

# Quarks, gluons i forats negres

David Mateos

Physics Department, University of California at Santa Barbara CA 93106, USA

dmateos@physics.ucsb.edu

## Resum

El 18 d'abril del 2005 a Tampa, Florida (Estats Units), es va anunciar que un nou estat de matèria, anomenat *plasma de quarks i gluons* (PQG, en anglès), havia estat creat en col·lisions d'ions pesants al Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) de Brookhaven, a Nova York. Algunes de les propietats del plasma de quarks i gluons (PQG, d'ara endavant), com per exemple la seva petita viscositat, són extremament sorprenents tant per si mateixes com pel fet que semblen estar relacionades amb propietats de forats negres en teoria de cordes, una teoria que unifica totes les forces de la natura, incloent-hi la força gravitatòria. De fet, l'anunci anterior va ser el primer anunci dels resultats d'un experiment de gran magnitud en què es va esmentar la teoria de cordes. Des d'aleshores s'ha produït una explosió d'activitat en el desenvolupament de la connexió entre la física del PQG i la de forats negres. L'objectiu d'aquest article és explicar aquesta connexió i les seves conseqüències i aplicacions potencials.

## 1 La cromodinàmica quàntica

La força nuclear forta és una de les quatre forces fonamentals de la natura (juntament amb la nuclear feble, l'electromagnètica i la gravitatòria). La teoria matemàtica que la descriu rep el nom de *cromodinàmica quàntica* (CDQ). Les partícules elementals en aquesta teoria són quarks, antiquarks i gluons. Els quarks i els antiquarks interactuen fortament mitjançant l'intercanvi de gluons, de manera anàloga a com els electrons i els antielectrons interactuen electromagnèticament mitjançant l'intercanvi de fotons. La diferència fonamental és que la interacció forta és tan poderosa que, exceptuant circumstàncies extremes, els quarks i els antiquarks es troben sempre en estats lligats en grups de tres quarks, i formen així, per exemple, protons i neutrons, o en parelles consistents en un quark i un antiquark, i formen així, per exemple, pions i kaons. Aquesta propietat de la CDQ rep el nom de *confinament*. Tot i els trenta-cinc anys d'existència de la CDQ, aquesta i altres de les seves propietats són encara un misteri, a causa de l'enorme complexitat de la teoria. Tant és així que la CDQ ha estat declarada un dels set problemes matemàtics més importants del mil·lenni, i la seva resolució ha estat dotada amb un premi d'un milió de dòlars.

Els quarks i els antiquarks de l'Univers han viscut en estat d'esclavitud, lligats permanentment els uns als altres pels gluons, durant aproximadament catorze mil milions d'anys, concretament des d'un microsegon després del Big Bang fins que els experiments a l'RHIC els han alliberat de nou (tot i que no per gaire temps, com veurem). En efecte, en els seus primers instants d'existència, l'Univers era un lloc molt més calent que ara. A mesu-

ra que es va expandir, la temperatura va de créixer. Al voltant d'un microsegon després del Big Bang, la temperatura havia caigut al valor crític  $T_c \sim 10^{12}$  K, aproximadament cent mil vegades la temperatura al centre del Sol. A temperatures iguals o superiors a  $T_c$ , les agitacions tèrmiques són tan violentes que les interaccions entre els quarks i els antiquarks no poden mantenir-los lligats. Com a conseqüència, a aquestes temperatures els quarks, els antiquarks i els gluons formen un nou tipus de matèria anomenada PQG, caracteritzada pel fet que els seus constituents no es troben ja confinats. Per aquest motiu aquesta nova fase s'anomena *fase desconfinada*. Es creu que aquesta és la fase en què els quarks i els gluons es trobaven en el primer microsegon de vida de l'Univers. Al cap d'un microsegon la temperatura va caure per sota de la temperatura crítica i les interaccions fortes entre quarks i antiquarks els van confinar en estats lligats... fins recentment.

