларындағы байқалатын уақытты нақты уақыт ретінде қарастырды.

Кеңістік-уақыт метрикасы

ЖСТ-да гравитацияны сипаттау үшін кеңістік-уақыттың масса мен энергияның әсерінен қалай қисық болатынын анықтайтын кеңістік-уақыт метрикасының тұжырымдамасы қолданылады. Метрика $g_{\mu\nu}$ символымен белгіленеді, мұндағы μ және ν индексі 0-ден 3-ке дейінгі мәндерді қабылдайды (өйткені бізде төрт өлшем бар: үшеуі кеңістіктік және бір уақыт бойынша). Сондай-ақ $g_{\mu\nu}$ метрикасы кеңістік-уақыттың әр нүктеде қалай қисаятыны туралы ақпаратты қамтиды. Жазық кеңістік-уақыт үшін (гравитациялық өріссіз) метрика диагональды матрицаның пішініне ие, онда барлық элементтері -1-ге (уақыт өлшемі үшін) және 1-ге (кеңістік өлшемдері үшін) тең болады:

$$g_{\mu\nu} = \begin{vmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \tag{1}$$

Эйнштейн теңдеулері

ЖСТ Эйнштейн теңдеулеріне негізделген, олар $g_{\mu\nu}$ метрикасын масса мен энергияның кеңістік-уақытта таралуымен байланыстырады. Эйнштейн теңдеулері былай жазылады:

$$G_{\mu\nu} = 8\,\pi T_{\mu\nu} \tag{2}$$

Мұндағы:

$G_{\mu\nu}$ – метрикаға және оның туындыларына тәуелді Эйнштейн тензоры;

$T_{\mu\nu}$ – масса мен энергияның кеңістік-уақыттағы таралуын сипаттайтын энергия-импульстік тензоры. Эйнштейн теңдеулері масса мен энергияның кеңістік-уақытты қалай қисайтатынын және қисайған кеңістік-уақыттың гравитация әсерінен заттардың қозғалысына қалай әсер ететінін сипаттайды.

БІРІНШІ ЖУЫҚТАУ РЕТІНДЕ КЕҢЕЙТІЛГЕН МЕТРИКА

Енді «бірінші жуықтау ретінде кеңейтілген метрика» тұжырымдамасына көшейік. Бұл $g_{\mu\nu}$ метриканы гравитациялық өрістер әлсіз болған жағдайларда жуықтау үшін пайдаланылады. Бірінші жуықтау ретінде біз гравитациялық әсерлер аз және сызықтық жуықтаулар арқылы сипатталуы мүмкін деп есептейміз. Сондай-ақ кеңейтілген $g_{\mu\nu}$ метриканы бірінші жуықтауда «фондық метриканың» (гравитациясыз жазық кеңістік-уақытты сипаттайтын) және гравитацияға байланысты түзетулердің қосындысы ретінде жаза аламыз:

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu} \tag{3}$$

Мұндағы:
$\eta_{\mu\nu}$ – жазық кеңістік-уақытты сипаттайтын фондық метрика болып табылады;
$h_{\mu\nu}$ – гравитациялық қисықтықтарды сипаттайтын түзету (метрикалық бұзылу тензоры).
Енді $\eta_{\mu\nu}$ үшін бірінші жуықтау теңдеулерін алу үшін (2) Эйнштейн теңдеулерін пайдалана аламыз және мұндағы $G_{\mu\nu}$ –ны кеңейтілген $g_{\mu\nu}$ метрикасынан табуға болады, ал $T_{\mu\nu}$ болса берілген жүйедегі масса және энергияны сипаттайтынын еске ала кетейік.

Бірінші жуықтау ретінде кеңейтілген метриканың маңызды аспектісі гравитациялық толқындар болып табылады. Егер Эйнштейн теңдеулеріндегі сызықтық жуықтауларды қарастырсақ, олар гравитациялық толқындардың кеңістікте таралуын сипаттайтынын көреміз. Бұл толқындар жарық жылдамдығымен таралатын және заттардың қозғалысына әсер ететін метрикадағы кішкентай ауытқулар болып табылады. ЖСТ механикасындағы кеңейтілген бірінші жуықтау метрикасы әлсіз жағдайларда гравитациялық өрістерді талдаудың қуатты құралы болып табылады. Ол сызықтық әдістерді қолдана отырып, гравитациялық толқындар сияқты гравитациялық әсерлерді жуықтап, талдауға мүмкіндік береді. Бұл қазіргі физикадағы іргелі ұғым және тартылыс күші мен кеңістік уақыт құрылымын түсінуімізде маңызды рөл атқарады.

Қолданылған әдебиет

1. Фок В.А. Теория пространства, времени и тяготения. М.: Физматгиз, 1961.564 с.
2. Фок В.А. Квантовая физика и философские проблемы // Физическая наука и философия. М.: Наука, 1973. С. 55-77.
3. Владимиров Ю.С. Реляционная теория пространства-времени и взаимодействий. Ч. 1. Теория систем отношений. М.: Изд-во МГУ, 1996. 264 с.
4. Владимиров Ю.С. Реляционная теория пространства-времени и взаимодействий. Ч. 2. Теория физических взаимодействий. М.: Изд-во МГУ, 1998. 448 с.