

Universidad Nacional de La Plata
Facultad de Ciencias Exactas
Departamento de Física



Tesis de Maestría
Maestría en Física Contemporánea

Evolución del concepto de elementalidad
Una propuesta de enseñanza basada en el uso de
herramientas TIC

Prof. Agustín Ozores Paci
Director: Dr. Carlos García Canal

La Plata, Diciembre de 2016

Resumen

Se presenta en este trabajo una propuesta didáctica con uso de TIC's que aborda la evolución en el concepto de *elementalidad*. La propuesta incluye la elaboración de un texto sobre la evolución de las ideas en torno a los constituyentes básicos de la materia, la creación de un conjunto de actividades sobre la física de partículas y la construcción de un sitio web dedicado al tema. Las actividades se desarrollan en torno al fenómeno de *scattering*, y tienen como objeto incorporar un conjunto de conceptos centrales para comprender el trabajo en física de partículas elementales. Todo el material desarrollado se encuentra alojado en el sitio web creado para la presente propuesta didáctica.

El trabajo se compone de ocho capítulos. En el capítulo primero se justifica la realización del trabajo y se plantean los objetivos del mismo. En el segundo capítulo se realiza una revisión de investigaciones en enseñanza de la Física Moderna y de propuestas didácticas con uso de TIC's. El tercer capítulo consta de una descripción de la propuesta en cuestión. Los capítulos 4 y 5 presentan respectivamente las dos partes del texto sobre la evolución del concepto de elementalidad, elaborado para docentes interesados en la temática. En los capítulos 6 y 7 se describe la metodología y los resultados de aplicación de la propuesta con alumnos de profesorado en Física. Finalmente, el último capítulo presenta las conclusiones generales del trabajo.

La presentación de la propuesta se realizó con un grupo de alumnos de Profesorado en Física y Física Aplicada, del Instituto Nacional Superior del Profesorado Técnico (INSPT - UTN) en el marco de la materia Física Contemporánea II. La evaluación de la puesta en práctica se llevó a cabo mediante las observaciones de clase, discusiones posteriores a las actividades, resolución de cuestionarios y la concreción de una encuesta anónima. Los resultados se conciben en forma descriptiva, dado que el número de alumnos no fue suficiente como para efectuar una estadística confiable. Luego del desarrollo de las actividades, los alumnos han manifestado abiertamente su interés en los temas trabajados. Sin embargo, las encuestas muestran que los alumnos no consideran que la enseñanza de partículas elementales debe ser una prioridad en el nivel medio, lo cual puede ser un disparador para trabajos futuros sobre la concepción de los alumnos de Profesorado en Física sobre la enseñanza de temas Física Contemporánea en el nivel medio.

Agradecimientos

Me gustaría en estas líneas extender mi agradecimiento a todas las personas que, de una u otra forma, colaboraron tanto con mi formación profesional como con la culminación de este trabajo de Maestría.

A todos los docentes de la Maestría. En particular a la Dra. Graciela Punte y a la Dra. Marcela Fernández van Raap, quienes nos han abierto las puertas de sus laboratorios. También al Dr. Rodolfo Borsi, quien ha arbitrado los medios para minimizar la pérdida de clases durante la inundación del edificio del Departamento de Física en 2013.

Al Dr. Sergio Sciutto y al Dr. Huner Fancchiotti por sus sugerencias y por su apoyo en la realización de este trabajo.

Al Dr. Hernan Wahlberg, quien gentilmente ha compartido conmigo sus experiencias sobre la realización del International Masterclass en la UNLP en junio de 2016.

Un agradecimiento especial al Dr. Carlos García Canal, por el seguimiento, el apoyo y la dedicación en la elaboración del presente trabajo y por su fuerte compromiso con la carrera.

A mis compañeros de Maestría, Carlos Dibarbora, Gabriel Attilio y Paola Talero.

A los alumnos de la materia Física Contemporánea II (2016) de la Tecnicatura en Física y Física Aplicada, del INSPT, por su predisposición para el trabajo con esta propuesta.

A mis compañeros y colegas del INSPT, particularmente a los profesores Marcelo Solimano y Guillermo Skop, quienes han sido y seguirán siendo modelos a seguir.

A mi esposa, a mi madre, a mi padre y a mi hermano, por la confianza, el cariño y el apoyo incondicional que me brindan todos los días.

Índice general

1	Introducción	7
1.1	Justificación	8
1.2	Objetivos	10
2	Marco Teórico	11
2.1	El uso de nuevas tecnologías en la enseñanza	11
2.2	Enseñanza de física con uso de TIC's	12
2.3	Investigaciones en enseñanza de FMC	13
2.4	Proyectos de enseñanza en FMC y en Física de Partículas Elementales	17
2.5	Base teórica para la construcción de la propuesta	19
2.5.1	Compromiso Interactivo	20
3	Descripción de la propuesta didáctica	22
3.1	Física de Partículas Elementales: un texto para profesores	22
3.2	Propuesta de actividades: Scattering en física de partículas	23
3.3	Sitio web	24
4	Elementalidad: Primera Parte	28
4.1	Introducción	28
4.2	Sobre la realidad atómico molecular de la materia	29
4.3	Sobre la cuantificación de la carga eléctrica	31
4.3.1	Experimentos de Faraday	31
4.3.2	Relación carga-masa	32
4.3.3	Experimento de Millikan	32
4.4	Modelos atómicos	33
4.4.1	Radiactividad	33
4.4.2	Los primeros modelos atómicos	34
4.4.3	Espectros atómicos y <i>cuantos</i> de luz	35
4.4.4	Modelo atómico de Bohr	37
4.5	Conceptos básicos sobre Mecánica Cuántica	38
4.5.1	Ondas de materia	39
4.5.2	La ecuación de Schrödinger	39
4.5.3	Breve reseña sobre la mecánica relativista	42

4.5.3.1	Energías típicas en física de partículas	43
4.5.4	Principio de incerteza	44
4.5.5	El átomo de hidrógeno	45
4.5.6	Espín	46
4.5.7	Principio de Exclusión	46
4.6	El núcleo atómico	47
4.6.1	Fenomenología nuclear	47
4.6.1.1	Energía de ligadura	48
4.6.1.2	Tamaño de los núcleos	48
4.6.1.3	Vida media	49
4.6.2	Decaimientos α , β y γ	50
4.6.3	Partículas virtuales y la fuerza nuclear fuerte	52
4.7	Rayos cósmicos, Materia y Antimateria.	54
4.7.1	Antimateria	56
4.8	Partículas Subnucleares: los <i>Quarks</i>	57
4.8.1	Muchas partículas	57
4.8.2	Resonancias	60
4.8.3	Los quarks	61
4.9	Interacciones fundamentales y el Modelo Estándar	63
4.9.1	El Modelo Estándar de Partículas Elementales	65
4.9.2	El papel de la simetría	67
4.9.3	Ruptura espontánea de la simetría y bosón de Higgs	67
5	Elementalidad: Segunda Parte	70
5.1	Generalidades	70
5.1.1	Aceleradores de partículas	71
5.1.2	Detectores	72
5.2	Conceptos básicos	74
5.2.1	Sección eficaz de dispersión	74
5.2.2	Sección eficaz diferencial	76
5.2.3	Luminosidad instantánea y luminosidad integrada	77
5.2.4	Decaimientos	79
5.2.5	Tasas de transición y regla de oro de Fermi	81
5.3	Relaciones entre la teoría y el experimento	82
5.3.1	Dispersión de Rutherford	83
5.3.2	Dispersión de electrones por núcleos	84
5.3.3	Dispersión hadrón-núcleo: modelo óptico	86
5.3.4	Dispersión electrón-protón	88
5.4	Evidencias en favor del Modelo Estándar	89
5.4.1	Descubrimiento de los bosones <i>W</i> y <i>Z</i>	89
5.4.2	Tres familias de leptones	91
5.4.3	Evidencia del color	91
5.4.4	Hallazgo del bosón de Higgs	93

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	6
6 Metodología	96
6.1 Características de la asignatura	97
6.2 Características generales del grupo	97
6.3 Pretest, postest y encuesta	97
6.4 Desarrollo de actividades	98
7 Resultados	100
7.1 Pretest	100
7.2 Actividades	102
7.3 Encuesta	103
7.3.1 Motivación	103
8 Conclusiones	106
Bibliografía	107
A Pretest	114
B Postest	117
C Encuesta	120

Capítulo 1

Introducción

La carrera de Maestría en Física Contemporánea, de la Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ciencias Exactas, se inició en el año 2009. Se presenta como una maestría profesional cuyo objetivo es «proveer una profundización de conceptos de la Física a través de una puesta al día en los temas fundamentales de la Física Contemporánea simultáneamente con los tópicos de la física clásica subyacente y las relaciones con otras disciplinas (...)». Con reconocimiento oficial, validez nacional (Res. Ministerial 990 / 2009 Aprobado por CONEAU) y con puntaje reconocido por la Dirección General de Cultura y Educación de la Pcia. de Bs. As. (Resol. N° 306/12)¹.

A lo largo de dos años de cursada, en modalidad presencial, se desarrollan temas de diferentes áreas de la Física Clásica (Mecánica, Ondas, Óptica, Acústica, Electromagnetismo, Termodinámica) y de la Física Contemporánea (Relatividad, Mecánica Cuántica, Materia Condensada, Física Nuclear, Física de Partículas Elementales). La finalidad es «dotar a los formadores de profesores secundarios y a los docentes de ese nivel de los conceptos actuales y las herramientas científicas para su transmisión rigurosa», entendiendo también que estos aspectos formativos colaboran para que los avances científicos lleguen al seno de la sociedad en su conjunto.

Actualmente, desde la comunicación oficial del descubrimiento del bosón de Higgs en 2012, los físicos celebran una vez más la corroboración de las predicciones teóricas del Modelo Estándar, teoría que explica las interacciones fundamentales entre partículas elementales, y que se inscribe como una de las teorías mejor corroboradas de la historia de la ciencia. Pero lo cierto es que, en proporción, es muy poca la gente que tiene un entendimiento profundo de estas ideas, en contraposición con los formidables recursos destinados a la investigación en estos y otros temas afines. Por otra parte, a pesar de que en la enseñanza oficial los nuevos lineamientos curriculares incluyen contenidos de Física Moderna y Contemporánea, raramente vemos que estos temas sean abordados en las aulas de nivel medio.

¹Sitio web de la Carrera: <http://www.fisica.unlp.edu.ar/carreras/maestria-en-fisica-contemporanea-1>

En este aspecto, existen excelentes libros de divulgación sobre temas de física de partículas. También es cierto que muchos de los libros actuales de Físicoquímica o de Física para nivel medio se encargan tíbiamente de enumerar algunas partículas subatómicas distintas del electrón, el protón y el neutrón. Sin embargo, se encuentran pocas opciones didácticas que combinen las ideas fundamentales de la física de partículas elementales con el análisis de experimentos en el área. Por lo anterior, será legítima toda intención de trasladar estos conocimientos fuera de los ámbitos de la investigación, siempre y cuando en ese traslado no sean tergiversados, y siempre que se presente a la búsqueda de la elementalidad como actividad permanente de la ciencia.

En relación con los objetivos para los cuales fue creada esta carrera, y en vista de la necesidad de abordajes adecuados para el tratamiento de temas de Física Contemporánea, tanto en la enseñanza de nivel medio como en la formación de docentes en el área de Física, se presenta en este trabajo una propuesta didáctica sobre la evolución del concepto de elementalidad, basado en el uso de herramientas TIC (Tecnologías de Información y Comunicación).

1.1 Justificación

En las últimas décadas se ha planteado la necesidad de incorporar temas de Física Moderna y Contemporánea (FMC) en los planes de estudio de nivel medio en el área de Física. En nuestro país, a partir de la última reforma educativa, los objetivos y contenidos de las disciplinas enmarcadas en las Ciencias Naturales se han modificado con respecto a los contenidos tradicionales dictados en estas áreas. En el caso de física, se han agregado a los diseños curriculares algunos temas propios de la FMC. Así es que en los Núcleos de Aprendizajes Prioritarios (NAP) aprobados por el Consejo Federal de Educación para el área de Física, se introduce «el conocimiento de nociones básicas de teorías como la Mecánica Cuántica o la Relatividad» así como el «análisis y utilización de modelos físicos, diferenciando y articulando las nociones de partícula, onda y campo». Dado que cada jurisdicción tiene la facultad de construir sus propios Diseños Curriculares basados en estos NAP, en muchos casos se incluyen temas de física moderna como efecto fotoeléctrico, dualidad onda partícula, radiactividad, física nuclear, y partículas elementales, entre otros.

Son muchas y variadas las razones para la inclusión de temas de física de altas energías en el nivel medio. En principio, permite el abordaje de ciertos esquemas fundamentales de las ciencias exactas, como ser, las leyes de conservación, la noción de invariantes, organización y clasificación de entidades físicas en función de propiedades. El esquema mismo de conservación de la masa-energía constituye el marco de análisis para la explicación de todos los fenómenos nucleares, acercando al alumno las ideas de producción de energía mediante la fisión nuclear, los desarrollos (y expectativas) en temas de fusión nuclear, fenómenos asociados a la radiactividad, etc.

A pesar de que muchos de estos contenidos figuran en los nuevos planes de estudios de la escuela media, la realidad muestra que, o bien no son llevados

al aula, o bien, son presentados como un mero relato (evolución histórica de modelos atómicos, enumeración de partículas elementales, aplicaciones aisladas de las consecuencias de los postulados de la relatividad, etc.), sin poner en relieve las ideas más trascendentes detrás de estas temáticas, como las ideas de simetría, las leyes de conservación, la interacción entre modelo, teoría y experimento. En este sentido, las actividades realizadas sobre estos temas se limitan a resolver cuestionarios o realizar ciertas investigaciones que, en muchos casos, concluyen con una búsqueda en wikipedia, desaprovechando la potencialidad de las herramientas informáticas.

Desde el punto de vista de la formación docente, si bien los profesorado de física y afines dedican parte del currículum a desarrollar temas de FMC, la especificidad de muchos de estos temas, así como su complejidad matemática, hacen que el estudiante de profesorado que culmina sus estudios tenga un dominio mucho más amplio en temas de física clásica. Por otra parte, las propuestas de formación o especialización en enseñanza de estos temas son muy limitadas.

A lo anterior se suma el hecho de que muchos docentes que enseñan física en las escuelas medias son en realidad profesores/as de matemática, ingenieros/as, incluso técnicos, u otros profesionales que no poseen una formación específica en el área de física y su enseñanza. Esto hace que, ante la opción de seleccionar contenidos, el docente promedio opte por aquellos en los que siente mayor seguridad (en general, contenidos de física clásica), abortando la posibilidad de expandir los límites del conocimiento de los alumnos hacia temas de la ciencia actual.

Considerando los métodos de enseñanza tradicionales, basados en exposiciones teóricas, la resolución de ejercicios y problemas y la realización de actividades experimentales, el abordaje de contenidos de física moderna en el nivel medio puede verse limitado por varias razones. La aparente complejidad de varios de sus tópicos, la carencia de material didáctico de laboratorio, el desconocimiento de propuestas de enseñanza, son algunas de ellas. No obstante, la inserción de las herramientas TIC en el aula ha fomentado la inclusión de muchos de estos temas en escuela media y en la formación de profesores. Fundamentalmente en el trabajo con simuladores se han observado buenos resultados en general.

La incorporación de TIC ha proporcionado una nueva forma de abordar el proceso de enseñanza-aprendizaje. Muchos autores coinciden en que el uso de simulaciones y la realización de experimentos virtuales constituye una forma de enseñanza alternativa a los métodos tradicionales, que se puede complementar con estos para que el alumno alcance un entendimiento más profundo de los fenómenos en estudio. En este sentido, el uso de herramientas TIC ofrece una opción potencialmente interesante para la enseñanza de la FMC.

Por lo anterior, consideramos que la presente propuesta didáctica puede colaborar favorablemente con la tarea de trasladar los conocimientos de la Física Contemporánea y de la Física de Partículas Elementales a las aulas de nivel medio y de profesorado, destacando a su vez la importancia de la pregunta sobre la *elementalidad*.

1.2 Objetivos

Como objetivo general se propone en este trabajo acercar a estudiantes de nivel medio y de profesorado al campo de la física de partículas a partir del estudio de la evolución del concepto de elementalidad. Para lograr este acercamiento se proyecta la elaboración de un material teórico y de un conjunto de actividades conceptuales y prácticas que vinculen las ideas principales de la física de partículas con el trabajo experimental en el área. Para la confección de las actividades, se plantea el uso de herramientas TIC, la realización de experimentos virtuales, el uso de simuladores, el análisis de información en diversos formatos sobre experimentos reales, el uso de material multimedia y la exploración de algunas publicaciones históricas seleccionadas sobre estos temas. Los objetivos específicos propuestos para este trabajo son:

- Desarrollar un texto de base sobre la evolución del concepto de elementalidad orientado a docentes que tengan interés en llevar esta temática a las aulas de nivel medio.
- Elaborar un conjunto de actividades con uso de TICs, para incorporar las ideas principales de la física de partículas elementales.
- Construir un sitio web que aloje el material generado para llevar a cabo la propuesta didáctica.
- Generar instancias de aplicación y evaluación de la propuesta, ya sea en forma parcial o total.
- Evaluar el impacto de la propuesta didáctica entre docentes del área y estudiantes de profesorado y de nivel medio a quienes fuera impartida.

Capítulo 2

Marco Teórico

La investigación en enseñanza de la Física Moderna y Contemporánea (FMC) constituye una línea relativamente nueva en el campo de la Investigación en Educación. Hoy existe una gran variedad de trabajos enfocados en diferentes aspectos de la enseñanza: investigaciones sobre la comprensión de conceptos de mecánica cuántica, diversos abordajes de la física atómica y nuclear, investigaciones sobre las representaciones de los docentes sobre temas de Física Moderna, o propuestas variadas de inclusión de estos y otros temas en nivel medio y superior. No obstante, a pesar del volumen de trabajos, las discusiones sobre qué y cómo enseñar temas de física moderna aún siguen vigentes.

En este capítulo se realiza una revisión sobre contribuciones en la enseñanza desde dos enfoques: la enseñanza de FMC y la enseñanza con uso de TICs. Se examinan a su vez, aportes a la enseñanza de FMC con uso de TICs. También se expone sobre incipientes investigaciones y propuestas en enseñanza de Física de Partículas. Finalmente, se exploran proyectos de enseñanza de FMC, la mayoría de ellos, basados en nuevas tecnologías.

2.1 El uso de nuevas tecnologías en la enseñanza

El vertiginoso desarrollo en nuevas tecnologías de las últimas décadas ha cambiado drásticamente los modos interacción entre los miembros de la sociedad. Particularmente, las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TICs) han tenido un desarrollo muy acelerado en la última parte del siglo XX y el comienzo del siglo XXI, al punto de que han dado forma a lo que se denomina «Sociedad del Conocimiento» o «de la Información» [1].

En educación, se plantea la incorporación de estas nuevas tecnologías al proceso de formación en todos los niveles educativos. En la Argentina, en el año 2009 fue creado el Plan Conectar Igualdad, cuya finalidad principal es introducir a todos los estudiantes de nivel medio al trabajo con herramientas TIC, mediante la entrega de netbooks a alumnos de escuelas públicas de todo el país. El Plan promueve el uso de estas herramientas como estrategia de apropiación de sabe-

res, de acceso a la información, de participación en debates y de comunicación de producciones en diferentes lenguajes y en formas variadas de representación, en el marco de la actividad científica escolar.

Son muchas las posibilidades que ofrece la incorporación de TICs en la enseñanza. En cuanto a aspectos conceptuales y procedimentales, Pontes [2] señala que las TICs favorecen el aprendizaje de procedimientos y el desarrollo de destrezas intelectuales, además de generar la motivación y desarrollo de actitudes favorables hacia el aprendizaje de la ciencia. Asimismo, el uso de TIC facilita la comprensión de conceptos que son difíciles de observar tanto en las clases teóricas como en los laboratorios escolares.

Por otra parte, siguiendo las aportaciones de Daza et al. [3], «una característica importante de las TIC y sus posibilidades educativas es su acelerado desarrollo». Hasta hace pocos años los recursos se limitaban a páginas Web estáticas, al correo electrónico y a algunos *applets*¹ con estética poco atrayente. No obstante, en pocos años han surgido los blogs, las webquests, los wikis, facilidades para el trabajo con documentos compartidos, simulaciones en formato Flash y html5, diversos portales con uso de objetos de aprendizaje virtuales, o aulas digitales. Todas estas herramientas, junto con un uso adecuado de redes sociales y plataformas multimedia, ponen de manifiesto una creciente democratización en el acceso a la información. Otro aspecto de enorme valor que presenta el uso de TICs es la posibilidad del trabajo colaborativo, una herramienta ya utilizada por los científicos desde la invención del World Wide Web (www).

2.2 Enseñanza de física con uso de TIC's

La enseñanza con el uso de TIC's se ha multiplicado en la última década. Al mismo tiempo, el número de trabajos de investigación en enseñanza ha crecido fuertemente. Son muchos los trabajos publicados que plantean propuestas didácticas con uso de TIC con resultados favorables. Buena parte de los trabajos muestran que el uso de simuladores ayuda al alumno a comprender fenómenos que no quedan completamente claros sólo con las explicaciones y la resolución de problemas. En casi todos los casos, se observan resultados favorables al comparar a los grupos que reciben una instrucción con métodos novedosos (uso de TIC's para el caso), frente a los grupos instruidos con métodos tradicionales (grupos de control). Estos resultados pueden provenir tanto de instancias de evaluación tradicionales como de test preparados específicamente para la evaluación de la propuesta en cuestión. También se advierte un mayor compromiso y predisposición hacia el aprendizaje. Como señalan Serrano y Prendes [4], hoy en día son pocos los profesionales de la educación que cuestionan las múltiples posibilidades que ofrecen las TIC al ámbito educativo en todos sus niveles.

Muchas experiencias con el uso de TIC's (Masterclass, Cosmic Ray e-lab, entre otros) han arrojado excelentes resultados, tanto en la apropiación de conceptos de la física de partículas, como en la forma de acercar al alumno al

¹Un *applet* es un pequeño programa que puede ejecutarse dentro de otro programa o dentro de una página web. Los ejemplos más comunes son los applets de Java o las animaciones flash.

trabajo científico. En particular algunas de estas propuestas se centran en el trabajo colaborativo, introduciendo al mismo tiempo la idea de las relaciones CTS (ciencia, tecnología y sociedad).

No obstante, hay que subrayar que prácticamente todos los autores coinciden en que sería un error el reemplazar la actividad de laboratorio por experimentos virtuales, por eso es que se alerta a los docentes al uso responsable de simuladores. En este sentido, Medeiros y Farias de Medeiros [5] realizan una buena exposición sobre las posibilidades y las limitaciones del uso de simulaciones computacionales en física. En cuanto a las limitaciones, el cuestionamiento más frecuente sobre las simulaciones es el uso de modelos sobresimplificados que dejan de lado la complejidad de una situación real. Por otra parte, el avance en las tecnologías ha hecho que las representaciones visuales sean cada vez más atractivas, lo cual puede ser contraproducente en algunos aspectos; así, por ejemplo, al hacer abuso de la imagen de un electrón como partícula, puede dificultar la incorporación de su aspecto ondulatorio. Si bien este artículo tiene ya varios años, muchos de los aspectos abordados aún siguen vigentes.

Ahora bien, existe una realidad asociada con el uso de tecnologías señalada por varios autores, en relación con el desconocimiento de los aportes de las investigaciones en Ciencias de la Educación por parte de los docentes. Arias y López [6] señalan que, en la educación colombiana, «a pesar del avance tecnológico y la irrupción de valiosas herramientas para los procesos educativos, su incursión en las aulas se sigue haciendo de forma instrumentalista y superficial». En una línea similar, Moreira expresa², en relación a la comunicación de las investigaciones, que al menos en nuestro país y en Latinoamérica, no existe aún una retroalimentación entre investigadores y docentes que haga posible la bajada de la investigación al aula.

Estas observaciones se ratifican con el trabajo de Capuano [7], en el que realiza una revisión de 48 trabajos seleccionados de 5 publicaciones entre 2000 y 2010. Si bien se destaca «el valor de las TICs en la construcción de aprendizajes significativos [...], en el marco de la enseñanza de las Ciencias Naturales, se percibe que en su mayoría resultan propuestas de estrategias no investigadas y que, en algunos casos, sólo son complementarias de otras actividades».

2.3 Investigaciones en enseñanza de FMC

Ya en 1986, Gil Pérez et al. [8], muestran las dificultades en el aprendizaje de conceptos básicos de la Física Moderna. Bajo la hipótesis de que «la enseñanza de la Física moderna viene caracterizada por una introducción desestructurada que simplemente yuxtapone (o incluso mezcla) las concepciones clásicas y las modernas», los autores desarrollan un diseño experimental basado en análisis de textos utilizados en enseñanza, y cuestionarios a docentes y a alumnos de escuela media. Los resultados muestran que la bibliografía analizada introduce varios errores conceptuales, que son trasladados por los docentes a las aulas de clase,

²En el marco de la cuarta Conferencia plenaria del SIEF XII (Tandil, 2014), titulada «Grandes desafíos de la enseñanza de las ciencias en el siglo XXI».

fundamentalmente por una lectura acrítica de los textos. Asimismo, se encuentra que los alumnos no alcanzan una buena comprensión de la Física Moderna, ni de los límites de aplicación de la Física Clásica. Se plantea entonces, «la necesidad de una visión clara y elemental de la Física Moderna que parta de la crisis de las concepciones clásicas y muestre cualitativamente las características del nuevo paradigma».

En el inicio del siglo XXI, Ostermann y Moreira [9] hacen una buena revisión de los trabajos de enseñanza de física cuántica. Los autores presentan los argumentos más recurrentes acerca de la necesidad de cambios en planes de estudio, pero alertan que no existe un acuerdo acerca de cuáles debe ser los temas a enseñar y cómo llevar adelante la tarea. Así, por ejemplo, se encuentran propuestas que parten de la exploración de los límites clásicos, contrapuestas a otras vertientes que, en rechazo al abuso de analogías, proponen no utilizar ninguna referencia clásica. En su trabajo, a partir de encuestas a especialistas, seleccionan dos tópicos de física contemporánea, a saber: superconductividad y física de partículas. Los autores justifican la elección en cada caso, enfatizando las relaciones CTS, la transversalidad de los temas, así como la posibilidad de introducir la modelización en física a través de estos temas.

También en la enseñanza de los modelos atómicos existen discrepancias sobre qué se debe enseñar. Una buena síntesis sobre las discusiones acerca de cómo abordar la enseñanza de los modelos atómicos la realiza McKagan et al. [10]. Por otra parte, en el ámbito de la educación española, Tuzón y Solbes [11] realizan un análisis de la enseñanza de la estructura e interacciones de la materia, a través de un estudio sistemático de la bibliografía utilizada en la enseñanza de física en el nivel medio (particularmente, primero de bachillerato), y de encuestas a docentes de este nivel. Los autores encuentran que, en general, el tratamiento sobre estructura de la materia se limita a los modelos clásicos, con referencias aisladas a la física de partículas y con enfoques históricos que no pasan de los primeros años del siglo XX.

En cuanto a la enseñanza de la Mecánica Cuántica, los temas de investigación más recurrentes están relacionados con la comprensión, interpretación y apropiación de conceptos cuánticos tanto en la enseñanza de nivel medio [12, 13, 14, 15], como en el nivel superior [16, 17, 18, 19]. Asimismo, se presentan propuestas superadoras para el abordaje de contenidos. En esta línea, muchas prácticas realizadas con uso de nuevas tecnologías han mostrado buenos resultados en la interpretación de fenómenos característicos del mundo cuántico [20].

Un aporte interesante para la evaluación de aspectos de la enseñanza, particularmente en FMC, la realiza Akarsu [21], quien expone los resultados de una investigación sobre la comprensión de conceptos de física moderna en base a un test de opción múltiple de 30 preguntas, el test TUCO-MP (*Test of Understanding Concepts of Modern Physics*). Este test aborda la dualidad onda-partícula, estructura atómica, teoría cuántica, física estadística, física nuclear y física de partículas. Administrado a 540 estudiantes de física, enseñanza de física, ingeniería y química, de diferentes niveles en Erciyes University in Kayseri (Turquía), los resultados muestran una puntuación de 41%, lo cual, según el autor, puede

considerarse una puntuación promedio o incluso algo mayor a los puntajes en exámenes parciales y finales de cursos regulares. Si bien su trabajo no apunta a obtener información sobre las dificultades en la comprensión de conceptos de física moderna, se genera una interesante herramienta de diagnóstico a nivel cualitativo y se obtiene una colección de datos útiles para analizar la prevalencia de ideas asociadas a estos conceptos.

En referencia a contenidos específicos de Mecánica Cuántica, McKagan, et al. [22] expone sobre la elaboración de una encuesta conceptual acerca de los principales tópicos de la mecánica cuántica. Los autores realizan inicialmente una buena revisión sobre otras encuestas y test sobre física moderna. Luego, describen una entrevista realizada a ocho miembros de la facultad para determinar cuáles son los conceptos que consideran más importantes para ser abordados en un curso de física moderna. Al igual que otras investigaciones, se pone de manifiesto que no hay un común acuerdo sobre los contenidos a enseñar. De los temas listados por los entrevistados el más recurrente es la función de onda y la probabilidad, mientras que la dualidad onda partícula, la ecuación de Schrödinger, y los estados cuantizados son mencionados por la mitad de los entrevistados. Un aspecto interesante sobre este trabajo es la descripción que proporcionan los autores sobre la concepción acerca de la base conceptual en la física moderna. Se hace referencia a que muchos especialistas desestiman la cuestión conceptual en base a que en física cuántica «no es posible tener conocimiento de lo que realmente está sucediendo», en tanto que aspiran a que sus estudiantes sean capaces de resolver situaciones cuantitativas. A este respecto, de las devoluciones sobre el cuestionario, han notado que los propios docentes contestan mal a varias de las preguntas propuestas, interpretando que, salvo en algunas excepciones, los libros de texto no profundizan en ciertas cuestiones conceptuales de mecánica cuántica. A partir de sus resultados, los autores recomiendan las formas de uso de este tipo de encuestas y los niveles en los que es conveniente su uso, entendiendo que la encuesta solo es favorable como un post-test, basándose en la idea de que un test previo sobre temas que mayormente son desconocidos para los alumnos puede ser desalentador.

Una interesante propuesta de enseñanza de física nuclear y de partículas para estudiantes de secundaria es planteada por Van den Berg y Hoekzema [23]. En base a las leyes de conservación y simetría, formulan un conjunto de actividades prácticas según el método de respuesta rápida (*fast feedback*), elemento común en los métodos de enseñanza de participación interactiva. Las tareas se construyen para ser resueltas mediante diagramas, esquemas, o repuestas cortas, destinando algunos minutos para su realización. El autor concluye que aprender a aplicar las leyes de conservación y de simetría es valorable en este nivel, pero que el entendimiento profundo de dichas leyes debe posponerse para el nivel universitario.

Diversas propuestas de acercamiento de la física de altas energías y cosmología a las aulas de nivel medio [24, 25, 26, 27, 28, 29] proponen un tratamiento de temas específicos con matemáticas simples, como forma de incorporar temas de física moderna en cursos regulares, o de establecer vínculos con temas de física clásica. Una propuesta de introducción de física de partículas la realiza

Llovera-Gonzalez [30]. El autor se basa en la teoría de la formación por etapas de las acciones mentales de Galperin para introducir el Modelo Estándar de las interacciones fundamentales como célula generadora, entendiendo esta última «como un contenido tal que por su carácter esencial y simple puede servir de base para organizar el aprendizaje de otros contenidos más complejos...». Más allá de las actividades que se ejemplifican (algunas de las cuales no escapan a lo que puede proponer cualquier libro de Física Moderna que contenga estos temas), es interesante la propuesta de utilizar el Modelo Estándar como concepto orientador tanto por su rol sistematizador como por las posibilidades que ofrece para su vinculación con otras áreas de la física clásica y moderna.

En cuanto a temas más cercanos a la Física de Partículas Elementales, Hobson [31, 32] propone un enfoque conceptual de la teoría cuántica de campos, partiendo de la concepción moderna de campo y su cuantificación, para dar una noción de partícula desde esta perspectiva. En esta propuesta, rescata las ideas centrales de la electrodinámica cuántica que podrían ser abordadas conceptualmente. Aborda también la unificación electrodébil y la interacción fuerte, presentando la colección de partículas que entendemos por elementales a la fecha. Su propuesta parte de cuestionamientos que realiza sobre los cursos introductorios tradicionales de física, planteando que «al descuidar la visión contemporánea del tiempo, el espacio, la materia, la radiación, las partículas, los átomos, los campos, la energía, la causalidad, la localidad, o el origen, estructura y evolución del universo, [...] estos cursos no enseñan mucho sobre el universo físico real como la ciencia entiende hoy en día».

Podemos también mencionar la propuesta de Hill y Lederman. En un breve artículo [33], describen un módulo de introducción al concepto de simetría destinado a estudiantes de nivel medio avanzado, en el que se incluyen ejemplos y explicaciones sobre esta idea. A través de una presentación conceptual del teorema de Emmy Noether, los autores desarrollan idea de simetría subrayando su importancia en la física.

Finalmente, un abordaje alternativo cuyo espectro se ha ampliado en los últimos años, fundamentalmente por el avance tecnológico, es el uso de juegos virtuales en educación. Particularmente en educación en ciencias, se han desarrollado experiencias con juegos de computadora, diseñados para motivar el aprendizaje de contenidos [34, 35], en algunos casos utilizando las perspectivas del aprendizaje por descubrimiento.

Aquí se ha presentado una breve selección de las investigaciones y proyectos de Enseñanza de Física Moderna. Se observa que el volumen de recursos didácticos crece rápidamente, sobre todo en base al uso de TICs. Prácticamente todos los investigadores en educación perciben la necesidad de incluir temas de FMC en la enseñanza de nivel medio, razón que han impulsado cambios en el currículum de las escuelas medias que se han llevado adelante en las últimas décadas. No obstante, aún no hay un acuerdo sobre qué enseñar y cómo enseñar, situación que puede parecer desfavorable en una primera mirada, pero que al mismo tiempo da lugar a la creatividad y originalidad de la comunidad docente en pos de la creación de nuevas estrategias didácticas.

2.4 Proyectos de enseñanza en FMC y en Física de Partículas Elementales

En los últimos años han surgido propuestas y proyectos de gran valor para la enseñanza de física de partículas, muchos de ellos originadas en los centros de investigación más importantes de estos temas (CERN, Fermilab, SLAC) y en Universidades que tienen grupos de investigación de física de partículas. Asimismo, han sido elaborados muchos proyectos de enseñanza, tanto en Física Clásica como en Física Moderna, con base en el uso de simuladores y objetos de aprendizaje virtuales. A continuación, se mencionan algunos de los proyectos más importantes en la actualidad, seleccionados no sólo por su valor didáctico, sino por ser de acceso libre.

International Masterclasses. Sin dudas, uno de los proyectos de educación en física más importantes de los últimos tiempos a nivel mundial es el programa «International Masterclasses. Hands on Particle Physics» [36], desarrollado por el International Particle Physics Outreach Group (IPPOG). El proyecto funciona ininterrumpidamente desde 2006. Cada año, miles de alumnos de nivel medio de casi 50 países asisten a los centros de investigación cercanos para trabajar con datos reales del LHC, bajo la supervisión de especialistas en el área. Se propone un acercamiento a las técnicas que utilizan los científicos en física de partículas elementales, a través del uso de plataformas de análisis de datos diseñadas para estas actividades. También se pone énfasis en el trabajo colaborativo, ya que al final de la jornada, los datos obtenidos por los alumnos de cada centro son compartidos y analizados de manera conjunta. En el año 2016 se realizó por primera vez la experiencia en la Argentina, en la Universidad Nacional de La Plata.

Un aspecto interesante del proyecto es que muchos recursos están disponibles en la web. Si bien los datos utilizados en cada jornada son cuidadosamente seleccionados, se puede trabajar con un conjunto de eventos liberados.

