

**ELS PREMIS NOBEL**

**DE L'ANY 2008**

**SOBRE EL**

**PREMI NOBEL DE FÍSICA**

**CONCEDIT A**

**YOICHIRO NAMBU, MAKOTO KOBAYASHI**

**I TOSHIHIDE MASKAWA,**

**A CÀRREC DE JOAN SOTO,**

**DEL DEPARTAMENT D'ESTRUCTURA**

**I CONSTITUENTS DE LA MATÈRIA**

**DE LA FACULTAT DE FÍSICA**

**DE LA UNIVERSITAT DE BARCELONA**

## SIMETRIES SUBTILMENT TRENCADES

### RESUM

El Premi Nobel de Física de l'any 2008 ha estat atorgat, d'una banda, a Yoichiro Nambu, pel «descobriment del mecanisme de la ruptura espontània de simetria en la física subatòmica», i, de l'altra, a Makoto Kobayashi i Toshihide Maskawa, pel «descobriment de l'origen de la simetria trencada que prediu l'existència de tres famílies de quarks». Resta clar que el nexa comú entre ambdues contribucions són les simetries trencades, trencades no de qualsevol manera, sinó d'una manera que m'he permès d'anomenar «subtil».

PARAULES CLAU: ruptura espontània de simetria, simetria quiral, simetria CP, física subatòmica, simetria trencada, quarks, LHC.

14

### ABSTRACT

The Nobel Prize in Physics 2008 has been awarded to Yoichiro Nambu «for the discovery of the mechanism of spontaneous broken symmetry in subatomic physics», and to Makoto Kobayashi and Toshihide Maskawa for the «discovery of the origin of the broken symmetry which predicts the existence of at least three families of quarks in nature». It is clear enough that the common link among those two contributions are the broken symmetries, although not broken in any way but in —let me say— a subtle way.

KEYWORDS: spontaneous broken symmetry, chiral symmetry, CP symmetry, subatomic physics, broken symmetry, quarks, LHC.

Comencem per explicar la contribució de Yoichiro Nambu. El concepte *ruptura espontània de simetria* és molt agraït de descriure, ja que el trobem en nombroses situacions de la vida quotidiana. En termes generals, diem que tenim una ruptura espontània de simetria quan el plantejament del nostre problema (que en física serà un determinat hamiltonià) gaudeix d'una simetria, però la seva solució (que en física serà l'estat fonamental, el de mínima energia), no; almenys, no de tanta simetria com el plantejament del problema. Per exemple, si tinc gana i em trobo a la mateixa distància de dos restaurants de menjar ràpid, puc seguir passant gana, perquè no sé quin de tots dos triar (respecto la simetria del problema), o puc triar-ne un a l'atzar (trenco espontàniament la simetria). Aquest fenomen va ser discutit pel filòsof francès Jean Buridan (1295-1358) a l'edat mitjana, en termes d'un ase que es mor de gana perquè es troba a la mateixa distància de dos feixos d'herba idèntics i no sap quin de tots dos triar. En física, el cas més conegut de ruptura espontània de simetria és el del ferromagnetisme (l'existència d'imants permanents), discutit pel mateix Heisenberg.<sup>1</sup> Per explicar aquest fenomen, Heisenberg va proposar un model d'espins (vectors), el hamiltonià del qual només depenia del producte escalar dels espins. Per tant, el hamiltonià era invariant sota el grup de rotacions a l'espai ( $SO(3)$ ). Si la constant d'acoblament entre espins fos negativa, però, per tal de minimitzar el hamiltonià (l'energia), els espins s'orientarien en el mateix sentit, i, per tant, l'estat fonamental (el de mínima energia) consistiria a tenir tots els espins apuntant a la mateixa direcció, tant se val quina fos. La simetria de l'estat fonamental, la de les rotacions al voltant de l'eix on apunten els espins ( $SO(2)$ ), és, doncs, més petita. Les simetries en aquest

1. HEISENBERG (1928).

cas corresponen a grups continus i són globals, és a dir, no depenen del punt de l'espai-temps.

