



UNIVERSIDAD DEL BÍO – BÍO  
FACULTAD DE EDUCACIÓN Y HUMANIDADES  
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA EDUCACIÓN  
CARRERA DE PEDAGOGÍA EN CIENCIAS NATURALES CON MENCIÓN EN BIOLOGÍA O FÍSICA O QUÍMICA

# **INTRODUCCIÓN A LA FÍSICA DE PARTÍCULAS: DESCRIPCIÓN E INTERACCIÓN DE PARTÍCULAS ELEMENTALES**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE PROFESOR DE ENSEÑANZA MEDIA EN CIENCIAS NATURALES CON MENCIÓN EN FÍSICA**

**AUTORES: DÍAZ LEIVA, LEONARDO SALVADOR**

**JIPOULOU SÁEZ, RODRIGO ANDRÉS**

**RAMÍREZ MEDINA, BASTIÁN RODRIGO**

**UMANZOR MARDONES, MARÍA JOSÉ**

Profesor guía: Schröder, York

Profesor informante: Manniatis, Markos

CHILLÁN, 2020

## INDICE

<b>Introducción .....</b>	<b>6</b>
<b>Capítulo I.....</b>	<b>8</b>
<b>Viaje al centro del universo.....</b>	<b>8</b>
<b>El universo a edad temprana.....</b>	<b>9</b>
<b>Capítulo II.....</b>	<b>14</b>
<b>De los quarks a los cuásares .....</b>	<b>14</b>
<b>El universo en temperatura y tiempo.....</b>	<b>15</b>
<b>Capítulo III.....</b>	<b>18</b>
<b>Energías y ondas .....</b>	<b>18</b>
<b>El electrón y el protón.....</b>	<b>20</b>
<b>Capítulo IV .....</b>	<b>22</b>
<b>El Corazón de la Materia.....</b>	<b>22</b>
<b>Capítulo V .....</b>	<b>25</b>
<b>Aceleradores: cósmicos y hechos por el hombre .....</b>	<b>25</b>
<b>Capítulo VI .....</b>	<b>30</b>
<b>Detectores: Maquinas y cámaras en el tiempo.....</b>	<b>30</b>
<b>Cámara de burbujas .....</b>	<b>30</b>
<b>Cámara de burbuja electrónica .....</b>	<b>32</b>
<b>Detector de Neutrinos .....</b>	<b>33</b>
<b>Capítulo VII .....</b>	<b>37</b>
<b>Las fuerzas de la naturaleza .....</b>	<b>37</b>

Portadores de fuerza.....	39
Capítulo VIII .....	42
Materia exótica (y antimateria).....	42
Quark strange .....	42
Quarks charm .....	43
Quark de bottom y top .....	43
Leptones .....	47
Capítulo IX .....	51
¿De dónde ha salido la materia? .....	51
El universo primitivo.....	53
Capítulo X Preguntas para el siglo XXI .....	57
Materia oscura .....	57
Supersimetría .....	58
Neutrinos masivos .....	59
Masa .....	55
Plasma de Quark-Gluon.....	56
Antimateria y CP.....	56
Capítulo XI .....	58
Panorama General .....	58
Electrodinámica cuántica .....	58
AMM.....	58
Diagramas de Feynman .....	59
Capítulo XII .....	61
Introducción y definiciones a la segunda parte .....	61
Historia.....	63

Propiedades de los muones.....	64
Momento magnético de un leptón .....	65
Conexiones con los diagramas de Feynman.....	67
Capítulo XIII .....	69
Los experimentos del muon g-2 .....	69
Experimento CERN-I (1961).....	69
Experimento CERN-II (1962).....	71
Experimento CERN-III (1975).....	73
Experimento Brookhaven E821.....	76
Resultado del experimento BNL .....	80
Experimento Fermilab E989 .....	80
Fase del experimento Fermilab en el anillo de almacenamiento .....	81
Componentes del experimento Fermilab en el anillo de almacenamiento.....	85
Resultados futuro del experimento Fermilab .....	89
Capitulo XIV.....	90
Clasificación de contribuciones, dependencia en masas, expansión en serie .....	90
Contribuciones universales .....	93
El momento anómalo de los electrones y la constante de la estructura fina .....	100
Contribuciones dependientes de masas.....	102
3 bucles: inserciones de dispersión luz a luz y polarización al vacío.....	104
4 bucles. Inserciones de leptones ligeros.....	106
5 bucles y resumen de contribuciones QED.....	109
Capítulo XV .....	111
Conteos de Diagramas de Feynman .....	111
Tipos de diagramas.....	112

<b>Ideas de código .....</b>	<b>113</b>
<b>Filtración de códigos .....</b>	<b>117</b>
<b>Capítulo XVI.....</b>	<b>130</b>
<b>Perspectivas y conclusiones .....</b>	<b>130</b>
<b>Posibilidades experimentales futuras .....</b>	<b>130</b>
<b>Algunas perspectivas sobre <math>a\mu</math> .....</b>	<b>131</b>
<b>Nuevos resultados de la constante de estructura fina (<math>\alpha</math>). .....</b>	<b>133</b>
<b>Conclusiones.....</b>	<b>134</b>
<b>Anexo A .....</b>	<b>136</b>
<b>Anexo B .....</b>	<b>154</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>158</b>

## Introducción

La búsqueda por comprender el origen del universo, su comportamiento y evolución hasta la actualidad, ha sido el motor de arranque de esta memoria, adentrándonos a indagar aún más sobre este mundo, debido a que, como alumnos de Pregrado de Pedagogía en Ciencias Naturales con mención en Física, tenemos una visión amplia del Universo, más aun, desconocemos aquellas partículas más básicas, detectores y reactores que se han utilizado para poder entender, comprender y describir cómo actúa el universo a escalas microscópicas, además de cuáles son sus estructuras y funcionamientos de estos.

Se analizó sobre este tema de forma grupal, debido a la recurrencia de dudas que surgían durante el período que compartimos con nuestro profesor de Física Moderna, donde se logró generar la curiosidad y motivación por comprender el funcionamiento de los diversos detectores de energía, la información que se rescata de ellos y que respuestas podemos encontrar para explicar los orígenes del todo.

Esta memoria, tendrá un recorrido desde la génesis del Universo, hasta cómo se han logrado estas conclusiones por medio de algunos detectores, para luego, en el siguiente capítulo conocer las formas más básicas de la materia como lo son los quarks que son parte de partículas elementales.

En el capítulo III se analizarán las energías, ondas y la relación que existe entre estas y como es que influyen en la cantidad de temperatura emitidas. A su vez, se explicará cómo es el núcleo y como es que se llegó a conocer el electrón desde aun cuando no existía noción de él.

En el capítulo IV encontrarás como está constituida la Tierra, conocerás más a fondo los quarks, siendo estos, parte de los protones y neutrones, como a su vez, comprenderás que estas partículas se mueven como UP y DOWN y que emiten cierta energía.

En el capítulo V nos entraremos en cómo están hechos y cómo funcionan los distintos aceleradores de partículas durante el tiempo, además de cómo se fueron realizando los distintos programas del CERN que es uno de los centros más importantes del mundo que se dedica a explicar los distintos comportamientos de la materia y como estos funciona.

En el capítulo VI se hace un recorrido por las distintas maquinarias que se fueron utilizando durante el tiempo y como es que distintos métodos fueron produciendo que nos adentráramos en mejores y más claras imágenes para darle respuesta a como se mostraban estos distintos componentes de la materia.

En el capítulo VII se podrán adentrar en cómo actúa la fuerza, pero con una mirada desde las partículas pocas comunes como los gluones y quarks para que así conozcas cómo se comportan estos en el núcleo, para luego entrarse en el mundo de la antimateria y cómo se comportan este tipo de quarks en el capítulo VIII.

En el capítulo IX podrás descubrir cómo es que se componía e interactuaban las partículas para generar la materia y el universo que conocemos como tal. Posterior a esto, en el capítulo X ampliarás tu curiosidad por comprender temas como materia oscura, la supersimetría, neutrinos masivos, masa, plasma de Quark-Gluon y antimateria y CP.

Para finalizar en el capítulo XI lograrás descubrir la electrodinámica cuántica y como es que Richard Feynman veía este tema, aportándote así en la comprensión de lo que nos rodea, teniendo una visión más crítica de las interacciones de las partículas elementales de la materia.

Esperando como equipo tengas una gran lectura, donde puedas conocer con mayor profundidad muchos de los temas que quizás conoces, desde una mirada más superficial, para alumnos de pregrado o personas aficionadas en la comprensión del mundo cuántico. Deseamos con ansias que esta lectura te cautive, sea de utilidad y que llene de nuevos conocimientos.

## Capítulo I

### Viaje al centro del universo

La búsqueda por descubrir de qué estamos hechos y qué es lo que formó la materia, han sido preguntas que nos siguen desde el tiempo de los griegos hasta la actualidad. En ese entonces, se creía que la materia se conformaba por cuatro elementos: “agua, fuego, tierra y aire” y eventualmente, su creencia se encontraba bastante alejado de lo que conocemos ahora. Sabemos por la Química, que estos elementos están compuestos por diferentes tipos de átomos, que fueron creados en su mayoría, durante el Big- Bang o gran explosión.

Estos átomos son peculiares, pues es la pieza más pequeña de un elemento. Por ejemplo, el Hidrógeno, gas y elemento más simple encontrado en la materia, sólo contiene un electrón orbitando en un espacio vacío alrededor del núcleo atómico, conformado por un protón. Pero la materia no está compuesta solamente por Hidrógeno, sino que hay más composiciones de átomos diferentes, que presentan una partícula más dentro de su núcleo, denominada neutrón. Estas pequeñas piezas que más adelante se discutirán, presentan algunas características que son eventuales nombrarlas. Neutrón y Protón presentan masas iguales, a diferencia del electrón, pero solamente los últimos exhiben cargas eléctricas las que son opuestas entre sí, correspondiendo al electrón su carga negativa y protón, cargado de forma positiva.

Estudiar el átomo es una tarea compleja, dado que no tenemos microscopios tan potentes para observarlos con nuestra visión, pero con el avance de la ciencia mediante aceleradores de partículas como el SLAC “Centro del Acelerador Lineal de Stanford”, se comprobó que no solamente se conforma por electrones, neutrones y protones [1]. Mediante detectores de partículas, se ha registrado que, luego del choque entre dos protones o dos neutrones a alta energía, se liberan subpartículas o partículas elementales denominadas quarks que presentan sus propias características. El neutrón, por ejemplo, presenta 3 quarks (1 up - 2 down)

A diferencia del protón que presenta 3 quarks (2 up – 1 down), detalles que se retomarán más adelante.

Como ya sabemos, dentro del átomo ocurren sucesos que son prescindibles discutirlos. Protones y electrones presentan cargas opuestas, pero ¿Por qué no se atraen entre sí?, o, por ejemplo, dentro del núcleo de un átomo diferente al Hidrógeno, existe un conglomerado de neutrones y protones unidos y estos últimos, ¿por qué no se repelen? Para responder estas interrogantes, debemos saber que existen cuatro fuerzas fundamentales que rigen el universo. Estas fuerzas son: Gravedad, Electromagnética, Nuclear Fuerte y Nuclear Débil. La gravedad es la más familiar, pues la experimenta la materia a gran escala, como cuerpos masivos como planetas, agujeros negros, etc. La fuerza electromagnética permite mantener a los electrones orbitando alrededor del núcleo de un átomo y también posibilita la unión de átomos, para formar elementos más pesados. Dentro y alrededor del núcleo se evidencian las dos fuerzas restantes. La fuerza nuclear fuerte mantiene unido a los quarks de los protones y neutrones dentro del núcleo atómico y la fuerza nuclear débil, permite la transmutación de los protones y neutrones, de forma radioactiva, liberando así neutrinos.

Tras esto, sabemos que neutrones, protones y electrones no se consideran como partículas fundamentales, dado que se componen por partículas aún más pequeñas, denominadas quarks y leptones respectivamente, conceptos que se retomarán en los próximos capítulos.

## **El universo a edad temprana**

Es difícil creer que el universo nació de algo minúsculo, más pequeño que el átomo, en un cataclismo que denominamos el Big Bang, aproximadamente hace 15 mil millones de años atrás. Una abrazadora explosión de energía que a medida que se enfriaba, se convertía en materia. Las partículas subatómicas se fueron agregando por la acción de la gravedad, formándose átomos simples como el Helio e Hidrógeno, las cuales, al aumentar de masa y gravedad, iniciaban la formación de estrellas, millones de ellas en cúmulos estelares y estas mismas,

Convirtiéndose en galaxias hasta formar los elementos químicos más pesados, dando origen a la vida que tenemos hoy en día, producto de supernovas ocasionadas por la muerte de estrellas. Pero todo este suceso cósmico no ocurrió de un instante al otro, sino que pasaron millones de años para formar el universo como actualmente lo conocemos.

Para relatar con mayor claridad este suceso, se explicará mediante una imagen referencial sobre la historia del universo y una gráfica que relaciona la Temperatura versus el tiempo transcurrido, desde el Big Bang hasta la actualidad. Así también, debemos tener en cuenta que, en la génesis del universo, todo ocurría de forma muy rápida, por lo cual, el tiempo y temperatura se trabajaron en escala logarítmica para poder detallar con mejor detalle las fluctuaciones de la Temperatura en todo este período.

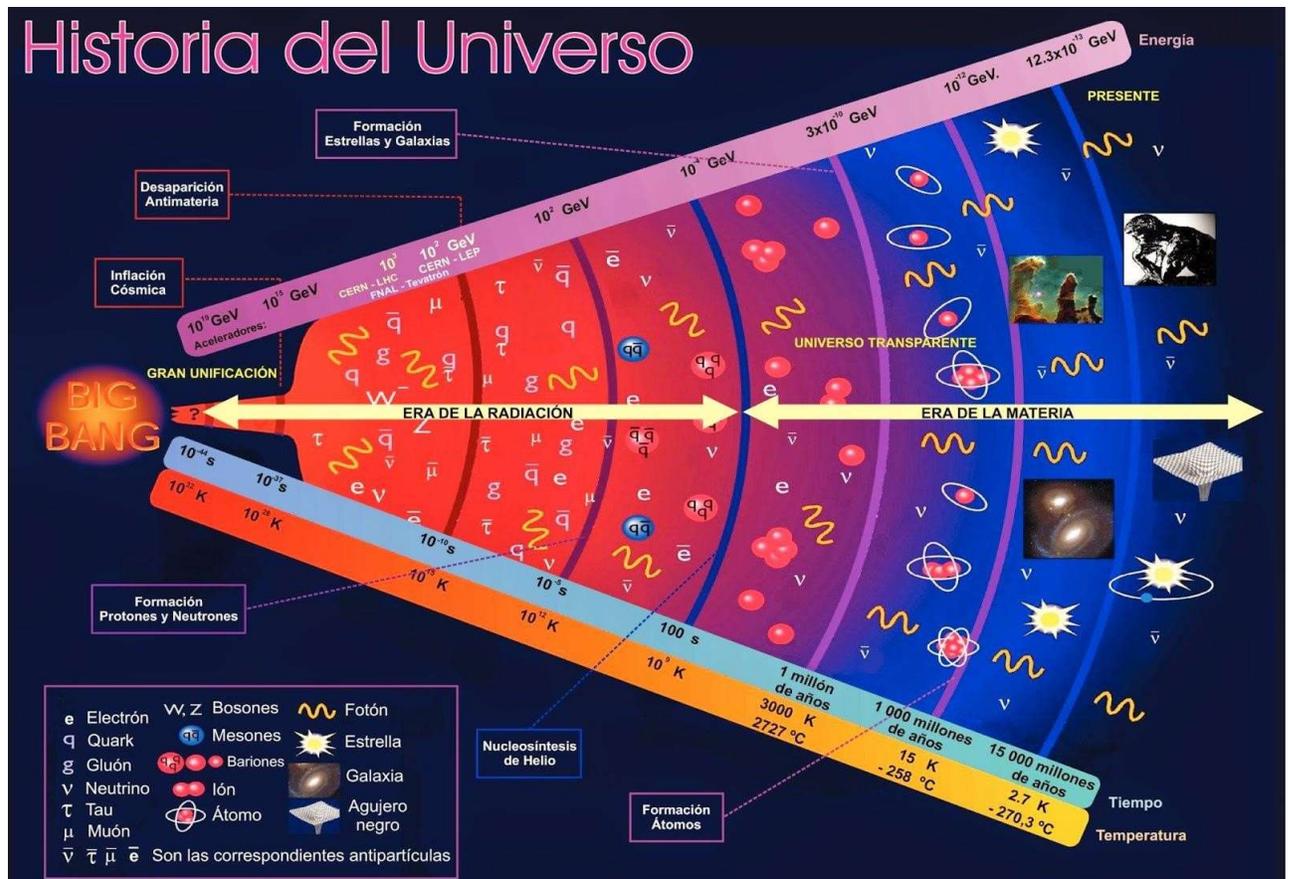


Figura 1: Descripci3n pict3rica de la historia del universo desde el Big-Bang [2].

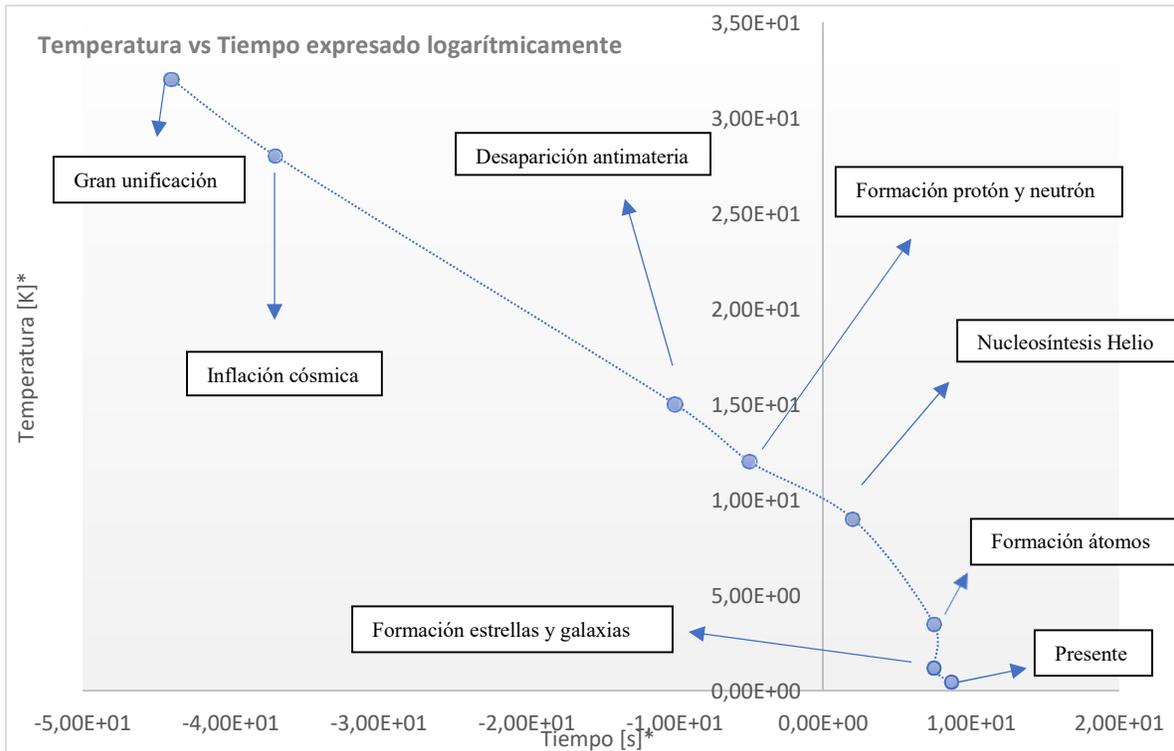


Figura 2: Gráfica historia térmica del Universo.

\*El tiempo como la temperatura han sido expresados de forma logarítmica. Para conocer valor real;  $10^{\log(\text{tiempo/temperatura})}$ .

Época de Planck: Esta ocurre antes de los  $10^{-43}$ s. Poco se conoce sobre lo que ocurrió sobre esta época. Existen teorías que hablan sobre una única fuerza fundamental que unificaba las cuatro fuerzas que rigen el universo.

Época de gran unificación: de  $10^{-43}$  a  $10^{-36}$ s. El universo se expande y comienza a enfriarse, pasando de  $10^{32}$  a  $10^{28}$  K. La gravedad comienza a separarse de las interacciones de Gauge, es decir, de la interacción electromagnética y de las fuerzas nucleares fuertes y débiles. La época culmina cuando la Fuerza nuclear fuerte, se desprende de la Fuerza electrodébil.

Inflación cósmica: de  $10^{-36}$  a  $10^{-33}$ s. Comenzando con una Temperatura de  $10^{28}$ K, el universo está aislado y entra en fase de expansión rápida homogénea e

Isotrópicamente. Parte de la energía de los fotones, se convierten en quarks, pero decaen rápidamente, producto de la alta temperatura.

Recalentamiento: En este momento, el universo está dominado por radiación, formándose los quarks, electrones y neutrinos, a una temperatura fluctuante entre  $10^{28}$  a  $10^9$ K. El tiempo ocurrido en este proceso, se encuentra entre  $10^{-37}$  a  $10^2$ s

Bariogénesis: Caso hipotético, donde se produce la asimetría entre bariones y anti-bariones durante los primeros instantes de la formación del universo. Aproximadamente, ocurre entre los  $10^{-5}$  a  $100$  [s] a una temperatura entre  $10^{12}$  a  $10^9$ K.

Época electrodébil: alrededor de  $10^{-12}$ s. Se cree que todas las partículas elementales adquieren masa, mediante el mecanismo de Higgs, debido a la ruptura espontánea de la simetría electrodébil. En este momento, los neutrinos empiezan a viajar libremente en el espacio cósmico.

Época del Hadrón: alrededor de  $10^{-6}$  a  $10^{-2}$ s. El plasma quark- gluón del que está compuesto el universo hasta este momento, se enfría hasta formar hadrones, incluyendo bariones como los protones y neutrones, aproximadamente a una temperatura de  $10^9$ K.

Nucleosíntesis: del segundo 1 hasta 3 minutos: En este instante, el universo se encuentra lo suficientemente frío, para formar núcleos atómicos. Estamos hablando de una temperatura bajo los  $10^9$ K. Protones y neutrones comienzan a combinarse, formando  ${}^4\text{He}$  y sólo escasas cantidades de otros núcleos.

Dominación de la materia: Ocurriendo alrededor de 70000 años después del inicio de la explosión. La densidad de núcleos atómicos y fotones son iguales.

Recombinación: 300000 años después. Hidrógeno y Helio se forman, mientras que la densidad del universo comienza a disminuir. Los fotones evolucionan independientemente de la materia. Todo este proceso ocurre aproximadamente a unos 3000 K.

Formación de estructuras. Estructuras pequeñas son formadas antes que las más grandes, dando origen a los cúasares, una fuente astronómica compuesta por energía electromagnética que incluye radiofrecuencia y luz visible, en temperaturas bajo 3000 K.

Formación de estrellas: Alrededor de 250 millones de años, las estrellas comienzan a formarse, uniendo los elementos que habitan en la infinidad del cosmos, es decir, Hidrógeno, Helio y Litio. En este instante, la temperatura del universo se encuentra alrededor de 15 K a 2.7 K.

Formación de Galaxias: 670 millones de años después, el gran volumen de materia comienza a colapsar formando poblaciones de galaxias, para luego formar cúmulos y supercúmulos. La temperatura del universo se encuentra alrededor de 15 K a 2.7 K.

Formación del sistema solar: 8000 millones de años después. Se forman los objetos de la escala de nuestro sistema solar. En este punto, ya nos encontramos cerca de 2.7 K.

Hoy, 15 mil millones de años después, sabemos que el universo continúa expandiéndose. Los supercúmulos son considerados como la estructura más grande que ha formado el universo y se han establecido teorías de cómo el universo cesará. Al final de cuentas, sabemos que: “Somos parte de este universo, estamos en este universo, pero quizás más importante que estos dos hechos es que el universo está en nosotros” [3].

## Capítulo II

### De los quarks a los cuásares

En el mundo de la física existen objetos a grandes escalas (planetas, estrellas, galaxias, cúmulos y supercúmulos), como también existe un micro mundo de partículas a escala pequeña (átomos, núcleo, electrones, protones, neutrones y quarks).

Desde la perspectiva del ojo humano es difícil visualizar distancias tan grandes cuando se expresan en unidad de metro, por lo cual, para evitar el uso de tantos ceros, se utiliza otra unidad de medida acorde a escalas tan grandes, en la cual corresponde el año luz ( $1 \text{ años luz} = 10^{16} \text{ m}$ ). Por lo tanto, a partir de esta relación, se puede decir que la vía láctea se extiende a 100000 años luz equivalente a  $10^{21} \text{ m}$ , el universo mismo tiene una extensión 10 mil millones de años luz, equivalente a  $10^{26} \text{ m}$ .

Como el ojo humano está limitado a observar escalas grandes, existen instrumentos que le permite lograr visualizarlo, tales como el telescopio, posibilitando así, el análisis de un campo bastante amplio de nuestro universo.

Si ahora exploramos este micro mundo de la física, observaremos que un átomo está casi vacío, es decir, el espacio que hay entre el núcleo y los orbitales (región donde se mueven los electrones) es puro vacío. Si comparamos la extensión del núcleo central y el radio del átomo presenta un factor de 1/1000, en cambio, el sistema solar tiene un factor de 1/100, por lo que el átomo está más vacío que nuestro sistema solar.

Como ocurría a escalas grandes, el ojo humano está restringido en observar a escalas bastante pequeñas. En la siguiente tabla se presenta las distancias en metros, desde los átomos hasta los quarks.

Tabla I: Tamaño del mundo microscópico [6]

Átomos	$10^{-10}$ m
Núcleo	$10^{-15}$ m
Protones y neutrones	$10^{-15}$ m
Quarks	$\sim < 10^{-18}$ m

Como vemos en la tabla a medida que la escala se hace más pequeña, más difícil es visualizarlo. Por lo tanto, existen instrumentos que nos permiten estudiar este mundo microscópico, los que eventualmente son los microscopios y los aceleradores de partículas.

Ahora, para que sea más fácil de manejar las cifras pequeñas, dos famosos científicos atómicos y nucleares del siglo XIX y XX, implementaron un sistema de unidad para escala pequeñas, una de ellas es el Angstrom ( $1 \text{ angstrom} = 10^{-10}\text{m}$ ) y el otro es el fermi ( $1 \text{ fermi} = 10^{-15}\text{m}$ ). Como podemos observar la unidad de Angstrom es equivalente al tamaño del átomo y el fermi al tamaño al tamaño del núcleo. Por lo tanto, el Angstrom es utilizado a escala atómica y molecular y el fermi a escala de partículas y nuclear.

### El universo en temperatura y tiempo

La energía a escala subatómica se vuelve más difícil al utilizar la unidad de Joule, debido a que resulta valores demasiado pequeños, por lo tanto, para obtener un valor de la energía que sea más manejable a esta escala se utilizó la unidad de electronvoltio (eV), en la cual,  $1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}\text{J}$ . La energía está ligada con la temperatura a partir de la siguiente expresión:

$$E = kT$$

Se puede establecer que  $1\text{eV} = 10^4\text{K}$

Nuestro universo en unos pocos microsegundos después del Big Bang era tan caliente que las partículas elementales que existían eran quark y electrones, en la cual presentaba una energía de 1 TeV equivalente a  $10^{16}$ K. Poco a poco el universo comenzó a enfriarse y la energía bajó a 1 GeV, donde los quarks se agruparon en tres y formaron los protones y neutrones. Posteriormente la temperatura del universo continúa disminuyendo a unos  $10^{10}$ K, en términos de energía a 1 MeV, energía necesaria para que los protones y neutrones se junten y formen el núcleo atómico. Producto de la fuerza gravitacional del universo estos núcleos son agrupados, formando estrellas, en el caso del sol, tenía una energía de 1 KeV equivalente a  $10^7$ K. Los átomos pueden sobrevivir a temperatura de  $10^4$ K, superior a esta temperatura no son capaces de sobrevivir.

Por lo tanto, producto de este enfriamiento el universo se está expandiendo, por ende, las ondas de luz se estiran, aumentando su longitud de onda, desplazándose cada vez más al rojo en el espectro electromagnético. El desplazamiento al rojo es el efecto equivalente para las ondas de luz emitidas por un objeto [4].

En 1929 el astrónomo E. Hubble postulo que el universo se expandía de tal modo que cada galaxia se aleja de nosotros a una velocidad que es proporcional a su distancia, mientras más débil es el brillo de las galaxias, mayor será su velocidad de alejamiento. En el siguiente gráfico, representa la velocidad frente a la distancia con los datos originales de 1929 descrito por Hubble, mediante el desplazamiento al rojo de 24 nebulosas.

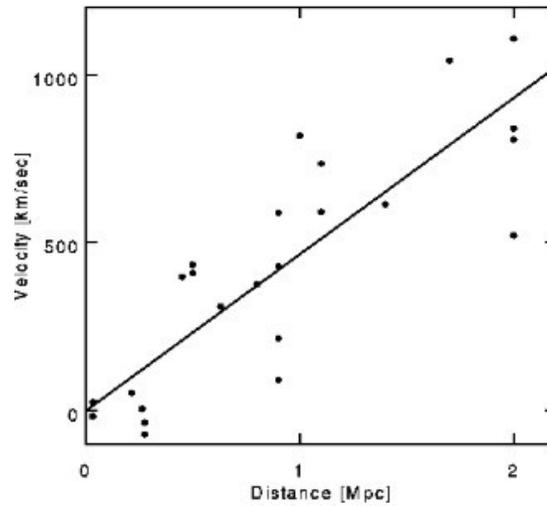


Figura 3. Expansión del Universo [5].

Es importante saber que cuanto más lejana estén las galaxias de otras, las líneas espectrales se desplazan hacia la zona de longitudes de ondas más larga, con energía y frecuencia menor, a esto se le denomina corrimiento o desplazamiento al rojo.

### **Capítulo III**

## **Energías y ondas**

Para el humano el descubrir cosas en profundidad se ha convertido en un reto, así es también para los físicos los cuales tienen como reto saber cómo se originan las cosas esenciales, es por esto por lo que han ido avanzando en métodos para poder acceder a los comportamientos de las partículas.

La luz es una forma de radiación electromagnética, los ojos solo pueden ver una parte del espectro electromagnético, -cuando el espectro electromagnético esta por completo- así como solo vemos una parte la otra la podemos sentir con la piel ya que esta se manifiesta como calor, incluso existiendo maquinas que son capaces de ver a los moderadores por el calor que emiten.

La longitud de onda que alcanzamos a percibir alcanza una medida de  $10^{-7}\text{m}$  lo que es mucho más grande que un átomo, para lo cual poder estudiarlos se utilizan haces de partículas como los electrones, los que pueden ser acelerados a lo cual a mayor energía será de una menor longitud de onda.

Los rayos X son luz con longitudes de onda cortas, estas son mayor que las de los átomos individuales, por lo que hace a los átomos aun invisibles, pero en los planos adyacentes de la matriz regular dentro de los cristales es similar a la longitud de los rayos X, al poder discernirlos a esto se le conoce como cristalografía de rayos X.

La codificación de la cristalografía de las múltiples ondas dispersas de las capas regulares del cristal resultaría

$$E = h\nu$$

Donde la constante de proporción,  $h$ , es la constante de Planck.

La longitud de onda y la frecuencia están relacionadas con la velocidad, así podemos relacionar la energía y la longitud de onda

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

Donde la constante de proporcionalidad  $hc \sim 10^{-6} \text{ eV m}$ . esto permite relacionar la energía y la longitud de onda, por lo que puede estar relacionada, así como el cuadro:

Tabla II: Energía y temperatura [6].

ENERGY	Wavelength (m)
1eV	$10^{-6}$
1keV	$10^{-9}$
1MeV	$10^{-12}$
1GeV	$10^{-15}$
1TeV	$10^{-18}$

**5. Energy and approximate wavelengths.**

Como no se puede trabajar con estrellas se ocupa otro método, el cual es trabajar con electrones y protones, y acelerarlas en campos electromagnéticos. Por lo que observar los átomos se hace fácil ya que solo hay que acelerar las partículas, darles más energías y así podremos observar longitudes de onda pequeña, para alcanzar las distancias del núcleo atómico ( $10^{-15}\text{m}$ ) para lo que se requiere energías al orden de los GeV.

A principios del siglo XX se trabajaba con una cierta cantidad de GeV, por lo que ahora se dio paso a trabajar con escala de los TeV, sondeando la materia a distancias menores de  $10^{-18}\text{ m}$ . Esta medida de longitud de onda en donde se pueden observar electrones y quarks por lo que todo que conocemos embarca todo aquello que se pueda observar sobre los  $10^{-18}\text{ m}$ .

A finales del siglo XX solo se podía generar energías que bordeaban las decenas de energía de MeV por metro recorrido, por esto en el SLAC que era de 3Km de largo se alcanzaron electrones de hasta 50 GeV, en tanto en el CERN que tiene una longitud de 27 km en donde los electrones alcanzan energías de hasta 100 GeV. Para los protones, que son mucho más masivos y tienen mayor fuerza no se necesita una gran energía.

## **El electrón y el protón**

Estos son los más básicos de un núcleo atómico, son la parte más pequeña, desde el siglo XIX que se trabaja con haces de electrones, aunque no se conocía que eran esto, a los que se les llamaron rayos catódicos que era la luz que se formaba al pasar corriente eléctrica por gases, se dice que estos pueden atravesar la materia solida ya que estos son tan vacíos como una estrella en el espacio.

Hoy se sabe que el Helio tiene en su núcleo atómico dos protones y dos neutrones, lo importante de esto que son altamente grandes y positivos y además que estos irradian energía emitiendo partículas alfa, esto dio origen para que Rutherford descubriera el núcleo atómico, ya que las partículas alfas chocan con los protones de algún elemento estos salen disparados, pero luego volverán, esto

deja un rastro el cual pudo ser percibido al hacer el experimento en cámara de gases.

Lo más importante para poder analizar estos núcleos atómicos es trabajar con núcleos con haces de protones para que estos no choquen con otras cosas y seas mucho más limpias y sin otros desechos, a lo que hoy en día trabajamos con medidas muy pequeñas las que sondan los  $10^{-19}\text{m}$ .

A lo largo de la historia se pudo alcanzar una distancia de  $10^{-15}\text{m}$  lo que nos decía que en los núcleos se encontraban los neutrones y protones, pero no es hasta que se utilizó un acelerador de partículas que alcanzo energías superiores a 10 GeV donde se pudo alcanzar  $10^{-16}\text{m}$  de distancia por lo que se pudo observar lo que hoy conocemos como quarks que parecen ser parte de lo más básico que se conoce.

## Capítulo IV

### El Corazón de la Materia

La primera pista sobre la existencia de electrones dentro de los átomos fue el descubrimiento de que los elementos atómicos emiten luz con longitudes de onda discretas que se manifiestan, por ejemplo, en un arcoíris o líneas espectrales. El estado basal (Tierra) de un átomo corresponde, cuando su configuración, tiene la menor energía total, se puede encontrar sin emitir ni absorber energía, este es el estado más puro de un átomo. El estado excitado de un átomo corresponde a cuando la configuración posee una mayor energía que la del estado basal (Tierra), los espectros atómicos se deben a la luz que se irradia o absorbe cuando sus electrones saltan entre los estados excitados.

Cuando se da más y más energía a los electrones de un átomo se eleva a niveles de energía cada vez más altos, hasta que finalmente son expulsados del átomo, a esto llamamos átomo ionizado. En el caso del protón, ocurre que, al ser golpeado con cada vez más altas energías, sus quarks se elevan a niveles más altos, y se logra ver una resonancia de corta duración. Esta energía se libera rápidamente, emitiendo fotones o, como se evidencia, otras partículas, y el estado de resonancia decae de nuevo al protón o al neutrón. Los estados o niveles excitados son de corta duración, y liberan el exceso de energía, típicamente irradiando energía en forma de fotones de rayos gamma, y caen al estado basal (de tierra) de protón o neutrón. A la inversa, se puede lograr excitar los estados de resonancia dispersando electrones de protones y neutrones.

Existen los quarks que coexisten principalmente con dos clases de combinaciones, los “**Bariones**” (estados unidos de tres quarks) y los “**Mesones**” (estados unidos de un quark y un antiquark).

Se requiere de tres quarks para la formación de protones y de neutrones, dos quarks up y un down hacen un protón y dos quarks down y un up hacen un neutrón. Los quarks se encuentran cargados eléctricamente, al estar compuestos por tres quarks la carga de un protón da como resultado +1,  $p (uud) = 2/3 + 2/3 - 1/3 = +1$ , y de un neutrón  $n (ddu) = -1/3 - 1/3 + 2/3 = 0$  (ver tabla III)

Tabla III: Properties of up and down quarks. (Propiedades de quarks arriba y quark abajo) [6].

quark	Up	Down
Charge	+2/3	-1/3
Mc <sup>2</sup> (MeV)	= 4	= 5
Spin	1/2	1/2

De la masa de un quark individual podemos decir que son diez veces más grande que la de un electrón por eso la masa de protones es más grande que la del electrón. El electrón posee un hermano idéntico, difiriendo de este en que no posee carga eléctrica, se le conoce como neutrino, este es el producto de una desintegración radiactiva de muchos núcleos atómicos. El neutrón al sufrir una decadencia beta -esto mientras no se encuentre atrapado en un núcleo-, un neutrón puede convertirse en un protón, emitiendo un electrón y un neutrino en proceso.

El neutrino es considerado como un mensajero de los primeros procesos del universo, este determina cuán rápido se expande el universo, y pueden determinar cuán rápido se expande y cuando puede terminar. El neutrino desempeña un papel en la desintegración radiactiva beta, así como en la fusión, se produce igualmente, por ejemplo, en el sol, y su pequeña masa podría influir la atracción gravitacional total del universo en el que vivimos. El sol al alimentarse de la fusión de protones cerca de su centro que chocan entre sí, uniendo y construyendo los núcleos de Helio. Al hacerlo, algunos protones se convierten en neutrones por una forma de radioactividad beta, y los neutrinos se emiten cuando esto sucede.

Tabla IV: Fundamental Particles of matter and their antiparticles (partículas fundamentales de materia y sus antipartículas) [6].

PARTICLE	CHARGE	ANTIPARTICLE	CHARGE
electron $e^-$	-1	positron $e^+$	+1
neutrino $\nu$	0	antineutrino $\bar{\nu}$	0
up quark $u$	+2/3	antiup $\bar{u}$	-2/3
down quark $d$	-1/3	antidown $\bar{d}$	+1/3

Los quarks y los electrones son las semillas de la materia como la conocemos, pero, estas poseen una versión espejo de ellas conocidas como antipartícula, estas se diferencian en lo opuesto de sus cargas, a diferencia el neutrino y el antineutrino que se diversifican en su estructura interna.

## Capítulo V

### **Aceleradores: cósmicos y hechos por el hombre**

En este capítulo se analiza la forma de hacer chocar haces de partículas contra objetivos en el laboratorio y de hacer chocar haces de frente, y las ventajas de cada uno de ellos. También, haces de materia y antimateria- electrones y positrones en el gran Colisionador de electrones positrones (LEP), protones y antiprotones, fábricas de partículas y antiprotones, fábricas de partículas. Al chocar haces primarios contra un objetivo, parte de la energía puede convertirse en nuevas partículas, a su vez acumularse y convertirse en haces secundarios. Es así como se han creado piones, neutrinos, otras partículas y antipartículas como positrones y antiprotones.

Los rayos cósmicos donde la naturaleza provee a partículas de energía, el problema de estos rayos es que vienen al azar y son mucho menos intensos que los creados por los aceleradores, el deseo de replicar estos rayos cósmicos bajo condiciones controladas, esto para reconocer la creación de partículas exóticas en el Big Bang.

Existe la física no aceleradora de partículas y la aceleradora, donde en la primera los procesos naturales han producido las partículas y se ha podido detectar sus efectos, mientras que la física aceleradora consiste en como su nombre lo dice acelerar los procesos para evidenciar sus efectos.

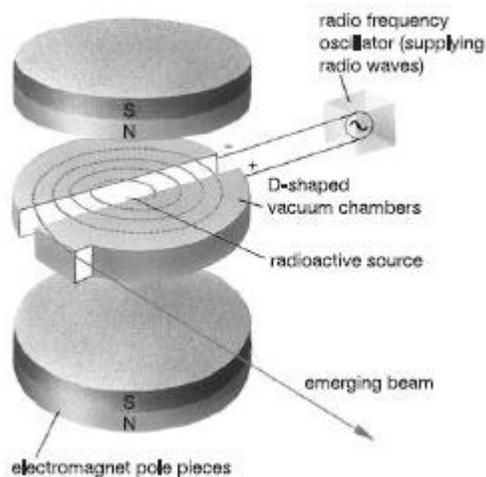


Figura 4: Las partículas se enrollan en el campo magnético del ciclotrón, pero a medida que aumentan de energía se enrollan menos y así se van desplazando en espiral hacia fuera hasta que salen de la máquina [6].

En el laboratorio se utiliza campos eléctricos, los cuales cargan eléctricamente las partículas y así acelerándolas, y además se usan campos magnéticos para dirigir las partículas, esto para la construcción de ciclotrones, sincrociclotrones y sincrotrones. Los aceleradores pueden ser lineales o circulares cada uno con sus ventajas y desventajas.

Para acelerar las partículas continuamente, el campo eléctrico en el centro debe cambiar de un lado a otro a la misma frecuencia con la que las partículas completan el circuito. Entonces las partículas que salen de una fuente en el centro del dispositivo de remolino saldrían en espiral hacia el borde y emergerían con un gran aumento de energía (ver fig. 4). Este dispositivo se conocía como "ciclotrón", y funcionaba según el principio de que las partículas siempre tardan el mismo tiempo en completar un circuito.

El sincrociclotrón fue capaz de acelerar los protones a la suficiente energía para que colisionar con los núcleos y lograr la producción de piones y que sabemos que están hechas de un solo quark y un antiquark. Sin embargo, no permitía pasar a

energías más altas, como las necesarias para producir las partículas extrañas más masivas, siendo poco práctico. Como solución a esto fue aumentar la fuerza del campo magnético de forma continua a medida que las partículas que circulan ganan energía, manteniéndolas así en la misma orbita en vez de salir en espiral hacia afuera.

Las partículas viajan a través de un tubo circular evacuado que se mantiene en el abrazo de los imanes; son aceleradas durante cada circuito por un voltaje alterno de frecuencia variable, que se aplica en uno o más lugares alrededor del anillo; y son mantenidas en su curso circular a través del tubo por la fuerza cada vez mayor del imán. Tal máquina se llama sincrotrón, y sigue siendo la base de los grandes aceleradores modernos.

En un acelerador lineal dirigido a un objeto estático los escombros de la colisión son impulsados hacia adelante, cuando un rayo golpea un objetivo estacionario, la energía que tanto cuesta ganar de las partículas del rayo se transfiere en gran parte a la energía de movimiento - en partículas en movimiento en el objetivo - y es efectivamente desperdiciada. Este problema se supera si podemos hacer que las partículas colisionen de frente, de modo que su energía pueda ser gastada en la interacción entre ellas. En tal colisión, los escombros se desprenden en todas las direcciones, y la energía se redistribuye con ellos - ninguno se "desperdicia" al poner en movimiento los bultos.

