

El sabor de la física : taller en celebración del 60 aniversario de Gabriel López Castro (7-8 abril 2022)

Contribución de Jean Pestieau

UCLouvain, Bélgica
jean.pestieau@gmail.com

Fue el 20 de septiembre de 1985 cuando conocí a Gabriel por primera vez en Bruselas (Bélgica). Venía de México DF, donde el día anterior su avión había despegado en medio de un terremoto. Venía a realizar un doctorado en física de interacciones fundamentales bajo mi supervisión. Este fue el comienzo de una profunda amistad. Para su gran satisfacción y la mía, recibió su doctorado 3 años después, en 1988.

Como sugirieron los organizadores del acto en honor a Gabriel, hablaré del camino que seguí tras mi doctorado, de la (limitada) experiencia investigadora que he adquirido y del futuro que veo en la física de las interacciones fundamentales. Les agradezco esta invitación, que recibo con mucho gusto. Estoy muy consciente de las limitaciones de mi presentación; realicé mi doctorado hace 54 años, en una época completamente distinta a la actual.

Cuando estaba en mi segundo año de la universidad (1962), me di cuenta de que James Maxwell (1831-1879) había completado las ecuaciones de los campos eléctricos y magnéticos exigiendo que no contradijeran la conservación de la corriente eléctrica. Ésto me impresionó mucho y fue un factor importante en mi desarrollo posterior ya que me mostró, por un lado, lo que significa unificar campos

aparentemente tan dispares como la electricidad, el magnetismo y la óptica y, por otro, la importancia de las nociones de campo y corriente y las relaciones entre ellos. Y también la importancia de las leyes de conservación.

Fue en este contexto, a partir de 1965, cuando decidí utilizar la interacción electromagnética para comprender mejor las interacciones débil y fuerte. Las herramientas dispares que tenía a mi disposición eran (1) la invariancia de norma para la interacción electromagnética, los teoremas de los fotones suaves (soft-photon theorems), (2) la teoría corriente x corriente (es decir, sin campos) de las interacciones débiles iniciada por Enrico Fermi, el álgebra de corrientes, PCAC, CVC, el modelo de dominancia de los mesones vectoriales (ρ , ω , ϕ) para estudiar la interacción electromagnética de los hadrones, etc. Fue, de hecho, un periodo de teoría mal fundamentada para describir las interacciones fuertes y de aproximaciones fragmentarias y semi-empíricas,

En la Université Catholique de Louvain (1965-1968), se respiraba un ambiente optimista y dinámico de intercambio y discusión entre los doctorandos. Tuve la sensación de descubrir colectivamente el mundo de las interacciones fundamentales. Especialmente con un amigo, Pierre de Baenst. Trabajamos y escribimos artículos juntos. Aprendí mucho de él. Discutíamos todas las semanas los nuevos artículos de Physical Review Letters, Physical Review, etc. Lo más importante era que podíamos saber lo que estaba ocurriendo en el mundo de las interacciones fundamentales. Lo que fue particularmente importante fue mantener nuestra imaginación fertilizada por los intercambios semanales con un notable profesor, Robert Brout, cuya intuición era desenfrenada [Robert Brout es uno de los inventores del mecanismo de Brout-Englert-Higgs, central para el tratamiento de las masas en el modelo estándar electrodébil].

Martinus Veltman, de la Universidad de Utrecht (Países Bajos), vino a la U. C. Louvain (a 200 km al sur de Utrecht) para impartir un seminario que me impresionó mucho en su momento, en el que demostró que los resultados del álgebra de corrientes podían obtenerse igualmente utilizando condiciones de divergencia que implicaban campos vectoriales de mesones (cargados) y corrientes. ¡Y así es como los bosones intermediarios llegaron a mi vida!

En 1968-1970, me incorporé a la Universidad de Cornell, en el estado de Nueva York, como Research Associate. Fue una época excitante. La teoría de campos volvió a ser el centro de atención con el descubrimiento de la anomalía de Adler-Bell-Jackiw que aparece en el cálculo de las correcciones radiativas de la divergencia de la corriente axial. Al mismo tiempo, Kenneth Wilson aportó una nueva perspectiva a la teoría de campos. Y al mismo tiempo, el estruendo: la revolución en la concepción de la interacción entre el campo electromagnético y los hadrones, especialmente el protón. En efecto, en el SLAC (Stanford), los experimentos de electroproducción profundamente inelástica (deep inelastic electroproduction) sobre el protón a altas energías [$e^- + p \rightarrow e^- + X$] indicaron que el fotón virtual interactuaba con el protón, no a través de un bosón vectorial (ρ , ω , ϕ), sino que interactuaba puntualmente con los constituyentes dentro del protón: quarks y antiquarks que aparecen en número variable, acompañados de partículas eléctricamente neutras, los gluones. Los hadrones (bariones y mesones) perdían de hecho su condición de partículas elementales. Son observables, directamente detectables, con masas bien definidas ($E^2 = p^2c^2 + m^2c^4$). A estos hadrones les corresponden, en el mejor de los casos, campos efectivos

