



# ***UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA***

## ***FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS***

### ***DEPARTAMENTO de FÍSICA***

---

#### ***Trabajo de Tesis de Maestría:***

***Sobre la presencia en el aula de los conceptos de la física contemporánea en la enseñanza secundaria y una propuesta para su implementación***

---

***Tesista: Carlos Alfredo Clusella***

***Director: Dr. Carlos García Canal***

***Año: 2020***

### *AGRADECIMIENTOS*

Agradezco profundamente a la Universidad de La Plata, a su cuerpo de docentes y de no docentes, por la oportunidad que nos han dado de poder realizar esta Maestría en física Contemporánea. Gracias a mi familia, Luisa, Irene y Mauro, por la paciencia que me han tenido y las horas que me dieron para poder realizar este estudio. Gracias también a todos los que participaron contestando las preguntas que se hicieron en los cuestionarios y a los que enviaron sus trabajos. Un agradecimiento especial a Carlos Dibarbora que me alentó y me brindo toda su ayuda y apoyo, revisando y sugiriendo cambios que la mejoraron, fue invaluable su colaboración. Y por último, muchas gracias a Carlos García Canal que me guió en la realización de esta tesis recibíendome cuantas veces fue necesaria para revisar temas, dándome sugerencias y aportándome ideas, muchas gracias, porque con infinita paciencia y poniendo toda su calidez humana tan grande como su calidad docente, pude terminar este trabajo.

### *PRÓLOGO*

Desgraciadamente, la teoría de la relatividad es muy poco conocida fuera del círculo estrecho de los especialistas. Y sucede así porque la citada teoría pertenece al grupo de las teorías de elevado grado de dificultad. Y no se puede exigir de uno que no sea físico el manejo natural del aparato matemático de esta teoría, por cierto, bastante complicado. A pesar de todo esto, nosotros creemos que las nociones principales y las ideas de la teoría de la relatividad pueden ser expuesta de manera accesible para ser comprendidas por un círculo de lectores bastante amplio.

L. Landau , Y. Rumer

(Notas al lector del libro “Que es la teoría de la relatividad” Ed. Mir, 1974)

He llegado a la conclusión de que lo que tengo que decir no puede transmitirse razonablemente sin cierta cantidad de notación matemática y la exploración de genuinos conceptos matemáticos. El conocimiento que tenemos de los principios que realmente subyacen en el comportamiento de nuestro mundo físico depende, de hecho, de una apreciación de sus matemáticas

Roger Penrose

(Prefacio de “El camino a la realidad” Ed. Debate, 2004)

Lo que hice un día fue decir que tal vez exista un libro para explicar la física cuántica para niños, y entonces pues (seguro que se puede hacer) de hecho lo encontré,...uno puede encontrar un libro *La física cuántica de Harry Potter* y está diseñado para niños. Lo que quiero decir es que no debe de ser tan difícil la física cuántica.

*Ignacio Cirac*

(Conferencia “Así cambiara el mundo la computación cuántica” Físico e Investigador español director del Inst. Max Planck, 2018)

Tenemos tres visiones sobre la transmisión de conocimiento científico, la primera es mesurada y cuidadosa en cuanto a las posibilidades de transmitir conocimiento científico al público en general (Landau-Rumer), la segunda es más intransigente sobre el alcance de los contenidos de matemáticas que debe tener un texto para una transferencia de conocimientos válida (Penrose) y por último, la tercera, amplía el espectro de público al que uno puede dirigirse proponiendo que puede ser un tema tanto para niños como para adultos (Cirac).

En la docencia existe consenso en cuanto a transmitir los conocimientos producidos por los grandes centros de investigación y la academia, pero la cuestión es cómo y cuándo hacerlo.

Probablemente existan dificultades de distinta índole que no nos permitan hacer esta tarea, o preconceptos sobre los alumnos, o que el contenido a enseñar no nos motive a hacerlo o no estemos preparados adecuadamente. Este trabajo pretende indagar sobre estas situaciones.

Es necesario hacer aquí una aclaración: no es nuestra tarea docente hacer divulgación científica. Somos formadores de ciudadanos que integrarán una sociedad y es en este sentido que

los conocimientos y valores que les propongamos contribuirán a formar su modo social y a la vez, singular, de mirar y comprender el mundo en el que viven.

Estos valores serán los del conjunto de la futura sociedad. La pregunta que hacemos en este trabajo es, cómo presentamos (si es que lo hacemos) los conocimientos de física contemporánea en el aula, de manera tal que contribuyan a alcanzar este objetivo.

En el artículo “El mundo y la letra. Una lectura crítica del entorno”, el pedagogo brasileño Paulo Freire de la Universidad de Recife, observa que “*La lectura del universo debe preceder a la lectura de la palabra y la lectura de esta implica la continuidad de la lectura de aquel*”. Freire establece un puente entre la realidad cotidiana y la escuela a través del proceso de aprendizaje de la lectura tanto de una como de otra. Al respecto nos interesa formar personas que enriquezcan su lectura del mundo, desde el más cercano al más lejano, con herramientas que la escuela les brinde. En nuestro caso, los elementos del pensamiento científico a través de la enseñanza de la física y en particular de los conocimientos generados últimamente en esta disciplina.

La realidad de los niños y adolescentes actuales está atravesada por la tecnología de última generación basada en las teorías de la física contemporánea y deberían estos conceptos ser parte integrante de sus “*cristales con los que ven el mundo*” ya que su mundo pasa en gran medida por allí.

## **RESUMEN**

Un resumen del objetivo de esa tesis podría hacerse a modo de preguntas tales como, “*¿qué es lo estamos enseñando cuando enseñamos física contemporánea?, ¿cómo lo estamos enseñando?, ¿realmente comprendemos lo que estamos enseñando?, ¿tenemos claro el objetivo de nuestra enseñanza?*”.

Contestar estas preguntas no es un asunto fácil, por ello se diseñó un plan de trabajo para esta tesis que parte de la confección de un cuestionario dirigido a los docentes de las ciencias naturales y en particular a los de física, a través de internet, con la finalidad de conocer lo que cada uno de ellos piensa en relación a la enseñanza de la física contemporánea, no solo docentes sino toda aquella persona encargada de los cursos de física (no siempre son docentes, los hay ingenieros, licenciados en física o matemáticas,...etcétera, sin la adecuada formación pedagógica).

Se les pidió a los docentes, a través del mismo medio, si podían enviar un tema de física contemporánea que hayan diseñado o que piensen trabajar con sus alumnos en el aula con el fin de evaluar el nivel y profundidad con que se presentan en el aula los tópicos de la física contemporánea.

Las preguntas fueron anónimas, en tanto que los trabajos que enviaron los docentes se recibieron con el nombre de su autor. Todo el material recolectado, junto con los antecedentes que se citan, permitieron arribar a las conclusiones que más adelante se detallan. La trasposición didáctica de temas de física contemporánea que se incluyen en el cuerpo del trabajo, fue realizada bajo la vigilancia epistemológica de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP), con el objetivo de

acercar a los alumnos de la enseñanza media, los temas de la física contemporánea sin utilizar las herramientas matemáticas propias para estos temas y sin perder veracidad en la transmisión.

Finalmente, se realiza una propuesta: La de crear un sitio web con la intención de que en un futuro, cada docente pueda subir fichas de sus producciones sobre temas acotados de física contemporánea, los cuales pueden incluir propuestas en clase o en el hogar, la de realización de experimentos o investigaciones, ...etcétera.

Estos aportes formarán un listado que cualquier docente podrá utilizar para estas materias, organizándolos en forma de estructura de curso o seminario, luego el docente podrá subir el resultado de su experiencia, de esta manera se podrá disponer de material y de experiencias didácticas para trabajar que irá progresando con el tiempo.

Este sitio además, podrá ser visitado regularmente por los docentes de la Maestría en Física Contemporánea del Departamento de Física de la Universidad Nacional de La Plata a fin de garantizar que el tratamiento dado al tema, los ejemplos y analogías utilizadas y en general todo su contenido sea el correcto.

### **MARCO TEÓRICO**

#### *Entendiendo el proceso de enseñanza–aprendizaje en la ciencia.*

El conocimiento dentro del aula que pretendemos relevar es el que define el profesor Yves Chevallard como “saber a enseñar” y que deviene del conocimiento generado en los centros de investigación o académicos y que llama “saber sabio”.

Evidentemente, en las aulas del colegio secundario no debemos abordar los temas científicos con la extensión y profundidad con que se hace en la universidad, debe pasar por un

proceso de transformación que Chevallard llama “transposición didáctica” (1997) que tiene la difícil tarea de tomar el conocimiento generado por los científicos y transformarlo en un conocimiento accesible para los estudiantes de la educación secundaria.

Esta transformación ocurre dos veces, la primera cuando el docente toma el conocimiento científico y lo transforma en conocimiento a ser enseñado, y la segunda cuando el alumno recibe este saber a ser enseñado y lo asimila como conocimiento aprendido.

Según el psicólogo y pedagogo David Ausubel, el conocimiento aprendido por el alumno debe producir en él un “aprendizaje significativo”. Esto es posible si se tienen en cuenta sus conocimientos previos, en relación a la física contemporánea. Veamos algunos aportes.

Por ejemplo, el trabajo “Algunas ideas de los jóvenes sobre la relatividad y el universo” en “Problemática de la enseñanza” (2016) de Beatriz Follari, Elena Gutiérrez, María Perrotta, Ana María De La Fuente y Vicente Capuano, en donde dicen *“...A través de una encuesta realizada a alumnos de 4° y 5° año de la actual escuela media de todo el país, se indagó sobre sus ideas acerca de conceptos relacionados con el Universo y la Relatividad. Del análisis de los resultados obtenidos se concluye, entre otras cosas, que conocen la ecuación  $E = mc^2$  aunque no interpretan su significado; que creen que no puede superarse la velocidad de la luz ni volver al pasado y que el Universo comenzó hace mucho tiempo y no tiene límites. Estas ideas han sido adquiridas, en su mayor parte, del contexto social y deben ser tenidas en cuenta para el diseño de acciones educativas.”*

También podemos tomar como fuente de conocimientos previos posibles, al cine. Esta información la expone Gabriel Guillermo Attilio en su tesis de maestría del año 2016 cuyo título

es *Incorporación del cine en la transmisión de temas de la física contemporánea* en la Universidad Nacional de La Plata (UNLP). Allí, concluye que a través del cine les llega información científica a los alumnos que es con la que cuentan a la hora de recibir del docente el saber a ser enseñado.

Dada la difícil tarea que se le adjudica a la transposición didáctica y los riesgos de error en cuanto a la interpretación del objeto a transformar, se debe realizar de manera constante una vigilancia epistemológica de los contenidos que se enseñarán en el aula.

Esta vigilancia debe ser constante para poder cumplir con el cometido de transformar los conocimientos científicos en conocimientos científicos y escolares.

Debe tenerse en cuenta a la hora de hacer vigilancia epistemológica de los conocimientos a ser enseñados, que existen obstáculos epistemológicos no de orden práctico como podría ser la obtención o recolección de datos sino en la interpretación que se hace de ellos y en cómo los hemos entendido para hacer la trasposición didáctica necesaria.

Dice Paulo Freire en su libro *Pedagogía de la autonomía*, en el punto 4 del capítulo 1. No hay docencia sin *discencia*, que “Enseñar exige crítica”, que la curiosidad es la base de la búsqueda del conocimiento, que en principio es una curiosidad ingenua que a medida que se vuelve metódica y se sistematiza cambia a una curiosidad que llama epistemológica. Esta curiosidad ingenua es lo que nos lleva a pensar en el sentido común, que luego la curiosidad epistemológica convierte en relativo (principio de incerteza o teoría de la relatividad, que se presentan como en aparente contrasentido con lo ya conocido, por ejemplo).

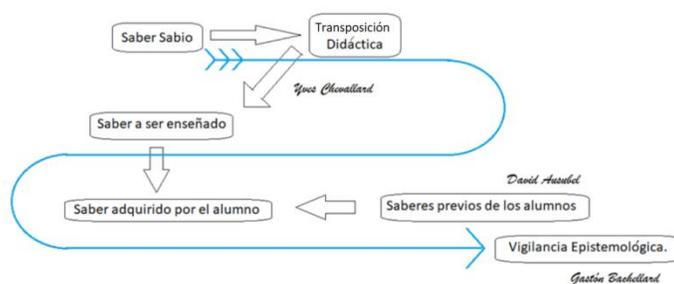
En un artículo la doctora Lidia Rodríguez dice,

*No hay en el pensamiento de Freire una desvalorización de los contenidos. Lo que hay es una centralidad del problema del sentido de los conocimientos para el sujeto que aprende. Porque el*

*conocimiento siempre es situado, su valor depende de la situación y por lo tanto no es neutro, está en función de algún proyecto de futuro, de algún régimen de producción de verdad. (Actualidad del pensamiento freirano, Revista Tram[p]as de la comunicación y la cultura N° 75 UNLP 2013)*

En este sentido, la transmisión del conocimiento como legado cultural, implica para las prácticas de enseñanza, una determinada dirección fijada por el propósito pedagógico respecto del modo en que los futuros ciudadanos podrán hacer una lectura del mundo situada (en el sentido del tiempo y espacio que les toca vivir, con sus circunstancias particulares), basada en el aprendizaje y ciertos modos constructivos de acceder al mismo.

El siguiente cuadro nos brinda un marco simplificado de cómo entender el proceso de transposición



A partir de estos conceptos trabajamos en lo que sigue.

### *ANTECEDENTES*

Los conceptos que resumimos más adelante, aportaron para la elaboración de este trabajo, por tratar temas afines y fueron considerados para la realización de las propuestas y conclusiones.

- 1) **Análisis de aspectos relevantes para el abordaje de la Teoría de la Relatividad Especial en los últimos años de la enseñanza media desde una perspectiva contextualizada histórica y epistemológicamente**, Irene Arriasecq - Ileana M. Greca (NIECyT, Facultad de Cs. Exactas, UNCPBA. Tandil, Argentina. In-Praxis, Comunidades en Práctica. Burgos, España 2005).

Del presente trabajo citaremos algunos fragmentos que son de interés para esta tesis,

“...el 87 % de los encuestados (docentes del nivel medio) no han abordado el tema en el polimodal, aun considerándolo relevante para ser tratado en este nivel.”

“...pareciera que los docentes carecen de una comprensión profunda de los conceptos relevantes para interpretar correctamente la Teoría Especial de la Relatividad (TER) y sus implicancias...”

“por otra parte el libro de texto parece ser el principal recurso utilizado para la preparación de clases (...) fundamentalmente los de nivel polimodal, y son esos mismos textos los

recomendados a los alumnos. Es significativo que los docentes manifiesten utilizar para la preparación de sus clases libros del mismo nivel en el que se desempeñan, no pareciendo tener la costumbre de buscar textos de un nivel superior. Este punto es importante dado que si los docentes en su formación de grado no han tenido oportunidad de analizar en profundidad conceptos de la TER difícilmente puedan aprenderlos en los libros que manifiestan consultar...”

“Esto muestra la necesidad de realizar estudios críticos de los libros de texto (...) ya que la manera en que se lo aborde puede condicionar fuertemente los resultados que logren los alumnos respecto del aprendizaje (...) Al parecer, los docentes que deban tratar este tema por primera vez recurrirán, como lo han manifestado en el estudio antes referido, justamente a esos textos como guía para sus clases y, teniendo en cuenta que en muchos casos el propio docente no ha tenido la oportunidad de reflexionar profundamente acerca de cuáles son los conceptos relevantes para comprender la teoría, es probable que  *siga*  el esquema presentado en el o los textos que seleccione para preparar su clase sin una reelaboración del material de acuerdo con criterios propios.”

“... el tratamiento de la teoría especial de la relatividad en el ciclo medio es un tema recurrente en la literatura en enseñanza de las ciencias de los últimos 20 años. Sin embargo, son aún pocos los trabajos que presentan estrategias concretas para su implementación.”

Se describe un estudio de caso realizado en un colegio privado de Tandil, con 18 alumnos, en el cual se propone impartir un curso de teoría especial de la relatividad (TER) llevado adelante por una docente que no tuvo formación en TER. Esta desarrolló un curso de ocho clases de dos horas, y se registró y observó cada una de las clases, recopilando además las producciones de los alumnos, luego se le hizo una entrevista a la profesora y se formularon las siguientes conclusiones:

“El rol del docente puede ser desglosado en dos subcategorías: la planificación del docente para abordar el tema TER (selección de contenidos que realiza y decisiones que toma basadas en materiales ya elaborados por otros, como por ejemplo textos de uso habitual) y la intervención del docente en el desarrollo de las clases.”

“..., la docente remarca que...*la genialidad de Einstein fue postular su teoría sin tener ninguna evidencia experimental...* este tipo de abordaje, refuerza la creencia de que los conocimientos científicos comienzan con la observación y que las grandes teorías son el producto de una mente brillante que no tiene en cuenta el trabajo de otros científicos. Por otra parte, no se aclaran los conceptos de *postulado* y *teoría*, que se los considera, erróneamente, como sinónimo de *hipótesis*”.

“Referido a esta cuestión, es importante aclarar que en la entrevista realizada a la docente manifiesta explícitamente que *...nunca tuve formación en temas de historia de*

*la ciencia y epistemología en la carrera de grado ni he realizado cursos vinculados con esos temas luego de recibirme”.*

“Realiza (la docente) un breve resumen de *suma y resta* de velocidades desde el punto de vista clásico para analizar que en la TER no se hace de la misma forma. Lo más destacado en este aspecto es que en ningún momento se hizo referencia explícita al concepto de *sistema de referencia*. Creemos que esto podría interpretarse de dos maneras: que la docente asume que los alumnos manejan el concepto en profundidad y no es necesario revisarlo o bien que realmente ella no lo concibe como un concepto central para abordar la TER.”

“No plantea discusiones en torno al concepto de *observador* y su resignificación en el contexto de la TER [...]”

“Recorre frecuentemente al uso de *experimentos mentales*, sin embargo, no aclara suficientemente por qué es un experimento mental,...”

“De manera similar a lo señalado anteriormente, analiza la denominada *paradoja de los gemelos*, se realizan algunos cálculos estimativos, pero no se explica en qué consiste una paradoja y cómo se resuelve.”

2) **La enseñanza de la física moderna, en debate en Latinoamérica** Jorge Vicario y Fabián L. Venier. Los autores son docentes de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Río Cuarto, miembros del Programa de Investigaciones Interdisciplinarias sobre el Aprendizaje de las Ciencias (PIIAC) (2010).

“Se analizan distintas propuestas para introducir la enseñanza de la física moderna en la escuela media y para mejorar su aprendizaje en la universidad, efectuadas por docentes e investigadores en enseñanza de la física.”

“En los últimos congresos internacionales de educación en física se viene discutiendo sobre la mejor manera de desarrollar conceptos de física cuántica y relatividad general en las escuelas de nivel medio y en los primeros años de la universidad.”

Por su parte, el profesor Guillermo Pineda, del Instituto de Física de la Universidad de Antioquia (Colombia) se refirió a, el por qué y cómo de la enseñanza de la física en la educación media, señaló al respecto que resulta incorrecto decir que no se puede enseñar física cuántica en la escuela media por las dificultades matemáticas que encierra su formalización,

" estas no son mayores que las necesarias para enseñar la mecánica newtoniana, cuya inclusión en los planes de estudio ya nadie discute”

Afirmó y consideró sumamente importante que la escuela suplante o complemente sabiamente a la tarea informativa que sobre estos temas, realizan los medios de comunicación social, no siempre bien informados científicamente.”

“... parece existir un consenso entre los investigadores en enseñanza de las ciencias, acerca de la necesidad de introducir tópicos de física moderna o contemporánea en el nivel medio. Sin embargo, ese consenso no llega aún a las comunidades docentes, al menos en la Argentina, donde el tema ha estado prácticamente ausente en los últimos eventos sobre educación en física, a pesar de que en algunos distritos educativos como en la provincia de Córdoba, algunos tópicos de esta temática, como la relatividad general, están incluidos en la currícula (...) el ministerio de educación cordobés (1999) propone que se traten los principios de la relatividad. Al parecer, el enciclopedismo que persiste en el sistema educativo argentino, el escaso tiempo disponible en materia de horas cátedra (tienen apenas un módulo de 80 minutos por semana) y sus propias limitaciones en cuanto a conocimientos sobre el tema, hacen que los docentes no incluyan conceptos de física moderna en sus planificaciones.

Por otra parte, la preocupación que se observa por las condiciones de acceso de sus alumnos a la universidad, indica que los docentes prefieren la formación propedéutica a la formación general, dado que en la balanza se pone en juego la continuación de estudios superiores. Esto les impone la necesidad de darles una formación básica en mecánica clásica que permita el análisis de conceptos como espacio, tiempo y masa. También incidirían

negativamente la falta de actividades de capacitación y el escaso material existente para la implementación de la física moderna en el nivel medio.”

“De todas maneras, el debate planteado en las presentaciones mencionadas en este artículo ha generado un marcado interés en el grupo por realizar alguna indagación sobre las percepciones de docentes y alumnos del nivel medio y del ingreso a la universidad, acerca de la importancia que podría tener la enseñanza de la física moderna en el nivel medio.”

- 3) **Física contemporánea en la escuela secundaria: Una experiencia en el aula involucrando formación de profesores** Fernanda Ostermann y Marco Antonio Moreira - Instituto de Física. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS Brasil.

“En los Estados Unidos y, probablemente, en un nivel internacional, la preocupación por la enseñanza de la Física Moderna y Contemporánea (FMC) en las escuelas y en los cursos básicos de la universidad ha empezado o se ha intensificado con la Conferencia sobre la enseñanza de la física moderna, realizada en el Fermilab, en Batavia (Illinois), en la cual cerca de cien profesores interactuaron con una decena o más de físicos norteamericanos. El objetivo de la conferencia era el de promover la enseñanza de tópicos de investigación en física, en particular física de partículas y cosmología, en las escuelas secundarias y en las asignaturas de física general en las universidades (Aubrecht, 1986).”

“La FMC es considerada difícil y abstracta; no obstante, las investigaciones en enseñanza de la física han mostrado que la física clásica también es difícil y abstracta para los alumnos, que presentan serias dificultades conceptuales para comprenderla.”

“Por otro lado, a pesar de todos esos argumentos, no hay mucho en la literatura con respecto a cómo enfocar los temas modernos y contemporáneos en la escuela secundaria.”

4) **Una propuesta sobre enseñanza de la relatividad en el bachillerato como motivación para el aprendizaje de la física**, Héctor Pérez y Jordi Solbes - investigación didáctica

Las investigaciones en didáctica de las ciencias [...] ya han señalado, como principales causas de la actitud desfavorable y del desinterés de los estudiantes hacia la ciencia y su aprendizaje, la enseñanza de una ciencia descontextualizada de la sociedad y del entorno, poco útil y sin temas de actualidad, el método de enseñanza del profesor, al que califican de aburrido y poco participativo, la escasez de prácticas de laboratorio o de campo y la falta de confianza en el éxito cuando son evaluados.

5) ***“Misconceptions, knowledge, and attitudes of secondary school students towards the phenomenon of radioactivity”*** A.I. Morales - P. Tuzón

“Hemos llevado a cabo el primer estudio sistemático sobre conceptos erróneos, conocimientos y actitudes de estudiantes en centros educativos de la Comunidad Valenciana (España).

El trabajo, realizado durante la primavera de 2018, ha verificado la mayoría de los conceptos erróneos reportados en la literatura científica solo ha habido una interpretación errónea previa no identificada en el presente trabajo, y es la siguiente “...*la radiación puede ser usada para detectar sentimientos...*”.

“Por otro lado, el conocimiento que los estudiantes tienen sobre los aspectos básicos de la radiactividad es claramente insuficiente para establecer adecuadamente las relaciones entre Ciencia, Tecnología, Sociedad y Medio Ambiente (STSE) de la Ciencia Nuclear (NS). Este aspecto parece fundamental para desarrollar la faceta emocional de la radiactividad, que muestra una clara evolución desde una visión catastrófica radical (...) a una más moderada cuya perspectiva este basada en el pensamiento crítico.”

“En cuanto a la dimensión actitudinal, hemos verificado un fuerte interés hacia las aplicaciones (prácticas) de la ciencia nuclear, con un abrumador 98 % de estudiantes que desean aprender nuevos aspectos.”

“Es importante destacar que los resultados muestran la necesidad de desarrollar nuevas estrategias de enseñanza para abordar las deficiencias encontradas aquí. Tales procedimientos deben conducir, por ejemplo, a un aprendizaje significativo de los conceptos de la ciencia nuclear con el objeto de promover el pensamiento crítico y las habilidades necesarias para discutir y tomar decisiones sobre los aspectos más controvertidos relativos a la ciencia, tecnología, sociedad y medio ambiente de la ciencia nuclear.”