Sempre que tenim una situació de ruptura espontània de simetria en un grup continu, com el de les rotacions, apareixen els bosons de Nambu-Goldstone: excitacions d'energia arbitràriament propera a l'estat fonamental. En el cas del ferromagnetisme, reben el nom d'*ones d'espín* o *magnons*. El fenomen que va motivar Nambu va ser, però, la superconductivitat, o, més ben dit, l'explicació de la superconductivitat mitjançant la teoria Bardeen-Cooper-Schrieffer (BCS).<sup>2</sup> Mentre que el hamiltonià d'aquesta teoria era invariant sota transformacions locals de fase, la simetria gauge  $U(1)$  de l'electromagnetisme, l'estat fonamental, consistia en una superposició de parells (d'electrons) de Cooper i no tenia una càrrega ben definida, és a dir, trencava la simetria  $U(1)$ . Com que la simetria era local, és a dir, depenia dels punts de l'espai-temps, no apareixien els bosons de Nambu-Goldstone, sinó que el fotó esdevenia massiu. Aquesta és la causa de l'efecte Meissner, en què la interacció electromagnètica esdevé de curt abast, la qual cosa implica que els camps magnètics no poden penetrar en un superconductor. Nambu va estudiar en tot detall aquesta teoria. El preocupava el fet que l'estat fonamental trenqués la invariància de gauge local. Va aconseguir demostrar una cosa molt important per a futurs desenvolupaments: la simetria, de fet, no estava «trencada»; la simetria encara hi era, però estava formada d'una manera no lineal. Mentre que *ruptura espontània de simetria* és encara un terme força utilitzat, que seguirem mantenint en aquest article, amb més propietat hom es refereix al fenomen com a *simetria a la manera de Nambu-Goldstone*.

A més a més, Nambu es va adonar de les diferències importants que hi ha entre el cas que el grup continu de sime-

2. BARDEEN, COOPER i SCHRIEFFER (1957).

tria que es trenqui espontàniament sigui global (que no depengui del punt de l'espai-temps) i el cas en què sigui local (que en depengui). En el primer apareixen els bosons de Nambu-Goldstone,<sup>3</sup> mencionats anteriorment, mentre que en el segon, no. El que passa en el segon cas és que els camps vectorials de massa nul·la, que sempre existeixen en teories invariants sota simetries contínues locals (en l'electromagnetisme són els fotons), esdevenen massius, un fenomen que es coneix actualment com a *mecanisme de Higgs*,<sup>4</sup> i que ha estat crucial en la formulació de la teoria electrofeble.

Pot ser que en el món de les partícules elementals, de la física subatòmica, una simetria estigui espontàniament trencada? Aquesta és la pregunta que es va fer Nambu, la resposta afirmativa de la qual li ha valgut el Nobel. Els exemples que hem vist fins ara impliquen sistemes de molts cossos no relativistes. En el cas de les partícules elementals, hom parlava del buit (l'estat de zero partícules), estats d'una partícula, de dues, etc. El buit té connotacions de no-res, i és difícil imaginar que el no-res pugui trencar una simetria. Però, de fet, el buit no és ben bé el no-res, sinó l'estat fonamental d'un determinat hamiltonià d'una teoria quàntica de camps relativista, i en aquest sentit no hi ha cap raó, en principi, que el forci a tenir la mateixa simetria que el hamiltonià.<sup>5</sup> Nambu va implementar aquesta idea en col·laboració amb Jona-Lasinio, a qui ha encarregat de recollir el Premi Nobel, en uns models que avui duen el nom de tots dos, i que són els models de Nambu-Jona-Lasinio (NJL).<sup>6</sup> El primer d'aquests, de caràcter il·lustratiu, consistia en fermions relativistes de massa zero amb interaccions locals de quatre fermions. El hamiltonià gaudia d'una