que describen sus interacciones. A los quarks y gluones les corresponden campos "fundamentales" que unifican las partículas y las interacciones como con la QED. Pero, como los quarks y los gluones no son directamente detectables, sólo pueden manifestarse indirectamente a través de lo que se llama "hadronización". Estamos aquí en el terreno de las recetas de la fenomenología, y no en el de una teoría coherente como la teoría de « lattice fields » tiene la ambición de ser. La aproximación de la matriz S a la física hadrónica sólo puede ser aproximada.

Esta toma de conciencia comenzó a surgir a finales de los años sesenta. En Cornell, tres postdoctorantes, Probir Roy, Hidezumi Terazawa y yo, estábamos llenos de entusiasmo por el nuevo mundo que estábamos descubriendo. Probir Roy y yo, en 1969, también nos planteamos otra cuestión: ¿qué hacer para que la « selfmass » del electrón sea finita? En el marco de la QED, esta corrección es logarítmicamente divergente. Acabábamos de descubrir los artículos de Glashow (1961) y Weinberg (1967), dos artículos fundadores del modelo estándar de las interacciones electrodébiles. Entonces nos preguntamos si, en este marco, la selfmass del electrón podría ser finita. No teníamos mucha experiencia. Despreciamos la contribución de las divergencias cuadráticas, reteniendo únicamente las divergencias logarítmicas calculadas en la « Feynman-'t Hooft gauge ». A continuación, obtuvimos que la suma de las divergencias logarítmicas era nula cuando $m_Z = 90.86$ GeV y $m_W = 80.53$ GeV para compararlos con sus valores experimentales reales actuales $m_Z = 91.1876(21)$ GeV y $m_W = 80.379(12)$ GeV (Ver : Jean Pestieau & Probir Roy, "*Lepton symmetry and Self-mass*", Phys. Rev. Lett. 23, 349(1969), <https://d-meeus.be/physique/lepton-sym.pdf>).

En Cornell, el famoso físico Hans Bethe me dijo una vez:

«Para hacer una buena investigación, no basta con ser inteligente, estar bien preparado, hay que saber conocer sus límites y elegir temas difíciles pero que sabes que puedes resolver.»

Luego tuve la suerte de estar en el Cinvestav (1970-1972) durante dos años y de volver regularmente cada dos o tres años por períodos de dos semanas entre 1972 y 2002. También visité la UNAM. Fue en México donde aprendí a ser un entrenador de nuevas generaciones de investigadores. Había mucho entusiasmo y sed de descubrir cosas nuevas en la física de las interacciones fundamentales. ¿Cómo tender un puente entre la "vieja" física que utiliza hadrones como bloques de construcción fundamentales y la "nueva" física basada en los partones (quarks y gluones) cuyas propiedades se iban revelando mes a mes?. Para los físicos teóricos era más que evidente que en la dialéctica entre teoría y experimento, éste debe tener y tiene la última palabra.

Los años 1970-1972 fueron un periodo para despejar el camino, antes de la QCD (1973), las corrientes neutras (1973), el descubrimiento del leptón tau (1974), de los quarks c (1974) y b (1977), y de los « jets » de quarks y gluones. Son muchos los buenos recuerdos de la colaboración con Héctor Moreno, que acababa de terminar su doctorado, Miguel Ángel Pérez, que empezaba su doctorado, seguido de Jesús Urías, Eduardo Cantoral, ... Fue especialmente dinámico el seminario semanal conjunto entre la UNAM, el IPN y el Cinvestav, donde nos encontramos con Germinal Cocho, Augusto García, Alfonso Mondragón, Matías Moreno, Juan Salazar, Lance Heiko, etc.

Desde 1972, la UCLouvain fue mi base. Investigué principalmente en colaboración con estudiantes y dos colegas, Jacques Weyers y Jean-Marc Gérard. Fui entrenador de brillantes estudiantes mexicanos para su doctorado: Matías Moreno, Jesús Urías, José Luis Lucio y Gabriel López Castro. Alejandrina Martínez y Erika Álvarez hicieron excelentes tesis de maestría. Mi investigación fue una continuación de mis años de aprendizaje (1965-1972). En concreto, entre 1986 y 2013, Gabriel y yo fuimos coautores de 18 artículos y de muchos « discussion papers »

Muchos de los artículos de los que soy autor o coautor están referenciados y/o pueden encontrarse en <https://inspirehep.net/authors/993660> y en <https://dmeeus.be/physique/>

¿El futuro?