## 2 Recreació de l'Univers primitiu

L'RHIC és un col·lisionador d'ions pesants (figura 1), concretament d'àtoms de plom i d'or als quals s'han arrencat els electrons i s'han deixat solament els nuclis. Cadascun d'aquests nuclis conté de l'ordre de dos-cents nucleons (protons i neutrons). Aquests nuclis s'acceleren fins al 99,99% de la velocitat de la llum, i es fan col·lisionar amb una energia total d'uns  $10^{13}$  eV. Una fracció d'aquesta increïble energia cinètica inicial es diposita en la regió de la col·lisió, augmentant-ne la temperatura fins aproximadament  $2T_c$ . Es crea així una minúscula regió, de la mida d'uns pocs protons, a una temperatura superior a la temperatura crítica de la CDQ. En altres paraules, es crea una petita bola de PQG, i es recrea així en un



Figura 1: L'accelerador d'ions pesants relativista (RHIC) a Brookhaven, Nova York

laboratori terrestre l'estat de la matèria a l'Univers quan aquest tenia al voltant d'un microsegon de vida!

Els quarks i els gluons en la bola de PQG no viuen en llibertat durant gaire temps. En efecte, aquesta bola s'expandeix immediatament, cosa que fa disminuir la temperatura. Al cap d'uns  $10^{-23}$  segons aquesta ha caigut per sota de la temperatura crítica i els quarks i els antiquarks queden confinats de nou. El resultat net és una petita "explosió" que produeix milers de pions, protons, neutrons, etc., que es detecten a l'RHIC (figura 2). Per enregistrar les propietats d'aquesta allau de partícules en cadascuna de les col·lisions es requereixen ordinadors tan potents que aquesta tasca hagués estat impossible quan l'RHIC es va començar a dissenyar fa més de vint anys. Els dissenyadors van apostar per la llei de Moore, que estableix que la potència dels ordinadors es dobla cada divuit mesos, i l'estratègia va funcionar.

Les dades obtingudes de l'allau de partícules produïdes en cada col·lisió permeten reconstruir les propietats del PQG. Algunes d'aquestes propietats han resultat extremament sorprenents. Si s'hagués de resumir en una frase el que s'ha descobert a l'RHIC, es diria que és el fet que els quarks i els gluons, fins i tot un cop desconfinats, encara es comporten com un sistema fortament interactuant. Una de les evidències més importants en favor d'aquest fet és la petita viscositat del PQG. Aquestes dues característiques són crucials per a la connexió amb la teoria de cordes, i per tant procedim ara a explicar-les amb més detall.

### 3 La viscositat del PQG

La viscositat d'una substància, usualment denotada per la lletra  $\eta$ , és una mesura de la resistència d'aquesta subs-

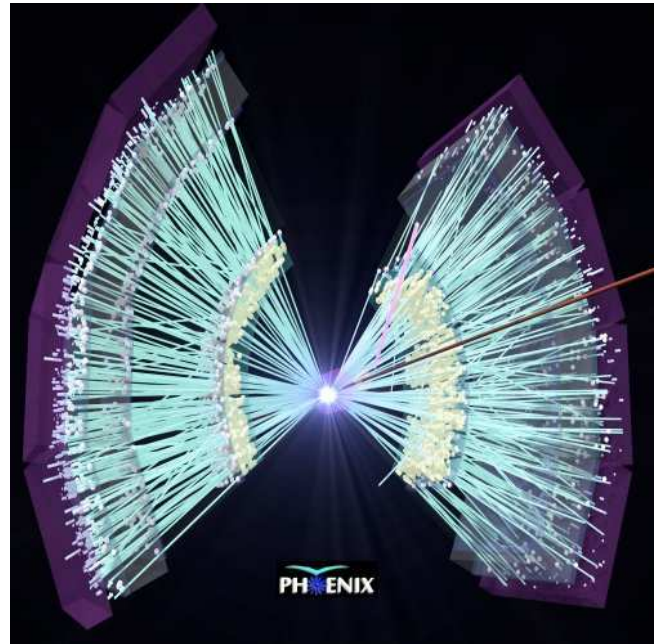


Figura 2: Resultat d'una col·lisió de ions pesants: milers de protons, neutrons, pions, etc.

tància a fluir, per exemple a través d'un tub. D'aquesta manera, una substància amb viscositat nul·la s'anomena *fluid perfecte*. Per comparar diverses substàncies entre si, és millor considerar el quocient entre la viscositat i la densitat d'entropia,  $s$ , ja que aquest quocient mesura, *grosso modo*, la viscositat per grau de llibertat o constituent microscòpic.