HY.P.A.T.I.A. HY.P.A.T.I.A (HYbrid Pupil's Analysis Tool for Interactions in ATLAS, [37]) es un visualizador de eventos del experimento ATLAS (LHC). Es el visualizador utilizado actualmente en las jornadas de Masterclass. Tanto su versión en línea como las versiones para descarga tienen un aspecto similar a los analizadores de eventos utilizados en el experimento real. El software presenta la posibilidad de identificar trazas de diferentes partículas, obtener datos sobre las mismas (energía, momento, carga, etc.), analizar dichos datos y construir histogramas. Podemos mencionar también el visualizador MINERVA [38]. Al igual que HyPATIA, MINERVA se basa en el entorno Atlantis [39]. Ambos son analizadores de eventos muy similares. MINERVA también fue utilizado en eventos Masterclass. Aún se encuentra disponible en la web con un conjunto de eventos para su análisis.

Quarknet. Se presenta como un proyecto de desarrollo profesional para profesores de Física en temas de física de altas energías y en partículas elementales. Si bien se ofrecen cursos presenciales, se presenta un conjunto de excelentes recursos en línea para la enseñanza de estos temas, entre los que se encuentran actividades para los experimentos ATLAS, CMS, ALICE, LHCb, LIGO y rayos cósmicos [40].

Proyectos de Educación de Fermilab. Como parte de las actividades de divulgación y de formación de profesores, la Oficina de Educación de Fermilab [41] ofrece una serie de proyectos muy variados en relación con las actividades que se desarrollan en el Fermilab. Entre los materiales ofrecidos se encuentran videos cortos sobre los distintos aceleradores que hay en Fermilab, hipertextos sobre los constituyentes fundamentales de la materia, juegos simples basados en distintos aspectos de la búsqueda de partículas fundamentales y, en general, actividades para reforzar las ideas trabajadas. La Oficina de Educación del Fermilab también ha producido desde 1987 un texto titulado *Topics in Modern Physics* ([42], *Tópicos en Física Moderna*). El texto contiene un conjunto de recursos y actividades especialmente seleccionadas para la enseñanza de partículas elementales, que constituye un excelente recurso para el aula.

CPEP. El CPEP (Contemporary Physics Education Project, [43]) es una organización de profesores e investigadores del área de la física y de la educación de todo el mundo, creado hace más de veinte años con el objetivo de contribuir a la formación de docentes en Física Contemporánea. Los materiales desarrollados por el CPEP presentan conocimientos actuales sobre la naturaleza fundamental de la materia y la energía (partículas fundamentales, física del plasma, física nuclear, evolución del Universo), e incorporan los principales resultados de las investigaciones de los últimos años.

KCVS. El King's Centre for Visualization in Science [44] es un centro de investigación de King's University, Edmonton, Alberta, Canadá, destinado al desarrollo de formas innovadoras para la visualización en ciencia naturales. En física moderna posee un conjunto de applets y simuladores de experimentos, entre otros, cámara de niebla, dispersión Compton, el ciclotrón, relación carga-masa, experimento de Rutherford, estabilidad nuclear. El proyecto se destaca no sólo por el calidad y diseño atractivo de los applets, sino por las propuestas didácticas que acompañan a cada uno de los simuladores, que incluyen realización de mediciones, contratación de modelos y planteo de problemas típicos en contexto.

QuVis. El proyecto QuVis (The Quantum Mechanics Visualisation Project, [45]) es un conjunto de simulaciones interactivas (en formato flash) sobre conceptos de la mecánica cuántica que van desde el nivel de la escuela secundaria avanzada hasta el nivel universitario de grado avanzado. Estas simulaciones es-

tán basadas en la investigación para el aprendizaje y la enseñanza de la mecánica cuántica, en función de las dificultades observadas en alumnos.

PhET. Creado en 2002 por Carl Wieman, el proyecto PhET de la Universidad de Colorado [46], ofrece simulaciones interactivas en ciencias naturales y matemática de acceso libre. Estas simulaciones son desarrolladas en base a la investigación en educación en ciencias. El proyecto incluye cerca de 150 simulaciones de las cuales unas cien simulaciones abordan temas de física. Se han publicado cientos de trabajos en relación con estas simulaciones, lo que lo convierte en uno de los proyectos más importantes de enseñanza con uso de TICs.

LPPP. Lancaster Particle Physics Package [47] es un proyecto diseñado por el Departamento de Física de la Universidad de Lancaster (Reino Unido), cubre aspectos básicos teóricos y experimentales de la física de partículas. Se proponen actividades tales como identificar partículas creadas en colisiones, determinar la masa y la vida media de las partículas o descubrir el bosón de Higgs, entre otras, a través de experimentos virtuales. Todas las actividades están acompañadas por descripciones teóricas y, en algunos casos, introducciones históricas.

OSP. Open Sources Physics [48] es un proyecto que concentra una gran variedad de recursos relacionados con física computacional y modelado por computadoras, destinados a la enseñanza. Incluye simulaciones en prácticamente todas las áreas de la física y materiales de para otras áreas (matemática, química), así como herramientas para el desarrollo de materiales. El objetivo es involucrar a los estudiantes con el trabajo en física, a través de la combinación de estas herramientas con la teoría y la experimentación, con el fin de lograr la comprensión que generalmente no se alcanza con un solo enfoque.

2.5 Base teórica para la construcción de la propuesta

En los párrafos previos hemos visto que son variadas las propuestas y experiencias de enseñanza en temas de Física Moderna. Sin embargo, no son numerosas las presentaciones en aulas de nivel medio o superior sobre temas de Física de Partículas Elementales. Por otra parte, el enfoque dado a esta temática en particular mayormente responde a análisis de textos o videos y al armado de mapas conceptuales. Asimismo, al margen de los proyectos ya citados, no se han encontrado propuestas de enseñanza que vinculen los experimentos en Física de Altas Energías con las teorías que permiten formular predicciones sobre dichos experimentos. En vista de estas ausencias, se ha formulado la propuesta de enseñanza que se describe en este trabajo.

Para la definición de los contenidos y abordajes se considera la siguiente hipótesis de trabajo: «Los estudiantes del Profesorado de Física, no tienen conocimientos sólidos sobre Física de Partículas Elementales». Al hacer referencia

a que los alumnos no tienen conocimientos sólidos, se entiende que no conocen las teorías que describen las Partículas Elementales (es decir, el Modelo Estándar) y que, por ende, desconocen la forma en la que la teoría se relaciona con el experimento.

Lógicamente, no se espera que un estudiante de profesorado maneje las teorías cuánticas de campos, pero sí que incorpore las clasificaciones generales de las partículas elementales, que conozca y diferencie las cuatro interacciones fundamentales de la naturaleza y que se forme una idea general sobre el trabajo experimental y sobre cómo se relaciona la teoría con la información proveniente de los experimentos. No tendría sentido, pues, abordar estos objetivos desde una exposición de las ecuaciones del Modelo Estándar. Por ello es que se decide elaborar una propuesta didáctica que aborde estos temas desde un enfoque conceptual, profundizando en algunos aspectos y proponiendo a su vez un conjunto de ideas que permitan llevar esta temática a las aulas de nivel medio.

2.5.1 Compromiso Interactivo

Desde el punto de vista didáctico, la propuesta fue concebida para ser aplicada según los métodos conocidos bajo el nombre «Compromiso interactivo» (*Interactive-engagement*, IE). Estos métodos introducen las características del Aprendizaje Activo (*Active Learning*, AL [49]) a través de la discusión entre pares y/o con el docente (*Peer Instruction*, [50]). R. Hake, define los métodos de IE como aquellos diseñados, al menos en parte, para promover una comprensión conceptual a través del compromiso interactivo de los estudiantes en actividades intelectuales (siempre) y prácticas (usualmente) que llevan a un intercambio inmediato mediante discusiones con pares y/o instructores (traducido de [51], p. 65). Los cursos en los que se hace un fuerte uso de esta metodología, en general tienen mejores rendimientos que los cursos tradicionales, basados en clases expositivas, resolución de problemas algebraicos y prácticas de laboratorio generalmente conductistas.

Se elige esta metodología en base a la efectividad que han mostrado diferentes investigaciones [52, 53, 51], y, a su vez, como una alternativa viable para su aplicación (por lo menos parcial) en la educación de nivel medio y de Profesorado, que involucre una participación activa de los alumnos. En tanto que la apropiación de conceptos de forma significativa implica un trabajo fuerte de elaboración por parte del alumno, deben utilizarse actividades y estrategias didácticas que logren comprometer al alumno con aquello que desea aprender. En este sentido, el conjunto de actividades prácticas diseñadas bajo la óptica del IE favorece que el alumno reflexione, individualmente y en forma grupal, qué hace y por qué hace lo que hace.

Es útil recordar la gran diferencia entre el aprendizaje activo y el aprendizaje por descubrimiento. Aquí no se pretende que los alumnos puedan descubrir las leyes físicas a través de un conjunto de actividades de aula, sino que puedan hacer uso de herramientas y métodos para la construcción del conocimiento.

En base a las ideas del IE, las actividades propuestas han sido pensadas para su resolución rápida en forma grupal, destinando algunos minutos para cada

tarea. Los grupos de trabajo deben ser de dos o tres alumnos. Esto garantiza la participación activa de todos los miembros del grupo, facilita la comunicación entre los mismos y favorece el intercambio de ideas al trabajar con cursos reducidos, como los que suelen presentarse en los profesorados en Física.

Capítulo 3

Descripción de la propuesta didáctica

La presente propuesta didáctica consiste en la presentación de una selección de temas en torno a la evolución en el concepto de elementalidad. Esta propuesta se concreta a través de la elaboración de un texto sobre estos temas, de la creación de un conjunto de actividades sobre conceptos centrales de la física de partículas y de la construcción de un sitio web en el que estos temas son presentados y donde se aloje el material desarrollado.

3.1 Física de Partículas Elementales: un texto para profesores

El texto en cuestión, titulado «Física de partículas y Evolución en el Concepto de Elementalidad», fue concebido como un texto guía para el docente. Se elaboró en base a una serie de ejes temáticos, seleccionados según un orden progresivo, que coincide mayormente con el orden cronológico de los avances en el área de la física de partículas. El texto se divide en dos partes, la primera se presenta en el Cap. 4 y la segunda parte, en el Cap. 5.

La primera parte consiste en un relato de aquellos descubrimientos y desarrollos teóricos orientados a la evolución en nuestro conocimiento sobre la naturaleza íntima de la materia, desde la teoría atómica de Dalton hasta el hallazgo del bosón de Higgs. El enfoque propuesto para esta primera parte es mayormente histórico, con la incorporación de algún concepto formal, y con la profundización conceptual de algunos temas centrales de la física de partículas. Aquí también se abordan ciertos aspectos de la mecánica cuántica y de la relatividad, necesarios para una exposición clara de los temas tratados.

En la segunda parte del texto se desarrollan algunos conceptos teóricos seleccionados para dar sentido a los temas expuestos en la primera parte del mismo. Se propone una definición de sección eficaz de una interacción, sección eficaz

diferencial, tasas de decaimiento, luminosidad, entre otros, para dar a comprender con cierto nivel de profundidad algunos aspectos del trabajo experimental y de las predicciones teóricas en el área de la física de altas energías, sobre todo para los docentes que nunca han tenido contacto con las teorías cuánticas de campos. Se presenta también una breve exposición sobre los experimentos que permitieron develar la estructura interna de los núcleos atómicos, la estructura de los nucleones, el descubrimiento de los bosones W y Z, la evidencia a favor de las tres familias de leptones, la evidencia de la carga de color, y el hallazgo del bosón de Higgs. Se hace hincapié en las representaciones de las secciones eficaces de dispersión y de las tasas de decaimiento de ciertas interacciones, dado el carácter de vínculo entre la teoría y el experimento que revisten estos conceptos. No se plantea una exposición completa de los temas tratados, sino que se trabaja sobre una selección de ideas y experimentos que se orientan a ciertos aspectos clave de la física nuclear y de partículas.

3.2 Propuesta de actividades: Scattering en física de partículas

Las actividades elaboradas para la propuesta didáctica se presentan bajo el título «*Scattering*: sondeando la estructura íntima de la materia», y están desarrolladas en torno a experimentos de dispersión. El abordaje plantea el uso de una serie de recursos didácticos basados en herramientas TIC de libre acceso. Una copia completa de la guía de actividades se encuentra en el sitio web (véase la sección 3.3)

Este conjunto de actividades se divide en dos partes. La primera parte ataca el problema de dispersión desde un enfoque conceptual, introduciendo progresivamente las variables principales a considerar, a través del trabajo con problemas conceptuales sencillos. Se define la sección eficaz de dispersión en relación a la probabilidad de ocurrencia de eventos y se pone en contexto en los diferentes problemas tratados.

La primera actividad de esta primera parte consiste en un experimento clásico de estadística en el que se relacionan las dimensiones de área con las probabilidades de interacción. A partir de este experimento sencillo se define la sección eficaz, indicando que, si bien en este experimento constituye una medida de área, en física de partículas es una cantidad asociada a la probabilidad de interacción. Las siguientes actividades corresponden a la dispersión clásica tipo esfera dura, dispersión de una carga puntual por un campo central y al experimento de Rutherford, como aplicación a un problema real. En cada caso se indaga en las variables y parámetros principales del problema; se introduce también el uso de applets para realización de experimentos virtuales. Otras dos actividades posteriores permiten vincular los experimentos de dispersión con la posibilidad de identificar las formas de un blanco. Finalmente, se trabaja con colisiones inelásticas y con la interpretación de resonancias. Dado que el objetivo es incorporar nociones generales sobre experimentos de dispersión en física

de partículas elementales y su relación con la teoría, se propone su aplicación tanto para grupos de nivel superior (terciario y de profesorado) como en grupos de nivel medio.

La segunda parte de la actividad se vuelca a la física de partículas elementales. El objetivo es brindar un conjunto de ideas sobre las formas en las que la teoría que describe las interacciones fundamentales (Modelo Estándar) puede ser corroborada con la experiencia, y sobre los métodos con los que los científicos pueden crear y detectar partículas subatómicas. Inicialmente se trabaja con las leyes de conservación de la carga (q), del número leptónico (L) y del número bariónico (B). Luego, se trabaja sobre algunos de los experimentos más importantes sobre el hallazgo de componentes fundamentales de la naturaleza. Más precisamente, se presentan actividades de determinación de la masa del top quark, del bosón Z , y del bosón de Higgs, a través del análisis de datos de eventos, y en base a las leyes de conservación de la energía y de la cantidad de movimiento. Se propone asimismo la construcción de histogramas que permitan determinar la masa invariante de las partículas detectadas, como un acercamiento al tratamiento de datos en experimentos reales. Estas actividades se basan mayormente en el programa International Masterclass, y se recomiendan para grupos de los últimos años del nivel medio, o bien, para estudiantes de profesorado.

3.3 Sitio web

Como parte de la propuesta se construyó un sitio web titulado *Elementalidad y física de parTICulas*¹. El sitio se compone de un conjunto de subpáginas en las que se desarrollan los diferentes temas en torno a la evolución en la idea de elementalidad. El objetivo principal es el de alojar material con relación a la enseñanza de los temas tratados.

En algunos tópicos se adjuntan guías de actividades desarrolladas específicamente para esta propuesta. También se proponen varios links de interés, ya sea a sitios con información de calidad como a sitios con simuladores para el desarrollo de actividades sobre el tema. Como material de interés para el docente, se incluyen algunos links a publicaciones de relevancia histórica para la física. En la página de presentación se encuentra una copia del texto sobre elementalidad y una copia de las actividades sobre scattering descritas previamente. La subdivisión de páginas coincide mayormente con los títulos tratados en el texto de elementalidad, a saber:

Realidad atómico-molecular de la materia. El abordaje de este tópico se realiza a partir del estudio del movimiento browniano. Se propone un conjunto de actividades orientadas a acercar conceptualmente al alumno a la teoría atómico-molecular y a la teoría cinética de la materia. Estas actividades se basan en la formulación de hipótesis sobre las posibles causas del movimiento browniano, junto con la propuesta de posibles caminos de corroboración de dichas

¹Disponible en: <https://sites.google.com/site/fisicadeparticulastic/>

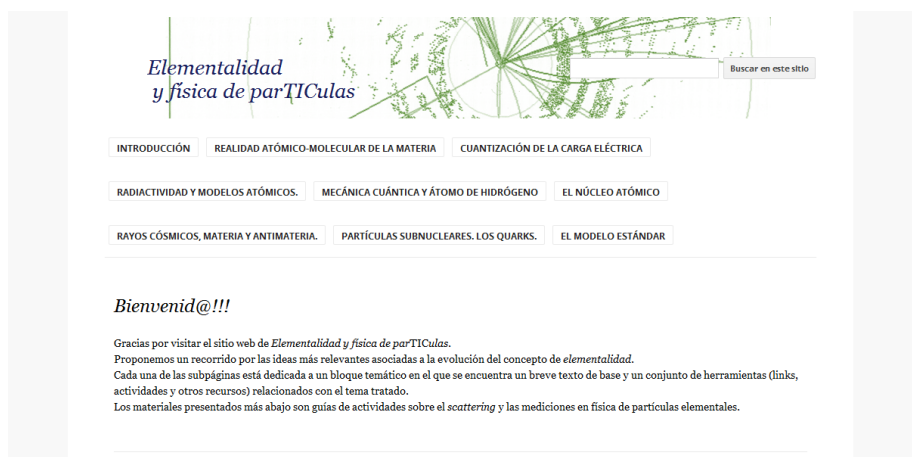


Figura 3.3.1: Captura de pantalla de la página de inicio del sitio

hipótesis. Se presenta además un trabajo de determinación experimental del número de Avogadro, mediante el análisis de filmaciones con el software Tracker². Esta actividad puede ser llevada a cabo por alumnos de nivel terciario o bien por alumnos de los últimos años del nivel secundario. Luego, para reforzar las ideas de la teoría cinética, se sugiere la exploración de diferentes applets en los que representa el comportamiento de la materia de diferentes estados de agregación, las relaciones entre variables termodinámicas, distribución de rapidez molecular, etc.

Cuantización de la electricidad. Para introducir la idea de cuantización de la carga se exploran los experimentos de electrólisis de Faraday, la obtención de la relación carga-masa por parte de J. J. Thomson y la determinación de la carga elemental por R. Millikan tras sus clásicos experimentos con gotitas de aceite. Tanto para los experimentos de Thomson como para los de Millikan se han preparado videos en los que se realiza el experimento con material didáctico de laboratorio. Se sugiere además la realización de experimentos virtuales con simuladores. También se propone un acercamiento a la dinámica de partículas elementales mediante el trabajo con simulaciones de fuerza de Lorenz, selector de velocidades y del experimento de Thomson.

Radiactividad y modelos atómicos. En primera instancia, se plantea una revisión histórica de los desarrollos y descubrimientos más relevantes relacionados con radiactividad. A partir de los experimentos de J. J. Thomson se describe la idea general de su modelo atómico, el cual tiene el valor de ser el primer modelo en haber sido sometido a contrastación experimental directa. Para la introducción del experimento de Rutherford, se incluye una propuesta para

²Véase <http://www.cabrillo.edu/~dbrown/tracker/webstart/>.

el trabajo de simuladores. En una puesta de nivel medio, los alumnos pueden manipular las variables del experimento con el objeto de encontrar relaciones, en principio cualitativas, entre dichas variables. Para nivel superior, el simulador permite realizar un trabajo cuantitativo de corroboración de la fórmula de dispersión de Rutherford. La introducción del modelo atómico de Bohr se realiza analizando las objeciones al modelo atómico de Rutherford, mencionando sus postulados y observando la correspondencia entre las predicciones de su modelo y las longitudes de onda de las líneas espectrales de átomos hidrogenoides.

Mecánica cuántica y átomo de hidrógeno. Se expone aquí una descripción de las ondas de materia propuestas por de Broglie y un relato del desarrollo posterior de la mecánica ondulatoria. Se presenta también la ecuación de Schrödinger y se da una interpretación a la función de onda en términos de la interpretación de Copenhague, ilustrada a partir del experimento de la doble rendija. También se aborda la introducción del espín como una propiedad fundamental de los sistemas cuánticos. Para alcanzar una imagen mental más acabada del modelo del átomo de hidrógeno, se sugiere trabajar con un simulador permite observar las geometrías de las nubes electrónicas a partir de las funciones de onda de los electrones en cada capa y de las correspondientes amplitudes de probabilidad. Asimismo, se proporciona un link a un video de la famosa serie «Universo Mecánico y más allá» (*Mechanical Universe and beyond*), sobre el átomo cuántico. Para profundizar en el estudio de la mecánica cuántica, se proveen links a diferentes sitios entre los que se encuentra una versión del experimento de la doble rendija con partículas, un sitio para visualización y experimentación virtual en mecánica cuántica y una tabla periódica interactiva.

Núcleo atómico. Sobre núcleos atómicos, se realiza una descripción de la fenomenología de los núcleos, introduciendo las características principales, como la estabilidad, tamaño, vida media, pero sin abordar los modelos nucleares (gota líquida, modelo de capas, etc.). Se realiza una descripción sobre decaimientos α y β (+ y -) y su interpretación a nivel hadrónico. Se incluyen links a algunas animaciones simples y experimentos de decaimiento radiactivo.

Rayos cósmicos, materia y antimateria. Aquí se presenta una idea general sobre los rayos cósmicos, su descubrimiento y energías típicas. Para incorporar la idea de antimateria se presenta un relato sobre el positrón y otras partículas encontradas en la observación de rayos cósmicos. Para profundizar en el concepto de antimateria, se describe brevemente la idea general de la teoría de Dirac y su interpretación. Se incluye un link al experimento virtual con un simulador de cámara de Wilson, en la que se analizan las trazas de distintos tipos de partículas emitidas por diferentes fuentes radiactivas. También se propone la exploración de los sitios de los principales proyectos de investigación en esta área.

Partículas subnucleares. Los Quarks. Comenzando por un relato sobre la necesidad de algún esquema de organización de las partículas subatómicas

descubiertas hacia la década de 1960, se describen las primeras clasificaciones utilizadas en física de partículas, y las leyes de conservación más elementales (conservación de los números leptónico, bariónico y de extrañeza). Luego, se introduce el concepto de resonancias y su interpretación en el marco de la física de altas energías. Finalmente, se expone sobre la propuesta de existencia de los quarks como componentes de los hadrones, y sobre algunas de sus principales características. También se menciona la idea general de la teoría del confinamiento: la imposibilidad de observar quarks libres. Se incluyen links a actividades asociadas con la determinación de la masa del kaón y del quark top.

Las interacciones fundamentales y el Modelo Estándar. Se describe brevemente el esquema de las cuatro fuerzas fundamentales, haciendo referencia a los bosones mediadores de cada una de las interacciones, y a las cargas asociadas con cada tipo de interacción. En el caso de la interacción fuerte, se hace referencia a la cromodinámica cuántica y a la carga de color. También se señala la teoría electrodébil como un tratamiento conjunto entre la interacción electromagnética y la interacción débil. A continuación, se comenta sobre el Modelo Estándar, poniendo énfasis en las partículas consideradas como elementales: leptones, quarks, bosones de intercambio y el bosón de Higgs. También se hace mención al papel de la simetría en la física de partículas. En este breve relato se explica la ruptura espontánea de la simetría y su relación con la propuesta del campo de Higgs. La página contiene links a varios proyectos de enseñanza de temas de física de partículas, algunos de ellos utilizados en las actividades desarrolladas para la presente propuesta didáctica. También se proponen links a sitios con material de muy buena calidad, como el sitio «Aventura de las partículas» [54] o el «Viaje al corazón de la materia» de F. Barradas Solas [55].

Capítulo 4

Física de Partículas y Evolución del Concepto de Elementalidad: Primera Parte

De los átomos de Dalton al bosón de Higgs

4.1 Introducción

Uno de los objetivos principales de la física es la búsqueda de los componentes últimos de toda la materia que nos rodea y la descripción de las interacciones entre estos componentes que, en última instancia, demarcan la realidad que se presenta ante nuestros ojos. El primer nombre dado a estos componentes, partículas indivisibles que formarían el mundo material, fue el de *átomo*¹. Al hablar de los átomos no se puede dejar de hacer referencia a los pensadores de la antigua Grecia. A partir del razonamiento puro, filósofos como Leucipo y Demócrito en el siglo 3 a.C. dieron forma a la idea de átomos indivisibles constituyendo la cualidad última de la materia. Luego, Epicuro nos hablaba de partes mínimas «confinadas» permanentemente. Anaximandro, Pitágoras y Platón, entre otros, expresaban que lo subyacente a toda la materia podría representarse en términos de números y simetrías. Pero, si bien estas sublimes manifestaciones del pensamiento tienen, en muchos casos, una fuerte conexión con el conocimiento actual sobre las partículas elementales, y han sido la base para la construcción del conocimiento científico, no dejan de ser especulaciones, y por ende no pueden ser consideradas como ideas científicas.

¹El término átomo deriva del griego *á-tomo*, que significa indivisible, o «que no se puede cortar».

No fue sino hasta comienzos del S. XIX que se presentaron las primeras ideas atomistas con fundamento empírico. En 1805, Dalton propone la existencia de átomos a partir del análisis de sus trabajos experimentales y hasta fines de aquel siglo se supuso al átomo como la mínima porción de materia. Los átomos se modelaron como pequeñas partículas indivisibles que pueden entrar en combinación con otros para formar átomos compuestos, los cuales recibirían el nombre de moléculas, tras ciertos retoques a las ideas originales de este científico.

No obstante, en los últimos años del S. XIX, se descubrió que existen en realidad partículas aún más fundamentales que los átomos. Primero los electrones, luego los protones, más tarde el neutrón y simultáneamente una catarata de nuevas partículas (muones, piones, neutrinos, positrones y muchas otras) intrigaron a los científicos durante muchos años, quienes trataban de dar un encuadre a los nuevos hallazgos.

A partir del desarrollo de la mecánica cuántica a comienzos del S. XX, se construyeron teorías cada vez más complejas desde el punto de vista formal. Estas teorías permitieron no sólo establecer una clasificación de todas las partículas encontradas en los laboratorios, sino también predecir la existencia de nuevas partículas. Así es que hoy los laboratorios experimentales más grandes del planeta están dedicados al estudio de partículas elementales. Veremos a continuación un relato sobre las ideas que hoy tenemos acerca de la elementalidad.

4.2 Sobre la realidad atómico molecular de la materia

Desde la antigüedad hasta comienzos del S. XIX existió la idea de «átomo» como partícula indivisible, como aquel corpúsculo que formaría a todos los cuerpos materiales; pero hasta aquel entonces, no se habían desarrollado esquemas sobre la naturaleza de estos supuestos componentes últimos de la materia. El concepto de elemento químico, desarrollado durante más de un siglo desde la publicación de R. Boyle (1661) hasta los trabajos de A. Lavoisier (1789), fue fundamental para poder exponer con precisión la hipótesis atómica. En base a este concepto y a las propiedades físicas de los gases, J. Dalton estableció (en 1808 y 1810) su hipótesis atómica. Las principales ideas presentadas por Dalton fueron las siguientes²: *i*) la materia está compuesta por átomos indivisibles; *ii*) cada elemento consta de una clase característica de átomos idénticos; *iii*) los átomos de diferentes elementos no pueden transformarse los unos en los otros; *iv*) los átomos simples se combinan para formar «átomos compuestos»; *v*) en las reacciones químicas los átomos no se crean ni se destruyen, sólo cambia su distribución. Si bien estas ideas fueron modificadas con el tiempo, se convirtieron en los fundamentos de la química moderna.

Unas décadas más tarde, basado en los trabajos de Gay-Lussac, A. Avogadro introduce su hipótesis molecular, la cual no encuentra total aceptación sino hasta fines de siglo. Según la hipótesis de Avogadro, volúmenes iguales de diferentes

²Adaptado de [56].

gases en las mismas condiciones de presión y temperatura contienen el mismo número de moléculas. De esta hipótesis se desprende el hecho de que existe un número constante de partículas en un mol de cualquier sustancia. Pero, ¿Cuán grande sería ese número? La primera estimación de este número se atribuye a J. J. Loschmidt. En base a la teoría cinética de la materia, desarrollada por J. C. Maxwell y L. Boltzmann, Loschmidt calculó en 1865 el tamaño las moléculas de aire, lo que permitió determinar el número de moléculas presentes en un centímetro cúbico de aire en condiciones estándar. Si bien sus resultados no fueron muy exactos, se alcanzó a visualizar que el número buscado sería asombrosamente grande: mayor a 10^{20} partículas por cm^3 . Surgió entonces una cuestión lógica, ¿cómo diseñar un experimento para corroborar este resultado?

Volvamos nuevamente a la primera mitad del siglo XIX. En 1828 Robert Brown, botánico inglés, publicó un trabajo titulado «Un breve recuento de las observaciones microscópicas efectuadas en los meses de junio, julio y agosto de 1827 sobre las partículas presentes en el polen de las plantas». En su trabajo, el científico describió el movimiento incesante y aparentemente aleatorio de las pequeñas partículas de polen suspendidas en un medio líquido, fenómeno que recibiría más tarde el nombre de movimiento browniano. Inicialmente, Brown supuso que el fenómeno se debía al origen biológico de estas partículas; sin embargo, él mismo corroboró que este movimiento también se presentaba en la materia inerte (polen de plantas muertas, partículas de rocas volcánicas, etc.). Se formularon desde entonces diversas hipótesis sobre las posibles causas de estos movimientos, tales como corrientes de convección, gradientes térmicos en el medio, o vibraciones mecánicas del instrumental. Sin embargo, ninguna de ellas parecía ser la explicación correcta. Ya en la segunda mitad del siglo XIX, en base a los trabajos de Boltzmann y Maxwell, se supuso que el movimiento podía deberse a los incesantes choques entre las moléculas del medio y las partículas suspendidas, pero esta hipótesis no sería contrastada hasta comienzos del S. XX.

En 1905 A. Einstein publicó un trabajo titulado «Investigaciones sobre la teoría del movimiento browniano», en el cual presenta un desarrollo teórico sobre el movimiento de las partículas brownianas. Combinando la teoría cinético-molecular de Boltzmann con la teoría de la difusión, Einstein obtuvo una relación entre el desplazamiento cuadrático medio de una partícula browniana $\langle \Delta x^2 \rangle$ efectuado en un intervalo de tiempo t y este intervalo:

$$\langle \Delta x^2 \rangle = \frac{RT}{3\pi\eta N_a a} t$$

donde R es la constante universal de los gases, T es temperatura absoluta del medio líquido, η es viscosidad del medio, a es radio de la partícula browniana y N_a , el número de Avogadro. En el año 1909, J. Perrín corroboró la relación de Einstein mediante una serie de escrupulosos experimentos, obteniendo así un valor muy preciso del número de Avogadro, cercano a $6 \cdot 10^{23}$ partículas por mol, valor que estaba en concordancia con los resultados de otras estimaciones efectuadas para entonces. De este modo, la idea de que la materia está compuesta por moléculas en constante movimiento pasó de ser una hipótesis a ser una realidad científica.

4.3 Sobre la cuantificación de la carga eléctrica

Hacia mediados del siglo diecinueve convivían dos teorías sobre la electricidad, una de las cuales sostenía la idea de dos clases de fluidos eléctricos, mientras que la segunda postulaba la existencia de una cantidad mínima de carga. El avance de las técnicas experimentales y el descubrimiento de ciertos fenómenos antes no observados permitieron corroborar que la carga eléctrica está realmente cuantificada, esto es, que existe un valor mínimo de carga eléctrica, portada por partículas que son más pequeñas aún que el propio átomo.

4.3.1 Experimentos de Faraday

Los primeros indicios sobre la cuantificación fueron proporcionados por el análisis de los experimentos de M. Faraday sobre la electrólisis. Durante la primera mitad del siglo diecinueve, Faraday realizó meticulosos experimentos sobre la conducción de la electricidad en soluciones. Obtuvo entonces una constante que mide la cantidad de electricidad que debe circular por una celda electrolítica para que la masa depositada (o liberada) durante la electrólisis sea igual a la masa equivalente de la sustancia (masa molar dividida por la valencia). Esta constante recibió el nombre de constante de Faraday, cuyo valor actual es $F = 96.500 \text{ C}$.³

En 1887 S. Arrhenius propuso que, en la formación de soluciones, las sales se disocian en *iones*, término acuñado por el propio Faraday décadas atrás. Sin embargo, mientras Faraday pensaba que la disociación se producía por el pasaje de corriente, la propuesta de Arrhenius fue que las sales se disocian en iones durante la formación de la solución, independientemente del paso de corriente eléctrica. Por esta contribución recibió en 1903 el Premio Nobel de Química. Ahora bien, si la corriente es transportada por portadores de carga, cada uno llevando la misma carga eléctrica, entonces la constante F se puede pensar como un número entero de cargas elementales. Siendo F la cantidad de electricidad que debe circular para que la masa depositada sea igual al peso equivalente de la sustancia (esto es, para que se depositen N_a iones de la sustancia), es razonable pensar que F es equivalente a N_a cargas elementales:

$$F = N_a q$$

donde q es el valor (supuesto) de carga elemental. Tomando $N_a = 10^{23}$ (valor estimado para fines del S. XIX) se tiene $q = F/N_a = 96500 \text{ C}/10^{23} \approx 10^{-18} \text{ C}$.

En 1894, G. Stoney acuñó el nombre *electrón* para esta carga fundamental, y fue él quien realizó la estimación de su valor a partir de la constante de Faraday. Si bien el valor del número de Avogadro no estaba bien determinado para aquellos años, tomando el valor $N_a = 6,02 \cdot 10^{23}$ se obtiene $q = F/N_a = 96500 \text{ C}/6,02 \cdot 10^{23} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ valor que coincide perfectamente con el asignado a la carga del electrón.

³El coulomb, C, es la unidad de carga eléctrica del Sistema Internacional. $1 \text{ C} = 1 \text{ A} \cdot \text{s}$.

4.3.2 Relación carga-masa

La ratificación de la cuantificación se dio a través del descubrimiento y posterior estudio de los rayos catódicos. En 1870, W. Crookes construyó un tubo de alto vacío con un par de electrodos en su interior, de manera de poder establecer una diferencia de potencial entre dichos electrodos. En sus experimentos, el científico pudo dar cuenta de que estos rayos provenían del cátodo al observar la luminiscencia producida en el extremo del tubo opuesto al del cátodo. También corroboró que estos rayos se propagan en línea recta, siendo que al interponer un obstáculo (en sus experimentos, una cruz de malta conectada al ánodo) se produce una sombra de dicho obstáculo en la región donde antes se producía la luminiscencia. Algunos años más tarde, A. Schuster comprobó que los rayos portaban carga negativa al observar que utilizando campos magnéticos se podía desviar su trayectoria.

La confirmación de que los rayos estaban compuestos por partículas vino de la mano de los trabajos experimentales de J. J. Thomson hacia 1896. Al interponer placas paralelas a la dirección de los rayos, y manteniendo una diferencia de potencial entre las mismas, Thomson logró desviar los rayos mediante campos eléctricos, obteniendo así valores fehacientes de la relación entre la carga y la masa de las partículas portadoras de electricidad. Esta relación le permitió estimar la masa de estas partículas, las cuales serían unas 2000 veces más ligeras que el átomo de menor masa conocido, el átomo de hidrógeno. Además de la determinación de la relación carga-masa, el físico inglés demostró que esta relación era independiente del material del cátodo, lo cual lo llevó a la idea de que estas partículas, los *electrones*, serían constituyentes fundamentales de la materia, es decir, partículas subatómicas. Estos trabajos llevaron a J. J. Thomson a formular su modelo atómico, el famoso pudín de pasas, del cual se hablará más adelante.

4.3.3 Experimento de Millikan

La determinación del valor de la carga del electrón fue dada varios años después por el físico R. A. Millikan. Sus experimentos, basados en experimentos previos de J. S. Townsend, consistieron en la medición del tiempo de caída y de ascenso de pequeñas gotitas de aceite (del orden de $1 \mu\text{m}$) eléctricamente cargadas, inmersas en una región donde se podía establecer un campo eléctrico vertical uniforme. Midiendo las velocidades de diferentes gotitas, con diferentes cargas, las cuales podían ser modificadas mediante la exposición a radiación ultravioleta, Millikan determinó la carga eléctrica de miles (literalmente) de gotitas para luego intentar encontrar un mínimo común divisor. El análisis de sus resultados llevó a un valor de la carga del electrón muy cercano al valor aceptado actualmente.