3. GOLDSTONE (1961).
4. ENGLERT i BROUT (1964).
5. NAMBU (1995 [1960]).
6. NAMBU i JONA-LASINIO (1961*a* i 1961*b*).

simetria quiral global  $U_L(1) \times U_R(1)$ . Els fermions relativistes lliures de massa zero només tenen dos estats possibles: que el seu espín apunti a la direcció del moviment (dreta) o a la direcció contrària (esquerra). La simetria  $U_L(1) \times U_R(1)$  implica que el nombre de fermions de la dreta menys el d'antifermions de la dreta i el nombre de fermions de l'esquerra menys el d'antifermions de l'esquerra es conservin separatament. És l'estat fonamental, però gaudeix només d'una única simetria  $U(1)$ . L'espectre de partícules contenia un bosó de Nambu-Goldstone de massa zero i fermions amb massa, és a dir, es produïa una generació dinàmica de massa. En un segon treball, Nambu i Jona-Lasinio van intentar fer el seu model realista: els fermions esdevenien nucleons (protons i neutrons); la simetria esdevenia  $SU_L(2) \times SU_R(2)$ , que es trencava espontàniament en la  $SU(2)$  de l'isoespín (la simetria que relaciona protons i neutrons), i els bosons de Nambu-Goldstone eren els pions. A la natura, però, els pions tenen massa, una massa força més petita que la de la resta dels hadrons. Aquesta petita massa dels pions es podia aconseguir fàcilment introduint una petita massa als fermions sense massa originals, que trencava, ara explícitament, la simetria quiral. Aquesta petita massa afecta poc la massa final dels nucleons, que és en gran part generada dinàmicament.

El model de NJL tenia, però, un problema greu: estrictament parlant, no estava ben definit; en llenguatge tècnic, no era renormalitzable. Això vol dir que per poder-hi treballar calia introduir un tall arbitrari a les sumes sobre moments virtuals que apareixien fent els càlculs, del qual depenien moltes quantitats observables. A més a més, la sociologia dels físics de l'època no l'afavoria, ja que a començament dels seixanta la teoria quàntica de camps relativista —el marc on el model de NJL es formulava— havia caigut en desgràcia, almenys pel que pertocava a les interaccions fortes, atès que molts físics de prestigi opinaven que s'havien de cercar formulacions alter-

natives. És famosa la següent frase de Landau, el prestigiós físic soviètic, dita el 1960: «Arribem a la conclusió que el mètode hamiltonià per a les interaccions fortes és mort i hem d'enterrar-lo, naturalment amb tot l'honor que es mereix». El mètode hamiltonià al qual es referia Landau és el que actualment s'anomena, i he estat anomenant, *teoria quàntica de camps relativista*. De tota manera, Nambu va insistir que allò que il·lustrava el model era bàsicament correcte; que el tall arbitrari només simulava física desconeguda a més altes energies, i que el fet que la simetria es trenqués espontàniament, que els pions fossin quasi bosons de Nambu-Goldstone i que els nucleons adquirissin massa dinàmicament eren conseqüències sòlides del model. Veiem que el temps li ha donat la raó.

La teoria actual de les interaccions fortes, la *crodonàmica quàntica* (QCD), va prendre forma cap a l'any 1972. És una teoria quàntica de camps relativista, una teoria de Yang-Mills no abeliana basada en el grup  $SU(3)$  de color (el nombre quàntic de color va ésser introduït per Han i Nambu el 1965), escrita en termes de quarks i gluons. Comparteix amb l'NJL el fet que la massa dels hadrons es genera dinàmicament; que la simetria quiral està trencada espontàniament; que, a més a més, existeix un petit trencament explícit d'aquesta simetria que és degut a la massa dels quarks lleugers, i que els pions són quasi bosons de Nambu-Goldstone. A diferència de l'NJL, en la QCD els hadrons són estats lligats de quarks i gluons, i no de nucleons de massa zero. L'NJL es pot, però, reformular en termes de quarks, i fins i tot avui es fa servir sovint per estimar paràmetres hadrònics que són difícils d'obtenir des de la QCD. La gran diferència entre la QCD i l'NJL és que la QCD no depèn de cap tall arbitrari, gràcies al fet que la llibertat asimptòtica està ben definida a energies arbitràriament altes.<sup>7</sup> Permet, a més a més, comprovar que els pions són