Un fet que pot resultar antiintuïtiu a primera vista és que substàncies en les quals els constituents microscòpics interactuen molt fortament entre si posseeixen un valor de  $\eta/s$  petit. L'aigua i altres substàncies líquides en són bons exemples. En canvi, substàncies en les quals els constituents microscòpics interactuen feblement posseeixen un valor de  $\eta/s$  gran. Els gasos en són un bon exemple. L'explicació intuïtiva per a aquesta correlació entre la força de les interaccions microscòpiques i la viscositat és el fet que els constituents microscòpics en substàncies fortament interactuants es comporten col·lectivament, de manera més ordenada, i per tant aquestes substàncies flueixen amb més facilitat. El contrari succeeix per a substàncies feblement interactuants en què els constituents microscòpics es comporten més desordenadament.

A causa de l'enorme complexitat de la CDQ, actualment no existeixen mètodes per calcular la viscositat del PQG des de primers principis. Malgrat això, abans dels resultats experimentals de l'RHIC, hi havia la creença en la comunitat que el PQG es comportaria com un gas de quarks i gluons gairebé lliures. En altres paraules, s'esperava que a temperatures lleugerament superiors a  $T_c$ , un

cop en la fase desconfineda, la interacció efectiva entre quarks, antiquarks i gluons seria feble. Si aquest fos el cas, aleshores el valor de  $\eta/s$  per al PQG hauria de ser gran.

Els resultats experimentals de l'RHIC han contradit contundentment aquestes expectatives. Malgrat que certs aspectes d'aquests resultats són encara objecte d'activa recerca, avui ja hi ha un ampli consens sobre el fet que el PQG no es comporta com un gas de partícules feblement interactuants, sinó com un líquid fortament acoflat. De fet, la viscositat sembla ser tan petita que el PQG podria ser el líquid més perfecte que es coneix! Per fer-nos-en una idea, considerem el valor de  $\eta/s$  per a diverses substàncies. Per motius que quedaran clars més endavant, resulta útil mesurar aquest quocient en múltiples de  $\hbar/4\pi k_B$ , on  $\hbar$  és la constant de Planck reduïda i  $k_B$  és la constant de Boltzmann. Per a l'aigua en condicions normals es té  $\eta/s \sim 380 \times \hbar/4\pi k_B$ , i per a l'heli líquid  $\eta/s \sim 9 \times \hbar/4\pi k_B$ . Per al PQG diverses incerteses d'origen experimental i teòric permeten només afitar el valor de  $\eta/s$ , però les estimacions més recents indiquen que aquest valor certament no sobrepassa  $\hbar/4\pi k_B$  en un factor superior a dos o tres, i de fet el valor precís podria ser fins i tot inferior a  $\hbar/4\pi k_B$ .

El que fa aquest valor extremament petit de la viscositat del PQG encara més interessant és el fet que és proper al valor de la viscositat per l'horitzó d'un forat negre en teoria de cordes. La connexió entre les propietats de plasmes fortament interactuants i la física de forats negres és un dels desenvolupaments més fascinants dels darrers anys. Per explicar aquesta connexió necessitem primer entendre alguns aspectes bàsics de la teoria de cordes.

## 4 Cordes i forats negres

A diferència de la CDQ, els constituents microscòpics de la teoria de cordes no són partícules puntuals com els quarks i els gluons, sinó objectes unidimensionals que anomenem *cordes*. D'aquí prové el nom d'aquesta teoria. La motivació més important per estudiar-la és el fet que unifica les quatre forces fonamentals de la natura en un marc consistent amb la mecànica quàntica.

