



UNIVERSIDAD DE SONORA

UNISON
DIFUS

ACTIVITY REPORT THESIS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MASTER

PRESENTA:
FRANCISCO MARTÍNEZ SÁNCHEZ

DIRECTOR DE TESIS:
Dr. ALFREDO CASTAÑEDA



SONORA/HERMOSILLO

MES, AÑO

Activity report Thesis

por

Francisco Martínez Sánchez

Bs. Physics

Tesis presentada para obtener el grado de

Master

en el

UNISON

UNIVERSIDAD DE SONORA

Sonora/Hermosillo. Mes, Año

Índice general

1. Física de Partículas	2
1.1. El Universo y su evolución	2
1.2. Modelo Estándar	7
1.2.1. Composición de la Materia y Fuerzas Fundamentales	7
1.2.2. Simetrías y Lagrangiano*	10
1.2.3. Insuficiencias del modelo*	13
1.3. Más allá del modelo estándar con la Materia Oscura	14
1.3.1. Evidencias observacionales	14
1.3.2. Alternativas Teóricas	20
1.3.3. Composición de la Materia Oscura	21
1.3.4. Experimentos de la Materia Oscura	23
2. Antecedentes Teóricos y Experimentales.	28
2.1. Física de Altas Energías.	28
2.1.1. Actualizando HLC.	30
2.2. Experimento CMS.	31
2.2.1. Reconstrucción de Muones.	33
2.2.2. Actualizando CMS.*	35
2.3. Simulación en Altas Energías.	35
2.3.1. Implementando ROOT.	37
2.3.2. Visualización de eventos con EVE.	38
2.3.3. Altas Energías con MadGraph.	38
2.3.4. Hadronización con Pythia 8.	39
2.3.5. Simulando el detector con Delphes 3.	41
2.4. Extensión del Modelo Estándar con Supersimetría.*	42
2.4.1. Supersimetría.*	43
2.4.2. Modelo Mínimo Estándar Simétrico.*	44
2.4.3. Definición	44
2.4.4. Formulación Teórica	44
3. Simulación y Análisis de Resultados.*	48
Referencias Bibliográficas	51

Índice de tablas

³²	2-1. Ancho total y $f(m_{\gamma_D})$	46
---------------	--	----

³⁴ Índice de figuras

35	1-1. (a) Mapa de anisotropías de temperatura de CMB según lo observado por el	
36	telescopio WMAP . Página de origen: https://wmap.gsfc.nasa.gov/media/121238/index.html ; (b) Representación de la evolución del universo a lo largo	
37	de 13.77 mil millones de años. Página de origen: https://wmap.gsfc.nasa.gov/media/060915/index.html	3
40	1-2. La historia del Universo. Página de origen: https://notodoeskippel.blogspot.com/2014/03/el-segundo-primordial.html	5
42	1-3. Clasificación de las partículas según el modelo estándar de las partículas elementales	8
43	1-4. (a) Gráficos de velocidad de rotación en función de la lejanía del centro de la galaxia NGC 3198. Página de origen: https://earthsky.org/clusters-nebulae-galaxies/the-coma-berenices-galaxy-cluster , (b) Visualización del cúmulo de $\sim 10^4$ galaxias Coma. Página de origen: https://earthsky.org/clusters-nebulae-galaxies/the-coma-berenices-galaxy-cluster	15
48	1-5. (a) Diagrama de cúmulo de galaxias que actúa como lente gravitatoria para una galaxia muy distante. El efecto de la masa es el de curvar el espacio-tiempo, alterando las trayectorias de la luz que emite la galaxia. Página de origen: https://alquimiayciencias.blogspot.com/2013/06/explicando-la-materia-oscura-cualquiera.html , (b) Imagen del cúmulo de galaxias Abell 3827 obtenida por el Telescopio Espacial Hubble. Página de origen: https://astronomy.com/news/2015/04/dark-matter-may-not-be-completely-dark-after-all	16
55	1-6. Simulación de un campo de galaxias circulares, el ruido de fondo es un grupo de galaxias realista de fondo. Página de origen: https://fos.cmb.ac.lk/blog/gravitational-lensing-wonders-universe-iii/	16
58	1-7. (a) Simulación computacional de materia oscura, (b) Efecto lente gravitación, (c) Simulación numérica que muestra la distribución de la materia oscura en un gran volumen del universo, los tres discos azules representan tres galaxias distantes, Las líneas que cruzan la caja representan rayos de luz de esas galaxias que se propagan a través del universo. Página de origen: http://www.cfht.hawaii.edu/News/Lensing/index.html#ST	17

64	1-8. (a) Coalisión de dos cúmulos de galaxias 1E 0657-56 conocida como cúmu-	
65	lo bala. Página de origen: https://en.wikipedia.org/wiki/Bullet_Cluster#/media/File:1e0657_scale.jpg , (b) Coalisión de las galaxias IC 2163 y NGC	
66	2207. Página de origen: https://mundo.sputniknews.com/espacio/201611051064627262-ic-2163-	
67	(c) Simulación por computadora de la futura colisión prevista de las dos ga-	
68	laxias más grandes del Grupo Local, Andrómeda (M31) y la Vía Láctea. Pá-	
69	gina de origen: https://hubblesite.org/contents/media/videos/2012/20/700-Video.html?news=true	18
70		
71		
72	2-1. (a) Diagrama de los experimentos que componen el centro de investigación del	
73	CERN . (b) Imagenes del experimento LHC . Adaptada de la página: https://theconversation.com/goodbye-for-a-while-to-the-large-hadron-collider-12238 . 29	
74		
75	2-2. Plan de actualización del experimento LHC . Pagina de origen: https://hilumilhc.web.cern.ch/content/hl-lhc-project	30
76		
77	2-3. Detector de solenoide de muón compacto. El detector consta de varias capas,	
78	cada una responsable de medir diferentes tipos de partículas. Pagina de origen:	
79	http://ippog.web.cern.ch/resources/2011/cms-slice-july-2010-version . 31	
80		
81	2-4. Comparación. Generados con python 2.7.	35
82	2-5. Comparación. Generados con python 2.7.	36
83	2-6. Comparación. Generados con python 2.7.	36
84	2-7. Diagrama de flujo de la investigación.	38
85	2-8. Perfil de diseño básico de la geometría del detector genérico asumido en Delphes.	
86	Adaptado de artículo de origen Alwall <i>et al.</i> [2014].	42
87	2-9. Extensión del Modelo Estandar bajo la existencia de la supersimetría (SUSY).	
88	Página de origen : http://www.cienciakanija.com/2009/11/13/confiamos--en-susy-lo-que-realmente-busca-el-lhc/	43
89		
90	2-10. Flujo de positrones medido por el experimento AMS-02, comparado con los ex-	
91	perimentos PAMELA, Fermi-LAT, MASS, CAPIRCE, AMS-01 y HEAT.	45
92	2-11. Ilustración esquemática de la conexión entre el sector oscuro y el modelo estándar,	
	los cuales están conectados mediante un término de mezcla dinámica.	47

93
94
95

Activity report Thesis
by
Francisco Martínez Sánchez

96 **Abstract**

⁹⁷ Introducción*

⁹⁸ En el núcleo del método científico se encuentra la interacción entre la teoría y el experimento:
⁹⁹ la formulación de una hipótesis y la prueba de dicha hipótesis a través de la experimentación,
¹⁰⁰ permitiendo que la física de altas energías se encuentre en una situación peculiar después del
¹⁰¹ descubrimiento del bosón de Higgs en 2012, el Modelo Estándar de física de partículas se ha
¹⁰² completado, pero a pesar de sus muchos éxitos, el Modelo Estándar no puede dar cuenta de
¹⁰³ muchos fenómenos que observamos, como la existencia de Dark Matter, la asimetría de materia-
¹⁰⁴ antimateria o el origen de las masas de neutrinos, entre otros. En las últimas décadas, se han
¹⁰⁵ propuesto muchas nuevas teorías para explicar estos fenómenos, pero a menudo solo se pueden
¹⁰⁶ probar utilizando los datos de los pocos experimentos del Gran Colisionador de Hadrones, ya
¹⁰⁷ que nos permiten recrear escenarios que de otra forma no podrían ser estudiados.

¹⁰⁸ Probar una teoría implica una medición cuidadosa de las colisiones en un subconjunto
¹⁰⁹ particular de la población de datos. Los equipos de análisis deben calcular con precisión cuántos
¹¹⁰ eventos se esperarían de los procesos del Modelo Estándar en ese subconjunto y, de manera
¹¹¹ similar, cuántos eventos cabría esperar de la teoría particular de la nueva física en la que
¹¹² uno está interesado. Con estos cálculos en mano, los analistas pueden mirar los datos reales
¹¹³ observados y realizar un análisis estadístico que indicara si la teoría particular es favorecida
¹¹⁴ por los datos, normalmente dicho análisis se define mediante un complejo análisis basada en
¹¹⁵ software. La mayor parte del trabajo en el desarrollo de un teoría consiste en crear un respaldo
¹¹⁶ en datos que contiene la mayor cantidad de información sobre la teoría estudiada, así como
¹¹⁷ también en hacer los cálculos precisos del Modelo Estándar. Esto es especialmente importante
¹¹⁸ dada la gran variedad de posibles teorías de la nueva física. Aquí se puede emplear un método
¹¹⁹ poderoso: la reinterpretación.

¹²⁰ La reinterpretación explota el hecho de que los efectos de una teoría pueden materializarse
¹²¹ en un subconjunto de la población de datos que ya se analizó con respecto a una teoría diferente,
¹²² si es el caso, el segmento de datos y el código para analizar están bien definidos, el próximo
¹²³ paso es calcular la estimación del efecto de la nueva teoría y realizar el análisis estadístico para
¹²⁴ decidir si es viable frente a los datos observados o no.

“No hay nada que hagan los seres vivos que no pueda entenderse desde el punto de vista de que están hechos de átomos que actúan de acuerdo con las leyes de la física.”

Richard P. Feynman

¹²⁵ Capítulo 1

¹²⁶ Física de Partículas

¹²⁷ Encontrar los fundamentos del funcionamiento de los objetos materiales que componen la
¹²⁸ naturaleza ha sido una de las tareas de la que se ha ocupado la humanidad desde tiempos
¹²⁹ inmemorables, esta cuestión se abrió paso dentro de la química del siglo XIX comenzando con
¹³⁰ la existencia del átomo con Dalton (1803) y pasó a ser parte de la física con el descubrimiento del
¹³¹ electrón por Thomson (1906) (teorizado por G. Johnstone Stoney (1881)) y de la radioactividad
¹³² por el físico francés Antoine Henri Becquerel (1896).

¹³³ Para los inicios del siglo XX es cuando el área de Física de Partículas Elementales se forma
¹³⁴ como área independiente junto con el establecimiento de la composición del núcleo atómico y
¹³⁵ con el advenimiento de los aceleradores, la misma se establece como la ciencia que estudia los
¹³⁶ componentes elementales de la materia y las interacciones entre ellos, también se la conoce como
¹³⁷ física de altas energías, con la cual se intenta teorizar sobre los orígenes del comportamiento
¹³⁸ del universo.

¹³⁹ 1.1. El Universo y su evolución

¹⁴⁰ El modelo estándar caliente del Big Bang teoriza que las condiciones iniciales para el Universo
¹⁴¹ sean dadas por campo gaussiano casi invariante o espectro de Harrison–Zeldovich [Rubakov,
¹⁴² 2009], predicción del modelo de inflación cósmica. Por lo que si se considera el estado inicial
¹⁴³ del Universo aleatorio bajo ciertas consideraciones, entonces, los postulados sobre las inhomogeneidades
¹⁴⁴ en el Universo necesitan ser estadísticas por naturaleza.

¹⁴⁵ En la actualidad la radiación del fondo cósmico de microondas (**CMB**, de sus siglas en inglés
¹⁴⁶ **Cosmic Microwave Background**) descubierto a mediados de los años 1960 y el corrimiento al
¹⁴⁷ rojo cosmológico son conjuntamente evidencia experimental disponible para validar aspectos
¹⁴⁸ importantes de la teoría del Big Bang. Se teoriza que unos 379 000 años después del Big Bang
¹⁴⁹ (período de la última dispersión) la temperatura del Universo era de unos 3000 K, la misma
¹⁵⁰ ha caído en un factor de aproximadamente 1100 K debido a la expansión del Universo. Según
¹⁵¹ se expande el Universo, los fotones del fondo cósmico de microondas se desplazan hacia el rojo,
¹⁵² haciendo que la temperatura de radiación sea inversamente proporcional al factor de escala del
¹⁵³ Universo.

¹⁵⁴ La radiación **CMB** parece a primera vista isótropa, posee pequeñas variaciones en la temperatura
¹⁵⁵ predichas por el modelo de Big Bang, estas pequeñas anisotropías o inhomogeneidades
¹⁵⁶ teorizadas fueron detectadas finalmente en los años 90 por el satélite de la NASA **COBE**

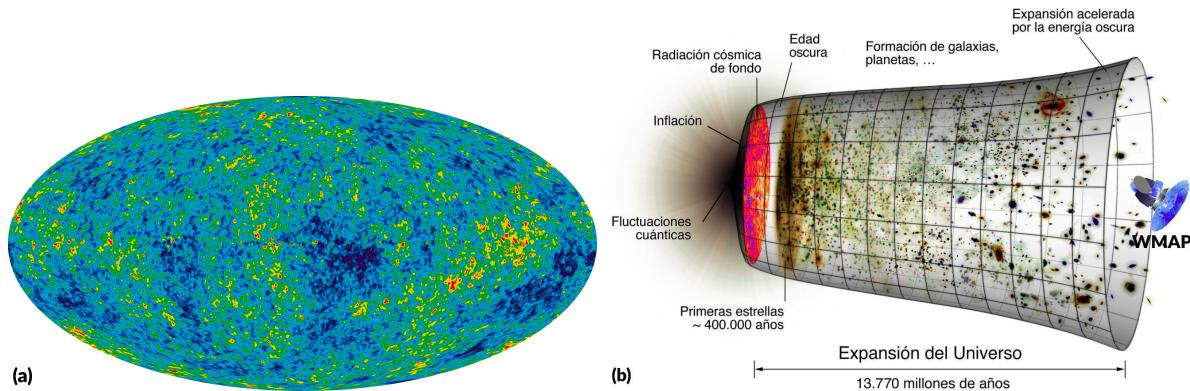


Figura 1-1: (a) Mapa de anisotropías de temperatura de **CMB** según lo observado por el telescopio **WMAP**. Página de origen: <https://wmap.gsfc.nasa.gov/media/121238/index.html>; (b) Representación de la evolución del universo a lo largo de 13.77 mil millones de años. Página de origen: <https://wmap.gsfc.nasa.gov/media/060915/index.html>

157 (**Cosmic Background Explorer**) entre 1989 y 1996, considerandose variaciones de densidad del
 158 universo primitivo y su descubrimiento arroja indicios de la formación de las primeras estructuras de gran escala y la distribución de galaxias del universo actual.
 159

160 En el 2001 la agencia espacial americana NASA lanza el **WMAP** (de sus siglas en inglés
 161 **Wilkinson Microwave Anisotropy Probe**) satélite capaz de estudiar con gran detalle la radia-
 162 ción **CMB** consiguiendo el mapa más completo posible por la humanidad. Otros instrumentos
 163 han detectado aún con más detalle y a mayor resolución angular las anisotropías del **CMB**, co-
 164 mo el **Cosmic Background Imager** pero en sólo unas zonas del cielo. El 2009 la Agencia Espacial
 165 Europea lanzó el **Planck**, un satélite de capacidades mucho mayores todavía que el **WMAP**.

166 La anisotropía del fondo de radiación de microondas está dividida en dos tipos: anisotropía
 167 primaria (debida a efectos que ocurren en la última superficie de dispersión y en la anterior) y la
 168 anisotropía secundaria (debida a efectos, como las interacciones con gases calientes o potenciales
 169 gravitacionales, entre la última superficie de dispersión y el observador).

170 La imagen detallada de la temperatura de la radiación de fondo cósmico de microondas
 171 (**CMB**, de sus siglas en inglés **Cosmic Microwave Background**) de todo el cielo del universo
 172 fue recreada a partir diversos intento de medición y con la red de datos del **WMAP**, esta
 173 revela fluctuaciones de temperatura de 13.77 mil millones de años (mostradas como diferencias
 174 de color) que corresponden a las semillas que crecieron para convertirse en galaxias. La señal de
 175 nuestra galaxia se resta con los datos de múltiples frecuencias, la resultante (Fig. 1-1a) muestra
 176 un rango de temperatura de $\pm 200 \mu K$.

177 En el modelo de concordancia, a épocas muy tempranas del Universo, todas las especies ya
 178 mencionadas estuvieron térmicamente acopladas en el gas primigenio. Conforme el Universo se
 179 expande, su temperatura disminuye y las diversas especies se desacoplan del gas, dando lugar
 180 a épocas con propiedades muy particulares (Fig. 1-2) las cuales a grandes rasgos son:

- 181 - [0s – $t_p \approx 5.3(9) \cdot 10^{-44}$ s] **Época de Planck** : es el período de tiempo en la historia
 182 en segundos, es el universo más temprano durante el cual las cuatro fuerzas fundamen-
 183 tales (interacción nuclear fuerte, interacción nuclear débil, interacción electromagnética e
 184 interacción gravitatoria) están unificadas y no existen todavía las partículas elementales,

185 la mecánica cuántica estándar teoriza que el tiempo de plack está dado por:

$$t_p \equiv \sqrt{\hbar G/c^5} \quad (1-1)$$

186 donde G es la constante de Gravitación Universal, c es la constante de gravitación universal,
187 \hbar es la constante de Planck reducida. t_p tiempo de Planck o cronón, es la unidad de
188 tiempo, considerada como el intervalo temporal que representa el instante de tiempo más
189 pequeño en el que las leyes de la física podrían ser utilizadas para estudiar la naturaleza
190 y evolución del Universo.

191 - $[(t_p - 10^{-5}s)]$ **Época de Gran Unificación** : asumiendo que la naturaleza está
192 descrita por una Teoría de Gran Unificación, este es el período en la evolución del universo
193 temprano que siguió a la Época de Planck. La temperatura durante esta época se teoriza
194 en 10^{27} K con una energía de $10^{15} GeV \gtrsim 10 TeV$. Así que, todos los procesos (y las
195 hipótesis para explicarlos) que ocurren en esta fase del Universo tales como el inicio de la
196 gran explosión, inflación, bariogénesis y otros, son especulativos.

- 197 • $[(t_p - 10^{-35}s)]$ **Primera congelación** : la gravedad se separó para siempre de las
198 otras fuerzas, y la expansión universal se opuso por primera vez a la gravedad. Antes
199 de ese tiempo se le conoce como el período inflacionario.
- 200 • $[(10^{-35}s - 10^{-10}s)]$ **Segunda congelación** : se congela la fuerza fuerte, permitiendo
201 la creación de los átomos.
- 202 • $[(10^{-10} - 10^{-5}s)]$ **Tercera congelación** : se congela la fuerza débil y la fuerza
203 electromagnética.

204 - $[(10^{-5}s - 1s)]$ **Universo temprano** : la energía decae a $200 MeV$ permitiendo la transición
205 de fase quark-gluón (confinamiento en bariones y mesones), existe un plasma caliente
206 con todos los compuestos existentes en equilibrio térmico, con la expansión la temperatura,
207 energía y por lo tanto la tasa de interacción disminuyen, desacoplando el plasma.
208 Cuando la energía del Universo alcanza $\sim 0.5 MeV$, solamente los electrones, protones,
209 neutrones y los fotones permanecen acoplados en el plasma, mientras el resto de las especies,
210 como los neutrinos ($\sim 1 MeV$), ya se han desacoplado.

211 - $[(1s - 3/5 min)]$ **Nucleosíntesis** : Momento en que la energía del Universo alcanza
212 $\sim 0.05 MeV$ las reacciones nucleares llegan a ser eficientes por lo tanto, los protones y
213 neutrones libres forman elementos ligeros como el helio, litio, deuterio. Las predicciones
214 teóricas de la nucleosíntesis primigenia ajustan bastante bien los datos observacionales
215 concluyendo que la densidad bariónica en el Universo es ~ 0.05 de la densidad crítica
216 fundamentando así que la presencia de materia no bariónica en el Universo.

217 - $[6 \cdot 10^5 \text{ años}]$ **Igualdad materia-radiación** : la energía del Universo es $\sim 1 eV$ y
218 la densidad de materia es igual a la densidad de radiación $\Omega_x(t) = \Omega_z(t)$, anteriormente
219 había un dominio de la radiación, deapués de esta época hay una prevalencia de la materia,
220 las observaciones del **CMB** en el corrimiento del rojo $z = 3100$ fundamentan este hecho.

221 - $[37.5 \cdot 10^5 \text{ años}]$ **Recombinacion** : la energía del Universo disminuye a $\sim 0.1eV$,
222 los fotones y los electrones se desacoplan de la materia como resultado de la dispersión

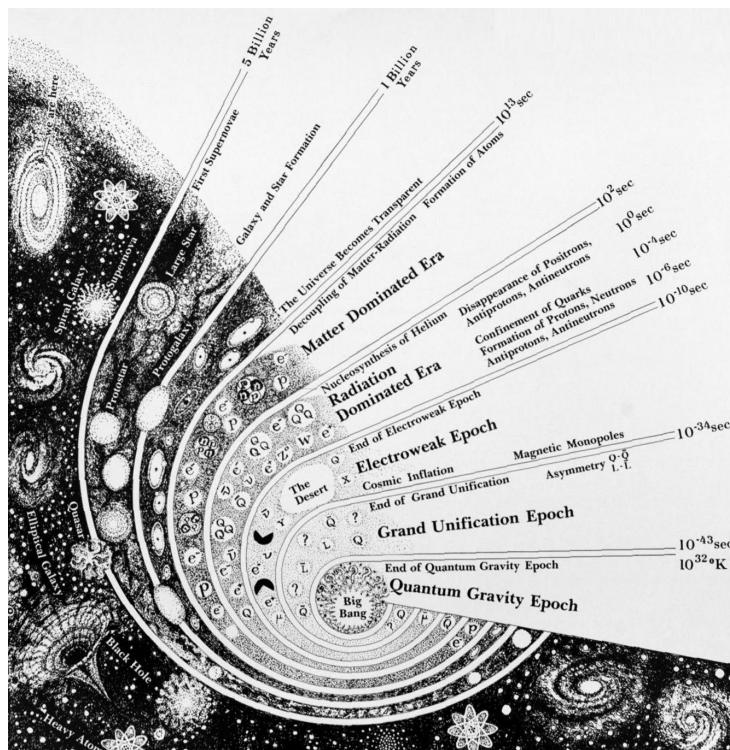


Figura 1-2: La historia del Universo. Página de origen: <https://notodoeskippel.blogspot.com/2014/03/el-segundo-primordial.html>

223 de Compton, como resultado hay una recombinação de los electrones libres con los
 224 protones, con la formación de átomos los fotones puedan viajar en el Universo como
 225 reliquias térmicas sin ser dispersados por los electrones y que hoy podemos observar como
 226 **CMB** en el corrimiento del rojo corrimiento $z \approx 1090$.

