

Нобеловата награда по физика **2020**

INSPIRAL

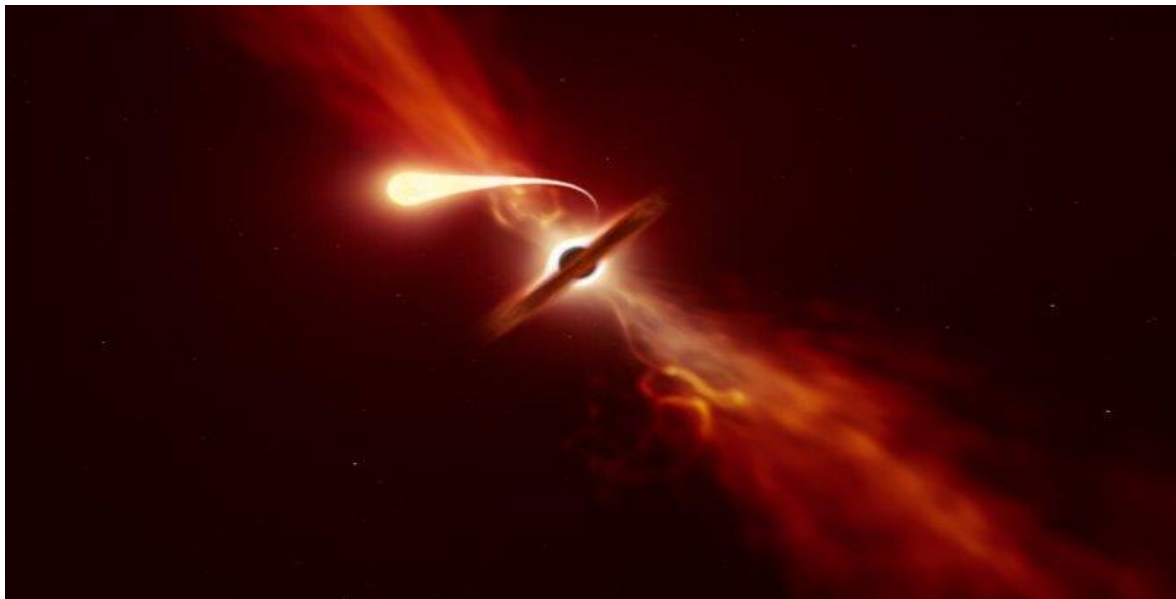
MERGER

проф. дфн Стойчо Язаджиев

HANFORD, WASHINGTON
LIVINGSTON, LOUISIANA

Нобелова награда по физика 2020

Нобеловата награда по физика за 2020 г. бе присъдена за изследвания на черните дупки, които са сред най-интересните и най-загадъчните обекти във Вселената.



Половината от наградата е за Роджър Пенроуз , а другата половина е за Райнхард Генцел и Андреа Гез .

Нобелова награда по физика 2020



Наградата се връчва на Пенроуз за математическо доказателство, че черните дупки могат да се образуват в съгласие със законите на общата теория на относителността.



Гензел и Гез получават наградата за наблюдателното доказателство, че свръхмасивния и свръхкомпактен обект в центъра на нашата галактика е черна дупка.

Кратка история на черните дупки

Всичко започва със създаване на общата теория на относителността (ОТО) преди повече от 100 години.



ОТО се ражда от синтеза на две велики идеи, изказани от математици - немските математик Херман Минковски и швейцарският математик Марсел Гросман.



През 1907 г. Минковски прави първата гениална стъпка като се отказва от пространството и времето като отделни категории и въвежда единно пространство-времето като нова категория.

Henceforth space by itself, and time by itself, are doomed to fade away into mere shadows, and only a kind of union of the two will preserve an independent reality

Кратка история на черните дупки

Следващата гениална идея, е изказана от Гросман - той отъждествява гравитационното поле с метриката на пространство-времето. Това е раждането на ОТО.

$$\text{гравитационно поле} = g_{\mu\nu}$$

Най-интерсно е, че самият Айнщайн първоначално се противопоставя на идеята на Гросман като нефизична и противоречаща на принципа за причинност ?!

