

**Acte d'investidura  
del Prof. Kip S. Thorne  
com a doctor *honoris causa*  
de la Universitat Politècnica de Catalunya**



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA  
DE CATALUNYA  
BARCELONATECH**

*Campus d'Excel·lència Internacional*

Acte d'investidura del  
Prof. Kip S. Thorne  
com a doctor *honoris causa*  
de la Universitat Politècnica  
de Catalunya·BarcelonaTech

25 de maig de 2017



UNIVERSITAT POLITÈCNICA  
DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

*Campus d'Excel·lència Internacional*

Imprès en paper ecològic

Servei de Comunicació de la UPC, 2017 (9678)

# Índex / Table of contents

Ordre de l'acte d'investidura /	5
<i>Order of the award ceremony</i>	15
Elogi dels mèrits del Prof. Kip S. Thorne, Prof. Enrique Garcia-Berro /	7
<i>Oration for the Prof. Kip S. Thorne by the sponsor, Prof. Enrique Garcia-Berro</i>	17
Discurs pronunciat pel nou doctor <i>honoris causa</i> , Prof. Kip S. Thorne /	11
<i>Acceptance speech by Prof. Kip S. Thorne</i>	21



# Ordre de l'acte d'investidura

Benvinguda del rector de la Universitat Politècnica de Catalunya · BarcelonaTech, Prof. Enric Fossas.

Lectura de l'acord del Consell de Govern, a càrrec del secretari general, Dr. José M. Sallán.

*Laudatio* del padrí, Prof. Enrique Garcia-Berro.

Acte solemne d'investidura del Prof. Kip S. Thorne com a doctor *honoris causa* per la Universitat Politècnica de Catalunya · BarcelonaTech.

Discurs del nou doctor *honoris causa*, Prof. Kip S. Thorne.

Paraules del rector, Prof. Enric Fossas.

Interpretació musical.

*Canticuorum*, de l'oratori Judas Macabeu

*An Irish Blessing*, harmonització de James E. Moore

*Good news*, harmonització de Wolfgang Kelber

*Gaudeamus Igitur*, harmonització de Joan Casulleres

Interpretacions musicals a càrrec de la Coral Gaudeamus de l'EEBE, la Coral del Parc Mediterrani de la Tecnologia, el Cor Ol·lari de l'FME, la Coral Arquitectura i l'Orquestra de la UPC.

## ***Gaudeamus Igitur***

---

Gaudeamus igitur,  
iuvenes dum sumus. (bis)  
Post iucundam iuventutem,  
post molestam senectutem,  
nos habebit humus.

Vivat Academia,  
vivat professores.  
Vivat membrum quodlibet,  
vivat membra quaelibet,  
semper sint in flore.

Gaudeamus igitur,  
iuvenes dum sumus. (bis)  
Post iucundam iuventutem,  
post molestam senectutem,  
nos habebit humus.



# Elogi dels mèrits del Prof. Kip S. Thorne

Prof. Enrique Garcia-Berro  
Universitat Politècnica de Catalunya · BarcelonaTech

## KIP S. THORNE. LA RECERCA D'ONES GRAVITACIONALS

És per a mi un plaer i un honor lloar la trajectòria acadèmica del Prof. Thorne. Pot semblar increïble, però vaig conèixer el professor Thorne ahir, a l'Aeroport de Barcelona. No obstant això, durant aquests últims mesos hem intercanviat molts, molts correus electrònics, i permeteu-me dir-vos que no és només un gran científic que mereix els honors més alts, sinó també una persona meravellosa i modesta. Sempre ha respost els meus missatges sense demora i ha facilitat enormement la meva tasca.

La idea que la UPC atorgués al Prof. Thorne un doctorat *honoris causa* va sorgir el novembre de 2015, quan el detector LIGO (Observatori d'Ones Gravitacionals per Interferometria Làser) va confirmar experimentalment l'existència de les ones gravitacionals. Encara que aquells dies hi havia rumors en la comunitat científica sobre un anunci important, vaig esperar que es publicués l'article. Els resultats van ser publicats a la revista *Physical Review Letters* poc després de la detecció experimental d'ones gravitacionals l'any 2015, tot i que la versió impresa es va publicar el 2016. Vaig gaudir molt llegint l'article. Vaig trigar uns 15 minuts a llegir-lo i a entendre el que havien fet, i per adonar-me com de convincents eren les proves de la detecció d'ones gravitacionals. De fet, crec que l'article és una veritable obra mestra

de la literatura científica. Està molt ben escrit i és clar i concís. Després de llegir-lo, vaig respirar profundament i em vaig adonar que estava vivint un moment històric. Finalment, després de moltes dècades, la recerca d'ones gravitacionals havia arribat a un final satisfactori! El primer que vaig pensar després d'això va ser: per què no convidar el Prof. Thorne, un dels líders del projecte, a ser un membre honorari de la nostra Universitat?