Este 8 de abril de 2022 cumpla 80 años. Desde luego, no soy la persona más indicada para hablar de las perspectivas de futuro de la física de las interacciones fundamentales. La probabilidad de equivocarse es probablemente cercana a 1. No obstante, he aquí algunas observaciones.

1. Hay que seguir los resultados del "LHC run 3" a partir de julio de 2022. Una sorpresa siempre es posible. En 1964, el descubrimiento de la violación del CP en la desintegración de los kaones neutros fue algo completamente inesperado.
2. Hay que seguir los resultados del «James Webb Space Telescope» (¡que cuesta casi el doble que el LHC!) en los próximos años, con resultados esperados muy superiores a

los de su predecesor, el Hubble. En particular, con respecto a la materia y la energía oscuras.

3. Hay que profundizar en la comprensión de la teoría de campos. A este respecto, recomiendo los libros de Frank Wilczek: «*The Lightness of Being: Mass, Ether, and the Unification of Forces*» (2010) y «*Fundamentals: Ten Keys to Reality*» (2021).

Es conveniente abandonar la expresión "física de las partículas elementales" y sustituirla por "física de las interacciones fundamentales". En efecto, las partículas son epifenómenos, los campos (en interacción) son las entidades fundamentales. Frank Wilczek: "*Las partículas son epifenómenos, manifestaciones superficiales de realidades más profundas y permanentes, es decir los campos cuánticos. Estos campos llenan todo el espacio, y en ese sentido son continuos. Pero las excitaciones que crean - las partículas - son discretas*". "*La incertidumbre cuántica, combinada con la posibilidad de procesos de creación y aniquilación, implica un vacío repleto de actividad. Las partículas y antipartículas efímeras nacen y mueren*".

4. Es importante detectar qué cantidades se conservan en una teoría física -especialmente en la teoría de campos, donde todo está en continua transformación- y por qué se conservan. Emmy Noether, en 1915, nos ayudó a responder a estas preguntas. Es importante familiarizarse con lo que se conoce como teorema de Noether. Véase, por ejemplo, Nina Byers, «*E. Noether's Discovery of the Deep Connection Between Symmetries and Conservation Laws*», <https://arxiv.org/abs/physics/9807044> .

Por ejemplo, debido a que los espacios-tiempos de Galileo y Minkowski son uniformes tanto en el espacio tridimensional como en el tiempo, existe la conservación del momento lineal

y de la energía. Y viceversa. En la relatividad general, no hay uniformidad del tiempo ni uniformidad del espacio y, por tanto, no hay conservación de la energía ni conservación del momento lineal. El gigante matemático David Hilbert y el gigantesco físico Alberto Einstein se asombraron de este resultado en 1915. El significado del teorema de Noether es igual de importante hoy en día, donde predominan las teorías de norma (gauge theories) en la formulación de interacciones fundamentales.

5. Desde el anuncio del descubrimiento del bosón escalar H de Brout-Englert-Higgs el 4 de julio de 2012 en el LHC, el modelo estándar electrodébil de Glashow-Salam-Weinberg $SU(2)_L \times U(1)$ se ha "afianzado" con un solo bosón escalar. No se han descubierto nuevas partículas elementales, especialmente las supersimétricas. Todas las partículas elementales masivas (W,Z, H, leptones, quarks) tienen sus masas proporcionales al valor medio v del bosón escalar único H en el vacío ($v = H$ vacuum expectation value).

Con las masas experimentales de las partículas elementales, la regla de suma (sum rule)

$$\frac{3}{4} m_H^2 + \frac{3}{4} m_Z^2 + \frac{3}{2} m_W^2 = 3 (m_t^2 + m_b^2 + m_c^2 + m_s^2 + m_d^2 + m_u^2) + m_\tau^2 + m_\mu^2 + m_e^2$$

necesaria para cancelar la divergencia cuadrática universal que aparece sólo en las correcciones radiativas de v , no se satisface. Y así, adiós a la creencia metafísica en la "naturalidad" (« naturalness »), asociada a la supuesta existencia de partículas supersimétricas. Ver; 1) R. Decker & J. Pestieau, «*Lepton Self-Mass, Higgs Scalar and Heavy Quark Masses*», presented at the DESY Workshop, October 22-24, 1979, Eq.(6), <https://arxiv.org/abs/hep-ph/0512126> , (2) M. Veltman, « *The Infrared-Ultraviolet Connection* », Acta

Phys. Polonica B12, 437 (1981), Eq. (7.3), <https://www.actaphys.uj.edu.pl/fulltext?series=Reg&vol=12&page=437> .

