

BERND BRUEGMANN

«NO HAURÍEM DE TÉMER ELS FORATS NEGRES MÉS QUE QUALSEVOL ALTRE ESTEL»

José María Ibañez i José Antonio Font

El 24 de maig del 2004 una nota de premsa de la Universitat de l'Estat de Pennsilvània (Penn State University, EUA) anunciava l'èxit d'un dels seus equips de científics que havia simulat una òrbita completa de dos forats negres lligats gravitacionalment. L'equip estava liderat per qui aleshores era professor associat de Física i investigador de l'Institut de la Física de la Gravitacional i Geometria (IGPG) d'aquella universitat, el doctor Bernd Bruegmann. El resultat fou publicat en la revista *Physical Review Letters*, amb Nina Jansen i Wolfgang Tichy com a coautors.

Sobre aquest avenç, Abhay Ashtekar, catedràtic de Física i director de l'IGPG, va dir: «Les simulacions recents del grup del professor Bruegmann són un punt de referència perquè obren la porta per a realitzar l'anàlisi numèrica d'una varietat de col·lisions de forats negres que estan entre els esdeveniments més interessants per a l'astronomia d'ones gravitatòries.»

Actualment, el doctor Bernd Bruegmann és catedràtic de la Universitat Friedrich-Schiller a Jena (Alemanya), i investigador del grup de Relativitat de l'Institut de Física Teòrica d'aquella universitat. El passat mes d'octubre va visitar la Universitat de València per treballar amb el grup d'Astrofísica Relativista i Relativitat Numèrica del Departament d'Astronomia i Astrofísica (DAA). En el marc dels col·loquis que organitza periòdicament el DAA, el professor Bernd Bruegmann va impartir una conferència als estudiants de la Facultat de Física en la qual va explicar què són i per què existeixen els anomenats forats negres, de l'important paper que representen les simulacions numèriques en la comprensió de l'evolució d'aquests objectes i de l'interès que tenen els resultats d'aquest

camp en el futur desenvolupament de l'astronomia de radiació gravitatòria. Sobre aquest i altres temes relacionats hem parlat detingudament amb ell.

Què és un forat negre?

Un forat negre és la massa més compacta predita per la física actual. Si poguéssim comprimir la matèria en volums més i més petits, llavors, en una ordenació de densitat creixent arribaríem a la densitat de la matèria en la Terra, després a la d'estels ordinaris, a la d'estels tipus nans blancs, a la d'estels de neutrons i, finalment, a la dels forats negres. No obstant això hi ha una diferència fonamental entre els forats negres i altres objectes massius, que dóna lloc al seu nom. S'anomenen «forats» perquè la teoria de la relativitat general d'Einstein prediu que si la densitat de la matèria supera un cert límit, el temps i l'espai es trenquen i apareix un forat en el teixit de l'espai-temps. I són «negres» perquè aquest forat és una ruta d'un únic sentit: allò que hi cau mai no torna a sortir-ne. Com que això s'aplica fins i tot a la llum, els forats negres són foscos. No emeten llum perquè fins i tot si un estel sencer caigués dins d'un forat negre, la seva llum no podria escapar-ne.

Hi ha forats negres a la nostra galàxia? Estaria justificat tenir por de la seva presència?

Es pensa que hi ha un nombre elevat de forats negres a la nostra galàxia. Llevat del fet de ser negres, es comporten com qualsevol altre objecte estel·lar amb un camp gravitatori. Els podríem trobar amb planetes al seu voltant o sense, igual com ocorre amb els estels ordinaris, i també en sistemes binaris amb un estel i un forat negre.

**«ELS FORATS SÓN “NEGRES”
PERQUÈ ÉS UNA RUTA D'UN
ÚNIC SENTIT: ALLÒ QUE
HI CAU MAI NO TORNA A
SORTIR-NE, I AIXÒ S'APLICA
FINS I TOT A LA LLUM. NO
EMETEN LLUM PERQUÈ FINS
I TOT SI UN ESTEL SENCER
CAIGUÉS DINS D'UN FORAT
NEGRE, LA SEVA LLUM NO
PODRIA ESCAPAR-NE»**



A més, es pensa que hi ha un forat negre supermassiu al centre de la nostra galàxia. No hauríem de témer els forats negres més que qualsevol altre estel. Si poséssim una nau espacial en una òrbita molt pròxima al sol es cremaria. Si la poséssim molt prop d'un forat, seria destruïda per l'intens camp gravitatori del forat negre, que la capturaria per sempre. O al revés, primer capturada i després destrossada, depenent de la massa del forat negre. Però no hi ha cap motiu per témer els forats negres, ja que aquests, de la mateixa manera que els altres estels, no s'acosten a buscar-nos.

