

1. Información general del proyecto

1.1. Título:

1.2. Duración:

18 Meses

1.3. Nombre de la entidad en Colombia que presenta el proyecto:

Universidad de Antioquia

1.4. Líder del proyecto:

Diego A. Restrepo Quintero

1.5. Lugar de ejecución en Colombia (departamento, ciudad):

Antioquia, Medellín.

1.6. Dirección electrónica de contacto:

diego.restrepo@fisica.udea.edu.co

1.7. Teléfonos de contacto con el líder del proyecto:

2195661

2. Información sobre la entidad ejecutora del proyecto

2.1. Nombre y nit:

Universidad de Antioquia, 890980040-8

2.2. Tipo de entidad:

2.3. Ciudad:

Medellín.

2.4. Dirección:

calle 67 No. 53 - 108

2.5. Teléfono:

219 8332

2.6. Correo electrónico:

comunicaciones@udea.edu.co

2.7. Representante legal:

Alvaro Uribe Correa

2.8. Tipo y número de identificación

Cédula de Ciudadanía: 8346555

2.9. Capacidad de ejecución:

Recurso humano	Recursos técnicos	Económico

3. Información sobre el proyecto**3.1. Sector(es) en el que se desarrolla el proyecto:****3.2. Título:**

Ciencias Básicas

3.3. Resumen ejecutivo:**3.4. Monto económico total (incluida contrapartida):****3.5. Antecedentes:**

Los avances recientes en física de partículas y cosmología han dado lugar a un entendimiento claro de las tres fronteras a lo largo de la cual la física de partículas debe avanzar para resolver algunos de los misterios cruciales de nuestro universo tales como: el origen de la masa, la naturaleza de la materia oscura y la energía oscura, la generación de la asimetría materia-antimateria, y la posible unificación de las fuerzas. Las tres fronteras que se ilustran en la Figura 1, se han identificado como la Frontera de Energía, la Frontera de Intensidad, y la Frontera Cósmica [1]. Este proyecto cubrirá los tres frentes y conectará física de partículas y cosmología. En el proyecto se estudiarán varios modelos teóricos confrontándolos con los resultados experimentales recientes y haciendo predicciones para los experimentos en marcha y los que entrarán próximamente en funcionamiento.

Nos encontramos ahora en una época de efervescencia experimental con detectores de partículas instalados desde las alturas de satélites artificiales, hasta las profundidades de laboratorios subterráneos

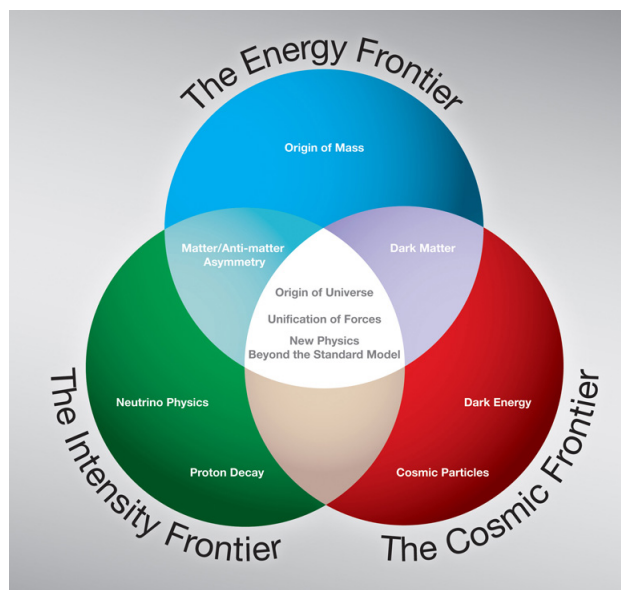


Figura 1: Fronteras de energía. Tomado de [1]

a kilómetros de profundidad. Esto marca una época excitante para la física de partículas con nuevos datos experimentales disponibles en las tres fronteras antes mencionadas. La posible correlación de datos experimentales entre varias de las fronteras podrían permitir un entendimiento más profundo de los constituyentes del Universo.

La *Frontera de Energía* ha alcanzado la escala del Tera, la energía a la cual se rompe la simetría electrodébil, con la puesta en funcionamiento del Large Hadron Collider (LHC). Ubicado en un túnel a 100 metros de profundidad y con una circunferencia de 27 km, el LHC posee cuatro detectores, dos de los cuales (ATLAS y CMS) están especialmente diseñados para encontrar el Higgs y señales de nueva física. El LHC ha comenzado a operar en el 2010, aunque hasta el 2012 lo hará a la mitad de la energía para la cual fue diseñado. A partir del 2014 aproximadamente, comenzará a funcionar a la energía de diseño de 14 TeV. Para finales del 2012 el LHC habrá completado su primera fase de operación a una energía de centro de masa de 7 TeV y habrá acumulado al menos 8 fb^{-1} de datos. Con esta luminosidad se podrá vislumbrar una escala de energía que hasta ahora no había sido explorada. La prioridad es la búsqueda de el bosón de Higgs del Modelo Estándar, el cual a la fecha aún no ha sido encontrado. En el año a venir se espera obtener las primeras evidencias de su existencia o por el contrario fortalecer los límites de exclusión hasta un rango de masa del orden de los 600 GeV.

En el campo de la física de partículas elementales más allá del Modelo Estándar (ME), quizás el resultado experimental más importante en los últimos años es el descubrimiento de que los neutrinos son masivos. Dichas masas han resultado ser pequeñas aunque diferentes de cero. Las diferencias de masa al cuadrado de los neutrinos, además de sus correspondientes ángulos de mezcla, son necesarios para poder explicar las observaciones de oscilaciones de neutrinos a medida que se propagan sobre grandes distancias. Debido a que los neutrinos interactúan solo débilmente, los experimentos de neutrinos requieren de detectores muy masivos y flujos muy intensos. Los experimentos de neutrinos exploran de esta manera la *Frontera de Intensidad*. Los experimentos en esta frontera se enfocan ahora en estudios más precisos de oscilaciones de neutrinos así como en búsqueda de nuevas fuentes de violación de la

simetría CP, mezclas de sabores de leptones cargados, decaimientos raros, y en la determinación de la velocidad de propagación de neutrinos altamente energéticos. Los experimentos que utilizan flujos muy intensos a energías inferiores que las del LHC pueden proveer información complementaria a los posibles descubrimientos de los detectores ATLAS y CMS. Un decaimiento raro que proviene del intercambio de una partícula de gran masa puede contener información sobre las propiedades del estado intercambiado aunque éste sea demasiado pesado para ser producido directamente.

Recientemente se ha venido acumulando evidencia experimental respecto al ángulo de mezcla en el sector de neutrinos que aún falta por determinar, mostrando que dicho ángulo no sólo es diferente de cero sino que puede ser suficientemente grande como para permitir violación de CP en el sector leptónico [2]. La violación de CP en el sector leptónico es un ingrediente necesario para la generación de la asimetría de materia-antimateria a través del mecanismo de leptogénesis [3].

La *Frontera Cósmica* utiliza laboratorios subterráneos, telescopios basados en tierra y telescopios instalados en satélites para explorar la componentes oscuras de la materia y la energía, las huellas de la inflación y el origen y destino del universo. Las observaciones de la Frontera Cósmica han alcanzado una precisión mucho mayor de la podría haber sido imaginada dos décadas atrás. Estos han conseguido determinar detalles del universo primitivo los cuales son cada vez más consistentes con el “Modelo Estándar” de Cosmología basado en la constante cosmológica y en la materia oscura fría (Λ CDM), que dan cuenta del 95 % del contenido energético del Universo. Técnicas novedosas como lentes gravitacionales han aportado significativamente a nuestro conocimiento del pasado cosmológico, en particular al aumentar la evidencia experimental de que la materia oscura del universo está compuesta de partículas masivas débilmente interactuantes (WIMPS) [4, 5], formando halos de materia oscura alrededor de las galaxias. La materia oscura representa un gran desafío teórico y experimental, tanto para la astrofísica moderna como para la física de partículas [4, 6, 5]. Los WIMPS deben corresponder a nuevas partículas no presentes en el ME, constituyéndose en la segunda evidencia experimental de necesidad de física más allá del ME. Muchos esfuerzos teóricos se han realizado para construir teorías más allá del ME con candidatos prometedores de materia oscura. Entre los candidatos a ser WIMPS, tenemos la más ligera de las partículas supersimétricas, escalares neutros adicionales, neutrinos derechos, y las partículas de Kaluza-Klein, cada uno con diferentes implicaciones experimentales.

Las partículas que constituyen la materia oscura típicamente son consideradas como estables, aunque también podrían ser inestables siempre y cuando el tiempo de vida media sea mayor que la edad del universo. Los WIMPs, si bien es cierto que interactúan débilmente entre sí, eventualmente pueden aniquilarse (o desintegrarse en el caso de ser inestables) generando productos de aniquilación (o de decaimiento) que contribuyen a los rayos cósmicos y que pueden llegar a los detectores instalados en satélites artificiales orbitando la tierra. El valor de múltiples estudios con detectores de diversos tipos de partículas y radiación electromagnética sobre un rango muy amplio (incluyendo rayos gamma) se hace evidente en el conocimiento detallado que se ha logrado alcanzar y el que se espera mejorar con los experimentos que recientemente han entrado en funcionamiento.

Cabe mencionar que el programa de detección de materia oscura se ha centrado en la búsqueda de sus señales en los aceleradores como el LHC [7], en la detección de la energía de retroceso en la dispersión de las partículas de materia oscura con núcleos atómicos [8], y la detección indirecta a través de los estados finales de la aniquilación y/o decaimiento de la materia oscura [9, 10, 11, 12], tales como fotones, neutrinos y la antimateria.

