

ELS PREMIS NOBEL

DE L'ANY 2004

SOBRE EL

PREMI NOBEL DE FÍSICA

CONCEDIT A

DAVID J. GROSS,

H. DAVID POLITZER I

FRANK WILCZEK,

A CÀRREC DE SANTIAGO PERIS,

DE LA UNIVERSITAT AUTÒNOMA

DE BARCELONA

DE L'ESCLAVITUD A LA LLIBERTAT
(GRÀCIES A UNA DERIVADA)

En el premi Nobel d'enguany han estat guardonats David J. Gross, H. David Politzer i Frank Wilczek per dos treballs del 1973; fa, per tant, trenta-un anys. Un d'aquests treballs és de Gross i Wilczek conjuntament (Wilczek era l'estudiant de doctorat de Gross a Princeton), i l'altre de Politzer tot sol (qui feia la tesi amb Coleman a Harvard). Els dos treballs van ser els primers articles tant per a Wilczek com per a Politzer. Tenien vint-i-un i vint-i-tres anys, respectivament. Gross no era gaire més gran, en tenia trenta-un.

Els tres físics van néixer a la costa est dels Estats Units; Gross a Washington, i Wilczek i Politzer a Nova York. Un punt per a la reflexió: Politzer va estudiar de petit a l'escola de secundària The Bronx High School of Science. Això no tindria més interès si no fos perquè resulta que en aquesta escola també van estudiar els següents premis Nobel de Física: Cooper (1947), Schwartz (1988), Glashow (1979), Weinberg (1979) i Hulse (1993). I no només això, aquesta escola té també entre els seus antics alumnes una cinquantena d'altres científics de renom i cinc premis Pulitzer. Aquesta escola tota sola té més premis Nobel que molts països (inclòs el nostre). Jo diria que els responsables del nostre sistema educatiu haurien d'investigar el tema; el telèfon d'aquesta escola és 1(718)8177700.

Però tornem al tema que ens ocupa. La primera pregunta que se'ns acudeix és, òbviament: per què ha esperat la comissió Nobel tant de temps? Segons la meva opinió, això és degut al fet que els resultats van ser revolucionaris, i intentaré explicar el perquè. S'han necessitat tots aquests anys de confirmació experimental per arribar al convenciment que la teoria a què es va arribar és la correcta.

Mirem de tornar en el temps a la situació de la física

de partícules a finals dels anys cinquanta. En aquell moment la teoria quàntica de l'electromagnetisme, o electrodinàmica quàntica (QED), era la teoria més exitosa, ja que permetia fer càlculs molt precisos a còpia de fer teoria de pertorbacions en la seva constant d'acoblament $\alpha \approx 1/137$. Però això era després que els desagradables infinits que sortien només de fer la primera correcció fossin sostrets tot seguint un procés, dit de *renormalització*. Aquest procés de renormalització va ser desenvolupat principalment per Dyson, Feynman, Schwinger i Tomonaga, però ni ells, ni encara menys gent tan influent en la creació de la teoria quàntica com Dirac i Wigner, no es prenien la renormalització com res més que un «truc per amagar els infinits sota la catifa».

En la primera edició del famós curs de Landau i Lifshitz sobre teoria quàntica relativista de 1967 es pot llegir a la introducció: «Il n'existe pas encore actuellement de théorie quantique relativiste complète logiquement fermée. [...] L'absence de fermeture logique complète dans cette théorie [QED] s'exprime par l'apparition d'expressions divergentes lorsqu'on applique directement son appareil mathématique, mais il existe des méthodes entièrement univoques pour lever ces divergences. Néanmoins, ces méthodes revêtent amplement un caractère de recettes semi-empiriques, et notre certitude de la justesse des résultats obtenus par cette voie est due en dernier ressort à leur belle concordance avec l'expérience, plutôt qu'à l'harmonie intrinsèque et à l'élégance logique des principes fondamentaux de la théorie». O sigui, l'actitud que calia seguir era tancar els ulls i calcular. Encara que no fos clar si els passos intermedis tenien o no sentit, el resultat semblava que estava bé. Encara recordo, molt més tard, cap als anys vuitanta, en unes lliçons de física de partícules, que es podia llegir: «When you understand Renormalization, i.e. when you have finally been brainwashed [...]». Feynman mateix va dir el 1961: «I do not subscribe to the

philosophy of renormalization», i això que ell s'ho havia inventat!¹

Per si això era poc, la QED encara tenia un altre problema conceptual. El procés de renormalització es pot formalitzar i sistematitzar usant el grup de renormalització. Les equacions del grup de renormalització són unes equacions diferencials que permeten predir el comportament d'una amplitud quàntica sota un canvi d'escala en l'energia/moment, però sempre que aquests estiguin en una regió no física, caracteritzada per la condició que $p^2 < 0$, on p és el quadrat del quadrimoment. Per contra, la regió física on viuen les partícules és la regió on $p^2 = m^2 > 0$ (m l'anomenem *massa de la partícula*). Per tant, el grup de renormalització dóna informació només indirecta sobre els processos físics.