De esta manera, el debate sobre la naturaleza de la electricidad llevó a los científicos al descubrimiento de una nueva partícula, más pequeña aún que el átomo más pequeño, que está presente en todas las sustancias y que por ende es considerada como una parte fundamental de la materia: el *electrón*. Al ser

la primera partícula subatómica en ser develada, su hallazgo abrió camino a la idea de una estructura interna del átomo.

4.4 Modelos atómicos

El estudio de descargas en gases a bajas presiones y la producción de rayos en tubos de vacío proveyeron grandes aportes al estudio de la naturaleza más íntima de la materia. Desde 1870, los físicos describieron minuciosamente los detalles sobre la luminosidad producida al conectar tubos con gases sometidos a diferentes presiones y a diferentes potenciales. Observaron zonas de mayor y menor luminosidad, así como la aparición de regiones oscuras en ciertas regiones para determinadas presiones.

A partir de la mejora de las técnicas de vacío, muchos científicos se dedicaron al estudio de estas y otras radiaciones, para las cuales no se tenía aún un modelo definitivo. Además de los rayos catódicos ya mencionados, fueron descubiertos los rayos canales. Este tipo de rayos viajan en sentido opuesto a los rayos catódicos, de aquí que también se los llama rayos anódicos o rayos positivos. Su estudio reflejó que estos rayos también podían ser desviados por campos magnéticos, con lo que se pudo determinar su masa. Se encontró que diferentes gases producían rayos canales de diferentes masas, lo cual apoyó la idea de iones desarrollada primeramente para explicar la disolución de sales. Luego, al trabajar con gas hidrógeno, Thomson (1904) determinó que la masa de los rayos era unas 2000 veces mayor a la de los rayos catódicos. Esto llevó a la idea de que estos rayos serían los propios átomos de hidrógeno ionizados, y por ende, eléctricamente cargados.

4.4.1 Radiactividad

En 1896, H. Becquerel descubrió que ciertas sales de uranio eran capaces de ennegrecer placas fotográficas aun cuando las mismas eran cubiertas por placas opacas a la luz. Los experimentos se realizaban pensando que la exposición a la luz solar era el desencadenante del fenómeno. Pero en una de sus jornadas de trabajo, en un día nublado, Becquerel guardó sus muestras en un cajón en completa oscuridad. Al retirar las muestras unos días más tarde observó que el efecto fue mucho más intenso. Esto indicaba que la fosforescencia no era debida a la interacción entre el material y la radiación solar. Becquerel había descubierto la radiactividad y por sus descubrimientos recibió el Premio Nobel de Química en 1903.

Un año más tarde, una científica polaca de nombre Marie Skłodowska, más conocida por el apellido de su marido, Pierre Curie, retomó los experimentos de Becquerel. En sus trabajos identificó elementos que emitían espontáneamente radiaciones y entendió que el fenómeno no tendría relación con la fosforescencia (emisión de radiación electromagnética por parte de ciertos materiales que han sido expuestos previamente a la luz), razones que la llevaron a compartir con su marido y con Becquerel el Premio Nobel de 1903. En trabajos posteriores,

suponiendo que elementos más pesados serían más radiactivos, M. Skłodowska y P. Curie descubrieron dos nuevos elementos, a los que bautizaron «Polonio» y «Radio». En 1911, M. Skłodowska recibiría un segundo Premio Nobel, esta vez en química, por el descubrimiento de estos elementos.

Al tener noticia de estos trabajos, E. Rutherford, un científico neozelandés que había sido estudiante del propio Thomson, comenzó una serie de experimentos con radio. Detectó que este elemento emitía tres tipos distintos de radiaciones sobre las cuales publicó en 1900. El científico observó la emisión de radiaciones de carga positiva, que eran absorbidas fácilmente por finas capas de material y que producían ionización de gases; a estas radiaciones las llamó rayos α (alfa). Observó también rayos negativos, de características idénticas a los rayos catódicos, a los que llamó rayos β (beta). Finalmente detectó un tipo de radiación muy penetrante que no se desvía con campos magnéticos (esto es, sin carga eléctrica) a la que denominó rayos γ (gamma). Más tarde se descubrió que los rayos α estarían compuestos por partículas de la misma masa que los átomos de helio, y cuya carga sería dos veces la carga del electrón, pero positiva.

4.4.2 Los primeros modelos atómicos

Si bien los primeros modelos atómicos que incluyeron partículas subatómicas fueron propuestos entre los últimos años del siglo diecinueve y los primeros años del siglo veinte, el primer indicio de que los átomos poseen una estructura interna fue la construcción de la tabla periódica de Mendeleiev. El hecho de que muchas de las propiedades de las sustancias sean periódicas podría indicar que existe una estructura subyacente a los mismos átomos. Ya en la primera mitad del siglo diecinueve se había planteado la idea de que todas las sustancias se podrían obtener como una combinación de unos pocos átomos (hidrógeno, oxígeno, carbono). Por otra parte, las masas de los diferentes elementos son múltiplos casi exactos de la masa del átomo de hidrógeno.

El descubrimiento del electrón y sus trabajos con rayos canales motivaron a J. J. Thomson a presentar el primer modelo atómico con estructura interna (recuérdese que Dalton habría pensado en los átomos como pequeñas partículas indivisibles). Este modelo describía al átomo como una masa positiva relativamente homogénea, embebida por electrones, de manera similar a las pasas en un budín inglés, lo que neutralizaría la carga positiva (de hecho, el propio Thomson acuñó la imagen del *plum pudding* para poder transmitir su idea).

Los experimentos llevados a cabo para testear el modelo de Thomson fueron realizados por H. Geiger y E. Mardsen, ambos colaboradores de E. Rutherford. En el experimento, diseñado por Rutherford, un haz de partículas alfa se dirigía hacia una finísima lámina de oro, de modo de colectar los destellos de las partículas que atravesaban dicha lámina. Según los cálculos realizados, las partículas α deberían atravesar la lámina prácticamente sin desviación. No obstante, al realizar el experimento, se observó que, además de los destellos producidos al atravesar la lámina, se producían algunos destellos aislados en la dirección de la que provenían las partículas. A partir de estas observaciones, los científicos llegaron a la conclusión de que la única forma de que las partículas sean desvia-

das en direcciones muy apartadas de sus trayectos originales, sería que la masa positiva esté concentrada en un punto del átomo.

En base a estos resultados, y tomando la idea de nuestro sistema planetario, Rutherford propuso un nuevo modelo atómico según el cual la carga positiva estaría concentrada en el centro del átomo, región a la que denominó núcleo atómico, y en el que los electrones estarían orbitando a su alrededor, tal como los planetas lo hacen alrededor del Sol. Estas ideas llevaron al físico holandés A. Van den Broek a proponer la hipótesis de que los elementos se ordenarían de modo natural según su carga nuclear, en vez de hacerlo según su masa, y fue H. Moseley quien corroboró estas hipótesis tras sus experimentos con rayos X.

En aquel entonces se conocía el elemento hidrógeno como el más liviano de los elementos. Con la imagen del núcleo atómico, y teniendo en cuenta que la «parte positiva» del átomo de hidrógeno tiene la misma carga que el electrón, se consideró que el núcleo de hidrógeno era en realidad una partícula elemental, a la que el propio Rutherford denominó *protón*.

Hay, en principio, dos conflictos relacionados con este modelo atómico que hay que señalar. Primero, el hecho de que para los átomos más pesados la carga nuclear era aproximadamente la mitad del número de masa ($Z \approx \frac{1}{2} A$), es decir, que la masa de estos núcleos se correspondía con el doble de la masa de los protones que le darían su carga. ¿Cómo, entonces, podría estar conformado el núcleo atómico? La primera respuesta tentativa a esta pregunta la dio el propio Rutherford, suponiendo que el núcleo atómico estaría compuesto por protones y electrones. De este modo, los protones individuales darían la carga del núcleo y parte de su masa, y la masa extra del núcleo estaría dada por parejas protón-electrón. Sin embargo, se demostró más tarde que tales parejas protón-electrón no existen, y que la masa restante la aportan otras partículas, los neutrones.

La segunda cuestión está relacionada con la dinámica del átomo. Como surge de la electrodinámica clásica, una carga acelerada emite radiación electromagnética. Considerando órbitas cerradas alrededor del núcleo atómico, un electrón debería radiar energía permanentemente, en virtud de su aceleración centrípeta, haciendo que su energía cinética disminuya gradualmente. Esto llevaría a un radio de órbita cada vez más pequeño, seguido por el colapso entre el electrón y el núcleo atómico; en pocas palabras, el modelo atómico planetario sería inestable. Este problema no pudo ser resuelto por Rutherford, pero encontró respuesta en las propuestas del físico danés N. Bohr.

4.4.3 Espectros atómicos y *cuantos de luz*

Hacia la primera década del S. XX la técnica espectroscópica había logrado ya un creciente desarrollo. Mediante el uso de los espectrómetros cada vez más sofisticados los científicos pudieron medir el espectro característico de muchas sustancias con gran precisión. Sin embargo, la explicación del origen de los espectros discretos de las diferentes sustancias (observados en las llamas de diferentes sales o en descargas en gases) seguía siendo un misterio.

El primer espectro en ser caracterizado matemáticamente fue el del hidrógeno. En 1885, J. Balmer encontró una fórmula que daba las longitudes de onda

de las rayas espectrales del hidrógeno con gran exactitud. Esta fórmula también permitió predecir las longitudes de onda de las rayas en las regiones del infrarrojo y del ultravioleta de este elemento, así como las longitudes de onda del espectro de otros átomos ionizados, a veces denominados átomos hidrogenoides (He I, Li II, Be III).

Espectros de otros elementos también fueron caracterizados, pero por la complejidad de los mismos, en las fórmulas espectrales comenzaban a incorporarse ciertas constante *ad hoc*. Fue J. Rydberg, uno de los más importantes espectroscopistas de la época, quien determinó los términos espectrales de muchas series a partir de las regularidades observadas en los espectros. Era lógico, entonces, pensar que la naturaleza de los espectros discretos tendría su explicación en la naturaleza misma de los átomos, y era lógico también pensar que un buen modelo atómico daría cuenta de ello.

El primer modelo atómico que pudo explicar la emisión y absorción de radiación por parte del átomo fue el modelo de Bohr, elaborado en base a las contribuciones de M. Planck sobre la radiación del cuerpo negro (1900), y de A. Einstein sobre el efecto fotoeléctrico (1905).

La caracterización de la radiación emitida por los cuerpos incandescentes fue un problema que intrigó a los físicos por muchos años. Hacia fines del S. XIX, ya se tenían curvas experimentales del espectro de emisión del cuerpo negro⁴ para diferentes temperaturas, pero aún no había explicación definitiva para el fenómeno. El problema era, básicamente, el de encontrar alguna expresión que dé cuenta de cómo se distribuye esa energía radiante en las diferentes frecuencias. Luego de trabajar intensamente en este problema, Planck logró dar con una ecuación semiempírica que representaba casi a la perfección las curvas espectrales del cuerpo negro. Para llegar a su ecuación, lo que propuso fue que la superficie del emisor estaría formada por pequeños radiadores elementales, cada uno de los cuales emitiría una cantidad de energía en forma de «paquetes» o «*cuantos*» de radiación electromagnética. La energía emitida por cada uno de estos osciladores estaría dada por la siguiente relación

$$E = nhf \quad (\text{con } n = 1, 2, 3, \dots),$$

donde f es la frecuencia del oscilador y h es una constante, que estableció en $6,62 \cdot 10^{-34}$ J-s, y que recibiría más tarde el nombre de constante de Planck. La idea de que los osciladores podrían emitir cantidades discretas de energía (sólo múltiplos de la energía hf) fue la primera expresión de la cuantización de la radiación electromagnética, y sería utilizada unos años más tarde por A. Einstein para explicar el efecto fotoeléctrico.

En sus investigaciones dedicadas a la producción y detección de ondas electromagnéticas, H. Hertz observó durante uno de sus experimentos que entre dos esferas cargadas se producía más fácilmente una descarga (una chispa) si estas eran iluminadas con la luz de otra descarga. En otras palabras, al iluminar

⁴Un cuerpo negro, o radiador integral, es aquel cuerpo que emite (y absorbe) la cantidad máxima de energía radiante para una temperatura dada.

una superficie metálica con luz de alta frecuencia se produce la emisión de electrones. Este fenómeno recibió el nombre de efecto fotoeléctrico, y fue estudiado minuciosamente por varios científicos, realizando pruebas con diferentes metales y con luz de diferentes frecuencias. En los experimentos se observó que existe una frecuencia umbral (característica de cada metal) por debajo de la cual no se produce el fenómeno. También se observó que la energía cinética de los electrones emitidos era proporcional a la frecuencia de la luz con la que se irradiaba el metal, pero que no aumentaba con la intensidad de la misma. Asimismo, la emisión de electrones se producía en forma inmediata a la exposición de la luz.

En 1905, A. Einstein propuso una explicación del efecto fotoeléctrico basándose en ideas propuestas previamente por Planck. En su trabajo, Einstein propone que la energía de una onda luminosa no se encuentra distribuida uniformemente en la superficie del frente de onda, sino que está concentrada en pequeños cuantos de energía, a los que les dio el nombre de *fotones*. Cada uno de estos fotones tendría una energía $E = hf$. Cuando uno de estos fotones se encuentra con un electrón, cede a este toda su energía. Si la energía del fotón es suficiente para extraerlo del material, entonces el electrón será emitido, mientras que si la frecuencia no es suficientemente grande, entonces no habrá electrones emitidos. La energía cinética del electrón emitido será la diferencia entre la energía del fotón y la energía necesaria para extraerlo del material (llamada a veces trabajo de extracción).

Las observaciones hechas sobre el efecto fotoeléctrico, imposibles de explicar a la luz del electromagnetismo clásico, son contempladas por un modelo que incluye la noción del fotón como el cuanto de radiación electromagnética. Quizás sea éste el aporte más significativo de este modelo: la inclusión del fotón como el cuanto de luz y la consecuente reafirmación de la idea de cuantización de la energía propuesta por Planck.

4.4.4 Modelo atómico de Bohr

En 1913 el físico danés N. Bohr propuso un nuevo modelo atómico a partir del cual se podía deducir teóricamente la fórmula de Balmer y que eliminaba la inestabilidad del modelo de Rutherford. El modelo atómico de Bohr, que combina el modelo planetario con las ideas de la cuantización de la radiación electromagnética de Planck y Einstein, se puede resumir en tres postulados. El primero de ellos propone que en el átomo existen ciertas órbitas en las que el electrón puede encontrarse sin emitir energía radiante. El segundo postulado afirma que un electrón puede pasar de una órbita a otra de mayor energía al absorber un fotón cuya energía sea igual a la diferencia de energías entre el estado inicial y el final. Este fotón tendría una frecuencia f dada por

$$hf = E_f - E_i$$

donde h es la constante de Planck, y E_i y E_f son las energías correspondientes a los estados inicial y final respectivamente. Así como el electrón absorbe energía al pasar de una órbita de menor energía a una de mayor energía, para producir la

transición inversa el átomo debería emitir un fotón. De este modo, las frecuencias observadas para los espectros de absorción y emisión estarían relacionadas con las diferencias de energía entre las órbitas de los electrones.

El tercer postulado plantea que las órbitas permitidas para el electrón son aquellas para las cuales la cantidad de movimiento angular, L , es un número entero de $h/2\pi$, condición que se puede expresar mediante

$$L = mvr = n(h/2\pi) \quad \text{con } n = 1, 2, 3, \dots$$

donde r el radio de la órbita, v es la velocidad del electrón en su órbita y m es su masa. Combinando estos postulados con las relaciones clásicas de energía cinética y potencial del electrón en movimiento, Bohr obtuvo una expresión teórica para ubicación en longitudes de onda de las rayas espectrales del hidrógeno que no sólo tiene la misma forma que la expresión de Balmer, sino que permite calcular la constante de Rydberg a partir de constantes más fundamentales.

El modelo atómico de Bohr fue exitoso al explicar el origen de las líneas espectrales del hidrógeno, pero quizás la mayor contribución haya sido incorporar el aspecto cuántico al sistema atómico. Sin embargo, el modelo era muy limitado. Sólo podía explicar los espectros de los átomos hidrogenoides, no podía explicar el efecto Zeeman (desdoblamiento de rayas espectrales en presencia de campos magnéticos intensos) y otros efectos observados experimentalmente e introducía hipótesis sin fundamento alguno, más allá de su funcionalidad. Si bien hubo refinamientos posteriores de esta teoría, como la inclusión de la relatividad especial por A. Sommerfeld, los principales cuestionamientos no fueron superados. Se necesitaba entonces de una teoría más general, algo que permitiera describir cualquier sistema cuántico, un formalismo análogo al de las leyes de Newton (o bien, el principio de Hamilton) pero aplicable al mundo microscópico.

4.5 Conceptos básicos sobre Mecánica Cuántica

La introducción del fotón no sólo hizo posible explicar el efecto fotoeléctrico, sino que planteó un conjunto de nuevos desafíos para los físicos. Esta nueva interpretación granular de la radiación reflató una vieja discusión acerca de la verdadera naturaleza de la luz: ¿Es la luz una onda o está compuesta por partículas? Los experimentos de interferencia y difracción, así como los cambios en la polarización de la luz con el uso de campos magnéticos, y más tarde la formulación teórica del electromagnetismo de J. C. Maxwell, habían convencido a los físicos de que la luz sería una onda electromagnética. Sin embargo, fenómenos como el efecto fotoeléctrico o la dispersión de la luz por electrones, evidenciadas por los experimentos de A. Compton, otorgaban a la luz un carácter corpuscular.

Esta dualidad onda-partícula mantuvo a los científicos perplejos por varios años. El hecho de que la luz se comportase como onda en algunos experimentos y muestre características corpusculares en otros hacía imposible optar por uno de los dos modelos. Pero, ¿existe acaso algún motivo por el cual no puedan convivir ambos modelos? N. Bohr fue el primer físico en plantear lo que hoy se conoce como principio de *complementariedad*: dado que no existe experimento

capaz de mostrar simultáneamente las características ondulatoria y corpuscular de la luz, ambos modelos son necesarios para una descripción completa de la radiación electromagnética; esto es, los modelos no son mutuamente excluyentes sino que son complementarios.

4.5.1 Ondas de materia

El comportamiento dual de los fotones llevó a L. de Broglie, un joven aristócrata francés, a plantear en su tesis doctoral en 1924, la posibilidad de asociar una longitud de onda a las partículas de materia, así como se adjudica una cantidad de movimiento a los fotones. Este razonamiento permitió desarrollar una descripción del mundo material en términos de estas ondas de materia, lo que llevaría más tarde a la formulación de la ecuación de Schrödinger. Según las relaciones de Einstein⁵ y Planck, la energía asociada al fotón es⁶ $E = hf = \hbar\omega$, donde la energía guarda con la cantidad de movimiento del fotón la relación $E = pc$. Luego, si se tiene en cuenta que $c = \omega/k$, combinando las relaciones anteriores se obtiene $p = h/\lambda = \hbar k$. De aquí surge que $\lambda = h/p$, lo que propone que toda partícula de cantidad de movimiento p tendría una onda asociada de longitud de onda λ .

Si bien en el caso de cuerpos macroscópicos esta onda sería imposible de determinar (por el pequeñísimo valor de λ), para partículas submicroscópicas esta onda sería detectable mediante un experimento diseñado para tal fin. En el año 1927, Davisson y Germer, demostraron que un haz de electrones puede ser dispersado por un cristal, de modo similar a lo que ocurre con los rayos X. Más tarde, se realizaron experimentos con haces de neutrones, partículas α y otras partículas, que mostraron patrones de interferencia de la misma naturaleza que los producidos por radiaciones electromagnéticas.

Las relaciones de de Broglie permitieron dar una explicación a los postulados ad hoc que Bohr había introducido para dar forma a su modelo atómico. Para un electrón en una órbita estacionaria debe ser $L = mvr = n(h/2\pi)$ donde r es el radio de la órbita y $n = 1, 2, 3$, etc. Siendo $p = mv$ la cantidad de movimiento del electrón, la relación de de Broglie nos dice que las órbitas permitidas son aquellas para las cuales $2\pi r = n\lambda$, es decir, aquellas órbitas para las cuales la onda de materia es una onda estacionaria. Esto es, las órbitas son estables cuando la circunferencia de la órbita es un múltiplo exacto de la longitud de onda asociada al electrón (Fig. 4.5.1).

4.5.2 La ecuación de Schrödinger

Al ver que la física clásica ya no podía responder a las evidencias experimentales, nace la necesidad de una nueva formulación de la dinámica que responda a las características de los sistemas cuánticos. Es sorprendente el hecho de que esta formalización se dio prácticamente en forma simultánea pero mediante dos

⁵En la subsección 4.5.3 se describen brevemente las relaciones de Einstein entre la masa, la cantidad de movimiento y la energía.

⁶En las expresiones siguientes se utiliza el símbolo \hbar para denotar $h/2\pi$.

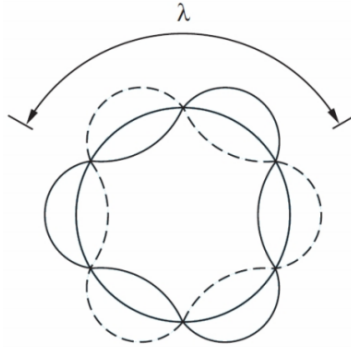


Figura 4.5.1: Esquema de una de las ondas de de Broglie, en este caso para $n = 3$.

representaciones que, en principio, parecen ser completamente diferentes: estas son la ecuación de Schrödinger y la representación matricial de Heisenberg. Ambas teorías fueron igualmente exitosas, lo cual no es nada extraño, ya que al ser analizadas más profundamente resultaron ser perfectamente equivalentes. A diferencia de la mecánica clásica, donde las ecuaciones nos hablan concretamente de la posición o de la cantidad de movimiento de una partícula, en la formulación de Schrödinger la descripción de un sistema viene dada en términos de la función de onda. La ecuación de Schrödinger puede escribirse en la forma

$$H\Psi(x, y, z, t) = i\hbar \frac{d\Psi(x, y, z, t)}{dt}$$

En esta ecuación, H es un operador diferencial llamado hamiltoniano que contiene la información sobre las interacciones del sistema, y Ψ , la función de onda del sistema, una función de las coordenadas y del tiempo que contiene toda la información del sistema. Ya que Ψ contiene toda la información del sistema, el problema en general consiste en encontrar la forma de esta función, a partir de la forma del operador hamiltoniano.

Pero, si efectivamente existe una onda asociada a las partículas, ¿cuál es el significado físico de esta onda? O bien, ¿qué ente físico representa la amplitud de la función de onda de una partícula? Desde la física clásica, sabemos que la función de onda permite determinar la amplitud de la onda en cualquier momento, en cualquier punto del espacio. Para las ondas EM, la amplitud de la onda representa el campo electromagnético en función del tiempo y de la posición. Luego, la función de la onda mecánica en una cuerda, en un gas, en un sólido, determina la amplitud de las perturbaciones que sufre dicho medio a través del espacio y del tiempo. En el caso de las ondas de materia, la amplitud de la función de onda no tiene sentido físico por sí misma, sino que es la magnitud $|\Psi|^2$ la que tiene una interpretación física. En 1926, Max Born propuso que la magnitud $|\Psi|^2$ representaría la densidad de probabilidad, una cantidad relacionada con la probabilidad de encontrar a una partícula en cierta región

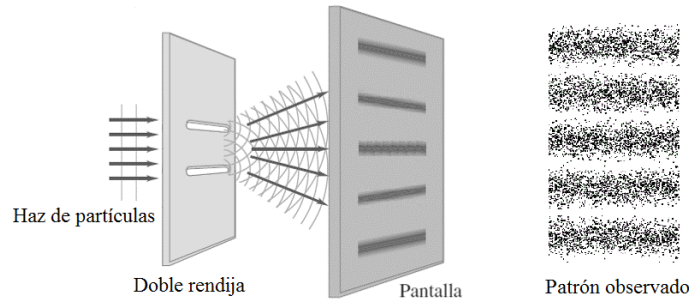


Figura 4.5.3: Esquema del experimento de interferencia de la doble rendija con un haz de partículas y el patrón observado.

del espacio. Pero ¿por qué hablar de probabilidad?

Para contestar a esta pregunta, examinemos brevemente la difracción por una rendija y la interferencia con una doble rendija. Si se hiciera incidir un haz de partículas sobre una rendija, lo que cabría esperar clásicamente es una distribución uniforme de impactos sobre una pantalla colocada detrás de la rendija. No obstante, si la rendija tiene el tamaño adecuado, lo que se observa sobre la pantalla en un experimento real es un patrón de difracción, similar al que se obtiene con una onda (Fig. 4.5.2).

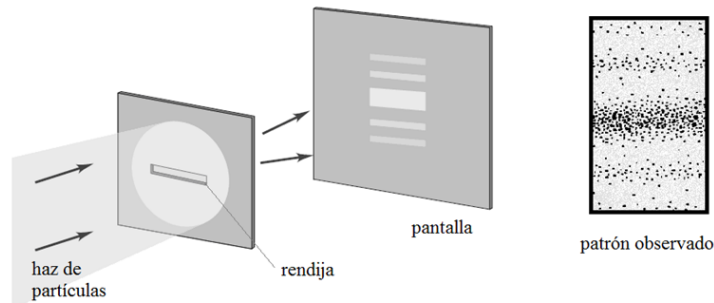


Figura 4.5.2: Esquema de la difracción de partículas por una rendija. El patrón observado tiene las mismas características que el que se produce con difracción de ondas.

Luego, si se hiciera incidir un haz de partículas sobre una doble rendija, clásicamente se obtendría una distribución equivalente a la superposición de los patrones generados por cada una de las rendijas separadamente. Sin embargo, se observa que, para rendijas del tamaño y separación adecuados, la distribución de impactos obedece a un patrón de interferencia (Fig. 4.5.3).

Ambos experimentos demuestran que las partículas de materia muestran un carácter corpuscular, pero además muestran otra característica importante. En

cualquiera de los experimentos, es imposible determinar dónde se producirá el impacto de una partícula sobre la pantalla. Aún si se hiciera el experimento lanzando electrones, protones, o cualquier otra partícula, una a la vez, sería imposible determinar la posición exacta del impacto antes de realizar el disparo. Todo lo que se puede afirmar es que hay mayores probabilidades de impacto en ciertas regiones de la pantalla que en otras, y que, asimismo, existen regiones en las que la probabilidad de impacto es nula. En este ejemplo se observa también el principio de complementariedad en acción: si se diseña un experimento para detectar por cuál de las rendijas pasó la partícula, el patrón de interferencia se destruye, de modo que tal experimento no puede mostrar el carácter ondulatorio y corpuscular de manera simultánea.

4.5.3 Breve reseña sobre la mecánica relativista

En 1905, A. Einstein publicó un trabajo titulado «Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento». La meta inicial de Einstein era resolver algunas inconsistencias entre las leyes de la Mecánica y las del Electromagnetismo; sin embargo, su teoría de la relatividad termina por reconstruir las concepciones de espacio y tiempo en la física. A partir de los postulados de la teoría de la relatividad, Einstein encuentra que las coordenadas espaciales y la temporal están entrelazadas.

Una de las consecuencias más importantes de la teoría es la relatividad de la simultaneidad: eventos que son simultáneos en un sistema de referencia no lo son en otro sistema en movimiento respecto al primero. Otras consecuencias son la dilatación de tiempos (dos observadores con movimiento relativo medirán diferentes intervalos de tiempo transcurrido entre dos eventos) y la contracción de las longitudes (dos observadores con movimiento relativo que miden diferentes longitudes para un mismo objeto).

Para tener una idea general de cómo opera la teoría de la relatividad restringida podemos comenzar analizando la geometría de Euclides, que es la geometría en la que se basa toda la Mecánica Clásica. Se traza un segmento en un espacio euclidiano. Si bien en diferentes sistemas se darían coordenadas distintas de los extremos, la longitud del segmento, definida por la relación

$$\Delta l^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2$$

será la misma en todos los sistemas. Esto es, la distancia entre puntos del espacio es un invariante de la geometría euclidiana. Esta distancia entre puntos podría representar, por ejemplo, el desplazamiento de un punto en movimiento. En ese caso, diferentes observadores en diferentes sistemas medirían no sólo el mismo desplazamiento, sino también el mismo intervalo de tiempo transcurrido.

La teoría de la relatividad plantea que la geometría del espacio-tiempo en el que se suceden todos los eventos responde a un invariante diferente, al que se suele llamar *intervalo*. Este intervalo se define entre *eventos* del *espacio-tiempo*, y su forma más sencilla (sin recurrir al álgebra tensorial) es

$$\Delta s^2 = \Delta t^2 - (\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2) / c^2$$

En esta expresión, Δs^2 es el intervalo entre eventos, mientras que Δt , Δx , Δy y Δz son las diferencias entre las coordenadas temporales y espaciales entre los eventos. Así, dos observadores pueden no estar de acuerdo en «cuándo y dónde» ocurrió un evento, y «cuándo y dónde» ocurrió un segundo evento, pero el intervalo entre eventos será el mismo para ambos.

De manera similar, existe un invariante que relaciona las variables dinámicas de un sistema. Si m es la masa de una partícula, E es su energía total y p , su cantidad de movimiento, se verifica

$$(mc^2)^2 = E^2 - (pc)^2$$

o bien,

$$(mc^2)^2 = E^2 - (p_x^2 + p_y^2 + p_z^2) c^2$$

Esta relación es válida tanto para una única partícula como para un sistema de partículas. Para un sistema formado por varias partículas, m es la masa invariante del sistema, E es la energía total del mismo y p es la cantidad de movimiento. Podemos interpretar lo anterior del siguiente modo: dos observadores en movimiento relativo pueden no estar de acuerdo en cuál es la energía total de una partícula (o de un sistema de partículas), ni en cuál es la cantidad de movimiento total del sistema, pero ambos estarán de acuerdo en cuál es su masa del sistema.

Una forma alternativa de presentar la energía total de una partícula es

$$E = \gamma mc^2 = mc^2 + K$$

siendo K la energía cinética de la partícula. La expresión anterior contiene el factor $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$ donde $\beta = v/c$ determina la velocidad de la partícula en relación con la velocidad de la luz. Al trabajar con altas energías, ocurre para muchas partículas de materia que $K \gg mc^2$, por ende, se puede tomar la aproximación $E \approx pc$.

Finalmente, una de las relaciones más importantes que se obtienen de esta teoría, es la famosa fórmula,

$$E = mc^2$$

que expresa la equivalencia entre la masa y energía de una partícula.

4.5.3.1 Energías típicas en física de partículas

De la física clásica sabemos que una carga acelerada por un campo eléctrico debido a una diferencia de potencial V adquiere una energía cinética igual al producto de la carga por la diferencia de potencial V . Si la carga es la de un electrón, entonces la energía cinética adquirida al ser acelerado por una diferencia de potencial de 1 V será 1 eV, equivalente a $1,6 \cdot 10^{-19}$ J. Esta unidad de energía, el *electron-Volt*, es muy cómoda para analizar interacciones entre

partículas, dado su pequeño valor. Los niveles energéticos de los electrones en el átomo, por ejemplo, son del orden de los eV; luego, dado que la producción de rayos X requiere energías del orden de las decenas de kV, los fotones de rayos X, tienen estas energías.

Según la teoría de la relatividad, toda partícula con masa tiene una energía en reposo, dada por la expresión $E = mc^2$. En el caso del electrón, con una masa de $9,11 \cdot 10^{-31}$ kg, la energía en reposo es de unos 0,511 MeV (que equivalen a $8,2 \cdot 10^{-14}$ J). De este modo, la masa del electrón puede ser expresada en términos de energía, como $0,511 \text{ MeV}/c^2$, lo cual tiene perfecto sentido pensando en la equivalencia masa-energía. De manera similar, los protones y neutrones tienen masas próximas a 938 y $939 \text{ MeV}/c^2$ respectivamente. Dado que esta relación aparece con frecuencia, muchas veces se indica directamente la masa en MeV⁷.

Para un electrón de energía cinética igual a su energía en reposo, su energía total es $E = \gamma mc^2 = 2mc^2$, de lo que resulta una velocidad de $0,866 c$. Si, en cambio su energía cinética fuese unas 20 veces su energía en reposo, su velocidad sería de $0,999 c$. El protón, sin embargo, tiene una masa casi 2000 veces mayor que la del electrón, de modo que requiere mucha más energía para alcanzar velocidades relativistas. De lo dicho recién, un electrón requiere cerca de 1 MeV para llegar (casi) al 90% de la velocidad de la luz, mientras que un protón necesita unos 2 GeV para alcanzar dicha velocidad.

La equivalencia masa-energía ($E = mc^2$) plantea el hecho de que la masa puede manifestarse como energía y viceversa. En los reactores nucleares, por ejemplo, la energía térmica se obtiene a partir de una pequeña pérdida de masa de los núcleos originales. En forma análoga, si se dispone de suficiente energía se puede crear materia. Un ejemplo de ello es la producción de pares electrón-positrón, que constituye un tipo de interacción en la que un fotón gamma deviene en un electrón y un positrón, partícula de la que se hablará más adelante. Podemos decir, entonces, que mientras mayor sea la energía disponible, mayores serán las posibilidades de creación de partículas.

4.5.4 Principio de incerteza

En 1926, de manera casi simultánea a las publicaciones de Born y Schrödinger, Heisenberg postuló el principio de incertidumbre. Este principio enuncia que es imposible determinar simultáneamente la posición y la cantidad de movimiento de una partícula con precisión absoluta. Si Δx es la incerteza en la coordenada x de posición de una partícula y es Δp_x la indeterminación en la componente x de la cantidad de movimiento, este principio indica que se debe satisfacer la desigualdad

$$\Delta x \Delta p_x \geq \hbar/2$$

En este planteo se observa que al aumentar la precisión en la medida de una

⁷Esto corresponde en realidad a un sistema de unidades muy utilizado en física de partículas elementales, al que se hace referencia como «unidades naturales». En este sistema se toma $c = \hbar = 1$, de modo que las cantidades m , p y E se expresan en MeV.

de las variables se incrementa la incertidumbre en la otra. Si bien la formulación anterior se refiere sólo a la dirección x , lo mismo sucede con las demás direcciones. Asimismo, el principio se cumple para la medición de magnitudes conjugadas, como el ángulo de rotación y el momento angular o la energía y el tiempo⁸. En este último caso, la medición de la energía E de un sistema y la medición del tiempo t empleado en efectuar dicha medición, cumple con la relación de incerteza, que puede plantearse como

$$\Delta t \Delta E \geq \hbar/2$$

Veamos un ejemplo. Cuando un átomo se excita, rápidamente vuelve a su estado más estable tras la emisión de un fotón. Si suponemos que el tiempo promedio en el que permanece el átomo en el estado excitado es del orden de 10^{-8} s, la incertidumbre en la energía del estado excitado será $\Delta E \geq \hbar/2\Delta t \approx 4 \cdot 10^{-8}$ eV. Para un fotón de longitud de onda de 600 nm ($6 \cdot 10^{-6}$ m), la energía es ~ 2 eV, de modo que la incerteza relativa será $\sim 2 \cdot 10^{-8}$. Este valor corresponde a una incerteza en la longitud de onda de $\sim 10^{-13}$ m y se interpreta como el ancho natural de esta línea espectral en el caso de una transición espontánea; esto implica que ningún experimento podría resolver esta línea espectral con una mayor resolución que esta.

