

Lliçó Inaugural
Curs Acadèmic 2017-2018

RELATIVITAT I
ASTROFÍSICA



per
Juan Antonio Miralles Torres
Catedràtic de Astronomia
i Astrofísica



Universitat d'Alacant
13 de setembre de 2017

Lliçó Inaugural

Curs Acadèmic 2017-2018

U n i v e r s i t a t d ' A l a c a n t



RELATIVITAT I ASTROFÍSICA

JUAN ANTONIO MIRALLES TORRES
CATEDRÀTIC DE ASTRONOMIA I ASTROFÍSICA

És un vertader honor pronunciar la lliçó inaugural del curs 2017-2018 de la Universitat d'Alacant. Enguany, ha correspost a la Facultat de Ciències i agraïsc a l'equip deganal, com també al Departament de Física Aplicada, haver-me demanat que fóra el ponent d'aquesta lliçó, una tasca que no vaig dubtar a acceptar. És també una satisfacció, i per això ho agraïsc a les autoritats acadèmiques, exposar aquesta lliçó després que el passat curs s'hagen iniciat a la Universitat d'Alacant els estudis de Física, una especialitat fonamental de les ciències experimentals que, per fi, ofereix la nostra universitat.

El tema que he triat per a la lliçó, Relativitat i Astrofísica, ve motivat principalment per dues raons. La primera és que he dedicat tota la meua vida professional a l'estudi de sistemes astrofísics en els quals la relativitat té un paper important. Com a nota personal, el primer treball que vaig fer a principis de la dècada dels 80 del segle passat va ser l'obtenció de la distribució de temperatura en una estrella de neutrons tenint en compte els efectes de la relativitat. El treball me'l va proposar el professor José María Ibáñez, de la Universitat de València, i a ell vull dedicar aquesta lliçó inaugural. La segona raó que m'ha fet triar aquest tema és la detecció recent d'ones gravitatòries, una de les prediccions més fonamentals de la teoria de la relativitat general.

L'objectiu de la lliçó és introduir des d'una perspectiva històrica el desenvolupament de la teoria de la relativitat i la relació que té amb l'astrofísica.

Teoria de la Relativitat Especial

L'any 1905 Albert Einstein publica un article titulat "Sobre l'electrodinàmica dels cossos en moviment" ¹.

En aquest article es posen les bases de la teoria especial de la relativitat. Einstein, que des de la seua joventut es plantejava què s'observaria en perseguir un raig de llum i igualar la velocitat d'aquest, va arribar a la conclusió que aquesta és inassolible. La velocitat de la llum en el buit resulta ser independent de la velocitat a la qual ens moguem o es moga la font emissora de llum. Aquest és un dels dos postulats que va fixar Einstein per a fonamentar la seua teoria. Experiments fets

1.- A. Einstein, "Zur Elektrodynamik bewegter Körper", *Annalen der Physik*, 17, 891-921 (1905).

a finals del segle XIX avalaven aquesta hipòtesi ². L'altre postulat, basat també en l'experiència, era conegut des de l'època de Galileu ³, i estableix la impossibilitat de distingir, mitjançant experiments mecànics, si estem en repòs o ens movem a una velocitat constant. Galileu utilitza com a escenari el celler d'un vaixell per a deduir que els experiments que fem en aquest recinte no ens podran indicar si el vaixell està atracat al port o si, per contra, està navegant amb el mar en calma.

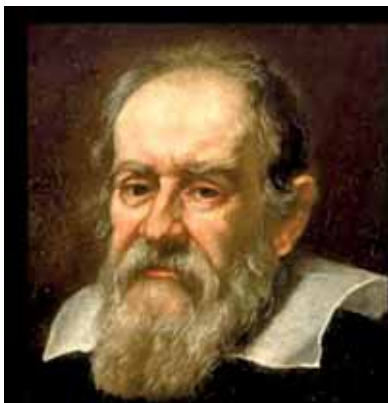
Aquest resultat, que es coneix amb el nom de principi de relativitat de Galileu, va ser pres per Einstein com un postulat, però ara generalitzat a qualsevol experiment físic, no només mecànic, és a dir, s'hi inclou també fenòmens electromagnètics, com ara la llum. Amb només aquests dos postulats, i tirant del fil, va ser capaç de traure la física del laberint en el qual es trobava a causa de la incompatibilitat de la física Newtoniana i la teoria electromagnètica de Maxwell.



