

---

# Premi Nobel de Física 2004

Domènec Espriu\*

David J. Gross, H. David Politzer i Frank Wilczek han obtingut el Premi Nobel de Física 2004 per les seves contribucions a l'estudi de les interaccions fortes i en particular pel descobriment de la propietat de la llibertat asimptòtica de les mateixes.

Nascut a Washington el 1941 David J. Gross va llicenciar-se a la Universitat de Jerusalem i va obtenir el seu doctorat a la Universitat de Califòrnia a Berkeley el 1966. Posteriorment va ocupar un lloc de recerca post-doctoral a la Universitat de Harvard per a passar a ocupar el 1969 una càtedra a la Universitat de Princeton on va ocupar diferents places de professor i va romandre fins el 1997 quan va traslladar-se a la Universitat de Califòrnia a Santa Barbara per a dirigir el Kavli Institute for Theoretical Physics. Gross es un dels creadors de QCD (inicials de Quantum Chromodynamics, o Cromodinàmica Quàntica), la teoria de les interaccions fortes. El 1973, juntament amb el seu estudiant de doctorat Frank Wilczek, publica a *Physical Review Letters* l'article *Ultraviolet Behaviour of Non-abelian Gauge Theories*, ara premiat. A més d'aquest guardó, David Gross està en possessió de nombroses distincions: Alfred P. Sloan Fellow, Fellow de l'Acadèmia Americana d'Arts i Ciències, Fellow de la Acadèmia Nacional de Ciències dels Estats Units, Premi de la McArthur Foundation, Premi Sakurai de la Societat Americana de Física, Medalla Dirac de la UNESCO i Gran Medalla d'or de la República Francesa. Apart de la present, ha fet nombroses contribucions a la física teòrica i la seva línia de treball present són les teories de cordes.

H. David Politzer nasqué a Nova York el 1949 és en l'actualitat professor de l'Institut de Tecnologia de Califòrnia (CALTECH), a Pasadena. Va estudiar a la coneguda Bronx School of Science, entre els graduats de la mateixa es troben sis premis Nobel de física. Politzer es va llicenciar de la Universitat de Michigan el 1969 i va traslladar-se a Harvard on va obtenir el doctorat. En el decurs dels seus estudis de doctorat, per indicació de Sydney Coleman, va analitzar el problema de les correccions quàntiques a la constant d'acoblament en teories *galga*, concloent que les teories basades en un grup no abelià eren els únics candidats per proporció-

nar una constant d'acoblament decreixent a l'augmentar l'energia i, conseqüentment, més petita a curtes distàncies. Politzer va publicar el seu resultat a l'article *Reliable Perturbative Results for Strong Interactions?* que va aparèixer simultàniament amb el de Gross i Wilczek a *Physical Review Letters* el 1973. Ha tingut un perfil de recerca relativament baix en física de partícules i actualment els seus interessos es troben en la recerca de les propietats dels àtoms a baixes temperatures.

Nascut a Nova York el 1951 Frank Wilczek des del 2000 ocupa la Càtedra Hermann Feshbach a l'Institut de Tecnologia de Massachusetts (MIT). Quan tenia només 21 anys i era estudiant de doctorat de David Gross a la Universitat de Princeton, ambdós van descobrir que les teories no abelianes de *galga* tenien una gran abundància de partícules portadores de la interacció (en el cas de la QCD, la Cromodinàmica Quàntica, hi ha vuit *gluons*; pel contrari a l'electrodinàmica quàntica només n'hi ha una, el fotó). La abundància d'aquestes partícules i les seves interaccions mútues fa que l'apantallament de la càrrega elèctrica es transformi en anti-apantallament en el cas de QCD. Els experiments de SLAC van revelar que al fer incidir electrons d'alta energia sobre un fitó de protons i explorar l'estructura del protó a molt curtes longituds, es trobaven tres centres difusors puntuals quasi-lliures dins del protó: els *quarks* acabaven de ser descoberts. Poc temps després els resultats de Gross i Wilczek, per una banda, i Politzer, per l'altra donaven una explicació d'aquest fenomen. Wilczek ha estat Fellow a l'Institut for Advanced Study de Princeton, professor a la Universitat de Princeton, la Universitat de Califòrnia a Santa Barbara i després va ocupar la Càtedra Oppenheimer a l'Institut for Advanced Study. La seva activitat i recerca es molt ample: axions, teories de superconductivitat d'alta temperatura, cosmologia, física nuclear, etc. Es troba en possessió de diferents guardons i distincions, entre d'altres: Alfred P. Sloan Foundation Fellow, medalla Lorentz de la Acadèmia Holandesa de Ciències, Premi de la Societat Europea de Física i el Premi Lilienfeld de la Societat Americana de Física.

