

A night sky filled with stars and a glowing aurora borealis over a mountain range. The aurora is a bright, horizontal band of light in shades of yellow and orange, stretching across the middle of the frame. The sky is dark blue with many small, bright stars. The mountains in the foreground are dark and silhouetted against the light of the aurora.

# **La crisis de la supersimetría: El ocaso de las teorías de cuerdas**

**Alfredo Macías**

**Departamento de Física, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa**

Durante los últimos 100 años, nuestra concepción del Universo ha cambiado drásticamente tanto a escalas cosmológicas como subatómicas. A escalas grandes hemos transitado de un Universo Newtoniano de edad desconocida poblado únicamente por las estrellas en nuestra Vía Láctea a un Universo gobernado por la Relatividad General conteniendo cientos de billones de galaxias, además de las correspondientes estrellas contenidas en cada galaxia.



Image credit: Richard Payne

La edad de este Universo es de 13.8 billones de años desde la ocurrencia del Big Bang, cuya parte observable tiene un diámetro de alrededor de 92 años

luz, y está llena de materia normal o bariónica, materia oscura y energía oscura.

A escalas microscópicas, la revolución ha sido igual de dramática: Hemos transitado de un Universo compuesto de núcleos atómicos, electrones y fotones, gobernado por las interacciones gravitacional y electromagnética, a un entendimiento mucho más fundamental de las partículas elementales y de las interacciones que hacen posible la existencia del Universo, es decir, la interacción nuclear fuerte, la interacción nuclear débil además de las interacciones gravitacional y electromagnética.

Los núcleos están formados por protones y neutrones, los cuales a su vez están formados por quarks y gluones. Existen dos tipos de interacciones nucleares, la fuerte y la débil y tres generaciones de partículas, tanto de leptones (electrones, muones, tauones y sus correspondientes neutrinos), como de quarks, hadrones fundamentales, (u = arriba, d = abajo, c = encanto, s = extraño, t = cima, b = fondo). Adicionalmente tenemos bosones de norma, los cuales son característicos de las simetrías asociadas a las interacciones, en particular a las vectoriales como la interacción nuclear fuerte, la interacción nuclear débil y la interacción electromagnética. Todo lo anterior junto con el bosón de Higgs constituyen el llamado Modelo Estándar de las partículas elementales. Las fuentes de las interacciones son los fermiones, los bosones transportan y propagan las interacciones en el espacio-tiempo y es el bosón de Higgs el que provee de masa a todas las partículas.

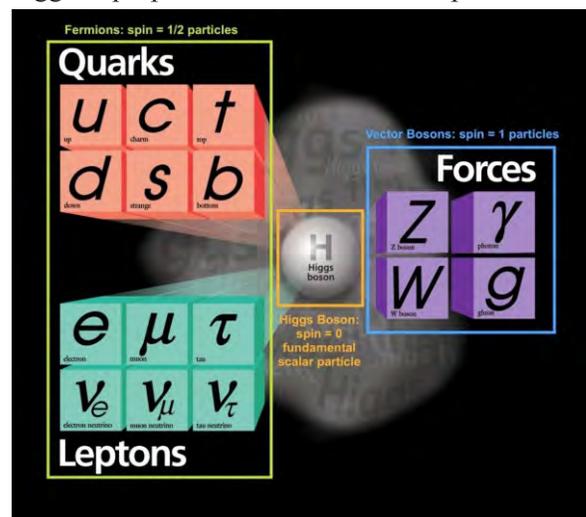


Image credit: Fermilab.

En principio, combinando el Modelo Estándar de las partículas elementales con el Modelo Estándar de la cosmología surgido de la Relatividad General, podríamos prácticamente explicar nuestro Universo físico real. Comenzando a partir de 10-10 segundos después del Big Bang, cuando el contenido del Universo era un poco más de materia que de antimateria. En principio, podríamos ahora explicar todos los fenómenos observados en nuestro Universo usando solamente las leyes de la física actualmente bien establecidas: Relatividad General y Mecánica Cuántica, entre otras.