72

Estudis del grup de renormalització a QED realitzats per Landau i col·laboradors a l'antiga Unió Soviètica van portar a la conclusió que, excepte que hi hagués a la natura un valor màxim absolut per a l'energia (i el moment) d'un sistema qualsevol, la càrrega elèctrica s'havia d'anul·lar, en contradicció òbvia amb l'experiment. Aquest és el famós problema de «càrrega zero» de Landau. Això va ser interpretat com una raó extra de que la QED era lògicament incompleta.

De fet, abans del descobriment de Gross, Politzer i Wilczek, totes les interaccions conegudes tenien la propietat de fer créixer indefinidament la constant d'acoblament amb l'energia (aquest és l'origen del problema de «càrrega zero» que va trobar Landau) i, per tant, de segur que més tard o més d'hora un abandonava el règim pertorbatiu perquè l'acoblament es feia massa gran. Això era dolent perquè en aquella època només se sabia fer teoria de pertorbacions.

1. Feynman és l'autor de les famoses «Lectures on Physics».

Tot plegat va contribuir a que la gent pensés que el grup de renormalització servia, a tot estirar, per fer una discussió qualitativa dels fenòmens, però res més. Al cap i a la fi, només donava informació de regions no físiques i, al damunt, tampoc no et permetia calcular. I això amb la teoria quàntica de camps més ben coneguda, que era la QED!

Comparativament, les interaccions febles, responsables de la desintegració β per exemple, estaven encara en una situació més dolenta que la QED, car no eren ni tan sols renormalitzables. Els càlculs donaven infinit, sense saber què fer per remeiar-ho.

I les interaccions fortes no estaven més bé. Aquestes interaccions són les responsables que els nuclis dels àtoms siguin estables, enganxant protons i neutrons tan fortament, que són capaces de superar la tremenda repulsió electrostàtica que hi ha, per exemple, entre els dos protons d'un nucli d'heli.

Un primer intent d'utilitzar la teoria de camps per explicar la interacció forta va ser en el sistema pió-nucli i va resultar un desastre: l'acoblament era massa gros per aplicar teoria de pertorbacions, i això era l'única cosa que se sabia fer. A més a més, ràpidament els experiments van portar a una enorme proliferació de les partícules que sentien aquesta interacció forta, anomenades *hadrons*. L'any 1970 ja n'hi havia més de seixanta. Aquesta proliferació de manera natural apuntava que els hadrons eren partícules compostes d'altres partícules més fonamentals, tal com passa amb els elements químics, que estan fets de protons, neutrons i electrons. Però, per més que els experiments fessin xocar aquests hadrons, mai no s'aconseguia revelar cap tipus de constituent més fonamental. Tots els hadrons semblaven igual de fonamentals. En teoria de camps això volia dir un camp per a cada un dels hadrons, i un lagrangiana

amb seixanta camps semblava massa.² El curs de Landau-Lifhsitz esmentat abans també es feia ressò d'això en l'últim paràgraf de la introducció, després de parlar dels problemes de la renormalització de la QED: «La situation est d'un tout autre caractère dans le domaine de la théorie des phénomènes liés aux interactions fortes des particules. Ici les tentatives pour construire une théorie à partir des mêmes méthodes n'ont pas abouti à des résultats physiques réels tant soit peu ponderables. La construction d'une théorie complète embrassant les interactions fortes fera, de toute vraisemblance, appel à des concepts physiques fondamentalement nouveaux.»³

Ràpidament es va estendre la creença que el concepte mateix de camp era erroni. Tota una generació de físics va acceptar que la teoria quàntica de camps no era el marc adequat per descriure la física de partícules, com a mínim en els cas de les interaccions fortes. En paraules de Gross: «until 1973 it was not proper to use field theory without apologies», o de Landau: «the Hamiltonian method for strong interactions is dead and must be buried, although of course with the deserved honor». El mateix Gross va començar com a físic treballant en interaccions fortes en teories alternatives a les teories de camps.