El acelerador de partículas más grande y de mayor energía, es el Gran Colisionador de Hadrones (LHC), fue construido por CERN entre 1998 y 2008, se encuentra en un túnel de 27 kilómetros de circunferencia y a una profundidad de 175 metros bajo tierra debajo de la frontera entre Francia y Suiza cerca de Ginebra [8].

Este Colisionador tiene cuatro puntos detectores de partículas: ATLAS, CMS, ALICE y LHCb, alrededor de los cuales colocan siete detectores cada uno [9]. LHC hace colisionar protones, pero igualmente se pueden utilizar haces de iones pesados como por ejemplo de plomo, el objetivo de los detectores de LHC es permitir a los físicos probar las predicciones diferentes de las teorías de la física de

particular, incluida la medición de las propiedades del bosón de Higgs y búsqueda de una serie de nuevas partículas predicha por las teorías de la supersimetría y así como otros problemas de física de partículas.

Al interior del acelerador, viajan a una velocidad cercana a la de la luz antes de colisionar, dos haces de partículas de alta energía, en direcciones opuestas en tubos de haces separados mantenidos a un vacío. Son guiados alrededor del anillo del acelerador por fuerte campo eléctrico mantenido por electroimanes, estos se encuentran contruidos a partir de bobinas de cable eléctrico especial que opera en un estado superconductor, conduciendo electricidad eficientemente sin resistencia o pérdida de energía esto enfriando los imanes a una temperatura más fría que el espacio exterior, esto gracias a un sistema de distribución de helio líquido el cual enfría los imanes [9].



Figura 5: la imagen muestra dos de las interconexiones más severamente rotas, que se encuentran entre los imanes en los sectores LHC tres y cuatro. Los imanes superconductores, utilizados para dirigir y enfocar los haces de protones en el experimento, se enfrían con helio líquido [10].

El acelerador en septiembre de 2008 fue dañado por una fuga de helio líquido (ver Fig. 5), esto a causa de una falla eléctrica, lo que resulto en la necesidad de reparaciones que dejaron el experimento fuera de acción hasta al menos el verano de 2009 [10], provocando que tesisas tuvieran que aplazar casi un año su trabajo.

El Colisionador Lineal Internacional (ILC), es un proyecto que tiene como objetivo brindar a los físicos una nueva puerta cósmica para explorar regímenes de energía más allá del alcance de los aceleradores actuales. Es un propuesto de Colisionador de positrones de electrones, complementará el Gran Colisionador de Hadrones en el Centro Europeo de Investigación Nuclear (CERN), este ayudará a desbloquear alguno de los misterios del Universo. Está compuesto por dos aceleradores lineales uno frente al otro, el ILC arrojara unos 10 mil millones de electrones y sus antipartículas, positrones, uno hacia el otro a casi la velocidad de la luz, las partículas son aceleradas casi a la velocidad de la luz, y las cavidades aceleradoras funcionan a una temperatura de casi el cero absoluto de la máquina, posee una extensión de aproximadamente 31 kilómetros de longitud, los haces chocan 14000 veces por segundo a energías extremadamente altas. El diseño actual de línea de base permite una actualización a una máquina de 50 kilómetros, 1 billón de electrones-voltios (TeV) durante la segunda etapa del proyecto. También hay planes para un enfoque por etapas que comience con una fábrica Higgs de 250 GeV para estudiar las propiedades de la partícula descubierta en el LHC en 2012 y luego actualizar a 500 GeV. Cada colisión espectacular crea una serie de nuevas partículas que podrían responder algunas de las preguntas más fundamentales de todos los tiempos [11].

## Capítulo VI

### Detectores: Maquinas y cámaras en el tiempo

Podemos observar este tema en cosas muy comunes, como lo es por ejemplo los televisores, donde los electrones chocan con material ya preparado y donde se emitirá una imagen, como lo eran los televisores antiguos, con un tubo el cual iba cargando de a poco la imagen.

Rutherford hace muchos años en la precariedad donde muchas veces las mediciones al ojímetro o con instrumentos básicos, donde con un tubo de latón el cual en su centro contenía un alambre en su centro cargado con 1000 V donde se creaba un campo eléctrico, donde al pasar por un gas de combustión, se crean iones, así se conocen las partículas alfas.

La cámara de nube, que es una cámara de vidrio equipada con un pistón y lleno con vapor de agua. Al expandir el pistón se enfría el gas, las partículas alfas y betas pasan formando gotas al ionizar átomos de vapor. Al unirla a un contador Geiger, esto es más fácil precisar un rayo cósmico donde el pistón y también partículas extrañas se encuentran en ella.

### Cámara de burbujas

Estas tenían la particularidad de hacer que el líquido pase a su temperatura por sobre el punto de ebullición, ¿cómo se logra esto?, se logra al bajar la presión en la cámara hasta que esta hace que el líquido alcance un estado que se conoce como “estado sobrecalentado” el cual es inestable dura solo pequeños instantes en donde deja una estela de burbujas las cuales pueden ser apreciadas.

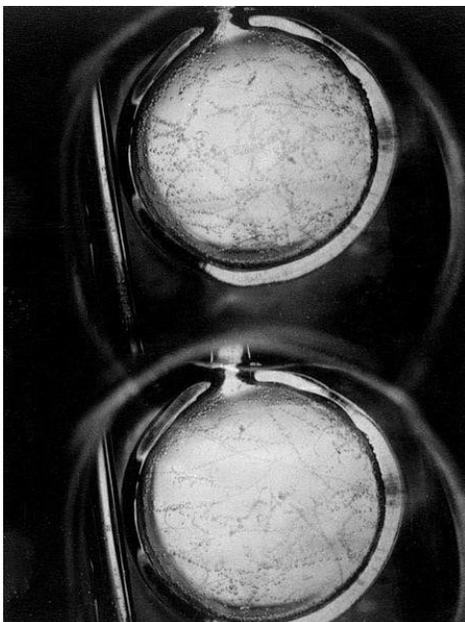


Figura 6: Primeras pistas observadas en la cámara de burbujas de hidrógeno líquido [12].

Todo está predeterminado por la capacidad de la cámara ya que cuando el pistón está retirado la presión se encuentra en su mínimo, y el líquido sobrecalentado para luego una luz de arco flashes ilumina la estela de burbujas.

La trayectoria de la partícula revela una curvatura además esta es positiva o negativa y su momento dependerá del radio y con esto develar su masa e identidad. Para determinar la velocidad se calcula cuanto se demora en viajar desde un contador de centelleo a otro.

La cámara de burbujas no fue suficiente por lo que se dio paso a la cámara de chispas, la cual tiene láminas paralelas de metal separadas por unos pocos milímetros inmersos en un gas inerte (poco reactivo). Cuando una partícula pasa a través de la cámara deja un rastro ionizado en el gas. Las estelas de las chispas pueden ser fotografiadas.



Figura 7: Fermilab desuso de 15 pies 's (4,57 m) cámara de burbujas [13].

La cámara de chispas de alambre, la cual ya es mucho más computarizada y los datos registrados en línea, con lo cual corren en tres direcciones diferentes donde se logran construir unas imágenes tridimensionales de las puntas de las partículas, donde se puede calcular la energía y momento, de esta manera comprobar la identidad.

### **Cámara de burbuja electrónica**

Construidas por cables separados entre 1-2 mm, la cual producen una señal en centésimas de microsegundos, lo que hace que puedan pasar millones de partículas por segundo, lo que es una mejora mil veces mejor a las anteriores versiones.

Los detectores de tiras de silicio son aquellos en donde se puede observar las partículas B, que contiene el pasado quark de fondo, los que decaen para encontrar en quark y a la vez decaer en quark extraños, los que son observados a través de la cámara.

## Detector de Neutrinos

Cuando una partícula viaja más rápido que la luz, se puede crear especies de onda de choque de luz visible, conocida como radiación Cerenkov. El experimento superkamiokande detecta los neutrinos cuando interactúan en el agua, donde puede producir un electrón o un muón, dependiendo del tipo de neutrino.

Todo lo anterior se combina en lo que hoy son los detectores cilíndricos que rodean el punto de interacción en un acelerador de colisión. El vidrio de plomo se utiliza para detectar electrones y positrones irradian fotones y hace que los fotones se conviertan en pares electrón-positrón.

Cuando hablamos de los detectores de neutrinos encontramos el superkamiokande, el cual consta de un tanque cilíndrico, tenemos un tanque de agua el cual consta de sensores fotográficos llamados foto multiplicadores-tubos (PMT), el detector está lleno de 50 Kt de agua pura.

Esta estructura de PMT una división en la estructura, la cual consta de detectores internos y también detectores externos.

Las fotos multiplicadores-tubos son parte del detector interno, estas son las encargadas de emitir la luz Cerenkov que recorre el agua y que es detectada por los sensores.



Figura 8: Experimento superkamiokande, detector subterráneo, ubicado en la costa oeste en Kamioka [14].

Los detectores externos son más pequeños que los detectores internos, la cual está cubierta con láminas blancas reflectantes, el cual tiene como finalidad distinguir entre el comportamiento de los neutrinos de los eventos de los muones de rayos cósmicos.

Este contiene además unas cabañas electrónicas las que consta de cuatro de estas, las que son encargadas de recibir la información de los tubos fotomultiplicadores y la fuente de alimentación de alto voltaje. Además, se encuentra un sistema de purificación de agua, el cual es agua pura subterránea, el cual se encarga de filtrarla del polvo, bacterias, iones. Continúa en su parte superior el sitio llamado top of bank, el cual se encuentra en la superficie del cilindro, en el que se encuentra el material radioactivo. Todo está conectado a una sala de control donde se toman datos durante las 24 h del día, todo el año.



Figura 9: Estructura del sistema de purificación de agua [15].



Figura 10: Sala de control [15].

El CERN es uno de los centros más grandes del mundo, en donde tienen una variedad de proyectos, uno de estos es el ATLAS el cual es uno de los dos detectores de uso general en el gran Colisionador de hadrones (LHC) en donde se trabaja en encontrar el bosón de Higgs hasta partículas adicionales que podrían ser parte de la materia oscura.

Los haces de partículas del LHC chocan con el centro del detector ATLAS provocando colisiones en forma de nuevas partículas, este contiene seis subsistemas las cuales registran los puntos de colisión registran las rutas, el impulso y la energía de las partículas, con los cual estas pueden ser identificadas. Un enorme sistema de imanes dobla los caminos de las partículas cargadas para que se pueda medir su momento.



Figura 11: Estructura del detector ATLAS [16].

Otro detector en el CERN es el CMS (Solenoid Muon Compacto) el cual es muy similar en funciones al que cumple el ATLAS, pero no obstante no utilizan las mismas soluciones técnicas diferentes como también el diseño de sistema de imán diferente.

Este está construido por un enorme imán solenoide, el cual crea una bobina cilíndrica de cable superconductor que genera un campo magnético de 4T, el cual está confinado por un “yugo” de acero.

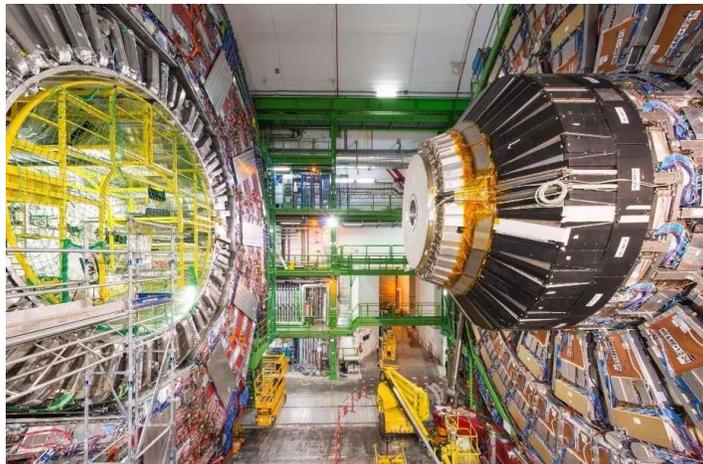


Figura 12: Detector CMS, ubicado en el CERN Ginebra [17].

## Capítulo VII

### Las fuerzas de la naturaleza

Existen cuatro fuerzas fundamentales que rigen dentro del universo, correspondiendo a la gravedad, electromagnética, fuerza nuclear débil y fuerte. Estas fuerzas se deben al intercambio de partículas como el fotón, W, Z y gluón, que, en sintonía, permitieron la existencia del cosmos, creando la materia y, por consiguiente, dar origen a la vida.

La gravedad es la fuerza más familiar para nosotros, debido a que es posible experimentarla a gran escala, sin necesidad de usar instrumentos microscópicos. Sin embargo, dentro de los átomos, el efecto de esta fuerza es extremadamente pequeña, por lo cual, es posible ignorarla con seguridad, a diferencia de lo que ocurre a escalas macroscópicas, donde cumple roles fundamentales, como, por ejemplo, mantener la Tierra orbitando alrededor del Sol.

Las cargas eléctricas en movimiento dan lugar a efectos magnéticos, por tanto, la fuerza electromagnética es intrínsecamente mucho más poderosa que la gravedad en escalas microscópicas, siendo esta,  $10^{40}$  veces más fuerte que la gravedad, pero pierde su efecto a grandes distancias. Este tipo de fuerza permite que los átomos y moléculas se mantengan unidos formando la materia en masa.

La atracción de cargas opuestas, mantienen a los electrones en caminos atómicos alrededor del núcleo cargado positivamente, mientras que, para el caso de cargas iguales, se produce la repulsión de partículas lo que ocasiona una paradoja si nos contextualizamos en el núcleo atómico. Sabemos que este es compacto y dentro de él, existen protones conglomerados, pero ¿cómo pueden estos protones estar unidos dentro del núcleo, aun cuando sufren una repulsión eléctrica tan intensa?

Este hecho peculiar, induce a que deben existir otro tipo de interacciones dentro de los átomos, una fuerza aún más fuerte que permite que los neutrones y protones estén dentro del núcleo atómico, sin ser afectados por la repulsión de cargas eléctricas. Este tipo de fuerza actúa dentro y alrededor del núcleo atómico y se diferencian como fuerza nuclear fuerte y débil, actuando a distancias muy

pequeñas, no familiares para nuestros sentidos, pero de mucha importancia para nuestra existencia [6].

La estabilidad de los núcleos oscila entre una delgada línea entre la fuerte atracción competitiva y la repulsión eléctrica. No se puede juntar demasiado los protones o la interrupción eléctrica hará que el núcleo se vuelva inestable, dando paso a desintegraciones radioactivas, donde el núcleo se dividirá en fragmentos más pequeños. Como protones y neutrones sienten la fuerza fuerte por igual, sólo los protones exhiben esta repulsión, es por esto por lo que, en átomos diferentes al Hidrógeno, contienen neutrones para generar una mayor estabilidad al núcleo. No obstante, presentar una mayor cantidad de neutrones dentro del núcleo también produce una inestabilidad intrínseca, por lo que estos mismos pueden descomponerse, es decir, se convierten en protones, expulsando un electrón ocasionando la radioactividad beta.

La fuerza que destruye al neutrón es la fuerza débil, alterando a los neutrones y protones, haciendo que el núcleo de un elemento atómico transmute en otro, mediante radioactividad  $\beta$ . Este fenómeno ocurre por ejemplo dentro del Sol, donde al menos dos protones se mueven lo suficientemente rápido como para superar su repulsión eléctrica momentáneamente y chocar entre sí. La fuerza débil transmuta un protón en un neutrón, luego la fuerza fuerte agrupa a estos neutrones con protones, lo cual forman un núcleo de Helio, liberando la energía y se irradia por cortesía de la fuerza electromagnética.

La fuerza fuerte por su parte actúa sólo en el núcleo y es debido a la presencia de quarks, las partículas básicas que forman a protones y neutrones, por tanto, los leptones, como el electrón no perciben esta fuerza. La ley que rige a estos actores es parecida a la fuerza electromagnética. Los quarks llevan carga, la que se define como forma positiva, por lo que el anti- quark lleva la misma cantidad, pero con carga negativa. La atracción de un quark y su antipartícula ( $q\bar{q}$ ) producen los mesones, que es la unión entre dos quarks, pero ¿qué sucede si intentamos unir tres quarks para formar bariones?

Sucede que, existen tres variedades distintas de la carga fuerte, y para efectos prácticos, se denominarán rojo (R), azul (B) y verde (G). Como tal, se conocen como cargas de color, aunque no presente relación directa con los colores. Si tenemos dos quarks del mismo color, se repelerían y si poseemos dos quarks de diferente color, se sentirán atraídos entre sí, al igual que tener tres quarks o colores diferentes (RBG). Al contener presencia de cargas eléctricas dentro de los átomos, los lleva a agruparse para formar moléculas, ocurriendo lo mismo, dentro de los protones y neutrones debido a la triple naturaleza de las cargas de color.

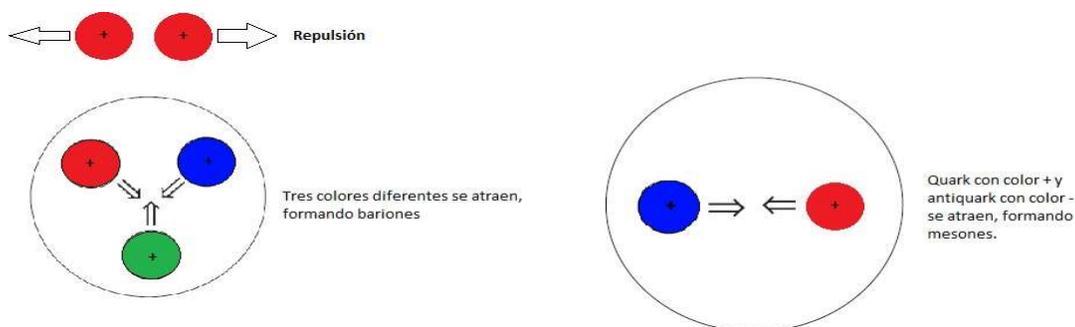


Figura 13: Interacción de carga fuerte. Adaptación [6].

## Portadores de fuerza

Sabemos que las cargas eléctricas experimentan fenómenos de emisión y repulsión de radiación electromagnética y ocurre analógicamente en las cargas de colores. Para 'pegar' aquellos quarks que forman protones, neutrones y núcleo atómico, actúan los gluones. La fuerza débil de manera análoga implica portadores de fuerza, conocidos como bosones Z y W.

El bosón W difiere del fotón en dos formas importantes: presenta carga eléctrica y una gran masa, siendo esta, 80 veces mayor que la masa de un protón o neutrón y necesitando 80 GeV como energía mínima para formarse.

La carga eléctrica del bosón W, hace que su emisión pierda carga de la fuente, por lo que, un neutrón neutro se convierte en un protón cargado positivamente, cuando un  $W^-$  es emitido, convirtiéndose en electrón y neutrino.

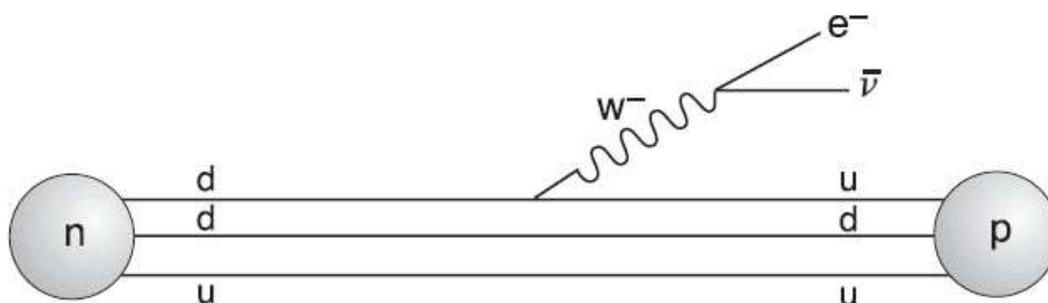


Figura 14: Desintegración beta a través de bosón W [6].

En 1964 Glashow, Salam y Weinberg unificaron la fuerza electromagnética con la fuerza débil en lo que actualmente se conoce como teoría electrodébil. Esta teoría explicaba la aparente debilidad de esta fuerza unificada, debido a la gran cantidad de masa que presentaba el bosón W, mientras que el fotón de la fuerza electromagnética no presentaba masa. Esta teoría solo funcionaba si, además de la carga eléctrica de  $W^+$  y  $W^-$ , había un socio neutral pesado, el  $Z^0$  con una masa alrededor de 90 GeV, la que, si se recreaba en laboratorio, con una energía aproximada de 100 GeV, se vería que la fuerza débil es similar a la electromagnética.

Finalmente, tenemos la fuerza fuerte, cuyos orígenes son las cargas de color que llevan los quarks y anti-quarks. En este sentido, la fuerza se transmite por gluones, los que eventualmente pueden irradiar cargas de colores.

A medida que estos gluones pueden llevar cargas de color, se pueden atraer y repeler de forma mutua a medida que viajan por el espacio, donde su interacción, produce que la fuerza resultante se concentre en una línea, a lo largo de un eje que conecta los dos quarks de colores.

Los fotones en su caso, como no presentan carga eléctrica, viajan en el espacio de forma independiente, llenando todo el volumen y la intensidad de esta fuerza, va desapareciendo como el cuadrado de la distancia que se conoce dentro de la electrostática.

Como ya sabemos, los fotones llenan el espacio y viajan independientemente, mientras que los gluones se agrupan. Este agrupamiento permite que los gluones formen estados compuestos de vida corta, conocidos como bolas de pegamento, ocasionando que, mientras se transmite la fuerza, hace que el comportamiento de la fuerza electromagnética y de color (fuerte) difieran radicalmente debido a la gran cantidad de energía que se requiere separar estas fuerzas de colores. Por lo tanto, los quarks individuales no pueden separarse de sus hermanos; permanecen agrupados en los tríos, como bariones, o quark y antiquark, como en los mesones. Es así como los efectos de las cargas de color se vuelven "fuertes" a grandes distancias.

En resumen, a energías superiores a 100 GeV la fuerza débil y electromagnética se vuelve similar. Además de ello, los portadores de las fuerzas como los gluones, fotón y gravitón no presentan masa, mientras que  $W^+$ ,  $W^-$  y  $Z^0$  son masivos.

Tabla V: Las principales fuerzas de la naturaleza con su respectivas intensidad y portador [6].

<b>Fuerza</b>	<b>Intensidad</b>	<b>Portador</b>	<b>Ejemplo</b>
Fuerte	1	Gluón	Núcleo atómico
Electromagnética	$\sim 10^{-2}$	Fotón	Átomo
Débil	$\sim 10^{-5}$	$W^+$ , $W^-$ , $Z^0$	Neutrinos
Gravedad	$\sim 10^{-42}$	Gravitón	Galaxias, planetas

## Capítulo VIII

### Materia exótica (y antimateria)

Los rayos cósmicos del espacio exterior consisten principalmente en partículas de materia y radiación de energía muy elevada que llegan a la tierra procedente del espacio exterior, en la cual algunos alcanzan a atravesar la atmosfera en su capa superior, constituido de un 98% de protones y partículas alfas de mucha energía y el resto está compuesto de electrones y partículas pesadas ionizada, a esto se le denomina partículas primarias. Estas partículas cargadas eléctricamente interaccionan con la atmosfera y el campo magnético, en la cual se convierten en partículas secundarias. Los rayos cósmicos nos permiten de alguna manera descubrir formas de materia que parece ser extraño en la tierra, conocido como partículas extrañas, uno de ellos corresponde a una nueva variedad de quark denominado quark strange.

#### Quark strange

Los quarks strange se caracterizan ser partículas cargada eléctricamente negativa, con un valor de  $-1/3$ . Estos quarks son más masivos que los quarks up y down, cuya masa es de  $96 \text{ MeV}/c^2$ , presenta un spin de  $1/2$ .

Un barion strange consiste básicamente en tres quarks, en la que al menos una de las partículas que lo conforma presenta un quark strange. Los teóricos de ese tiempo inventaron un concepto denominado extrañeza, mientras mayor sea el número de quarks strange presente un barion, mayor es la magnitud de su extrañeza. Las cantidades que llevan los bariones extraños van de  $-1$ ,  $-2$  o  $-3$ . El signo negativo se debe al número de quarks strange, en cambios los anti-quarks la cantidad de extrañeza es positivo. Existen bariones strange con spin  $1/2$  y con spin  $3/2$ , en la cual se encuentra en estado de resonancia.

El mesón strange consiste en un quark strange y un anti-quark, como también puede ser un quark y anti-quarks strange. La cantidad de extrañeza de los mesones va de  $+1$  y  $-1$ , si un mesón contiene un quark strange y anti-quark

strange la cantidad de extrañeza neta será cero, como en el caso de la eta prima ( $\eta^0$ ), el  $\pi^0$  y  $\eta^0$ .

### Quarks charm

El quark charm es otra variedad de quarks, en la cual se caracteriza por ser más masivo que los quarks up, down y strange, cuya masa es de  $1,28 \text{ GeV}/c^2$ . Al igual que los quarks up tiene una carga eléctrica de  $+2/3$  y un spin de  $1/2$ . El quark charm al ser tan masivo no se producen tan fácilmente en los rayos cósmicos, por lo cual estas partículas aparecieron a partir de experimentos en los aceleradores de partículas de alta energía en la que fueron postulados de Sheldon Glashow, John Lliopoulos y Luciano Maianicon en 1970.

Como sabemos anteriormente, los quarks strange tienen un nivel de extrañeza, esto ocurre también en los quarks charm, pero presenta un nivel de encanto, en el caso del quark charm es  $+1$  y el anti-quark charm es  $-1$ .

Al igual que los quarks up, down y strange, el quark charm también puede combinarse en tres y formar bariones charm o combinarse con un anti-quark y formar mesones, por ejemplo, la unión entre un quark charm y sus anti-quarks charm ( $c\bar{c}$ ) conocido como charmonium, dando origen a un mesón eléctricamente neutro, eta-charm ( $\eta_c$ ), con masa de  $3 \text{ GeV}$ .

Las partículas charm o strange no son estables, debido a su gran cantidad de masa, aunque se llevara a cabo una colisión de alta energía entre ellos, decaerían rápidamente dejando quarks up y down dentro de un barion. En cambio, los mesones se autodestruyen producto de la aniquilación entre quarks y anti-quarks, emitiendo fotones, electrones y neutrinos estables.

### Quark de bottom y top

Los quarks de bottom (B), es la tercera generación quarks más masivo que los anteriores, cuya masa es aproximadamente  $4.18 \text{ GeV}/c^2$ , con carga eléctrica de -

$1/3$ , spin de  $1/2$ . Los quarks bottom presentan un carácter de fondo que está definido para los quarks bottom  $+1$  y los anti-quarks bottom  $-1$ . Los bariones y mesones que contiene esta clase de quarks son más pesados, siendo así, el mesón más ligero tiene una masa de  $5 \text{ GeV}$ .

Los quarks top (t) tiene una masa alrededor de  $173.1 \text{ GeV}/c^2$ , siendo más masivo que el quark bottom. Su carga eléctrica es de  $+2/3$ , con spin  $1/2$ . Esta clase de quarks al ser tan masivo es muy inestable, por lo que decae en menos de  $10^{-25} \text{ s}$ . Se puede producir una cascada de decaimiento desde el quark más pesado hasta el más ligero emitiendo en el proceso un electrón o un positrón junto con un neutrino o un antineutrino. Por ejemplo, en la imagen que se muestra a continuación se observa los decaimientos de los quarks más pesados a los más ligero, indicando la flecha hacia abajo la emisión de positrón y neutrino ( $e^+\bar{\nu}$ ) y la flecha hacia arriba emite electrón y antineutrinos ( $e^-\bar{\nu}$ ).

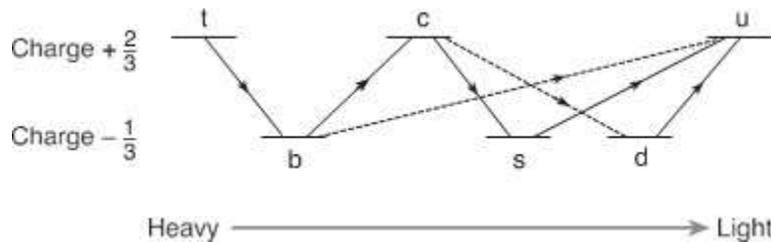


Figura 15: Decaimiento del quark masivo al más ligero [6].

En el siguiente apartado se presenta la tabla VI y VII, la primera muestra todas las propiedades de los bariones y en la segunda se presenta las propiedades de los mesones [7].

Tabla VI: Propiedades de los bariones

Barion	Símbolo	Composició n	Masa en MeV/c <sup>2</sup>	Espín	Carga	Extrañeza	Tiempo de vida (segundo)
Protón	P	uu d	938. 3	1/2	+1	0	estable
Neutrón	N	dd u	939. 6	1/2	0	0	9 2 0
lambda	$\Lambda$	ud s	1115 .6	1/2	0	- 1	$2.6 \times 10^{-10}$
sigma	$\Sigma^+$	uu s	1189 .4	1/2	+1	- 1	$0.8 \times 10^{-10}$
sigma	$\Sigma^0$	ud s	1192 .5	1/2	0	- 1	$6 \times 10^{-20}$
sigma	$\Sigma^-$	dd s	1197 .3	1/2	-1	- 1	$1.5 \times 10^{-10}$
delta	$\Delta^{++}$	uu u	1232	3/2	+2	0	$0.6 \times 10^{-23}$
Delta	$\Delta^+$	uu d	1232	3/ 2	+1	0	$0.6 \times 10^{-23}$
delta	$\Delta^0$	ud d	1232	3/ 2	0	0	$0.6 \times 10^{-23}$
delta	$\Delta^-$	dd d	1232	3/ 2	-1	0	$0.6 \times 10^{-23}$
En cascad a	$\Xi^0$	us s	1315	1/ 2	0	- 2	$2.9 \times 10^{-10}$
En cascad a	$\Xi^-$	ds s	1321	1/ 2	-1	- 2	$1.64 \times 10^{-10}$
omega	$\Omega^-$	ss s	1672	3/ 2	-1	- 3	$0.82 \times 10^{-10}$
Lambd a	$\Lambda_c^+$	ud c	2281	1/ 2	+1	0	$2 \times 10^{-13}$

Tabla VII: Propiedades de los mesones

Mesón	Símbolo	Composición	Masa (MeV/c <sup>2</sup> )	Carga	Extrañeza	Tiempo de vida /segundos)	Espín	Encanto	Carácter de fondo	Carácter de cima
Pion	$\pi^+$	u $\bar{d}$	139.6	+ 1	0	$2.60 \times 10^{-8}$	0	0	0	0
Pion	$\pi^0$	$\bar{u}ud\bar{d}$	135.0	0	0	$0.83 \times 10^{-16}$	0	0	0	0
Kaón	$K^+$	u $\bar{s}$	493.7	+ 1	+ 1	$1.24 \times 10^{-8}$	0	0	0	0
Kaón	$K^0$	d $\bar{s}$	497.7	0	+ 1	$0.89 \times 10^{-10}$	0	0	0	0
Kaón	$K^-$	$\bar{s}u$	493.7	-1	-1	$1.24 \times 10^{-8}$	0	0	0	0
Eta	$\eta^0$	$\bar{u}ud\bar{d}$	548.8	0	0	$< 10^{-18}$	0	0	0	0
Eta prima	$\eta'^0$	s $\bar{s}$	958	0	0	-	0	0	0	0
Ro	$\rho^+$	u $\bar{d}$	770	+ 1	0	$0.4 \times 10^{-23}$	1	0	0	0
Ro	$\rho^0$	$\bar{u}ud\bar{d}$	770	0	0	$0.4 \times 10^{-23}$	1	0	0	0
Ome ga	$\omega^0$	$\bar{u}ud\bar{d}$	782	0	0	$0.8 \times 10^{-22}$		0	0	0
Phi	$\phi^0$	s $\bar{s}$	1020	0	0	$20 \times 10^{-23}$	1	0	0	0
D	$D^+$	c $\bar{d}$	1869. 4	+ 1	0	$10.6 \times 10^{-13}$	0	+ 1	0	0
D	$D^0$	$\bar{c}u$	1864. 6	0	0	$4.2 \times 10^{-13}$	0	+ 1	0	0
D	$D_s^-$	c $\bar{s}$	1969	+ 1	+ 1	$4.7 \times 10^{-13}$	0	+ 1	0	0
J/Psi	J/ $\psi$	c $\bar{c}$	3096. 9	-	0	$0,8 \times 10^{-20}$	1	0	0	0
B	$B^-$	$\bar{b}u$	5279	-1	0	$1.5 \times 10^{-12}$	0	0	+ 1	0
B	$B^0$	$\bar{d}b$	5279	0	0	$1.5 \times 10^{-12}$	0	0	- 1	0

$B_s$	$\bar{b}_s$	$\bar{s}b$	5370	0	-1	-		0	-1	0
Ípsilon	$\gamma$	$\bar{b}b$	9460.4	-	0	$1.3 \times 10^{-20}$	1	0	0	0

## Leptones

Son partículas que no interactúan usando la fuerza intensa, no tiene una estructura y son parecidos a un punto. En la actualidad los científicos creen que solo existen seis clases de leptones: electrón ( $e^-$ ), muon ( $\mu^-$ ), tau ( $\tau^-$ ), electrón neutrino ( $\nu_e$ ), muon neutrino ( $\nu_\mu$ ) y tau neutrino ( $\nu_\tau$ ), cada uno de los seis leptones tiene una antipartícula.

En 1975 fue descubierto el leptón tau en un Colisionador de electrón-positrón en Stanford, en la cual presenta una masa que es el doble de la masa del protón. En julio de 2000 el fermi national accelerator laboratory (Fermilab) anuncio haber encontrado evidencia experimental directa del neutrino asociado con el tau.

Entre el leptón más conocido es el electrón, pero existen una versión más pesado que es el muon, en la cual se caracteriza por ser 207 veces más masivo que el propio electrón. Hay una versión más pesada que el muon, el tau siendo 4000 veces más pesados que el electrón.

En la siguiente tabla se muestra cada una de las propiedades de los leptones.

Tabla VIII: Propiedades de los leptones [7].

<b>Leptones</b>	<b>Antipartículas</b>	<b>Masa</b>	<b>Carga</b>	<b>Spin</b>
Electrón ( $e^-$ )	$e^+$	0.511 MeV/c <sup>2</sup>	-1	1/2
Muon ( $\mu^-$ )	$\mu^+$	105.66 MeV/c <sup>2</sup>	-1	1/2
Tau ( $\tau^-$ )	$\tau^+$	1784 MeV/c <sup>2</sup>	-1	1/2
Electrón- neutrino ( $\nu_e$ )	$\bar{\nu}_e$	< 1 eV/c <sup>2</sup>	0	1/2
Muon – neutrino ( $\nu_\mu$ )	$\bar{\nu}_\mu$	< 0.17 MeV/c <sup>2</sup>	0	1/2
Tau – neutrino ( $\nu_\tau$ )	$\bar{\nu}_\tau$	<19.2 MeV/c <sup>2</sup>	0	1/2

Uno de los misterios más antiguo de nuestro universo durante la explosión, hace 14 mil millones de años fue la existencia de la antimateria (formación de partículas idénticas a la materia, pero con carga eléctrica opuesta), en la cual deberían haberse creado en cantidades iguales de materia y antimateria. Cuando la materia entra en contacto con la antimateria entre sí, se aniquilan en un destello de luz, produciendo partículas fundamentales exóticas.

Uno de los grandes desafíos de los físicos y cosmólogos durante años fue de como la materia y la antimateria pueden diferir entre sí. En 1964 se descubrió que la naturaleza presenta un pequeño desequilibrio en el comportamiento de ciertas partículas extrañas como el kaón ( $K^0$ ) y su antipartícula ( $\bar{K}$ ).

Las primeras partículas extrañas fueron descubiertas en 1947 mediante los rayos cósmicos que golpean la atmosfera de la tierra. A partir de aquí los físicos tenían una comprensión de que hay cosas exóticas en el universo, por lo cual se inspiraron en construir aceleradores de partículas para producir partículas extrañas, como el kaón (K).

Ahora bien, unas de las grandes preguntas son ¿Por qué la naturaleza misma ha creado tres generaciones de fermiones, es decir, tres generaciones de quarks y de leptones? (ver figura 8), en la actualidad, los físicos no están seguros de por qué la naturaleza decido crear tres generaciones de fermiones, pero esto puede explicar la asimetría de la materia-antimateria del universo. Para explicar por qué vemos materia y no antimateria, es necesario comprender que las leyes de la física no son simétricas, es decir, se necesita un desequilibrio entre la materia y la antimateria, en la cual, mediante su aniquilación se produce un pequeño exceso de materia. Pero una de las grandes cuestiones es ¿Dónde se fue la antimateria?, en la actualidad, aún no se sabe con certeza.

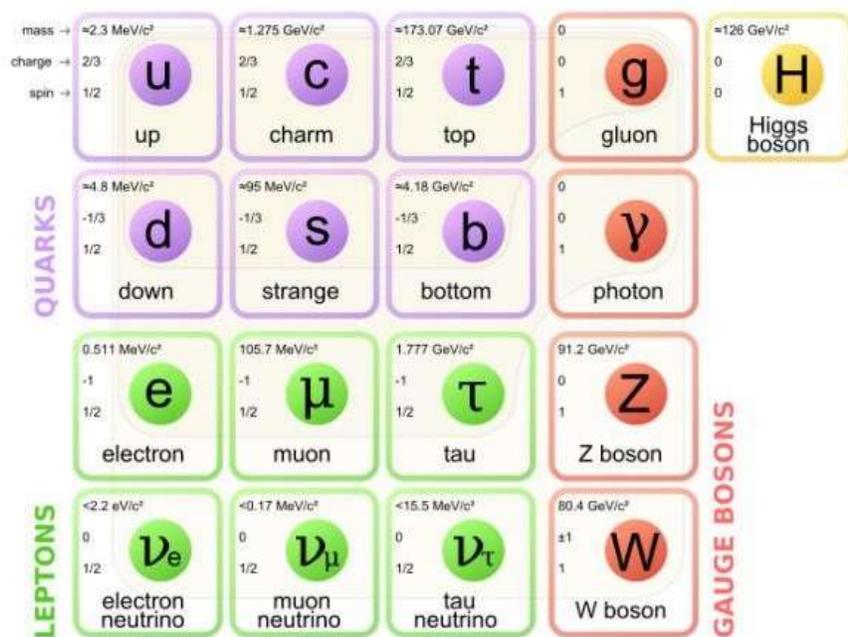


Figura 16: Modelos estándar. Experiencia Docet [18].

## Capítulo IX

### ¿De dónde ha salido la materia?

La existencia humana en la tierra se debe a una serie de accidentes afortunados, en la cual uno de estos accidentes es la existencia del sol, ya que nos proporciona energía necesaria para el desarrollo de la bioquímica y la vida en la tierra. La partícula subatómica responsable de que el sol entregue energía suficiente, son los protones, partículas estables y son las semillas del hidrogeno. La presencia de neutrones en el sol provoca un decaimiento de tipo beta en estos tipos de partículas, debido a su gran masa. Si algunas de estas partículas, tanto el protón como el neutrón tuviesen otras propiedades distintas a como son ahora, podría haber una probabilidad de no haber vida en la tierra.

Para comprender en profundidad de como el sol nos proporciona la energía necesaria para existir, nos enfocaremos en el funcionamiento del sol. El hidrogeno es el primer elemento químico de la tabla periódica, compuesto por un solo electrón, un protón y es el principal combustible de nuestro sol ( $10^{57}$  átomos de hidrógenos en su interior). Para suministrar energía al sol, el hidrogeno tiene que pasar por un proceso, en la cual cuatro núcleos de hidrógenos se fusionan formando un núcleo más denso y pesado denominado helio, este proceso se le llama fusión nuclear. Ahora la gran pregunta es ¿Cómo aparece el neutrón en el núcleo del helio? La fusión nuclear presenta tres etapas, en la cual, la primera etapa se tiene dos protones, en donde uno de los protones sufre una transmutación, es decir, un protón se convierte en un neutrón, formando un deuterón (un sistema formado por un protón y un neutrón que más ligero que un protón y un neutrón aislado), emitiendo un positrón y un neutrino. En esta primera etapa de la fusión nuclear se produce antimateria, en la que es inmediatamente destruido con un electrón en el plasma, produciendo dos fotones que son dispersados y ayuda a formar parte de la luz solar.

En la segunda etapa de esta fusión, el deuterón se une con otro protón para formar un núcleo de helio-3. Dos de estos helio-3 se juntan y se reorganizan para

formar el helio-4 (la forma más estable). Entonces el resultado neto es que cuatro protones se unen para formar helio, liberando dos positrones, dos neutrones y la energía se libera en forma de rayos gamma (ver figura 17).

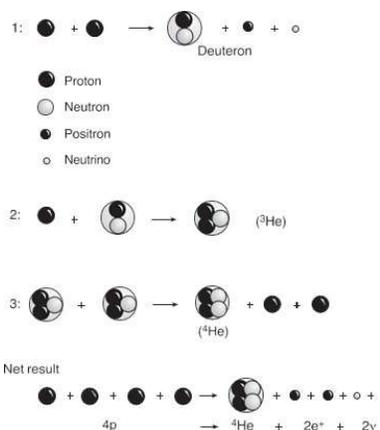


Figura 17: Proceso de conversión del hidrogeno en helio producto de la fusión nuclear del sol [6].

La velocidad de la quema solar va a depender principalmente de la fuerza nuclear débil, por lo tanto, la lentitud de esta quema solar se debe a la debilidad de la fuerza nuclea débil y a la gran masa del bosón W. Si la velocidad de quema solar fuese más rápida, la masa del bosón W hubiera sido menor y, por ende, la fuerza débil habría sido más fuerte.

Las masas juegan un papel fundamental en la determinación de nuestro destino. Como se ha discutido anteriormente, el decaimiento beta implica que un neutrón se convierta en un protón, liberando electrón y neutrino. Esto se debe a que la naturaleza misma busca su estado de mínima energía o de menor masa, por lo cual el protón es la forma más estable de la química. Ahora bien, si los neutrones fuesen las partículas más estables, las formas de vida serian diferentes e incluso

inexistente, debido a que los neutrones son incapaces de atraer electrones para formar átomos.

## El universo primitivo

En el universo temprano la temperatura era de  $10^{11}K$ . A esta temperatura el universo está lleno de una indiferenciada de materia y radiación, siendo que cada partícula chocara muy rápidamente con las otras partículas. Pese a su rápida expansión, el universo se encuentra en un estado de equilibrio térmico, debido a que las partículas como electrones, positrones, neutrinos y fotones mantienen rápidas colisiones entre sí. El universo se encuentra en expansión y enfriándose rápidamente. El tiempo de expansión se aproxima a 0.02 segundos, en la cual se define como “100 veces la extensión de tiempo en el cual el tamaño del universo aumentaría el 1 %” [19]. En este momento el número de partículas es tan pequeño que solo había un solo protón o neutrón por cada 1000 millones de fotones, electrones y neutrinos. Para conocer los elementos químicos que se formaron en el universo primitivo, es indispensable conocer las proporciones relativas de protones y neutrones. Estas partículas nucleares aún no se encuentran unidas en un núcleo, debido a que, con solo seis a ocho millones de [eV] se puede romper un núcleo, por lo tanto, a la temperatura con la cual se encuentra el universo, los núcleos se destruirán rápidamente al momento de formarse.

