

Supercuerdas: Teoría de Unificación

Barton Zwiebach

Center for Theoretical Physics, Massachusetts Institute of Technology

E-mail: zwiebach@lns.mit.edu

Recibido el 01 de setiembre del 2005, aceptado el 19 de setiembre del 2005

Por los últimos veinte años los físicos hemos investigado intensamente la interesante y compleja Teoría de las Supercuerdas. A pesar de mucho progreso, aspectos fundamentales de la teoría siguen siendo misteriosos. Cuando fueron descubiertas en los últimos años de la década de 1960, las Supercuerdas pretendían explicar los hadrones. Pero la teoría de Cromodinámica cuántica – una teoría de quarks y gluones – tuvo mayor éxito, y las cuerdas, a pesar de su promesa inicial, fueron abandonadas. En este momento, la teoría de las supercuerdas es único candidato para una teoría de todas las interacciones – una teoría unificada de fuerzas y materia. La complicación que frustró la búsqueda de una teoría unificada fue la incompatibilidad entre dos de los pilares más importantes de la física del siglo XX: La teoría General de Relatividad de Einstein, y los principios de la Mecánica Cuántica.

Palabras claves: Supercuerdas, quarks, D -branas, cuerdas cósmicas, dimensiones extras.

For the last twenty years, physicists have investigated the interesting and complex Superstring Theory rather vigorously. Despite much progress, fundamental aspects of the theory remain mysterious. When it was discovered in the last years of the 1960's, the Superstring tried to explain hadrons. But the theory of Quantum Chromodynamics – a theory of quarks and gluons – was more successful, and strings, despite their initial promise, were abandoned. At present, superstring theory is the only candidate for a theory of all interactions – a unified theory of all forces and matter. The difficulty that originated the search for a unified theory was the incompatibility between the two pillars of twentieth century physics: Einstein's General Theory of Relativity and the principles of Quantum Mechanics.

Keywords: Superstring, quarks, D -branes, cosmic strings, extra dimensions.

1. Introducción

La teoría de las supercuerdas parece ser la muy buscada teoría cuántica de la gravitación y de las demás interacciones. El trabajo intenso de las últimas décadas ha demostrado que la teoría de supercuerdas puede incorporar muchas de las propiedades físicas del universo. Es posible que en un futuro cercano la teoría de cuerdas sea comprobada experimentalmente. Por el momento, es una teoría no verificada.

Una de las propiedades más interesantes de las cuerdas es la aparición de la gravedad como un modo de vibración de la cuerda cerrada.

Uno examina una cuerda, parecida a las cuerdas con tensión y con masa que uno estudia como bachiller de física. Esta cuerda, sin embargo, es relativista, lo que significa que la mecánica clásica de esta cuerda es consistente con la Teoría Especial de la Relatividad de Einstein. Una cuerda relativista es un objeto sutil y tiene un rico espectro de vibraciones. Estas vibraciones clásicas, sin embargo, no se pueden identificar con partículas elementales.

La teoría cuántica viene al rescate: el análisis cuántico de la cuerda relativista da modos de vibración que si pueden ser identificados con partículas elementales. Cierta modo cuántico de vibración de la cuerda cerrada describe el gravitón, la partícula que transmite la fuerza de gravedad. Cierta modo cuántico de vibración de la cuerda abierta describe el foton, la partícula de la luz, que transmite la fuerza electromagnética. Es la *magia* de la cuantización que hace posible estos resultados. En la teoría de cuerdas todas las partículas aparecen como vibraciones cuánticas de la cuerda relativista.

2. Sorpresas con cuerdas Relativistas

Las cuerdas no relativistas se caracterizan por dos parámetros independientes: La tensión T_0 y la masa por unidad de longitud μ_0 . En la cuerda relativista, solo existe la tensión – la masa por unidad de longitud es igual a la tensión dividida por la velocidad de la luz al cuadrado:

$$\mu_0 = \frac{T_0}{c^2} \quad (1)$$

donde c es la velocidad de la luz. La cuerda relativista *no tiene masa intrínseca*.

Una cuerda abierta moviéndose libremente tiene a sus extremos moviéndose con la velocidad de la luz.