Afortunadament, l'any 1961 Gell-Mann i Neeman van aconseguir posar una mica d'ordre en la proliferació d'hadrons en fer notar que tots ells anaven omplint representacions del grup SU , d'una manera similar a com els elements químics omplen la taula periòdica. Més tard, el 1964, Gell-Mann i Zweig aconseguien explicar aquesta regularitat a còpia de postular uns components per als hadrons que van

2. Curiosament, algunes teories actuals estan arribant a aquest nivell en la proliferació de camps.

3. En l'edició de 1982, aquest paràgraf ja no hi és.

ser batejats amb el nom de *quarks* per Gell-Mann i *aces* per Zweig.⁴ Els quarks eren de tres tipus o *flavors* (*flavor* en català vol dir ‘gust’, com en «vull un gelat de tres gustos»), anomenats *up*, *down* i *strange*, o *u*, *d*, *s*.⁵ Es podien formar mesons i barions ajuntant un quark amb un antiquark o tres quarks, respectivament.

Però, òbviament, aquells quarks no podien ser en absolut constituents normals com, per exemple, el protó i l’electró ho són de l’àtom d’hidrogen. Per començar, ningú no els havia vist mai aïllats. Com he dit, els experiments no aconseguien trencar els hadrons en aquests constituents per més que ho intentessin. A més a més, els quarks tenien propietats estrambòtiques que mai ningú no havia vist, com, per exemple, càrrega elèctrica fraccionària $2/3$ o $-1/3$. I no era l’única. Per aconseguir els moments angulars dels hadrons observats, els quarks havien de tenir espín $1/2$. Al mateix temps, un hadró com la Δ^{++} , que té espín $3/2$, estava fet de tres quarks *u* en una funció d’ona orbital *s*, i això dóna una funció d’ona simètrica per a tres fermions idèntics. Això està en contradicció amb el principi d’exclusió de Pauli, que diu que dos o més fermions idèntics no poden estar en el mateix estat quàntic. Aquest és un principi fonamental de la mecànica quàntica i és responsable, ni més ni menys, que de tota la química, de manera que la gent estava bastant segura de la seva validesa. Com podia existir aleshores un hadró com la Δ^{++} ?

Després de diversos intents sense èxit, finalment la solució que es va trobar va ser la d’imposar que els quarks tinguessin un nou nombre quàntic, que es va anomenar *color*. Aquest nombre quàntic havia de tenir tres possibles valors,

4. Com que l’article de Zweig no va ser ni publicat, ara tothom parla de *quarks*.

5. Avui dia sabem que a la natura hi ha sis quarks; els tres ja esmentats més el *charm*, el *bottom* i el *top*.

per exemple «vermell», «blau» i «verd», perquè els tres quarks u de la Δ^{++} poguessin estar en tres estats diferents corresponents a cada un d'aquests colors i així no estar en conflicte amb el principi de Pauli. Els hadrons no tindrien cap color, o, en l'argot habitual, serien *singlets* de color. De fet, de l'òptica se sap que el resultat d'afegir aquests tres colors pot tenir com a resultat el color *blanc*, de manera que la invenció d'aquest nom semblava molt adequada.

Tanmateix, més que una explicació, la hipòtesi que els quarks tenien color semblava una fugida cap endavant: per què no es veien partícules amb color?, què prohibia que les partícules amb color fossin observables? Es va haver d'inventar el principi de confinament. Segons aquest principi, només les partícules *singlets* de color són observables. O sigui, era així perquè sí.

Els quarks tenien, per tant, gust i color. No és estrany que el mateix Gell-Mann, i com ell la majoria de gent, no es prenguessin aquests quarks massa seriosament, com unes entitats imaginàries, instruments matemàtics sense realitat física que potser podien servir per abstroure algunes propietats de les partícules reals (els hadrons), però res més. Fins i tot tan tard com l'any 1972, és a dir, l'any en què Gross, Politzer i Wilczek van començar el treball que els ha reportat el Premi Nobel d'enguany, Gell-Mann deia al respecte de la possible construcció d'una teoria de les interaccions fortes: «[...] it may well be possible to construct an explicit theory of hadrons, based on quarks and some sort of glue, treated as fictitious, but with enough physical properties abstracted and applied to real hadrons to constitute a complete theory». Noteu l'adjectiu «fictici» per caracteritzar els quarks. Noteu també la paraula «glue» ('cola', en anglès), car alguna cosa havia de mantenir els quarks tan fortament «enganxats» dins els hadrons perquè costés tant separar-los.