La temperatura ha descendido a  $3 \times 10^{10}K$ , tan solo ha transcurrido 0.11 [s], en este momento el universo no ha cambiado mucho, aun el universo está formado por las partículas como los electrones, positrones, neutrinos, antineutrinos y fotones, todo en equilibrio térmico. Los pequeños números de partículas nucleares aún no se encuentran ligados a núcleos, producto de la temperatura. Pero con la caída de la temperatura los neutrones pueden transformarse en protones, siendo así, el balance de partículas nucleares con un 38% de neutrones y 62% de protones.

La temperatura ha disminuido nuevamente a  $10^{10}K$ , en la cual solo ha transcurrido 1.09 [s]. A esta temperatura los neutrones y los antineutrinos se comportan como partículas libres, por lo cual, no están en equilibrio térmicos con los electrones, positrones y fotones. En este instante, el universo aún es demasiado caliente para que los protones y neutrones formen núcleos atómicos. Con el descenso de la temperatura el balance de protones-neutrones ha cambiado en un 24% de neutrones y 76% de protones.

La temperatura del universo descendió a  $3 \times 10^9K$ , transcurriendo 13.82 [s]. A esta temperatura los electrones y positrones desaparecen rápidamente. En este momento el universo está lo bastante frío para formar núcleos estables, como el helio, pero no sucede de manera inmediata. La razón es que se requiere de unas series de reacciones rápidas de dos partículas para poder formar finalmente helio. Aun no hay posibilidad de formar núcleos más pesados. Los neutrones aún se convierten en protones, siendo la proporción de 17% neutrones y 83% protones.

La temperatura ha decrecido a  $10^9K$ , transcurriendo 3 minutos y dos segundos. Los electrones y positrones han desaparecido en su mayor parte, siendo las partículas principales, los fotones, neutrinos y antineutrinos. El universo está lo suficientemente frío para mantener unidos a los núcleos de helio, pero los núcleos de deuterio no se mantienen unidos por mucho tiempo. En este punto del universo, el balance de neutrones-protones alcanza un 14% neutrones y 86% protones.

Poco después, la temperatura disminuye al punto en que los núcleos de deuterio se mantienen unidos, produciendo la cadena de reacciones de dos partículas.

La temperatura desciende ahora a  $0.9 \times 10^9K$ , transcurriendo 3 minutos y seis segundos. La desintegración de los neutrones ha cambiado el balance neutrón-protón antes de la nucleosíntesis en un 13% neutrones y 87 % protones.

En la siguiente figura se aprecia la proporción de los neutrones a medida que la temperatura del universo desciende y el tiempo transcurrido.

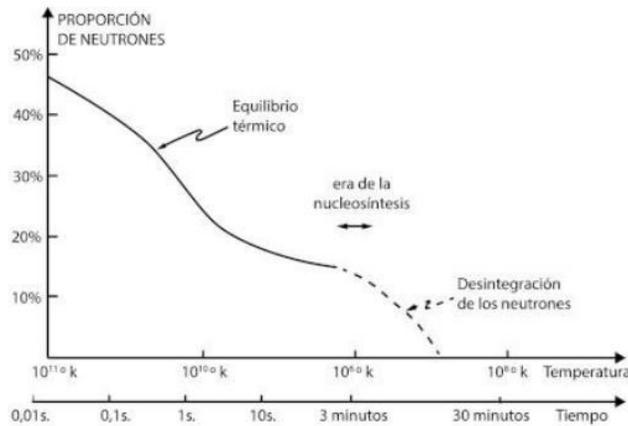


Figura 18: La curva del equilibrio térmico describe el periodo en el cual las densidades y la temperatura son tan altas que se mantiene el equilibrio térmico entre todas las partículas. La curva de la desintegración de los neutrones describe el periodo en el cual han cesado todos los procesos de conversión neutrón-protón, excepto en lo que respecta a la desintegración radiactiva de los neutrones libres. La parte intermedia (nucleosíntesis), describe las tasas de transición de las interacciones débiles. En esta parte los neutrones se reúnen rápidamente en núcleos de helio” [19].

El neutrino es una de las partículas más pobladas en el universo, a pesar de su ligera masa, da suficiente atracción gravitacional para contribuir a la formación de galaxias, y esto se debe principalmente a que en el universo hay un gran número de neutrinos presentes. Para los astrónomos el neutrino es un mensajero cósmico que es capaz de atravesar la materia, es decir, no interactúan con lo que se encuentra en su alrededor, esto a su vez traen consigo información excepcional sobre las regiones en donde son producidos. Uno de los problemas que se les presenta a los científicos es la determinación de la masa del neutrino. En la actualidad existen experimentos que permiten determinar la masa del neutrino, como es el experimento Karlsruhe tritio neutrino (KATRIN), que comenzó a operar en el instituto de tecnología de Karlsruhe en Alemania, “mediante un proceso radiactivo conocido como desintegración beta, en donde un neutrón se transmuta en un protón, liberando electrones y neutrino, pero en el experimento alemán

emplea un gas de tritio, un isótopo inestable del hidrógeno, cuyo núcleo consta de un protón y dos neutrones, siendo estos neutrones adicionales a sufrir decaimiento de tipo beta. Cuando esto ocurre, el experimento aísla los electrones expulsados y mide su energía. Los neutrinos son difíciles de atrapar, pero es posible de calcular la energía total del electrón, por ende, se puede deducir la energía del neutrino, y a partir de esta energía, se puede determinar su masa” [20].

Hasta el momento KATRIN no ha generado datos suficientes para obtener un valor definitivo, pero según los datos cosmológicos, la verdadera cifra es probablemente sea mucho menor que 1 eV. “Según la física Katherine Freese de la universidad de Michigan que trabaja en modelos astrofísicos para calcular la masa del neutrino, en la cual mediante un análisis cosmológico reciente dedujo que la masa del neutrino más ligero no podía exceder de los 0.086 eV” [21].

Así que determinar la masa de los neutrinos podría ser un gran problema para los físicos, predecir el futuro a largo plazo del universo. Una de las grandes preguntas de los físicos ¿se expandirá para siempre el universo o eventualmente colapsaría por su propio peso? La respuesta a esta pregunta aún no sabe con seguridad.

## Capítulo X

### Preguntas para el siglo XXI

#### Materia oscura

Todos los fermiones presentes en el modelo estándar siembran toda la materia luminosa, pero sucede que para los astrónomos algo no le cuadra en sus observaciones de los movimientos de galaxias, ya que muestran que hay más fuerza gravitatoria en torno a lo que la materia luminosa puede explicar. Entonces, hay un 90% de materia que permanece sin detectar, a esta materia que no es visible se le denomina materia oscura, con lo cual no aparece en ninguna longitud de onda de los telescopios.

Lo que más intriga sobre el estudio de la materia oscura es que estas grandes cantidades de partículas subatómicas no interactúan electromagnéticamente, es decir, no se puede detectar su radiación electromagnética.

Para explicar la materia oscura, es indispensable discutir acerca del neutrino, debido a que estas entidades son partículas que podrían pertenecer a este tipo de materia, con lo cual grandes nubes de neutrinos gravitaran entre sí y ayudara a sembrar la formación de las galaxias.

El modelo estándar plantea que la materia oscura es fría, es decir, consiste en partículas relativamente pesadas que inicialmente tuvieron movimientos lentos. La consecuencia de esto es que es muy sencillo que las partículas cercanas se agrupen y formen objetos que estén ligados por la gravedad. Así que la predicción del modelo es que el universo debería estar lleno de pequeñas coronas de materia oscura [22].

Por otra parte, la materia oscura podría ser caliente, es decir formadas por partículas ligeras y con una velocidad elevada que puedan escapar con facilidad de regiones densas, como las galaxias. Por lo tanto, el neutrino al moverse a una velocidad extremadamente alto, podría ser un candidato de materia oscura caliente, ya que no emite o absorbe luz, con lo cual no lo podemos detectar con facilidad.

Una teoría que va más allá del modelo estándar postula la existencia de partículas supersimétrica, en las cuales se caracterizan por ser partículas extra ligeras que no responden a las fuerzas electromagnéticas o la fuerza nuclear fuerte. Si bien, en los aceleradores de partículas, principalmente en el Tevatron en el Fermilab y el LHC en CERN, pueden tener la suficiente energía para crear estas partículas supersimétrica. Si se encuentra una de estas partículas, el desafío es estudiar las propiedades en detalle, principalmente si estas pudieran haber formados cúmulos de materia oscura en el universo temprano. Ahora bien, una de las grandes preguntas es ¿Qué es la supersimetría?

## **Supersimetría**

La supersimetría o también llamado SUSY por sus siglas en inglés, es una de las teorías más populares que postula la existencia de partículas más allá del modelo estándar. El modelo estándar se construye a partir de simetrías que dan lugar a las leyes de conservación. La supersimetría incluye todas las simetrías del modelo estándar y añade otras que están involucradas con el spin. Este número cuántico divide las partículas del modelo estándar en dos tipos: los fermiones (quarks y los leptones) que tiene spin sementero y los bosones (fotón, gluon, W y Z) con spin entero.

SUSY postula que cada partícula del modelo estándar le corresponde a un compañero Supersimétrica con spin contrario, es decir, por cada fermión, SUSY añade un bosón y por cada bosón añade un fermión. Por lo tanto, la cantidad de partículas predicho por SUSY es el doble del modelo estándar.

Si la teoría de SUSY es cierta, los aceleradores de partículas, como el LHC sería capaz de producirlas, debido a que las masas de estas partículas deberían estar en un rango de energía en el que LHC trabaja a 14 TeV.

En la supersimetría hay familia de bosones que hermanan los quarks y leptones, a estos superquarks y superlepton, se les conocen como squark y slepton. Si la simetría de SUSY fuese exacta cada variedad de leptón y quarks tendría la misma masa que los slepton y squarks. Pero en realidad las cosas no son así. Para el

caso del selectrón, presenta una masa mucho mayor que 100 GeV, en la cual implica que es miles de veces más masivo que el electrón.

Con los bosones ocurre algo similar. En SUSY hay familias de fermiones que hermanan de los bosones, a estas superpartes se le añade el apéndice “ino” para denotar la súper pareja de fermiones en un bosón estándar (photino, gluino, zino y wino). Como lo ocurrido anteriormente si SUSY fuese perfecta, la masa del photino, gluino y el gravitino sería cero y para el caso del wino y el zino tendrían masa de 80 y 90 GeV, igual con que el W y Z. pero en la realidad no ocurre, ya que los “inos” son más masivo que sus homólogos convencionales [23].

### Neutrinos masivos

En el modelo estándar de Física de Partículas, se asumía que los neutrinos no presentaban masa, en comparación con las demás partículas elementales. Este hecho recaía en que, no había los instrumentos necesarios para calcular la masa de estos, por lo que se asumía que su masa era 0. En la actualidad, sabemos que los neutrinos si presentan una masa pequeña, diferente de 0 y que, en comparación con el electrón, es diez mil veces menor a su masa.

A su vez, existen tres tipos de neutrinos asociados a cada una de las familias leptónicas, - más sus respectivas antipartículas- las cuales son: Neutrino electrónico ( $\nu_e$ ), con una masa  $< 2$  eV, neutrino muónico ( $\nu_\mu$ ), de masa  $< 190$  KeV y neutrino tauónico ( $\nu_\tau$ ), de masa  $< 18.2$  MeV<sup>1</sup>.

En la mecánica cuántica, las partículas presentan un carácter ondulatorio, por lo cual, los neutrinos pueden pasar de una familia a otra, mediante el proceso denominado oscilación de neutrinos, ocasionándose de forma aleatoria, destacándose que, la probabilidad de que ocurra este suceso es mayor en medios materiales que en el vacío. Dada la aleatoriedad del proceso, cada neutrino tiende a repartirse por igual ( $\frac{1}{3}$  para cada neutrino) a medida que se producen sucesivas oscilaciones. Este hecho es fundamental, pues permitió considerar por primera vez la oscilación de neutrinos procedentes del Sol [24].

<sup>1</sup>Datos obtenidos por el Observatorio de Neutrinos Súper- Kamiokande

Las masas de estos neutrinos también podrían tener un impacto en la cosmología. Neutrinos masivos podrían haber jugado un papel en la siembra de formas de galaxias, podrían implicar un papel fundamental en explicar la naturaleza de la materia oscura. Estos mismos, son una entrada principal para probar la interacción débil y conducir a descubrimientos inesperados, conduciendo naturalmente a preguntar sobre la naturaleza de la masa misma.

## Masa

La fuerza de la fuga eléctrica es la fuerza llevada por el fotón familiar del electromagnetismo y por los bosones W, Z, siendo estos, los responsables de las interacciones de fuerza débil que ocurren al interior del núcleo solar. Sin embargo, si estos efectos están estrechamente entrelazados, ¿por qué parecen ser tan diferentes a temperaturas y energías tan bajas? Una razón se explica que el fotón no presenta masa, a diferencia de los bosones W y Z que se asocian a la fuerza débil, que presentan enormes masas y cada una pesa como un átomo de plata.

El modelo estándar de partículas fundamentales y las fuerzas que actúan entre ellas explica la masa al proponer que se debe a cierto campo, denominado campo de Higgs. Si no existiera este campo, las partículas fundamentales no tendrían masa. En este caso, el fotón no interactúa con este campo, a diferencia de los leptones, quarks o bosones, que sí experimentan esta interacción con el campo<sup>2</sup>.

Como en los campos electromagnéticos se producen los haces cuánticos, llamados fotones, en el campo de Higgs, deberían manifestarse mediante el Bosón de Higgs, por lo cual, de existir la supersimetría, debe existir más de un bosón, el cual, en la actualidad, no se ha podido determinar aún.

Ahora bien, el bosón de Higgs es una partícula elemental propuesta en el modelo estándar de partículas, designada mediante la nomenclatura  $H_0$ . Según este modelo, no posee espín, carga eléctrica o carga de color, siendo muy inestable, lo que produce su desintegración en el orden de un zeptosegundo ( $10^{-21}[s]$ ). Todos estos datos, fueron aportados por ATLAS y CMS en el año 2012 y explica la razón

---

<sup>2</sup> La interacción es asociada al Bosón de Higgs ( $H_0$ )

de la existencia de masa en las partículas elementales, pero aún no declara la propia naturaleza de la masa [25].

### **Plasma de Quark-Gluon**

Si la percepción de los orígenes de la materia es correcta entonces los Quarks y Gluones, en el frío actual se encuentran atrapados dentro de los protones y neutrones, en el calor del Big Bang habría estado demasiado caliente para mantenerlos juntos, lo que crea la sopa energética conocida como plasma de Quark-Gluon (QGP). Este estado es conocido como plasma es análogo al estado de materia encontrado dentro del corazón del sol, y consiste en gases independientes de electrones y núcleos muy energéticos para unirse para la formación de átomos neutros [6].

En vez de realizarse colisiones de protones, se colisiona los núcleos de átomos más pesados, como el plomo o el oro, esto se hace actualmente en el Colisionador de iones pesados relativistas del laboratorio nacional Brookhaven (RHIC) y el gran Colisionador de Hadrones (LHC) de CERN, estos confirmaron el fenómeno del enfriamiento por chorro en colisiones de iones pesados, aun así las energías de colisiones de LHC son mucho mayores, que las accesibles en RHIC, lo que permite una nueva caracterización más detallada del quark-gluon [26].

En las colisiones se acumula tanta energía, que se forma un plasma de corta duración de las partes de los nucleones (quark y gluones), este plasma se expande y enfría rápidamente, de manera similar a un universo joven, es decir, después del Big Bang, de modo que permite realizar estudios de preguntas relacionadas con la época, aun así, la comprensión teórica de estas mediciones sigue siendo un desafío y es uno de los problemas más importantes en la cromodinámica cuántica en la actualidad.

### **Antimateria y CP**

Los kaones representan mezclas simétricas y antisimétricas, los kaones cargados son mesones, es decir que tienen cargas intermedias compuestos por un quark y

antiquark, hay dos versiones de esta, misma masa, pero vida útil de descomposición, uno denominado K-short y el otro k-long el primero una vida útil de  $9 \times 10^{-11}$ s en tanto el segundo  $5 \times 10^{-8}$  s, estas partículas se descomponen en piones [27].

Durante muchos años se pensó que existía una ley de conservación inviolable, pero en el año 1964 se demostró la violación de la carga y paridad (CP), lo que quiere decir que deberían ser iguales si se ven al revés de un espejo (P) y con toda la materia intercambiada con antimateria (C), en 1973 el incumplimiento de la simetría fue dictada por Makoto Kobayashi y Toshidie Maskawa, que dijeron que si existían 6 tipos de quark, los que posteriormente fueron descubiertos (quarks b y quarks t).

El experimento T2K, en el Japan Proton Accelerator Research Complex, ubicado en Japón, el cual hace colisionar neutrinos y donde en los últimos antecedentes se ha recaudado información en que no existe simetría entre la materia y la antimateria de estos, ya que al obtener la cantidad de cargas de antineutrinos no es similar y es algo menor que a la materia, es por esto que se considera que la simetría CP no sería tan real como tal, aunque para llegar a afirmar esto es necesario que se mejoren algunos componentes en los aceleradores [28].

El experimento LHCb también está trabajando en algo similar, donde quieren describir porque la materia predomino por sobre la antimateria cuando ocurrió el Bing Bang, este detector cuenta con un conjunto de subdetectores que son capaces de identificar parámetros importantes de las partículas generadas en los decaimientos [29].

## Capítulo XI

### Panorama General

En este capítulo se dará una breve idea sobre las generalidades de la electrodinámica cuántica (QED), centrándonos en los diagramas de Feynman con fotones, electrones, muones y tauones. La finalidad del capítulo es que el lector tenga una aproximación del enfoque principal del proyecto. Al finalizar el capítulo se explicará brevemente el software que se utilizará en el proyecto.

### Electrodinámica cuántica

En la física de partículas, la electrodinámica cuántica (QED) es la teoría relativista del campo cuántico de la electrodinámica. Esta teoría describe la interacción de la luz y la materia, siendo así, la primera teoría en la que se logra un acuerdo entre la mecánica cuántica y la relatividad especial. La electrodinámica cuántica describe matemáticamente todos los fenómenos que involucra partículas cargadas eléctricamente que interactúan por medio de intercambio de fotones.

En términos técnicos, QED se puede describir como una teoría de perturbación del vacío cuántico electromagnético. Richard Feynman lo denominó la joya de la física, por sus predicciones extremadamente precisas de cantidades como el momento magnético anómalo del electrón.

### AMM

Dentro de la QED, el momento magnético anómalo (*En sus siglas en inglés **AMM***) de una partícula, es la contribución de los efectos de la mecánica cuántica, expresadas mediante los diagramas de Feynman, por medio de bucles, para explicar el momento magnético de alguna partícula (*El momento magnético se denomina en ocasiones momento magnético dipolar*).

El momento magnético dipolar, se refiere al componente magnético que se representa mediante un dipolo magnético, donde una partícula que se le aplica un campo magnético se opone a la misma fuerza magnética [30]. La fuerza y la dirección de este par de torsión dependen no sólo de la magnitud del momento magnético, sino también de su orientación relativa a la dirección del campo magnético, por tanto, el momento magnético<sup>3</sup> puede ser considerado como un vector.

El momento magnético, se representa mediante los diagramas de nivel de árbol de Feynman (se piensa como resultado clásico) y se pueden calcular mediante la ecuación de Dirac. Por lo general, se expresa en términos de *g-factor*<sup>4</sup>.

## Diagramas de Feynman

Richard Feynman fue uno de los más importantes físicos del siglo XX, el realizó su trabajo en electrodinámica cuántica con la que en conjunto con Julián Schwinger y Sin-Ichiro Tomonaga obtuvieron el premio Nobel de Física en 1965, a partir del desarrollo de un método para estudiar interacciones u propiedades de las partículas subatómicas utilizando los llamados diagramas de Feynman [31], estos diagramas describen interacciones entre partículas mediante una representación esquemática de líneas.

Cada línea que esquematizan los diagramas posee un significado, por ejemplo, las líneas externas representan las propias partículas reales, fermiones, que conocemos del modelo estándar y las líneas internas representan partículas no observables, ya que son partículas de intercambio conocidas con el nombre de

<sup>3</sup> Vector que relaciona la alineación par en el objeto, cuando se aplica un campo magnético externo. La relación se da mediante:

$$\tau = m \times B$$

$\tau$  es el par que actúa sobre el dipolo

$m$  corresponde al momento magnético

$B$  es el campo magnético externo

<sup>4</sup> Momento magnético adimensional, que caracteriza el momento magnético y el momento angular de un átomo, partícula o núcleo.

bosones, y se dice que son propagadores de fuerza, lo que quiere decir que transfieren energía y momento ingredientes primordiales para la interacción.

Estas partículas no observables, no son portadores de masa por lo tanto no cumplen con la ecuación de Einstein ( $E = mc^2$ ), aun así, en el proceso global de cualquier interacción a de conservar los parámetros de energía, materia, carga eléctrica y momento, todo esto sin confundir la representación pictórica de los diagramas con trayectorias y/o distancias de las partículas que intervienen en el proceso.

Las interacciones suceden probabilísticamente, en la vida real la probabilidad del suceso, cuánticamente hablando, se obtiene mediante secciones, y vidas medias (probabilidad de reacción y de desintegración de las partículas integrantes, respectivamente), generalmente este cálculo es complejo, requiriendo de integrales, teoría de perturbaciones (Regla de Oro de Fermi), destreza y manejo con transformadas de Fourier y sobre todo conocimiento en teoría de campos relativistas. Para dibujar utilizamos la siguiente convención: la línea temporal de la interacción va de izquierda a derecha, donde las líneas fermiónicas indican el impulso. Las partículas que intervienen como reactivos y se obtienen como productos son fermiones, unidades de la materia más pequeñas postuladas en el modelo estándar [32].

## Capítulo XII

### Introducción y definiciones a la segunda parte

Para el establecimiento del marco teórico de la física moderna de partículas, existen señales de la existencia de física no descrita por el modelo estándar que son muy obvias (como la energía oscura y la materia oscura) y otras que son muy sutiles, como la anomalía en el momento magnético anómalo del muón ( $g-2$ )  $\mu$  [38]. El muon  $g-2$  es un experimento de física de partículas para medir el momento dipolar magnético anómalo de un muon y es una de las magnitudes más precisas medidas y teóricamente investigadas. El interés en la alta precisión de las mediciones es con el fin de explorar los límites de nuestra actual comprensión de la naturaleza y encontrar los defectos que no pueden ser explicados por las teorías ya establecidas. [33]

El primer miembro del grupo de la segunda familia de los leptones es el muon ( $\mu$ ) y es la primera partícula elemental descubierta que no pertenece a los átomos convencionales, descubierto en los rayos cósmicos descubiertos por Anderson y Neddermeyer, mientras estudiaban la radiación cósmica en una cámara de niebla al detectar la presencia de partículas que se curvaban al pasar por un campo electromagnético de forma distinta a los electrones y a otras partículas conocidas, con una curvatura intermedia entre el electrón y el protón. [34]

De hecho, el muón resulta ser muy especial en muchos aspectos como veremos y estas propiedades particulares hacen que juegue un papel crucial en el desarrollo de la teoría de las partículas elementales. Dado que el muón resulta ser mucho más sensible a la física hipotética más allá del modelo estándar que el propio electrón, el muón es mucho más adecuado que podría darnos pistas sobre aún no se ha descubierto la física. [33]

La presencia de las tres familias permite un patrón extremadamente rico de todo tipo de fenómenos que derivan en la posibilidad de mezclar los vectores horizontales en el espacio familiar formado por los miembros con números cuánticos idénticos. Los vectores de los que hablamos en este caso se refieren al momento angular del spin y al momento angular orbital, con los cuales al sumarlos obtenemos el momento angular total. En el momento orbital, más el espín del electrón en que los átomos emiten radiación dentro de un campo magnético, es conocido como efecto Zeeman, este efecto provoca que las líneas espectrales asociadas a la energía emitida muestren un desdoblamiento en un patrón simétrico de componentes o grupos de líneas muy cercanas, encontrándose completamente polarizadas.[35]

Pieter Zeeman, observó de manera paralela a un campo magnético, donde se formaba un triplete de líneas espectrales en lugar de solo una, este fenómeno fue denominado efecto Zeeman y su comportamiento tal y como se describió para esos casos se consideró normal y posteriormente se descubrieron otras líneas espectrales de energía emitida por átomos en presencia de campos magnéticos cuyos desdoblamientos eran más complejos aun, por lo que estos casos fueron considerados anómalos. [36]

El momento magnético se puede calcular a partir de la ecuación de Dirac. Normalmente se expresa en términos del factor  $g$ ; predice la ecuación de Dirac, que en la teoría clásica  $g=2$ . Para partículas como el electrón, este resultado clásico difiere del valor observado en una pequeña fracción de un porcentaje. La diferencia es el momento magnético anómalo, denotado y definido como

$$g - 2 = 2a$$

$$a_{\ell} \equiv \frac{g_{\ell} - 2}{2}$$

En el momento magnético anómalo del muón, hay una carga eléctrica en un campo magnético y siente una fuerza que es proporcional a una magnitud llamada momento magnético. Los niveles atómicos de los electrones en un átomo inmerso en un campo magnético se desdoblan por efecto Zeeman. Este desdoblamiento depende del momento magnético del electrón, que tiene dos componentes, una proporcional al momento angular orbital (con constante de proporcionalidad  $g=1$ ) y otra proporcional al momento de espín (con constante de proporcionalidad  $g=2$ ). El vacío en electrodinámica cuántica (QED) introduce correcciones radiactivas en el momento magnético de espín del electrón, resultando un valor de  $(g-2)$  diferente de cero, lo que se denomina momento magnético anómalo (normalmente se calcula el valor de la constante  $a = (g-2)/2$ ). La constante adimensional  $(g-2)$  determina el valor del momento magnético para cualquier leptón (electrón, muón y leptón tau). La predicción teórica en QED es una función de la constante de estructura fina  $\alpha$  y de los cocientes entre las masas de los tres leptones.

[38]

## Historia

Para la formulación de la electrodinámica cuántica se encuentra uno de los físicos teóricos de la segunda mitad del siglo XX, este es Julián Schwinger, el cual, en conjunto con Feynman, Tomonaga y Dyson transformaron el ejemplo de una teoría cuántica de campos experimentalmente exitosa y consistente. Schwinger fue comparado ocasionalmente con el legendario físico Richard Feynman. El primero tuvo una inclinación más matemática en la forma de la forma de hacer física, esto especialmente en la teoría cuántica de campos. Por contraste, Feynman fue más intuitivo y su mostrado diagrama de Feynman se aproxima a la teoría cuántica de campos, pero Schwinger

discrepó con los diagramas de Feynman al punto de combatirlos completamente en sus clases [37].

La teoría de la electrodinámica cuántica también predice correcciones cuánticas a observables tales como probabilidades de dispersión de partículas, estas correcciones cuánticas se pueden determinar matemáticamente mediante integrales o en el lenguaje de los diagramas de Feynman, con los llamados bucles, el será el tema principal de esta segunda parte de la tesis (ver capítulo 15). Un ejemplo destacado es el momento magnético anómalo (AMM), relacionado con la interacción electrón-fotón, para el cual Schwinger ha determinado que la primera corrección cuántica es;

$$a_{\ell}^{\text{QED}(2)} = \frac{\alpha}{2\pi}, \quad (\ell = e, \mu, \tau)$$

Esto ha sido verificado experimentalmente, midiendo la AMM con precisión a través de los tres experimentos del muon g-2, el CERN-I, CERN-II y CERN-III. Donde gracias al primer experimento se logró la variación de la asimetría de desintegración con tiempo de almacenamiento, lo que evidencio que los muones no eran relativistas. En el desarrollo del segundo experimento, CERN-II, construyó un anillo de almacenamiento de enfoque débil magnético de 5m de diámetro, que permite determinar el momento magnético anómalo del muon, para el desarrollo del tercer experimento tienen pensado aumentar la medición de  $a_{\mu}$ , para esto deberán considerar una vida mayo del muón y acumular más datos, este tema se desarrollará más en el capítulo XIII.

### Propiedades de los muones

El momento magnético anómalo de los muones al ser tan interesante juega un papel fundamental en la física elemental de partículas, esto significa que no se descompone en otras partículas además debido a su

alta masa, los muones tienen gran capacidad de penetración. Es interesante debido a que puede ser predicho por la teoría con muy alta precisión y al mismo tiempo se puede medir con la misma precisión en un montaje experimental sin ambigüedades, pero si con pequeños problemas sistemáticos, puesto que posee propiedades intrínsecas.

### Momento magnético de un leptón

De los capítulos anteriores sabemos que los leptones son partículas elementales con un giro medio, los cuales no experimentan interacciones fuertes. El interés radica en el comportamiento completo del movimiento del leptón en un campo externo bajo la consideración de la mecánica cuántica relativista, esto controlando las ecuaciones de movimiento de la electrodinámica cuántica con un campo externo añadido. En resumen, lo que se busca es la solución de la ecuación de Dirac con un campo externo, específicamente constante, esto como un problema relativista de una sola partícula, descuidando el campo de radiación, este movimiento está esencialmente determinado por la ecuación generalizada de Pauli.

Hasta el término de giro no es más que la ecuación no relativista de Schrödinger y que también sirve de base para el entendimiento del papel del momento magnético de un leptón en nivel clásico, es un componente no relativista de Pauli- Spinor. En ausencia de campos eléctricos, la corrección cuántica puede ser asombrosamente subsumida en un solo número, el momento magnético anómalo, que es el resultado de las fluctuaciones cuánticas relativistas. La electrodinámica cuántica tiene una descomposición covariante relativista de la forma:

The diagram shows a fermion loop (represented by a circle with a cross-hatch pattern) with two external fermion lines. The incoming line on the left is labeled  $\mu(p_1)$  and the outgoing line on the right is labeled  $\mu(p_2)$ . A wavy line representing a photon with momentum  $\gamma(q)$  is attached to the top of the loop.

$$= (-ie) \bar{u}(p_2) \left[ \gamma^\mu F_E(q^2) + i \frac{\sigma^{\mu\nu} q_\nu}{2m_\mu} F_M(q^2) \right] u(p_1), \quad (17)$$

Donde  $q = p_2 - p_1$  y  $u(p)$  es el cuadvivector de energía-momento del fotón (se conserva en el vértice), y  $u(p_1)$  y  $u(p_2)$  denotan los llamados espinores de Dirac, donde espinor corresponde a sinónimo de fermión;  $F_E(q^2)$  es la carga magnética o factor de forma de Dirac y  $F_M(q^2)$  es el magnético o factor de forma Pauli. Notando además que la matriz representa el tensor de momento angular de giro  $1/2$ , el AMM del leptón viene dado por el valor en el momento fotón cero, es decir  $F_M(0) = a$ . Esta ecuación nos permite simplificar el cálculo, trabajando directamente en el límite de  $q \rightarrow 0$ , esto por que  $a_\mu$  no depende de la dirección del momento del muón, encontrándose como formula maestra la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
 a_\mu = & \frac{1}{8(d-2)(d-1)m_\mu} \text{Tr} \{ (\not{p} + m_\mu) [\gamma^\mu, \gamma^\nu] (\not{p} + m_\mu) T_{\nu\mu}(p) \} \\
 & + \frac{1}{4(d-1)m_\mu^2} \text{Tr} \{ [m_\mu^2 \gamma^\mu - (d-1)m_\mu p^\mu - d \not{p} p^\mu] V_\mu(p) \} \Big|_{p^2=m_\mu^2},
 \end{aligned} \tag{20}$$

Donde  $d = 4 - \varepsilon$ , es la ecuación espacio tiempo, en caso de las divergencias de los UV, la elección  $\varepsilon > 0$  proporciona una regularización, el límite  $\varepsilon \rightarrow 0$  debe realizarse después de la renormalización. Las amplitudes  $V_\mu(p)$  y  $T_{\nu\mu}(p)$  dependen del momento  $p = p/2$ , solamente, y por, lo tanto el problema se reduce al cálculo de los diagramas de tipo auto energía en la cubierta ya que el impulso del fotón externo ahora puede ser tomado como cero. Obsérvese que en órdenes superiores los factores de forma en general adquieren una parte imaginaria, por lo tanto, se debe escribir un efectivo momento dipolo lagrangiano con complejo de “acoplamiento”.

Es importante destacar el factor de forma Dirac, este describe las amplitudes de probabilidad para un electrón solo. Esta teoría de una sola partícula da una predicción bastante buena del spin y del

momento magnético del electrón, y explica la mayor parte de la estructura fina observada en las líneas espectrales atómicas. También realiza una peculiar predicción de que existe un conjunto infinito de estados cuánticos en que el electrón tiene energía negativa. Este extraño resultado permite a Dirac predecir, por medio de las hipótesis contenidas en la llamada teoría de los agujeros, la existencia de electrones cargados positivamente. Esta predicción fue verificada con el descubrimiento del positrón, el año 1932 [39]. A pesar de este éxito, la teoría fue descartada porque implicaba la creación y destrucción de partículas, enfrentándose así a una de las consecuencias básicas de la relatividad. Esta dificultad fue resuelta mediante su reformulación como una teoría cuántica de campos. Añadir un campo electromagnético cuantificado en esta teoría conduce a la moderna teoría de la electrodinámica cuántica.

### Conexiones con los diagramas de Feynman

Cómo se mencionó en capítulos anteriores Richard Feynman desarrolló un método para estudiar las interacciones y propiedades de las partículas subatómicas utilizando los denominados diagramas de Feynman.

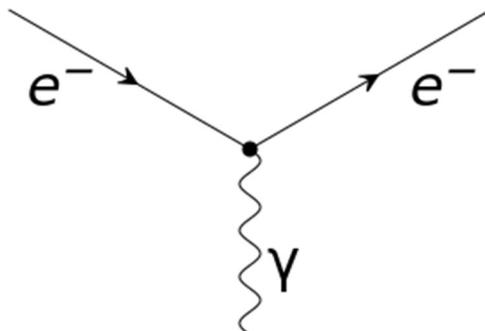


Figura 19: interacción fotón con un Leptón, en este caso un electrón.

[40]

Cada línea recta es una partícula, los vértices son interacciones, las líneas con flechas son partículas de materia (fermiones). Las líneas onduladas es una partícula de fuerza (bosones) que, en este caso, intermedia la interacción electromagnética: es el fotón. En resumen, Son unas representaciones excelentes de cómo las partículas elementales interactúan entre sí en un determinado modelo. Siendo estos diagramas importantes para guiar los cálculos dentro de la electrodinámica cuántica, cabe destacar que la precisión de los cálculos depende de cuantos términos se consideren. Para finalizar esta sesión cabe mencionar que el diagrama que se observa en la ecuación (17) puede expandirse en una serie de Taylor, donde este pequeño parámetro de expansión es la carga eléctrica elemental, este diagrama muestra el primer término de esta serie los demás términos de orden superior de la serie y los diagramas de Feynman se discutirán en los capítulos XIV y XV.

## Capítulo XIII

### Los experimentos del muon g-2

#### Experimento CERN-I (1961)

Los primeros experimentos con el muon g-2 nacieron en el CERN en 1959 bajo la iniciativa de León Lederman. La motivación que tuvieron para seguir adelante en este experimento es obtener una medición más precisa, en la cual fue buscar un desglose en la electrodinámica cuántica (QED). El experimento CERN-I (1961) del muon g-2, los miembros del equipo eran responsables de partes individuales del experimento. El físico Nino Zichichi asumió la responsabilidad de producir el campo magnético de la forma deseada, midiéndolo y generando datos cuantificables para el campo magnético en una escala de tiempo acorde. El diseño de este experimento se basó en un imán de 6 m (86 toneladas) con caras polares de acero superior e inferior de 50 mm de espesor, tomando la decisión de no mecanizar las caras de los polos para obtener el campo magnético deseado, pero para una acumulación magnética de los polos por la aplicación de calzas planas de acero Armco de varios espesores, asegurada con cinta y finalmente está sujeta en el vacío por tapas de cobre, asegurada con tornillos de latón en las caras de los polos [44].

El grupo de físicos reconoció desde un principio de este experimento, de que era deseable un tamaño de paso pequeño para tener el mayor tiempo de almacenamiento posible en un imán de volumen dado.

El experimento del CERN-1 consistió en un rayo que se llevó a un gran imán dipolo con un campo magnético que contenía un pequeño gradiente que causó que las orbitas circulares del muon se desviaran lentamente hacia el extremo más alejado del imán [41]. En la figura 20, se muestra la configuración del experimento CERN-1, en donde el rayo

se inyecta en un imán de dipolo largo, con el muon incidente definido como una coincidencia de los contadores 1,2 y 3, se utilizó un degradador de berilio, colocado entre los contadores 2 y 3, con el fin de inyectar el rayo en el imán [41]. Al final del dipolo se utilizó un gran gradiente para expulsar el haz y luego se detuvo en el objetivo de yoduro de etileno. En base a este experimento se logró en el grafico 1 la variación de la asimetría de desintegración con el tiempo almacenamiento, con el cual el tiempo se extiende a  $8 \mu s$ .

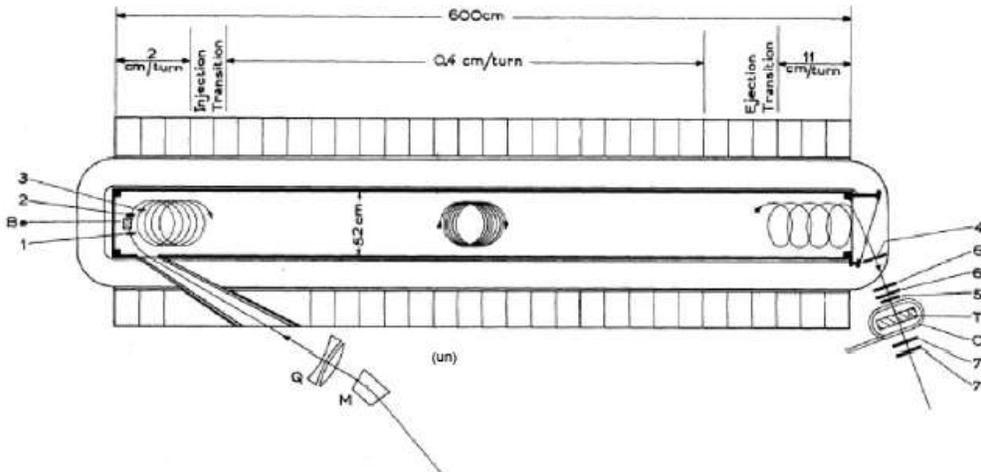


Figura 20: Experimento CERN-1: inyección de muon en un dipolo largo [41]

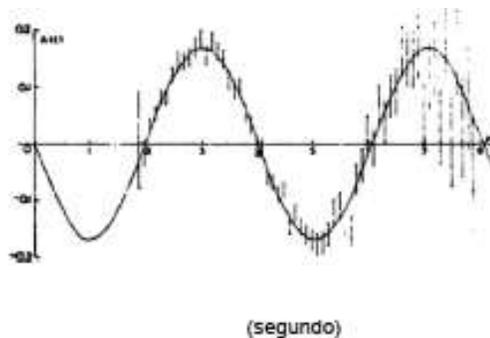


Grafico 1: La distribución del tiempo de las desintegraciones de los muones [41].

En base al experimento hay que tener en cuenta que los muones no eran relativistas, por lo que la vida útil del muon es esencialmente de  $2,2\mu s$ . Por lo tanto el resultado final del experimento fue de  $a_{\mu}^{exp} = 1162 \pm 5 \times 10^{-6}$  (5164 ppm) [41].

Las dificultades en este primer experimento del CERN, con respecto al muon g-2, es que la vida útil en reposo es de  $2,2 \mu s$ , lo que limita el periodo de medición. Queda claro que para lograr una mejora significativa del experimento, debería realizarse con un mayor haz de muones intenso y a una energía más alta, donde el tiempo dilata la vida útil del muon mayor a  $2,2 \mu s$  [41].

### Experimento CERN-II (1962)

El segundo experimento del CERN, llamado CERN-2 (1962), se llevó a cabo mediante un anillo de almacenamiento, con lo cual los elementos que son esenciales en el experimento de anillo de almacenamiento es utilizar un haz incidente de partículas, una fuerza para almacenar las partículas inyectadas en orbitas estables en el anillo de almacenamiento y detectores para detectar las partículas que salen de las reacciones del anillo de almacenamiento, en particular, los positrones de la desintegración de los muones [41].

Uno de los grandes problemas en la inyección en un anillo de almacenamiento es la complejidad, por lo cual en los experimentos posteriores del CERN resolvieron este problema técnico utilizando el decaimiento del pion en un muon y un muon neutrino ( $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ ).

El experimento CERN-2, construyó un anillo de almacenamiento de enfoque débil magnético de 5m de diámetro, que permite determinar el momento magnético anómalo del muon, en la cual, contenía un objetivo de producción de piones dentro del anillo, tal como se muestra la figura 21, en la cual se muestra el haz de protones de 10.5 GeV que entra por un agujero en el yugo y golpea un objetivo en el campo magnético. Los muones creados por la decadencia de  $\pi - \mu$  se almacenan. Los contadores detectan los electrones de la decadencia  $\mu - e$ . Las cuatro sondas de resonancia magnética nuclear se inyectan en lugares específicos de la órbita de los muones cada 200 ciclos para medir el campo magnético [44]. Si bien, el campo magnético es de 1.711 T,  $p_\mu = 1.27 \text{ GeV}/c$  y  $\gamma_\mu = 12.06$  [41].

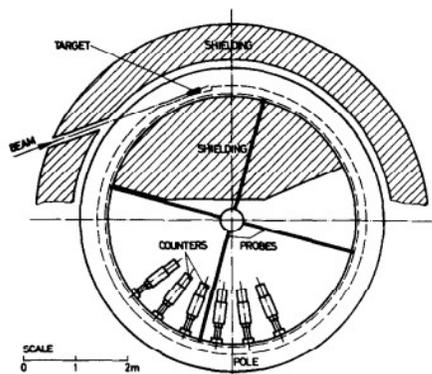


Figura 21: La disposición del primer anillo de almacenamiento del CERN [45].

Los detectores miden los positrones de altas energía que decaen y que llevan la información del giro del muon en el momento de la desintegración. Los detectores lograron medir tanto el tiempo de llegada como la energía de los positrones de desintegración. En el grafico 2 en

la parte inferior, se muestra la frecuencia de rotación del muon en el momento inicial [45], que se extingue después de  $400\mu s$  [41].

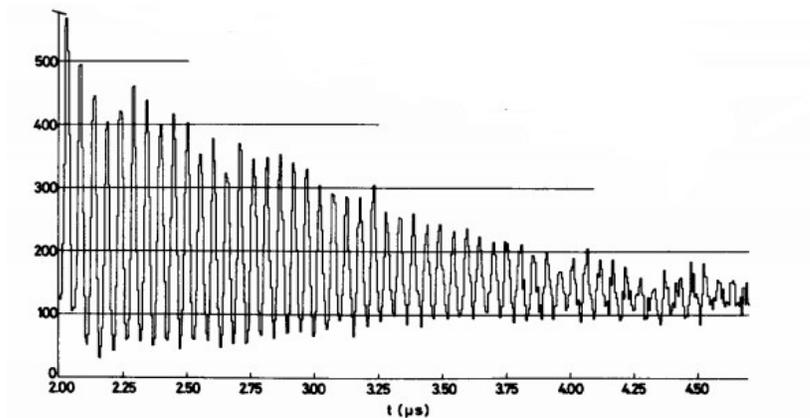


Grafico 2: Distribución de los eventos de decaimiento de los electrones en función del tiempo [44].

