



Universitat
de les Illes Balears

Les noves missatgeres de l'Univers

Dra. Alícia M. Sintes Olives

Professora titular de Física Teòrica

Departament de Física i IAC3

Investigadora principal

de la Col·laboració Científica LIGO a la UIB

WWW.uib.cat

Universitat de les Illes Balears
DL PM 949-2017

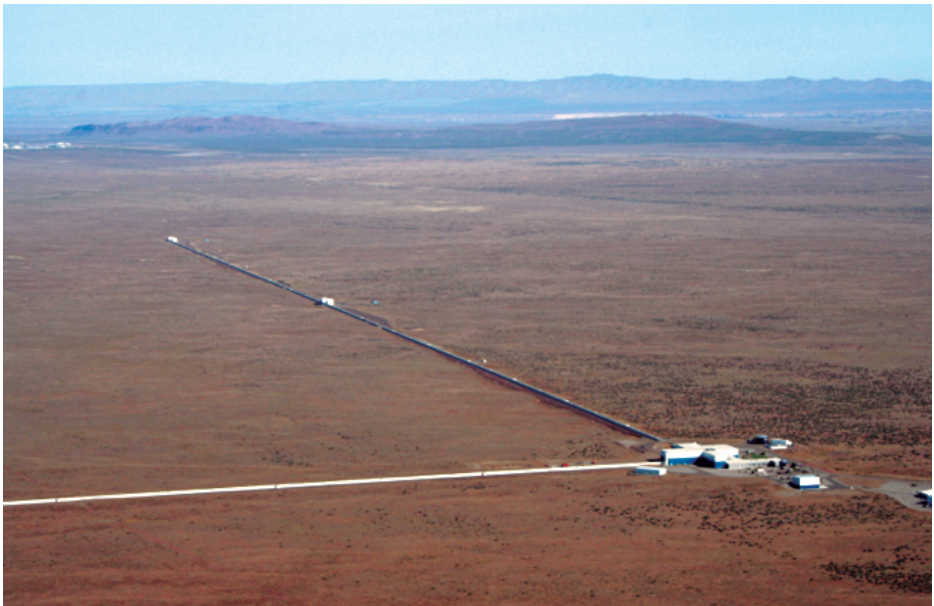
Lliçó inaugural

Any acadèmic 2017-18

Les noves missatgeres de l'Univers

Dra. Alícia M. Sintes Olives

Professora titular de Física Teòrica
Departament de Física i IAC₃
Investigadora principal de la Col·laboració
Científica LIGO a la UIB



Vista aèria de les instal·lacions de LIGO a Hanford. La fotografia mostra els dos braços de l'interferòmetre, de quatre quilòmetres de longitud (<https://www.ligo.caltech.edu/image/ligo20150731f>).

Magnífic Senyor Rector, Molt Honorable Senyora Presidenta, autoritats, senyors i senyores, companys i amics,

El 14 de setembre de 2015, a les 09:50:45 UTC, aproximadament a migdia a les Illes Balears, els Observatoris d'Ones Gravitacionals per Interferometria Làser (LIGO, per les sigles en anglès) marcaven el començament d'una nova era en astronomia amb la detecció de la primera ona gravitacional, anomenada GW150914. Això succeïa pocs dies després que els detectors americans LIGO comencessin a operar com a LIGO Avançat, després de la realització d'importants millores en les instal·lacions, sorprenent així tota la comunitat científica, i cent anys després dels enunciats del científic alemany Albert Einstein.

Només hi ha dos tipus d'ones que ens porten informació sobre l'Univers: les ones electromagnètiques i les ones gravitacionals. Viatgen a la mateixa velocitat però, a part d'això, no poden ser més diferents. Les ones electromagnètiques —que inclouen la llum, les ones infraroges, les microones, les ones de ràdio, les ones ultraviolades, els raigs X i els raigs gamma— són oscil·lacions dels camps elèctrics i magnètics que viatgen a través de l'espai-temps. Les ones gravitacionals són oscil·lacions en el teixit de l'espai-temps.