El pas següent va ser parlar amb el director del Departament de Física, el Dr. Crespo, i el director adjunt, el Dr. José, i els vaig engrescar per proposar la idea al vicerector de Recerca de la UPC, el Dr. Orejas. Tots tres estaven entusiasmats, de manera que vaig preguntar al Prof. Thorne si acceptaria un doctorat *honoris causa* de la UPC. Ell va acceptar gairebé immediatament.

La proposta va obtenir el suport de les més prestigioses institucions acadèmiques, com la Universitat de Cambridge, l'Institut Max Planck de Física Gravitacional i la Universitat de Trento, així com de diversos centres nacionals de recerca i departaments universitaris.

El Prof. Thorne va néixer a Utah el 1940. Va estudiar física al Caltech i s'hi va llicenciar el 1962. Va obtenir un doctorat de la Universitat de Princeton tres anys més tard. Va tornar al Caltech com a professor titular el 1967 i va ser nomenat catedràtic de



Física Teòrica el 1970. Més tard, el 1981, va ocupar la càtedra William R. Kenan Jr. i, després, el 1991, la càtedra Feynman de Física Teòrica. Ara és professor emèrit al Caltech.

Tractar de lloar la trajectòria científica del Prof. Thorne és una tasca difícil. Els seus èxits són molts i àmpliament coneguts, i ha fet contribucions molt influents en molts camps de la física.

La seva recerca inclou no només la física gravitatòria i l'astrofísica, amb un èmfasi especial en els estels relativistes, els forats negres i les ones gravitacionals, sinó també l'òptica, les tècniques d'anàlisi de dades per detectar ones gravitacionals, el disseny de detectors d'ones gravitacionals, l'estudi de les fonts de soroll en aquests detectors i el disseny d'algorismes per controlar-les.

Recentment ha escrit obres crucials que exploren el comportament dinàmic no lineal de l'espai-temps corbat, en què ha utilitzat tant simulacions per ordinador com càlculs analítics. En nom de la concisió, només revisaré els mèrits del Prof. Thorne en l'àmbit de la física gravitacional i l'astrofísica.

Aquells qui hi estiguin interessats poden trobar més informació sobre les seves contribucions en altres àrees de la física contemporània en altres llocs.

El Prof. Thorne va ser cofundador del projecte LIGO, el detector d'ones gravitacionals més avançat mai construït, i va presidir el comitè directiu que va dirigir la recerca del LIGO els primers anys (1984-1987).

Durant gairebé tres dècades ell i el seu equip van proporcionar el suport teòric per al LIGO, incloent-hi la identificació de les fonts d'ones gravitacionals que el LIGO havia de tenir com a objectiu. Tot això va conduir a un gran avenç: la detecció directa, el 14 de setembre de 2015, de les ones gravitacionals mitjançant la col·laboració del LIGO. Aquesta detecció va confirmar l'última predicció de la teoria de la relativitat general d'Albert Einstein

que quedava per demostrar experimentalment i, cosa que és més important, obria una nova finestra d'observació de l'astrofísica moderna, a més de, per exemple, la finestra electromagnètica. Aquesta finestra d'observació ens permetrà explorar, des d'una perspectiva diferent, fenòmens molt interessants, com l'estructura de l'univers a gran escala o l'evolució de l'univers durant els primers moments de vida.

D'altra banda, serem capaços d'estudiar amb noves eines els fenòmens més energètics del nostre univers, incloent-hi la fusió dels forats negres i altres objectes compactes. Tot això no hauria estat possible sense la visió revolucionària i el treball pioner del Prof. Thorne.

La detecció d'ones gravitacionals és tècnicament molt difícil. Es necessiten mesures extremament precises, ja que la distorsió de l'espai-temps produïda per una ona gravitacional és extremament petita. Alguns nombres ens ajudaran a entendre les dificultats experimentals. L'observatori LIGO té dos detectors, un a Hanford (Washington) i un altre a Livingston (Louisiana).

El principi de detecció bàsic consisteix a mesurar, amb la màxima exactitud possible, la distància entre dues masses de prova (miralls de quatre kilograms) quan l'ona gravitacional distorsiona l'espai-temps. Això es fa utilitzant interferòmetres làser.

La longitud dels dos braços interferomètrics de cada un dels detectors LIGO és de 4 km i la precisió amb què mesuren la distància entre les masses de prova és d'una mil·lèsima part del diàmetre d'un protó! Això, naturalment, implica desenvolupar tecnologies d'última generació, i el Prof. Thorne va portar a terme aquest desenvolupament.

Els senyals registrats mitjançant la col·laboració del LIGO s'han de comparar amb plantilles teòriques existents per obtenir resultats sòlids. El càlcul d'aquestes formes d'ona també requereix un esforç considerable, no només pel fet que aquests càlculs són un

exemple de ciència d'avantguarda, sinó també perquè calcular les plantilles realistes i comparar-les amb les dades observades requereix una immensa càrrega computacional.