El resultado obtenido en el experimento CERN.-2 fue  $a_{\mu}^{exp} = (11661 \pm 3.1) \times 10^{-7}$  (266 ppm) [41], que probó el QED hasta el sexto orden, es decir, hasta el orden  $\left(\frac{\alpha}{2\pi}\right)^3$ . Este resultado prueba la electrodinámica cuántica (QED) a nuevos niveles de precisión [45].

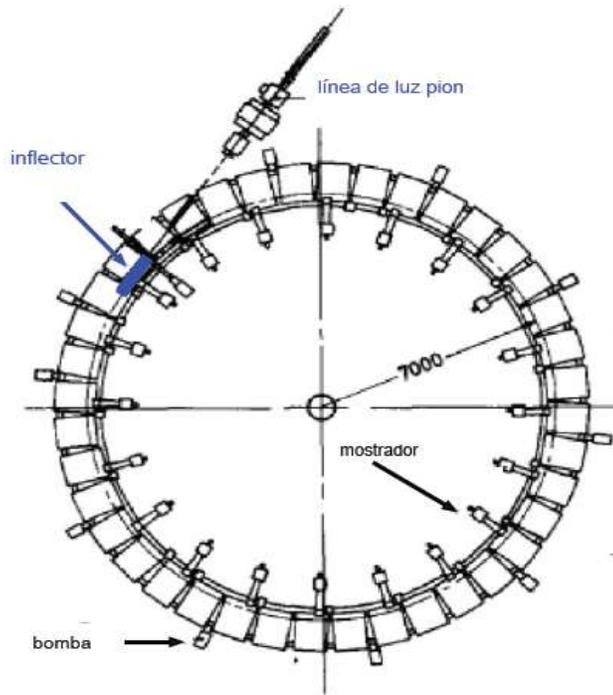
Las limitaciones del experimento CERN-2 fue la pequeña cantidad de muones almacenados y el enorme fondo en los contadores en la inyección causado por el gran destello hadrónico en los detectores causado por basura del objetivo de producción [41].

### Experimento CERN-III (1975)

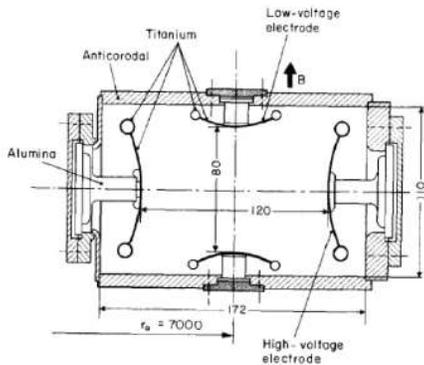
El tercer experimento del CERN, conocido como CERN- III (1975), tienen pensado aumentar la precisión de medición de  $a_{\mu}$ , para esto los investigadores del CERN, deben considerar pasar a una vida mayor del muón y acumular más datos. El problema que surgió es ¿Cómo se sabe el campo promedio que siente la distribución de muones con precisión sin conocer las orbitas de los muones con precisión? [41]. La solución se

dio en el tercer experimento del CERN examinando la fórmula de precisión del espín de un muon en un anillo de almacenamiento con un campo magnético uniforme y un campo cuadrupolo eléctrico para proporcionar un enfoque vertical [41].

En este experimento se construye un nuevo anillo de almacenamiento de 7 m de diámetro, compuesto por 40 imanes contiguos, se colocaron 24 mostradores que se encuentra simétricamente alrededor del interior del anillo, con el fin de medir el tiempo de llegada y la energía del positrón (ver figura 22 (a)).



(a)



El diseño de la cámara de vacío cuadrupolo

(b)

Figura 22: (a) Vista del anillo de almacenamiento del CERN-III. El anillo proporciona un campo magnético de 1,47 T [44] (b) y los cuadrupolos eléctrico de enfoque vertical están situados dentro de una cámara de vacío en el imán [41].

En el experimento CERN-III hubo cuatro mejoras significativas con respecto al experimento CERN-II, en cuales son: la inyección de un haz de piones en el anillo de almacenamiento, el desarrollo de un imán inflector que canceló el campo del anillo de almacenamiento de modo que la desviación del haz que entra en el anillo fuese mínima, el uso de  $\gamma = 29.3$  que significó que la vida útil de muon se extendiera a  $64,4 \mu s$ , lo que implicó un aumento del tiempo de medición y por último un campo magnético más uniforme con un enfoque eléctrico débil facilitó la determinación del campo magnético promedio ponderado sobre la distribución de muones [41].

El campo magnético del inflector es generado por un pulso de corriente que se elevó a un valor de 300 kA en  $12 \mu s$  [41]. Los cuadrupolos (ver figura 22 (b)) se activan durante la fase de recopilación de datos y después se apagan para minimizar la captura de electrones por el campo de cuadrupolo, con el fin de minimizar las chispas en el sistema.

En base a los resultados del experimento CERN-III, se midió  $a_\mu$ , tanto para muones negativos como positivos, con lo cual obtuvieron lo siguiente [41].

$$a_{\mu^+} = (1\,165\,911 \pm 11) \times 10^{-9} (10 \text{ ppm})$$

$$a_{\mu^-} = (1\,165\,937 \pm 12) \times 10^{-9} (10 \text{ ppm})$$

$$a_{\mu} = (1\,165\,924 \pm 8.5) \times 10^{-9} (7.3 \text{ ppm})$$

### Experimento Brookhaven E821

Para aumentar la precisión en la anomalía del muon, con el objetivo de observar la contribución electrodébil, así como también las contribuciones de la nueva física como la supersimetría, se propuso un nuevo experimento para el sincrotrón de gradiente alterno (AGS) del laboratorio nacional Brookhaven (BNL) [41]. Ahora si bien, este experimento conlleva nuevas mejoras para obtener el valor más preciso del momento magnético anómalo del muon ( $a_{\mu}$ ). Entre las mejoras tenemos, 1) un campo magnético mucho más uniforme usando un imán de anillo de almacenamiento superconductor y superférrico, 2) Un imán inflector superconductor pasivo, 3) un carro de RMN de tubo de haz que podría mapear el campo magnético en el anillo de almacenamiento a menudo, simplemente apagando el haz de muones, 4) una matriz de 378 sondas de RMN alrededor del anillo para monitorear continuamente el campo magnético durante la recolección de datos, 5) una simetría de 4 veces para los cuadrupolos electrostáticos en lugar de 2 veces, 6) un haz circular con colimadores para minimizar la importancia tanto de los múltiplos magnéticos más altos como de los momentos más altos de la distribución del haz de muones en la determinación del campo magnético promedio sentido por los muones, 7) un lanzador rápido de muones para inyectar muones directamente en el anillo de almacenamiento y 8) un haz de piones – muones mucho más intenso que los del CERN [41].

El experimento de Brookhaven funciona como se observa en la figura 23, protones de energía de 24 GeV del sincrotrón de gradiente alterno

(AGS) golpea un objetivo y se producen piones de energía de 3,1 GeV. Los piones son inestables y se descomponen en muones más un neutrino, donde los muones llevan el giro y, por lo tanto, un momento magnético que se dirige a lo largo de la dirección del eje del vuelo [42]. Los muones polarizados se inyectan luego en un campo magnético uniforme donde viajan en círculo.

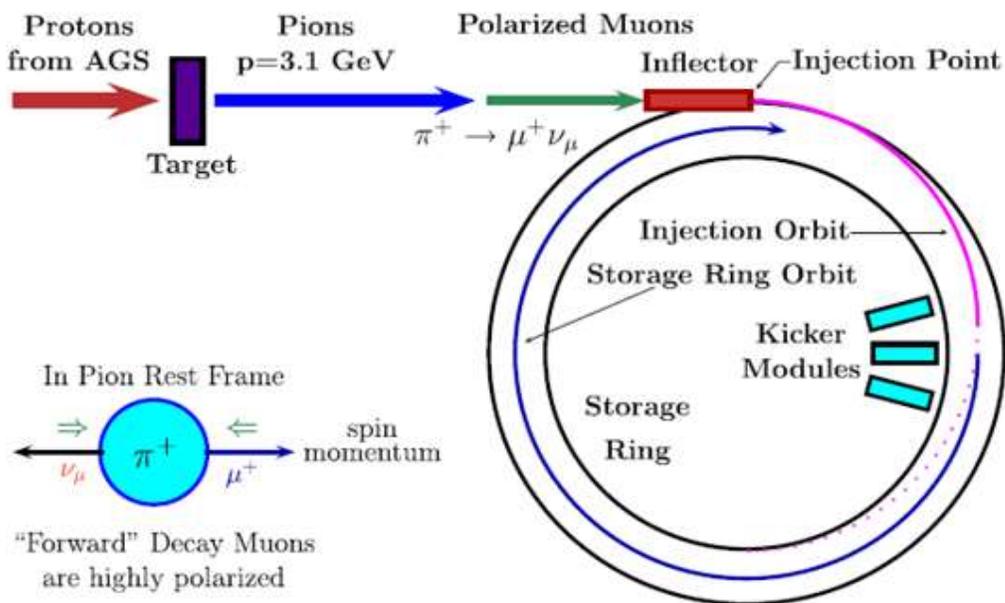


Figura 23: Estructura del anillo de almacenamiento de muones g-2 del experimento Brookhaven [42].

El anillo de almacenamiento tiene una estructura de un diámetro de 14 m, la apertura de la tubería del haz es de 90 mm, el campo magnético es de 1,45 T y el momento del muón es  $p_\mu = 3,094 \text{ GeV}$  [42]. Los muones realizan un movimiento ciclotrónico relativista con frecuencia angular ( $\omega_c$ ). Después de cada círculo, el eje de rotación del muon cambia en 120 arcos, mientras que el muon viaja con el mismo impulso [42]. El espín del muón se realiza con una frecuencia angular  $\omega_s$ , en la

cual es mayor que la frecuencia angular  $\omega_c$ , obteniendo una diferencia de frecuencia angular  $\omega_a = \omega_s - \omega_c$  [42]. La frecuencia angular mencionada está relacionada con el campo magnético ( $\vec{B}$ ) del anillo de almacenamiento, la masa del muón ( $m_\mu$ ), el momento magnético anómalo del muon ( $a_\mu$ ) y el factor  $\gamma$ . Este factor  $\gamma$ , esta dado por la ecuación  $\gamma = \sqrt{1 + 1/a_\mu} = 29,3$ , en donde los muones son altamente relativista [42]. Entonces las ecuaciones que involucran la frecuencia angular  $\omega_c$ ,  $\omega_s$  y  $\omega_a$  son:

$$\omega_c = \frac{eB}{m_\mu\gamma}, \quad \omega_s = \frac{eB}{m_\mu\gamma} + a_\mu \frac{eB}{m_\mu}, \quad \omega_a = a_\mu \frac{eB}{m_\mu} \text{ [Ver ref. 42].}$$

Ahora si bien, es importante destacar que la masa del muon  $m_\mu$ , se determina mediante un experimento que está conformado por un sistema unido mediante muon con carga positiva y electrón ( $\mu^+ e^-$ ). Para retener los muones en el anillo se requiere de un sistema de enfoque electrostático, en la cual, aparte de un campo magnético, se debe aplicar un campo cuadripolo eléctrico ( $\vec{E}$ ) en el plano normal a la órbita de la partícula [42].

La vida de un muón en reposo es de  $2,19711 \mu s$ , en cambio, dentro del anillo tiene una vida de  $64,43 \mu s$ , teóricamente, pero experimentalmente es de  $64,378 \mu s$ , por lo tanto a partir de estos datos la vida del muón es mayor dentro del anillo, que en el reposo, por lo que los muones están dando muchas vueltas en el anillo antes de descomponerse en un positrón y dos neutrinos [42].

El positrón se emite con alta probabilidad a lo largo del eje de rotación del muón (ver figura 24). Los positrones que decaen se logran detectar mediante 24 calorímetros que están distribuidos dentro del anillo de almacenamiento de muones [42].

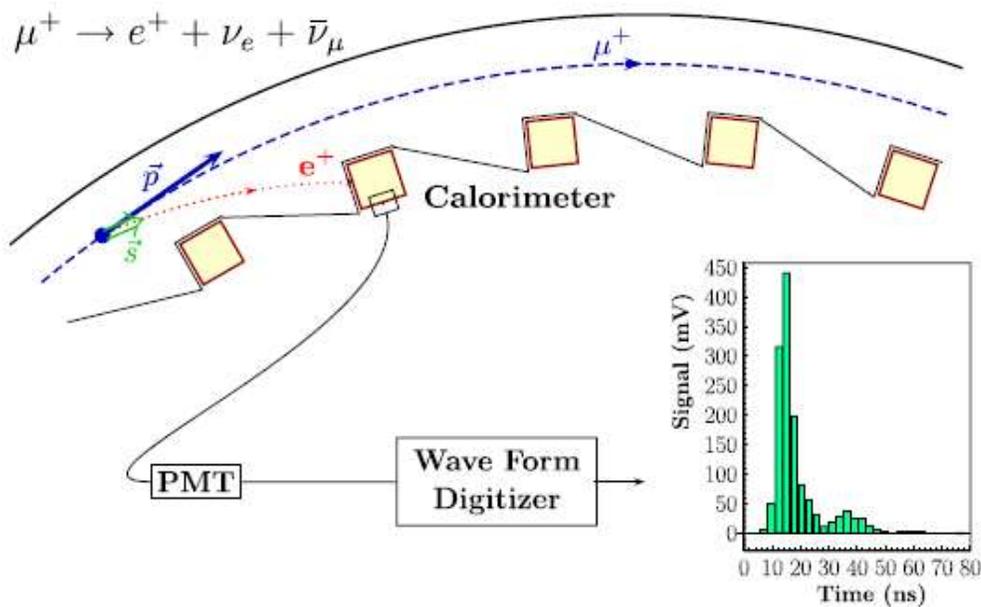


Figura 24: Decaimiento del muon y la detección del positrón emitido en fotomultiplicadores. [42].

Una de las cantidades que se deben medir con alta precisión en este experimento es el campo magnético, con lo cual se logra mediante resonancia magnética nuclear (RMN), utilizando una sonda estándar de  $H_2O$ .

En el experimento BNL, la frecuencia de precesión del espín se puede medir muy bien. Ahora si bien, la precisión a la que se puede medir  $g-2$  esta esencialmente determinada por la posibilidad de fabricar un campo magnético homogéneo constante [42]. Las posibles desviaciones que se pueden presentar se corrigen ajustando apropiadamente el campo magnético efectivo.

Las fuerzas asociadas al momento magnético anómalo son muy débiles en comparación con las fuerzas de la carga de la partícula que determina el movimiento orbital [42]. El campo magnético  $\vec{B}(r, z) = (0, 0, B_0)$  hace que las partículas se muevan en círculo de radio  $r_0 = \gamma m / (eB_0)$  y el campo cuadrípulo eléctrico  $\vec{E} = (E_r, E_\theta, E_z) = (\kappa x, 0, -\kappa z)$ ,

en la cual produce una fuerza restauradora en la dirección vertical y una fuerza repulsiva en la dirección radial, lo que conduce a un movimiento oscilatorio superpuesto [42].

### Resultado del experimento BNL

El experimento BNL de muon g-2 ha podido mejorar y perfeccionar el método de los últimos experimentos CERN, en la cual logró una precisión de 14 veces [42]. Suponiendo que la simetría CPT es válida para cualquier teoría de campos cuánticos (QFT) y considerando las correlaciones entre los errores sistemáticos entre los distintos datos, el valor del momento magnético anómalo del muon es  $a_{\mu}^{exp} = 11659208.0(5.4)(3.3)[6.3] \times 10^{-10}$  (0.54 ppm) [42].

En la siguiente tabla se muestra todos los resultados del muon g-2 que se han realizado en el CERN y en BNL.

Tabla IX: Resultados del momento magnético anómalo del muon del CERN y BNL [42].

Experiment	Year	Polarity	$a_{\mu} \times 10^{10}$	Pre. (ppm)
CERN I	1961	$\mu^+$	11 450 000(220000)	4300
CERN II	1962-1968	$\mu^+$	11 661 600(3100)	270
CERN III	1974-1976	$\mu^+$	11 659 100(110)	10
CERN III	1975-1976	$\mu^-$	11 659 360(120)	10
BNL	1997	$\mu^+$	11 659 251(150)	13
BNL	1998	$\mu^+$	11 659 191(59)	5
BNL	1999	$\mu^+$	11 659 202(15)	1.3
BNL	2000	$\mu^+$	11 659 204(9)	0.73
BNL	2001	$\mu^-$	11 659 214(9)	0.72
Average			11 659 208.0(6.3)	0.54

### Experimento Fermilab E989

El laboratorio del acelerador nacional Fermi del departamento de energía en Estados Unidos (chicago), ejecutan un nuevo experimento en fermilab en 2017 [45], con el fin de aclarar la diferencia de desviación estándar de 3,7 entre el modelo estándar y las mediciones de experimento Brookhaven (E821) [41]. El experimento fermilab reutiliza el

imán del anillo de almacenamiento y el inflector superconductor de E821, pero renueva el carro de resonancia magnético nuclear (RMN) y con un nuevo sistema de medición del campo magnético.

Las nuevas características que presenta el experimento fermilab son: 1) Se diseñó y se puso en marcha un haz de muones sin componente hadrónico, 2) también se diseñaron calorímetros segmentados que consta de una matriz de 6 x 9 de cristales de fluoruro de plomo, en la cual permitirá minimizar las partículas ionizantes de muones que se pierden en el anillo de almacenamiento, 3) nuevo lanzador de muones rápido que utiliza la red de formación de pulso de Blumlein, 4) Calce magnético mejorado que permite una mejor uniformidad del campo magnético en un factor de dos, 5) Una tasa más rápida de llenado del anillo de almacenamiento, con el fin de acumular 21 veces más datos que el experimento E821 y para mejorar los errores sistemático en una factor de tres [41].

El experimento Fermilab con muon g-2 podría tener grandes consecuencias para el campo de la física de partículas, como arrojar luz sobre la validez de partes del modelo estándar vigente de física de partículas [46].

Obtener mediciones con alta precisión en este experimento es crucial para producir resultados significativos. La principal cantidad es el factor g del muon, en la cual es una propiedad que caracteriza los atributos magnéticos y mecánicos cuánticos de la partícula. Si el valor medido experimentalmente difiere al valor esperado del modelo estándar, podría indicar la existencia de partículas desconocida, cuya presencia perturba el campo magnético [46].

### **Fase del experimento Fermilab en el anillo de almacenamiento**

El experimento comienza con una enfoque final por campos magnéticos antes de inyectar los muones de 3,1 GeV/c (ver figura 25).

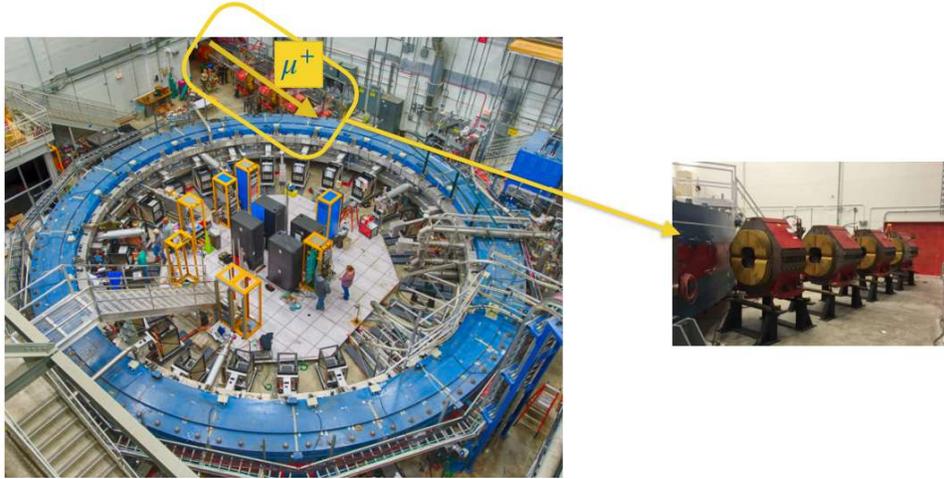


Figura 25: Enfoque final de muones en el salón experimental [43].

Luego se realiza la supervisión del haz inyectado (ver figura 26) mediante un contador T0, que consiste en un fino centelleador con dos lecturas de PMT, en la cual proporciona un perfil de tiempo de haz antes de que el haz entre en el anillo de almacenamiento [43]. Mediante un sistema de monitoreo de haz inflector (IBMS), en la cual se tiene dos planos de fibra de centelleo que permite la verificación de las características de la inyección del haz.

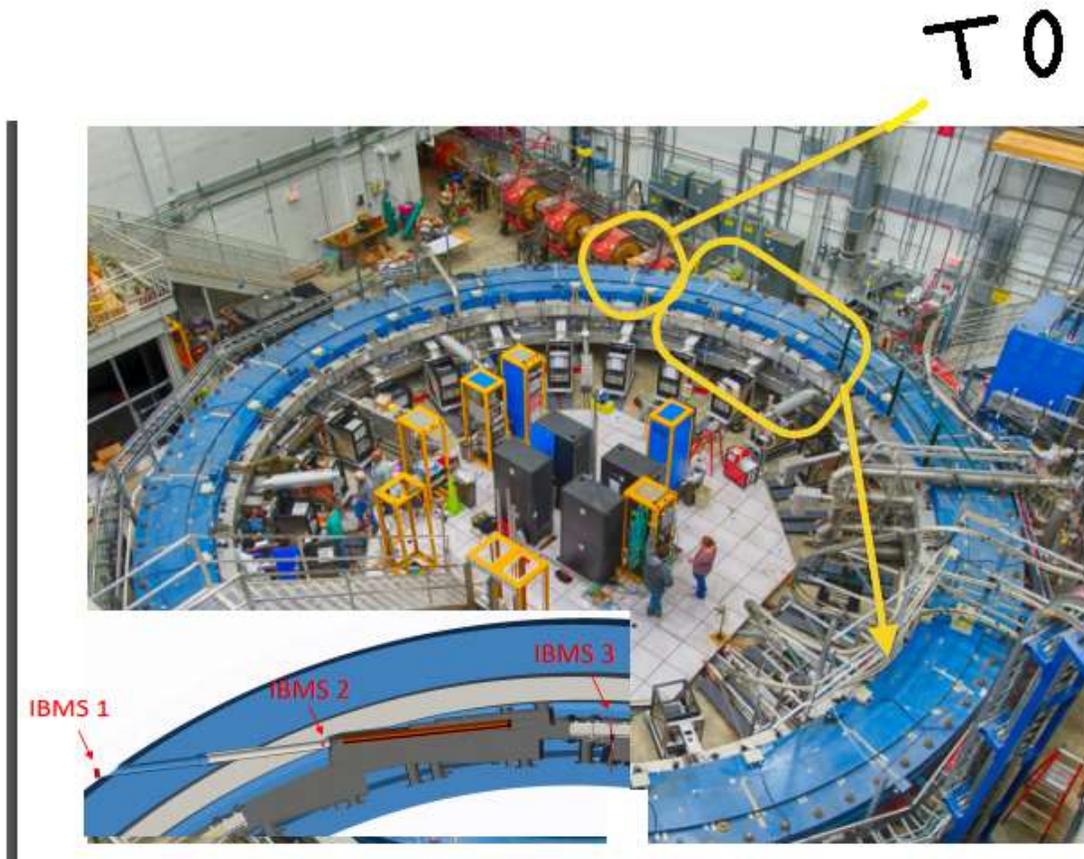


Figura 26: Supervisión del haz inyectado durante el experimento [43].

Una vez que supervisado el haz inyectado, se realiza el almacenamiento de los muones mediante un inflector (ver figura 27), en la cual ayuda al cancelar el campo magnético en el espacio del imán y deja que el haz entre en el anillo de almacenamiento sin desviarse [43].

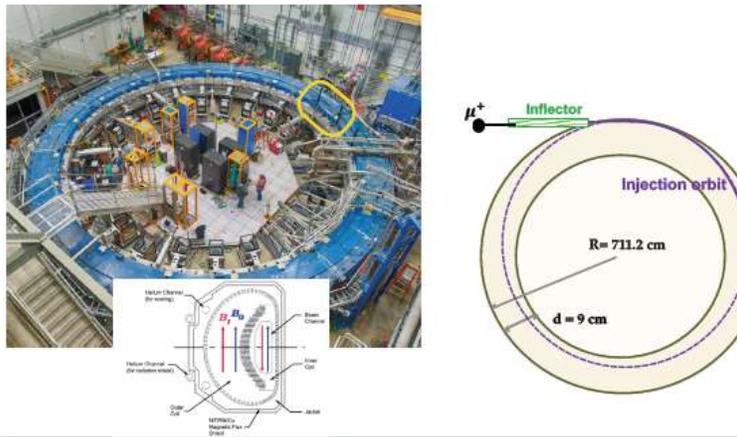


Figura 27: Almacenamiento del muon mediante un inflector [43].

Al pasar el muon por este inflector, la partícula pasa por un pateador magnético, que ayuda a dar un poco de impulso al muon y dirigirlo en una órbita ideal (ver figura 28).

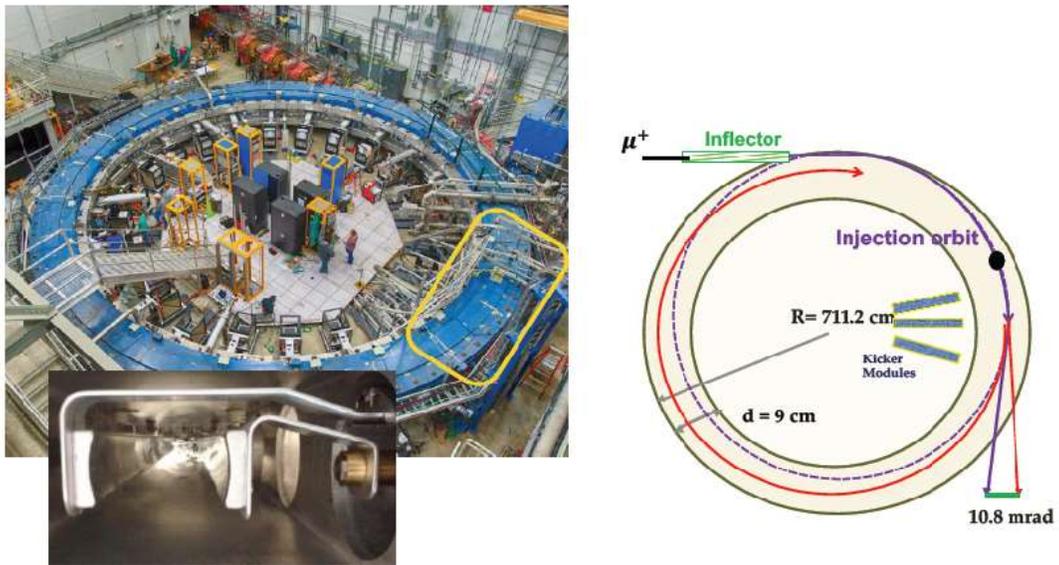


Figura 28: pateador magnético dirige el muon en órbita ideal [43].

## Componentes del experimento Fermilab en el anillo de almacenamiento

### RMN en el experimento Fermilab

Como se mencionó anteriormente con respecto a las nuevas mejoras del experimento fermilab, principalmente el carro de RMN (ver figura 29), este permite mapear la fuerza del campo magnético en todo el anillo con alta resolución y precisión para recopilar datos.



Figura 29: Sistema de carro ensamblado con ruedas, con carcasa cilíndrica de 50 cm de largo, incluyendo 17 sondas RMN [45].

La universidad de Heidelberg desarrollo este sistema de carro para el experimento de Brookhaven, en la cual para el experimento Fermilab renovaron el equipo y reemplazaron la electrónica. Las 378 sondas que estaban dentro del anillo en el experimento Brookhaven para monitorear las desviaciones del campo magnético, para el experimento fermilab se modificó a solo 17 sondas (ver figura 30) que miden periódicamente el campo magnético con alta resolución. Cada tres días, el carro de la vuelta al anillo en ambas direcciones, tomando alrededor de 9.000 mediciones por sonda y dirección [45].

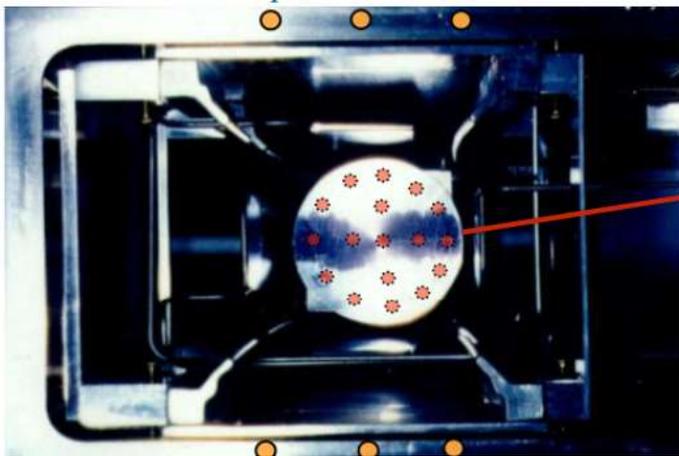


Figura 30: Estructura de la 17 sonda de resonancia magnética nuclear, encargada de monitorear el campo magnético [43].

### Cuadрупolos electrostáticos

Corresponde a otro componente que se almacena en el anillo de almacenamiento de muones (ver figura 31), en la cual, está compuesto por 4 juegos de cuadrantes, por otro lado, el campo del anillo de almacenamiento proporciona un enfoque horizontal y los cuadrupolos electrostáticos que cubren el 43% del anillo se utilizan para enfocar el haz de manera vertical [43].

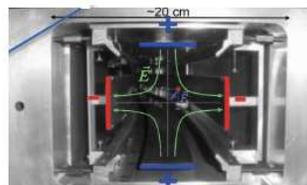


Figura 31: Juegos de cuatro cuadrupolos electrostático almacenado en

el interior del anillo de almacenamiento [43]

## Imán

El imán que se diseñó en el experimento Fermilab (ver figura 32), proporciona un campo magnético de 1,45 T de manera vertical y uniforme [43]. las características que presenta este imán son: contiene 12 yugos abiertos en el interior, en la cual permite que los positrones de desintegraciones lleguen a los detectores, también tiene 72 polos que están hechos de acero y de carbono, con el fin de minimizar la impureza, tiene 144 cuñas de borde que ayuda a minimizar el campo de sextupolo local al cambiar el grosor de la cuña, presenta 864 cuñas de acero, que ayuda hacer un ajuste de ángulo (compensación de componentes de cuadrupolo), también realiza un ajuste radial y por último el imán tiene una bobina de corrección de superficie, que ayuda a reducir la falta de uniformidad en momentos de campos más altos.[43].

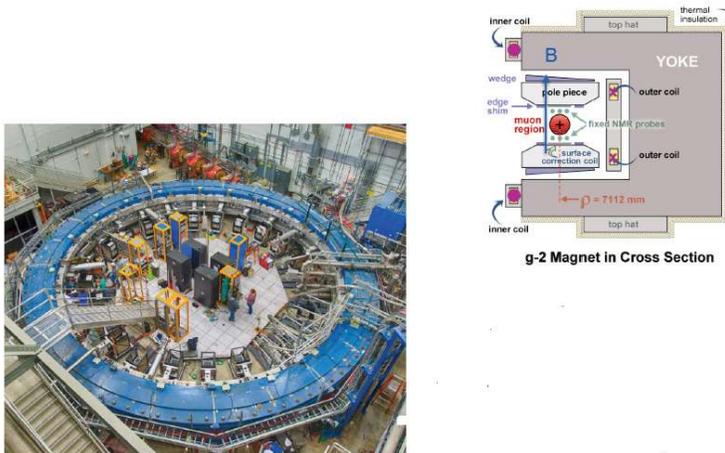


Figura 32: Diseño del imán en el anillo de almacenamiento del experimento E989 [43].

## Detectores: Rastreadores

Estos detectores se localizan en el anillo de almacenamiento (ver figura 33), con lo cual tiene 2 estaciones de rastreo, con 8 módulos por cada estación. Los rastreadores cumplen la función de reconstruir el perfil del

haz de muones a partir de las trayectorias de los positrones.

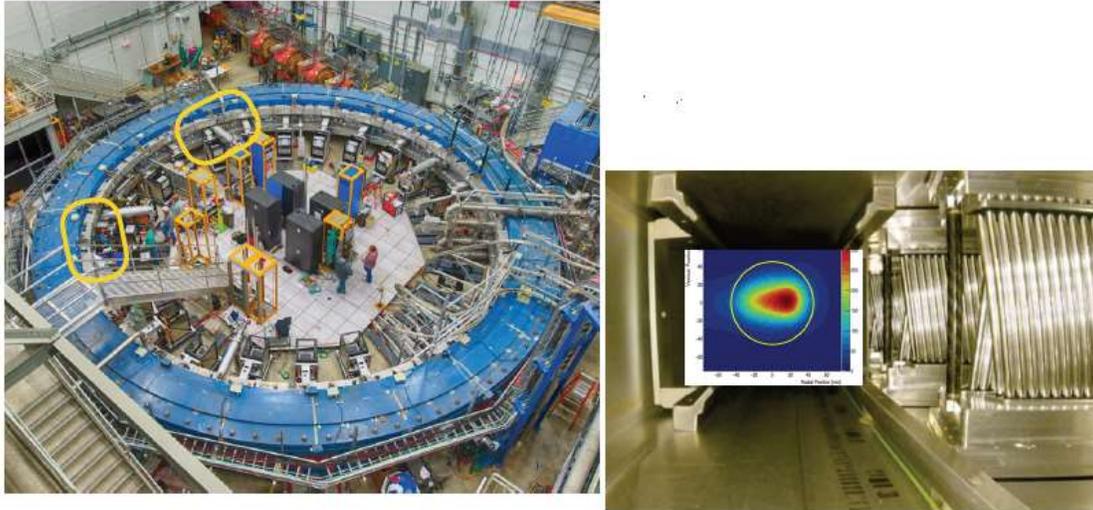


Figura 33: localización de los detectores de haz de muones [43].

### Calorímetros

Corresponde a unos detectores que están compuesto por 24 calorímetros (ver figura 34) de cristal, ubicados alrededor del anillo. La funcionalidad de este calorímetro es detectar la energía y el tiempo de llegada de la descomposición de los muones  $\mu^+ \rightarrow e^+ \bar{\nu}_\mu \nu_e$  [43].



Figura 34: Calorímetros en el anillo de almacenamiento de muones [43].

### **Resultados futuro del experimento Fermilab**

El sistema RMN de mapeo del campo magnético y su control de movimiento se han encargado con mucho éxito durante los tres periodos en la toma de datos experimentales en Fermilab [46]. Por otro lado los científicos han logrado una precisión sin precedentes para las mediciones de campo en el anillo del experimento muon g-2. En la actualidad, los científicos están analizando la primera ronda de datos de 2018 y esperan publicar los resultados para fines de 2020 [46].

## Capítulo XIV

### Clasificación de contribuciones, dependencia en masas, expansión en serie

Las predicciones teóricas precisa se requiere de un conocimiento preciso de los parámetros fundamentales. En QED estos son la constante de estructura fina  $\alpha$  y las masas de leptones. Como el resultado del primer orden es  $\frac{\alpha}{2\pi}$ , en la cual se quiere determinar  $a_\mu$  con una alta precisión, el parámetro básico más importante para calcular  $a_\mu$  es la constante de estructura fina [42]. Su valor más preciso se determina utilizando el momento magnético anómalo del electrón.

$$\alpha^{-1}(a_e) = 137.035999084(51)(0.37 \text{ ppb}) \quad [42].$$

Este nuevo valor tiene una incertidumbre de 20 veces menor que cualquier determinación independiente anterior de  $\alpha$  y se utilizará para todos los cálculos de  $a_\mu$ .

A partir de 2 bucles, las correcciones de orden superior incluyen contribuciones de bucles de leptones en los que se pueden circular diferentes tipos de leptones y los resultados dependen de las proporciones de masa correspondientes [42]. Por lo cual, se utilizará los siguientes alores para las relaciones de masa muon-electrón y muon-tau y las masas leptónicas.

$$\frac{m_\mu}{m_e} = 206.7682838(54), \frac{m_\mu}{m_\tau} = 0.0594592(97), m_e = 0.5109989918(44) \text{ MeV}, m_\mu = 105.6583692(94) \text{ MeV}, m_\tau = 1776.99(29) \text{ MeV} \quad [42]$$

En donde se puede observar que las contribuciones dependientes de las masa difieren para  $a_e, a_\mu, a_\tau$ , por lo que no existe una universalidad para los leptones  $a_e \neq a_\mu \neq a_\tau$ .

En este sentido de observar las relaciones existentes entre las masas se puede ver perjudicado, ya que los números obtenidos para trabajar con estos leptones en donde la unidad de MeV hace que este tenga valores más inciertos.

Las pruebas experimentales pudieron verificar QED hasta siete dígitos en la predicción, lo que requiere que se evalué la expansión de la perturbación de hasta 5 términos (5 loops) en donde el momento anómalo manifiesta contribuciones que son solo números expandidos en potencia de  $\alpha$ , lo que se obtendría en QED con solo una especie de leptón, y contribuciones que dependen de las proporciones de masa si el caso entran en juego diferentes tipos de leptones [42]. Teniendo en cuenta los tres tipos de leptones, se obtiene funciones de las proporciones de las masas leptónicas  $m_e, m_\mu$ , y  $m_\tau$  [42]. Considerando  $a_\mu$ , se puede convertir de la siguiente forma:

$$a_\mu^{\text{QED}} = A_1 + A_2(m_\mu/m_e) + A_2(m_\mu/m_\tau) + A_3(m_\mu/m_e, m_\mu/m_\tau). \quad [42]$$

Donde  $A_1$  es el término universal común para todos los leptones. También se incluye aquellos diagramas con bucles leptónicos cerrados que tienen la misma masa que el leptón externo [42].  $A_2$ , depende de una escala y se obtiene contribuciones de diagramas con bucles de fermión cerrados donde el fermión difiere del externo [42]. Las contribuciones comienzan en el nivel de dos bucles: para el muon como leptón externo se tiene dos posibilidades: un bucle de electrones adicional  $A_2\left(\frac{m_\mu}{m_e}\right)$  o un  $\tau$ -loop adicional  $A_2\left(\frac{m_\mu}{m_\tau}\right)$ , siendo así, ambas

contribuciones de carácter bastante diferente. El primero produce grandes logaritmos  $\propto \ln(m_\mu/m_e)^2$ , y en consecuencias produce grandes efectos [42]. En la segunda contribución, debido al desacoplamiento de partículas pesadas en teorías de tipo QED, produce solo pequeños efectos de orden  $\propto (m_\mu/m_\tau)^2$ . La contribución de dos escalas requiere una luz, así como un bucle extra pesado y, por lo tanto, comienza en el orden de tres bucles.

Cada uno de los términos se da en la teoría de perturbación renormalizada mediante una expansión apropiado en:

$$\begin{aligned}
 A_1 &= A_1^{(2)} \left(\frac{\alpha}{\pi}\right) + A_1^{(4)} \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^2 + A_1^{(6)} \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^3 + A_1^{(8)} \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^4 + A_1^{(10)} \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^5 + \dots \\
 A_2 &= A_2^{(4)} \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^2 + A_2^{(6)} \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^3 + A_2^{(8)} \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^4 + A_2^{(10)} \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^5 + \dots \\
 A_3 &= A_3^{(6)} \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^3 + A_3^{(8)} \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^4 + A_3^{(10)} \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^5 + \dots
 \end{aligned}$$

## Contribuciones universales

La contribución del orden principal de la figura 35 se puede escribir de la siguiente forma:

$$a_1^{(2)\text{QED}} = \frac{\alpha}{\pi} \int_0^1 dx (1-x) = \frac{\alpha}{\pi} \frac{1}{2} \quad [42]$$

En la cual es trivial de evaluar. Este es el famoso resultado de Schwinger de 1948 [42].

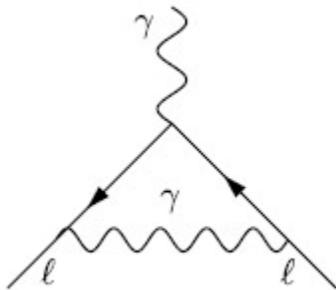


Figura 35: La contribución universal QED de orden más bajo de  $a_\ell$  [42].

En dos bucles en QED están los nueve diagramas que se muestran en la figura 36 que contribuyen  $a_\mu$ . Los primeros seis diagrama se unen dos fotones virtuales a la cadena de líneas de muones externos, en la cual contribuyen al termino universal.

La parte universal, completa el coeficiente  $A_1^{(4)}$ , calculado primero por Petermann y por Sommerfield en 1957

$$A_{1u}^{(4)} = \frac{197}{144} + \frac{\pi^2}{12} - \frac{\pi^2}{2} \ln 2 + \frac{3}{4} \zeta(3) = -0.32847896557919378 \dots$$

[42].

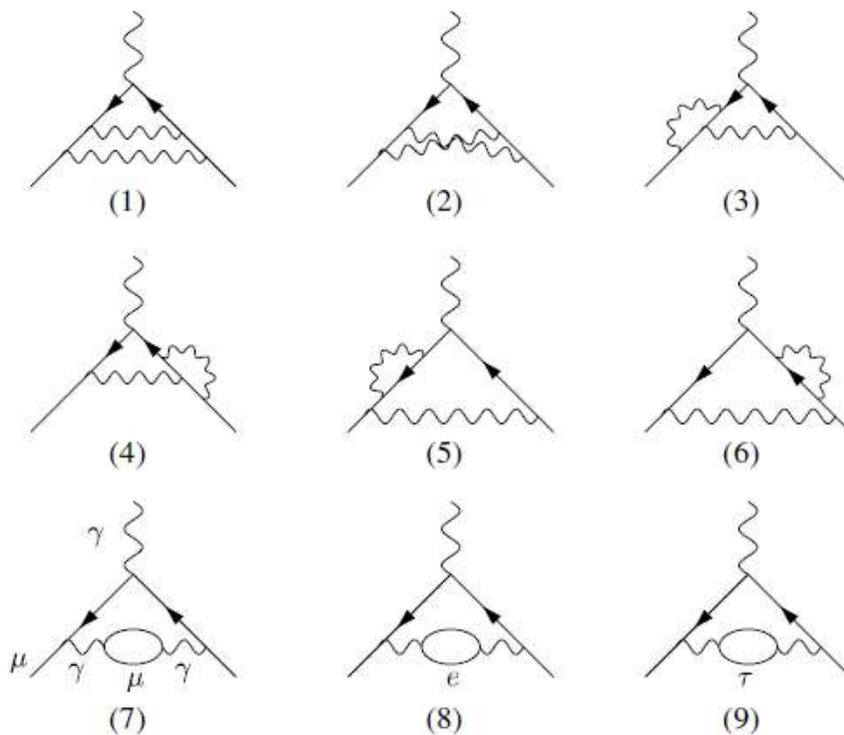


Figura 36: Los diagramas (1-7) representan la contribución universal de segundo orden  $a_\mu$ , el diagrama (8) produce las correcciones dependientes de masa ligeras y el diagrama (9) produce las correcciones dependientes de masa pesadas [42].

