

## **Гравитациялық толқындар**

**Дәрістің мақсаты** – Гравитациялық толқындардың табиғаты мен пайда болуын, Эйнштейннің жалпы салыстырмалылық теориясымен байланысын түсіндіру.

### **Дәрістің жоспары:**

1. Гравитациялық толқындардың қасиеттері.
2. Әлемнің құрылымын қалыптастырудағы гравитациялық толқындардың рөлі.
3. Гравитациялық толқындардың галактикалар мен жұлдыздардың пайда болуына әсері.
4. Гравитациялық толқындарды анықтау және зерттеу.
5. Эксперименталды дәлелденуі.

### **Гравитациялық толқындардың қасиеттері**

Гравитациялық толқындар – жарық жылдамдығымен таралатын кеңістік-уақыттың тербелісі. Олар жұлдыздар, планеталар немесе қара құрдымдар сияқты массивті объектілердің қозғалысы нәтижесінде пайда болады. Гравитациялық толқындар Альберт Эйнштейннің болжаған жалпы салыстырмалылық теориясының (ЖСТ) нәтижесі болып табылады [1].

Гравитациялық толқындарды алғаш рет 2015 жылдың қыркүйегінде LIGO обсерваториясының екі детекторы тікелей анықтады, олар екі қара құрдымның бірігуінен және бір үлкен айналмалы қара құрдымның пайда болуынан туындаған Гравитациялық толқындарды тіркеді. Олардың бар екендігі туралы жанама дәлелдер 1970 жылдардан бері белгілі болған [1, 2].

Гравитациялық толқындар оларды басқа толқын түрлерінен ажырататын қасиеттерге ие. Ауаны немесе басқа ортаны қажет ететін дыбыс толқындарынан айырмашылығы, олардың таралуы үшін орта қажет емес [3]. Олар сондай-ақ беттерге сіңіп кетуі немесе шағылысуы мүмкін жарық толқындарынан айырмашылығы, ауытқусыз немесе жұтылмай кез келген кедергілерден өте алады.

Әр түрлі теориялар гравитациялық толқындардың таралу жылдамдығын әр түрлі болжайды. Жалпы салыстырмалылықта ол жарық жылдамдығына тең (сызықтық жуықтауда) деп, ал басқа гравитациялық теорияларда ол кез-келген мәнгерді, соның ішінде шексіздікке дейін қабылдай алады деп болжанады. Гравитациялық толқындардың алғашқы тіркелуіне сәйкес олардың дисперсиясы массасыз гравитонмен үйлесімді болып шықты және жылдамдық жарық жылдамдығына тең деп бағаланды. LIGO эксперименттерінің нәтижелері бойынша 90% ықтималдығы бар гравитациялық толқындардың жылдамдық шектері 0,55-тен 1,42 жарық жылдамдығына дейін жетеді деп тұжырымдады.

Гравитациялық толқындарды лазерлік интерферометрлер сияқты арнайы құралдардың көмегімен анықтауға және өлшеуге болады. Бұл құрылғылар гравитациялық толқындардың өтуінен туындаған жарық сәулесінің

ұзындығының өзгеруін өлшейді. Гравитациялық толқындарды зерттеу ғалымдарға Әлемде болып жатқан физикалық процестерді жақсы түсінуге және гравитациялық күш пен кеңістік-уақыт құрылымы туралы түсінікті кеңейтуге мүмкіндік береді.

Жалпы салыстырмалылық теориясының шеңберінде гравитациялық толқындар Эйнштейннің толқындық типтегі теңдеулерінің шешімдерімен сипатталады [4], олар жарық жылдамдығымен қозғалатын (сызықтық жуықтауда) кеңістік-уақыт метрикасының қисаюын көрсетеді. Бұл бұзылыстың көрінісі, атап айтқанда, екі еркін қозғалатын (яғни, ешқандай күш әсер етпейтін) сынақ массалары арасындағы қашықтықтың мерзімді өзгеруі болуы керек. Гравитациялық толқынның  $h$  амплитудасы-өлшемсіз шама-қашықтықтың салыстырмалы өзгеруін көрсетеді. Күн жүйесіндегі өлшеулер кезінде астрофизикалық объектілерден (мысалы, компакт қос жүйелерден) және құбылыстардан (аса жаңа жұлдыздың жарылыстары, нейтрондық жұлдыздардың бірігуі, жұлдыздардың қара құрдыммен жұтылуы және т.б.) гравитациялық толқындардың болжамды максималды амплитудасы өте аз ( $h = 10^{-18} - 10^{-23}$ ). Әлсіз (сызықтық) гравитациялық толқын жалпы салыстырмалылық теориясы бойынша энергия мен импульсті тасымалдайды, жарық жылдамдығымен қозғалады, көлденең, квадруполды болып табылады.