Galileo Galilei va impel·lir l'astronomia electromagnètica fa quatre-cents anys, quan va construir un petit telescopi òptic, el va dirigir cap al cel i va descobrir les quatre llunes més grans de Júpiter. Nosaltres, els científics de LIGO, vam impel·lir l'astronomia gravitacional el 2015, quan els nostres complexos detectors van descobrir ones gravitacionals de dos forats negres en col·lisió a més de mil milions d'anys llum de la Terra, un esdeveniment còsmic mai abans observat.

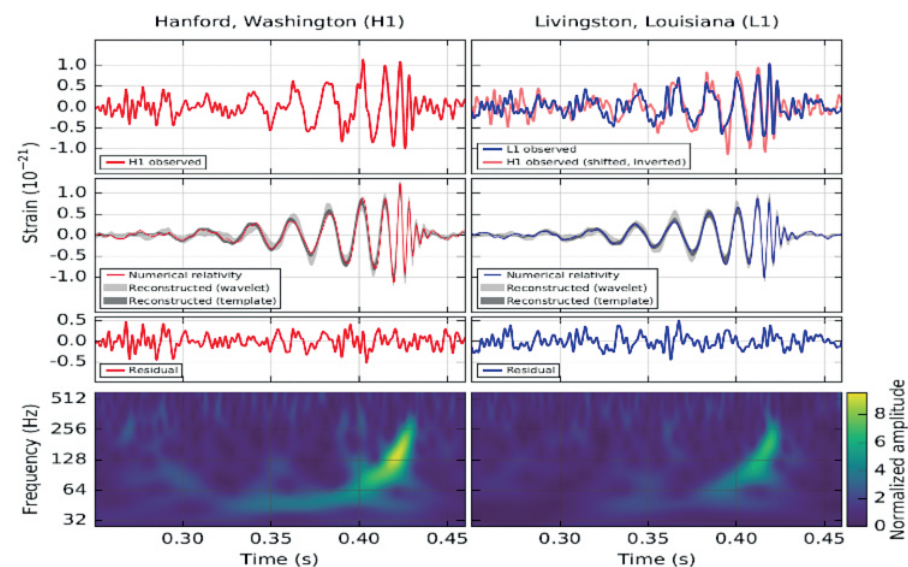
Els esforços que van conduir a aquests dos descobriments no podien ser més diferents. Galileu va fer el seu descobriment sol, tot i que construïa sobre idees i tecnologia d'altres. Els científics de LIGO vam fer el nostre descobriment a través d'una estreta col·laboració internacional de més de mil científics i enginyers, entre els quals ha estat involucrat molt activament el Grup de Relativitat i Gravitació de la Universitat de les Illes Balears. És per aquest motiu que agraeisc molt al Rector haver-nos concedit l'honor de fer-nos càrrec d'aquesta lliçó inaugural de l'any acadèmic 2017-18, que ens dóna l'oportunitat única de compartir amb vosaltres una sèrie de fets i reflexions.

Fa una mica més d'un any i mig, l'11 de febrer de 2016, i després de setmanes d'intensos rumors entre la comunitat científica sobre la possible troballa, va arribar l'esperat anunci de les col·laboracions científiques LIGO i Virgo. Aquest dia el director de l'experiment LIGO, David Reitze, va fer una declaració de transcendència històrica davant la premsa internacional: «Hem detectat ones gravitacionals. Per fi ho hem aconseguit!». Des d'aquest dia les desconegudes ones han acaparat l'atenció dels mitjans, els esdeveniments científics i els més prestigiosos premis internacionals. Els pares del descobriment van sentenciar: «Fins ara hem estat sords davant l'Univers. Avui, som capaços de sentir les ones gravitacionals per primera vegada. Això marca l'inici de l'era de l'astronomia gravitacional. És una magnífica celebració del centenari del vaticini d'Einstein». Fins i tot el gran expert en forats negres Stephen Hawking va voler sumar-se a aquestes entusiastes reaccions: «ara es podran veure algunes relíquies de l'Univers molt d'hora, just després del Big Bang i reconstruir tota la història astronòmica.».

Es tracta, per tant, d'una de les majors troballes de les últimes dècades; aquest descobriment quedarà gravat en els llibres d'història de la ciència del segle XXI. Cap altra fita tecnològica en dècades —excepte potser la del bosó de Higgs el 2012— no havia suscitat tanta expectació com aquesta, perquè tal descobriment suposa un canvi de paradigma, una nova forma de concebre l'Univers de manera diferent de la que havíem heretat de Galileu.

