

## Дәріс 8

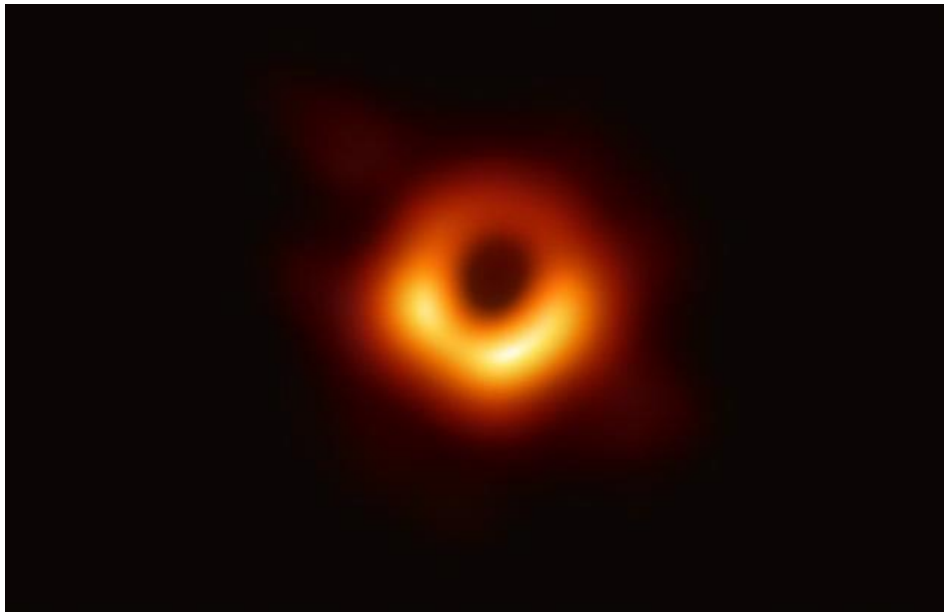
### Қара құрдымдар

#### Дәрістің жоспары:

1. Қара құрдымдар идеясының тарихы
2. Қара құрдымдардың термодинамикасы
3. Қара құрдымдарға дискінің жиналуы
4. Қара құрдымның сәулеленуі
5. Әдебиеттер тізімі

Шамамен 30 жыл бұрын, өте аз ғана ғалымдар қара құрдымдардың болуын шынымен мүмкін деп санады. Нейтрондық жұлдыздар ашылғаннан кейін назар қара құрдым гипотезасына аударылды. Көптеген астрофизиктер қара құрдымдар тек аса жаңа жұлдыздардың қалдықтарында ғана емес, галактикалық ядролар мен квазарларда да табуға болады деген қорытындыға келді.

Қара құрдымдар денелер де, сәулелер де емес. Қара құрдымдардың табиғатын зерттеу кеңістік пен уақыттың іргелі қасиеттері туралы білімімізді айтарлықтай кеңейте алады. Физикалық вакуум құрылымының ең күрделі қасиеттері кванттық процестер пайда болатын қара құрдымдар жақын жерде пайда болады. Одан да күшті кванттық процестер қара құрдымның ішінде жүреді.



3-сурет. Қара құрдымның алғаш алынған суреті [1]

**Қара құрдым** – тіпті жарықтың осы аймақты тастап, шексіздікке баруына мүмкіндік бермейтін гравитациялық өрісі күшті кеңістік-уақыт аймағы.

Қара құрдым массасы  $M$  денені гравитациялық радиус деп аталатын өлшемнен кіші өлшемге сығылғанда пайда болады – мәні  $r_g = 2GM/c^2$ . ( $G$  – Ньютонның гравитациялық тұрақтысы,  $c$  – жарық жылдамдығы). Қара құрдымның шегінен шексіздікке ұшып кету үшін қажетті жылдамдық (екінші ғарыш жылдамдығы) – жарық жылдамдығына тең. Егер жарық жылдамдығы

физикалық сигналдардың таралу жылдамдығының шегі екенін ескерсек, онда қара құрдым ішінде жатқан аймақтан сигналдар мен бөлшектердің шығуы мүмкін емес деген қорытындыға келуге болады.