4.5.5 El átomo de hidrógeno

Volviendo a la ecuación de Schrödinger, hay que remarcar que su resolución exacta sólo es posible para ciertos sistemas físicos. (Para sistemas formados por varias partículas, por ejemplo, no hay soluciones exactas de la ecuación, por lo que se recurre a métodos de aproximación). Uno de tales sistemas es el formado por una pequeña masa eléctricamente cargada sometida a un potencial eléctrico central, generado por otra carga de mayor masa, es decir, el átomo de hidrógeno. Dado que el problema tiene simetría esférica por ser el potencial dependiente de r , para la resolución se plantea la ecuación de Schrödinger en coordenadas esféricas, siendo la función de onda de la forma $\Psi(r, \theta, \phi, t)$. Al resolver la ecuación, surgen naturalmente tres números cuánticos: el *número cuántico principal* (n), el *número cuántico orbital* (l) y el *número cuántico magnético* (m_l). El número cuántico principal indica el nivel de energía en el que se encuentra el electrón; quizás sea el número más familiar, ya que está presente desde el modelo atómico de Bohr. Luego, los números cuánticos orbital y magnético están asociados a la cuantización de los momentos angular y magnético del electrón en el átomo.

Ya que las soluciones corresponden a funciones de onda, en este modelo de átomo los electrones ya no se conciben como partículas girando en órbitas alrededor del núcleo atómico, en cambio se obtienen ciertas regiones donde la

⁸Una forma más general de expresar este principio implica relacionar una coordenada generalizada con su correspondiente impulso: $\sigma_p \sigma_q \geq \hbar/2$. Sin embargo, esto no contempla la relación entre las indeterminaciones de la energía y el tiempo. Si bien existe un operador asociado a la energía (el Hamiltoniano) no existe un operador asociado al tiempo dado que el tiempo no es un observable, sino un parámetro. No obstante, existen caminos para demostrar que esta relación es válida.

probabilidad de encontrar al electrón es mayor y regiones donde la probabilidad es nula. Se reemplaza así la idea de órbita por la de orbital, siendo este último la región del espacio donde es más probable encontrar a un electrón determinado.

4.5.6 Espín

En 1922, tras los experimentos de Stern y Gerlach, se logró la corroboración experimental de la cuantización del momento magnético de los átomos. El experimento consistía en disparar un haz de átomos en una región donde se establecía un campo magnético inhomogéneo, para que impacten luego sobre una placa fotográfica. Sobre la placa se observaría una traza continua en el caso de que el momento magnético pudiese tomar cualquier valor, mientras que las trazas serían discretas si el momento magnético estuviese cuantizado. En este último caso, el número de trazas debería ser impar, dados los posibles valores para el número cuántico magnético provistos por la teoría ($m_l = \pm 1$ con $l \leq n - 1$). En los primeros experimentos, realizados con un haz de átomos de plata (que tienen $l = 0$ para el electrón en su capa más externa), los resultados mostraron la cuantización, pero en lugar de observar un número impar de trazas se obtuvo un patrón con dos trazas.

Para explicar estas observaciones (así como el efecto Zeeman anómalo), en 1924 dos estudiantes graduados en física, Uhlenbeck y Goudsmit propusieron la idea de que el electrón podría girar alrededor de un eje propio. Esto significa que el electrón tendría momento magnético intrínseco o propio, y correspondientemente un momento angular, al que se llamó momento angular de espín. Esta hipótesis fue el punto de partida para incluir un cuarto número cuántico, el cual se llamó *número cuántico de espín*. No obstante, la idea de un electrón girando alrededor de un eje propio fue rápidamente descartada en base a una serie de sólidos argumentos. La fundamentación teórica del espín llegaría unos años más tarde de la mano de P. Dirac, quien logró combinar la mecánica cuántica con la mecánica relativista. Se entendió entonces al espín como una propiedad intrínseca del electrón, y más tarde se encontraría que todo sistema cuántico tendrían un espín.

4.5.7 Principio de Exclusión

Es importante mencionar que el espín juega un papel fundamental en la distribución de electrones en los átomos. A partir de dicha propiedad se crea una nueva clasificación para las partículas (elementales o no): los *fermiones* y los *bosones*. Los primeros poseen espín semientero, como los electrones o protones, mientras que los bosones poseen espín entero, como los fotones. A diferencia de los bosones, los fermiones se atienen al *principio de exclusión de Pauli*. Este principio nos dice, en pocas palabras, que dos partículas con espín semientero no pueden ocupar el mismo estado cuántico. Aplicado al átomo, esto implica que dos electrones no pueden tener el mismo conjunto de números cuánticos, lo que limita el número máximo de electrones que puede haber en cada nivel

energético. En base a esta y otras reglas se comprendió y mejoró el ordenamiento de los elementos en la tabla periódica de los elementos.

4.6 El núcleo atómico

Nos encontramos hasta ahora con dos clases de partículas que componen a los átomos: los protones y los electrones. También, tenemos la idea de que la mayor parte de la masa de los átomos se halla concentrada en una pequeña región: el núcleo atómico. Las estimaciones del tamaño del núcleo de los átomos de oro realizadas por el mismo Rutherford arrojaron resultados sorprendentes: a partir de sus cálculos el diámetro nuclear debería ser unas 100.000 veces menor que el del átomo.

Aceptada la existencia del núcleo atómico podríamos preguntarnos cómo se compone. Hemos visto que inicialmente fue planteada la idea de núcleos compuestos por protones, que confieren la carga nuclear positiva, y conjuntos electrones-protón, para completar la masa del átomo, conjuntos para los cuales sugirió el nombre de neutrón. Ciertamente, esta idea era muy lógica para la época. En principio las únicas partículas subatómicas (materiales) conocidas eran protones y electrones, y, por otra parte, muchos elementos radiactivos experimentan decaimientos con emisión de electrones. No obstante, en función de las ideas de de Broglie, para que la longitud de onda asociada a un electrón fuese del orden del tamaño del núcleo atómico, la energía cinética debería ser varias veces mayor que la observada en las emisiones de partículas beta, de modo que sería imposible encontrar electrones dentro del núcleo atómico.

En 1932, sin embargo, fue descubierta una partícula neutra de una masa ligeramente mayor a la del protón, a la que se llamó neutrón. En ese año, J. Chadwick, discípulo de Rutherford, llevó a cabo un experimento en el que se logró la emisión de neutrones mediante la transmutación de Berilio en Carbono, a través del bombardeo de una lámina de Berilio con partículas alfa. Ahora bien, esta nueva partícula, a la que se le dio el nombre de neutrón, no se compone de un electrón y un protón como inicialmente se propuso, sino que es otro tipo de partícula, diferente a las conocidas hasta aquel momento, y que completaría la lista de partículas componentes del átomo.

Así es que todos los átomos pueden entenderse como conjuntos de estas tres partículas. Desde el hidrógeno, el átomo más simple, cuyo isótopo más abundante está formado por un protón y un electrón, hasta los elementos más pesados, como el Uranio, de 92 protones, 92 electrones y varios isótopos (entre ellos, ^{234}U , ^{235}U y ^{238}U), toda la materia ordinaria será una combinación de estas tres partículas.

4.6.1 Fenomenología nuclear

Con la incorporación del neutrón a la lista de partículas subatómicas, se pudo entender completamente la tabla periódica de los elementos en términos de partículas subatómicas. Se comprendió que los núcleos de los elementos más

pesados tendrían mayor proporción de neutrones que los elementos más livianos. Se pudo explicar además, la existencia de diferentes variantes del mismo elemento, hoy llamados isótopos, como elementos de igual número atómico (Z) y diferente cantidad de neutrones. Incluso se pensó que los neutrones podrían estar relacionados con la vida media de diferentes isótopos. En relación con estas ideas, veremos a continuación algunos aspectos generales sobre la física nuclear.

4.6.1.1 Energía de ligadura

En primera aproximación se podría pensar que la masa total de un núcleo, $M(A, Z)$ viene dada por la suma de las masas de sus nucleones, $M(A, Z) = Zm_p + (A - Z)m_n$, sin embargo, esta relación no es precisa. La experiencia muestra que la masa del núcleo siempre es menor que la suma de la masa de sus nucleones. La diferencia entre estas masas (la del núcleo y la de los constituyentes) se denomina déficit de masa, ΔM , y puede escribirse como

$$\Delta M = M(A, Z) - [Zm_p + (A - Z)m_n] \leq 0$$

Este déficit de masa está asociado a la energía de ligadura del núcleo. Esta energía de ligadura, denotada por $B_{A,Z}$ se define por $B_{A,Z} = -\Delta Mc^2$ y se relaciona con la estabilidad nuclear: mientras mayor sea $B_{A,Z}$ más estable será el núcleo. Un valor útil en física nuclear es la energía de ligadura por nucleón, $B_{A,Z}/A$, que podría entenderse como la energía que liga a cada nucleón al núcleo en cuestión.

Como se observa en la gráfica de la Fig. 4.6.1, los valores de $B_{A,Z}/A$ se encuentran mayormente entre los 7 y los 9 MeV; esto implica, en principio, que podríamos extraer un nucleón si se le entregase al núcleo una energía cercana a los 8 MeV. También se aprecia que esta energía de ligadura crece rápidamente para elementos livianos de $A \leq 20$, luego crece lentamente hasta un valor máximo, alrededor de $A = 60$ y luego decrece lentamente. De aquí que los núcleos con $A \sim 60$ sean los más estables.

4.6.1.2 Tamaño de los núcleos

La evidencia obtenida de experimentos de dispersión sugirió que los núcleos atómicos tendrían en general una forma asimilable a la de una esfera y densidad uniforme. Se planteó entonces una relación fenomenológica que dio cuenta de estas ideas,

$$R = R_0 A^{1/3}, \quad \text{con } R = 1, 2 \text{ fm}$$

Es interesante notar que este radio está en el orden de magnitud que corresponde a la longitud de onda de un nucleón. Dado que la energía de enlace por nucleón es $B/A \sim 8 \text{ MeV}$, con $p^2/2m \sim B/A$, $p=h/\lambda$ y $\lambda \sim 2\pi R$, se encuentra que $R = 1,6 \text{ fm}$.

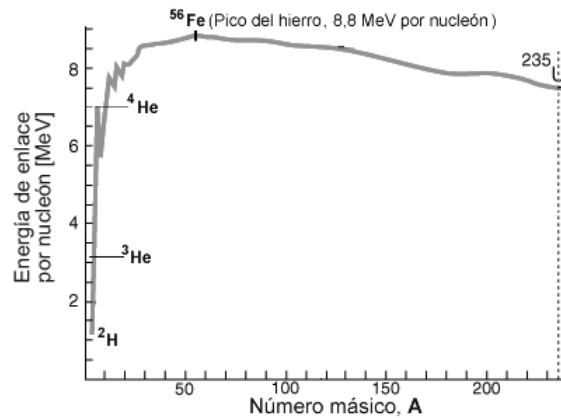


Figura 4.6.1: Gráfica de energía por nucleón (en MeV) en función del número másico.

4.6.1.3 Vida media

En sus estudios sobre radiactividad, Rutherford descubrió que la actividad decrecía con el tiempo. Experimentalmente se encuentra que la cantidad de núcleos que se desintegran en la unidad de tiempo es proporcional a la cantidad de núcleos presentes de esa clase,

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

donde λ es una constante característica de la especie que se desintegra. Al resolver esta ecuación se encuentra que el número de núcleos decrece con el tiempo en forma exponencial, dada por

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

El tiempo necesario para que se desintegre la mitad de los núcleos presentes se conoce como tiempo de semidesintegración, $T_{1/2}$, y se puede calcular fácilmente como $\ln 2/\lambda$. Otro valor característico muy importante es la vida media, τ , que corresponde al tiempo necesario para que el número de núcleos se reduzca a N_0/e , de modo que $\tau = 1/\lambda$.

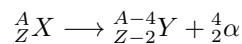
Si bien la ley de desintegración planteada se cumple de manera general, no hay que perder de vista que el fenómeno es completamente probabilístico. Esto significa que es imposible saber cuánto tiempo tardará un núcleo particular en desintegrarse, o bien, dentro de una muestra en particular, cuál será el próximo núcleo en desintegrarse. Por otra parte, los núcleos pueden decaer en núcleos hijos inestables, que a su vez decaen en núcleos nietos, lo que da origen a familias o series radiactivas.

4.6.2 Decaimientos α , β y γ

Existen muchas interacciones nucleares, entre ellas, los decaimientos α , β y γ , la captura electrónica, la fisión y la fusión nuclear. El estudio de estas formas de interacción han brindado información muy importante sobre la composición íntima de la materia.

Decaimiento α .

El decaimiento α es una reacción espontánea en la que un núcleo inestable decae emitiendo una de estas partículas. Las partículas α están compuestas por dos protones y dos neutrones, de modo que su masa, como ya se mencionó, es aproximadamente cuatro veces mayor a la del átomo de hidrógeno. Este tipo de decaimientos sólo se da en núcleos pesados, con $Z > 82$, y la energía cinética de las partículas emitidas es de algunos MeV. Al emitir una partícula alfa, el núcleo madre reduce su número másico en 4 unidades y su carga en dos unidades, de modo que una forma concisa de escribir la reacción es



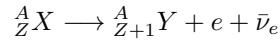
Ejemplos de decaimientos α son ${}^{238}_{92} U \longrightarrow {}^{234}_{90} Th + {}^4_2 \alpha$ o ${}^{222}_{86} Rn \longrightarrow {}^{218}_{84} Po + {}^4_2 \alpha$.

Decaimiento β

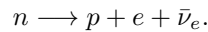
El decaimiento β consiste en la emisión de electrones o positrones por parte de ciertos radionúclidos. Existen dos tipos de decaimiento beta: el decaimiento β^+ (emisión de positrones) y el decaimiento β^- menos (con emisión de electrones). En ambos casos, el núcleo hijo tiene el mismo número de masa que el núcleo madre, pero diferente Z . Más adelante veremos que estos decaimientos son originados por una interacción distinta a la gravitatoria y a la electromagnética: la *interacción débil*.

Decaimiento β^- . Este decaimiento se caracteriza por la emisión de un electrón. Por la ley de conservación de la carga eléctrica, la carga neta antes y después de la reacción debe ser la misma. Esto implica que, si la carga es Z antes de la reacción, la carga nuclear luego de la reacción debe ser $Z + 1$ para compensar la carga negativa que lleva el electrón emitido. Así, la reacción podría escribirse inicialmente como ${}^A_Z X \longrightarrow {}^A_{Z+1} Y + e^-$.

Sin embargo, la experiencia mostró que una reacción escrita de esta forma no cumple con la conservación de la energía ni con la conservación de la cantidad de movimiento. A partir del estudio de los decaimientos beta, W. Pauli supuso que debería existir una partícula que estaría «llevándose» la energía y la cantidad de movimiento necesaria para que el proceso cumpla con las leyes de conservación. Esta partícula debía ser neutra y tener una masa despreciable o nula; fue propuesta en 1930, bautizada como *neutrino* (ν) y no fue evidenciada sino hasta 1955. Con estas consideraciones, el decaimiento beta menos se escribe

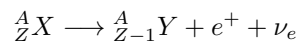


donde $\bar{\nu}_e$ es el antineutrino-electrón, la antipartícula del neutrino-electrón (más adelante se volverá sobre el tema de las antipartículas). Este decaimiento se interpreta a nivel de los componentes nucleares como la transformación de un neutrón en un protón dentro del núcleo, con la consecuente emisión de un electrón y el correspondiente antineutrino,

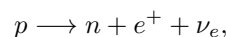


La conservación de la energía se cumple en el hecho de que el déficit de energía se convierte en energía cinética de las partículas emitidas. Experimentos de decaimiento de neutrones aislados han mostrado que esta es la forma en la que se desintegran, dando para los neutrones libres una vida media algo mayor a diez minutos.

Decaimiento β^+ . En el decaimiento beta más, se observa la emisión de una partícula en todo igual al electrón, pero con carga positiva. Esta partícula, el positrón, fue la propuesta por Paul Dirac en 1928, descubierta unos años más tarde por Carl Anderson en el estudio de rayos cósmicos, y luego observada en el decaimiento de ciertos elementos radiactivos. Al igual que en el decaimiento beta menos, el número de masa del núcleo que decae no se modifica, mientras que Z disminuye en una unidad. También acompaña el proceso la emisión de un neutrino.



Nuevamente, a nivel nuclear, la reacción se interpreta como la transformación de un protón en un neutrón dentro del núcleo, acompañada por la emisión del positrón y el neutrino,



pero debe tenerse en cuenta en este caso que no es el protón el que decae. El protón es de hecho, la partícula compuesta más estable conocida. La vida media de los protones libres se estima en 10^{32} años, que es muchos órdenes de magnitud mayor que la edad del universo. Estos decaimientos nos muestran que aquellas reacciones que inicialmente se interpretan como la transformación de elementos, son en realidad transformaciones de los componentes nucleares. Se verá más adelante que estos mismos decaimientos pueden ser interpretados a un nivel aún más elemental.

Emisión γ

A nivel nuclear se puede producir la emisión de radiación γ . De manera similar a los átomos, los núcleos atómicos pueden alcanzar estados excitados. En general, estos estados excitados se producen luego de algún tipo de interacción

(decaimientos α , β , absorción de neutrones, etc.). Cuando el núcleo pasa de un cierto estado excitado a su estado fundamental se produce la emisión del fotón γ . Un ejemplo típico se muestra en la Fig. 4.6.2, donde el núcleo ${}^{60}_{27}\text{Co}$ decae a un estado excitado del ${}^{60}_{28}\text{Ni}$ tras la emisión β^- , para luego decaer nuevamente hacia el estado fundamental tras la emisión de uno o dos fotones γ .

Como se mencionó, existen otras interacciones nucleares que son sumamente importantes para la física nuclear, pero no se profundizará sobre ellas aquí.

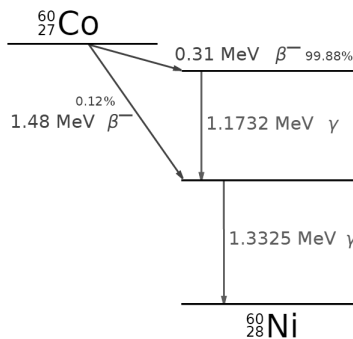


Figura 4.6.2: Decaimiento del ${}^{60}_{27}\text{Co}$. Se indican las energías y las probabilidades correspondientes a cada decaimiento.

4.6.3 Partículas virtuales y la fuerza nuclear fuerte

Vamos a detenernos ahora en la siguiente cuestión. Teniendo en cuenta que a escalas atómicas la fuerza electrostática es casi 40 órdenes de magnitud más intensa que la fuerza gravitacional, y teniendo en cuenta también que los radios nucleares son entre diez mil y cien mil veces más pequeños que los atómicos, la repulsión electrostática entre los protones que componen al núcleo es gigantesca. Entonces, ¿cómo pueden los protones mantenerse unidos en el núcleo atómico?

Para responder a esta pregunta debemos introducir una nueva fuerza: la *fuerza nuclear*. Veremos que para comprender cómo opera esta fuerza debemos basarnos en el principio de incerteza de Heisenberg y admitir la existencia de *partículas virtuales*.

El principio de incerteza de Heisenberg plantea la posibilidad de la existencia de partículas virtuales. Como se mencionó, al observar un sistema durante un intervalo de tiempo Δt , la indeterminación asociada con la energía del sistema será ΔE . Si el sistema en cuestión es una partícula de masa m , entonces la indeterminación en la masa será

$$\Delta m \sim \frac{\hbar}{2c^2\Delta t}.$$

Para un intervalo de tiempo suficientemente corto, la indeterminación en la masa puede ser comparable con la masa de una partícula, de modo que es imposible saber si el sistema consta de una única partícula o de un conjunto de

partículas de masa $m + \Delta m$. Veamos, por ejemplo, cuál es el intervalo de tiempo necesario para que un protón fluctúe en una partícula con su misma masa. La masa del protón en el SI es, aproximadamente, $1,7 \cdot 10^{-27}$ kg, con lo cual el intervalo de tiempo será $\Delta t \sim \hbar/2c^2\Delta m = 3,5 \cdot 10^{-25}$ s.

Esto implica que, durante ese breve lapso, una partícula de masa similar a la del protón podría aparecer abruptamente y ser nuevamente absorbida por el protón (siempre que no estemos mirando). La distancia que esta partícula podría recorrer en ese tiempo, viajando a una velocidad cercana a la de la luz, será $d \sim 10^{-16}$ m. Esta distancia es unas diez veces menor al orden de magnitud del tamaño del núcleo atómico. Luego, una partícula menos masiva podría recorrer distancias más grandes.

Ahora bien, una partícula virtual, viajando a través de un núcleo atómico podría encontrarse en su camino con otra partícula, no necesariamente el protón original, y ser absorbida por ella. Esta es la idea general del intercambio de partículas virtuales.

En 1935 Hideky Yukawa, físico japonés, propuso que la fuerza de atracción entre nucleones podría deberse a la existencia de una nueva interacción, a la que llamó interacción fuerte. Esta fuerza sería de muy corto alcance, pero a distancias pequeñas, como las dimensiones nucleares, sería aún mayor que las fuerzas de repulsión electrostática entre protones, lo que hace posible la existencia de los núcleos atómicos. Pero quizás lo más interesante de la propuesta de Yukawa es que explicó la existencia de esta fuerza mediante el intercambio de una partícula. Si esta partícula de intercambio se viera atraída por dos nucleones, el efecto observado sería el de una fuerza de atracción entre nucleones.

Si bien la existencia de partículas virtuales puede ser difícil de asimilar, se puede concebir a las fuerzas como resultado de un intercambio de partículas a través de la siguiente analogía. Se imagina a dos personas, viajando en sendos botes y acercándose entre sí. Cuando están suficientemente cerca, una de las personas arroja hacia el otro bote un objeto pesado. Como consecuencia de la conservación de la cantidad de movimiento, el bote desde el que se arrojó el objeto retrocede, mientras que el bote que recibe el objeto también retrocede, produciendo finalmente el alejamiento de los botes. Este es un ejemplo de una fuerza de repulsión (Fig. 4.6.3). Es importante resaltar que la idea de intercambio de partículas es fundamental para la física de partículas elementales. Más adelante se verá que según el Modelo Estándar todas las interacciones fundamentales se producen mediante el intercambio de partículas.

Volviendo a la interacción nuclear, suponiendo que la fuerza nuclear tiene un alcance de 1 fm, la masa de la partícula propuesta por Yukawa debería ser de alrededor de

$$\frac{\hbar c}{2(10^{-15}m)} \sim 100 \text{ MeV}$$

Esta partícula fue finalmente detectada en el estudio de rayos cósmicos, y se hace referencia a ella como el mesón⁹ π .

⁹El término mesón proviene del latín *meso*, que significa en el medio, y hace referencia a

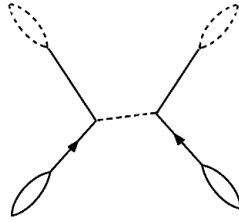


Figura 4.6.3: Representación esquemática simple de la fuerza de repulsión mediada por el intercambio de una partícula .

4.7 Rayos cósmicos, Materia y Antimateria.

A partir de la década de 1930 se realizaron muchos descubrimientos de nuevas partículas, más que nada por el desarrollo y construcción de aceleradores cada vez más potentes. Sin embargo, antes de la generación de los aceleradores había una fuente natural de partículas: los rayos cósmicos. Los rayos cósmicos son partículas muy energéticas, mayormente protones o núcleos de átomos (es decir, partículas muy estables) que provienen de diferentes regiones del espacio.

Cuando una de estas partículas llega a las capas más altas de la atmósfera, interactúa con las partículas componentes de los átomos de los gases atmosféricos, produciendo con cada interacción una lluvia de nuevas partículas. Las energías de los rayos cósmicos pueden ser extremadamente grandes, llegando hasta los 10^{20} eV, mucho mayores que las que se pueden obtener en los aceleradores más potentes de la Tierra (unos 10^{12} eV). Estas energías tan grandes son suficientes para producir un gran número de partículas, lo cual constituye una fuente de información muy importante para los físicos.

El estudio de los rayos cósmicos comenzó en la década de 1910, gracias a los descubrimientos de Víctor Hess. Inicialmente la detección se efectuaba con electroscopios, de modo que los descubrimientos efectuados durante las primeras décadas de estudio fueron poco precisos. Recién hacia fines de la década de 1920 se desarrollaron equipos de detección más sofisticados, como el contador Geiger-Müller o la cámara de Wilson, que permitieron develar características como la masa y la carga de las partículas. Más tarde, además de modificaciones y refinamientos de las cámaras de niebla, se desarrollaron otros métodos de detección, como las emulsiones fotográficas. Gracias a estos avances fueron descubiertas muchas partículas subatómicas en el estudio de rayos cósmicos antes de ser observadas en laboratorios terrestres. Aquí se mencionan sólo algunos ejemplos.

El positrón. En 1932, tras una serie de mediciones realizadas en torno a rayos cósmicos, C. Anderson logró registrar la traza de una partícula que presentaba las mismas características que la de un electrón, pero con carga positiva (Fig.

que esta partícula tendría una masa intermedia entre la del electrón y la del protón.

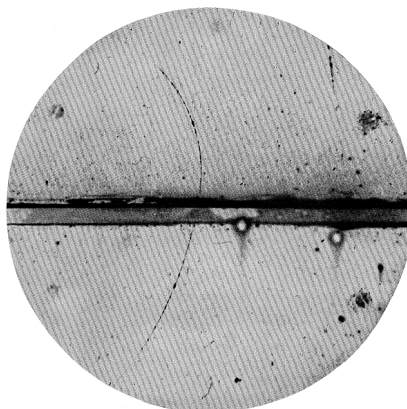


Figura 4.7.1: Primer registro de la traza de un positrón. Al atravesar una placa de plomo de 6 mm de espesor, la energía cinética se reduce a casi un tercio de su valor. En función del radio de curvatura y de la intensidad y dirección del campo, se evidencia que la carga de la partícula es positiva y que su masa es similar a la del electrón.

4.7.1). En el experimento, la desviación en la trayectoria de partículas cargadas se producía mediante un campo magnético. En este caso, cuando la partícula atraviesa la placa de plomo pierde parte de su energía, lo que hace que el radio de la trayectoria disminuya. Conociendo el sentido del campo se puede conocer el signo de la carga de la partícula. Así fue como se identificó el signo de la carga de esta partícula, a la que se le dio el nombre de positrón, haciendo referencia a su carga positiva. El descubrimiento del positrón constituyó la primera evidencia experimental de la existencia de la antimateria.

El muon. En 1937, el mismo Anderson, junto con S. H. Neddermeyer, detectaron una nueva partícula similar al electrón pero con una masa unas 200 veces mayor, a la que se denotó con la letra griega μ . En un principio se creyó que esta partícula sería el mediador de Yukawa, dado que tenía una masa similar a la misma, pero tras mediciones posteriores se comprobó que no experimentaba la interacción fuerte, de modo que no podría ser la partícula mediadora de esta fuerza. Hoy sabemos que el muon es una partícula elemental que forma parte de la familia de los leptones. Existen los muones de carga positiva y negativa, ambas iguales a la del electrón.

Mesones de Yukawa. Una década más tarde, un grupo de investigadores dirigidos por C. Powell publicaron una serie de resultados de observaciones de emulsiones fotográficas dispuestas en altas montañas. Además de observar trazas de muones, se observaron otras partículas, más masivas que los muones. Estos nuevos mesones podían decaer en un muon y otra partícula neutra, o bien,

interactuar con otro núcleo de la emulsión. El análisis de las trazas indicaba que interactuaban fuertemente con los núcleos, lo cual hizo pensar que serían los mesones de Yukawa. A estas nuevas partículas se las bautizó con la letra π , haciendo referencia a ellas como mesones π , o simplemente piones. Se descubrió que los piones se presentan en tres formas: piones positivos, π^+ , negativos, π^- y neutros, π^0 . La masa de los piones cargados fue determinada en 273 veces la masa del electrón, mientras que la del pion neutro, en 265 veces. La vida media de los piones cargados se determinó de 10^{-8} segundos, y la de los piones neutros, en 10^{-16} segundos.

Muchas otras partículas fueron detectadas en experimentos con rayos cósmicos, tales como las partículas Λ y los kaones (K^+, K^-, K^0), entre otras. Actualmente la investigación en rayos cósmicos es un área de importante desarrollo en física de partículas. En la zona de Malargüe, provincia de Mendoza, se encuentra el laboratorio de rayos cósmicos más grande del mundo, el Observatorio Pierre Auger. Uno de los principales objetivos de este proyecto es la reconstrucción de las lluvias de partículas producidas por los rayos cósmicos con el fin de determinar su procedencia y composición.

4.7.1 Antimateria

Como ya se mencionó, el descubrimiento del positrón constituyó la primera evidencia experimental de la antimateria. Con el correr del tiempo, se observó que todas las partículas que se descubrían se presentaban en sus variantes positiva y negativa (con excepción de las neutras). Pero ¿a qué llamamos antimateria?

En 1928, P. Dirac, un joven y brillante físico inglés, se dio a la tarea de reconciliar la mecánica cuántica de Schrödinger con la relatividad de Einstein. En la resolución del problema Dirac se encontró con la presencia de soluciones con energías negativas. Si bien la matemática implicada en la resolución del problema es algo complicada, el punto se puede ilustrar como sigue. La energía total de una partícula relativista puede escribirse en la forma $E^2 = (mc^2)^2 + (pc)^2$, o bien

$$E = \pm \sqrt{(mc^2)^2 + (pc)^2}$$

lo que implica valores de energía tanto positivos como negativos.

Ahora bien, si existiese la posibilidad de que los electrones alcancen energías negativas, en virtud de la tendencia natural de todo sistema aislado a dirigirse hacia el estado de menor energía, todos los electrones tenderían a dirigirse hacia estos estados, con la consecuente emisión de radiación; pero esto no es lo que se observa. Por otra parte, estos electrones buscarían energías cada vez más negativas, debido a que el efecto no está acotado por debajo (esto es, no se plantea un valor mínimo de energía).

La manera de interpretar estos estados de energía negativa por parte de Dirac fue considerar que estos estados sí existirían, pero que estarían todos «llenos», y no podrían ser ocupados por otros electrones en virtud del principio de exclusión

de Pauli. Para poder crear un «hueco» se debería aportar la energía necesaria a una de estas partículas como para que salten a un estado de energía positiva. En tal caso, existiría el electrón negativo, de energía positiva, y el hueco, o ausencia de una partícula negativa con energía negativa, correspondiente a una partícula de energía positiva y carga positiva; esta sería la explicación del fenómeno de creación de pares. En forma análoga, la aniquilación se produciría cuando un electrón se encontrase con uno de estos huecos de energía negativa.

Pero a la hora de medir, no es posible encontrar estos huecos; en realidad lo que detectó C. Anderson, y lo que se puede observar en los laboratorios, fue la traza de una partícula de igual masa que el electrón, de energía positiva y de la misma carga pero positiva. De este modo se introdujo a la escena de la física la idea de antipartícula. Hoy sabemos que para cada partícula existe una antipartícula: en el caso de las partículas con carga eléctrica, sus antipartículas tienen carga opuesta. Para partículas neutras, ellas mismas pueden ser su antipartícula. Como se verá más adelante, existen otras características que cambian entre una partícula y su correspondiente antipartícula.

Hay otra cuestión interesante relacionada con la idea de antimateria. En la física actual, la simetría desempeña un papel fundamental, de hecho, muchas de las teorías actuales en física de partículas se fundamentan en la existencia de ciertas simetrías para dar cuenta de las interacciones. Sin ir más lejos, la aceptación de que toda partícula posee una antipartícula está fundada en una idea de simetría. Sin embargo, se podría pensar que, de ser iguales las cantidades entre partículas y antipartículas, estas se aniquilarían mutuamente y no quedaría materia en el Universo. Pero, entonces, ¿por qué observamos partículas de materia en nuestro Universo, mientras que la antimateria parece ser una colección de objetos extraños o inusuales? Al parecer, durante el enfriamiento posterior al Big Bang, en la región del Universo en la que nos tocó vivir, se produjo una leve asimetría entre materia y antimateria. Eso implicaría que pueden existir regiones en el Universo donde los cuerpos materiales estén compuestos de lo que llamamos antimateria. Debe tenerse presente que las antipartículas son tan estables como las partículas «ordinarias»; la aniquilación se produce cuando hay un encuentro entre partícula y antipartícula, pero eso no significa que un cuerpo material formado por «antiátomos» sea de por sí inestable.

4.8 Partículas Subnucleares: los *Quarks*

4.8.1 Muchas partículas

Con el desarrollo de aceleradores cada vez más potentes, la lista de partículas subatómicas creció enormemente. Mientras que a fines de la década de 1920 sólo se contaban unas cuatro o cinco partículas subatómicas, hacia la década de 1960 el número de partículas superaba el número de elementos en la tabla periódica. Los piones, muones, kaones, las partículas sigma, delta, rho, eta, etc. son solo algunos ejemplos de partículas subatómicas. Lógicamente, semejante situación requería de algún tipo de sistematización de la información, la cual se

fue dando paulatinamente en función de la determinación de las propiedades de las partículas.

La primera clasificación general se dio por el tipo de interacción. Al hablar del núcleo atómico se hizo referencia a la fuerza fuerte. Además de los nucleones, existen otras partículas que experimentan este tipo de interacción; de aquí, la primera clasificación. A las partículas que no experimentan interacción fuerte se las llamó *leptones* (del griego *leptos*, que significa liviano), mientras que las partículas que experimentan la interacción fuerte fueron clasificadas como *hadrones* (también del griego *hadrys*, o fuerte). Los leptones que habían sido observados hasta aquel momento eran el electrón, el muon y el neutrino (y sus correspondientes antipartículas). Luego, en la década de 1970 se descubriría un leptón más masivo: el *tau* (τ). Este leptón completaría la lista de tres generaciones de leptones, como se verá más adelante.

Dentro del grupo de los hadrones se estableció una nueva clasificación: *mesones* y *bariones*. Con excepción del protón y el neutrón, todos los hadrones se desintegraban en fracciones de segundo. A las partículas que daban lugar a uno o más protones entre los productos de desintegración se las llamó bariones, mientras que aquellas cuyos productos eran solo leptones se clasificaron como mesones. Ejemplos de bariones son el mismo protón, el neutrón, y otras partículas como la Ξ , Λ , Σ , Δ , entre otras, mientras que los piones o los kaones son mesones. Otra clasificación introducida *ad hoc* fue la extrañeza. Son «extrañas» aquellas partículas que muestran tiempos de decaimiento mucho más largos de los esperados para las mismas en función de su masa.

Para dar un carácter cuantitativo a estas clasificaciones se introdujeron diferentes números para cada grupo de partículas. Primero, el número bariónico, B , que toma el valor $B = 1$ para bariones, $B = -1$ para antibariones y cero para toda otra partícula. De manera similar, se introdujo el número leptónico L (que no debe confundirse con el impulso angular), y se adjudicó $L = 1$ para leptones, $L = -1$ para antileptones y $L = 0$ para las demás partículas. A las partículas con extrañeza se las rotuló con el número de extrañeza $S = -1$ (que no debe confundirse con el número cuántico de espín), $S = 1$ para las antipartículas y cero para las demás.

La inclusión de estos rótulos para las partículas dio lugar a nuevas leyes de conservación que se sumaron a las leyes de conservación de la cantidad de movimiento, del impulso angular, de la energía y de la carga eléctrica. Las leyes de conservación del número leptónico, de conservación del número bariónico, y de conservación del número de extrañeza, se formularon para dar cuenta de cuáles procesos eran posibles y cuáles nunca serían observados¹⁰. Si bien estas clasificaciones permitieron obtener nuevos conocimientos sobre las partículas, la situación se volvía cada vez más confusa: demasiadas partículas, demasiadas propiedades para las mismas, y ningún esquema simple que pueda resumir todo lo observado. Los cuadros¹¹ 4.1 y 4.2 muestran sólo algunas de las partículas descubiertas.

¹⁰Se debe mencionar que la conservación del número de extrañeza es válida para la producción de hadrones, pero no lo es, en general, para el decaimiento de partículas extrañas.

¹¹Ambos cuadros, adaptados de [57]

Nombre de la partícula	Símbolo	Anti-partícula	Masa (MeV/c ²)	L _e	L _μ	L _τ	Vida (s)	Modos principales de decaimiento
Electrón	e ⁻	e ⁺	0.511	±1	0	0	Estable	
Neutrino electrónico	ν _e	$\bar{\nu}_e$	<3 × 10 ⁻⁶	±1	0	0	Estable	
Muón	μ ⁻	μ ⁺	105.7	0	±1	0	2.20 × 10 ⁻⁶	e ⁻ $\bar{\nu}_e$ ν _μ
Neutrino muónico	ν _μ	$\bar{\nu}_\mu$	<0.19	0	±1	0	Estable	
Tau	τ ⁻	τ ⁺	1777	0	0	±1	2.9 × 10 ⁻¹³	μ ⁻ $\bar{\nu}_\mu$ ν _τ o e ⁻ $\bar{\nu}_e$ ν _τ
Neutrino tauónico	ν _τ	$\bar{\nu}_\tau$	<18.2	0	0	±1	Estable	

Cuadro 4.1: Tablas de leptones.

