

Acte d'investidura del Prof. Kip S. Thorne com a doctor *honoris causa* de la Universitat Politècnica de Catalunya·BarcelonaTech (UPC). 25 de maig de 2017.

Discurs d'acceptació Kip S. Thorne

Gràcies, Enrique, per la teva massa generosa descripció de mi i les meves contribucions a la ciència. Aquest doctorat *honoris causa* de la Universitat Politècnica de Catalunya és de gran importància per a mi. Honra, sobretot, les meves contribucions al descobriment que va fer el LIGO de les ones gravitacionals. És per això que considero que el comparteixo amb el gran equip de científics i enginyers, les contribucions dels quals van ser essencials per al nostre descobriment.

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 i el temps. Les ones gravitacionals són oscil·lacions en el *teixit* de l'espai i el temps.

Galileo Galilei va impel·lir l'astronomia electromagnètica fa 400 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 del LIGO, vam impel·lir l'astronomia gravitacional el 2015, quan els nostres detectors complexos van descobrir ones gravitacionals de dos forats negres en col·lisió, a mil milions d'anys llum de la Terra.

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 les idees i la tecnologia d'altres. Els científics del LIGO vam fer el nostre descobriment a través d'una estreta col·laboració entre més de 1.000 científics i enginyers.

El Prof. Garcia-Berro em considera un dels *líders* del projecte LIGO. No obstant això, jo en vaig ser líder en un sentit formal només tres anys, del 1984 al 1987, quan en vaig presidir el comitè directiu, que formaven els tres fundadors: Rai Weiss, Ronald Drever i jo mateix. El nostre comitè de direcció va ser un fracàs. Sovint no ens posàvem d'acord i, per tant, no podíem prendre decisions prou ràpidament per poder tirar endavant el projecte de manera eficient.

Richard Isaacson, el nostre responsable de finançament a la Fundació Nacional de la Ciència (NSF) dels EUA, ens va dir, de manera inequívoca, que l'èxit requeria que

el LIGO tingués un sol director, un director amb prou autoritat i poder per prendre totes les decisions tècniques i de gestió. El director no necessitava experiència prèvia en el camp de les ones gravitacionals. El que ell o ella sí que necessitava era una gran habilitat per dissenyar una estructura de col·laboració i gestió, per aprendre física fonamental amb rapidesa, per trobar els consells útils dels millors experts, per prendre decisions intel·ligents sobre la base d'aquests consells i per convèncer els col·laboradors que acceptessin les seves decisions.

L'èxit del LIGO es deu en bona mesura a una sèrie de directors que tenien aquestes qualitats: Robbie Vogt, després Barry Barish, després Jay Marx i ara David Reitze. D'aquests quatre, només David Reitze tenia experiència en l'àmbit de la ciència d'ones gravitacionals abans d'esdevenir director del LIGO.

Molts altres grans projectes científics han patit dificultats o fins i tot han fracassat perquè no van poder atorgar el poder suficient a un sol director que tingués les habilitats necessàries.

Atès que jo no he estat un líder reeixit en l'organització o la presa de decisions al LIGO, quines han estat les meves contribucions? Com ha indicat el Prof. Garcia-Berro, vaig formular una visió de la ciència que el LIGO hauria de desenvolupar. I vaig fer atenció a la 'partida final'. Em preguntava contínuament: "Què cal, per assolir un èxit total al final? Què hi falta, què ha de confluïr amb l'esforç experimental principal del LIGO per poder estendre el camp de l'astronomia gravitacional i maximitzar la informació que ens aporta?"

Per a mi, desenvolupar aquesta visió i no deixar de pensar en el desenllaç van ser una tasca que va durar mig segle.

Em vaig inspirar, per centrar-me en les ones gravitacionals com a estudiant, el 1963, en el meu mentor, John Wheeler, i en el primer físic experimental que va intentar detectar les ones gravitacionals, Joseph Weber. Especialment importants van ser les meves converses amb Weber durant llargues caminades als Alps francesos.

El 1966, quan em vaig unir al Caltech, vaig començar a formular la meua visió de les fonts de les ones gravitacionals i els coneixements que les ones gravitacionals ens podien aportar; una visió basada en bona mesura en la informació i les idees proporcionades pels meus mateixos alumnes i les dels col·legues de física i astronomia d'arreu del món. Vaig continuar actualitzant aquesta visió en les dècades posteriors, fins a la dècada del 2000, incorporant-la a les propostes de finançament que vam redactar per al LIGO i oferint-la als meus col·legues de l'Observatori, com a guia per als seus esforços d'anàlisi de dades.