El resultado más prometedor en esta área proviene del 2008, cuando varios experimentos sobre rayos cósmicos como ATIC [13] y los satélites PAMELA [14] y Fermi [15], comenzaron a reportar un exceso en el flujo de electrones y positrones en rayos cósmicos. Los resultados experimentales muestran un

exceso inesperado en comparación con el background convencional, tanto en el flujo de electrones más positrones como en la fracción de positrones, señalando la existencia de una fuente adicional de electrones y positrones en el halo de la Vía Láctea, mientras que los datos de antiprotones están de acuerdo con el background astrofísico esperado. Estos resultados han dado lugar a un sinnúmero de publicaciones tratando de explicar su origen. Las medidas cada vez más precisas de rayos gamma por parte de Fermi-LAT, pueden ayudar a discernir si el origen de las anomalías detectadas en electrones y positrones es debida a fuentes astrofísicas como pulsares cercanos, o a la aniquilación o el decaimiento de materia oscura. El detector de rayos cósmicos AMS-02 [16], ha sido instalado recientemente en la estación espacial internacional para medir el espectro y la naturaleza de los rayos cósmicos en un rango de energía mucho más amplio y con una estadística mucho mejor que PAMELA.

Los experimentos de detección directa de materia oscura instalados en laboratorios subterráneos como XENON100 [17] o CDMS [18], han comenzado a explorar las regiones predichas por algunos de los modelos más estudiados de materia oscura. Sin embargo, hasta ahora dichos detectores no han encontrado señales de dichas partículas. Por el contrario, existen otras medidas tomadas con detectores tales como DAMA/LIBRA [19], CoGent [20] o CRESST-II [21] que favorecerían la existencia de partículas de materia oscura con una masa en el rango de 6 a 15 GeV. La situación experimental está lejos de ser sencilla, ya que por el momento no es claro cómo conciliar los diferentes resultados de la detección directa. No obstante, una nueva generación de detectores con masas del orden de la tonelada como XENON1T o SuperCDMS, o con técnicas más avanzadas de discriminación del ruido de fondo como MIMAC [22] o DRIFT [23] en el caso de la detección direccional estará próximamente disponible para así poder resolver este conflicto. En definitiva, para los próximos años se espera una gran actividad en el campo de la detección directa de materia oscura que permitirá testear una porción considerable del espacio de parámetros favorecido por la materia oscura del modelo estándar supersimétrico mínimo restringido (cMSSM por sus siglas en inglés).

Supersimetría [24, 25] es una de las teorías propuestas para resolver el problema de la jerarquía del sector de Higgs en el ME. El modelo estándar supersimétrico mínimo (MSSM) es, como su nombre lo indica, la extensión supersimétrica más simple del ME. Dicho modelo es mínimo en el sentido que contiene una mínima cantidad de campos e interacciones. Todas las interacciones del modelo están especificadas por las simetrías (gauge, Lorentz, supersimetría...) y el superpotencial, el cual debe ser una función holomorfa de los campos escalares del modelo. El MSSM, además de tener la virtud de resolver el problema de jerarquía estabilizando la masa del Higgs, unifica los acoplamientos gauge a una escala llamada de Gran Unificación y proporciona un candidato viable para la materia oscura. Este corresponde a la partícula supersimétrica más ligera, el cual es estable cuando se supone la conservación de una simetría Z_2 , conocida también en este caso como paridad R [26] (R_p). En el ME supersimétrico, además de los términos del superpotencial que constituyen la semilla del potencial escalar y del lagrangiano de Yukawa, las simetrías del modelo permiten los siguientes términos:

$$W_{\mathcal{R}} = \mu_i \hat{L}_i \hat{H}_u + \lambda_{ijk} \hat{L}_i \hat{L}_j \hat{l}_k + \lambda'_{ijk} \hat{L}_i \hat{Q}_j \hat{d}_k + \lambda''_{ijk} \hat{u}_i \hat{d}_j \hat{d}_k. \quad (1)$$

La conservación de la simetría de paridad R prohíbe la aparición *simultánea* de operadores que violan el número bariónico y leptónico, λ' y λ'' , evitando así el decaimiento prematuro del protón. El modelo resultante es conocido como modelo estándar supersimétrico con mínimo número de operadores (MSSM). Otras simetrías similares a paridad R que permiten bien sea la presencia sólo de operadores que violan número leptónico o número bariónico también dan lugar a un protón suficientemente estable. Estos modelos fenomenológicamente viables son conocidos en general como modelos con violación de paridad R.

Cuando paridad R no se conserva en el Modelo Estándar supersimétrico [27], estos operadores pueden conducir al decaimiento de la partícula supersimétrica más ligera, teniendo profundas implicaciones en la búsqueda de supersimetría en aceleradores y en los experimentos de detección directa e indirecta de materia oscura. El modelo estándar supersimétrico con rotura bilineal de paridad R (BRpV) [28, 29, 30], es la versión más simple que da cuenta de las masas y mezclas de neutrinos sin necesidad de introducir partículas adicionales.

Con la entrada en funcionamiento del LHC se han estado excluyendo partes importantes de modelos supersimétricos basado en señales de energía faltante. En general, en modelos con rotura de paridad R hay una degradación de ésta señal haciendo más difícil su búsqueda en colisionadores hadrónicos. En modelos con rotura de paridad R a través de operadores que violan número bariónico, supersimetría puede quedar incluso oculta por el background de QCD. De modo que se espera que los modelos con rotura de paridad R ganen cada vez más importancia a medida que se continué excluyendo el MSSM [31].

Cuando la supersimetría se promueve a ser una simetría local de la naturaleza, la teoría de supergravedad resultante requiere un supermultiplete que incluya el gravitón y su supercompañero, el gravitino [24, 32]. El gravitino (\tilde{G}) adquiere masa a partir de la ruptura espontánea de la supersimetría (llamado súper mecanismo de Higgs), la cual viene dada por $m_{\tilde{G}} = \langle F \rangle / M_P$, donde $\langle F \rangle$ es el valor esperado de vacío del campo auxiliar que rompe la supersimetría, y M_P es la masa de Planck. Por lo tanto, dependiendo del escenario de rotura de supersimetría, el rango de la masa del gravitino va desde los eV hasta mas allá de la escala del TeV.

La aparición natural del gravitino en supergravedad trae un problema con el escenario de la cosmología estándar. En el Universo primitivo, cuando el gravitino está en equilibrio térmico con el plasma, la densidad reliquia de gravitinos es mayor que la densidad crítica, lo que implica que el universo podría auto-contraherse. Por lo tanto, es fundamental invocar una fase inflacionaria en el Universo con el objetivo de diluir la densidad reliquia de gravitinos. Sin embargo, los gravitinos también se producen en la fase de recalentamiento (a través del decaimiento del inflatón) después de la inflación. Durante o después de la nucleosíntesis, el decaimiento de la segunda partícula supersimétrica más ligera o podría generar una lluvia electromagnética y de hadrones que echarían a perder la predicción exitosa de las abundancias de elementos ligeros [33]. La solución a este problema se obtiene mediante la introducción de una violación de paridad R [34], la cual permite a la segunda partícula supersimétrica más ligera decaer en las partículas del ME antes de la nucleosíntesis, y permite a los restantes gravitinos tener un tiempo de vida mayor que la edad del universo. En este último caso, el gran tiempo de vida que se requiere para un candidato de materia oscura inestable se obtiene gracias a las débiles interacciones del gravitino, las cuales son suprimidas por la escala de Planck y por los pequeños acoplamientos bilineales ó trilineales que violan paridad R. Si las masas de neutrinos son explicadas a través del mecanismo de seesaw, el escenario con el gravitino como materia oscura y con violación de paridad R también se ve favorecido por la teoría que explica la asimetría entre materia y antimateria, la leptogénesis, ya que alivia la tensión entre la alta temperatura de recalentamiento requerida por leptogénesis y las restricciones provenientes de la teoría de la Nucleosíntesis. Por lo tanto, en modelos con violación de paridad R, el gravitino como materia oscura producido en el Universo temprano es viable y bien motivado.

Con respecto a la detección, cuando la simetría paridad R se conserva, los gravitinos tienen interacciones muy débiles y por lo tanto ninguna señal de la materia oscura gravitino se puede observar en los experimentos de detección directa o indirecta. En cuanto a las señales en los colisionadores, la producción directa de gravitinos esta muy suprimida, pero la segunda partícula supersimétrica más ligera puede dejar rastros en los detectores. Por otro lado, si el gravitino es inestable (debido a la violación de paridad R) sus productos de desintegración puede llevar a señales observables en las búsquedas indirectas de

materia oscura [9, 35, 11]. Los gravitinos pueden ser detectados indirectamente a través del decaimiento a rayos gamma, neutrinos o antimateria a través de los experimentos descritos en la Frontera Cósmica. De particular interés se tiene la región en la cual la masa del gravitino es menor que 80 GeV, ya que el gravitino puede decaer únicamente a un neutrino y un rayo gamma, produciendo lo que se conoce como una línea de rayos gamma (un fotón monoenergético). Los datos del espectro de rayos gamma extragaláctico, tomados por los satélites EGRET y FERMI, ponen fuertes cotas sobre el espacio de parámetros de estos modelos. De hecho, en la referencia [36] se obtuvieron restricciones sobre el tiempo de vida del candidato a materia oscura en los modelos supersimétricos con violación de paridad R, para un rango de masas de 10^{-5} a 10 GeV. En esta misma dirección, en la referencia [37] se realizó una búsqueda sistemática de señales de líneas de rayos gamma en dichos modelos, sin encontrar evidencia de estas. Con este resultado, se obtuvieron restricciones sobre el tiempo de vida del candidato a materia oscura para una masa entre $2 < m_{DM} < 600$ GeV. Como hemos mostrado en [38], y ratificado por otro grupo con datos más recientes en [39], los últimos datos de líneas de rayos gamma publicado por FERMI-LAT excluyen la posibilidad de que las masas de neutrinos puedan ser generadas por términos bilineales de ruptura de paridad R si la temperatura de recalentamiento está sobre 10^9 GeV como sugiere leptogénesis. En esta región del espacio de parámetros el gravitino es mayor de unos 10 GeV y los acoplamientos bilineales son tan pequeños que el decaimiento de la partícula siguiente a la LSP, la NLSP (de sus siglas en inglés), ocurre fuera del detector en el LHC, por lo que el modelo es básicamente indistinguible del MSSM. En este caso los datos de detección indirecta de materia oscura a través de rayos cósmicos serían la única forma de diferenciar el modelo del MSSM (donde el neutralino es el candidato de materia oscura). Sin embargo, si consideremos masas de gravitinos más pequeñas, aunque ya no podríamos explicar bariogénesis a través de leptogénesis, recuperamos la posibilidad de explicar las masas y mezclas de los neutrinos a través de los operadores bilineales y trilineales que rompen paridad R [40], un mecanismo, que a diferencia del seesaw, si se puede verificar en el LHC. En modelos supersimétricos con violación bilineal de paridad R también la explicación de las masas y mezclas de neutrinos es especialmente simple [29, 30, 41]: Por un lado se encuentra la generación a nivel árbol de la escala de masa atmosférica, el ángulo de mezcla atmosférica y el ángulo de reactor. En el otro lado, la escala de masa solar y el ángulo de mezcla solar se obtienen por medio de las correcciones cuánticas a un loop de la matriz de masa de los neutrinos a nivel árbol.