Avui, ja hi ha tres observatoris avançats que estan en funcionament: els dos LIGO, separats per una distància de 3.000 quilòmetres, als EUA, amb braços disposats en forma de L de quatre quilòmetres de longitud, i, des del passat mes d'agost, l'europeu Virgo, de 3 quilòmetres de longitud,

que també ha comptat amb participació espanyola. Ambdues col·laboracions han confirmat ja tres senyals: el famós GW150914; GW151226, detectat el 26 de desembre de 2015 a les 03:38.53 UTC (25 de desembre a la nit als EUA), que va ser un bonic regal de Nadal; i GW170104, anunciat recentment, a principis d'estiu. Això ha permès per primera vegada l'observació de sistemes binaris formats per dos forats negres i veure'n la fusió. Aquestes observacions ens han donat accés directe a les propietats de l'espai-temps en un règim de camp gravitatori fort i d'alta velocitat —atès que els forats negres, abans de la fusió, anaven a velocitats superiors a la meitat de la de la llum—, i a descobrir tota una població de forats negres de masses estel·lars superiors a vint vegades la massa del nostre Sol.



Evolució temporal de les dades registrades pels detectors LIGO associades a GW150914 comparades amb la millor predicció teòrica a partir de la relativitat general. Figura adaptada de la publicació: B.P. Abbott et al., *Phys. Rev. Lett.* 116, 061102 (2016).

Tot això són fets, resultats d'una de les moltes empreses científiques en curs, encara que aquesta sigui una de les més difícils i de més llarga tradició. Però com els icebergs, que mostren només la vuitena part del seu volum, hi ha moltes altres coses ocultes que mereixen ser tretes a la llum en aquesta ocasió. La primera té a veure amb la predicció teòrica. Es fa ressaltar que els resultats de LIGO constitueixen una nova confirmació de la teoria de la relativitat general. I ho és. Però si no es diu res més, serà difícil evitar pensar que la deducció de l'existència de radiació gravitacional a partir de la teoria einsteiniana va ser, si no senzilla sí més o menys directa, cosa que dista molt de la realitat, igual que l'existència dels forats negres.

Va ser el novembre de 1915 quan Albert Einstein va presentar una nova teoria que descrivia la interacció gravitacional. Aquesta es va publicar en forma d'article el 1916 a la influent revista científica *Annalen der Physik* —«Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie». Aquest article incloïa les famoses equacions que governen la dinàmica relativista del camp gravitatori, equacions que tenen la ben merescuda fama d'estar entre les més complicades de resoldre de la física matemàtica. Tant és així que el mateix Einstein dubtava seriosament si mai podrien, de fet, ser resoltes.

D'aquí la seva sorpresa —i la seva corresponent carta d'admiració— en saber que el físic alemany Karl Schwarzschild (un soldat) va poder resoldre-les de forma exacta tot just un mes després de la publicació de les equacions. Tal solució, coneguda com a mètrica de Schwarzschild, descriu l'exterior d'un forat negre amb simetria esfèrica. Anys més tard, el 1963, el matemàtic neozelandès Roy Patrick Kerr va trobar una altra solució de

les equacions d'Einstein que generalitzava la de Schwarzschild, en incloure rotació. Així i tot, Einstein sempre va qüestionar que els forats negres existissin realment a la naturalesa.

Avui en dia sabem que hi ha un forat negre supermassiu al centre de quasi totes les galàxies, inclosa la nostra Via Làctia, amb una massa milions o fins i tot milers de milions de vegades superior a la de Sol; coneixem sistemes amb forats negres de masses estel·lars gràcies a les observacions de sistemes binaris de raigs X; i ara també, gràcies a les ones gravitacionals, els podem observar en galàxies molt llunyanes, veure com ballen un al voltant de l'altre fins que es fonen en un de sol, com dos enamorats que es besen, i emeten en aquest darrer instant, inferior a un segon, una quantitat d'energia en forma de radiació gravitacional superior a la lluminositat combinada (és a dir, el ritme en què l'energia és alliberada en forma de llum) de totes les galàxies a l'Univers observables juntes.