## *FÍSICA CONTEMPORÁNEA*

### *Introducción*

En este capítulo haremos un resumen de algunos de los temas que se consideran los que han ido conduciendo a la física a replantear sus bases. El objetivo fue lograr la transposición didáctica adecuada sin perder veracidad en lo enunciado. Se pretendió mostrar que cualquier tema de los que integran la física contemporánea puede ser ofrecido al estudiante de manera asequible.

### *Resumen de los temas*

Llamamos física contemporánea a los temas de física que se desarrollaron a partir de los comienzos del siglo XX en adelante. Esta no es una definición precisa y es posible que se encuentren otras definiciones pero existe un amplio consenso en que la nueva forma de hacer y de estudiar física nace a partir de la solución que Max Planck da al problema planteado a fines del 1800, la llamada: *catástrofe ultravioleta*.

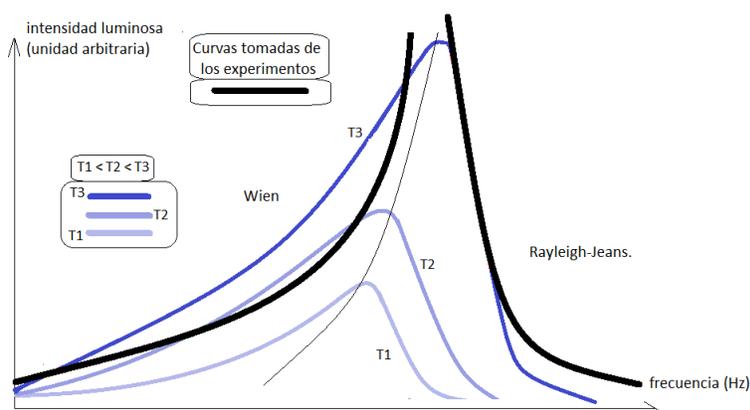
Terminaba el siglo XIX con muchos éxitos conquistados, tantos que se dice que Lord Kelvin llegó a afirmar en un encuentro de la Asociación Británica para el Avance de la Ciencia, que "...ya no queda nada nuevo por descubrir en física. Todo lo que queda es hacer más y mejores medidas...", pero el siglo terminaba y dejaba planteado un serio problema.

La radiación que emiten los cuerpos, en particular la luz, puede ser producida por ellos mismos o puede ser reflejada por otra fuente de luz, como lo que ocurre cuando vemos en día un

hermoso un paisaje pero de noche no vemos absolutamente nada. Un cuerpo que emite luz lo hace debido a la agitación térmica de sus átomos y moléculas, esta agitación es lo que medimos como temperatura del cuerpo. Los experimentos demuestran que un cuerpo que es calentado, a un determinado valor de temperatura comienza a emitir luz (visible) y a medida que sigue aumentando su temperatura esta luz emitida disminuye su longitud de onda (o aumenta su frecuencia, es lo mismo), pasando del rojo al azul-violeta.

La intensidad del brillo de un cuerpo como este, va desde valores muy bajos hasta un valor máximo y desde allí es donde comienza a decrecer. Esto era precisamente lo que no podía explicarse, veamos un gráfico:

Experimentalmente se verificaba que un material calentado a temperatura  $T_1$



irradiaba su energía describiendo una curva, aumentando a  $T_2$  describía otra curva pero con el máximo de intensidad corrido a una frecuencia mayor y lo mismo para  $T_3$ , pero siempre luego del máximo alcanzado la intensidad bajaba lo que contradecía a las teorías del momento.

A bajas frecuencias la propuesta de Wilhem Wien sobre la ley de radiación (1890) cumplía con lo visto en forma experimental y a altas frecuencias fallaba, pero la propuesta de Raleygh-Jeans sobre el mismo tema (1900) podía explicarlo a altas frecuencias y fallaba a bajas frecuencias.

No existía una sola ley o fórmula que se ajustase a lo visto experimentalmente hasta la llegada de Max Planck (1900), quien propuso que la energía irradiada por un cuerpo caliente estaba formada por pequeñas unidades que llamó *cuantos* cada frecuencia tenía un valor de energía que debía alcanzar para que el cuanto se pueda irradiar, esto es, los cuantos de frecuencia bajas tienen menor energía que los de frecuencias altas y a medida que la frecuencia se eleva los paquetes de energía para esa frecuencia deben ser mayores, debido a eso es que a partir de una determinada temperatura la intensidad disminuía.

Esta fue la primera aparición de los cuantos en la escena de la física y a pesar de que el mismo Planck creía que su propuesta era solo un artilugio matemático que funcionaba pero que estaba destinado a ser superado por posteriores investigaciones, comenzó a dar frutos en otras áreas, como la explicación de Albert Einstein y el efecto fotoeléctrico que le valió el Premio Nobel en 1921.

La importancia de la explicación del efecto fotoeléctrico no estriba solamente en la descripción del fenómeno, sino que le dio a los cuantos la cualidad de transmitir la energía que se irradiaba de los cuerpos a través del espacio viajando hasta el material, y que arrancaba de él sus electrones. Las implicancias fueron enormes pues se sabía de la naturaleza ondulatoria de la luz pero ahora también se correspondía con otro tipo de naturaleza prevista en tiempos de Newton: la corpuscular. Se estaba tendiendo la alfombra para que hiciera su ingreso una teoría que relacionaría el comportamiento ondulatorio y el de la partícula (corpuscular).

Luego se incorporaron las investigaciones de Louis de Broglie y la mecánica ondulatoria, donde propone interpretar a las partículas materiales como onda y a las ondas como partículas, que

junto con los experimentos como el de la difracción de electrones en cristales, fenómeno similar al comportamiento de la luz cuando pasa por una doble rendija donde se verifica la interferencia y el principio de incerteza de Heisenberg, que imposibilita a un observador precisar la posición y cantidad de movimiento de una partícula de forma simultánea y que como una de sus consecuencias es la imposición de no poder hablar más de trayectorias sino de probabilidades de que una partícula pueda encontrarse en una región del espacio, y junto a los aportes de la ecuación de Schrödinger y de Heisenberg que permiten describir un átomo...etcétera. Es toda esta catarata de formas nuevas de ver el mundo de las partículas donde van apareciendo partículas que constituyen a otras que creíamos elementales, lo que denominamos mecánica cuántica y que luego veremos más en detalle.

Casi a la par en septiembre de 1905, Albert Einstein publica un artículo llamado “Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento” en *Annalen der Physik*, donde utiliza las ecuaciones de transformación de Lorentz, enuncia el principio que dice que las leyes físicas son las mismas y deben cumplirse para cualquier observador de cualquier sistema de referencia inercial, de la velocidad de luz como una constante para todos los observadores y prescinde además del éter que era el medio donde se propagaba la luz y tenía enormes dificultades para ser definido. En noviembre de ese mismo año publica “¿Depende la inercia de un cuerpo de su contenido energético?” en la misma revista científica, donde propone que cuando un cuerpo disminuye su energía también disminuye su masa, y que un cuerpo además de tener energía cinética y potencial, tiene energía en reposo por el solo hecho de tener materia, lo que llevó a la ecuación “ $E = m \cdot c^2$ ”, a esta teoría se la llamó *Teoría de la Relatividad* el nombre se lo debemos a Max Planck.

En 1916, Albert Einstein busca en sus trabajos integrar la gravedad a la nueva teoría de la mecánica y publica *Teoría de la Relatividad General*, la cual da respuesta a la anomalía en la trayectoria de mercurio que no podía explicar la mecánica de Newton, la gravedad como una deformación del espacio y no como una acción instantánea sobre los cuerpos con los que interactúa...etcétera.

Crece así dos teorías, que hasta el momento no podían unirse en una sola debido a que cuando las partículas tomaban velocidades relativistas (cercanas a la de la luz), la mecánica cuántica no daba respuestas satisfactorias y además no se describía en lo más mínimo a la gravedad. Entonces tenemos por ahora,

- 1) La Mecánica Cuántica
- 2) La Mecánica Relativista

En 1926, Paul Dirac unía los modelos propuestos por Edwin Schrödinger y Werner Heisenberg en un único modelo matemático para describir un electrón relativista.

En 1928, su trabajo concluyó en la llamada ecuación de Dirac, una ecuación que describe al electrón y que preanuncia la existencia de la antimateria, observada por Carl Anderson en 1932.

Por este descubrimiento Dirac gana en 1933 el Premio Nobel y lo comparte con Erwin Schrödinger. Sus trabajos contribuyeron al desarrollo de la electrodinámica cuántica, la cual cuantifica el campo electromagnético.

Llegamos así a la “Teoría Cuántica de Campos”, que aplica los principios de la mecánica cuántica a la teoría de campos, en la cual la partícula toma otra acepción a la concepción clásica de partícula y es la de ser una perturbación dentro de un campo en el cual la partícula se manifiesta.

La interacción de los distintos campos, como puede ser el de la interacción de fotones y electrones, se hace necesariamente bajo ciertas reglas basadas en consideraciones de simetría. Se encontraron dificultades en este planteamiento donde resultaban magnitudes que tendían a infinito, que fue resuelta por una propuesta de re-normalización de la teoría. Consiste en que ciertos valores deben ser obtenidos experimentalmente y a partir de allí ser incluidos en el formalismo.

Las teorías cuánticas de campos que describen las interacciones fundamentales son invariantes de gauge, esto es que ciertas transformaciones realizadas a los objetos matemáticos, no producen variaciones en las magnitudes observadas.

Es por eso que cobran mucha relevancia estas simetrías de gauge. Hoy entendemos cada una de las interacciones fundamentales a partir de las condiciones que imponen las simetrías de gauge para validarlas.

El modelo estándar de partículas es una teoría desarrollada a comienzos de los años 70 en el siglo XX. Es una “Teoría Cuántica de Campos” basada en simetrías de gauge, y describe las interacciones de las partículas elementales. Se la sigue llamando modelo si bien se han confirmado casi en su totalidad, pero no en todo. Es una teoría válida a las escalas de energía de los experimentos actuales.

Podemos decir resumidamente, entonces, que cuando hablamos de física contemporánea, hablamos del desarrollo que experimento la física a partir de comienzos del siglo XX, con el surgimiento de un nuevo modo de interpretar los fenómenos naturales aun cuando choquen con nuestro sentido común, y por eso probablemente sea difícil asimilarlos. A continuación profundizaremos estos temas.

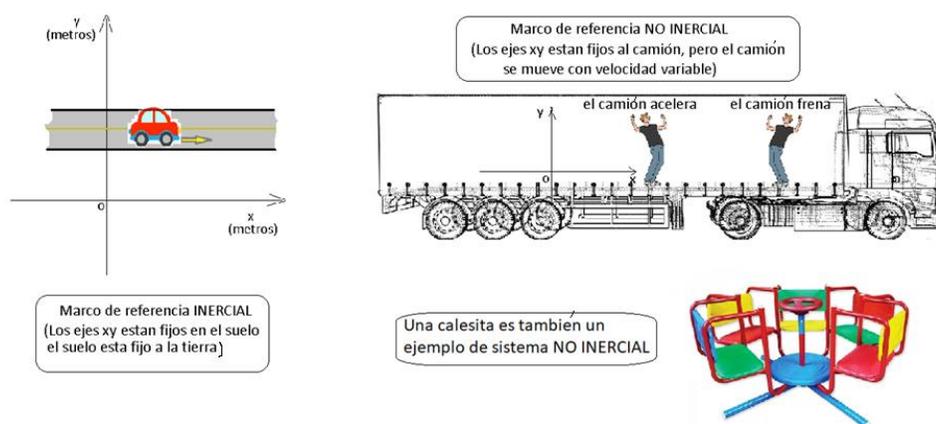
***Marco teórico de los contenidos de la física contemporánea  
(trasposición didáctica de los temas posibles a trabajar en el aula)***

***Relatividad***

*Introducción*

Para comenzar con el tema recordemos a qué llamábamos *marco de referencia inercial*.

Un *marco de referencia* (espacial) es un sistema acordado previamente al cual nos remitimos para ubicar un objeto sin ambigüedad en el espacio. Si pedimos además que este sea *inercial* el sistema de referencia debe cumplir con las leyes de Newton y Galileo.



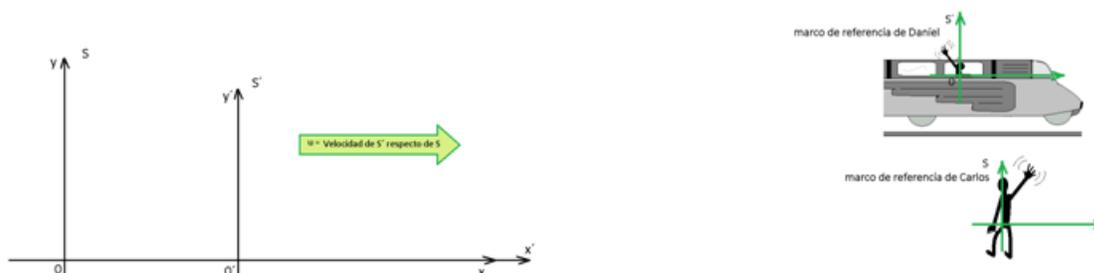
Si tengo dos sistemas de los cuales uno de ellos sabemos que se mueve con velocidad constante y del otro no sabemos nada, pero estando en cada uno de ellos (haciendo experimentos físicos, por ejemplo), no somos capaces de distinguir cual es el que se mueve y cual no, entonces

esos dos marcos de referencia son *inerciales* y podemos afirmar también que estos marcos de referencia están en reposo o se mueven con velocidad constante.

### *Teoría de la relatividad de Galileo*

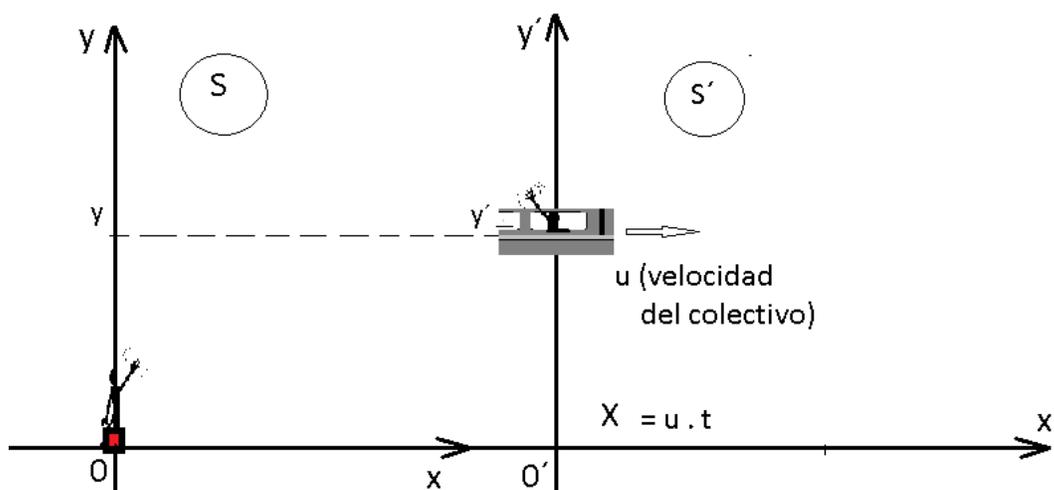
Parado en el andén de una terminal de colectivos, Carlos despide a su amigo Daniel. Podemos imaginar sobre Carlos y sobre Daniel unos sistemas de referencia que llamaremos  $S$  y  $S'$  respectivamente, ambos serán marcos de referencia inerciales.

Como el movimiento se da sobre el eje  $x$ , coloquemos los marcos de referencia como indica la figura,

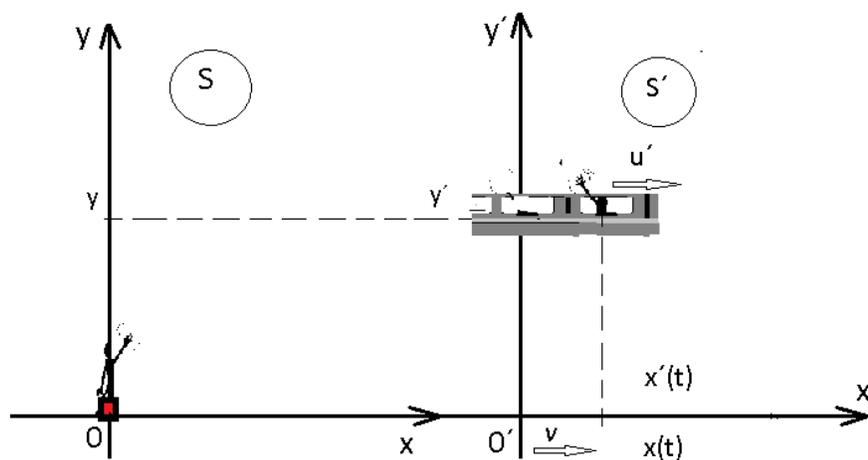


Tanto Daniel, que está en el colectivo, como Carlos que está parado en el andén acuerdan que el que se mueve es el colectivo y que la terminal con sus postes de luz, su gente esperando sentada, sus oficinas y el resto de la escena, esta quieta.

La situación puede graficarse de la siguiente manera,



y considerando que Daniel se mueva con velocidad constante dentro del colectivo ( $u'$ ),



Finalmente, esta última situación puede expresarse matemáticamente como,

Sistema S	
$x(t) = u \cdot t + u' \cdot t$	Donde $u \cdot t$ es la posición del sistema de referencia S', $u'$ es la velocidad de Daniel y $t$ el tiempo medido por Carlos en S.
$y(t) = y'$	Donde $y'$ es la distancia del colectivo al andén.

Sistema S'	
$x'(t) = x(t) - u \cdot t$	Donde $x(t)$ es la posición de Daniel respecto de S, $u$ es la velocidad origen de coordenadas de S' y $t$ el tiempo medido por Daniel en S'.
$y'(t) = y'$	Donde $y$ es la distancia del colectivo al andén.

Calculemos la velocidad (solo para el sistema S) derivando respecto del tiempo,

$$\frac{dx(t)}{dt} = \frac{d(x'(t) + u \cdot t)}{dt}$$

$V_x = V'_x + u$
------------------

Dice que la velocidad con que Carlos ve a Daniel es la velocidad del colectivo sumada a la de Daniel dentro del colectivo. Las velocidades se suman, simplemente.

### *Postulados de la Teoría de la Relatividad de Einstein*

Esta teoría está basada en dos postulados,

<p>1° “Las formas de las leyes de la física son las mismas cualquiera sea el marco de referencia inercial que se elija”</p>
---

<p><i>Comentario: Si las leyes no fuesen las mismas y dependieran del sistema de referencia elegido, esto permitiría poder distinguir entre dos sistemas de referencias inerciales.</i></p>
---

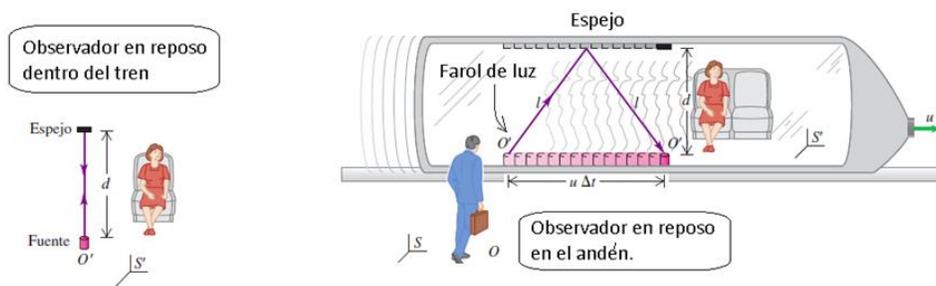
<p>2° “La rapidez de la luz en el vacío es la misma para todos los sistemas inerciales, estén estos en movimiento o no”</p>
---

<p><i>Comentario: Este postulado plantea un problema en la conclusión que sacamos de la relatividad de Galileo. Si tenemos una nave espacial que viaja a una velocidad <math>v'</math>, próxima a <math>C</math> (velocidad de la luz) y enciende un faro frontal, un observador en la nave verá moverse a la luz del faro a velocidad <math>C</math> y uno en tierra verá moverse a la luz del faro con velocidad igual a <math>C</math>... o sea ¿ <math>v' + C = C</math> ?, ¿es posible?, lo analizaremos más adelante.</i></p>
---

Según estos nuevos postulados, si tomamos dos velocidades cercanas a la de la luz, al sumarlas no pueden superar a la velocidad de la luz, ¿cómo puede ser?, esto planteaba un problema que Einstein resolvió. Detengámonos primeramente a ver cuáles son las consecuencias de los dos postulados de la teoría de la relatividad aplicados a los tiempos transcurridos para dos personas en dos sistemas de referencias inerciales distintos de los cuales uno va a velocidades cercanas a la de la luz (por ejemplo  $V=0,99 \cdot C$ ) y a las distancias medidas en cada uno de ellos.

### *Dilatación del tiempo*

Supongamos dos observadores, uno parado en el andén de una estación de trenes (sistema  $S$ ) y otro dentro de un tren viajando a velocidad  $u$  (sistema  $S'$ ). Sobre el suelo del vagón se deja una linterna o un farol que ilumina el techo, como se muestra en la figura,



### *Para el observador en $S'$ (dentro del tren)*

El tiempo transcurrido ( $\Delta t_0$ ) entre que se enciende el farol y llega al techo, situado a una distancia ( $d$ ) y donde la velocidad de la luz es ( $c$ ) será,

$$\Delta t_0 = \frac{2 \cdot d}{c}$$

Para el observador en  $S$  (en el andén)

Para calcular el tiempo transcurrido ( $\Delta t$ ) entre que se enciende la luz y llega al techo, primero calculemos la longitud recorrida por el rayo ( $l$ )

$$l = \sqrt{d^2 + \left(\frac{u \cdot \Delta t}{2}\right)^2}$$

que es la Hipotenusa de un triángulo rectángulo,

$$\Delta t = \frac{2 \cdot l}{c} \quad \text{entonces} \quad \Delta t = \frac{2}{c} \cdot \sqrt{d^2 + \left(\frac{u \cdot \Delta t}{2}\right)^2}$$

Reemplazo  $d$

$$\Delta t = \frac{2}{c} \cdot \sqrt{\left(\frac{c \cdot \Delta t_0}{2}\right)^2 + \left(\frac{u \cdot \Delta t}{2}\right)^2}$$

$$\Delta t = \frac{1}{c} \cdot \sqrt{(c \cdot \Delta t_0)^2 + (u \cdot \Delta t)^2}$$

Ingreso  $c$  en signo radical,

$$\Delta t = \sqrt{\Delta t_0^2 + \left(\frac{u \cdot \Delta t}{c}\right)^2}$$

$$\Delta t^2 = \Delta t_0^2 + \left(\frac{u \cdot \Delta t}{c}\right)^2 \quad \text{y} \quad \Delta t^2 - \left(\frac{u \cdot \Delta t}{c}\right)^2 = \Delta t_0^2 \quad \text{y} \quad \Delta t^2 \cdot \left(1 - \frac{u^2}{c^2}\right) = \Delta t_0^2$$

$$\Delta t^2 = \frac{\Delta t_0^2}{\left(1 - \frac{u^2}{c^2}\right)}$$

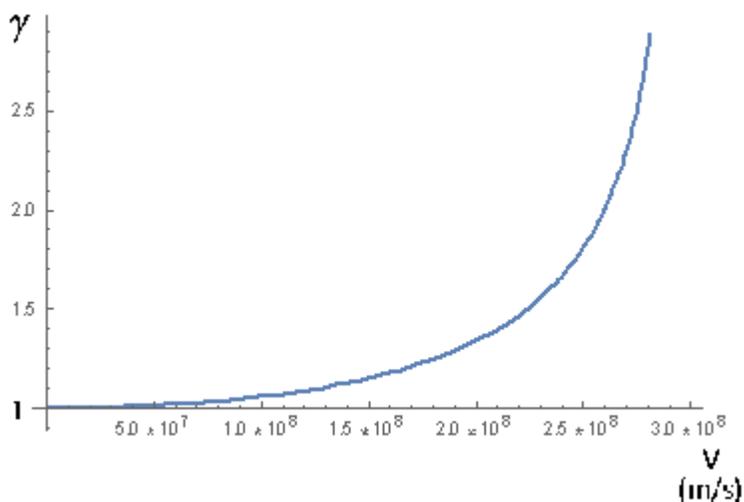
$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{\left(1 - \frac{u^2}{c^2}\right)}}$$

Esta última fórmula nos dice que el tiempo medido por un observador en el andén (sistema de referencia fijo) es distinto del tiempo medido por un observador dentro del tren (sistema de referencia móvil).