En tres bucles en QED están los 72 diagramas que se muestran en la figura 37 que contribuyen a  $g-2$  del muon [42]. En bucles de

fermiones cerrados, cualquiera de los fermiones del modelo estándar puede circular. El subconjunto invariante de calibre de 72 diagramas donde todos los bucles de fermiones cerrados son bucles muon, que produce la contribución QED universal de un sabor  $A_{1uni}^{(6)}$ . Este conjunto ha sido calculado analíticamente por Remiddi y sus colaboradores. El resultado fue sorprendentemente compacto y se lee de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 A_{1uni}^{(6)} = & \frac{28259}{5184} + \frac{17101}{810} \pi^2 - \frac{298}{9} \pi^2 \ln 2 + \frac{139}{18} \zeta(3) \\
 & + \frac{100}{3} \left\{ Li_4 \left( \frac{1}{2} \right) + \frac{1}{24} \ln^4 2 - \frac{1}{24} \pi^2 \ln^2 2 \right\} - \frac{239}{2160} \pi^4 \\
 & + \frac{83}{72} \pi^2 \zeta(3) - \frac{215}{24} \xi(5) = 1.18124145658 \dots
 \end{aligned}$$

[Ver ref. 42]

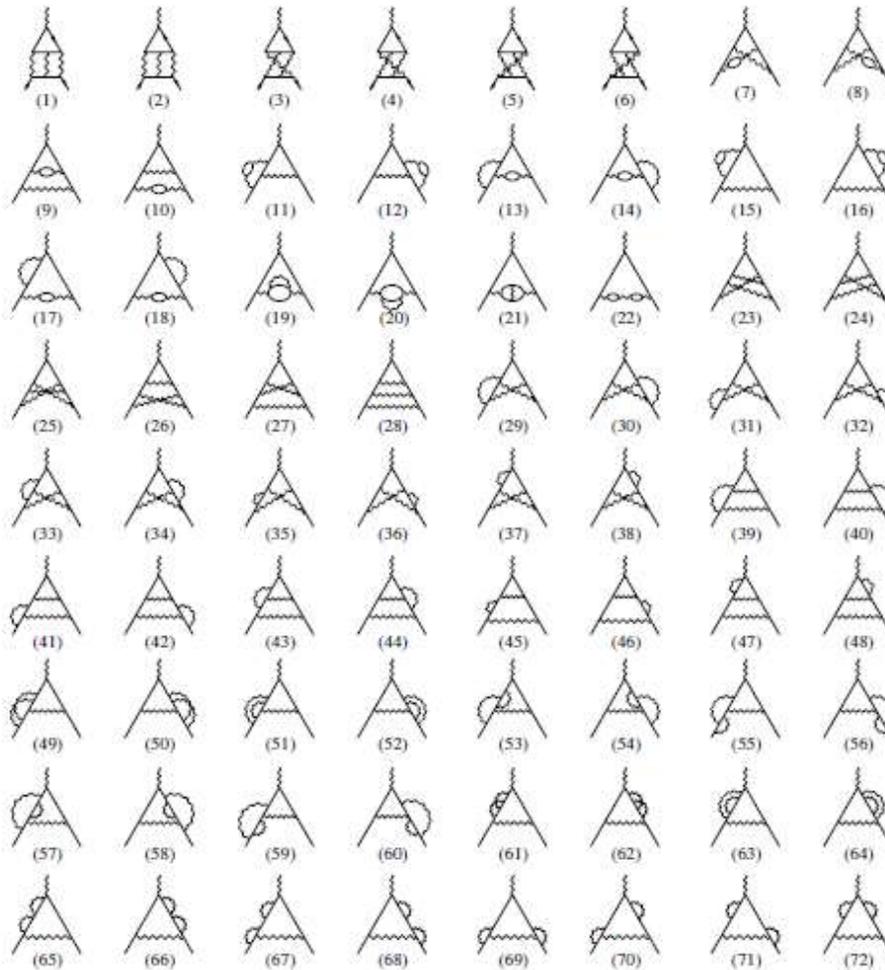


Figura 37: La contribución universal de tercer orden de  $a_\mu$ . Todos los bucles de fermiones aquí son bucles de muones. Los diagramas del (1) a (6) son diagramas de dispersión de luz por luz, en cambio los del (7) a (22) incluyen inserciones de polarización al vacío de fotones.

En cuatro bucles hay 891 diagramas, en la cual 373 tienen bucles de leptones cerrados, tal como se muestra en la figura 38. También 518 diagramas sin bucles de fermión = grupo V de conjunto invariante de calibre (ver figura 39), con líneas de fermiones comunes [42]. Su contribución ha sido calculada por métodos numéricos por Kinoshita y colaboradores [42]. Como resultado del

duradero esfuerzo heroico, Aoyama, Hayakawa, Kinoshita obtuvieron una respuesta mejorada de:

$$A_1^{(8)} = -1.9144(35) \quad [42]$$

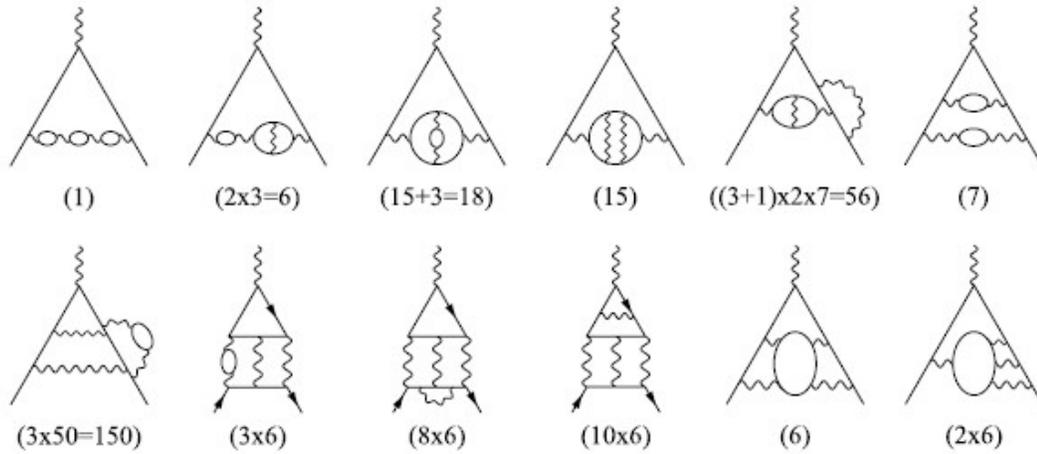


Figura 38: Algunas contribuciones típicas de ocho órdenes de  $a_l$ , que involucran bucles leptónicos. Entre paréntesis, el número de diagramas de un tipo determinado si solo se consideran bucles de muones. Estos últimos contribuyen a la parte universal [42].

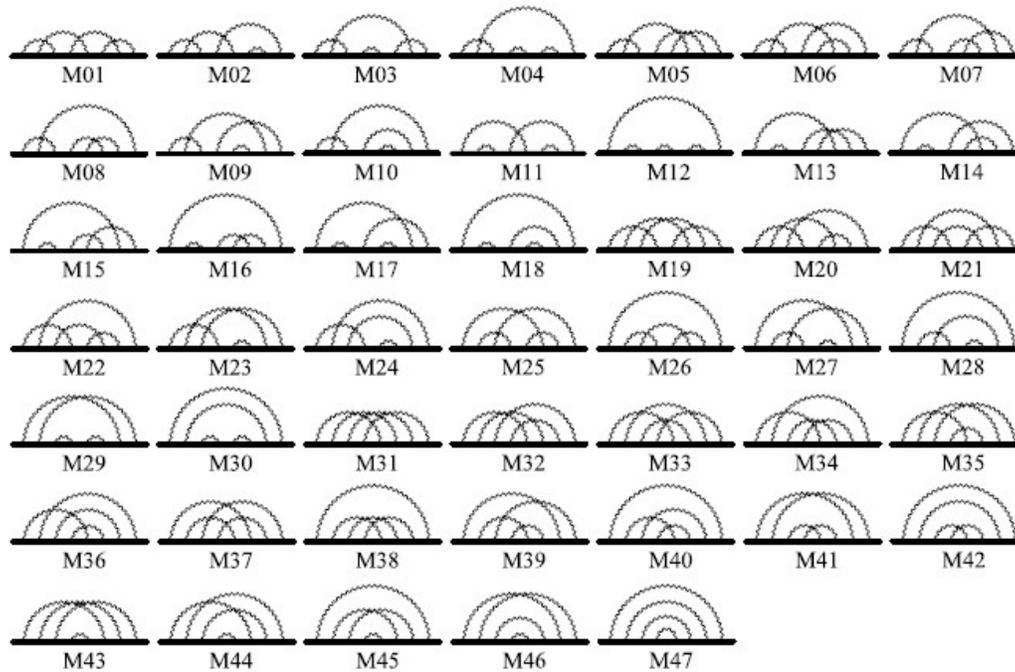


Figura 39: diagramas del grupo V de 4 lazos. 47 diagramas similares a energía de M01-M47 representan 518 diagramas de vértices (insertando el vértice del fotón externo en las líneas de muones virtuales de todas las formas posibles) [42].

Se encontró un error en la cancelación de términos singulares IR al calcular los diagramas M18 (-0,2207 (210)) y M16 (+0,0274 (235)) en el conjunto de diagramas de la figura n [42]. La contribución es considerable alrededor de  $6 \sigma$  con la precisión experimental actual, y un conocimiento preciso de este término es absolutamente crucial para la comparación entre teoría y experimento [42].

La contribución universal de QED de 5 bucles aún se desconoce, en la cual corresponde de la siguiente forma:

$$A_1^{(10)} = 0.0(4.6) \quad [42].$$

Para la parte universal, como una estimación de los términos de orden superior que faltan. Como resultado, la contribución QED universal puede escribirse como:

$$\begin{aligned}
 a_l^{uni} &= 0.5 \left(\frac{\alpha}{\pi}\right) - 0.32847896557919378 \dots \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^2 \\
 &+ 1.181241456587 \dots \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^3 - 1.9144(35) \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^4 \\
 &+ 0.0 (4.6) \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^5 \\
 &= 0.00115965217630(43)(10)(31) \dots \quad [42]
 \end{aligned}$$

El valor numérico se da para  $\alpha$ , debido a que este valor se utilizará para el cálculo de  $a_\mu$ . Los tres errores dados son: el error de la incertidumbre en  $\alpha$ , la incertidumbre numérica del coeficiente  $\alpha^4$  y error estimado para los términos de orden superior que faltan. [42].

El momento magnético anómalo de un leptón es un efecto de aproximadamente de 0,12 %,  $\frac{g_l}{2} \sim 1.00116$ . Es notable que a pesar de que este observable es tan pequeño, conocemos  $a_e$  y  $a_\mu$  con mayor precisión que la mayoría de los demás observable de precisión. Por lo cual el primer término  $a_l^{(2)} \sim 0.00116141$ , aporta los primeros tres dígitos significativos del resultado completo. [42].

## El momento anómalo de los electrones y la constante de la estructura fina

Los términos universales determinan esencialmente el momento magnético anómalo del electrón ( $a_e$ ), por ende, permiten una determinación precisa de la constante de estructura fina a partir del valor medido experimentalmente en  $a_e$ , invirtiendo la serie en  $\alpha$ . Esto se debe al hecho de que los efectos de los leptones pesados (muon, tau) en QED, de los hadrones, el sector electrodébil y la posible nueva física se desacoplan como  $(m_e/M)^2$ , donde M es una masa de leptones pesados o un hadrónico.

El momento magnético anómalo del electrón es probablemente la cantidad conocida experimentalmente con mayor precisión. Recientemente, ha estado disponible un nuevo resultado sustancialmente mejorado para  $a_e$ . El resultado fue obtenido por Gabrielse et al, en un experimento en la universidad de Harvard usando un ciclotrón cuántico de un electrón [42]. Los nuevos resultados del 2006 y 2008 son:

$$a_e^{\text{exp}} = 1.15965218085(76) \times 10^{-3} \text{ (.66 ppb)} \quad [42]$$

$$a_e^{\text{exp}} = 1.15965218073(28) \times 10^{-3} \text{ (.024 ppb)} \quad [42]$$

El resultado que muestra a continuación tiene una precisión de 15 veces mejor que el resultado anterior

$$a_e^{\text{exp}} = 1.1596521883(42) \times 10^{-3} \text{ (3.62 ppb)} \quad [42]$$

Las mediciones de  $a_e$  no solo juegan un papel fundamental en la historia de las pruebas de precisión de QED en particular, y de los conceptos de QFT en general, hoy podemos utilizar el momento magnético anómalo del electrón para obtener la medición indirecta más precisa de la constante de estructura fina  $\alpha$  [42]. Esta posibilidad depende de la capacidad de precisar la predicción teórica con una alta

precisión. Cabe destacar que  $a_e$  es mucho más seguro de predecir de forma fiable que  $a_\mu$  [42]. La razón es que los efectos hadrónico no perturbadores, así como la sensibilidad a la física desconocida más allá del modelo estándar, son suprimidos por el gran factor  $\frac{m_\mu^2}{m_e^2} \sim 42753$  en comparación con  $a_\mu$  [42]. El resultado de 5 bucles faltantes representan la mayor incertidumbre en la predicción de  $a_e$ ,

Lo que alta son las contribuciones hadrónicas y débiles, en la cual son suprimidas por el factor  $(m_e/m_\mu)^2$  relativo  $a_\mu$  [42]. Para  $a_e$  es bastante pequeño:  $a_e^{had} = 1.676(18) \times 10^{-12}$  y  $a_e^{weak} = 0.039 \times 10^{-1}$  respectivamente [42].

La contribución hadrónica ahora comienza ser significativa, sin embargo a diferencia de  $a_\mu^{had}$  para el muon,  $a_e^{had}$  se conoce con suficiente precisión y no es un factor limitante. El error de la teoría está dominado por el término QED de 5 bucles que falta [42]. Por lo tanto  $a_e$ , su nivel de precisión esta teóricamente bajo control, siendo así un excelente observable para extraer  $\alpha$  según la predicción del modelo estándar [42].

El resultado con la muy reciente medición extremadamente precisa del momento magnético anómalo del electrón es:

$$\alpha^{-1}(a_e) = 137.035999084(33)(12)(37)(2) \quad [42].$$

El primer error es el experimental de  $a_e^{exp}$ , el segundo y el tercero son las incertidumbres numéricas de los términos  $\alpha^4$  y  $\alpha^5$  respectivamente [42]. El último es la incertidumbre hadrónica, que es completamente insignificante la reciente corrección del coeficiente  $O(\alpha^4)$  de  $-1.7283(35)$  a  $-1.9144(35)$  conduce a un  $7\sigma$  [42]. Esta es la determinación más precisa de  $\alpha$ , en la cual se utilizara para calcular  $a_\mu$ .

## Contribuciones dependientes de masas

Los fermiones que ya se conocen del modelo estándar, solo interactúan a través de fotones u otros bosones de calibre de un giro, las correcciones dependientes de la masa al principio aparecen en el nivel de 2 bucles a través de los efectos de polarización de vacío de fotones. En 3 bucles aparecen bucles de dispersión de luz a luz [42]. Como todos los fermiones tienen masas diferentes, los bucles de fermiones dan lugar a efectos dependientes de la masa.

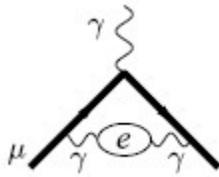
Los principales efectos dependientes de la masa provienen de la polarización al vacío de los fotones, que conduce al filtrado de carga [42].

### Inserciones de polarización de vacío de 2 bucles

La contribución no universal dependiente de la masa principal se debe a los dos últimos diagramas de la figura 36. El coeficiente ahora es una función de la masa  $m_l$  del leptón que forma el circuito cerrado. Para calcular realmente las contribuciones de VP, se necesita la polarización de vacío de fotones de 1 bucles, en la cual está dado por

$$\begin{aligned} \Pi'_{\gamma ren}(q^2) &= -\frac{\alpha}{\pi} \int_0^1 dz 2z(1-z) \ln(1-z(1-z)q^2/m_l^2) \\ &= \frac{\alpha}{\pi} \int_0^1 dt t^2 \left(1 - t^{\frac{2}{3}}\right) \frac{1}{\frac{4m_l^2}{q^2} - (1-t^2)} \end{aligned} \quad [42]$$

Ahora si bien, las masas internas ligeras dan lugar a logaritmos potencialmente grandes de relaciones de masa que se vuelven singulares en el límite  $m_{light} \rightarrow 0$  [42].



$$a_{\mu}^{(4)}(\text{vap}, e) = \left[ \frac{1}{3} \ln \frac{m_{\mu}}{m_e} - \frac{25}{36} + O\left(\frac{m_e}{m_{\mu}}\right) \right] \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^2.$$

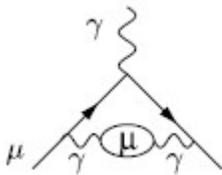
[42]

Aquí se tiene un resultado típico para un campo de luz que produce un gran logaritmo  $\ln \frac{m_{\mu}}{m_e} \sim 5.3$ , de modo que el primer término  $\sim 2.095$ , es grande en relación con un segundo término constante típico  $-0.6944$  [42]. Por lo tanto, el resultado exacto de 2 bucles es

$$a_{\mu}^{(4)}(\text{vap}, e) \sim 1.0942583111(84) \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^2 = 5.90406007(5) \times 10^{-6} \quad [42].$$

El error se debe principalmente a la incertidumbre en la relación de masa  $\left(\frac{m_e}{m_{\mu}}\right)$  [42].

El caso de masa interna igual, que da el número puro



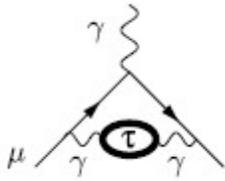
$$a_{\mu}^{(4)}(\text{vap}, \mu) = \left[ \frac{119}{36} - \frac{\pi^2}{3} \right] \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^2,$$

[42]

El resultado es típico para este tipo de cálculo de corrección radiativa: un término racional de tamaño 3.3055... y un término transcendental  $\pi^2$  de magnitud muy similar 3.2899.... pero de signo opuesto se cancelan en gran medida [42]. El resultado es solo el 0,5 % de los términos individuales:

$$a_{\mu}^{(4)}(\text{vap}, \mu) \sim 0.0156874219 \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^2 = 8.46413320 \times 10^{-8} \quad [42].$$

Las masas internas pesadas se desacoplan en el límite  $m_{heavy} \rightarrow \infty$  y, por lo tanto, solo producen pequeñas correcciones de potencia.



$$a_{\mu}^{(4)}(\text{vap}, \tau) = \left[ \frac{1}{45} \left( \frac{m_{\mu}}{m_{\tau}} \right)^2 + O \left( \frac{m_{\mu}^4}{m_{\tau}^4} \ln \frac{m_{\tau}}{m_{\mu}} \right) \right] \left( \frac{\alpha}{\pi} \right)^2 .$$

[42]

Aquí se tiene una contribución típica de física pesada, de un estado de masa  $M \gg m_{\mu}$ , dando un término proporcional a  $m_{\mu}^2/M^2$ . Esto significa que además del orden en  $\alpha$  hay un factor de supresión adicional, e.g.  $O(\alpha^2) \rightarrow Q \left( \alpha^2 \frac{m_{\mu}^2}{M^2} \right)$  [42]. Revelar nuevos estados pesados se requiere de una alta precisión correspondiente en la teoría y en la experimentación. Para  $\tau$ , la contribución es relativamente pequeña.

$$a_{\mu}^{(4)}(\text{vap}, \tau) \sim 0.000078064(25) \left( \frac{\alpha}{\pi} \right)^2 = 4.2120(13) \times 10^{-1} \quad [42].$$

### 3 bucles: inserciones de dispersión luz a luz y polarización al vacío.

En tres bucles, además de las correcciones de polarización de vacío de fotones, aparece un nuevo tipo de contribución que exhibe las llamadas inserciones de dispersión de luz a luz (LbL): bucles de fermión cerrados con cuatro fotones unidos [42]. Se debe tener en cuenta que el proceso  $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$  de la dispersión de luz a luz involucra fotones reales en el caparazón. Hay 6 diagramas que siguen al primero de la figura 40, por permutación de los vértices de los fotones en la línea de muones externos, más los obtenidos invirtiendo la dirección del bucle del fermión [42]. Cabe destacar, que los bucles de fermiones cerrados con tres fotones desaparecen por el teorema de Furry.

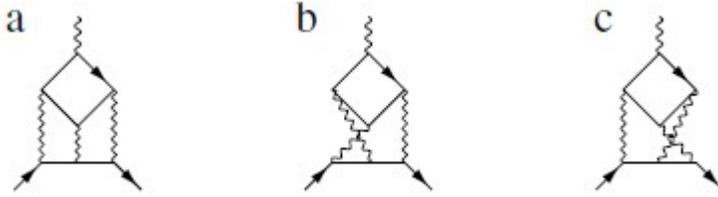


Figura 40: inserciones de dispersión luz a luz en el vértice electromagnético [42].

Las masas internas ligeras también para este caso dan lugar a logaritmos potencialmente grandes de relaciones de masa que se vuelven singulares en el límite  $m_{light} \rightarrow 0$  [42].

$$a_{\mu}^{(6)}(lbl, e) = \left[ \frac{2}{3} \pi^2 \ln \frac{m_{\mu}}{m_e} + \frac{59}{270} \pi^4 - 3 \zeta(3) - \frac{10}{3} \pi^2 + \frac{2}{3} + O\left(\frac{m_e}{m_{\mu}} \ln \frac{m_{\mu}}{m_e}\right) \right] \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^3. \quad [42]$$

Esto nuevamente es un bucle de luz que produce una contribución inesperadamente grande

$$a_{\mu}^{(6)}(lbl, e) \sim 20.94792489(16) \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^3 = 2.62535102(2) \times 10^{-7} \quad [42].$$

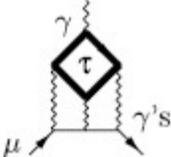
El caso de masas internas iguales, que produce un número puro y que ya está incluido en la parte universal.

$$a_{\mu}^{(6)}(lbl, \mu) = \left[ \frac{5}{6} \zeta(5) - \frac{5}{18} \pi^2 \zeta(3) - \frac{41}{540} \pi^4 - \frac{2}{3} \pi^2 \ln^2 2 + \frac{2}{3} \ln^4 2 + 16a_4 - \frac{4}{3} \zeta(3) - 24\pi^2 \ln 2 + \frac{931}{54} \pi^2 + \frac{5}{9} \right] \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^3, \quad [42].$$

La contribución QED de escala única es mucho menor

$$a_{\mu}^{(6)}(lbl, \mu) \sim 0.371005293 \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^3 = 4.64971652 \times 10^{-9} \quad [42].$$

Las masas internas pesadas se desacoplan nuevamente en el límite  $m_{heavy} \rightarrow \infty$  y, por lo tanto, solo producen pequeñas correcciones de potencia.



A Feynman diagram showing a muon line entering from the left and exiting to the right. A tau lepton loop is attached to the muon line. A photon line (γ) is emitted from the top of the tau loop. Two photon lines (γ's) are emitted from the muon line.

$$a_{\mu}^{(6)}(lbl, \tau) = \left[ \left[ \frac{3}{2} \zeta(3) - \frac{19}{16} \right] \left( \frac{m_{\mu}}{m_{\tau}} \right)^2 + O \left( \frac{m_{\mu}^4}{m_{\tau}^4} \ln^2 \frac{m_{\tau}}{m_{\mu}} \right) \right] \left( \frac{\alpha}{\pi} \right)^3.$$

[42]

Numéricamente se obtiene

$$a_{\mu}^{(6)}(lbl, \tau) \sim 0.00214283(69) \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^3 = 2.68556(86) \times 10^{-11} \quad [42].$$

#### 4 bucles. Inserciones de leptones ligeros

En 4 bucles, los electrones internos de luz, incluidos en  $A_2^{(8)} \left(\frac{m_{\mu}}{m_e}\right)$ , dan contribuciones mucho más grandes. Aquí contribuyen 469 diagramas que pueden dividirse en grupos invariante de calibre ( $g - i$ ): Grupo I, 49 diagramas obtenidos del vértice del muon de 1 bucle insertando subdiagramas VP de leptones de 1,2 y 3 bucles, es decir, la línea de fotones de la figura 8 se reemplaza por el propagador completo en tres bucles [42]. El grupo se subdivide en cuatro subclases  $g - i$ , I(a), I (b), I(c) e I (d), tal como se ilustra en la figura 41.

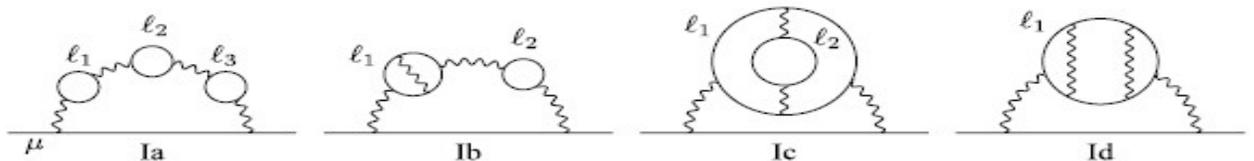


Figura 41. Diagramas típicos de los subgrupos Ia (7 diagramas, Ib (18 diagramas), Ic (9 diagramas e Id (15 diagramas). Las líneas de leptones representan fermiones que se propagan en un campo magnético externo [42].

Los resultados para este grupo se han obtenido mediante métodos numéricos y analíticos

$$A_{2I}^{(8)} = 16.720359(20) \quad [42].$$

Grupo II: 90 diagramas generados a partir del vértice del muon de 2 bucles insertando subdiagramas VP de leptones de 1 bucle y/o 2 bucles, tal como se muestra en la figura 42.

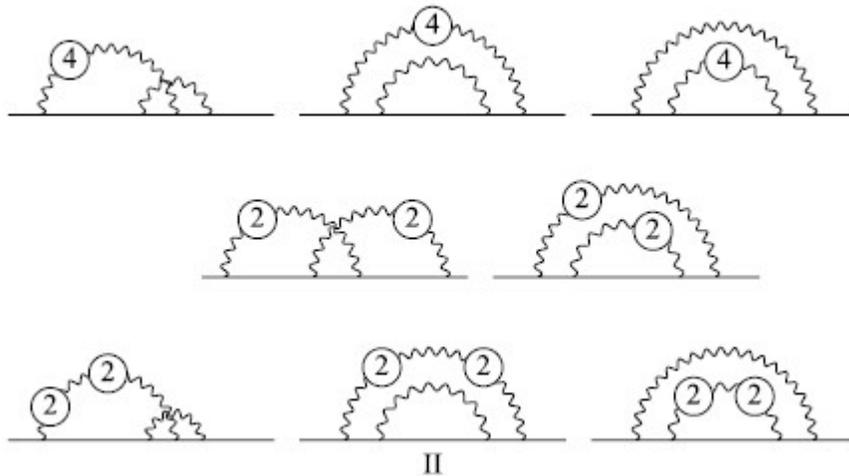


Figura 42. Diagramas típicos del grupo II (90 diagramas). Las líneas de leptones como en la figura 41. 2 y 4, respectivamente, indican el segundo (subdiagramas de 1 bucle) u el 4 (subdiagramas de 2 bucles) [42].

Los resultados para este grupo se han obtenido mediante métodos numéricos y analíticos, tal como en el grupo I.

$$A_{2II}^{(8)} = -16.674591 (68) \quad [42].$$

Grupo III: 150 diagramas generados a partir del vértice de muones de 3 bucles de la figura 10, insertando un subdiagramas VP de electrones de 1 bucle en cada línea de fotones internos de todas las formas posibles [42]. En la figura 43 se muestran algunos ejemplos de diagramas de este grupo.

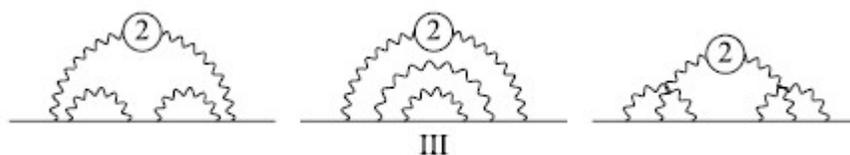


Figura 43. Diagramas típicos del grupo III (150 diagramas) [42].

El resultado encontrado dice

$$A_{2III}^{(8)} = 10.79343(414) \quad [42].$$

Grupo IV: 180 diagramas con vértice muon que contienen subgrafos LbL decorados con correcciones radiativa adicionales [42]. Este grupo se subdivide como se muestra en la figura 44 en  $g - i$ , subconjunto IV(a), IV (b), IV(c) y IV (d)

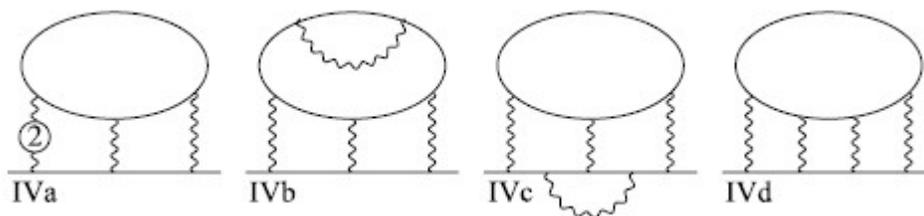


Figura 44. Diagramas típicos de los subgrupos IV(a) (54 diagramas), IV (b) (60 diagramas), IV(c) (48 diagramas) y IV (d) (18 diagramas) [42].

Los resultados se han evaluado por dos métodos independientes, en la cual se lee de la siguiente forma

$$A_{2IV}^{(8)} = 121.8431(59) \quad [42].$$

La suma de los resultados de los diferentes grupos se lee

$$A_2^{(8)} = \left(\frac{m_\mu}{m_e}\right) = 132.6823(72) \quad [42].$$

### 5 bucles y resumen de contribuciones QED

En cinco bucles, las inserciones de bucles de electrones son las contribuciones principales (ver figura 45). Aquí el número de diagramas es 9080, un número muy desalentador, como cometa Kinoshita [42]. Esta contribución se evaluó originalmente utilizando argumentos de grupo de renormalización (RG). La nueva estimación de Kinoshita y Nio es

$$A_2^{(10)} = \left(\frac{m_\mu}{m_e}\right) = 663(20) \quad [42].$$

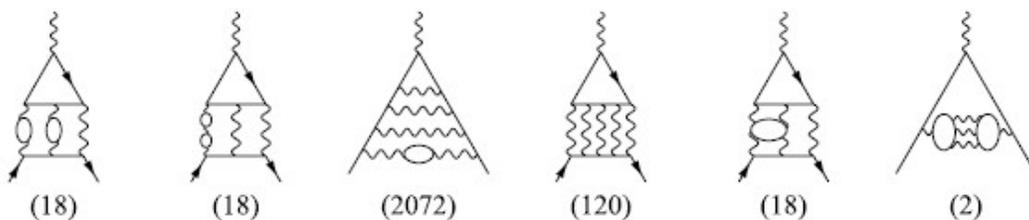


Figura 45. Contribuciones típicas de décimo orden  $a_l$  incluyendo bucles de fermión. Entre paréntesis el número de diagramas del tipo dado [42].

Un cálculo muy reciente de la clase de contribuciones principales de decimo orden (diagramas de inserción VP singlete (SI) que incluye el último diagrama de la figura 45 con dos bucles LbL de electrones) produce  $A_2^{(10)} = \left(\frac{m_\mu}{m_e}\right) = -1.26344(14)$  [42].

En la siguiente tabla se puede apreciar las contribuciones de QED para  $a_\mu$ .

Tabla X: Contribuciones de QED en  $a_\mu$  [42].

	$C_i$		$a_\mu^{(2)QED} \times 10^{11}$
$C_1$	0.5	$a^{(2)}$	116140973.289(43)
$C_2$	0.765 857 410 (27)	$a^{(4)}$	413217.620(14)
$C_3$	24.050 509 64 (46)	$a^{(6)}$	30141.902(1)
$C_4$	130.8105(85)	$a^{(8)}$	380.807(25)
$C_5$	663.0(20.0)(4.6)	$a^{(10)}$	4.483(135)(31)

Lo que se mide en un experimento incluye efectos del mundo real, por lo que se deben incluir todas las contribuciones de las partículas e interacciones conocidas de manera de que se obtenga una desviación entre la teoría y el experimento, permitiendo así obtener una pista de la física aún desconocida.

## Capítulo XV

### Conteos de Diagramas de Feynman

Una vez conociendo que, para predecir el AMM del muón, se puede realizar mediante serie de Taylor, como se explicó en el capítulo anterior, es momento de visualizar las interacciones por medio de Diagramas de Feynman.

Los diagramas de Feynman corresponden a una forma visual de entender las interacciones entre aquellas partículas como los leptones, muones, tauones con los fotones y se pueden representar en la forma de árbol, como de forma de bucles (Figura 46).

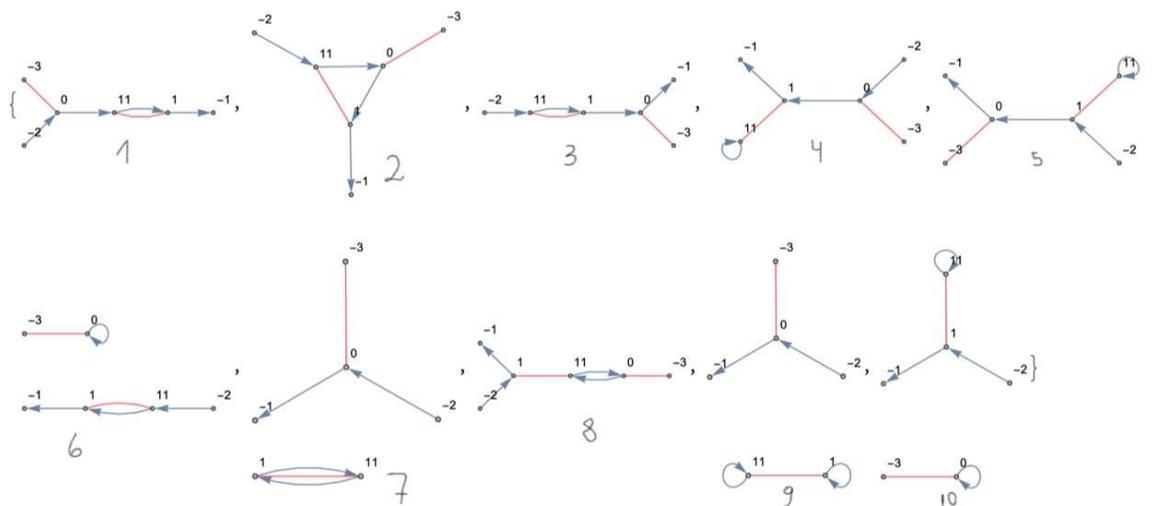


Figura 46: Diagramas de Feynman generados por medio de Software Mathematica

Cada diagrama de Feynman comienza desde una forma general, que sólo presenta interacciones entre leptones y fotones, y sigue el patrón de un máximo de interacción de 3 puntos. Con dichas interacciones, es posible crear hasta 5 diagramas, mientras que, si nos adentramos a interacciones con 5 puntos en común, es posible esquematizar alrededor de 11 diagramas.

Como cada interacción, se rige bajo la forma

$$A_n = A_n^{(2)} \left(\frac{\alpha}{\pi}\right) + A_n^{(4)} \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^2 + A_n^{(6)} \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^3 + \dots$$

a mayor interacción interna, mayor será las probabilidades de conteos de diagramas [cita]. Varias clases de diagramas no requieren de un cálculo, porque

según los métodos de la teoría de campos cuánticos ya se consideran automáticamente y, por lo tanto, pueden descartarse en cada orden de expansión.

## **Tipos de diagramas**

Dentro de los diagramas de Feynman, es posible encontrar una variedad de esquemas, los que dependerán netamente de las interacciones que presenten cada partícula [42]. Para adentrarnos en esta temática, se explicarán los diversos tipos de diagramas, tema que más adelante, se tocará con más detalle en su representación.

### **I. Conexos**

Cada vértice está conectado a través de líneas internas y otros vértices entre sí. En este caso, la suma de las energías, impulsos y cargas de partículas entrantes es igual a la suma de las energías, impulsos y cargas de partículas salientes.

### **II. Irreducibles**

Si cuando se corta por cualquier punto en el diagrama, se genera siempre dos gráficos inconexos, se dice que es un diagrama irreducible.

### **III. Amputados**

Son aquellos tipos de diagramas, que se pueden “cortar” las extremidades y formar diversos tipos de diagramas.

### **IV. Auto energía**

Un grafo con un lazo, líneas exteriores y sólo dos vértices se denominan posterior

a la amputación, diagramas de auto energía. Su valor solo depende de la energía y el momento que fluye a la otra, además del giro por las líneas externas y un vértice.

## V. Bucles

Además de aquellos diagramas con estructura de árbol, como los observados más arriba, existen aquellos diagramas que experimentan bucles internos, principalmente ocasionados por los fermiones.

### Ideas de código

Al comprender los diferentes tipos de Diagramas de Feynman y observando que, dependiendo del tipo de interacción que presentan sus partículas, es posible encontrar diagramas con un bucle interno, amputado, Furry, etc., y que, manualmente pueden ser expresados (Figura 47), sabemos que es tedioso si se procede a dibujar todos los diagramas, categorizarlos y descartar aquellos esquemas que no son admisibles, debido a que es un trabajo que conllevaría bastantes horas. Ante esta necesidad, la idea de trabajar con programas que faciliten este proceso, parece ser un buen suplente.

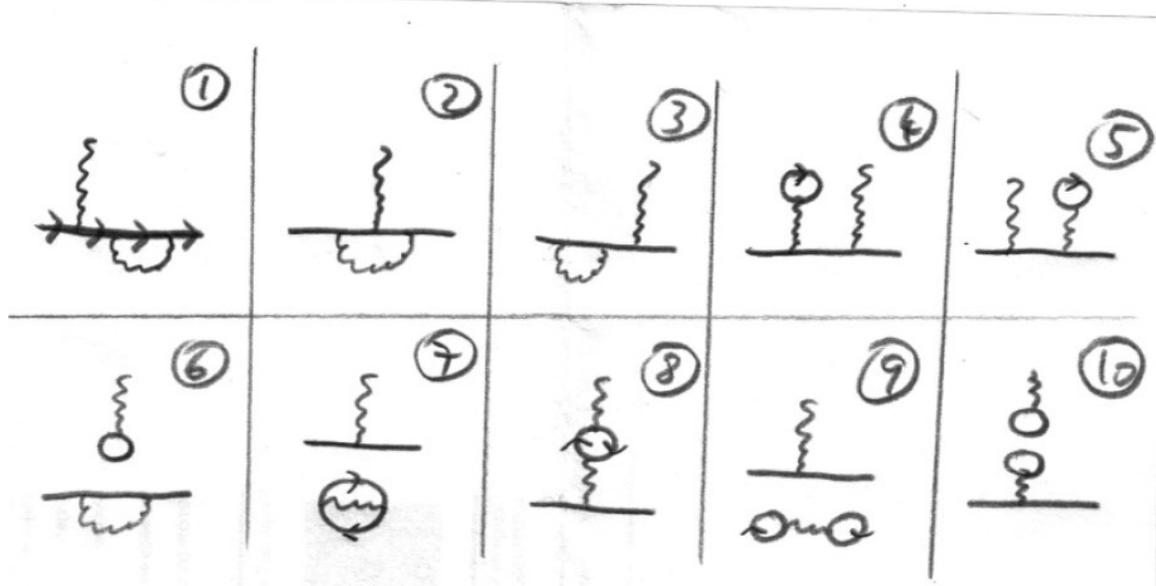


Figura 47: Representación diagramas de Feynman hechas a mano.

Para lograr con éxito, la transcripción de los diagramas de Feynman en base a códigos conlleva un trabajo riguroso y minucioso, hechos que se detallarán a continuación con aquellas ideas que sirvieron para comenzar con la categorización y dibujos de las interacciones.

### Idea de Código I

En primera instancia, el crear un código que siguiera una forma lineal, parecía la solución, para introducirlos en programación y que, entregara el resultado correspondiente. Este ideal consta de las siguientes partes:

#### *Nomenclatura:*

A: Electrón externo de inicio del diagrama de Feynman

B: Electrón externo de salida del diagrama de Feynman

Números enteros 1, 2, 3, etc., enumeran los fotones. Cada vértice leptón-leptón-fotón hereda el número del fotón.

C: Corresponde al fotón de salida.

Para lograr la comprensión, con mayor detalle, se ejemplificará el uso de este código en el siguiente ejemplo de interacción de un punto interno (Fig. 48):

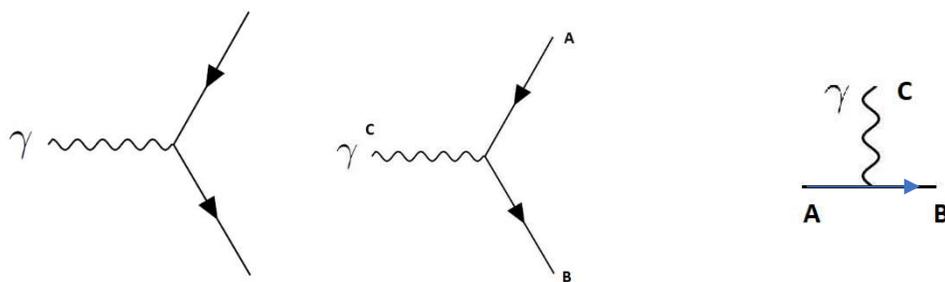
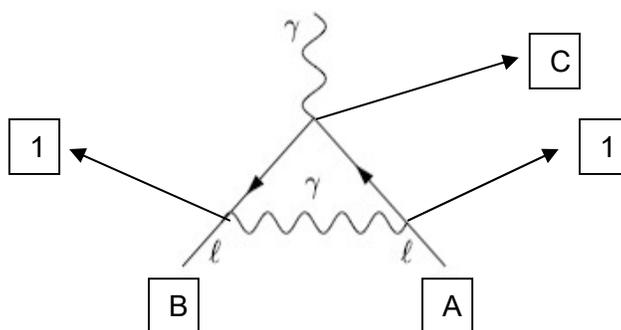


Figura 48: Esquematación diagrama con una interacción interna.

En la figura 48, se observa la forma general esquematizada del diagrama de Feynman de tipo de árbol. El primer paso es ubicar aquellos electrones de entrada y salida, como también, el fotón de salida. Cuando se reconocen estos aspectos básicos, el diagrama de tipo árbol se extiende, de forma que sea más fácil la transcripción del código, quedando de la forma: **ACB**

Para el caso de interacciones internas con 3 puntos, tenemos lo siguiente:



**A1C1B**

### Idea de código II

Hasta el momento, no se presentan complicaciones para codificar los diagramas de Feynman con esta idea de código. Sin embargo, cuando nos encontramos con un diagrama de árbol que contenga un bucle interno, este código se vuelve obsoleto. (Véase Figura 50). Por tanto, para solucionar esta deficiencia del código lineal, es necesario crear otro código.

Esta nueva idea de código relaciona en designar a cada parte de la interacción un valor, ya sea letra griega, o letra alfabética, acompañada de un subíndice si lo requiere la interacción.

La idea de codificar esto, sigue la misma lógica que la idea principal de simbolización, cabe decir, que sea lineal y que, se pueda aplicar en programas.