Aquestes dues solucions exactes que mencionava abans, la de Schwarzschild i la de Kerr, van poder trobar-se gràcies a la imposició d'importantes restriccions en les equacions, tant geomètriques (simetries espacials) com evolutives. En el cas més general, sense simetries i en presència de camps gravitatoris dinàmics, les equacions d'Einstein romanen sense resoldre de forma exacta, i cal recórrer a refinades tècniques numèriques, com les que desenvolupa el nostre Grup de Relativitat i Gravitació (GRG) a la UIB, liderat pel professor Carles Bona i el qual és pioner per trobar solucions. Aquestes tècniques permeten, en particular, estudiar l'evolució del camp gravitatori durant l'explosió d'una estrella supernova, o

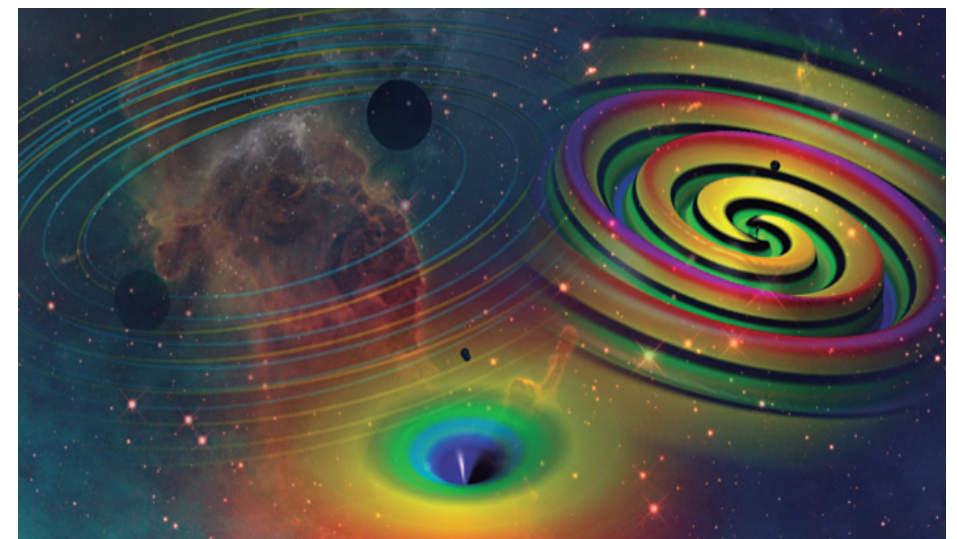
la col·lisió d'objectes compactes en sistemes binaris formats per forats negres o estels de neutrons, que són fonts de radiació gravitacional de gran intensitat, com aquestes primeres que s'han observat.

El coneixement teòric d'aquests estranys objectes, i en particular dels forats negres, ha millorat dràsticament gràcies als avenços en la capacitat de simular en supercomputadors sistemes binaris de forats negres. Aquestes simulacions ens han permès crear catàlegs molt precisos del perfil de les ones gravitacionals d'acord amb les prediccions de la relativitat general.

El desenvolupament d'aquest tipus de catàlegs i models de «cançons» de forats negres ha estat el centre de la recerca del doctor Sascha Husa, també professor de la UIB i membre del GRG, durant la darrera dècada.

Juntament amb altres membres del nostre grup a la UIB, a la Universitat de Cardiff i a l'Institut Max Planck de Física Gravitacional, el doctor Sascha Husa ha desenvolupat models que no només descriuen la fusió de forats negres de forma precisa, sinó que les seves fórmules també poden calcular-se ràpidament amb els grans ordinadors utilitzats en l'anàlisi de les dades de LIGO i Virgo. Aquesta rapidesa ha estat essencial per poder identificar ràpidament l'origen dels senyals que s'han descobert. Les visualitzacions de les nostres simulacions numèriques, realitzades pel senyor Rafel Jaume, són al nostre canal de YouTube UIB@GRG i en diverses revistes de divulgació científica.

Tornant a la història, l'existència o no d'ones gravitacionals anàlogues a les ones electromagnètiques i l'efecte que tenen



Simulació numèrica de la fusió d'un sistema binari de forats negres. Simulació de Sascha Husa i visualització de Rafel Jaume, Universitat de les Illes Balears.

aquestes en sistemes físics va ser un dels apartats de la relativitat general del qual es va ocupar aviat Einstein. Basant-se en l'aproximació lineal de les equacions del camp gravitacional, primer de forma molt succinta, el 1916, i després amb més detall i extensió i corregint alguns errors, el 1918, Einstein va concloure que efectivament existien. No obstant això, aquell treball tenia les suficients limitacions com perquè Einstein tornés a l'assumpte anys després.