Pot fer algun comentari sobre l'origen dels forats negres?

Es pensa que els forats negres es formen en l'última fase d'una evolució estel·lar normal. Si el núvol de gas inicial que col·lapsa per a formar un estel contingués suficient matèria, el forat negre podria formar-se immediatament o, en cas contrari, podria formar-se després d'un fenomen supernova al final de la vida de l'estel. Aquest tipus



«LA COL·LISIÓ DE DOS FORATS NEGRES S'ESPERA QUE SIGUI UNA FONT EXTREMADAMENT INTENSA D'ONES GRAVITATÒRIES»

de forats negres es coneixen com forats negres estel·lars, i les seves masses estan compreses entre tres i potser cent vegades la massa del nostre Sol. En el centre de les galàxies la situació és diferent. Hi ha evidències que indiquen que la massa del gas disponible per a formar una galàxia sencera és de l'ordre de milions de masses solars, i sembla un fet bastant comú que la majoria de galàxies continguin un forat negre supermassiu en el seu centre, on supermassiu significa que la massa és d'un milió fins a potser mil milions de masses solars.

Hi ha sistemes binaris de forats negres al nostre univers? En aquest cas, quin origen tenen?

S'han observat diversos candidats a sistemes binaris de forats negres supermassius, que es formen quan dues galàxies col·lideixen i s'agrupen en una única galàxia. També es pensa que hi ha forats negres binaris d'origen estel·lar, encara que no han estat observats directament.

Com es detecta la presència d'un forat negre aïllat o en un sistema binari?

Aquesta és una pregunta important, ja que, com que els forats negres són negres, no els podem veure per emissió de llum. Hi ha bàsicament dues maneres d'identificar un forat negre. Si existeix un objecte invisible extremadament compacte, notarem el seu camp gravitatori. El forat negre del centre galàctic s'observa d'aquesta manera. El seu camp gravitatori força els estels pròxims a seguir òrbites molt característiques. La segona possibilitat és detectant radiació electromagnètica, no la del mateix forat negre, sinó la de la matèria que hi cau. Un escenari típic en astronomia és el d'un disc d'acreció de gas i pols al voltant del forat negre, on aquesta matèria pot ser molt calenta, estar il·luminada i emetre radiació.

Si no és possible observar directament un forat negre, com és possible observar una binària de forats negres?

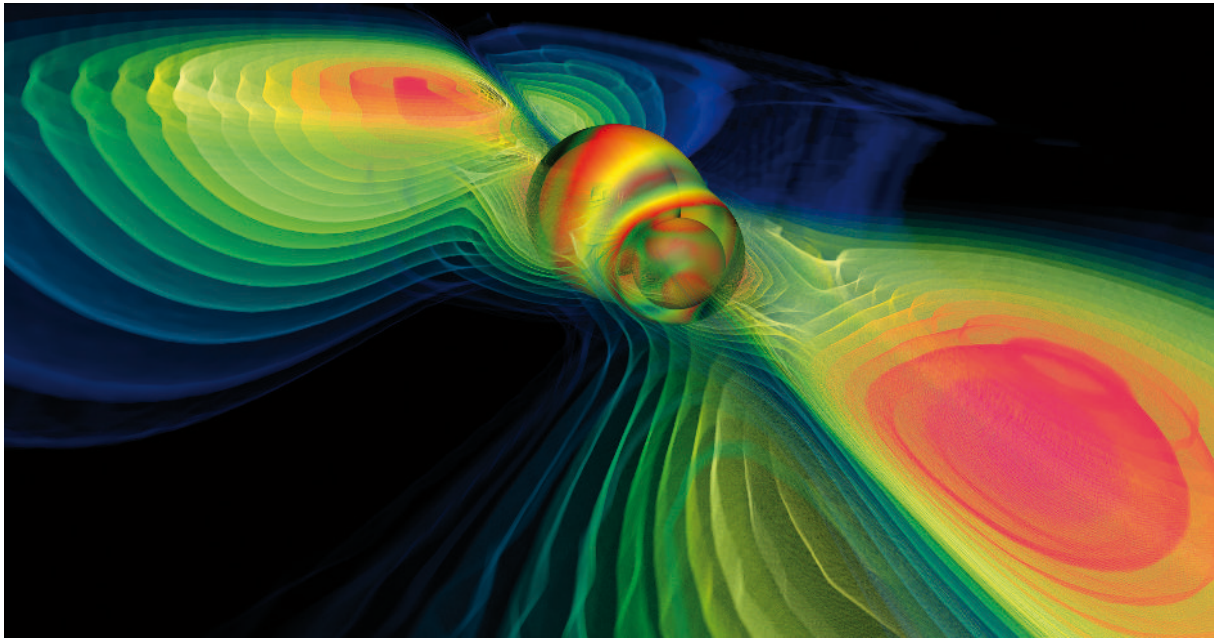
En l'actualitat està emergint un nou i excitant camp en l'astronomia, l'anomenada «astronomia de radiació gravitatòria». Les ones gravitatòries són un altre fenomen predit per la relativitat general. Aquestes ones són oscil·lacions de l'espai-temps. La col·lisió de dos forats negres s'espera que sigui una font extremadament intensa d'ones gravitatòries, la qual cosa és plausible, perquè els forats negres són el paradigma de l'existència de grans deformacions en l'espai-temps. Malgrat que aquestes ones gravitatòries encara no han estat detectades directament, ja s'han construït uns quants detectors arreu del món amb aquest propòsit.