El 1972, Rainer Weiss va crear un disseny detallat per a un nou tipus de detector d'ones gravitacionals basat en la interferometria làser, que finalment esdevindria en el LIGO. En l'article experimental més potent que he llegit mai, Rai va identificar les principals fonts de soroll a què un detector d'aquest tipus s'enfrontaria, va descriure formes de tractar cada soroll i va estimar el grau de sensibilitat del detector resultant. Comparant-les amb la força de les ones que els meus col·legues

i jo estàvem calculant, ell va concloure que el detector tenia una bona oportunitat per reeixir.

Al principi vaig ser escèptic. Al llibre *Gravitation*, que vaig publicar un any després amb Charles Misner i John Wheeler, hi vaig etiquetar el detector de Rai com a "no gaire prometedor", ja que necessitava la llum per controlar els moviments d'uns miralls que eren un bilió de vegades més petits que la longitud d'ona de la llum. Semblava ridículament impossible.

Però després d'estudiar l'article de Rai amb profunditat i de llargues converses amb ell, vaig canviar d'opinió i vaig passar la major part de la resta de la meua carrera tractant d'ajudar Rai a aconseguir l'èxit, de totes les maneres en què un teòric podia ajudar-lo.

Ronald Drever, a Glasgow, Escòcia, havia inventat diverses millores importants sorgides de les idees de Rai; de manera que, a finals de la dècada de 1970, vaig ser el responsable de portar Drever al Caltech per crear-hi una iniciativa experimental, en col·laboració amb la de Rai al MIT. I junts, el 1983, tots tres vam crear el projecte LIGO.

Paral·lelament a l'esforç experimental del projecte, jo no deixava de pensar en com acabaria tot plegat. Què *més* calia perquè l'èxit fos total?

Un ingredient addicional obvi era l'anàlisi de dades: com es podrien extreure senyals molt febles de les dades del LIGO, plenes de soroll? Aquí, de nou, inicialment vaig ser ingenu: vaig pensar que l'anàlisi de les dades seria fàcil. Però estava equivocat.

Bernard Schutz, a Cardiff, va començar a pensar profundament sobre l'anàlisi de dades del LIGO a finals de 1980, en col·laboració amb Alberto Lobo i altres. Bernard em va convèncer ràpidament que l'anàlisi de les dades era difícil. De manera que, a principis de 1990, vaig començar a centrar-me en l'anàlisi de dades al Caltech, en paral·lel amb els esforços de Bernard i Alberto a Europa. Aviat un grup de joves amb molt talent, inspirats per Bernard, Alberto i jo, van acceptar el repte i van formular sistemes d'anàlisi de dades que semblaven prometedors. Així que, cap a l'any 2000, em vaig deixar de preocupar de l'anàlisi de dades. Però tenia una altra preocupació més profunda.

El 1980 se'm va fer evident que una de les fonts més fortes —les primeres coses que el LIGO detectaria— probablement seria la col·lisió de forats negres. Per detectar les col·lisions d'ones i extreure'n la informació, necessitàvem un catàleg de totes les *formes* d'ona que les col·lisions podien produir, és a dir, les formes d'ona gravitacional.

El càlcul d'aquestes formes d'ona era tan difícil que no es podia fer només amb llapis i paper. Calien simulacions per ordinador per resoldre les equacions de la relativitat d'Einstein, una tasca anomenada *relativitat numèrica*.

De manera que jo considerava la relativitat numèrica com un esforç crucial que hauria d'alimentar l'anàlisi de dades del LIGO perquè l'Observatori tingués èxit. A

principis de la dècada de 1990, hi havia una dotzena de petits grups de recerca arreu del món tractant de perfeccionar els codis informàtics per a la relativitat numèrica. Però s'avançava molt lentament. Sota la pressió de Richard Isaacson, el responsable de finançament de l'NSF que ens havia obligat a designar un sol director per al LIGO, aquests grups de recerca es van unir en una col·laboració mundial anomenada Grand Challenge Alliance. Com a president del comitè assessor de l'Alliance, tinc una imatge molt clara del seu progrés o, més exactament, de la seva *falta de* progrés al llarg de la dècada de 1990 i la dècada de 2000.

A principis de la dècada de 2000 vaig començar a posar-me realment nerviós. Era probable que les simulacions de col·lisió de forats negres *no* estiguessin llestes a temps per al primer descobriment d'ones gravitacionals del LIGO. Per accelerar la recerca, era necessari un esforç molt més gran i més focalitzat. Afortunadament, en aquell moment jo ja havia format un grup de joves científics que podrien fer-se càrrec dels rols que jo tenia dins el projecte LIGO, de manera que vaig deixar de participar en el dia a dia del LIGO i vaig esmerçar tots els esforços en la relativitat numèrica, en col·laboració amb el gegant intel·lectual d'aquest camp, Saul Teukolsky, de la Universitat de Cornell. El vam anomenar projecte SXS: Simulate eXtreme Spacetimes.