Perquè us feu una idea de la dificultat de l'anàlisi teòrica de les dades del LIGO: es trigarien 5.000 anys per executar l'anàlisi del senyal enregistrat en un ordinador portàtil modern. Per tant, es van utilitzar 10 superordinadors per realitzar els càlculs que van permetre la primera detecció d'ones gravitacionals.

D'altra banda, utilitzant els algorismes de processament de senyals més avançats, el senyal rebut pels detectors del LIGO el setembre de 2015 es va comparar amb les prediccions de les simulacions de relativitat numèrica del projecte SXS (Simulate eXtreme Spacetimes), un altre projecte dirigit pel Prof. Thorne, i es va trobar que els càlculs teòrics tenien un alt grau de coincidència amb les dades observades.

Cal afegir que aquesta comparació va permetre extreure els paràmetres físics de la font i va demostrar que les ones gravitacionals detectades van ser emeses durant la fusió de dos forats negres massius en rotació, cosa que confirmava l'existència dels forats negres.

El Prof. Thorne ha supervisat 52 estudiants de doctorat. La majoria d'ells han tingut carreres molt reeixides i són considerats els principals experts en els seus camps de recerca. N'esmentaré només uns quants, majoritàriament relacionats amb l'astrofísica i la cosmologia.

El Prof. Thorne va supervisar la tesi doctoral d'Anna Zytkov (Universitat de Cambridge, Regne Unit), que va descobrir una nova classe d'objectes astronòmics, els anomenats objectes Thorne-Zytkov, que són estels gegants vermells, o estels supergegants, que contenen un estel de neutrons en el nucli i que són el resultat de la col·lisió d'estrelles gegants amb estrelles de neutrons.

També va dirigir, juntament amb Stephen W. Hawking, la tesi doctoral de Don N. Page (Universitat d'Alberta, Canadà). Van

desenvolupar la teoria relativista general dels discs d'acreció primis al voltant de forats negres, un problema essencial de l'astrofísica relativista.

Un altre físic rellevant al qual el Dr. Thorne va fer de mentor és Bernard Schutz, que ha centrat la seva investigació en la física de les ones gravitacionals i és l'investigador principal del grup d'Astrofísica de l'Institut Max Planck de Física Gravitacional a Potsdam, Alemanya.

El Prof. Thorne també va supervisar la tesi doctoral de Clifford Will (Universitat de Florida, EUA), un expert mundial en proves de precisió de la gravetat; de Saul A. Teukolsky (Universitat Cornell, EUA), que és un expert de reconegut prestigi en relativitat numèrica, i de William H. Press (Universitat de Texas a Austin, EUA), que ha fet descobriments fonamentals en l'àmbit de l'astronomia extragalàctica.

De passada vull comentar que Teukolsky i Press, juntament amb William Vetterling i Brian Flannery, són coautors del conegut llibre *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing*, un supervendes que molts de nosaltres hem utilitzat molt sovint.

El Prof. Thorne també gaudeix molt ensenyant estudiants de grau i postgrau. De fet, aquesta tarda alguns dels nostres estudiants de física i matemàtiques, estudiants seleccionats sobre la base del seu expedient acadèmic, tindran l'oportunitat de parlar amb ell. Estic segur que ho recordaran per a la resta de les seves vides.

El seu interès en les tasques docents i de divulgació el va portar a escriure diversos llibres. En particular, Thorne va ser coautor del llibre de text *Gravitation*, amb John A. Wheeler i Charles W. Misner, el 1973. Molts de nosaltres hem après la relativitat general amb aquest llibre de text com a referència bàsica, que, més de 40 anys després, és una referència fonamental per a joves estudiants i investigadors d'alt nivell.

Els registres bibliogràfics del Prof. Thorne són simplement impressionants. Excloent els articles en coautoria amb la col·laboració del LIGO, és autor de més de 300 articles en revistes indexades. Ha acumulat més de 28.000 cites i té un índex h de 83, una fita increïble. La seva contribució més citada, el llibre de text *Gravitation*, té més de 5.700 cites.

Sincerament, no conec cap altre físic viu la investigació del qual hagi tingut un impacte més gran i que sigui tan influent.

El Prof. Thorne també ha tingut una carrera cinematogràfica. La seva primera pel·lícula a Hollywood va ser *Interstellar*, dirigida per Christopher Nolan, el 2014, de la qual va ser assessor científic i productor executiu. També va aportar idees sobre els viatges pels forats de cuc a Carl Sagan per a la seva novel·la *Contact*.

Les seves presentacions sobre els forats negres, la radiació gravitatòria, la relativitat, els viatges en el temps i els forats de cuc s'han mostrat a la PBS, als EUA, i a la BBC, al Regne Unit.