La metodología desarrollada en el estudio exhaustivo de modelos supersimétricos la hemos logrado aplicar a otros modelos de generación radiativa de masas de neutrinos con nuevas partículas a la escala del TeV asequibles en el LHC [42, 43]. El método para obtener una partícula estable del modelo supersimétrico a partir de una simetría Z_2 como el caso de paridad R, ha sido usado recientemente para obtener extensiones del modelo estándar que explican materia oscura. De hecho, en el programa computacional MicrOMEGAs [44] se puede implementar cualquier extensión del modelo estándar que posea una simetría Z_2 para calcular numéricamente la densidad de reliquia de materia oscura y la sección eficaz WIMP–nucleón, relevante para los experimentos de detección directa. En extensiones del modelo estándar que implementan una simetría Z_2 con un singlete escalar neutro [45] o un doblete inerte escalar [46], la partícula impar neutra y más liviana constituye un candidato viable de materia oscura estable escalar con implicaciones en aceleradores y en experimentos de detección directa e indirecta de materia oscura. En el caso de la extensión del modelo estándar con un doblete inerte se puede tener una conexión con la frontera de intensidad si se adicionan neutrinos derechos impares bajo la simetría Z_2 . A diferencia del mecanismo seesaw tradicional, en este caso correspondiente al seesaw radiativo [47], las masas de los neutrinos ligeros se generan al nivel de un bucle de modo que los neutrinos derechos pueden estar en la escala del TeV con yukawas suficientemente grandes como para ser producidos en el LHC [42]. En

general, en modelos en los cuales es posible explicar la masa de los neutrinos total o parcialmente por métodos radiativos, no sólo es posible dar cuenta de la pequeñez de sus masas con respecto a la de los otros fermiones, sino también, hacer predicciones muy concretas en aceleradores de partículas, como el LHC.

Las observaciones astronómicas sugieren que el Universo está compuesto en su mayor parte de materia. En el contexto del big-bang, esto implica que en algún momento grandes cantidades de materia y antimateria se aniquilaron dejando el pequeño exceso de materia que constituye el Universo observable actual. El problema de explicar el exceso inicial de materia sobre antimateria se conoce con el nombre de bariogénesis. Dentro del modelo estándar, aunque contiene los ingredientes necesarios, no es posible explicar bariogénesis. Los modelos con neutrinos derechos contienen todos los ingredientes para poder explicar bariogénesis a través de leptogénesis [].

3.6. Justificación:

El Grupo de Fenomenología de Interacciones Fundamentales de la Universidad de Antioquia, en colaboración con Grupos emergentes en otras instituciones de la región conformados por egresados de doctorado de nuestro Grupo, se ha enfocado en la investigación científica de aspectos fenomenológicos en las tres fronteras de la física de altas energías y la cosmología. Estas investigaciones se han hecho en colaboración con investigadores internacionales, en particular con científicos colombianos trabajando en el exterior que participan en este proyecto [48, 42, 49, 38, 50]; mediante el cual buscamos dar continuidad a estos desarrollos a través de investigaciones de impacto en la comunidad científica de éstas áreas de frontera. En éste proyecto se continuarán explorando diferentes extensiones del modelo estándar que explican las masas y mezclas de neutrinos y que contienen un candidato de materia oscura con predicciones concretas para los experimentos presentes y futuros en las tres fronteras de la física de partículas y la cosmología.

Con éste proyecto queremos beneficiarnos de la experiencia y capacidad de reconocidos científicos colombianos que trabajan en instituciones de primera línea en el exterior para ampliar los horizontes investigativos del país y poder participar más activamente en las fronteras de investigación de la física de partículas y cosmología.

Hemos estudiado exhaustivamente las predicciones del modelo con ruptura bilineal de paridad R, BRpV, que incluye sólo los tres operadores con μ_i , tanto para el Tevatron como para el LHC, asumiendo que el neutralino es la partícula supersimétrica más liviana (LSP) [51, 52]. Dichas búsquedas ya han comenzado a implementarse por la colaboración ATLAS del LHC [53] donde se muestra el espacio de parámetros excluido en el cMSSM con BRpV hasta una luminosidad de 1 fb^{-1} . En [52] nos hemos enfocado en la intersección entre la Frontera de Energía y la Frontera de Intensidad al determinar el nivel de precisión con el que se puede llegar a medir en el LHC la correlación entre decaimientos de neutralinos a muón y tau con el ángulo de mezcla atmosférico de neutrinos: una predicción muy concreta que de no observarse en el LHC en los próximos años descartaría completamente el modelo como el mecanismo de generación de masas para neutrinos.

Cuando el gravitino es la LSP, se constituye en un candidato viable de materia oscura inestable. Éste caso ha sido estudiado exhaustivamente en la literatura por sus implicaciones en experimentos de rayos cósmicos, especialmente en el caso en que la temperatura de recalentamiento es mayor que $T_R \gtrsim 10^9 \text{ GeV}$ [34, 9, 54, 35, 11]. En tal caso el modelo también explica bariogénesis a través de leptogénesis.

También hemos explorado [55] la intersección en las tres fronteras encontrando las restricciones en el modelo BRpV provenientes de las medidas de líneas de líneas de rayos gamma obtenidas por Fermi-LAT

cuando el gravitino es la partícula supersimétrica más liviana y da cuenta de la materia oscura del universo. Como los acoplamientos que violan paridad R deben ser suficientemente grandes para explicar masas y mezclas de neutrinos, los decaimientos que violan paridad R de la partícula supersimétrica siguiente a la más liviana (NLSP) dominan sobre los canales de decaimiento a gravitino, de modo que la fenomenología en aceleradores, incluyendo las correlaciones entre las fronteras de energía e intensidad, estudiada previamente se sigue manteniendo intacta.

Esto hace los modelos con violación de paridad R con el gravitino como materia oscura especialmente interesantes pues genera predicciones en la tres fronteras de la física de partículas y la cosmología, las cuales se han venido confrontando con los resultados experimentales muy diversos. Es así como por ejemplo se ha logrado restringir hasta en 12 ordenes de magnitud el tiempo de vida media del gravitino, desde los 10^{17} seg (correspondientes a la edad del universo) hasta los 10^{29} seg, en el rango de masas alrededor de 10 GeV, cuando el gravitino decae predominantemente a neutrino-fotón [37].

Diversos estudios han considerado las restricciones que las medidas de rayos cósmicos imponen sobre modelos supersimétricos con violación de paridad R. En el caso de operadores trilineales que violan número leptónico se han venido reportando las restricciones sobre la masa del gravitino a partir de los datos de rayos cósmicos considerando sus decaimientos a tres cuerpos, y a un loop mediados por partículas gauge [56]. En este proyecto extenderemos esos análisis teniendo en cuenta que los operadores trilineales de rotura de paridad R pueden inducir operadores bilineales de rotura de paridad R. En tal caso el gravitino tiene un nuevo canal a nivel árbol a neutrino-fotón que afectarán las cotas sobre la masa del gravitino especialmente en la región por debajo de los 80 GeV.

También estudiaremos las restricciones sobre la masa del gravitino cuando los operadores trilineales son usado para generar las masas y mezclas de los neutrinos, extendiendo el análisis realizado previamente en [57].

En el marco de los modelos supersimétricos con violación bilineal de paridad R y materia oscura de gravitinos, se supone que el gravitino es la más ligera de las partículas supersimétricas y que da cuenta de la densidad de materia oscura observada del Universo. En estos modelos, el gravitino es inestable debido a la rotura de paridad R y puede decaer en partículas del Modelo Estándar a través de las interacciones bilineales que rompen paridad R. En este escenario, todos los efectos que violan paridad R, incluyendo el decaimiento del gravitino y las masas diferentes de cero de los neutrinos, son controlados por los acoplamientos bilineales ξ_i .

La detección indirecta de materia oscura involucra las búsqueda de los estados finales en las desintegraciones del gravitino, entre los que se encuentran los rayos gamma. A partir de las restricciones sobre el tiempo de vida del gravitino se pueden obtener restricciones en función de la masa del gravitino para el acoplamiento bilineal dominante ξ_3 . Cuando se asume la unificación de las masas de los gauginos a la escala de unificación, la restricción resultante sobre ξ_3 es muy fuerte: $\xi_3 \lesssim 10^{-7}$ para $m_{\tilde{G}} \gtrsim 1$ GeV. Sin embargo, la unificación de las masas de los gauginos no es una condición que se deba asumir necesariamente en los modelos supersimétricos, lo cual implicaría que la restricción sobre ξ_3 puede ser relajada.

Nuestro grupo [58] fue uno de los primeros en proponer una explicación en términos de materia oscura inestable para explicar el exceso de positrones observado por el satélite PAMELA en el 2008 [14]. Luego hemos construido un modelo basado en supersimetría con ruptura de paridad R a través de términos trilineales del tipo λ , caso *ii*, para explicar la preferencia por decaimientos leptónicos de la partícula de materia oscura, que en este caso es el neutralino [48].