Las cuerdas tienen una orientación: en el caso de una cuerda abierta, los extremos de la cuerda llevan carga eléctrica

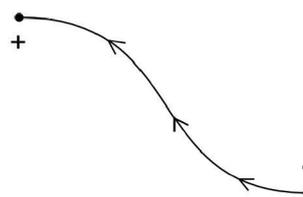


Figura 1. Cuerda abierta.

La cuerda relativista solo tiene vibraciones transversales – no existen vibraciones longitudinales – demostrando la ausencia de subestructura en la cuerda.

El análisis cuántico revela sorpresas adicionales:

1. La dimensión del espacio-tiempo esta determinada por la teoría. 26 dimensiones para cuerdas bosónicas (25 espaciales, 1 temporal) y 10 dimensiones (9 espaciales, 1 temporal) para supercuerdas.

- Los estados de oscilación son discretos y se pueden identificar con partículas cuyas masas están cuantizadas.
- Por circunstancias fortuitas aparecen oscilaciones que corresponden a partículas de masa cero:

Gravitón, de cuerdas cerradas 

Fotón, de cuerdas abiertas 

3. Ingredientes del Modelo Standard

Conocemos cuatro fuerzas en la naturaleza. El Modelo Standard describe tres de ellas: la fuerza electromagnética, la fuerza débil, y la fuerza fuerte. El Modelo Standard no describe la fuerza gravitatoria. El Modelo Standard también describe todas las partículas elementales que conocemos.

La fuerza electromagnética es transmitida por los fotones γ . La fuerza débil es responsable por la radiación beta en la cual el neutrón se convierte en un protón, un electrón y un anti-neutrino. Esta fuerza es transmitida por tres bosones:

$$W^+, W^-, Z^0 \quad (2)$$

La fuerza electromagnética y la fuerza débil (con 4 bosones transmisores en total) fueron unificadas en la Teoría *Electro-débil* (*electroweak*) de Weinberg y Salam.

La fuerza fuerte es transmitida por 8 gluones. Estos gluones mantienen a los quarks dentro del protón, el neutrón, y otras partículas sub-nucleares. En resumen tenemos:

- 4 electroweak bosones.
- 8 gluones.
- En total: 12 *portadores de fuerzas*.

Las partículas de materia son todas fermiones y son de dos tipos distintos: *leptones* y *quarks*. El electrón, por ejemplo es un leptón. El positrón es la anti-partícula del electrón, y es también un leptón. La colección de leptones es descrita usando tres grupos de dos leptones cada uno

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix} \quad (3)$$

Incluyendo las anti-partículas tenemos un total de 12 *leptones*.

Los quarks vienen en 6 tipos, *flavors* (o sabores, hablando poéticamente). Ellos son: up (u), down (d), charm (c), strange (s), top (t) y bottom (b). También organizamos los quarks en tres grupos de dos

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix} \quad (4)$$

Cada uno de los quarks en esta lista viene en 3 colores (otro nombre poético) *rojo*, *azul*, y *verde*. Multiplicando,

$3 \times 6 = 18$, y contando las antipartículas tenemos un total de 36 quarks. Con 12 leptones y 36 quarks, el número total de partículas de materia son 48. Si agregamos las 12 partículas transmisoras de fuerzas, obtenemos un total de 60 *partículas* elementales en el Modelo Standard.

A pesar que las partículas de materia y algunos de los bosones tienen masas, estas masas son, en cierto aspecto, muy pequeñas.

Las partículas se pueden encontrar en dos estados: izquierdo (left-handed) y derecho (right-handed). La componente izquierda del electrón se denota por e_L^- y la componente derecha del electrón se denota por e_R^- . Las interacciones *electro-débiles* son *quirales* porque las componentes izquierda y derecha no responden en la misma manera a las fuerzas: existe una asimetría fundamental. Consideremos el electrón y el neutrino, por ejemplo:

$$\begin{pmatrix} \nu_{eL} \\ e_L^- \end{pmatrix} \quad e_R^-, \nu_{eR} \quad (5)$$

Los estados izquierdos del doblete sienten las fuerzas electro-débiles, pero los estados derechos del electrón y el neutrino no sienten esta fuerza. Una situación similar se da con los quarks

$$\begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix} \quad u_R, d_R \quad (6)$$

4. D-branas y el Modelo Standard

D -branas son objetos extendidos en la teoría de cuerdas. Cada vez que tenemos cuerdas abiertas, tenemos D -branas, pues los extremos de las cuerdas abiertas deben estar localizados en las branas. Las branas vienen en varias dimensiones diferentes. La Dp -brana es una brana con p dimensiones espaciales. Por lo tanto una $D2$ -brana, se puede ver como una hoja de papel, y una $D1$ -brana se ve como una cuerda. En un espacio-tiempo de 4 dimensiones, una $D3$ -brana puede llenar las tres dimensiones espaciales.