Ara voldria retre un afectuós homenatge a un amic que compartíem, el Dr. José Alberto Lobo, que va morir prematurament el 2012, víctima d'una greu malaltia, el càncer. Estic segur que seria molt feliç en aquest moment, i no el puc oblidar. Sempre recordaré fructíferes discussions amb ell sobre les ones gravitacionals radiades durant la coalescència d'un sistema binari de nanes blanques, un problema que he estudiat per tractar la naturalesa dels progenitors de les supernoves termonuclears. Ell va insistir que havia de calcular el patró d'ones gravitacionals i, probablement, és la raó per la qual sóc aquí avui. Obviament, per calcular el patró de radiació resultant de la fusió de nanes blanques vaig utilitzar el llibre del Prof. Thorne.

El Dr. Lobo va ser el pioner de l'astronomia d'ones gravitacionals a Espanya. Quan gairebé ningú no creia que fos possible detectar les ones gravitacionals va estudiar, pràcticament sol, aquesta possibilitat.

A mesura que les tècniques experimentals avançaven, va començar a establir un grup petit però molt competitiu, que més tard va participar en el disseny del Lisa Pathfinder (LPF), una missió de l'Agència Espacial Europea que va tenir com a objectiu demostrar la viabilitat del LISA, un observatori d'ones gravitacionals a l'espai que compartia els principis de funcionament amb detectors interferomètrics a terra, però en una escala molt més gran (2,5 milions de kilòmetres).

El Dr. Lobo, juntament amb el seu equip de recerca a l'Institut d'Estudis Espacials de Catalunya, va liderar la participació espanyola a l'LPF, que consistia en el disseny del subsistema de dades i diagnòstic del paquet de tecnologia LISA (LTP), la càrrega útil de l'LPF. Diversos grups de recerca de la UPC hi han participat.

Per concloure, m'agradaria parafrasejar les paraules del president John F. Kennedy en el seu famós discurs davant el Congrés dels Estats Units per demanar suport per arribar a la Lluna: el Prof. Thorne va triar detectar ones gravitacionals no perquè fos fàcil, sinó perquè era difícil; perquè l'objectiu servia per organitzar i mesurar el millor de les nostres energies i habilitats; perquè aquest repte és el que estava disposat a acceptar, el que no estava disposat a posposar, i el que tenia la intenció de guanyar.

I ho va fer!

Moltes gràcies.

# Discurs pronunciat pel nou doctor *honoris causa*, Prof. 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 adicional 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 equivocacat.

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 impredecible 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 post-doctorals, 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.

# Order of the award ceremony

Welcome from the rector of the Universitat Politècnica de Catalunya · BarcelonaTech, Prof. Enric Fossas.

Reading of the Governing Council's agreement by the general secretary, Dr José M. Sallán.

Oration for Prof. Kip S. Thorne by the sponsor, Prof. Enrique Garcia-Berro.

Conferral of the honorary doctorate on Prof. Kip S. Thorne by the Universitat Politècnica de Catalunya · BarcelonaTech.

Acceptance speech by Prof. Kip S. Thorne.

Speech by the rector of the UPC, Prof. Enric Fossas.

Short concert by the UPC's choirs.

*Canticuorum*, by Judas Macabeu chapel

*An Irish Blessing*, arranged by James E. Moore

*Good news*, arranged by Wolfgag Kelber

*Gaudeamus Igitur*, arranged by Joan Casulleres

The music will be performed by the EEBE's Gaudeamus choir, the PMT's choir, the FME's Ol-lari choir, the Arquitectura choir and the UPC Orchestra.

## ***Gaudeamus Igitur***

---

Gaudeamus igitur,  
iuvenes dum sumus. (bis)  
Post iucundam iuventutem,  
post molestam senectutem,  
nos habebit humus.

Vivat Academia,  
vivant professores.  
Vivat membrum quodlibet,  
vivant membra quaelibet,  
semper sint in flore.

Gaudeamus igitur,  
iuvenes dum sumus. (bis)  
Post iucundam iuventutem,  
post molestam senectutem,  
nos habebit humus.





# Oration for the Prof. Kip S. Thorne by the sponsor

*Prof. Enrique Garcia-Berro*  
*Universitat Politècnica de Catalunya · BarcelonaTech*

## KIP S. THORNE. THE QUEST FOR GRAVITATIONAL WAVES

It is for me a pleasure and an honor to praise the academic trajectory of Prof. Thorne. Believe it or not, the first time I met Prof. Thorne in person was... yesterday, at Barcelona Airport. However, during these last months we have exchanged many, many emails, and let me tell you that he is not only a great scientist who deserves the highest honors, but also a wonderful, and modest, person. He always answered my emails promptly and has facilitated my task enormously.