### **Әлемнің құрылымын қалыптастырудағы гравитациялық толқындардың рөлі**

Гравитациялық толқындар Әлемнің құрылымын қалыптастыруда маңызды рөл атқарады. Олар кеңістіктің сығылуы және кеңеюі сияқты жаппай қозғалыстардан туындайды. Бұл толқындар энергия мен Әлемдегі объектілер арасындағы гравитациялық өзара әрекеттесу туралы ақпаратты береді.

Гравитациялық толқындар қатысатын негізгі процестердің бірі- галактикалар мен жұлдыздардың пайда болуы. Әлемнің дамуының бастапқы кезеңінде, оның құрылымы енді қалыптаса бастаған кезде, гравитациялық толқындар материяның сығылуы мен шоғырлануында шешуші рөл атқарды. Олар газ бен шаңның жеке аймақтарын галактикалар мен жұлдыздар сияқты үлкен құрылымдарға біріктіруге көмектесті.

Гравитациялық толқындар Әлемдегі қараңғы материяның таралуына да әсер етеді. Қараңғы материя – электромагниттік сәулеленумен әрекеттеспейтін және тікелей байқалмайтын заттың белгісіз түрі. Алайда, ол көрінетін материяға гравитациялық әсер етеді және гравитациялық толқындар қараңғы материяны галактикалар мен басқа да ірі құрылымдардың айналасына таратуға көмектеседі.

Сонымен қатар, гравитациялық толқындарды ерте Әлемді және оның эволюциясын зерттеу үшін қолдануға болады. Гравитациялық толқындарды өлшеу және талдау ғалымдарға бақылаудың басқа әдістері тиімсіз немесе мүмкін болмаған кезде Әлемнің дамуының алғашқы кезеңдерінде болатын процестер туралы ақпарат алуға мүмкіндік береді. Осылайша, гравитациялық толқындар галактикаларды, жұлдыздарды және қараңғы материяның таралуын қоса алғанда, Әлемнің құрылымын қалыптастыруда маңызды рөл атқарады. Бұл толқындарды зерттеу ғалымдарға Әлемде болып жатқан процестерді және оның

эволюциясын жақсы түсінуге, сондай-ақ астрофизика мен космология туралы білімімізді кеңейтуге мүмкіндік береді.

### **Гравитациялық толқындардың галактикалар мен жұлдыздардың пайда болуына әсері**

Гравитациялық толқындар галактикалар мен жұлдыздардың құрылымында және эволюциясында маңызды рөл атқарады. Бұл толқындар жоғары жылдамдықпен қозғалатын немесе бір-бірімен әрекеттесетін қара құрдымдар немесе қос жұлдыздар сияқты объектілердің нәтижесінде пайда болады.

Гравитациялық толқындар галактика немесе жұлдыз арқылы өткенде, олар кеңістік-уақыттың деформациясын тудырады, бұл олардың пішіні мен қозғалысының өзгеруіне әкеледі. Бұл алыс объектілердің жарығын күшейтетін немесе бұрмалайтын гравитациялық линзалар деп аталатын тығыз аймақтарға әкелуі мүмкін.

Гравитациялық толқындар галактикалар мен жұлдыздар ішінде тербелістер мен вибрацияларды тудыруы мүмкін. Бұл тербелістер жаңа жұлдыздардың пайда болуына, сондай-ақ олардың эволюциясы мен өмірлік цикліне әсер етуі мүмкін. Мысалы, гравитациялық толқындар жұлдызаралық бұлттарда газ бен шаңның сығылуын тудыруы мүмкін, бұл өз кезегінде жаңа жұлдыздардың пайда болуына ықпал етеді.

Сонымен қатар, гравитациялық толқындар галактикалар ішіндегі жұлдыздардың қозғалысына да әсер етуі мүмкін. Олар галактикалық дискілердің ішінде тербелістер мен деформацияларды тудырады, бұл спиральды “қолдар” мен басқа құрылымдардың пайда болуына әкелуі мүмкін. Бұл құрылымдар өз кезегінде жұлдыздардың қозғалысына және жаңа жұлдыздық жүйелердің қалыптасуына әсер етеді.