Des de la seva concepció, l'existència de la radiació gravitatòria va ser objecte de gran escepticisme per part de prestigiosos científics, entre ells Sir Arthur Eddington i el mateix Einstein. És ben conegut l'àcid comentari d'Eddington el 1922, quan va afirmar que «les ones gravitatòries es propaguen a la velocitat del pensament». Amb aquest comentari, Eddington resumia irònicament la confusió generada per la presència d'artefactes matemàtics que emascaraven la possible realitat física de la radiació gravitacional.

El 1936, Einstein va preparar amb un col·laborador, Nathan Rosen, un manuscrit que van titular «Hi ha ones gravitacionals?», en el qual arribava a la conclusió que no existien. No obstant això, aquell treball contenia errors, i en la versió final, publicada el 1937 amb el títol «Sobre les ones gravitacionals», ja no les rebutjava, però en més d'un passatge les manifestacions no eren en absolut clares. De totes maneres, Einstein va canviar tantes vegades d'opinió sobre les ones gravitacionals que és difícil estar segur de quina va ser la seva posició final.

Davant la pregunta que segurament es plantejaran els profans de com és possible això, cal dir que l'estructura de la relativitat

general és complexa, i és molt difícil determinar coses com quin tipus d'ones hi deu haver, si hi ha les gravitacionals, o com es defineix l'energia. Però aquestes són qüestions tècniques que no puc tractar aquí, el que pretenc és, simplement, assenyalar que no és possible reduir la història de la deducció teòrica de l'existència de radiació gravitacional en la relativitat general a un nom (Einstein) i a un moment inicial (1916). El problema si realment existien les ones gravitacionals es va mantenir durant dècades. Un avanç substancial es va produir vint anys després de l'article d'Einstein i Rosen, i va ser presentat al congrés Conference on the Role of Gravitation in Physics, que va tenir lloc el gener de 1957 a Chapel Hill, a la Universitat de Carolina del Nord.

Allà, Felix Pirani va fer un pas decisiu en el problema de com es podia relacionar la mesura d'aquestes ones amb les equacions relativistes, i va presentar una contribució de claredat cristal·lina: «Measurement of Classical Gravitational Fields». El punt principal d'aquesta presentació va ser la proposta de l'observació de l'efecte de les ones gravitacionals mesurant l'acceleració relativa de dos cossos en caiguda lliure. Pirani va fer una exposició sobre la connexió de l'equació de la desviació geodèsica de la relativitat general i la segona llei de Newton, identificant certes components del tensor de Riemann amb la derivada segona del potencial newtonià. En aquest congrés hi eren presents Hermann Bondi, Richard Feynman i Joseph Weber, que van comprendre immediatament l'essència del missatge. Feynman, amb el seu extraordinari sentit físic, ho va beneir amb la famosa frase: «My instincts are that if you can feel it, you can make it». Aquell dia del 1957 marca el començament de la recerca experimental de

les ones gravitacionals, i un nom sobresurt per sobre de tots: Joseph Weber.

Joseph Weber era un ambiciós professor d'Enginyeria Elèctrica de la Universitat de Maryland i estava cercant la manera de contribuir al treball experimental de la relativitat general després d'haver estat a Princeton amb John Wheeler. Ningú no ho va intentar amb més afany i durant tant de temps. De fet, a final dels anys seixanta, Weber va arribar a creure que havia aconseguit detectar aquestes ones, encara que no era cert. Però això va fer que s'impulsés l'estudi de les fonts d'ones gravitacionals, el problema de l'anàlisi de les dades i els estudis de fonts de soroll. Quan es compara el seu cilindre d'alumini, d'un metre de diàmetre i 3,5 tones de pes, al qual s'acoblaben aparells de quars piezoelèctric per detectar les possibles distorsions que es produïssin en el cilindre quan passés una ona gravitacional, amb els dos detectors de LIGO, cadascun amb braços de quatre quilòmetres de longitud, no podem sinó meravellar-nos de l'entusiasme i la ingenuïtat de Weber.