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{\left(1 - \frac{u^2}{c^2}\right)}} \text{ si llamamos } \gamma = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{u^2}{c^2}\right)}} \text{ entonces } \Delta t = \Delta t_0 \cdot \gamma$$

Si la velocidad  $u$  es cero entonces el factor  $\gamma$  es igual a 1, pero si la velocidad  $u$  es igual a  $c$ , el denominador es cero y nos quedaría una indeterminación del tipo  $\frac{1}{0}$ , cuyo límite es el infinito. Podemos concluir entonces que ningún objeto puede alcanzar la velocidad de la luz. Aparte de que esta conclusión se puede derivar de forma lógica de los postulados propuestos por Einstein,

“Si desde la tierra se ve una nave ir a la velocidad de la luz, y esta prende un faro, el observador verá a la nave y al rayo de luz ir juntos pero el observador en la nave ve que el rayo de luz avanza y no se queda con él. Este absurdo se salva si prohibimos a los objetos ir a la velocidad de la luz.”



A medida que  $u$  aumenta,  $\gamma$  crece haciendo que el tiempo para el observador del andén siempre sea mayor que para el del tren, y cuanto más aumente su velocidad, mayor será.

Tenemos estos dos tiempos, el medido por el observador del andén y el medido por el observador del tren, según lo visto, podemos afirmar que el observador del tren sufre una dilatación de su tiempo respecto al del observador del andén, ¿por qué no al revés?, es necesario definir el *tiempo propio*, para contestar esta pregunta.

El tiempo propio se define como el tiempo medido donde el reloj está en reposo respecto del fenómeno que se mide.

En nuestro ejemplo, el reloj que mide el tiempo desde donde sale el rayo de luz y donde llega, es el reloj del tren. Para el otro observador (el del andén) la salida del rayo luz ocurrió en un lugar distinto al lugar en el que llegó el rayo.

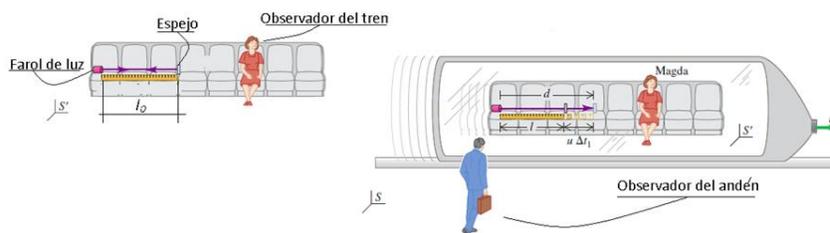
Podemos decir, entonces que el tiempo pasa más rápido en el andén que respecto del tren y no al revés, por que el tiempo del tren es el tiempo propio.

### Contracción de las longitudes

Otro fenómeno que se verifica es el de la contracción de las longitudes, veamos las siguientes figuras, donde vemos sentada en un vagón de tren a una observadora (sistema  $S'$ ) que coloca sobre los asientos una linterna y más adelante, un espejo como se ve en la figura.

Cuando se enciende la linterna el rayo de luz viaja en el mismo sentido que el tren y llega al espejo, luego regresa viajando lógicamente en la dirección contraria al tren.

Desde el andén otro observador mira la situación (sistema  $S$ ),



Para el observador en  $S'$

$$\Delta t_0 = \frac{2 \cdot l_0}{c}$$

Es el tiempo que tarda en ir y volver el rayo de luz.

Para el observador en  $S$

Como los tiempos de ida ( $\Delta t_1$ ) y vuelta ( $\Delta t_2$ ) son distintos, debido a que cuando el rayo de luz va hacia el espejo, lo ve alejarse a la velocidad del tren, y cuando vuelve a la fuente esta se

está acercando a la misma velocidad. Calculemos por separado los tiempos de ida y de vuelta, luego los sumamos y obtenemos el tiempo total.

$$\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2$$

Donde,  $d$ = distancia recorrida por el rayo de luz

$l$ = distancia entre linterna y espejo

$u$ =velocidad del tren

$$d = l + u \cdot \Delta t_1 \quad d = c \cdot \Delta t_1 \quad l + u \cdot \Delta t_1 = c \cdot \Delta t_1$$

$$\frac{l}{c - u} = \Delta t_1$$

$$d = l - u \cdot \Delta t_2 \quad d = c \cdot \Delta t_2 \quad l - u \cdot \Delta t_2 = c \cdot \Delta t_2$$

$$\frac{l}{c + u} = \Delta t_2$$

Entonces,

$$\Delta t = \frac{l}{c + u} + \frac{l}{c - u} = \frac{l(c + u) + l(c - u)}{c^2 - u^2} = \frac{2 \cdot l \cdot c}{c^2 - u^2} = \frac{2 \cdot l}{c} \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{u^2}{c^2}\right)}$$

$$\text{Reemplazando, } \Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2}}$$

Queda,

$$\frac{2.l}{c} \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{u^2}{c^2}\right)} = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2}}$$

$$\frac{2.l}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2}} = \Delta t_0$$

Reemplazando,  $\Delta t_0 = \frac{2.l_0}{c}$

Queda finalmente,

$$\frac{2.l}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2}} = \frac{2.l_0}{c}$$

Cancelando y reordenando factores,

$$l = l_0 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2}$$

Como ya hemos definido a  $\gamma$ , y vuelve a aparecer en el cálculo, lo reemplazamos,

$$l = \frac{l_0}{\gamma}$$

A medida que la velocidad crece,  $\gamma$  se hace cada vez más grande y como está en el denominador la longitud  $l$ , se hace cada vez más chica.

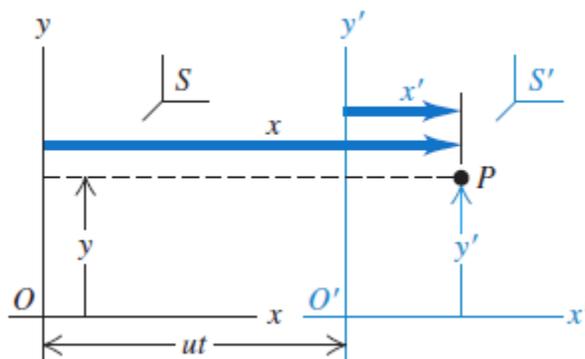
En un movimiento longitudinal, las alturas no sufren contracción de su longitud, (esto fue supuesto cuando calculamos la dilatación del tiempo).

### Transformaciones de Lorentz

Son las transformaciones que sufren un suceso, medido en dos marcos de referencia distintos como  $S(x,y,z,t)$  y  $S'(x',y',z',t')$ .

Hendrik Lorentz, físico holandés, publicó sus ecuaciones de transformación antes de que se conociera la teoría de la relatividad. Notó que quedaban invariantes las ecuaciones de Maxwell frente a la aplicación de su transformación y que además corregía ciertas discrepancias entre la mecánica clásica y el electromagnetismo. Henri Poincaré, un matemático francés las corrigió y le dio la forma con la que hoy la conocemos y junto a Hermann Minkowski, un matemático alemán, demostraron que eran aplicables a la nueva teoría de la relatividad. Albert Einstein, por otro lado, las dedujo de su propia teoría dándole una interpretación definitiva como herramienta de transformación de coordenadas para la teoría de la relatividad.

Cuando un suceso ocurre y es observado en un sistema de referencia, llamémoslo  $S$ , ¿cómo lo verá alguien en otro sistema, por ejemplo  $S'$  si sabemos que se mueve respecto de  $S$  a una velocidad  $u$ ?



Según la transformación de Galileo tenemos,

$$x = x' + u \cdot t$$

Pero  $x'$  desde el sistema  $S$  se ve contraída,

$$x = x' \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2} + u \cdot t$$

Despejando  $x'$

$$x' = \frac{x - u \cdot t}{\sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2}}$$

Ya tenemos una de las transformaciones. Las otras son,

$$\begin{array}{|c|} \hline y = y' \\ \hline z = z' \\ \hline \end{array}$$

Y para calcular el tiempo  $t'$ , conviene recordar que la forma en la que se transforma de  $S$  a  $S'$  debe ser la misma que cuando lo hacemos de  $S'$  a  $S$ , según el postulado que dice que las leyes físicas son las mismas en cualquier sistema de referencia inercial. Planteamos la misma ecuación de relatividad de Galileo como hicimos al comienzo y solo cambiamos el signo de la velocidad y transformamos, (ahora visto desde  $S'$ )

$$x' = x \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2} - u \cdot t'$$

Igualo ambas expresiones donde figura  $x'$ ,

$$\frac{x - u \cdot t}{\sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2}} = x \sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2} - u \cdot t'$$

$$t' = \left( x - \frac{x - u \cdot t}{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2} \right) \cdot \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2}}{u}$$

$$t' = \left( \frac{x \left(1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2\right) - (x - u \cdot t)}{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2} \right) \cdot \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2}}{u}$$

$$t' = \frac{x - x \left(\frac{u}{c}\right)^2 - x + u \cdot t}{\sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2}} \cdot \frac{1}{u}$$

$$t' = \frac{t - x \frac{u}{c^2}}{\sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2}}$$

Con esto ya podemos escribir las transformaciones de Lorentz completas. Respetando el primer postulado de la teoría podemos escribir las ecuaciones desde  $S \rightarrow S'$ , como las que van de  $S' \rightarrow S$ .

TRANSFORMACIONES DE LORENTZ	
$S \rightarrow S'$	$S' \rightarrow S$
$x' = \frac{x - u \cdot t}{\sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2}}$	$x = \frac{x' + u \cdot t'}{\sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2}}$
$y' = y$	$y = y'$
$z' = z$	$z = z'$
$t' = \frac{t - x \frac{u}{c^2}}{\sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2}}$	$t = \frac{t' + x' \frac{u}{c^2}}{\sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2}}$

Notemos que si hacemos que la velocidad  $u$  sea tan baja que pueda compararse con cero, entonces  $t$  será igual a  $t'$  y  $x' = x - u \cdot t$  y tendremos la transformación de Galileo. Veremos más adelante que esta es una de las formas del principio de correspondencia, donde se exige que la nueva teoría en determinadas condiciones permita a la vieja teoría ser tomada como una aproximación.

*Transformación de las velocidades en relatividad*

Consideremos solo el movimiento a lo largo del eje  $x$  de un objeto, su velocidad será entonces  $V_x$ , las otras no las consideramos.

Supongamos ahora que desde el sistema de referencia  $S$  se toma un desplazamiento de una partícula igual a  $dx$  en un tiempo  $dt$ , en el marco de referencia  $S'$  se verá transformado en  $dx'$  y  $dt'$ ,

Calculando esta derivadas respecto de  $t$  en  $S$ , tenemos,

$$dx' = \gamma (dx - u \cdot dt)$$

$$dt' = \gamma \cdot (dt - dx \frac{u}{c^2})$$

Dividiendo miembro a miembro,

$$\frac{dx'}{dt'} = \frac{\gamma (dx - u \cdot dt)}{\gamma \cdot (dt - dx \frac{u}{c^2})}$$

Cancelando  $\gamma$  y multiplicando y dividiendo el segundo miembro por  $dt$ , tenemos,

$$\frac{dx'}{dt'} = \frac{\frac{dx}{dt} - u}{1 - \frac{dx}{dt} \frac{u}{c^2}}$$

Llamando,

$$v'_x = \frac{dx'}{dt'} \quad y \quad v_x = \frac{dx}{dt}$$

Queda finalmente,

$$v'_x = \frac{v_x - u}{1 - v_x \frac{u}{c^2}}$$

Veamos cómo funciona esta ecuación si la probamos en la situación que queríamos inicialmente, donde un móvil que lleva una velocidad cercana a la de la luz enciende una linterna y ¿qué ve el tripulante?, ¿qué ve un observador en tierra?

*La velocidad de la luz + la velocidad de la luz = ¿velocidad de la luz?*

Si un piloto viaja en una nave espacial a velocidad  $u$  cercana a la de la luz, y prende una linterna frontal mientras un observador desde la tierra lo está mirando, ¿cuál será la velocidad de esa luz para el observador en la tierra?

$v_x = c$  Velocidad del haz de luz que ve el observador de la tierra.

$u = 0,9 \cdot c$  Velocidad de la nave.

$v'_x = ?$  Velocidad que ve el piloto de la nave,

$$v'_x = \frac{v_x - u}{1 - v_x \frac{u}{c^2}} \quad v'_x = \frac{c - u}{1 - c \frac{u}{c^2}} \quad v'_x = \frac{c \left(1 - \frac{u}{c}\right)}{1 - \frac{u}{c}} \quad v'_x = c$$

La velocidad del haz de luz que ve el piloto es  $c$  ¿y que ve el observador de la tierra?

Utilizando el mismo criterio de reciprocidad en las formas de las ecuaciones, usado ya anteriormente, escribamos cambiando el signo de  $u$  por  $-u$ , y resolviendo,

$$v_x = \frac{v'_x + u}{1 + v'_x \frac{u}{c^2}}$$

Donde,

$v'_x = c$  Velocidad del haz de luz que ve el tripulante de la nave.

$u = 0,9 \cdot c$  Velocidad de la nave.

$v_x = ?$  Velocidad que ve el observador de la tierra

Reemplazo,

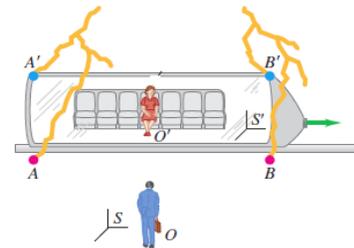
$$v_x = \frac{v'_x + u}{1 + v'_x \frac{u}{c^2}} \quad v_x = \frac{c + u}{1 + c \frac{u}{c^2}} \quad v_x = \frac{c \left(1 + \frac{u}{c}\right)}{1 + \frac{u}{c}} \quad v_x = c$$

Hemos visto cómo una nave que va a velocidades cercanas a la de la luz, prende una linterna (o emite una señal electromagnética cualquiera) y vemos que estas velocidades no se suman como lo proponía la relatividad de Galileo, sino que lo hacen de la forma propuesta por Einstein.

Tanto el tripulante como el observador de la tierra ven al rayo de luz avanzar con velocidad  $c$  y no hay ninguna paradoja ni contradicción.

### *Simultaneidad de sucesos en relatividad*

Este es uno de los tantos experimentos mentales que propuso Albert Einstein (los experimentos mentales son proposiciones que no están destinadas a realizarse en la práctica, sino por el contrario, se analizan mentalmente con los recursos de la teoría y de la lógica deductiva).



Supongamos que en un tren viaja un observador  $O'$  a velocidades cercanas a la de la luz y que hay otro observador  $O$  situado en el andén y cuando lo ve pasar frente a él, cae un rayo delante del tren que impacta sobre las vías (punto  $B$  para el observador  $O$  y  $B'$  para observador  $O'$ ) otro rayo cae sobre la parte posterior del tren que también impacta sobre las vías (punto  $A$  para observador  $O$  y  $A'$  para observador  $O'$ ).

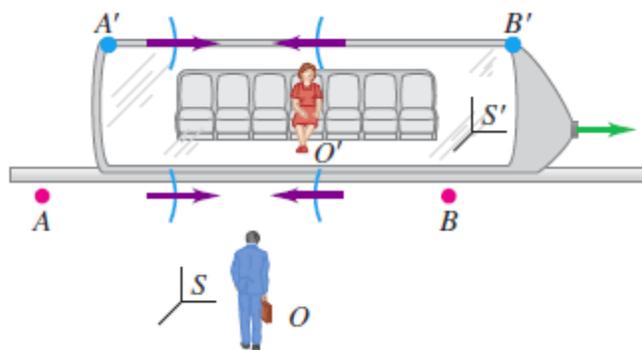
Si les preguntásemos a los dos observadores que fue lo que vieron, estas hubiesen sido sus respuestas,

Observador  $O$ : "...vi caer dos rayos simultáneamente, uno delante del tren y otro en la parte posterior".

Observador  $O'$ : "...yo vi que cayó el rayo de adelante primero y luego que cayó otro rayo en la parte posterior".

¿Cómo se explica esta discrepancia?

Para el observador  $O$ , cuando los rayos cayeron en  $A$  y en  $B$ , los frentes de onda luminosa que partieron lo alcanzaron recorriendo las mismas distancias (a la velocidad de la luz, por supuesto).



Para el observador  $O'$ , cuando los rayos cayeron en  $A'$  y  $B'$ , los frentes de onda debieron recorrer distintas distancias debido a que el que partió de  $B'$  iba al encuentro de la persona dentro del tren que también iba a su encuentro y el que cayó en  $A'$ , por el contrario, debía alcanzarlo mientras el observador se alejaba cada vez más. Es por este motivo que para la persona dentro del tren que va a velocidades cercanas a la de la luz, un rayo lo ve caer antes y otro después.

La simultaneidad de dos fenómenos depende del marco de referencia inercial en el que estemos, no existe la simultaneidad absoluta debido a que como vimos, algo puede ser simultáneo para un observador y no para otro, no hay un marco privilegiado.

### *Principio de correspondencia en relatividad*

La mecánica, hasta la llegada de la teoría cuántica y la teoría relativista, se había desarrollado mucho. Desde los principios de Newton, la mecánica analítica de Lagrange y Hamilton hasta la termodinámica y física estadística y pasando por las ecuaciones de Maxwell, los progresos eran sorprendentes, tanto que se le atribuye (dudosamente) a Lord Kelvin la frase que dice “en física ya

está todo hecho, solo se puede hacer más y mejores medidas”, refleja la satisfacción que se sentía por los logros obtenidos.

Con la llegada de la mecánica cuántica y de la relatividad (especial), toda esa sólida construcción que enorgullecía a los científicos, comenzó a temblar y surgieron preguntas como, ¿estaba todo mal?, ¿hay que hacer todo de vuelta o se puede rescatar algo de la Física?, ¿Cómo puede ser que hasta hoy la física haya conquistado grandes logros pero ahora esa misma física está mal?, estas y muchas otras preguntas hacían desplazar el tema hacia regiones más cercanas a la filosofía.

La física es toda una misma ciencia, y la relativista debe estar relacionada de alguna manera con la clásica, así como también la mecánica cuántica lo está con la mecánica clásica que veremos más adelante.

Niels Bohr propuso que se debía determinar algún parámetro que permita el paso de una a otra, y en caso de la relatividad era la velocidad. Le dio el nombre de *Principio de correspondencia*, a esta idea. En relatividad sus ecuaciones podían convertirse en las ecuaciones clásicas si la velocidad era lo suficientemente pequeña, este es un puente conceptual entre la física clásica y la física relativista.

Veamos,

En mecánica clásica tenemos las ecuaciones de la relatividad de Galileo que dicen,

$$V_x = V'_x + u$$

Si tomamos una de las expresiones de la velocidad relativista, es

$$v_x = \frac{v'_x + u}{1 + v'_x \frac{u}{c^2}}$$

Cuando el valor de  $u$  se hace muy pequeño,  $v'_x \frac{u}{c^2}$ , tiende a cero, por lo tanto queda,

$$v_x = \frac{v'_x + u}{1 + 0}$$

Y vemos que coinciden las expresiones,

$$v_x = v'_x + u$$

## *Mecánica Cuántica*

### *Introducción*

La mecánica cuántica empezó a nacer cuando se le dio solución a un problema que había quedado pendiente a fines del siglo XIX, en relación al estudio de un *cuerpo negro* (un objeto ideal que absorbe toda la energía que recibe) y que consistía en explicar qué cuando a un cuerpo de cualquier material se lo calienta comienza a irradiar la energía absorbida en forma de energía electromagnética con un cierto espectro de frecuencias con distintas intensidades.

Las predicciones de las teorías (las cuales estaban bien aplicadas) no coincidían con los datos experimentales, y tanto preocupó a los científicos que lo llamaron *catástrofe ultravioleta* debido a que era en la zona del espectro ultravioleta en donde las teorías predecían un crecimiento

infinito de la energía irradiada y en la práctica se veía que no solo no crecía sino que la curva decaía abruptamente.

El problema fue inicialmente tratado por Gustav Kirchhoff quien introdujo el término “cuerpo negro” y luego por John Strutt (Lord Rayleigh) y James Jeans, quienes lograron describir una parte de la curva experimental: la correspondiente a frecuencias menores. Wilhelm Wien es quien enuncia la ley de desplazamiento con la temperatura de las longitudes de onda donde las curvas experimentales presentaban el máximo. Se buscaron aplicando correctamente todo el arsenal del que se disponía en ese tiempo y que les proveía la termodinámica y las ecuaciones de Maxwell, pero no se pudo solucionar.

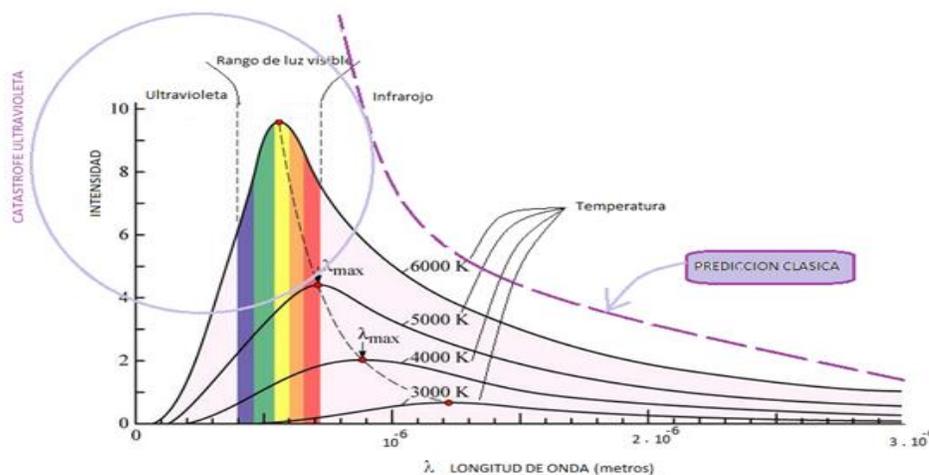
*Desde los cuantos al principio de incerteza*

El siglo XX comenzó y el problema planteado por la *catástrofe ultravioleta*, fue abordado por Max Planck, quien utilizando un método heurístico (buscando expresiones matemáticas que reprodujeran la curva observada), logra dar con una expresión que describe la curva experimental.

Si bien Planck había obtenido una fórmula que podía reproducir la curva experimental, fue la interpretación que le dio a su propuesta la que cambió el rumbo de la física.

Volvamos al fenómeno del cuerpo negro y hagamos una descripción de lo que puede observarse en la curva experimental, sabiendo además que todos los cuerpos que son calentados hasta la misma temperatura brillan con el mismo color e intensidad, independientemente de cuál sea el material empleado.

*El color de la radiación de un cuerpo caliente depende de la temperatura.*



Si tomamos un material y lo calentamos hasta una temperatura de 3000K, obtendremos una curva como la que se muestra en el gráfico de arriba, donde el punto rojo de la curva indica el máximo de intensidad que se da aproximadamente en un  $\lambda=1200\text{nm}$ , y que corresponde a una frecuencia no visible, recordemos que el espectro visible está situado entre los 400nm y 700nm aproximadamente, y notamos que la parte que se encuentra dentro del espectro visible es de muy baja intensidad.

Si volvemos a calentarlo hasta los 4000K, vemos que el máximo del pico de intensidad se ha desplazado hacia valores menores de longitud de onda ( $\lambda \cong 890\text{nm}$ ), y notamos también que hay una parte de la radiación que abarca el espectro visible con mayor intensidad que en el caso anterior.

Repitiendo este mismo procedimiento para 5000K y 6000K, queda claro el comportamiento que tiene el máximo del pico de desplazarse hacia valores menores de longitudes de onda, este comportamiento responde a la *Ley de Desplazamiento de Wien*.

No importa si se trata de una brasa que arde en una fogata o de un trozo de metal, en una fundición, la gráfica es la misma.

Como ya dijimos antes, la *catástrofe ultravioleta* consistía en que no se podía explicar la caída abrupta de la gráfica luego de haber alcanzado el máximo.

Un físico de la época hubiese pensado "...caliento un trozo de hierro hasta 5000K y espero que este metal emita frecuencias de distintos valores, con diferentes intensidades, cuanto más baja la longitud de onda mayor la intensidad y la tendencia es que si la longitud de onda tiende a cero la intensidad tiende a infinito...es absurdo".

Max Planck propuso una solución que consistía en pensar que la energía que se irradiaba en cada longitud de onda no podía ser de cualquier valor sino de valores discretos que eran proporcionales a una constante, que es la que hoy llamamos *constante de Planck* ( $h$ ) y su valor es  $6,6260664 \times 10^{-34}$  J.s. Su interpretación fue que para emitir energía de cierta longitud de onda se debía tener un paquete con una cantidad mínima de energía, que llamo *quantum de acción* (cuantos) y que debía cumplir que,

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

Donde  $E$  es la energía del cuanto que se va a emitir,  $h$  es la constante de Planck y  $\lambda$  es la longitud de onda.

Su propuesta en definitiva consistía en considerar que la emisión de energía de un cuerpo negro no se producía de manera continua sino por paquetes o cuantos con valores discretos de energía. Esto explicaba la caída de la curva una vez alcanzado el máximo valor de intensidad, se

debía tener cuantos de mayor energía para emitir, lo cual hacía que se emitiesen menos cuantos y a menor longitud de onda menos cuantos todavía. Esto explicaba la caída abrupta luego del pico máximo.