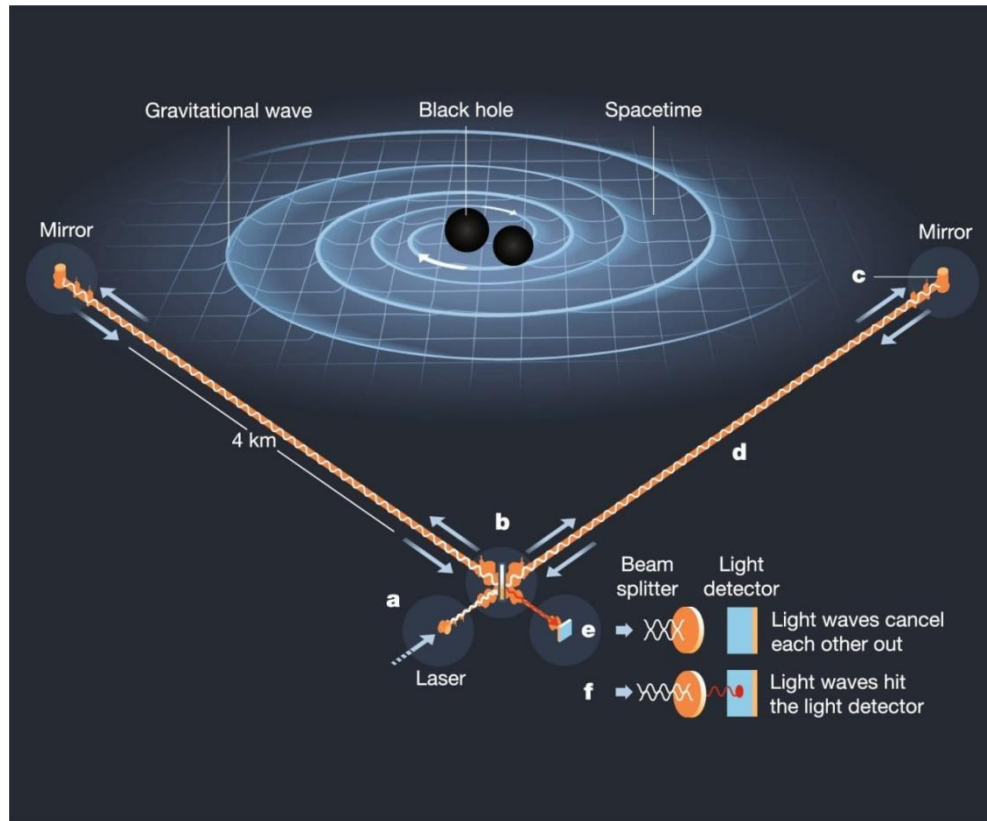
### **Гравитациялық толқындарды анықтау және зерттеу**

Гравитациялық толқындарды тіркеу олардың әлсіздігіне байланысты өте күрделі мәселе (метриканың шамалы бұрмалануы). Оларды тіркеуге арналған аспаптар гравитациялық толқын детекторлары болып табылады. Гравитациялық толқындарды анықтау әрекеттері 1960 жылдардың аяғынан бастап жүргізіліп келеді. Амплитудамен анықталатын гравитациялық толқындары қос пульсардың коллапсы кезінде пайда болады. Мұндай оқиғалар біздің галактиканың айналасында шамамен он жылда бір рет болады.

ЖСТ гравитациялық толқындардың сәулеленуіне энергияның жоғалуына байланысты қос жұлдыздардың өзара айналуының үдеуін болжайды және бұл әсер бірнеше белгілі қос жүйелерде (атап айтқанда, компактты серіктері бар пульсарларда) сенімді түрде бекітілген [4]. 1993 жылы PSR B1913+16 бірінші қос пульсарының ашушылары Рассел Халс пен кіші Джозеф Тейлорға "гравитацияны зерттеуге жаңа мүмкіндіктер берген пульсарлардың жаңа түрін ашқаны үшін" физика бойынша Нобель сыйлығы берілді. Бұл жүйеде байқалған айналу үдеуі гравитациялық толқындардың сәулеленуіне арналған ЖСТ болжамдарымен толығымен сәйкес келеді.

Гравитациялық толқындарды анықтаудың бір әдісі – лазерлік интерферометрлерді қолдану. Бұл құрылғылар айналардан шағылысатын және қайтадан түйсетін екі перпендикуляр лазер сәулесінен тұрады (Сурет-1). Егер

гравитациялық толқын интерферометр арқылы өтсе, ол сәулелердің бірінің ұзындығының өзгеруіне әкеледі, бұл интерференциялық кескіннің өзгеруіне әкеледі. Осылайша, гравитациялық толқынды тіркеп, анықтауға болады.



Сурет-1. Лазерлік интерферометр.