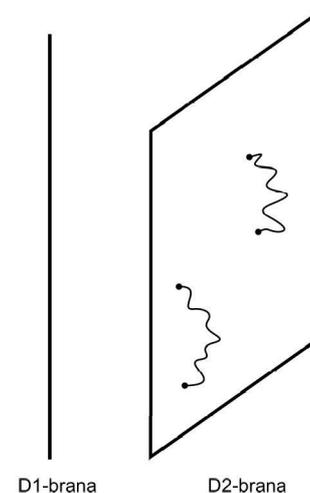


Figura 2. La $D1$ -brana se ve como una cuerda y la $D2$ -brana como una hoja de papel.

Como los extremos de una cuerda están cargados eléctricamente, para representar una partícula cargada

necesitamos tener una cuerda con un extremo en la brana (donde vivimos). El otro extremo debe estar en otra brana sino, la cuerda representa 2 partículas con cargas opuestas. Los fotones viven en la brana y aparecen a partir de cuerdas cuyos dos extremos están en la brana (tienen una carga total igual a cero).

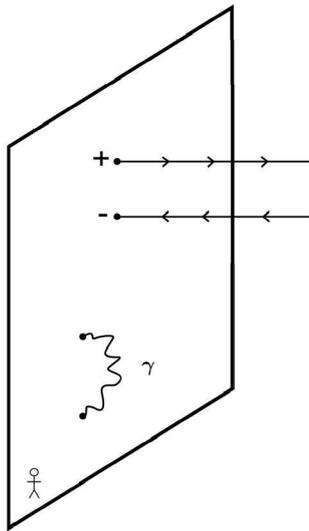


Figura 3. Las cuerdas con un extremo en la brana son partículas cargadas y cuando ambos extremos se encuentran en la brana su carga total es cero.

¿Como podemos obtener los quarks usando branas y cuerdas?. Recordemos que cada sabor de quark viene en tres colores. Como *color* es simplemente el nombre de un tipo de carga, para obtener tres tipos de colores usamos 3 *D*-branas: las llamamos roja, azul y verde. Una cuerda que termina en la brana verde representa un quark verde, etc. Las cuerdas que comienzan en las branas son antiquarks. Finalmente, los gluones (que transmiten la fuerza fuerte) aparecen como cuerdas que comienzan y terminan en las branas de color. Con 3 branas de color, hay $3 \times 3 = 9$ cuerdas de este tipo. 8 de estas 9 cuerdas son los gluones.

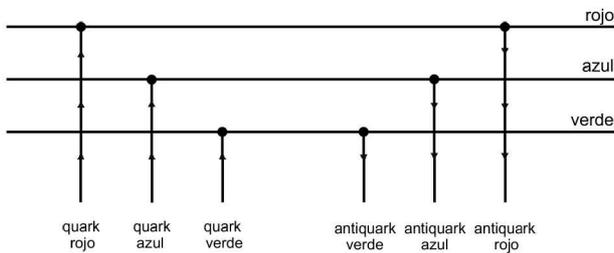


Figura 4. Los quarks son cuerdas abiertas que terminan en branas. Los antiquarks comienzan en las branas.

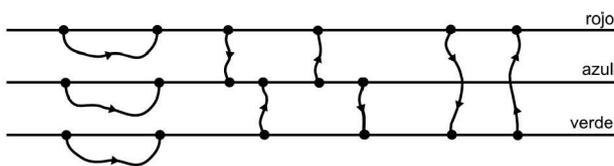


Figura 5. Los gluones son cuerdas que empiezan y terminan en las branas.