227 - [1.377 · 10^{10} años] **Formación de estructuras** Las pequeñas perturbaciones en la
 228 distribución de la materia oscura comienzan a crecer debido a la acción de la fuerza de
 229 gravedad dando lugar a la formación de grandes estructuras en el Universo. Los pozos
 230 gravitacionales de estas estructuras gravitacionales atraen a su vez a la materia bariónica
 231 dando a lugar a las galaxias y cúmulos de galaxias.

232 El extremo izquierdo de la Fig. 1-1b representa el momento más temprano que ahora po-
 233 demos investigar, cuando un período de “inflación” produjo una explosión de crecimiento ex-
 234 ponencial en el universo. (El tamaño se representa por la extensión vertical de la cuadrícula
 235 en este gráfico). Durante los próximos miles de millones de años, la expansión del universo se
 236 desaceleró gradualmente a medida que la materia en el universo se empujó sobre sí misma a
 237 través de la gravedad. Más recientemente, la expansión ha comenzado a acelerarse nuevamente
 238 a medida que los efectos repulsivos de la energía oscura han llegado a dominar la expansión del
 239 universo. La luz incandescente vista por **WMAP** se emitió aproximadamente 375.000 años
 240 después de la inflación y ha atravesado el universo en gran medida sin impedimentos desde
 241 entonces. Al analizar detenidamente el espectro de potencia, los cosmólogos determinaron que

242 nuestro universo es espacialmente plano con un 0,5 % de margen de error.

243 El satélite artificial Planck como parte del programa científico Horizon 2000 de la Agencia
244 Espacial Europea es lanzado en el 2009 con la intención de detectar las anisotropías en el fondo
245 cósmico de microondas en casi todo el cielo menos un octavo, con una resolución y sensibilidad
246 sin precedentes.

247 La información obtenida por el satélite Planck del **CMB** muestra pequeñas fluctuaciones de
248 temperatura que corresponden a regiones de densidades ligeramente diferentes en épocas muy
249 tempranas, que representan las semillas de toda estructura futura resultado de las fluctuaciones
250 que surgieron inmediatamente después del Big Bang y que se extendieron durante el período de
251 expansión acelerada (inflación). Diseñado para mapear estas fluctuaciones en todo el cielo con
252 mayor resolución y sensibilidad que nunca pudiendo determinar la composición y la evolución
253 del Universo desde su nacimiento hasta nuestros días [Collaboration, 2019].

254 En general, la información extraída del nuevo mapa de Planck proporciona una excelente
255 confirmación del modelo estándar de cosmología con una precisión sin precedentes, estableciendo
256 un nuevo punto de referencia en nuestro manifiesto de los contenidos del Universo y debido a
257 que la precisión del mapa de Planck es tan alta, también permitió revelar algunas características
258 peculiares inexplicables que pueden requerir una nueva física para ser entendidas.

259 Entre los hallazgos más sorprendentes están:

260 - Las fluctuaciones en las temperaturas de **CMB** a grandes escalas angulares no coinciden
261 con las predichas por el modelo estándar; sus señales no son tan fuertes como se esperaba
262 de la estructura a menor escala revelada por Planck.

263 - Se reafirma la asimetría en las temperaturas medias en hemisferios opuestos del cielo. Esto
264 va en contra de la predicción hecha por el modelo estándar de que el Universo debería ser
265 ampliamente similar en cualquier dirección que miremos.

266 - Se reafirma la existencia de un punto frío se extiende sobre un parche de cielo que es
267 mucho más grande de lo esperado.

268 Estos últimos dos puntos ya se habían intuido con la misión **WMAP** de la NASA, pero fueron
269 ignorados en gran medida debido a las dudas persistentes sobre su origen cósmico [Collaboration,
270 2019].

271 Una forma de explicar las anomalías es proponer que el Universo, de hecho, no es el mismo
272 en todas las direcciones en una escala mayor de lo que podemos observar. En este escenario,
273 los rayos de luz del CMB pueden haber tomado una ruta más complicada a través del Universo
274 de lo que se entendía anteriormente, lo que resulta en algunos de los patrones inusuales obser-
275 vados hoy, sin embargo, sin la consideración de las anomalías, los datos de Planck se ajustan
276 espectacularmente bien a las expectativas de un modelo bastante simple del Universo.

277 Esto permitió obtener valores mas refinados de los obtenidos por el **WMAP** de la compo-
278 sición de la materia que compone el universo, sus resultados fueron 4.9 % de la masa bariónica.
279 La materia oscura, que hasta ahora solo se ha detectado indirectamente por su influencia gra-
280 vitacional, representa el 26.8 % y la energía oscura con un porcentaje de 68.3 % siendo la fuerza
281 misteriosa posible responsable de acelerar la expansión del Universo.

282 Los datos de Planck establecen la velocidad a la que el Universo se está expandiendo
283 hoy(constante de Hubble) con $H_0 = 67.15 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ implicando que la edad del Uni-
284 verso teorizada en la Fig. 1-1b.

285 1.2. Modelo Estándar

286 El modelo estándar (**ME**) es el formalismo teórico-experimental que hasta el día de hoy
287 describe con mayor precisión las interacciones entre las partículas elementales y los diferentes
288 tipos de fuerzas que experimentan las mismas. Los mayores desarrollos teóricos y descubrimien-
289 tos experimentales que dieron forma al modelo estándar se tuvieron en la segunda mitad del
290 siglo XX con el desarrollo de la Teoría Cuántica de Campo, fruto del esfuerzo de científicos
291 de todo el mundo, los cuales a partir de los modelos teóricos y observaciones experimentales
292 construyeron una clasificación de las partículas en base a sus propiedades fundamentales como
293 lo son la masa, la carga eléctrica, el espín, entre otras. Dicha clasificación se muestra en la
294 Figura 1-3.

295 En el mundo atómico y subatómico se tratan los problemas con la mecánica cuántica y
296 unido a esto las magnitudes de las energías que se manejan para escudriñar el mundo subnuclear
297 requiere del uso de la mecánica relativista superior en complejidad a la mecánica newtoniana,
298 entonces la formulación conjunta de la mecánica cuántica y la mecánica relativista se expresa
299 adecuadamente en el lenguaje de la Teoría Cuántica del Campo, que es capaz de describir la
300 aniquilación, creación, decaimientos e interacciones de las partículas elementales, así teorías
301 sobre física de las partículas elementales se describen con el lenguaje de teoría cuántica del
302 campo.

303 1.2.1. Composición de la Materia y Fuerzas Fundamentales

304 El Modelo Estándar (**SM**) describe la composición del universo usando 6 quarks, 6 leptones
305 y algunas partículas portadoras de las cuatro fuerzas (o interacciones) conocidas, cada una
306 mediada por una partícula fundamental, ellas son los fotones γ (interacción electromagnética),
307 los higgs **H** (interacción gravitatoria), los gluones **g** (interacción fuerte) y las partículas **W** y **Z**
308 (fuerza débil). Actualmente la Gravedad está incluida solamente en el Modelo Estándar como
309 hipótesis especulativa, pues los bosones higgs no se han observados directamente aún.

310 Las partículas elementales están divididas en dos categorías según el valor de su espín en
311 fermiones (espín semi-entero, para elementales 1/2) y bosones (espín entero, para elementales 1
312 menos el higgs con 0), estos obedecen también a la estadística de Fermi-Dirac y la estadística de
313 Bose-Einstein, respectivamente, solo cumpliendo el principio de exclusión de Pauli los primeros.

314 Como se observa en la Fig. 1-3 los fermiones están a la vez divididos en dos subgrupos
315 importantes (quarks y leptones), estos con claras diferencias palmeables:

316 - **Carga** : los leptones poseen carga eléctrica neutra (los neutralinos) o una carga funda-
317 mental unidad (electrón, muón y tau), los quarks, por otra parte, disponen de cargas
318 fraccionadas ($-1/3$ o $+2/3$).

319 - **Fuerzas** : la fuerza fuerte mediada por sus partículas portadoras los gluones **g** mantiene
320 unido los núcleos atómicos y solo actúa sobre los quarks razón por la cual no existirán
321 nunca libremente en la naturaleza, esta fuerza además aumenta a medida que se mueven
322 los quarks entre sí, asegurando que un quark libre nunca se detecte.

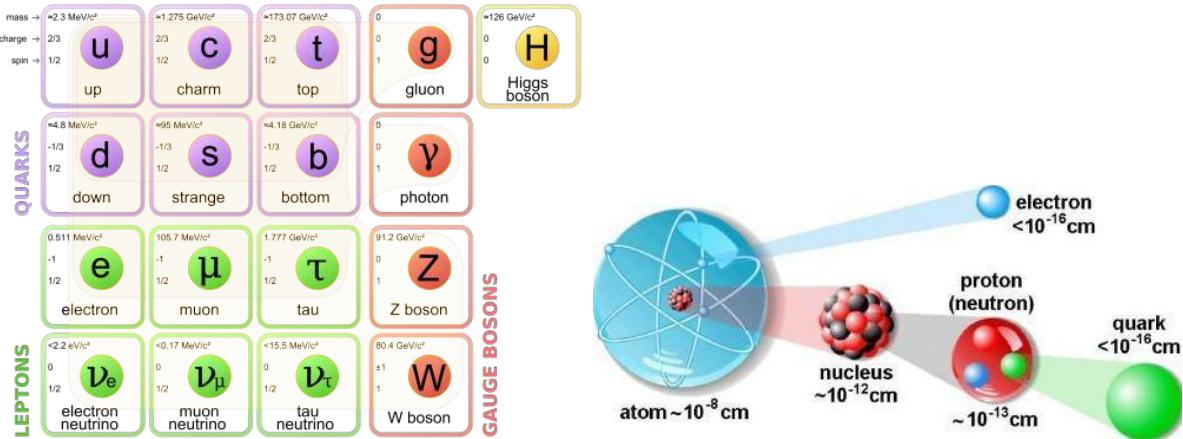


Figura 1-3: Clasificación de las partículas según el modelo estándar de las partículas elementales

323 Los Quark

324 El campo de estudio dedicado a las interacciones entre quarks y gluones se llama Cromo-
 325 dinámica Cuántica (**QCD**), en concreto explica la interacción entre los quarks mediante el
 326 intercambio de gluones que son los portadores de un nuevo número cuántico (el color el cual
 327 fue introducido por Greenberg en 1964 para restaurar el principio de Pauli) para formar todas
 328 las partículas que interactúan fuertemente (hadrones), ya sean mesones donde interactúan
 329 quark y antiquark, **q̄q**, o bariones donde interactúan tres quarks de diferente color, **qqq** dado
 330 que los quarks son partículas de espín semi-entero, dos quarks del mismo tipo no podían tener
 331 los mismos números cuánticos.

332 Ejemplos de bariones:

- 333 - **Los delta** : también llamados resonancias delta son bariones relativamente ligeros (1.232 ± 1 MeV/c²), están compuestos por un quark arriba **u** y un quark abajo **d**. Algunas partí-
 334 culas que forman parte de esta familia son Δ^{++} , Δ^+ , Δ^- , Δ^0 , compuestos por **uuu**, **uud**,
 335 **udd** y **ddd**, respectivamente.
- 336 - **Los lambda** : está compuesto por un quark arriba **u**, uno abajo **d** y todas las combina-
 337 ciones con los quarks restantes. Las partículas que forman parte de la familia son Λ^0 , Λ_c^+ ,
 338 Λ_b^0 y Λ_t^+ , compuestos por **uds**, **udc**, **udb** y , **udt**, respectivamente.
- 339 - **Los xi** : está compuesto por tres quarks: un quark arriba (**u**) o abajo (**d**) y dos quarks más
 340 pesados. Estas partículas son inestables, que les lleva a desintegrarse rápidamente en
 341 partículas más ligeras a través de una cadena de desintegraciones. Las partículas que
 342 forman parte de la familia Ξ_{abc}^i donde $i = \{++, +, -, 0\}$, algunos ejemplos son Ξ^0 , Ξ^- ,
 343 Ξ_c^+ , Ξ_c^0 , compuestos por la combinación de quarks **uss**, **dss**, **usc**, **dsc**, respectivamente.
- 344 - **El omega negativo** : son una familia de partículas que no poseen ningún quark arriba (**u**)
 345 o quark abajo (**d**), además el Modelo Estándar teoriza la inexistencia con de combinaciones
 346 que contengan quarks cima **t**. Las familias que forman parte de la familia son Ω_{abc}^i donde
 347 $i = \{++, +, -, 0\}$ relacionado con la respectiva carga resultante, algunos ejemplos
 348

349 son Ω^- , Ω_c^0 , Ω_{bb}^- , Ω^{-0}_{cbb} , compuestos por la combinación quarks **sss**, **css**, **sbb**, **cbb**,
350 respectivamente.

351 - **El neutrón (N^0)** : es incluida en la definición de nucleones ya que conforman el núcleo
352 de los átomos, es una partícula subatómica sin carga neta, de la **QCD** se define que es
353 partícula compuesta por la unión estable de quarks **udd**.

354 - **El protón (p^+)** : es incluida en la definición de nucleones ya que conforman el núcleo de
355 los átomos, es una partícula subatómica con una carga eléctrica elemental positiva, de la
356 **QCD** se define que es partícula compuesta por la unión estable **uud**.

357 hay una regla extra para todos los sub-índices abc , no se incluye el símbolo correspondiente al
358 quark **s**, y con la regla que forma parte de la definición del barión referido sumado al valor de
359 la carga incluida en el supra-índice i es inducible la inclusión de los quarks **u** y **d**, de esta forma
360 lógica se reconstruye de forma únicamente la simbología anteriormente descrita . Todas partículas
361 anteriormente conformadas se pueden distinguir por su carga eléctrica, y cada una posee una
362 respectiva antipartícula con carga opuesta, formadas por sus correspondientes antiquarks.

363 Ejemplos de mesones son:

364 - **El pión** : son la familia π^i donde $i = \{+, -, 0\}$ está compuesto por un quark y un
365 antiquark, siendo y es el más ligero de todo el grupo, de manera general son muy inestables.
366 Las partículas que forman parte de su familia son π^+ , π^- y π^0 , compuestos por los
367 quarks **u** $\bar{d}, **d** $\bar{u} y **u** $\bar{u}/**d** $\bar{d}, respectivamente.$$$$

368 - **El kaon** : es de la familia K estos contienen dos quarks, siendo uno de ellos un quark o
369 antiquark extraño. Las partículas que forman parte de la familia son K^+ , K^0 , K_S^0 y K_L^0 ,
370 compuestos por los quark **u** $\bar{s}, **d** $\bar{s}, [**d** $\bar{s} - **s** $\bar{d}] $/\sqrt{2}$, [**d** $\bar{s} + **s** $\bar{d}] $/\sqrt{2}$, respectivamente.$$$$$$

371 - **El rho** : son una familia de partículas de corta vida, estos pueden ser interpretados como
372 un estado ligado de un quark y un anti-quark , siendo una versión excitada de un pión,
373 su diferencia radica en el valor de su espín entero (un mesón vectorial). Las partículas
374 que forman parte de la familia son ρ^+ , ρ^- y ρ^0 compuestos por los quarks **u** $\bar{d}, **d** $\bar{u}, [**u** \bar{u} -
375 **d** $\bar{d}] $/\sqrt{2}$, respectivamente.$$$

376 - **El B** : son partículas compuestas de un antiquark fondo **b** con otro quark. Las partículas
377 que forman parte de la familia son B^+ , B^0 , B_S^0 y B_C^0 compuestos por los quarks **u** $\bar{b}, **d** $\bar{b},
378 **s** $\bar{b} y **c** $\bar{b}, respectivamente.$$$$

379 - **El Eta** : son de la familia η están compuestos de una mezcla de quarks arriba, abajo y
380 extraños con sus correspondientes antiquarks.

381 Los leptones

382 Los leptones forman parte de la familia de los fermiones por lo cual poseen espín semi-
383 entero, además no poseen carga hadrónica o de color y por lo tanto tampoco experimentan
384 la interacción nuclear fuerte. Se han identificado tres sabores característicos, el electrón (e),
385 el muón (μ) y el tauón (τ), respectivamente representado por un par de partículas llamadas
386 doblete débil, una tiene carga masiva que lleva el mismo nombre que su sabor y la otra es una
387 partícula neutra casi sin masa llamada neutrino.

- 388 - **El electrón** : es una partícula elemental perteneciente a la primera generación de los
 389 leptones, representada por el símbolo e^- posee una carga eléctrica elemental negativa. Su
 390 antipartícula es denominada positrón idéntica excepto por la carga de signo opuesto.
- 391 - **El muón** : es una partícula elemental masiva perteneciente a la segunda generación de
 392 leptones, representada por el símbolo μ^- su masa es 100 veces mayor que la del electrón.
 393 Su correspondiente antipartícula es el antimuón (μ^+).
- 394 - **El tau** : llamada a veces tauón, es una partícula elemental masiva que pertenece a la
 395 tercera generación de leptones, representada por el símbolo τ^- , su masa es cerca de 3500
 396 veces mayor que la del electrón. Su correspondiente antipartícula es el antitau o antitauón
 397 (τ^+).
- 398 - **Los neutrinos** : son partículas subatómicas sin carga y de espín 1/2, que estas partículas
 399 tienen masa muy pequeña, su interacción con las demás partículas es mínima, por lo
 400 que pasan a través de la materia ordinaria sin apenas perturbarla. Existen tres tipos de
 401 neutrinos asociados a cada una de las familias leptónicas (o sabores): neutrino electrónico
 402 (v_e), neutrino muónico (v_μ) y neutrino tauónico (v_τ) más sus respectivas antipartículas.

403 Cada partícula anteriormente descrita con su correspondiente anti-partícula corresponde
 404 con la materia bariónica.

405 1.2.2. Simetrías y Lagrangiano*

406 La variedad de partículas, elementales y compuestas, sugirió el uso de simetrías para entender
 407 las relaciones entre ellas, estás existen cuando la expresión matemática de las leyes de la física es
 408 independiente (invariante) del sistema de referencia, estas simetrías son internas ya que
 409 relacionan partículas entre sí. La búsqueda de la simetría responsable de las similitudes entre
 410 los hadrones condujo a la formulación de la teoría de quarks, como base del espacio donde opera
 411 el grupo clasificador de hadrones **SU(3)**. Aparte de los grupos de clasificación hay grupos que
 412 corresponden a *simetrías espontáneamente rotas*.

413 El papel de las simetrías en la física de partículas elementales subió a un rango superior
 414 en la década de los cincuenta cuando se les identificó como determinantes de la dinámica al
 415 postularse como simetrías locales, es decir cuando se exige que las transformaciones que forman
 416 el grupo correspondiente varíen de punto a punto en el espacio cuatridimensional cotidiano.
 417 A estas simetrías se les denomina simetrías de norma y para que sean exactas se requiere la
 418 existencia de campos que representan las fuerzas (las partículas cuyo intercambio entre las
 419 partículas ordinarias son la causa de las interacciones conocidas o de nuevas interacciones). Así
 420 la interacción electromagnética es consecuencia ineludible de la simetría de norma asociada al
 421 grupo **U(1)**, las interacciones débiles junto con las electromagnéticas resultan de la simetría de
 422 norma **SU(2) \otimes U(1)**, y las interacciones entre quarks de una simetría de norma **SU(3)_c** que
 423 opera en el espacio tridimensional de color.

424 Sin embargo las partículas responsables de interacciones deben ser de masa cero, como
 425 lo es el fotón, si las simetrías de norma son exactas y explícitas. Esta última cualidad es
 426 opuesta a la de ser espontáneamente rota. Siendo un hecho experimental el que las interacciones
 427 débiles (responsables de la radioactividad) son de muy corto alcance, deben ser entonces los
 428 mediadores de esta interacción de masa muy grande. Esto solo se concibe si la simetría de

429 norma correspondiente a esta interacción está espontáneamente rota. Para que este fenómeno
 430 acontezca es necesario un ingrediente adicional en el modelo o cuadro completo. Este nuevo
 431 ingrediente puede ser un bosón especial llamado Higgs cuya existencia aun no ha sido establecida
 432 experimentalmente y cuya búsqueda es uno de los motivos principales detrás de la construcción
 433 de nuevos aceleradores gigantescos, como el LHC (Large Hadron Collider) en el CERN.

434 El **SM** consiste entonces en un contenido de materia, los quarks y los leptones en tres
 435 familias, con una dinámica dictada por la simetría de norma $\mathbf{U(1)} \otimes \mathbf{SU(2)} \otimes \mathbf{SU(3)_c}$ y con un
 436 elemento adicional, el Higgs, responsable de la rotura (parcial) espontánea de $\mathbf{U(1)} \otimes \mathbf{SU(2)}$.

437 El lagrangiano completo del modelo estandar:

$$\mathcal{L}_{SM} = \mathcal{L}_{gauge} + \mathcal{L}_{Fermion} + \mathcal{L}_{Higgs} + \mathcal{L}_{Yukawa} + \mathcal{L}_{GF} + \mathcal{L}_{Ghost} \quad (1-2)$$

438 donde tenemos que:

439 - \mathcal{L}_{gauge} : resultado de la teoría de campo gauge (teoría de gauge o teoría de recalibración)
 440 resume la interacción entre fermiones como resultado de la introducción de transformacio-
 441 nes pertenecientes al grupo de simetría interna. Esta transformación de gauge modifica
 442 un grado de libertad interno sin cambiar ninguna propiedad observable física. Esta trans-
 443 formación posee su respectivo campo de Yang-Mills asociado a las transformaciones y que
 444 describe la interacción física entre diferentes campos fermiónicos. Por ejemplo el campo
 445 electromagnético es un campo de gauge que describe el modo de interactuar de fermiones
 446 dotados con carga eléctrica.

447 El lagrangiano de gauge describe la dinámica de los campos fermiónicos poseyendo alguna
 448 simetría interna “local” dada por un grupo de Lie, llamado grupo de transformaciones de
 449 gauge, transformando algún grado de libertad que no modifica ninguna propiedad física
 450 observable. Las dos características formales que hacen de un campo un campo gauge son:

- 451 • Los campos gauge aparecen en el lagrangiano que rige la dinámica del campo en
 452 forma de conexión, por tanto, matemáticamente están asociadas a 1-formas que
 453 toman valores sobre una cierta álgebra de Lie.
- 454 • El campo de gauge puede ser visto como el resultado de aplicar a diferentes puntos
 455 del espacio diferentes transformaciones dentro del grupo de simetría asociado a los
 456 campos fermiónicos de la teoría.

457 Una manera de representar su ecuación matemática viene dada por:

$$\mathcal{L}_{gauge} = -\frac{1}{4}G_{\mu\nu}^a G^{a\mu\nu} - \frac{1}{4}W_{\mu\nu}^a W^{a\mu\nu} - \frac{1}{4}B_{\mu\nu} B^{\mu\nu} \quad (1-3)$$

458 El desarrollo de los términos de los campos de fuerza pueden encontrarse en la referencia
 459 [Romao y Silva, 2012].