*Nomenclatura:*

$\Delta = \text{Electrón}$

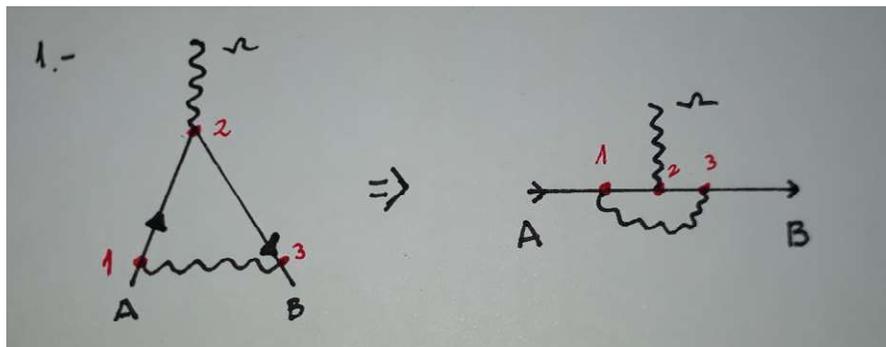
$\Delta^2 = \text{Bucle}$

$G = \text{Fotón}$

$\Omega = \text{Fotón de salida}$

$A = \text{Punto inicial}$

$B = \text{Punto final}$



$$A G(1,3) \Delta(1 \Omega_2 3) B$$

Figura 49: Diagrama con 3 interacciones internas

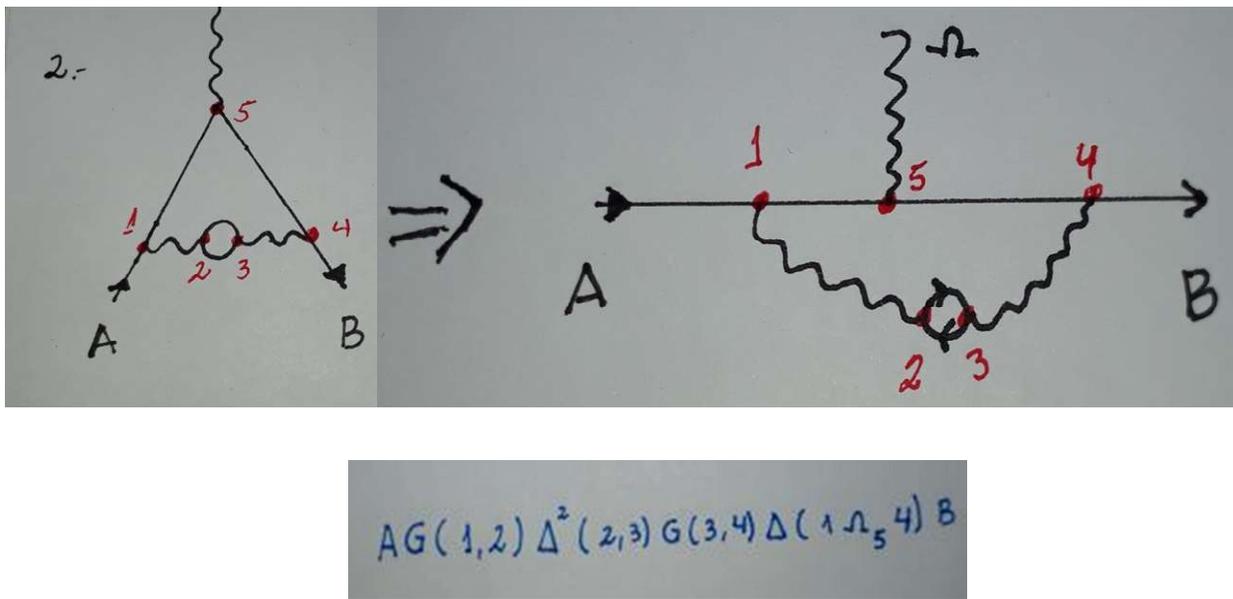
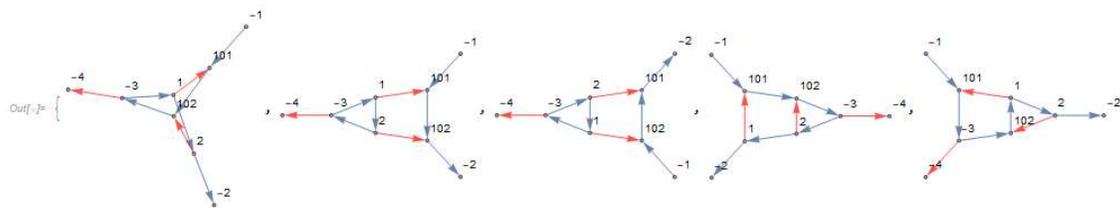


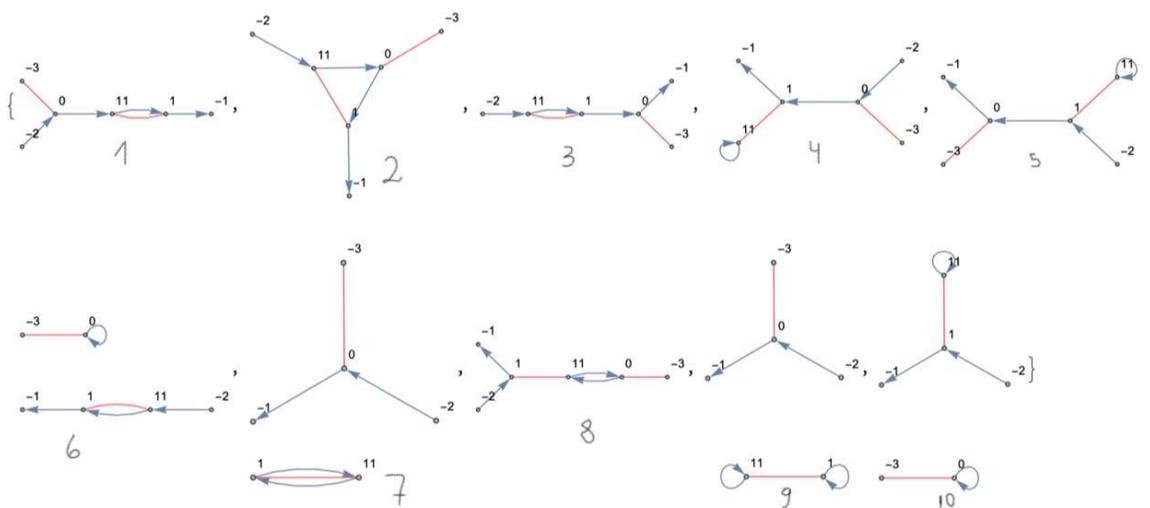
Figura 50: Diagrama con 5 interacciones internas, más un bucle.

### Filtración de códigos

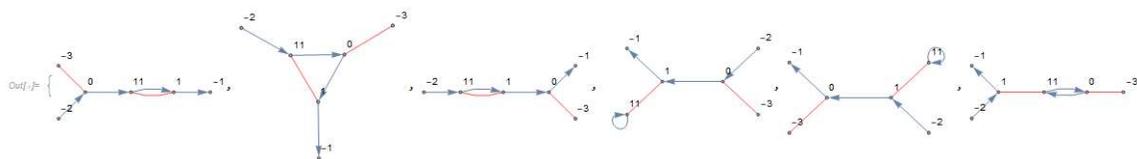
Una vez teniendo claridad del tipo de código a utilizar, es posible la implementación en programas matemáticos, para que empiecen a generar estos códigos en diagramas de Feynman. El programa para utilizar es Wólffram Mathematica [47], donde el código para utilizar corresponde a la segunda idea, cabe decir, aquella que va mencionando las interacciones en cada punto, generando la primera aproximación a los diagramas de Feynman. (Para mayor detalle, véase Anexo A)



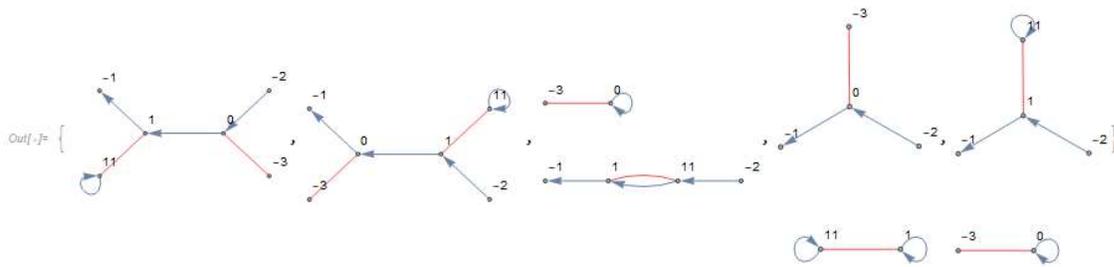
Si bien, el programa logra crear diagramas de Feynman, aún falta optimizarlos, debido a que genera diagramas dobles y algunos que no corresponden a diagramas admisibles. Al mejorar aún más la programación y generar ciertos filtros, se logrará detectar aquellos diagramas que pueden amputarse, y descartar aquellos diagramas que, en la Física de partículas, se han apartado. Para comprender mejor esto, se generarán diagramas con 3 interacciones internas, correspondiente al coeficiente  $A_n^{(2)}$  de la pág. 110.



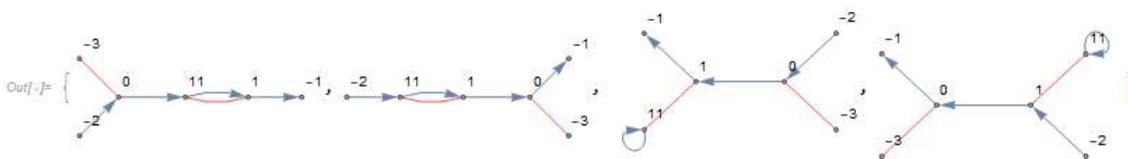
Del caso anterior, tenemos diagramas de tipo conectado, como:



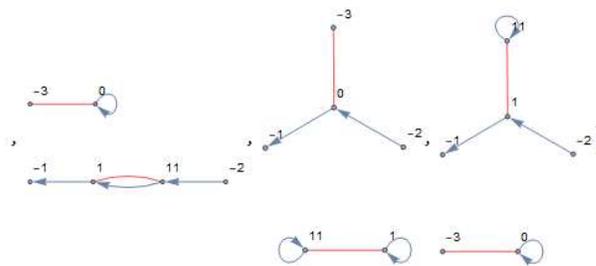
### Diagramas de tipo Furry



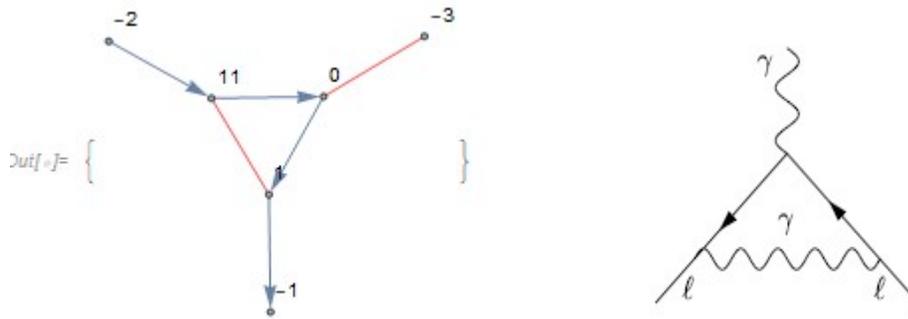
### Diagramas que son posibles amputar



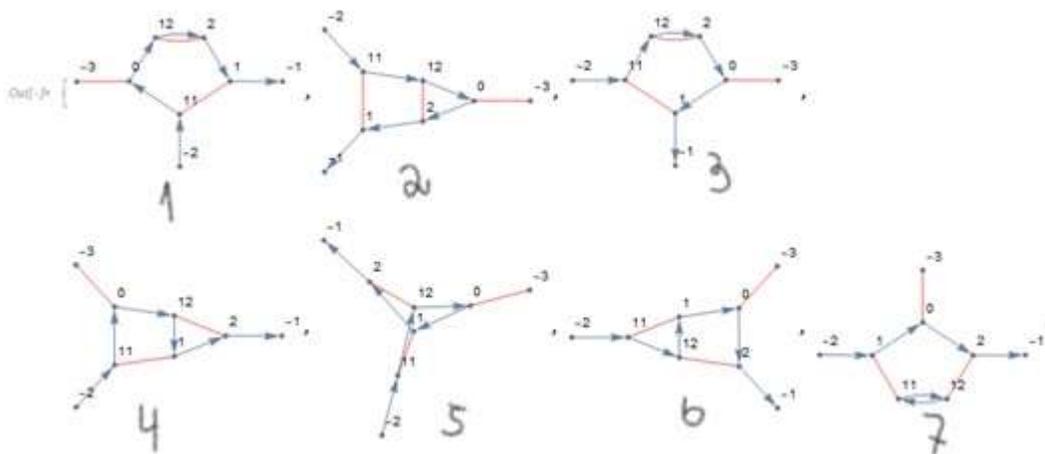
### Diagramas desconectados



Como es posible observar, de los 10 diagramas que se han generado, algunos de ellos no cumplen con los parámetros establecidos en la literatura, por tanto, es necesario aplicar ciertos filtros que nos ayuden con este proceso, obteniendo como resultado el siguiente diagrama:



Para el caso de aquellos diagramas con 5 interacciones internas, correspondiente al coeficiente  $A_n^{(4)}$  de la página 110, el proceso a seguir fue idéntico al asunto anterior, generando 88 diagramas, del cual, solo 7 han pasado el filtro:



El trabajo más complejo se ha logrado, sin embargo, la representación entregada por el programa Wólfam Mathematica, no es óptima y, eventualmente tiende a confundir al lector sobre lo que realmente está pasando. Para solventar esta problemática, se ha implementado la extensión Tikz-Feynman en Látex [48], con el fin de lograr una mejor representación. Para exportar los códigos desde el software Wólfam Mathematica se encuentran detallados en los anexos, sin embargo, se mostrará el resultado.

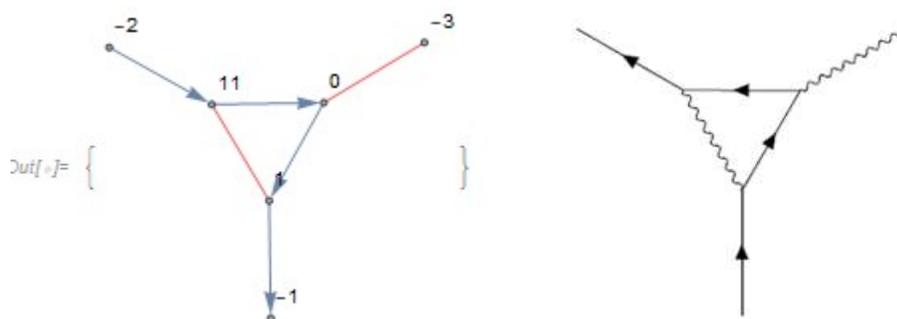


Diagrama entregado por programa Wólfram Mathematica y representación con Tikz-Feynman.

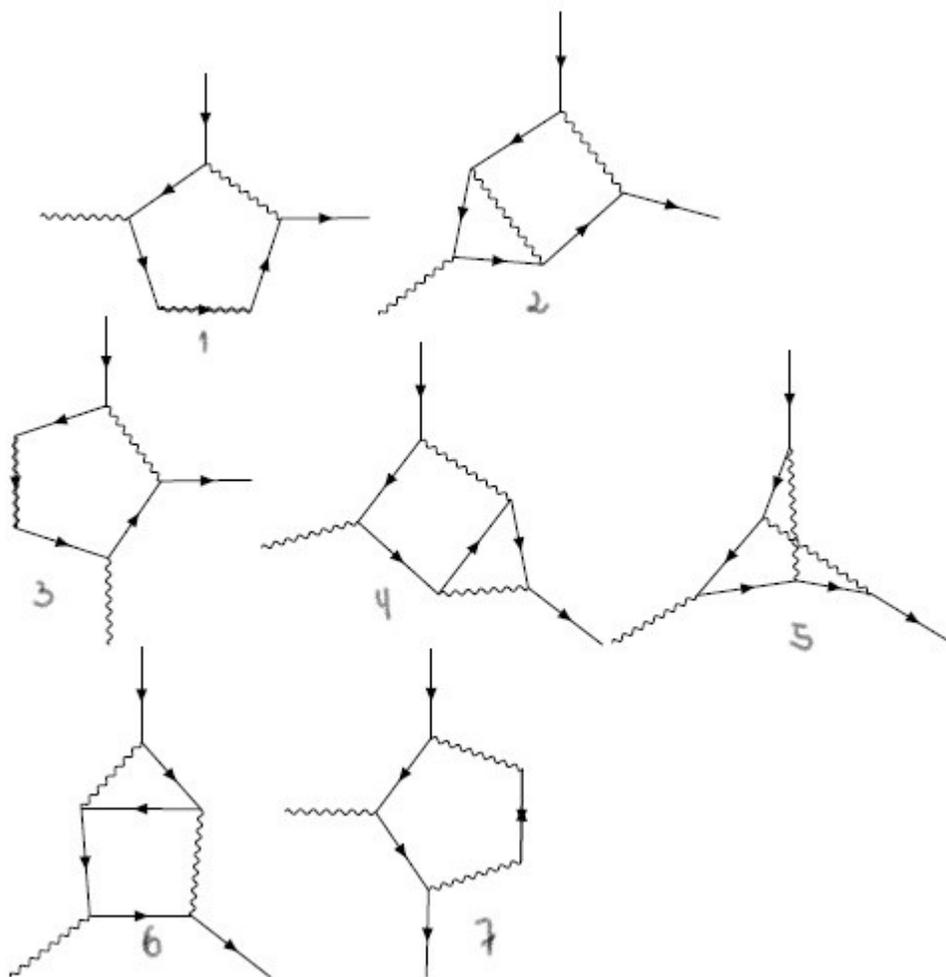
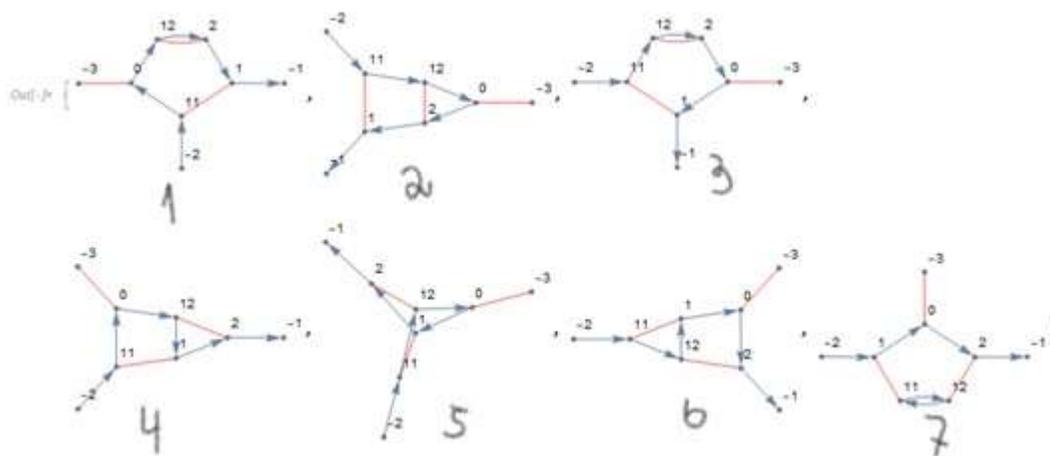
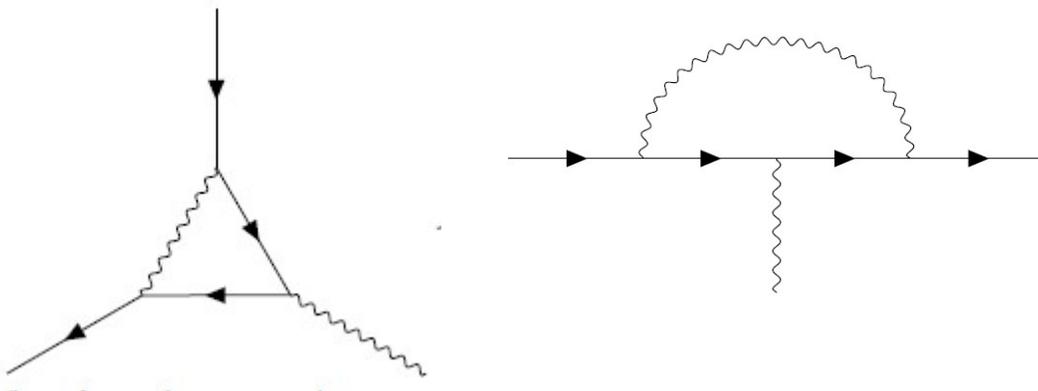


Diagrama entregado por programa Wólfram Mathematica y representación con Tikz-Feynman.

Si bien, la representación de los diagramas de Feynman, luego de la exportación del software Wólfram Mathematica es buena, cuando se observa aquellas con 5 interacciones internas, no son del todo clara. Para solventar esta situación, se ha optado por representarlas de otra forma, de modo que, sea más liviana y rápida su comprensión. Para esto, los diagramas de 3 y algunos de 5 interacciones internas, corresponden a diagramas universales, por lo cual, pueden figurar de la siguiente forma y representarse, como un Superdiagrama.

El concepto de Superdiagrama, hace referencia a una forma más rápida y simplificada de esquematizar diagramas universales, donde no se grafica el fotón externo (de salida), entendiéndose que se acopla a todas las líneas leptónicas internas de todas las formas posibles. Para los casos siguientes, cuando se hable de interacciones internas, corresponderán a la interacción del fotón, como se presenta a continuación:

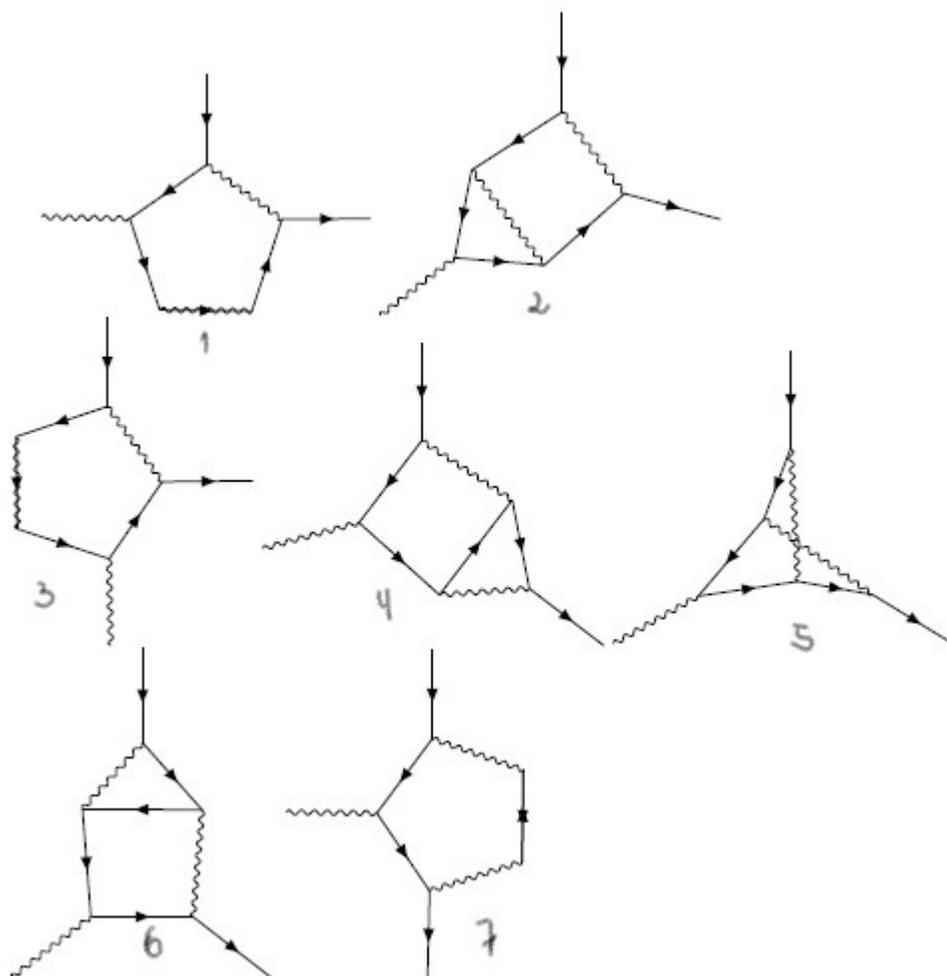
Diagrama con 1 interacción interna



### Superdiagrama



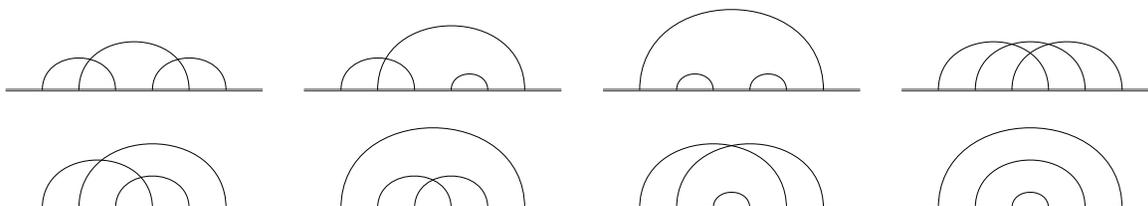
### Diagrama con 2 interacciones internas



### Superdiagrama



### Diagrama con 3 interacciones internas<sup>1</sup>



---

<sup>1</sup> El programa arroja 72 interacciones diferentes en total, pero se resumen en 8 Superdiagrama.

Diagramas con 4 interacciones internas [42,49,50]<sup>2</sup>

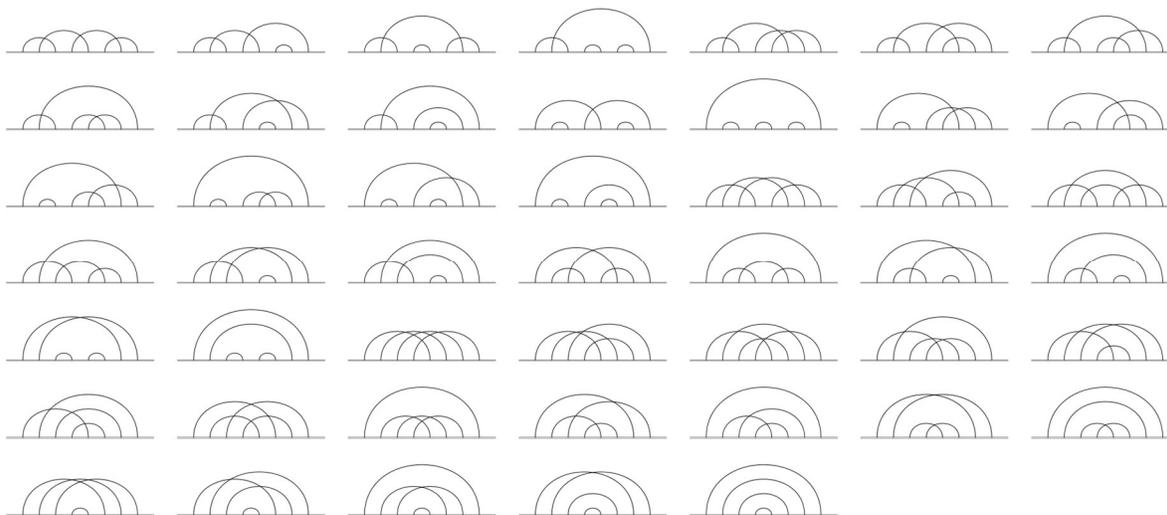
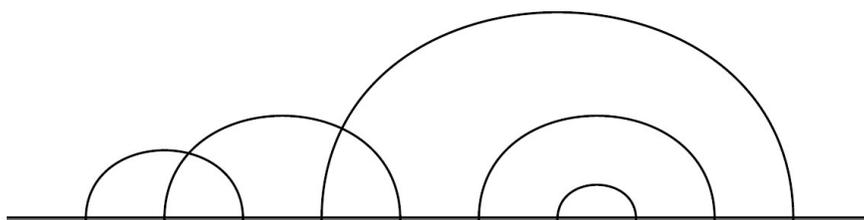


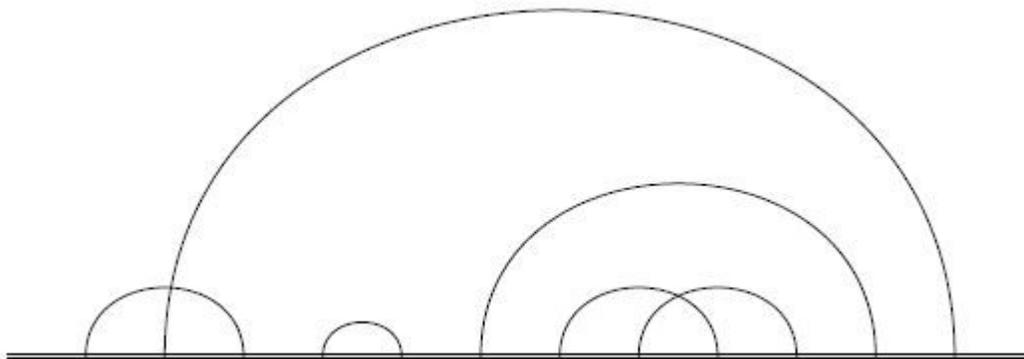
Diagrama con 5 interacciones internas [51]<sup>3</sup>



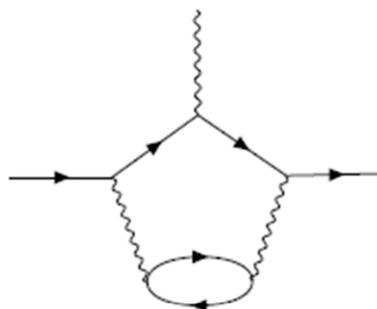
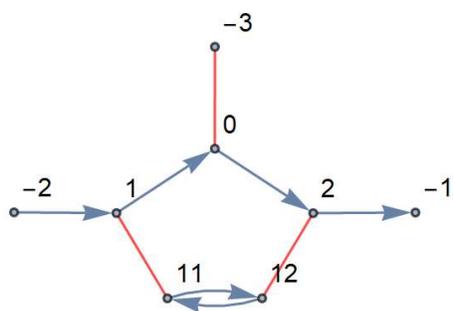
<sup>2</sup> El total de diagramas generados, son 518, pero se representan 47 Superdiagrama.

<sup>3</sup> De 6354 diagramas universales, se resumen en 389 Superdiagrama. Véase Anexo B para observar lista completa.

Diagrama con 6 interacciones internas<sup>4</sup>



Nótese que, en el caso de los diagramas con 2 interacciones internas, el esquema N° 7 (véase en la figura 122) no se ha incorporado a los diagramas de tipo universal. Este hecho, es por lo siguiente: El loop que posee, corresponde a 2 fermiones, por tanto, no es posible aún, simplificarlo a tal punto de convertirlo en un Superdiagrama. Sin embargo, se adjuntará en Anexo B ideas sobre cómo trabajar estos casos en un futuro no muy lejano.



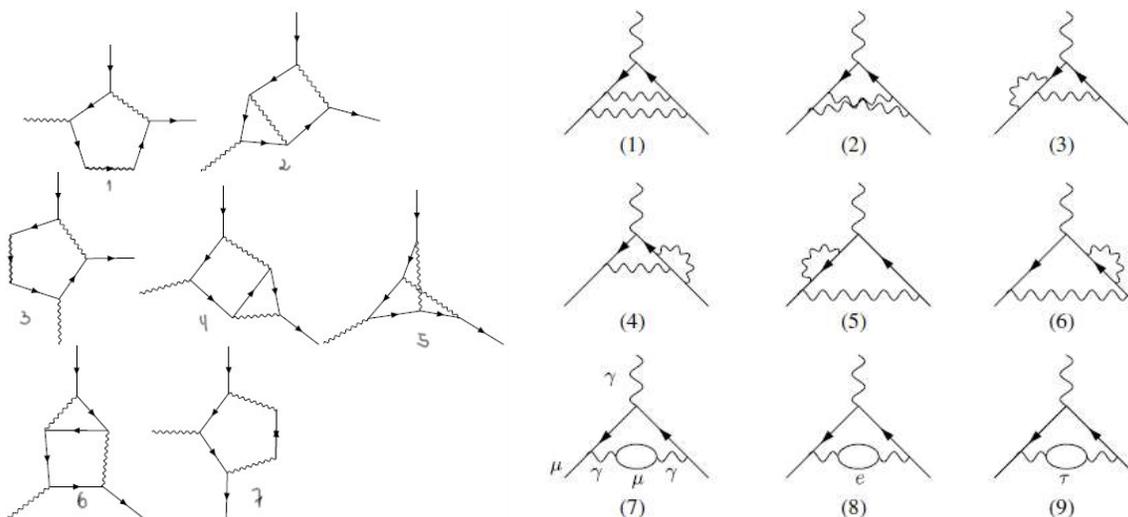
<sup>4</sup> De 89742 diagramas universales, se pueden resumir en 4226 Superdiagrama. Véase Anexo B para conocer la lista completa de diagramas.

Finalizando con estos esquemas provenientes de las ideas de códigos, el último paso es comparar los resultados obtenidos con lo establecido en la literatura. Para ello, se evaluará cada diagrama como se muestra a continuación:

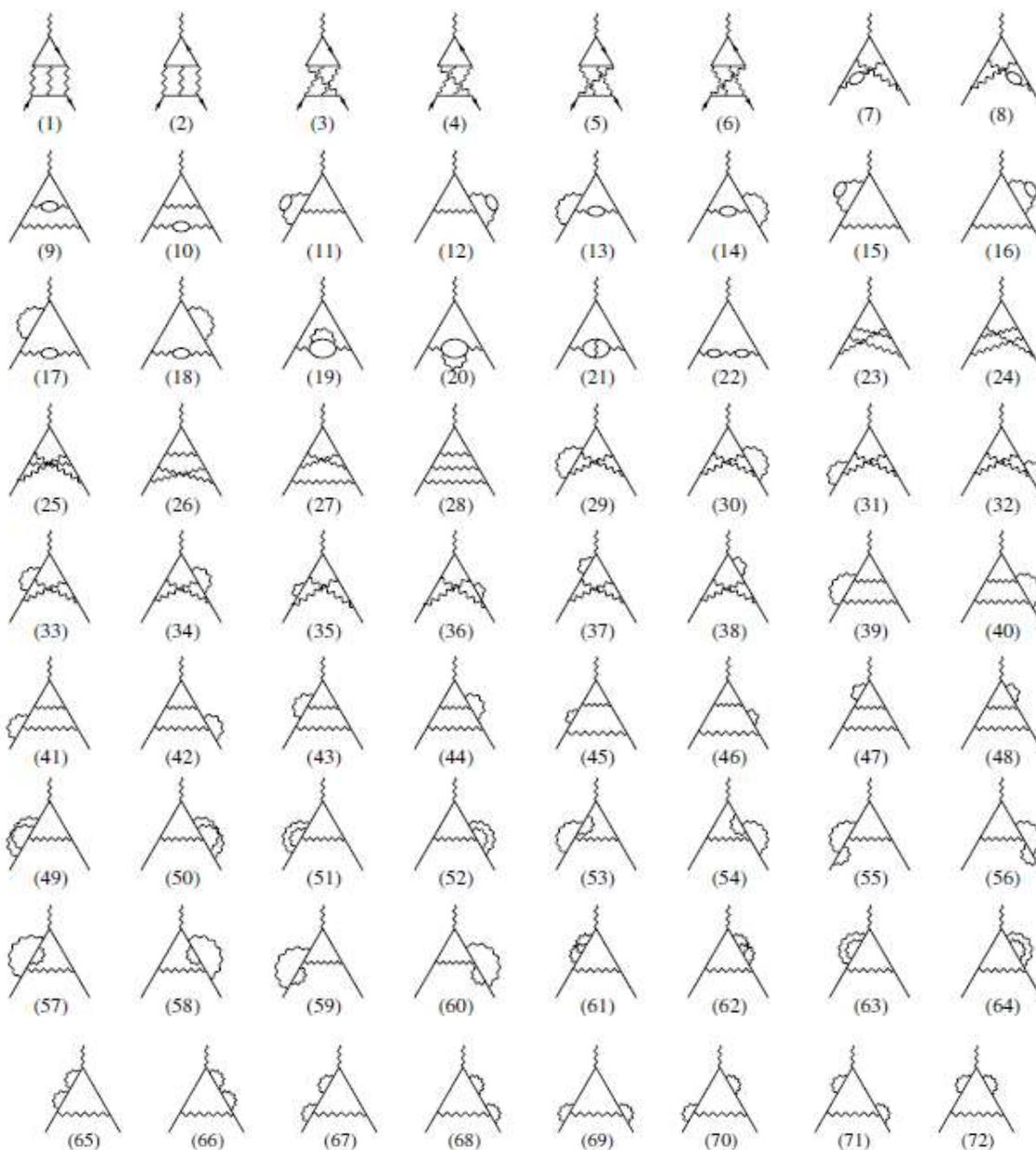
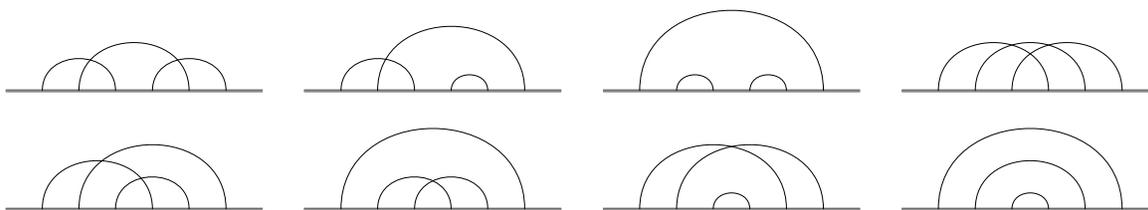
Diagrama con 1 interacción interna



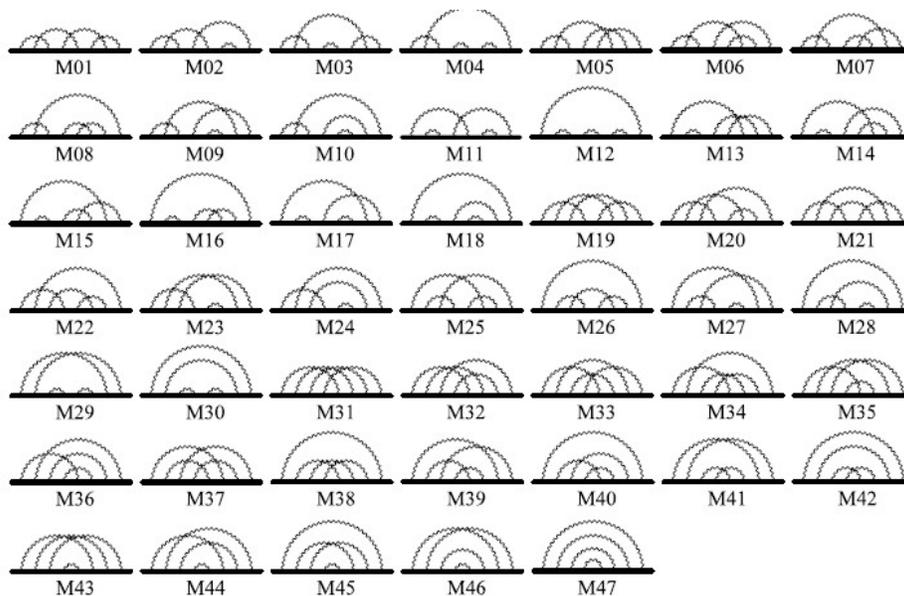
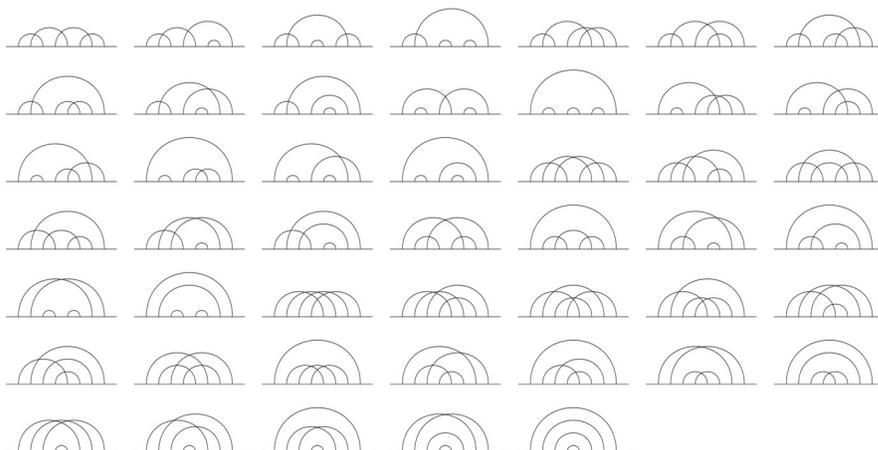
Diagrama con 2 interacciones internas



### Diagrama con 3 interacciones internas



### Diagrama con 4 interacciones internas



Como se puede apreciar, los diagramas que han sido elaborados desde el código de Wólfram Mathematica y exportados a Tikz-Feynman en Látex, se asemeja a lo estipulado en la literatura. Sin embargo, nótese que aquellos diagramas con 5 y 6 interacciones internas no se han comparado con lo establecidos en la literatura. Esto se debe, a que aún no se han esquematizado, debido a la gran cantidad de diagramas que se pueden generar (véase notas de pie, de la página 124-125), lo que, genera un pequeño avance dentro de la Física de partículas, respecto a cómo interactúan estas partículas.

## Capítulo XVI

### Perspectivas y conclusiones

La medición del momento magnético anómalo del muon ( $a_\mu$ ), es una de las pruebas más estrictas dentro del escenario de la nueva física, debido a la gran precisión actual. El experimento de Brookhaven de muon g-2, marca un nuevo hito dentro de la física de precisión, con una mejora de 14 veces con respecto al experimento del CERN [42]. La precisión que se logró en el experimento E821 de BNL ha sido bastante bien ejecutado, pero si fuese sido más preciso, podría haber reducido el error al objetivo original de  $\pm 40 \times 10^{-11}$  [42]. El resultado entregado en el experimento Brookhaven muestra una discrepancia de  $3\sigma$  con respecto a la predicción actual del modelo estándar, por lo que las comparaciones con predicciones fiables de extensiones del modelo estándar sean muy interesantes. Lo interesante de todo esto es que las mediciones que han obtenidos de  $a_\mu$  en los experimentos han proporcionado pista para la búsqueda de la nueva física, en la cual los próximos experimentos de frontera de alta energía se llevará a cabo en el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) en CERN [42], por lo que será una fuerte motivación para un nuevo experimento g-2 de la próxima generación.

### Posibilidades experimentales futuras

En el capítulo XIII se cuenta que los científicos de Fermilab proponen mejorar el experimento realizado por BNL, en la cual apuntan en obtener una precisión experimental de  $\sim 15 \times 10^{-11}$  [42], considerando que el anillo de almacenamiento de BNL será la pieza clave del experimento en Fermilab. Otro posible experimento futuro sería el JPARC en Japón, en la cual proponen mediante un haz de protones de alta intensidad de 30 GeV se podría realizar un haz de decaimiento hacia atrás que permite una mejor separación de los muones y piones [42]. Un efecto muy similar podría lograrse utilizando muones en retroceso junto con un anillo acumulador de muones en el Fermilab.