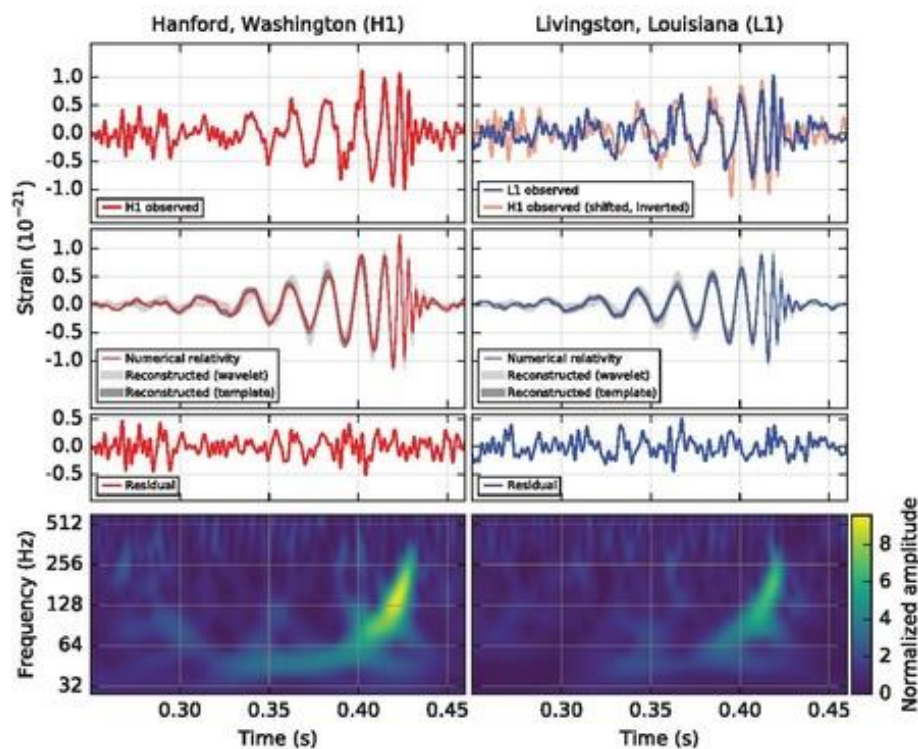
Гравитациялық толқындарды анықтаудың тағы бір әдісі – пульсарларды қолдану. Пульсарлар – радио толқындарының тұрақты импульстарын шығаратын жылдам айналатын нейтрондық жұлдыздар. Егер гравитациялық толқын пульсардың жанынан өтсе, ол импульстардың келу уақытының өзгеруіне әкеледі, оны радиотелескоптармен тіркеуге болады [2].

Гравитациялық толқындарды зерттеу ғалымдарға сол гравитациялық толқынның көздері болып табылатын массивті нысандардың массасы мен қозғалыс жылдамдығы туралы ақпарат алуға мүмкіндік береді. Мысалы, гравитациялық толқындардың көмегімен кара құрдымдардың немесе нейтрондық жұлдыздардың бірігуін анықтауға және олардың массасы мен айналу жылдамдығын өлшеуге болады.

### Эксперименталды дәлелденуі

2016 жылдың 11 ақпанында LIGO және VIRGO обсерваторияларының ғалымдары алғаш рет гравитациялық толқындардың эксперименттік түрде анықталғанын жариялады. Амплитудасы шамамен  $10^{-21}$  болатын екі кара құрдымның бірігу сигналы 2015 жылдың 14 қыркүйегінде UTC 9:51-де Ханфорд пен Ливингстондағы екі LIGO детекторымен бір-бірінен 7 миллисекундтан кейін, сигналдың максималды амплитудасы (0,2 секунд) аймағында тіркелді, біріктірілген сигнал/шу қатынасы 24:1-ге тең болды. Бұл

сигнал GW150914 деп белгіленді. Сигналдың формасы – массалары 36 және 29 Күн массасына тең екі қара құрдымның бірігуі үшін жалпы салыстырмалылық теориясының болжамымен сәйкес келеді. Пайда болған қара құрдымның массасы 62 Күн массасына тең болуы және айналу параметрі  $a = 0,67$  керек. Көзге дейінгі қашықтық шамамен 1,3 миллиард жарық жылы. Бірігу кезінде секундтың оннан бір бөлігінде сәулеленген энергия шамамен 3 Күн массасына тең.



Сурет-2. Бірінші тіркелген гравитациялық-толқындық сигнал. Сол жақта Ханфордтағы (H1) детектордан, оң жақта Ливингстонда (L1) деректер бар.

#### Әдебиеттер тізімі:

1. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория поля. — Издание 7-е, исправленное. — М.: Наука, 1988. — 512 с.
2. Мизнер Ч., Торн К., Уилер Дж. Гравитация. — М.: Мир, 1977. — Т. 3. — С. 218. — 510 с.
3. Рис М., Руффини Р., Уилер Дж. Чёрные дыры, гравитационные волны и космология. М.: Мир, 1977
4. Эйнштейн А.. О гравитационных волнах. 1937 : [пер. с англ.] // Собрание научных трудов. — М. : Наука, 1965. — Т. 2. — С. 438—449.