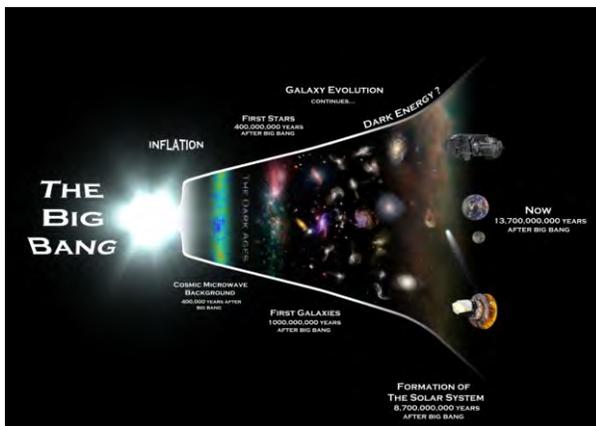


Image credit: Rhys Taylor, Cardiff University.

Podemos reproducir, mediante simulaciones, un Universo que es en todos los aspectos físicamente indistinguible del nuestro. Sin embargo, existen algunas preguntas fundamentales que actualmente todavía no podemos responder:

1. ¿Por qué existe más materia que antimateria?
- ¿De dónde proviene la asimetría?
2. ¿Cuál es la naturaleza de la energía oscura?
- ¿Qué tipo de campo/partícula es responsable de ella?
3. ¿Cuál es la naturaleza de la materia oscura?
- ¿Qué tipo de campo/partícula es responsable de ella?
4. Sabemos que a energías altas las interacciones débil y la electromagnética se unifican, y se manifiestan separadas cuando la simetría electrodébil se rompe a bajas energías. Eventualmente la fuerza fuerte también prácticamente podemos decir que casi se unifica con la electrodébil a energías todavía más altas. La pregunta es: ¿La interacción gravitatoria también se unificaría a energías aún mayores?
5. ¿Por qué las partículas elementales del Modelo Estándar tienen la masa que medimos? Este

problema se conoce como el problema de la jerarquía/estructura de la materia en Física.

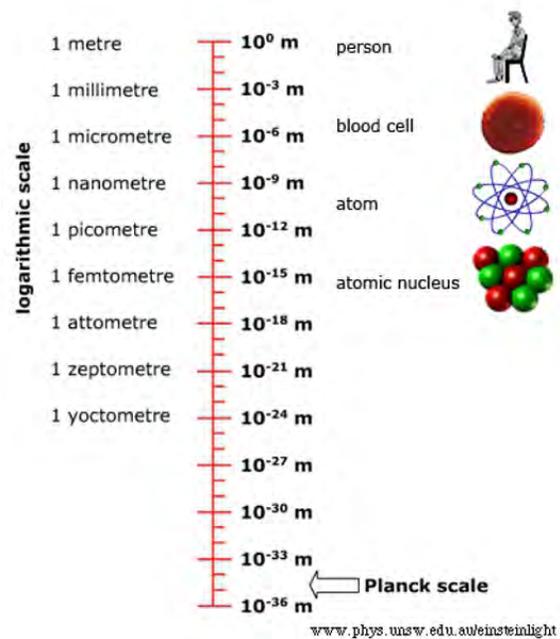


Image credit: © School of Physics UNSW.

Existen tres constantes fundamentales de la naturaleza: la constante de gravitación ( $G$ ), la constante de Planck ( $\hbar$ ), y la velocidad de la luz ( $c$ ). Podemos combinar estas constantes de diferentes maneras para generar unidades para el tiempo, la longitud y la masa, los cuales se conocen como las unidades de Planck: tiempo de Planck, longitud de Planck y masa de Planck.