Una d'aquestes forces és la força gravitatòria. En situacions físiques en què els efectes quàntics es poden ignorar, la força gravitatòria està descrita per la famosa teoria de la relativitat general d'Einstein. D'entre els molts fenòmens descrits per la relativitat general, potser un dels més misteriosos i interessants és el dels forats negres. Un forat negre es forma quan una quantitat de matèria suficientment gran es concentra en una regió de l'espai suficientment petita. En aquestes circumstàncies el camp gravitatori al voltant d'aquesta regió pot arribar a ser tan intens que res, ni tan sols la llum, pot escapar-ne. Per

aquest motiu, els forats negres són possiblement els objectes més perfectament negres de l'Univers. La superfície que limita la regió de no retorn al voltant d'un forat negre s'anomena *horitzó*.

Com hem dit abans, la relativitat general és estrictament aplicable solament quan els efectes quàntics es poden negligir. Quan aquests efectes es tenen en consideració, el resultat és certament sorprenent: els forats negres no són negres! En efecte, Stephen Hawking va descobrir que, mitjançant efectes quàntics, qualsevol forat negre emet radiació (és a dir, llum) amb un espectre tèrmic. En aquest sentit, un forat negre es comporta com un sistema termodinàmic en equilibri a una certa temperatura. Malgrat que això pot semblar una simple analogia, el paral·lisme va molt més enllà. Hawking va argumentar que els forats negres tenen també altres propietats termodinàmiques. Per exemple, l'entropia d'un forat negre és proporcional a l'àrea del seu horitzó.

Les conclusions de Hawking estan basades en consideracions que depenen solament de propietats molt generals dels forats negres i la mecànica quàntica. Per això no és sorprenent que també siguin certes en el marc de la teoria de cordes. Com hem explicat, aquesta teoria unifica la gravetat amb la mecànica quàntica, i per tant també descriu forats negres i els corresponents efectes quàntics.

Una de les característiques més sorprenents de la teoria de cordes és que prediu que l'espai-temps ha de tenir nou dimensions espacials i una de temporal, en lloc de les tres més una que observem en la vida quotidiana. Aquesta no és necessàriament una predicció errònia, ja que, per exemple, les dimensions addicionals podrien ser compactes i massa petites per ser observables en experiments als quals tenim accés avui dia. Com formular aquesta possibilitat (o d'altres) de manera més precisa és una àrea de recerca molt activa. Com veurem, per al propòsit d'aquest article ens interessa el cas en què només cinc dimensions (quatre d'espacials i una de temporal) són observables.

## 5 La dualitat entre cordes i partícules

Ara que ens hem familiaritzat amb les propietats bàsiques de la CDQ i de la teoria de cordes, estem preparats per discutir la connexió entre ambdues. Per motivar-la, és útil pensar en un model físic molt senzill pel mecanisme que a la CDQ manté els quarks i els antiquarks confinats. La idea és que els quarks i els antiquarks actuen com a fonts de l'anàleg a la CDQ d'un camp elèctric. A diferència del que passa en electromagnetisme, però, a la CDQ aquest camp no es dispersa en totes direccions sinó que es concentra en la regió entre el quark i l'antiquark, formant el que s'anomena un *tub de flux* (figura 3). Per aquest motiu l'energia emmagatzemada en aquest tub creix linealment amb la distància entre el quark i l'antiquark, de manera que es requeriria una energia infinita per separar-

los asimptòticament.

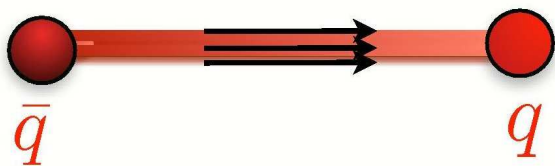


Figura 3: Tub de flux entre un quark i un antiquark

El paper fonamental que tenen els tubs de flux a la CDQ fa pensar que hauria de ser possible reformular la teoria de manera que els graus de llibertat microscòpics en la nova formulació no siguin els quarks i els gluons sinó els tubs de flux mateixos. Com que aquests tubs són objectes unidimensionals, això suggereix que aquesta formulació alternativa o dual podria ser una teoria de cordes.