Albert Einstein

A la vegada, Einstein presentava idees revolucionàries com ara que el temps transcorregut entre dos successos depenia de l'observador. La incompatibilitat entre la física Newtoniana i l'electromagnetisme ja havia sigut considerada per H. Lorentz ⁴ i H. Poincaré ⁵ els quals havien fet propostes per a resoldre-la. No obstant això, va ser Einstein, qui, a partir dels dos postulats esmentats, estableix definitivament la teoria i abandona la idea de l'èter, que era el medi on, suposadament, es propagaven les ones electromagnètiques. Einstein defineix, d'una manera precisa, però senzilla, com hem de fer per a assignar a cada succés un instant de temps i una posició relativament a un observador donat. En aquest procediment, primer hem de fer una sincronització de rellotges mitjançant l'emissió de rajos de llum, ja que la seua velocitat resulta ser independent de l'observador. Einstein es planteja qüestions que havien passat quasi inadvertides, però que resulten fonamentals. El concepte de simultaneïtat entre dos successos, per exemple, perd l'estatus d'absolut i passa a ser un concepte que depèn de l'observador. El fet que els efectes predits per aquesta teoria no s'hagueren observat molt abans és degut al fet que la velocitat de la llum és molt major que les

-
- 2.- A. Michelson & E. Morley, "On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether", *American Journal of Science*, 34 (203): 333–345 (1887).
 - 3.- Galileo Galilei, "Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo Tolemaico, e Copernicano" (1632).
 - 4.- H. Lorentz va obtenir l'any 1904 el que avui dia anomenem transformacions de Lorentz, que ens permeten relacionar les coordenades d'un succés en dos sistemes de referència inercials.
 - 5.- H. Poincaré l'any 1895 ja va enunciar un principi de relativitat que inclou els fenòmens electromagnètics.



Galileo Galilei

velocitats assolides en la vida quotidiana i, en conseqüència, els seus efectes resulten ser pràcticament inobservables. Només en els experiments dissenyats per a posar de manifest aquests efectes es poden observar diferències entre els resultats predits per la teoria de Newton, que sosté que el temps és absolut, i la teoria d'Einstein.

Aquest mateix any 1905, Einstein publica un altre article sobre relativitat ⁶ en el qual obté la seua famosa equació que ha esdevengut una icona, $E=mc^2$, encara que en l'article del 1905 no utilitza ni la lletra E per a representar l'energia ni la lletra c per a la velocitat de la llum.

Al principi, la teoria de la relativitat especial no va ser acceptada amb entusiasme per la comunitat científica, només alguns científics, encara que d'una vàlua notable com ara Max Plank, hi van mostrar interès.

Teoria de la Relativitat General

Una vegada establida la teoria de la relativitat especial, Einstein cercava una teoria de gravitació que fóra compatible amb aquesta. La teoria de gravitació de Newton es basava en 'l'acció a distància' i admetia una propagació instantània de la interacció gravitatòria, circumstància radicalment incompatible amb la condició que la velocitat de la llum en el buit fóra la màxima velocitat assolible. A la recerca d'aquesta teoria de gravitació es va dedicar sense descans a partir del 1907. La idea que guiava el seu treball es fonamenta en el fet que els efectes d'un camp gravitatori desapareixen si l'observador es mou amb l'acceleració que li provoca la força de la gravetat.

Gibt ein Körper die Energie L in Form von Strahlung ab, so verkleinert sich seine Masse um L/c^2 . Hierbei ist es offenbar unwesentlich, daß die dem Körper entzogene Energie

Extracte de l'article d'Einstein del 1905: $E=mc^2$.

Si substituïm el celler del vaixell per la cabina d'un ascensor que cau lliurement, els experiments que s'hi fan ens donaran els mateixos resultats que si aquests els férem en l'espai, ara però movent-nos lliurement allunyats de qualsevol cos celeste. Això es coneix com a 'principi d'equivalència' i reflecteix la igualtat entre la massa gravitatòria i la massa inerta. Segons aquest principi, per a eliminar els efectes del camp gravitatori només hem de 'deixar-nos caure'. La gran potència d'aquest principi resideix en el fet que conegudes les lleis de la física en absència de gravetat, la generalització d'aquestes en presència de gravetat és immediata. En realitat, els efectes del camp gravitatori poden eliminar-se només si el nostre laboratori en caiguda

6.- A. Einstein, "Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?", *Annalen der Physik*, 17, 639-641 (1905).