Гросман прави всъщност много повече - той е първият, които записва полевите на уравнения на ОТО във вакуум:

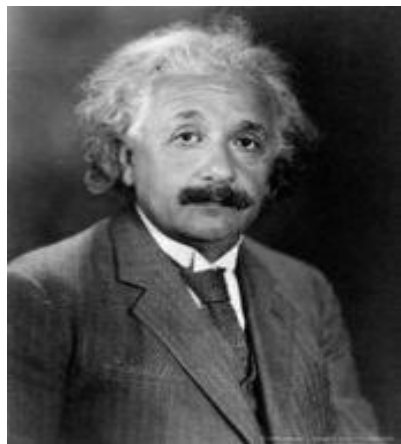
$$R_{\mu\nu} = 0$$

Кратка история на черните дупки



Пълните полеви уравнения на гравитационното поле в присъствие на материя се извеждат за пръв път чрез вариационен принцип от великия немски математик Давид Хилберт през 1915 г.

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = 8\pi G_*T_{\mu\nu}$$



След това полевите уравнения са изведени отново и от Айнщайн на базата на други аргументи.

Още с идването си на бял свят ОТО прави шокиращи предсказания: гравитационни вълни, разширяваща се Вселена, черни дупки и много други.

Кратка история на черните дупки



През 1922 г. руският математик и физик А. Фридман прави шокиращо предсказание - той показва, че съгласно уравненията на ОТО Вселената трябва да се разширява.



Това предсказание е потвърдено само няколко години по-късно през 1926 г. от американският астроном Е. Хъбъл, за съжаление след смъртта на Фридман.

Независимо от това почти всички физици по онова време разглеждат ОТО като някаква екзотика, изпитвайки дълбок страх от найната тъмна математическа страна и това отношение се запазва в определена степен и днес. Това е една от причините черните дупки да бъдат възприети няколко десетилетия след като са реално открити.

Кратка история на черните дупки



Самите черни дупки излизат на сцената в скрита форма още през 1916 г., но не са разпознати като такива от физиците. Но са разпознати от математиците!

През 1916 г. немският астроном Карл Шварцшилд намира първото точно и нетривиално решение на уравненията на Хилберт-Айнщайн, за съжаление само четири месеца преди смъртта си.

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{R_g}{r}\right)dt^2 + \frac{dr^2}{1 - \frac{R_g}{r}} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2.$$

$R_g = \frac{2MG}{c^2}$ е гравитационния радиус на тялото.

Поради фалшива координатна сингулярност при $r = R_g$ физиците разглеждат решението само за $r > R_g$ въпреки, че математиците настояват, че е напълно регулярно и за всяко $r > 0$.

Кратка история на черните дупки



През 1939 г. американският физик Робърт Опенхаймер, бъдещият баща на атомната бомба, заедно с своя студент Хартланд Снайдер, изследват колапса на сферично симетричен облак от материя в ОТО, като напълно правилно идентифицират гравитационния радиус с хоризонт. Според тях колапсиращото тяло след свиване под гравитационния радиус се самозатваря и прекъсва всякаква комуникация с външните наблюдатели, като остава само собственото му статично гравитационно поле във външното пространство.

Статията на Опенхаймер и Снайдер е критична крачка в теорията на черните дупки, тя е в съгласие с идеите на математиците и на практика пуска духа от бутилката.

Кратка история на черните дупки

През 1958 г. американският физик Дейвид Финкелщайн използвайки съвсем проста координатна трансформация, показва съвсем ясно и категорично, че $r = R_g$ е напълно регулярна повърхнина в пространство-времето и че причината физиците да я смятат за пространствено-времева сингулярност е координатен артефакт.

Този резултат заедно с резултата на Опенхаймер и Снайдер категорично показва, че сферично-симетричното решение на Шварцшилд е в сила за всяко $r > 0$ и описва тяло, което се е свило под гравитационния си радиус и притежава хоризонт лежащ при $r = R_g$ като крие в себе си истинска сингулярност при $r = 0$.

След това събитията се зареждат в полза на черните дупки.

Кратка история на черните дупки



В началото на 60-те години астрономите откриват квазарите - екстремално светли галактически ядра с маса от порядъка на милиони (и дори милиарди) слънчеви маси обградени от акреционни дискове. Единственото възможно обяснение са черните дупки.