Nunca estuvo del todo convencido de su propuesta, pero lo tomó como una explicación que al concordar con los resultados era una buena guía, él esperaba que más adelante cuando el tema estuviese lo suficiente estudiado se dejaría de lado este concepto del cuanto de energía.

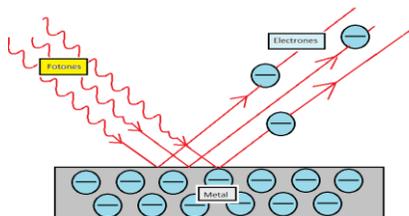
En contra de lo que esperaba Planck, Albert Einstein tomó la idea de los cuantos y la utilizó para formular una teoría con la cual explicó el efecto fotoeléctrico, descubierto por Heinrich Hertz, en 1887.

El efecto fotoeléctrico consiste en la extracción de electrones de la superficie de un material, por parte una fuente luminosa que incide en él.

Los trabajos de Einstein indicaban que la energía con que los electrones se desprendían del material iluminado, aumentaba proporcionalmente con la frecuencia de la luz, esto era independiente de la intensidad de la luz que iluminaba.

La teoría de Planck aplicada a este efecto explica que a frecuencias más altas los cuantos que inciden sobre la superficie de un material son más energéticos y por lo tanto pueden arrancar un electrón.

Experimentalmente fue probado por Robert Millikan, un físico estadounidense, en 1915.



Lo novedoso de la propuesta de Albert Einstein es que le da al fotón (el cuanto de la luz) la propiedad de transportar esa energía por el espacio y ser el mismo fotón quien lleva la energía suficiente para desprender un electrón realizando el trabajo de extracción y para entregarle energía cinética para salir con velocidad. La fórmula que enunció Einstein fue,

$$K = h \cdot f - \phi$$

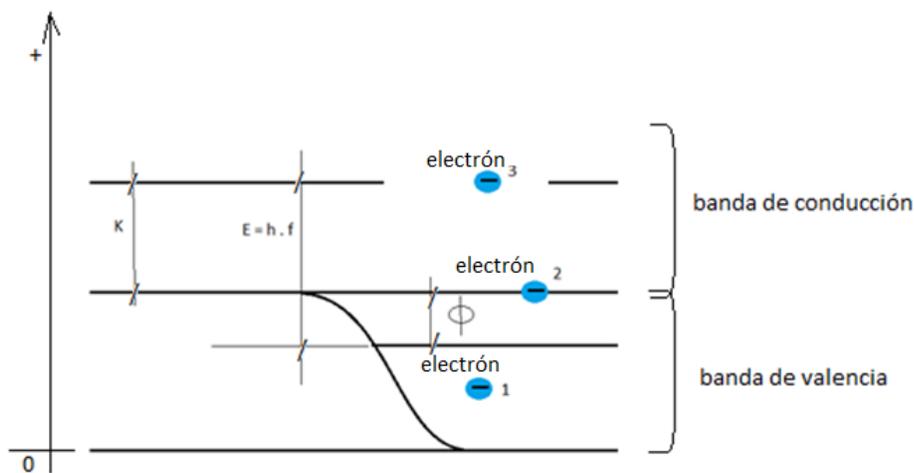
Donde  $K$ , es la energía cinética,

$h$ , la constante de Planck

$f$ , la frecuencia y

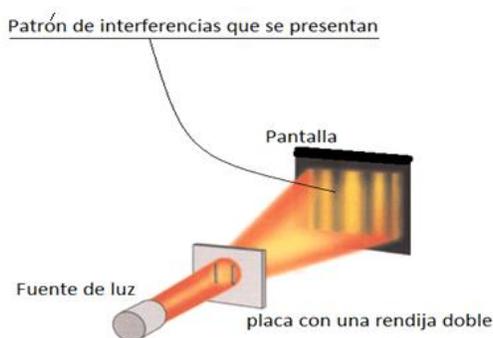
$\phi$ , el trabajo de la energía de extracción.

Niveles de Energía



En la figura anterior vemos al electrón (1) dentro de la banda de valencia en el metal, el electrón (2) ya recibió su energía de extracción, pero no tiene cinética, el electrón (3) fue extraído y salió con cierta velocidad, circulando por la banda de conducción (corriente eléctrica).

Esta explicación confirmó a la constante de Planck ( $h$ ) como una de las constantes de la naturaleza y cuantificó la forma del fotón describiéndoselo ahora como de carácter dual (dualidad onda-partícula). A la par se había confirmado hacía unos años la naturaleza ondulatoria de la luz con el experimento llamado *de la doble rendija*, llevado adelante por Thomas Young en 1801, donde la luz mostraba interferencia al pasar por dos rendijas muy próximas. Había llegado el momento de preguntarse por la verdadera naturaleza de la luz, ¿Corpuscular u ondulatoria?



¿Estaba la luz formada por corpúsculos (*fotones*), o por el contrario era una onda, como se había visto hasta ahora?, la naturaleza de la luz parecía no tener una sola respuesta, según fuese el experimento que se llevase a cabo se mostraba formada por partículas o fotones, como vimos, entonces se la comenzó a entender como de naturaleza dual y se dijo que la luz estaba compuesta por una *dualidad onda-partícula*, como si uno mostrase un plato a un grupo de personas que nos rodean, el que este frente al plato dirá que ve un círculo y el que este de costado dirá que ve una

vara (sería el plato de perfil). Según fuese la situación en que la observaba, la luz era percibida como compuesta de fotones o como una onda.

Si esto ya era difícil de entender, el físico Louis de Broglie, un aristócrata francés, publica en 1924 un trabajo titulado “Recherches sur la théorie des quanta (Investigaciones sobre la teoría cuántica)”, donde trataba a los electrones como ondas.

Su propuesta fue que, si la luz podía comportarse como una onda y como una partícula, porque no las partículas (cualquier clase de ellas) podrían comportarse como ondas. Esa idea se inspiró en el carácter simétrico que parecía verse en la naturaleza.

Partículas	Ondas
a) $E = m \cdot c^2$ (energía relativista en reposo)	b) $E = h \cdot f$ $h$ constante de Planck y $f$ es la frecuencia
c) $p = m \cdot v$ (es la cantidad de movimiento)	d) $f = \frac{c}{\lambda}$ $c$ es la velocidad de la luz y $\lambda$ la longitud de onda

Louis de Broglie tomó las ecuaciones de partículas y de ondas, y las combinó de la siguiente forma b) con d),

$$E = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

Y luego con a)

$$m \cdot c^2 = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad \text{simplificando} \quad m \cdot c = \frac{h}{\lambda}$$

Donde  $c$  es la velocidad de la luz, pero podía ser cualquier otra velocidad por lo tanto la ecuación queda,

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

La idea de Louis de Broglie era entonces que una partícula en movimiento podía tener el comportamiento de una onda y asociarle a ella una longitud de onda correspondiente.

Un año después se realizaron dos experimentos que mostraron la difracción de un haz de electrones, uno de ellos el de George Thomson en la Universidad de Aberdeen y otro de Davisson y Germer en los Laboratorios Bell, por este trabajo Thompson y Davisson recibieron el Premio Nobel en 1937. La difracción de electrones es un comportamiento que no tiene análogo en la descripción de las partículas newtonianas.

Se comenzó a hablar de *mecánica ondulatoria*, y cabe destacar que Louis de Broglie fue un precursor en la aplicación de principios de simetría que posteriormente se convirtiera en una guía para la física.

### *Ondas*

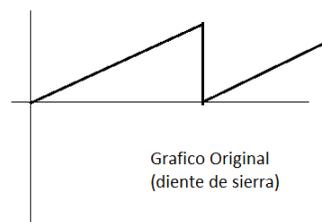
Con el surgimiento de la teoría de los cuantos y de la mecánica ondulatoria, cobra una gran importancia el estudio de las ondas y de los trabajos de Jean-Baptiste Joseph Fourier, un físico y matemático francés nacido en 1768 en París, sobre la descomposición de funciones periódicas en

sumas de senos y cosenos formando series convergentes llamadas hoy *series de Fourier*, con ellas solucionó la ecuación del calor, fue discípulo de Lagrange y de Laplace.

Básicamente una serie de Fourier dice que toda función puede ser expresada como una suma de términos de senos y de cosenos, multiplicados por un factor que modifica su amplitud. La serie de Fourier cumple además con la propiedad de linealidad que nos permite aplicar el principio de superposición al cálculo de las funciones por separado y obtener como resultado la función buscada. En otras palabras, es lo mismo tomar una función y triplicar su amplitud que tomar cada uno de los términos de la descomposición en serie de Fourier, triplicarlos y luego sumarlos.

Ejemplo:

Supongamos que queremos graficar una función como la que se muestra a la derecha, se la conoce como *diente de sierra* por su semejanza obvia.



Lo que nos dice Fourier es que existen términos donde figuran senos y cosenos, modificados en amplitud, que al sumarse pueden aproximarse a la gráfica. No vamos a detenernos en profundidad en el tema, pero propongamos unas gráficas y sumémoslas.

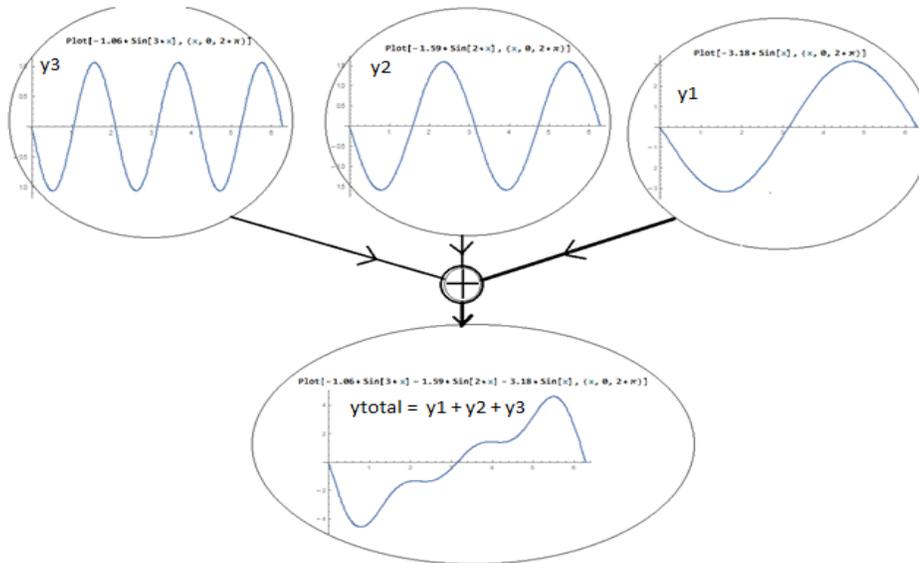
Para ello vamos a proponer tres curvas dadas por las funciones,

$$- y_1(t) = -3,38 \cdot \text{sen } t$$

$$- y_2(t) = -1,59 \cdot \text{sen } 2t$$

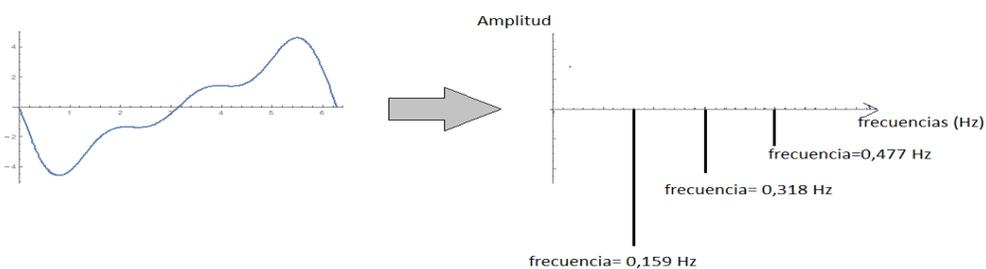
$$- y_3(t) = -1,06 \cdot \text{sen } 3t$$

Las vemos graficadas más abajo, junto con la gráfica que resulta de la suma de las tres,



Podemos apreciar que existen funciones senos y cosenos que multiplicados por algún factor (cero en caso de los cosenos) y sumados dan una función que se *aproxima* a la que queremos reproducir: más términos tenga la serie, más se aproximara. Para lograr la igualdad deberíamos usar infinitos términos.

Podríamos representar lo que hemos dicho de dos maneras, una manera como la amplitud en función del tiempo, y otra como la frecuencia utilizada y el factor por el cual se modificó la amplitud. Cada gráfico se vería de la siguiente forma,



Recordemos que,

$$y(t) = A \cdot \text{sen}(\omega t + \phi)$$

Donde A, es la amplitud

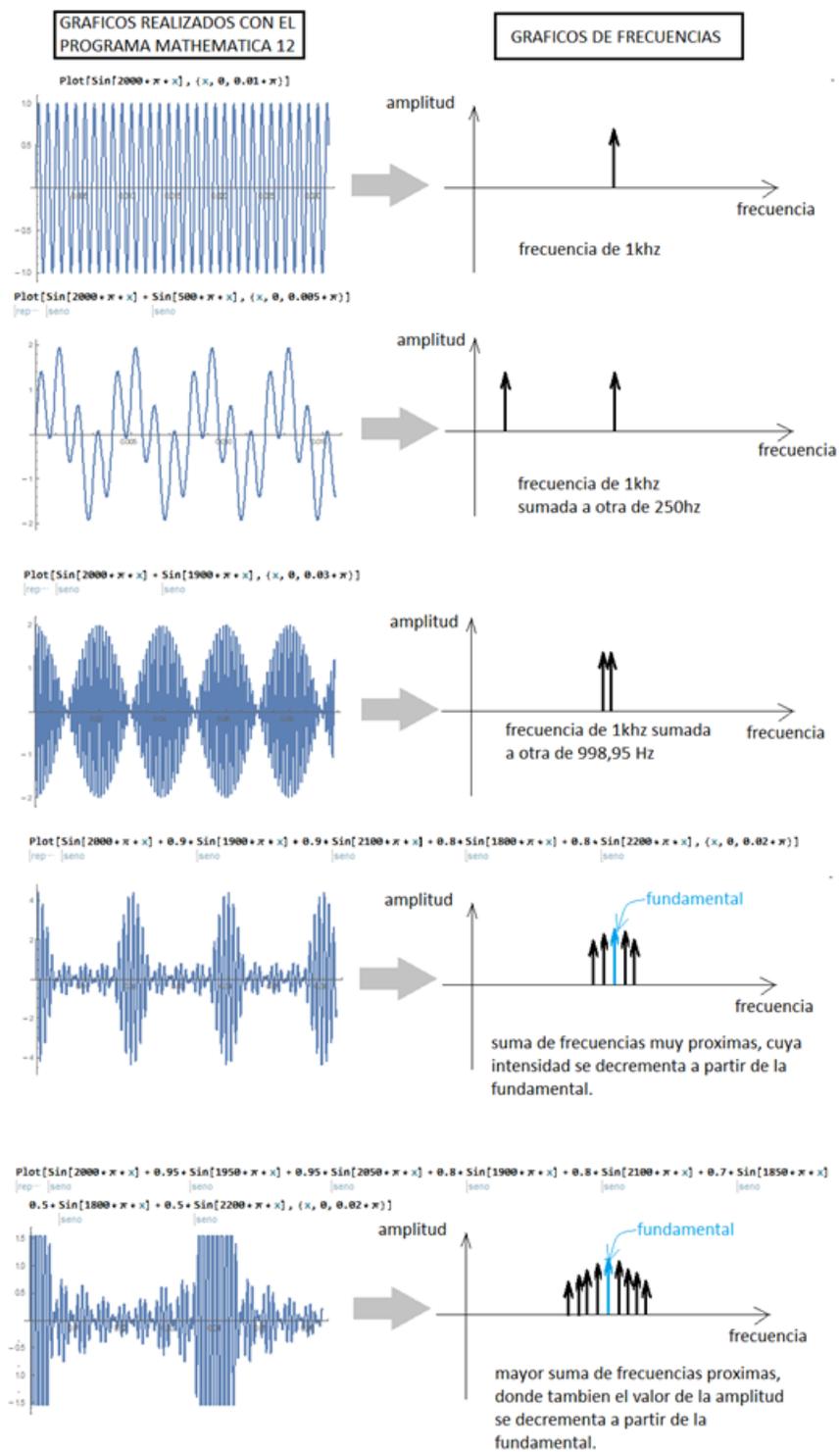
$\omega$ , es la frecuencia angular

$\phi$ , es la fase inicial

$$Y \omega = 2\pi f$$

$$\text{Por lo tanto } f = \frac{\omega}{2\pi}$$

Vemos como podemos transformar una forma de representación en otra, a esto en matemáticas se la conoce como la *transformada de Fourier* (tema que tampoco vamos a desarrollar, pero sí a explicar), según lo que ya hemos visto repasemos los siguientes gráficos,

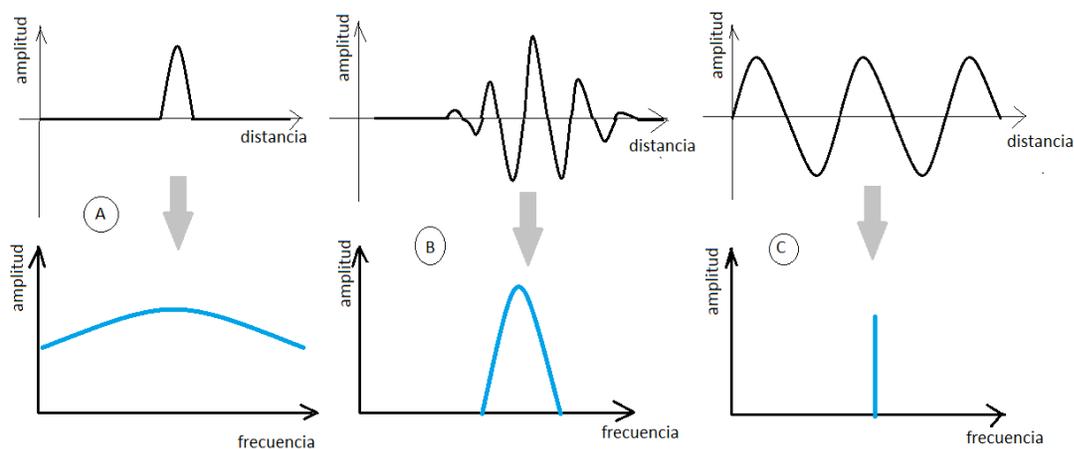


Vemos entonces que *la transformada de Fourier* nos permite representar una función como función del tiempo o de la frecuencia. Este concepto matemático es aplicado en las nuevas teorías cuánticas, pero mientras la *transformada de Fourier* como la vimos se aplica a el espacio de configuraciones (es decir al espacio de las posibles posiciones tomadas por un sistema físico) en la mecánica cuántica se aplicará el mismo formalismo (según la Real Academia Española (RAE) es la “Doctrina que sostiene que las verdades científicas son meramente formales, y se apoyan en las convenciones”) pero al espacio de fases (es el espacio que permite representar posiciones y momentos de un sistema de partículas).

### ***Representación de partículas a través de su probabilidad de ubicarlas***

Habíamos dicho que una partícula está asociada a una onda según lo que hemos visto.

En el siguiente grafico mostramos la relación entre la frecuencia de las ondas que componen una partícula y la posición que esta partícula tiene en el espacio.



Responde perfectamente a eso que llamamos *transformada de Fourier*, o sea que podemos informar de qué frecuencias está compuesta una partícula que ubicamos en el espacio.

En el *caso A*, la partícula es perfectamente identificable, pero está compuesta por una cantidad muy grande de frecuencias por lo tanto pierde nitidez la determinación de  $\lambda$  y en consecuencia la velocidad ( $v = \lambda \cdot f$ ).

En el *caso C*, la partícula no puede ser ubicada en el espacio, pero su velocidad está perfectamente definida porque la frecuencia tiene solo un valor y permite el cálculo de la velocidad sin problemas.

En el *caso B*, describe la situación intermedia entre *A* y *C*.

En la ecuación de Louis de Broglie,

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

Reemplacemos  $\lambda = \frac{2\pi}{k}$  queda entonces,  $p = \frac{h \cdot k}{2\pi}$ , despejando,

$$k = \frac{2\pi \cdot p}{h}$$

Tomemos un  $\Delta k = k_2 - k_1 = \frac{2\pi \cdot p_2}{h} - \frac{2\pi \cdot p_1}{h} = \frac{2\pi}{h} \cdot (p_2 - p_1) = \frac{2\pi}{h} \Delta p$ , despejamos

$$\frac{h}{2\pi} = \frac{\Delta p}{\Delta k} \quad A)$$

Por otro lado,

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad y \quad \lambda = \frac{c}{f}$$

Entonces,  $k = \frac{2\pi}{c} \cdot f$  y como  $2\pi$  y  $c$  son constantes, puede verse que  $k$  (el número de onda) es directamente proporcional a  $f$  (frecuencia).

Y como hemos visto en los gráficos anteriores: más grande es la cantidad de frecuencias, más precisa es la posición de la partícula (casos A, B y C, de la página anterior). Entre  $k$  y  $x$  existe una relación inversamente proporcional lo mismo que sus variaciones, esto es,

$$\Delta k = \frac{1}{\Delta x} \quad B)$$

Reemplazando B) en A),

$$\frac{h}{2\pi} = \Delta p \cdot \Delta x$$

Al primer miembro se lo define como “hache barra y se lo escribe  $\hbar$ , donde  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$

Queda finalmente

$$\Delta p \cdot \Delta x \geq \hbar$$

Donde el signo igual se cambió por el de mayor o igual debido a que es la cota mínima, pero de este umbral hacia arriba cualquier valor está permitido. La condición que impone el principio de incerteza es que no sea menor.

### *Interpretación*

La precisión con que puede conocerse la velocidad o la posición simultáneamente de una partícula no es arbitraria, hay una precisión mínima posible que no depende de la habilidad de la persona que mide o de lo defectuoso de sus instrumentos. Es una imposibilidad inherente a la medida en esas escalas, no así a escalas más grandes donde no se hace tan visible. Es importante destacar que la precisión de las medidas debe ser simultánea, no de manera independiente.

El doctor en física español Javier Santaolalla, divulgador de ciencia en internet brinda la siguiente analogía,

“Una persona va a una carpintería y le pide a el carpintero que le haga una mesa, pero pone como condición que su superficie debe ser mayor que  $1\text{mm}^2$ . El carpintero no se hace ningún problema porque la condición de su cliente la va a cumplir cualquiera sea la mesa que arme ya que las placas de madera que usa para hacer las mesas son cuadradas y vienen de 1 m, 2 m, 3 m...etcétera. de lado. Luego otro cliente viene y le pide una mesa, pero la condición que pone es que su superficie sea mayor que  $2\text{m}^2$ .

Ahora el carpintero está más comprometido por qué no puede poner una placa de  $1\text{m}^2$ , ni dos juntas, debe poner tres o colocar una de  $2\text{m} \times 2\text{m}$ . En el primer caso, la condición

era insignificante respecto a las medidas con las que trabaja el carpintero, pero en el segundo caso, cuando las condiciones impuestas eran de la misma magnitud con las que trabaja, tuvo que calcular con precisión para no equivocarse.”

Decía W. Heisenberg que para ubicar un electrón este nos tiene que devolver un fotón de luz, pero para hacerlo el electrón modifica su velocidad. Por lo tanto, si quiero saber dónde está en un preciso momento, no sabré su velocidad y por lo tanto no sabré donde estará después, dejando sin sentido el concepto de trayectoria. Conviene notar que el principio de incerteza está contenido en el formalismo de la transformada de Fourier.

### *Trayectoria*

En la mecánica clásica se define la trayectoria como las posiciones que toma un objeto a medida que pasa el tiempo, y decimos que es la solución de la segunda ley de Newton,

$$F = m \cdot a$$

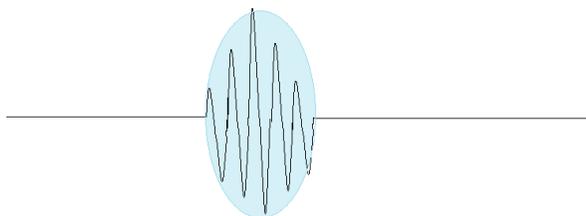
Decimos que la aceleración es la variación de velocidad en el tiempo, es decir  $a = \frac{dv}{dt}$  donde  $v$  es la velocidad del móvil y sabemos que la velocidad es la variación de la distancia en función del tiempo, o sea  $v = \frac{dx}{dt}$ , entonces queda claro que si conocemos  $x(t)$  conoceremos  $v(t) = \frac{dx}{dt}$  y  $a(t) = \frac{d\left(\frac{dx}{dt}\right)}{dt}$  lo que es igual a escribir  $a(t) = \frac{d^2x}{dt^2}$ , que significa derivar dos veces seguidas a la posición respecto del tiempo. Esta última expresión es una ecuación diferencial debido a que la solución la

hallaremos a través de proponer una función  $x(t)$  que la cumpla. Nosotros en los cursos de física en el nivel medio usamos la ecuación horaria,

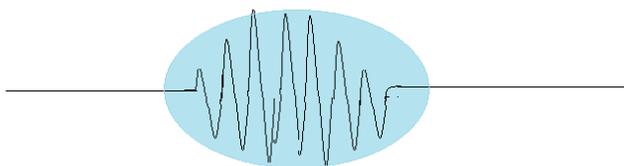
$$x(t) = x_i + v_i \cdot \Delta t + \frac{1}{2} a (\Delta t)^2$$

donde vemos que dadas las condiciones iniciales de posición y velocidad obtenemos la trayectoria. Esto no puede hacerse en la mecánica cuántica, y es una consecuencia del principio de incerteza.