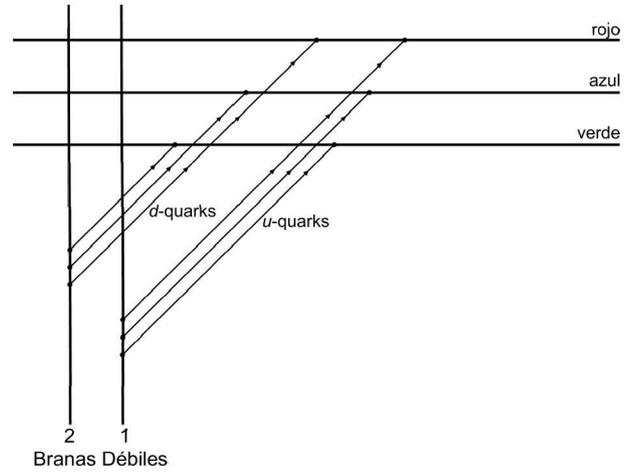


Figura 6. Los quarks izquierdos son cuerdas que se extienden desde las branas débiles hasta las branas de color.

Un quark es una cuerda abierta con un extremo en una brana de color. ¿Donde esta el otro extremo? Consideramos la interacción electro-débil. Para ella necesitamos 2 branas adicionales, las cuales dan los 4 bosones intermedios como cuerdas que se extienden entre estas dos branas. Las dos branas débiles se intersectan con las branas de color. Consideremos ahora los dos sabores *u* y *d* de los quarks izquierdos. Como estos quarks sienten las interacciones débiles, deben tener un extremo en las branas débiles. Con dos branas débiles todo funciona.

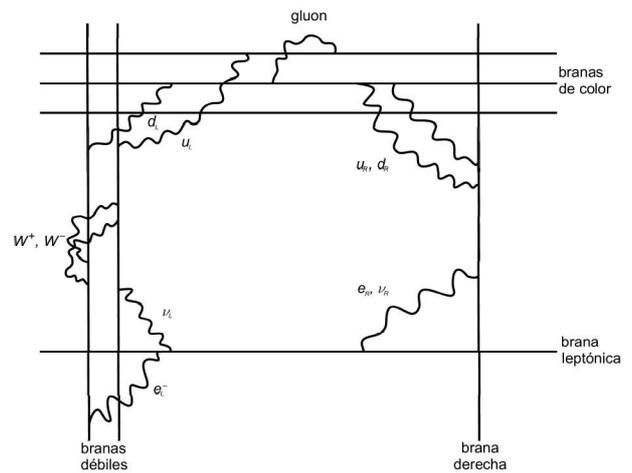


Figura 7. Configuración de las branas de color, débiles, leptónicas y derecha

Las cuerdas que representan a los quarks izquierdos se extienden desde un tipo de brana (débil) a otro tipo de brana (color). La tensión de las cuerdas les obliga a tener la menor longitud posible: cero. ¿Como obtenemos los quarks derechos u_R, d_R ? Como estas partículas sienten la fuerza fuerte aparecen como cuerdas que tienen un extremo en las branas de color. Como no sienten la fuerza electro-débil, no pueden tener el otro extremo en las branas débiles, y por lo tanto necesitamos nuevas branas. Las branas *derechas* deben intersectar a

las branas de color, para obtener partículas de masa cero. ¿Cómo obtenemos el doblete de leptones izquierdos?

$$\begin{pmatrix} \nu_{eL} \\ e_L^- \end{pmatrix} \quad (7)$$

Dado que estas partículas sienten la fuerza débil, emergen como cuerdas que tienen un extremo en las branas débiles. Como no sienten la fuerza del color, el otro extremo tiene que estar en nuevas branas: branas leptónicas. Finalmente, los leptones derechos e_R^- y ν_{eR} no sienten fuerzas débiles ni fuerzas de color. Estas partículas aparecen en la intersección de las branas leptónicas y las branas *derechas*.

Hemos mostrado las partículas que forman una familia del Modelo Standard (Ibáñez, Cremades y Marchesano, 2001, 2002). **Finalmente:** ¿Cómo se incorpora la configuración de branas que hemos discutido en la teoría de 10 dimensiones? Como necesitamos un espacio de 4 dimensiones, 6 dimensiones espaciales deben formar un espacio compacto de volumen pequeño. Para visualizar la configuración asumimos que dos de las 6 dimensiones forman un toro bi-dimensional. Las branas que usamos son *D4*-branas y tres de sus cuatro dimensiones llenan nuestro espacio tri-dimensional. La última dirección en las branas aparece como líneas en el toro. Por lo tanto las figuras mostradas anteriormente son las figuras de como se ven las branas en el toro.