La primera evidència experimental, però indirecta, que sí que hi ha radiació gravitacional va procedir de la descoberta, el 1974, del primer púlsar binari, PSR B1913+16, descobriment pel qual Russell Hulse i Joseph Taylor van rebre el 1993 el premi Nobel de Física. Després de diversos anys d'observacions continuades d'aquest sistema binari, es va poder concloure que les òrbites dels estels varien acostant-se entre si, i aquest fet es va interpretar en el sentit que el sistema perdia energia a causa de l'emissió d'ones gravitacionals. Aquesta descoberta va impulsar encara més aquest camp. Resultats encara més precisos

s'obtidrien posteriorment amb el púlsar doble PSR J0737-3039, descobert el 2003.

La idea d'usar interferometria làser per mesurar el moviment relatiu de miralls lliures, va ser suggerida per Mikhaïl Gertsenshtein i Vladislav Pustovoit, a Rússia, el 1962, i anys més tard de forma independent pel mateix Joseph Weber i per Rainer Weiss, als EUA. Durant la dècada dels noranta es va iniciar la construcció d'enormes infraestructures que allotjarien la primera generació d'aquests detectors amb braços de centenars de metres de longitud (com és el cas de TAMA al Japó i GEO a Alemanya) a diversos quilòmetres (com Virgo a Itàlia i LIGO als EUA). Aquests detectors van estar prenent dades durant la primera dècada del 2000, sense èxit des del punt de vista de la detecció, però han estat extremadament indispensables per consolidar l'experiència i el desenvolupament de noves tècniques que s'implementarien la dècada següent en els detectors de segona generació que aquesta vegada sí que han complert, com sabeu, les expectatives.

Els LIGO Avançat són només els primers d'una futura xarxa global de detectors composta per LIGO, incloent un tercer observatori a l'Índia, Virgo Avançat a Europa i KAGRA al Japó. Quan aquests arribin a la seva sensibilitat de disseny permetran observar els fenòmens astrofísics més energètics en les profunditats de l'Univers, com el mateix Big Bang, les supernoves, els esclats de raigs gamma, les col·lisions i fusions de forats negres i estels de neutrons, o descobrir sistemes astronòmics fins ara inimaginables.

Quan es produeixen aquests esdeveniments, fan que el teixit de l'espai-temps mateix

vibri com un tambor. Les ondulacions de l'espai-temps emanen en totes direccions, viatjant a la velocitat de la llum i distorsionant-ho físicament tot al seu pas. Però com més s'allunyen del seu origen, més petites tornen, i en el moment en què arriben a la Terra, la distorsió espacial, en detectors tipus LIGO, és com a molt de 10^{-18} metres —una quantitat 1.000 vegades més petita que el diàmetre del protó.

Detectar i extraure la informació que porten aquestes minúscules ones serà decisiu en l'avenç de la física fonamental, l'astrofísica i la cosmologia, i permetrà explorar importants qüestions com, per exemple, com es formen els forats negres, si la relativitat general és la descripció correcta de la gravetat, o com es comporta la matèria sota condicions extremes. Però, a més a més, el treball, tant teòric, tecnològic, com de simulacions o d'anàlisis de dades, desenvolupat en el si d'aquest projecte té un gran valor intrínsec, atès que fa aportacions a l'avenç del coneixement més enllà de les fronteres actuals, i presenta un elevat potencial innovador i de transferència a altres àmbits amb gran impacte social.

Fins al moment LIGO és l'instrument òptic de precisió més gran del món i un dels experiments físics més sofisticats que existeixen. La millora en sensibilitat que va possibilitar aquests recents descobriments va ser el resultat de moltes dècades de treball de científics, enginyers i estudiants, tots ells coordinats internacionalment i gràcies a la complicitat de les agències de finançament de diversos països que fan apostes valentes per avançar en la frontera del coneixement.