Existen varias extensiones del modelo BRpV que adicionan nuevas partículas tales como las resultantes de la adición de un supertripleto escalar de Higgs [], o singletes adicionales para explicar el problema μ .

Estas extensiones se podrían parametrizar en términos de operadores no renormalizables que se podrían adicionar para tener un marco general de modelo más allá del BRpV. El Dr. Nicolás Bernal es un experto en extensiones más allá del MSSM para parametrizar el sector de Higgs [] y será de gran ayuda en ésta área.

En este proyecto pretendemos seguir explorando más correlaciones de observables en el LHC con física de neutrinos para determinar con que nivel de precisión se podrían llegar a medir en el LHC. Cuando el neutralino es la LSP, los decaimientos a tres cuerpos mediados por sfermiones con muones y electrones en los estados finales, están correlacionados con el ángulo de mezcla solar, y la longitud de decaimiento del neutralino está correlacionada con la diferencia de masa atmosférica.

El cálculo de la densidad de neutralinos en supersimetría se conoce a un loop, lo cual es necesario para determinar más precisamente las regiones de exclusión obtenidas a partir de las medidas de detección directa de materia oscura. En el marco de éste proyecto, con la participación del estudiante de Maestría, y con el asesoramiento del Dr. Carlos Yaguna, se calculará las contribuciones a un loop para la sección eficaz de la partícula escalar de materia oscura en varios modelos con materia oscura escalar impar bajo una simetría Z_2 .

En éste proyecto se extenderá el estudio realizado en [42] con materia oscura tibia en el modelo see-saw radiativo en la intersección de las fronteras de energía e intensidad, para estudiar las correlaciones entre mezclas y masas de neutrinos con combinaciones de branchings de decaimientos de las partículas impares de dicho modelo en el caso de materia oscura fría. Para las señales más representativas realizaremos las simulaciones computacionales para el detector ATLAS del LHC.

Aprovechando la experiencia del Dr. Diego Aristizabal en el área, también se explorará la posibilidad de generar leptogénesis e implementar simetrías no Abelianas tipo A_4 en el sector de Yukawa del see-saw radiativo para obtener ángulos de mezcla θ_{13} suficientemente grande como sugieren las medidas experimentales actuales.

Un modelo ideal sería uno que de cuenta de las masas y mezclas de neutrinos, tenga un candidato a materia oscura que sirva para explicar el exceso de positrones en experimentos de rayos cósmicos y a la vez contenga los ingredientes para explicar bariogénesis. En este proyecto pretendemos formular modelos de éstas características, además de continuar explorando otros posibles modelos que puedan dar cuenta al menos de las dos evidencias fenomenológicas más importantes: masas de neutrinos y materia oscura, las cuales requieren una extensión del modelo estándar.

Con base en lo planteado anteriormente, lo que proponemos en este proyecto es tratar de responder la siguiente pregunta: ¿Cuáles serían las restricciones impuestas por los resultados experimentales presentes y futuros en las tres fronteras de la física de partículas y cosmologías sobre modelos que presenten una partícula candidata a materia oscura y la vez generen masas para los neutrinos?

3.7. Objetivos:

Utilizar los resultados experimentales en las fronteras de energía, intensidad y cósmica para restringir modelos existentes de masas y mezclas de neutrinos que posean algún candidato de materia oscura.

3.7.1. Objetivos específicos

- Consolidar y ampliar las líneas de investigación en las tres fronteras de la física de partículas y cosmología en el país, aprovechando la experiencia y capacidades de los investigadores colombianos

trabajando en el exterior que participan en el proyecto.

- Construir un programa computacional que incluya todos los decaimientos del gravitino en modelo estándar supersimétrico con rotura de paridad R a través de operadores con violación de número leptónico, incluyendo los decaimientos a dos y tres cuerpos de los operadores bilineales inducidos por el correspondiente término trilineal cuando evoluciona desde la escala de unificación en un contexto de supergravedad mínima.
- Extender el programa computacional de espectro supersimétricos SUSPECT [?] para calcular el espectro supersimétrico y sus correspondientes ángulos de mezcla cuando la escala de los sferminoes éste varios ordenes de magnitud por encima de la escala electrodébil, para entonces determinar la dependencia de las masas de neutrino inducidas por operadores trilineales con rotura de paridad R con la escala de los sfermiones.
- A partir de las medidas de experimentos de rayos cósmicos de experimentos, como los de líneas de rayos gamma de Fermi–LAT, determinar las restricciones en el espacio de parámetros del modelo estándar supersimétrico con rotura de paridad R a través de operadores con violación de número leptónico.
- Estudiar cuales serían las implicaciones en física de neutrinos cuando no se consideran las restricciones de leptogénesis en con rotura de paridad R a través de operadores con violación de número leptónico y con el gravitino como materia oscura.
- Calcular las masas y mezclas de neutrinos en la extensión del modelo BRpV con operadores no renormalizables de dimensión cinco con violación de número leptónico, sus consecuencias y restricciones experimentales en las tres fronteras de la física de partículas y la cosmología.
- En el modelo con ruptura bilineal de paridad R con el neutralino como la LSP, determinar con que nivel de precisión se podría llegar a medir en el LHC la correlación entre: La diferencia de masa atmosférica al cuadrado y la longitud de decaimiento del neutralino.
- Calcular la sección eficaz materia-oscura–nucleón en el seesaw radiativo tanto en el caso materia oscura escalar como fermiónica.
- Establecer las regiones del espacio de parámetros en el seesaw radiativo que dan lugar a una densidad apropiada de la densidad de reliquia de materia oscura y satisfacen las restricciones experimentales de masas y mezclas de neutrinos. Para cada región establecer las señales que se esperan en el LHC y en experimentos de detección directa de materia oscura. Para las señales más representativas, hacer simulaciones para el detector ATLAS del LHC.

3.8. Metodología:

A continuación se demuestra la metodología a seguir a la hora de analizar las predicciones, o establecer las restricciones, de un modelo de nueva física que explique las masas y mezclas de neutrinos, o

tenga un candidato de materia oscura estable o inestable. Para ello usaremos como paradigma el trabajo que hemos venido realizando con modelo con ruptura bilineal de paridad R y ejemplificando cada paso con referencias concretas.

1. Se construye un modelo que solucione un problema fenomenológico del modelo estándar, como el problema de las masas de neutrinos [29], o la materia oscura (o ambos [40, 55]), mostrando bajo que mecanismo específico se soluciona el problema en cuestión. La solución del problema requiere introducir partículas adicionales las cuales pueden buscarse en detectores de partículas en las fronteras de energía, de intensidad o cósmica.
2. Se determina el espacio de parámetros compatible con los datos experimentales, se calculan los branchings de decaimiento y las secciones eficaces y se establecen correlaciones entre estos observables en la frontera de energía con otros observables en la frontera de intensidad y cósmica. En el caso de modelos con mecanismos de generación radiativa de masas de neutrinos las correlaciones se buscan con los datos de oscilaciones de neutrinos [30], y en el caso de materia oscura con experimentos de detección directa e indirecta [59, 55].
3. Se desarrolla un programa computacional que dado los parámetros de entrada del modelo entregue las secciones eficaces y los branching de decaimiento en un formato adecuado (el SLHA [60]) para ser usado luego por programas de Montecarlo de generación de eventos como PYTHIA [61]. El modelo con ruptura bilineal de paridad R ha sido implementado en el programa computacional SPheno [62] (el cual tiene implementado el formato de salida SLHA version 2). Modelos con un candidato de materia oscura estable bajo una simetría Z_2 pueden ser implementados en microMEGAs [44].
4. Se divide el espacio de n-parámetros establecido en el paso 2 en una malla n-dimensional. Para cada punto se corre el programa computacional desarrollado en el paso 3 y los correspondiente datos de salida se pasan a PYTHIA usando la interfase SLHA. En cada punto se realiza con PYTHIA una simulación que consiste en generar aleatoriamente eventos de acuerdo a la geometría y características de detectores específicos, para determinar la factibilidad de descubrir las señales en aceleradores [51], o en experimentos de detección indirecta [59] de materia oscura. En el caso de detección directa el número esperado de eventos puede calcularse directamente con microMEGAs. Este paso requiere normalmente herramientas de computación distribuida en clusters de computadores.
5. Como modelos muy diferentes pueden dar lugar a las mismas señales en detectores, se debe hacer también simulaciones en PYTHIA del nivel de precisión con el que se pueden determinar observables en los experimentos de la frontera de energía que se puedan correlacionar con observables en los experimentos de las fronteras de intensidad y cósmica. experimentos.

Las simulaciones se realizan con el fin de desarrollar todas las herramientas necesarias para que los grupos experimentales de los aceleradores puedan comparar los datos obtenidos con modelos específicos y puedan descubrir o poner cotas sobre las nuevas partículas propuestas. En el caso de detección directa o indirecta de materia oscura donde las señales están preestablecidas, la simulaciones se realizan para poder comparar con los datos obtenidos o que se pueden llegar a obtener. Es así como el trabajo fenomenológico realizado alrededor del modelo BRpV ya ha dado sus frutos al estar ya en las agendas de búsqueda de los grupos experimentales del Tevatron [63] y el LHC [53]. Esperamos que con este proyecto se pueda llegar al mismo nivel de relación de teoría y experimento con otras extensiones del modelo estándar que también explican las masas y mezclas de neutrinos y tienen candidatos de materia oscura.

En el modelo donde la ruptura de paridad R a través de operadores que violan número leptónico puede explicar la densidad de reliquia de materia oscura cuando la LSP es el gravitino se realizarán los pasos 3 y 4 de la metodología.

En el marco de este proyecto se simularán dos correlaciones adicionales que existen en el modelo con ruptura bilineal de paridad R: Cuando el neutralino es la LSP, los decaimientos a tres cuerpos mediados por sfermiones con muones y electrones en los estados finales, están correlacionados con el ángulo de mezcla solar, y la longitud de decaimiento del neutralino está correlacionada con la diferencia de masa atmosférica.