Ahora si bien, para reducir los errores sistemáticos en los experimentos, es necesario obtener un campo magnético más uniforme y un centrado mejorado del haz de muones y una mejora de la calibración [42]. Para detectar y analizar la

señal de precisión se propone utilizar un método complementario para determinar  $\omega_a$ , tratando de medir la energía frente al tiempo en lugar de eventos frente a hora. Los detectores de seguimiento se mejorarían con una mejor segmentación [42].

### Algunas perspectivas sobre $a_\mu$

La utilización del uso de la polarización al vacío hadrónico, conlleva ciertos problemas que limitan la precisión teórica, por lo que requiere de una mejora sustancial y en la cual dependerá en gran medida de los nuevos experimentos mejorados de aniquilación electron-positron, en un rango de hasta 2,5 GeV. Es necesario contar con un gran esfuerzo para la mejora de los cálculos de las correcciones para estos procesos de producción de hadrones [42].

Desde el espectro de decaimiento hadrónico- $\tau$ , y los datos de  $e^+e^-$  se espera reducir aún más los errores al incluir los datos. Sin embargo, se observan desviaciones sustanciales que aún no son explicables, por lo que no se incluye dentro de los datos. La solución a este problema de  $e^+e^-$  frente a  $\tau$ , ayudaría a mejorar la determinación de  $a_\mu^{had}$  [42].

En contraste a la polarización del vacío hadrónico de  $a_\mu$ , no se puede establecer una conexión directa con los datos experimentales para la dispersión luz a luz hadrónica y es probable que se requiera de modelos en un futuro previsible. Debido a la mayor precisión en la posibilidad de un posible experimento futuro de g-2 y la reducción sustancial esperada del error de otras contribuciones hadrónicas de  $a_\mu$ , en particular la polarización al vacío hadrónico, también es ciertamente necesaria una reconsideración de la contribución hadrónica luz por luz [42].

Otra posibilidad, en la cual fue propuesta por Remiddi, sería aumentar la precisión de las mediciones independientes de  $a_\mu$  en un factor de 20 y luego usar  $a_e$  junto con cálculos mejorados de QED y SM y determinar  $a_\mu$  (impredicible) [42].

Por otra parte, la contribución de QED, en la que se han realizado cálculos hasta el décimo orden en la expansión perturbativa, es decir,  $O(\alpha^5)$ . El número final del cálculo  $a_\mu$  depende de la constante de estructura fina ( $\alpha$ ) y en la actualidad hay dos determinaciones independiente que difieren en aproximadamente  $2,4\sigma$  [53].

Sin embargo, el impacto de esta discrepancia en el número final de  $a_\mu$ , está muy por debajo de la incertidumbre de la contribución QED. Ahora si bien, el número final de  $a_\mu$ , se toma en base en el valor de  $\alpha$  obtenido de las mediciones de interferometría atómica del átomo de Cs. Por lo tanto los cálculos de QED en  $a_\mu$  es:  $a_\mu^{QED}(\alpha(Cs)) = 116\,584\,718\,931(104) \times 10^{-11}$  [53].

En la contribución electrodébil se han realizado cálculos de hasta dos bucles, en donde los bucles hadrónicos son de nivel de dos bucles, en la que también se incluyen dentro de la incertidumbre de la contribución electrodébil. El resultado final  $a_\mu$  bajo la contribución electrodébil es:  $a_{\kappa\mu}^{EW} = 153.(1.0) \times 10^{-11}$  [53].

Con una incertidumbre de diez veces mayor que la QED, pero aun insignificante con referente a las incertidumbres hadrónicas, corresponde a los datos HVP, que surgen de las incertidumbres experimentales [53], así como también de las tensiones no resueltas entre los conjuntos de datos. Se diseñó un procedimiento de fusión que tiene en cuenta adecuadamente estas tensiones, que también impulsan las diferencias entre las evaluaciones de HVP [53]. La estimación resultante es de:  $a_\mu^{HVP,LO} = 6931(40) \times 10^{-11}$  [53].

Para HVP, las incertidumbres actuales para los cálculos de cesos (Cs) son demasiado grandes para realizar un promedio similar y para el futuro. Por lo que la estimación final, enfatizando que la estimación de la incertidumbre ya da cuenta de las tensiones en la base de datos  $e^+e^-$  y combinando con las contribuciones QED y EW, se obtiene:

$$\begin{aligned} a_\mu^{SM} &= a_\mu^{QED} + a_\mu^{EW} + a_\mu^{HVP,LO} + a_\mu^{HVP,NLO} + a_\mu^{HVP,NNLO} + a_\mu^{HLbL} + a_\mu^{HLbL,NLO} \\ &= 116\,591\,810(43) \times 10^{-11}, \quad \text{ver ref. [53]}. \end{aligned}$$

Este valor difiere con el valor medido en Brookhaven,  $a_\mu^{exp} = 116\,592\,089(63) \times 10^{-11}$  [53]. La diferencia en el valor de  $a_\mu$ , tanto teórico como experimental resulta ser:

$$\Delta a_\mu = a_\mu^{exp} - a_\mu^{SM} = 279(76) \times 10^{-11}, \quad \text{ver ref. [53]}$$

La discrepancia con respecto a estos valores de  $a_\mu$  es de  $3,7\sigma$  [53].

## Nuevos resultados de la constante de estructura fina ( $\alpha$ ).

Los físicos pretenden medir la constante de estructura fina con la mayor precisión posible, debido a que están omnipresente medirlo con la mayor precisión, ya que este permite probar la teoría de las interacciones entre partículas elementales del majestuoso modelo estándar de la física de partículas.

Debido a las discrepancia entre las predicciones del modelo estándar y las observaciones experimentales pueden proporcionar evidencia de una nueva física, una evolución precisa de esas predicciones requiere de valores más precisos de las constantes físicas fundamentales, entre ellas, la constante de estructura fina. El 2 de diciembre de 2020 un equipo de cuatro físicos dirigidos por Saida Guellati-Khelifa en el laboratorio Kastler Brossel en París informo la medición más precisa hasta ahora de la constante de estructura fina [54]. La determinación del valor nuevo de esta constante, se ejecutó mediante el uso de interferometría de ondas de materia para medir la velocidad de retroceso de un átomo de rubidio que absorbe un fotón, obteniendo un valor de la constante de estructura fina de  $\alpha^{-1} = 137.035999206(11)$  con una precisión relativa de 81 ppb [52]. La precisión de once dígito en  $\alpha$  conduce a un factor  $g$  de electrones [52]. El valor de la constante de estructura fina difiere de tan solo  $5\sigma$ , siendo así el mejor resultado disponible de las mediciones de retroceso de cesio [52].

Estos resultados traen consigo mismo partículas candidatas de materia oscura propuesta para explicar las desintegraciones anómalas de los estados excitados de núcleos de berilio, como también allana el camino para probar la discrepancia observada en la anomalía del momento magnético del muon en el sector de electrones [52].

Mediante observaciones del corrimiento al rojo  $z = 7.085$  quasar J1120 + 0641 se utilizan para buscar variaciones de la constante de estructura fina, en el rango de corrimiento al rojo de  $5:5$  a  $7:1$  [55]. Las observaciones en  $z = 7:1$  exploran la física del universo solo 0.8 billones de años de antigüedad [55].

En la figura 51 se muestran las medidas de  $\Delta\alpha/\alpha$ , en donde el lado izquierdo, corresponde a hoy, en la cual el error es bastante pequeño e incluso puede llegar

a cero, en cambio el lado derecho corresponde al big Bang, donde se muestra que el error es bastante grande al medir objetos muy antiguos, en donde corrimiento al rojo es mayor [55].

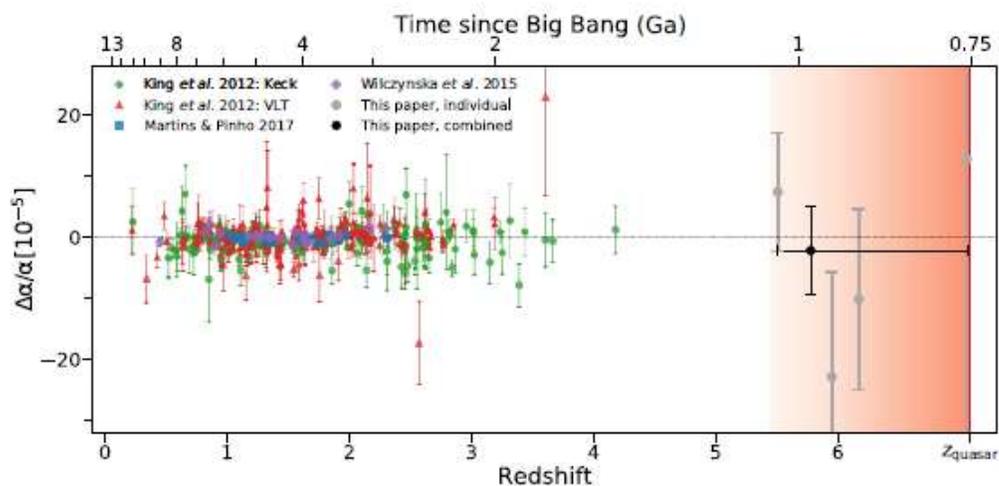


Figura 51: Medidas directa de  $\Delta\alpha/\alpha$  tomado por mediciones de absorción de cuántar [55].

## Conclusiones

El experimento BNL de muon g-2 ha conllevado un gran progreso significativo en la teoría, así como también el experimento Fermilab ha mejorado de manera significativo el experimento BN, en la cual pronto publicará sus resultados. Las contribuciones de QED y electrodébiles están muy bien establecidas en el nivel requerido de precisión. Tras las mejoras experimentales basado en los datos de aniquilación de  $e^+e^-$ , permitió reducir las incertidumbres de la predicción teórica para igualar la precisión experimental, aunque todavía quedan alguna desviaciones, que en la actualidad no son comprendida [42]. El principal problema en la actualidad es la precisión limitada de los datos  $e^+e^-$  en el rango entre 1 y 2 GeV, por lo cual, se espera ciertas mejoras en un factor de 2 en la precisión de  $a_\mu^{\text{had}}$  [42].

La desviación de  $3,2\sigma$  [42], que se presenta entre  $a_\mu^{\text{Theo}}$  y  $a_\mu^{\text{Exp}}$  abre mucho espacio de reflexión acerca del origen de esta discrepancia y se espera que sea un verdadero efecto, debido a la física más allá del modelo estándar. Por otra parte, la predicción precisa del modelo estándar acerca del momento magnético

anómalo del muon es un gran triunfo que incorpora el SM, excepto la gravedad, por lo que todas las demás interacciones de partículas se encuentran dentro de un marco unificador de  $SU(3)_C \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y$  [42].

El momento magnético anómalo del muon es un observable cuántico puro, en la cual es predicho sin ninguna ambigüedad por el modelo estándar, con una precisión que despliega todo el espectro de la física. Por otro lado el bosón de Higgs, producto de su pequeño acoplamiento con los fermiones ligeros, no juega un papel muy relevante [42]. La sensibilidad de la anomalía del muon con referente a la nueva física es mayor a los nuevos estados cercanos o nuevas interacciones efectivas, mientras que los estados demasiado pesados producen efectos demasiado pequeño [42].

El muon  $g-2$  con su discrepancia entre la teoría y el experimento proporciona importantes restricciones a los parámetros de los nuevos modelos físicos. Por otro lado, también ayuda a desenredar la gran cantidad de posibilidades que se tiene para ir más allá del modelo estándar y con eso complementar la próxima nueva física con la búsqueda en el LHC.

Un experimento de muon  $g-2$  mejorado desafiaría los nuevos esfuerzos para mejorar la precisión de la predicción teórica y corroboraría la existencia de la física más allá del modelo estándar que se cree que debe estar allí en cualquier caso [42].

## Anexo A

tesis20.diagsV4 (1).nb - Wolfram Mathematica 12.1 Student Edition - uso personal solamente

Archivo Edición Insertar Formato Celda Gráficos Evaluación Paletas Ventana Ayuda

WOLFRAM MATHEMATICA | EDICIÓN PARA ESTUDIANTES

Demostraciones | MathWorld | Comunidad Wolfram | Help

**play with drawing AMM QED diags: Version1 (01.Oct.2020)**

notation: label external vertices with negative numbers, eg. {A,B,C} -> {-1,-2,-3}  
 el[-1,...,-2]: follow the arrow of the external lepton line. list all the photon numbers in ...  
 po[...]: for each internal lepton loop, again, follow the arrow and list photons in ...

```
(*define conversion functions*)
list2prop[diag_] :=
diag /. {el[li_] -> el[li] * f[li], po[li] -> po[li] * f[li]} /. f[li1_] * f[li2_] -> f[li1, li2] /. f[li1_, a_] /; a < 0, li2_] -> f[li1, li2] /.
f[li1_, a_, li2_, a_, li3_] -> f[li1, li2, li3, a] /. f[li_] -> f[li] * Apply[ph, 100 + Range[Length[li]]] /.
el[li1_, a_, li2_] * f[a_, li3_] -> ph[b_, li4_] -> el[li1, b, li2] * f[li3] * ph[li4, a + b] /. f[] -> 1 /. po[a_, li_] -> el[a, li, a] /.
el[li1_, a_Integer, b_, li2_] -> el[li1, a + b, b, li2] /. el[li1_, a_Integer] -> el[li1] /. el[li1_] * el[li2_] -> el[li1, li2] /. ph[li_] -> ph[li, -3 -> -4];

(*conversion to Leonardo notation*)
prop2leo[prop_] := prop /. {el[li_, a_ -> b_] -> el[li] * G[a, b], ph[li_, a_ -> b_] -> ph[li] * d[a, b]} /. {el[] -> 1, ph[] -> 1};
(*and back*)
leo2prop[leo_] := leo el[] * ph[] /. {el[li_] * G[a_, b_] -> el[li, a -> b]} /. {ph[li_] * d[a_, b_] -> ph[li, a -> b]};

(*simple drawing of the graph*)
graph[prop_] := prop /. el[li_] * ph[li2_] -> Graph[Join[{li2}, Map[Style[#, Red] &, {li2}]], VertexLabels -> "Name" (*, GraphLayout -> "CircularEmbedding" *)];
```

Out[-] := (\*ejemplo\*)

```
(*def lista de diags. por ej 2loop (2 fotones internos)*)
diag[1] = el[-1, 1, 2, -3, 1, 2, -2];
diag[2] = el[-1, 1, 2, -2] * po[1, 2, -3];
diag[3] = el[-1, 1, 2, -2] * po[-3, 2, 1];
diag[4] = el[-1, 1, 2, -3, 2, 1, -2];
diag[5] = el[-1, 1, -3, 2, 1, 2, -2];
```

Out[-] := (\*mostrar el funcionamiento de las funciones definidas arriba\*)

tesis20.diagsV4 (1).nb - Wolfram Mathematica 12.1 Student Edition - uso personal solamente

Archivo Edición Insertar Formato Celda Gráficos Evaluación Paletas Ventana Ayuda

WOLFRAM MATHEMATICA | EDICIÓN PARA ESTUDIANTES

Demostraciones | MathWorld | Comunidad Wolfram | Help

```
(*generar todas las permutaciones*)
Permutations[%]
(*pegar los dos leptones externos, envuélvalo con la función el*)
Map[el@@Join[{-1}, #, {-2}] &, %]
(*convertir lista a propagadores, y graficar*)
graph /@ list2prop /@ %
```

Out[-] := {-3, 1, 1}

Out[-] := {{-3, 1, 1}, {1, -3, 1}, {1, 1, -3}}

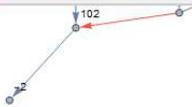
Out[-] := {el[-1, -3, 1, 1, -2], el[-1, 1, -3, 1, -2], el[-1, 1, 1, -3, -2]}

tesis20.diagsV4 (1).nb - Wolfram Mathematica 12.1 Student Edition - uso personal solamente

Archivo Edición Insertar Formato Celda Gráficos Evaluación Paletas Ventana Ayuda

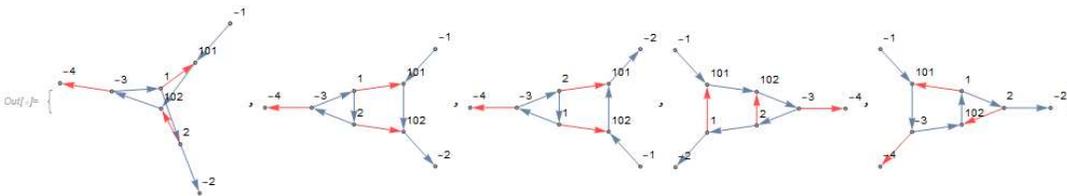
WOLFRAM MATHEMATICA EDICIÓN PARA ESTUDIANTES

Demostraciones | MathWorld | Comunidad Wolfram | Help



```

In[ ]:= (*ejemplo. graficar todos los 5 diagramas "diag" definidos antes*)
(*nota: "/"@ significa "aplica a cada miembro de la lista" (una lista siendo {a,b,..,z})*
graph /@ list2prop /@ diag /@ {1, 2, 3, 4, 5}
    
```



```

In[ ]:= (*ahora tenemos algo de control como graficar codigos ingresados manualmente*)
(*pero queremos tambien generar estos mismos codigos en una manera automatica*)
(*aqui una propuesta para los primeros pasos*)

(*generacion de codigos. falta clasificacion: amputar patas externas, etc; faltan loops de fermiones internos*)

(*ejemplo: generar multiples diagrams*)
(*wow, ya funciona bastante bien..*)

(*buscar diagramas sin loops de fermiones, con un foton interno*)
{-3, 1, 1}

(*generar todas las permutaciones*)
    
```



tesis20.diagsV4 (1).nb - Wolfram Mathematica 12.1 Student Edition - uso personal solamente

Archivo Edición Insertar Formato Celda Gráficos Evaluación Paletas Ventana Ayuda

WOLFRAM MATHEMATICA | EDICIÓN PARA ESTUDIANTES

Demostraciones | MathWorld | Comunidad Wolfram | Help

**play with drawing AMM QED diags: Version1 (01.Oct.2020)**

**Version2 (08.Oct.2020)**

- \* cambio suave de notación: mayormente trabajar con listas unDiag={{-2,0,1,-1},{1,2,2},...}; lepton externos {-2,-1}; foton externo {-1}; fotones internos {1,1,2,2,...}
- \* tratar tambien loops de fermiones
- \* cada cadena (externa o interna=loop) de lepton es una  $fct\ el[...indices...]$  (no usar  $po[...]$  como antes)
- \* mejorar graficos: fotones como lineas (sin flechas)
- \* generación automática de todos los diagramas
- \* generar diagramas sin repeticiones (respecto a la renumeración de fotones)
- \* filtrar diagramas: grupos de diags conectados / amputados / Furry / ...

```

In[ ]:= (*comando para borrar toda la memoria de Mathematica*)
Exit[];
(*seten núcleo del sistema*)

v2: considerar multiples lepton loops, y mejorar graficos
=> función graph3[listaDeIndices]

In[ ]:= (*define improved conversion function*)
ClearAll[list2prop2];
(*borra todo*)
list2prop2[diag_] :=
diag /. {el[l1_] -> el[l1] * f[l1], po[l1_] -> el[l1] * f[l1], po[] -> 1, el[] -> 1} /. {f[l1_] * f[l2_] -> f[l1, l2] * f[l2]^n -> f[l1, l2] * f[l2]^(n-1), f[l1_] * f[l2_] -> f[l1, l2]} /.
f[l1_, a_] /; a <= 0, l2_ -> f[l1, l2] /. f[l1_, a_, l2_, a_] -> f[l1, l2, l3, a] /. f[l1_] -> f[l1] * Apply[ph, 10 + Range[Length[{l1}]]] /.
{el[l1_, a_, l2_] ^ n * f[l1_, a_, l4_] -> ph[b_, l5_] -> el[l1, a, l2]^(n-1) * el[l1, b, l2] * f[l1, l4] * ph[l1, a -> b],
el[l1_, a_, l2_] * f[l1_, a_, l4_] -> ph[b_, l5_] -> el[l1, b, l2] * f[l1, l4] * ph[l1, a -> b]} /. f[] -> 1 /. el[a_ /; a != -2, l1_] -> el[a, l1, a] /.
el[l1_, a_Integer, b_, l2_] -> el[l1, a + b, b, l2] /. el[l1_, a_Integer] -> el[l1] /. el[l1_] * el[l2_] -> el[l1, l2] /. el[l1_] -> el[l1] * ph[0 -> -3] /.
ph[l1_] -> ph[l1] * ph[l1, l2];
    
```

tesis20.diagsV4 (1).nb - Wolfram Mathematica 12.1 Student Edition - uso personal solamente

Archivo Edición Insertar Formato Celda Gráficos Evaluación Paletas Ventana Ayuda

WOLFRAM MATHEMATICA | EDICIÓN PARA ESTUDIANTES

Demostraciones | MathWorld | Comunidad Wolfram | Help

```

el[l1_, a_Integer, b_, l2_] -> el[l1, a + b, b, l2] /. el[l1_, a_Integer] -> el[l1] /. el[l1_] * el[l2_] -> el[l1, l2] /. el[l1_] -> el[l1] * ph[0 -> -3] /.
ph[l1_] -> ph[l1] * ph[l1, l2];

(*simple drawing of the graph version 2*)
ClearAll[graph2];
(*borra todo*)
graph2[prop_] := prop /. el[l1_] -> ph[l1, l2] -> Graph[Join[{l1}], Map[Style[UndirectedEdge @@ #, Red] &, {l1}], VertexLabels -> "Name"];
(*borra todo*)

(*wrapper to directly draw lists*)
graph3[l1_] := graph2@list2prop2@ (Times @@ el @@@ l1);

In[ ]:= (*ejemplo con varios internal fermion loops*)
el[-2, 1, 3, -1] * el[2, 0, 3] * el[1, 2] * el[]
list2prop2%
graph2%

Out[ ]:= el[1, 2] * el[2, 0, 3] * el[-2, 1, 3, -1]

Out[ ]:= el[2 + 0, 0 -> 13, 13 -> 2, 11 -> 12, 12 -> 11, -2 -> 1, 1 -> 3, 3 -> -1] * ph[0 -> -3, 1 -> 11, 2 -> 12, 3 -> 13]
    
```



tesis20.diagsV4 (1).nb - Wolfram Mathematica 12.1 Student Edition - uso personal solamente

Archivo Edición Insertar Formato Celda Gráficos Evaluación Paletas Ventana Ayuda

WOLFRAM MATHEMATICA | EDICIÓN PARA ESTUDIANTES

Demostraciones | MathWorld | Comunidad Wolfram | Help

```

(*ejemplo*)
splits[2]

Out[ ]:= {{5}, {4, 1}, {1, 4}, {3, 2}, {2, 3}, {3, 1, 1}, {1, 3, 1}, {1, 1, 3}, {2, 2, 1}, {2, 1, 2}, {1, 2, 2}, {2, 1, 1, 1}, {1, 2, 1, 1}, {1, 1, 2, 1}, {1, 1, 1, 1, 1}}

In[ ]:= (*test diag generator*)
testNr = 1;
(*all distinct perms of {0,1,1,...} up to photon renumbering*)
(*split in all possible ways into fermion chains*)
(*remember cycle sym of closed fer loops*)
Join@@Table[Map[TakeList[#, splits[testNr]][[k]] &, vrt[testNr]], {k, 1, Length[splits[testNr]]}]
(*convert to el chains, adding external fermions to 1st chain*)
(*do not consider empty 1st chain {-2, -1} since these are for sure disconnected diags*)
(*there are some duplicates from the cyclesym of closed fer loops*)
DeleteDuplicates@Map[Times@@el@@@cyc /@ ReplacePart[#, 1 -> Join[{-2}, #][[1]], {-1}] &, %]
(*ver el resultado*)
graph2 /@ list2prop2 /@ %
(*contar diags generados*)
Length[%]

Out[ ]:= {{{{0, 1, 1}}, {{1, 0, 1}}, {{1, 1, 0}}, {{0, 1}, {1}}, {{1, 0}, {1}}, {{1, 1}, {0}}, {{0}, {1, 1}}, {{1}, {0, 1}}, {{1}, {1, 0}}, {{0}, {1}, {1}}, {{1}, {0}, {1}}, {{1}, {1}, {0}}, {{1}, {1}, {1}, {0}}}}
Out[ ]:= {el[-2, 0, 1, 1, -1], el[-2, 1, 0, 1, -1], el[-2, 1, 1, 0, -1], el[1] - el[-2, 0, 1, -1], el[1] - el[-2, 1, 0, -1],
el[0] - el[-2, 1, 1, -1], el[1, 1] - el[-2, 0, -1], el[0, 1] - el[-2, 1, -1], el[1]^2 - el[-2, 0, -1], el[0] - el[1] - el[-2, 1, -1]}

```

tesis20.diagsV4 (1).nb - Wolfram Mathematica 12.1 Student Edition - uso personal solamente

Archivo Edición Insertar Formato Celda Gráficos Evaluación Paletas Ventana Ayuda

WOLFRAM MATHEMATICA | EDICIÓN PARA ESTUDIANTES

Demostraciones | MathWorld | Comunidad Wolfram | Help

```

Out[ ]:= 10

In[ ]:= (*wrapper to generate all lists*)
genAll[lp_] :=
DeleteDuplicates@Map[Sort[cyc /@ ReplacePart[#, 1 -> Join[{-2}, #][[1]], {-1}] &, Join@@Table[Map[TakeList[#, splits[lp]][[k]] &, vrt[lp]], {k, 1, Length[splits[lp]]}]]];
(*example use*)
genAll[1]
graph3 /@ %

```

tesis20.diagsV4 (1).nb - Wolfram Mathematica 12.1 Student Edition - uso personal solamente

Archivo Edición Insertar Formato Celda Gráficos Evaluación Paletas Ventana Ayuda

WOLFRAM MATHEMATICA | EDICIÓN PARA ESTUDIANTES

Demostraciones | MathWorld | Comunidad Wolfram | Help

```

graph3 /@ %

Out[ ]:= {{{{-2, 0, 1, 1, -1}}, {{-2, 1, 0, 1, -1}}, {{-2, 1, 1, 0, -1}}, {{1}, {-2, 0, 1, -1}}, {{1}, {-2, 1, 0, -1}},
{{0}, {-2, 1, 1, -1}}, {{1, 1}, {-2, 0, -1}}, {{0, 1}, {-2, 1, -1}}, {{1}, {1}, {-2, 0, -1}}, {{0}, {1}, {-2, 1, -1}}}}

```

```

tesis20.diagsV4 (1).nb - Wolfram Mathematica 12.1 Student Edition - uso personal solamente
Archivo Edición Insertar Formato Celda Gráficos Evaluación Paletas Ventana Ayuda
WOLFRAM MATHEMATICA | EDICIÓN PARA ESTUDIANTES
Demostraciones | MathWorld | Comunidad Wolfram | Help

v2: acerca de la generación de diagramas "admisibles"
=> filtros universal[lista]/connected[lj]/furry[lj]/amputate0[lj]/amputateFer[lj]

(*ahora necesitamos filtrar/grupar: conectado, amputado, furry, ...*)
(*regenerate all admissible diags*)
testNr = 1;
Print["all diagrams with ", testNr, " internal photons"]
|escribe
all = genAll[testNr]
graph3 / @ %
Length[all]
|longitud
(*def some criteria for filters*)
universal[lj_] := Length[lj] == 1;
|longitud
connected[lj_] := Length[lj /. {l1_>, {a1_>, a2_>, a3_>}, l2_>, {a4_>, a2_>, a5_>}, l3_>} -> {l11, l12, {a1, a2, a3, a4, a5}, l13}] == 1;
|longitud
furry[lj_] := Or @@ OddQ /@ Length /@ DeleteCases[lj, {-2, ___}];
|longitud |elimina casos
amputate0[lj_] :=
  MemberQ[lj /. {-2, ___} -> {} /. {l1_>, {0, l2_>}, l3_>} -> {l1, l3, {0, l2}}] /.
  |contenido en?
  {l1_>, {l12_>, a_>, l12_>}, l2_>, {0, l13_>, a_>, l14_>}} -> {l1, l2, {0, l11, l12, l13, l14}} /. {0, l12_>, a_>, l13_>} -> {0, l11, l12, l13}, {0, a_>};
amputateFer[lip_] := Max[Length /@ (lip /. {l1_>, {-2, l1_>, -1}, l2_>} -> Table[{help = TakeList[{-2, l1, -1}, {k, Length[{l1}] + 2 - k}]]);
  |mk |longitud |longitud |ajusta |toma lista |longitud
  If[Intersection @@ help == {}, Join[{l1}, {l2}, help], {}], {k, 2, Length[{l1}]}] /.
  |Intersección |junta |longitud
  {l1_>, {l1_>, a_>, l2_>}, l2_>, {l3_>, a_>, l4_>, -1}} -> {l11, l12, {l1, l2, l3, l4, -1}}] > 1;

(*apply individual filters*)
Print["universal contributions"]
|escribe
Select[all, universal[#] &]

```

```

tesis20.diagsV4 (1).nb - Wolfram Mathematica 12.1 Student Edition - uso personal solamente
Archivo Edición Insertar Formato Celda Gráficos Evaluación Paletas Ventana Ayuda
WOLFRAM MATHEMATICA | EDICIÓN PARA ESTUDIANTES
Demostraciones | MathWorld | Comunidad Wolfram | Help

Select[all, universal[#] &]
|selecciona
graph3 / @ %

Print["connected diagrams"]
|escribe
Select[all, connected[#] &]
|selecciona
graph3 / @ %

Print["Furry diagrams"]
|escribe
Select[all, furry[#] &]
|selecciona
graph3 / @ %

Print["amputate0 diagrams"]
|escribe
Select[all, amputate0[#] &]
|selecciona
graph3 / @ %

Print["amputateFer diagrams"]
|escribe
Select[all, amputateFer[#] &]
|selecciona
graph3 / @ %

(*combine filters*)
Print["connected / NOTfurry / NOTamputate0 / NOTamputateFer(not yet fully implemented)"]
|escribe
Select[all, And[connected[#], Not[furry[#]], Not[amputate0[#]], Not[amputateFer[#]]] &]
|selecciona |operación y |negación |negación |negación

```

tesis20.diagsV4 (1).nb - Wolfram Mathematica 12.1 Student Edition - uso personal solamente

Archivo Edición Insertar Formato Celda Gráficos Evaluación Paletas Ventana Ayuda

WOLFRAM MATHEMATICA | EDICIÓN PARA ESTUDIANTES

Demostraciones | MathWorld | Comunidad Wolfram | Help

```
Print["connected / NOTfurry / NOTamputate0 / NOTamputateFer(not yet fully implemented)"]
Select[all, And[connected[#], Not[furry[#]], Not[amputate0[#]], Not[amputateFer[#]]] &]
graph3 / @ %
Length[%]
all diagrams with 1 internal photons
```

Out[ ] := {{{{-2, 0, 1, 1, -1}}, {{-2, 1, 0, 1, -1}}, {{-2, 1, 1, 0, -1}}, {{1}, {-2, 0, 1, -1}}, {{1}, {-2, 1, 0, -1}}, {{0}, {-2, 1, 1, -1}}, {{1, 1}, {-2, 0, -1}}, {{0, 1}, {-2, 1, -1}}, {{1}, {-2, 1, -1}}, {{1}, (1), {-2, 0, -1}}, {{0}, (1), {-2, 1, -1}}}}

tesis20.diagsV4 (1).nb - Wolfram Mathematica 12.1 Student Edition - uso personal solamente

Archivo Edición Insertar Formato Celda Gráficos Evaluación Paletas Ventana Ayuda

WOLFRAM MATHEMATICA | EDICIÓN PARA ESTUDIANTES

Demostraciones | MathWorld | Comunidad Wolfram | Help

```
Out[ ] := 10
universal contributions
```

Out[ ] := {{{{-2, 0, 1, 1, -1}}, {{-2, 1, 0, 1, -1}}, {{-2, 1, 1, 0, -1}}}}

```
connected diagrams
```

Out[ ] := {{{{-2, 0, 1, 1, -1}}, {{-2, 1, 0, 1, -1}}, {{-2, 1, 1, 0, -1}}, {{1}, {-2, 0, 1, -1}}, {{1}, {-2, 1, 0, -1}}, {{0}, (1), {-2, 1, -1}}}}

```
Furry diagrams
```

Out[ ] := {{{(1), {-2, 0, 1, -1}}, {{1}, {-2, 1, 0, -1}}, {{0}, {-2, 1, 1, -1}}, {{1}, (1), {-2, 0, -1}}, {{0}, (1), {-2, 1, -1}}}}

tesis20.diagsV4 (1).nb - Wolfram Mathematica 12.1 Student Edition - uso personal solamente

Archivo Edición Insertar Formato Celda Gráficos Evaluación Paletas Ventana Ayuda

WOLFRAM MATHEMATICA EDICIÓN PARA ESTUDIANTES Demostraciones MathWorld Comunidad Wolfram Help

**Furry diagrams**

Out[ ]:= {{{{1}, {-2, 0, 1, -1}}, {{1}, {-2, 1, 0, -1}}, {{0}, {-2, 1, 1, -1}}, {{1}, {1}, {-2, 0, -1}}, {{0}, {1}, {-2, 1, -1}}}}

**amputate0 diagrams**

Out[ ]:= {{{{0, 1}, {-2, 1, -1}}}}

**amputatefer diagrams**

Out[ ]:= {{{{-2, 0, 1, 1, -1}}, {{-2, 1, 1, 0, -1}}, {{1}, {-2, 0, 1, -1}}, {{1}, {-2, 1, 0, -1}}}}

tesis20.diagsV4 (1).nb - Wolfram Mathematica 12.1 Student Edition - uso personal solamente

Archivo Edición Insertar Formato Celda Gráficos Evaluación Paletas Ventana Ayuda

WOLFRAM MATHEMATICA EDICIÓN PARA ESTUDIANTES Demostraciones MathWorld Comunidad Wolfram Help

**connected / NOTfurry / NOTamputate0 / NOTamputatefer (not yet fully implemented)**

Out[ ]:= {{{{-2, 1, 0, 1, -1}}}}

Out[ ]:= 1

```

In[ ]:= (*aplicación. comparar con literatura!*)
testNr = 2;
(*generar*)
all = genAll[testNr];
Print["generated ", Length[all], " diagrams with ", testNr, " internal photons"]
(*filtrar*)
part = Select[all, And[connected[#], Not[furry[#]], Not[amputate0[#]], Not[amputatefer[#]]] &];
Print["of those, there are ", Length[part], " connected / NOTfurry / NOTamputate0 / NOTamputatefer"]
(*graficar*)
graph3 /@ part
generated 90 diagrams with 2 internal photons
of those, there are 7 connected / NOTfurry / NOTamputate0 / NOTamputatefer
    
```

tesis20.diagsV4 (1).nb - Wolfram Mathematica 12.1 Student Edition - uso personal solamente

Archivo Edición Insertar Formato Celda Gráficos Evaluación Paletas Ventana Ayuda

WOLFRAM MATHEMATICA | EDICIÓN PARA ESTUDIANTES

Demostraciones | MathWorld | Comunidad Wolfram | Help

```
(*graficar*)
graph3 / @ part
generated 90 diagrams with 2 internal photons
of those, there are 7 connected / NOTFurry / NOTamputate0 / NOTamputateFer
```

```
Out[ ]:= (*ver grupos con el mismo nro de lepton loops*)
Tally[Length / @ part]
Select[part, Length[#] == 1 &]
graph3 / @ %
Select[part, Length[#] == 2 &]
graph3 / @ %
```

tesis20.diagsV4 (1).nb - Wolfram Mathematica 12.1 Student Edition - uso personal solamente

Archivo Edición Insertar Formato Celda Gráficos Evaluación Paletas Ventana Ayuda

WOLFRAM MATHEMATICA | EDICIÓN PARA ESTUDIANTES

Demostraciones | MathWorld | Comunidad Wolfram | Help

```
graph3 / @ %
Select[part, Length[#] == 2 &]
graph3 / @ %
```

```
Out[ ]:= {{1, 6}, {2, 1}}
```

```
Out[ ]:= {{{{-2, 1, 0, 2, 2, 1, -1}}, {{-2, 1, 2, 0, 2, 1, -1}}, {{-2, 1, 2, 2, 0, 1, -1}}, {{-2, 1, 0, 2, 1, 2, -1}}, {{-2, 1, 2, 0, 1, 2, -1}}, {{-2, 1, 2, 1, 0, 2, -1}}}}
```

```
Out[ ]:= {{{{1, 2}, {-2, 1, 0, 2, -1}}}}
```

```
Out[ ]:= {{-2, 1, 0, 2, -1}}
```

```

tesis20.diaqv4 (1).nb - Wolfram Mathematica 12.1 Student Edition - uso personal solamente
Archivo Edición Insertar Formato Celda Gráficos Evaluación Paletas Ventana Ayuda
WOLFRAM MATHEMATICA | EDICIÓN PARA ESTUDIANTES Demostraciones | MathWorld | Comunidad Wolfram | Help

play with drawing AMM QED diaqs: Version1 (01.Oct.2020)
Version2 (08.Oct.2020)
(como NO hacer la generación de todos los diaqs)
Version3 (22.Oct.2020)

* genAll2 improved 4+ loop double counting due to photon renumbering symm in multiple lepton loops
* amputate0: not yet correct at 4+ loops eg {{{-2,1,2,3,-1},{0,4},{1,4,3,2}}}

In[ ]:= Exit[];
|detén núcl

copiar las defs de v2

In[ ]:= (*1: def graph3. para convertir y graficar listas de indices*)
ClearAll[list2prop2];
|borra todo
list2prop2[diag_]:=
diag /. {el[l1_ ]->el[l1] * f[l1], po[l1_ ]->el[l1] * f[l1], po[]->1, el[]->1} /. {f[l1_ ] * f[l2_ ]^n_>f[l1, l2] * f[l2]^(n-1), f[l1_ ] * f[l2_ ]->
f[l1, l2]} /. {f[l1_ ], a_ /; a <= 0, l1_ ]-> f[l1, l2]} /. {f[l1_ ], a_ , l2_ ], a_ , l3_ ]-> f[l1, l2, l3, a]} /.
f[l1_ ]-> f[l1] * Apply[ph, 10 + Range[Length[{l1}]]] /.
|aplica |range |longitud
{el[l1_ ], a_ , l2_ ]^n_ * f[l3_ ], a_ , l4_ ] * ph[b_ , l5_ ]-> el[l1, a, l2]^(n-1) * el[l1, b, l2] * f[l3, l4] * ph[l5, a + b],
el[l1_ ], a_ , l2_ ] * f[l3_ ], a_ , l4_ ] * ph[b_ , l5_ ]-> el[l1, b, l2] * f[l3, l4] * ph[l5, a + b]} /. f[]->1 /. el[a_ /; a # - 2, l1_ ]-> el[a, l1, a] /.
el[l1_ ], a_ Integer, b_ , l2_ ]-> el[l1, a + b, l2] /. el[l1_ ], a_ Integer-> el[l1] /. el[l1_ ]-> el[l1, l2] /. el[l1_ ]-> el[l1] * ph[0 + - 3] /.
|entrada |entrada
ph[l1_ ] * ph[l2_ ]-> ph[l1, l2];
(*simple drawing of the graph version 2*)
ClearAll[graph2];

```

```

tesis20.diaqv4 (1).nb - Wolfram Mathematica 12.1 Student Edition - uso personal solamente
Archivo Edición Insertar Formato Celda Gráficos Evaluación Paletas Ventana Ayuda
WOLFRAM MATHEMATICA | EDICIÓN PARA ESTUDIANTES Demostraciones | MathWorld | Comunidad Wolfram | Help

|ph[l1_ ] * ph[l2_ ]-> ph[l1, l2]
(*simple drawing of the graph version 2*)
ClearAll[graph2];
|borra todo
graph2[prop_]:= prop /. el[l1_ ] * ph[l2_ ]-> Graph[Join[{l1}], Map[Style[UndirectedEdge @ #, Red] &, {l2}], VertexLabels->"Name"];
|grafic |suma |graf |estilo |lista no direccional |prop |etiquetas de vértices
(*wrapper to directly draw lists*)
graph3[l1_]:= graph2@list2prop2@ (Times @ el @ l1);
|multiplicación

(*2: def genAll. para generar todas las listas admisibles y sin repeticiones*)
(*all permutations of vertices, up to photon renumbering symm*)
ClearAll[insert1, insert2, vrt];
|borra todo
insert1[set_ , new_]:= Table[Insert[set, new, j], {j, 1 + FirstPosition[set, new - 1][[1]], Length[set] + 1}];
|tabla |inserta |primera posición |longitud
insert2[set_ , new_]:= Table[Insert[set, new, j], {j, 1 + FirstPosition[set, new][[1]], Length[set] + 1}];
|tabla |inserta |primera posición |longitud
vrt[nroFotones_]:= Module[{sets = {}},
|include
Do[sets = Join @@ Map[insert1[#, k] &, sets];
|repite |suma |aplica a todos
sets = Join @@ Map[insert2[#, k] &, sets], {k, 1, nroFotones}];
|suma |aplica a todos
sets = Map[Drop[#, 1] &, sets];
|apl |elimina
Join @@ Map[Table[Insert[#, 0, j], {j, 1, Length[#] + 1}] &, sets];
|suma |apl |tabla |inserta |longitud
(*split into different fermion chains*)
splits[nroFotones_]:= Join @@ Permutations /@ IntegerPartitions@ (1 + 2 nroFotones);
|suma |permutaciones |particiones de entero
(*the extra fer loops are cyclesymm in arguments*)
cyc[test_]:= First@Sort@Table[RotateLeft[test, k], {k, 1, Length[test]}];
|primero |oro- |table |rota a la izquierda |longitud