През 1963 г. новозеландският математик Рой Кер намира ново точно решение на уравненията на Хилберт-Айнщайн с аксиална симетрия описващо въртяща се черна дупка. Започва да се промъква идеята, че централните обекти свързани със квазарите са черни дупки, т.е. решение на Кер или в частен случай решение на Шварцшилд.

Приносът на Пенроуз

В началото на 60-те години изглежда неизбежно централните двигатели на квазарите да се отъждествят с черни дупки. Основното притеснение е дали черни дупки могат да се образуват при реален гравитационен колапс. Както вече коментирахме, Опенхаймер и Снайдер са показали това в случая на сферична симетрия, но остава съмнението, че хоризонт може да се образува само при много специални симетрии, но не и в общия случай.

Някъде през 1964 г. Джон Уилер споделя идеята с Пенроуз, който започва да мисли върху проблема. Пред Пенроуз стои следната фундаментална задача: **Да се покаже, че черните дупки са общо следствие от законите на ОТО, като се формират в области с висока плътност на материята.**

Така поставена задачата е изключително сложна. Обиквено във физиката винаги се разглеждат процеси и обекти със висока симетрия в един или друг смисъл, но сега всяка симетрия е изключено изначално, което усложнява проблема прекалено много.

Приносът на Пенроуз

Подходът на Пенроуз към задачата е чисто математически на базата на абстрактната диференциална геометрия и топология. За тази цел въвежда ново понятие в ОТО, което играе ключова роля, а именно **уловена повърхнина**.

Уловената повърхнина е двумерна повърхнина в пространство-времето, която има свойството да фокусира светлинните лъчи, излъчени навън и ортогонално на нея. С други думи уловената повърхнина е сигнал за достатъчно силно гравитационно поле.

Във фундаментална статия от 1965 г. Пенроуз доказва, че ако веднъж се е образувала уловена повърхнина и ако материята удовлетворява определени естествени енергетични условия (като положителна плътност на енергията), съгласно законите на ОТО вътре в уловената повърхнина настъпва необратим колапс към сингулярност.

Приносът на Пенроуз

Чисто математическата формулировка на Теоремата на Пенроуз

Теорема: Нека (M, g) е глобално хиперболично пространство-време с некомпактна повърхнина на Коши. Ако тензорът на енергията-импулса на материята удовлетворява слабото (или силното) енергетично условие и пространство-времето съдържа уловена повърхнина, тогава пространство-времето (M, g) е изотропно геодезически непълно.

Приносът на Пенроуз

Теоремата на Пенроуз поставя началото на нов златен период за ОТО и нова ера за астрономията и астрофизиката. Черните дупки влизат официално във физиката, а супермасивните черните дупки стават общоприетото обяснение на квазарите. Може да се покаже, че материята, която пада спирално към черната дупка може до освободи от 6% до 42% от масата си на покой като лъчение, което обяснява високата светимост на квазарите.

Следват 20 златни години за теорията на черните дупки. Откритието на Хокинг е шокиращо - черните дупки, които по своята дефиниция са чисто пространствено-времеви структури, проявяват и термодинамични свойства. Това разбулва дълбока и неочаквана връзка между пространство-времето, термодинамиката и квантовата теория.

Като венец на двете златни десетилетия се доказват фундаменталните теоремите за единственост на решенията в ОТО описващи черни дупки. Теоремите са доказани от австралийския математичен физик Б. Картер, полския математик П. Мазур и австралийският математик Р. Бунтик.

Приносът на Генцел и Гез

Пионерските наблюдения на Генцел и Гез поставят основата на нови прецизни тестове на ОТО и фундаменталната физика на пространство-времето и нейните шокиращи предсказания.

Генцел и Гез ръководят две изследователски групи, които наблюдават движението на звездите около ядрото на нашата галактика. Групата на Генцел използва телескопи на Европейската южна обсерватория (ESO) разположени в Чили, докато тима на Гез използват обсерваторията Кек на Хаваите. Наблюденията продължават почти 30 години!