Tot i que aquesta motivació pot semblar excessivament heurística, avui creiem que la conclusió és correcta. En efecte, a finals de 1997 Juan Maldacena, aleshores a Harvard, va conjeturar una equivalència molt precisa entre una certa teoria de partícules en tres més una dimensions i una teoria de cordes. Un dels aspectes més profunds d'aquesta correspondència és el fet que la teoria de cordes viu en un espai-temps amb un nombre de dimensions diferent del de la teoria de partícules, concretament en quatre més una dimensions! Des de la conjectura inicial fins a l'actualitat s'han construït molts altres exemples d'equivalències similars entre diverses parelles de teories de cordes i teories de partícules.

Hi ha tres aspectes de la conjectura inicial i dels exemples posteriors que cal aclarir immediatament. El primer és que la conjectura estableix que, per cada parella, la teoria de partícules i la corresponent teoria de cordes dual són descripcions matemàticament diferents d'una única realitat física. Tot i que una de les descripcions pot resultar-nos més familiar que l'altra, qualsevol pregunta física en una de les teories es pot reformular i respondre en l'altra teoria. Més avall il·lustrarem això amb l'exemple del potencial entre un quark i un antiquark.

El segon aspecte que cal aclarir és que no es coneix la teoria de cordes dual de la CDQ. Algunes de les teories en els exemples coneguts exhibeixen propietats molt semblants a les de la CDQ, incloent-hi confinament, però cap d'aquestes teories és exactament la CDQ. Més endavant tornarem a la rellevància d'aquest fet.

El tercer aspecte és el fet que la conjectura no ha estat demostrada des del punt de vista estrictament matemàtic, però l'evidència en el seu favor és poc menys que aclaparadora. Tot i que no podem discutir aquí els detalls que donen suport a la conjectura, sí que ens serà

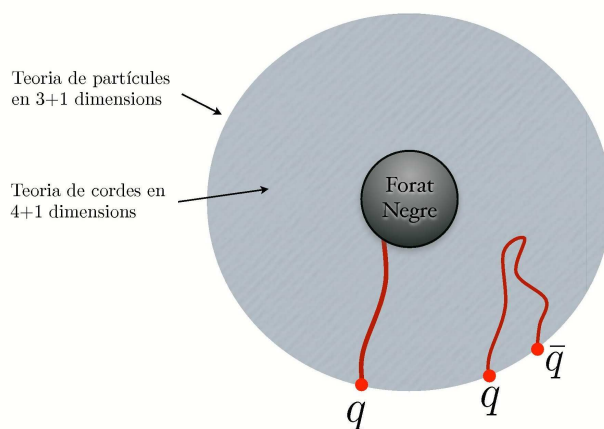


Figura 4: Representació pictòrica de la dualitat: la teoria de partícules viu a la frontera de l'espai-temps de la teoria de cordes. La fase desconfineda (el PQG) correspon a la presència d'un forat negre

útil entendre millor, a nivell intuïtiu, com és possible que una teoria de partícules i una teoria de cordes, que a més viuen en un nombre de dimensions diferents, puguin ser físicament equivalents.

La idea és que la teoria de partícules viu en la frontera de l'espai-temps on està definida la teoria de cordes (figura 4). Qualsevol observable físic en una teoria pot ser reformulat en la teoria dual. Considerem per exemple el potencial entre un quark i un antiquark. A la teoria de partícules aquest potencial prové de l'intercanvi de gluons entre el quark i l'antiquark. En termes de la descripció dual, el quark i l'antiquark corresponen als punts inicial i final d'una corda que s'estén fins a la frontera (figura 4), i el potencial entre ells ve donat simplement per la longitud mínima d'aquesta corda.

L'exemple anterior posa en relleu dues característiques importants de la dualitat. La primera és el fet que problemes molt difícils en una de les descripcions es tornen molt fàcils en l'altra. En efecte, el càlcul del potencial quark-antiquark a la teoria de partícules és un problema inherentment quàntic, mentre que a la teoria de cordes es redueix a un càlcul clàssic d'una catenària.