Partícula	Masa (MeV/c ²)	Relación de carga Q/e	Espín	Número bariónico B	Extrañeza S	Vida promedio (s)	Modos típicos de decaimiento
<i>Mesones</i>							
π ⁰	135.0	0	0	0	0	8.4 × 10 ⁻¹⁷	γ γ
π ⁺	139.6	+1	0	0	0	2.60 × 10 ⁻⁸	μ ⁺ ν _μ
π ⁻	139.6	-1	0	0	0	2.60 × 10 ⁻⁸	μ ⁻ ν _μ
K ⁺	493.7	+1	0	0	+1	1.24 × 10 ⁻⁸	μ ⁺ ν _μ
K ⁻	493.7	-1	0	0	-1	1.24 × 10 ⁻⁸	μ ⁻ ν _μ
η ⁰	547.3	0	0	0	0	≈ 10 ⁻¹⁸	γ γ
<i>Bariones</i>							
p	938.3	+1	1/2	1	0	Estable	—
n	939.6	0	1/2	1	0	886	pe ⁻ $\bar{\nu}_e$
Λ ⁰	1116	0	1/2	1	-1	2.63 × 10 ⁻¹⁰	pπ ⁻ o nπ ⁰
Σ ⁺	1189	+1	1/2	1	-1	8.02 × 10 ⁻¹¹	pπ ⁰ o nπ ⁺
Σ ⁰	1193	0	1/2	1	-1	7.4 × 10 ⁻²⁰	Λ ⁰ γ
Σ ⁻	1197	-1	1/2	1	-1	1.48 × 10 ⁻¹⁰	nπ ⁻
Ξ ⁰	1315	0	1/2	1	-2	2.90 × 10 ⁻¹⁰	Λ ⁰ π ⁰
Ξ ⁻	1321	-1	1/2	1	-2	1.64 × 10 ⁻¹⁰	Λ ⁰ π ⁻
Δ ⁺⁺	1232	+2	3/2	1	0	≈ 10 ⁻²³	pπ ⁺
Ω ⁻	1672	-1	3/2	1	-3	8.2 × 10 ⁻¹¹	Λ ⁰ K ⁻
Λ _c ⁺	2285	+1	1/2	1	0	2.0 × 10 ⁻¹³	pK ⁻ π ⁺

Cuadro 4.2: Tablas de hadrones.

4.8.2 Resonancias

Una de las formas más utilizadas para estudiar las partículas subatómicas consiste en el análisis de las trazas de desintegración. Con las mejores técnicas ha sido posible medir trayectos del orden de 10^{-6} m, lo que se corresponde con tiempos de vida del orden de 10^{-16} s. Sin embargo, muchas partículas tienen tiempos de vida muy inferiores, lo que crea la necesidad de otros mecanismos de análisis.

En experimentos de scattering, una de las cantidades más importantes es la sección eficaz de dispersión, la cual da una medida de la probabilidad de interacción entre las partículas que participan de una colisión. Para una dispersión clásica, la sección eficaz se asocia directamente con el área transversal del blanco, pero en mecánica cuántica la sección eficaz depende de varios factores, siendo la energía cinética inicial de las partículas incidentes el factor principal para su determinación. El cálculo teórico de la sección eficaz para diferentes tipos de interacciones es en general muy complejo, pero como se verá más adelante, es un valor de gran importancia.

La Fig. 4.8.1 muestra la sección eficaz para la dispersión de piones π^+ (línea de trazo) y π^- (línea punteada) por protones. En ambas curvas se observan picos muy pronunciados, llamados *resonancias*, y la interpretación que se da a estas resonancias es la existencia de una partícula inestable en esa región de energías. En el caso de las interacciones pion-protón, los picos marcados corresponden a la partícula Δ (1230).

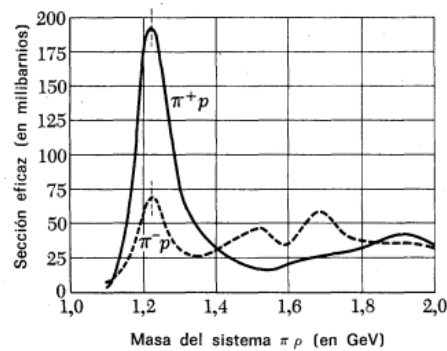


Figura 4.8.1: Sección eficaz para las interacciones $p\pi^+$ y $p\pi^-$ (Reproducido de [58]).

Analicemos otro gráfico de características similares. En la Fig. 4.8.2 se muestra una resonancia en la producción de pares muón-antimuón. En este caso, la resonancia corresponde a la producción del mesón J/ψ . Como se observa, la masa es cercana a los 3100 MeV. En este caso, la ordenada de la gráfica corresponde a la cantidad de eventos para cada energía. ¿Cómo se relaciona esto con la sección eficaz? Como se ha dicho, la sección eficaz da una medida de la probabilidad de interacción. A través de la teoría pueden efectuarse los cálculos

de las secciones eficaces para diferentes procesos y a diferentes energías. Luego, los resultados pueden corroborarse midiendo las probabilidades de interacción para dichas energías. La curva en la gráfica corresponde al cálculo mientras que los puntos con las barras de incerteza representan los datos experimentales.

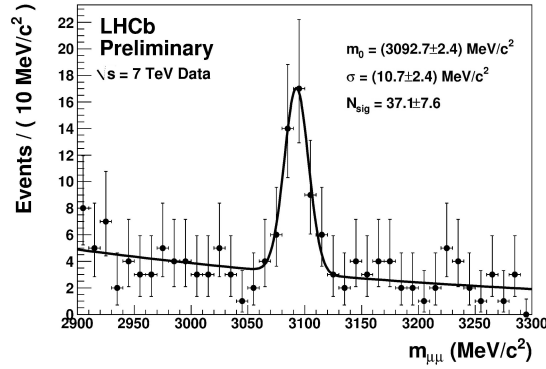


Figura 4.8.2: Sección eficaz de interacción en la región de la resonancia J/ψ . Esta interacción particular corresponde a la creación del mesón B^+ (de vida media corta), el cual decae según la reacción $B^+ \rightarrow K^+ + J/\psi$. Luego, la partícula J/ψ decae inmediatamente en dos muones μ^+ y μ^- los cuales son registrados en el experimento.

Como se puede ver en la gráfica, los picos corresponden a una energía permite establecer la masa de las partículas. Por otra parte, por el principio de incerteza se puede determinar la vida media de las partículas: considerando la anchura de la resonancia como la indeterminación asociada a la energía, es $\Delta t \sim \hbar/\Delta E$.

4.8.3 Los quarks

En un intento por dar orden a las partículas descubiertas, dos científicos de manera independiente, M. Gell-Mann y Y. Ne'eman, propusieron a principios de la década de 1960 una forma de organizar las partículas en tablas, según algunas de las propiedades mencionadas más arriba. Las tablas de hadrones permitieron además predecir la existencia de partículas no descubiertas aún. Este fue el caso de la partícula Ω^- , descubierta en 1964 y con las propiedades predichas. Otros ejemplos fueron los mesones η y η' , cuyo descubrimiento completaría esta familia de mesones. La Fig. 4.8.3 muestra tres diagramas de hadrones.

Así como el ordenamiento de los elementos en la tabla periódica sugirió la existencia de una estructura interna para los átomos, el ordenamiento de los hadrones también dio lugar a la idea de una estructura interna para estas partículas. Esta propuesta también fue realizada por Gell-Mann, quien bautizó con el nombre de *quarks* a estos objetos que formarían a los hadrones¹².

¹² El término quarks, que no tiene significado en sí, fue extraído de la frase «Three quarks for Muster Mark» de un poema de James Joyce.

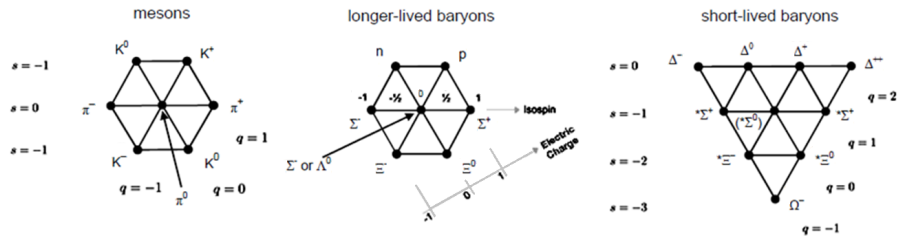


Figura 4.8.3: Tres diagramas de hadrones.

La propuesta inicial incluía tres clases o sabores de quarks: el quark *up* (o *arriba*), el quark *down* (o *abajo*) y el quark *strange* (o *extraño*), cada uno con su correspondiente antipartícula. La combinación de un quark y un antiquark daría lugar a un mesón, mientras que la combinación de tres quarks (o tres antiquarks) resultaría en un barión. Con este esquema, basado en la espectroscopia de hadrones, los protones estarían formados por dos quarks up y un quark down, mientras que los neutrones serían grupos de un quark up y dos down. La Fig. 4.8.4 muestra la composición de los hadrones, presentados en los diagramas previos.

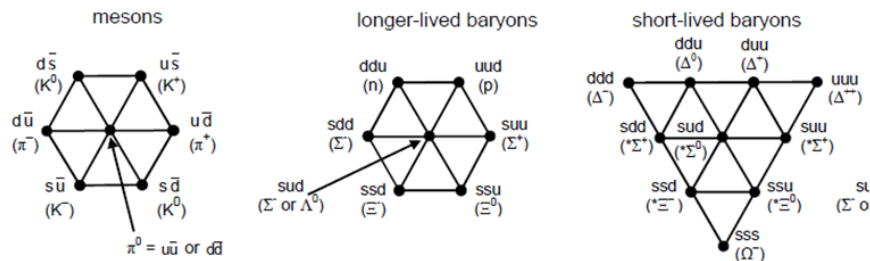


Figura 4.8.4: Composición de quarks de algunos mesones y bariones.

Descubrimientos posteriores en aceleradores de partículas mostraron la existencia de otros tres tipos de quarks, a los que se llamó *charm* (o *encanto*), *top* (o *cima*) y *bottom* (o *fondo*). El último en ser descubierto fue el quark top, en 1995 en Fermilab (Illinois, EEUU). El modelo actual de quarks incluye a su vez las correspondientes antipartículas. En general se agrupan los quarks en generaciones, admitiendo a los quarks up y down como la primera generación, charm y strange de la segunda generación y top y bottom, de tercera generación.

Pero para aceptar estas ideas se debería aceptar una idea mucho más radical: los quarks tendrían carga eléctrica fraccionaria, y nunca se había observado una partícula con una carga menor a la del electrón. ¿Sería posible, entonces, observar un quark libre? o, dicho de otro modo, ¿podría ser observada una partícula de carga fraccionaria? Dentro del formalismo de la teoría que describe

las interacciones fuertes se incluye la teoría del confinamiento cuántico. Esta teoría predice la imposibilidad de encontrar quarks en estado libre. A diferencia de la fuerza electromagnética, que es de alcance infinito, pero disminuye con la distancia, la fuerza fuerte, que es la responsable de mantener unidos a los quarks, se hace cada vez mayor con la distancia. Esto trae dos consecuencias. La primera es que a pequeñas distancias los quarks se encuentran prácticamente libres, propiedad conocida como libertad asintótica. Por otra parte, ya que la fuerza se hace mayor con la distancia de separación, esta fuerza hará que los quarks se mantengan a distancias nucleares. Luego, si se quisiera separar dos quarks una distancia del orden del fermi (10^{-15} m), la energía puesta en juego sería suficientemente grande como para crear otro par de quarks, formándose así un nuevo hadrón. A esta propiedad se la llama confinamiento, haciendo referencia a que los quarks están confinados dentro de los hadrones.

4.9 Interacciones fundamentales y el Modelo Estándar

Hasta aquí se ha hablado de cómo ha evolucionado la idea de elementalidad, desde los átomos hasta leptones y quarks, entendidos hoy como los componentes últimos de la materia. No obstante, para tener una descripción lo más completa posible de la naturaleza, es necesario no sólo conocer sus componentes más fundamentales, sino además, la forma en que estos componentes interactúan entre sí. De hecho, no es posible concebir la existencia de la materia ordinaria sin hacer referencia a las interacciones entre las partículas que la forman. La mejor descripción que tenemos hoy sobre la naturaleza se basa en cuatro interacciones: la interacción *gravitatoria*, la *electromagnética*, la interacción *fuerte* y la interacción *débil*.

De las cuatro interacciones fundamentales, la más familiar es la gravitacional. Puede resultar irónico que esta interacción, que fue la primera que tuvo una descripción matemática, sea en realidad la más misteriosa a nivel microscópico, ya que no se tiene aún una teoría cuántica de la gravedad generalmente aceptada. Al igual que lo que sucede con el resto de las interacciones, la gravedad existe (se supone) a partir del intercambio de una partícula, el *gravitón*, aún no observada. Esta interacción es la única que no está incluida en el modelo estándar; no obstante, al ser la más débil de todas a nivel microscópico (cerca de 10^{40} veces menor que la electromagnética) no se tiene en consideración al analizar interacciones entre partículas fundamentales.

La interacción electromagnética es la que existe entre partículas con carga eléctrica. Al igual que la interacción gravitatoria, el electromagnetismo tiene un alcance infinito, ya que la intensidad es proporcional a $1/r^2$. A nivel fundamental, la interacción electromagnética se describe a través de la Electrodinámica Cuántica (QED, por sus siglas en inglés), y la partícula de intercambio responsable de la interacción electromagnética es el *fotón*, de carga nula, sin masa y espín 1. Tanto los quarks como los leptones (con excepción de los neutrinos)

experimentan la interacción electromagnética.

La teoría que describe la interacción fuerte se conoce como Cromodinámica Cuántica (QCD). Esta interacción es la responsable, por ejemplo, de mantener unidos a los quarks. La interacción fuerte debe su nombre a la intensidad de la misma: a distancias nucleares, esta fuerza es más de 100 veces mayor que la electromagnética, lo que hace posible los estados agregados de quarks. Al hablar de las fuerzas entre nucleones se hizo referencia a la fuerza fuerte. Ahora podemos comprender que, en realidad, la fuerza que mantiene unidos a los nucleones dentro del núcleo atómico no es la fuerza fuerte en sí misma, sino una fuerza residual de la interacción fuerte entre los quarks que forman los nucleones.

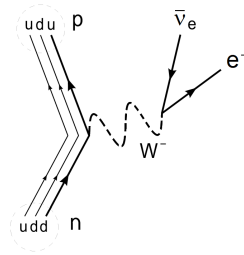
La QCD plantea la existencia de una propiedad más para los quarks: la *carga de color*. Lejos de ser una propiedad relacionada con el sentido de la vista, el color de los quarks establece reglas claras para las interacciones, y por ende, para la formación de hadrones. Los quarks, independientemente del sabor, presentan tres cargas de color distintas, a las que se hace referencia de manera arbitraria como rojo (r), verde (g) y azul (b), mientras que los antiquarks tienen las correspondientes anticargas. Por un lado, esta propiedad permite sortear la inconsistencia que plantea el principio de exclusión: si no existiese esta propiedad no podría haber dos quarks del mismo tipo o sabor en el mismo estado cuántico en un mismo hadrón. Luego, se limitan las posibilidades de combinaciones entre quarks. La idea es sencilla: el color de los hadrones debe ser neutro. Para ello, las alternativas son tres quarks de diferentes colores para formar bariones o bien un quark y un antiquark del color complementario para formar mesones.

Pero esto no es todo. Al igual que en las demás interacciones, la fuerza fuerte también es mediada por partículas, los *gluones* (del inglés *glue*, que significa pegamento). Estas partículas, bosones como todos los demás mediadores, no poseen carga eléctrica ni masa, pero poseen carga de color. Existen ocho gluones correspondientes a combinaciones posibles de pares de colores, y dado que poseen carga de color, los gluones pueden interactuar entre sí.

Finalmente, la interacción débil también es de muy corto alcance y es la responsable de ciertos decaimientos. Existen tres mediadores de la fuerza débil, los bosones W^+ , W^- y Z^0 . Así, por ejemplo, el decaimiento β^- , que fue interpretado como la transformación de un neutrón en un protón con la emisión de un electrón y un antineutrino, se concibe como la emisión de un bosón W^- que decae en el electrón y el antineutrino.

Lo que se plantea es que uno de los quarks down que componen al neutrón se transforma en un quark up, de modo que el nucleón queda compuesto por dos quarks up y un down, es decir, un protón. En la transformación de este quark se produce la emisión del bosón W^- (Fig. 4.9.1). De modo similar, en el decaimiento β^+ se produce un bosón W^+ que decae rápidamente en el positrón y el neutrino, mientras que dentro del núcleo un protón se convierte en un neutrón por la transformación de un quark up en un quark down.

La primera teoría de la interacción débil fue propuesta por E. Fermi en la década de 1930. En ella se explicaba el decaimiento beta a partir de una fuerza de muy corto alcance entre nucleones. No obstante, la teoría actualmente aceptada sobre la interacción débil fue propuesta en la década de 1960 por S. L.

Figura 4.9.1: Decaimiento β^- revisado.

Glashow, A. Salam y S. Weinberg. Esta teoría constituye en realidad el tratamiento unificado de las interacciones débil y electromagnética y su contrastación experimental fue el descubrimiento de los bosones W (+ y -) y Z^0 .

Asimismo, una de las metas de los físicos teóricos de partículas es lograr la unificación de las tres interacciones (fuerte, débil y electromagnética) en una única teoría, la Teoría de Gran Unificación (en inglés, GUT, *Grand Unification Theory*). Existen varias versiones de teorías unificadas, sin embargo, al momento no se ha probado la validez de ninguna. En todos los casos, la información actual apunta a que, a grandes energías, todas las fuerzas serían parte de una misma interacción.

4.9.1 El Modelo Estándar de Partículas Elementales

Todo el conocimiento que tenemos sobre las partículas elementales y sus interacciones se encuentra en el Modelo Estándar de Partículas Elementales. Reúne la teoría electrodébil y la cromodinámica cuántica para dar una descripción completa de todas las interacciones fundamentales entre partículas elementales (con excepción de la gravedad).

Según esta teoría, toda la materia conocida se compone de leptones o combinaciones de quarks, las cuales interactúan entre sí mediante el intercambio de bosones. Como ya se ha visto, los quarks pueden interactuar mutuamente a través del intercambio de gluones, quienes a su vez pueden interactuar entre otros gluones y consigo mismos. Los quarks experimentan, además, las interacciones débil y electromagnética. Los leptones, en cambio, sólo experimentan estas últimas dos, ya que la interacción fuerte sólo se reserva para partículas con carga de color.

El Cuadro 4.3 muestra las partículas que hoy consideramos elementales. Se indica en cada caso, la carga eléctrica, la carga de color y la energía en reposo, en MeV. Generalmente los fermiones, partículas de materia, se agrupan en tres generaciones. Esta clasificación responde en principio a un aspecto histórico: las partículas de la primera generación fueron las primeras en ser descubiertas, luego las de la segunda y finalmente las de la tercera. Asimismo, las masas de las mismas crecen para cada generación. Debe tenerse en cuenta que cada una de estas partículas posee a su vez una antipartícula, en todo igual, pero de carga

Quarks	Up	+ 2/3	Charm	+ 2/3	Top	+ 2/3
		r, g, b		r, g, b		r, g, b
	u	-3	c	~1,250	t	~173,000
	Down	- 1/3	Strange	- 1/3	Bottom	- 1/3
		r, g, b		r, g, b		r, g, b
	d	~6.5	s	~115	b	~4,250
Leptons	Electron	-1	Muon	-1	Tau	-1
		0.511		106		1,777
	e⁻		μ		τ	
	Electron neutrino	0	Muon neutrino	0	Tau neutrino	0
		< 0.000002		< 0.000002		< 0.000002
	ν_e		ν_μ		ν_τ	

Cuadro 4.3: Tabla de partículas elementales. Se indica la carga eléctrica (como múltiplos de la carga fundamental), la carga de color y la masa en MeV [42].

opuesta. Las antipartículas no se muestran en el cuadro.

Además de las partículas de materia, tenemos también los bosones de intercambio (llamados también bosones de Gauge). El Cuadro 4.4 resume las propiedades más importantes de estas partículas.

	Force	Force Carrier	Rest Mass (GeV/c ²)	Charge	Relative Strength	Range (cm)	Spin	Color
Gauge Bosons	Strong	Gluons	0	0	1	< 10 ⁻¹³	1	Yes
	Weak	W ⁺	80.4	+1	10 ⁻¹³	< 10 ⁻¹⁶	1	Neutral
		W ⁻	80.4	-1			1	
	Electromagnetic	Photons	0	0	10 ⁻²	Infinite	1	Neutral
	Gravitational	Gravitons	0	0	10 ⁻³⁸	Infinite	2	Neutral

Cuadro 4.4: Bosones de Gauge, mediadores de las cuatro interacciones fundamentales [42].

El Modelo Estándar es una de las teorías más importantes de la física, tanto por la generalidad y profundidad de sus descripciones, como por la fuerte correspondencia entre sus predicciones y los resultados de los experimentos. Muchas de las partículas hoy entendidas como elementales fueron predichas inicialmente por el modelo, así como los mediadores de la interacción débil. Asimismo, en virtud de esta teoría puede entenderse la composición de todos los hadrones observados en los experimentos.

4.9.2 El papel de la simetría

El concepto de simetría juega un rol fundamental en la física moderna, a un punto tal que todas las leyes de conservación conocidas pueden ser expresadas en términos de simetrías. Pero, ¿qué entendemos por simetría? En términos simples, un sistema posee alguna simetría si se puede realizar alguna transformación en el sistema, de modo que, luego de la transformación, el sistema quede exactamente igual que antes. Se dice, entonces, que el sistema es invariante ante tal transformación. Ejemplos de transformaciones son las traslaciones espaciales, las rotaciones o la traslación temporal; el concepto de simetría radica en que las leyes físicas que describen un sistema, si son correctas, deben ser invariantes ante estas transformaciones.

La formulación matemática que está detrás del concepto de simetría es el teorema de Emmy Noether. En palabras simples, el teorema establece que, *para cada simetría continua de las leyes de la física, debe existir una ley de conservación, y para cada ley de conservación debe existir una simetría continua.*

Luego, ya que cada ley de conservación se expresa en términos de una cantidad conservada, podemos decir que para cada simetría continua existe una cantidad conservada¹³. Desde esta perspectiva, las leyes de conservación de la energía, de la cantidad de movimiento y del momento angular, son en realidad el resultado de las simetrías de traslación temporal, de traslación espacial y de rotaciones, respectivamente.

Además de las tres leyes de conservación mencionadas existen otras, algunas más familiares que otras. Quizás la más conocida sea la conservación de la carga. Se ha dicho que en cualquier transformación la carga neta debe permanecer constante, lo cual se verifica en cualquier experimento. Es de esperar, entonces, que esta ley de conservación esté relacionada con alguna simetría, y de hecho esto es así. La simetría asociada a la conservación de la carga es la «simetría de Gauge». Esta simetría, totalmente abstracta, juega un papel fundamental en todas las fuerzas de la naturaleza. Otras simetrías importantes en el campo de la física de partículas son la simetría de paridad, la simetría de inversión temporal o la simetría entre materia y antimateria, todas ellas necesarias para describir las reacciones observadas.

4.9.3 Ruptura espontánea de la simetría y bosón de Higgs

Existe otra idea en relación con las simetrías que es de vital importancia para la descripción de la naturaleza: la ruptura espontánea de la simetría. Si un sistema que posee cierta simetría es sometido a ciertas condiciones, también simétricas, de modo que pasa a un estado que ya no respeta la simetría, se dice que la simetría se ha roto espontáneamente. Hay muchos ejemplos en la naturaleza de ruptura espontánea de la simetría. Un ejemplo típico es el de pandeo de una varilla. Si se dispone una varilla verticalmente presentará simetría frente a rotaciones alrededor de un eje vertical. Si se realiza un esfuerzo de

¹³Una cantidad conservada es una cantidad física cuyo valor es el mismo antes y después de la transformación que conserva la simetría.

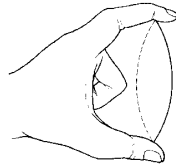


Figura 4.9.2: Al someter a una varilla a un esfuerzo de compresión, la misma pandea en alguna dirección. Inicialmente el sistema es simétrico ante rotaciones y no hay direcciones de privilegio para el pandeo. El esfuerzo aplicado también es simétrico. Sin embargo, el resultado final es un sistema que no presenta la misma simetría ante rotaciones que la que presentaba inicialmente. Se dice entonces que la simetría del sistema se ha roto espontáneamente.

compresión sobre la varilla, también simétrico (Fig. 4.9.2), esta va a pandear en alguna dirección particular. En principio, todas las posibles direcciones para el pandeo son igualmente probables, pero al producirse en una dirección particular, se dice que la simetría se rompe espontáneamente.

Ahora bien, ¿cómo se relaciona esta idea con la física de partículas? El Modelo Estándar de Partículas Elementales describe con éxito las interacciones fuerte, electromagnética y débil. Sin embargo, las teorías de Gauge, uno de los soportes formales de las ecuaciones del modelo, predicen que los mediadores de las fuerzas no pueden tener masa, lo cual no se corresponde de ninguna forma con las observaciones de las interacciones débiles. La resolución de este problema llegó con la propuesta de F. Englert y R. Brout, e independientemente P. Higgs, quienes propusieron un mecanismo de ruptura espontánea de simetría. La idea general es que existe un campo escalar que inunda todo el Universo, el campo de Higgs. Al estar presente en todo el Universo, las partículas elementales pueden interactuar en mayor o menor medida con este campo, y es la intensidad de la interacción lo que le da la masa a las partículas. Así, los fotones y gluones no interactúan con este campo, por ello su masa nula, mientras que los bosones W^+ , W^- y Z^0 interactúan fuertemente con este campo lo que hace que tengan una gran masa.

La idea de ruptura espontánea de la simetría se pone de manifiesto en los comienzos del Universo. A raíz del Big Bang, nace un Universo simétrico con partículas de masa nula y, por ende, viajando a la velocidad de la luz. El campo de Higgs tenía un valor de energía nulo y estable. Con el enfriamiento del Universo, una fracción de segundo posterior al Big Bang, el campo de Higgs realizó una transición de fase que hizo que el estado de energía nulo deje de ser un estado de mínima energía, convirtiéndose en un estado inestable. Como consecuencia, el campo pasó de estar en un punto simétrico de valor nulo a alguno de los puntos correspondientes al círculo de mínima energía (Fig. 4.9.3), tomando un valor distinto de cero y rompiendo así la simetría. Con esta ruptura, el campo toma en todo el Universo un valor constante no nulo, y las partículas comienzan a interactuar con él, ganando cierta energía, que es a lo que llamamos masa.

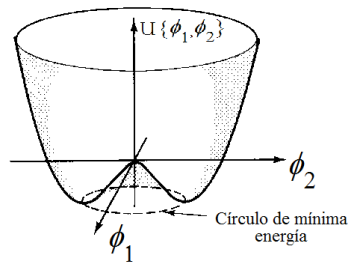


Figura 4.9.3: Representación esquemática del campo de Higgs.

Al igual que lo que sucede con todos los demás campos, la excitación del campo de Higgs debería poder detectarse como una partícula. Fue P. Higgs quien señaló por primera vez que esta partícula debería ser un bosón escalar, pero las ecuaciones del Modelo Estándar no permiten establecer con precisión la masa del bosón de Higgs. Los experimentos efectuados en Fermilab mostraron que la masa de esta partícula debería ser mayor a 114 GeV, de modo que su masa podría tomar, en principio, cualquier valor superior a este. Luego de enormes esfuerzos efectuados por científicos de todo el mundo, el bosón de Higgs fue encontrada en 2012 en los experimentos ATLAS y CMS del CERN, y su masa se estableció en alrededor de 125 GeV.

Capítulo 5

Física de Partículas y Evolución del Concepto de Elementalidad: Segunda Parte

Una breve introducción a la teoría y el experimento

5.1 Generalidades

En las ciencias exactas, el grado de precisión de una teoría se mide en función de la correspondencia entre las predicciones efectuadas desde la teoría y los resultados experimentales. El Modelo Estándar de Partículas Elementales (SM) es una de las teorías mejor corroboradas de las ciencias. Pero teniendo en cuenta que muchas de las partículas propuestas no pueden ser observadas de manera directa, ¿cómo es posible, entonces, probar su existencia? En los siguientes párrafos veremos algunos ejemplos de las predicciones teóricas que pueden obtenerse a partir del SM y cómo estas predicciones pueden ser corroboradas en los experimentos. No es el objetivo de este Capítulo analizar las ecuaciones del SM, sino acercar algunas ideas que permitan comprender cómo se trabaja en física de partículas.

En términos generales, una partícula puede realizar un *decaimiento*, sufrir una *dispersión* (o *scattering*), o bien, encontrarse en un *estado ligado* a un sistema. Los estados ligados, como los sistemas atómicos, o los diferentes tipos de uniones moleculares, en general se pueden describir mediante la mecánica ondulatoria no relativista, esto es, la formulación de Schrödinger, mientras que los decaimientos y las dispersiones entre partículas elementales se formulan per-

turbativamente mediante las reglas de Feynman. Estas reglas (que no vamos a discutir aquí) son en realidad una herramienta para simplificar la construcción de las ecuaciones que permiten calcular los parámetros medibles en los experimentos. Así, por ejemplo, las tasas de decaimiento, las secciones eficaces o tasas de desintegración múltiple (en inglés, *branching ratios*) pueden ser calculadas para cualquier interacción por las ecuaciones del SM. Luego, el éxito de la teoría queda supeditado al ajuste entre estas predicciones y los datos experimentales.

Ya que los decaimientos y las dispersiones no se dan siempre del mismo modo, no se puede determinar de manera unívoca cuál será el resultado de una interacción entre partículas, pero sí se puede predecir la probabilidad de que se produzcan diferentes decaimientos y dispersiones. Si, por ejemplo, una partícula con energía e impulso en un rango dado decae de tres modos distintos, el SM permite calcular las amplitudes de probabilidad relativas a cada modo de decaimiento. Al observar un número de decaimientos de esta partícula en el rango de energía e impulso correspondiente, se puede comprobar si efectivamente las probabilidades de decaimiento coinciden con lo predicho por la teoría.

El SM también permite predecir la probabilidad de creación de una partícula determinada, en una interacción particular, dentro de cierto rango de energías. Lógicamente, para crear una partícula de una energía en reposo dada se necesitará que la energía total de las partículas que interactúan sea mínimamente la energía en reposo de la partícula buscada. Por encima de esta barrera existirá cierta probabilidad de que la interacción resulte en la creación de una u otra partícula. Las probabilidades relativas pueden ser calculadas y comparadas con las probabilidades de ocurrencia de dichos sucesos en los experimentos, lo que permite al mismo tiempo «ir a buscar» una partícula dentro de un cierto rango de energías.

La información procedente de la experiencia en física de partículas proviene de diversas áreas. Como ya se mencionó, el estudio de rayos cósmicos contribuyó al descubrimiento de un gran número de partículas, algunas de ellas fundamentales y otras, compuestas. Asimismo, la experimentación en física nuclear ha aportado información valiosa sobre la estructura de la materia. El neutrino, por ejemplo, fue propuesto a partir del análisis de la energía de los electrones producidos en las emisiones beta. No obstante, las limitaciones de estas fuentes de información llevaron a los físicos a desarrollar los aceleradores de partículas.

5.1.1 Aceleradores de partículas

Casi la totalidad de la información que tenemos sobre la física de partículas elementales proviene de experimentos de dispersión, en los que un haz de partículas se hace incidir sobre un blanco, que a su vez puede ser otro haz de partículas moviéndose en dirección opuesta, para estudiar los resultados de la colisión.

El despliegue de grandes aceleradores se dio recién en la segunda mitad del siglo pasado. La Fig. 5.1.1, conocida como gráfica de Livingston, quien la produjo originalmente en 1954, muestra la evolución de los aceleradores de partículas a lo largo del tiempo. Se observa en esta gráfica que el crecimiento en la energía

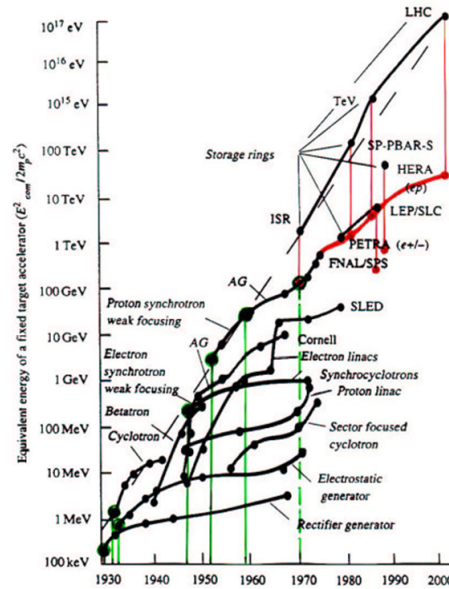


Figura 5.1.1: Gráfica de Livingston. (Reproducido de [65])

de los aceleradores es prácticamente exponencial, incrementándose en un orden de magnitud cada seis años aproximadamente. También se concluye que el alcance de energías cada vez más altas se debe fundamentalmente al desarrollo de nuevas tecnologías utilizadas en la construcción de nuevos aceleradores; no sólo se trata de construir aceleradores cada vez más grandes, sino de generar nuevos mecanismos para acelerar partículas [65].

El acelerador más grande construido hasta el momento es el Gran Colisionador de Hadrones, o LHC (*Large Hadron Collider*), ubicado en el CERN (Centro Europeo de Investigaciones Nucleares). Este acelerador, de cerca de 27 km de longitud (8 km de diámetro), es la máquina más grande y compleja construida por el hombre. En el acelerador principal, la energía máxima alcanzada en el LHC es de 7 TeV por cada haz de protones, lo que da 14 TeV en el centro de masa.

5.1.2 Detectores

Entre los detectores clásicos se encuentran las cámaras de ionización, como la cámara de niebla (o cámara de Wilson) o la cámara de burbujas. Estos se basan en el registro de la trayectoria de partículas cargadas de alta energía, que se logra gracias a la ionización producida cuando la partícula atraviesa un medio líquido o un gas saturado con el vapor de alguna sustancia. También las emulsiones fotográficas permiten registrar las trayectorias de las partículas que dejan sus rastros al atravesarlas.

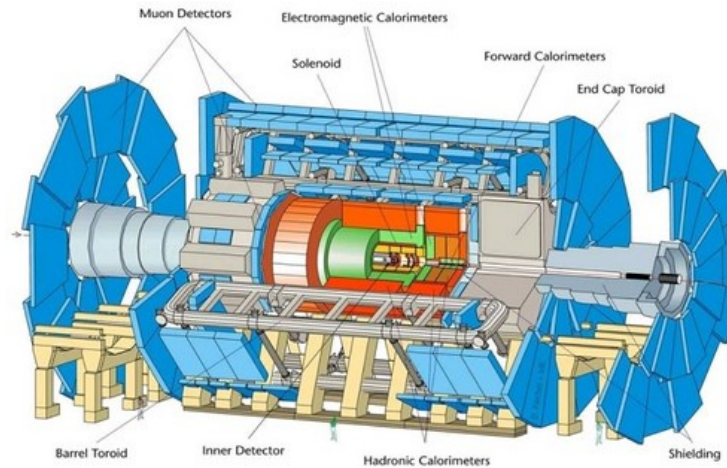


Figura 5.1.2: Representación esquemática del detector ATLAS del LHC (CERN).