L'ascensor d'Einstein en caiguda lliure

lliure és suficientment petit ⁷. Si no ho és, s'observarien efectes, anomenats de marea per ser l'origen de les mareas en la Terra ⁸. Einstein va fer una teoria geomètrica sobre la gravetat i explicava el perquè de la igualtat entre massa inerta i massa gravitatòria, fet que per a la Teoria de Newton era una coincidència sense cap explicació.

La geometria de l'espai-temps no s'acomodava, en presència de gravetat, a la de la relativitat especial i Einstein va haver d'introduir una geometria amb curvatura que representava els efectes de marea. Aquesta geometria havia sigut desenvolupada per Bernhard Riemann ⁹ a mitjan segle XIX i Einstein identifica un objecte matemàtic anomenat 'tensor de curvatura' amb el responsable dels efectes de marea. A la fi del 1915 Einstein obté les equacions del camp gravitatori, les quals relacionen el contingut d'energia-moment amb l'estructura mètrica de l'espai-temps ¹⁰. El treball complet va ser publicat l'any 1916 i constitueix la culminació de la 'teoria de la relativitat general', de la qual s'ha dit que és la teoria més bella de la física.

No obstant això, allò que hom exigeix a una teoria física, més que bella, és que les prediccions concorden amb les observacions, i això ens porta al regne de l'astrofísica, ja que és en aquest marc on va començar a contrastar-se la teoria de la relativitat general amb la teoria de Newton de la gravitació. Cal pensar que les dues teories, encara que conceptualment molt diferents, ens donaran resultats molt semblants, almenys en situacions no extremes. Haurem de fer mesures molt precises o estudiar sistemes extrems per a poder apreciar diferències en elles mesures. Per aquestes raons, la teoria de Newton s'ha mantingut durant més de 200 anys sense necessitat de canviar-la.

Cap a mitjan segle XIX, Le Verrier, que va predir l'existència del planeta Neptú, va observar anomalies en el moviment de

7.- S'utilitza la paraula 'local' per a indicar aquesta circumstància i el terme suficientment petit té una definició matemàtica rigorosa.

8.- Són degudes al fet que l'atracció gravitatòria del Sol i la Lluna sobre la hidrosfera terrestre és més gran en la zona més pròxima i més menuda en la més allunyada.

9.- B. Riemann, "Ueber die Hypothesen, Welche der Geometrie zu Grunde liegen" (1854).

10.- "Die Feldgleichungen der Gravitation", Königlich Preußische Akademie der Wissenschaften (Berlin). Sitzungsberichte, 844-847 (1915).

Mercuri ¹¹ que no podien ser explicades per la teoria de Newton ¹², si més no si no s'admetera l'existència, sense cap altra evidència, d'algun altre planeta o asteroides propers al Sol. El primer triomf de la teoria d'Einstein és l'explicació d'aquesta anomalia sobre la base que la força de la gravetat exercida pel Sol sobre Mercuri no decau exactament amb l'invers del quadrat de la distància. Einstein obté aquest resultat usant una solució aproximada de les seues equacions de camp ¹³. Les observacions astronòmiques permeten, per tant, validar la teoria d'Einstein.

$$R_{i\alpha} = \sum_j \frac{\partial \Gamma_{ij}^\alpha}{\partial x_j} + \sum_{\beta\gamma} \Gamma_{ij}^\alpha \Gamma_{\beta\gamma}^i = -\kappa \left(T_{i\alpha} - \frac{1}{2} g_{i\alpha} T \right)$$

Equacions d'Einstein del camp gravitatori (1915)

El suport definitiu, tant a la seua teoria com a ell mateix com a científic, es produiria quatre anys més tard. Einstein havia predit l'any 1911, basant-se en la seua teoria, encara incompleta, que la llum havia de ser corbada per l'atracció gravitatòria i va obtenir l'angle de desviació de la llum ¹⁴. Quan conclou la teoria de la relativitat general l'any 1915, Einstein revisa els seus càlculs i obté que el valor correcte de l'angle de desviació és el doble del que havia donat el 1911 ¹⁵. L'any 1919 dues expedicions es dirigeixen a observar l'eclipsi de Sol i a mesurar la predicció d'Einstein. Es prenen diverses plaques fotogràfiques de les estrelles circumdants al disc solar eclipsat amb la finalitat de comparar les posicions de les estrelles amb aquelles que es van obtenir sense la presència del Sol. Al novembre del 1919, Sir Arthur Eddington, organitzador de les expedicions, confirma les prediccions d'Einstein. Diaris de tot el món es fan ressò de la notícia i Einstein es converteix en una celebritat mundial. Novament, una observació astronòmica evidencia la veracitat de la seua teoria.