460 - $\mathcal{L}_{Fermion}$: los términos cinéticos para los fermiones, incluyendo la interacción con el gauge
 461 de campo debido a sus derivadas covariantes, tiene su forma:

$$\mathcal{L}_{Fermion} = \sum_{quarks} i\bar{q}\gamma^\mu D_\mu q + \sum_{\psi_L} i\bar{\psi}_L \gamma^\mu D_\mu \psi_L + \sum_{\psi_R} i\psi_R \gamma^\mu D_\mu \psi_R \quad (1-4)$$

- 462 - $\mathcal{L}_{EW} = \mathcal{L}_{gauge} + \mathcal{L}_{Fermion}$: El modelo electrodébil (**EW** de sus siglas en inglés) es aquella
 463 que unifica la interacción débil y el electromagnetismo (despreciando el primer término
 464 de los lagrangianos ya que están relacionados con la interacción de la fuerza fuerte y los
 465 quarks), dos de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza, aplicada a todas las
 466 partículas del **SM**, en esa teoría los fermiones son descritos mediante un lagrangiano de
 467 Dirac generalizado adecuadamente para que sea invariante gauge bajo un cierto grupo
 468 gauge de simetría interna. Teóricamente no existe una elección única de las simetrías del
 469 lagrangiano de las interacciones electrodébiles, estas son deducidas de resultados experi-
 470 mentales.

471 De la evidencia experimental, se deduce que el grupo de simetría gauge mínimo capaz de
 472 acomodar las corrientes cargadas es **SU(2)**. La observación empírica ha permitido consta-
 473 tatar que las interacciones **EW** actúan de manera distinta sobre los fermiones dextrógiros
 474 y sobre los fermiones levógiros constituye una de las características de este modelo. La
 475 aparición de esta simetría a partir de un lagrangiano originalmente simétrico es explicado
 476 formalmente por el mecanismo de ruptura espontánea de simetría.

477 Por otro lado las fuerzas electromagnética y débil actúan sobre los mismos campos fer-
 478 miónicos y no pueden ser descritas por separado, de acuerdo que el grupo gauge mínimo que
 479 describe las interacciones electrodébiles es **U(1)_Y ⊗ SU(2)_L**. Así, las corrientes cargadas de
 480 Yang-Mills incluyen solamente fermiones levógiros y no se conocen neutrinos dextrógiros.
 481 Es por ello que los campos fermiónicos levógiros son agrupados en dobletes, mientras que
 482 los campos dextrógiros son singletes del grupo **SU(2)_L** con simetría de isospín asociada
 483 con la conservación débil del mismo (donde el subíndice **L** únicamente indica la asimetría
 484 existente entre los fermiones de distinta helicidad), además la cantidad conservada por el
 485 grupo **U(1)_Y** es la hipercarga **Y**

486 lo que quiere decir que las partículas son representantes de un grupo de gauge de tipo
 487 **U(1)_Y ⊗ SU(2)_L**.

- 488 - \mathcal{L}_{Higgs} : El mecanismo de Higgs es el proceso que da masa a las partículas elementales, en
 489 una teoría de gauge el mecanismo de Higgs dota con masa a los bosones de gauge a través
 490 de la absorción de los bosones de Nambu–Goldstone derivados de la ruptura espontánea de
 491 simetría. La implementación más simple del mecanismo agrega un campo de Higgs extra
 492 a la teoría de gauge. La ruptura espontánea de la simetría local subyacente desencadena
 493 la conversión de los componentes de este campo de Higgs a bosones de Goldstone que
 494 interactúan (al menos algunos de ellos) con los demás campos de la teoría, con el fin de
 495 producir términos de masas para (al menos algunos de) los bosones de gauge. El sistema
 496 viene descrito por un Lagrangiano con la forma:

$$\mathcal{L}_{Higgs} = (D_\mu \Phi)^\dagger D_\mu \Phi + \mu^2 \Phi^\dagger \Phi - \lambda (\Phi^\dagger \Phi)^2 = (D_\mu \Phi)^\dagger D_\mu \Phi - V(\Phi) \quad (1-5)$$

497 donde $V(\Phi) \equiv \lambda (\Phi^\dagger \Phi)^2 - \mu^2 \Phi^\dagger \Phi$ conocido como el potencial renormalizable

- 498 - \mathcal{L}_{Yukawa} : mecanismo que describe la interacción entre un campo escalar y un campo de
 499 Dirac mediante una constante de acoplamiento. La forma matemática de su lagrangiano
 500 es:

$$\mathcal{L}_{Yukawa} = -\overline{L}_L Y_L \Phi \ell_R - \overline{Q}'_L Y_d \Phi d'_R - \overline{Q}'_L Y_u \Phi u'_R + h.c \quad (1-6)$$

501 El desarrollo de esta ecuación, explicación de la notación en la referencia [Santamaria,
 502 1993; Romao y Silva, 2012]

- 503 - \mathcal{L}_{GF} :en la teoría de los *gauges*, se realiza continuamente una elección constante de un
 504 gauge, procedimiento matemático para hacer frente a grados de libertad redundantes en
 505 las variables de campo. La mayoría de las predicciones físicas cuantitativas de una teoría
 506 de *gauges* solo pueden obtenerse bajo una receta coherente para suprimir o ignorar estos
 507 grados de libertad no físicos. La fijación juiciosa del *gauge* puede simplificar enormemente
 508 los cálculos, pero se vuelve cada vez más difícil a medida que el modelo físico se vuelve
 509 más realista, esta es la forma tradicional de aplicación a la teoría cuántica de campos,
 510 la cual está llena de complicaciones relacionadas con la renormalización, especialmente
 511 cuando el cálculo continúa en órdenes superiores, de aquí que la búsqueda de procedi-
 512 mientos de obtención de *gauges* lógicamente consistentes y manejables desde el punto de
 513 vista computacional, y los esfuerzos para demostrar su equivalencia frente a una varie-
 514 dad desconcertante de dificultades técnicas, ha sido un importante impulsor de la física
 515 matemática desde finales del siglo XIX hasta el presente. Su forma matemática tiene la
 516 forma:

$$\mathcal{L}_{GF} = -\frac{1}{2\xi_G}F_G^2 - \frac{1}{2\xi_A}F_A^2 - \frac{1}{2\xi_Z}F_Z^2 - \frac{1}{2\xi_W}F_-F_+ \quad (1-7)$$

517 su desarrollo se muestra en la sección 2.6 de la referencia [Romao y Silva, 2012].

- 518 - \mathcal{L}_{Ghost} : La última pieza necesaria el **SM** es el lagrangiano fantasma, para una condición de
 519 fijación del medidor lineal, es un campo adicional que se introduce en las teorías cuánticas
 520 de campos de tipo *gauge* para mantener la consistencia de la formulación de integral, esto
 521 es dado por la receta Fadeev-Popov. La necesidad de fantasmas de Fadeev-Popov vino del
 522 requerimiento de que en la formulación de integral de caminos, las teorías cuánticas de
 523 campos deben proporcionar soluciones inequívocas, esto no es posible si una simetría de
 524 *gauge* está presente ya que no hay ningún procedimiento para seleccionar ninguna solución
 525 a partir de una serie de soluciones físicamente equivalentes, todas relacionadas por una
 526 transformación de gauge. Su formulación matemática tiene la forma:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{Ghost} = \eta_G \sum_{i=1}^4 & \left[\bar{c}_+ \frac{\partial(\delta F_+)}{\partial \alpha^i} + \bar{c}_- \frac{\partial(\delta F_-)}{\partial \alpha^i} + \bar{c}_Z \frac{\partial(\delta F_Z)}{\partial \alpha^i} + \bar{c}_A \frac{\partial(\delta F_A)}{\partial \alpha^i} + \right] c_i + \\ & \eta_G \sum_{a,b=1}^8 \bar{w}^a \frac{\partial(\delta F_G^a)}{\partial \beta^b} w^b \end{aligned} \quad (1-8)$$

527 1.2.3. Insuficiencias del modelo*

528 Incluso cuando el **SM**ha tenido gran éxito en explicar los resultados experimentales, tiene
 529 ciertas cuestiones importantes sin resolver:

530 -

531 -

532 -

533 -

534 -

535 -

536 -

537 -

538 -

539 **1.3. Más allá del modelo estándar con la Materia Oscura**

540 Detrás de la materia oscura y la energía oscura, el término oscuro hace referencia al desco-
541 nocimiento sobre cualquiera de las dos, específicamente del tipo de partículas que las componen.
542 Solo sabemos que no están compuestas de protones, neutrones, electrones o neutrinos. Además,
543 ni la materia oscura ni la energía oscura sienten las fuerzas eléctricas y magnéticas y por tanto
544 no interactúan con la luz, no la emiten ni la absorben. Son inmunes a las ondas electromagné-
545 ticas en todas las frecuencias, desde el radio, pasando por la luz visible hasta los rayos gamma,
546 de forma riguosa el calificativo oscuras no aplica, son transparentes, su existencia es supuesta
547 por porque la gravitación es universal y todo lo que tenga masa-energía crea gravedad.

548 **1.3.1. Evidencias observacionales**

549 Ambas, materia oscura y energía oscura se detectan por sus efectos gravitacionales ya que
550 una partícula de materia oscura aún no ha sido identificada, sin embargo, los nuevos experimen-
551 tos y desarrollos tecnológicos han permitido alcanzar una sensibilidad tal que hace pensar en un
552 descubrimiento inminente. A continuación expondremos algunas investigaciones que involucran
553 a tales partículas que se realizan tanto en el espacio exterior, como en los laboratorios en la
554 tierra.

555 **Rotación de las galaxias**

556 En la primera mitad del siglo pasado Paul Zwicky había estado observando agrupaciones de
557 galaxias ligadas por atracción gravitatoria, siendo el primero en utilizar el Teorema de virial,
558 del estudio de las velocidades radiales de ocho galaxias en el cúmulo Coma, Zwicky encontró
559 una dispersión de velocidad inesperadamente grande $\sigma_{cz} = (1019 \pm 360) \text{ km s}^{-1}$ (recalculado
560 en la actualidad por valor moderno $\sigma_{cz} = 1082 \text{ km s}^{-1}$ obtenido por Colless y Dunn [1996]).
561 Zwicky concluyó de estas observaciones que la densidad media del grupo Coma tendría que ser
562 ~ 400 (valor moderno recalculado de ~ 50) veces mayor que la derivada de la materia luminosa
563 (se sobreestimó la relación masa-luz del grupo Coma por asumir un parámetro de Hubble de
564 $H_o = 558 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ cuando su valor moderno de $H_o = 67.15 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$). Zwicky
565 postula:

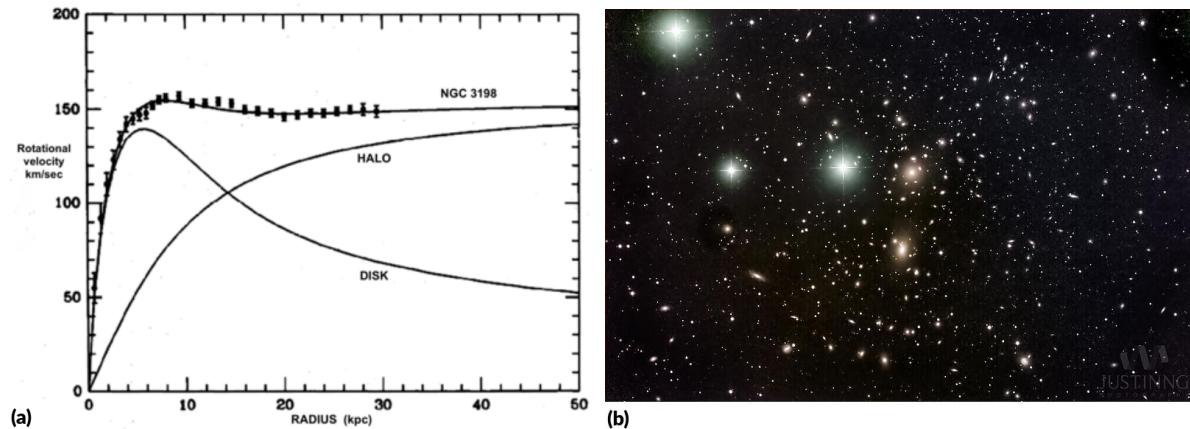


Figura 1-4: (a) Gráficos de velocidad de rotación en función de la lejanía del centro de la galaxia NGC 3198. Página de origen: <https://earthsky.org/clusters-nebulae-galaxies/the-coma-berenices-galaxy-cluster>, (b) Visualización del cúmulo de $\sim 10^4$ galaxias Coma. Página de origen: <https://earthsky.org/clusters-nebulae-galaxies/the-coma-berenices-galaxy-cluster>

“Si se confirma esta sobredensidad, llegaríamos a la sorprendente conclusión de que la materia oscura está presente en Coma con una densidad mucho mayor que la materia luminosa ... De estas consideraciones se deduce que la gran dispersión de velocidad en Coma representa un problema no resuelto”

566

presente en la referencia Bergh [1999]

567 Esta cuestión continuo siendo un enigma hasta que Vera Rubin y Kent Ford confirmaron
 568 la prueba de su existencia en 1970 al trazar la curva de rotación de la galaxia ver el gráfico
 569 correspondiente a la Fig. 1-4a para NGC 3198 (es una galaxia espiral en la constelación de la
 570 Osa Mayor) muestra que la velocidad de la materia visible es esencialmente constante aunque
 571 nos elejemos del centro para distancias mayores de $\gtrsim 5 \text{ kpc}$ desde el centro de la galaxia, en
 572 lugar de tener una caída Kepleriana proporcional a $1/r$.

573 En la actualidad se continuan los intentos por comprender el problema galáctico de la masa
 574 visible faltante, ejemplos se pueden encontrar proyectos de simulaciones [Deur, 2020; Wu y
 575 Kroupa, 2015] o mediante la comparacion empírica con los datos experimentales Mielke *et al.*
 576 [2006], con altos niveles de predicción.

577 Lentes gravitacionales

578 Otra evidencia viene de las lentes gravitacionales (Fig. 1-5). La gravedad afecta a todo el
 579 espectro de ondas electromagnéticas, incluyendo radio, infrarrojos, luz visible y ultravioleta,
 580 siendo el grado de desviación mayor mientras mayor sea la masa que actúa como lente gravi-
 581 tacional, siento esta predicción unos de los mayores resultados de Einstein, en estos cálculos
 582 se pudo evidenciar el efecto para calcular el valor de masas de grandes cúmulos midiendo las
 583 desviaciones de la luz.

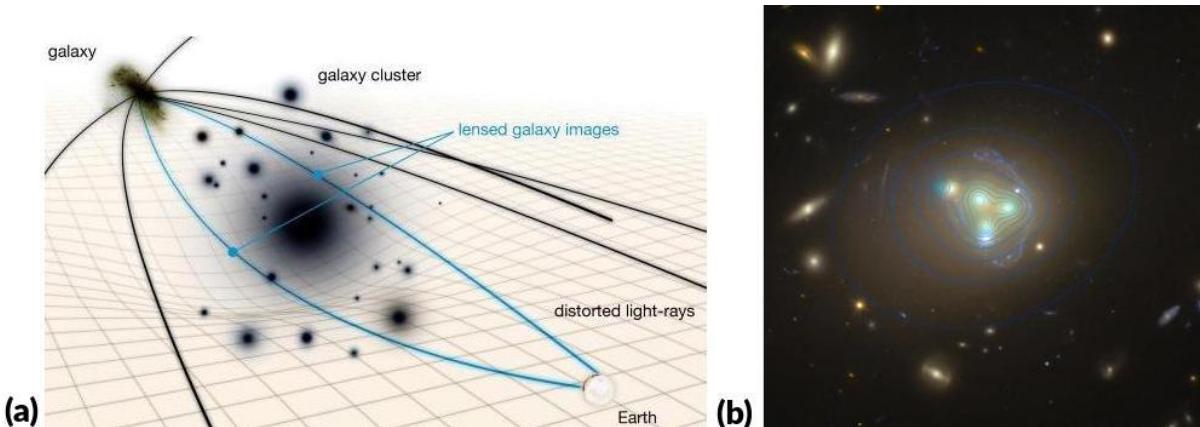


Figura 1-5: (a) Diagrama de cúmulo de galaxias que actúa como lente gravitatoria para una galaxia muy distante. El efecto de la masa es el de curvar el espacio-tiempo, alterando las trayectorias de la luz que emite la galaxia. Página de origen: <https://alquimiayciencias.blogspot.com/2013/06/explicando-la-materia-oscura-cualquiera.html>, (b) Imagen del cúmulo de galaxias Abell 3827 obtenida por el Telescopio Espacial Hubble. Página de origen: <https://astronomy.com/news/2015/04/dark-matter-may-not-be-completely-dark-after-all>

584 Dadas sus características los lentes gravitacionales son un importante herramienta para
 585 detectar la materia oscura, resultado de la comparación de lo resultados experimentales con los
 586 resultados de la relatividad general que predice la dinámica dependiente de la masa visible. En
 587 muchos casos, la lente no es lo suficientemente fuerte como para formar múltiples imágenes o
 588 arcos, sin embargo, la fuente aún está distorsionada, tanto estirada como magnificada porque
 589 es un hecho que hay algo de materia oscura entre nosotros y cada galaxia distante que vemos,
 590 de aca que todas las galaxias tienen lentes, incluso si son solo un poco, aquellas alteradas
 solo en una cantidad muy pequeña son llamadas lentes gravitacionales débiles. Nunca podemos

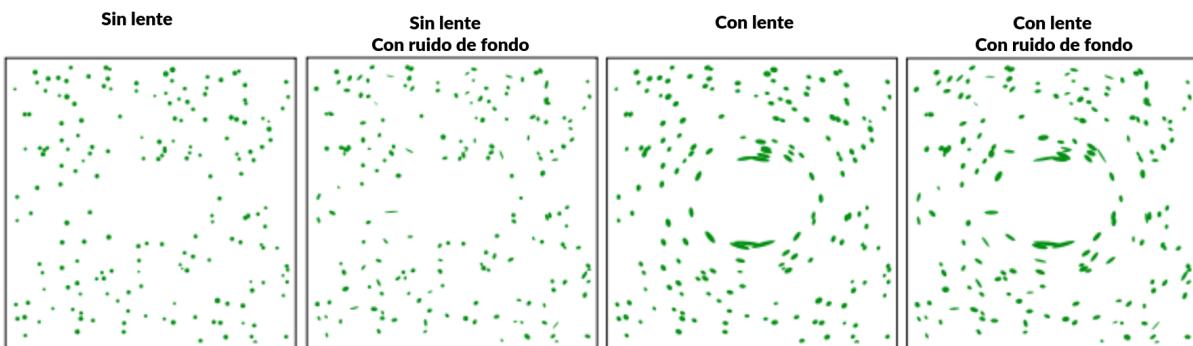


Figura 1-6: Simulación de un campo de galaxias circulares, el ruido de fondo es un grupo de galaxias realista de fondo. Página de origen: <https://fos.cmb.ac.uk/blog/gravitational-lensing-wonders-universe-iii/>

591
 592 ver esta modificación de forma con nuestros propios ojos en una imagen porque es demasiado
 593 pequeño, en vez de eso podemos calcular el efecto de lente promedio en un conjunto de galaxias,

594 normalmente bajo suposiciones (ver Fig. 1-6), como considerar que todas las galaxias tienen una
595 formas elípticas o que están orientadas al azar en el cielo, estas se traten de forma estadística.

596 Trabajos dedicados a la simulación numérica (ver referencia [Munshi y Jain, 2001; Fosalba
597 *et al.*, 2015]) para conocer los efectos de la distribución de la materia oscura en un el universo (ver
598 Fig. 1-7), las trayectorias de los rayos se desvían evidentemente por los efectos gravitacionales
599 de la materia provocando que las galaxias esten ligeramente alargadas en una dirección común
600 determinada por la distribución de la materia oscura a lo largo de esa línea de visión particular,
601 ya que la distorsión es muy pequeña, esta requiere un tratamiento estadístico cuidadoso en
muchos parches en el cielo. Las lentes gravitacionales fuertes se caracterizan por la curvada

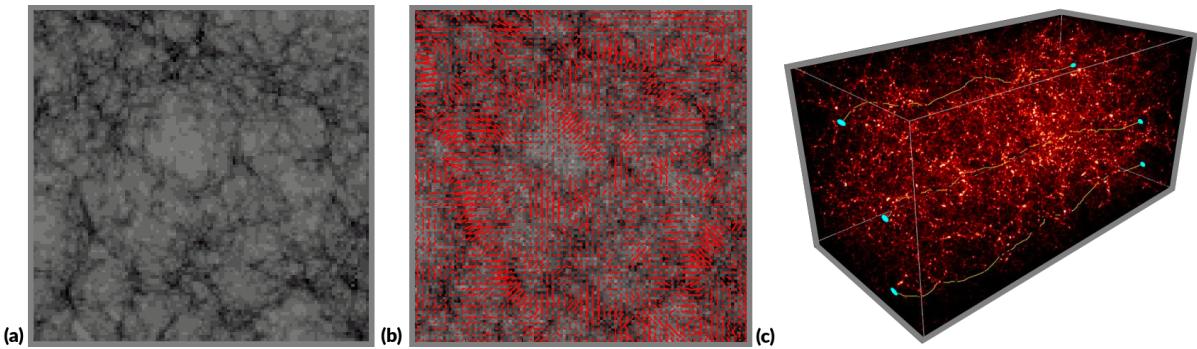


Figura 1-7: (a) Simulación computacional de materia oscura, (b) Efecto lente gravitación, (c) Simulación numérica que muestra la distribución de la materia oscura en un gran volumen del universo, los tres discos azules representan tres galaxias distantes, Las líneas que cruzan la caja representan rayos de luz de esas galaxias que se propagan a través del universo. Página de origen: <http://www.cfht.hawaii.edu/News/Lensing/index.html#ST>

602 distorsión observada de las galaxias de fondo, estas han sido observada alrededor de un cúmulo
603 poco distante como el Abell 1689 o 3827 (ver Fig. 1-5b). Midiendo la distorsión geométrica, se
604 puede obtener la masa del cúmulo que causa el fenómeno. Estas lentes permiten ver objetos
605 distantes, sobre todo galaxias lejanas, al intensificar su luz, motivo por el cual su estudio es
606 motivo de investigación (Schäfer *et al.* [2020]). Al observar la luz de las galaxias más distantes,
607 algunas tan antiguas que su formación se remonta a las primeras fases de expansión del Universo,
608 los astrónomos pueden estudiar las condiciones de hace miles de millones de años, e incluso que
609 sucedía durante la formación de estas galaxias, de forma que pueden ser aplicadas de modo
610 similar a los telescopios. Un caso especial de estos lentes son los anillos de Einstein, causada
611 por la alineación exacta de la fuente, la lente y el observador, este fue predicho por este en 1912.

612 Las microlentes se suelen formar por el paso de una estrella o planeta delante de otra
613 estrella u otro objeto más lejano. La luz del objeto distante no está tan distorsionada como
614 en las lentes fuertes, ni siquiera alcanza a la distorsión de las lentes débiles; la distorsión de
615 la imagen puede ser prácticamente imperceptible, pero la disminución en la intensidad de la
616 luz pone de manifiesto las microlentes. Gracias a las microlentes se han descubierto numerosos
617 planetas extrasolares.