Por otra parte, existen diferentes tipos de contadores, como los de centelleo, Geiger, o Cerenkov, los cuales permiten registrar el paso de partículas mediante la generación de un pulso eléctrico producido cuando la partícula atraviesa la región de detección. También se pueden mencionar algunos desarrollos más actuales, como las cámaras de chispas, las cámaras de deriva, cámaras multihilo, y detectores de semiconductores. Lógicamente, el desarrollo de aceleradores más potentes y la necesidad de tiempos de respuesta más pequeños han contribuido al diseño de detectores compuestos cada vez más complejos.

Así llegamos a los detectores modernos, compuestos por una enorme cantidad de diferentes tipos de sensores y de dimensiones que pueden alcanzar varios metros. Generalmente, los grandes detectores están diseñados en forma de capas. La primera, la más cercana al punto de colisión, está compuesta por detectores de trazas, donde todas las partículas con carga dejan su «huella» permitiendo determinar las trayectorias y las cantidades de movimiento de las mismas. La determinación del impulso se logra mediante la desviación de estas partículas mediante potentes campos magnéticos. Luego se encuentran los denominados calorímetros, donde las partículas depositan su energía. Los calorímetros electromagnéticos permiten medir la energía de electrones y fotones, mientras que los calorímetros hadrónicos miden la energía depositada por los chorros de hadrones producidos en la colisión. Finalmente, en la parte más externa se encuentran las cámaras de muones, similares a los detectores de trazas, que permiten medir la energía y cantidad de movimiento de los muones. Las únicas partículas que no pueden ser detectadas debido a su ínfima probabilidad de interacción con la materia son los neutrinos. No obstante, se puede inferir su presencia mediante el cálculo de la energía faltante a partir la energía de la colisión. La Fig. 5.1.2 muestra un esquema del detector ATLAS del LHC con sus partes principales.

5.2 Conceptos básicos

5.2.1 Sección eficaz de dispersión

Los experimentos de dispersión consisten básicamente en hacer colisionar partículas y observar los resultados de la colisión. Estas colisiones pueden ser elásticas, en las que las partículas en el estado final son las mismas que en el estado inicial y donde se conserva la energía cinética, o bien inelásticas, en tanto haya producción de nuevas partículas. En algunos casos, los experimentos consisten en «disparar» partículas hacia un blanco fijo, mientras que en otros se aceleran dos haces en sentidos opuestos para hacerlos colisionar en un punto exacto de sus trayectorias.

Una forma simple de ilustrar el problema de la dispersión consiste en imaginar un conjunto de partículas del tipo a que viajan hacia un blanco fijo compuesto por n_b partículas por unidad de volumen del tipo b . Para simplificar el problema, pensemos en una partícula del tipo a que se dirige hacia el blanco fijo. En el tiempo δt la partícula a atraviesa una región que contiene δN partículas del tipo b , tal que

$$\delta N = n_b v_a A \delta t$$

donde A es el área iluminada del blanco. La probabilidad de interacción puede obtenerse como la razón entre la sección transversal efectiva de las δN partículas y el área A del blanco, lo cual se puede pensar como la probabilidad de que la partícula incidente pase a través de una de las δN regiones de área σ en torno a cada una de las partículas. El área σ está asociada a la probabilidad de interacción y se conoce como *sección eficaz* de la interacción. La probabilidad será, entonces,

$$\delta P = \frac{\delta N \sigma}{A} = \frac{n_b v_a A \sigma \delta t}{A} = n_b v_a \sigma \delta t$$

Por lo tanto, la tasa de interacción por partícula del tipo a es

$$r_a = \frac{dP}{dt} = n_b v_a \sigma$$

Luego, al considerar un haz de partículas del tipo a , de densidad numérica n_a , confinadas en un volumen V , la tasa total de interacción W es

$$W = r_a n_a V = (n_b v_a \sigma) n_a V$$

expresión que puede reordenarse como

$$W = (n_a v_a) (n_b V) \sigma = J N_b \sigma$$

donde J es el flujo incidente (definido como la tasa por unidad de área a la cual las partículas del haz incidente atraviesan una pequeña superficie en reposo respecto al blanco y perpendicular a la dirección del haz) y N_b es el número total

de partículas en el blanco iluminado por el haz. Lo anterior puede escribirse en forma simple como

$$W = \text{flujo incidente} \times \text{número de partículas en el blanco} \times \text{sección eficaz}$$

y dado que la tasa de interacción no es otra cosa que el número de interacciones por unidad de tiempo, podemos definir a la sección eficaz para un proceso particular como

$$\sigma = \frac{\text{número de interacciones por unidad de tiempo por partícula del blanco}}{\text{flujo incidente}}$$

En ocasiones es útil pensar en la sección eficaz como el área efectiva asociada a las partículas del blanco. De hecho, hay casos en los que la sección eficaz es muy cercana a la sección transversal real del blanco, como en la absorción de neutrones por núcleos. Sin embargo, la sección eficaz es en realidad un invariante que da la medida de la *probabilidad de interacción* para una reacción particular: la física fundamental detrás del proceso de dispersión considerado se encuentra en la sección eficaz.

De lo anterior se puede ver que la sección eficaz es una cantidad que se mide en unidades de área. La unidad usual es el barn (b),

$$1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ cm}^2$$

Para la explicación anterior se consideró un haz de partículas del tipo a que incide sobre un blanco fijo compuesto por partículas del tipo b . Si en lugar de un blanco fijo se considera un haz de partículas b moviéndose con la velocidad v_b en sentido opuesto al de las partículas del tipo a , el planteo es el mismo, con la única salvedad de que la velocidad v_a considerada en el flujo incidente debe reemplazarse por la velocidad relativa $v = v_a + v_b$. Dicho de otro modo, el flujo J toma en cuenta el movimiento relativo de las partículas.

Como ya se mencionó, al producirse una colisión puede ocurrir una dispersión de las partículas del haz original (colisión elástica), o bien pueden ser creadas más partículas a partir de la colisión (colisión inelástica). Si una partícula del tipo a colisiona con una partícula del tipo b y como resultado de la interacción se obtienen otras partículas c y d , se puede definir la sección eficaz de la interacción, $\sigma_{ab \rightarrow cd}$ mediante

$$\sigma_{ab \rightarrow cd} = \sigma_T P_{ab \rightarrow cd}$$

donde $P_{ab \rightarrow cd}$ es la probabilidad de que se produzca la reacción $a + b \rightarrow c + d$ y σ_T es la sección eficaz total. Suponiendo que la única reacción posible para esta interacción sea la creación de las nuevas partículas c y d , se tiene la relación

$$\sigma_T = \sigma_e + \sigma_{ab \rightarrow cd}$$

donde σ_e es la sección eficaz correspondiente a la interacción elástica. Se ve entonces en una colisión, pueden obtenerse diferentes estados finales a partir de un mismo estado inicial.

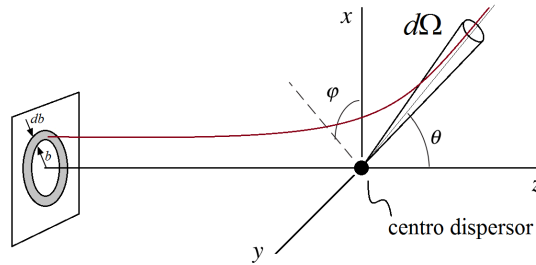


Figura 5.2.1: Relación entre el parámetro de impacto b y el ángulo de dispersión θ . Una partícula que incida pasando a través de un área diferencial $d\sigma = b db d\varphi$ será dispersada bajo un ángulo $d\Omega = d \cos \theta d\varphi$. El número de partículas por unidad de tiempo dispersadas en un ángulo $d\Omega$ en la dirección (θ, φ) es proporcional a la sección eficaz diferencial $d\sigma/d\Omega$.

5.2.2 Sección eficaz diferencial

En muchos casos, no sólo importa la sección eficaz total, sino también la distribución de alguna variable cinemática. Por ejemplo, para una dispersión inelástica electrón-protón en la que el protón deviene en un conjunto de nuevas partículas, la distribución angular del electrón dispersado provee información esencial sobre la física fundamental de la interacción.

Pensemos ahora en una partícula que se encuentra con algún determinado potencial y es dispersado por la interacción con dicho potencial. Podría ser el caso de un electrón acercándose a un protón estacionario. El ángulo de dispersión será función del parámetro de impacto b , definido como la menor distancia entre la dirección de la velocidad inicial de la partícula y el centro dispersor. En general, a menor parámetro de impacto, mayor será el ángulo de dispersión, pero la relación funcional entre estas variables dependerá del potencial considerado.

Si la partícula considerada incide con un parámetro de impacto que se haya entre b y $b + db$, entonces será dispersada en un ángulo entre θ y $\theta + d\theta$. Más generalmente, si la partícula pasa a través de un área diferencial $d\sigma$, será dispersada en un ángulo sólido $d\Omega$ (ver Fig. 5.2.1). A la cantidad $d\sigma/d\Omega$ se la llama *sección eficaz diferencial*, y es la medición experimental relevante para la dispersión evaluada en el elemento de ángulo sólido $d\Omega$, dado que es directamente proporcional a la probabilidad de que la partícula sea dispersada en el ángulo sólido $d\Omega$.

En términos de la tasa de interacción, podemos escribir

$$\frac{dW}{d\Omega} \equiv J N_b \frac{d\sigma}{d\Omega},$$

de aquí que la sección eficaz diferencial es directamente proporcional al número de partículas dispersadas por unidad de tiempo en un elemento de ángulo sólido $d\Omega$. Luego, para obtener la sección eficaz total se debe integrar la sección eficaz

diferencial,

$$\sigma = \int \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega.$$

La sección eficaz diferencial no sólo se limita a la distribución angular. En muchas situaciones, la cantidad relacionada con la física fundamental subyacente es la distribución de la energía de la partícula dispersada. En otras situaciones, puede ser de interés la combinación entre la distribución angular y la distribución de energía de las partículas dispersadas. En cada caso, es posible definir la correspondiente sección eficaz diferencial, como

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \quad \text{o} \quad \frac{d^2\sigma}{dE d\Omega}$$

5.2.3 Luminosidad instantánea y luminosidad integrada

Hemos visto que la tasa de interacciones (esto es, el número de interacciones por unidad de tiempo) viene dada por el producto entre el flujo incidente, J , el número total de partículas en el blanco, N_b , y la sección eficaz σ . Al producto JN_b se lo conoce con el nombre de *luminosidad*, \mathcal{L} , e indica el número total de interacciones que pueden producirse por unidad de tiempo y de área en un colisionador. De la definición de la sección eficaz diferencial, podemos escribir

$$\frac{dW}{d\Omega} = \mathcal{L} \frac{d\sigma}{d\Omega},$$

Luego, al integrar se obtiene $W = \mathcal{L}\sigma$. Esto es, *el número de eventos por unidad de tiempo es σ veces la luminosidad*. Dicho de otro modo, si se conoce la sección eficaz de una interacción particular, se puede determinar el número de interacciones por unidad de tiempo para una luminosidad dada.

La luminosidad es un parámetro característico de un acelerador, y da la cantidad de eventos por segundo para una sección eficaz de 1 cm^2 . Por ejemplo, para un blanco de un espesor finito l , el número de eventos por unidad de tiempo es proporcional al flujo incidente, J , al número de partículas blanco por unidad de volumen, n_b , y al espesor l , lo que permite escribir

$$W = \sigma J n_b l$$

pero el número de blancos por unidad de volumen es $n_b = N_A \delta / M$, donde N_A es el número de Avogadro, δ es la densidad del blanco y M , su masa molar, con lo cual

$$W = \sigma J \left(\frac{N_A \delta}{M} \right) l$$

Para hidrógeno líquido, por ejemplo, considerando $l = 10 \text{ cm}$ y $\delta = 0,071 \text{ g/cm}^3$, se obtiene $n_b l = 4,3 \cdot 10^{23} \text{ cm}^{-2}$, y para un flujo de 10^7 partículas por segundo, es $W = \sigma 4,3 \cdot 10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Luego, $1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ cm}^2$, de modo que para $\sigma \sim 1 \mu\text{b}$ se tendrán $\sim 4,3$ eventos por segundo, y una luminosidad $\mathcal{L} = 4,3 \mu\text{b}^{-1} \text{ s}^{-1}$.

Cada acelerador tendrá su propia luminosidad, la cual depende de varios factores. En anillos aceleradores, por ejemplo, donde dos haces de partículas se mueven en paquetes o *bunches* que viajan en sentidos opuestos, la luminosidad dependerá de los números de partículas por bunch, n_1 y n_2 , del número de bunches en cada haz, k_b , de la frecuencia de revolución f (o bien, la separación entre bunches) y el radio de los bunches en el punto de colisión, b . Un cálculo aproximado provee

$$\mathcal{L} = \frac{n_1 n_2 k_b f}{4\pi b^2}$$

Si en lugar del radio del bunch se especifican los valores de σ_x y σ_y , que indican el tamaño (rms) de los bunches en las direcciones correspondientes, se puede escribir una expresión un poco más adecuada para la luminosidad,

$$\mathcal{L} = \frac{n_1 n_2 k_b f}{4\pi \sigma_x \sigma_y}$$

El Cuadro 5.1 muestra solo algunos ejemplos de luminosidad y otros parámetros importantes de diferentes aceleradores. Nótese que existe una gran diferencia en las tasas de interacción, particularmente entre los colisionadores de hadrones y los de leptones. Esto se debe a la pequeña sección eficaz de interacción e^+e^- . Por otra parte, tanto en PEP (en el Acelerador Linear de Stanford, California, EEUU) como en KEKB (Laboratorio Nacional de Física de Altas Energías, Tsukuba, Japón), que son aceleradores que operan en la región cercana a las de resonancia de partículas (B en este caso), la sección eficaz cambia fuertemente para pequeñas variaciones en la energía, lo que no permite establecer un valor apropiado para la tasa de interacción (en la tabla se representa con NA).

	Energy (GeV)	\mathcal{L} $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	rate s^{-1}	σ_x/σ_y $\mu\text{m}/\mu\text{m}$	Particles per bunch
SPS ($p\bar{p}$)	315x315	$6 \cdot 10^{30}$	$4 \cdot 10^5$	60/30	$\approx 10 \cdot 10^{10}$
Tevatron ($p\bar{p}$)	1000x1000	$50 \cdot 10^{30}$	$4 \cdot 10^6$	30/30	$\approx 30/8 \cdot 10^{10}$
HERA (e^+p)	30x920	$40 \cdot 10^{30}$	40	250/50	$\approx 3/7 \cdot 10^{10}$
LHC (pp)	7000x7000	$10000 \cdot 10^{30}$	10^9	17/17	$11 \cdot 10^{10}$
LEP (e^+e^-)	105x105	$100 \cdot 10^{30}$	≤ 1	200/2	$\approx 5 \cdot 10^{11}$
PEP (e^+e^-)	9x3	$3000 \cdot 10^{30}$	NA	150/5	$\approx 2/6 \cdot 10^{10}$
KEKB (e^+e^-)	8x3.5	$10000 \cdot 10^{30}$	NA	77/2	$\approx 1.3/1.6 \cdot 10^{10}$

Cuadro 5.1: Principales características de diferentes aceleradores.

La luminosidad, como se ha dicho, es un parámetro muy importante de los aceleradores. Sin embargo, a los fines de calcular el número real de eventos debe considerarse la *luminosidad integrada*, definida como una integral de la luminosidad extendida en el tiempo de funcionamiento del colisionador,

$$L = \int \mathcal{L} dt$$

La luminosidad integrada tiene unidades inversas de sección eficaz (barn⁻¹ y sus correspondientes submúltiplos). El número total de eventos en un tiempo dado puede determinarse como

$$N = \int \sigma \mathcal{L} dt$$

Si se toma como ejemplo para el LHC una luminosidad $\mathcal{L} = 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} = 10^{10} \text{b}^{-1} \text{s}^{-1}$, el número de eventos con una sección eficaz de 50 fb en 10 horas de funcionamiento será[25]

$$N = 10^{10} \text{b}^{-1} \text{s}^{-1} \cdot 50^{-15} \text{b} \cdot 36.000 \text{s} \approx 20.$$

5.2.4 Decaimientos

El concepto de vida media trabajado en física nuclear también es válido para las partículas elementales. En este caso, si se tiene una colección de $N(t)$ partículas (muones, piones, kaones, o cualquier otro tipo de partícula) a tiempo t , la cantidad que decae en el tiempo dt será $N\Gamma dt$, de modo que,

$$\frac{dN}{dt} = -\Gamma N.$$

En esta ecuación, Γ es la tasa de decaimiento, e indica la probabilidad por unidad de tiempo de que dicha partícula se desintegre. Luego, el número de partículas presentes a en el tiempo t será

$$N(t) = N_0 e^{-\Gamma t}$$

Ya que el decaimiento responde a una exponencial decreciente, podemos definir la vida media, τ ,

$$\tau = \frac{1}{\Gamma}$$

que corresponde al tiempo necesario para que el número de partículas se reduzca a N_0/e .

En experimentos de dispersión existen ciertas energías para las cuales la probabilidad de interacción crece fuertemente. Este fenómeno se evidencia como un pico pronunciado en las gráficas de sección eficaz en función de la energía. A estos picos se les da el nombre de *resonancias*, las cuales son interpretadas en muchos casos como la creación de partículas inestables. A estas resonancias se les puede adjudicar una masa en reposo M , que coincide con la energía del pico de la resonancia, y una vida media relacionada con el semiancho de la misma.

Existe una relación muy importante entre la sección eficaz elástica y la vida media de estas resonancias; aquí se presenta sin demostración una forma general de dicha relación, conocida como la fórmula de Breit-Wigner,

$$\sigma_{if} \propto \frac{\Gamma_i \Gamma_f}{(E - Mc^2)^2 + \Gamma^2/4}$$

donde σ_{if} es la sección eficaz de la interacción $i \rightarrow f$ para la energía total E . La forma general de esta relación, a veces llamada Lorentziana, se muestra en la Fig. 5.2.2.

De la gráfica se desprende que el ancho Γ puede interpretarse como la indeterminación en la energía en reposo, en virtud del principio de incerteza,

$$\Delta E \cdot \Delta t \sim \Gamma \cdot t \sim \hbar.$$

Considerando, entonces, que la vida media de una partícula, puede interpretarse como $\tau \sim \Delta t$, y dado que $\Delta E = mc^2$, vemos que existe una indeterminación asociada a la masa de una partícula dada por

$$\Delta mc^2 \sim \Delta E \sim \frac{\hbar}{\Gamma}$$

con lo cual, conocida la vida media de una partícula se puede obtener la indeterminación en su masa. En algunos casos, la indeterminación es pequeña, pero en otros casos puede ser muy significativa. Para el mesón ρ , por ejemplo, con $E_0 = 780$ MeV y una vida media de $4,2 \cdot 10^{-24}$ s, se tiene que $\Delta m/m \sim 0,21$. En la práctica no se pueden medir tiempos tan cortos, de modo que la vida media se obtiene a partir de la incerteza en la masa.

En general, una partícula puede decaer en diferentes modos. La tasa de decaimiento de cada modo j puede ser calculada independientemente usando la regla de oro de Fermi (la cual se describe brevemente en la siguiente subsección). Estas tasas de decaimiento parciales, Γ_j , hacen referencia al ancho total del máximo de una curva Lorentziana, mientras que la tasa de decaimiento total puede obtenerse simplemente como la suma de todas las tasas de decaimiento parciales,

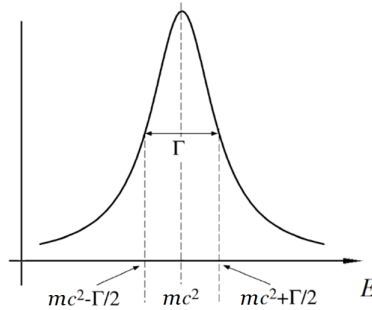


Figura 5.2.2: Forma general de una resonancia. Se indica el semiancho y la energía correspondiente al pico.

$$\Gamma_{tot} = \sum \Gamma_j$$

Luego, se definen las tasas de desintegración múltiple para cada canal en la forma

$$B_j \equiv \frac{\Gamma_j}{\Gamma_{tot}}$$

5.2.5 Tasas de transición y regla de oro de Fermi

En términos generales, podemos definir a la tasa de transición como la probabilidad de que un sistema pase de un estado inicial a un estado final determinado. Las tasas de transición dependen, en principio, de la fuerza del acoplamiento entre el estado inicial y final de un sistema y del número de maneras en que la transición puede ocurrir, lo que se conoce como densidad de los estados finales. En el caso de una dispersión, las tasas de transición no son otra cosa que las secciones eficaces, mientras que en desintegraciones, las tasas de transición son las tasas de decaimiento. En la década de 1930, E. Fermi desarrolló un cálculo para determinar las tasas de transición correspondientes a las transiciones atómicas. La forma general es

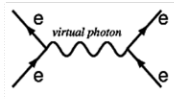
$$\lambda_{if} = \frac{2\pi}{\hbar} |M_{if}|^2 \rho_f$$

y se conoce como la *regla de oro de Fermi*. En esta expresión, λ_{if} es la probabilidad de transición, $|M_{if}|$ es el elemento de matriz de la interacción y ρ_f es la densidad de estados finales. Lo interesante es que la forma general de la regla de oro de Fermi se puede aplicar tanto a las transiciones atómicas, como a desintegraciones nucleares, y otros decaimientos y dispersiones.

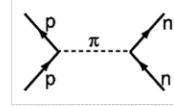
En todos los casos, existen dos ingredientes a determinar: la amplitud o elemento matriz y la densidad de los estados finales. No obstante, toda la dinámica del proceso se encuentra en el elemento matriz ya que indica la intensidad del acoplamiento que corresponde a una interacción particular. El cálculo de este término se realiza en forma perturbativa partiendo de los términos de cada uno de los campos interactuantes y de los términos de interacción entre los mismos. Pero estos cálculos son sumamente complicados, por eso se recurre a una serie de reglas que, sin quitar sentido físico al problema, reducen mucho su complejidad. Estas reglas son el resultado del esfuerzo de grandes físicos y se conocen como *reglas de Feynman*.

Las reglas de Feynman se basan en diagramas de espacio-tiempo, *ct* vs. *x*, que representan diferentes interacciones entre partículas, conocidos como diagramas de Feynman. Las partículas están representadas por líneas con flechas que indican la dirección de su viaje, las antipartículas poseen direcciones invertidas y las partículas virtuales están representadas por líneas onduladas o punteadas y no tienen dirección. En la Fig 5.2.3 se muestran algunos ejemplos de estos diagramas.

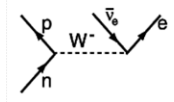
Interacción electromagnética. Dos electrones interactúan mediante el intercambio de un fotón virtual.



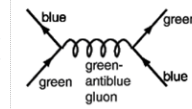
Interacción fuerte entre nucleones. Un protón y un neutrón interactúan fuertemente mediante el intercambio de un pión.



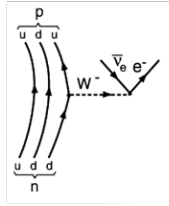
Interacción débil. Un neutrón se convierte en un protón tras la emisión de un electrón y un antineutrino electrón.



Interacción fuerte entre quarks. Dos quarks que interactúan mediante el intercambio de un gluón.



Interacción electrodébil. Decaimiento beta revisado: Un quark down se convierte en un quark up con la emisión de un bosón W^- , que rápidamente decae en un electrón y un antineutrino electrón.



Interacción fuerte entre nucleones revisada: La interacción entre quarks de diferentes nucleones crea temporalmente un pión negativo.

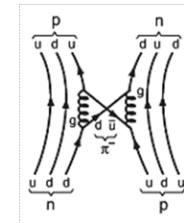


Figura 5.2.3: Ejemplos de diagramas de Feynman

Sin profundizar sobre los diagramas, sólo diremos que en relación con cada línea (es decir, en relación con cada partícula interactuante) hay un factor que se debe incorporar al cálculo de la amplitud $|M_{if}|$ correspondiente a la interacción en cuestión. Lo mismo sucede para cada vértice. Para cada diagrama se puede construir el cálculo general de $|M_{if}|$, lo que reduce en gran medida la complejidad del problema. Vemos entonces que a partir de la teoría pueden ser calculadas las tasas de decaimiento y las secciones eficaces de dispersión. Luego, dado que estos observables son valores que se obtienen experimentalmente, pueden ser comparados con los valores calculados para cada proceso.

Pero para producir una partícula que aún no se ha descubierto, o bien, para determinar con mayor precisión las propiedades de las partículas ya conocidas, se debe disponer de la energía necesaria (así, para producir una partícula de, digamos, 1 GeV se necesita contar mínimamente con una energía inicial de 1 GeV). Además, muchos procesos tienen mayores probabilidades de ocurrencia a mayores energías, o bien, probabilidades muy bajas a energías bajas. Finalmente, se entiende que acelerar partículas para hacerlas colisionar con un blanco, o bien, hacer colisionar dos haces de partículas y observar los productos de la colisión, es la forma que tienen los físicos de explorar la materia en este nivel de profundidad.

5.3 Relaciones entre la teoría y el experimento

Habiendo revisado algunos conceptos básicos de la física de partículas, vamos ahora a hacer mención a una selección de experimentos que han aportado conocimientos muy valiosos sobre la evolución del concepto de elementalidad. Nuevamente, no se pretende hacer un análisis exhaustivo de los problemas, sino

presentar un conjunto de ideas que nos permita alcanzar una comprensión más profunda de la física de partículas elementales.

Como veremos, los experimentos de scattering permiten obtener información sobre la forma, el tamaño y la distribución de carga de los núcleos atómicos. La forma más simple de estudiar la densidad de carga nuclear consiste en el análisis de experimentos de dispersión de electrones. En este caso, la interacción relevante es la electromagnética, luego el problema teórico se simplifica en buena medida al no considerar la interacción fuerte. Por otra parte, para conocer cómo es la densidad de materia nuclear es necesario utilizar partículas que interactúen fuertemente con los núcleos, es decir, los hadrones¹.

5.3.1 Dispersión de Rutherford

El experimento de Rutherford de dispersión de partículas alfa es seguramente uno de los experimentos más importantes de la física. No sólo permitió comprender que el átomo tiene una estructura interna (un núcleo atómico rodeado de electrones), sino que fue el primer experimento de scattering diseñado para estudiar la naturaleza íntima de la materia.

En el experimento, un haz de partículas alfa es dirigido hacia un blanco compuesto por una fina lámina de oro de algunos miles de átomos de espesor. Según las predicciones efectuadas por J. J. Thomson los ángulos de dispersión para las partículas alfa deberían ser menores a 1° . Sin embargo, al realizar el experimento se observó que algunas partículas eran deflectadas en direcciones muy alejadas de la del haz original, en algunos casos volviendo directamente en sentido opuesto a la dirección original del haz. Al analizar los resultados, Rutherford concluyó que toda la carga positiva del átomo debería estar concentrada en un «punto» (el núcleo el átomo), siendo ésta la única forma de deflectar a las partículas en tales ángulos. Con esta idea, derivó una expresión que permitiría predecir el número de partículas por unidad de área que serían dispersadas bajo un ángulo θ ,

$$\frac{N}{A} = \frac{I_0}{r^2} \left(\frac{kZe^2}{E} \right)^2 \frac{1}{\sin^4(\theta/2)}.$$

Aquí, E representa la energía cinética de los proyectiles, I_0 es el flujo incidente y Z es el número atómico del material del blanco. Esta relación está en perfecto acuerdo con los datos experimentales (Fig. 5.3.1).

Volviendo al concepto de sección eficaz, y en base a lo expresado en la subsección 5.2.2, para la dispersión de Rutherford podemos considerar un área diferencial $d\sigma = |b db d\varphi|$ y un ángulo sólido $d\Omega = |\sin\theta d\theta d\varphi|$ (las barras de módulo se agregan para expresar que ambas cantidades son intrínsecamente positivas). Así, la sección eficaz diferencial puede expresarse como

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left| \frac{b}{\sin\theta} \left(\frac{db}{d\theta} \right) \right|.$$

¹Las subsecciones 5.3.2 y 5.3.3 de este capítulo son adaptaciones del Cap. 2 de [66]

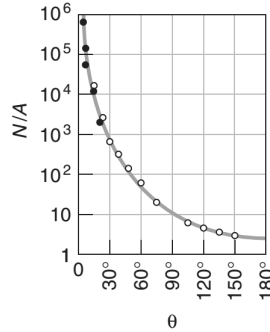


Figura 5.3.1: Resultados obtenidos para el experimento de Rutherford, con partículas α de 7,7 MeV incidiendo sobre núcleos de oro. Se muestra el número de partículas dispersadas en función del ángulo de dispersión (Reproducido de [67]).

Un cálculo clásico provee la siguiente relación entre el parámetro de impacto b y el ángulo de dispersión θ ,

$$b = \frac{kZe^2}{E} \cot \frac{\theta}{2}.$$

Finalmente, a partir de las relaciones anteriores, y operando convenientemente, se obtiene la sección eficaz diferencial

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{kZe^2}{E} \right)^2 \frac{1}{\sin^4(\theta/2)},$$

aplicable a la dispersión clásica no relativista. Como se observa, la sección eficaz diferencial es directamente proporcional al número de partículas dispersadas bajo un ángulo θ .

5.3.2 Dispersión de electrones por núcleos

La dispersión de electrones relativistas por una carga distribuida se puede calcular con métodos de la mecánica cuántica. Para una dispersión por una carga puntual estática, sin considerar el espín del electrón, la sección transversal diferencial viene dada por la fórmula de Rutherford,

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{Rutherford} = \frac{Z^2 \alpha^2 (\hbar c)^2}{4E^2 \sin^4(\theta/2)}$$

donde E es la energía cinética del electrón incidente, θ es el ángulo de dispersión medido en el sistema de referencia del laboratorio y α es la constante de estructura fina ($\alpha \approx 1/137$). Luego, al considerar el espín del electrón se obtiene la sección eficaz de *Mott*,

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{Mott} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{Rutherford} [1 - \beta^2 \sin^2(\theta/2)]$$

donde $\beta = v/c$ es la velocidad relativa del electrón. Para energías muy altas, donde se puede tomar la aproximación $\beta \approx 1$, la expresión se reduce a

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{Rutherford} = \frac{Z^2 \alpha^2 (\hbar c)^2 \cos^2(\theta/2)}{4E^2 \sin^4(\theta/2)}$$

Pero, estos resultados relativamente simples no son aplicables para un blanco con una dada distribución de carga espacial $\rho(r)$. Al considerar la densidad de carga, la sección eficaz experimental puede ser aproximada mediante la siguiente relación,

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{exp} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{Mott} |F(\mathbf{q}^2)|^2,$$

donde $F(\mathbf{q}^2)$ es una función que recibe el nombre de factor de forma, y que permite obtener la distribución de carga. En el caso de una distribución de simetría esférica, el factor de forma puede ser calculado, pero existen ciertos límites que hacen que la expresión no de resultados precisos. La forma usual de obtener las distribuciones de carga implica resolver la ecuación de Schrödinger o de Dirac numéricamente para obtener la sección eficaz de la interacción electrón-núcleo, para distribuciones de carga parametrizadas. Luego, los parámetros son modificados para obtener el mejor ajuste con la experiencia.

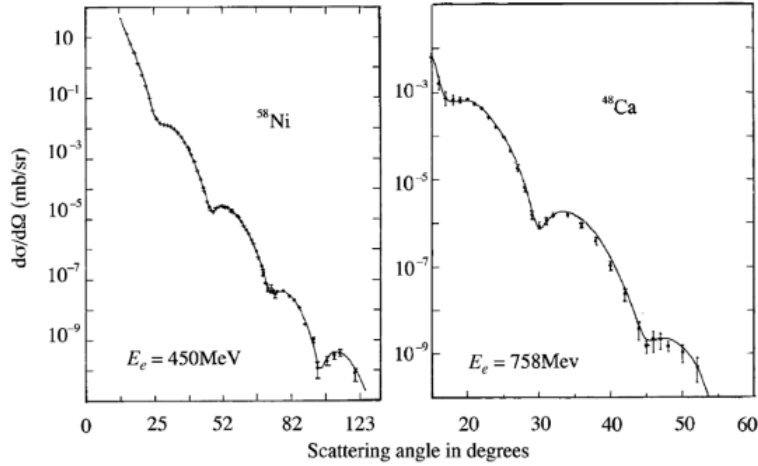


Figura 5.3.2: Gráficas de sección eficaz diferencial para el Ni y el Ca.

La Fig. 5.3.2 muestra la sección eficaz diferencial para el níquel y el calcio con las correspondientes curvas de ajuste. La Fig. 5.3.3 muestra la densidad de carga para varios núcleos.

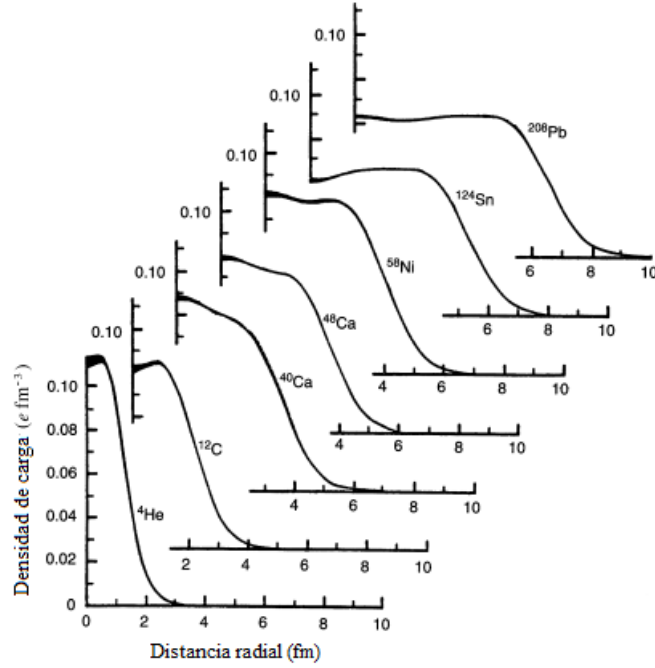


Figura 5.3.3: Densidades de carga nuclear en función del radio para diferentes núcleos. El grosor de las curvas cerca de $r = 0$ es una medida de la incerteza en la densidad de carga.

Un valor de gran utilidad es el radio cuadrático medio nuclear, $\langle r^2 \rangle$, el cual puede ser calculado utilizando la definición del factor de forma. Sin profundizar en la resolución, el resultado obtenido para núcleos medianos y pesados, tomando datos experimentales de $F(\mathbf{q}^2)$, viene dado por

$$\langle r^2 \rangle^{1/2} = 0,94 A^{1/3} \text{fm}.$$

Finalmente, aproximando el núcleo a una esfera uniformemente cargada, la relación entre su radio y el radio cuadrático medio es $R^2 = 5/3 \langle r^2 \rangle$, lo que permite evaluar el radio nuclear como función del número de masa, A , mediante

$$R_{ch} = 1,21 A^{1/3} \text{fm},$$

expresión generalmente citada en los libros de Física Moderna.

5.3.3 Dispersión hadrón-núcleo: modelo óptico

Para obtener información sobre la densidad nuclear debe utilizarse alguna partícula como proyectil que experimente la interacción fuerte, es decir, un hadrón. A energías muy altas, donde la dispersión elástica contribuye en menor

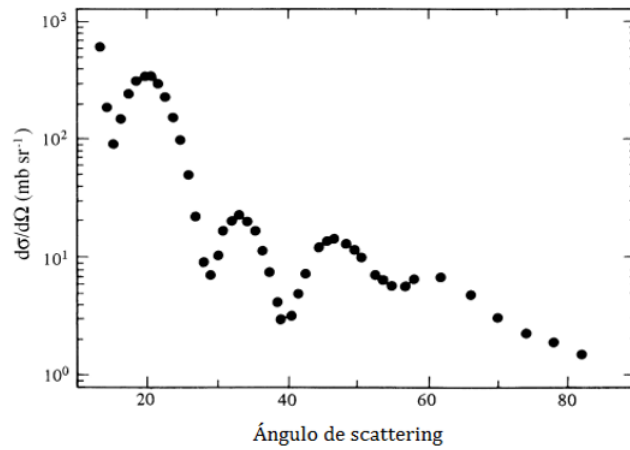


Figura 5.3.4: Sección eficaz diferencial para la interacción dispersión de deutrones ionizados por núcleos de ^{54}Fe .

medida a la sección eficaz total de la dispersión, el núcleo se comporta de modo similar a una esfera absorbente. Para analizar el problema, a la partícula incidente se le asocia la onda de probabilidad de longitud de onda $\lambda = h/p$, donde p es la cantidad de movimiento de la partícula, de modo que al interactuar con un núcleo sufre una difracción análoga a la difracción óptica. Considerando que a altas energías sólo interesa la interacción fuerte (la interacción coulombiana puede despreciarse), puede representarse al núcleo como un obstáculo opaco de radio R . En este caso, la sección eficaz diferencial se aproxima a la forma de la difracción de Fraunhofer (abertura circular). La Fig. 5.3.4 muestra la sección eficaz diferencial para la interacción $D+^{54}\text{Fe}$, donde se observa una forma muy similar a la amplitud de dispersión de una difracción de Fraunhofer.