La connexió entre la teoria de la relativitat, tant especial com general, amb l'astronomia i l'astrofísica s'ha mantingut des de la formulació de la teoria de la relativitat. De fet, va ser amb una observació astronòmica amb la qual es va comprovar, per primera vegada, que la velocitat de la llum és finita ¹⁶, circumstància fonamental en la teoria de la relativitat.

Des del punt de vista purament matemàtic, la complexitat de la teoria de la relativitat general és molt superior a la teoria

11.- U. J. Le Verrier, "Theorie du Mouvement de Mercure", *Annales de l'Observatoire Impérial de Paris*, V, 76 (1859).

12.- El periheli, punt més proper al Sol, del planeta Mercuri avançava a un ritme més gran que el que havia predit teòricament. La discrepància era d'uns 40 segons d'arc per segle.

13.- A. Einstein, "Erklärung der Perihelionbewegung der Merkur aus der allgemeinen Relativitätstheorie", *Sitzungsber. preuss. Akad. Wiss.*, vol. 47, No.2, pp. 831-839 (1915).

14.- Per a comprovar aquest resultat es va posar en marxa una expedició l'any 1914 que havia d'observar, durant un eclipsi, un canvi en la posició de les estrelles que s'observen prop del limbe solar, produït per l'acció d'aquest sobre la llum. Aquesta expedició no va poder complir l'objectiu per l'inici de la Primera Guerra Mundial.

15.- Si s'haguera pogut observar aquest efecte el 1914, la reputació d'Einstein i de la seua teoria s'hi haurien ressentit.

16.- Ole Romer, l'any 1676 va observar que els eclipsis d'Io, satèl·lit de Júpiter, eren més llargs quan Júpiter s'allunyava de la Terra i més

de gravitació de Newton. Les equacions del camp gravitatori d'Einstein resulten ser no lineals, a diferència del que ocorre en el cas de la teoria Newtoniana, que es redueix a l'equació de Poisson.

Atesa aquesta complexitat matemàtica, Einstein dubtava de la possibilitat de trobar solucions exactes no trivials de les seues equacions. No obstant això, l'any 1916 Karl Schwarzschild ¹⁷ va obtenir, mentre combatia en el front de la Primera Guerra Mundial, una solució exacta de les equacions. Aquesta solució es va interpretar com el camp gravitatori, o millor dit l'estructura geomètrica de l'espai-temps, en l'exterior d'un objecte esfèric d'una massa donada, aplicable, per exemple, al camp gravitatori d'una estrella. En la solució obtinguda per Schwarzschild apareixia una singularitat quan l'objecte tenia un radi inferior al que avui dia es coneix amb el nom de radi de Schwarzschild. De fet, en aquest cas, l'objecte col·lapsaria irremediament i cap senyal de l'interior de la zona limitada pel radi de Schwarzschild en podria eixir. L'espai-temps quedaria dividit en dues zones separades per un horitzó de successos que actuaria com una membrana que pot travessar-se en sentit, però que no permet que es travesse en sentit oposat. Anys més tard, ja en la dècada dels anys 60 del segle passat, es va encunyar el terme 'forat negre' per a designar aquest tipus d'objectes col·lapsats, ja que ni tan sols la llum podia eixir-ne.

Ones gravitatòries

Una altra de les prediccions de la teoria de la relativitat general era l'existència d'ones gravitatòries ¹⁸. A mitjan segle XIX James Clerk Maxwell va predir l'existència d'ones electromagnètiques les quals es propagaven

curts quan s'hi acostava. D'aquesta observació va deduir que la velocitat de la llum havia de ser finita i amb la mesura de la diferència entre la durada dels eclipsis es va poder obtenir un valor aproximat de la velocitat de la llum.

17.- Karl Schwarzschild, "Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einsteinschen Theorie", *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften* (Berlin), 1916, Seite 189-196.