The idea of awarding Prof. Thorne an honorary doctorate of the UPC originally came up in November 2015, when the LIGO (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory) detector confirmed the existence of gravitational waves experimentally. Although in September 2015 there were rumors in the scientific community about an important announcement of the LIGO experiment, I waited until the results were published in *Physical Review Letters* shortly after the discovery. Actually, the printed version of the paper was published in 2016. I enjoyed reading the paper very much. It took me about 15 minutes to read and to

understand what they had done, and to figure out how compelling the evidence for the detection of gravitational waves was. In fact, I think the paper is a true masterpiece of scientific literature. It is very well written and it is clear and concise. After reading it, I took a deep breath and realized I was living a historic moment. At last, after many decades, the quest for gravitational waves had finally reached a satisfactory end! My first thought after this was why not ask Prof. Thorne, one of the leaders of the project, to become an honorary member of our university? I then talked to the director of the Department of Physics, Prof. Crespo, and the assistant director, Prof. José, and prompted them to propose the idea to the UPC's vice-rector for Research, Prof. Orejas. All three were enthusiastic, so we asked Prof. Thorne to accept an honorary degree from the UPC. He accepted almost immediately. Then, we collected letters of support from some of the most prestigious academic institutions, such as the University of Cambridge, the Max Planck Institute for Gravitational Physics and the University of Trento, as well as from several national research centers and university departments.

Prof. Thorne was born in Utah in 1940. He studied physics at Caltech and graduated in 1962. He obtained a PhD from Prince-

ton University three years later. Prof. Thorne returned to Caltech as an associate professor in 1967 and was appointed professor of theoretical physics in 1970. Later, in 1981, he became the William R. Kenan Jr. Professor, and then, in 1991, the Feynman Professor of Theoretical Physics. He is now emeritus professor at Caltech.

Trying to praise the scientific trajectory of Prof. Thorne is a challenging endeavor. His achievements are many and widely known, and he has made seminal contributions to many fields of physics. His research encompasses not only gravitational physics and astrophysics, with an emphasis on relativistic stars, black holes and gravitational waves, but also optics, data analysis techniques to detect gravitational waves, the design of gravitational wave detectors, the study of the noise sources in these detectors, and the design of algorithms to control them. Recently, he has written crucial works exploring the nonlinear dynamical behavior of curved space-time, using both computer simulations and analytical calculations. For the sake of conciseness, I will only review the merits of Prof. Thorne in gravitational physics and astrophysics. Those who are interested can find more information on his contributions in other areas of contemporary physics elsewhere.

Prof. Thorne was co-founder of the LIGO project, the most advanced gravitational wave detector ever built, and he chaired the steering committee that led LIGO in its earliest years (1984-87). For almost three decades he and his research team provided theoretical support for LIGO, including identifying the gravitational wave sources that LIGO should target. All this led to a breakthrough: the direct detection, on 14 September 2015, of gravitational waves by the LIGO collaboration. This detection confirmed the last prediction of Albert Einstein's theory of general relativity that remained to be experimentally proved, and most importantly, opened a new observational window for modern astrophysics, in addition to, for instance, the electromagnetic window. This observational window will allow us to explore ex-

tremely interesting phenomena such as the large-scale structure of the universe or its evolution during the very first moments of its life from a different perspective. Moreover, we will be able to study with new tools the most energetic phenomena in our universe, including the merger of black holes and other compact objects. All this would have not been possible without the revolutionary vision and pioneering work of Prof. Thorne.

Detecting gravitational waves is technically very challenging. Extremely accurate measurements are needed, since the distortion of space-time produced by a passing gravitational wave is exceedingly small. Some numbers will help us to define the concepts. The LIGO experiment has two detectors, one in Hanford (Washington) and another in Livingston (Louisiana). The basic detection principle consists in measuring with the highest possible accuracy the distance between two test masses (40 kilograms mirrors) as the gravitational wave distorts space-time. This is done using interferometers. The laser beams of the two interferometric arms of each of the LIGO detectors are 4 km, and the accuracy to which they measure the distance between the test masses is  $1/1000^{\text{th}}$  the diameter of a proton! This, naturally, involves the development of cutting-edge technologies, and Prof. Thorne led this development.

The signals recorded by the LIGO collaboration need to be compared with extant theoretical templates to obtain physically sound results. Computing such waveforms also requires considerable effort, not only because these calculations are an example of forefront science, but also because computing realistic templates and comparing them with the observed data requires a tremendous computational load. To give you an idea of the difficulty of the theoretical analysis of the LIGO data, it would take 5,000 years to run the analysis of the recorded signal on a modern laptop. Thus, 10 supercomputers were used to perform the calculations that allowed the first detection of gravitational waves. Moreover, using state-of-the-art signal processing algorithms, the signal received by the LIGO detectors in September

2015 was compared to the predictions of the numerical relativity simulations by the SXS (Simulate eXtreme Space-times) project, another project led by Prof. Thorne, and it was found that the theoretical calculations matched the observed data very closely. Moreover, this comparison allowed the physical parameters of the source to be derived, and proved that the gravitational waves detected were emitted during the merger of two spinning massive black holes, thus confirming the existence of black holes.