Així és la ciència. Una tasca en la qual, llevat d'excepcions, els problemes no solen

ser resolts mitjançant el treball d'un sol científic, i en la qual no falten els errors. Una tasca, a més, llarga. Si es pren com a referència l'article de 1916, s'ha trigat un segle a comprovar que existeixen les ones gravitacionals. No crec que hi hagi molts casos de tal longevitat. La demostració de la conjectura (teorema) que Fermat va proposar el 1637 i que Andrew Wiles va demostrar el 1994 és, certament, un d'aquests, mentre que la detecció del celebrat bosó de Higgs va costar «només» cinquanta anys. La recerca de radiació gravitacional ha estat tan llarga que alguns dels que més van contribuir al seu èxit no van aconseguir veure'n el final. Weber va morir el setembre de 2000. Pirani, el 31 de desembre de 2015. Va tenir la seva confirmació a un pas, encara que dubt que fos informat de la primera observació, que es va produir el 14 de setembre.

Però l'entusiasme per aquestes ones, o l'aventura en la qual m'embarcava ara fa vint anys, quan jo mateixa vaig ser una de les investigadores que va intervenir en la posada en marxa de la Col·laboració Científica LIGO el 1997, no és l'únic missatge que us vull fer arribar. Tots els avenços són útils i necessaris, i aquests fan que s'impulsi l'economia i la qualitat de vida dels ciutadans. Recordau que petites curiositats de principi del segle XX són avui en dia la base de gran part de la tecnologia actual, i ho seran més de la futura.

Malauradament, des del meu punt de vista, la societat i alguns polítics no valoren suficientment la investigació fonamental. Invertir en educació, ciència bàsica i innovació no s'ha de veure com un cost per a la societat sinó com una inversió. De fet, els països que més han invertit en aquests camps són avui dia els més rics. Lamentablement,

la inversió a Espanya pel que fa a recerca, desenvolupament i innovació té molt a desitjar, i ara hem tornat als nivells de 2004. També la mentalitat empresarial se centra a optimitzar procediments existents en lloc de finançar el desenvolupament de projectes nous, i el mercat global emfatitza la implementació ràpida de resultats. Tot això ja ho remarcava Carl Sagan, el gran astrofísic i encara millor divulgador, quan deia que «vivim en una societat totalment dependent de la ciència i la tecnologia en la qual pràcticament ningú no sap res sobre ciència o tecnologia».

Per canviar aquesta situació és fonamental la tasca i l'exemple dels docents, dels professors, de la Universitat amb majúscules i també dels mitjans de comunicació, que també són missatgers en aquest univers del coneixement científic, humanístic i dels valors d'esforç i de superació. Ensenyament i divulgació han d'anar de la mà, i és fonamental acostar la ciència als joves a edats primerenques, per així poder despertar vocacions i canviar els seus interessos, les seves prioritats, com també les de la societat en general, i lluitar contra estereotips. Galileu va ser el primer gran divulgador de la ciència. I vulgaritzar és el que fa un divulgador: comunicar idees bàsiques amb un llenguatge que pugui arribar al públic amb un cert rigor. Això és una tasca que s'hauria de veure com a fonamental per incrementar l'interès i el reconeixement de la ciència en la societat.

Nosaltres hem tingut la sort de treballar en el marc d'un projecte internacional que ha marcat una fita històrica. Però aquest èxit ha estat gràcies al treball i suport de molta gent. En primer lloc, de tots els professors que ens vàreu formar, entre els quals vull destacar els professors Lluís Mas,

Montserrat Casas, Eugeni Garcia, i el meu director de tesi, Jaume Carot, pel nivell i qualitat de l'ensenyament que vaig rebre i la seva gran humanitat. També vull estendre el meu agraïment a tots els membres de la Universitat de les Illes Balears, en particular l'equip de comunicació i tot el PAS, atès que sense ells la nostra feina no seria possible. I a les diverses institucions, com els ministeris de l'Estat espanyol i el Govern de les Illes Balears, pel finançament rebut.

La UIB està fent apostes valentes per l'educació i la recerca, i té grups en múltiples àmbits que destaquen, any rere any, pels seus paràmetres d'excel·lència i alt nivell d'internacionalització. Gràcies a apostes de futur i valentes és possible la consolidació de la base científica i tecnològica de la nostra societat balear, per a la qual les bones polítiques de R+D+I i la innovació són un repte fonamental, i en particular per no tancar les portes al capital humà que hi ha a les Illes Balears.

Des d'aquí vull acabar animant tots els joves a seguir els seus somnis, encara que el camí sigui llarg i a vegades dur.

Gràcies a tots per la vostra atenció.