El 2004 un investigador post-doctoral en el nostre projecte SXS, Frans Pretorius, va reeixir en la creació d'un codi informàtic que simulava dos forats negres que orbiten l'un al voltant de l'altre i que, a poc a poc, orbiten en espirals més petites a mesura que les ones gravitacionals perden energia, i que simulava la col·lisió dels forats i l'últim i espectacular esclat d'ones gravitacionals. Sobre la base del gran avenç de Pretorius, el 2015 la nostra col·laboració SXS havia elaborat un catàleg prou complet de formes d'ones gravitacionals per sustentar l'anàlisi de dades del LIGO i els seus descobriments d'ones gravitacionals.

M'afanyo a afegir que, igual que no vaig contribuir significativament a la construcció real dels detectors del LIGO, tampoc vaig contribuir a compondre els codis informàtics SXS. La meua funció principal va ser identificar el que es necessitava i inspirar altres a desenvolupar-ho.

Els detectors avançats del LIGO d'avui tenen un terç del grau de sensibilitat prevista en dissenyar-los. Quan estiguin completament perfeccionats, hi veuran tres vegades més lluny dins l'univers, és a dir, n'abastaran un volum 27 vegades més gran, de manera que en lloc de descobrir al voltant d'una col·lisió de forats negres al mes, cercant-ne les ones, en descobrirà més o menys una al dia. Amb les noves millores previstes, en descobrirà unes quantes cada hora a finals de la dècada de 2020, així com ones de molts altres tipus de fonts. Això, però, requerirà un canvi important en els dissenys dels detectors: un canvi predit fa mig segle per Vladimir Braginsky, un magnífic físic experimental rus.

El 1968, Braginsky ens va dir que, per assolir l'èxit, els nostres detectors d'ones gravitacionals haurien de vigilar els moviments d'objectes molt pesants, com ara els miralls del LIGO, amb tanta precisió que en veuríem fluctuar de forma imprevisible el seu moviment: fluctuacions controlades per les lleis de la mecànica quàntica. Per primera vegada, els humans veurien objectes de mida

humana comportant-se d'acord amb la mecànica quàntica, un comportament només observat, prèviament, en àtoms, molècules i partícules fonamentals. Vaig trigar deu anys, però, al voltant de 1978, vaig entendre la preocupació de Braginsky qualitativament i vaig començar a instar els meus estudiants i investigadors postdoctorals a investigar-la quantitativament.

El 1983, quan Weiss, Drever i jo cofundàvem el LIGO, el meu estudiant Carlton Caves va desenvolupar un coneixement detallat d'aquestes fluctuacions quàntiques dels miralls de l'Observatori. I, des d'aleshores fins ara, el meu grup de recerca del Caltech i el de Braginsky, a Moscou, han col·laborat per desenvolupar el que Braginsky denomina *quantum nondemolition techniques* (tècniques quàntiques no destructives) per al LIGO: tècniques experimentals i d'anàlisi de dades per assegurar que els senyals d'ones gravitacionals que passen a través dels miralls de 40 quilos del LIGO no siguin destruïts per les fluctuacions quàntiques dels miralls. La primera d'aquestes tècniques quàntiques no destructives s'implementarà al LIGO a finals d'aquest any i durant els propers anys esdevindran crucials.

Aquí, de nou, he de confessar: aquestes tècniques quàntiques no destructives van ser dissenyades en bona mesura pels meus estudiants i investigadors postdoctorals, i pels estudiants i investigadors post-doctorals de Braginsky. El meu paper aquí, com en la majoria de llocs, va ser identificar el que calia fer i exhortar els altres a fer-ho.

En aquest sentit he estat crucial per al LIGO. No obstant això, el mèrit real per a l'èxit del LIGO és d'altres: els científics i enginyers que van construir els detectors del LIGO i que els van fer funcionar; aquells que van desenvolupar els algorismes d'anàlisi de dades del LIGO i que els van fer funcionar; aquells que van perfeccionar els codis informàtics de relativitat numèrica i els van utilitzar per simular la col·lisió de forats negres, i aquells que van formular i perfeccionar les tècniques quàntiques de no demolició del LIGO i que començaran a implementar-les-hi a finals d'aquest any.

A aquests col·legues, els dono les gràcies; els estic enormement agraït. Els èxits del LIGO són seus; són ells, que es mereixen el reconeixement. I considero que comparteixen aquest meravellós doctorat *honoris causa* amb mi.