Prof. Thorne has supervised 52 PhD students. Most of them have had very successful careers and are considered leading experts in their respective fields of research. Just to mention a few that are mostly related to astrophysics and cosmology: Prof. Thorne supervised the PhD dissertation of Anna Zytow (University of Cambridge), who discovered a new class of astronomical objects, the so-called Thorne-Zytow objects, which are red giant stars or super-giants containing a neutron star at their core, and are the result of the collision of such stars with neutron stars. He also mentored, together with Stephen W. Hawking, the PhD dissertation of Don N. Page (University of Alberta, Canada). They developed the general relativistic theory of thin accretion disks around black holes, an essential problem in relativistic astrophysics. Another relevant physicist who was mentored by Prof. Thorne is Bernard Schutz, who has focused his research on the physics of gravitational waves and is the head of the Astrophysics group at the Max Planck Institute for Gravitational Physics in Potsdam, Germany. Prof. Thorne also supervised the PhD dissertations of Clifford Will (University of Florida), a world-class expert in precision tests of gravity, Saul A. Teukolsky (Cornell University), who is a leading expert in numerical relativity, and William H. Press (University of Texas at Austin), who has made fundamental discoveries in extragalactic astronomy. In passing I note that Teukolsky and Press, together with William Vetterling and Brian Flannery, are co-authors of the well-known *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing*, a best-selling book that many of us have used quite often.

Prof. Thorne also very much enjoys giving lectures to graduate and undergraduate students. Actually, this afternoon a few of

our physics and mathematics students, selected on the basis of their academic records, will have the chance to talk to him. I am sure they will remember this event for the rest of their lives. His interest in teaching duties and public outreach led him to write several books. In particular, Thorne co-authored the textbook *Gravitation* with John A. Wheeler and Charles W. Misner in 1973. Many of us have learned general relativity using this textbook as the basic reference, and it is, over 40 years later, a cornerstone reference for young students and senior researchers.

The bibliographical records of Prof. Thorne are simply impressive. Excluding the papers co-authored with the LIGO collaboration, he has authored more than 300 papers in refereed journals. He has accumulated over 28,000 citations, and he has an h-index of 83, an unbelievable landmark. His most cited contribution, the textbook *Gravitation*, has more than 5,700 citations. I honestly do not know of any other living physicist whose research has had a bigger impact and who is so influential.

Prof. Thorne has also pursued a career in movie making. His first Hollywood movie was *Interstellar*, directed by Christopher Nolan, in 2014. He was the science advisor and an executive producer of the film. He also contributed ideas on wormhole travel to Carl Sagan for use in his novel *Contact*. His presentations on black holes, gravitational radiation, relativity, time travel, and wormholes have been shown in PBS shows in the United States and on the BBC in the United Kingdom.

Let me now pay a fond tribute to a friend we shared, Prof. José Alberto Lobo, who died prematurely in 2012, the victim of a serious illness, cancer. He would be very happy on this occasion, and I cannot forget about him. I will always remember fruitful discussions with him about the gravitational waves radiated during the coalescence of a white dwarf binary system, a problem that I have studied to address the nature of the progenitors of thermonuclear supernovae. He insisted that I compute the gravitational wave pattern, and this is probably why I am here

today. Obviously, to compute the resulting radiation pattern of merging white dwarfs I used Prof. Thorne's book. Prof. Lobo was the pioneer of gravitational wave astronomy in Spain. When almost nobody believed in the possibility of detecting gravitational waves he studied, practically by himself, such a possibility. As the experimental techniques advanced he started to set up a small, but very competitive, group that later became involved in the design of Lisa Pathfinder (LPF), a European Space Agency mission that aimed to demonstrate the feasibility of LISA, a space-borne gravitational wave observatory that shares its working principles with ground-based interferometric detectors but on a much larger scale (2.5 million kilometers). Prof. Lobo, together with his research team at the Institute for Space Studies of Catalonia, led the Spanish participation in LPF, which

consisted of the design of the data and diagnostic subsystem of the LISA technology package (LTP), the payload of LPF. Several UPC research groups have participated in this effort.

To conclude, I would like to paraphrase the words of President John F. Kennedy in his famous address to the United States Congress to ask for support to reach the Moon: Prof. Thorne chose to detect gravitational waves, not because it was easy, but because it was hard, because the goal served to organize and measure the best of our energies and skills, because that challenge is the one he was willing to accept, the one he was unwilling to postpone, and the one he intended to win –and he did!

Thank you very much. Muchas gracias.

# Acceptance speech by Prof. Kip S. Thorne

Thank you, Enrique, for your much too generous description of me and my contributions to science. This honorary doctorate from the Universitat Politècnica de Catalunya is of great significance to me. It honors, especially, my contributions to LIGO's discovery of gravitational waves. For this reason, I regard myself as sharing it with the large team of scientists and engineers, whose contributions were essential to our discovery.