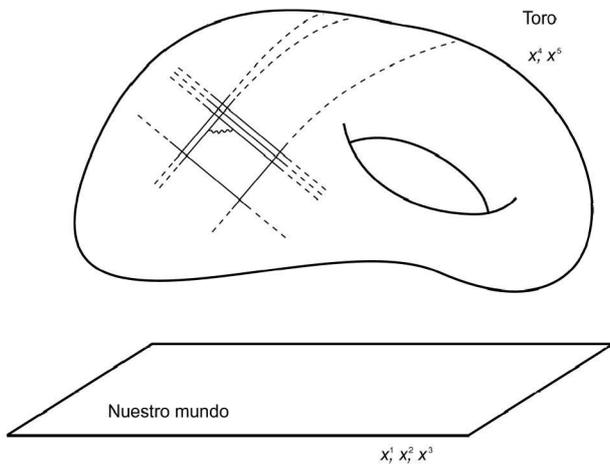


Figura 8. Tres de las cuatro dimensiones de una *D4*-brana se encuentran en el espacio ordinario tridimensional y la otra dimensión esta sobre el toro.

5. ¿Cuerdas Cósmicas?

Una posibilidad fascinante es que cuerdas se puedan observar directamente en el universo con grandes telescopios: estas serian cuerdas cósmicas.

Una cuerda cósmica es un filamento de energía que se extiende a lo largo de gran parte del universo. La cuerda cósmica crea una distorsión del espacio: el espacio se vuelve cónico, con un ángulo de defecto dado por:

$$\Delta = \frac{8\pi G T_0}{c^4} = \frac{8\pi G \mu}{c^2} \quad (8)$$

donde G es la constante gravitatoria de Newton.

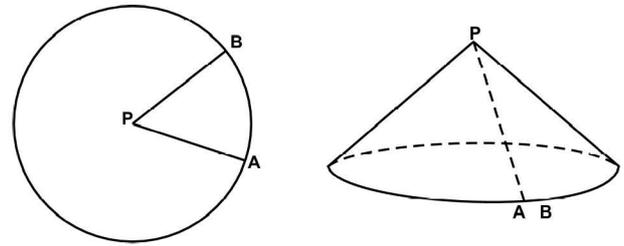


Figura 9. Sección cónica.

Una cuerda cósmica produce un lente gravitatorio en el cual las dos imágenes son idénticas.

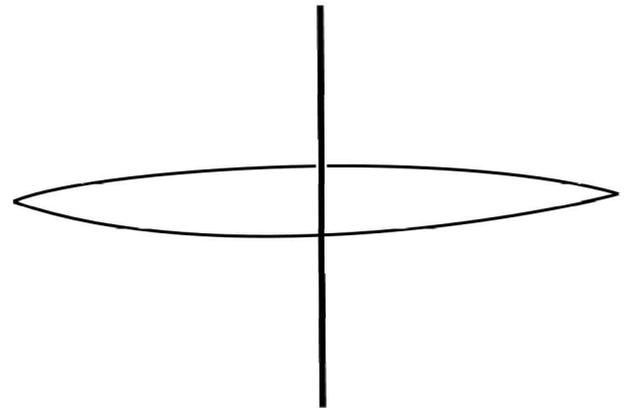


Figura 10. Lente gravitatorio.

En la teoría de cuerdas, las cuerdas cósmicas se pueden formar si al final de la época inflacionaria hay un proceso de aniquilación de branas y antibranas. Kibble demostró hace muchos años que el asociado rompimiento de simetrías da lugar a cuerdas. Las cuerdas cósmicas son grandes radiadores de ondas gravitacionales: sus efectos hubieran sido descubiertos como irregularidades en el *millisecond* pulsar a menos que

$$\frac{G\mu}{c^2} < 10^{-7} \quad (9)$$

Asimismo, fluctuaciones en el fondo de la microonda (Microwave Background) nos indican que este límite debe ser observado. Este límite corresponde a una desviación angular de aproximadamente 2 segundos de arco.

$$\frac{G\mu}{c^2} = \frac{M_s}{M_p} \quad (10)$$

donde M_p es la masa de Plank y M_s es la masa de la cuerda. Para obtener el limite observacional se necesita que $M_s \ll M_p$. Cuerdas cerradas oscilan y durante su período de oscilación forman *cúspides* instantáneas que se mueven con la velocidad de la luz – produciendo una gran fuente de ondas gravitacionales.