Защо е важно да се наблюдава точно движението на звезди близо до галактичното ядро? Причината е, че съгласно ОТО, близките звезди чувстват най-силно кривината на пространство-времето и орбитите съдържат информация за кривината.

$$\omega_0 = \frac{(GM)^{1/2}}{r_0^{3/2} + a(GM)^{1/2}/c}$$

Приносът на Генцел и Гез

Наблюдението на отделни звездни орбити обаче е голямо предизвикателство поради много причини. Огромни облаци междузвезден газ и прах закриват по-голямата част от видимата светлина, идваща от центъра на галактиката. Колкото и добри да са телескопите имат крайна разделителна способност.

Освен това атмосферата влияе на движението на приеманите фотони и размива образите. Ето защо звездите примигват, а също така и образите им са размити.

За да проникнат през облаците прах близо до ядрото на галактиката и да минимизират влиянието на атмосферата, Генцел и Гез разработват и усъвършенстват свои техники, изграждайки уникални инструменти за дългосрочни наблюдения.

Турбуленцията в земната атмосфера размазва траекториите на фотоните във времеви мащаби около една 1 секунда. За да компенсират това, и двете групи разработват и използват техника на *speckle imaging* в близката инфрачервена област.

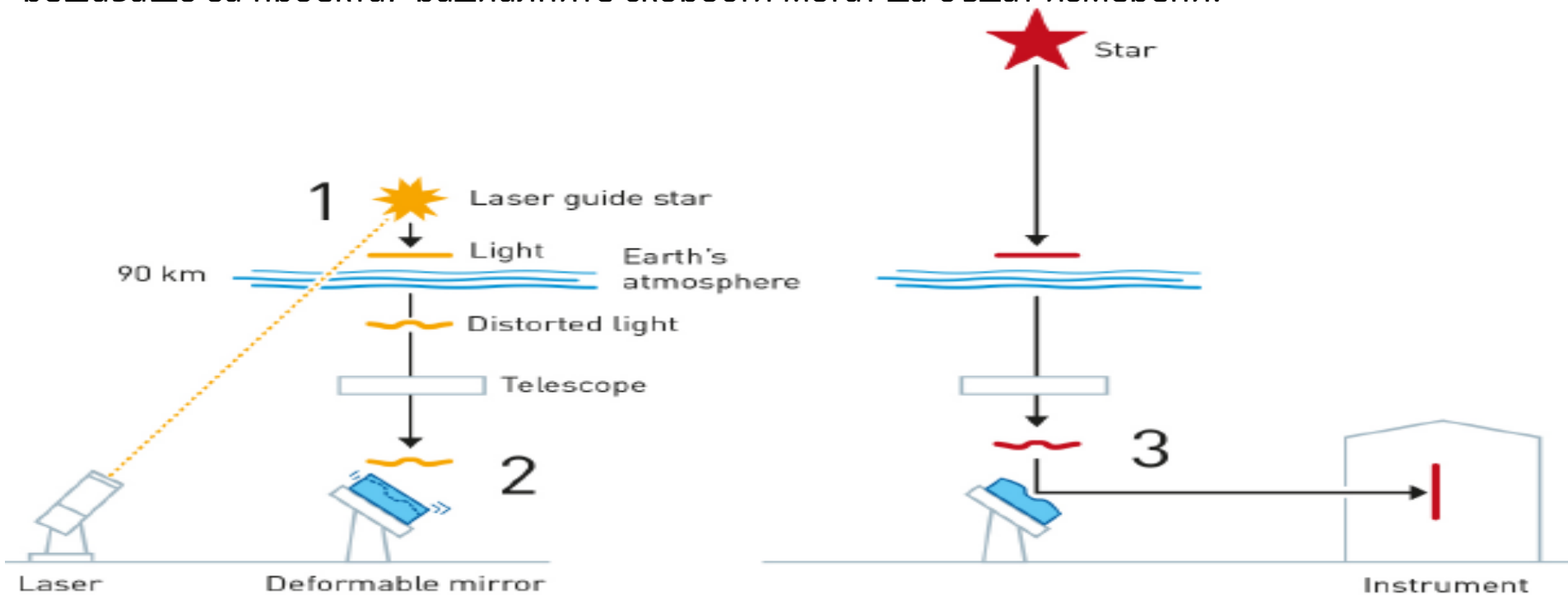
Приносът на Генцел и Гез

Правят се кратки експозиции с много чувствителен детектор, около 0.1 s за да има ефективно замразяване на динамиката на атмосферата. Отделите експозиции се наслагват като се използва референтен източник. По този начин се получават по-рязки и по-дълбоки изображения, ограничени само от дифракцията. За инфрачервената лента на наблюдение ($2.2 \mu m$) това ограничение съответства на 0.05 arcsec или на физическо разстояние около 2.5 светлинни дни около центъра на галактиката.