7. POLITZER (1973).

veritables bosons de Nambu-Goldstone quan les masses dels quarks dalt (*up*) i baix (*down*) es fan zero, i que la dependència de la massa al quadrat del pió de la massa d'aquests quarks és lineal, exactament la mateixa dependència que la massa del pió en el model NJL tenia de la petita massa dels nucleons originals. En la figura 1 es mostren aquests resultats, que s'han obtingut mitjançant càlculs numèrics de QCD en un reticle.

En un terreny més proper, crec que cal recordar que Nambu va acollir en el seu grup entre 1961 i 1962 qui més endavant esdevindria el creador dels primers grups de física de partícules als Països Catalans, Pere Pascual, que va ser catedràtic de la Universitat de València entre 1963 i 1971 i de la Universitat de Barcelona entre 1971 i 2000, i que malauradament ens va deixar ara fa dos anys. Pascual explicava de tant en tant anècdotes dels seus temps a Chicago. No recordo que mencionés, però, que havia aconseguit publicar un treball amb Nambu.<sup>8</sup> El que sí que recordo que explicava sovint era que, durant els dos anys que havia estat a Chicago, Nambu només l'havia obligat a llegir dos treballs: el de Yang i Mills,<sup>9</sup> on es formulen les teories que duen el seu nom i que actualment formen la base de les interaccions fortes i electrofebles, i el de Gell-Mann i Low,<sup>10</sup> on es formulen les bases del grup de renormalització, indispensable per entendre les conseqüències de la llibertat asimptòtica, que va dur a la consolidació de la QCD com a teoria fonamental de les interaccions fortes. Tots dos treballs, fets en el marc de les teories quàntiques de camps relativistes, van ser crucials per al futur desenvolupament de la física de partícules, la qual cosa indica que Nambu tenia un gran olfacte per identificar quines eren les direccions correctes en uns temps de gran confusió en aquest camp; recordeu, si

8. NAMBU i PASCUAL (1963).

9. YANG i MILLS (1954).

10. GELL-MANN i LOW (1954).



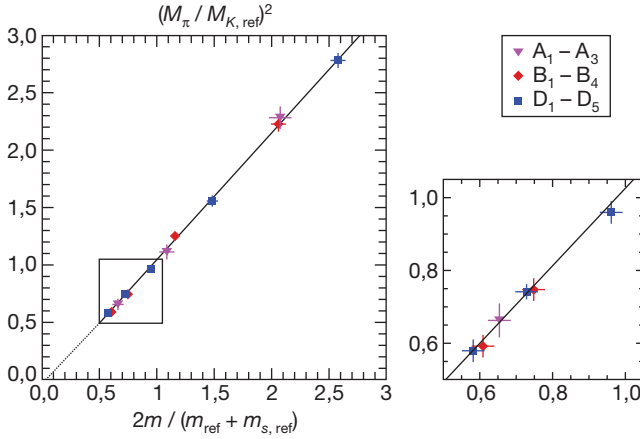


FIGURA 1. Massa al quadrat del pió (eix  $y$ ) en funció de la massa mitjana dels quarks dalt i baix (eix  $x$ ) en la QCD. Noteu la relació lineal, idèntica a la del model NJL, i el fet que la massa del pió s'apropa a zero quan la massa dels quarks dalt i baix també s'hi apropa. (Font: L. GIUSTI (2006), «Light dynamical fermions on the lattice: toward the chiral regime of QCD», *PoS LATT2006*.)

21

més no, la frase de Landau, que volia enterrar-les, això sí, amb els honors que calgués.