There are only two types of waves that bring us information about the universe: electromagnetic waves and gravitational waves. They travel at the same speed, but aside from this, they could not be more different. Electromagnetic waves –which include light, infrared waves, microwaves, radio waves, ultraviolet waves, X-rays and gamma rays– these are all oscillations of electric and magnetic fields that travel *through* space and time. Gravitational waves are oscillations in the *fabric* of space and time.

Galileo Galilei opened up electromagnetic astronomy 400 years ago, when he built a small optical telescope, turned it on the sky, and discovered the four largest moons of Jupiter. We LIGO scientists opened up gravitational astronomy in 2015 when our complex detectors discovered gravitational waves from two colliding black holes, a billion light years from Earth.

The efforts that produced these two discoveries could not have been more different. Galileo made his discovery alone, though

he built on ideas and technology of others. We LIGO scientists made our discovery through a tight collaboration of more than 1000 scientists and engineers.

Professor Garcia-Berro refers to me as one of the *leaders* of the LIGO Project. However, I was a leader in a formal sense for only three years, from 1984 to 1987, when I chaired LIGO's steering committee, consisting of LIGO's three founders: Rai Weiss, Ronald Drever and me. Our steering committee was a miserable failure. We frequently disagreed and so could not make decisions fast enough to move the project forward efficiently. Richard Isaacson, our funding officer at the US National Science Foundation –NSF– told us, unequivocally, that success would require LIGO to have a single director, a director with the authority and power to make all major technical and managerial decisions. The director did not need prior experience in the field of gravitational waves. What he or she *did* need was great skill in designing a collaboration structure and management structure, skill in learning the essential physics quickly, skill in seeking the relevant advice from the best experts, skill in making wise decisions based on that advice, and skill in convincing the members of the collaboration to accept his or her decisions.

LIGO's success is largely due to a sequence of directors who had those skills: Robbie Vogt, then Barry Barish, then Jay Marx, and now David Reitze. Of these four, only David Reitze had expe-

rience in gravitational wave science before becoming LIGO's director.

Many other big science projects have floundered or even collapsed because they failed to give sufficient power to a single director with the necessary skills.

Since I was not a successful organizational leader or decision-making leader of LIGO, what did I actually contribute? As Professor Garcia-Berro indicated, I formulated a vision for the science that LIGO would do. And I kept my eyes on the 'end game'. I continually asked myself "What will be required for full success in the end? What is missing, that must come together with the main-stream LIGO experimental effort, in order to open up gravitational astronomy and maximize the information it brings us?"

For me, developing the vision, and keeping my eyes on the end game, were a half-century quest:

I was inspired to focus on gravitational waves as a student, in 1963 –inspired by my mentor, John Wheeler, and by the first experimenter to attempt to detect gravitational waves, Joseph Weber. Especially important were my conversations with Weber during long hikes in the French Alps.

In 1966, when I joined the faculty at Caltech, I began formulating my vision for sources of gravitational waves and the insights that gravitational waves might bring us –a vision based largely on information and ideas gleaned from my own students, and from physics and astronomy colleagues around the world. I continued to update that vision over the decades from then until the 2000s. I incorporated my vision into the funding proposals that we wrote for LIGO, and I offered it to my LIGO colleagues as guidance for their data analysis efforts.

In 1972, Rainer Weiss created a detailed design for a new type of gravitational-wave detector: one based on laser interferome-

try that would ultimately become LIGO. In the most powerful experimental paper I have ever read, Rai identified all the major noise sources that such a detector would confront, he described ways to deal with each noise, and he estimated the sensitivity of the resulting detector. By comparing them with the wave strengths that my colleagues and I were estimating, he concluded that such a detector had a good chance of succeeding.

At first I was skeptical. In the book *Gravitation* that I published the next year with Charles Misner and John Wheeler, I labeled Rai's detector "not promising". It required using light to monitor motions of mirrors that were a trillion times smaller than the light's wavelength. That seemed ridiculously impossible.

But after studying Rai's paper in depth and after long discussions with him, I changed my opinion; and then I spent most of the rest of my career trying to help Rai succeed; trying to help in any way that a theorist could.

Ronald Drever, in Glasgow, Scotland, had invented several major improvements on Rai's ideas, so in the late 1970s, I spear-headed bringing Drever to Caltech to create an experimental effort there, in collaboration with Rai's at MIT. And together, in 1983, the three of us created the LIGO project.

In parallel with the project's experimental effort, I was keeping my eyes on the end game. What else would be required for full success?