### **Қара құрдымдар идеясының тарихы**

Ағылшын геофизигі және астрономы Джон Митчелл (Дж. Мишелл, 1724–1793) табиғатта тіпті жарық сәулесі де олардың бетінен шыға алмайтындай массивті жұлдыздар болуы мүмкін деген болжам жасады. Ньютон заңдарын пайдалана отырып, Митчелл Күннің массасы бар жұлдыздың радиусы 3 км-ден аспайтын болса, онда тіпті жарық бөлшектері де (ол Ньютоннан кейін оны корпускулалар деп санаған) мұндай жұлдыздан алысқа ұша алмайтынын есептеді. жұлдыз. Сондықтан мұндай жұлдыз алыстан мүлде қараңғы болып көрінетін еді. Митчелл бұл идеяны 1783 жылы 27 қарашада Лондон корольдік қоғамының жиналысында ұсынды. Осылайша «Ньютондық» қара құрдым тұжырымдамасы дүниеге келді.

Дәл осындай ойды француз математигі және астрономы Пьер Лаплас «Әлем жүйесі» (1796) кітабында да айтқан. Қарапайым есеп оған былай деп жазуға мүмкіндік берді: «Тығыздығы Жердікіне тең, ал диаметрі Күннің диаметрінен 250 есе үлкен жарық жұлдызы тартылыс күшіне байланысты бізге бірде-бір жарық сәулесінің түсуіне жол бермейді; Сондықтан ғаламдағы ең жарық аспан денелері осы себепті көрінбейтін болып шығуы мүмкін». Алайда мұндай жұлдыздың массасы Күндікінен ондаған миллион есе артық болуы керек еді. Әрі қарай астрономиялық өлшеулер нақты жұлдыздардың массалары Күндікінен айтарлықтай ерекшеленбейтінін көрсеткендіктен, Митчелл мен Лапластың қара құрдымдар туралы идеясы ұмытылды.

Ғалымдар екінші рет қара құрдым мәселесімен 1916 жылы неміс астрономы Карл Шварцшильд гравитацияның релятивистік теориясының, жалпы салыстырмалылық теориясының теңдеулерінің алғашқы дәл шешімін алған кезде соқтығысты. Массивті нүктенің айналасындағы бос кеңістік одан  $r_g$  қашықтықта ерекшелікке ие болатыны анықталды; Сондықтан  $r_g$  мәні жиі «Шварцшильд радиусы», ал сәйкес бет (оқиға көкжиегі) – Шварцшильд беті деп аталады. Келесі жарты ғасырда теоретиктер Шварцшильд шешімінің көптеген таңқаларлық ерекшеліктерін ашты, бірақ қара құрдымдар әлі нақты зерттеу нысаны ретінде қарастырылмады.

1934 жылы АҚШ-та жұмыс істейтін еуропалық астрономдар Фриц Цвики мен Уолтер Бааде аса жаңа жұлдыздардың жарылыстары – жұлдыз ядросының апатты сығылуынан туындаған жұлдыздық жарылыстың өте ерекше түрі деген гипотезаны алға тартты. Жұлдыздың құлдырауын байқау мүмкіндігі туралы идея осылай пайда болды. Бааде мен Цвики аса жаңа жұлдыздың жарылысының нәтижесінде нейтрондардан тұратын өте тығыз дегенерацияланған жұлдыз пайда болады деп болжады.

1939 жылы американдық физиктер Роберт Оппенгеймер мен Хартланд Снайдер массивті жұлдыздың ядросы үздіксіз өте кішкентай нысанға құлап отыруы керек деген қорытындыны негіздеді, оның айналасындағы кеңістіктің қасиеттері (егер ол айналмаса) Шварцшильд шешімімен сипатталады. Басқаша айтқанда, эволюциясының соңында массивті жұлдыздың ядросы тез сығылып, қара құрдымға айналуы керек. Бірақ мұндай нысан (ол кезде оны «құлаған»

немесе «қатқан жұлдыз» деп атаған) электромагниттік толқындар шығармайтындықтан, астрономдар оны ғарышта табу өте қиын болатынын түсінді, сондықтан ұзақ уақыт бойы іздеуді бастамады.