## VIOLACIÓ DE LA SIMETRIA CP

Passem a continuació a explicar la contribució que Makoto Kobayashi i Toshihide Maskawa van fer l'any 1973. Sota la frase, un pèl enrevessada, que el comitè del Nobel ha triat per descriure aquesta contribució, s'hi amaga la descripció de la violació de la simetria CP a la teoria electrodèbil actual. La simetria CP es respecta quan en aplicar una transformació de paritat (P) i tot seguit una de conjugació de càrrega (C), el hamiltonià del sistema resta invariant. Una transformació de paritat és la que

fem quan mirem la natura a través d'un mirall. Una transformació de conjugació de càrrega és la que fem quan canviem totes les càrregues per les seves oposades. En el cas de l'electromagnetisme, consisteix a canviar càrregues positives per negatives i viceversa. L'any 1956, Yang i Lee van adonar-se que les interaccions febles violaven la paritat, i si això ocorria, restava clar que la conjugació de càrrega també havia d'ésser violada. Això no obstant, es pensava que CP, l'aplicació d'una transformació de paritat seguida d'una de conjugació de càrrega, romanía una bona simetria. Però, l'any 1964, Cronin i Fitch van descobrir experimentalment una petita violació de la simetria CP en observar la desintegració de l'anomenat *kaó llarg* (un mesó amb un quark estrany [*strange*]) en dos pions, procés que hauria estat impossible si la simetria CP fos respectada.<sup>11</sup>

Gràcies a tot un seguit de treballs,<sup>12</sup> la teoria electrofeble actual ja es trobava l'any 1973 ben fonamentada. És una teoria de Yang-Mills no abeliana; basada en el grup  $SU_L(2) \times U_Y(1)$ , i escrita en termes de leptons, quarks i bosons vectorials, tots sense massa, i d'escalars amb massa. És una teoria quiral: les interaccions dels fermions (quarks i leptons) de la dreta són diferents de les dels fermions de l'esquerra. El buit d'aquesta teoria trenca espontàniament la simetria  $SU_L(2) \times U_Y(1)$  a l' $U(1)$  de l'electromagnetisme i l'espectre consisteix en leptons, quarks i bosons vectorials, tots massius excepte els neutrins i el fotó, que es mantenen sense massa, i en un escalar també massiu, el Higgs. Els hadrons descoberts fins aleshores es podien explicar en termes de tres quarks: dalt, baix i estrany. De leptons, se'n coneixien quatre: l'electró, el muó i els seus respectius neutrins. Hi havia la constatació teòrica que havia d'existir un altre quark: l'encantat (*charmed*). D'una

11. CHRISTENSON *et al.* (1964).

12. GLASHOW (1961); WEINBERG (1967); SALAM (1968); HOOFT (1971); HOOFT i VELTMAN (1972).

banda, Glashow, Iliopoulos i Maiani havien suggerit un mecanisme per suprimir els corrents neutres amb canvi d'estranyesa, que experimentalment eren molt petits, en el qual un nou quark era essencial. De l'altra, l'escola de Nagoya tenia un model,<sup>13</sup> molt influent a l'època, en el qual la simetria barió-leptó tenia un paper fonamental. Havent-hi, doncs, quatre leptons, hi havia d'haver quatre quarks.

Kobayashi i Maskawa van fer una anàlisi exhaustiva de la teoria electrofeble amb dues famílies de quarks i dues de leptons (cada família conté dos membres, un doblet de SU(2)<sub>L</sub>), i es van adonar que la simetria CP havia de ser necessàriament respectada. Com que la natura violava la simetria CP, això volia dir que hi havia d'haver més quarks i leptons. Van demostrar que, a la teoria electrofeble, li calen com a mínim tres famílies per tal que la simetria CP pugui ser violada. Van parametritzar aquesta violació mitjançant una fase en una matriu unitària  $3 \times 3$  que du el nom de tots dos,<sup>14</sup> juntament amb el de Cabibbo,<sup>15</sup> que havia introduït l'únic angle que cal per parametritzar aquesta matriu quan només hi ha dues famílies: la matriu de Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM). La violació de la simetria CP observada a la natura predeia, doncs, l'existència de dos quarks més (a part de l'encantat) i de dos leptons més en la teoria electrofeble, i aquesta ha estat la raó per la qual Kobayashi i Maskawa han estat guardonats amb una quarta part del Premi Nobel cadascun.