Gust, color, cola d'enganxar... és evident que ningú no

tenia ni idea de què fer amb les interaccions fortes. Si alguna cosa estava clara abans de 1972 era que, quasi amb tota probabilitat, aquestes interaccions no s'explicarien amb una teoria quàntica de camps a l'estil de la QED, per exemple. A més a més, les idees no basades en teories de camps anaven tenint algun èxit parcial, com per exemple el model de Veneziano, que va ser capaç d'explicar unes certes trajectòries que es veien en dibuixar les masses dels hadrons respecte dels seus espins, dites *trajectòries de Regge*. També explicava xocs d'hadrons quan les partícules sortien totes en la direcció de baixa transferència de moment, dita «cap endavant», on *endavant* volia dir la direcció de la partícula projectil. En aquesta direcció es concentraven la majoria dels xocs, de manera que això feia feliços tant teòrics com experimentadors. Semblava evident que el que calia estudiar, el més important que donaria la clau per entendre les interaccions fortes, era la regió de la secció eficaç on es produïen més successos. O no?

Per això, quan es va proposar de fer els primers experiments de col·lisions profundament inelàstiques, aquests van ser considerats per molts com una pèrdua de temps i de diners. Aquests experiments consistien a fer xocar electrons contra protons o neutrons a molta energia, estudiant tots els hadrons produïts a gran transferència de moment, és a dir, a grans angles, fora de la regió cap endavant. La sorpresa del que es va veure va ser enorme.

En el xoc elàstic d'un electró contra un protó a grans energies, la probabilitat que aquest protó surti a grans angles (és a dir, a gran transferència de moment) disminueix molt quan el protó és una partícula composta. Com més dur és el cop, més petita és la secció eficaç. Això també és així encara que la partícula sortint no sigui un protó sinó un altre hadró. Aquesta disminució de la secció eficaç amb la transferència de moment és una prova que el sistema no és puntual, sinó que té una certa extensió espacial.

Per contra, en les col·lisions profundament inelàstiques s'estudien tots els productes de la col·lisió de manera inclusiva, és a dir, sumant sobre tots els possibles estats finals. Va ser per tant molt «xocant» (i mai millor dit) quan els experiments fets a SLAC l'any 1969 van veure que l'anterior supressió desapareixia. Aquest fenomen es va anomenar *scaling*, perquè les amplituds «escalaven», és a dir, es tornaven independents de la transferència de moment. Uns quants mesos abans, Bjorken havia avançat aquest *scaling* com un dels possibles comportaments de la secció eficaç basant-se en el que s'anomena *àlgebra de corrents*, un resultat que depèn només d'arguments de simetria de *flavor*, sense cap càlcul dinàmic. I va resultar que els experiments hi estaven d'acord.

Ràpidament, diversa gent es va adonar que aquests experiments es podien interpretar dient que el protó i el neutró estaven fets de constituents puntuals, que es comportaven quasi com partícules lliures. Feynman, en particular, és qui va aconseguir donar una imatge més coherent i clara del que estava succeint amb el seu model de «partons» de l'any 1969. Segons aquest model, els protons i els neutrons estaven formats de partons (és a dir, «parts de»), que eren partícules puntuals i quasiliures. Aquest era l'ingredient necessari perquè els xocs profundament inelàstics tinguessin *scaling*. Noteu que Feynman no els va anomenar quarks.

Ràpidament es va veure que aquests partons tenien les mateixes propietats que els quarks: espín $1/2$, càrregues elèctriques $2/3$ i $-1/3$, nombre bariònic $1/3$, etc. Per a alguns estudiosos, Gross entre ells, aquesta coincidència era prou significativa per acceptar que els partons i els quarks eren la mateixa cosa i que, per tant, els quarks eren partícules físiques, constituents dels hadrons. Els quarks, amb les seves propietats estrambòtiques i tot, havien de ser tan reals com l'electró!

No tothom pensava així, però. Entre la gent que enca-

ra cap al final dels anys seixanta i començament dels setanta no creia en la realitat dels quarks es trobaven físics tan notables com Fritsch, Leutwyler i Weinberg; a més del mateix Gell-Mann i, segurament, de Feynman.

I és que no podia ser d'una altra manera. Tota la coincidència de propietats físiques entre els partons i els quarks no feia res més que augmentar la terrible contradicció: com podien els mateixos quarks estar tan fortament lligats dins dels hadrons que era impossible aïllar-los, i al mateix temps estar lliures dins el protó per donar lloc a l'*scaling* com els partons? Com pot una mateixa cosa estar lliure i atrapada al mateix temps?

