

**Investigador:**

**Daniel E. LOPEZ-Fogliani**  
daniel.lopez@df.uba.ar

**Becario:**

**Andres D. PEREZ**  
andres.perez@df.uba.ar

**Las constantes Fundamentales,**

**h**, constante de Planck,  $h = \frac{h}{2\pi} = 1.055 \times 10^{-34} \text{ J s}$ , nos permite definir un "cuanto de acción" (la acción es el ente matemático que contiene toda la información física del sistema).  
**c**, velocidad de la luz,  $c = 2.988 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ , nos permite formar con el tiempo y el espacio un único ente matemático; el espacio-tiempo.  
**G**, constante de gravitación de Newton,  $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ Kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ , nos permite relacionar la métrica espacio-temporal con el campo que define el tensor de energía-momento.

**Introducen la escala de Planck (masa, longitud, y tiempo):**

$$M_{\text{Planck}} c^2 = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G}} = 1.22 \times 10^{-19} \text{ GeV} = 2.17 \times 10^{-2} \text{ mg } c^2 \quad l_{\text{Planck}} = \frac{\hbar}{M_{\text{Planck}} c} \approx 1.6 \times 10^{-33} \text{ cm} \quad t_{\text{Planck}} = \frac{l_{\text{Planck}}}{c} \approx 5 \times 10^{-44} \text{ s}$$

**Esperamos profundos cambios en la noción de espacio-tiempo a la escala de Planck. En nuestro tiempo nos resulta experimentalmente inaccesible (área de interés teórico, muy probablemente no haya una única extensión posible).**

**Trabajamos con teoría de campos, podemos pensar que las interacciones ocurren en un punto, podemos describir toda la física experimentalmente accesible:** (unidades naturales  $\hbar = c = 1$ ,  $M_P = \frac{1}{\sqrt{8\pi G}} = \frac{1}{\sqrt{8\pi}} M_{\text{Planck}}$ )

- i- Clásica: En el régimen de distancias (curvaturas) mucho mayores (menores) que la longitud de Planck (cuadrado). La distribución de energía nos fija la métrica del espacio-tiempo.
- ii- Cuántica: Las excitaciones de los campos son las partículas, la gravedad la tratamos como clásica. Objetos fundamentales, pero la energía involucrada en las interacciones es mucho menor que la energía de Planck.

**El modelo estándar** es el modelo más simple que describe las partículas conocidas, pero posee problemas. Hay cuestiones con consecuencias fenomenológicas que permanecen abiertas:

- **Problema de las jerarquías:** La interpretación del modelo estándar de las partículas fundamentales como válido hasta la escala de Planck tiene problemas. La masa del Higgs por correcciones radiativas tendería a ser de la escala de Planck, mucho mayor que la masa observada.
- **Los neutrinos no poseen masa en el modelo estándar de las partículas fundamentales:** El modelo estándar debe ser extendido.
- **Materia Oscura:** Evidencia gravitatoria de su existencia. En el modelo estándar de las partículas fundamentales no hay candidato.

**Supersimetría** (Incluyendo la gravedad tenemos supergravedad):

- i) Relaciona bosones y fermiones
- ii) Permite interpretar la validez de la versión supersimétrica del modelo estándar hasta la escala de Planck. Efectos gravitatorios suprimidos por potencias de la escala de Planck. **Soluciona el problema de las jerarquías del modelo estándar.** Las masas de los bosones (el Higgs) no sufren correcciones proporcionales a la escala de Planck.
- iii) Permite una mejor descripción de la física de **neutrinos**.
- iv) Permite describir la **materia oscura** simplemente utilizando las compañeras supersimétricas de las partículas que sabemos que existen.
- v) La supersimetría se rompe espontáneamente en sector oculto comunicada al sector visible. Las partículas que conocemos y sus compañeras poseen una masa distinta.

**MSSM** (y extensiones que conservan R-parity, como el NMSSM): Extensión mínima del modelo estándar, se la conoce como MSSM por sus siglas en Ingles. Es necesario agregar más Higgses y doblar el número de partículas.