Una partícula, vimos anteriormente, que podemos describirla a través de una onda asociada, supongamos que podríamos medir con cierta indeterminación su posición y velocidad se vería de esta manera,



Aumentando su precisión en la medida de la velocidad se vería de esta otra manera,



A medida que aumenta la precisión de su velocidad la precisión de la medición de la posición va disminuyendo. Si la condición para que exista una trayectoria es la de conocer la posición de un objeto en el tiempo, no poder conocer su posición actual hace imposible conocer su posición futura, por lo tanto no se puede aceptar en mecánica cuántica el concepto de trayectoria.

Erwin Schrödinger fue quien propuso una ecuación en la que intervenía una función que representaba a la partícula, la *función de onda* de la partícula, pero esta representación era muy incierta y no quedaba claro que era. Max Born fue el encargado de darle el significado que hoy está aceptado y es que el cuadrado de la amplitud de la función de onda es igual a la densidad de probabilidad del estado de la partícula. Es decir, tanto la posición como la velocidad no están definidas con un valor determinado sino con un valor que representa la probabilidad de encontrar su posición o su velocidad.

De este modo se hace imposible definir una trayectoria. Desde el punto de vista clásico una trayectoria se podría representar como,



Lo definimos como los puntos del espacio sucesivos en tiempos que toma el objeto.

Y una partícula en mecánica cuántica, como ,



No podemos decir donde ha estado la partícula entre un punto donde logramos ubicarla y otro punto donde también la logramos ubicar. Esta diferencia es fundamental ya que en mecánica cuántica para saber dónde está la partícula debe medirse cada vez que uno quiere saber, no como la mecánica clásica que sabiendo su posición y velocidad inicial podemos predecir donde se encontrará luego a través de las leyes de Newton.

### *Principio de correspondencia en cuántica*

Como ya hemos dicho en el capítulo de relatividad, fue Niels Bohr en el año 1923 el que impuso una condición para que la mecánica cuántica no quede separada de la mecánica clásica sino que exista un parámetro que dada cierta magnitud, separe una de otra. Lo llamó *principio de correspondencia*, como ya dijimos. Sugirió que era posible pasar de la mecánica cuántica a la

mecánica clásica cuando el número cuántico principal era muy grande, (situación análoga a lo que ocurre con la velocidad en relatividad). Demostremos esto último.

Repasemos brevemente el modelo de átomo de Niels Bohr, lo presentó en 1913 tomando como base conceptual el modelo planetario de Ernest Rutherford, pero introduciendo ciertas correcciones que salvaban los inconvenientes que presentaba, como ser el de que los electrones girando como planetas alrededor del núcleo son cargas aceleradas y debían perder su energía emitiendo ondas electromagnéticas para finalmente caer en el núcleo, hasta donde se sabía debían hacer esto, pero no lo hacían. Introduce *ad hoc* el concepto de que el momento debe ser cuantizado (no puede tener el electrón cualquier nivel de energía de forma continua sino valores discretos de energía), es decir que un electrón puede moverse dentro de un nivel energético sin irradiar ondas electromagnéticas, a este nivel se lo denominó *número cuántico principal*. Incorpora también el concepto de fotón para describir la emisión de ondas electromagnéticas en función de los saltos que el electrón efectúe entre distintos niveles energéticos. Los tres postulados fundamentales desarrollados por Niels Bohr, fueron,

- 1) Los electrones describen órbitas circulares en torno al núcleo del átomo sin irradiar energía.
- 2) Las órbitas permitidas son las que cumplen que el momento angular sea un número de veces enteras la constante reducida de Planck. ( $L = m_e \cdot v \cdot r = n \cdot \hbar$ ), partiendo de este postulado podremos calcular el radio de la órbita y la energía de la órbita (más adelante lo haremos).
- 3) Los electrones para pasar de una órbita cercana al núcleo a una más alejada deben absorber un fotón de energía y los electrones que saltan de órbitas más alejadas al núcleo a órbitas más cercanas emiten un fotón de energía. La energía de cada uno de estos fotones está

relacionada los niveles de energía de donde partió el electrón y el nivel de energía a donde llegó (también lo calcularemos más adelante).

El modelo permite explicar las líneas de emisión del hidrógeno de Lyman, Balmer, Paschen, Brackett y Pfund, lo que motivó una cálida bienvenida a este modelo. Luego Arnold Sommerfeld realiza un modelo mejorando al de Bohr, e introduce otros números cuánticos interpretando algunas órbitas como elípticas (niveles p, s, d y f) pudiendo explicar no solo el hidrógeno sino átomos más complejos. A este modelo lo sucede el modelo atómico de Erwin Schrödinger, es un modelo cuántico no relativista, que no admite una representación espacial como era el caso del modelo planetario. En este modelo juega un papel muy importante la probabilidad a la hora de hacer predicciones.

Según la visión clásica, un electrón moviéndose en una órbita circular, irradia ondas electromagnéticas de frecuencia igual a la frecuencia de revolución y los múltiplos enteros de esta frecuencia, llamados armónicos.

Calculemos esto para un átomo de hidrógeno, su frecuencia haciendo consideraciones clásicas y cuánticas, debemos confirmar que como dice el principio de correspondencia enunciado por Niels Bohr, para cuando tengamos números cuánticos grandes se tiende a la mecánica clásica.

*Calculo a través de consideraciones clásicas*

Para ello calculamos la velocidad y la frecuencia de un electrón según el radio,

$$F = m \cdot a = \left( \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right) \cdot \frac{e^2}{r^2} = m \cdot \frac{v^2}{r}$$

$$\left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\right) \cdot \frac{e^2}{r} = m \cdot v^2$$

$$v = \frac{e}{\sqrt{4\pi\epsilon_0 r m}}$$

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{2\pi r} = \frac{e}{2\pi\sqrt{4\pi\epsilon_0 r^3 m}}$$

Ahora calculemos el valor del radio,

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m \cdot v} = \frac{h}{\frac{m \cdot e}{\sqrt{4\pi\epsilon_0 r m}}} = \frac{h}{e} \cdot \sqrt{\frac{4\pi\epsilon_0 r}{m}}$$

El radio de cada una de las órbitas según el número cuántico principal es,

$$n \cdot \lambda = 2\pi r_n$$

Reemplazando primero el valor de  $\lambda$  y luego despejando  $r_n$ ,

$$n \cdot \frac{h}{e} \cdot \sqrt{\frac{4\pi\epsilon_0 r_n}{m}} = 2\pi r_n$$

$$\frac{n^2 h^2}{e^2} \cdot \frac{4\pi\epsilon_0 r_n}{m} = 4 \cdot \pi^2 \cdot r_n^2$$

$$r_n = \frac{\epsilon_0 n^2 h^2}{\pi m e^2}$$

Reemplazando  $r_n$  en la velocidad,

$$v = \frac{e}{\sqrt{4\pi\epsilon_0 \left(\frac{\epsilon_0 n^2 h^2}{\pi m e^2}\right) m}} = \frac{e^2}{2 \cdot h \cdot \epsilon_0 \cdot n}$$

Calculamos la frecuencia,

$$f = \frac{e}{2\pi \sqrt{4\pi\epsilon_0 \left(\frac{\epsilon_0 n^2 h^2}{\pi m e^2}\right)^3 m}} = \frac{e}{2\pi \sqrt{4\pi\epsilon_0 \frac{\epsilon_0^3 n^6 h^6}{\pi^3 m^3 e^6} m}}$$

$$f = \frac{e}{2\pi \sqrt{\frac{4\epsilon_0^4 n^6 h^6}{\pi^2 m^2 e^6}}} = \frac{m \cdot e^4}{4\epsilon_0^2 n^3 h^3}$$

$$f_{clásica} = \frac{m \cdot e^4}{8\epsilon_0^2 h^3} \cdot \left(\frac{2}{n^3}\right)$$

Esta ecuación corresponde a la frecuencia de emisión, haciendo consideraciones clásicas

*Calculo a través de consideraciones cuánticas.*

Debemos calcular también la frecuencia, para ello primero calculamos la energía de cada órbita,

$$v = \frac{e}{\sqrt{4\pi\epsilon_0 r m}}$$

$$T = \frac{1}{2} \cdot m v^2$$

$$V = -\left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\right) \cdot \frac{e^2}{r}$$

$$E_r = T + V = \frac{1}{2} \cdot m v^2 - \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\right) \cdot \frac{e^2}{r}$$

$$E_r = \frac{1}{2} \cdot m \left(\frac{e}{\sqrt{4\pi\epsilon_0 r m}}\right)^2 - \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\right) \cdot \frac{e^2}{r}$$

$$E_r = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r}$$

$$E_n = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 \left(\frac{\epsilon_0 n^2 h^2}{\pi m e^2}\right)} = -\frac{m \cdot e^4}{8\epsilon_0^2 h^2 n^2}$$

Energía correspondiente al salto de un electrón, de un nivel  $n_i$  (inicial) a un nivel  $n_f$  (final),

$$\Delta E = E_i - E_f = \frac{m \cdot e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \cdot \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right)$$

Ley de Planck,

$$f = \frac{E}{h}$$

$$f_{cuántica} = \frac{m \cdot e^4}{8\epsilon_0^2 h^3} \cdot \left( \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$$

Esta ecuación corresponde a la frecuencia de emisión haciendo consideraciones cuánticas

Tenemos ya dos expresiones, una de consideraciones clásicas y otra de cuánticas, imponemos la condición de que no sea muy grande y además definamos el salto entre niveles para que este dado por  $n_i = n$  y  $n_f = (n - p)$ , siendo  $p = 1, 2, 3, \dots$

$$f_{cuántica} = \frac{m \cdot e^4}{8\epsilon_0^2 h^3} \cdot \left( \frac{1}{(n-p)^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$f_{cuántica} = \frac{m \cdot e^4}{8\epsilon_0^2 h^3} \cdot \left( \frac{n^2 - (n-p)^2}{n^2(n-p)^2} \right)$$

$$f_{cuántica} = \frac{m \cdot e^4}{8\epsilon_0^2 h^3} \cdot \left( \frac{2pn - p^2}{n^2(n-p)^2} \right)$$

Cuando  $n$  es muy grande, se puede aproximar,

$$2pn - p^2 \approx 2pn$$

$$n^2(n-p)^2 \approx n^4$$

Queda entonces,

$$f_{cuántica} = \frac{m \cdot e^4}{8\epsilon_0^2 h^3} \cdot \left( \frac{2p}{n^3} \right)$$

Cuando  $p = 1$ ,

$$f_{cuántica} = \frac{m \cdot e^4}{8\epsilon_0^2 h^3} \cdot \left(\frac{2}{n^3}\right) = f_{clásica}$$

Queda demostrado que para valores muy grandes del número cuántico principal la ecuación cuántica tiende a la clásica

Ahora veamos que ocurre cuando el número cuántico principal, no es grande. Tomamos por ejemplo  $n = 2$  y  $p = 1$ ,

$$f_{cuántica} = \frac{m \cdot e^4}{8\epsilon_0^2 h^3} \cdot \left(\frac{1}{(n-p)^2} - \frac{1}{n^2}\right) = \frac{m \cdot e^4}{8\epsilon_0^2 h^3} \cdot \left(\frac{3}{4}\right)$$

$$f_{clásica} = \frac{m \cdot e^4}{8\epsilon_0^2 h^3} \cdot \left(\frac{2}{n^3}\right) = \frac{m \cdot e^4}{8\epsilon_0^2 h^3} \cdot \left(\frac{1}{4}\right)$$

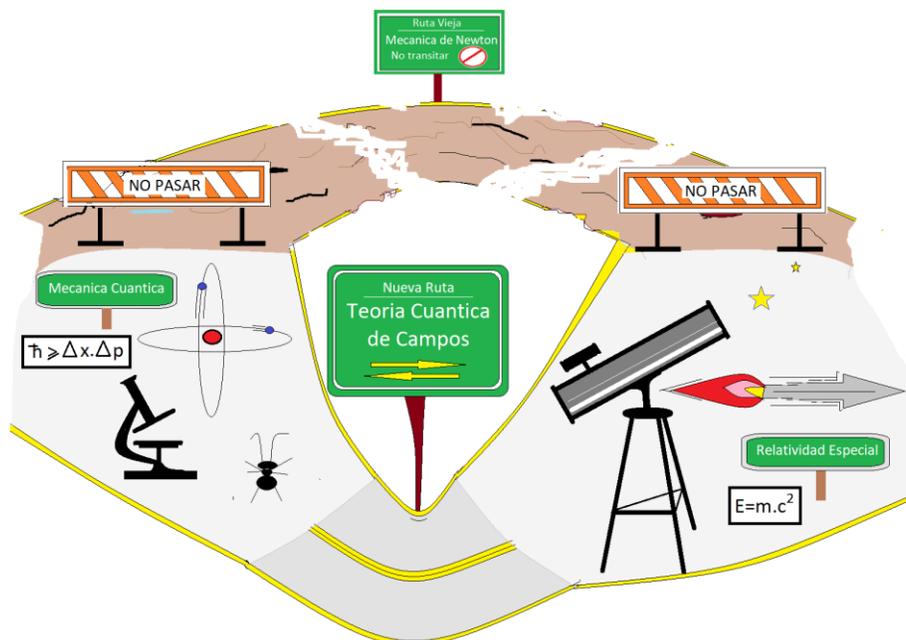
Calculemos la diferencia entre los dos valores a través del porcentaje,

$$\frac{f_{cuántica}}{f_{clásica}} \cdot 100 \% = \frac{\frac{m \cdot e^4}{8\epsilon_0^2 h^3} \cdot \left(\frac{3}{4}\right)}{\frac{m \cdot e^4}{8\epsilon_0^2 h^3} \cdot \left(\frac{1}{4}\right)} \cdot 100 \% = 300 \%$$

O sea un 300 % de diferencia para valores cuánticos pequeños.

## Teoría cuántica de campos

Hemos visto como el desarrollo de la mecánica cuántica y los logros de la relatividad, abrieron caminos nuevos para la física, pero había algunos inconvenientes que tenían que ser solucionados para darle consistencia a las ideas.



Es el caso de la ecuación de Schrödinger, que podía resolver con enorme precisión la evolución en el tiempo de una partícula a nivel subatómico pero solo a bajas energías (bajas velocidades), su idea se desprende de los trabajos de Louis de Broglie, cuando propone al electrón (o materia en general) como asociados a una onda.

Esta ecuación se resuelve utilizando una función de onda, lo que no quedaba claro era el significado físico de esa función de onda.

Max Born en 1926 la interpretó como que el cuadrado de la amplitud de la función de onda era igual a la densidad de probabilidad de encontrar la partícula en dicho estado. Junto al principio de incerteza de Heisenberg, la imposibilidad de definir una trayectoria, el colapso de la función de onda al ser medida, el camino que empezaba a tomar la mecánica cuántica, no fue del agrado de Schrödinger quien llegó a lamentarse de haber tenido algo que ver con su desarrollo.

Las nuevas ecuaciones eran validas mientras no se tuviese velocidades relativistas, ahí no funcionaba y era una deficiencia grande ya que dentro del átomo la energía obtenida puede estar relacionada al aumento de velocidad, lo que abre la posibilidad de la creación de nuevas partículas ( $E= m \cdot c^2$ ) y por lo tanto cambia la cantidad de partículas que tenemos.

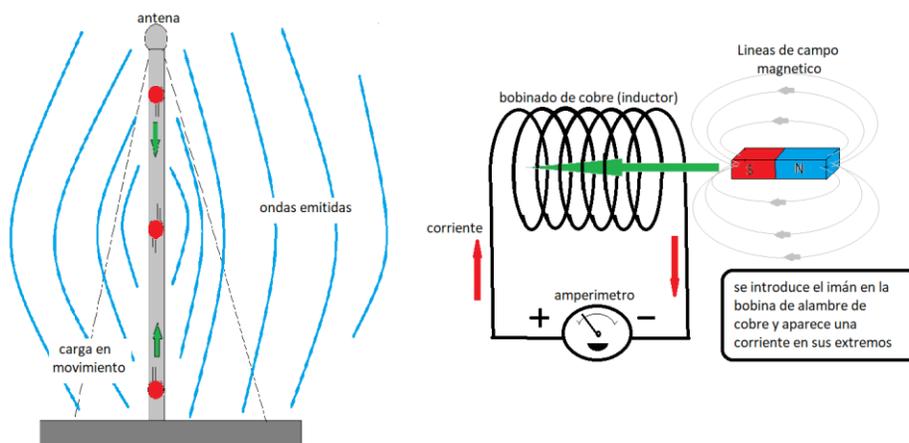
La *Teoría Cuántica de Campos* (TCC) es el formalismo utilizado para el estudio de partículas considerando su energía alta y la posibilidad de que el número de partículas cambie (creación y destrucción).

<p><i>Formalismo:</i> es el uso de una convención arbitraria basada en la lógica matemática para dar cuenta de observaciones experimentales y que conducen a una ley física. En nuestro caso podemos decir que como la TCC es un formalismo, entonces es un acuerdo que sostiene principios definidos por los físicos.</p>
--

Desde la época de Newton cuando se hablaba de gravitación era llamativo el hecho de que dos cuerpos que no estaban en contacto se atraigan mutuamente. También ocurría con la fuerza eléctrica, donde dos cargas podían atraerse o repelerse pero nunca haberse tocado, entonces, ¿cómo se daba cuenta una de la presencia de la otra? A través de los campos que rodeaba a las partículas. Se lo denominó acción a distancia y se describía a la gravitación como un *campo gravitatorio*

producido por la presencia de una masa, un *campo eléctrico* era provocado por la presencia de una carga y también podemos decir de un imán (o la variación de corriente) que produce un *campo magnético*.

En particular, en el caso del campo eléctrico y el campo magnético, tenemos las ecuaciones de Maxwell que los describen y donde reconocemos una vinculación entre ellos, cuando un campo magnético varía produce un campo eléctrico y viceversa.



Estos campos eran los que operaban entre masas, cargas e imanes. Con la formulación de Planck de la energía en forma de cuantos (o lo que es lo mismo, cantidades proporcionales a la constante  $h$ ), y su posterior comprobación en experimentos, hubo que entender de otra manera los campos, sobre todo el efecto fotoeléctrico comprobó que la energía viajaba en cuantos como los descritos por Planck, acercándonos al concepto de partícula más que al de onda, pero sin embargo también era una onda (interferencia de Young). Lo mismo ocurría con el electrón el cual Louis de

Broglie había mostrado su carácter ondulatorio y se fortaleció la idea de la naturaleza dual de las partículas.

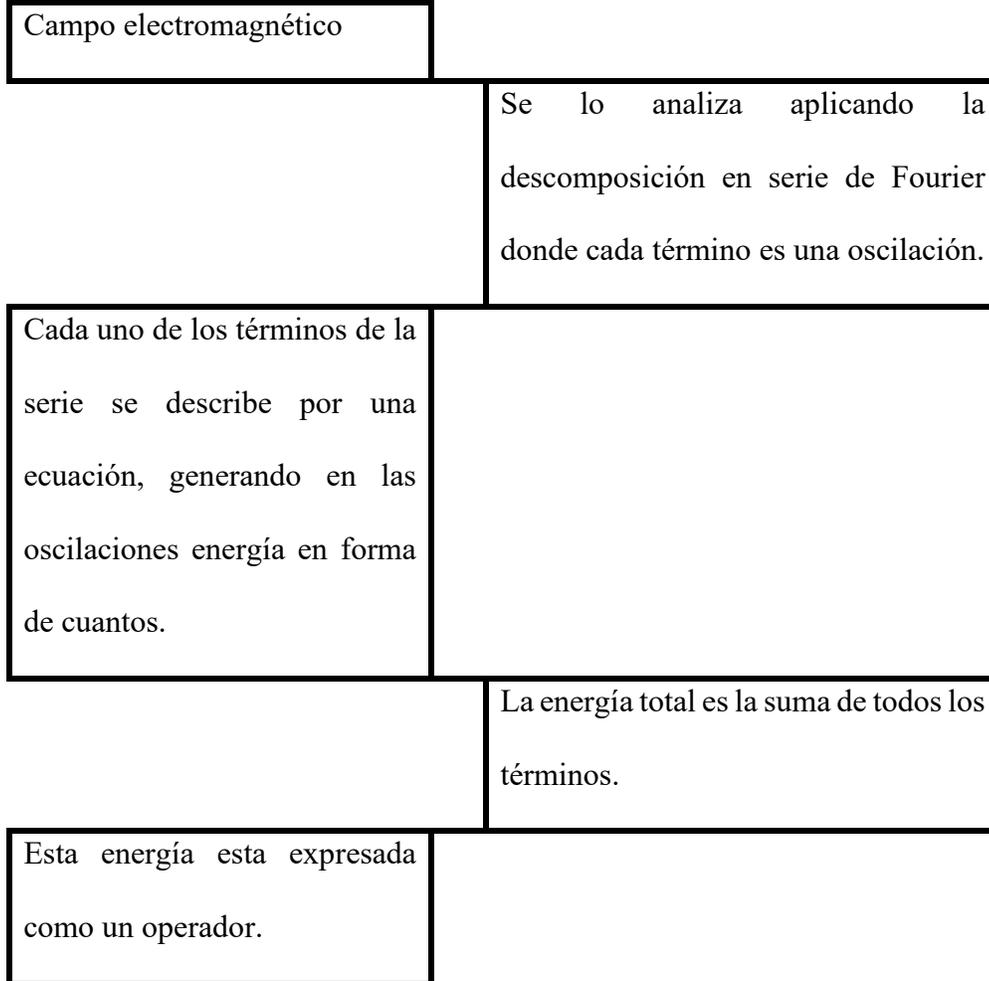
La electrodinámica cuántica es el paradigma de la TCC, uno de sus fundamentos es que considera que una partícula cuántica es una excitación en un campo. Los electrones son perturbaciones en el campo de electrones, los fotones son perturbaciones en el campo de fotones...etcétera. Es más, sería correcto no llamarlas partículas u ondas sino objetos cuánticos del campo al que pertenecen. Otro de los fundamentos es la teoría relativista del electrón de Paul Dirac.

Paradigma: según la Real Academia Española (RAE), es una “...Teoría o conjunto de teorías cuyo núcleo central se acepta sin cuestionar y que suministra la base y modelo para resolver problemas y avanzar en el conocimiento. El paradigma newtoniano.”

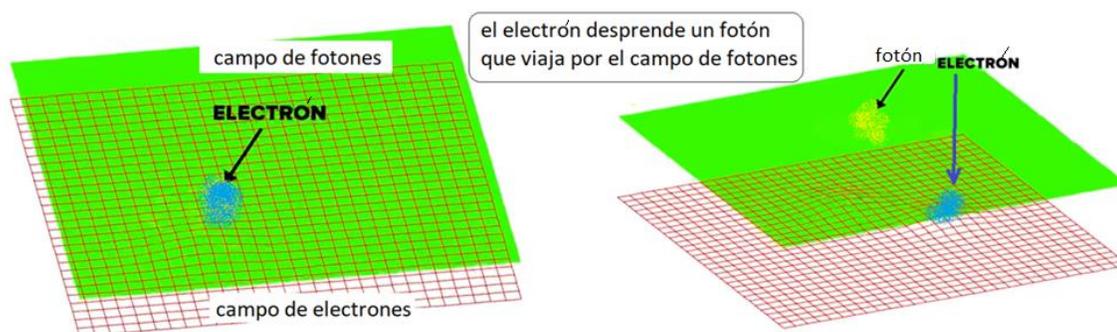
Las partículas no son lo que entendemos clásicamente por partícula, es una excitación en el campo al que pertenece, es decir, es un elemento muy diferente que si puede ser tomado discretamente pero que no es “una esfera pequeña y sólida”.



¿Cómo está cuantificado el campo electromagnético?



La electrodinámica cuántica describe la interacción de los campos de fotones y de electrones como un acoplamiento de esos campos, que son establecidos a través de constantes llamadas de acoplamiento y miden la interacción.