En aquest moment va fer entrada en escena el grup de renormalització, en la seva versió moderna, gràcies al geni de Wilson. Aquest grup de renormalització, com he explicat al començament, havia estat mig oblidat durant tots els anys seixanta perquè la seva utilitat a QED era molt limitada. Una altra peça fonamental, també introduïda per Wilson, va ser l'expansió en producte d'operadors, dita *OPE*. Aquesta expansió permetia reescriure el producte de dos corrents a punts de l'espai propers però diferents com una suma d'operadors locals amb uns coeficients, coneguts avui dia com a *coeficients de Wilson*. La gràcia d'aquesta expansió és que permetia separar els problemes, fent que tota la física de curtes distàncies⁶ anés a parar als coeficients de Wilson, mentre que la física de llargues distàncies anava a parar als elements de matriu dels operadors. El grup de renormalització i l'OPE donaven junts un llenguatge prou potent per discutir el fenomen de *scaling* dins de la teoria quàntica de camps. Així, se sabia que el comportament a grans transferències de moment

6. La mecànica quàntica relaciona grans moments amb petites distàncies. Per tant, és equivalent dir que el fenomen de *scaling* tenia lloc a molt alt moment o a molt curtes distàncies.

(o curtes distàncies) estava dominat pel que es coneix per *dimensions anòmales dels camps* i la funció beta de l'acoblament. Les dimensions anòmales expressen el canvi en les dimensions dels camps en fer un canvi en el moment transferit, perquè els camps canvien les seves dimensions per efectes quàntics a causa de la renormalització. Així, també, la funció beta expressa el canvi de l'acoblament amb el moment transferit al sistema, i també és degut a les fluctuacions quàntiques del sistema. La funció beta s'expressa com una derivada de l'acoblament respecte del moment.

El problema és que el fenomen de *scaling* era equivalent a dir que totes les fluctuacions quàntiques dels hadrons a curtes distàncies no existien! Els operadors semblaven tenir les mateixes dimensions que en una teoria lliure sense interaccions. Perquè això passés calia que la constant d'acoblament disminuís a curtes distàncies per efectes quàntics, és a dir, que la funció beta fos negativa. El gran problema era que mai ningú no havia vist una teoria quàntica de camps que tingués la funció beta negativa, totes les teories de camps (la QED en particular) o tenien beta positiva o eren patològiques. Per tant, el fenomen de *scaling* era en realitat un atac a la teoria de camps. Tots els experts en el grup de renormalització, Wilson, Polyakov i Migdal entre d'altres, estaven convençuts que els experiments haurien de canviar, que el fenomen de *scaling* només era cert en un període transitori i que encara a més alta energia tindria lloc un comportament diferent.

Cap al final dels anys seixanta van entrar també en escena les teories de Yang-Mills. Aquestes teories havien estat proposades per Yang i Mills el 1954 i eren, essencialment, una generalització de la QED per a grups no abelians, on els «fotons» tenien càrrega i interactuaven entre ells mateixos.⁷

7. Avui dia s'anomenen *camps de Yang-Mills*.

Ningú no s'havia pres seriosament aquestes teories durant anys perquè aquests camps de Yang-Mills havien de tenir massa zero, com el fotó. Això era molt dolent perquè, a diferència de les interaccions electromagnètiques, que són d'abast infinit, les interaccions fortes a baixes energies s'apantallen exponencialment més enllà d'un fermi, la qual cosa vol dir que la partícula bescanviada ha de tenir una massa d'uns 200 MeV. Per això Yukawa va proposar el 1935 una teoria de les interaccions fortes en què es bescanviava un pió, que té una massa de 140 MeV.

Van ser els treballs de 't Hooft al final dels seixanta i començament dels setanta que van ressuscitar les teories de Yang-Mills, demostrant la seva renormalitzabilitat tant en el cas sense massa com en el cas amb massa (a través del mecanisme de Higgs) i donant-los l'estatus de teories de camps ben definides, amb les quals era possible fer càlculs.

Per tant, amb totes les eines a la mà, Gross va agafar el seu estudiant Wilczek a Princeton i li va posar com a tema de tesi el càlcul de la funció beta en una teoria de Yang-Mills. Segons confessa el mateix Gross, ell estava convençut que la funció beta sortiria positiva, és a dir, amb el mateix signe que a QED, i per tant que el fenomen de *scaling* no es podria explicar amb teoria de camps. El càlcul va durar diversos mesos perquè, tot i que ara el pot fer un bon estudiant en una tarda, en aquella època no es tenia la seguretat d'un bon mètode de regularització per a aquestes teories.⁸ Al mateix temps, Politzer, estudiant de Coleman a Harvard, va començar també a fer el mateix càlcul.⁹ Finalment, després de corregir un error en l'últim moment, Gross i Wilczek van

8. La regularització és la manera de definir les integrals infinites que surten en els càlculs intermedis. El resultat físic, un cop el regulador ja s'ha fet desaparèixer, és independent d'això.

9. Coleman estava interessat en aspectes més formals de les teories de Yang-Mills i no tant en el fenomen de *scaling*.

trobar una funció beta negativa. Politzer, també.¹⁰ Era la primavera de 1973. Per tant, en teories de Yang-Mills la constant d'acoblament es feia més i més petita a distàncies més curtes, fenomen que es va batejar com *llibertat asimptòtica*.