La aproximación teórica del problema consiste en considerar una onda incidente que puede ser dispersada o absorbida, lo que en analogía con la óptica, corresponde a la refracción y absorción por un medio de índice de refracción complejo. En este caso, la parte imaginaria del potencial complejo permite describir la interacción inelástica. De manera similar al caso de dispersión de electrones, el modelo óptico es esencialmente fenomenológico. En la práctica, se resuelve la ecuación de Schrödinger utilizando un campo complejo parametrizado, donde la parte real corresponde a la dispersión elástica (potencial coulombiano + potencial espín-órbita) y la parte imaginaria es la responsable de la atenuación de la onda incidente. Luego, las correspondientes funciones de onda proveen información sobre los núcleos. La Fig. 5.3.5 muestra la correspondencia entre el modelo y los datos obtenidos para un variado rango de núcleos. Se comparan las curvas calculadas con este modelo y los datos obtenidos experimentalmente con diferentes núcleos para dispersiones elásticas con protones de 30,3 MeV.

5.3.4 Dispersión electrón-protón

Hemos visto que la dispersión de un electrón por una partícula fija puntual con carga y espín puede evaluarse con la fórmula de Mott. El tratamiento para la dispersión elástica electrón-protón da como resultado una expresión conocida como fórmula de Rosenbluth, que da la sección transversal en términos de dos factores de forma. Esta relación se basa en la suposición de que el electrón y el protón intercambian un sólo fotón. Más allá de la complejidad de esta relación, que no presentaremos aquí, es importante rescatar que la fórmula puede ser testeada midiendo la sección transversal de la interacción, dado que los únicos parámetros desconocidos son los mencionados factores de forma.

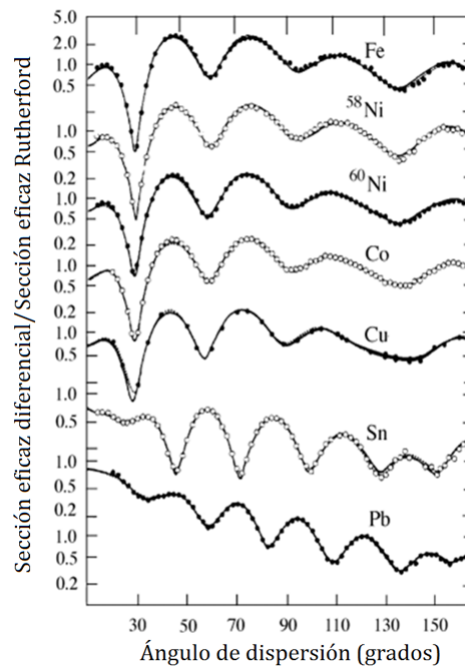


Figura 5.3.5: Sección eficaz diferencial de dispersión de protones por diferentes núcleos, relativa a la dispersión de Rutherford.

La dispersión elástica electrón-protón fue medida en 1956 por McAllister y Hofstadter con electrones de 188 MeV. El resultado obtenido para el valor cuadrático medio del radio de la distribución de carga del protón fue de $0,74 \cdot 10^{-13}$ cm (= 0,74 fm). Si bien estos experimentos fueron consistentes con la idea de una distribución de carga radial, experimentos con mayores energías permitieron explorar en profundidad la estructura interna del protón.

Hacia finales de la década de 1960 en el acelerador lineal de Stanford (*Stanford Linear Accelerator Center*, SLAC), se llevaron a cabo experimentos de dispersión con energías de 7 a 17 GeV, energías para las cuales la dispersión es

inelástica. El análisis de los resultados fue coherente con el modelo del protón formado por partículas puntuales, los *quarks*, como lo habían anticipado Bjorken y Feynman de manera independiente unos años antes.

Una vez más se muestra la importancia de la energía puesta en juego en la interacción como un factor clave para el sondeo de la estructura de la materia. En los experimentos de Rutherford, limitados por las energías de las partículas alfa provenientes de decaimientos radiactivos, se pudo determinar el tamaño de los núcleos atómicos. Luego, los experimentos de Hofstadter (~ 200 MeV) permitieron determinar el tamaño del protón y los experimentos posteriores en SLAC arrojaron luz sobre la estructura interna del protón, identificando así a los quarks como componentes de los hadrones.

5.4 Evidencias en favor del Modelo Estándar

5.4.1 Descubrimiento de los bosones W y Z

La teoría electrodébil introduce la existencia de tres bosones mediadores: W^+ , W^- y Z^0 . Las masas aproximadas (estimadas a partir de la teoría) serían de alrededor de 80 y 90 GeV para los bosones W y Z respectivamente y todas tendrían espín 1. A pesar de que esta teoría fue desarrollada a mediados de 1960, la existencia de estas partículas no fue probada sino hasta 1983, en experimentos de colisiones p^+p^- en el acelerador SPS (Super Proton Synchrotron) en el CERN.

El descubrimiento del bosón W fue posible gracias a la observación de la producción de electrones de gran momento transversal (esto es, una elevada componente de cantidad de movimiento en el plano normal a la dirección de los haces) para eventos con valores elevados de E_{MT} (*missing energy transverse*). Esta energía «perdida», E_{MT} , es en realidad energía que no es depositada en los detectores. Las únicas partículas con baja probabilidad de interacción con detectores son los neutrinos, de modo que una gran E_{MT} se interpreta como la creación de un neutrino. Ya que se puede determinar no sólo la energía perdida sino la dirección, se tienen todas las variables para poder determinar la masa invariante en la producción $l\nu$ (leptón-neutrino). Los datos obtenidos en los primeros experimentos fueron consistentes con una partícula de masa cercana a los 80 GeV. Mediciones posteriores permitieron precisar este valor en

$$m_W = 80,385 \pm 0,015 \text{ GeV} \quad \text{con} \quad \Gamma_W = 2,085 \pm 0,042 \text{ GeV}$$

En la década de 1980 fueron diseñados y construidos los aceleradores LEP y SLC, con el objetivo de producir una gran cantidad de eventos con producción de bosones Z a partir de colisiones e^+e^- . Ya que los electrones no experimentan la interacción fuerte, las colisiones e^+e^- permiten un estudio más detallado de las propiedades de estos bosones (se dice en ocasiones que las colisiones electrón-protón son más «limpias» que las colisiones entre hadrones). La reacción bajo estudio es $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$, donde f y \bar{f} (fermión-antifermión) representan quarks, o leptones. Esta reacción puede darse mediante el intercambio de un fotón o

bien mediante el intercambio del elusivo Z^0 . Los diagramas correspondientes se muestran en la Fig.5.4.1.

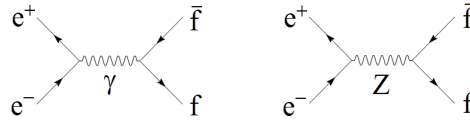


Figura 5.4.1: Diagramas de Feynman para la interacción $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$.

Los datos acumulados durante la siguiente década se utilizaron para determinar los parámetros del bosón Z con gran precisión. La Fig. 5.4.2 muestra la sección eficaz hadrónica para colisiones e^+e^- de varias fuentes. La curva representa las predicciones del SM y los puntos indican los datos experimentales. En la gráfica se observa un pico para 91 GeV que corresponde a la interacción vía intercambio del bosón Z . Para energías menores, la interacción se produce mediante el intercambio de un fotón, pero para energías cercanas a 90 GeV crece fuertemente la probabilidad de creación del bosón Z , por eso el pico resonante en la gráfica se interpreta como la creación del bosón Z . La información proveniente de un gran número de decaimientos provee para la masa del Z el valor

$$m_Z = 91,1875 \pm 0,0021 \text{ GeV} \quad \text{con} \quad \Gamma_Z = 2,4952 \pm 0,0023 \text{ GeV}$$

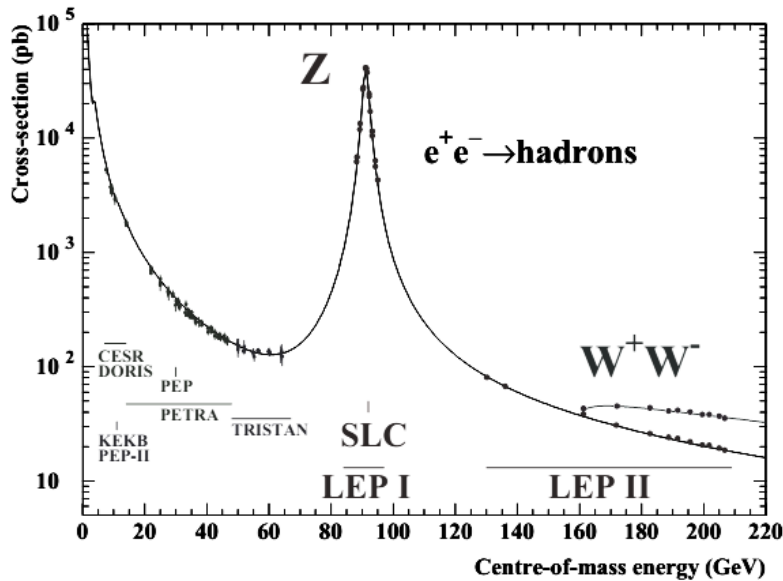


Figura 5.4.2: Sección eficaz para la interacción e^+e^- .

5.4.2 Tres familias de leptones

Al momento han sido descubiertas tres generaciones de leptones. Podríamos preguntarnos si es posible encontrar nuevas partículas que formen parte de alguna familia no descubierta aún, pero existe evidencia en favor de la idea de que sólo son tres.

Los bosones Z^0 son producidos y decaen según las siguientes reacciones

$$e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow \begin{cases} l\bar{l} \\ \nu_l\bar{\nu}_l \\ u\bar{u}, d\bar{d}, s\bar{s}, c\bar{c}, b\bar{b} \end{cases}$$

En los productos de la reacción encontramos pares de todos los leptones y de todos los quarks, con excepción del quark top, dado que es demasiado pesado para poder ser producido en el decaimiento del bosón Z (la masa del Z es de 91,2 GeV mientras que la del quark top es $m_{top} = 172,2 \pm 1,2$ GeV).

Por un lado, los quarks no son observados en forma directa, sino como parte de hadrones. Por otra parte, los neutrinos no son observados, pero las correspondientes relaciones de decaimiento pueden ser estimadas mediante la relación

$$\Gamma(Z \rightarrow \text{neutrinos}) = \Gamma_{total} - \Gamma(Z \rightarrow \text{hadrones}) - \Gamma(Z \rightarrow \text{leptones})$$

donde Γ_{total} es la tasa de decaimiento total del bosón Z , la cual puede determinarse a partir de la forma de la sección eficaz. De haber un neutrino extra, la tasa de decaimiento total cambiaría, con lo cual cambiaría la relación de decaimiento de algún proceso particular (por ejemplo, $\Gamma(Z \rightarrow \text{hadrones})/\Gamma_{total}$). Los datos concuerdan muy bien con la suposición de que el bosón Z decae en tres neutrinos, tres leptones y cinco quarks (cada quark, con los tres grados de libertad de la carga de color).

La Fig. 5.4.3 muestra la sección eficaz hadrónica, a partir de los datos experimentales. El número de clases de neutrinos obtenido a partir del Modelo Estándar es $N_\nu = 2,92 \pm 0,05$. Estos argumentos no eliminan la posibilidad de existencia de alguna otra clase de neutrino, pero de existir, la masa de estos debería ser muy grande ($m_\nu \geq m_Z/2$) de modo que se considera una situación muy poco probable.

5.4.3 Evidencia del color

Como se dijo previamente, para explicar las regularidades observadas en las tablas de partículas elementales se introduce un conjunto de nuevas partículas: los quarks. Estas partículas, de espín 1/2 y carga fraccionaria ($\pm 1/3$ y $\pm 2/3$) serían partículas componentes de todos los hadrones. Los bariones serían combinaciones de tres o más quarks y los mesones serían combinaciones de un quark y un antiquark. Pero este esquema dio lugar a nuevos problemas.

Muchas partículas están compuestas por dos (o tres) quarks de la misma clase. Un ejemplo son las partículas Ω^- y Δ^{++} , que están compuestas por los quarks sss y uuu respectivamente. El espín de estas partículas es 3/2, lo que

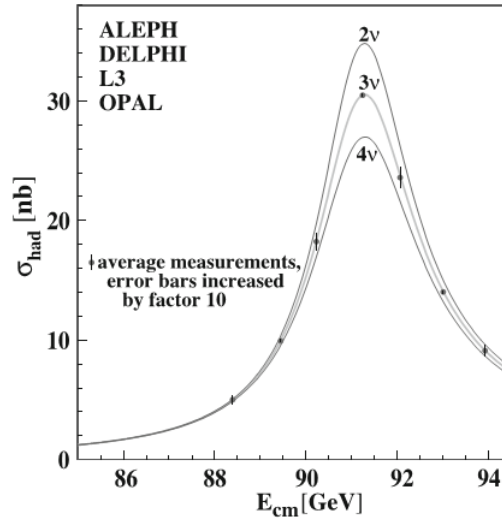


Figura 5.4.3: Sección eficaz para la reacción $e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow \text{hadrones}$, considerando cinco clases de quarks. Las mediciones concuerdan con los cálculos provistos por el Modelo Estándar.

implica que su configuración es $\uparrow\uparrow\uparrow$, esto es, la misma configuración de espín para todos los quarks. Pero dado que los quarks son fermiones, están sujetos al principio de exclusión de Pauli, de modo que no podrían encontrarse en un mismo estado cuántico. Sin embargo, al ser $L = 0$ el valor esperado para el momento angular de estas partículas, las funciones de onda de los quarks deberían ser completamente simétricas, lo que violaría el principio de exclusión de Pauli.

La forma de salvar esta inconsistencia fue introducir una nueva propiedad para los quarks: la *carga de color*. Luego, para lograr un sistema de tres quarks totalmente antisimétrico, el número de grados de libertad debía ser tres. De este modo, la carga de color confiere a los quarks tres nuevos grados de libertad a los que se hace referencia arbitrariamente como rojo, verde y azul, o bien R, G, B (*red, green y blue*, respectivamente). La evidencia de la existencia del color proviene de varias fuentes. Aquí se mencionan brevemente algunas.

Decaimiento del mesón π^0 . Ya se mencionó que el pión neutro decae en dos fotones. La tasa de decaimiento puede calcularse con base en los diagramas de Feynman. El cálculo da un valor proporcional a N_c^2 , donde N_c es el número de grados de libertad del color. Al calcular este valor tomando $N_c = 3$, la tasa de decaimiento toma el valor $\Gamma(\pi^0 \rightarrow 2\gamma) = 7,64 \text{ eV}$ lo que está de acuerdo con el valor experimental, $\Gamma_{exp} = \hbar/\tau = 7,84 \pm 0,6 \text{ eV}$.

Decaimiento de W . El bosón mediador W puede decaer de las siguientes formas

$$W \rightarrow e\bar{\nu}_e, \mu\bar{\nu}_\mu, \tau\bar{\nu}_\tau, \bar{u}d', \bar{c}s'$$

El cálculo de la relación de decaimiento para la reacción $W \rightarrow leptones$ da como resultado $1/5$ si no se considera la carga de color, y $1/9$ considerando la carga de color. El valor experimental es de $\approx 11\%$, consistente con la suposición de la existencia de los tres grados de libertad para los quarks.

Valor de R . En experimentos de dispersión electrón-positrón se define el valor R como un cociente entre la sección eficaz para la producción de hadrones y la sección eficaz de producción de un par de muones,

$$R \equiv \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow hadrones)}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} = N_c \sum Q_i^2$$

Este valor depende de la energía de la interacción, dado que a mayores energías podrán ser producidos los quarks más pesados. Los valores esperados para R serán, entonces,

$$R = 3 \left[\left(\frac{2}{3}\right)^2 + \left(-\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \dots \right] =$$

$$= \begin{cases} 2 & u, d, s & \sqrt{s} < 2m_c \\ \frac{10}{3} & u, d, s, c & 2m_c < \sqrt{s} < 2m_b \\ \frac{11}{3} & u, d, s, c, b & 2m_b < \sqrt{s} \end{cases}$$

donde m_c y m_b son respectivamente las masas de los quarks charm y bottom. El valor \sqrt{s} corresponde a la energía del centro de masa. Los valores dados son los que corresponden al valor de R esperado considerando $N_c = 3$. La Fig.5.4.4 muestra una compilación de valores de R que incluye correcciones débiles y fuertes. Se marcan los correspondientes valores de $R = 2, 10/3$ y $11/3$ para energías crecientes, en coincidencia con la probabilidad de creación de quarks pesados. Se entonces ve un claro acuerdo con el valor de R calculado.

5.4.4 Hallazgo del bosón de Higgs

Como hemos visto, todas las interacciones son mediadas por bosones. Las ecuaciones de las teorías cuánticas de campos describen las interacciones en términos de bosones mediadores, pero en estas descripciones, ninguno de dichos bosones debería ser masivo, lo cual no se corresponde en absoluto con las observaciones. Para solucionar estas inconsistencias teóricas en las ecuaciones de las teorías cuánticas de campos, en la década de 1960 fue desarrollado el concepto de ruptura espontánea de la simetría, en forma simultánea por varios investigadores, entre ellos, P. Higgs.

Este mecanismo explica cómo algunas partículas elementales adquieren masa y otras no. Básicamente, lo que confiere masa a las partículas elementales es la

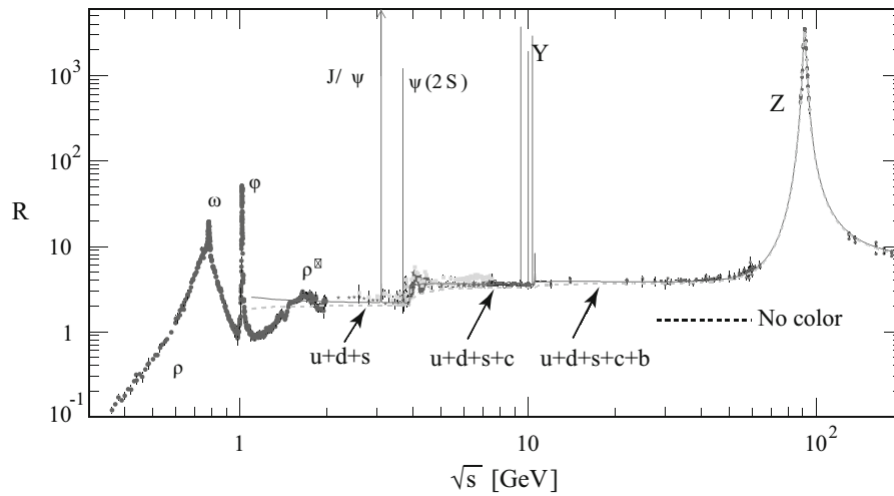


Figura 5.4.4: Valores de R para la interacción e^+e^- .

interacción de estas con el campo de Higgs, un campo que inunda todo el espacio y que está presente desde los comienzos del Universo. Aquellas partículas que interactúan más fuertemente con este campo tendrían una masa mayor, mientras que las que no interactúan con el campo de Higgs no tendrían masa.

Pero, ¿cómo corroborar la existencia de este campo? Como sucede con otros campos, su detección sería posible si se pudiera observar una excitación del campo, en este caso, el bosón de Higgs. Este bosón es una partícula virtual de corta vida, de modo que, lo que efectivamente se detecta en los experimentos son los productos de decaimiento. Una dificultad extra de su búsqueda es que la teoría no predice la masa que debe tener este bosón; no obstante, existen razones para descartar ciertas regiones de energía. Así por ejemplo, los experimentos en el Fermilab indican que el Higgs debería tener una masa mayor a 114 GeV (con un nivel de confianza de un 95%).

La Fig. 5.4.5 representa las relaciones de decaimiento del bosón de Higgs. Como se observa, se tiene la mayor probabilidad de decaimiento según el canal $b\bar{b}$ para $m_H \lesssim 130\text{GeV}$ y WW y ZZ para $m_H \gtrsim 130\text{GeV}$.

Obsérvese la región de energías comprendida entre 100 y 200 GeV. Si bien la probabilidad de decaimiento en el canal de dos fotones (por ejemplo) es relativamente baja, tras un gran número de eventos puede colectarse evidencia suficiente que responda a este modo de decaimiento, y corroborar si corresponde al decaimiento de partículas con la misma masa invariante.

En el año 2010, luego de varios años de construcción, se puso en marcha el colisionador de partículas más grande construido a la fecha: el LHC (Large Hadron Collider, o gran colisionador de hadrones). Uno de los objetivos principales de su construcción fue la búsqueda del bosón de Higgs. Al tener una gran luminosidad, este colisionador permite obtener una cantidad de información muy

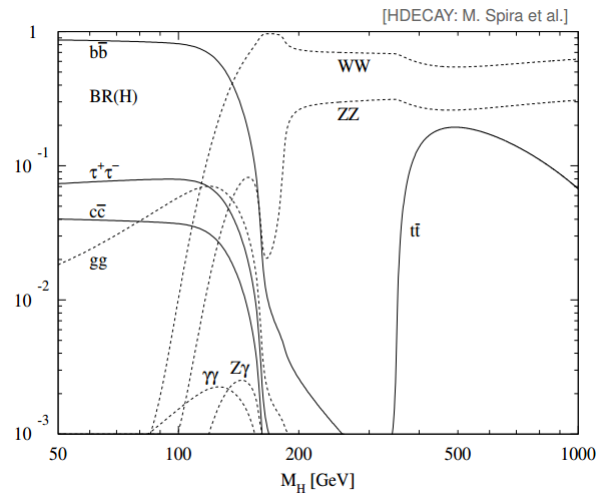


Figura 5.4.5: Relaciones de decaimiento del bosón de Higgs.

grande en los períodos de funcionamiento.

Tras casi 50 años de búsqueda y luego de dos años de operación del LHC, los científicos del CERN anunciaron el hallazgo de una partícula que reunía todas las características esperadas para el bosón de Higgs. Los experimentos ATLAS y CMS confirmaron el descubrimiento de una partícula con una masa de alrededor de 125 GeV. Al año siguiente, como era previsible, F. Englert y P. Higgs recibieron el premio Nobel de Física por «el descubrimiento teórico del mecanismo que contribuye a entender el origen de la masa de las partículas subatómicas».

Para finalizar:

Toda la materia conocida se compone de leptones y combinaciones de quarks. Tanto leptones como quarks son considerados al día de hoy como partículas elementales.

Existen cuatro interacciones fundamentales entre partículas elementales: la interacción débil, la interacción electromagnética, la interacción fuerte y la interacción gravitatoria. Estas interacciones son posibles gracias al intercambio de partículas virtuales: los bosones mediadores.

Las partículas elementales, así como los bosones de intercambio masivos, adquieren su masa debido a la interacción con el campo de Higgs.

Capítulo 6

Metodología

La presentación de la propuesta se realizó con un grupo de alumnos de Profesorado en Física y Física Aplicada, en el marco de la materia Física Contemporánea II. La propuesta fue planteada mediante la resolución de dos cuestionarios iniciales (pretest), el desarrollo de las actividades y la resolución y discusión de cuestionarios finales (postest). El desarrollo de las actividades se concretó en dos encuentros de 4 horas cátedra cada uno. En el primer encuentro se desarrolló la primera parte de las actividades descritas en la sección 3.2, mientras que la segunda parte se desarrolló en el segundo encuentro.

Para el primer encuentro no se dio previamente ninguna clase especial, tampoco se propuso la lectura de materiales sobre el tema. Si bien en las clases se deslizaron algunas ideas sobre partículas elementales, en ningún momento se profundizó sobre el tema. De modo que cualquier conocimiento de los alumnos sobre estos temas estaría relacionado únicamente con sus propias motivaciones. Se eligió esta metodología para que los cuestionarios iniciales muestren de manera efectiva los conocimientos del alumno y no los posibles recuerdos de lecturas o clases recientes. Para el segundo encuentro se propuso a los alumnos que exploren el sitio web (descrito en la sección 3.3).

Terminada la actividad se pidió a los alumnos que, en función del material presentado y de su experiencia con las actividades realizadas, completen una encuesta orientada a la recepción de los temas tratados, a sus puntos de vista sobre la relevancia de los mismos en la enseñanza de nivel medio y sobre los eventuales abordajes en su futuro desempeño como docentes.

Si bien se ha elaborado un conjunto de instrumentos exclusivamente para la evaluación de la propuesta, dado el número de alumnos con el que se trabajó, no se siguió una estructura rígida característica de un trabajo de investigación en educación (grupos de alumnos al azar, grupos experimental y de control, instrumentos de evaluación cuantificables, etc.), de modo que los resultados se conciben de manera descriptiva.

6.1 Características de la asignatura

La materia Física Contemporánea II es una materia cuatrimestral (segundo cuatrimestre) de 5 horas cátedra semanales, ubicada en el tercer año de la Tecnicatura Superior en Física y Física Aplicada. Los contenidos de la materia incluyen: ondas de materia, principio de incerteza, mecánica cuántica (ecuación de Schrödinger y problemas unidimensionales), átomo de hidrógeno y números cuánticos, mecánica estadística, nociones de física nuclear y de partículas elementales. Los aspectos relacionados con relatividad se dictan en la materia Física Contemporánea I. Para poder cursar la Física Contemporánea I, los alumnos deben tener aprobada la cursada de todas las físicas previas, en las que se desarrollan temas de mecánica, termodinámica, óptica, electricidad y magnetismo, ondas, y otros temas de la Física Clásica.

6.2 Características generales del grupo

El primer encuentro se realizó con 11 alumnos. De los once alumnos, 10 eran regulares en la materia, mientras que el alumno restante, quien fue invitado a participar de la propuesta, había cursado y aprobado la materia en el año 2012. De los diez alumnos regulares, sólo dos rindieron y aprobaron el examen final de la materia Física Contemporánea I al concluir la cursada (primer cuatrimestre), mientras que el resto de los alumnos no se presentaron, en muchos casos por cuestiones asociadas a correlatividades y finales pendientes. Se trata de un grupo participativo, de buen nivel académico en general, y que demuestra interés por los temas de Física Moderna. Del total de alumnos cuatro se dedican a la docencia o bien, han tenido ya alguna experiencia docente.

6.3 Pretest, postest y encuesta

En base a la hipótesis de trabajo planteada, se desarrollaron dos cuestionarios para ser resueltos en forma de pretest. El primer cuestionario (Cuestionario 1A) consta con 17 preguntas de tipo «verdadero-falso» en el que se abordan temas generales sobre la física clásica y moderna. El objetivo de este cuestionario es el de tener un panorama de las concepciones de los alumnos sobre cuestiones de relevancia para la física, tales como determinismo, incertidumbre, relatividad, elementalidad, entre otras.

El segundo cuestionario (Cuestionario 1B) contiene preguntas asociadas concretamente a la física de partículas. Ya que la propuesta didáctica está orientada a la relación entre teoría y experimento en física de partículas elementales, este cuestionario, compuesto por seis preguntas para desarrollar en unas pocas líneas, se diseñó para relevar los conocimientos previos de los alumnos sobre partículas elementales e interacciones fundamentales.

Ambos cuestionarios fueron completados por los alumnos antes de comenzar con el desarrollo de las actividades. Los mismos fueron presentados a los alumnos como herramientas para evaluar la adquisición de conocimientos, por ello se

insistió en que no contesten aquello que no supieran o sobre lo que no tuviesen certezas. A pedido del docente, los alumnos contestaron en forma anónima. Una copia de cada cuestionario se encuentra en el Apéndice A.

Se diseñaron otros dos cuestionarios para ser trabajados al finalizar la actividad (postest). El primero (Cuestionario 2A), sobre generalidades de las fuerzas fundamentales de la naturaleza y el segundo (Cuestionario 2B), sobre el «zoo» de partículas. Los mismos se encuentran en el Apéndice B. Si bien estos cuestionarios fueron elaborados para sondear el nivel de adquisición de conceptos por parte de los alumnos al finalizar el tratamiento de los temas, no fueron utilizados aquí con este fin. Esto se debe a que muchas de las cuestiones planteadas en los cuestionarios no fueron desarrolladas en profundidad. En lugar de ello, consideramos más fructífero efectuar una puesta en común sobre las cuestiones planteadas en los mismos.

Finalmente, se preparó una encuesta con preguntas que hacen referencia a la concepción de los alumnos sobre la importancia de los temas tratados en su formación y sobre las posibilidades de trasposición al nivel medio. La Encuesta se elaboró con la herramienta Google Forms¹ y fue contestada en línea, y en forma anónima, por los alumnos que concurren a ambos encuentros (ocho alumnos en total). La misma se compone de siete preguntas y un espacio para comentarios. Las preguntas fueron diseñadas para ser respondidas en una escala lineal de 1 a 5, donde el valor 1 corresponde a la respuesta «No, en absoluto» y 5 corresponde a la respuesta «Sí, definitivamente». Las preguntas pueden encontrarse en el Apéndice C.

6.4 Desarrollo de actividades

Primer encuentro

El trabajo fue planteado en grupos de dos y tres alumnos por mesa de trabajo. Cada grupo contó con una computadora portátil (netbook) con todos los simuladores y animaciones a utilizar y con una copia de la guía de actividades. Cada grupo tenía a su vez una copia en papel de las hojas de trabajo, las cuales fueron completadas durante la actividad. Una vez completados los test iniciales, se comenzó con el desarrollo de las actividades. Se trabajó con la primera parte del conjunto de actividades de scattering como primera aproximación al problema de interacciones entre partículas. A partir de esta puesta se discutieron los conceptos centrales del tema, reforzando algunas ideas desde la teoría con ayuda del docente.

Se llevaron a cabo los primeros cinco puntos de la primera parte (con excepción del primero, el cual se había trabajado algunas clases antes) tal como están propuestos. En la planificación inicial se estimó entre 5 y 10 minutos para cada actividad, sin embargo, los tiempos reales se extendieron más allá de estas estimaciones. Al final de cada tarea se realizó una puesta en común, de entre 5 y 10 minutos cada una. Las últimas dos actividades de esta primera parte,

¹Vease: https://www.google.com/intl/es-419_ar/forms/about/

relacionadas con ondas en el problema de scattering y con resonancias, fueron trabajadas mediante una discusión general.

Segundo encuentro

Antes de comenzar con la segunda parte del trabajo se realizó una puesta en común sobre las preguntas del pretest. Luego de la discusión, se ofreció una charla corta sobre partículas elementales, específicamente sobre las primeras clasificaciones de partículas, de modo de contextualizar la primera actividad. En esta charla fueron definidos los números leptónico y bariónico. A continuación, se realizó la primera actividad, en la que se pide a los alumnos que indiquen, de un listado de interacciones, cuáles están prohibidas por las leyes de conservación planteadas y cuáles no.

A posteriori, se dio una segunda charla corta, esta vez sobre leptones y quarks y sobre las interacciones fundamentales. Esta intervención dio pie para las siguientes dos actividades: determinación de la masa del quark top y construcción de histogramas para la masa del bosón Z. La última actividad, correspondiente al análisis de eventos y determinación de la masa del bosón de Higgs, no se llegó a realizar, quedando pendiente para un eventual encuentro futuro. La discusión sobre los Cuestionarios 2A y 2B se llevó a cabo en la primera parte de la clase posterior al segundo encuentro.

Capítulo 7

Resultados

Los resultados de la aplicación de la propuesta se analizan según varios enfoques. Lógicamente, se hace un examen de los cuestionarios previos y posteriores a la actividad. Se comenta sobre las observaciones realizadas al momento de la realización de las actividades, sobre las filmaciones de los grupos en acción y sobre las puestas en común. También se recoge el trabajo plasmado por los alumnos en papel para las actividades desarrolladas. Por último, se exponen los resultados de la encuesta sobre la recepción de la propuesta y sobre la relevancia de la temática, según la visión del alumno.

En términos generales, los alumnos mostraron interés no sólo por la temática trabajada, sino también por la dinámica de trabajo: realización de tareas de respuesta rápida y discusión en grupos. Aun así, llevó un tiempo que los alumnos encuentren el ritmo de trabajo, dado que esta actividad fue diferente a las propuestas en las clases tradicionales. Probablemente esta sea la razón por la cual las primeras actividades, que son las más simples, hayan tomado tiempos de discusión similares a los que demandaron las actividades que requieren una mayor elaboración.

7.1 Pretest

La siguiente gráfica (Fig. 7.1.1) muestra la cantidad de respuestas correctas, incorrectas y respuestas NS (no sabe) de los alumnos al Cuestionario 1A. El porcentaje de respuestas correctas sobre el total de las preguntas fue de 59%, de 26% para las respuestas incorrectas y 15 % para las respuestas NS.

De la gráfica se observa que existen ambigüedades con respecto a varios de los temas abordados en el cuestionario. Se observa, por ejemplo, que los alumnos asocian el espín con el giro del electrón (pregunta 6); sin embargo, esto no es algo que nos llame la atención, dado que el tema no había sido abordado en la materia al momento de realizar el cuestionario. También se percibe que no tienen claro cómo se componen las partículas subnucleares, como se ve en las respuestas a las preguntas 5, 9, 11, 14 o 15. Esta afirmación se verá reforzada cuando se

analicen las respuestas del Cuestionario 1B. Otra observación pertinente, es la confusión que tienen los en cuanto al principio de incerteza (pregunta 4).

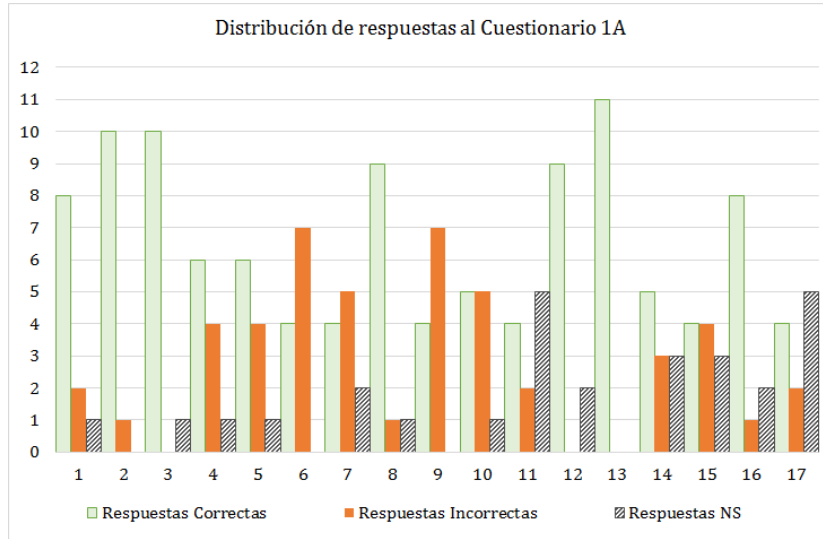


Figura 7.1.1: Respuestas al Cuestionario 1A.

En cuanto a las cuestiones asociadas a la relatividad, parece que los alumnos han incorporado en general el límite impuesto por la velocidad de la luz (pregunta 8). No obstante, no es claro que se pueden crear partículas de materia si se dispone de suficiente energía. En relación a esta cuestión, tampoco muestran tener concepciones claras sobre la relación masa-energía a la que refiere la pregunta 10. La Fig. 7.1.2 muestra los puntajes obtenidos este cuestionario. El puntaje promedio es de 10 respuestas correctas (de 17) con una desviación estándar de 2,6.