Описания по-горе метод има и някои недостатъци. Краткото време на експозиция, ограничи наблюдението само до най-ярките звезди и е необходимо дълго време на наблюдение, за да се определи скоростта на звездите. Тези ограничения са преодоленни, когато адаптивната оптика става достъпна за екипа на Гез в обсерваторията Кеск и екипа на Генцел в Много големия телескоп (VLT, ESO) .

Приносът на Генцел и Гез

Адаптивна оптика използва ярък референтен обект до целта за наблюдение или дори изкуствена „звезда“, създадена от лазерно възбуждане на натриеви атоми в горните слоеве на атмосферата. Деформируемо вторично огледало променя формата си да компенсира отклоненията от референтния обект и се осъществява обратна връзка в реално време, което позволява дълго време на експозиция и създаване на много резки и дълбоки изображения, до границата на дифракция. Това позволява използването на спектрограф за изследване на звездите - съставът на звездите може да бъде проучен и, решаващо за проекта, радиалните скорости могат да бъдат измерени.



Приносът на Генцел и Гез

Една от звездите, наречена S2, има много кратък орбитален период около Sgr A *, малко под 16 години. За сравнение Слънцето обикаля центъра на галактиката за над 200 милиона години. S2 има силно елиптична орбита с ексцентриситет $e = 0,88$. Нейното перицентрово разстояние от Sgr A * през пролетта на 2002 г. е само 17 светлинни часа, или $1400 R_g$, за черна дупка с маса $4 \cdot 10^6 M_\odot$. Равнината на орбитата има наклон от около 46° спрямо равнината на небето.

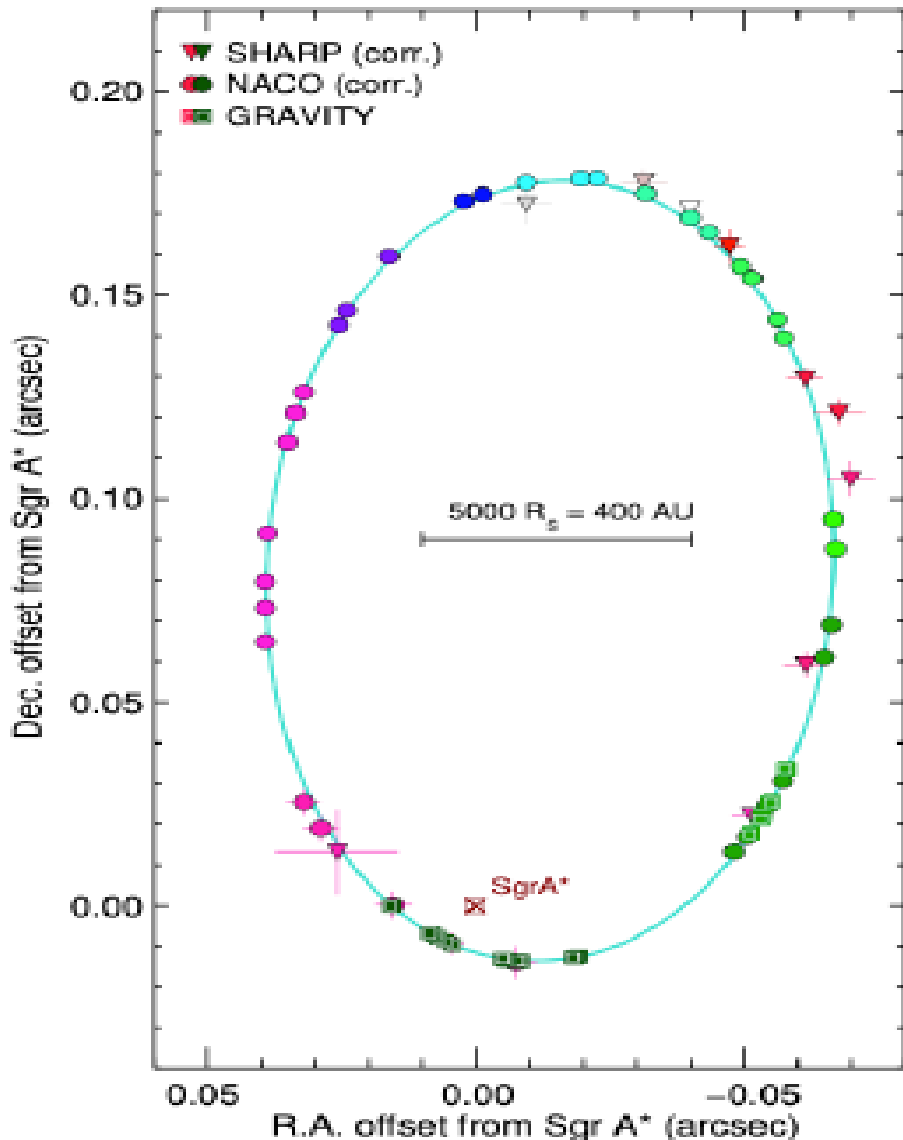
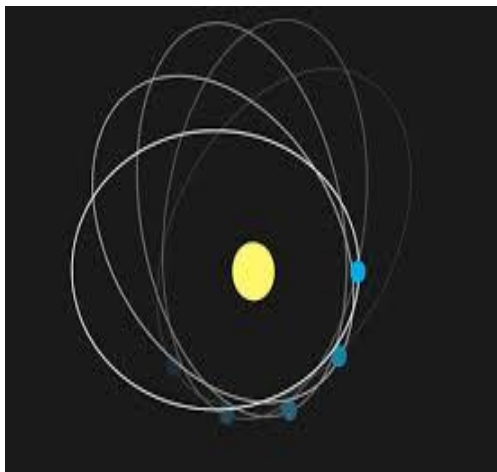
Наблюдателните данни на двете групи показват, че:

- 1) Движението на S2 се определя изцяло от централния обект и влиянието на останалата материя е напълно пренебрежимо.
- 2) Галактическият център съдържа изключително концентрирана маса- 4 милиона слънчеви маси
- 3) Като се вземе предвид, че видимият размер (радиоизлъчващата част) на ядрото е $< 1 \text{ AU}$, означава, че имаме чудовищно компактен обект (еквивалентно на 4 милиона слънца между Земята и Слънцето!)

Приносът на Генцел и Гез

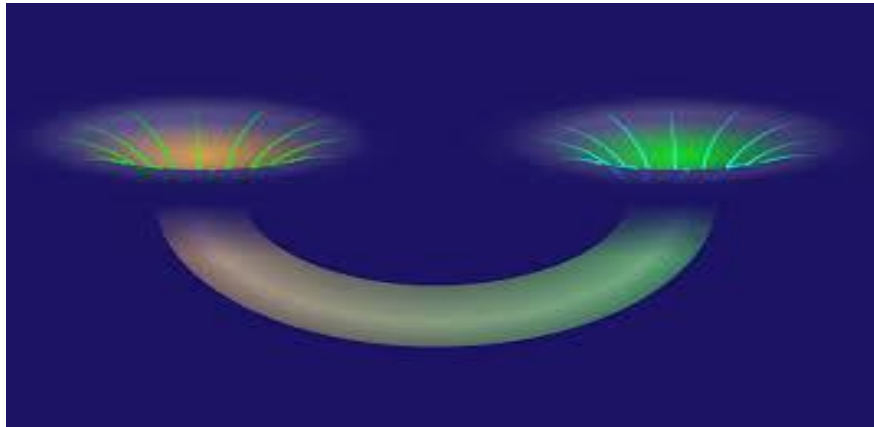
Графиката обобщава 26 години наблюдение на S2 около Sgr A* (април 2002 – май 2018)

Изключително достижение на двете групи е и измерването на релятивистката прецесия на орбитата – много важен ефект предсказан от ОТО.