La segona característica suggerida per l'exemple anterior és el fet que la descripció dual de la fase desconfineda sempre correspon a una teoria de cordes en l'espai-temps d'un forat negre. En efecte, en absència d'un forat negre, una corda que comença a la frontera es veu sempre obligada a tornar-hi (figura 4). Això significa que un quark sempre va lligat a un antiquark. En canvi, en presència d'un forat negre, la corda pot travessar l'horitzó, i deixa enrere un quark solitari. En altres paraules, en presència d'un forat negre l'espectre de la teoria de partícules a la

frontera conté quarks lliures.

## 6 Horitzons líquids

Ara que hem entès el marc general, podem respondre finalment la pregunta clau. Quin és el valor del quocient entre la viscositat i la densitat d'entropia per a un PQG en una teoria de partícules per la qual es coneix la seva teoria de cordes dual? La resposta resulta ser universal:  $\eta/s = \hbar/4\pi k_B$ . Abans d'analitzar la importància d'aquest resultat, veiem quin n'és l'origen. Com hem dit abans, la descripció dual de la fase desconfinada, és a dir, d'un PQG, involucra sempre un forat negre. En aquesta descripció l'entropia és, llevat d'un coeficient de proporcionalitat, simplement l'àrea de l'horitzó del forat negre. Un càlcul molt senzill demostra que la viscositat és proporcional a la secció eficaç del forat negre, que a la vegada resulta ser també proporcional a l'àrea de l'horitzó. Per aquest motiu el quocient  $\eta/s$  és un nombre universal.

El resultat anterior és important per dos motius. Primer, per la seva universalitat. Recordem que cap de les teories de partícules per les quals coneixem la teoria de cordes dual és exactament la CDQ. Quantitats físiques que varien d'una teoria a una altra podrien prendre un valor molt diferent per la CDQ, i per tant no podrem calcular-les amb confiança (usant la teoria de cordes) per la CDQ fins que en coneguem la teoria dual. En canvi, quantitats físiques universals, com a mínim dins la classe de teories a què tenim accés, són susceptibles de ser prou consistents per ser aplicables a la CDQ. El quocient entre la viscositat i la densitat d'entropia és el millor exemple que coneixem d'observable universal i, certament, el valor per la CDQ estimat a partir dels experiments duts a terme a l'RHIC sembla ser proper a  $\eta/s = \hbar/4\pi k_B$ .

El segon motiu pel qual el resultat anterior és important és perquè, com hem explicat anteriorment, el valor  $\hbar/4\pi k_B$  és extremament petit. Això ha motivat la conjectura que, de fet, aquest valor és una fita inferior universal al quocient de  $\eta/s$  per a qualsevol substància física. Si això fos cert, el PQG o, equivalentment, l'horitzó del seu forat negre dual podrien ser els líquids més perfectes de la natura.

## 7 Conclusions

Els resultats experimentals de l'RHIC i la seva connexió amb els forats negres de la teoria de cordes han obert una línia de recerca interdisciplinària en la qual avui dia es treballa furiosament. D'aquí ben poc l'accelerador actualment en finalització a Suïssa, l'LHC, col·lisionarà ions pesants a energies trenta vegades superiors a les de l'RHIC. Tot els que treballem en la teoria de cordes i els seus forats negres per intentar entendre els misteris de la CDQ esperem amb emoció les sorpreses que aquests nous experiments ens aportaran. D'una banda som conscients de la

importància de fer les prediccions més precises possibles abans que arribin els resultats experimentals. De l'altra, és possible que, en el futur, es doni una situació encara més apassionant: que les col·lisions d'ions pesants ens ajudin a entendre experimentalment els misteris dels seus forats negres duals i, per què no, fins i tot de la gravetat quàntica.

## Bibliografia

P.K. KOVTUN, D.T. SON and A.O. STARINETS, Holography and hydrodynamics: Diffusion on stretched horizons, *Journal of High Energy Physics*, 310, 64 (2003). ([arXiv:hep-th/0309213])

P.K. KOVTUN, D.T. SON and A.O. STARINETS, Viscosity in strongly interacting quantum field theories from black hole physics, *Physical Review Letters*, 94, 111601 (2005).

([arXiv:hep-th/0405231])