El temps anirà confirmant que la proposta de Kobayashi i Maskawa és correcta. El 1974 es descobreix el quark encantat; el 1975, el leptó tau; el 1977, el quark fons (*bottom*); el 1995, el quark cim (*top*), i el 2000, el neutrí tauònic. No és, però, fins als darrers anys, gràcies als abundants resultats

13. MAKI, NAKAGAWA i SAKATA (1962).

14. KOBAYASHI i MASKAWA (1973).

15. CABIBBO (1963).

aconseguits en els experiments Belle, al Japó, i BaBar, als Estats Units (les anomenades *fàbriques de mesons B*), que s'ha pogut confirmar amb una precisió notable que la matriu CKM és suficient per explicar tota la violació de la simetria CP observada a la natura fins al moment. Concretament, el que han comprovat tots dos experiments esmentats, a base de fer nombroses mesures de processos diferents, és l'anomenat *triangle d'unitarietat*. Una conseqüència directa del fet que la matriu CKM sigui unitària és que la suma de tres dels nombres complexos que s'obtenen multiplicant certs elements de la matriu CKM pel complex conjugat d'altres és zero. Com que cada nombre complex es pot representar com un vector al pla i els tres vectors sumen zero, tenim, doncs, un triangle al pla, el triangle d'unitarietat. Tal com es pot veure en la figura 2, tots els resultats experimentals de les fàbriques de mesons B són compatibles amb l'existència d'aquest triangle. A més a més, els resultats experimentals han establert una clara jerarquia entre els elements de la matriu CKM: els elements de la diagonal tenen una dimensió al voltant d'1; els més propers a la diagonal són força més petits, i els més allunyats, encara més petits.

La violació de la simetria CP a la teoria electrofeble és petita per una raó ben subtil: un procés que violi la simetria CP ha d'implicar necessàriament les tres famílies de quarks,<sup>16</sup> i això vol dir que ha de dependre d'elements de la matriu CKM de fora de la diagonal, que, com acabem de comentar, són petits o molt petits.

## CONCLUSIONS

Tant la simetria quiral com la simetria CP es troben trencades a la natura, no d'una manera arbitrària, ja que, si aquest fos el

16. JARLSKOG (1985).

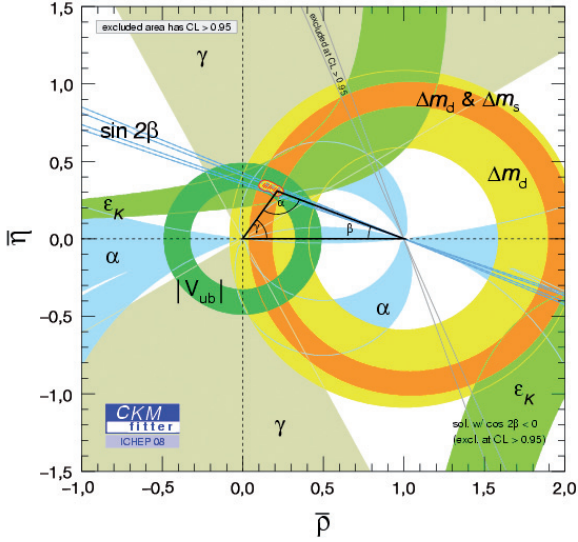


FIGURA 2. Estat de les mesures experimentals de l'anomenat *triangle d'unitarietat*, l'estiu de 2008. Noteu la compatibilitat de totes amb la figura triangular. (Font: J. CHARLES *et al.* [CKMfitter Group] (2005), «CP violation and the CKM matrix: assessing the impact of the asymmetric  $B$  factories», *Eur. Phys. J. C.*, vol. 41, núm. 1, p. 1-131, amb resultats actualitzats a <http://ckmfitter.in2p3.fr>.)