Independentment d'això, a Europa, 't Hooft també havia fet el càlcul de la funció beta per Yang-Mills, trobant el seu valor negatiu, però mai no el va publicar. Segons explica ell, perquè Veltman, el seu director de tesi, li va dir que el fenomen important no era *scaling* sinó el confinament, i una funció beta negativa no era suficient per explicar-ho. Dit sigui de passada, les relacions personals entre tots dos no han estat mai gaire bones.

Però 't Hooft no va ser l'únic de no veure la connexió entre una funció beta negativa i *scaling*. De fet, dos físics soviètics, Vanyashin i Terentev, ja havien fet aquest mateix càlcul molt abans, l'any 1964, i van trobar que la funció beta era negativa (encara que es van equivocar en el coeficient). Van concloure, i això ara pot resultar divertit, que el seu resultat era absurd i degut a la no-renormalitzabilitat de les teories de Yang-Mills. Un altre soviètic, Khriplovich, al 1969 ho va calcular correctament però tampoc ho va relacionar amb el fenomen de *scaling*. Per tant, com veiem, Gross, Wilczek i Politzer no van ser, estrictament parlant, els primers que van calcular la funció beta d'una teoria de Yang-Mills; però sí que van ser els primers a adonar-se del profund significat que això tenia per comprendre les interaccions fortes.

Després d'obtenir el resultat d'una funció beta negativa per Yang-Mills, en un paper que va sortir només uns quants mesos després, Gross i Wilczek van reproduir amb els seus càlculs els resultats de *scaling* que els experiments havien trobat. A més, donat que la teoria de camps estava ara

10. No he sabut mai quin grau d'independència van tenir aquests dos càlculs.

ben definida, eren capaços d'anar més enllà i predir certs fets observables on l'*scaling* seria només aproximat, amb petites correccions logarítmiques del moment transferit en la col·lisió. Tot d'una, altres processos, com per exemple l'anihilació electró-positró en hadrons eren també calculables, fins i tot amb les seves correccions.

Més encara, com que la constant d'acoblament es feia petita a curtes distàncies, recíprocament això volia dir que també es feia grossa a llargues distàncies, tot i que un cop fora del règim pertorbatiu era molt difícil dir res més concret. Això podia explicar per què els quarks estaven confinats dins dels hadrons i era impossible separar-los.

Intentar separar sempre involucra una distància prou gran, i l'acoblament es fa tan intens, que aleshores ja no es pot: si continues estirant, la creació d'una parella quark-anti-quark es torna energèticament favorable i el que acabes arrencant és un mesó sencer. Una cosa similar passa quan es vol trencar un imant en dos trossos: queden dos imants petits, però mai amb el pol nord i el pol sud separats.

Aquest fenomen pel qual els quarks no es poden separar a causa del creixement il·limitat de la constant d'acoblament va ser batejat com *esclavitud infraroja* per Georgi i Glashow. Per tant, de l'esclavitud infraroja a baixes energies es va passar a la llibertat asimptòtica a grans energies, gràcies a que la derivada de la constant d'acoblament (la funció beta) és negativa.

Un altre punt molt important és el teorema de Coleman-Gross, també del mateix any 1973. Aquest teorema va demostrar que cap altra teoria de camps pot tenir llibertat asimptòtica si no és una teoria de Yang-Mills. Per tant, no només les teories de Yang-Mills eren una solució, sinó que eren l'única solució. Les preguntes que quedaven eren: quina teoria en concret?, quin grup de simetria i quins nombres quàntics pels quarks?

Tornem al color. Com s'ha dit, el color s'havia introduït perquè alguns hadrons com la Δ^{++} no violessin el principi d'exclusió de Pauli. Cap al 1973, Bardeen, Fritsch i Gell-Mann es van adonar que la desintegració electromagnètica del π^0 sortia nou vegades massa petita si els quarks no tenien color. Aquest factor 9 que es necessitava a l'amplada de desintegració es pot entendre com un factor 3 extra a l'amplitud si cada quark té tres colors. També els mesuraments experimentals de la secció eficaç d'anihilació electró-positró en hadrons demanaven aquest factor 3 de color. Hi havia ja, per tant, diverses evidències que el color era necessari; però en tots els casos el color tenia un paper totalment passiu, només servia per triplicar els resultats. D'altra banda, els experiments de col·lisions profundament inelàstiques amb electrons van anar confirmant que els constituents dels hadrons amb càrrega elèctrica eren quarks. Els camps de Yang-Mills que hi hagués havien de ser sense càrrega elèctrica. Aquests camps van ser anomenats *gluons* perquè se'ls va fer responsables de la «cola» necessària per enganxar els quarks dins dels hadrons.