Quins són els camps de la ciència involucrats en l'estudi de les binàries de forats negres?

Els forats negres són prediccions de la relativitat general, sembla clar que s'ha d'estudiar relativitat general i bastants matemàtiques. A més, hi ha la part de l'astronomia observacional dedicada als forats negres, com també el nou camp de l'astronomia de la radiació gravitatòria. Els càlculs numèrics per a resoldre les equacions d'Einstein i obtenir la dinàmica de dos forats negres requereixen simulacions en superordinadors.

Què és la relativitat numèrica? És un camp d'investigació actiu?

La solució numèrica de les equacions d'Einstein és el camp de la relativitat general conegut com relativitat numèrica. Fins fa poc no era possible calcular ni tan sols una única òrbita de dos forats negres. Les equacions d'Einstein són complicades en general, però a més era un gran repte obtenir simulacions de forats negres estables i amb una alta precisió. El camp de la simulació de forats negres ha estat molt actiu des de 1995. Durant el



Visualització per ordinador de dos forats negres després de la fusió. També es mostra l'emissió de radiació gravitatòria generada en la col·lisió. La relativitat numèrica proporciona prediccions de les ones gravitatòries, mentre que els astrònoms de radiació gravitatòria treballen en els detectors per a aconseguir la primera detecció directa d'una ona gravitatòria.

2004 i el 2005 alguns avenços espectaculars han conduït a les primeres simulacions d'òrbites completes i al càlcul de la radiació gravitatòria emesa. Des de llavors hi ha una gran activitat en l'estudi de les binàries de forats negres.

Quin és l'estat actual d'aquesta àrea del coneixement a Europa, i en particular a Espanya i Alemanya?

Europa té una rica tradició en relativitat general i en relativitat numèrica, i tant Espanya com Alemanya tenen diversos grups capdavanters en aquests camps. De fet, la Universitat de València té una gran presència internacional en els camps de l'astrofísica relativista i de la hidrodinàmica en general. Fa uns anys es va crear una xarxa d'investigació de la Unió Europea que va reunir deu institucions europees, una iniciativa que va constituir un gran èxit, perquè va permetre crear una comunitat europea d'investigadors en relativitat numèrica i ones gravitatòries.

Per què és tan difícil resoldre numèricament les equacions d'Einstein?

El problema és la immensa complexitat de les equacions d'Einstein, el que jo prefereixo anome-

nar «la bella riquesa de les equacions». Un aspecte particular que fa que aquestes equacions siguin tan difícils és el fet que «tot és relatiu». La relativitat significa, per exemple, que a priori no és obvi quin sistema de coordenades utilitzar a l'hora de fer els càlculs. La física no depèn de les coordenades, però l'ordinador ha de saber explícitament el que ha de fer. Els relativistes numèrics som enginyers de l'espai-temps. Construïm l'univers a mesura que resollem les equacions, en lloc d'utilitzar un model prèviament donat que ens pogués servir de base sobre la qual estudiar els fenòmens físics. A més, els forats negres posen les seves pròpies dificultats damunt de la taula, entre elles com bregar amb la singularitat de l'espai-temps que existeix a l'interior dels forats negres.