Las masas de las partículas del Modelo Estándar son del orden de la masa de Planck, lo cual significa una energía de alrededor de  $10^{28}$  eV. Esto es una masa **17 órdenes de magnitud**, o un factor de 100,000,000,000,000,000 mayor que la partícula más pesada observada en el Universo. En particular el bosón de Higgs debe tener la masa de Planck y dado que se acopla con las otras partículas para dotarlas de masa, éstas adquieren *masas también del orden de la de Planck*.

Por tanto, ante la pregunta: ¿Por qué las partículas elementales tienen la masa que medimos y no otra masa mucho mayor? La mejor solución y la más elegante es proponer la existencia de una simetría extra, la cual cancela todas las contribuciones a nivel de la escala de Planck y preserva las masas de las

partículas durante el camino a energías mucho más bajas.

Esta es la idea básica detrás de la llamada supesimetría, conocida como SUSY, introducida en 1970 por Golfand and Likhtman en su modelo de electrodinámica cuántica y fueron Mikhail Shifman e independientemente Julius Wess quienes la formalizaron para teorías de Yang-Mills en 1974. La supersimetría es una simetría que mezcla bosones con fermiones, hace la predicción audaz de que debe de existir el mismo número de bosones que de fermiones en el Modelo Estándar de las partículas elementales, esto quiere decir, que cada partícula de éste (fermión y bosón} tiene un compañero supersimétrico, el cuál tiene propiedades casi idénticas excepto que tiene un espín que difiere por un valor de  $\pm\frac{1}{2}$  respecto a su contraparte en el Modelo Estándar.

Este compañero supersimétrico debería proteger la masa de todas las partículas, tanto las del Modelo Estándar y las de SUSY, todo el camino hasta la escala en donde la SUSY se rompe, en este punto los compañeros supersimétricos adquieren masas más pesadas que las masas normales. Si la SUSY se rompe, en la escala correcta para resolver el problema de la jerarquía, en algún lugar entre los 100 GeV y 1 TeV, entonces las partículas supersimétricas más ligeras deberían ser accesibles mediante el LHC (Large Hadron Collider) en el CERN de Ginebra en Suiza.

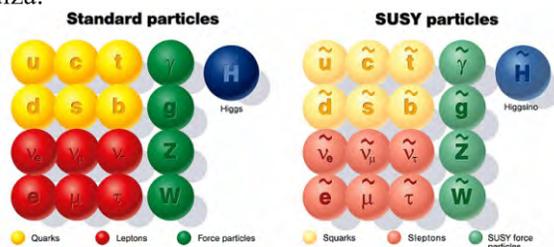


Image credit: DESY at Hamburg.

Adicionalmente, si consideramos todas las partículas del Modelo Estándar y estimamos la intensidad de las tres interacciones, las dos nucleares y la electromagnética, encontraremos que la intensidad de las interacciones, parametrizada por sus constantes de acoplamiento, cambia con la energía. Las intensidades casi se intersectan para una energía de alrededor  $10^{15}$  GeV. Si añadimos la supesimetría, la inclusión de las nuevas partículas

modifica la evolución de las constantes de acoplamiento. Si SUSY fuera correcta, podría indicarnos el lugar donde las interacciones nuclear fuerte, nuclear débil y electromagnética se unifican para muy altas energías.

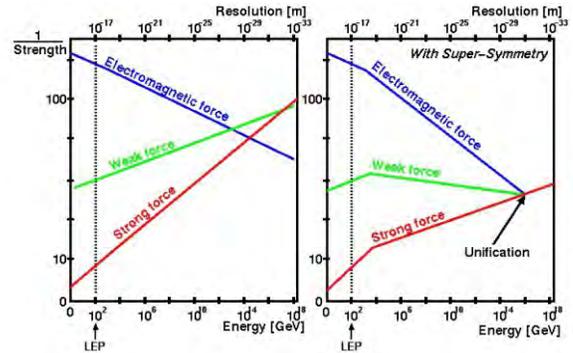


Image credit: CERN (European Organization for Nuclear Research), 2001. Via <http://edu.pyhajoki.fi/>.