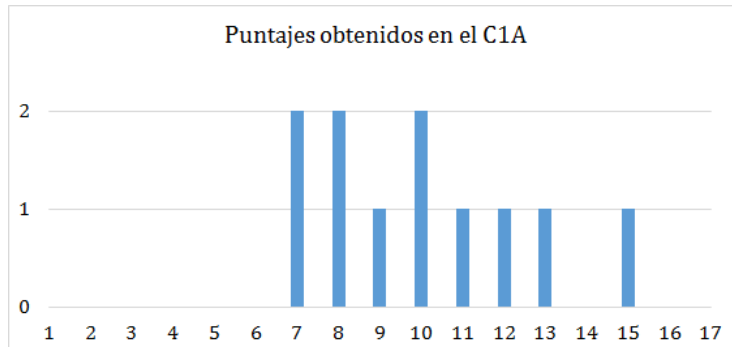


Figura 7.1.2: Puntajes obtenidos en el cuestionario 1A

En cuanto al segundo cuestionario (C1B), en general, los alumnos mostraron tener conceptos vagos y poco precisos sobre el tema. Buena parte de las preguntas fueron respondidas en forma afirmativa, lo cual significa que los alumnos escucharon hablar de los conceptos mencionados; sin embargo, no pueden dar detalles al respecto. Asimismo, muchas de las preguntas fueron respondidas negativamente, y otras, con frases como «Sí, pero no recuerdo», o «Sí, pero no estoy seguro», o «Me suena...». Así, por ejemplo, diez de los once alumnos afirman haber escuchado sobre estas partículas, pero sólo dos de ellos demuestran tener una idea medianamente aceptable (esto es, reconocer a los quarks como partículas elementales y nombrar los seis sabores). Sobre leptones, tres alumnos indican no haber oído al respecto. El resto muestra una idea vaga; solo dos alumnos entienden a los leptones como partículas elementales diferentes de los quarks. Las respuestas son similares en el caso de los rayos cósmicos. Con respecto a las preguntas sobre los bosones W, Z y sobre el Modelo Estándar, crece la incertidumbre, ya que la mitad de los alumnos no escuchó sobre estos temas. Por el contrario, todos afirman haber oído algo acerca del bosón de Higgs, pero nuevamente se tienen ideas muy pobres al respecto.

7.2 Actividades

El análisis de las guías de actividades completadas por los alumnos, así como el análisis de las filmaciones sobre la implementación, muestran que en general los grupos fueron capaces de responder correctamente a las consignas planteadas. Las mayores dificultades se encontraron al tratar de representar esquemáticamente la sección eficaz de interacción para diferentes geometrías. Otra actividad que no pudieron completar fue la de encontrar una posible relación cuantitativa (en forma de proporcionalidad) entre sección eficaz de dispersión con partículas puntuales cargadas y las variables relevantes al problema.

Con respecto a la segunda parte, el trabajo con leyes de conservación de q , B y L no presentó mayores dificultades. Luego, para la determinación de la masa del quark top, se distribuyeron las imágenes (una por grupo). Todos los grupos obtuvieron una masa cercana a los 170 GeV. Se hizo hincapié en que, para tener un valor experimental aceptable habría que tener un número suficientemente grande de mediciones. El trabajo con el visualizador Hypatia sólo se limitó a la identificación de pares leptón-antileptón que corresponderían al decaimiento del bosón Z. Los grupos obtuvieron histogramas de entre 10 y 20 mediciones de la masa invariante del Z.

Luego del desarrollo de las actividades, se observó que los tiempos planificados para las actividades no fueron suficientes como para explotar plenamente las posibilidades que ofrecen los simuladores, como el trabajo con imágenes. Asimismo, notamos que los tiempos planificados para las charlas previas a cada actividad fueron insuficientes, fundamentalmente por las dudas planteadas por los alumnos al tratar temas completamente nuevos para ellos. Esta observación también fue realizada por varios alumnos, quienes expresaron que hubiese sido bueno dedicar más tiempo al desarrollo de las actividades y a las discusiones

sobre los temas planteados en cada una.

7.3 Encuesta

Mostramos a continuación los resultados de la Encuesta. En principio, en función de las observaciones del trabajo en clase del grupo y de las discusiones posteriores, las respuestas a las preguntas relacionadas con los temas trabajados no causaron sorpresas. Así es que el 100 % de los alumnos considera que los temas presentados son importantes para su formación como docentes de Física (Pregunta 1). Asimismo, prácticamente todos los alumnos tienen interés en aprender más sobre la Física de Altas Energías (Pregunta 7). Las preguntas 2 y 3 muestran una buena aceptación de la propuesta, tal como se muestra en las gráficas de la Fig. 7.3.1.

Sin embargo, encontramos una situación no esperada en cuanto a las concepciones de los alumnos sobre el abordaje de estos temas en nivel medio. En referencia a las preguntas 4, 5 y 6, las gráficas de la Fig. 7.3.2 muestran que los alumnos no consideran prioritario enseñar cuestiones sobre Física de Partículas Elementales en la escuela media. Si bien este trabajo no tiene valor estadístico, dado el bajo número de participantes, aún así estos resultados encienden un alerta, dado que son pocos los egresados de las carreras de Profesorado en Física.

7.3.1 Motivación

Un aspecto interesante de la puesta en práctica de la propuesta fue la motivación que generó en los alumnos el trabajo con esta temática. En las clases posteriores al desarrollo de las actividades, los alumnos manifestaron abiertamente su motivación por el tema, interés en las discusiones y en las puestas en común de los Cuestionarios 2A y 2B. Esta motivación no sólo fue compartida en las charlas posteriores a las actividades, sino que fue plasmada en la Encuesta. Transcribimos aquí algunos comentarios de los alumnos¹:

«Me gustaron mucho las clases sobre Física de partículas, como así también fue de gran ayuda la utilización de simulaciones, para la comprensión de los temas dados.»

«Mucho más...» (En relación a la última pregunta de la Encuesta).

«... creo que voy a egresar sabiendo mucho menos de lo que quisiera.»

«... hacía mucho tiempo que una materia no me despertaba tanto interés»

«La propuesta me resultó muy interesante, pero creo que deberíamos haberle dedicado más tiempo...»

«... ahora entiendo muchas cosas que por ahí antes no entendía cuando leía algo o veía algún video o alguna charla de divulgación sobre el tema»

¹Las primeras tres frases son transcripciones (totales o parciales) de los comentarios de la Encuesta. Las últimas tres, corresponden a comentarios hechos por alumnos directamente al docente.

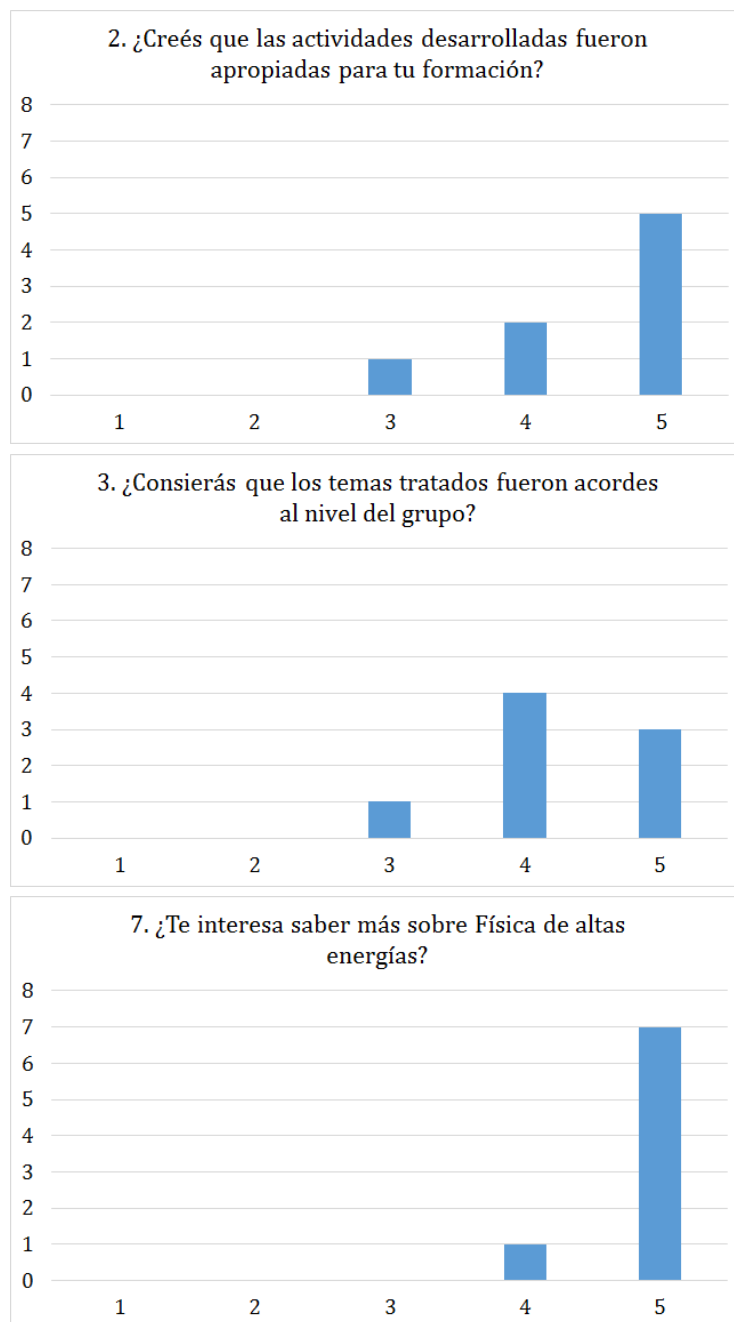


Figura 7.3.1: Respuestas a las preguntas 2, 3 y 7 de la Encuesta.

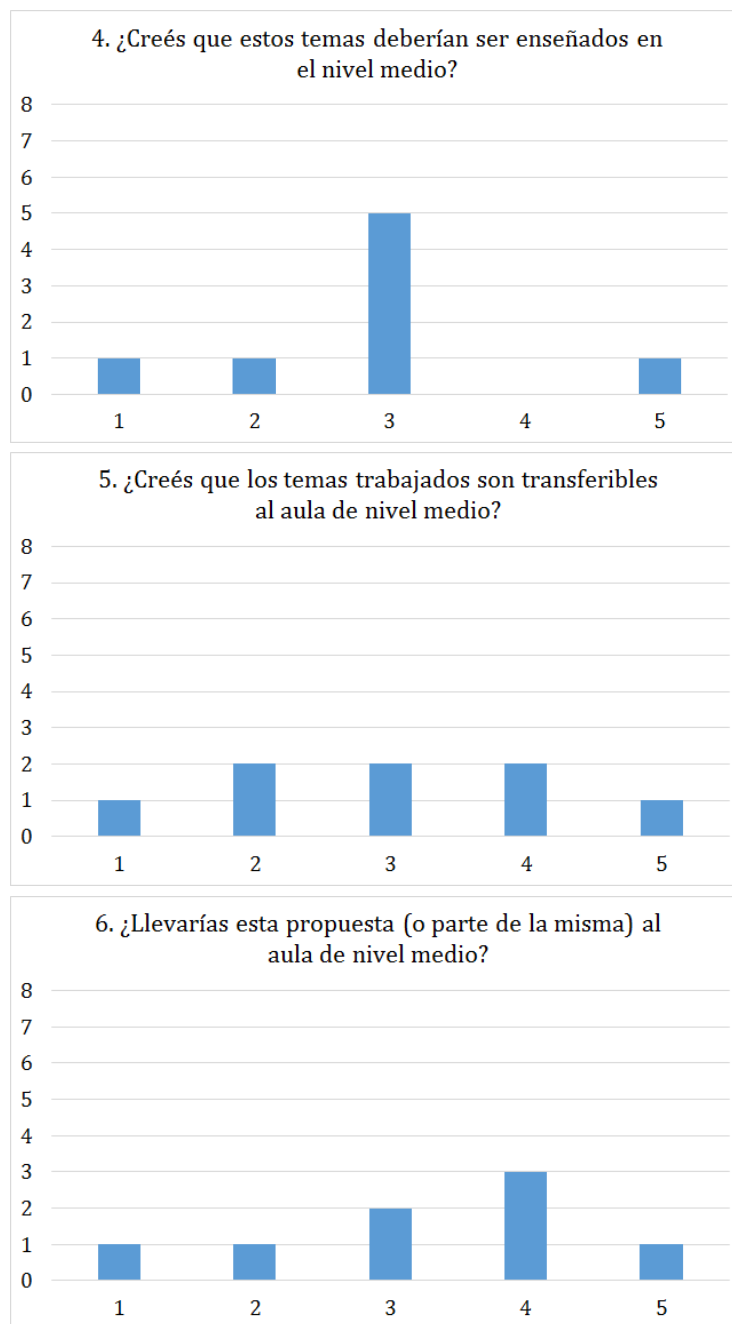


Figura 7.3.2: Respuestas a las preguntas 4, 5 y 6 de la Encuesta.

Capítulo 8

Conclusiones

La Física Moderna y Contemporánea forma una parte esencial de la Física. A pesar de ello, en el nivel medio la enseñanza de estos temas se efectúa de manera aislada, aún cuando los nuevos programas de Física incluyen temas de Física Contemporánea. La investigación en Enseñanza de Física Contemporánea ha crecido fuertemente en los últimos años. Existe un buen número de trabajos con propuestas de acercamiento de la FMC al nivel medio, muchas de ellas basadas en el uso de TIC's. Aún así, todavía no existen acuerdos sobre qué y cómo enseñar. Se observa también un buen número de proyectos de enseñanza que surgen en diferentes universidades e instituciones dedicadas a la investigación. Sin embargo, nuevamente, su implementación se realiza aisladamente.

La incorporación de nuevas tecnologías a la enseñanza de la física ha mostrado resultados favorables, tanto en la apropiación de conocimientos como en aspectos motivacionales. La enseñanza con el uso de TIC's se concibe como una forma alternativa de enseñanza que se complementa con los métodos tradicionales de clases teóricas, resolución de problemas y trabajos prácticos de laboratorio. En el área de la Física Contemporánea, estas herramientas permiten incorporar ideas muy complejas desde el punto de vista formal, a través del uso de simuladores y animaciones. Por otra parte, estas herramientas ofrecen la posibilidad de incluir ideas y formas de trabajo propios de las Ciencias, como el trabajo colaborativo o la construcción y evaluación de modelos sobre problemas reales concretos, aspectos que comienzan a incorporarse a la enseñanza de nivel medio y que constituyen una parte esencial de la educación científica.

Hemos presentado en este trabajo una propuesta de enseñanza centrada en la evolución del concepto de elementalidad. Esta propuesta se ha generado con el fin de trasladar un conjunto de ideas de la Física de Partículas Elementales a las aulas de nivel medio y superior, en respuesta a los objetivos para los cuales fue creada la Maestría en Física Contemporánea. Dado que la aplicación se llevó a cabo con un número pequeño de alumnos de profesorado, no podemos afirmar que los resultados obtenidos sean un reflejo de la situación del alumnado en general.

Los resultados de la puesta en práctica, muestran que la física de altas ener-

gías, y en particular lo referente a los constituyentes básicos de la materia, ha despertado un fuerte interés en los alumnos de profesorado. Sin embargo, se observa que estos mismos estudiantes no consideran la introducción de estos temas en el nivel medio como algo prioritario. Esto es contradictorio con la visión generalizada de los investigadores. Si bien no se ha indagado en los motivos de estas respuestas, podemos hipotetizar sobre sus orígenes. En principio, la mayor parte de los contenidos de los profesorados en Física forman parte de la Física Clásica, dejando aspectos de la FMC a ciertas materias específicas de la carrera. Por otra parte, es probable que en su paso por la Escuela Media, los alumnos sólo hayan tenido contacto con temas de Física Clásica. Si bien los objetivos de los planes de estudio hacen referencia a la vinculación entre la Ciencia y la vida cotidiana, en general los alumnos tienen un conocimiento muy limitado de las aplicaciones de la FMC. Queda abierta, entonces, la posibilidad de efectuar estudios que aborden las concepciones de los alumnos de Profesorado en Física sobre la incorporación de temas de FMC en la Escuela Media.

En cuanto al desarrollo de las actividades, tanto la resolución como las discusiones posteriores han sido muy enriquecedoras, tal como han manifestado los alumnos y como se ha observado en las filmaciones. Hemos visto que el estilo de trabajo basado en el Compromiso Interactivo ha tenido una buena aceptación. Los trabajos citados sobre estas metodologías (IE y PI) incluyen en general grandes grupos de alumnos. Sin embargo, vemos que también son aplicables a grupos pequeños. No se han desarrollado de manera completa todas las actividades elaboradas para la propuesta, no obstante el material se encuentra a disposición de cualquier docente interesado en la temática. Se deja así el camino abierto para experiencias futuras.

Bibliografía

- [1] UNESCO, “Enfoques estratégicos sobre las tics en educación en america latina y el caribe,” OREALC/UNESCO, Tech. Rep., 2013.
- [2] A. Pontes Pedrajas, “Aplicaciones de las tecnologías de la información y de la comunicación en la educación científica. primera parte: funciones y recursos,” *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, vol. 2, no. 1, pp. 2–18, 2005.
- [3] E. P. Daza Pérez, “Experiencias de enseñanza de la química con el apoyo de tics,” *Educación Química*, vol. Número de Aniversario: la Educación y las TIC, pp. 320–329, 2009.
- [4] J. L. Serrano Sánchez and M. P. Prendes Espinosa, “La enseñanza y el aprendizaje de la física y el trabajo colaborativo con el uso de las tic,” *Revista Latinoamericana de Tecnología Educativa*, vol. 11, no. 1, p. 95–107, 2012.
- [5] A. Medeiros and C. Farias de Medeiros, “Possibilidades e limitacoes das simulacoes computacionais no ensino da física,” *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 24, no. 2, Junho, 2002, vol. 24, no. 2, pp. 77–86, 2002.
- [6] V. Arias Gil and S. Y. López Ríos, “Las tic en educación en ciencias en colombia: una mirada actual de la investigación en la línea y su contribución a los propósitos de la educación en ciencias,” in *Congreso Iberoamericano de Ciencia, Tecnología, Innovación y Educación*, Buenos Aires,, 2014.
- [7] V. Copuano, “El uso de las tic en la enseñanza de las ciencias naturales,” *Virtualidad, Educación y Ciencia*, vol. 2, no. 2, pp. 79–88, 2011.
- [8] D. Gil Pérez, F. Senent, and J. Solbes, “Análisis critico de la introducción de la física moderna en la enseñanza media,” *Revista de Enseñanza de la Física*, vol. 2, no. 1, pp. 16–21, 1986.
- [9] F. Ostermann and M. A. Moreira, “Física contemporánea en la escuela secundaria: una experiencia en el aula involucrando formación de profesores,” *Enseñanza de las Ciencias*, vol. 18, no. 3, pp. 391–404, 2000.

- [10] S. B. McKagan, K. K. Perkins, and C. E. Wieman, “Why we should teach the bohr model and how to teach it effectively,” *Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res.*, vol. 4, no. 1, p. 010103(10), 2008.
- [11] P. Tuzón and J. Solves, “Análisis de la enseñanza de la estructura e interacciones de la materia según la física moderna en primero de bachillerato,” *Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales*, vol. 28, pp. 175–195, 2014.
- [12] L. Deslauriers and C. Wieman, “Learning and retention of quantum concepts with different teaching methods,” *Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res.*, vol. 7, no. 1, p. 010101(6), 2011.
- [13] M. Ayene, J. Kriek, and B. Damti, “Wave-particle duality and uncertainty principle: Phenomenographic categories of description of tertiary physics students’ depictions,” *Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res.*, vol. 7, no. 2, p. 020113(13), 2011.
- [14] C. Baily and N. Finkelstein, “Teaching and understanding of quantum interpretations in modern physics courses,” *Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res.*, vol. 6, no. 1, p. 010101, 2010.
- [15] M. A. Monteiro, R. Nardi, and J. B. B. Filho, “A sistemática incompreensão da teoria quântica e as dificuldades dos professores na introdução da física moderna e contemporânea no ensino médio,” *Ciência & Educação*, vol. 15, no. 3, pp. 557–580, 2009.
- [16] G. C. Pantoja, M. A. Moreira, and V. Herscovitz, “Implementation of a didactic proposal on fundamental concepts of quantum mechanics with students of a professional master’s degree in physics teaching,” *Latin American Journal of Physics Teaching*, vol. 6, no. 4, pp. 519–529, Diciembre 2012.
- [17] I. Greca and V. Herscovitz, “Construyendo significados en mecánica cuántica: fundamentación y resultados de una propuesta innovadora para su introducción en el nivel universitario,” *Enseñanza de las Ciencias*, vol. 20, no. 2, pp. 327–338, 2002.
- [18] C. Baily and N. Finkelstein, “Teaching quantum interpretations: Revisiting the goals and practices of introductory quantum physics courses,” *Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res.*, vol. 11, no. 2, 2015.
- [19] P. Fernández, E. González, and J. Solbes, “Evolución de las representaciones docentes en la física cuántica,” *Enseñanza de las Ciencias*, vol. Núm. Extra, pp. 1–5, 2005.
- [20] D. Zollman, “Research on teaching and learning quantum mechanics,” *Papers presented at the annual meeting National Association for Research in Science Teaching*, 1999.

- [21] B. Akarsu, “Evaluating college students’ conceptual knowledge of modern physics: Test of understanding on concepts of modern physics (tuco-mp),” *European Journal of Physics Education*, vol. 2, no. 1, pp. 67–79, 2011.
- [22] S. B. McKagan, K. K. Perkins, and C. E. Wieman, “Design and validation of the quantum mechanics conceptual survey,” *Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res.*, vol. 6, no. 2, p. 020121(17), 2010.
- [23] E. van den Berg and D. Hoekzema, “Teaching conservation laws, symmetries and elementary particles with fast feedback,” *Physics Education*, vol. 41, no. 1, pp. 47–56, 2006.
- [24] F. K. Nóbrega and L. F. Mackedanz, “O lhc (large hadron collider) e a nossa física de cada dia,” *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 35, no. 1, p. 1301, 2013.
- [25] X. Cid and R. Cid, “Luminosidad: la luz al final del túnel (lhc),” *Lat. Am. J. Phys. Educ.*, vol. 3, no. 3, pp. 638–642, 2009.
- [26] —, “Lhc en unos pocos números,” *Lat. Am. J. Phys. Educ.*, vol. 4, no. 2, pp. 449–454, 2010.
- [27] —, “Llevando el magnetismo de alicé (lhc) a la aulas de secundaria,” *Lat. Am. J. Phys. Educ.*, vol. 5, no. 3, pp. 614–617, 2011.
- [28] R. García-Salcedo and C. Moreno, “Descripción de la evolución del universo: una presentación para alumnos preuniversitarios,” *Lat. Am. J. Phys. Educ.*, vol. 1, no. 1, pp. 95–100, 2007.
- [29] C. Mora, “Deducción de los primeros modelos cosmológicos,” *Lat. Am. J. Phys. Educ.*, vol. 2, no. 2, 2008.
- [30] J. J. Llovera-González, “El modelo estándar como célula generatriz y contexto sistematizador de contenidos en el curso de física general,” *Lat. Am. J. Phys. Educ.*, vol. 4, no. 2, pp. 429–434, 2010.
- [31] A. Hobson, “Teaching elementary particle physics: Part 1,” *The Physics Teacher*, vol. 49, pp. 12–15, 2011.
- [32] —, “Teaching elementary particle physics: Part 2,” *The Physics Teacher*, vol. 49, pp. 136–138, 2011.
- [33] C. Hill and L. Lederman, “Teaching symmetry in the introductory physics curriculum,” *The Physics Teacher*, vol. 38, no. 6, pp. 348–353, 2000.
- [34] M. K. Pedersen, B. Skyum, R. Heck, R. Müller, M. Bason, A. Lieberoth, and J. F. Sherson, “Virtual learning environment for interactive engagement with advanced quantum mechanics,” *Phys. Rev. Phys. Educ. Res.*, vol. 12, no. 1, p. 013102, 2016.

- [35] R. Magnussen, S. D. Hansen, T. Planke, and J. F. Sherson, “Games as a platform for student participation in authentic scientific research,” *Electronic Journal of E-Learning*, vol. 12, no. 3, pp. 259–270, 2014.
- [36] CERN, “International masterclasses, hands on particle physics,” consultado en noviembre de 2016. [Online]. Available: <http://www.physicsmasterclasses.org/>
- [37] ATLAS-CERN, “Hy.p.a.t.i.a. (hybrid pupil’s analysis tool for interactions in atlas),” consultado en noviembre de 2016. [Online]. Available: <http://hypatia.iasa.gr/en/3.html>
- [38] CERN, “Minerva,” consultado en noviembre de 2016. [Online]. Available: <http://atlas-minerva.web.cern.ch/atlas-minerva>
- [39] —, “Atlantis event display for atlas,” consultado noviembre de 2016. [Online]. Available: <http://atlantis.web.cern.ch/atlantis/>
- [40] N. S. Foundation and U. D. o. E. the Office of High Energy Physics (Office of Science, “Quarknet,” consultado en noviembre 2016. [Online]. Available: <https://quarknet.i2u2.org/home>
- [41] Fermilab, “Education office projects,” consultado en noviembre de 2016. [Online]. Available: <http://ed.fnal.gov/projects/>
- [42] M. Bardeen, “Topics in modern physics teacher resource materials,” Batavia, IL,, 2006.
- [43] CPEP, “Classroom activities. fundamental particles and interacitons.” [Online]. Available: http://www.cpepphysics.org/Class_act_esp.html
- [44] B. Martin and P. Mahaffy, “The king’s center for visualization in science.” [Online]. Available: <http://www.kcvs.ca/site/projects/physics.html>
- [45] A. Kohnle, “The quantum mechanics visualisation project.” [Online]. Available: <http://www.st-andrews.ac.uk/physics/quvis/about.html>
- [46] C. Wieman, “Phet interactive simulationas,” consultado en noviembre de 2016. [Online]. Available: <https://phet.colorado.edu/>
- [47] L. University, “Lancaster particle physics package,” 2011, consultado en noviembre de 2016. [Online]. Available: <http://www.lppp.lancs.ac.uk/>
- [48] W. Christian, “Open source physics.” [Online]. Available: <http://www.compadre.org/osp/index.cfm>
- [49] C. C. Bonwell and J. A. Eison, *Active Learning; Creating Excitement in the Classroom. ASHE-ERIC Higher Education Report No. 1.* Washington, D.C.;; The George Washington University, School of Education and Human, 1991.

- [50] E. Mazur, *Peer Instruction. A User's Manual*. New Jersey: Prentice Hall, 1997.
- [51] R. R. Hake, "Interactive-engagement versus traditional methods: A six-thousand-student survey of mechanics test data for introductory physics courses," *American Journal of Physics*, vol. 66, no. 1, pp. 64–74, 1998.
- [52] D. E. Meltzer and R. K. Thornton, "Resource letter alip-1: Active-learning instruction in physics," *Am. J. Phys.*, vol. 80, no. 6, pp. 478–496, 2012.
- [53] C. H. Crouch and E. Mazur, "Peer instruction: Ten years of experience and results," *Am. J. Phys.*, vol. 69, no. 9, pp. 970–977, 2001.
- [54] PDG-LBNL, "The particle adventure," consultado en noviembre de 2016. [Online]. Available: <http://particleadventure.org/>
- [55] F. Barradas Solas, "Viaje al corazón de la materia," consultado en noviembre de 2016. [Online]. Available: <http://palmera.pntic.mec.es/~fbarrada/mapa.html>
- [56] G. Holton and D. Roller, *Fundamentos de la Física Moderna*. Reverté S. A., 1963.
- [57] H. D. Young and R. A. Freedman, *Física universitaria, con física moderna*, decimosegunda ed. PEARSON EDUCACIÓN, México, 2009, vol. 2.
- [58] E. Wichmann, *Física Cuántica*, ser. Berkeley Physics Course. Reverté S. A., 1986, vol. 4.
- [59] D. De Florian, *Una expedición al mundo subatómico*. Eudeba. Buenos Aires, 2007.
- [60] M. T. Dova, *Qué es el bosón de Higgs*. Paidós. Buenos Aires, 2015.
- [61] L. Lederman and D. Teresi, *La Partícula Divina. Si el universo es la respuesta, ¿cuál es la pregunta?* Crítica, 1996.
- [62] F. Ostermann, "Um texto para professores do ensino medio sobre partículas elementares," *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 21, no. 3, pp. 415–436, 1999.
- [63] F. A. Schaposnik, *Qué es la Física Cuántica*. Paidós. Buenos Aires., 2014.
- [64] J. S. Trefil, *De los átomos a los quarks*. Salvat Editores, 1985.
- [65] T. Leng, "Particle accelerators - outlook for the twenty-first century," *Proceedings of the Second Asian Particle Accelerator Conference*, pp. 926–933, 2001.
- [66] B. R. Martin, *Nuclear and Particle Physics*. John Wiley & Sons, 2006.

- [67] P. A. Tipler and R. A. Llewellyn, *Modern Physics*, fifth edition ed. W. H. Freeman and Company, 2008.
- [68] M. Thomson, *Modern Particle Physics*. Cambridge University Press, 2013.
- [69] W. N. Cottingham and D. A. Greenwood, *An Introduction To The Standard Model Of Particle Physics*, second edition ed. Cambridge University Press, 2007.
- [70] R. Cahn and G. Goldhaber, *The Experimental Foundations of Particle Physics*, second edition ed. Cambridge University Press, 2009.
- [71] D. Griffiths, *Introduction to Elementary Particles*, second edition ed. WILEY-VCH, 2008.
- [72] R. Frühwirth, M. Regler, R. K. Bock, H. Grote, and D. Notz, *Data Analysis Techniques for High-Energy Physics*, 2nd ed., ser. Cambridge Monographs On Particle Physics, Nuclear Physics And Cosmology, P. V. L. T. Ericson, Ed. Cambridge University Press, 2000.
- [73] S. Schael *et al.*, “Precision electroweak measurements on the Z resonance,” *Phys. Rept.*, vol. 427, pp. 257–454, 2006.

Apéndice A

Pretest

En las siguientes páginas se muestran los Cuestionarios 1A y 1B en su formato original, tal como fueron entregados a los alumnos.

Cuestionario 1A:

Generalidades sobre la física clásica y moderna

Marcá con una cruz la respuesta que consideres apropiada	V	F	ns*
1. Hay más átomos en una gota de agua que personas en el mundo.			
2. De las fuerzas fundamentales de la naturaleza, la Gravedad es la de mayor intensidad, en cualquier escala de tamaños.			
3. Si existiera una supercomputadora con un poder de cálculo suficientemente grande se podría predecir el movimiento exacto de todas las partículas del Universo.			
4. La teoría cuántica predice que es imposible medir la velocidad de una partícula subatómica con absoluta precisión.			
5. Todas las partículas conocidas poseen masa.			
6. El espín (<i>spin</i>) de una partícula está asociado al giro de dicha partícula alrededor de un eje propio.			
7. Si se dispone de energía suficiente se puede crear materia.			
8. Si se dispone de energía suficiente, una partícula podría alcanzar cualquier velocidad.			
9. Los protones, los neutrones y los electrones están compuestos por partículas aún más pequeñas.			
10. La masa de una partícula compuesta es simplemente la suma de las masas de sus componentes.			
11. Se han descubierto más de cien partículas subatómicas diferentes.			
12. Existen partículas que pueden viajar a través de miles de kilómetros sin interactuar con la materia.			
13. La antimateria es sólo ciencia ficción y no un hecho científico.			
14. Toda la materia conocida está compuesta de leptones y quarks.			
15. Los quarks nunca han sido observados libremente.			
16. Los aceleradores de partículas pueden ser usados para recrear los primeros instantes del Universo, posteriores al Big Bang.			
17. Los aceleradores de partículas pueden ser usados para el diagnóstico y tratamiento del cáncer.			

* ns: no sabe

Cuestionario 1B: Generalidades sobre la física de partículas elementales

¿Escuchaste alguna vez hablar de los quarks? ¿Qué creés que son los quarks? ¿Cuántas clases de quarks se conocen hoy en día?

¿Escuchaste alguna vez hablar de leptones? ¿Qué creés que son los leptones? ¿Cuántas clases de leptones se conocen hoy en día?

¿Escuchaste alguna vez hablar de rayos cósmicos? ¿Qué creés que son?

¿Escuchaste alguna vez hablar alguna vez de los bosones W y Z? ¿Qué sabés sobre estos bosones?

¿Escuchaste alguna vez hablar del bosón de Higgs? ¿Qué sabés sobre estos bosones?

¿Escuchaste hablar del Modelo Estándar de Partículas Elementales? ¿Podrías describirlo brevemente?

Apéndice B

Postest

En las siguientes páginas se muestran los Cuestionarios 2A y 2B en su formato original, tal como fueron entregados a los alumnos.

Cuestionario 2A:

Generalidades sobre las fuerzas fundamentales de la naturaleza

Marcá con una cruz la(s) opción(es) correspondiente(s) a cada fuerza	G	EM	F	D	Nh	NS
1. Es la responsable de los enlaces químicos.						
2. Es la más débil a nivel microscópico.						
3. Es la responsable de mantener unidos los quarks que forman a los hadrones.						
4. Su existencia se debe al intercambio de una partícula mediadora.						
5. Posee más de un tipo de mediador.						
6. Su mediador es neutro.						
7. Es la responsable de los decaimientos beta.						
8. Tiene alcance infinito.						
9. Tiene un alcance del orden del femtometro.						
10. No está contemplada dentro del Modelo Estandar.						
11. Los electrones la experimentan.						
12. Los quarks la experimentan.						
13. Los neutrinos la experimentan.						
14. Dentro del Modelo Estandar poseen un tratamiento unificado.						

G: interacción gravitacional;
EM: interacción electromagnética;
F: interacción fuerte;
D: interacción débil;
Nn: ninguna;
Ns: no lo sabe.

Cuestionario 2B:

Recorte del "Zoo" de partículas

Marcá con una cruz la(s) opción(es) correspondiente(s)	e^+	p	γ	μ^+	n	π^+	ν_μ	u	s	J/ψ	$\bar{\nu}_e$	Z^0	π^0
Es:	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Barión													
Leptón													
Mesón													
Fermión													
Bosón													
Hadrón													
Una partícula compuesta													
Posee:	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Carga de color													
Carga eléctrica													
Masa mayor a 1 GeV													
Masa menor a 1 keV o nula													
Extraneza													

e^+ positrón	p protón	γ fotón	μ^+ muón	n neutrón	π^+ pión	ν_μ neutrino- muón	u quark <i>up</i>	s quark <i>strange</i>	J/ψ J/ψ	$\bar{\nu}_e$ antineutrino- electrón	Z^0 Z^0	π^0 pión (neutro)
-------------------	---------------	-------------------	-----------------	----------------	-----------------	--------------------------------	------------------------	--------------------------------	----------------------	--	----------------	-----------------------------

Apéndice C

Encuesta

En este apéndice se muestra la encuesta realizada a los alumnos una vez concretadas las actividades. La misma la realizaron en forma virtual, completando un formulario online y en forma anónima.

Encuesta:

Elementalidad y Física de Partículas

Preguntas sobre la propuesta didáctica "Scattering: sondeando la estructura íntima de la materia"

1. ¿Creés que los temas presentados son importantes para tu formación como docente de física?

	1	2	3	4	5	
No, en absoluto	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Sí, definitivamente

2. ¿Creés que las actividades desarrolladas fueron apropiadas para tu formación?

	1	2	3	4	5	
No, en absoluto	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Sí, definitivamente

3. ¿Consieras que los temas tratados fueron acordes al nivel del grupo?

	1	2	3	4	5	
No, en absoluto	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Sí, definitivamente

4. ¿Creés que estos temas deberían ser enseñados en el nivel medio?

	1	2	3	4	5	
No, en absoluto	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Sí, definitivamente

5. ¿Creés que los temas trabajados son transferibles al aula de nivel medio?

	1	2	3	4	5	
No, en absoluto	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Sí, definitivamente

6. ¿Llevarías esta propuesta (o parte de la misma) al aula de nivel medio?

	1	2	3	4	5	
No, en absoluto	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Sí, definitivamente

7. ¿Te interesa saber más sobre Física de altas energías?

	1	2	3	4	5	
No, en absoluto	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Sí, definitivamente

Comentarios (libre):