Оқиғалар көкжиегінен ешбір ақпарат тасымалдаушы шыға алмайтындықтан, қара құрдымның ішкі бөлігі Әлемнің қалған бөлігімен себепті байланысы жоқ, ал қара құрдым ішінде болып жатқан физикалық процестер оның сыртындағы процестерге әсер ете алмайды. Сонымен қатар сырттан қара құрдымға түсетін материя пен радиация көкжиек арқылы ішіне еркін енеді. Қара құрдым айналасынан өткен барлық материяны (бөлшекті) жұтып, ештеңені шығармайды деп айтуға болады. Осы себепті 1967 жылы американдық физик Джон Арчибалд Уилер ұсынған «қара құрдым» термині дүниеге келді.

Қара құрдымды сипаттау үшін Эйнштейннің гравитация теориясын - жалпы салыстырмалық теориясын (ЖСТ) толық пайдалану қажет. Жалпы салыстырмалық теориясы Әлемде қара құрдымдардың бар екенін дәлелдемейді, өйткені бұл теория қара құрдымдардың пайда болуын астрофизикалық тұрғыдан сипаттамайды.

Пайда болғаннан кейін қысқа уақыттан кейін кез келген қара құрдым стационар болады және оның гравитациялық өрісі кейбір параметрлермен: оның массасы мен бұрыштық импульсімен, сондай-ақ электр зарядының мәнімен ерекшеленетіні белгілі болды.

Сигналдар қара құрдымнан шыға алмайтындықтан және оған физикалық денелер мен радиация түсуі мүмкін болғандықтан, қара құрдымның беті мембрананың бір түрі рөлін атқарады, ал *оқиғалар көкжиегі* деп аталатын кеңістік-уақыттағы қара құрдымның шекарасы жарық беті болып табылады. Қара құрдымның пайда болуы кеңістік-уақыттағы ерекше құрылымның пайда болуын білдіреді. Қара құрдымдардың физикалық өрістермен және заттармен, сондай-ақ бір-бірімен өзара әрекеттесуін зерттеу жаңа әдістерді ойлап табуды талап етті.

Қарапайым қара құрдымның электр заряды жоқ (жалпы алғанда, қара құрдым үш параметрге ие болуы мүмкін: масса, айналуы және электр зарядын сипаттайтын параметр). Масса көкжиек өлшемін анықтауға мүмкіндік береді:

$$R_g = \frac{2GM}{c^2} \approx 2.95 \text{ км} \frac{M}{M_\odot}$$

Массивті жұлдыздардан пайда болатын жұлдыздық қара құрдымдардан типтік массалары бірнеше күн массалары болып табылады; сәйкесінше, жұлдыздан пайда болған қара тесіктің типтік өлшемі 10-15 километр радиуста болады.

Астрофизикалық тұрғыдан қара құрдымдардың бірнеше түрі бар, олардың екеуі нағыз және екеуі гипотетикалық. Ең әйгілі жұлдыздық-массалық қара құрдымдар, олар массивті жұлдыздардан ядроларының ыдырауы нәтижесінде пайда болады. 3 күн массасынан бастап, мұндай қара құрдымдар пайда болуы мүмкін. Қазіргі уақытта массасы 15-20 күн массасынан асатын қара құрдымдар галактикада сирек пайда болуы керек. Қара құрдымның екінші түрі – аса массивті қара құрдымдар. Олар галактикалардың орталық аймақтарында кездеседі және массасы ондаған мың күн массасынан миллиардтаған күн массасына дейін өте үлкен диапазонда болуы мүмкін.