Se estudiará además como estas predicciones, correlaciones y restricciones se mantienen o relajan cuando se consideran extensiones más del modelo BRpV en términos de operadores no renormalizables de dimensión cinco y violación de número leptónico.

Para el seesaw radiativo, en la literatura básicamente sólo se ha realizado el paso 1, aunque para algunas regiones del espacio de parámetros donde la partícula más liviana de paridad impar (LOP de sus siglas en inglés) es escalar se ha llegado hasta el paso 4 [64]. En este proyecto haremos un estudio sistemático del modelo incluyendo todos los pasos de la metodología. Como el modelo está basado en una simetría Z_2 , implementaremos el modelo en MicrOMEGAS [65] donde además de calcular la densidad de reliquia, y la sección eficaz WIMP-nucleon, se pueden obtener todas las secciones eficaces y amplitudes de decaimiento con el formato SLHA, lo que facilitará las simulaciones para el LHC.

A través de todo el proyecto se requiere de una infraestructura de computación de alto rendimiento adecuada, que garantice una disponibilidad permanente de poder de cómputo para las diferentes simulaciones y programas computacionales que requiere el proyecto. El grupo ha venido consolidando sus herramientas de computación con la adquisición de un servidor Blade con capacidad para 8 nodos, aunque de momento sólo tiene un nodo instalado. Toda esta experiencia le ha permitido consolidar un grupo de desarrolladores y administradores de software científico que ahora conforman la división de ciencias de la computación del grupo la cual es ahora la encargada de administrar el Centro Regional de Simulación y Cálculo Avanzado (CRESCA) y ofrece servicio de computación científica. Una de las metas prioritarias es la unificar el poder de cómputo de los Grupos de Investigación de la Universidad, como el servidor Blade del grupo, en un Grid Institucional que la vez éste conectado con Grid-Colombia. En el proyecto solicitamos, además de los recursos para seguir mejorando la infraestructura tecnológica a través de nodos Blade que soporten la arquitectura CUDA para computación distribuida a través de GPU, la contratación de un Administrador de Sistemas, que dedicaría parte de su tiempo para la administración de CRESCA y la implementación del Grid Institucional de computación de alto rendimiento.

3.9. Actividades:

Las actividades a desarrollar durante el proyecto consistirán en pasantías, visitas y la organización de un taller sobre herramientas de computación científica en física de altas energías.

3.10. Resultados esperados:

Hemos entrado en una nueva era de la física que, de obtener los resultados esperados, combinaría los descubrimientos de nuevas partículas, a los cada vez mejor establecidos resultados de física de neutrinos y observaciones cosmológicas sobre materia oscura. El resultado de este proyecto es aportar a esta área

de la ciencia con nuevas propuestas de señales para ser buscadas en estos detectores (subterráneos y en el espacio) y con la interpretación de los resultados que surjan de ellos en términos de los modelos propuestos, en los cuales se añaden partículas nuevas al modelo estándar de la partículas elementales. Estos resultados se reflejarán en la publicación de al menos tres artículos científicos en el área con la participación de un estudiante de Doctorado, y en la presentación de los resultados en al menos una conferencia internacional.

De especial importancia es el nuevo paradigma científico que surgirá de la combinación de todos esos resultados experimentales. Por ejemplo el descubrimiento en el LHC de la partícula escalar elemental predicha por el Modelo Estándar, el Higgs, establecería finalmente las teorías gauge con rompimiento espontáneo de simetría como el principio fundamental para describir las interacciones subatómicas, redondeando décadas de desarrollo científico. El estudio detallado de las propiedades del Higgs, acompañado posiblemente de señales de nueva física, podría marcar el camino para encontrar el mecanismo de generación de masas y mezclas de neutrinos, así como la determinación de la partícula que compone la materia oscura del Universo. A más tardar al finalizar ésta década, se espera tener respuesta a todos estos interrogantes. Todo esto tendrá un impacto en la enseñanza de la física a todos los niveles. Además el descubrimiento del Higgs, que sería la primera partícula escalar elemental, daría un mejor fundamento teórico a los modelos inflacionarios en cosmología y a la interpretación de la energía oscura como la causante de la expansión acelerada del Universo. El otro escenario posible en el que no se encuentre al Higgs del modelo estándar, debe dar lugar a datos experimentales suficientes para dilucidar cual es realmente el mecanismo de rotura de la simetría electrodébil. Nuestro grupo es el más directamente llamado a difundir estos avances en nuestro entorno social, como lo ha venido haciendo a través de conferencias y cursos de extensión en los últimos años. Es importante que nuestro país siga participando en el desarrollo de la física fundamental, no sólo con la participación de grupos teóricos como el nuestro, sino también con grupos experimentales de física de altas energías como lo viene haciendo en las colaboraciones ATLAS y CMS del LHC con grupos de la Universidad Antonio Nariño y de los Andes respectivamente. Con ellos, y con los otros grupos teóricos del país, hemos venido colaborando y organizando congresos en el área en los últimos años para consolidar ésta área de investigación en el país.

El principal aporte de un Grupo como el nuestro al desarrollo del país es la formación de talento humano con capacidad de hacer investigación científica al más alto nivel. Para ello es prioritario que nuestro Grupo siga produciendo productos de gran impacto en la comunidad mundial de física de altas energías con participación de nuestros estudiantes de pregrado y posgrado. Aunque de momento los doctores que formamos son rápidamente reabsorbidos en el ámbito académico, esperamos que a futuro, como pasa en otros países donde profesionales de este tipo son muy apreciados en empresas de innovación tecnológica, los nuestros puedan llegar a hacer aportes significativos a otros sectores de la sociedad. También hemos logrado capacitar nuestro equipo técnico en herramientas de computación científica y de administración de redes en Linux.

De ser aprobado, éste proyecto nos permitiría participar en esta excitante era del desarrollo científico que coincide con los primeros años de funcionamiento del LHC. Se espera que entre los resultados de los próximos años LHC, no solo esté el del descubrimiento del Higgs, sino también de alguna señal de física más allá del modelo estándar que explique los problemas fenomenológicos y teóricos del Modelo Estándar. En los próximos años también se espera que los experimentos de detección directa, o indirecta a través de rayos cósmicos, entreguen una evidencia definitiva de materia oscura.

Se espera que una vez realizados con éxito los objetivos trazados en este proyecto, se amplíen las líneas de investigación

Se espera que una vez realizados con éxito los objetivos trazados en este proyecto, se establezca

cualés son las implicaciones que generan el abandono de la hipótesis de leptogénesis y la no universalidad de las masas de los gauginos, sobre las masas de los neutrinos en modelos con violación de paridad R y materia oscura de gravitinos. Es decir, determinar si es posible obtener un modelo con operadores de rotura de paridad R hasta dimensión cinco, que puedan explicar la densidad de materia oscura con gravitinos, dar cuenta de los datos de física de neutrinos y sea consistente con las restricciones provenientes de rayos cósmicos.

....
..
....

3.11. Cronograma:

- **meses 1-3:** Revisión bibliográfica sobre cálculos de secciones eficaces promediadas térmicamente, programas computacionales para cálculos de secciones eficaces y amplitudes de decaimientos, propiedades de los detectores y filtros de selección de datos en el LHC, propagación de los diferentes tipos de rayos cósmicos a través de la galaxia. En esta fase también se formarán los estudiantes de maestría Doctorado en los tópicos específicos relativos a la investigación, así como motivarle a tomar parte activa en todas las fases de desarrollo del proyecto.
- **meses 3-6** Durante esta fase desarrollaremos las herramientas computacionales necesarias para el proyecto, y se desarrollarán los cálculos analíticos necesarios.

Con los colaboradores de Brasil y Valencia hemos desarrollado un programa computacional en PYTHIA para calcular el nivel de precisión con el que se puede llegar a medir en el LHC la correlación entre el ángulo de mezcla atmosférico de neutrinos y el cociente decaimientos a dos cuerpos: $\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow W^\pm \mu^\mp$ sobre $\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow W^\pm \tau^\mp$, cuando el W^\pm decae hadrónicamente. En esta fase se modificará el programa para implementar las nuevas correlaciones propuestas.

Para el caso en que el gravitino es la LSP debemos modificar el programa para calcular las correlaciones con base en la NLSP teniendo en cuenta los nuevos canales en los cuales la NLSP puede decaer al gravitino.

Para el seesaw radiativo, implementaremos el modelo en MicrOMEGAS. escribiremos el Lagrangiano del modelo en el lenguaje de programación LanHEP [?]. Con este programa podremos generar las cuatro tablas en el formato de CalcHEP [?], el cual podemos usar para calcular las secciones eficaces y las amplitudes de decaimiento del modelo. Como MicrOMEGAS usa internamente CalcHEP, también podremos calcular la densidad de reliquia y la sección eficaz WIMP-nucleón del modelo, implementando las correcciones a un loop necesarias para una mejor implementación de las restricciones provenientes de los resultados experimentales de detección directa. Debemos crear también una interfase en Python para hacer los llamados a los diferentes cálculos y para implementar las regiones del espacio de parámetros que son compatibles con los datos de oscilaciones de neutrinos. Paralelamente debemos hacer cálculos analíticos de las secciones eficaces promediadas térmicamente para estar seguros que los resultados de MicrOMEGAS son correctos.

- **meses 6-12** En esta parte se obtendrán y analizarán los resultados numéricos de los modelos bajo consideración. El estudiante de doctorado realizará su pasantía doctoral en un Grupo de Investigación europeo.
- **meses 12-18** En esta parte se prepararán los artículos para publicación con base en los resultados obtenidos. Uno sobre el nivel de precisión con la que se pueden medir correlaciones nuevas del modelo de ruptura bilineal de paridad R en el LHC, otro sobre la formulación de un modelo consistente de ruptura trilineal de paridad R con operadores de violación de número leptónico, con el gravitino como materia oscura inestable, y otro sobre las implicaciones fenomenológicas del seesaw radiativo en aceleradores de partículas y en experimentos de detección directa de materia oscura.

Se presentarán los resultados en al menos una conferencia internacional y se preparará el informe final del proyecto.