M. Veltman dio una notable conferencia en el CERN titulada «*Reflections on the Higgs System* », CERN 97-05, 23 July 1967.

[file:///home/jean/T%C3%A9l%C3%A9chargements/Reflection of the Higgs system Veltman\(6\).pdf](file:///home/jean/T%C3%A9l%C3%A9chargements/Reflection%20of%20the%20Higgs%20system%20Veltman(6).pdf) En dicho artículo da las razones teóricas para elegir el modelo estándar electrodébil con un único bosón de Higgs (ver en particular las páginas 2, 40, 46, 49). Lo recomiendo ampliamente.

En cuanto a las interacciones electrodébiles, estoy de acuerdo con la postura de Erwin Schrodinger: "*La tarea no es ver lo que nunca se ha visto antes, sino pensar lo que nunca se ha pensado antes sobre lo que se ve cada día*" (« *The task is not to see what has never been seen before, but to think what has never been thought before about what you see everyday* »).

Propongo aquí 5 relaciones que pueden ayudar a profundizar en el modelo electrodébil estándar con un único bosón escalar H. La mayoría de ellas provienen de la colaboración entre Gabriel y yo. Ver: Jean Pestieau, «*New track in the standard model*»,

<https://d-meeus.be/physique/NewTrack.pdf> (2019)

A. Relación de cierre (closure relation) para v :

$$m_H^2 + m_Z^2 + m_W^2 + m_t^2 + m_b^2 + m_c^2 + m_s^2 + m_d^2 + m_\tau^2 + m_u^2 + m_e^2 = v^2$$

Véase: G. López Castro, J. Pestieau, "*Relation between*

masses of particles and the Fermi constant in the electroweak Standard Model", <https://arxiv.org/abs/1305.4208> (2013).

B. Relación entre W y B, $m_W - m_B = ev/2$ con

$$m_B = (m_Z^2 - m_W^2)^{1/2} .$$

Véase: G. López Castro, J. Pestieau, «*The unit of electric charge and the mass hierarchy of heavy particles*», Mod. Física. Lett. A22, 2909-2916 (2007), <https://arxiv.org/abs/hep-ph/0609131> , Ecuación (6). En este trabajo, trabajamos en la aproximación donde $\tan(\pi/4 - \theta_W) = e$.

C. Relación de cierre (closure relation) para la carga eléctrica e

$$1 - e^2 = 3e - \pi\alpha^2 (1 + \alpha/4)$$

$$\text{con } \alpha = e^2/4\pi = (137,035\ 999\ 144)^{-1}$$

Véase: J. Pestieau, "*Variations on the Gauge Sector of the Electroweak Model*",

<https://dmeeus.be/physique/40years.xhtml> (2009);

"*Exploration in the Boson Sector of the Glashow-Salam-Weinberg model*"

<https://d-meeus.be/physique/bosonGSWmodel.pdf> (2012)

D. El ángulo de Weinberg θ_W es fijado por la carga eléctrica e

$$1 - \tan^2(\pi/4 - \theta_W) = 3e + 2\pi\alpha^2 (1 + \alpha/4)$$

con $\cos\theta_W = m_W/m_Z$, y

$$\tan(\pi/4 - \theta_W) = (m_W - m_B) / (m_W + m_B)$$

Observamos que

$$e^2 / \tan^2(\pi/4 - \theta_W) = (1 - 3\alpha/4) / (1 + \alpha/4)$$

E. Relación entre los tres bosones m_H , m_Z y m_W

$$m_H^2 + m_Z^2 + m_W^2 = 2 (m_W + m_B)^2 = e^2 / \tan^2(\pi/4 - \theta_W) \cdot v^2 / 2$$

Si, de forma un tanto arbitraria, fijamos v , el valor medio en el vacío del bosón escalar H, en función de G_F la constante de Fermi, $v_F = 1 / (2^{1/2} G_F)^{1/2} = 246.21965 \pm 0.00006$ GeV, entonces encontramos que

$$m_Z = 91.1850 \text{ GeV}$$

$$m_W = 80.3646 \text{ GeV}$$

$$m_H = 125.324 \text{ GeV}$$

$$m_t = 173.623 \text{ GeV}$$

Si $v = 246.2266$ GeV, encontramos

$$m_Z = 91.1876 \text{ GeV}$$

$$m_W = 80.3668 \text{ GeV}$$

$$m_H = 125.327 \text{ GeV}$$

$$m_t = 173.628 \text{ GeV}$$

Compárese con los datos de la tabla 10.4, p.20 en <https://pdg.lbl.gov/2020/reviews/rpp2020-rev-standard-model.pdf> para las predicciones del Modelo Estándar

$$m_Z = 91.1876 (21) \text{ GeV}$$

$$m_W = 80.361 (6) \text{ GeV}$$
$$m_H = 125.30 (13) \text{ GeV}$$
$$m_t = 173.19 (55) \text{ GeV}$$