619 **Coalición de galaxias**

620 Los científicos usaron el observatorio Chandra de rayos X de la NASA y el Telescopio Es-
621 pacial Hubble para estudiar el grupo, conocido como MACSJ0025.4-1222, donde se enfoca una
622 colisión de dos cúmulos de galaxias (ver Fig. 1-8a), en esta las dos áreas rosadas contienen la
623 mayor parte de la masa ordinaria de los dos grupos, el uno en forma de bala pasó a través
624 del otro grupo más grande. En el proceso de la colisión, la temperatura de la materia normal
625 aumenta y se emiten rayos X que fueron detectados por el Observatorio de Rayos X Chandra.
626 Las áreas azules son un mapa de la materia invisible hecha mediante el uso de lentes gravi-
627 cionales, donde la luz de los objetos más distantes que el grupo de balas se dobla por la
628 materia que interviene. La materia normal que se muestra en rosa está claramente separada de
629 la mayoría de la materia que comprende los grupos que se muestran en azul. La conclusión es
que la mayor parte de la materia en los grupos es materia oscura. Marsh [2019] Dada la riqueza



Figura 1-8: (a) Coalición de dos cúmulos de galaxias 1E 0657-56 conocida como cúmulo bala. Página de origen: https://en.wikipedia.org/wiki/Bullet_Cluster#/media/File:1e0657_scale.jpg, (b) Coalición de las galaxias IC 2163 y NGC 2207. Página de origen: <https://mundo.sputniknews.com/espacio/201611051064627262-ic-2163-ngc-2207-fusion/>, (c) Simulación por computadora de la futura colisión prevista de las dos galaxias más grandes del Grupo Local, Andrómeda (M31) y la Vía Láctea. Página de origen: <https://hubblesite.org/contents/media/videos/2012/20/700-Video.html?news=true>

630 en el fenómeno de coalición este es ampliamente estudiado incluso en la actualidad en el 2018
631 la **UNAM** (Universidad Nacional Autónoma de México) diseñó el **NEFER** (Nuevo Espectró-
632 metro Fabry-Perot de Extrema Resolución), invento integrable al espectrómetro **OSIRIS** del
633 Gran Telescopio Canarias (GTC) en España, permitiendo observar en dos dimensiones de alta
634 resolución la formación estelar que se produce en las galaxias e inclusive la distribución de la
635 materia oscura, todo mediante mapas bidimensionales de intensidades y velocidades de objetos
636 astronómicos extendidos, diseñado principalmente para observar la emisión y las velocidades
637 del medio interestelar de nuestra galaxia y de galaxias externas.

638 La complejidad de estos fenómenos esta siendo arduamente estudiada, bajo la apuesta de
639 que nuestra comprensión del mundo mejorara por ello, razón por lo cual los trabajos en esa linea
640 son tema actual implementando continuamente la simulación como herramienta de análisis, este
641 fue el caso de dos galaxias Andrómeda (M31) y la Vía Láctea, las cuales formaron parte de
642 un arduo trabajo basada su predicción en mediciones con el telescopio espacial Hubble del
643 movimiento adecuado de M31 en el cielo, junto con el desplazamiento al rojo de M31 (ver Fig.
644 1-8)c relacionado con la referencia van der Marel *et al.* [2012]. Mientras previas investigaciones
645 afirman la necesidad de incluir la materia oscura en las simulaciones hay que considerar algunas
646 investigaciones que bajo el excepticismo de la existencia de materia oscura intenta encontrar

648 otras fuentes de incertidumbre, posibles soluciones como las presentadas en la referencia Bilek
649 *et al.* [2018], donde se intentan adaptar la relatividad general bajo un nuevo enfoque dado
650 por la teoría **MOND** (del inglés Modified Newtonian dynamics) dando resultados que hacen
651 cuestionar que tan cerca estamos de entender la materia oscura o su existencia.

652 **Formación de estructuras**

653 En las simulaciones la inclusión de la materia oscura es fundamental para explicar la for-
654 mación de estructuras cosmológicas ya que la materia normal sucumbe a la fuerza de atracción
655 de la materia oscura formando galaxias y cúmulos de ellas, por otro lado la energía oscura es
656 cualquier entidad que haga que la expansión del universo se acelere.

657 La historia del universo es la competencia entre la materia oscura que lo frena y la energía
658 oscura que lo acelera. A medida que el espacio se expande, la materia y la radiación se diluyen;
659 en cambio, la densidad del vacío permanece constante, y por eso triunfará en la competencia,
660 el universo se expandirá cada vez a un ritmo mayor y esa aceleración tiene importantísimas
661 consecuencias para el futuro del universo, de aquí que sea crucial para el modelo cosmológico
662 del Big Bang como un componente que se corresponde directamente con las medidas de los pa-
663 rámetros asociados con la métrica **FLRW** (métrica de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker)
664 a la relatividad general.

665 En particular, las medidas de las anisotropías del fondo cósmico de microondas se corres-
666 ponden a una cosmología donde gran parte de la materia interactúa con los fotones de forma
667 más débil que las fuerzas fundamentales conocidas que acoplan las interacciones de la luz con la
668 materia bariónica. Así mismo, se necesita una cantidad significativa de materia fría no-barionica
669 para explicar la estructura a gran escala del universo. Las observaciones sugieren que la forma-
670 ción de estructuras en el Universo procede jerárquicamente, con las estructuras más pequeñas
671 uniéndose hasta formar galaxias y después cúmulos de galaxias. Según se unen las estructuras
672 en la evolución del Universo, empiezan a "brillar" que la materia bariónica se calienta a través
673 de la contracción gravitacional y los objetos se aproximan al equilibrio hidrostático. La mate-
674 ria barionica ordinaria tendría una temperatura demasiado alta y demasiada presión liberada
675 desde el Big Bang para colapsar y formar estructuras más pequeñas, como estrellas, a través de
676 la inestabilidad de Jeans. La materia oscura actúa como un compactador de estructuras. Este
677 modelo no sólo se corresponde con investigaciones estadísticas de la estructura visible en el
678 Universo sino también se corresponden de forma precisa con las predicciones de materia oscura
679 de la **WMAP**.

680 Para obtener el inverso de formación de estructuras necesita algún tipo de la materia oscura
681 para funcionar. Se han utilizado simulaciones por ordenador de miles de millones de partículas
682 de materia oscura para confirmar que el modelo de materia oscura fría de la formación de estruc-
683 turas es consistente con las estructuras observadas en el Universo mediante las observaciones
684 de galaxias, como la Sloan Digital Sky Survey y la 2dF Galaxy Redshift Survey, así como las
685 observaciones del bosque Lyman-alfa. Estos estudios han sido cruciales en la construcción del
686 modelo Lambda-CDM que mide los parámetros cosmológicos, incluyendo la parte del Universo
687 formada por báriones y la materia oscura.

688 **1.3.2. Alternativas Teóricas**

689 Para comprender y explicar las irregularidades galácticas se han tratado de realizar medidas
690 directas de la materia oscura para descubrir qué es exactamente pero con escaso éxito, motivo
691 por el cual, investigadores que no creen que exista la materia oscura, han propuesto explicaciones
692 alternativas al comportamiento de las galaxias.

693 **Modificaciones de la gravedad**

694 Una explicación alternativa a las cuestiones planteadas por la materia oscura es suponer que
695 las inconsistencias observadas son debidas a una incompleta comprensión de la Gravedad. Para
696 explicar las observaciones, a grandes distancias, las fuerzas gravitacionales son más fuertes de
697 lo que nos indicarían la mecánica newtoniana.

698 - **Teoría de Dinámica newtoniana modificada (MOND)** : hipótesis que propone una
699 modificación de las leyes de Newton para tener en cuenta las propiedades observadas
700 de las galaxias, como alternativa a la hipótesis de la existencia de materia oscura en
701 términos de los fenómenos cosmológicos, resolviendo teóricamente esta discrepancia al
702 considerar la fuerza gravitacional experimentada por una estrella en las regiones externas
703 de una galaxia proporcional al cuadrado de su aceleración centrípeta (en oposición a la
704 aceleración centrípeta en sí, como en la segunda ley de Newton), o alternativamente si la
705 fuerza gravitacional variaba inversamente con el radio (en oposición al cuadrado inverso
706 del radio, como en la ley de gravedad de Newton). En **MOND**, la violación de las leyes
707 de Newton se produce a aceleraciones extremadamente pequeñas, características de las
708 galaxias pero muy por debajo de cualquier cosa que se encuentre típicamente en el Sistema
709 Solar o en la Tierra.

710 - **Tensor-Vector-Escalares de la Gravedad (STVG)** : es una teoría de la gravedad
711 modificada desarrollada por John Moffat, investigador del Perimeter Institute for Theoretical
712 Physics en Waterloo, Ontario, normalmente referida a la teoría por el acrónimo
713 **MOG (MOdified Gravity)**. **STVG** se ha utilizado con éxito para explicar las curvas de
714 rotación de galaxias, los perfiles de masa de los cúmulos de galaxias, lentes gravitacionales
715 en el cúmulo de bala (Fig. 1-8a), y observaciones cosmológicas sin la necesidad de materia
716 oscura. En una escala más pequeña, en el Sistema Solar, **STVG** no predice ninguna
717 desviación observable de la relatividad general y explica el origen de la inercia.

718 - **Expansión cósmica en escala (SEC)** : se presenta una cosmología física integral,
719 elaborada desde un primer principio explicando efectos de arrastre cósmico que dificulta
720 la disminución de las velocidades en las métricas de la teoría, poseyendo un arrastre
721 cósmico que puede explicar los fenómenos en general atribuido a la materia oscura. Es
722 un acercamiento conformal del tiempo en la relatividad general que requiere la extensión
723 discreta exponencial de la coordenada del tiempo para que sea conforme con la continuidad
724 de la variedad. Esta "teoría" proporciona explicaciones más simples que la del modelo
725 estándar de la cosmología.

726 - **La Teoría de gravitación no simétrica (NGT)** : presenta una extensión física no
727 trivial de la Relatividad General. La componente antisimétrica del campo fundamental

en la NGT, corresponde a un campo masivo de Kalb-Ramond de rango finito, que se identifica con una quinta fuerza gravitacional de tipo repulsivo, y genera una geometría no Riemanniana. La **NGT** concuerda con los datos actuales de aceleración del universo, halos de materia oscura en las galaxias, lentes gravitacionales, y comportamiento de cúmulos, al igual que con los resultados observacionales estándar, sin necesidad de invocar la dominancia de materia oscura.

tales aproximaciones poseen claras dificultades explicando la diferencia en el comportamiento de las distintas galaxias y cústeres, las cuales pueden ser minimizadas considerando cantidades de materia oscura diferentes de la teoría tradicional. Otro problema principal de estas explicaciones alternativas es que no explican las anisotropías del fondo cósmico de microondas que, por otro lado, algunas sí predicen la existencia de materia oscura no bariónica. Otras teorías semejante han sido formaladas y están en proceso de análisis y validación. Más información en la referencia Rojas [2008].

741 **Explicaciones de mecánica cuántica***

En otra clase de teorías se intenta reconciliar la Gravedad con la Mecánica cuántica y se obtienen correcciones a la interacción gravitacional convencional. En teorías escalar-tensoriales, los campos escalares como el campo de Higgs se acopla a la curvatura dada a través del tensor de Riemann o sus trazas. En muchas de tales teorías, el campo escalar es igual al campo de inflación, que es necesario para explicar la inflación cósmica del Universo después del Big Bang, como el factor dominante de la quintaesencia o energía oscura. Utilizando una visión basada en el Grupo de Renormalización, M. Reuter y H. Weyer han demostrado que la constante de Newton y la constante cosmológica pueden ser funciones escalares en el espacio-tiempo si se asocian las escalas de renormalización a los puntos del espacio-tiempo.

En la teoría de la relatividad de escala Laurent Nottale, el espacio-tiempo es continuo pero no diferenciable, conduciendo a la aparición de una Ecuación de Schrödinger gravitacional. Como resultado, aparecen los efectos de cuantización a gran escala. Esto hace posible predecir correctamente las estructuras a gran escala del Universo sin la necesidad de las hipótesis de la materia oscura.

756 **1.3.3. Composición de la Materia Oscura**

La existencia de la materia oscura es importante en la comprensión del modelo de formación del universo teorizado por el Big Bang y del modo de comportamiento de los cuerpos espaciales, de aquí que los investigadores teoricen sobre su composición.

760 **Materia oscura bariónica**

En los primeros años de estudio del problema de la materia oscura en el Universo, se propuso que esta podría ser materia bariónica y otras partículas ligadas a ellos en forma de objetos compactos considerables pero con una emisión electromagnética muy débil. Los candidatos a materia oscura bariónica se encuentran los gases no luminosos, los objetos compactos y masivos de los halos galácticos (MACHOs) y las enanas marrones. Sin embargo, múltiples líneas de evidencia contradicen este hecho, ya que contribuyen muy poco a la densidad crítica del Universo.

768 **Materia oscura no-bariónica**

769 En general, la materia oscura se puede clasificar en caliente, tibia o fría. Esta clasificación se
770 hace de acuerdo a la dispersión de velocidades de la partícula en el momento en que se desacopló
771 del plasma primigenio:

- 772 - **Materia oscura caliente:** partículas no bariónicas que se mueven ultrarrelativistamente.
773 Estas hacen referencia a una determinada partícula χ de masa m_χ con una velocidad
774 relativista al momento de desacoplarse del plasma primigenio, por lo tanto, su temperatura
775 T_{chi} cumple con la condición $T_\chi \gg m_\chi$.
- 776 - **Materia oscura fría :** partículas no bariónicas que no se mueven relativistamente al
777 momento de desacoplarse ($v_\chi \sim 0$), por lo cual $T_\chi \ll m_\chi$.
- 778 - **Materia oscura templada o tibia :** partículas no bariónicas que se mueven relativistamente,
779 es decir con características intermedias de las frías y calientes, o sea, con dispersión
780 de velocidades al momento de desacoplarse mayores a las de la materia oscura fría pero
781 menores a las de la materia oscura caliente.

782 Algunos de los candidatos a materia oscura más populares en el área de la física de partículas
783 son:

- 784 - **Axiones:** Esta partícula es el bosón pseudo-Goldstone que resulta del rompimiento espontáneo de la simetría Peccei-Quinn. Esta simetría se postula en 1977 en las extensiones
785 del modelo estándar para resolver el problema de la violación carga-paridad (**CP**) de la
786 interacción fuerte en **QCD**. Las observaciones cosmológicas y las mediciones en los acelaradores de partículas acotan la masa del axión a valores de $\lesssim 10^{-2} \text{ eV}$ por lo que cae
787 en la categoría de materia oscura fría. Una de las características de los axiones es que
788 dado que tiene interacciones extremadamente débiles con otras partículas, éstas podrían
789 no estar en equilibrio térmico en el Universo temprano.

792 Más información en: <https://wikimili.com/en/Axion>.

- 793 - **WIMPs(Weakly Interacting Massive Particles) :** son partículas que se desacoplan siendo
794 no relativistas cuando el Universo tenía una temperatura de $\simeq 1 \text{ GeV}$, por lo que caen
795 en la clasificación de materia oscura fría. Las masas de los **WIMPs** abarcan un intervalo
796 de $10 \text{ GeV} - 1 \text{ TeV}$. Como su nombre lo indica, es un partícula que interactúa débilmente
797 y gravitacionalmente con el resto de las especies del modelo estándar.

798 Más información en: https://wikimili.com/en/Weakly_interacting_massive_particles

800 Entre los candidatos se encuentran:

- 801 • **LSP(Lightest Supersymmetric Particle)** : es el nombre genérico dado a la más ligera
802 de las partículas hipotéticas adicionales que se encuentran en los modelos supersimétricos. En modelos con conservación de paridad R, el **LSP** es estable; en otras
803 palabras, el **LSP** no puede descomponerse en ninguna partícula del **SM** ya que poseen
804 paridad R opuesta. Algunos ejemplos más conocidos son el sneutrino ligero, el
805 neutralino ligero y el gravitón.

- **LKP** (Lightest Kaluza-Klein Particle) : son las partículas hipotéticas que cumplen con la teoría de Kaluza-Klein (teoría **KK**) unificadora de la gravedad y electromagnetismo construida alrededor de la idea de una quinta dimensión más allá de los cuatro habituales del espacio y el tiempo, siendo considerada precursora de la teoría de cuerdas. Algunos de sus candidatos ligeros son el fotón **KK** y el neutrino **KK**, con masas en la escala *TeV* (para más información, ver referencia Servant y Tait [2003]).
- **SIMPs** (Strongly Interacting Massive Particles) : se supone que los piones oscuros interactúan mucho más fuertemente entre sí, se sugiere que en el universo primitivo los piones oscuros habrían chocado entre sí, reduciendo la cantidad de materia oscura, pero a medida que el universo se expande, las partículas colisionarían cada vez con menos frecuencia, hasta ahora, cuando se extienden de manera tan delgada que casi nunca se encuentran. En la nueva hipótesis, los piones de materia oscura están formados por quarks de materia oscura que se mantienen unidos por gluones de materia oscura. (Los quarks ordinarios están unidos por gluones normales), en esta propuesta el gluón oscuro tendría masa.

1.3.4. Experimentos de la Materia Oscura

Como ya se ha podido ver en las secciones anteriores, muchos fenómenos cosmológicos han dado indicios de la existencia de materia oscura en sus diferentes composiciones teóricas, dado por lo cual un gran conjunto de experimentos han sido dedicados únicamente con la intención de obtener información pertinente en la comprensión de su composición y explicación de su comportamiento, existen dos métodos para realizar mediciones dimensionales:

Forma directa

Los métodos de detección directa intentan detectar las esporádicas interacciones que, a su paso por la Tierra, podrían experimentar las partículas de materia oscura con un material adecuado y muy bien aislado del entorno. Algunos experimentos de masa oscura son:

- **ADMX** (Axion Dark Matter eXperiment) :
 - **Nombre:** Experimento de Materia Oscura Axion
 - **Resumen:** Utiliza una cavidad de microondas resonante dentro de un gran imán superconductor para buscar axiones de materia oscura fría en el halo local de materia oscura galáctica.
 - **Página del proyecto :** <https://depts.washington.edu/admx/publications.shtml#>
- **ANALIS** (Annual modulation with NaI Scintillators) :
 - **Nombre:** Modulación anual con NaI Centelleador.
 - **Resumen:** Busca la modulación anual de la señal con centelleadores de *NaI* con el objetivo de detectar directamente la Materia Oscura galáctica a través de su dispersión con los núcleos blancos de un cristal de *NaI(Tl)* radiopuro. Esta señal de Materia Oscura debería estar modulada anualmente debido al cambio de la velocidad relativa **WIMP**-núcleo, consecuencia de la rotación de la Tierra alrededor del Sol.
 - **Página del proyecto :** <https://gifna.unizar.es/anais/>.

- 847 - **ArDM (Argon Dark Matter):**
- 848 • **Nombre:** Materia Oscura en el Argón.
- 849 • **Resumen:** Busca medir y observando electrones libres de ionización y fotones de
- 850 centelleo, que son producidos por la interacción de su núcleo con los átomos vecinos
- 851 y de esta forma relacionarla con la dispersión elástica de **WIMP** de los núcleos de
- 852 argón líquido del que esta hecho el detector.
- 853 • **Pagina del proyecto :**https://wikimili.com/en/China_Jinping_Underground_Laboratory.
- 855 - **CDMS (Cryogenic Dark Matter Search)**
- 856 • **Nombre:** Buscando Materia Oscura Criogénica
- 857 • **Resumen:** Busca utilizando una serie de detectores de semiconductores a tempe-
- 858 raturas de milikelvin encontrar los límites más sensibles en las interacciones de la
- 859 materia oscura **WIMP** con materiales terrestres y de esta manera detectar directa-
- 860 mente la materia oscura. Constituye una serie de experimentos continuos: el **CDMS I**, **CDMS II**, el **SuperCDMS** y en la actualidad continúa con **SuperCDMS SNO-LAB**.
- 863 • **Pagina del proyecto :**<https://supercdms.slac.stanford.edu/>
- 864 - **DAMA/NaI experiment**
- 865 • **Nombre:** Experimento DAMA/NaI
- 866 • **Resumen:** Características semejantes al experimento **ANALIS** con mas de 7 años
- 867 de datos de datos recopilados, fue continuado su estudio con el experimento DA-
- 868 MA/LIBRA.
- 869 • **Pagina del proyecto :**<https://people.roma2.infn.it/~dama/web/home.html>
- 870 - **DarkSide**
- 871 • **Nombre:** DarkSide
- 872 • **Resumen:** Busca con la construcción y operación de una serie de cámaras de proyec-
- 873 ción de tiempo o **TPC** (Time Projection Chamber) de argón líquido para detectar
- 874 **WIMPs**.
- 875 • **Pagina del proyecto :**<http://darkside.lngs.infn.it/>
- 876 - **DEAP (Dark matter Experiment using Argon Pulse-shape discrimination)**
- 877 • **Nombre:** Experimento de materia oscura con discriminación de forma de pulso de
- 878 argón
- 879 • **Resumen:**) Busca discriminación de fondo basada en la característica forma de
- 880 pulso de centelleo del argón permitiendo medir directamente **WIMP**.
- 881 • **Pagina del proyecto :**<http://deap3600.ca/>
- 882 - **Otros experimentos :**
- 883 • **MACRO (Monopole, Astrophysics and Cosmic Ray Observatory),**
- 884 **Pagina del proyecto :**https://hepwww.rl.ac.uk/groups/ukdmc/ukdmc_old.html
- 885 • **PandaX (Particle and Astrophysical Xenon Detector),**
- 886 **Pagina del proyecto :**<https://pandax.sjtu.edu.cn/>

- **WARP** (WIMP ARgon Programme),
 Pagina del proyecto : <https://ztopics.com/WIMP%20Argon%20Programme/>
- XENON,
 Pagina del proyecto : <http://www.xenon1t.org/>
- ZEPLIN-III dark matter experiment,
 Pagina del proyecto : <https://zeplin.io/>
- **UKDMC** (UK Dark Matter Collaboration),
 Pagina del proyecto : <https://hepwww.rl.ac.uk/groups/ukdmc/ukdmc.html>

896 Forma indirecta

897 Otro mecanismo de investigación es cuando el valor de la propiedad física se obtiene a partir
 898 de lecturas directas de otras propiedades y de una expresión matemática que las relacione.
 899 Las medidas indirectas calculan el valor de la medida mediante una expresión matemática
 900 fundamentada por la teoría, previo cálculo de las magnitudes que intervienen en la expresión
 901 por medidas directas. Algunas investigaciones relacionadas con este mecanismo son:

- **AMS-02** (Alpha Magnetic Spectrometer)
 - **Nombre:** Espectrómetro Magnético Alfa
 - **Resumen:** Busca con un detector localizado en Estación Espacial Internacional o ISS (International Space Station) medir la antimateria en los rayos cósmicos, detectando picos en el flujo de positrones, antiprotones o rayos gamma pudiendo indicar la presencia de neutralinos. El **AMS-01** es referido al prototipo de **AMS**, conteniendo este una versión simplificada del detector usado. Algunos de sus resultados se muestran en las referencias Li *et al.* [2017]; Battiston [2008]
 - **Pagina del proyecto :** <https://ams.nasa.gov/>
- **ANTARES** (Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental RESEArch project)
 - **Nombre:** Astronomía con un Proyecto de Investigación Ambiental del Telescopio de Neutrinos y Abyss.
 - **Resumen:** Busca con sus tubos fotomultiplicadores detectar la radiación Cherenkov emitida cuando el muón pasa a través del agua, las técnicas de detección utilizadas consiguen en distinguir entre la señal de muones "que van hacia arriba", de neutrinos muónicos que interaccionan antes de llegar por debajo al detector y del alto flujo de muones procedentes de la atmósfera, con los datos y la alta resolución de estos pretende buscar indicaciones de materia oscura detectando el proceso de aniquilación del neutralino en el Sol. El proyecto **ANTARES** complementa el Observatorio de Neutrinos IceCube en la Antártida. Otros telescopios de neutrinos diseñados para su uso en el área cercana incluyen el telescopio griego **NESTOR** y el italiano **NEMO**.
 - **Pagina del proyecto :** <https://antares.in2p3.fr/>
<https://icecube.wisc.edu/>
<https://cds.cern.ch/record/5841>
<http://nemo.in2p3.fr/nemow3/index.html>
- **CALET** (CALorimetric Electron Telescope)

- 929 • **Nombre:** Telescopio de electrones calorimétrico
930 • **Resumen:** Busca realizar un seguimiento de la trayectoria de electrones, protones,
931 núcleos y rayos gamma, mediante la medición de su dirección, carga y energía, para
932 esto hace uso de un telescopio espacial de alta precisión.
933 • **Pagina del proyecto :** <https://iss.jaxa.jp/en/kiboexp/ef/calet/>

934 - **DAMPE (DArk Matter Particle Explorer)**

- 935 • **Nombre:** Explorando Particulas de Materia Oscura
936 • **Resumen:** Busca señal de descomposición indirecta de un hipotético candidato de
937 materia oscura **WIMP** mediante la detección rayos gamma de alta energía, elec-
938 trones e iones de rayos cósmicos, para esto se hace uso de un telescopio espacial
939 localizado en el satélite **CAS**.
940 • **Pagina del proyecto :** <http://dpnc.unige.ch/dampe/>

941 - **FGST (Fermi Gamma-ray Space Telescope)**

- 942 • **Nombre:** Telescopio Espacial de Area Grande de Rayos Gamma
943 • **Resumen:** Busca haciendo haciendo uso de un observatorio espacial muestras astro-
944 nómicas de rayos gamma desde la órbita terrestre baja para para estudiar fenómenos
945 astrofísicos y cosmológicos como núcleos galácticos activos, púlsares, otras fuentes
946 de alta energía y materia oscura. Su instrumento principal es el Telescopio de Área
947 Grande o **LAT** (Large Area Telescope), con el cual los astrónomos pretenden rea-
948 lizar un levantamiento de todo el cielo.
949 • **Pagina del proyecto :** <https://glast.sites.stanford.edu/>

950 - **PAMELA (Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics)**

- 951 • **Nombre:** Exploración de la Materia-Antimateria y Astrofísica de los Núcleos de
952 Luz.
953 • **Resumen:** Busca estudiar y detectar rayos cósmicos, con un enfoque particular en su
954 componente antimateria, en forma de positrones y antiprotones, además monitorea
955 a largo plazo de la modulación solar de los rayos cósmicos, partículas energéticas del
956 Sol, partículas de alta energía en la magnetosfera de la Tierra y electrones jovianos,
957 con el objetivo de detectar evidencia de aniquilación de materia oscura.
958 • **Pagina del proyecto :** <https://pamela.roma2.infn.it/>

959 - **MASS (Matter Antimatter Superconducting Spectrometer)**

- 960 • **Nombre:** Espectrómetro Superconductor de Materia-Antimateria.
961 • **Resumen:** Busca con la adaptación de la configuración básica de la Instalación
962 de Imanes en Globo investigar partículas de alta energía usando un espectrómetro
963 de imán superconductor, un dispositivo de tiempo de vuelo, un contador de gas
964 cherenkov y un calorímetro de imagen de tubo streamer, de esta manera medir anti-
965 protónes en el rango de energías entre 4 – 20 GeV y positrones de aproximadamente
966 4 – 10 GeV. Se utilizó la misma configuración del experimento **MASS-1** excepto
967 por el sistema de seguimiento.
968 • **Pagina del proyecto :** <https://stratocat.com.ar/fichas-e/1991/FSU-19910923.htm>

970 - **CAPRICE (Cosmic AntiParticle Ring Imaging Cherenkov Experiment)**

- 971 • **Nombre:** Experimento Cósmico de Imágenes de Anillo de Antipartículas de Che-
972 renkov.

- 973 • **Resumen:** Busca estudiar el flujo de rayos cósmicos sin demasiado fondo de partí-
974 culas producidas atmosféricamente, esto es posible por el uso de un espectrómetro
975 capaz de discriminar entre diferentes partículas. El proyecto se enfoca en estudiar los
976 núcleos de antimateria, luz en los rayos cósmicos así como los muones en la atmósfera,
977 específicamente mide el flujo de las antipartículas (antiprotones y positrones) por
978 encima de aproximadamente 5 GeV y relaciona los flujos con modelos que incluyen
979 la producción exótica de antipartículas como partículas supersimétricas de materia
980 oscura.

- 981 • **Página del proyecto :** <https://cds.cern.ch/record/5608>

982 - **HEAT (High-Energy Antimatter Telescope)**

- 983 • **Nombre:** Telescopio de Antimateria de Altas Energías

- 984 • **Resumen:** Busca optimizar la detección e identificación de electrones de rayos
985 cósmicos y positrones a energías de aproximadamente 1 GeV hasta 50 GeV , mediante
986 la implementación de un imán superconductor de dos bobinas y un hodoscopio de
987 seguimiento de precisión, complementado con un sistema de tiempo de vuelo, un
988 detector de radiación de transición y un contador de ducha electromagnético, de esta
989 forma medir la diferencia en el tiempo entre la detección de una partícula ionizante
990 en un tubo de deriva y un impulso generado por el disparador del experimento.
991 Algunos de sus resultados se muestran en la referencia Hooper y Kribs [2004].

- 992 • **Página del proyecto :** <http://stratocat.com.ar/fichas-e/1994/FSU-19940503.htm>

994 - **LHC (Large Hadron Collider)**

- 995 • **Nombre:** Gran Colisionador de Hadrones

- 996 • **Resumen:** Ya que debido a que una partícula de materia oscura debería tener interacciones insignificantes con la materia visible normal, entonces estas interacciones
997 pueden detectarse indirectamente como energía y momento faltantes que escapan de
998 los detectores como resultado de las colisiones de haces de protones. Cualquier descubrimiento
999 en las búsquedas de los colisionadores debe ser corroborado por resultados
1000 en los sectores de detección indirecta o directa en otros experimentos.

- 1002 • **Página del proyecto :** <https://home.cern/science/accelerators/large-hadron-collider>.

1004 - Otros experimentos :

- 1005 - **MOA (Microlensing Observations in Astrophysics)**

1006 **Página del proyecto :** http://www.tekapotourism.co.nz/info/mt_john.html

- 1007 - **VERITAS (Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System)**

1008 **Página del proyecto :** <https://veritas.sao.arizona.edu/>

“La discrepancia entre lo que se esperaba y lo que se ha observado ha aumentado a lo largo de los años, y nos estamos esforzando cada vez más por llenar el vacío.”

Jeremiah P. Ostriker

¹⁰⁰⁹ Capítulo 2

¹⁰¹⁰ Antecedentes Teóricos y ¹⁰¹¹ Experimentales.

¹⁰¹² En este capítulo se realizará una descripción de todos los métodos experimentales y compu-
¹⁰¹³ tacionales necesarios para el cumplimiento de los objetivos, estos serán descritos para su mejor
¹⁰¹⁴ comprensión en el proceso de simulación, caracterización y análisis de resultados. Además se
¹⁰¹⁵ resumirán los resultados que servirán de antecedentes para la investigación.

¹⁰¹⁶ 2.1. Física de Altas Energías.

¹⁰¹⁷ La Organización Europea para la Investigación Nuclearo **CERN**(Conseil Européen pour la
¹⁰¹⁸ Recherche Nucléaire) es una organización de investigación europea que opera el laboratorio de
¹⁰¹⁹ física de partículas más grande del mundo, está situado en Suiza cerca a la frontera con Fran-
¹⁰²⁰ cia, entre la comuna de Saint-Genis-Pouilly y la comuna de Meyrin. La función principal del
¹⁰²¹ **CERN** es proporcionar los aceleradores de partículas y otra infraestructura necesaria para la
¹⁰²² investigación de física de alta energía; como resultado, se han construido numerosos experimen-
¹⁰²³ tos en el **CERN** a través de colaboraciones internacionales. El sitio principal de Meyrin alberga
¹⁰²⁴ una gran instalación informática, que se utiliza principalmente para almacenar y analizar datos
¹⁰²⁵ de experimentos, así como para simular eventos. Los investigadores necesitan acceso remoto a
¹⁰²⁶ estas instalaciones, por lo que el laboratorio ha sido históricamente un importante centro de
¹⁰²⁷ red de área amplia. En la Fig. 2-1a se muestra un diagrama de las instalaciones y los proyectos
¹⁰²⁸ en los que está dividido.

¹⁰²⁹ El **CERN** es fundamentalmente un conjunto interconectado de aceleradores de partículas
¹⁰³⁰ cuyo primer elemento, el Sincro-Ciclotrón de protones de 600 MeV o **SC** (Synchro-Cyclotron)
¹⁰³¹ se empiezó a construir a mediados de 1955, sustituido por el Gran Coalición de Hadrones o
¹⁰³² **LHC**(Large Hadron Collider) puesto en funcionamiento el 2008. En la actualidad, gran parte
¹⁰³³ de la actividad experimental que se realiza en el **CERN** está concentrada en la construcción
¹⁰³⁴ de los experimentos para el **LHC**:

¹⁰³⁵ - **ATLAS** (**A** Toroidal **LHC** **ApparatuS**) : Investiga una amplia gama de física, desde
¹⁰³⁶ la búsqueda del bosón de Higgs hasta dimensiones adicionales y partículas que podrían
¹⁰³⁷ formar materia oscura. Aunque tiene los mismos objetivos científicos que el experimento
¹⁰³⁸ **CMS**, utiliza diferentes soluciones técnicas y un diseño de sistema magnético diferente.

- 1039 **Página del proyecto :** <https://atlas.cern/>
- 1040 - **CMS**(Compact Muon Solenoid) : Tiene un amplio programa de física que va desde el
1041 estudio del Modelo estándar (incluido el bosón de Higgs) hasta la búsqueda de dimensiones
1042 y partículas adicionales que podrían formar materia oscura. Está construido alrededor de
1043 un gran imán de solenoide.
- 1044 **Página del proyecto :** <https://cms.cern/detector>
- 1045 - **LHCb** (Large Hadron Collider beauty) : experimento especializado en física del quark b,
1046 algunos de cuyos objetivos son la medida de parámetros de violación de simetría **CP** en
1047 las desintegraciones de hadrones que contengan dicho quark o la medida de precisión de
1048 las fracciones de desintegración (“branching ratios”) de algunos procesos extremadamente
1049 infrecuentes.
- 1050 **Página del proyecto :** <http://lhcb-public.web.cern.ch/lhcb-public/>
- 1051 - **ALICE** (A Large Ion Collider Experiment) : es un detector de iones pesados, estudiar la
1052 física de la materia que interactúa fuertemente a densidades de energía extremas, donde
1053 se forma una fase de la materia llamada plasma quark-gluón.
- 1054 **Página del proyecto :** <http://aliceinfo.cern.ch/Public/Welcome.html>

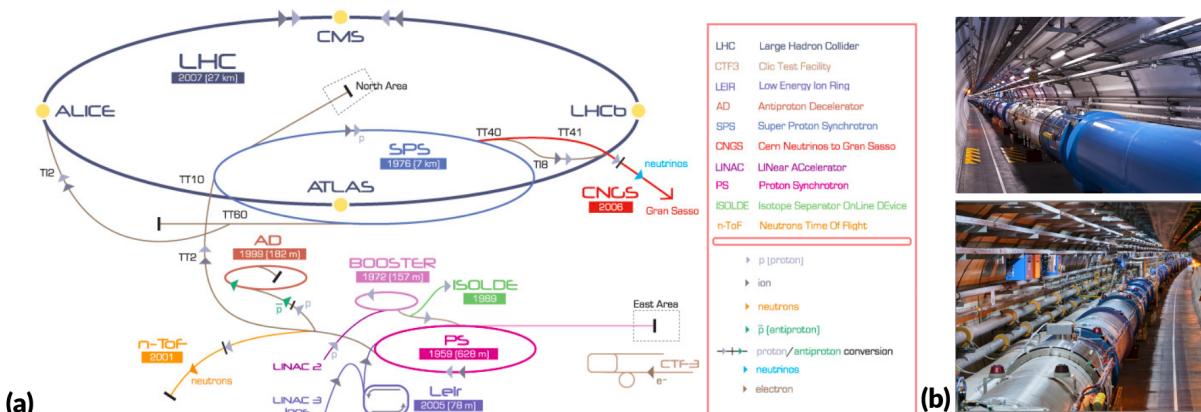


Figura 2-1: (a) Diagrama de los experimentos que componen el centro de investigación del **CERN**. (b) Imágenes del experimento **LHC**. Adaptada de la página: <https://theconversation.com/goodbye-for-a-while-to-the-large-hadron-collider-12238>.

1055 Uno de los experimentos considerado por sus resultados de los mas importantes es el **CMS**,
1056 el cual es uno de los detectores multi-usos del **CERN** como se puedo constatar anteriormente,
1057 dicho detector tiene la capacidad de cubrir un amplio rango de procesos físicos, siendo este
1058 junto con el experimento **ATLAS** los que reportaron la observación de la partícula de Higgs en
1059 el 2012. El mismo es uno de los recursos principales para las investigaciones relacionadas con
1060 la exploración de la materia oscura.

1061 El experimento **LHC** está continuamente en proceso de actualización con el objetivo de
1062 proporcionar mediciones más precisas de nuevas partículas y permitiendo observar raros proce-
1063 sos teorizados y de esta intentar aumentar nuestros conocimientos de la materia oscura. Con la
1064 detección de eventos raros aumentaría nuestra comprensión de la frontera energética y arrojaria
1065 luz sobre la teoria de la materia oscura. Las intenciones en el núcleo del proyecto **LHC** es con

procesos de alta luminosidad (**HL-LHC**), cuya fase de diseño fue apoyada en parte por fondos del Séptimo Programa Marco de la Comisión Europea y está actualmente en desarrollo.

2.1.1. Actualizando HLC.

El programa de línea de base del **LHC** tenía el objetivo de producir los primeros resultados en la carrera 2010-2012 con el objetivo de una luminosidad integrada de al menos $1 \text{ fb}^{-1} = 40 \text{ m}^2$ para fines de 2011 y gracias a un rendimiento mejor de lo previsto se obtuvo más de 25 fb^{-1} en colisión de pp a finales de 2012, más allá de cualquier expectativa. Después se alcanzó la energía de $13 - 14 \text{ TeV}$ de centro de masa de energía en 2015.

Después de 2019, la ganancia estadística al ejecutar el acelerador sin un aumento considerable de luminosidad más allá de su valor de diseño fue más de la prevista. El tiempo de ejecución necesario para reducir a la mitad el error estadístico en las mediciones. Por lo tanto, para mantener el progreso científico y explorar su capacidad total, el **LHC** necesitará un aumento decisivo de su luminosidad. Por eso, cuando el Consejo del **CERN** adoptó la Estrategia Europea para la Física de Partículas en Bruselas el 30 de mayo de 2013, se acordó que su primera prioridad sería:

“La máxima prioridad de Europa debería ser la explotación de todo el potencial del LHC, incluido el actualización de alta luminosidad de la máquina y los detectores con el fin de recopilar diez veces más datos que en el diseño inicial, alrededor de 2030”

cita traducida de la referencia Wells [2015]

Además se reemplazarán los imanes triples internos (el responsable de exprimir el rayo en caso de colisión) y de todos los cambios de hardware necesarios para permitir una ambiciosa actualización de luminosidad. Con algunas de las modificaciones ya cumplidas en 2019 (*LS2*), esta nueva fase de la vida del **LHC** se ha denominado “**LHC** de alta luminosidad” (**HL-LHC**) y tiene la aspiración de alcanzar el sorprendente umbral de 3000 fb^{-1} en 10-12 años, entregando hasta la actualización aproximadamente $\sim 300 \text{ fb}^{-1}$ durante ese período (ver Fig. 2-2).

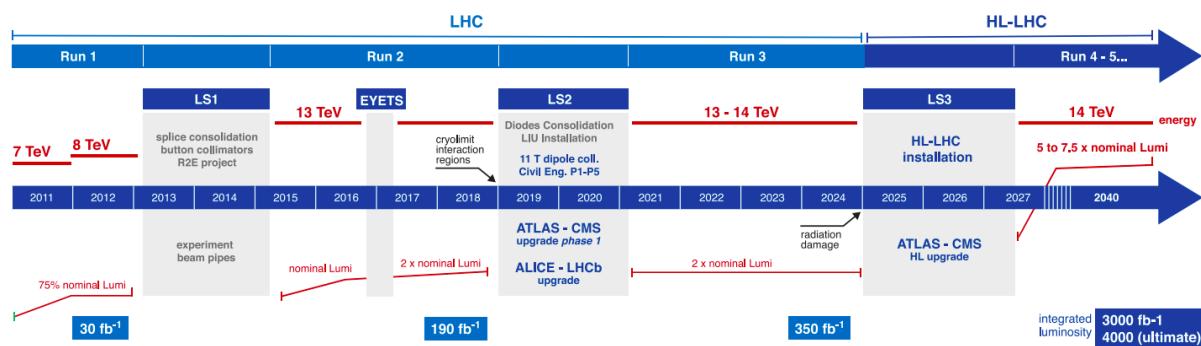


Figura 2-2: Plan de actualización del experimento **LHC**. Pagina de origen: <https://hilumilhc.web.cern.ch/content/hl-lhc-project>.

Con la actualización del **LHC** se espera aumentar los conocimiento más allá del Modelo Estándar y su bosón de Higgs, siendo sus apuestas a la misteriosa materia oscura, con la teoría de la supersimetría. Pero para lograr actualizar una maquinaria tan compleja a tan gran

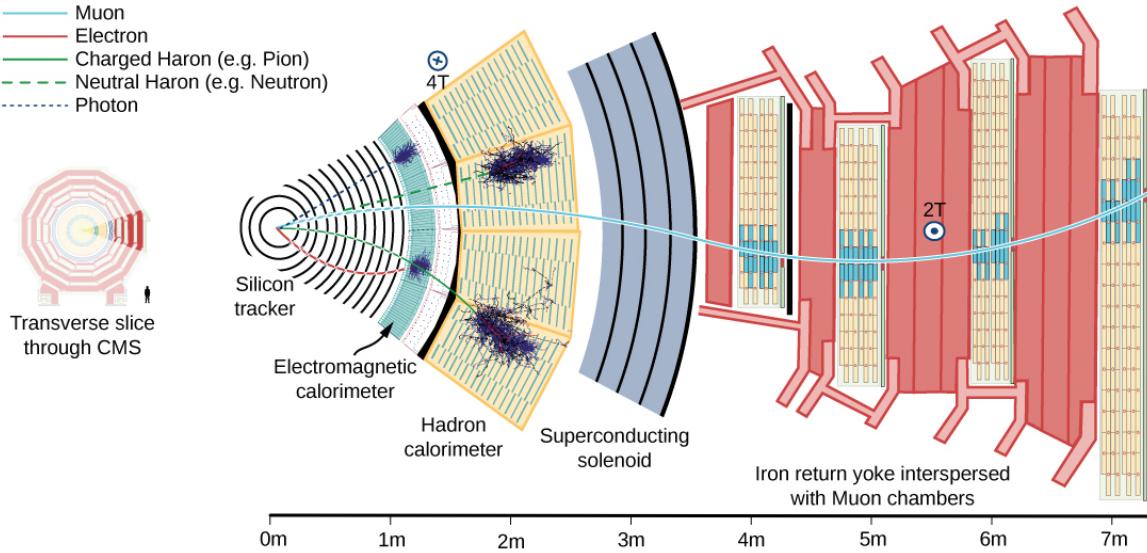


Figura 2-3: Detector de solenoide de muón compacto. El detector consta de varias capas, cada una responsable de medir diferentes tipos de partículas. Pagina de origen: <http://ippog.web.cern.ch/resources/2011/cms-slice-july-2010-version>.

1091 escala se planifica una década en completarse. El proceso depende de una serie de tecnologías
 1092 innovadoras que el proyecto **HL-LHC** está explorando. Esta extraordinaria empresa técnica
 1093 dependerá de una combinación de imanes superconductores $11 - 12\text{ T}$ de vanguardia, cavidades
 1094 de radiofrecuencia superconductoras compactas y ultraprecisas para la rotación del haz, así
 1095 como enlaces superconductores de alta potencia de 100 m de largo con disipación de energía cero.
 1096 Además, las altas luminosidades generarán nuevas demandas de vacío, criogenia y protección
 1097 de la máquina, y requerirán nuevos conceptos para la colimación y el diagnóstico, modelado
 1098 avanzado para el haz intenso y nuevos esquemas de cruce del haz para maximizar la salida física
 1099 de las colisiones.

1100 2.2. Experimento CMS.

1101 El experimento Solenoide compacto de muones o **CMS**(Compact Muon Solenoid) tiene la
 1102 capacidad de cubrir un amplio rango de procesos físicos, este experimento consiste de varios
 1103 subsistemas los cuales están diseñados para la identificación de prácticamente todas las partí-
 1104 culas del modelo estándar. Para su diseño se tomó en cuenta cómo cada partícula interacciona
 1105 con la materia, por ejemplo las partículas cargadas son identificadas por medio de detectores a
 1106 base de silicio y de gas noble, permitiendo determinar con precisión el tiempo y localización de
 1107 las partículas. La variedad de interacciones por tipo de partícula se puede ver en la Fig. 2-3.

1108 El CMS es un detector de propósito general, capaz de estudiar múltiples aspectos de las
 1109 colisiones de protones hasta 14 TeV . También contiene sistemas para medir la energía y la canti-
 1110 dad de movimiento de fotones, electrones, muones y otras partículas producto de las colisiones.
 1111 La capa detectoras se pueden dividir en:

1112 - **El rastreador de Silicio (The Silicon tracker)** : para calcular el momento de una
1113 partícula es rastrear su camino a través de un campo magnético; cuanto más curvaba el
1114 camino, menos impulso tenía la partícula. El rastreador CMSregistra los caminos toma-
1115 dos por las partículas cargadas al encontrar sus posiciones en varios puntos clave. De esta
1116 forma se reconstruyen los caminos de muones de alta energía, electrones y hadrones (par-
1117 tículas formadas por quarks), así como ver las huellas que provienen de la descomposición
1118 de partículas de vida muy corta.