Aquesta neutralitat de càrrega dels gluons exclouïa fer del *flavor* dels quarks la càrrega no abeliana que hi ha en el camp de Yang-Mills. El camp de Yang-Mills s'havia d'acoblar a una altra cosa i l'únic nombre quàntic dels quarks sense fer servir era el color. Per tant, Gross i Wilczek van proposar una teoria de Yang-Mills acoblada al color dels quarks com a teoria de les interaccions fortes. Així va néixer el que es coneix avui com la *cromodinàmica quàntica*, o QCD, tot i que aquest nom en realitat va aparèixer posteriorment, l'any 1978, en un article de Marciano i Pagels, atribuint la invenció del nom a Gell-Mann.

És cert que en un article de 1973, Fritsch, Gell-Mann i Leutwyler també escriuen el lagrangiana de la QCD com una teoria de Yang-Mills basada en el color, però, a diferència de

Gross i Wilczek, no el proposen com a teoria de les interaccions fortes, sinó simplement com un model perquè volen discutir «the advantages of abstracting properties of hadrons». O sigui, seguien amb la idea d'utilitzar les simetries del model per extreure conclusions, i després llençar el model. De fet, en aquest article encara es poden llegir frases tan contundents com «we do not accept theories in which quarks are real, observable particles» i «the gluon is unphysical». Per tant, és clar que els treballs de Gross, Wilczek i també de Politzer van ser determinants a l'hora d'identificar la teoria de les interaccions fortes com una teoria de Yang-Mills del color. Jo crec que aquest fet és clau per entendre per què se'ls ha guardonat amb el Premi Nobel d'enguany.

Tanmateix, no tot estava resolt. El problema principal era poder demostrar el confinament. Per primera vegada en la física de partícules es donava la circumstància que partícules amb realitat física, i amb efectes que es poden mesurar i atribuir inequívocament a la seva presència, no es podien aïllar totalment. Això va semblar durant un temps lògicament inconsistent i va generar recel. Encara l'any 1985, Bjorken començava una conferència tot dient «while to this day QCD is not universally accepted [...]».

El problema era que el confinament pertany a la regió d'acoblament molt fort, on la teoria de pertorbacions és inútil. És precisament per aquesta raó que el fet que els gluons no tinguin massa en el lagrangiana de Yang-Mills no vol dir res. En el règim no pertorbatiu es perd la connexió entre els camps que s'escriuen en el lagrangiana i els estats físics. Per tant, no hi ha contradicció amb el fet que les interaccions fortes puguin ser de curt abast i els gluons no tinguin terme de masses en el lagrangiana.

No es va tardar massa temps a veure que la idea de confinament, *per se*, no era lògicament inconsistent. Això es va fer amb models que no eren enterament QCD però que

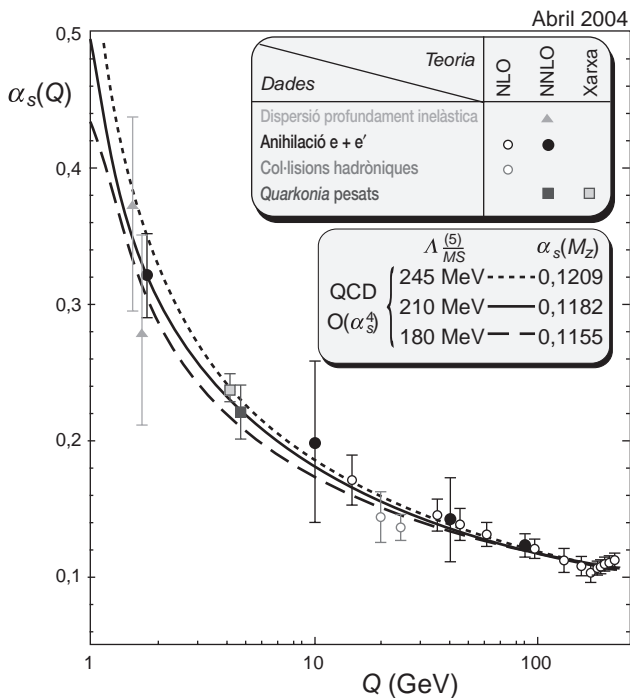
compartien moltes propietats comunes amb QCD. Per tant, eren una prova d'existència del confinament com a concepte. Entre aquests models cal citar, per exemple, QCD en dues dimensions en el límit de gran nombre de colors. Aquí es veu com tot i començar amb un lagrangiana de quarks i gluons, els únics estats que es poden aïllar són hadrons, sense color. Per tant, de mica en mica, el confinament va començar a ser acceptat com un comportament de la natura, tan lògic com d'altres.