6. Compatibilidad entre el tratamiento de las interacciones fuertes

- de los campos hadrónicos
- de la QCD (quarks y gluones)

El mejor ejemplo es el muón g-2.

7. Valor preciso de α la constante de estructura fina

$$\alpha^{-1} = 137.035999046(027) \text{ (Parker et al. 2018)}$$
$$137.0359991496(0331) \text{ (Aoyoma et al. 2019)}$$

[electron g-2]

$$137.035999206(011) \text{ (Guellati-Khélifa et al. 2020)}$$

8. En el acoplamiento tipo Yukawa del bosón escalar H con los fermiones, no sólo se incluyen la masa relativa de los fermiones en unidades de v , sino también los ángulos de mezcla entre los fermiones (incluyendo las fases que contienen violación CP). Podemos tener aquí un camino abierto para futuras investigaciones con un origen común para la masa y la violación del CP.

Reflexiones finales

1. Amplía tus horizontes, libérate, sé un revolucionario despierto inspirándote en Albert Einstein:

"Un ser humano es una parte de un todo que llamamos Universo, una parte limitada en el tiempo y el espacio. Se experimenta a sí mismo, sus pensamientos y emociones como algo separado del resto, una especie de ilusión óptica"

de la conciencia. Esta ilusión es como una prisión para nosotros, que nos limita a nuestros deseos personales y a los afectos de unas pocas personas cercanas. Nuestra tarea debe ser liberarnos de esta prisión ampliando nuestro círculo de compasión a todas las criaturas vivas y a toda la naturaleza en toda su belleza”.

En este contexto, Einstein no sólo hizo sus inmensos descubrimientos en física, sino que también trabajó contra el racismo, las armas nucleares, ... y escribió artículos como "*¿Por qué el socialismo?*" (Monthly Review, NY, mayo de 1949)

<http://www.revsaludpublica.sld.cu/index.php/spu/article/view/717/596>

2. El carácter dialéctico de la física se ha hecho cada vez más evidente en el último siglo. John Wheeler (director de tesis de Richard Feynman) lo ilustró muy bien cuando resumió poéticamente la relatividad general: "*El espacio-tiempo le dice a la materia cómo moverse; la materia le dice al espacio-tiempo cómo doblarse*", a lo que Frank Wilczek añade este importante hecho: "*el espacio-tiempo es también una forma de materia*". Este es probablemente el marco en el que se desarrollará la física de las interacciones fundamentales en el siglo que viene.

3. "*La mecánica newtoniana planteaba la masa como una cualidad primaria de la materia, incapaz de ser dilucidada. Ahora vemos la masa newtoniana como una propiedad emergente. [...] Tanto Newton como Maxwell dedujeron que los componentes básicos de la materia fueron fabricados por Dios en el momento de la creación. La moderna teoría cuántica de campos abre la posibilidad de una explicación alternativa. [...] En lugar de tener que abordar la masa de cada objeto del universo por separado, podemos centrarnos*

en las propiedades de unos pocos campos cuánticos, cuyas excitaciones (quanta) son los bloques de construcción de la materia. Así, por ejemplo, si comprendemos las propiedades (incluida la masa) de un electrón, comprenderemos las propiedades de todos los electrones. En términos más generales: si comprendemos las propiedades de los campos asociados a los bloques de construcción de la materia, deberíamos ser capaces de deducir las propiedades -¡incluida la masa! - de la propia materia, y esas deducciones serán válidas universalmente." Frank Wilczek, "Origin of Mass", <https://arxiv.org/pdf/1206>.

4. ¿Una diferencia entre la física y la filosofía?

"Explicar toda la naturaleza es una tarea demasiado difícil para un solo hombre o incluso para una sola época. Es mucho mejor hacer un poco con certeza, y dejar el resto para otros que vengan después, que explicar todas las cosas por conjeturas sin asegurarse de nada." ("To explain all nature is too difficult a task for any one man or even for any one age. 'Tis much better to do a little with certainty, and leave the rest for others that come after you, than to explain all things by conjecture without making sure of anything."), Isaac Newton.

-