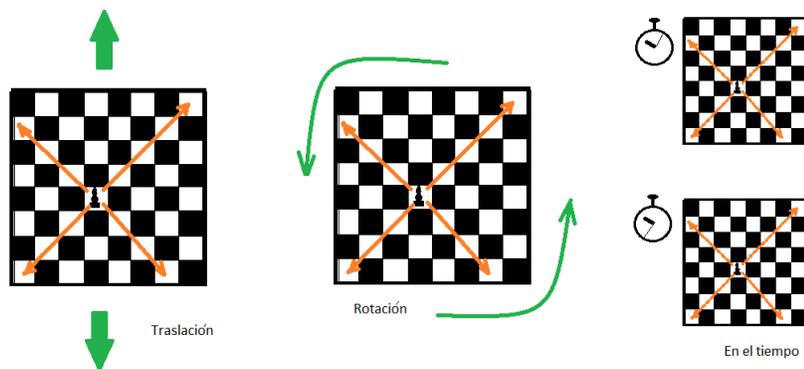
En algunos casos los cálculos producían infinitos, lo que ponía en jaque a la teoría, por lo tanto había que resolverlo. Si bien era un defecto de la teoría no era uno tan grande como para tentar a los científicos a abandonarla. La propuesta que resolvió este inconveniente se encontró en la *renormalización*, que consistía principalmente en obtener las constantes de acoplamiento de la experimentación y no de la teoría (de primeros principios), con estos valores hallados se los podía incluir en las ecuaciones y los infinitos desaparecían.

En la TCC las simetrías juegan un papel importante y vamos a detenernos un instante en ello.

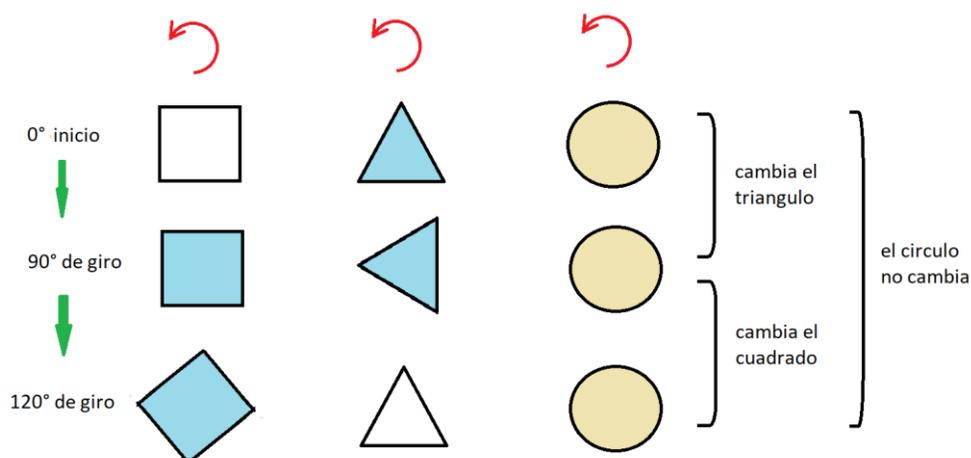
## Simetrías

Acerquémonos al concepto de simetría a través de un ejemplo brindado por Richard Feynman.

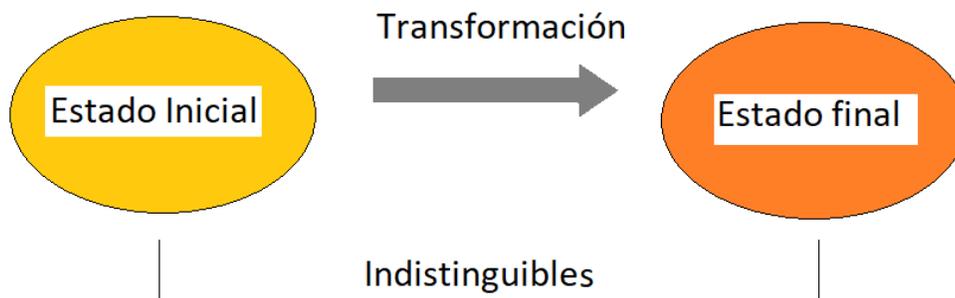
Un alfil en un juego de ajedrez se mueve en diagonal sin importar si trasladamos el tablero de lugar, rotamos el tablero o jugamos hoy, mañana o pasado mañana, decimos que el alfil se mueve en diagonal y es invariante respecto a traslaciones, rotaciones y en el tiempo.



Si hacemos rotar un cuadrado, un triángulo y un círculo, veremos que cada  $90^\circ$  de giro, el cuadrado se presenta con la misma apariencia que antes (si alguien no hubiese visto el giro, diría que no se ha movido) esto mismo sucede con el triángulo pero para un giro de  $120^\circ$  y para el círculo, con cualquier rotación que le apliquemos se verá siempre igual.



Podemos decir que una simetría es una transformación que se realiza a un sistema de modo tal que el estado final y el inicial son equivalentes.

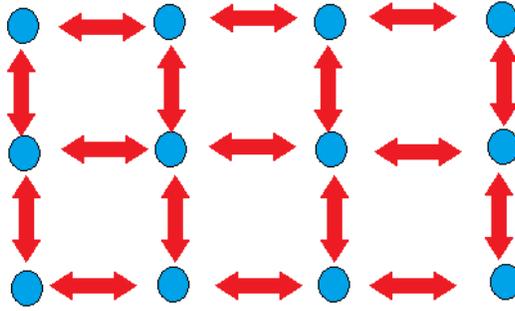


Si llamamos  $G$  al conjunto de las transformaciones  $f$  que dejan invariante a este sistema físico,  $G$  es entonces un *grupo de simetría*.

Las simetrías podemos distinguir las en espacio-temporales y en internas. Las primeras son por ejemplo las que vimos en la analogía dada anteriormente del tablero de ajedrez y como mueve el alfil, su movimiento no depende del tiempo ni del lugar físico donde se mueva ni el tablero esta rotado o no. Las segundas no son tan claras, pero diremos que son las que se dan en el espacio de soluciones de aquellas propiedades que se estudian.

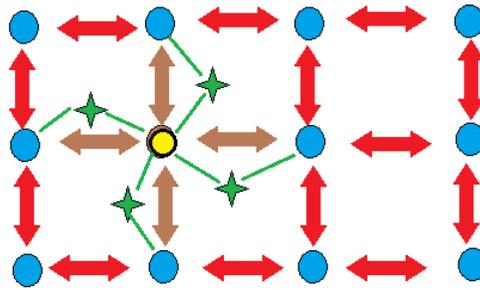
A las simetrías internas podemos dividir las también en globales y locales. Las simetrías locales son relativas a la carga eléctrica y a la carga de color, de la que hablaremos más adelante pero podemos decir por ahora que la carga de color es la carga de los quarks del mismo modo que lo es la carga eléctrica para el electrón. Estas son las simetrías gauge. Las simetrías globales no las abordaremos en este trabajo.

Imaginemos un grupo de personas haciendo un trabajo de oficina, y ordenados dentro del espacio físico donde desarrollan su tarea de la siguiente manera,



Los círculos azules son las personas que trabajan en la oficina y las flechas rojas indican con quiénes se deben relacionar. Una simetría global sería decir que estos oficinistas se comunican en idioma castellano entre ellos, podríamos cambiarlo y hacer que hablen entre ellos en chino y se conserva el funcionamiento de la oficina, cada uno de ellos no cambia su función por este motivo.

¿Pero qué pasaría si uno solo de ellos empieza a hablar chino y el resto no?, entonces para no alterar la comunicación entre ellos, deberíamos colocar un traductor en cada flecha de comunicación que este empleado tiene con sus compañeros.



✦ Traductores

Cada uno de estos traductores es el mediador de la interacción entre este oficinista que ha modificado una propiedad suya con los demás oficinistas. Podemos hablar de un campo de oficinistas y un campo de traductores.

Si en vez de empleados tenemos electrones, y en vez de traductores tenemos fotones, la analogía se puede visualizar, decimos que tenemos un campo de electrones y para interactuar entre ellos, un campo de fotones.

Las simetrías se toman en el sentido de invariancia bajo la transformación de algunos parámetros, lleva al concepto de conservación de ciertos parámetros (*Teorema de Noether*),

Simetrías bajo Translaciones Temporales	→ Conservación de la Energía
Simetrías bajo Translaciones Espaciales	→ Conservación del Momento
Simetrías bajo Rotaciones	→ Conservación del Momento Angular

Además, contiene la idea de interacciones a través de sus mediadores. Pero teniendo en cuenta estas premisas de simetría nos encontramos con que los bosones W y Z, no se atienen a la simetría propuesta para ellos, ¿por qué?, según el concepto de simetría que se define para el modelo estándar, estas partículas no deberían tener masa para respetar la simetría de gauge, y no solo tienen sino que son muy masivas.

El electrón y los quarks, tienen masa y cuando forman partículas más complejas estas adquieren masa no solo de sus partículas constituyentes sino de la energía cinética y potencial de sus componentes (lo vimos antes).

No podemos, por otro lado, renunciar a las simetrías que están en la base de las interacciones debido a que si lo hacemos las inconsistencias que aparecen son aún peores.

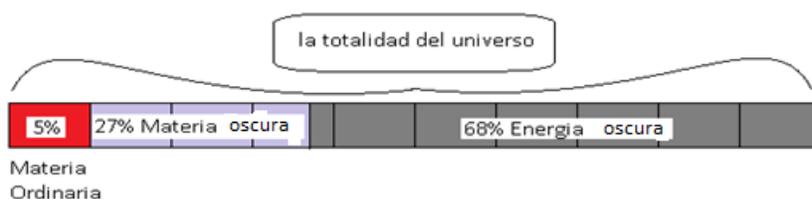
Debido a ello se pensó que las partículas podrían tener algún mecanismo por el cual adquirieran masa, y ese mecanismo fue hallado por François Englert, Robert Brout y Peter Higgs.

### ***Las partículas elementales hoy***

#### *Descripción del modelo estándar de partículas*

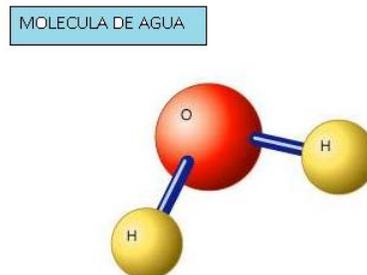
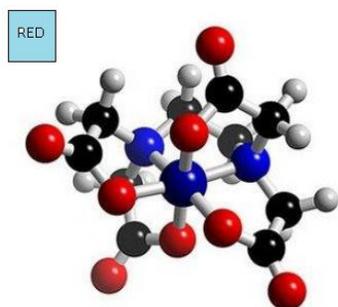
Este modelo describe la interacción de las partículas elementales (no compuestas de otras partículas) que forman la materia en el cosmos y sus interacciones bajo consideraciones de simetrías de gauge (simetrías de “medida”), las cuales dan fundamentos a la *Teoría Cuántica de*

*Campos (TCC)*. La simetría de gauge nos habla de la invariancia de ciertas medidas en razón de algún cambio, si se da esta invariancia se dice que son simétricos. No todo el cosmos, solo es capaz de describir una porción pequeña, el 5 % aproximadamente, el resto que está formado por materia oscura (27 %) y energía oscura (68 %). Sobre la materia y la energía oscura se sabe que no es materia ordinaria (materia bariónica) ni neutrinos, no emite radiación electromagnética ni interactúa con ella, se la detecta por sus efectos gravitacionales sobre la materia ordinaria, por ejemplo: la velocidad de rotación de las galaxias se explica teniendo en cuenta este tipo de materia. Todavía hay mucho por descubrir con respecto a su naturaleza.

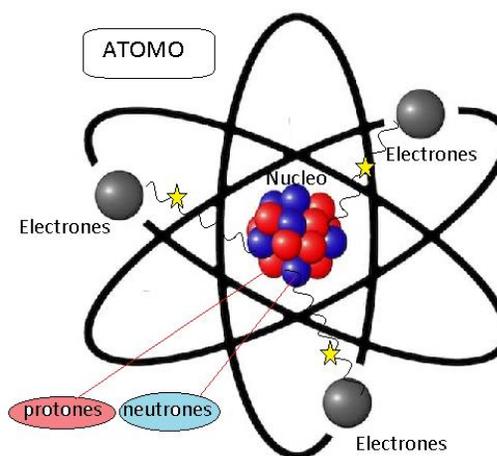


La materia ordinaria la constituye todo lo que podemos ver, sentir o detectar ya sea por su sola presencia o por sus efectos. Las estrellas, los planetas, los objetos que nos rodean, las células, los átomos, y cuanto más nos adentramos en la intimidad de la materia más pequeñas serán las partículas que encontremos.

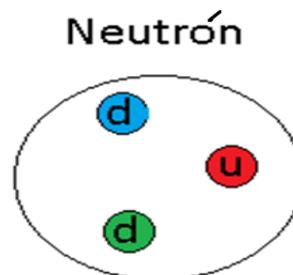
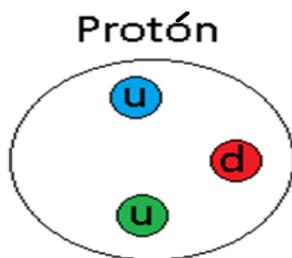
Las moléculas son las constituyentes de los materiales que conocemos y dentro de estas moléculas encontraremos a los átomos formados por electrones, y a su núcleo formado por protones y neutrones, estos a su vez están formados por elementos más pequeños,



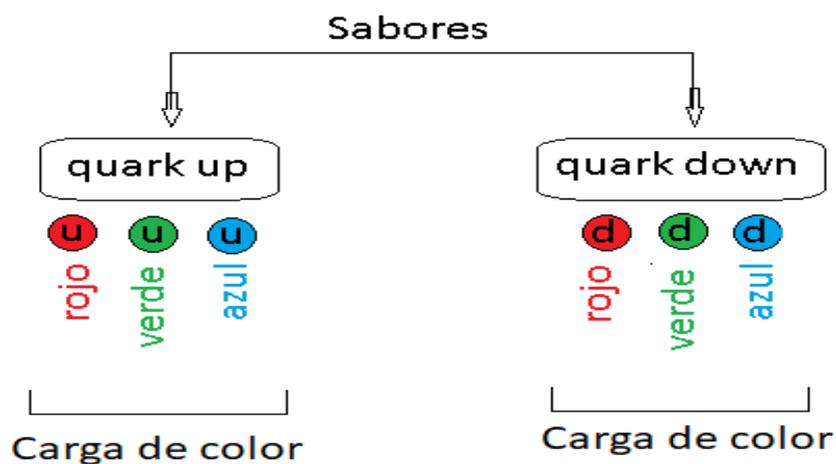
En el modelo estándar, el átomo está formado por electrones que son partículas indivisibles (hasta ahora) y por lo tanto las consideraremos elementales y el núcleo que contiene protones y neutrones, que fueron tomados inicialmente como elementales, pero luego se descubrió que estaban constituidos por



otras partículas más pequeñas llamadas *quarks*. Para entender su constitución hacen falta solo dos clases de quarks, los *up* y los *down*. Los protones tienen dos quarks up y uno down, los neutrones en cambio tienen dos down y un up.



Cada uno de los tres quarks que constituyen un protón o un neutrón, llamados quarks de valencia, no solo se distinguen en up o down (llamados sabores) sino que también se los identifica por una carga de color que cada uno de ellos tiene. Tenemos que tener cuidado y comprender que la denominación “sabor” y “color” es solo para representar una característica que se encuentra en estas partículas, y nada tiene que ver con que alguien haya probado sabor o que haya visto sus colores. Cuando los quarks están confinados formando partículas se las denominan *hadrones* (en griego significa denso).



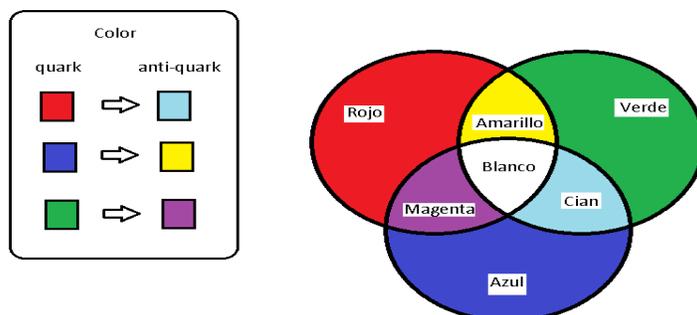
No es casualidad que sean el verde, rojo y el azul, debido a que en materia de luz la suma de estos tres colores da el blanco, y lo que dice la teoría que propone esta idea, *La Cromodinámica Cuántica* es que ellos pueden cambiar de color dentro de la partícula, pero su suma debe seguir siendo blanco.

Los quarks no los encontramos libres, solo los encontramos confinados formando partículas como las que vimos.

A cada uno de estos quarks le corresponde un *antiquark* (una antipartícula). Veremos que todas las partículas tienen una antipartícula que les corresponde en el grafico que sigue.

Quark	Antiquark
$u$ (up)	$\bar{u}$ (antiquark up)
$d$ (down)	$\bar{d}$ (antiquark down)
$c$ (charm)	$\bar{c}$ (antiquark charm)
$s$ (strange)	$\bar{s}$ (antiquark strange)
$t$ (top)	$\bar{t}$ (antiquark top)
$b$ (bottom)	$\bar{b}$ (antiquark bottom)

Las antipartículas tienen una carga de color representada por el complementario.



De esta manera, un protón está formado por 3 quarks  $u + u + d$ , esto es 2 *quarks up* y 1 *quark down*, donde cada uno tiene un color diferente tal que su suma dé blanco.

Del mismo modo un neutrón está formado por 3 quarks también  $d + d + u$ , 2 quarks *d* y 1 quark *u*, con distintas cargas de color, de modo que su suma dé blanco también, como en los protones.



Hagamos un resumen de lo visto hasta ahora, sobre las partículas elementales que encontramos,

**Electrón** = forma parte de las partículas que se denominan *Leptones*, es una partícula de carga negativa igual a -1, de masa pequeña comparada con la del protón o neutrón, es de  $0,511 \text{ Mev}/c^2$  y de espín  $\frac{1}{2}$ . Está unido al núcleo a través de una fuerza eléctrica.

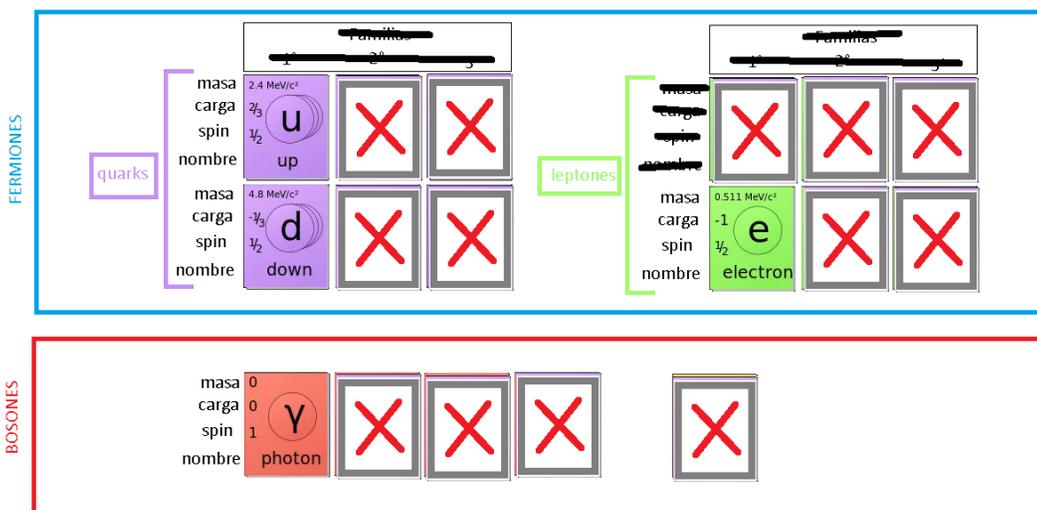
**Quarks** = vimos que aparecieron dos tipos de quarks uno up y otro down, cada uno de ellos se presenta en tres colores distintos, rojo, verde y azul. Tienen carga eléctrica fraccionaria, para el quark up es de  $+\frac{2}{3}$  y para el quark down es de  $-\frac{1}{3}$ . La masa para el quark up es de  $2,4 \text{ Mev}/c^2$  y para el quark down es de  $4,8 \text{ Mev}/c^2$  y el espín de cualquiera de ellos es  $\frac{1}{2}$ .

El electrón que tiene carga negativa, es atraído por el protón de carga positiva, esta fuerza de atracción en el modelo estándar se define a través del intercambio de una partícula llamada fotón.

En el modelo estándar las fuerzas siempre están representadas por un intercambio de partículas que median entre ellas. Son las que a través de ese intercambio producen la fuerza de atracción o repulsión.

**Fotón** = es la partícula mediadora de la fuerza electromagnética. La fuerza de atracción coulombiana entre los electrones y los protones se establece debido al intercambio de esta partícula y de este modo se manifiesta la fuerza de atracción entre ellos. Esta partícula no tiene masa ni tiene carga eléctrica, pero si tiene espín y vale 1 (más adelante hablaremos del espín).

Podemos armar un cuadro e ir completándolo a medida que vayamos descubriendo las partículas que hasta ahora hemos probado que existen, se vería así,



Nos falta descubrir el resto de las partículas. Como vemos en el cuadro, hemos hecho una división entre partículas que llamamos fermiones y bosones, esta división se hace teniendo en cuenta el espín de la partícula.

Digamos primero que se llaman fermiones por que la forma estadística de contar sus estados de ocupación siguen la estadística de Fermi-Dirac, y los bosones reciben ese nombre porque cumplen con la estadística de Bose-Einstein. Pero ¿qué es el espín?, expliquemos primero que no es el espín.

Suele decirse equivocadamente que puede considerarse a la partículas girando sobre su propio eje y sobre su orbita alrededor del núcleo (modelo planetario), esto esta mal. Eso no es el espín, es una característica nueva que nace con la mecánica cuántica y que asocia a la partícula con un valor de momento magnético intrínseco. Si lo explicamos de forma clásica ya no es cuántico y no sería correcto, por eso debemos evitar verlo así.

Ralph Kronig, George Uhlenbeck y Samuel Goudsmit en 1925 probaron que además del momento orbital que el electrón tiene respecto del núcleo, tenía un momento orbital propio y lo llamaron *espín*. El espín es un número cuántico y toma valores discretos, como  $\pm \frac{1}{2}$ ,  $\pm 1$ ,  $\pm 3/2$ .

No podemos interpretarlo como el giro del electrón, sino más bien como un parámetro más de la partícula para definir su estado de energía.

Es importante esta diferenciación debido a que los fermiones no comparten su estado de energía y por lo tanto no pueden tener los cuatro números cuánticos (que identifican su estado) iguales a otro fermión, esto es;

- El número principal (**n**)= está relacionado al nivel de energía que ocupa la partícula.

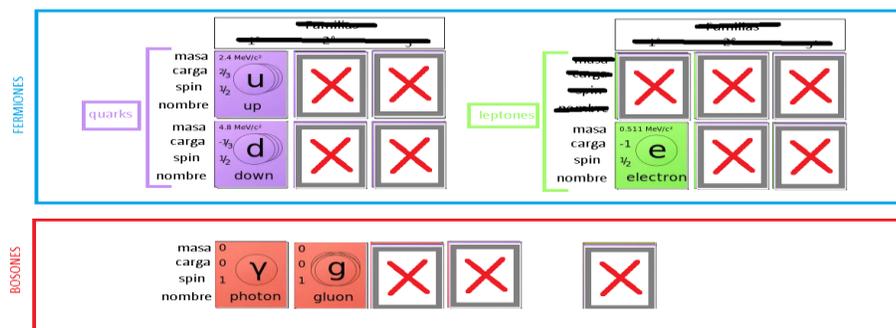
- El número secundario (o azimutal) ( $l$ )= indica la forma del orbital y el subnivel que ocupa.
- El número magnético ( $m$ ) = indica la orientación magnética del subnivel.
- El número de espín ( $s$ ) = indica el momento angular intrínseco del electrón.

A esta ley se la conoce como *Principio de exclusión de Pauli*.

Mirando el cuadro que hemos completado hasta ahora, podríamos preguntarnos ¿cómo es posible que dos quarks de una misma cantidad de carga se mantengan juntos tanto en el protón como en el neutrón?, ¿no es que la fuerza eléctrica es muy fuerte y entonces deberían repelerse?, la respuesta que da el modelo es que cuando se presentan quarks de distintos colores, se intercambian entre ellos unas partículas que los mantiene unidos fuertemente a cortas distancias venciendo a la fuerza electromagnética (acordémonos que la fuerza es un intercambio de partículas mediadoras), estas partículas se llaman *gluones*, y son las mediadoras de la *fuerza fuerte*, es claro que debe ser muy fuerte para superar a la fuerza eléctrica que los repele pero solo a cortas distancias, es necesario esto para mantenerlos unidos dentro del protón o neutrón.