1119 El rastreador CMS está hecho completamente de silicio: los píxeles, en el núcleo mis-
1120 mo del detector y que se ocupan de la mayor intensidad de partículas, y los detectores
1121 de microstrip de silicio que lo rodean. A medida que las partículas viajan a través del
1122 rastreador, los píxeles y las microstrips producen pequeñas señales eléctricas que se am-
1123 plifican y detectan. El rastreador emplea sensores que cubren un área del tamaño de una
1124 cancha de tenis, con 75 millones de canales de lectura electrónica separados: en el detector
1125 de píxeles hay unas 6,000 conexiones por centímetro cuadrado.

1126 **Actualización de Alta Luminosidad :**

1127 La actualización esperada de **HL-LHC** aumentará el número de interacciones hasta el
1128 punto en que la ocupación excesiva reduciría significativamente la efectividad de la bús-
1129 queda de pistas. Se planea una actualización para aumentar el rendimiento y la tolerancia
1130 a la radiación del rastreador.

1131 - **Calorímetro electromagnético o ECAL (Electromagnetic CALorimeter)** : compo-
1132 nente diseñado para medir con alta precisión las energías de electrones y fotones, está
1133 construido a partir de cristales de plomo tungstato ($PbWO_4$). Este es un material extre-
1134 madamente denso pero ópticamente transparente, ideal para detener partículas de alta
1135 energía, este material está hecho principalmente de metal y es más pesado que el acero
1136 inoxidable, pero con un toque de oxígeno en esta forma cristalina es muy transparente y
1137 centellea cuando los electrones y fotones lo atraviesan, lo que produce luz en proporción
1138 a la energía de la partícula. Para mayor precisión espacial, el **ECAL** también contiene
1139 detectores de “preshower” que se encuentran frente a las tapas finales, permitiendo dis-
1140tinguir entre fotones individuales de alta energía (a menudo signos de física emocionante)
1141 y los pares cercanos menos interesantes de fotones de baja energía. Está calibrado para
1142 discriminar entre de piones y fotones.

1143 - **El calorímetro de hadrones o HCAL(Hadronic CALorimeter)** : mide la energía de
1144 los hadrones, además, proporciona una medición indirecta de la presencia de partículas
1145 no cargadas que no interactúan, como los neutrinos. Consta de capas de material denso
1146 (latón o acero) intercaladas con baldosas de centelleadores de plástico, leídas a través de
1147 fibras que cambian la longitud de onda mediante fotodiodos híbridos, de esta forma se
1148 permite la máxima cantidad de material absorbente dentro de la bobina magnética.

1149 - **Solenoide supercondutor (Superconducting Solenoid):** es el dispositivo central
1150 alrededor del cual se construye el experimento, con un campo magnético de 4 Tesla per-
1151 mite determinar la relación carga/masa de partículas a partir de la pista curva que si-
1152 guen en el campo magnético. Tiene 13 m de largo y 6 m de diámetro, y sus bobinas de
1153 niobio-titanio superconductoras refrigeradas estaban destinadas originalmente a producir

1154 un campo magnético de hasta 4 T. Es componente tiene la función de doblar los caminos
1155 de las partículas que emergen de colisiones, permitiendo determinar con la trayectoria
1156 curvada por el campo magnético el impulso, combinado con mediciones de posición de
1157 alta precisión en los rastreadores y detectores de muones, esto permite una alta medición
1158 en sus resultados.

1159 - **Los detectores de muones** : dedicado a la detección de muones, siendo estas partículas
1160 cargadas y 200 veces más masivas que los electrones y positrones, se espera que se
1161 produzcan en la descomposición de una serie de posibles partículas nuevas. Debido a que
1162 los muones pueden penetrar varios metros de hierro sin interactuar, ninguno de los calorímetros de **CMS** los detiene. Por lo tanto, las cámaras para detectar muones se colocan
1163 en el borde mismo del experimento, donde son las únicas partículas que pueden registrar
1164 una señal. Para identificar muones y medir sus momentos, **CMS** utiliza tres tipos de
1165 detectores:
1166

- 1167 • **Tubos de deriva o DT(Drift Tubes)** : se usan para mediciones de trayectoria
1168 precisas en la región central del barril.
- 1169 • **Cámaras de banda catódica o CSC(Cathode Strip Chambers)** : se usan para
1170 mediciones de trayectoria precisas en los extremos del barril.
- 1171 • **Cámaras de placas resistivas o RPC(Resistive Plate Chambers)** : proporcionan
1172 una señal rápida cuando un muón pasa a través del detector.

1173 2.2.1. Reconstrucción de Muones.

1174 La identificación de partículas es parte del proceso de análisis y estudio en el **LHC**, para
1175 hacer eficiente el proceso de detección, algoritmos y nuevos conceptos tuvieron que definidos e
1176 implementados para un aprovechamiento del equipamiento, con la intención de maximizar las
1177 observaciones válidas de las partículas que se estudian, en especial la identificación de procesos
1178 en los que intervienen los muones sigue siendo uno de los objetivos del proyecto por lo que se
1179 hace necesario analizar parte del proceso de identificación y reconstrucción de muones.

1180 Reconstrucción de muones.

1181 La reconstrucción de muones es un algoritmo sistemático que se ejecuta en un software de
1182 reconstrucción que utiliza información de impacto para rechazar objetos físicos, muones. La re-
1183 construcción de muones se realiza en el rastreador de silicio y el sistema de muones, y se compone
1184 de tres pasos secuenciales: reconstrucción local, reconstrucción independiente y reconstrucción
1185 global.

1186 La reconstrucción local utiliza la información del golpe recopilada por el sistema muon para
1187 construir pistas; entonces, la información de la pista, como entrada, se alimenta al algoritmo de
1188 reconstrucción independiente. La reconstrucción global utiliza no solo información de recon-
1189 strucción independiente, sino también golpes de seguimiento de silicio. La reconstrucción del
1190 muón coincide con el camino del muón desde el sistema de muones al rastreador de silicio. La
1191 reconstrucción independiente se llama reconstrucción de Level-2 y la reconstrucción global se
1192 llama reconstrucción de Level-3. Los muones reconstruidos por reconstrucción independiente y
1193 global se denominan, respectivamente, muones independientes y muones globales.

1194 **Identificación de muones.**

1195 La “D0 muon ID” es un algoritmo utilizado para seleccionar candidatos a muones y es un
1196 algoritmo complementario para la reconstrucción estándar. A diferencia de la reconstrucción
1197 estándar, utiliza información de energía adicional de **ECAL** y **HCAL**, y está al revés en
1198 términos de información del detector. Muon Identification primero reconstruye las pistas de los
1199 rastreadores de silicio y luego utiliza la información de la **ECAL** y la **HCAL**.

1200 También se consideran los rastreadores que no están asociados con ningún rastro de muones
1201 independiente, lo que le permite reconstruir algunos muones de p_T bajos sin suficiente energía
1202 para alcanzar el sistema muónico. Estos bajos p_T muones pueden no ser reconstruidos como
1203 muones globales, pero son identificados por el algoritmo de identificación de muones. Los muones
1204 reconstruidos por el algoritmo de identificación se denominan muones rastreados (“tracker
1205 muons”).

1206 **Aislamiento de muones.**

1207 Los muones producidos a partir de objetos pesados como Z y W deben aislarse de los
1208 muones producidos a partir del decaimiento b o c , el aislamiento de muones (“muon isolation”)
1209 tiene como objetivo separar estos diferentes muones, lográndose esta separación calculando la
1210 energía transversal total E_T depositada en un calorímetro dentro de un cono a lo largo de la
1211 dirección del muón.

1212 **Eficiencia Muon.**

1213 Las secciones anteriores describen brevemente cada parte del experimento **CMS** desde la
1214 vía interna, más cercana a la línea del haz, hasta el sistema de muones más externo. Muchos
1215 análisis físicos requieren la probabilidad de que un muón se reconstruya como un objeto muón,
1216 dado que el muón se produce en un evento. En general, esa probabilidad se llama eficiencia. La
1217 eficiencia es la relación entre el número de muones que pasan los criterios deseados y el número
1218 total de muones producidos, también puede definirse como:

$$\epsilon_\mu = \epsilon_{track} \cdot \epsilon_{id} \cdot \epsilon_{iso} \cdot \epsilon_{trig} \quad (2-1)$$

1219 donde ϵ_{track} es la eficiencia del rastreador muón, es decir, la probabilidad de que un muón
1220 producido en un evento también se reconstruya como un rastreador de silicio, rastreador muón.
1221 ϵ_{id} es la eficiencia de identificación del muón, la probabilidad de que un muón pase por un grupo
1222 de criterios de selección, dado que es un muón reconstruido. ϵ_{iso} es la eficiencia de aislamiento
1223 del muón, la probabilidad de que un muón reconstruido esté aislado. ϵ_{trig} es la eficiencia del
1224 disparador, la probabilidad de que un muón reconstruido y aislado se dispare en términos de
1225 un umbral de p_T dado.

1226 La eficiencia del muón depende de dos factores principales: la estructura del **CMS** y el
1227 momento transversal p_T de los muones. La eficiencia del muón está influenciada por la ruta
1228 a través de la cual pasa un detector, porque el detector no es homogéneo, por lo tanto, la
1229 pseudoapidez $|\eta|$ y el ángulo azimutal φ desempeñan un papel en la decisión de la eficiencia
1230 del muón. Como el detector es muy simétrico con respecto a φ no influye significativamente en
1231 la eficiencia del muón. La p_T de los muones decide si tienen suficiente energía para llegar al
1232 sistema muónico, debido a que los muones independientes necesitan más de una estación para

1233 ser alcanzados en el sistema muónico, los muones con bajo p_T no pueden reconstruirse como
 1234 muones independientes. Toda esta información es resumida en los paquetes *.tcl de Delphes,
 1235 aunque solo de forma básica ya que se busca descripción general del sistema.

1236 2.2.2. Actualizando CMS.*

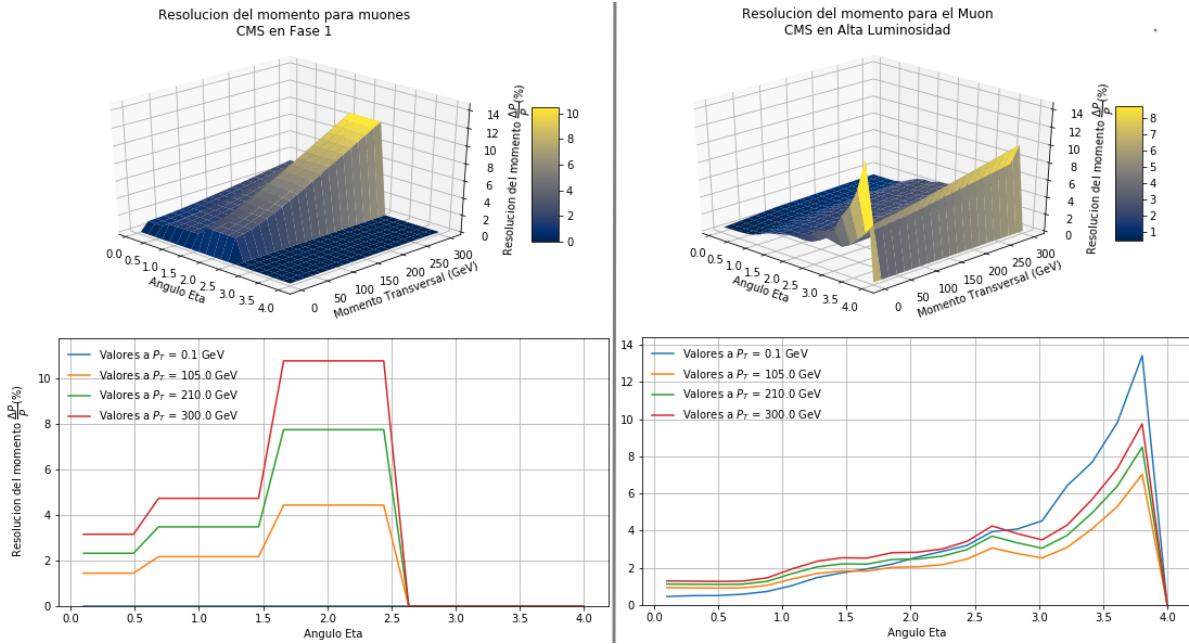


Figura 2-4: Comparación. Generados con python 2.7.

1237 2.3. Simulación en Altas Energías.

1238 Gracias a la infraestructura desarrollada dentro del experimento **ATLAS** y el **CERN**, los
 1239 equipos de análisis de física de altas energías ahora pueden preservar fácilmente su código de
 1240 análisis en formatos de contenedores linux, de modo que pueda usarse con fines de reinterpretación,
 1241 con ellos viene incluido como una receta, el orden exacto en que las diversas tareas de
 1242 un análisis deben llevarse a cabo y el conocimiento de cómo usarlo exactamente para poder
 1243 extraer nueva ciencia.

1244 Entre las herramientas más básicas y robusta de la biblioteca desarrollada por el **CERN** es
 1245 el programa orientado a objetos **ROOT**, este fue originalmente diseñado para el análisis
 1246 de datos de física de partículas y contiene varias características específicas de este campo. Este
 1247 proporciona todas las funcionalidades necesarias para manejar el procesamiento de grandes
 1248 datos, el análisis estadístico, la visualización y el almacenamiento. Está escrito principalmente
 1249 en *C*++ pero integrado con otros lenguajes como Python y R, es la base también de muchos
 1250 de sus sistemas, conteniendo las librerías necesarias para su ejecución.

1251 El proyecto **RECAST** (**R**equest **E**fficiency **C**omputation for **A**lternative **S**ignal **T**heories)
 1252 combina la motivación científica para un poderoso programa de reinterpretación en el **LHC** con

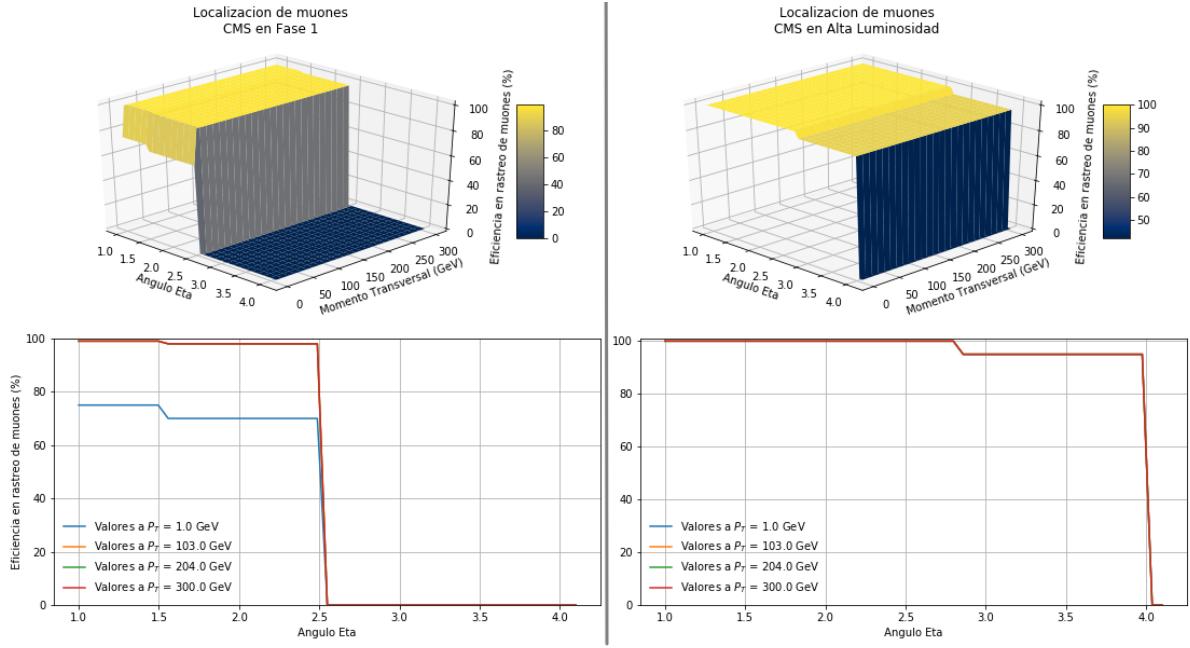


Figura 2-5: Comparación. Generados con python 2.7.

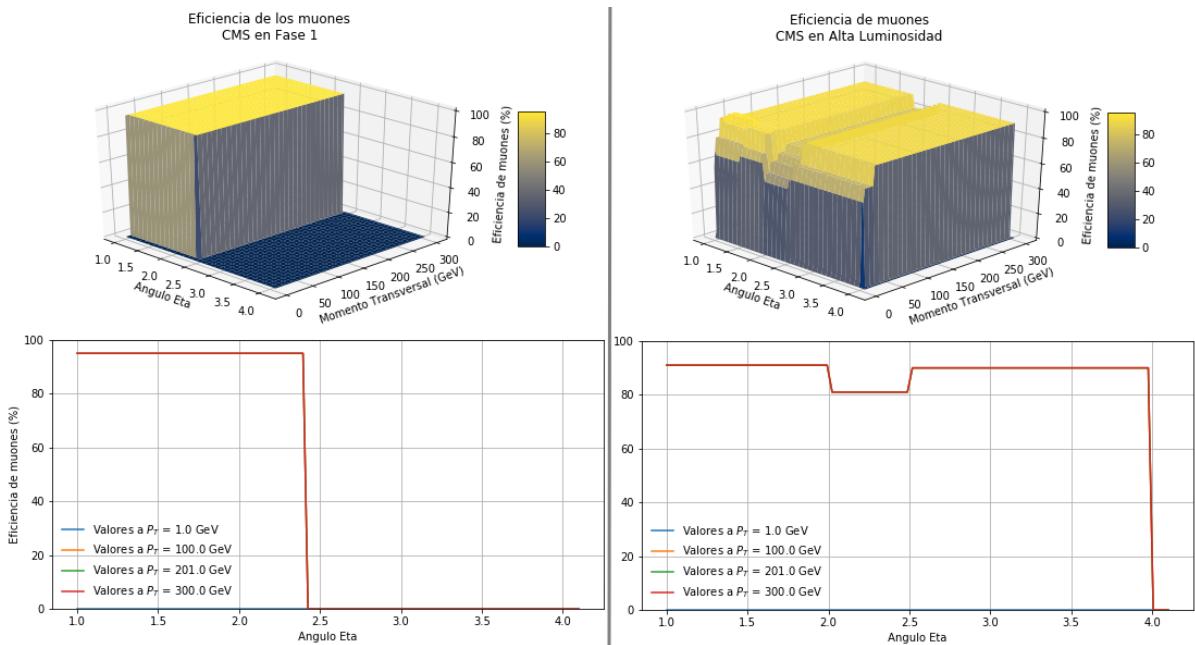


Figura 2-6: Comparación. Generados con python 2.7.

las capacidades técnicas que ofrecen los lenguajes de flujo de trabajo y los entornos de software preservables. Los principales grupos de búsqueda dentro de la colaboración **LHC** ahora requieren que se conserven nuevos análisis utilizando estas nuevas herramientas, de modo que

1256 cuando los teóricos proponen un nuevo modelo de física, la colaboración puede reutilizar estos
1257 análisis archivados para derivar una primera evaluación a través de la reinterpretación. También
1258 se espera que los análisis conservados se usen en una ola de estudios de resumen planificados
1259 una vez que se finalicen los análisis de datos de la segunda ejecución del **LHC**, entre ellos los
1260 modelos supersimétricos, denominado **MSSM** fenomenológico y de esta forma permitir una
1261 evaluación detallada del estado de la supersimetría más allá del alcance más estrecho de los
1262 modelos individuales.

1263 La implementación de estas herramientas y su completo control son habilidades necesarias
1264 para incursionar en la investigación de altas energías, de aquí que se precise profundizar en
1265 ellas.

1266 **2.3.1. Implementando ROOT.**

1267 Como ya se trato anteriormente **ROOT** es un “framework” para el procesamiento de datos,
1268 nacido en el **CERN**, dedicado principalmente para la investigación sobre física de altas energías.
1269 Todos los días, miles de físicos utilizan aplicaciones **ROOT** para analizar sus datos o realizar
1270 simulaciones, entre sus utilidades encontramos:

- **Guardar datos :** compactación en forma binaria comprimida en un archivo de extensión `*.root`, siendo archivos autodescriptivos, por lo que facilita obtener información sobre los modelos utilizados para describirlos. Su característica principal es ser un contenedor de datos llamado árbol, con sus subestructuras ramas (“branch”) y hojas (“leave”). Un árbol puede verse como una ventana deslizante a los datos sin procesar, tal como se almacenan en un archivo. Los datos de la siguiente entrada en el archivo se pueden recuperar avanzando el índice en el árbol. Esto evita los problemas de asignación de memoria asociados con la creación de objetos y permite que el árbol actúe como un contenedor liviano mientras se maneja el almacenamiento en búfer de forma invisible.
- **Acceso a los datos:** se accede a los datos guardados en uno o varios archivos **ROOT** desde la web o sistemas de entrega de archivos a gran escala. Los árboles **ROOT** distribuidos en varios archivos se pueden encadenar y acceder como un objeto único, lo que permite bucles sobre grandes cantidades de datos.
- **Mina de datos :** posee potentes herramientas matemáticas y estadísticas para operar con sus datos, todo sobre `C++`, preparado para el procesamiento en paralelo cuando se requiera la manipulación de los mismos. Permite la generación de cualquier distribución estadística y modelados, logrando simular sistemas complejos.
- **Gráfica resultados:** los datos se pueden mostrar con histogramas, diagramas de dispersión, funciones de ajuste ya integradas como herramientas en su biblioteca.
- **Ejecución interactiva o creación de aplicaciones:** Puede usar el intérprete `Cling C++` para sus sesiones interactivas y para escribir macros, o puede compilar su programa para que se ejecute a toda velocidad, siempre dando la posibilidad de crear una interfaz gráfica de usuario.
- **Página del Proyecto :** <https://root.cern.ch/>.

1295 . Hay muchas herramientas creadas a partir de **ROOT**, entre ellas se pueden destacar el gene-
1296 rador de Monte-Carlo Madgraph, y entre las herramientas iteractivas a **EVE**.

1297 2.3.2. Visualización de eventos con EVE.