One obvious additional ingredient was data analysis: How do you extract very weak signals from LIGO's noisy data? Here, again, I was initially naive: I thought the data analysis would be easy. But I was wrong. Bernard Schutz in Cardiff began thinking deeply about LIGO data analysis in the late 1980s, in collaboration with Alberto Lobo and others. Bernard quickly convinced me that the data analysis was difficult. So in the early 1990s I started a data analysis effort at Caltech, in parallel with Bernard's

and Alberto's efforts in Europe. Soon a talented cadre of young people, inspired by Bernard, Alberto and me, took up the challenge and formulated data analysis plans that looked promising. So by 2000, I quit worrying about data analysis. But I had another, deeper worry:

In 1980, it had become clear to me that the strongest sources—the first things LIGO would detect— would likely be colliding black holes. To detect the collisions' waves and extract their information, we would need a catalog of all the wave *shapes* that the collisions could produce: their gravitational 'waveforms'. Computing those waveforms was so difficult that it could not be done with just pencil and paper. It would require computer simulations: solving Einstein's relativity equations on a computer, an enterprise called *numerical relativity*.

So I regarded numerical relativity as a crucial effort that would have to feed into LIGO's data analysis, in order for LIGO to succeed. In the early 1990s there were a dozen small research groups, around the world, trying to perfect computer codes for numerical relativity. But progress was very slow. Under pressure from Richard Isaacson—the NSF funding officer who had forced us to appoint a single LIGO director— these research groups banded together into a worldwide collaboration called the *Grand Challenge Alliance*. As chair of the Alliance's advisory committee, I got a very clear picture of their progress—or, more accurately, their *lack* of progress, through the 1990s and into the 2000s.

By the early 2000s I began to panic. It appeared likely that the simulations of colliding black holes would *not* be ready in time for LIGO's first discovery of gravitational waves. To speed up the research, we would need a much larger and more focused effort. Fortunately, by then I had trained a set of young scientists who could take over the roles I was playing inside the LIGO project; so I left day-to-day involvement with LIGO and turned to creating a large, focused effort on numerical relativity, in colla-

boration with the intellectual giant of that field, Saul Teukolsky at Cornell University. We called our effort the SXS project: the project to Simulate eXtreme Spacetimes.

In 2004 a postdoc in our SXS project, Frans Pretorius, succeeded in creating a computer code that simulated two black holes orbiting each other, and gradually spiraling inward as they lost energy to gravitational waves; and simulated the holes' collision, and their final, spectacular burst of gravitational waves. Building on Pretorius's breakthrough, by 2015 our SXS collaboration had constructed a sufficiently complete catalog of gravitational waveforms to underpin LIGO's data analysis and its gravitational wave discoveries.

I hasten to add that, just as I did not contribute significantly to the actual construction of LIGO's detectors, I did also not contribute to the construction of the SXS computer codes. My primary role was to identify what was needed and inspire others to develop it.

LIGO's advanced detectors today are at one-third of their design sensitivity. When fully perfected, they will see three times farther into the universe, encompassing a volume 27 times larger, so instead of discovering roughly one black hole collision per month, when searching for waves, they will discover roughly one per day. With further planned improvements, they will discover a few per hour by the late 2020s, and also waves from many other kinds of sources. This, however, will require a major change in the detectors' designs: a change predicted half a century ago by Vladimir Braginsky, a superb Russian experimental physicist.

In 1968 Braginsky told us that, for ultimate success, our gravitational wave detectors would have to monitor the motions of very heavy objects, such as LIGO's mirrors, with such high precision that we would see their motions fluctuate unpredictably: fluctuations controlled by the laws of quantum mechanics. For the first time, humans would see human-sized objects behave quantum



mechanically –a behavior only seen, previously, in atoms, molecules and fundamental particles. It took me ten years, but by about 1978 I understood Braginsky's worry qualitatively, and began urging my students and postdocs to probe it quantitatively.

In 1983, when Weiss, Drever and I were co-founding LIGO, my student Carlton Caves developed a detailed understanding of these quantum fluctuations of LIGO's mirrors. And from then until now, my Caltech research group and Braginsky's in Moscow have collaborated to develop what Braginsky called *quantum nondemolition techniques* for LIGO: experimental and data analysis techniques to ensure that gravitational wave signals passing through LIGO's 40 kilogram mirrors are not demolished by the mirrors' quantum fluctuations. The first of these quantum nondemolition techniques will be implemented in LIGO later this year; and over the next several years, they will become crucial.

Here, again, I must confess: these quantum nondemolition techniques were devised largely by my students and postdocs,

and by Braginsky's students and postdocs. My role here, as most everywhere else, has been one of identifying what needed to be done, and exhorting others to do it.

In that sense I have been crucial to LIGO. But the real credit for LIGO's success belongs to others: to the scientists and engineers who actually built LIGO's detectors and made them work; and those who actually developed LIGO's data analysis algorithms and made them work; and to those who actually perfected the numerical relativity computer codes and used them to simulate colliding black holes; and to those who actually formulated and perfected LIGO's quantum nondemolition techniques, and will begin implementing them in LIGO later this year.

To these colleagues, I give thanks; enormous thanks. LIGO's successes are theirs; they deserve the credit; and I regard them as sharing this wonderful honorary doctorate with me.



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA  
DE CATALUNYA  
BARCELONATECH**

*Campus d'Excel·lència Internacional*