Al número 30 de la revista *Physical Review Letters* van aparèixer fa 31 anys dos articles consecutius: *Ultraviolet Behaviour of Non-abelian Gauge Theories* (Gross i Wilczek) i *Reliable Perturbative Results for Strong In-*

---

\*Domènec Espriu (Barcelona, 1957) és doctor en Física per la Universitat de Barcelona (19-) i actualment és Catedràtic de Física Teòrica al Departament d'Estructura i Constituents de la Matèria de la Universitat de Barcelona

*teractions?* (Politzer). Aquests dos articles han canviat la nostra manera d'entendre la teoria quàntica de camps i han resultat fonamentals per obrir el camí que ha conduït avui a considerar que QCD (sigles angleses de la Cromodinàmica Quàntica) es la teoria correcta de les interaccions fortes.

Per entendre i situar en el seu context la rellevant contribució dels tres guardonats a la física teòrica i la física de les partícules elementals cal recordar la confosa situació que vivia el camp de les interaccions fortes durant les dècades dels anys 50 i 60. A mesura que nous acceleradors permetien realitzar col·lisions a més i més energia, es va veure aviat que el nombre de partícules que interaccionaven fortament es multiplicava d'una manera que era impensable admetre que totes elles eren 'elementals' en algun sentit de la paraula. Tal era la situació de crisi conceptual que molts autors van proposar abandonar la teoria quàntica de camps, cos doctrinal que incorpora els principis de la relativitat especial de Albert Einstein i la Mecànica Quàntica de Niels Bohr i altres. Desenvolupada als anys 40 i 50 entre d'altres per Feynman, Schwinger i Tomonaga (tots tres van rebre el Premi Nobel el 1965), la teoria quàntica de camps de l'electromagnetisme (QED en les sigles angleses) havia permès calcular amb una precisió molt considerable subtils efectes com per exemple l'efecte Lamb o l'estructura hiperfina dels àtoms. Fins i tot una teoria similar a QED, la teoria de Fermi, descrivia prou bé les interaccions febles (tot i que aquesta darrera teoria presentava certes dificultats teòriques importants que no van ser resoltes fins el descobriment de la teoria electrofeble, per la que van rebre el premi Glashow, Salam i Weinberg el 1979).

En teories quàntiques de camps com QED o la teoria de Fermi, era consistent suposar que els *quanta* que les teories descrivien eren elementals, sense estructura interna. Tractar partícules que interaccionaven fortament (com per exemple el protó, el neutró, el pío, la partícula  $n$ , i moltes altres, conegudes totes elles com hadrons) com elementals no solament era poc estètic (hi hauria literalment milers de partícules 'elementals'), sinó inconsistent, conduint a resultats que estaven en contradicció amb l'experiment (per exemple el moment magnètic del protó es molt diferent del valor que prediu l'electrodinàmica quàntica). Davant d'aquesta situació, va haver-hi diferent propostes radicals que tenien totes elles el denominador comú d'abandonar la teoria quàntica de camps com paradigma teòric; potser la més coherent va ser la hipòtesi que coneixem amb el curiós nom de 'el cordó de les sabates' (el nom fa referència a una popular història en el món anglosaxó on el protagonista vol enlairar-se tot estirant cap amunt els seus cordons). Aquesta hipòtesi abandona completament la teoria quàntica de camps i sosté que les partícules amb interaccions fortes viuen en una espècie de democràcia on cadascuna d'elles esta

composada de manera virtual per totes les altres. Va ser defensada sobretot per Geoffrey Chew al final dels anys 60.

El desllorigador aquesta confosa situació va ser adonar-se que, en lloc de posar en qüestió la teoria quàntica de camps, el que calia era identificar els veritables graus de llibertat fonamentals. A diferència dels leptons, que son partícules que interaccionen només electromagnèticament o feblement, els hadrons no serien elementals. Persones com Han, Nambu, Gell-Mann i Zweig van abonar aquesta hipòtesi proposant que els hadrons estarien composts d'unes entitats bàsiques que Gell-Mann va anomenar *quarks*, inspirant-se en una novel·la de Joyce.

Els *quarks* es combinarien per a formar tots els hadrons coneguts, d'una manera no molt diferent de com Mendeleiev va poder reconstruir tots els àtoms a partir de protons i electrons. En aquest paral·lisme, els àtoms serien els hadrons i el paper de protons i electrons els ocuparien els *quarks*, dels que avui sabem que n'existeixen sis classes diferents. El paral·lisme amb Mendeleiev va mes enllà, perquè Gell-Mann i col·laboradors no coneixien les propietats de la força que mantenia units els quarks dins dels hadrons, de la mateixa manera que el científic de Sant Petersburg era desconegedor de la Mecànica Quàntica que permet entendre l'estabilitat dels àtoms i els seus diferents nivells. Naturalment es tractava de la força forta la que unia els *quarks*; però, quina teoria descrivia aquesta força? Alguna cosa d'estrany hi havia, car mai ningú havia observat cap *quark* lliure (els *quarks* tenen càrrega elèctrica fraccionària i per tant serien fàcilment identificables).