1298 Un entorno de visualización de eventos de **ROOT** creado como parte del proyecto **ALICE** es
1299 **EVE** (Event Visualization Environment), el mismo proporciona un marco de aplicación para la
1300 construcción de programas de visualización de eventos, está construido sobre la infraestructura
1301 GUI, GL y GED, el mismo ofrece las siguientes características principales:

- 1302 - Clases base para la representación de objetos visuales que se pueden presentar en vistas
1303 de árbol de lista, editores de objetos y renderizados a través de OpenGL (TEveElement
1304 y subclases).
- 1305 - Clase de administrador de aplicaciones TEveManager para la gestión de nivel superior de
1306 elementos, componentes GUI, geometrías y eventos.
- 1307 - Clases para la presentación de geometrías TGeo completas (TEveGeoNode y TEveGeo-
1308 TopNode), así como de geometrías simplificadas mediante extracción de datos de forma
1309 (TEveGeoShape).

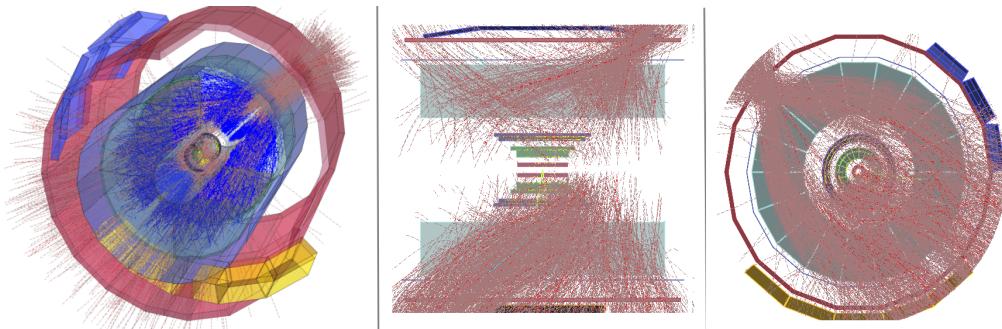


Figura 2-7: Diagrama de flujo de la investigación.

1310 Para su implementación se hace necesario seguir los pasos simplificados mostrados en la
1311 guía <https://cp3.irmp.ucl.ac.be/projects/delphes/wiki/WorkBook/EventDisplay> y ha-
1312 cer uso de los comandos:

```
1313     make display  
1314     root -l examples/EventDisplay.C'("cards/delphes_card_CMS.tcl","delphes_output.root")'
```

1314 2.3.3. Altas Energías con MadGraph.

1315 Las colisiones de alta energía entre partículas elementales normalmente dan lugar a estados
1316 finales complejos, con grandes multiplicidades de hadrones, leptones, fotones y neutrinos. La
1317 relación entre estos estados finales y la descripción física subyacente no es simple, por dos
1318 razones principales:

- 1319 - No se posee una comprensión completa de la física a implementar.
1320 - Cualquier enfoque analítico se vuelve intratatable por las grandes multiplicidades.

1321 La forma de abordar este problemática es generando eventos completos por los métodos
1322 de **MC**, la complejidad se domina mediante una subdivisión del problema completo en un
1323 conjunto de tareas separadas más simples, simulando todos los aspectos principales de los
1324 eventos: selección de procesos duros, la radiación de estado inicial y final, los restos de haces, la
1325 fragmentación, las desintegraciones, el cálculo de secciones transversales y su coincidencia con
1326 generadores de eventos, etc. Esto resulta en eventos que deben ser directamente comparables
1327 con los observables experimentalmente y de esta forma programas pueden usarse para extraer
1328 la física de las comparaciones con los datos existentes, o para estudiar la física en experimentos
1329 futuristas.

1330 Con el objetivo de refundir un análisis **LHC** siendo una de sus herramientas mas importantes
1331 desarrollada por el proyecto y la solución a los problemas anteriormente planteado tenemos a
1332 MadGraph5_aMC@NLO (ver referencia Alwall *et al.* [2014]) siendo un framework que tiene
1333 como objetivo proporcionar todos los elementos necesarios para la fenomenología del **SM** y
1334 extensiones, permitiendo el uso de una variedad de herramientas relevantes para generación,
1335 manipulación y análisis de eventos.

1336 Toda la información con respecto a su instalación y configuración se puede encontrar en su
1337 página oficial: <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/MadgraphTutorial>.

1338 La salida del mismo son archivos **.lhe* o **LHEF** (**Les Houches Event File**), estos datos son
1339 los que obtenemos de un generador **MC**(Monte Carlos) como MadGraph. Esta salida contiene
1340 varios parámetros cinemáticos de todas las partículas involucradas en los procesos junto con la
1341 descripción de procesos simulados, parámetros de modelo y condiciones de ejecución. El análisis
1342 con **LHEF** se realiza para comprender varias propiedades cinemáticas básicas de la muestra
1343 de **MC** producida. Las variables cinemáticas asociadas con diferentes partículas del evento se
1344 pueden obtener utilizando este método.

1345 El principal conjunto de herramientas que componen la herramienta MadGraph5_aMC@NLO,
1346 o a las que puede ser integrada son: Delphes (de Favereau *et al.* [2014a]), MadAnalysis4 y Ma-
1347 dAnalysis5 (Conte *et al.* [2013]), ExRootAnalysis, Golem95 (Binoth *et al.* [2008]), QCDLoop
1348 (Ellis y Zanderighi [2008]), maddm (Wang [2018]), maddump (Buonocore *et al.* [2019]), pythia8
1349 (Sjöstrand *et al.* [2015a]), lhapdf5 y lhapdf6 (Buckley *et al.* [2015]), collier (Denner *et al.* [2017]),
1350 hepmc, mg5amc_py8_interface (Sjöstrand *et al.* [2015a]), ninja (Hirschi y Peraro [2016]; Pe-
1351 raro [2014]; Mastrolia *et al.* [2012]), oneloop (van Hameren [2011]). Su implementación se hace
1352 necesaria para estudios de partículas, dada su versatilidad, aunque sea una herramienta de altas
1353 exigencias en conocimiento de programación y trabajo en el sistema Linux.

1354 Para uso futuro como parte de esta investigación se profundizará en las herramientas Pythia8
1355 y Delphes, estás a pesar de poderse ejecutar de forma independiente pueden ser integradas con
1356 facilidad dentro del programa de Madgraph y de esta manera planificar la receta de nuestro
1357 proceso a reconstruir.

1358 2.3.4. Hadronizacion con Pythia 8.

1359 El programa Pythia (descripción en referencia Sjöstrand *et al.* [2015b]) es una herramienta
1360 estándar para la generación de colisiones de alta energía con mas de 35 años de desarrollo y
1361 actualización, este comprende un conjunto coherente de modelos físicos para la evolución de
1362 un proceso difícil de pocos cuerpos a un estado final multihadrónico complejo. Contiene una
1363 biblioteca de procesos y modelos complejos para los estados inicial y final del *parton showers*

1364 (ver referencia Nagy y Soper [2018]), múltiples interacciones de *parton-parton*, *beam remnants*,
1365 *string fragmentation* y *article decays*. También tiene un conjunto de utilidades e interfaces para
1366 programas externos.

1367 Si bien las versiones anteriores se escribieron en Fortran, Pythia 8 representa una reescritura
1368 completa en *C++*. Su versión mas actual es una opción atractiva para los estudios de física del
1369 **LHC** pero el programa también se utiliza para una multitud de otros estudios fenomenológicos
1370 o experimentales.

1371 Las principales tareas realizadas por el programa incluyen la exploración de las consecuencias
1372 experimentales de los modelos teóricos, el desarrollo de estrategias de búsqueda, la interpreta-
1373 ción de datos experimentales y el estudio del rendimiento del detector. De este modo, abarca
1374 toda la vida útil de un experimento, desde los primeros conceptos de diseño para el detector
1375 hasta la presentación final de los datos.

1376 Limitaciones

1377 Los modelos de física incorporados en Pythia se centran en colisiones de partículas de alta
1378 energía que tienen energías de centro de masa (**CM**) mayores de 10 GeV, correspondientes
1379 a una energía de haz fijo de protón-protón (pp) de $\geq 50 \text{ GeV}$. Esta limitación se debe a la
1380 aproximación de un continuo de estados finales permitidos que se utilizan en varios lugares
1381 de Pythia, especialmente para los cálculos de la sección transversal hadron-hadron, total y
1382 diferencial, y como base para el modelo de fragmentación de cuerdas. Con energías inferiores a
1383 10 *GeV*, ingresamos a la región de resonancia hadrónica, donde estas aproximaciones se rompen,
1384 y por lo tanto los resultados producidos por Pythia no serían confiables. El límite de 10 *GeV* se
1385 elige como una escala típica; para la aniquilación positrón-electrón ($e+e-$) sería posible ir algo
1386 más bajo, mientras que para las colisiones pp los modelos no son particularmente confiables
1387 cerca del límite inferior.

1388 En el extremo opuesto, solo conocemos pruebas explícitas de la física de Pythia que modela
1389 hasta energías **CM** de aproximadamente 100 *TeV*, que corresponde a una energía de haz de
1390 objetivo fijo de $pp \leq 10^{10} \text{ GeV}$.

1391 El programa solo funciona con colisiones hadron-hadron o lepton-lepton, las instalaciones in-
1392 ternas para manejar las colisiones protón-núcleo o núcleo-núcleo no están previstas en absoluto.
1393 Entre los hadrones incluidos se encuentra el (anti)protón, (anti)neutrón, el pión y, como caso es-
1394pecial, el Pomeron. Todavía no hay ninguna disposición para las colisiones de leptones-hadrones
1395 o para los haces de fotones entrantes.

1396 La producción de partículas salientes es en vacío y la simulación de la interacción de las
1397 partículas producidas con el material detector no está incluida en Pythia. Las interfaces con los
1398 códigos de simulación de detectores externos pueden ser escritas directamente por el usuario o
1399 realizadas a través de la interfaz HepMC.

1400 Procesos incluidos

1401 Una gran cantidad de procesos están disponibles internamente, y aún más a través de
1402 interfaces para programas externos. Las adiciones internas recientes incluyen varios escenarios
1403 para la física de Hidden Valley, procesos adicionales que involucran dimensiones adicionales,
1404 más procesos supersimétricos (**SUSY**), manejo extendido de R-hadrones y más estados de
1405 charmonium y bottomonium. En la correspondiente última versión 8.2, los siguientes procesos

1406 están disponibles internamente:

- **Los procesos de Electroweak (EW)** : incluyen la producción rápida de fotones, la producción individual de γ^*/Z y W^\pm , así como la producción de pares de bosones débiles con correlaciones de fermiones completas para $VV \rightarrow 4f$, ademas de los procesos de colisión de fotones del tipo $\gamma\gamma \rightarrow ff$.
- **Producción de fermiones de cuarta generación** : a través de interacciones electro-débiles o fuertes.
- **Los procesos de Higgs** : incluyen la producción del bosón Higgs del modelo estándar (**ME**), así como los múltiples bosones Higgs de un modelo genérico de dos dobletes de Higgs (**2HDM**). También es posible modificar la correlación angular del decaimiento de Higgs $h \rightarrow VV \rightarrow 4f$ debido a acoplamientos anómalos de hVV . La implementación interna de SUSY también utiliza la implementación *2HDM* para su sector Higgs.
- **Los procesos SUSY** : incluyen la producción de pares de partículas **SUSY**, así como la producción resonante de squarks a través de la paridad R que viola la interacción **UDD**. Las interferencias electro débil se han tenido en cuenta cuando sean relevantes. Se puede hacer que tanto los squarks como los gluinos formen R-hadrones de larga vida, que posteriormente se descomponen. En el medio, es posible cambiar el contenido de sabor ordinario de los hadrones R, mediante interacciones (implementadas por el usuario) con el material del detector.
- **Los procesos de calibre de bosones** : se incluyen la producción de un Z' (con interferencia completa de $\gamma^*/Z/Z'$), un W'^\pm y un bosón de calibre de acoplamiento horizontal (entre generaciones) R^0 .
- **Otros Procesos** : Los procesos QCD, procesos simétricos de izquierda a derecha, producción de leptoquark, procesos de composición, procesos de Hidden Valley, procesos extradimensionales, producción Top, Onia.

1431 2.3.5. Simulando el detector con Delphes 3.

1432 Este simula la respuesta de un detector compuesto por un rastreador interno (The silicon Tracker), calorímetros electromagnéticos y de hadrones (**ECAL** y **HCAL**) y un sistema
1433 detector de muones (ver referencia de Favereau *et al.* [2014b]). Todos están organizados con-
1434 céntricamente con una simetría cilíndrica alrededor del eje del haz. El usuario puede especificar
1435 el volumen activo del detector, la segmentación del calorímetro y la intensidad del campo mag-
1436 nético uniforme (Fig. 2-8). Cada subdetector tiene una respuesta específica, como se describe a
1437 continuación.

1438 En Delphes, la reconstrucción e identificación de objetos se basa en una serie de aproxima-
1439 ciones para acelerar sensiblemente el procedimiento y mantener una buena precisión.

1440 Los muones que se origina en la interacción, tiene cierta probabilidad de ser reconstruido,
1441 según la parametrización de eficiencia definida por el usuario. Esta probabilidad se desvanece
1442 fuera de la aceptación del rastreador, y para momentos de muón por debajo de algún umbral
1443 para rechazar partículas en bucle. El momento final del muón se obtiene mediante una mancha

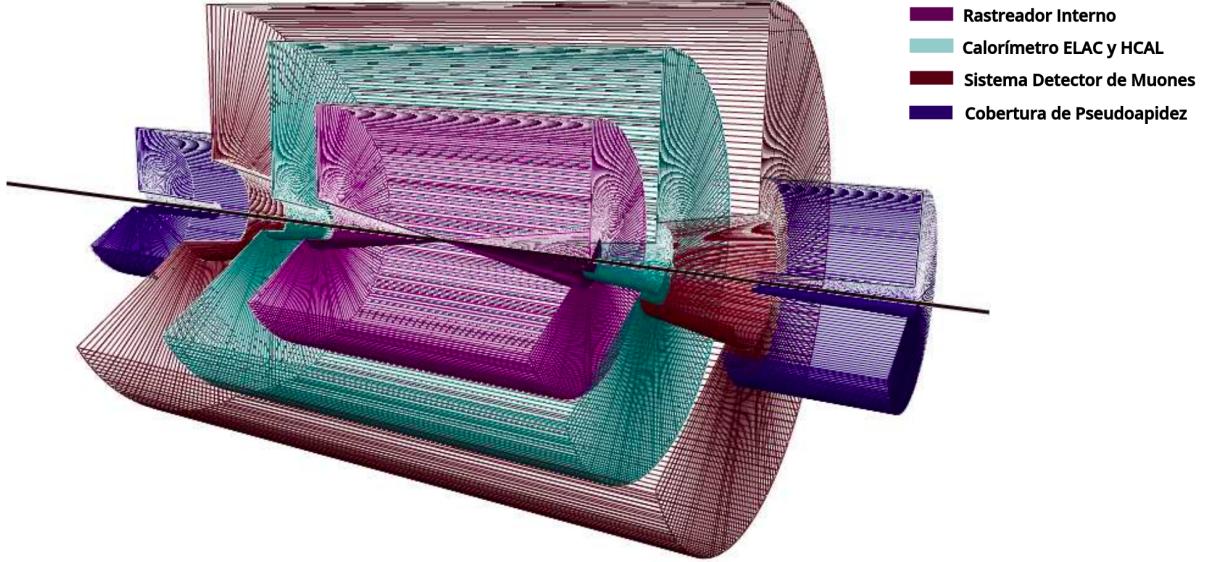


Figura 2-8: Perfil de diseño básico de la geometría del detector genérico asumido en Delphes.
Adaptado de artículo de origen Alwall *et al.* [2014].

gaussiana del vector inicial de 4 momentos. La resolución es parametrizada en función de p_T y η implementada por el usuario.

El framework Delphes permite el acceso a datos de diferentes formatos de archivo (**ProMC**, **HEPMC**, **STDHEP** y **LHEF**). Los archivos de eventos provenientes de generadores externos **MC** son procesados primero por un lector, este convierte partículas estables en una colección de objetos universales, para luego ser procesada por una serie de módulos que comienzan con el módulo de fusión acumulada y terminan con el módulo de buscador de objetos único. Finalmente, Delphes permite al usuario almacenar y analizar eventos en un formato de árbol raíz al ejecutar DelphesHepMC tomando un archivo de configuración `delphes_card.tcl` y realizando la simulación del detector en el archivo `*.hepmc`. La información sobre varios objetos **MC** (partículas) y objetos reconstruidos (jets, partículas reconstruidas), estas se guardan en un archivo `*.root` en forma de árboles (“trees”) Delphes, el archivo de salida `*.root` se puede abrir usando el mismo programa **ROOT**.

2.4. Extensión del Modelo Estándar con Supersimetría.*

En el año 1973 por Julius Wess y Bruno Zumino presentan un modelo en la física de partículas el cual es conocido con el nombre de Modelo de Wess-Zumino, este es un modelo mínimo supersimétrico con solo un Fermion y su super compañero Boson. A pesar de que el modelo de Wess-Zumino no representa un modelo físico real, sirve por su sencillez de modelo ejemplo para mostrar ciertos aspectos de los modelos físicos supersimétricos. El primer modelo supersimétrico compatible con el modelo estandar de la física de partículas llamado **MSSM**(Modelo Mínimo Estándar Supersimétrico) este fue enunciado en el año 1981 por Howard Georgi y Savas Dimopoulos. Según el **MSSM**, las masas de los super compañeros se podrán observar en la región entre 100 GeV hasta 1 TeV mediante un acelerador de partículas, terminado de construir en

1468 el año 2008 en la frontera franco-suiza. Los científicos esperan poder demostrar mediante el
1469 **LHC** la existencia de los super compañeros de las partículas elementales ya conocidas.

1470 2.4.1. Supersimetría.*

1471 En la física de partículas, la supersimetría es una simetría hipotética propuesta querela-
1472 cionaría las propiedades de los bosones y los fermiones. Aunque todavía no se ha verificado
1473 experimentalmente que la supersimetría sea una simetría de la naturaleza, es parte fundamen-
1474 tal de muchos modelos teóricos, incluyendo la teoría de supercuerdas, la supersimetría también
1475 es conocida por **SUSY**(**SUperSYmmetry**) siendo una de las teorías más populares que postulan
la existencia de física más allá del **SM**.

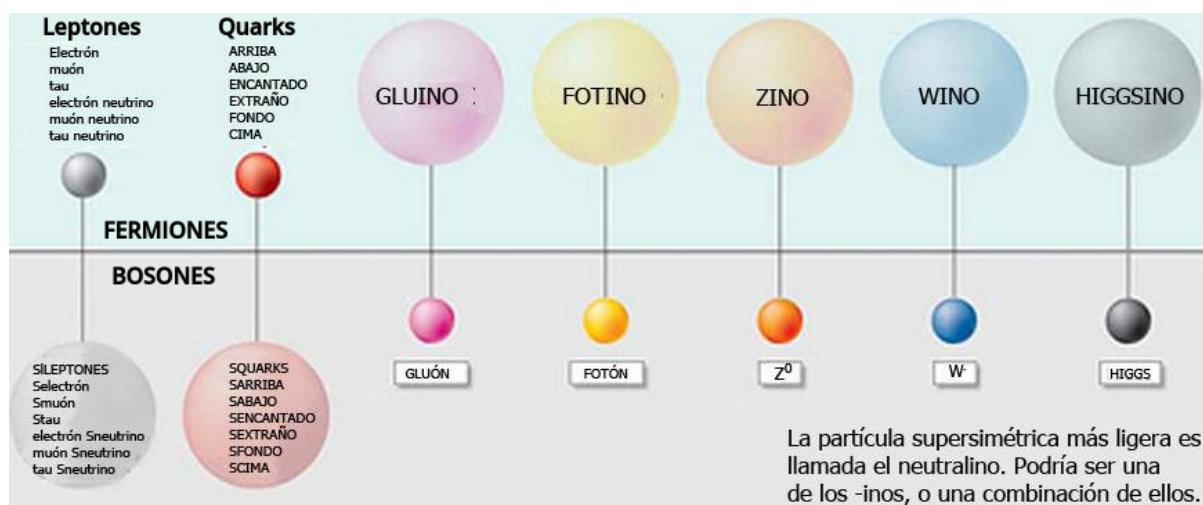


Figura 2-9: Extensión del Modelo Estandar bajo la existencia de la supersimetría (**SUSY**).
Página de origen : <http://www.cienciakanja.com/2009/11/13/confiamos-en-susy-lo--que-realmente-busca-el-lhc/>.

1476
1477 De forma general el **SM** se construye a partir de simetrías muy fundamentales que dan lugar
1478 a leyes de conservación, en el caso de **SUSY**, esta incluye todas las simetrías que ya contiene el
1479 **SM** y añade otra más que involucra al espín. Lo que postula **SUSY** es que a cada partícula del
1480 **SM** le corresponde un compañero supersimétrico que tiene el espín contrario, o sea, por cada
1481 fermión, **SUSY** añade un bosón y por cada bosón añade un fermión. Por tanto, el número de
1482 partículas predicho por **SUSY** es el doble que en el Modelo Estándar, como se visualiza en la
1483 Figura 2-9.

1484 Se teoriza que **SUSY** puede dar solución al problema de la materia oscura mediante su
1485 teorizada relación con la materia del **SM**, en la mayoría de modelos de supersimetría, la parti-
1486 cula supersimétrica más ligera o **LSP**(mencionada anteriormente) es necesariamente neutra y
1487 estable. Esto significa que nuestro Universo estaría lleno de estas partículas masivas, neutras y
1488 estables, que por tanto serían buenas candidatas a formar la materia oscura.

1489 Sin embargo, debido a que dichas compañeras supersimétricas aún no han podido ser creadas
1490 en el laboratorio, sus masas deben ser mucho mayores que las de las partículas originales. Esto
1491 implica que la supersimetría, de ser cierta, está rota por algún mecanismo, la especificación de

1492 dicho mecanismo da lugar a diversas simplificaciones del **MSSM**, donde algunas partículas
1493 supersimétricas, como el neutralino, podrían explicar el problema de la materia oscura del
1494 universo.

1495 **2.4.2. Modelo Minimo Estandar Simétrico.***

1496 Se sabe que el modelo estándar proporciona una descripción incompleta de la física de
1497 partículas y una serie de extensiones del **SM** predicen la existencia de nuevos bosones de luz.
1498 Un posible modelo de búsqueda independiente para la producción en pareja de un bosón ligero
1499 que se descompone en un par de muones.

1500 Un ejemplo simple de producción de pares en colisiones protón-protón ($pp \rightarrow h \rightarrow$
1501 $2a + \chi \rightarrow 4\mu + \chi$, donde h es un bosón de Higgs, a es el nuevo bosón neutro ligero, y χ
1502 son partículas de espectador que se predicen en varios modelos. Si bien la producción a través
1503 del bosón h es posible, no se requiere en la búsqueda presentada aquí: el único requisito es
1504 que un par de bosones de luz idénticos sean vértices comunes de datos y un bosón de luz de
1505 decaimiento se descomponga posteriormente en un par de muones. Estos pares de muones se
1506 denominan “dimuones”, el vértigo y los nuevos vértices de producción de bosones ligeros pueden
1507 ser desplazados. La naturaleza genérica de esta firma significa que cualquier límite establecido
1508 en el producto de la sección transversal, la fracción de ramificación a los dimuons al cuadrado, y
1509 la aceptación es independiente del modelo; Por lo tanto, puede ser reinterpretado en el contexto
1510 de modelos específicos.