Още едно предсказание на ОТО - wormholes

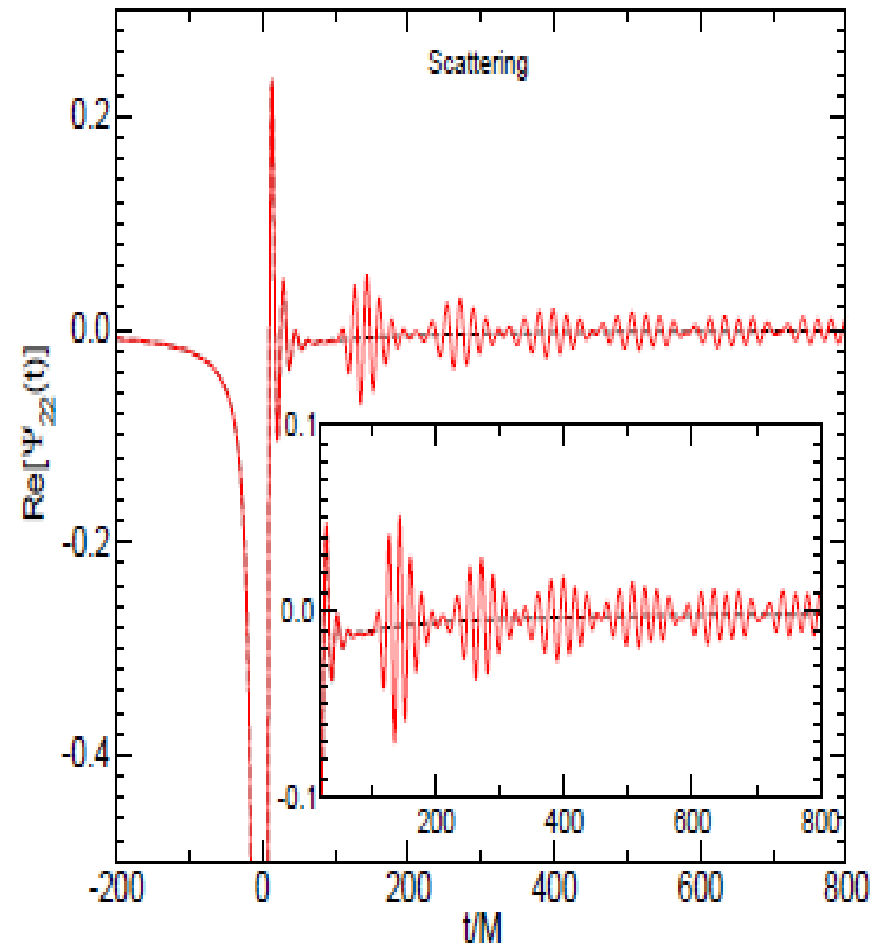
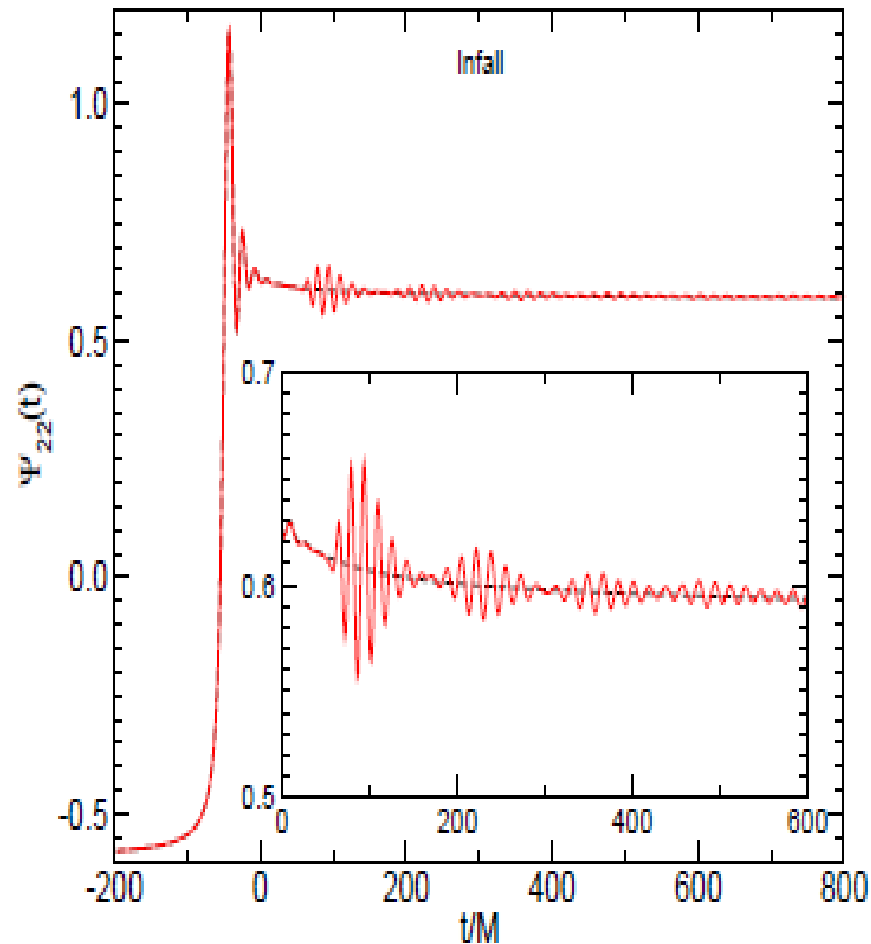
- Мишена на наблюдения в електромагнитния спектър и чрез гравитационни вълни. Предсказани са от австрийския физик Лудвиг Флам (1916) и в чиста форма от швейцарския математик Херман Вайл (1928).
- Wormholes могат да съществуват само ако съществува материя, която нарушава определени енергетични условия (null energy condition). Има ли такава материя? Спинорните полета! Вселената изобилства и с още такава материя – тъмната енергия!