**Problemas del MSSM:**

- 1) Al igual que el modelo estándar posee **neutrinos de masa cero** incompatible con experimentos desde 1998 (super-kamiokande).
- 2) En principio la supersimetría permitiría tener los términos de ruptura de supersimetría como la única escala y fuente de la ruptura gauge. En el MSSM esto no es viable y sus predicciones estarían ya excluidas. Esto se lo conoce como **problema-μ**.

**"μ-from-ν Supersymmetric Standard Model" (y violación de R-parity) Soluciona los dos problemas anteriores simplemente agregando neutrinos dextrógiros:**

- Se reproducen los ángulos y diferencias de masas experimentalmente observados incluso utilizando Yukawas diagonales en el sector de neutrinos, *dando respuesta a la pregunta ¿Por qué son tan distintas las mezclas de los quarks (CKM) y los neutrinos (MNS)?*.
- Se puede tener los términos de ruptura de supersimetría como única escala de energía y como fuente de ruptura espontánea de simetría gauge (NO hay problema-μ).
- El Higgs puede interpretarse como el compañero bosónico de una cuarta familia de leptones vector-like. Y otras interpretaciones interesantes.

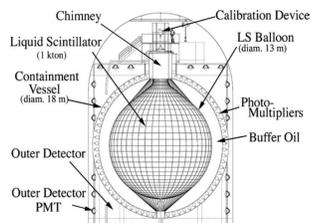
## Física de Neutrino

Muchos esfuerzos se han dedicado y se dedican para desarrollar experimentos capaces de desentrañar los detalles de la física de neutrinos.

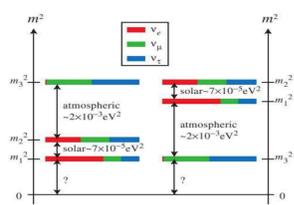
Ejemplos:

"Minos": Mina de Soudam (atmosfericos y solares)

"KamLand" (reactores)



Dos diferencias de masas y los ángulos de mezcla se conocen con mucha precisión, al igual que una cota sobre las sumas de las tres masas. En forma esquemática tenemos:



La matriz de masas más sencilla para describir los neutrinos es la de "see-saw"

$$M_n = \begin{pmatrix} M & m \\ m^T & 0_{3 \times 3} \end{pmatrix},$$

**Física de Neutrinos en el "μ-from-ν Supersymmetric Standard Model":**

En este modelo reproducir los ángulos y diferencias de masas observadas experimentalmente es muy sencillo. Los neutrinos se mezclan incluso con Yukawas diagonales, y en ese caso vale de forma aproximada:

$$(m_{\nu}^{\text{eff}})_{ij} \approx \frac{Y_{\nu_i} Y_{\nu_j} v_u^2}{6\kappa v_{\nu} c} (1 - 3\delta_{ij}) + \frac{v_{\nu_i} v_{\nu_j}}{2M},$$

donde  $Y_{\nu} \sim 10^{-6}$ ,  $v_{\nu} \sim Y_{\nu} v_u$ , y  $6\kappa v_{\nu} c, v_u, M$ , son de orden de la escala electroweak-SUSY, esto es del orden de los 100 o los 1000 GeV.

En el caso que CP no se conserve:

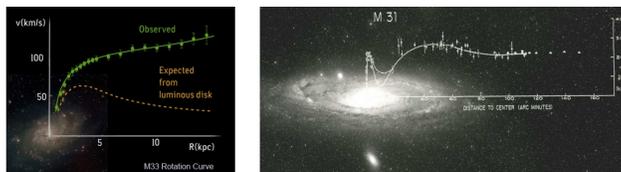
$$P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e) - P(\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e) = -16J \sin\left(\frac{\Delta m_{12}^2 L}{4E}\right) \sin\left(\frac{\Delta m_{13}^2 L}{4E}\right) \sin\left(\frac{\Delta m_{23}^2 L}{4E}\right),$$

$$J = s_{12} c_{12} s_{23} c_{23} s_{13} c_{13}^2 \sin \delta.$$

## Materia oscura

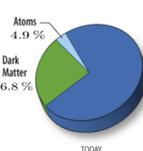
Pocos años después de 1930 comienza a observarse en cúmulos de galaxias que las galaxias satélite no se comportan de la manera esperada.