1511 **2.4.3. Definición**

1512 Entre sus observaciones más recientes ? se ha reportado un flujo de positrones anómalo
1513 que tiene una posible explicación en el proceso de aniquilación de partículas de materia oscura,
1514 donde se libera energía en forma de positrones. Dicho flujo anómalo puede observarse a partir de
1515 los 25 GeV en la Figura 2-10 donde también se presenta una comparación con otros experimentos
1516 que observan similar comportamiento.

1517 Estas observaciones cosmológicas han motivado a los físicos teóricos de altas energías a pos-
1518 tular nuevos modelos en los cuales la composición de la materia oscura se pueda entender por
1519 medio de nuevas partículas elementales no descritas en el modelo estándar y que sin embargo
1520 podrían estar siendo producidas en los aceleradores de partículas modernos como el Gran Coli-
1521 sionador de Hadrones en Ginebra, Suiza. Los modelos propuestos se encuentran en la categoría
1522 que se conoce como extensiones al modelo estándar y por lo general involucran la existencia de
1523 nuevas partículas cuyas fuerzas e interacciones están descritas por alguna variación de la teoría
1524 cuántica de campo, lo que sugiere que sus mecanismos de producción y propiedades pueden ser
1525 estudiados por el formalismo de la física de partículas y la parte experimental por medio de los
1526 detectores de partículas con métodos de recolección de datos, selección de eventos y técnicas
1527 estadísticas para el análisis y extracción de posibles señales.

1528 **2.4.4. Formulación Teórica**

1529 En el SUSY oscuro, $U(1)$ (una simetría global de Peccei–Quinn) se rompe, dando lugar a
1530 fotones oscuros (g_γ) que se acoplan débilmente a las partículas SM a través de una pequeña
1531 mezcla cinética entre los fotones. El neutralino más ligero n_1 en el espectro visible (opuesto

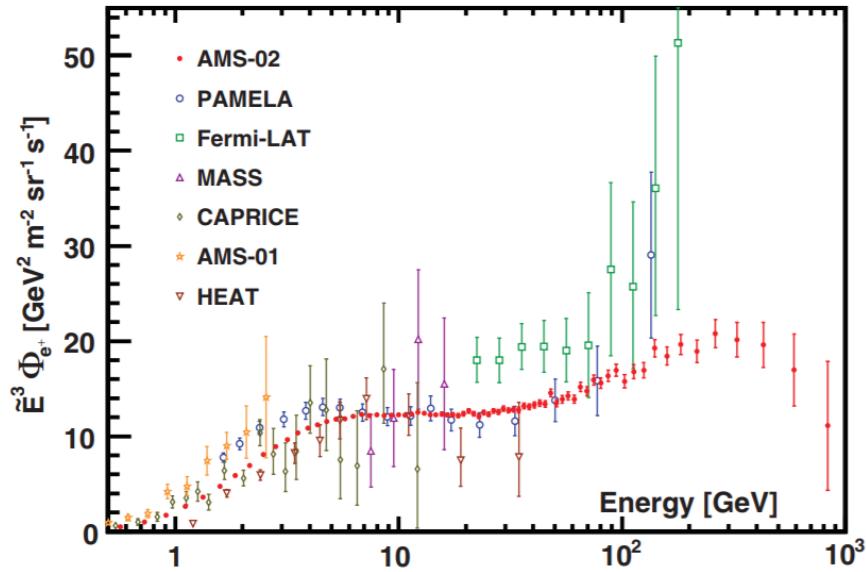


Figura 2-10: Flujo de positrones medido por el experimento AMS-02, comparado con los experimentos PAMELA, Fermi-LAT, MASS, CAPIRCE, AMS-01 y HEAT.

al escondido) de SUSY ya no es estable y puede descomponerse a través de procesos como $n_1 \rightarrow n_D + \gamma_D$, donde n_D es un fermión oscuro (neutralino oscuro) que escapa a la detección. En estos modelos, las desintegraciones de γ_D a menudo están mediadas por interacciones muy débiles con el SM, y en gran parte del espacio de parámetros disponible tienen una larga vida útil. Si la SUSY oscura se realiza en la naturaleza, la descomposición de los fotones oscuros podría ocurrir a cierta distancia dentro del detector, o incluso potencialmente fuera de este.

La falta de un exceso de antiprotones en las mediciones del espectro de rayos cósmicos limita la masa de γ a $\leq 2m_p$. Suponiendo que γ_D solo puede descomponerse en partículas SM, la fracción de ramificación ($\gamma_D \rightarrow \mu^+ \mu^-$) puede ser tan grande como 45 % esto dependiendo de m_{γ_D} . Si el acoplamiento a las partículas SM está altamente suprimido, entonces la masa m_{γ_D} también puede tener una vida útil no despreciable y recorrer cierta distancia antes de la descomposición. Por lo tanto, es importante acomodar la posibilidad de fotones oscuros de larga duración en nuestras búsquedas.

Las nuevas fuerzas ocultas en los escenarios de Dark SUSY pueden acoplarse a la hipercarga SM a través de un término de mezcla cinética en lagrangiano:

$$L_{KM} \sim \frac{\epsilon}{2} F_{\mu\nu}^\gamma F^{\mu\nu} \quad (2-2)$$

donde $F_{\mu\nu}^\gamma = \partial_\mu A_v^D - \partial_v A_\mu^D$ y A^D es el campo de calibre oscuro [37-39]. Si el A_D es masivo, entonces las partículas SM adquieren una carga adicional ϵe bajo la interacción oscura. Tenga en cuenta que en los escenarios típicos del SUSY oscuro con mezcla cinética del parámetro ϵ está dentro del rango $10^{-8} - 10^{-2}$.

Se prueba que debido a la mezcla cinética, el fotón oscuro se descompondrá en leptones SM

1552 con un ancho parcial dado por:

$$\Gamma_{\gamma_D \rightarrow l\bar{l}} = \frac{1}{3} \alpha \epsilon^2 m_{\gamma_D} \sqrt{1 - \frac{4m_l^2}{m_{\gamma_D}^2}} \left(1 + \frac{2m_l^2}{m_{\gamma_D}^2} \right) \quad (2-3)$$

1553 donde m_l es la masa del lepton y los diferentes modos de descomposición comienzan desde
 1554 $m_{\gamma_D} > 2m_l$. Además, el fotón oscuro se descompondrá en hadrones SM para masas $m_{\gamma_D} > 2m_\pi$,
 1555 con ancho parcial dado por:

$$\Gamma_{\gamma_D} \rightarrow = \frac{1}{3} \alpha \epsilon^2 m_{\gamma_D} \sqrt{1 - \frac{4m_\mu^2}{m_{\gamma_D}^2}} \left(1 + \frac{2m_\mu^2}{m_{\gamma_D}^2} \right) R(s = m_{\gamma_D}^2) \quad (2-4)$$

1556 donde $R = \sigma_{e^+e^- \rightarrow hadrons}/\sigma_{e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-}$. Los datos de la sección transversal hadrónica están
 1557 disponibles en la bibliografía científica resultado de varias mediciones experimentales, resultado
 1558 de estas pero solo se mide a partir de $\sqrt{s} = 0.36 \text{ GeV}/c^2$, que está por encima del umbral
 1559 $2m_\pi = 0.28 \text{ GeV}/c^2$. Por lo tanto, en la región donde $\sqrt{s} < 0.36 \text{ GeV}/c^2$, usamos la sección
 1560 transversal para $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$. Finalmente, para la región donde $\sqrt{s} < 2m_\pi$, sumamos solo
 1561 los anchos parciales de leptones.

Tabla 2-1: Ancho total y $f(m_{\gamma_D})$.

	$m_{\gamma_D}, \text{GeV}/c^2$								
	0.25	0.275	0.3	0.4	0.7	1	1.5	2	8.5
$\Gamma_{\gamma_D Total/\epsilon^2} [\text{MeV}]$	1	1.2	1.9	2.1	11.4	8.0	15.5	20.3	114.6
$f(m_{\gamma_D}) [\text{GeV}^{-1}]$	952.9	817.2	538.9	480.2	87.4	125.1	64.6	49.2	8.7

1562 Según las expresiones (2-3) y (2-4), las dependencias del ancho parcial de ϵ y m_{γ_D} pueden
 1563 factorizarse como $(\Gamma_{\gamma_D}/\epsilon^2)^{-1} = f(m_{\gamma_D})$, donde $f(m_{\gamma_D})$ es solo dependiente de la masa del
 1564 fotón oscuro. Los anchos parciales para los diferentes modos de decaimiento del fotón oscuro
 1565 y su ancho total (todos divididos por ϵ^2 para demostrar solo la dependencia de los anchos con
 1566 m_{γ_D}) se muestran en la Tab. 2-1. La relación de ramificación para la descomposición del fotón
 1567 oscuro a un par de muones $B_{\gamma_D \rightarrow \mu\mu} = \Gamma_{\gamma_D \rightarrow \mu\mu}/\Gamma_{\gamma_D Total}$ no depende de ϵ , y se muestra como
 1568 función de m_{γ_D} . Esta relación de ramificación $B_{\gamma_D \rightarrow \mu\mu}$ tiene un mínimo en $m_{\gamma_D} \sim 0.8 \text{ GeV}/c^2$,
 1569 donde predomina el decaimiento del fotón oscuro en hadrones.

1570 Las expresiones para los anchos parciales permiten el cálculo del tiempo de vida del fotón
 1571 oscuro:

$$\tau_{\gamma_D} = \frac{1}{\Gamma_{\gamma_D Total}} = \frac{1}{\Gamma_{\gamma_D \rightarrow e^+e^-} + \Gamma_{\gamma_D \rightarrow \mu^+\mu^-} + \Gamma_{\gamma_D \rightarrow hadrons}} \quad (2-5)$$

1572 El tiempo de vida está directamente relacionada con el parámetro ϵ y la masa del fotón oscuro
 1573 se obtiene:

$$\tau_{\gamma_D}(\epsilon, m_{\gamma_D}) = \frac{1}{\epsilon^2} \times f(m_{\gamma_D}) \quad (2-6)$$

1574 Es conveniente representar el tiempo de vida τ_{γ_D} en unidades de distancia $c\tau_{\gamma_D}$, donde c es la

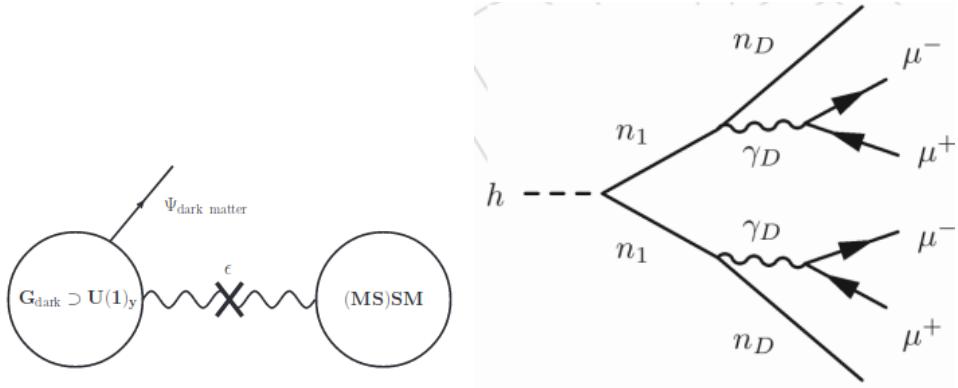


Figura 2-11: Ilustración esquemática de la conexión entre el sector oscuro y el modelo estándar, los cuales están conectados mediante un término de mezcla dinámica.

1575 velocidad de la luz. También es conveniente medir $c\tau_{\gamma_D}$ en milímetros porque la sensibilidad
 1576 del análisis a esta variable es $\sigma(mm)$. Las restricciones sobre ϵ y la masa del fotón oscuro
 1577 podrían obtenerse a partir de las restricciones sobre la vida útil del fotón oscuro porque están
 1578 directamente relacionadas entre sí, como ya se comprobó anteriormente.

1579 El diagrama de Feynman del proceso del SUSY oscuro $h \rightarrow 2n_1 \rightarrow 2n_D + 2\gamma_D \rightarrow 2n_D + 4\mu$
 1580 se muestra en la Fig. 2-11. Este modelo de referencia es solo un escenario posible, y se elige
 1581 como una representación única de un rango muy amplio de espacio de parámetros disponibles.
 1582 Este modelo simple del sector oscuro se puede ampliar de varias maneras; versiones más com-
 1583 plejas involucran otros bosones oscuros de Higgs, W y Z . También hay muchos otros procesos
 1584 permitidos, como por ejemplo $pp \leftarrow h \leftarrow Z_D Z / Z_D Z_D / Z_a \leftarrow 4\mu$. En este análisis representamos
 1585 los resultados de una manera que permite reinterpretaciones adicionales en el marco de otros
 1586 modelos.a

1587 Capítulo 3

1588 Simulación y Análisis de
1589 Resultados.*

1590

Bibliografía

- 1591 ALWALL, J., FREDERIX, R., FRIXIONE, S., HIRSCHI, V., MALTONI, F., MATTELAER, O.,
1592 SHAO, H.S., STELZER, T., TORRIELLI, P., Y ZARO, M. The automated computation of
1593 tree-level and next-to-leading order differential cross sections, and their matching to parton
1594 shower simulations. *J. High Energ. Phys.* **2014**(7):79 (2014). ArXiv: 1405.0301
- 1595 BATTISTON, R. The anti matter spectrometer (AMS-02): a particle physics detector in space.
1596 *J. Phys.: Conf. Ser.* **116**:012001 (2008)
- 1597 BERGH, S.V.D. The Early History of Dark Matter. *PUBL ASTRON SOC PAC* **111**(760):657–
1598 660 (1999). ArXiv: astro-ph/9904251
- 1599 BINOTH, T., GUFFANTI, A., GUILLET, J.P., HEINRICH, G., KARG, S., KAUER, N., MER-
1600 TSCH, P., REITER, T., REUTER, J., Y SANGUINETTI, G. Precise predictions for LHC using a
1601 GOLEM. *Nuclear Physics B - Proceedings Supplements* **183**:91–96 (2008). ArXiv: 0807.0605
- 1602 BUCKLEY, A., FERRANDO, J., LLOYD, S., NORDSTROM, K., PAGE, B., RUEFENACHT, M.,
1603 SCHOENHERR, M., Y WATT, G. LHAPDF6: parton density access in the LHC precision era.
1604 *Eur. Phys. J. C* **75**(3):132 (2015). ArXiv: 1412.7420
- 1605 BUONOCORE, L., FRUGUELE, C., MALTONI, F., MATTELAER, O., Y TRAMONTANO, F. Event
1606 generation for beam dump experiments. *J. High Energ. Phys.* **2019**(5):28 (2019). ArXiv:
1607 1812.06771
- 1608 BÍLEK, M., THIES, I., KROUPA, P., Y FAMAHEY, B. MOND simulation suggests the origin of
1609 some peculiarities in the Local Group. *A&A* **614**:A59 (2018). ArXiv: 1712.04938
- 1610 COLLABORATION, P. Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. *arXiv:1807.06209*
1611 [*astro-ph*] (2019). ArXiv: 1807.06209
- 1612 COLLESS, M. Y DUNN, A.M. Structure and Dynamics of the Coma Cluster. *ApJ* **458**:435
1613 (1996). ArXiv: astro-ph/9508070
- 1614 CONTE, E., FUKS, B., Y SERRET, G. MadAnalysis 5, a user-friendly framework for colli-
1615 der phenomenology. *Computer Physics Communications* **184**(1):222–256 (2013). ArXiv:
1616 1206.1599
- 1617 DE FAVEREAU, J., DELAERE, C., DEMIN, P., GIAMMANCO, A., LEMAÎTRE, V., MERTENS,
1618 A., Y SELVAGGI, M. DELPHES 3, A modular framework for fast simulation of a generic
1619 collider experiment. *J. High Energ. Phys.* **2014**(2):57 (2014a). ArXiv: 1307.6346

- 1620 DE FAVEREAU, J., DELAERE, C., DEMIN, P., GIAMMANCO, A., LEMAÎTRE, V., MERTENS,
 1621 A., Y SELVAGGI, M. DELPHES 3, A modular framework for fast simulation of a generic
 1622 collider experiment. *J. High Energ. Phys.* **2014**(2):57 (2014b). ArXiv: 1307.6346
- 1623 DENNER, A., DITTMAIER, S., Y HOFER, L. Collier: a fortran-based Complex One-Loop LI-
 1624 brary in Extended Regularizations. *Computer Physics Communications* **212**:220–238 (2017).
 1625 ArXiv: 1604.06792
- 1626 DEUR, A. Relativistic corrections to the rotation curves of disk galaxies. *arXiv:2004.05905*
 1627 [*astro-ph, physics:gr-qc*] (2020). ArXiv: 2004.05905
- 1628 ELLIS, R.K. Y ZANDERIGHI, G. Scalar one-loop integrals for QCD. *J. High Energy Phys.*
 1629 **2008**(02):002–002 (2008). ArXiv: 0712.1851
- 1630 FOSALBA, P., CROCCE, M., GAZTANAGA, E., Y CASTANDER, F.J. The MICE Grand Cha-
 1631 llenge Lightcone Simulation I: Dark matter clustering. *arXiv:1312.1707* [*astro-ph*] (2015).
 1632 ArXiv: 1312.1707
- 1633 HIRSCHI, V. Y PERARO, T. Tensor integrand reduction via Laurent expansion. *J. High Energ.*
 1634 *Phys.* **2016**(6):60 (2016). ArXiv: 1604.01363
- 1635 HOOPER, D. Y KRIBS, G.D. Kaluza-Klein Dark Matter and the Positron Excess. *Phys. Rev.*
 1636 *D* **70**(11):115004 (2004). ArXiv: hep-ph/0406026
- 1637 LI, Z.Y., MENDEZ, C.J.D., GIOVACCHINI, F., HAINO, S., Y HOFFMAN, J. Antiproton iden-
 1638 tification below threshold with the AMS-02 RICH detector. *Chinese Phys. C* **41**(5):056001
 1639 (2017). Publisher: IOP Publishing
- 1640 MARSH, G.E. Strings, Topological Change and Dark Matter. *arXiv:1909.01077* [*gr-qc,*
 1641 *physics:hep-th, physics:physics*] (2019). ArXiv: 1909.01077
- 1642 MASTROLIA, P., MIRABELLA, E., Y PERARO, T. Integrand reduction of one-loop scattering
 1643 amplitudes through Laurent series expansion. *J. High Energ. Phys.* **2012**(6):95 (2012). ArXiv:
 1644 1203.0291
- 1645 MIELKE, E.W., FUCHS, B., Y SCHUNCK, F.E. Dark Matter Halos as Bose-Einstein Condens-
 1646 ates. *The Tenth Marcel Grossmann Meeting* págs. 39–58 (2006). ArXiv: astro-ph/0608526
- 1647 MUNSHI, D. Y JAIN, B. Statistics of Weak Lensing at Small Angular Scales: Analytical
 1648 Predictions for Lower Order Moments. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*
 1649 **322**(1):107–120 (2001). ArXiv: astro-ph/9912330
- 1650 NAGY, Z. Y SOPER, D.E. What is a parton shower? *Phys. Rev. D* **98**(1):014034 (2018). ArXiv:
 1651 1705.08093
- 1652 PERARO, T. Ninja: Automated Integrand Reduction via Laurent Expansion for One-Loop Am-
 1653 plitudes. *Computer Physics Communications* **185**(10):2771–2797 (2014). ArXiv: 1403.1229
- 1654 ROJAS, G. Teoría de gravitación no simétrica. *Integración: Temas de matemáticas* **26**(2):77–
 1655 88 (2008). Publisher: Universidad Industrial de Santander Section: Integración: Temas de
 1656 matemáticas

- 1657 ROMAO, J.C. Y SILVA, J.P. A resource for signs and Feynman diagrams of the Standard
 1658 Model. *Int. J. Mod. Phys. A* **27**(26):1230025 (2012). ArXiv: 1209.6213
- 1659 RUBAKOV, V.A. Harrison-Zeldovich spectrum from conformal invariance. *J. Cosmol. Astro-
 1660 part. Phys.* **2009**(09):030–030 (2009). ArXiv: 0906.3693
- 1661 SANTAMARIA, A. Masses, Mixings, Yukawa Couplings and their Symmetries. *Physics Letters
 1662 B* **305**(1-2):90–97 (1993). ArXiv: hep-ph/9302301
- 1663 SCHÄFER, C., FOURESTEY, G., Y KNEIB, J.P. Lenstool-HPC: A High Performance Computing
 1664 based mass modelling tool for cluster-scale gravitational lenses. *arXiv:2004.06352 [astro-ph]*
 1665 (2020). ArXiv: 2004.06352
- 1666 SERVANT, G. Y TAIT, T.M.P. Is the Lightest Kaluza-Klein Particle a Viable Dark Matter
 1667 Candidate? *Nuclear Physics B* **650**(1-2):391–419 (2003). ArXiv: hep-ph/0206071
- 1668 SJÖSTRAND, T., ASK, S., CHRISTIANSEN, J.R., CORKE, R., DESAI, N., ILTEN, P., MRENNA,
 1669 S., PRESTEL, S., RASMUSSEN, C.O., Y SKANDS, P.Z. An Introduction to PYTHIA 8.2.
 1670 *Computer Physics Communications* **191**:159–177 (2015a). ArXiv: 1410.3012
- 1671 SJÖSTRAND, T., ASK, S., CHRISTIANSEN, J.R., CORKE, R., DESAI, N., ILTEN, P., MRENNA,
 1672 S., PRESTEL, S., RASMUSSEN, C.O., Y SKANDS, P.Z. An Introduction to PYTHIA 8.2.
 1673 *Computer Physics Communications* **191**:159–177 (2015b). ArXiv: 1410.3012
- 1674 VAN DER MAREL, R.P., BESLA, G., COX, T.J., SOHN, S.T., Y ANDERSON, J. The M31
 1675 Velocity Vector. III. Future Milky Way-M31-M33 Orbital Evolution, Merging, and Fate of
 1676 the Sun. *ApJ* **753**(1):9 (2012). ArXiv: 1205.6865
- 1677 VAN HAMEREN, A. OneLoop: for the evaluation of one-loop scalar functions. *Computer Physics
 1678 Communications* **182**(11):2427–2438 (2011). ArXiv: 1007.4716
- 1679 WANG, F. A novel pulsed fiber laser: Further study on the bias-pumped gain-switched fiber
 1680 laser. *Laser Phys. Lett.* **15**(8):085105 (2018). ArXiv: 1804.00444
- 1681 WELLS, P.S. The upgraded ATLAS and CMS detectors and their physics capabilities. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*
 1682 **373**(2032):20140046 (2015). Publisher: Royal Society
- 1683 WU, X. Y KROUPA, P. Galactic rotation curves, the baryon-to-dark-halo-mass relation and
 1684 space-time scale invariance. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **446**(1):330–
 1685 344 (2015). ArXiv: 1410.2256