Existen tres grandes problemas que podrían ser resueltos mediante la supesimetría:

1. Si realmente la supesimetría resuelve el problema de jerarquía, entonces deberían definitivamente ser descubiertas nuevas partículas supersimétricas en el LHC. De lo contrario habría que buscar otra solución al problema.

2. Si la partícula supesimétrica más ligera es realmente la materia oscura existente en el Universo, entonces los experimentos CDMS y XENON diseñados para detectarla ya deberían de haberla detectado. El estatus de no detección proveniente de estos experimentos enciende focos rojos en contra de la afirmación original de que el neutralino es realmente la materia oscura. Afortunadamente la SUSY no es el único caballo en la carrera, es decir existen muchos más candidatos alternativos para ser la materia oscura.

3. La interacción nuclear fuerte podría no unificarse completamente con las otras dos interacciones. Sin embargo la SUSY evita este problema.

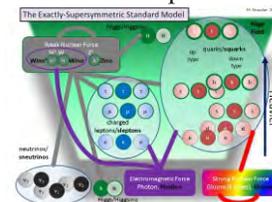


Image credit: Matt Strassler of <http://profmattstrassler.com/>.

Los grandes problemas de la SUSY no son teóricos *sino experimentales*. No se tiene hasta ahora ninguna evidencia experimental de que sea correcta. La búsqueda experimental de las partículas supersimétricas ha resultado infructuosa, incluso en el LHC en su primera corrida.

Esta solo reconfirma el Modelo Estándar con más precisión que antes. Este hecho deja a la SUSY como una teoría de promesas potenciales infinitas cuya realidad es hoy altamente cuestionable. Al parecer, la naturaleza no gusta de SUSY, al menos en su forma original.

Hasta ahora no se ha detectado en el LHC, operado por el CERN, ningún indicio de nueva física más allá del Modelo Estándar, más aún, la última ronda de los experimentos de aplastamiento de protones (protons-smashing) descartan una gran cantidad de modelos supersimétricos, los modelos mejor estudiados durante casi 50 años de la SUSY.

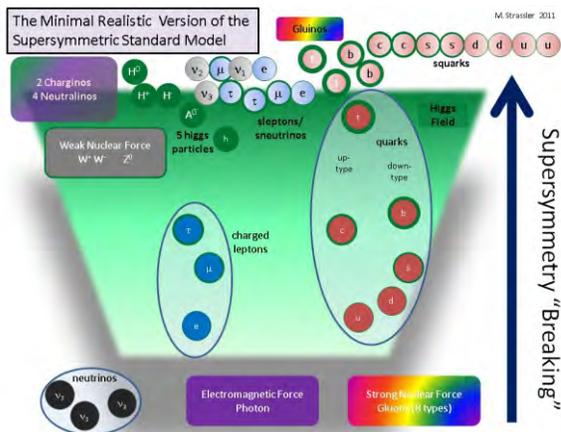


Image credit: Matt Strassler of <http://profmattstrassler.com/>.

Los resultados negativos han comenzado a producir, si bien no una crisis a gran escala en la física de partículas, si un pánico extendido. A principios de 2015 comenzará la segunda corrida del LHC, alcanzando su funcionamiento a las más altas energías para las que fue diseñado el acelerador permitiendo que los experimentos ATLAS y CMS detecten o descarten la existencia de otros compañeros supersimétricos mucho más masivos. Existen algunas versiones adicionales de la SUSY, las cuales son un poco más complejas que la simple versión de masa-energía ya descartada por el LHC, de manera que diferentes sabores de la SUSY podrían todavía ser realistas.