Қара құрдымның пайда болуы кезінде миллиондаған жұлдыздардың энергиясымен салыстыруға болатын орасан зор энергия бөлінеді. Бұл саңылаулар арқылы қысқа толқын ұзындығы бар жарық толқындарының шығарылуына байланысты. Бұл факт қара тесіктерді энергия көзі ретінде қарастыруға мүмкіндік береді.

Қара құрдымдардың тағы екі түрі бар, бірақ қазірде олардың бар екені нақты емес.

Біріншісі, бұл ерте Әлемде пайда болған алғашқы қара құрдымдар. Алғашқы қара құрдымдар – бұл Үлкен Жарылыстан кейін, Әлемнің алғашқы кезеңдерінде пайда болған деп есептелетін гипотетикалық нысандар. Бұл қара құрдымдар ертеде тығыз материядан тұратын массивті бұлттардың құлауынан пайда болған деп саналады.

Алғашқы қара құрдымдардың пайда болуына ықпал етуі мүмкін өте жоғары энергия мазмұны мен материя тығыздығы болды. Осы сәтте қара құрдымдардың пайда болуына әкелетін газ және шаң бұлттарының гравитациялық құлауы сияқты қарқынды процестер болды.

Дегенмен, мұндай алғашқы қара құрдымдардың құрылымы мен қасиеттері теориялық зерттеу нысаны болып қала береді. Олар ғаламның ең ерте кезеңдерінде пайда болғандықтан, олар бұрынғы қалпында өмір сүруін жалғастыру үшін тым массивті болған. Әлемнің эволюциясы кезінде олар басқа қара құрдымдармен қосылуы немесе олардың сипаттамаларының өзгеруіне әкелетін басқа процестерге ұшырауы мүмкін.

*Алғашқы қара құрдымдардың* бар екендігі туралы тікелей дәлелдер болмаса да, олар космология және жалпы салыстырмалылық шеңберіндегі теориялық зерттеулер үшін қызықты тақырып болып қала береді.

Қара құрдымның массасы неғұрлым аз болса, соғұрлым ол тезірек буланады. Қара құрдымның массасы неғұрлым аз болса, радиусы соғұрлым аз болады, көкжиекке жақын кеңістіктің қисықтығы соғұрлым күшті болады және кеңістікті неғұрлым көп жасырсаңыз, Хокинг механизмі соғұрлым тиімдірек жұмыс істейді және егер механизм болса, ең жеңіл алғашқы қара құрдымдар буланып кетуі керек еді. жұмыс істейді, ал массасы  $10^{15}$  граммнан асатын қара құрдымдар болса, мұндай қара құрдымдар буланып кетуі керек және олардың жарқылын көру қызықты болар еді, бұл қара құрдымдардың бар екендігінің нақты дәлелі болар еді.

Ал жұлдызды массалық қара құрдым мен аса массивті қара құрдымдардың арасындағы аралық массалық *аралық* деп аталатын қара құрдым бар.

### **Қара құрдымдардың термодинамикасы**

Бастапқыда Дж.Уилер қара құрдымдардың болуы термодинамиканың екінші заңына қайшы келетінін атап өтті. Өйткені жүйенің кездейсоқтығы (энтропия) уақыт өткен сайын артады немесе өзгеріссіз қалады. Ал денелердің классикалық теория шеңберінде құлауын, дене энтропиясы қайда және қалай жойылатынын түсіндіру мүмкін болмады. Дегенмен, Хокинг сәулеленуінің ашылуы дененің тек энергия мен массаны ғана емес, сонымен бірге оның энтропиясын да қара құрдымға тасымалдайтынын түсіндіруге мүмкіндік берді. Қара құрдымдардың энтропиясын келесі формула бойынша есептеуге болады:

$$S = \frac{Akc^3}{4\hbar G}$$

Мұндағы  $A$  – оқиға көкжиегінің ауданы;

$\hbar$  – келтірілген Планк тұрақтысы;

$c$  – вакуумдағы жарық жылдамдығы;

$k$  – Больцман тұрақтысы;

$G$  – гравитациялық тұрақты.