```

```

tesis20.diagsV4 (1).nb - Wolfram Mathematica 12.1 Student Edition - uso personal solamente
Archivo Edición Insertar Formato Celda Gráficos Evaluación Paletas Ventana Ayuda
WOLFRAM MATHEMATICA | EDICIÓN PARA ESTUDIANTES
Demostraciones | MathWorld | Comunidad Wolfram | Help

cyc[test_] := First@Sort@Table[RotateLeft[test, k], {k, 1, Length[test]}];
(*take into account internal photon renumbering in lepton loops*)
min[l_i] := (help = Cases[Tally@Flatten[l_i], {a, 2} -> a]; First@Sort@Map[Sort[cyc /@ (l_i /. Thread[help -> #])] &, Permutations@help]);
(*wrapper to generate all lists*)
genAll2[l_p_] :=
DeleteDuplicates@Map[Join[{Join[-2], First[#], {-1}], min[Drop[#, 1]]] &, Join@@Table[Map[TakeList[#, splits[l_p][[k]]] &, vrt[l_p]], {k, 1, Length[splits[l_p]}]];
(*wrapper to generate all lists*)
genAll[l_p_] :=
DeleteDuplicates@Map[Sort[cyc /@ ReplacePart[#, 1 -> Join[-2], #[1]], {-1}]] &, Join@@Table[Map[TakeList[#, splits[l_p][[k]]] &, vrt[l_p]], {k, 1, Length[splits[l_p]}]];

(*3: def filtros. para agrupar diags con ciertas características*)
(*def some criteria for filters*)
universal[l_i_] := Length[l_i] == 1;
connected[l_i_] := Length[l_i] /. {l1___, {a1___, a2___, a3___}, l2___, {a4___, a2___, a5___}, l3___} -> {l11, l12, {a1, a2, a3, a4, a5}, l13} == 1;
furry[l_i_] := Or@@OddQ@Length/DeleteCases[l_i, {-2, ___}];
amputate0[l_i_] :=
MemberQ[l_i /. {-2, ___} -> {} /. {l1___, {0, l2___}, l3___} -> {l1, l3, {0, l2}}] /.
{l1___, {l11___, a_, l12___}, l2___, {0, l13___, a_, l14___} -> {l1, l2, {0, l11, l12, l13, l14}} /. {0, l11___, a_, l12___, a_, l13___} -> {0, l11, l12, l13}, {0, a_}];
amputateFer[l_ip_] := Max[Length /@ (l_ip /. {l1___, {-2, l1___, -1}, l2___} -> Table[help = TakeList[-2, l1, -1], {k, Length[l1] + 2 - k}]];
If[Intersection@help == {}, Join[{l11}, {l12}, help], {}]]], {k, 2, Length[l1]}] /.
{l1___, {l11___, a_, l12___}, l2___, {l3___, a_, l4___, -1}} -> {l11, l12, {l1, l2, l3, l4, -1}}] > 1;

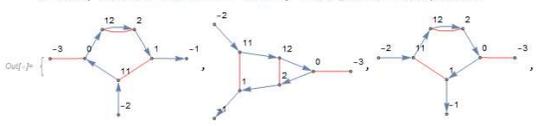
```

```

tesis20.diagsV4 (1).nb - Wolfram Mathematica 12.1 Student Edition - uso personal solamente
Archivo Edición Insertar Formato Celda Gráficos Evaluación Paletas Ventana Ayuda
WOLFRAM MATHEMATICA | EDICIÓN PARA ESTUDIANTES
Demostraciones | MathWorld | Comunidad Wolfram | Help

aplicación
In[ ] := (*aplicar las funciones graph3, genAll, y los filtros. para comparar con literatura*)
testNr = 2;
(*generar*)
all = genAll2[testNr];
Print["generated ", Length[all], " diagrams with ", testNr, " internal photons"]
(*filtrar*)
part = Select[all, And[connected[#], Not[furry[#]], Not[amputate0[#]], Not[amputateFer[#]]] &];
Print["of those, there are ", Length[part], " connected / NOTfurry / NOTamputate0 / NOTamputateFer"]
(*graficar*)
graph3 /@ part
generated 88 diagrams with 2 internal photons
of those, there are 7 connected / NOTfurry / NOTamputate0 / NOTamputateFer

```



```

tesis20.diagsV4 (1).nb - Wolfram Mathematica 12.1 Student Edition - uso personal solamente
Archivo Edición Insertar Formato Celda Gráficos Evaluación Paletas Ventana Ayuda
WOLFRAM MATHEMATICA | EDICIÓN PARA ESTUDIANTES
Demostraciones | MathWorld | Comunidad Wolfram | Help

(*dividir en grupos con definido nro de lepton loops*)
splitlep[l_i_] := Map[Print[Length[#], " diags with ", Length[#][[1]] - 1, " lepton loops:\n", #, "\n", graph3 /@ #] &, GatherBy[l_i, Length]];
(*aplicar la nueva funcion*)
splitlep[part];
1 diags with 0 lepton loops:
{{{-2, 1, 0, 1, -1}}}

```



```

tesis20.diagsV4 (1).nb - Wolfram Mathematica 12.1 Student Edition - uso personal solamente
Archivo Edición Insertar Formato Celda Gráficos Evaluación Paletas Ventana Ayuda
WOLFRAM MATHEMATICA EDICIÓN PARA ESTUDIANTES Demostraciones MathWorld Comunidad Wolfram Help

testing / desarrollo de código

TODO
* PRIORITY improve amputate0
* speed up code
* simplify code
* improve graphic representation

(*aplicar las funciones graph3, genAll, y los filtros. para comparar con literatura*)
(*0loop. all/filtered diags 1/1*)
(*1loop. all/filtered diags 10/1*)
(*2loop. all/filtered diags 88/7(6+1)*)
(*3loop. 1sec. all/filtered diags 858/72(50+21+1)*)
(*4loop. 45-83sec. all/filtered diags 9686/897(518ok;327+51+1#373:6 too many)*)
(*5loop. 5506sec, all/filtered diags 367824/14956 *)
testNr = 4;
(*generar*)
AbsoluteTiming[all = genAll2[testNr];]
duración absoluta
Print["generated ", Length[all], " diagrams with ", testNr, " internal photons"]
escribe longitud
(*filtrar*)
AbsoluteTiming[part = Select[all, And[connected[#], Not[furry[#]], Not[amputate0[#]], Not[amputateFer[#]]] &];]
duración absoluta selección operación y negación negación negación
Print["of those, there are ", Length[part], " connected / NOTfurry / NOTamputate0 / NOTamputateFer"]
escribe longitud

Map[Print[Length[#], " diags with ", Length[#][[1]] - 1, " lepton loops"] &, GatherBy[part, Length]]
spi describe longitud agrupa por longitud

Out[ ]> {82.8757, Null}

generated 9686 diagrams with 4 internal photons

Out[ ]> {0.832914, Null}

```

```

tesis20.diagsV4 (1).nb - Wolfram Mathematica 12.1 Student Edition - uso personal solamente
Archivo Edición Insertar Formato Celda Gráficos Evaluación Paletas Ventana Ayuda
WOLFRAM MATHEMATICA EDICIÓN PARA ESTUDIANTES Demostraciones MathWorld Comunidad Wolfram Help

Out[ ]> {0.832914, Null}

of those, there are 897 connected / NOTfurry / NOTamputate0 / NOTamputateFer
518 diags with 0 lepton loops
327 diags with 1 lepton loops
51 diags with 2 lepton loops
1 diags with 3 lepton loops

Out[ ]> {Null, Null, Null, Null}

(*need to improve this fct*)
amputate0[l1_] :=
MemberQ[l1 /. {-2, ___} -> {} /. {l1___, {0, l2___}, l3___} -> {l1, l3, {0, l2}}] //
[[contiene en?]]
{l1___, {l1___, a_, l2___}, l2___, {0, l3___, a_, l4___}} -> {l1, l2, {0, l11, l12, l13, l14}} // . {0, l1___, a_, l2___, a_, l3___} -> {0, l11, l12, l13}, {0, a_}}];

In[ ]> (*amputate0 strategy destroys some cuts by sucking in too many other lepLoops*)
Select[part, Length[#] == 3 &][[23]]
selecciona longitud
graph3 / @ %
amputate0 / @ % %
%% /. {-2, ___} -> {} /. {l1___, {0, l2___}, l3___} -> {l1, l3, {0, l2}}

Out[ ]> {{{{-2, 1, 2, 3, -1}, {0, 4}, {1, 4, 3, 2}}}}



Out[ ]> {False}

```

tesis20.diagsV4 (1).nb - Wolfram Mathematica 12.1 Student Edition - uso personal solamente

Archivo Edición Insertar Formato Celda Gráficos Evaluación Paletas Ventana Ayuda

WOLFRAM MATHEMATICA | EDICIÓN PARA ESTUDIANTES

Demostraciones | MathWorld | Comunidad Wolfram | Help

```

Out[ ]:= {False}

Out[ ]:= {{}, {1, 4, 3, 2}, {0, 4}}

In[ ]:= (*example*)
test = {{-2, 1, 2, 3, -1}, {0, 4}, {1, 4, 3, 2}}
graph3@test
amputate0@test

Out[ ]:= {{-2, 1, 2, 3, -1}, {0, 4}, {1, 4, 3, 2}}

Out[ ]:=

Out[ ]:= False

In[ ]:= (*test*)
test = {{-2, 1, -1}, {0, 2, 3, 4}, {1, 4, 3, 2}}
graph3@test
amputate0[l1_] :=
MemberQ[l1 /. {-2, ___} -> {} /. {l1___, {0, l2___}, l3___} -> {11, 13, {0, 12}}] /.
  |<contenido en?>

```

tesis20.diagsV4 (1).nb - Wolfram Mathematica 12.1 Student Edition - uso personal solamente

Archivo Edición Insertar Formato Celda Gráficos Evaluación Paletas Ventana Ayuda

WOLFRAM MATHEMATICA | EDICIÓN PARA ESTUDIANTES

Demostraciones | MathWorld | Comunidad Wolfram | Help

```

graph3@test
amputate0[l1_] :=
MemberQ[l1 /. {-2, ___} -> {} /. {l1___, {0, l2___}, l3___} -> {11, 13, {0, 12}}] /.
  |<contenido en?>
{ l1___, {l1___, a_, l12___}, l2___, {0, l13___, a_, l14___} -> {11, 12, {0, 111, 112, 113, 114}}] /. {0, l1___, a_, l12___} -> {0, 111, 112, 113}, {0, a_};
test /. {-2, ___} -> {} /. {l1___, {0, l2___}, l3___} -> {11, 13, {0, 12}}] /. {l1___, {l1___, a_, l12___}, l2___, {0, l13___, a_, l14___} -> {11, 12, {0, 111, 112, 113, 114}}] /.
{0, l1___, a_, l12___, a_, l13___} -> {0, 111, 112, 113}
amputate0@test

Out[ ]:= {{-2, 1, -1}, {0, 2, 3, 4}, {1, 4, 3, 2}}

Out[ ]:=

Out[ ]:= {{}, {0, 1}}

Out[ ]:= True

In[ ]:= (*from 4loop still get duplicates it seems. 5loop 5506sec, all/filtered diags 367824/14956*)
(*remember foton indices in lepton loops. need part from testNr=4 run*)
testNr = 4;
AbsoluteTiming[
duración absoluta
allTest = DeleteDuplicates@Map[Sort[cyc /@ ReplacePart[#, 1 -> Join[{-2}, #[[1]], {-1}]]] &,
  |elimina repeticiones| apl- |ordena| |sustituye una parte| junta
Join@@Table[Map[TakeList[#, splits[testNr]][[k]]] &, vrt[testNr]], {k, 1, Length[splits[testNr]]}];
junta |tabla| apl- |toma lista| |longitud
partTest = Select[allTest, And[connected[#, Not[furry[#]], Not[amputate0[#]], Not[amputateFer[#]]] &];
|selección| |operación y| |negación| |negación| |negación|
]
Length /@ {allTest, partTest}
|longitud

```

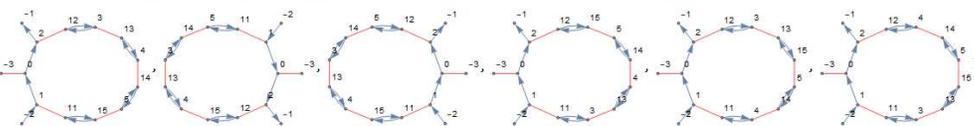
tesis20.diagsV4 (1).nb - Wolfram Mathematica 12.1 Student Edition - uso personal solamente

Archivo Edición Insertar Formato Celda Gráficos Evaluación Paletas Ventana Ayuda

WOLFRAM MATHEMATICA EDICIÓN PARA ESTUDIANTES

Demostraciones | MathWorld | Comunidad Wolfram | Help

```

Out[ ]:= {51.6712, Null}
Out[ ]:= {17518, 922}
In[ ]:= Tally[Length /@ partTest]
Out[ ]:= {{1, 518}, {2, 342}, {3, 60}, {4, 2}}
genAll2[4]
In[ ]:= (*5loops*)
Tally[Length /@ partTest]
Select[partTest, Length[#] == 5 &]
graph3 /@ %
Out[ ]:= {{1, 6354}, {2, 6245}, {3, 2181}, {4, 250}, {5, 6}}
Out[ ]:= {{{1, 5}, {2, 3}, {3, 4}, {4, 5}, {-2, 1, 0, 2, -1}}, {{1, 5}, {2, 4}, {3, 4}, {3, 5}, {-2, 1, 0, 2, -1}}, {{1, 4}, {2, 5}, {3, 4}, {3, 5}, {-2, 1, 0, 2, -1}},
{{1, 3}, {2, 5}, {3, 4}, {4, 5}, {-2, 1, 0, 2, -1}}, {{1, 4}, {2, 3}, {3, 5}, {4, 5}, {-2, 1, 0, 2, -1}}, {{1, 3}, {2, 4}, {3, 5}, {4, 5}, {-2, 1, 0, 2, -1}}}
Out[ ]:= 
In[ ]:= (*all these could be the same*)
Map[RotateRight, Select[partTest, Length[#] == 5 &] /. {-2, Li_., -1} -> {1i}]

```

tesis20.diagsV4 (1).nb - Wolfram Mathematica 12.1 Student Edition - uso personal solamente

Archivo Edición Insertar Formato Celda Gráficos Evaluación Paletas Ventana Ayuda

WOLFRAM MATHEMATICA EDICIÓN PARA ESTUDIANTES

Demostraciones | MathWorld | Comunidad Wolfram | Help

```

In[ ]:= (*all these could be the same*)
Map[RotateRight, Select[partTest, Length[#] == 5 &] /. {-2, Li_., -1} -> {1i}]

min[Li_] := (help = Cases[Tally@Flatten[Li], {a_, 2} -> a]; First@Sort@Map[Sort[cyc /@ (Li /. Thread[help -> #])] &, Permutations@help]);
DeleteDuplicatesMap[Join[{Join[-2], First[#]}, min[#], 1]} &, %]
min[{{1, 2}, {3, 4}}]
min[{{3, 2}, {2, 3}}]
Out[ ]:= {{{1, 0, 2}, {3, 5}, {2, 3}, {3, 4}, {4, 5}}, {{1, 0, 2}, {1, 5}, {2, 4}, {3, 4}, {3, 5}}, {{1, 0, 2}, {1, 4}, {2, 5}, {3, 4}, {3, 5}},
{{1, 0, 2}, {1, 3}, {2, 5}, {3, 4}, {4, 5}}, {{1, 0, 2}, {1, 4}, {2, 3}, {3, 5}, {4, 5}}, {{1, 0, 2}, {1, 3}, {2, 4}, {3, 5}, {4, 5}}}
Out[ ]:= {{{-2, 1, 0, 2, -1}, {1, 3}, {2, 4}, {3, 5}, {4, 5}}}
Out[ ]:= {{1, 2}, {3, 4}}
Out[ ]:= {{2, 3}, {2, 3}}
In[ ]:= (*check if renumbering symm catches these duplicates*)
Map[Cases[Tally@Flatten[# /. {-2, ___} -> {}], {a_, 2} -> a] &, partTest]
Out[ ]:= 

```





```

tesis20.diagsV4 (1).nb - Wolfram Mathematica 12.1 Student Edition - uso personal solamente
Archivo Edición Insertar Formato Celda Gráficos Evaluación Paletas Ventana Ayuda
WOLFRAM MATHEMATICA EDICIÓN PARA ESTUDIANTES Demostraciones MathWorld Comunidad Wolfram Help

[api] [intercala una cadena de caracteres] [api] [convierte a cadena de caracteres]

(*file output*)
file = OpenWrite[fileName];
[abre archivo para escritura]

WriteLine[file, "\\feynmandiagram {"];
[escribe línea]
Map[WriteLine[file, # <> " ,"] &, help];
[api] [escribe líneas]
Do[WriteLine[file, ToString[n] <> " -- [boson] " <> ToString[n + {p} <> " ,"], {n, 1, {p}}];
[api] [escribe líneas] [convierte a cadena de caracteres] [convierte a cadena de caracteres]
WriteLine[file, "0 -- [boson] e3 ,"];
[escribe línea]
WriteLine[file, "];"];
[escribe línea]
Close[file];
[cierra]
Print["wrote ", fileName]
[escribe]
];

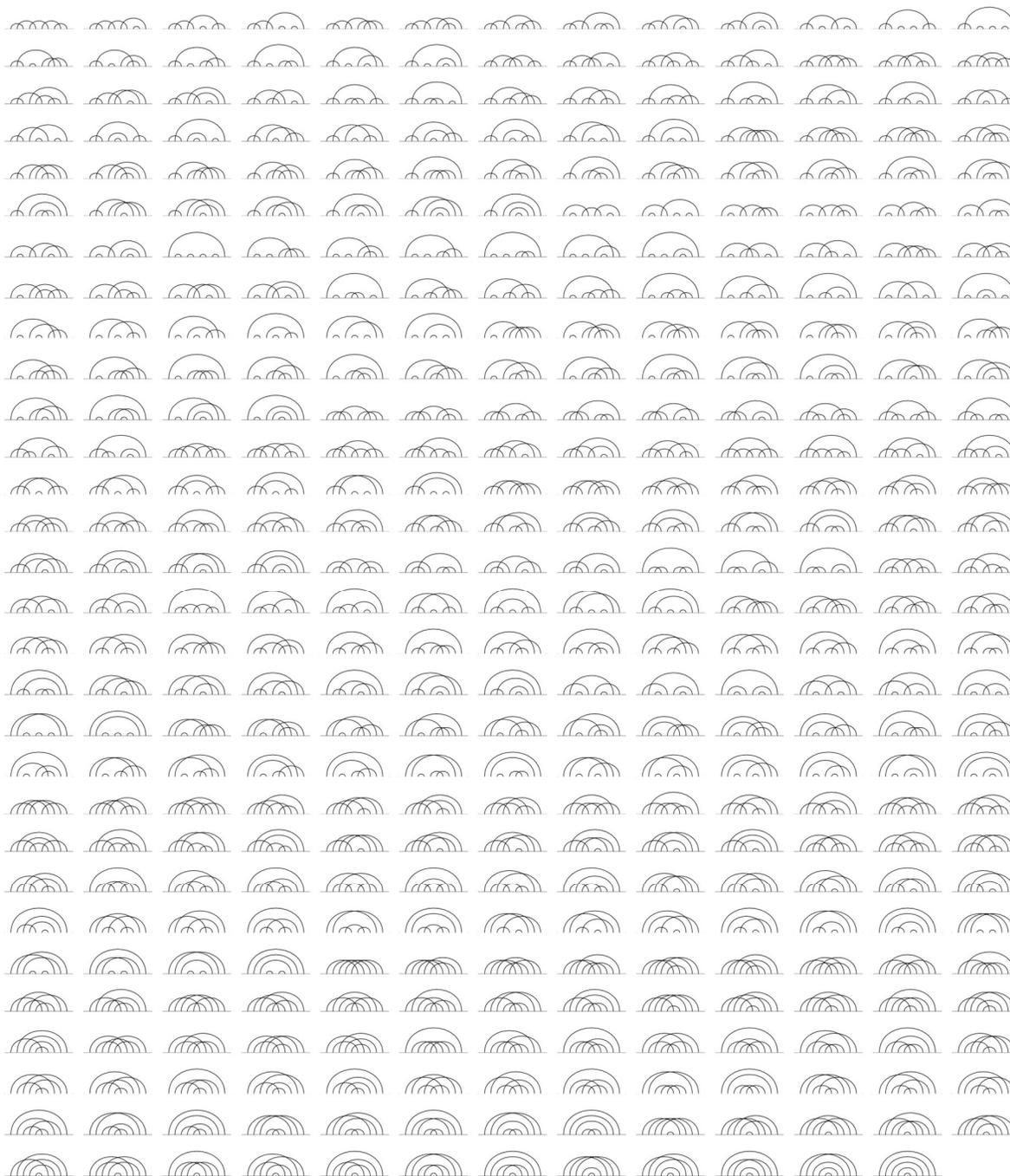
in]:= (*aplicar la nueva función a la lista "part"*)
(*loop over the list to output individual files*)
(*pick filename*)
MapIndexed[list2tikz[#1, "C:\\Users\\ldiaz\\OneDrive\\Escritorio\\Tesis" <> ToString[First[#2]] <> ".txt", testNr] &, part];
[aplica con posiciones] [convierte a primer]

wrote C:\\Users\\ldiaz\\OneDrive\\Escritorio\\Tesis7.txt
wrote C:\\Users\\ldiaz\\OneDrive\\Escritorio\\Tesis6.txt
wrote C:\\Users\\ldiaz\\OneDrive\\Escritorio\\Tesis5.txt
wrote C:\\Users\\ldiaz\\OneDrive\\Escritorio\\Tesis4.txt
wrote C:\\Users\\ldiaz\\OneDrive\\Escritorio\\Tesis3.txt
wrote C:\\Users\\ldiaz\\OneDrive\\Escritorio\\Tesis2.txt
wrote C:\\Users\\ldiaz\\OneDrive\\Escritorio\\Tesis1.txt

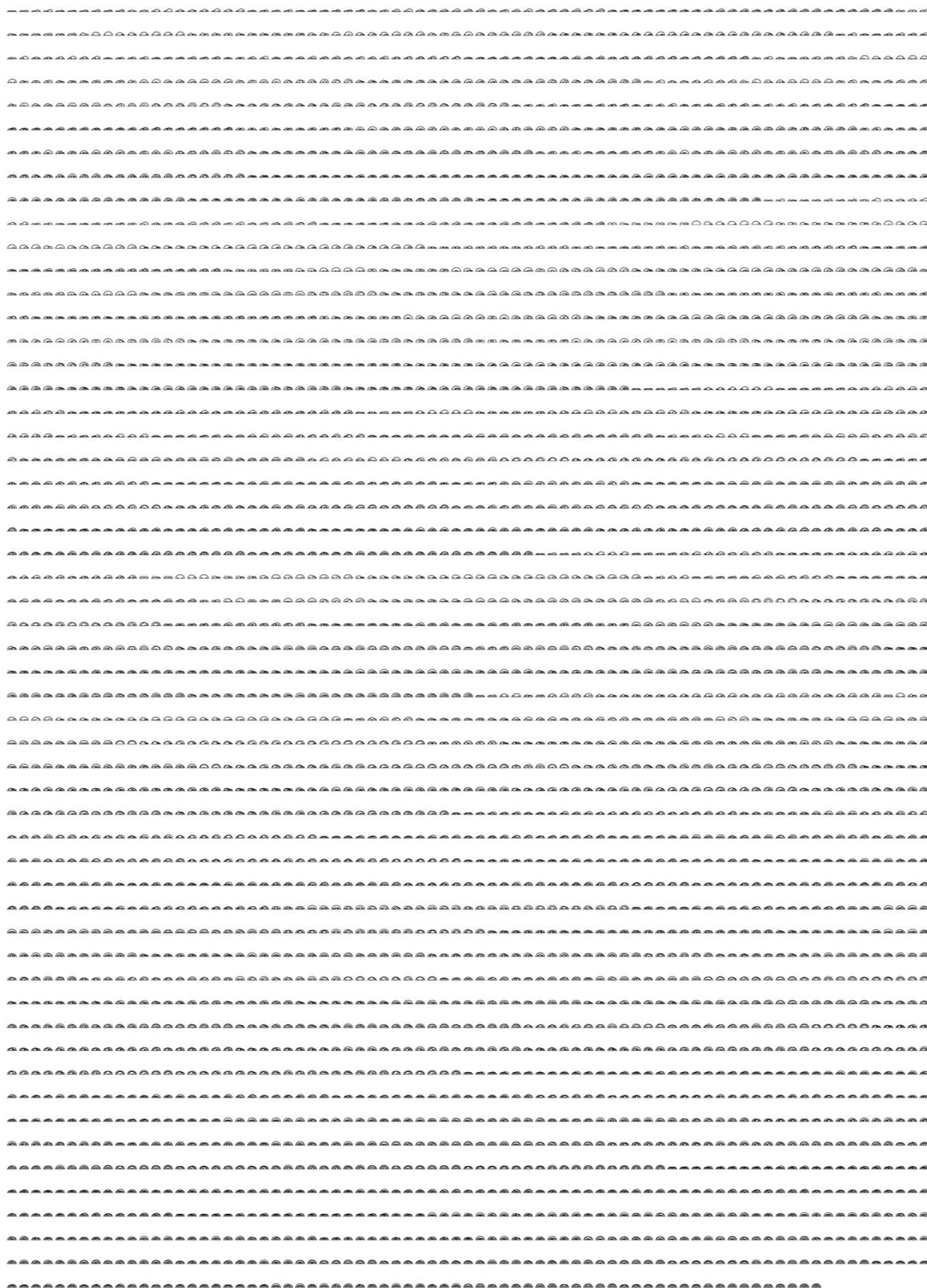
```

## Anexo B

### Superdiagrama con 5 interacciones internas

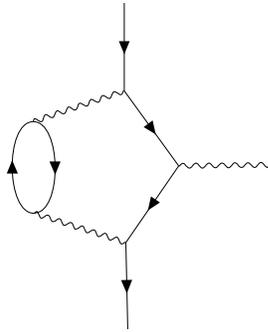


## Superdiagrama con 6 interacciones internas

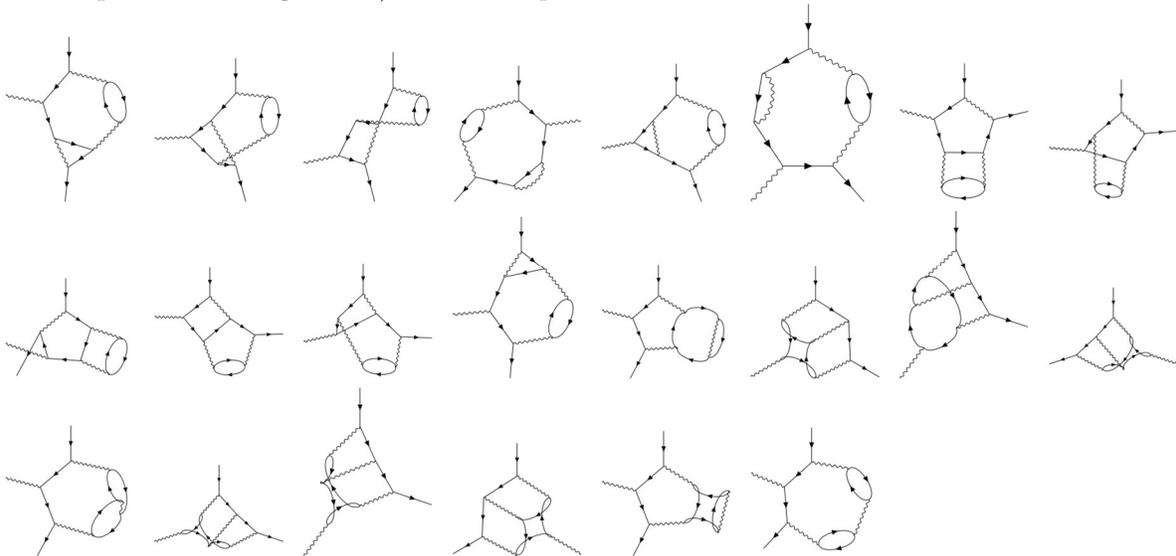


Representaciones automáticas mejoradas de diagramas con bucles de fermión interno,

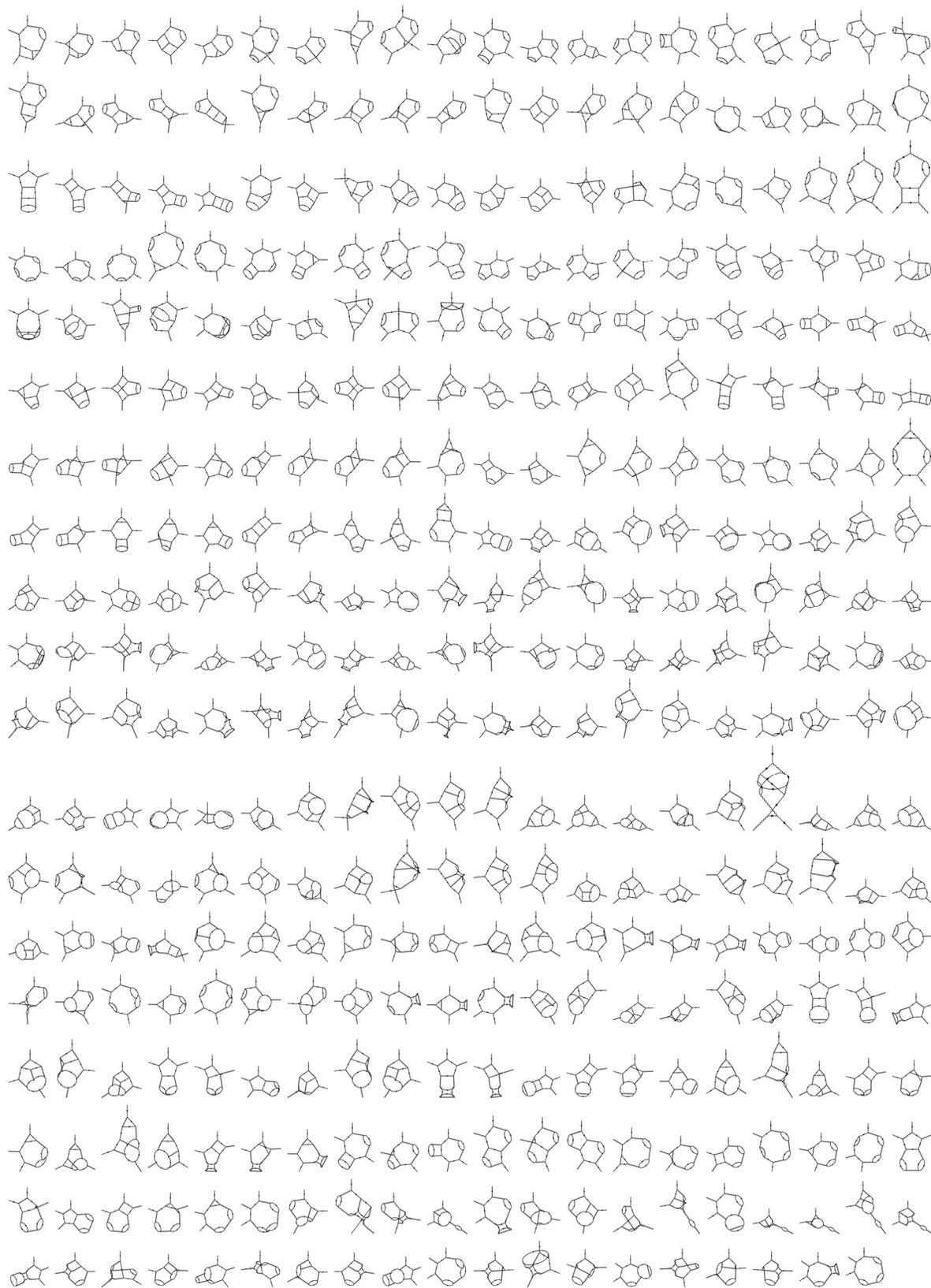
2 loop: 1 diagrama con 1 loop de fermión.



**3-loop:** 21+1=22 diags with 1/2 fermion loops



**4 loop: 327+ 51+1= 379 diagramas con 1/2/3 loop de fermiones**



## Bibliografía

- [1] The Nobel Foundation, *The Nobel Prize in Physics in 1990*, The Royal Swedish Academy of Sciences, (2002) [<https://web.archive.org/web/20030814011816/http://www.nobel.se/physics/lauraeates/1990/presentation-speech.html>].
- [2] D. Perret-Gallix, *Computational Particle Physics for Event Generators and Data Analysis*. Journal of Physics Conference Series. 454. (2013) 10.1088/1742-6596/454/1/012051.
- [3] Time Magazine *How Neil DeGrasse Tyson Would Save The World | 10 Questions | TIME*. (2008) Entrevista [<https://www.youtube.com/watch?v=wiOwqDmacJo>].
- [4] DESI, *Desplazamientos al Rojo y Distancias*, Dark Energy Spectroscopy Instrument, U.S. Department of Energy Office and Science (s.f.) [<https://www.desi.lbl.gov/redshifts-and-distance/redshifts-and-distance-en-español/>].
- [5] P. Hernández, *El Universo en Expansión*, (s.f.) [<http://astronomia.net/cosmologia/expansin.htm>].
- [6] F. Close, *Particle physics: A very short introduction*. Oxford University Press Ink (2004), New York.
- [7] P.A. Zyla et al. (Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys. (2020), 083C01.
- [8] Wikipedia, *Gran Colisionador de Hadrones*, Wikipedia, La enciclopedia libre (2020) [[https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Gran\\_colisionador\\_de\\_hadrones&oldid=127566925](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Gran_colisionador_de_hadrones&oldid=127566925)].
- [9] CERN, *The Project. A revolution has begun in the way see the universe*, CERN Accelerating science (s.f.) [<https://ilchome.web.cern.ch/ilc/project/>].
- [10] T. Espiner, *Photos: The damage that halted the LHC*. (2008) [<https://www.cnet.com/news/photos-the-damage-that-halted-the-lhc/>].
- [11] CERN, *The Large Hadron Collider*. CERN Accelerating science (s.f.) [<https://home.cern/science/accelerators/large-hadron-collider>].

- [12] Wikimedia Commons, File: *Liquid hydrogen bubblechamber.jpg*, Wikimedia Commons, the free media repository. (2017) [[https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Liquid\\_hydrogen\\_bubblechamber.jpg&oldid=266005124](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Liquid_hydrogen_bubblechamber.jpg&oldid=266005124)].
- [13] Wikimedia Commons, File: *BubbleChamber-fnal.jpg*, Wikimedia Commons, the free media repository. (2019) [<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:BubbleChamber-fnal.jpg&oldid=351342828>].
- [14] Mirror, *The hardest puzzle yet? Neutrino Detector jigsaw looks fiendishly difficult*, (2018) [[https://www.mirror.co.uk/science/hardest-puzzle-yet-neutrino-detector-13650976?utm\\_source=linkCopy&utm\\_medium=social&utm\\_campaign=sharebar](https://www.mirror.co.uk/science/hardest-puzzle-yet-neutrino-detector-13650976?utm_source=linkCopy&utm_medium=social&utm_campaign=sharebar)].
- [15] Kamioka Observatory, *Super- Kamiokande*, ICRR, Univ. of Tokyo, Higashi-Mozumi, Kamioka-cho, Hida 506-1205 Japan (2007) [<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/detector/purewater-e.html>].
- [16] CERN, *ATLAS*, CERN Accelerating science (s.f.) [<https://home.cern/science/experiments/atlas>].
- [17] CERN, *CMS*, CERN Accelerating science (s.f.) [<https://home.cern/science/experiments/cms>].
- [18] Tomé-López, *Cuaderno de Cultura Científica*, (2014) [<https://culturacientifica.com/2014/06/17/del-modelo-estandar>].
- [19] S. Weinberg, *Los tres primeros minutos del Universo*, Alianza Editorial (2009).
- [20] C. Moskowitz, *El experimento KATRIN consigue acotar masa del neutrino*, Investigación y Ciencia (2019). [<https://www.investigacionyciencia.es/noticias/el-experimento-katrin-consigue-acotar-la-masa-del-neutrino-17804>].
- [21] M. Aker, et al, *An improved upper limit on the neutrino mass from a direct kinematic method by KATRIN*, Phys. Rev. 123, 221802 (2019) [[hep-ex/1909.06048](https://arxiv.org/abs/hep-ex/1909.06048)].

- [22] A. Riveiro, *El neutrino podría ser parte de la materia oscura*, Astrobitácora (2018) [<https://www.astrobitacora.com/neutrino-podria-parte-materia-oscura/amp/>].
- [23] CPAN, *¿En qué consiste la supersimetría y cómo ayuda a explicar la Materia Oscura?*, (2013) [<https://www.i-cpan.es/detallePregunta.php?id=10>].
- [24] Loureiro, Arthur and Cuceu et al, *Upper Bound of Neutrino Masses from Combined Cosmological Observations and Particle Physics Experiments*, Phys. Rev. 123, 08 (2019) [081301].
- [25] M. Jammer, *Concepts of Mass in Contemporary Physics and Philosophy*, Princeton University Press, 162, (2000), New York.
- [26] CERN, *Heavy ions and quark- gluon plasma*, CERN Accelerating science (s.f.) [<https://home.cern/science/physics/heavy-ions-and-quark-gluon-plasma>].
- [27] Hyperphysics, *Kaons and other strange mesons*. (s.f.) [<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Particles/kaon.html>].
- [28] IFIC, *El experimento T2K presenta los resultados más precisos sobre las diferencias entre masas*. (2020) [<http://webific.ific.uv.es/web/content/el-experimento-t2k-presenta-los-resultados-m%C3%A1s-precisos-sobre-las-diferencias-entre-materia>].
- [29] CPAN, *Acercándonos al LHC - Violación CP*, (s.f.) [[https://www.lhc-closer.es/taking\\_a\\_closer\\_look\\_at\\_lhc/0.violation\\_cp/idioma/es\\_ES](https://www.lhc-closer.es/taking_a_closer_look_at_lhc/0.violation_cp/idioma/es_ES)].
- [30] S. Vonsovsky, *El magnetismo de las partículas elementales*, (1975) Editores MIR.
- [31] Soycientífico, *¿Qué son los Diagramas de Feynman?* El Factor Ciencia. (2013) [<https://elfactorciencia.wordpress.com/2013/01/25/que-son-los-diagramas-de-feynman/>].
- [32] L. Martínez, *Diagramas de Feynman*. NUSGREM - Asociación Nacional de Estudiantes de Física. (2018) [<https://nusgrem.es/diagramas-de-feynman/>].
- [33] Science Direct, *The muon g-2*. (2009) [[https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0370157309001306?casa\\_token=qxcXrulxRuoAAAAA:bq6lts\\_vP8BetKkgaU7hFaA\\_ZI39D8mqXC91RKIXgMTujkJB0u6Kz6i-xbJCT0FCGZ43uSgE](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0370157309001306?casa_token=qxcXrulxRuoAAAAA:bq6lts_vP8BetKkgaU7hFaA_ZI39D8mqXC91RKIXgMTujkJB0u6Kz6i-xbJCT0FCGZ43uSgE)].
- [34] Wikipedia. Muon. (2020) [<https://es.wikipedia.org/wiki/Muon>]

- [35] EcuRed. Efecto Zeeman. (s. f). [[https://www.ecured.cu/Efecto\\_Zeeman](https://www.ecured.cu/Efecto_Zeeman)]
- [36] Efecto Zeeman. Portafolio Física Moderna. (s. f.) [<https://ranivale.weebly.com/efecto-zeeman.html>]
- [37] Julian Schwinger. - EcuRed. (S. f.) [[https://www.ecured.cu/Julian\\_Schwinger](https://www.ecured.cu/Julian_Schwinger)]
- [38] Villatoro, F. R. #Física Cuántica: El momento magnético anómalo del muón. La Ciencia de la Mula Francis. (2013). [<https://francis.naukas.com/2013/05/28/fisicacuantica-el-momento-magnetico-anomalo-del-muon/>]
- [39] Química.es. Ecuación de Dirac. (s. f.) [[https://www.quimica.es/enciclopedia/Ecuaci%C3%B3n\\_de\\_Dirac.html#Forma\\_de\\_la\\_ecuaci.C3.B3n](https://www.quimica.es/enciclopedia/Ecuaci%C3%B3n_de_Dirac.html#Forma_de_la_ecuaci.C3.B3n)]
- [40] Wikipedia. vértice de interacción QED para el electrón. (2008) [<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lepton-interaction-vertex-eeg.svg>]
- [41] B. Roberts, “The History of the muon ( $g - 2$ ) experiments”, SciPost Phys. Proc. 1, 032 (2019) [doi: 10.21468/SciPostPhysProc.1].
- [42] F. Jegerlehner and A. Nyffeler, “The Muon  $g-2$ ”, Phys. Rept. 477 (2009) 1 [arXiv: 0902.3360].
- [43] Fermilab, “Current Status of Muon  $g-2$  Experiment at Fermilab”, (2020) [[https://indico.cern.ch/event/838862/contributions/3609622/attachments/2054740/3445104/FPCP-2020-muon\\_g-2\\_Experiment.pdf](https://indico.cern.ch/event/838862/contributions/3609622/attachments/2054740/3445104/FPCP-2020-muon_g-2_Experiment.pdf)]
- [44] G. Charpak, F. J. M. Farley, R. L. Garwin, T. Mueller, J. C. Sens, and A. Zichichi (1994) , “The First CERN Muon  $g - 2$  experiment” En Cabibbo, N (ed). Lepton Physics en CERN y Frascati. World scientific.
- [45] J. Bailey, W. Bartl, G. Von Bochmann, R. C. A. Brown, F. J. M. Farley, H. Jöstlein, E. Picasso and R. W. Williams, “Precision measurement of the anomalous magnetic moment of the muon”, Phys. Lett. B 28, 287 (1968), [doi: 10.1016/0370-2693(68)90261-X.]
- [46] Laboratorio Nacional Argonne, “Experimento muon  $g-2$  de Fermilab: trabajando para arrojar luz sobre el modelo estándar de física de partículas”, (2020) [<https://scitechdaily.com/fermilabs-muon-g-2-experiment-working-to-shed-light-on-standard-model-of-particle-physics/>]
- [47] Wolfram Research, Inc., Wolfram Alpha Knowledgebase, Champaign, IL

- (2020).
- [48] J. Ellis, Tikz-Feynman: Feynman diagrams with Tikz, *Comput. Phys. Commun.* 210 (2017), 103-123, doi:10.1016/j.cpc.2016.08.019, [arXiv:1601.05437 [hep-ph]], <https://arxiv.org/pdf/1601.05437.pdf>.
- [49] S. Laporta, High-precision calculation of the 4-loop contribution to the electron  $g-2$  in QED, *Phys. Lett. B* 772 (2017), 232-238, doi:10.1016/j.physletb.2017.06.056, [arXiv:1704.06996 [hep-ph]], <https://arxiv.org/pdf/1704.06996.pdf>.
- [50] T. Aoyama, N. Asmussen, M. Benayoun, J. Bijnens, T. Blum, M. Bruno, I. Caprini, C. M. Carloni Calame, M. C\_e and G. Colangelo, et al. The anomalous magnetic moment of the muon in the Standard Model, doi:10.1016/j.physrep.2020.07.006, [arXiv:2006.04822 [hep-ph]], <https://arxiv.org/pdf/2006.04822.pdf>.
- [51] T. Aoyama, M. Hayakawa, T. Kinoshita and M. Nio, Tenth-Order QED Contribution to the Electron  $g-2$  and an Improved Value of the Fine Structure Constant, *Phys. Rev. Lett.* 109 (2012), 111807, doi:10.1103/PhysRevLett.109.111807, [arXiv: 1205.5368 [hep-ph]], <https://arxiv.org/pdf/1205.5368.pdf>.
- [52] Morel, L., Yao, Z., Cladé, P. *et al.* "Determination of the fine-structure constant with an accuracy of 81 parts per trillion". *Nature***588**, 61–65 (2020). [<https://doi.org/10.1038/s41586-020-2964-7>].
- [53] T. Aoyama, N. Asmussen, M. Benayoun, *et al.* "The anomalous magnetic of the muon in the standard model", Fermilab-PUB-20-207-T (2020) [arXiv: 2006.04822v1].
- [54] Wolchover, N. "Los Físicos precisan el número mágico que da forma al universo". (2020). [<https://www.quantamagazine.org/physicists-measure-the-magic-fine-structure-constant-20201202/>]
- [55] Wilczynska, MR, Webb, JK, Bainbridge, M., Barrow, JD, Bosman, SEI, Carswell, RF, Pasquini, L. (2020). *Cuatro mediciones directas de la constante de estructura fina hace 13 mil millones de años. Science Advances*, 6 (17), eaay9672. [Doi: 10.1126 / sciadv.aay9672]