La propuesta de la existencia de materia que no se ve, "**materia oscura**", no se hace esperar, al igual que la observación del mismo efecto a escalas de galaxias.



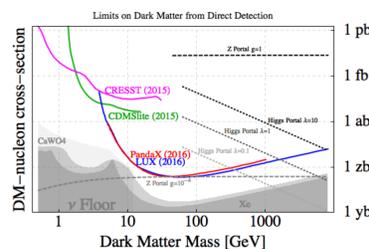
Sin embargo al día de hoy **seguimos sin saber qué la constituye**, y sin saber si puede emitir fotones (luz), ya sea por aniquilación o por decaimiento. Tampoco sabemos si interactúa o no de manera medible con la materia, más allá de la interacción gravitatoria cuyo efecto si observamos.

Los avances en el área son sorprendentes. **La observación del "Bullet cluster" de la colisión de galaxias no deja prácticamente dudas sobre la existencia de materia oscura;** haciendo casi inverosímil otro tipo de interpretación ...



Observaciones tanto en galaxias, como en clusters de galaxias, como a escala cosmológica, indican que alrededor del 85 % de la materia está constituida por materia oscura.

**Detección directa:** Desde hace más de dos décadas enormes esfuerzos se han dedicado a la búsqueda de materia oscura mediante la interacción con núcleos pesados. El resultado ha sido negativo. Pero el nivel de precisión alcanzado ha sido sorprendente, tan es así que nos encontramos cercanos a tener que considerar el fondo coherente de neutrinos solares.



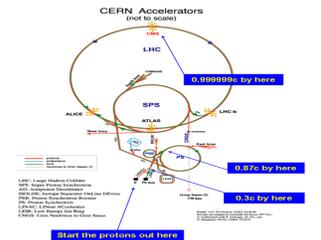
**Detección indirecta:** Experimentos utilizando satélites como Fermi-LAT se llevan a cabo para detectar la posible emisión de fotones (ya sea por decaimiento o aniquilación) de materia oscura.



**Gravitino como materia oscura en el μνSSM: Búsqueda con Fermi-LAT**

$$\Gamma(\Psi_{3/2} \rightarrow \sum_i \gamma \nu_i) \simeq \frac{m_{3/2}^3}{64\pi M_P^2} |U_{\gamma\nu}|^2$$

## Nueva Física en aceleradores de partículas (LHC)



**Búsqueda de nueva física en el MSSM y NMSSM** (el neutralino más ligero puede ser la materia oscura):

- Una posible señal es la energía que se pierde al no detectarse el neutralino invisible (LSP estable gracias a simetría de paridad-R).
- Existen fuertes cotas sobre la producción de partículas supersimétricas cargadas, principalmente utilizando que al final del decaimiento de estas partículas se encuentra el neutralino dando lugar a energía perdida.

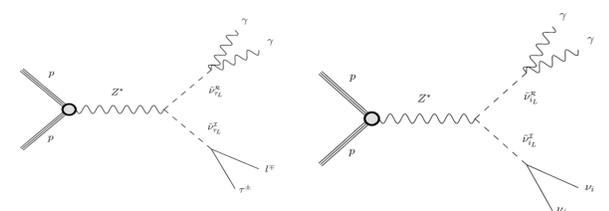
**Búsqueda de nueva física en el "μ-from-ν Supersymmetric Standard Model":**

- El LSP decae: No hay partícula estable, todas las que tengan acoples con las partículas del modelo estándar decaerán a estas. Señales de multileptones, multi-quarks, etc. posibles en LHC
- La ruptura de paridad-R no es arbitraria: Esta relacionada con física de neutrinos. Hay una partícula con vida media larga que puede dar vértices desplazados en el acelerador.

**Muchas señales posibles motivadas por este modelo podrían observarse en el futuro próximo.**

**Ejemplos:**

**Sneutrino izquierdo LSP, producción directa,**



**Neutralino LSP, vértices desplazados decaimiento del Higgs,**