cas, ni en parlaríem, sinó d'una manera que m'he permès d'anomenar «subtil». La simetria quiral apareix a les interaccions fortes trencada de dues maneres: espontàniament, pel buit de la QCD, i explícitament, per les petites masses dels quarks lleugers. Aquestes petites masses dels quarks lleugers, així com la resta de masses de les partícules que coneixem —caldría exceptuar-ne potser els neutrins, l'origen de la massa dels quals és encara desconegut—, són també generades mitjançant la ruptura espontània d'una altra simetria quiral, aquest cop, però, la de la teoria electrofeble. És en aquesta

última teoria on té lloc la violació de la simetria CP, que és petita a la natura a causa de l'estructura mateixa d'aquesta teoria: calen processos que impliquin les tres famílies de quarks per observar-la, i aquests estan molt suprimits.

Finalment, mencionaré la relació entre aquest Premi Nobel i els experiments del gran col·lisionador d'hadrons (LHC) que es duran a terme en el futur immediat al Centre Europeu per a la Recerca Nuclear (CERN, a Ginebra, Suïssa). L'objectiu principal d'aquests experiments és el descobriment del Higgs, l'única partícula de l'anomenat *model estàndard*, format per la QCD i la teoria electrofeble, que encara no ha estat trobada. El seu descobriment, o simplement la seva cerca, aportarà una informació molt valuosa sobre el mecanisme del trencament espontani de simetria, una simetria quiral, en aquest model, i permetrà validar-lo, o —més interessant encara— trobar indicacions d'un mecanisme nou o de noves partícules, de nova física, que el model estàndard no copsa adequadament. Els esforços no es concentraran, però, exclusivament a trobar el Higgs; de fet, un dels experiments, l'anomenat LHCb, en què participen grups experimentals de la Universitat de Barcelona i de la Universitat de València, ha estat dissenyat per explorar en detall la violació de la simetria CP i veure si la matriu CKM encara pot acomodar-la tota quan la precisió sigui molt més gran. Fóra molt interessant que això no fos així, ja que donaria indicacions clares que hi ha una nova física més enllà del model estàndard amb tres famílies de quarks i leptons.

#### BIBLIOGRAFIA

BARDEEN, J.; COOPER, L. N.; SCHRIEFFER, J. R. (1957). «Theory of superconductivity». *Phys. Rev.*, vol. 108, núm. 5, p. 1175-1204.

- CABIBBO, N. (1963). «Unitary symmetry and leptonic decays». *Phys. Rev. Lett.*, vol. 10, núm. 12, p. 531-533.
- CHRISTENSON, J. H.; CRONIN, J. W.; FITCH, V. L.; TURLAY, R. (1964). «Evidence for the  $2\pi$  decay of the  $K_2^0$  meson». *Phys. Rev. Lett.*, vol. 13, núm. 4, p. 138-140.
- ENGLERT, F.; BROUT, R. (1964). «Broken symmetry and the mass of gauge vector mesons». *Phys. Rev. Lett.*, vol. 13, núm. 9, p. 321-323.
- GELL-MANN, M.; LOW, F. E. (1954). «Quantum electrodynamics at small distances». *Phys. Rev.*, vol. 95, núm. 5, p. 1300-1312.
- GLASHOW, S. L. (1961). «Partial-symmetries of weak interactions». *Nucl. Phys.*, vol. 22, núm. 4, p. 579-588.
- GOLDSTONE, J. (1961). «Field theories with “superconductor” solutions». *Nuovo Cimento*, vol. 19, núm. 1, p. 154-164.
- GROSS, D. J.; WILCZEK, F. (1973). «Ultraviolet behavior of non-abelian gauge theories». *Phys. Rev. Lett.*, vol. 30, núm. 26, p. 1343-1346.
- HEISENBERG, W. (1928). «Zür theorie des ferromagnetismus». *Zeitschrift für Physik A Hadrons and Nuclei*, vol. 49, núm. 9-10, p. 619-636.
- HIGGS, P. W. (1964). «Broken symmetries and the masses of gauge bosons». *Phys. Rev. Lett.*, vol. 13, núm. 16, p. 508-509.
- HOOFT, G. 't (1971). «Renormalizable Lagrangians for massive Yang-Mills fields». *Nucl. Phys. B*, vol. 35, núm. 1, p. 167-188.
- HOOFT, G. 't; VELTMAN, M. J. G. (1972). «Regularization and renormalization of gauge fields». *Nucl. Phys. B*, vol. 44, núm. 1, p. 189-213.
- JARLSKOG, C. (1985). «Commutator of the quark mass matrices in the standard electroweak model and a measure of maximal CP violation». *Phys. Rev. Lett.*, vol. 55, núm. 10, p. 1039-1042.