18.- L'acció a distància de la teoria de Newton impedia aquesta possibilitat ja que, en aquesta teoria, el moviment d'una massa que produeix un canvi en el camp gravitatori es transmet instantàniament.



Notícia de l'èxit de la teoria d'Einstein en *The Times*

en el buit a la velocitat de la llum ¹⁹. Aquestes ones consisteixen en pertorbacions dels camps elèctrics i magnètics que es propaguen a la velocitat de la llum i es poden produir, per exemple, en accelerar càrregues elèctriques. Els treballs de Maxwell van ser publicats el 1865 i, aproximadament, 20 anys més tard H. Hertz va comprovar la validesa de la teoria quan va produir i detectar ones electromagnètiques en el laboratori ²⁰.

De forma anàloga a la teoria electromagnètica de Maxwell, la teoria de la relativitat general d'Einstein prediu que les masses accelerades produeixen pertorbacions del camp gravitatori que es propaguen. El 1918 Einstein publica l'article "Sobre les ones gravitatòries" ²¹ en el qual corregeix alguns errors d'un article anterior i obté una expressió aproximada que determina l'ona gravitatòria emesa per un sistema, l'anomenada 'fórmula quadrupolar'. En la teoria d'Einstein una ona gravitatòria és una pertorbació de la geometria de l'espai-temps, i més concretament del tensor de curvatura, que es propaga a la velocitat de la llum.

Generar ones gravitatòries en el laboratori és molt més simple que generar ones electromagnètiques. N'hi ha prou, per exemple, a fer girar una barra rígida respecte d'un eix perpendicular al de simetria. No obstant això, l'energia emesa en forma d'ones gravitatòries mitjançant aquest procediment, encara que girarem la barra fins al punt de ruptura, és tan petita que detectar-la és actualment una missió impossible. Novament, hem de considerar fenòmens astrofísics, molt més energètics, tot i que ens trobem amb la dificultat que aquests no els podem controlar.

A la fi de la dècada dels anys 70 del segle xx es va observar la pèrdua d'energia en un sistema astrofísic format per dues estrelles de neutrons que orbitaven al voltant del centre de masses comú ²². Aquest sistema emet ones gravitatòries que fan disminuir-ne l'energia, i, com a conseqüència, les estrelles van a poc a poc acostant-s'hi. Aquests canvis en les òrbites han sigut detectats i s'ha estimat que en, aproximadament, 380 milions d'anys es produirà la coalescència o la fusió d'aquestes, amb l'augment consegüent en el ritme d'emissió d'ones gravitatòries. Seria llavors el moment idoni per a detectar-les. És evident que si fóra aquest l'únic sistema adequat per a la detecció d'ones gravitatòries hauríem perdut tota esperança. No obstant

19.- Amb aquesta predicció, Maxwell unificava l'electromagnetisme i l'òptica ja que la llum no era més que un tipus d'ona electromagnètica.

20.- Aquest experiment va donar origen, pocs anys més tard, a la telegrafia sense fils i, posteriorment, a les emissions radiofòniques. Avui dia, les ones electromagnètiques constitueixen la base fonamental de les comunicacions i la importància que tenen en astrofísica és extraordinària ja que quasi tota la informació que rebem del cosmos ens arriba mitjançant ones electromagnètiques, que abracen tot l'espectre electromagnètic, des dels rajos gamma fins a les ones de ràdio.

21.- A. Einstein, "Über Gravitationswellen". *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften Berlin* (1918), 154–167.

22.- Aquest sistema (pulsar binari PSR B1913+16) va ser descobert per R. Hulse i J. Taylor el 1974, que van ser guardonats amb el premi Nobel de Física el 1993.



Il·lustració artística d'una ona gravitatòria

fenòmens astrofísics que són fonts importants d'ones gravitatòries. Entre aquests destaquem les explosions de supernoves, que es produeixen quan les estrelles massives han esgotat el combustible nuclear després de milions d'anys d'existència. De fet, és en aquestes explosions on es formen les estrelles de neutrons que posteriorment formaran els sistemes binaris com el que hem descrit anteriorment.

Depenent de la massa de l'estrella progenitora, al final de la seua vida, en lloc d'una estrella de neutrons es podria formar un forat negre. Els sistemes binaris constituïts per dos forats negres també són possibles fonts d'ones gravitatòries.