Cal dir, però, que encara avui no s'ha pogut solucionar QCD i, per tant, no tenim una prova matemàtica del confinament a QCD. Però hi ha clares evidències a favor seu. Ja l'any 1973, Wilson havia començat a pensar a definir la teoria quàntica de camps en una xarxa o *lattice*. Aquest *lattice* és una versió de l'espai-temps discretitzat. Aquesta idea de Wilson ha portat a una línia d'investigació de les interaccions fortes que ha estat seguida per molts científics d'arreu del món. En aquesta visió, els quarks i els gluons viuen en un *lattice* espai-temporal on es calculen les propietats dels hadrons a còpia de fer simulacions numèriques en ordinadors superpotents. I fins ara tots els càlculs han confirmat de manera brillant l'existència del confinament en QCD. Per tant, ningú no dubta de la seva correcció. El que encara no està clar és quins són els mecanismes precisos que donen el confinament a QCD. Això necessitarà, segurament, solucions analítiques més que no pas numèriques. En fi, ànim!, perquè el qui solucioni aquest problema s'emporta un milió de dòlars, que és el premi que ha posat l'Institut Clay de Matemàtiques.¹¹

A més, en tots aquests anys s'han portat a terme nombrosos experiments, cada vegada més refinats, amb acord total amb les prediccions de QCD. De tots aquests, potser el

11. Els interessats poden adreçar-se amb la solució a <<http://www.claymath.org/millennium>>.

més emblemàtic és el canvi amb l'escala de la constant d'acoblament. El coneixement actual d'aquest canvi (o *running*, com es diu en l'argot del camp) es mostra en la figura adjunta. Com es veu, l'acord teoria-experiment és magnífic.



87

FIGURA 1. Variació de la constant d'acoblament forta en funció del moment. Extret de S. Bethke, «alpha(s) at Zinnowitz 2004», *Nucl. Phys. Proc. Suppl.*, núm. 135 (2004), p. 345 [arXiv:hep-ex/0407021].

L'Acadèmia Sueca de Ciències ha necessitat tenir trenta-un anys de treball experimental i teòric sobre la taula per assegurar-se de la correcció de QCD; no volen que Gross,

Politzer i Wilczek hagin de tornar mai el milió d'euros que els han donat de premi!

Per acabar, voldria esmentar que la llibertat asimptòtica també va obrir unes expectatives increïbles a altres teories. Això és degut al fet que els acoblaments de les interaccions electromagnètica i feble són més petits que l'acoblament de la QCD. Com que l'acoblament de la QCD baixa molt de pressa a curtes distàncies, és a dir, a grans energies, això fa possible que les interaccions fortes, les febles i l'electromagnètica es trobin. Aquest és el somni de la unificació de les forces. Només que això passa a energies fantàstiques, de l'ordre de 1.015 vegades la massa del protó. Sols que, perquè això passi, s'han de postular noves partícules supersimètriques que encara no hem vist, i que per unificar també la gravetat calen teories de cordes en un món amb dimensions extres de l'espai-temps... Com veieu, els físics de partícules no fan descansar mai la imaginació. Però deixarem tot això per a un altre dia.

Agraeixo a J. Matias la lectura d'una versió preliminar d'aquest document.

BIBLIOGRAFIA

— Articles que han donat lloc al Premi Nobel

GROSS, D. J.; WILCZEK, F. (1973a). «Asymptotically Free Gauge Theories. 1». *Phys. Rev.*, núm. 8, p. 3633.

— (1973b). «Ultraviolet Behavior of Non-Abelian Gauge Theories». *Phys. Rev. Lett.*, núm. 30, p. 1343.

POLITZER, H. D. (1973). «Reliable Perturbative Results for Strong Interactions?». *Phys. Rev. Lett.*, núm. 30, p. 1346.

— (1974). «Asymptotic Freedom: An Approach to Strong Interactions». *Phys. Rept.*, núm. 14, p. 129.

— Articles de caire històric i general

- GROSS, D. J. (1999). «Twenty five years of asymptotic freedom». *Nucl. Phys. Proc. Suppl.*, núm. 74, p. 426 [arXiv: hep-th/9809060].
- HODDESON, L.; BROWN, L.; RIORDAN, M.; DRESDEN, M. (1997). *The Rise of the standard model: Particle physics in the 1960s and 1970s*. Cambridge University Press.
- HOOFT, G. 't (1999). «When was asymptotic freedom discovered? or The rehabilitation of quantum field theory». *Nucl. Phys. Proc. Suppl.*, núm. 74, p. 413 [arXiv:hep-th/9808154].