Agregamos esta partícula al cuadro,

**Gluón**= partícula mediadora de la fuerza fuerte que se intercambia entre quarks (partículas con colores), su masa es nula y su carga también pero su espín es de valor igual a 1. Es un bosón.



Los gluones nos explican por qué los quarks se mantienen juntos formando protones y neutrones, pero los protones finalmente tienen carga eléctrica +1 (los neutrones obviamente no tienen carga eléctrica) y de nuevo nos preguntamos ¿qué los une, si no es una fuerza eléctrica?

Se mantienen juntos debido a que como consecuencia de la fuerza fuerte se manifiesta una fuerza llamada *nuclear*.

Existe un mediador específico para esta *fuerza nuclear* y es consecuencia de la fuerza fuerte y se manifiesta con el intercambio de partículas llamadas *piones* ( $\pi^+$ ,  $\pi^-$ ,  $\pi^0$ ), no son partículas elementales, están formados por un quark y un antiquark.

$\pi^+ = u\bar{d}$ , formado por un quark  $u$  y un antiquark  $d$ .

$\pi^- = d\bar{u}$ , formado por un quark  $d$  y un antiquark  $u$ .

$\pi^0 = u\bar{u}, d\bar{d}$ , formado por un quark y un antiquark sea  $u$  o  $d$ .

Existen más partículas, una de ellas fue propuesta por Wolfgang Pauli en 1930 mientras estudiaba el decaimiento de un neutrón en estado libre, el cual produce un protón, un electrón y una partícula propuesta por él, que fue llamada luego *neutrino* por Enrico Fermi.

En estado libre el neutrón tiene una vida media de aproximadamente 881,5 segundos.

Dentro del núcleo se produce un decaimiento que es llamado *decaimiento  $\beta^-$* ,

$$n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$$

Y existe otro decaimiento llamado *decaimiento  $\beta^+$*  que solo se da dentro del núcleo también, que consiste en que el protón decae en un neutrón, un electrón positivo y un neutrino,

$$p^+ \rightarrow n + e^+ + \nu_e$$

Las propiedades proyectadas sobre el neutrino indicaban que era de masa despreciable y de carga nula, por lo que no podía interactuar con fotones, y tampoco con gluones, esto hacia su detección muy difícil.

La detección finalmente la lograron C. Cowan y F. Reines en 1956. Luego en 1962 se descubrió la existencia de dos neutrinos, el *electrónico*, el *muónico* y luego en el 2000, el neutrino *tauónico*.

Los experimentos indicaron que los neutrinos sí contaban con masa, pero no tenían carga eléctrica efectivamente y su espín era de  $\frac{1}{2}$ .

**Neutrino electrónico**= su carga eléctrica es nula y su espín es de  $\frac{1}{2}$  y es por lo tanto un fermión.

**Neutrino muónico** = su carga eléctrica es nula y su espín es de  $\frac{1}{2}$  y es por lo tanto un fermión.

**Neutrino tauónico** = su carga eléctrica es nula y su espín es de  $\frac{1}{2}$  y es por lo tanto un fermión.

En el año 1936 los físicos C. Anderson y S. Neddermeyer, descubrieron una partícula desconocida mientras estudiaban los rayos cósmicos en una cámara de niebla, esta partícula se

curvaba de una manera distinta a los electrones y los protones, frente a un campo electromagnético, se trataba del *muón*.

Posteriormente en 1974 el experimentador M. Lewis Perl descubrió en la colisión de un electrón con un positrón otra partícula llamada *Tau*, entonces,

**Muon**= masa de  $105,7 \text{ Mev}/c^2$ , carga eléctrica igual a -1, y espín de  $\frac{1}{2}$  y es por lo tanto un fermión.

**Tau**= masa de  $1,777 \text{ Gev}/c^2$ , carga eléctrica igual a -1, y espín de  $\frac{1}{2}$  y es por lo tanto un fermión.

Ya hemos dicho que los neutrinos no interactúan con campos eléctricos, por lo que no intercambian fotones, ni cargas de color, por lo que no intercambian gluones, pero si lo pueden hacer con los electrones y los quarks y lo hacen a través de los mediadores  $Z^0$ ,  $W^+$  y  $W^-$  estos son los mediadores de la *fuerza débil* debido a que se compara su fuerza con la fuerza fuerte.

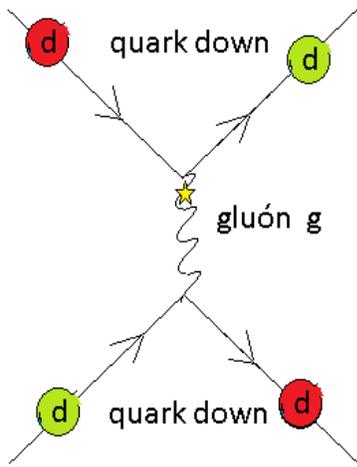
**W bosón** = tiene una masa de  $80,4 \text{ Gev}/c^2$ , su carga eléctrica puede ser +1 o -1 y su espín es de 1, por lo tanto, es un bosón.

**Z bosón** = tiene una masa de  $91,2 \text{ Gev}/c^2$ , su carga eléctrica es nula y su espín es de 1, por lo tanto, es un bosón.

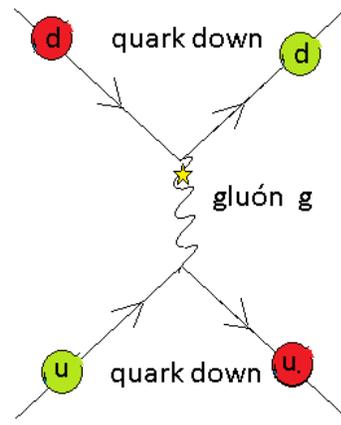
Este mediador es fundamental para entender los procesos de emisión radioactivos.

El cuadro se va completando de la siguiente manera,

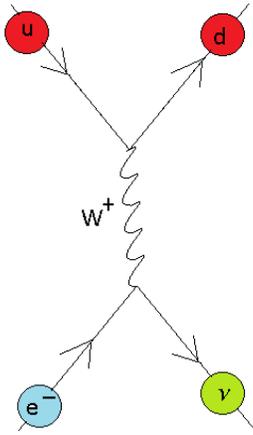




*down verde*, emite un gluón y el que era rojo sale como verde, pero sigue siendo de tipo down y el verde sale como rojo, pero no cambia el tipo como se muestra en el dibujo de la derecha.



$w^\pm$



La figura de la izquierda muestra un quark de tipo *up* rojo que emite un  $W +$  y se transforma en un quark de tipo *down* pero sigue siendo rojo. Este  $W +$  lo recibe un electrón y se transforma en un neutrino electrónico. El bosón  $W +$ , no cambia el color de las partículas, sino que cambia el tipo de ellas.

Ahora la a un quark de tipo down rojo que emite quark de tipo up sin cambiar de color.

Al bosón emitido lo absorbe un transforma en un electrón, es lo que

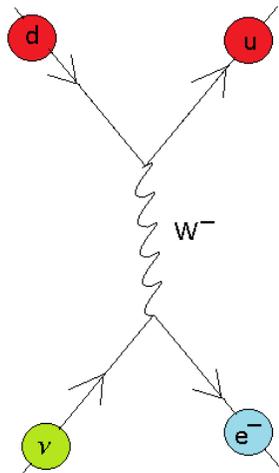
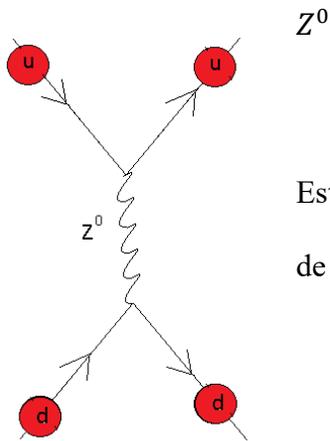


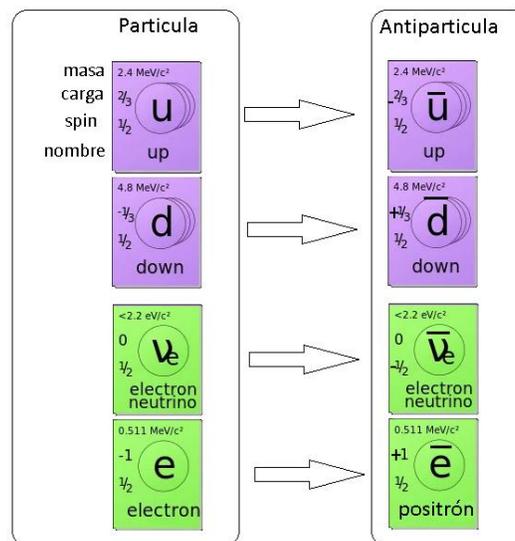
figura de la derecha muestra un  $W^-$  y se transforma en un neutrino electrónico y se muestra abajo la figura.



$Z^0$

Este bosón interactúa con todas las partículas sin producirles cambios de sabor.

Por cada una de las partículas mencionadas hasta ahora (y también las que vendrán luego) existe una antipartícula, que tiene como característica que sus rótulos son opuestos a los de las partículas.



Otra interacción posible es la de un electrón con un positrón dando como resultado la creación de dos fotones.

Las partículas las podemos agrupar formando *familias*,

- 1° familia (la que ya vimos) formada por el quark up y el quark down.
- 2° familia formada por el quark *charm* para el quark up y el quark *strange* para el quark down.
- 3° familia formada por el quark *top* para el up y charm y el quark *bottom* para el down y strange.

Podemos ahora dibujar nuestra tabla “*casi*” completa (explicaremos al final el bosón de Higgs),

**Charm**= tiene una masa de  $1,27 \text{ GeV}/c^2$ , una carga eléctrica de  $\frac{2}{3}$  y su valor de espín es de  $\frac{1}{2}$ , y es por lo tanto un fermión.

**Strange**= tiene una masa de  $104 \text{ MeV}/c^2$ , una carga eléctrica de  $-\frac{1}{3}$  y su valor de espín es de  $\frac{1}{2}$ , y es por lo tanto un fermión.

**Top**= tiene una masa de  $171,2 \text{ GeV}/c^2$ , una carga eléctrica de  $\frac{2}{3}$  y su valor de espín es de  $\frac{1}{2}$ , y es por lo tanto un fermión.

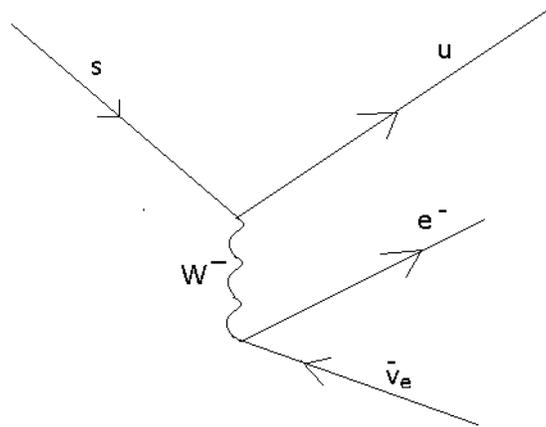
**Bottom**= tiene una masa de  $4,2 \text{ GeV}/c^2$ , una carga eléctrica de  $-\frac{1}{3}$  y su valor de espín es de  $\frac{1}{2}$ , y es por lo tanto un fermión.

Con estos “ladrillos” no solo podemos construir protones y neutrones, sino que podemos formar partículas diversas llamadas *Hadrones* que se subdividen según la cantidad y el tipo de quarks que lo forman, en *Bariones* y *Mesones*,

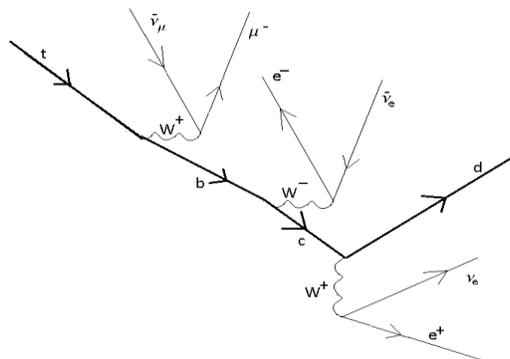
HADRONES	
BARIONES	MESONES
<p>Están formados por tres quarks, debe su nombre a la suposición sobre su masa que se hizo cuando se los descubrió.</p> <p>Los más comunes son el protón y el neutrón, existen otros bariones, pero son inestables.</p>	<p>Son partículas formadas por otras dos, un quark y un antiquark. Son inestables.</p>

Notemos que todas las partículas formadas por este tipo de quarks tienen cargas enteras, solo los quarks tienen carga eléctrica fraccionaria.

Las partículas de la segunda y tercera familia no se ven hoy de modo natural, no forman la materia ordinaria debido a su inestabilidad. El quark strange decae, por ejemplo, en un quark up emitiendo un  $W^-$  que a su vez decae en un electrón y un antineutrino electrónico.



El quark de tipo top decae emitiendo un  $W^+$  y produciendo una partícula bottom que sigue decayendo en un quark charm y emite un  $W^-$  este a su vez se desintegra en un electrón y un antineutrino electrónico, y el quark charm en un quark down y emite también un  $W^+$  que se desintegra nuevamente en un positrón y un neutrino electrónico.



Las partículas de la 2° y 3° familia pueden producirse en laboratorios actualmente utilizando mucha energía.

Los muones son particularmente interesantes debido a que como son producidos en las capas altas de la atmósfera y su vida media no alcanzaría para que podamos detectarlos sobre la superficie, su detección es una de las tantas comprobaciones de la dilatación del tiempo a velocidades cercanas a la de la luz predichas por la relatividad.

El colisionador de Hadrones LHC en Ginebra (Suiza), produce choques de partículas con elevadas energías para producir estas partículas que naturalmente tienden a decaer y hace muy difícil su detección en el universo.

Por último, mencionemos a la partícula que nos quedó por describir que es el *bosón de Higgs*.

Esta partícula es la responsable de dar masa a aquellas partículas que interactúan con ella, se la representa siempre como si el espacio estuviese lleno de una mezcla muy viscosa que de algún modo fricciona con la partícula en función de la masa que esta partícula va a tener, mayor fricción, más masa y viceversa.

**bosón de Higgs**= su masa es aproximadamente de  $126 \text{ GeV}/c^2$  su carga eléctrica es nula y su espín es nulo también.

La tabla que buscábamos queda completa entonces, y es la siguiente,

		FERMIONES					
		quarks			leptones		
		Familias					
		1°	2°	3°	1°	2°	3°
FERMIONES	masa	$2.4 \text{ MeV}/c^2$	$1.27 \text{ GeV}/c^2$	$171.2 \text{ GeV}/c^2$	$<2.2 \text{ eV}/c^2$	$<0.17 \text{ MeV}/c^2$	$<15.5 \text{ MeV}/c^2$
	carga	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0	0
	spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	nombre	u	c	t	electron neutrino	muon neutrino	tau neutrino
	nombre	up	charm	top	electron	muon	tau
	nombre	down	strange	bottom	electron	muon	tau
BOSONES	masa	0	0	$91.2 \text{ GeV}/c^2$	$80.4 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$	
	carga	0	0	0	$\pm 1$	0	
	spin	1	1	1	1	1	0
	nombre	$\gamma$	g	Z	W	H	
	nombre	photon	gluon	Z boson	W boson	Higgs boson	
	nombre						



1122,83m de lado, ¿cómo buscar cosas tan pequeñas como un átomo de hidrógeno entre bloques tan gigantes? No está de más volver a recordar que es solo una analogía de tamaños, no es que el fotón sea  $2,27 \cdot 10^{39}$  veces más grande que el mediador de interacción gravitacional. No va a ser tarea sencilla encontrar a los responsables de la fuerza gravitatoria a nivel atómico, pero el ser humano ha logrado cosas que parecían imposibles y eso nos permite ser optimistas.

### *Mecanismo de Higgs*

El mecanismo de Higgs es el modo por el cual las partículas pueden adquirir masa, en una teoría de gauge como lo es el modelo estándar. Conviene aclarar que no toda la masa viene dada por este proceso.

### *Masa en el protón*

Un protón está formado por dos quarks up y un quark down, y por gluones que son los mediadores de la fuerza que mantiene unidos a estos.

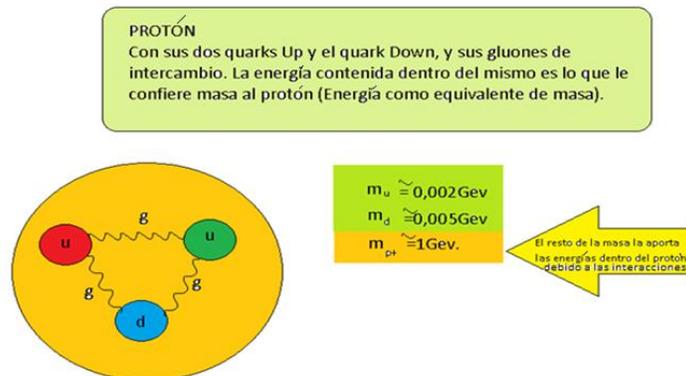
Si sumamos la masa de los tres quarks llegamos a el valor de  $9,6 \text{ MeV}/c^2$  (tomando las masas del cuadro más abajo del modelo estándar) y sabemos que el protón tiene una masa 1836 veces de la del electrón, esto es  $938,3 \text{ MeV}/c^2$ .

Tres generaciones de la materia (fermiones)

	I	II	III	Bosones de gauge	
Quark	masa → 2.4 MeV/c <sup>2</sup> carga → 2/3 espín → 1/2 nombre → <b>u</b> up	masa → 1.27 GeV/c <sup>2</sup> carga → 2/3 espín → 1/2 nombre → <b>c</b> charm	masa → 171.2 GeV/c <sup>2</sup> carga → 2/3 espín → 1/2 nombre → <b>t</b> top	masa → 0 carga → 0 espín → 1 nombre → <b>γ</b> Foton	masa → 0 carga → 0 espín → 2 nombre → <b>G</b> Graviton
	masa → 4.8 MeV/c <sup>2</sup> carga → -1/3 espín → 1/2 nombre → <b>d</b> down	masa → 104 MeV/c <sup>2</sup> carga → -1/3 espín → 1/2 nombre → <b>s</b> strange	masa → 4.2 GeV/c <sup>2</sup> carga → -1/3 espín → 1/2 nombre → <b>b</b> bottom	masa → 0 carga → 0 espín → 1 nombre → <b>g</b> Gluon	masa → 125 GeV/c <sup>2</sup> carga → 0 espín → 0 nombre → <b>H</b> Boson Higgs
	masa → <2.2 eV/c <sup>2</sup> carga → 0 espín → 1/2 nombre → <b>ν<sub>e</sub></b> Neutrino electrónico	masa → <0.17 MeV/c <sup>2</sup> carga → 0 espín → 1/2 nombre → <b>ν<sub>μ</sub></b> Neutrino muónico	masa → <15.5 MeV/c <sup>2</sup> carga → 0 espín → 1/2 nombre → <b>ν<sub>τ</sub></b> Neutrino tauónico	masa → 91.2 GeV/c <sup>2</sup> carga → 0 espín → 1 nombre → <b>Z<sup>0</sup></b> Boson Z	
Lepton	masa → 0.511 MeV/c <sup>2</sup> carga → -1 espín → 1/2 nombre → <b>e</b> Electrón	masa → 105.7 MeV/c <sup>2</sup> carga → -1 espín → 1/2 nombre → <b>μ</b> Muón	masa → 1.777 GeV/c <sup>2</sup> carga → -1 espín → 1/2 nombre → <b>τ</b> Tau	masa → 80.4 GeV/c <sup>2</sup> carga → ±1 espín → 1 nombre → <b>W<sup>±</sup></b> Boson W	

Por lo tanto, la masa de los quarks es apenas superior al 10 % de la masa total... ¿y el resto de masa de dónde saldrá?

La respuesta la da el aporte de la energía cinética y potencial de los gluones y de los quarks. Como se muestra en la figura,



Los gluones no solo interactúan con los quarks, sino que lo hacen entre ellos también.

Notemos que los gluones no tienen masa, pero al tener energía cinética, y ya que la energía es equivalente a la masa ( $E = m \cdot c^2$ ), podemos afirmar que la masa que falta luego de sumar la de los quarks es la masa equivalente a la energía aportada por los gluones.

Volviendo al cuadro de partículas elementales, vemos que todos los fermiones tienen masa, y espín fraccionario. Pero todos los bosones tienen espín entero y todos, salvo el bosón  $W^\pm$  y el bosón  $Z^0$ , tienen masa cero.

Estos bosones que no se ajustan a la regla, rompen la simetría, y la simetría es una guía excelente para la teoría y debe ser justificada.

La nueva pregunta que surgió es ¿de dónde provienen las masas de estos bosones?, que además no solo tienen masas, sino que esta es de un valor muy grande, ya que la fuerza es de alcance muy corto (la fuerza es inversamente proporcional a la masa del mediador).

### *Propuesta de Englert, Brout y Higgs*

Una partícula (sin masa) que se mueva por el campo de Higgs, interactúa con él mediante el bosón de Higgs (recientemente descubierto en el CERN), confiriéndole masa.

*El profesor **Alberto Casas** del Instituto de Física Teórica de Madrid considera una buena aproximación verlo como si fuera un mar de una melaza viscosa (ver en el video en **fuentes de información** 32 min y 27 segundos) y que cuando una partícula se mueve en él, su rozamiento le da la masa, intermediando para ello el bosón de Higgs.*

*Por otro lado, el profesor **Leonard Suskind** de la Universidad de Stanford considera que no debe usarse como ejemplo el modelo de la melaza viscosa para ejemplificar cómo el campo al interactuar con las partículas le confiere masa (ver en el video en fuentes de información 35 min y 35 segundos). Estas diferencias entre dos físicos nos hace pensar que debemos tener cuidado en la elaboración de metáforas y sus alcances y que no debemos olvidar nunca que una analogía tiene por objeto dar a entender un concepto de difícil transmisión y que no es una descripción fiel de la realidad, solo es una aproximación al concepto desde un aspecto familiar.*

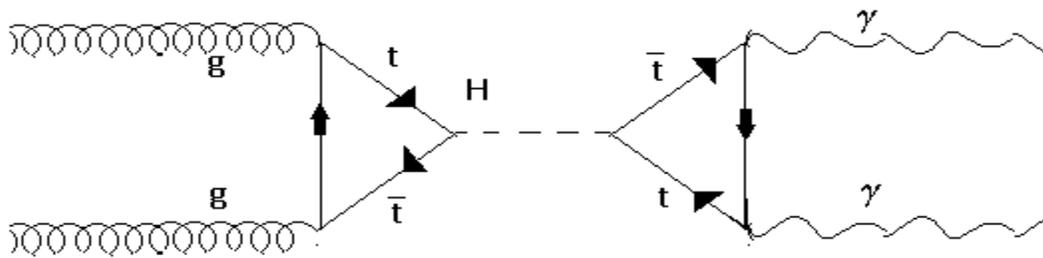
El campo de Higgs interactúa con las partículas de forma tal que hace que estas adquieran masa (inercia) en forma proporcional a la intensidad de la interacción.

Esta interacción está mediada por el bosón de Higgs, que no es ni más ni menos que una excitación del campo de Higgs al evolucionar.

La forma de detectar el bosón de Higgs es hacer chocar (en el colisionador LHC, por ejemplo) dos protones y producir la aparición del bosón, pero como este vive muy poco hay que detectarlo por los resultados de su desintegración.

Un bosón de Higgs se desintegra en dos fermiones o dos bosones o dos fotones, como este producto no nos asegura que provengan de un Higgs, para verificar debemos tener en cuenta solo aquellos que la energía producida sea igual a la calculada con la del Higgs. Desde luego se hizo así en el CERN y así se pudo comprobar su existencia.

### Diagrama de Feynman



- dos gluones interaccionan produciendo dos quarks, top y antitop (son el par de quarks más pesados y por lo tanto los de mayor interacción)
- estos a su vez producen un bosón de Higgs
- luego el bosón se desintegra a través de un bucle de quarks tops de nuevo
- y emite dos fotones

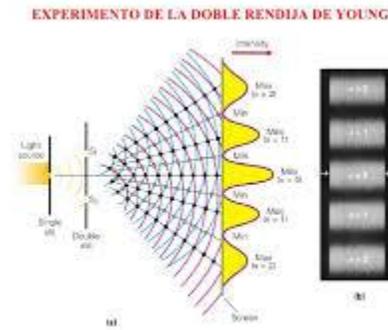
A través de la detección de esos dos fotones es que se determinó la existencia del bosón de Higgs.

### ***Temas vinculados a la mecánica cuántica para desarrollar en clase***

#### *Experimento de la doble ranura*

Este experimento tuvo un papel de gran importancia debido a que fue la prueba de que la descripción de una partícula podía hacerse como una dualidad de partículas y de onda, esto ayudó dando una base firme a todo el desarrollo de la mecánica cuántica que vino luego.