3.12. Equipo de trabajo:

Recurso humano (rol)	Responsabilidad	Unidades (días, meses)	# de unidades
Diego Restrepo	Investigador Principal		
Oscar Zapata	Coinvestigador		
Jose David Ruíz	Estudiante de Maestría		
Mauricio Velásquez	Estudiante de Doctorado		
Diego Aristizaba	Investigador diáspora		
Nicolás Bernal	Investigador diáspora		
Carlos Yaguna	Investigador diáspora		

3.13. Presupuesto

Rubros	Fuentes		Total
	Colciencias	Contrapartida	
Investigador Principal (15h/semana)		51,000,000	51,000,000
Coinvestigador (15h/semana)		0	0
Coinvestigador (15h/semana)		0	0
Estudiante de doctorado (Est. Instructor)	27,000,000	14,400,000	41,400,000
Estudiante de Maestría (Est. Instructor)	18,000,000	14,400,000	32,400,000
Auxiliar de Sitemas	18,000,000	0	18,000,000
Pasantias y asistencia congresos	33,500,000	7,000,000	40,500,000
Visitantes diáspora	34,000,000	7,000,000	41,000,000
Nodo blade server	10,000,000	0	10,000,000
Papeleria e impresiones	5,000,000	0	5,000,000
Administración 3 %	4,500,000	0	4,500,000
TOTAL (en pesos)	150,000,000	93,800,000	243,800,000
Total en porcentaje	61,53	38,47	100,00

3.14. Plan de acción.

Objetivo	Estrategia	Indicador	Metas		
			Bimestre 1	Bimestre 2	Bimestre 3

4. Información sobre el colombiano en el exterior

4.1. Nombres y apellidos:

4.2. Lugar y fecha de nacimiento:

4.3. Correo electrónico:

4.4. País y ciudad de residencia:

4.5. Formación académica:

4.6. Producción intelectual de los tres últimos años

4.6.1. Artículos publicados en revistas indexadas:

4.6.2. Libros y capítulos publicados:

4.7. Reconocimiento por excelencia académica:

4.8. Experiencia específica en el tema del proyecto6:

4.9. Trayectoria laboral:

4.10. Tiempo total de experiencia:

5. Información sobre el colombiano en el exterior

- 5.1. Nombres y apellidos: Nicolás Bernal Hernández**
- 5.2. Lugar y fecha de nacimiento: Cali, Colombia el 21 de noviembre de 1979**
- 5.3. Correo electrónico: nicolas@th.physik.uni-bonn.de**
- 5.4. País y ciudad de residencia: Alemania, Bonn**
- 5.5. Formación académica:**
- 5.6. Producción intelectual de los tres últimos años**
 - 5.6.1. Artículos publicados en revistas indexadas:**
 - 5.6.2. Libros y capítulos publicados:**
- 5.7. Reconocimiento por excelencia académica:**
- 5.8. Experiencia específica en el tema del proyecto6:**
- 5.9. Trayectoria laboral:**
- 5.10. Tiempo total de experiencia:**

6. Información sobre el colombiano en el exterior

6.1. Nombres y apellidos:

6.2. Lugar y fecha de nacimiento:

6.3. Correo electrónico:

6.4. País y ciudad de residencia:

6.5. Formación académica:

6.6. Producción intelectual de los tres últimos años

6.6.1. Artículos publicados en revistas indexadas:

6.6.2. Libros y capítulos publicados:

6.7. Reconocimiento por excelencia académica:

6.8. Experiencia específica en el tema del proyecto6:

6.9. Trayectoria laboral:

6.10. Tiempo total de experiencia:

7. Estrategia para la transferencia de conocimiento y tecnología

8. Trabajo colaborativo

8.1. Antecedentes

8.2. Red de trabajo

Actor	Responsabilidad
Grupo de Fenomenología de Interacciones Fundamentales	Inv. Ppal, estudiantes

8.3. Alianzas estratégicas

9. Lugares de ejecución

Actividad	Nacional	Internacional
-----------	----------	---------------

Referencias

- [1] Fermilab, “Fermilab,” <http://www.fnal.gov>.
- [2] Thomas Schwetz, Mariam Tortola, and J.W.F. Valle, “Where we are on θ_{13} : addendum to ‘Global neutrino data and recent reactor fluxes: status of three-flavour oscillation parameters’,” *New J.Phys.* **13**, 109401 (2011), * Temporary entry *, [arXiv:1108.1376 \[hep-ph\]](https://arxiv.org/abs/1108.1376).
- [3] Sacha Davidson, Enrico Nardi, and Yosef Nir, “Leptogenesis,” *Phys. Rept.* **466**, 105–177 (2008), [arXiv:0802.2962 \[hep-ph\]](https://arxiv.org/abs/0802.2962).
- [4] Gianfranco Bertone, Dan Hooper, and Joseph Silk, “Particle dark matter: Evidence, candidates and constraints,” *Phys. Rept.* **405**, 279–390 (2005), [arXiv:hep-ph/0404175](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0404175).
- [5] Gerard Jungman, Marc Kamionkowski, and Kim Griest, “Supersymmetric dark matter,” *Phys. Rept.* **267**, 195–373 (1996), [arXiv:hep-ph/9506380](https://arxiv.org/abs/hep-ph/9506380).
- [6] Claude Amsler *et al.* (Particle Data Group), “Review of particle physics,” *Phys. Lett.* **B667**, 1–1340 (2008); *Particle Dark Matter: Observations, Models and Searches*, edited by G. Bertone (Cambridge University Press, 2010).
- [7] Edward A. Baltz, Marco Battaglia, Michael E. Peskin, and Tomer Wizansky, “Determination of dark matter properties at high-energy colliders,” *Phys. Rev.* **D74**, 103521 (2006), [arXiv:hep-ph/0602187](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0602187); Won Sang Cho, Kiwoon Choi, Yeong Gyun Kim, and Chan Beom Park, “ M_T -assisted on-shell reconstruction of missing momenta and its application to spin measurement at the LHC,” *Phys. Rev.* **D79**, 031701 (2009), [arXiv:0810.4853 \[hep-ph\]](https://arxiv.org/abs/0810.4853); Pran Nath *et al.*, “The Hunt for New Physics at the Large Hadron Collider,” *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* **200-202**, 185–417 (2010), [arXiv:1001.2693 \[hep-ph\]](https://arxiv.org/abs/1001.2693).

- [8] Anne M. Green, “Determining the WIMP mass using direct detection experiments,” *JCAP* **0708**, 022 (2007), [arXiv:hep-ph/0703217](#); G. Bertone, David G. Cerdeno, J. I. Collar, and Brian C. Odom, “WIMP identification through a combined measurement of axial and scalar couplings,” *Phys. Rev. Lett.* **99**, 151301 (2007), [arXiv:0705.2502 \[astro-ph\]](#); Manuel Drees and Chung-Lin Shan, “Model-Independent Determination of the WIMP Mass from Direct Dark Matter Detection Data,” *JCAP* **0806**, 012 (2008), [arXiv:0803.4477 \[hep-ph\]](#); Anne M. Green, “Determining the WIMP mass from a single direct detection experiment, a more detailed study,” *JCAP* **0807**, 005 (2008), [arXiv:0805.1704 \[hep-ph\]](#).
- [9] Gianfranco Bertone, Wilfried Buchmuller, Laura Covi, and Alejandro Ibarra, “Gamma-Rays from Decaying Dark Matter,” *JCAP* **0711**, 003 (2007), [arXiv:0709.2299 \[astro-ph\]](#).
- [10] David Eichler, “TeV PARTICLES AS WEAKLY UNSTABLE DARK MATTER,” *Phys.Rev.Lett.* **63**, 2440 (1989); Asimina Arvanitaki, Savas Dimopoulos, Sergei Dubovsky, Peter W. Graham, Roni Harnik, *et al.*, “Astrophysical Probes of Unification,” *Phys.Rev.* **D79**, 105022 (2009), [arXiv:0812.2075 \[hep-ph\]](#); Alejandro Ibarra and David Tran, “Decaying Dark Matter and the PAMELA Anomaly,” *JCAP* **0902**, 021 (2009), [arXiv:0811.1555 \[hep-ph\]](#).
- [11] Alejandro Ibarra and David Tran, “Antimatter Signatures of Gravitino Dark Matter Decay,” *JCAP* **0807**, 002 (2008), [arXiv:0804.4596 \[astro-ph\]](#).
- [12] Matthew R. Buckley, Katherine Freese, Dan Hooper, Douglas Spolyar, and Hitoshi Murayama, “High-Energy Neutrino Signatures of Dark Matter Decaying into Leptons,” *Phys.Rev.* **D81**, 016006 (2010), [arXiv:0907.2385 \[astro-ph.HE\]](#); Alejandro Ibarra and David Tran, “Antideuterons from Dark Matter Decay,” *JCAP* **0906**, 004 (2009), [arXiv:0904.1410 \[hep-ph\]](#); Joshua T. Ruderman and Tomer Volansky, “Searching for Smoking Gun Signatures of Decaying Dark Matter,” (2009), [arXiv:0907.4373 \[hep-ph\]](#).
- [13] J. Chang *et al.*, “An excess of cosmic ray electrons at energies of 300-800 GeV,” *Nature* **456**, 362–365 (2008).
- [14] Oscar Adriani *et al.* (PAMELA), “An anomalous positron abundance in cosmic rays with energies 1.5-100 GeV,” *Nature* **458**, 607–609 (2009), [arXiv:0810.4995 \[astro-ph\]](#).
- [15] Aous A. Abdo *et al.* (The Fermi LAT), “Measurement of the Cosmic Ray e^+ plus e^- spectrum from 20 GeV to 1 TeV with the Fermi Large Area Telescope,” *Phys. Rev. Lett.* **102**, 181101 (2009), [arXiv:0905.0025 \[astro-ph.HE\]](#).
- [16] CMS-02, “The Alpha Magnetic Specrometer Experiment,” <http://ams.cern.ch/>.
- [17] E. Aprile *et al.* (XENON100), “Implications on Inelastic Dark Matter from 100 Live Days of XENON100 Data,” *Phys. Rev.* **D84**, 061101 (2011), [arXiv:1104.3121 \[astro-ph.CO\]](#).
- [18] Z. Ahmed *et al.* (The CDMS-II), “Dark Matter Search Results from the CDMS II Experiment,” *Science* **327**, 1619–1621 (2010), [arXiv:0912.3592 \[astro-ph.CO\]](#); Z. Ahmed *et al.* (CDMS-II), “Results from a Low-Energy Analysis of the CDMS II Germanium Data,” *Phys. Rev. Lett.* **106**, 131302 (2011), [arXiv:1011.2482 \[astro-ph.CO\]](#).
- [19] R. Bernabei *et al.*, “New results from DAMA/LIBRA,” *Eur. Phys. J.* **C67**, 39–49 (2010), [arXiv:1002.1028 \[astro-ph.GA\]](#).