- KOBAYASHI, M.; MASKAWA, T. (1973). «CP-violation in the renormalizable theory of weak interaction». *Prog. Theor. Phys.*, vol. 49, núm. 2, p. 652-657.
- MAKI, Z.; NAKAGAWA, M.; SAKATA, S. (1962). «Remarks on the unified model of elementary particles». *Prog. Theor. Phys.*, vol. 28, núm. 5, p. 870-880.
- NAMBU, Y. (1995 [1960]). «A “superconductor” model of elementary particles and its consequences». A: EGUCHI, T.; NISHIJIMA, K. (ed.). *Broken symmetry: Selected papers of Y. Nambu*. (World Scientific Series in 20th Century Physics; 13)
- NAMBU, Y.; JONA-LASINIO, G. (1961a). «Dynamical model of elementary particles based on an analogy with superconductivity. I». *Phys. Rev.*, vol. 122, núm. 1, p. 345-358.
- (1961b). «Dynamical model of elementary particles based on an analogy with superconductivity. II». *Phys. Rev.*, vol. 124, núm. 1, p. 246-254.
- NAMBU, Y.; PASCUAL, P. (1963). «Self-consistent models of strong interactions with chiral symmetry». *Nuovo Cimento*, vol. 30, núm. 1, p. 354-365.
- POLITZER, H. D. (1973). «Reliable perturbative results for strong interactions?». *Phys. Rev. Lett.*, vol. 30, núm. 26, p. 1346-1349.
- SALAM, A. (1968). «Weak and electromagnetic interactions». A: SVARTHOLM, N. (ed.). *Elementary particle theory: Relativistic groups and analyticity: Proceedings of the Eighth Nobel Symposium*. Estocolm: Almquist and Wiskell.
- WEINBERG, S. (1967). «A model of leptons». *Phys. Rev. Lett.*, vol. 19, núm. 21, p. 1264-1266.
- YANG, C.-N.; MILLS, R. L. (1954). «Conservation of isotopic spin and isotopic gauge invariance». *Phys. Rev.*, vol. 96, núm. 1, p. 191-195.



## WEBS

- <[http://nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2008](http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2008)> [Pàgina web del Premi Nobel de Física de l'any 2008 (en anglès)]
- <[http://ca.wikipedia.org/wiki/Yoichiro\\_Nambu](http://ca.wikipedia.org/wiki/Yoichiro_Nambu)> [Biografia de Yoichiro Nambu]
- <[http://ca.wikipedia.org/wiki/Makoto\\_Kobayashi](http://ca.wikipedia.org/wiki/Makoto_Kobayashi)> [Biografia de Makoto Kobayashi]
- <[http://ca.wikipedia.org/wiki/Toshihide\\_Maskawa](http://ca.wikipedia.org/wiki/Toshihide_Maskawa)> [Biografia de Toshihide Maskawa]
- <[http://en.wikipedia.org/wiki/Spontaneous\\_symmetry\\_breaking](http://en.wikipedia.org/wiki/Spontaneous_symmetry_breaking)> [Ruptura espontània de simetria (en anglès)]
- <<http://en.wikipedia.org/wiki/CP-violation>> [Violació de la simetria CP (en anglès)]