Сфералық пішінді білдіретін «оқиға көкжиегі» аймағының шекарасын көрсететін гравитациялық Шварцшильд радиусы болуы керек. Шварцшильд радиусының формуласы:

$$r_s = \frac{2GM}{c^2}$$

Ұсынылған тұжырымдарға сәйкес, қара құрдымның энтропиясы, демек, ауданы тұрақты болып қалады немесе өседі. Энергия мен энтропия арасындағы байланыс қара құрдымның  $g$  температурасымен еркін түсу үдеуінің  $T$  температурасымен байланысын орнатуға мүмкіндік береді. Бұл байланыс қара құрдым массасы арқылы еркін түсу үдеуінің формуласынан анық көрінеді:

$$g = \frac{c^4}{4GM}$$

Қара құрдымдардың сипаттамаларын есептеу үшін жоғарыда келтірілген формулалардан басқа, сәулелену қуатын есептеу формуласы бар:

$$L = \frac{\hbar c^6}{15360\pi G^2 M^2}$$

Қолданыстағы тәуелділіктерден қорытынды жасай отырып, қара құрдым тұрақсыз және тепе-теңдіксіз жүйе деп қорытынды жасауға болады. Оның температурасы массаның азаюымен жоғарылайды, ал сәулелену массаның төмендеуіне әкеледі, бұл температураның жоғарылауына ықпал етеді. Қара құрдым неғұрлым кішірек болса, бөлшек соғұрлым қысқа қашықтыққа жетуі керек, демек, сәулелену жылдамдығы және қара құрдымның эффективті температурасы соғұрлым жоғары болады. Бұдан шығатыны, қара құрдым массасының жоғалуы жылдамырақ. Қазіргі уақытта қара құрдым сәулеленуінің бүкіл процесі әлі белгісіз. Дегенмен, қара құрдым радиация кезінде соңғы радиация жарылысында толығымен жойылады деген болжам бар. Қалған масса үлгілері қара құрдымның «өмірінің» бейнесін толықтырады, бұл оның шектеулі уақыт ішінде жану сәтіне әкеледі.

Қара құрдымды моделдеу

Заманауи тұжырымдамаларға сәйкес, қара құрдымның пайда болуының төрт сценарийі бар:

1. Жеткілікті массивтік жұлдыздың ( $\approx 3,6$  Күн массасы) эволюциясының соңғы сатысындағы гравитациялық күйреуі;

2. Галактиканың орталық бөлігінің немесе галактикалық газдың күйреуі, мұндай объектілердің массасы 1000 күн массасынан асады (мысалы, біздің Галактиканың орталығында массасы  $3,7 \cdot 10^6$  Күн массасы болатын Стрелец А қара құрдымы бар);

3. Үлкен Жарылыс сәтінде гравитациялық өрістің және материяның (бастапқы қара құрдымдар) ауытқуы нәтижесінде қара құрдымдардың пайда болуы;

4. Жоғары энергиялы ядролық реакцияларда кванттық қара құрдымдардың пайда болуы.

Жұлдыздың өмірінің соңында қысылуы белгілі бір кезеңде тоқтауы немесе күйреуі мүмкін. Бұл нәтиже жұлдыздың массасына және айналу моментіне байланысты.

Қазіргі астрофизика Әлемдегі қара құрдымдардың екі түрін қарастырады:

1. Жұлдыздық қара құрдымдар. Бұл қара құрдымдар массивті жұлдыздардың өмірінің соңында пайда болады.

2. Массалары бар аса массивті қара құрдымдар.

Галактикалардың орталықтарында  $10^9 M_{\odot}$  және одан да көп.

Екі типтегі де қара құрдымдар табылды. Астрофизикалық қара тесіктердің үшінші ықтимал түрі - алғашқы қара құрдымдар.