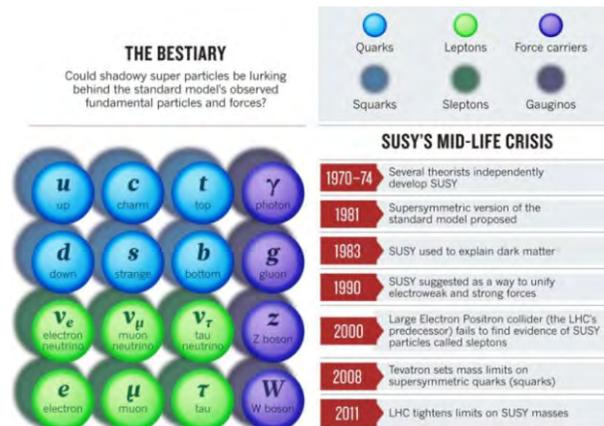


Image credit: Geoff Brumfiel from Nature.

Si al final de la segunda corrida nada nuevo aparece las teorías de cuerdas se encontrarán en una encrucijada mortal e insalvable. Actualmente se encuentran en suspenso deseando que los resultados del LHC no destruyan la mítica catedral de la física teórica estudiada ya por más de 50 años.

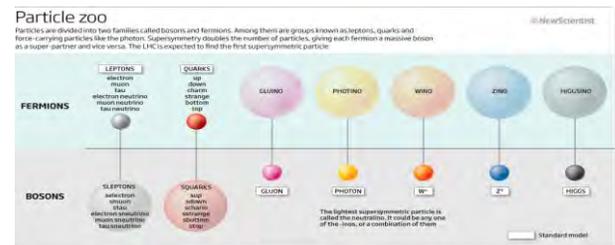
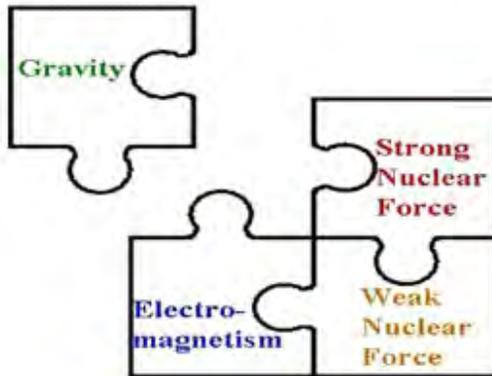


Image credit: © New Scientist.

Podría resultar que simplemente la SUSY es incorrecta y que los físicos precisan de desarrollar nuevas ideas trascendentales.

Resultó muy seductora y revolucionaria la idea propuesta con las teorías de cuerdas sobre objetos fundamentales extendidos uni-dimensionales, en lugar de puntuales, cuyos modos normales de oscilación corresponden a las partículas elementales conocidas, potencialmente capaces de unificar todas las interacciones conocidas de la naturaleza incluida la gravedad, la interacción más antigua conocida y la menos entendida a nivel microscópico, mediante la introducción de las llamadas **supersimetrías** y de las **dimensiones adicionales**, no detectables *experimental/observacionalmente*, del espacio-tiempo. Sin embargo, después de varias décadas, y ante la falta de *fenomenología* que las sustente, las teorías de cuerdas han pasado actualmente de ser *la teoría de todo*, como se propuso originalmente, a ser

tan solo una teoría cuántica de campo alternativa, diferente a la estándar cuyo principal problema era la existencia de  $10^{500}$  diferentes y disjuntas maneras de proyectar sus predicciones a nuestro mundo físico real de 4 dimensiones.