En aquell moment, quan els *quarks* eren poc més que una eina teòrica, un crucial nou accelerador va entrar en funcionament a començament dels 70. Al Stanford Linear Accelerator Center, a Califòrnia, fou possible accelerar electrons fins una energia d'uns pocs GeV i fer-los col·lisionar amb un fitó de protons. Els resultats foren sorprenents: els processos podien descriure's com si dins de cada protó hi hagués tres centres difusors elementals i l'electró interaccionés amb tots tres separatament. En poques paraules, l'electró a aquestes energies tan elevades (i per tant a unes longituds d'ona Compton molt petites) penetra dins l'estructura del protó i 'veu' els seus components. Els *quarks* acabaven de ser descoberts.

A longituds d'ones molt curtes els *quarks* ens apareixen per tant, gairebé com partícules lliures. Però, per què no els veiem lliures, per què no podem produir *quarks* en col·lisions? L'única explicació possible es que quan intentem separar els *quarks* la força esdevé tan gran que 'l'energia d'ionització' (utilitzant de nou el símil atòmic) es infinita.

Molts físics, entre ells els guardonats, van abraonar-se sobre el problema tot intentant trobar teories amb aquestes dues propietats simultànies: interacció molt

forta a llargues distàncies i molt feble a curtes. Malauradament, l'únic exemple realment consistent de teoria quàntica de camps disponible aleshores, la QED, presenta precisament la propietat contrària, la teoria es feblement acoblada a llargues distàncies i els desenvolupaments en teoria de perturbacions són possibles, però les correccions quàntiques la fan fortament acoblada a molt curtes distàncies (si bé a una escala experimentalment inabastable). Aquest efecte ha estat observat realitzant experiment de precisió a energies més i més elevades.

És mèrit de Gross, Politzer i Wilczek haver-se adonat que una de les possibilitats teòriques que van estudiar podria ser el desllorigador que es buscava. L'electromagnetisme està basant en una simetria de *galga* basada en el grup  $U(1)$ . Això en llenguatge més planer vol dir simplement que es invariant sota canvis de la fase de la funció d'ona de l'electró, per exemple. Diferents autors havien ja explorat la possibilitat que cadascun dels *quarks* vingués dotat d'un nombre quàntic 'vectorial', i la seva funció d'ona tingués varies components. Això permetria entendre, per exemple, certs problemes que el model *quark* presentava a l'intentar reproduir la 'taula periòdica' dels hadrons i obria la porta a grups *galga* més generals, on la invariància és sota multiplicació de la funció d'ona per un cert tipus de matriu (recordem que la funció d'ona del *quark* seria un vector en un cert espai intern). Un cop realitzats els càlculs van veure que el comportament de la constant d'acoblament quan el grup de simetria era un grup no-abelià era precisament l'adequat. Les teories d'aquest tipus són quasi lliures a curtes distàncies i aquesta propietat s'anomena 'llibertat asimptòtica'. Pel contrari són molt fortament interaccionants, fins l'extrem de portat al confinament, a llargues distàncies.

Tres anys després de la publicació dels articles al *Physical Review Letters* Gross estava ja convençut que la teoria era correcta. De fet, la publicació d'aquests dos articles constitueix la presentació en societat de la teoria de les interaccions fortes, la Cromodinàmica Quàntica o QCD. Arribar a aquesta teoria va necessitar la contribució de moltes persones, apart dels guardonats aquest any, com Fritsch, Leutwyler, Nambu, Symanzik, 't Hooft, i altres que ja hem esmentat. Per això l'Acadèmia Sueca en la seva citació pel premi d'enguany esmenta només: 'pel descobriment de la llibertat asimptòtica en la teoria de les interaccions fortes'. La construcció de QCD fou sens cap tipus de dubte un dels grans triomfs de la física teòrica del segle XX.

Frank Wilczek va ser el primer estudiant de doctorat de David Gross a Princeton, mentre que Politzer feia la seva tesi doctoral sota la direcció de Syd Coleman a Harvard. Estem per tant davant del treball de gent molt jove. Potser és adient recordar algunes de les paraules que Gross ha pronunciat recentment aconsellant

als nous físics: 'mantingueu sempre en el vostre cap els grans problemes, els que són veritablement importants i observeu amb atenció el que la natura intenta dir-nos'. Wilczek afegeix: 'penseu per vosaltres mateixos i penseu sobretot en la natura'.