- [20] C. E. Aalseth *et al.*, “Search for an Annual Modulation in a P-type Point Contact Germanium Dark Matter Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **107**, 141301 (2011), [arXiv:1106.0650 \[astro-ph.CO\]](#).
- [21] G. Angloher *et al.*, “Results from 730 kg days of the CRESST-II Dark Matter Search,” (2011), [arXiv:1109.0702 \[astro-ph.CO\]](#).
- [22] J. Billard, F. Mayet, and D. Santos, “Directional Detection of Dark Matter with MIMAC,” (2011), [arXiv:1110.5999 \[astro-ph.IM\]](#).
- [23] Mark Pipe (DRIFT Collaboration), “Progress report on DRIFT-II,” *J.Phys.Conf.Ser.* **203**, 012031 (2010).
- [24] Stephen P. Martin, “A Supersymmetry Primer,” (1997), [arXiv:hep-ph/9709356](#).
- [25] Howard E. Haber and Gordon L. Kane, “The Search for Supersymmetry: Probing Physics Beyond the Standard Model,” *Phys. Rept.* **117**, 75–263 (1985).
- [26] John R. Ellis, J. S. Hagelin, Dimitri V. Nanopoulos, Keith A. Olive, and M. Srednicki, “Supersymmetric relics from the big bang,” *Nucl. Phys.* **B238**, 453–476 (1984).
- [27] R. Barbier *et al.*, “R-parity violating supersymmetry,” *Phys. Rept.* **420**, 1–202 (2005), [arXiv:hep-ph/0406039](#).
- [28] Marco A. Diaz, Jorge C. Romao, and J.W.F. Valle, “Minimal supergravity with R-parity breaking,” *Nucl.Phys.* **B524**, 23–40 (1998), [arXiv:hep-ph/9706315 \[hep-ph\]](#).
- [29] M. Hirsch, M.A. Diaz, W. Porod, J.C. Romao, and J.W.F. Valle, “Neutrino masses and mixings from supersymmetry with bilinear R parity violation: A Theory for solar and atmospheric neutrino oscillations,” *Phys.Rev.* **D62**, 113008 (2000), [arXiv:hep-ph/0004115 \[hep-ph\]](#).
- [30] M.A. Diaz, M. Hirsch, W. Porod, J.C. Romao, and J.W.F. Valle, “Solar neutrino masses and mixing from bilinear R parity broken supersymmetry: Analytical versus numerical results,” *Phys.Rev.* **D68**, 013009 (2003), [arXiv:hep-ph/0302021 \[hep-ph\]](#).
- [31] N. E. Bomark, D. Choudhury, S. Lola, and P. Osland, “Supersymmetry with Trilinear R-Parity Violation at the LHC,” (2011), [arXiv:1110.2910 \[hep-ph\]](#).
- [32] Hans Peter Nilles, “Supersymmetry, Supergravity and Particle Physics,” *Phys. Rept.* **110**, 1–162 (1984).
- [33] Subir Sarkar, “Big bang nucleosynthesis and physics beyond the standard model,” *Rept. Prog. Phys.* **59**, 1493–1610 (1996), [arXiv:hep-ph/9602260](#).
- [34] Fumihiro Takayama and Masahiro Yamaguchi, “Gravitino dark matter without R-parity,” *Phys.Lett.* **B485**, 388–392 (2000), [arXiv:hep-ph/0005214 \[hep-ph\]](#); Wilfried Buchmuller, Laura Covi, Koichi Hamaguchi, Alejandro Ibarra, and Tsutomu Yanagida, “Gravitino dark matter in R-parity breaking vacua,” *JHEP* **03**, 037 (2007), [arXiv:hep-ph/0702184](#).

- [35] Alejandro Ibarra and David Tran, “Gamma Ray Spectrum from Gravitino Dark Matter Decay,” *Phys. Rev. Lett.* **100**, 061301 (2008), [arXiv:0709.4593 \[astro-ph\]](#); Laura Covi, Michael Grefe, Alejandro Ibarra, and David Tran, “Unstable Gravitino Dark Matter and Neutrino Flux,” *JCAP* **0901**, 029 (2009), [arXiv:0809.5030 \[hep-ph\]](#).
- [36] Hasan Yuksel and Matthew D. Kistler, “Dark Matter Might Decay... Just Not Today!,” *Phys. Rev.* **D78**, 023502 (2008), [arXiv:0711.2906 \[astro-ph\]](#).
- [37] Gilles Vertongen and Christoph Weniger, “Hunting Dark Matter Gamma-Ray Lines with the Fermi LAT,” *JCAP* **1105**, 027 (2011), [arXiv:1101.2610 \[hep-ph\]](#).
- [38] Ki-Young Choi, Diego Restrepo, Carlos E. Yaguna, and Oscar Zapata, “Indirect detection of gravitino dark matter including its three-body decays,” *JCAP* **1010**, 033 (2010), [arXiv:1007.1728 \[hep-ph\]](#).
- [39] Mathias Garny, Alejandro Ibarra, David Tran, and Christoph Weniger, “Gamma-Ray Lines from Radiative Dark Matter Decay,” *JCAP* **1101**, 032 (2011), [arXiv:1011.3786 \[hep-ph\]](#).
- [40] M. Hirsch, W. Porod, and D. Restrepo, “Collider signals of gravitino dark matter in bilinearly broken R-parity,” *JHEP* **03**, 062 (2005), [arXiv:hep-ph/0503059](#).
- [41] M. Hirsch and J. W. F. Valle, “Supersymmetric origin of neutrino mass,” *New J. Phys.* **6**, 76 (2004), [arXiv:hep-ph/0405015](#); M. Hirsch, A. Vicente, and W. Porod, “Spontaneous R-parity violation: Lightest neutralino decays and neutrino mixing angles at future colliders,” *Phys. Rev.* **D77**, 075005 (2008), [arXiv:0802.2896 \[hep-ph\]](#).
- [42] D. Aristizabal Sierra, Jisuke Kubo, D. Restrepo, Daijiro Suematsu, and Oscar Zapata, “Radiative seesaw: Warm dark matter, collider and lepton flavour violating signals,” *Phys. Rev.* **D79**, 013011 (2009), [arXiv:0808.3340 \[hep-ph\]](#).
- [43] D. Aristizabal Sierra and Diego Restrepo, “Leptonic Charged Higgs Decays in the Zee Model,” *JHEP* **0608**, 036 (2006), [arXiv:hep-ph/0604012 \[hep-ph\]](#).
- [44] G. Belanger, F. Boudjema, A. Pukhov, and A. Semenov, “micrOMEGAs2.0: A program to calculate the relic density of dark matter in a generic model,” *Comput. Phys. Commun.* **176**, 367–382 (2007), [arXiv:hep-ph/0607059](#).
- [45] John McDonald, “Gauge Singlet Scalars as Cold Dark Matter,” *Phys. Rev.* **D50**, 3637–3649 (1994), [arXiv:hep-ph/0702143](#); C. P. Burgess, Maxim Pospelov, and Tonnies ter Veldhuis, “The minimal model of nonbaryonic dark matter: A singlet scalar,” *Nucl. Phys.* **B619**, 709–728 (2001), [arXiv:hep-ph/0011335](#); Hooman Davoudiasl, Ryuichiro Kitano, Tianjun Li, and Hitoshi Murayama, “The new minimal standard model,” *Phys. Lett.* **B609**, 117–123 (2005), [arXiv:hep-ph/0405097](#); Vernon Barger, Paul Langacker, Mathew McCaskey, Michael J. Ramsey-Musolf, and Gabe Shaughnessy, “LHC Phenomenology of an Extended Standard Model with a Real Scalar Singlet,” *Phys. Rev.* **D77**, 035005 (2008), [arXiv:0706.4311 \[hep-ph\]](#); Rainer Dick, Robert B. Mann, and Kai E. Wunderle, “Cosmic rays through the Higgs portal,” *Nucl. Phys.* **B805**, 207–230 (2008), [arXiv:0803.1444 \[astro-ph\]](#); Carlos E. Yaguna, “Gamma rays from the annihilation of singlet scalar dark matter,” *JCAP* **0903**, 003 (2009), [arXiv:0810.4267 \[hep-ph\]](#); A. Goudelis, Y. Mambrini, and C. Yaguna, “Antimatter signals of singlet scalar dark matter,” *JCAP* **0912**, 008 (2009), [arXiv:0909.2799 \[hep-ph\]](#); Carlos E. Yaguna, “The singlet scalar as FIMP dark matter,” *JHEP* **08**, 060 (2011), [arXiv:1105.1654 \[hep-ph\]](#).