**«LA RELATIVITAT NUMÈRICA
ÉS L'ÚNICA EINA QUE
POT PROPORCIONAR
PREDICCIONS TEÒRIQUES
SOBRE LES ONES
GRAVITATÒRIES GENERADES
EN EL RÈGIM DE GRAVETAT
FORTA DE LES EQUACIONS
D'EINSTEIN»**

Des del seu naixement com una àrea de relativitat general, el principal objectiu de la relativitat numèrica ha estat simular la col·lisió de dos forats negres. Per què és tan important resoldre aquest problema?

En primer lloc tenim la qüestió fonamental en física del problema de dos cossos. En la teoria clàssica de Newton, el moviment de dues masses segueix òrbites ke-

plerianes. Òbviament, volem resoldre un problema tan fonamental com aquest de dos cossos, però en el marc de la relativitat general. A més, el moviment orbital de dos forats negres segueix una espiral, en lloc de les el·lipses de Kepler de grandària constant. Aquesta trajectòria condueix a la col·lisió i fusió dels forats negres. Aquest succeís violent provoca grans oscil·lacions a l'espai-temps, el que fa de la col·lisió de dos forats negres una de les fonts més importants d'ones gravitatòries. Per a predir la forma d'aquestes ones hem de resoldre el problema de la col·lisió de dos forats negres numèricament.

Per quin motiu les simulacions de la col·lisió de dos forats negres són particularment complicades?

Molts càlculs en relativitat general poden realitzar-se sota la hipòtesi d'alguna aproximació de les equacions d'Einstein. Per exemple, moltes prediccions clàssiques de la relativitat general es basen en els efectes relativistes dominants, és a dir lineals, o de «primer ordre». Alguns exemples són els efectes de la curvatura de la llum o el retard temporal, que representen un paper important en els sistemes de GPS. No obstant això, els forats negres són els exemples paradigmàtics d'una gravetat no lineal i extrema. Especialment durant la col·lisió de dos forats negres hem de resoldre necessàriament les equacions d'Einstein completes, sense adoptar cap aproximació a elles.

Les simulacions de la col·lisió de dos forats negres només han estat possibles molt recentment, després de molt d'esforç realitzat durant les últimes dècades. Quins eren els ingredients que faltaven i que finalment les han fetes possibles?

Només des del 2007 ha estat possible realitzar simulacions d'unes deu òrbites de l'evolució de dos forats negres abans d'una eventual col·lisió i fusió. Els mètodes computacionals actuals tenen molts ingredients, però els avenços més recents estan relacionats amb el tractament dels forats negres. En una línia d'investigació, l'interior dels forats negres és escindit de la malla computacional. Com que no en pot sortir res, per què preocupar-se de lluitar amb la singularitat de l'interior del forat negre?

El pas decisiu en aquesta direcció es va fer el 2005 amb la introducció de tècniques que van permetre mantenir sota control els errors numèrics que aquesta escissió introduïa. La segona línia d'investigació, pel contrari, tracta els forats negres transformant-los en els denominats «forats de cuc», construint una espècie de tub que penetra fins a zones molt internes del forat negre. Sens dubte