Detecció d'ones gravitatòries

Des de la dècada dels anys 60 del segle passat s'han dissenyat diferents tipus d'instruments amb la finalitat de detectar les ones gravitatòries procedents de fonts astrofísiques.

Els primers detectors d'ones gravitatòries es basaven en el fet que l'ona transporta energia que pot ser transmesa al detector, típicament una esfera, i provocar que aquesta comence a vibrar ²³. Si mesurem la vibració del detector podem inferir característiques de l'ona gravitatòria que la provoca.

Els detectors actuals estan basats en el fet que la distància entre dues masses que deixem caure lliurement està modulada per l'ona gravitatòria que sobre aquestes incideix. El problema és que aquesta distància canvia tan poc que es necessita una precisió extraordinària. Com que el canvi en la distància és proporcional a la distància mateixa, com més gran siga aquesta

23.- Joseph Weber va dissenyar i construir aquest tipus de detector en la dècada dels 60 del segle xx.

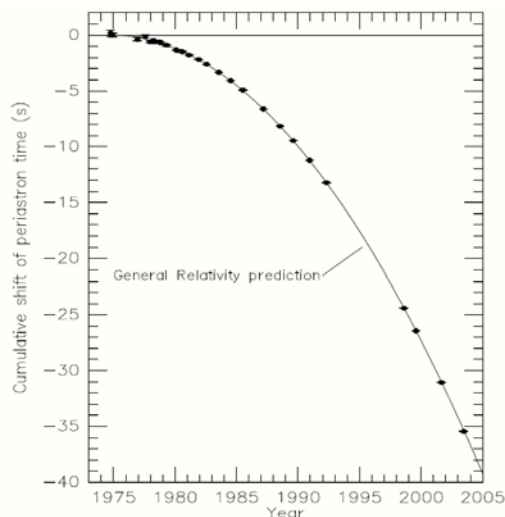
major serà aquella. Convé, per tant, fer detectors en els quals les masses se situen a grans distàncies. Per a detectar aquests canvis en la distància entre les masses s'utilitzen tècniques interferomètriques que són les més precises.

Actualment el 'Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory' (LIGO) ²⁴, constituït per dos detectors als Estats Units, els braços interferomètrics dels quals tenen una longitud de 4 km, i l'observatori europeu Virgo ²⁵, format per un detector a Itàlia, amb braços de 3 km, són capaços de detectar canvis en la distància entre les masses ²⁶ de l'ordre de la mil·lèsima part de la grandària d'un protó. Les dificultats tècniques que s'han hagut de superar per a aconseguir aquesta precisió han sigut enormes, tant en el procés de construcció com en el d'anàlisi del senyal proporcionat pels detectors.

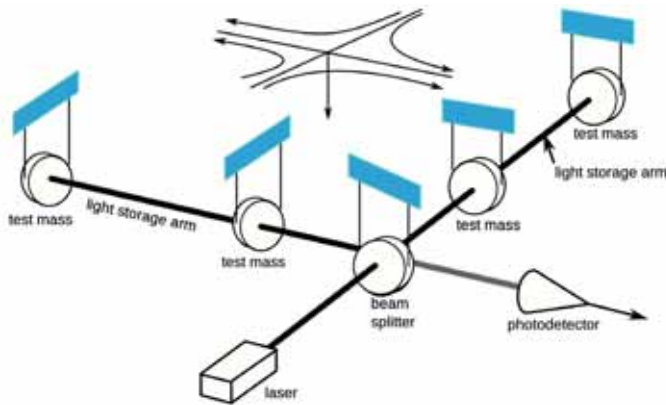
Un dels principals problemes que es té per a extraure el senyal de l'ona gravitatòria que arriba als detectors és que sobre aquesta se superposen senyals sorollosos que arriben a emascarar-la quasi per complet ²⁷. Per a solucionar aquest problema es disposa, almenys, de dos detectors separats per una gran distància per a evitar qualsevol correlació entre la component sorollosa dels senyals. Només la component corresponent a l'ona gravitatòria serà la mateixa en els dos detectors.

A més, es va proposar usar un procediment que consisteix a fer patrons de possibles ones gravitatòries i cercar la presència d'aquests patrons en el senyal que produeixen els detectors.