### **Қара құрдымдарға дискінің жиналуы**

Қара құрдымдарды анықтау және зерттеу үшін аккрецияның екі ерекше жағдайы өте маңызды: қос жүйелердегі аккреция және галактикалардың орталықтарында орналасуы мүмкін аса массивті қара құрдымдардағы аккреция. Екі жағдайда да аккрециялық газдың үлкен ішкі бұрыштық импульсі бар. Нәтижесінде газ элементтері Кеплер орбиталарында қара құрдым айналасында айналып, оның айналасында диск түзеді. Тұтқырлық аккрецияның жинақталуында шешуші рөл атқарады. Тұтқырлық газдың әрбір жеке элементінің бұрыштық импульсін әлсіретеді, бұл газдың бірте-бірте орталыққа жақындайтын спиральда қара құрдым айналасында айналуына мүмкіндік береді. Сонымен бірге тұтқырлық газды қыздырып, оның сәулеленуін тудырады. Тұтқырлықтың мүмкін көздері газ дискідегі турбуленттілік және хаостық магнит өрістері болып табылады.

Аккрециялық дискінің қасиеттері газдың жиналу жылдамдығымен анықталады. Қара құрдымға түсетін кез келген аккрецияның жарқырауының маңызды өлшемі Эддингтонның критикалық жарқырауы болып табылады.

$$L = \frac{4\pi G M_h m_p c}{\sigma_T} = \frac{M_h}{M_{\odot}} 1,3 \times 10^{38} \text{ эрг/с}$$

Мұндағы  $M_h$  – қара құрдымның массасы,  $m_p$  – протонның тыныштық массасы,  $\sigma_T$  – Томсон қимасы. Бұл сәулелену қысымы толық иондалған плазма үшін  $M_h$  тудыратын тартылыс күшін дәл теңестіретін жарықтылық.

### **Қара құрдымның сәулеленуі**

Физиканың классикалық теориясы қара құрдымдарды стационарлық объектілер ретінде айтады, бұл бақылаулармен келіспейді. Эксперименттік деректерді тек қара құрдымдардың үздіксіз сәулеленуін ескеретін кванттық теориямен түсіндіруге болады. Кванттық физика концепциялары бойынша

ғарышта нақты бөлшектерге (ұзақ өмір сүретін) айнала алатын виртуалды бөлшектердің жұбы (қысқа өмір сүретін) үнемі дүниеге келеді. Хокинг оқиға көкжиегінің шекарасындағы вакуумда виртуалды жұп бөлшектер туатынын, олардың бірі қара құрдымдардың ішіне кіріп, екіншісі ұшатынын атап өтеді. Бұл радиация Хокинг сәулесі деп аталады.



4-сурет. Бұл суретте қара құрдым затты өзіне тартып қана қоймайды, сонымен қатар оны өте жоғары энергиялы жарық кванттары түрінде шығарады. Бұл Хокинг сәулесі. [2]

Бұл құбылысты зерттеу Хокингті қара құрдым радиусы  $R_g$ , температураға дейін қыздырылған қара дене сияқты жарқырайды деген қорытындыға әкелді.

$$T = \frac{\hbar c^3}{8\pi kGM}$$

Мұндағы  $\hbar$  - келтірілген Планк тұрақтысы;

$k$ -Больцман тұрақтысы;

$T$ -температура (Кельвинмен өлшенген); граммдағы  $M$ -массасы;

$G$ -гравитациялық тұрақты.

#### Әдебиеттер тізімі:

1. <https://www.eso.org/public/unitedkingdom/images/eso1907a/>
2. <http://spacetelescope.org>
3. И.Д. Новиков, В.П. Фролов, Физика наших дней: Черные дыры во Вселенной//Успехи физических наук. – 2001. Vol. 171. – Р.291–305.
4. Шапиро С. Л., Тьюколски С. А. Чёрные дыры, белые карлики и нейтронные звёзды / Пер. с англ. под ред. Я. А. Смородинского. — М.: Мир. – 1985. – Т.1-2. – стр.656.