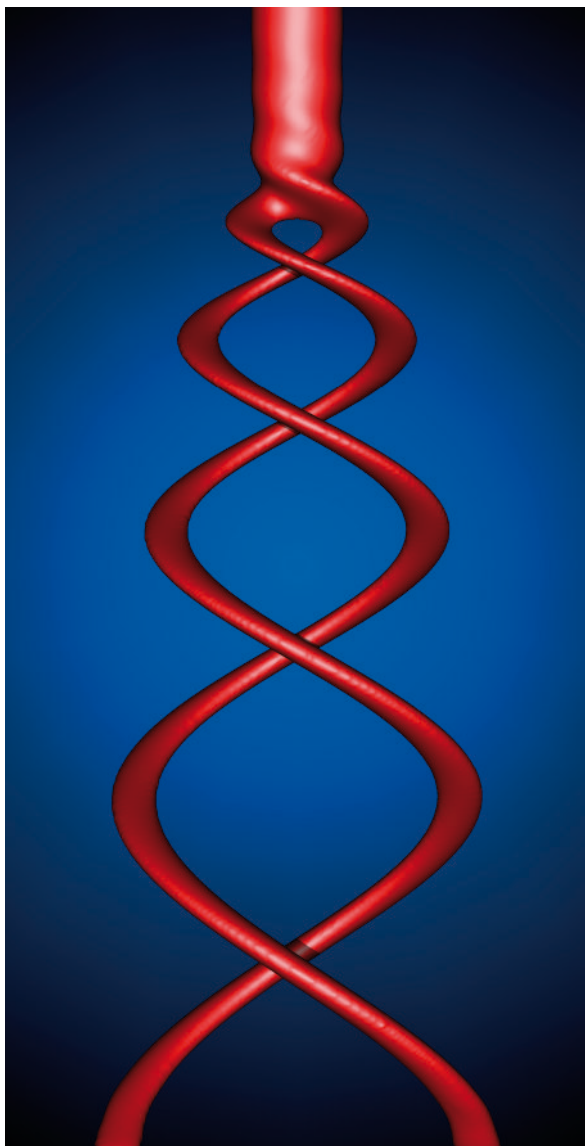
**«ELS FORATS NEGRES SÓN
ELS EXEMPLES D'UNA GRAVETAT
NO LINEAL I EXTREMA»**

aquesta idea va ser més fàcil de pensar que de posar en pràctica, encara que aquest mètode també va esdevenir satisfactori a la fi del 2005.

Ara que el problema de la col·lisió de dos forats negres està resolt, queda encara alguna cosa per fer en relativitat numèrica?

Per descomptat. Moltes de les primeres simulacions són simulacions prova amb precisió limitada. Ara que aquestes simulacions comencen a produir resultats útils hi ha una cursa entre diversos grups per investigar l'espai de paràmetres del problema. Per exemple, és un tema im-





Visualització per ordinador d'una col·lisió de dos forats negres. En vermell ens mostra la superfície dels dos forats negres, denominada «horitzó de successos». Els forats negres giren un al voltant de l'altre en una òrbita espiral fins que finalment es fusionen. Els horitzons de successos per a aquestes trajectòries espirals han estat calculats per primera vegada el 2007. La figura mostra un «diagrama d'espai-temps»: el temps corre cap amunt i tan sols s'indiquen dues direccions espacials. En cada instant de temps els dos forats negres són dos cercles. Unint tots els instants temporals emergeix el dibuix dels dos tubs en espiral.

**«ELS RELATIVISTES NUMÈRICS SOM
ENGINYERS DE L'ESPAI-TEMPS.
CONSTRUÏM L'UNIVERS A MESURA QUE
RESOLEM LES EQUACIONS»**

portant saber què succeeix, no només quan els forats negres giren l'un al voltant de l'altre, sinó a més quan ambdós també giren individualment.

Pot la relativitat numèrica ajudar a millorar la nostra comprensió d'observacions astronòmiques?

La relativitat numèrica és l'única eina que pot proporcionar prediccions teòriques sobre les ones gravitatòries generades en el règim de gravetat forta de les equacions d'Einstein. Els astrònoms d'ones gravitatòries dependran de la relativitat numèrica per a fer prediccions, i també per a analitzar les ones que es detectin.

Hi ha encara espai per a nous descobriments en la teoria de la relativitat general d'Einstein?

Com que la majoria de les conseqüències observacionals de la teoria d'Einstein han estat només testades per a camps gravitatoris febles, com en el Sistema Solar, confiem que hi pugui haver sorpreses en el règim de gravetat intensa. Una sorpresa recent de les simulacions de binàries de forats negres, que el nostre grup i altres han realitzat, és que durant la col·lisió de dos forats negres amb rotació pot produir-se un espectacular efecte que denominem «coet forat negre». En aquests sistemes dobles les ones gravitatòries són emeses preferentment en una direcció i es produeix una reacció de reculada en el forat negre final fusionat. Així, aquest s'allunya de la seva posició original a una velocitat sorprenentment alta, denominada «velocitat puntada de peu», que fins i tot podria expulsar el forat negre del cúmul estel·lar circumdant. De moment aquesta és una predicció purament teòrica que encara necessita confirmació experimental. També m'agradaria esmentar que es porten a terme molts esforços per a quantificar la teoria de la relativitat general, aspecte que va més enllà de la teoria clàssica que descriu les col·lisions de forats negres.

Com preveu que serà el futur de la relativitat numèrica?

Per descomptat la frenètica competició actual entre diversos grups en la simulació de col·lisions de forats negres es calmarà, encara que imagino que hi haurà multitud de temes a investigar en aquest context durant almenys cinc o deu anys. En particular, una vegada s'hagin detectat ones gravitatòries serà necessari un major èmfasi en el modelatge de fonts astrofísiques similars.

I la radiació gravitatòria? Cap a on es dirigirà?

L'astronomia de radiació gravitatòria té un futur molt brillant i complementarà altres branques de l'astronomia per proporcionar una visió més completa de l'univers. ☺

José María Ibáñez i José Antonio Font. Departament d'Astronomia i Astrofísica, Universitat de València