Així per exemple, mitjançant simulacions numèriques en les quals es resolen les equacions d'Einstein s'obté l'ona gravitatòria produïda en diferents escenaris astrofísics, com són la coalescència de forats negres o d'estrelles de neutrons. La resolució



-
- 24.- Aquest projecte comença a gestar-se en la dècada dels anys 70 del segle xx a partir d'un disseny de Rainer Weiss. A principis dels anys 80 Rainer Weiss, juntament amb Kip Thorne i Ronald Drever, funden el projecte LIGO.
 - 25.- A principi dels anys 80 Alain Brillet del CNRS francès i Adalberto Giazotto de l'INFN italià inicien una col·laboració amb la finalitat de dissenyar el detector interferomètric. L'any 2003 s'acaba la construcció de l'interferòmetre i el 2007 comencen les primeres observacions.
 - 26.- Amb la finalitat de poder utilitzar aquesta tècnica interferomètrica les masses són espills que reflecteixen la llum làser.
 - 27.- Com a fonts de soroll en el senyal esmentarem el soroll sísmic, el tèrmic i el causat a la naturalesa discreta dels fotons ('shot noise').



Esquema de l'interferòmetre per a detectar ones gravitatòries

per dos forats negres.

Fa una mica més d'una dècada va poder resoldre's aquest problema i obtenir l'ona gravitatòria associada a aquest procés ²⁸, i es va poder utilitzar com a patró segons hem esmentat anteriorment.

És evident que empreses com aquesta porten sempre aparellat un gran avanç en ciència i tecnologia que acaba revertint en la societat.

Però pel que fa a la relativitat i l'astrofísica, el gran avanç s'ha produït quan al setembre de 2015 els detectors del projecte LIGO van registrar l'ona gravitatòria procedent de la coalescència de dos forats negres amb la formació d'un de nou. Aquest resultat prova inequívocament l'existència d'ones gravitatòries, predites per la teoria de la relativitat general. A més, l'anàlisi del senyal ha permès determinar les masses dels forats negres involucrats en el procés, i s'ha confirmat l'existència de forats negres amb masses estel·lars. Fins al



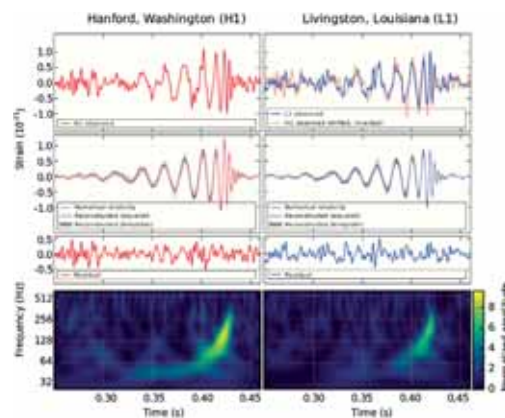
Detector LIGO a Hanford, WA

28.- Frans Pretorius, "Evolution of Binary Black-Hole Spacetimes", *Phys. Rev. Lett.* 95, 121101 (2005).

moment han sigut confirmades tres deteccions i els tres casos corresponen a coalescència de forats negres en sistemes binaris ²⁹.

Amb l'entrada en operació conjunta, el passat 1 d'agost, del detector europeu Virgo ³⁰ es podrà establir amb precisió la direcció de la font d'ones gravitatòries i, en coordinació amb observacions en l'espectre electromagnètic, es podrà determinar millor la naturalesa d'aquest.

Definitivament s'ha obert una nova finestra d'observació de l'univers i, amb aquesta, una nova era en l'Astronomia Moderna amb un nivell d'impacte conceptual anàleg al que va suposar, fa més de quatre-cents anys, l'ús del telescopi en l'observació de Galileu de quatre llunes de Júpiter. Aquesta nova astronomia d'ones gravitatòries proporcionarà informació valuosíssima sobre els fenòmens astrofísics més espectaculars i energètics del cosmos i, en conseqüència, contribuirà d'una manera decisiva a entendre millor l'univers en el qual vivim.



Senyal de l'ona gravitatòria GRI50914 registrada per LIGO

29.- LIGO Collaboration.

“Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger” *Phys. Rev. Lett.* 116, 061102 (2016);

“GW151226: Observation of Gravitational Waves from a 22-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence”, *Phys. Rev. Lett.* 116, 241103 (2016);

“GW170104: Observation of a 50-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence at Redshift 0.2”, *Phys. Rev. Lett.* 118, 221101 (2017).

30.- Els consorcis LIGO i Virgo tenen signat un acord de col·laboració.