- [46] Riccardo Barbieri, Lawrence J. Hall, and Vyacheslav S. Rychkov, “Improved naturalness with a heavy Higgs: An alternative road to LHC physics,” *Phys. Rev.* **D74**, 015007 (2006), [arXiv:hep-ph/0603188](#); Debasish Majumdar and Ambar Ghosal, “Dark Matter candidate in a Heavy Higgs Model - Direct Detection Rates,” *Mod. Phys. Lett.* **A23**, 2011–2022 (2008), [arXiv:hep-ph/0607067](#); Thomas Hambye and Michel H. G. Tytgat, “Electroweak Symmetry Breaking induced by Dark Matter,” *Phys. Lett.* **B659**, 651–655 (2008), [arXiv:0707.0633 \[hep-ph\]](#); Laura Lopez Honorez, Emmanuel Nezri, Josep F. Oliver, and Michel H. G. Tytgat, “The inert doublet model: An archetype for dark matter,” *JCAP* **0702**, 028 (2007), [arXiv:hep-ph/0612275](#); Michael Gustafsson, Erik Lundstrom, Lars Bergstrom, and Joakim Edsjo, “Significant gamma lines from inert Higgs dark matter,” *Phys. Rev. Lett.* **99**, 041301 (2007), [arXiv:astro-ph/0703512](#); Prateek Agrawal, Ethan M. Dolle, and Christopher A. Krenke, “Signals of Inert Doublet Dark Matter in Neutrino Telescopes,” *Phys. Rev.* **D79**, 015015 (2009), [arXiv:0811.1798 \[hep-ph\]](#); Sarah Andreas, Michel H. G. Tytgat, and Quentin Swillens, “Neutrinos from Inert Doublet Dark Matter,” *JCAP* **0904**, 004 (2009), [arXiv:0901.1750 \[hep-ph\]](#); Emmanuel Nezri, Michel H. G. Tytgat, and Gilles Vertongen, “Positrons and antiprotons from inert doublet model dark matter,” *JCAP* **0904**, 014 (2009), [arXiv:0901.2556 \[hep-ph\]](#); Erik Lundstrom, Michael Gustafsson, and Joakim Edsjo, “The Inert Doublet Model and LEP II Limits,” *Phys. Rev.* **D79**, 035013 (2009), [arXiv:0810.3924 \[hep-ph\]](#); Ethan Dolle, Xinyu Miao, Shufang Su, and Brooks Thomas, “Dilepton Signals in the Inert Doublet Model,” *Phys. Rev.* **D81**, 035003 (2010), [arXiv:0909.3094 \[hep-ph\]](#).
- [47] Ernest Ma, “Verifiable radiative seesaw mechanism of neutrino mass and dark matter,” *Phys. Rev.* **D73**, 077301 (2006), [arXiv:hep-ph/0601225](#); Jisuke Kubo, Ernest Ma, and Daijiro Suematsu, “Cold dark matter, radiative neutrino mass, $\mu \rightarrow e\gamma$, and neutrinoless double beta decay,” *Phys. Lett.* **B642**, 18–23 (2006), [arXiv:hep-ph/0604114](#); Jisuke Kubo and Daijiro Suematsu, “Neutrino masses and CDM in a non-supersymmetric model,” *Phys. Lett.* **B643**, 336–341 (2006), [arXiv:hep-ph/0610006](#); Daijiro Suematsu, Takashi Toma, and Tetsuro Yoshida, “Reconciliation of CDM abundance and $\mu \rightarrow e\gamma$ in a radiative seesaw model,” *Phys. Rev.* **D79**, 093004 (2009), [arXiv:0903.0287 \[hep-ph\]](#); Graciela B. Gelmini, Efunwande Osoba, and Sergio Palomares-Ruiz, “Inert-Sterile Neutrino: Cold or Warm Dark Matter Candidate,” *Phys. Rev.* **D81**, 063529 (2010), [arXiv:0912.2478 \[hep-ph\]](#).
- [48] D. Aristizabal Sierra, Diego Restrepo, and Oscar Zapata, “Decaying neutralino dark matter in anomalous $U(1)_H$ models,” *Phys. Rev.* **D80**, 055010 (2009), [arXiv:0907.0682 \[hep-ph\]](#).
- [49] D. Aristizabal Sierra, W. Porod, D. Restrepo, and Carlos E. Yaguna, “Novel Higgs decay signals in R-parity violating models,” *Phys. Rev.* **D78**, 015015 (2008), [arXiv:0804.1907 \[hep-ph\]](#).
- [50] D. Aristizabal Sierra, Luis Alfredo Munoz, and Enrico Nardi, “Purely Flavored Leptogenesis,” *Phys. Rev.* **D80**, 016007 (2009), [arXiv:0904.3043 \[hep-ph\]](#).
- [51] M.B. Magro, F. de Campos, O.J.P. Eboli, W. Porod, D. Restrepo, *et al.*, “Probing neutrino mass with multilepton production at the Tevatron in the simplest R parity violation model,” *JHEP* **0309**, 071 (2003), [arXiv:hep-ph/0304232 \[hep-ph\]](#); F. de Campos, O.J.P. Eboli, M.B. Magro, W. Porod, D. Restrepo, *et al.*, “Probing neutrino mass with displaced vertices at the Tevatron,” *Phys. Rev.* **D71**, 075001 (2005), [arXiv:hep-ph/0501153 \[hep-ph\]](#); F. de Campos, O.J.P. Eboli, M.B. Magro, W. Porod, D. Restrepo, *et al.*, “Probing bilinear R-parity violating supergravity at the LHC,” *JHEP* **0805**, 048 (2008), [arXiv:0712.2156 \[hep-ph\]](#); F. de Campos, O.J.P. Eboli, M.B. Magro, D. Restrepo, and J.W.F. Valle, “Finding the Higgs Boson through Supersymmetry,” *Phys. Rev.* **D80**, 015002 (2009), [arXiv:0809.1637](#)

- [hep-ph]; F. de Campos, O.J.P. Eboli, M.B. Magro, and D. Restrepo, “Searching supersymmetry at the LHCb with displaced vertices,” *Phys.Rev.* **D79**, 055008 (2009), [arXiv:0809.0007 \[hep-ph\]](#).
- [52] F. De Campos, O.J.P. Eboli, M. Hirsch, M.B. Magro, W. Porod, *et al.*, “Probing Neutrino Oscillations in Supersymmetric Models at the Large Hadron Collider,” *Phys.Rev.* **D82**, 075002 (2010), [arXiv:1006.5075 \[hep-ph\]](#).
- [53] “Search for supersymmetry in final states with jets, missing transverse momentum and one isolated lepton in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions using 1 fb⁻¹ of ATLAS data,” (2011), [arXiv:1109.6606 \[hep-ex\]](#).
- [54] Koji Ishiwata, Shigeki Matsumoto, and Takeo Moroi, “High Energy Cosmic Rays from the Decay of Gravitino Dark Matter,” *Phys. Rev.* **D78**, 063505 (2008), [arXiv:0805.1133 \[hep-ph\]](#).
- [55] Diego Restrepo, Marco Taoso, J.W.F. Valle, and Oscar Zapata, “Gravitino dark matter and neutrino masses with bilinear R-parity violation,” (2011), * Temporary entry *, [arXiv:1109.0512 \[hep-ph\]](#).
- [56] S. Lola, P. Osland, and A.R. Raklev, “Radiative gravitino decays from R-parity violation,” *Phys.Lett.* **B656**, 83–90 (2007), [arXiv:0707.2510 \[hep-ph\]](#); N.-E. Bomark, S. Lola, P. Osland, and A.R. Raklev, “Gravitino Dark Matter and the Flavour Structure of R-violating Operators,” *Phys.Lett.* **B677**, 62–70 (2009), [arXiv:0811.2969 \[hep-ph\]](#); N.-E. Bomark, S. Lola, P. Osland, and A.R. Raklev, “Photon, Neutrino and Charged Particle Spectra from R-violating Gravitino Decays,” *Phys.Lett.* **B686**, 152–161 (2010), [arXiv:0911.3376 \[hep-ph\]](#).
- [57] Borut Bajc, Tsedenbaljir Enkhbat, Dilip Kumar Ghosh, Goran Senjanovic, and Yue Zhang, “MSSM in view of PAMELA and Fermi-LAT,” *JHEP* **1005**, 048 (2010), [arXiv:1002.3631 \[hep-ph\]](#).
- [58] Enrico Nardi, Francesco Sannino, and Alessandro Strumia, “Decaying Dark Matter can explain the electron/positron excesses,” *JCAP* **0901**, 043 (2009), [arXiv:0811.4153 \[hep-ph\]](#).
- [59] Ki-Young Choi and Carlos E. Yaguna, “New decay modes of gravitino dark matter,” *Phys.Rev.* **D82**, 015008 (2010), [arXiv:1003.3401 \[hep-ph\]](#).
- [60] B.C. Allanach, C. Balazs, G. Belanger, M. Bernhardt, F. Boudjema, *et al.*, “SUSY Les Houches Accord 2,” *Comput.Phys.Commun.* **180**, 8–25 (2009), [arXiv:0801.0045 \[hep-ph\]](#).
- [61] Torbjorn Sjostrand, Stephen Mrenna, and Peter Z. Skands, “PYTHIA 6.4 Physics and Manual,” *JHEP* **0605**, 026 (2006), [arXiv:hep-ph/0603175 \[hep-ph\]](#).
- [62] Werner Porod, “SPHeno, a program for calculating supersymmetric spectra, SUSY particle decays and SUSY particle production at e^+e^- colliders,” *Comput.Phys.Commun.* **153**, 275–315 (2003), [arXiv:hep-ph/0301101 \[hep-ph\]](#).
- [63] T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), “Search for Pair Production of Scalar Top Quarks Decaying to a τ Lepton and a b Quark in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s}=1.96$ TeV,” *Phys.Rev.Lett.* **101**, 071802 (2008), [arXiv:0802.3887 \[hep-ex\]](#).
- [64] Oren Bergman, Shigenori Seki, and Jacob Sonnenschein, “Quark mass and condensate in HQCD,” *JHEP* **0712**, 037 (2007), [arXiv:0708.2839 \[hep-th\]](#).
- [65] G. Belanger, F. Boudjema, P. Brun, A. Pukhov, S. Rosier-Lees, *et al.*, “Indirect search for dark matter with micrOMEGAs2.4,” *Comput.Phys.Commun.* **182**, 842–856 (2011), [arXiv:1004.1092 \[hep-ph\]](#).