Още едно предсказание на ОТО - wormholes

- **Wormholes** могат да бъдат най-различни видове в зависимост от тяхната топология.
- Проявяват изключително екзотични свойства – имат изключително интимна връзка с топологията на пространство-времето и неговата причинно-следствена структура. Физиката в околност на wormhole може да е много странна.
- Могат да бъдат масивни или безмасови. Дори и безмасови играят роля на гравитационни лещи и могат да излъчват гравитационни вълни
- Wormholes се отличават от черните дупки по начина, по който излъчват гравитационни вълни.
- Отличават се също по начина, по който изкривяват светлината и проявяват ефекта на гравитационната леща.

Още едно предсказание на ОТО - wormholes



- Последните 20 години са златен период за ОТО и физиката на пространство-времето, и техните рожби – космологията и релативистката астрофизика. Достатъчно е само да споменем директното детектиране на гравитационните вълни през 2015 г, което донесе революция във фундаменталната физика и нов тип астрономия – гравитационно-вълновата астрономия.
- За последните 10 години са дадени 4 нобелови награди за приноси в тази област.
- Има фундаментални нерешени проблеми, които могат да обърнат представите ни за физиката. Тъмната страна на Вселената е неразгадана -тъмната материя и тъмната енергия генерират огромен интерес и са огромно поле за развитие на областта.

.

Развитие на областта

- Гравитационните вълни дават невиждана до сега възможност да се изследват немислими до момента неща - например да се тестват чисто математически теореми в ОТО. Скоро се очаква да се тестват теоремите за единственост на черни дупки !
- Гравитационните вълни са перфектното средство за изучаване на тъмната енергия и тъмната материя.
- Чрез гравитационни вълни и електромагнитни наблюдения се търсят нови екзотични полета и обекти във Вселената. Да се споменем само пространствените тунели (wormholes).

Развитие на областта

Тази област ще е доминиращата област във фундаменталната физика. В следващите 10-20 години са планирани или вече се изпълняват мащабни проекти за гравитационни вълни (ЛИГО –САЩ, ВИРГО-Италия, ГЕА-Германия, КАГРА –Япония, ИЛИГО-Индия, ДЕСИГО- Япония, Телескоп Айнщайн, ЛИЗА -ЕКА)

Освен това ще бъдат изстреляни един куп космически мисии за изследване на гравитационните лещи, неутронни звезди и т.н.

В САЩ се разработва детектор на гравитационни вълни с размери от само няколко метра - Levitated Sensor Detector- в честотния спектър от 10 kHz за детектиране на вълни от космически събития включващи маси от порядъка на 1 слънчева маса. Перфектен за изучаване на тъмната материя на тези мащаби. Цената е около -1 милион долара- всеки уважаващ се университет ще го притежава.

Зората на нова ера в астрофизиката и фундаменталната физика