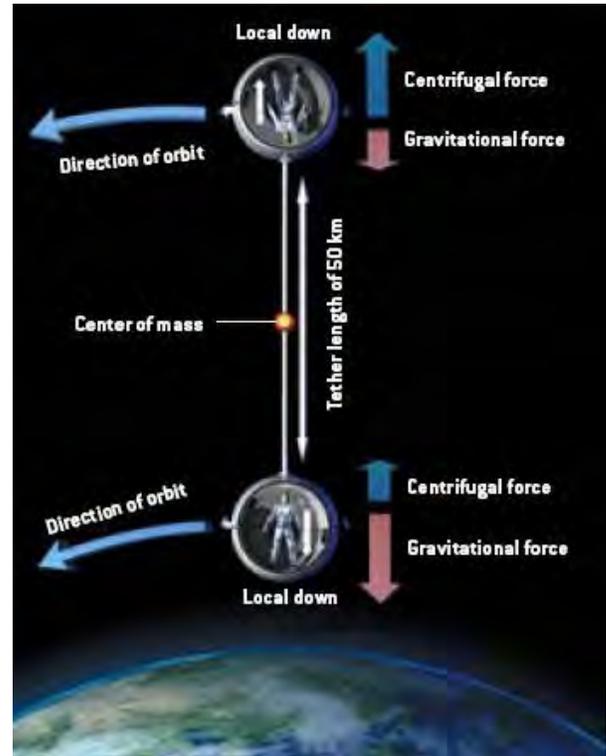


El problema de encontrar una teoría de unificación de las cuatro interacciones conocidas de la naturaleza, que por tanto incluya una teoría cuántica de la gravedad ha sido estudiado por más de 70 años asumiendo que los experimentos no proporcionan ninguna guía al respecto. Esto ha llevado a suponer que la manera de resolver el problema sería la construcción y análisis de teorías muy ambiciosas, de unificación de las interacciones, capaces de resolver todas las controversias surgidas de la posible coexistencia de la relatividad general con la mecánica cuántica.

Desafortunadamente, en el caso de la investigación en teorías multidimensionales de unificación incluyendo gravedad cuántica, dada la falta de una guía *fenomenológica/experimental*, los físicos teóricos han sido seducidos por la tentación de identificar el marco teórico supuestamente correcto basándose solamente en criterios de *origen conceptual y matemático*.

Sin embargo, en otras áreas de investigación, la disponibilidad de datos experimentales que cuestionan a las teorías existentes motiva a los teóricos a proponer modelos fenomenológicos que resuelvan las paradojas experimentales, aún cuando algunos aspectos del modelo no sean completamente satisfactorios desde una perspectiva conceptual. Usualmente, estos modelos, aparentemente no

satisfactorios, nos proveen de un importante punto de partida para la identificación de la descripción teórica correcta y conceptualmente satisfactoria del nuevo fenómeno.



Aún la teoría más consistente matemáticamente y conceptualmente satisfactoria no puede ser aceptada y adoptada sin una contundente confirmación experimental/observacional. Por tanto, resulta obligatoria la búsqueda de la fenomenología de la gravedad cuántica.

A final de cuentas cualquier teoría física y la física misma deben estar necesariamente relacionadas con los *experimentos/observaciones* para no ser consideradas solamente como *metafísica*.

#### Lecturas Adicionales

[1] Joseph Lykken and Maria Spiropulu: *Supersymmetry and the crisis in Physics*. Scientific American, Mayo 2014, 34.

[2] Gordon Kane: *The down of Physics beyond the Standard Model*. Scientific American, Junio 2003, 68.

[3] Michael Krämer: *Searching for supersymmetry*:

*some frustration but no despair.* Life & Physics, Science, The Guardian. 14 Marzo 2013.

[4] Sebastian Anthony: *Searching for supersymmetry: Work begins on Large Hadron Collider's 60-mile-long successor.* ExtremeTech Newsletter. Febrero 20, 2014

[5] S Natalie Wolchover and Quanta Magazine: *Supersymmetry Fails Test, Forcing Physics to Seek New Ideas.* Scientific American. Nov 29, 2012. [Supersymmetry Fails Test, Forcing Physics to Seek New Ideas - Scientific American.htm](#)

[6] Matt Strassler: *Where Stands Supersymmetry (as of 12/2013).* Of Particular Significance. Conversations About Science with Theoretical Physicist Matt Strassler. [Where Stands Supersymmetry \(as of 12\\_2013\) \\_ Of Particular Significance.htm.](#)