6. ¿Dimensiones extras grandes?

Es una predicción general de la teoría de las supercuerdas que existen dimensiones adicionales a las cuatro (espacio/tiempo) con las cuales estamos acostumbrados. La pregunta importante es:

¿Cual es el tamaño de estas dimensiones?

Inicialmente, se pensó que estas dimensiones tendrían que ser del tamaño de la longitud de Planck $\sim 10^{-33}$ cm. Esto es mucho menor que la distancia de 10^{-16} cm. que ha sido estudiada hoy en día con los aceleradores de partículas más poderosos.

Con dimensiones adicionales hay una relación matemática entre la distancia de Planck en la teoría completa (en altas dimensiones), la distancia de Planck en la teoría en cuatro dimensiones, y el tamaño de las dimensiones extras.

Por ejemplo, en un mundo de 6 dimensiones en total, con distancia de Planck de 10^{-18} cm., la distancia de Planck en 4 dimensiones será la correcta (10^{-33} cm.) si el tamaño de las dimensiones adicionales es

$$L = 0,01\text{mm}. \quad (11)$$

Si vivimos en branas, en las cuales todos los campos de materia están localizados, la única manera de detectar las dimensiones adicionales es a través de experimentos gravitacionales. Si hay dos dimensiones extras, por ejemplo, la ley de atracción universal se modifica de $1/r^2$ a $1/r^4$, a distancias pequeñas.

Experimentos realizados en los últimos años (Chiverini, et.al. 2003, Hoyle 2003, Long and Price, 2003) han demostrado que no hay dimensiones extras de un tamaño de 0,1mm. (pero si pueden haber menores).

7. La vista al futuro

Nos podemos preguntar cuales son los posibles resultados en la búsqueda exhaustiva de un modelo realista de cuerdas. Un posible resultado (el peor) es que no hay

modelo de cuerdas que reproduce totalmente el Modelo Standard. Esto demostraría que la teoría de las supercuerdas no es correcta. Otro posible resultado (el mejor) es que un modelo único reproduce el Modelo Standard. Más aun, este modelo representa un punto aislado en el espacio de todos los modelos posibles. Si tal es el caso, los parámetros del Modelo Standard son explicados.

El número de modelos de cuerdas es tan grande que una posibilidad extraña emerge: muchos modelos con propiedades casi idénticas, todos los cuales son consistentes con el Modelo Standard en la precisión con la cual se conoce actualmente. Si esto ocurre hay cierta pérdida de predictabilidad.

Nuevos descubrimientos experimentales nos ayudaran a determinar si las supercuerdas describen nuestro universo. El reciente descubrimiento de una constante cosmológica positiva ha tenido gran influencia en las investigaciones de supercuerdas. El descubrimiento de supersimetría (quizás en CERN, 2008) sería alentador, pues supersimetría es prácticamente universal en la teoría de las supercuerdas.

Lo mas probable es que tendremos que entender la teoría de las supercuerdas mucho mejor para poder decidir si describe nuestro universo. La teoría de supercuerdas es todavía una teoría incompleta. Mucho se sabe sobre ella, pero no existe una formulación completa de la teoría (no tenemos ecuaciones generales). La base conceptual de la teoría aun sigue siendo misteriosa (¿Que pasa con el espacio-tiempo de Einstein? ¿El principio de equivalencia? ¿La función de onda del universo?). La teoría de las supercuerdas es un área de investigación intensa e interesante porque las ideas fundamentales todavía no han sido descubiertas.

1. B. Zwiebach, *A First Course in String Theory*, Cambridge university Press, UK, 2004.
2. Cremades, D., Ibanez, L.E. y Marchesano, F. *More about*

the Standard Model at Intersecting Brane. ArXiv:hep-ph/0212048.