Se lo conoce también como el *experimento de Young* realizado en 1801 por Thomas Young mientras investigaba las propiedades de la luz y su comportamiento ondulatorio cuando pasaba por dos orificios próximos produciendo una imagen en la pantalla donde después se la proyectaba como franjas luminosas y oscuras de distinta intensidad.



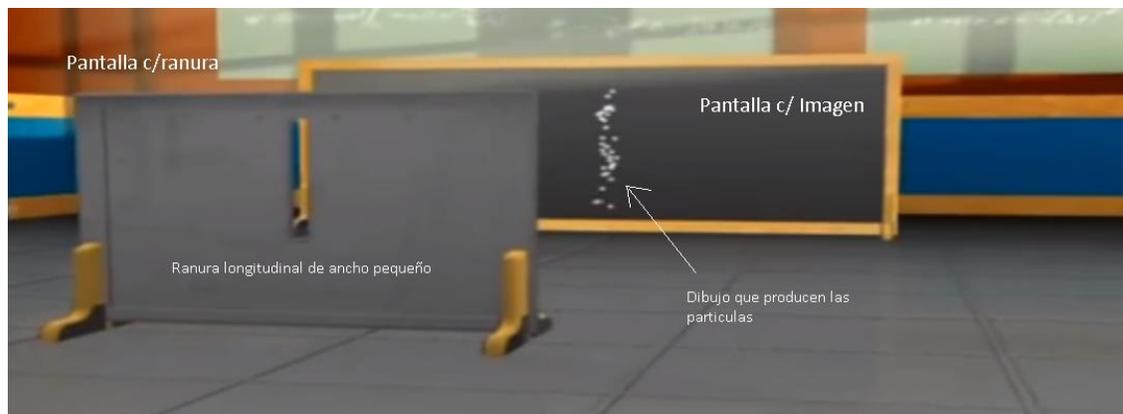
### *El punto de vista clásico*

Repasemos brevemente los conceptos de Interferencia y de Difracción,

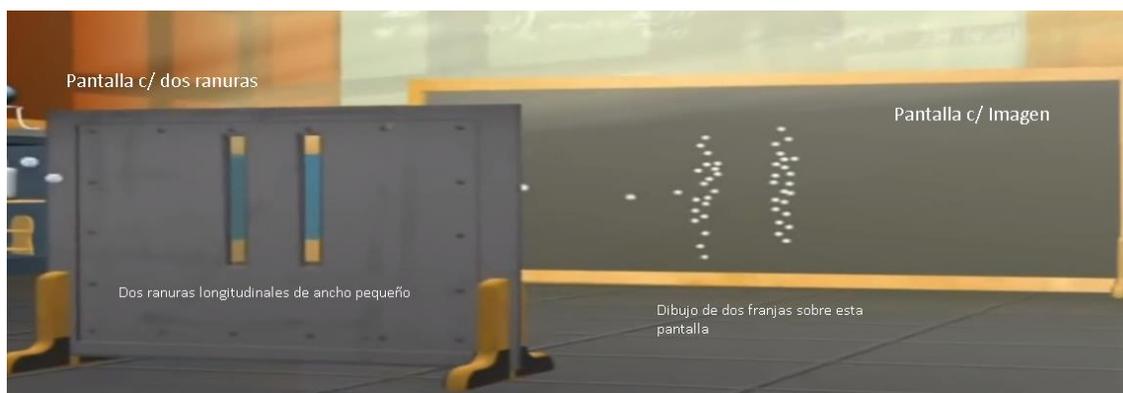
- 1) La interferencia es la combinación por superposición de dos ó más ondas que se encuentran en un punto del espacio al mismo tiempo.
- 2) La difracción es la desviación que sufren las ondas alrededor de los bordes y esquinas, que se produce cuando una porción de un frente de ondas se ve cortado ó interrumpido por un obstáculo.

Imaginemos un dispositivo compuesto de una fuente de partículas (cualquiera siempre que sean partículas materiales grandes como unas bolitas o semillas) que son disparadas hacia una pantalla donde se le ha practicado una ranura vertical de ancho pequeño.

La fuente dispara estas partículas que van dibujando un patrón en la pantalla,



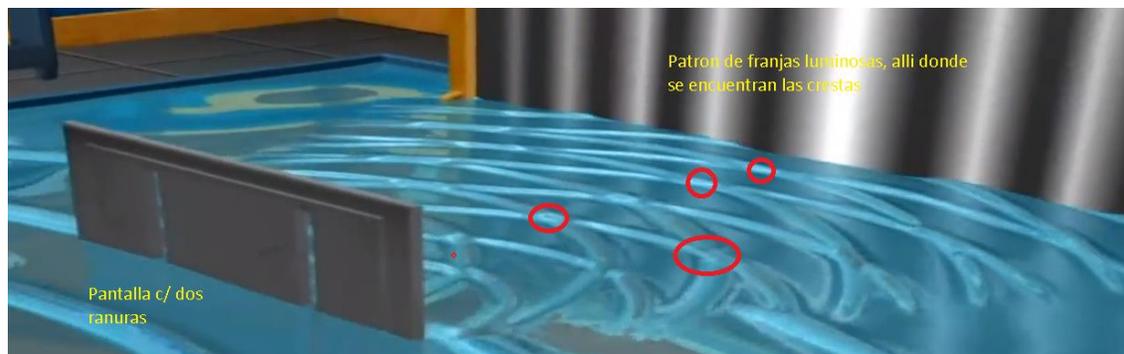
Ahora hagamos lo mismo pero coloquemos dos ranuras, volvamos a disparar las partículas y lo que deberíamos ver sería lo que nos muestra la figura más abajo.



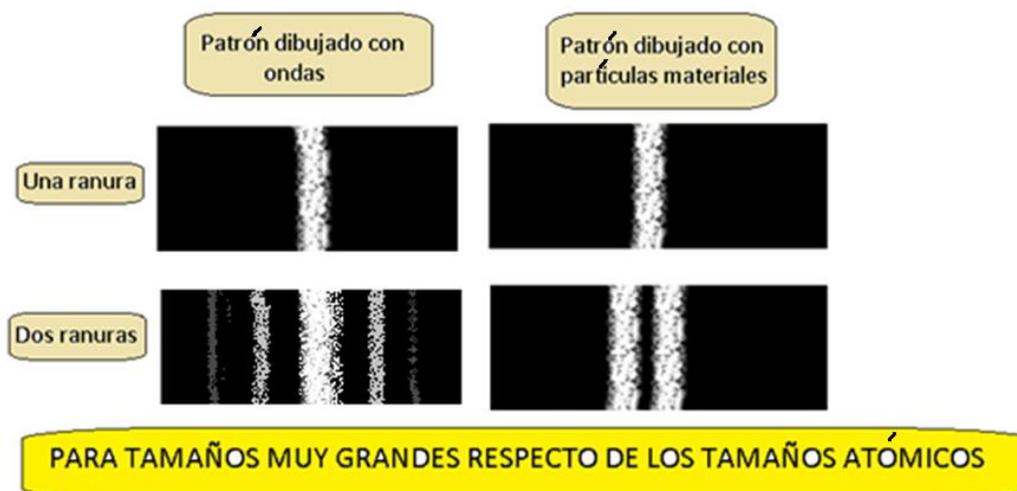
Hagamos el mismo experimento, pero con ondas comunes (usamos el ejemplo de ondas en el agua pero en la pantalla la veremos cómo más luminoso a las zonas de mayor intensidad), si comparamos la franja luminosa (más intensa) con la dibujada por las partículas en el caso anterior vemos que son muy similares.



Ahora, cuando ponemos una pantalla con dos ranuras y le hacemos incidir un frente de ondas como el del ejemplo, cuando estas pasan por cada una de las ranuras, sobre cada una de ellas las ondas parten como si fuesen una fuente individual y se interfieren unas con otras cancelándose y sumándose según se encuentren dos valles o dos crestas (suma) o una cresta con un valle y viceversa (resta o cancelación) como se ve abajo en la figura,



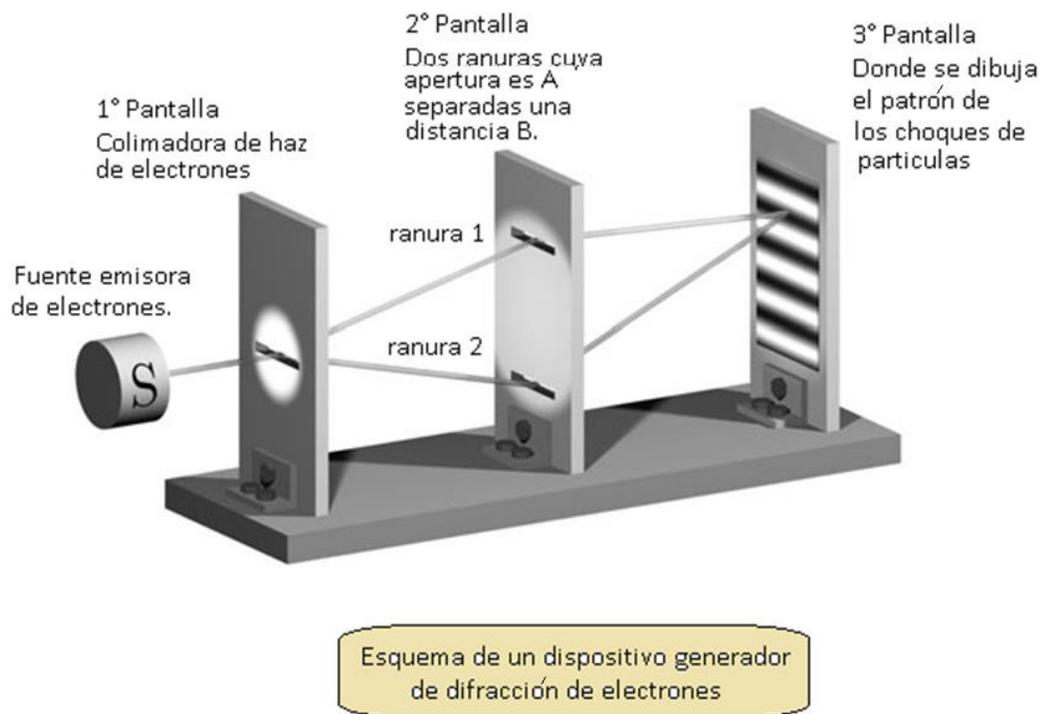
Todo lo dicho anteriormente es válido siempre y cuando los tamaños de los que estamos hablando sean muy grandes respecto de los tamaños de los átomos, resumiendo queda,



Cuando el tamaño empieza a parecerse a los de la escala atómica, esta diferencia entre unas partículas de materia y los fenómenos vistos con las ondas empiezan a desaparecer también y se empiezan a ver efectos de interferencia y de difracción también cuando se disparan electrones o átomos.

*El punto de vista cuántico*

Pensemos en el siguiente dispositivo para realizar el experimento de la doble ranura,

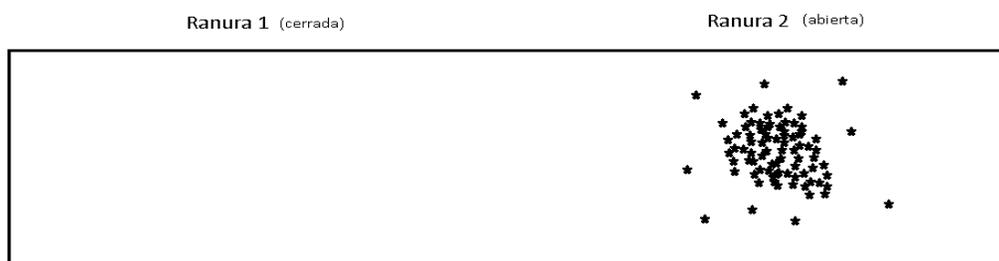


De una fuente de electrones que podemos suponer que salen de a uno por vez, se observa lo siguiente,

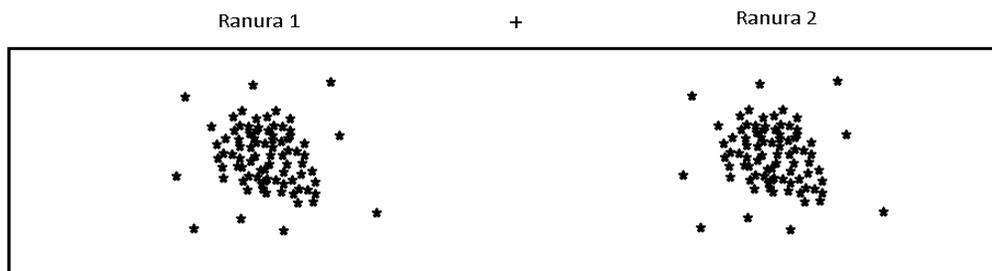
- 1) a.- *Se deja salir un electrón y se tapa la ranura 2* - El electrón pasa por la *ranura 1* e impacta sobre la *3° pantalla*, si se repite muchas veces esto se formará el siguiente patrón,



- b.- *Se deja salir un electrón y se tapa la ranura 1* - El electrón pasa por la *ranura 2* e impacta sobre la *3° pantalla*, si se repite muchas veces esto formará el siguiente patrón,

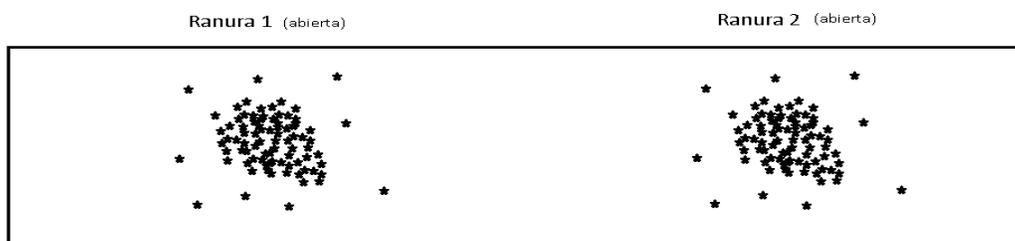


Si luego superponemos los dos patrones en una misma pantalla, lo que se verá es,



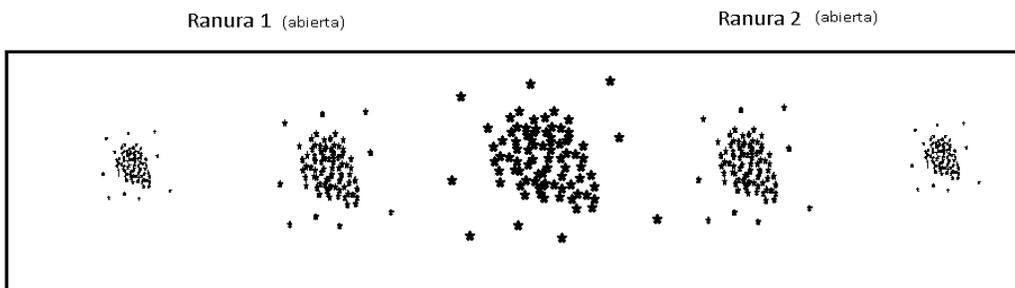
Si separamos las ranuras los patrones se separarán y si las acercamos se acercarán, lo que puede verse es que ningún patrón lleva información de la otra ranura, son dos patrones superpuestos.

2) Coloquemos un sensor de paso por cada una de las ranuras y hagamos de nuevo el experimento anterior, pero con las dos ranuras abiertas, el sensor nos indicará por cual ranura paso el electrón que luego impactó en la pantalla 3°, se verá un patrón sobre la pantalla de la siguiente forma,



Se ve que es el mismo dibujo que en el caso anterior cuando tapamos cada una de las ranuras.

3) Saquemos los sensores y repitamos de nuevo el experimento. La diferencia con el experimento anterior es solamente que no sabemos de dónde sale el electrón que impactará la pantalla, por lo que en principio y pensando de forma clásica el patrón que esperamos que surja no es diferente del anterior ... ¡pero si es diferente!

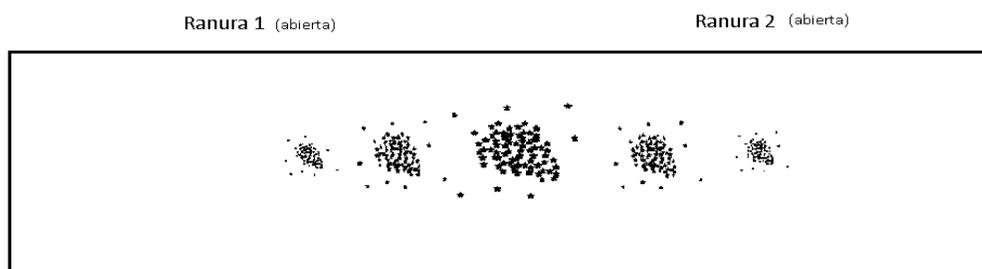


¡Aparece un patrón de interferencia! como si los electrones se comportasen como una onda. Cada disparo fue producido con un solo electrón y se entiende clásicamente que, si pasa por una ranura o por otra, este aporta su impacto para dibujar dos franjas, pero para dibujar un patrón de interferencia debe haber .... ¿interferencia de un electrón consigo mismo?

Se pensó en un primer momento que podía haber alguna influencia externa que estuviese provocando este raro patrón, pero se descartó todo lo imaginable y se siguió dando el mismo resultado (como campos magnéticos no tenidos en cuenta generados por alguien dentro del radio del experimento... etcétera.).

Se verificó además que si las ranuras se separaban o se juntaban, el patrón aparecía más junto o más separado, presentando otro problema más... ¿cómo podía el electrón saber la distancia entre ranuras, si se disparaba solo un electrón por vez y este podía pasar por una ranura de las dos posibles?, la explicación sugería que el electrón a veces podía “*pasar por las dos ranuras a la vez*” y era por eso que “*sabía*” la distancia entre las cajas.

Con un poco más de detalle diríamos que si un electrón sale de una ranura e impacta en la pantalla, no puede saber nada de la otra ranura, la única forma de que lleve alguna información es que al salir tenga algún vínculo con la otra ranura también.



### *El microscopio de Heisenberg*

En el experimento de la doble ranura descrito anteriormente hablamos de un sensor que es capaz de indicar por dónde pasó la partícula, ese dispositivo fue diseñado por Heisenberg, y se lo conoce como el *Microscopio de Heisenberg*, él se preguntó cómo determinar la ranura por la que pasa el electrón.

Para saber dónde está una partícula hace falta medir esa posición con algo, y lo hace con un rayo de luz, pero la luz no es infinitamente divisible, no se puede tomar una parte infinitamente pequeña de luz porque está compuesta de fotones discretos.

Para poder ver algo hace falta que la radiación sea de una longitud de onda más pequeña que esa que se quiere medir (imaginemos por ejemplo que se intenta ubicar un sacapuntas con ondas cuya longitud de onda es de 1 km, es muy probable que las ondas ni se enteren de que el sacapuntas estaba allí y pasen sin rebotar y no permitirán detectarlo, haría falta una onda cuya longitud fuese comparable con el tamaño del sacapuntas).

Entonces, para poder determinar la posición con gran precisión debe usarse ondas de muy corta longitud, pero cuanto más cortas son, mayor es su frecuencia ( $f = v/\lambda$ , donde  $f$  es frecuencia,  $v$  es velocidad y  $\lambda$  es longitud de onda), y también, cuanto mayor es la frecuencia de un fotón mayor es su energía ( $E = h \cdot f$ , donde  $E$  es energía,  $h$  es la constante de Planck y  $f$  es la frecuencia).

De modo que, en el microscopio de Heisenberg, un fotón incide sobre el electrón y luego llega al microscopio (al detector), pero si lo impacta con mucha energía el electrón se desviará

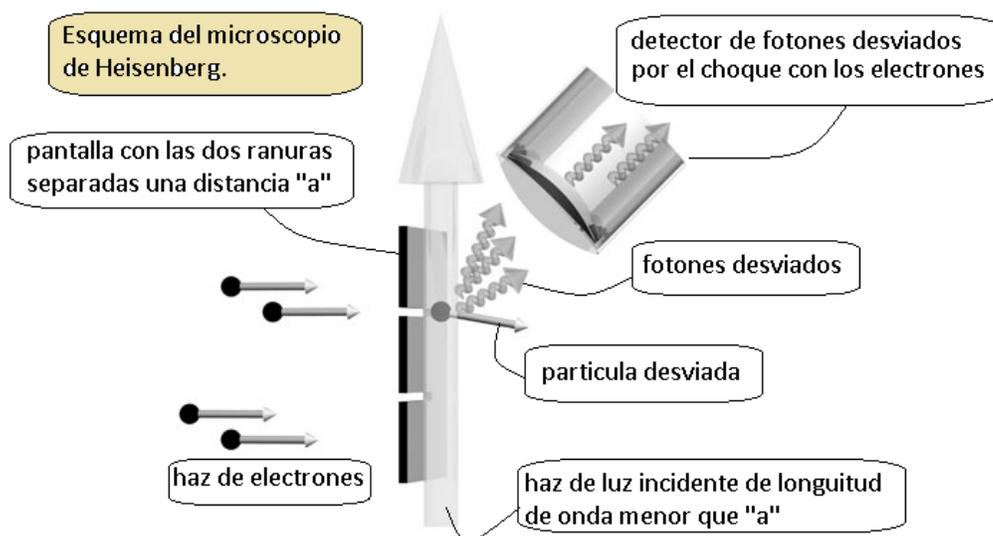
mucho y no sabremos a dónde fue a parar y habremos podido ubicar muy bien dónde estaba el electrón, pero no tendremos idea de su velocidad.

La solución sería poder contar con un fotón de muy pequeña longitud de onda para que pueda encontrar al electrón y de poca energía para que no lo desvíe, al menos para que no lo desvíe mucho.

Pero eso no es posible, debido a la ley de Planck los fotones de baja frecuencia son de baja energía y los de alta frecuencia de alta energía.

Si nos apoyásemos en la física clásica, podríamos tomar radiación de longitud de onda tan corta como se quiera (muy precisa) y emitir una cantidad arbitrariamente pequeña de esa radiación (que casi no afecte al electrón), pero esto no sucede.

Al disminuir la energía debemos usar frecuencias más bajas con longitudes de ondas más grandes y por lo tanto perderíamos la capacidad de ubicar el electrón.



Este dispositivo, si bien fue diseñado aproximadamente en el año 1927, recién ahora fue posible realizarlo debido a la complejidad técnica que requería, fue un experimento de los llamados *experimentos mentales* que se usaron mucho en las primeras etapas del desarrollo de la mecánica cuántica.

Básicamente consta de un haz de luz que, por detrás de la pantalla con las ranuras, corre perpendicularmente a la dirección de los electrones y los impacta con cierta cantidad de energía provocando una desviación de estos electrones y por efecto Compton (cambio en la longitud de onda de un fotón cuando colisiona con un electrón) los fotones desviados (que han variado su longitud de onda) son detectados por un dispositivo a tal fin.

#### *Haciendo algunos cálculos*

El experimento de la doble ranura utilizando el microscopio de Heisenberg para determinar por cual ranura salió el electrón, nos da cuenta de que si la frecuencia es lo suficientemente grande para determinar la posición entonces el patrón de franjas de interferencia desaparece y si no lo es podremos ver el patrón de franjas pero tendremos una frecuencia lo suficientemente baja como para no saber por dónde pasó.

En el caso de que las partículas produzcan franjas de difracción concluimos que cada partícula cruza el aparato en una superposición lineal de dos estados, correspondiendo cada uno a una densidad de probabilidad de que la onda pase por una de las rendijas.

La densidad de probabilidad para registrar la partícula en un punto dado es el cuadrado de la suma de las dos amplitudes correspondientes.

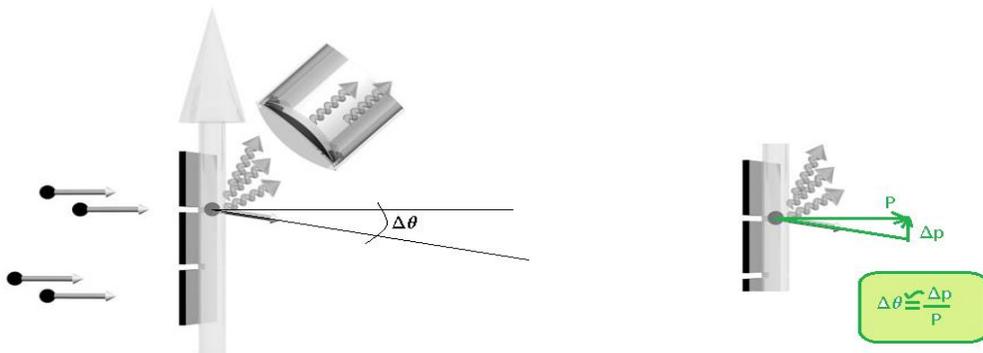
*No es la partícula ni su probabilidad la que interfiere, sino la función de onda asociada a la partícula la que produce interferencia.*

Para identificar la ranura cerca de la cual ocurrió el evento de dispersión, debemos usar una radiación cuya longitud de onda es más pequeña que “ $a$ ” (la distancia entre ranuras).

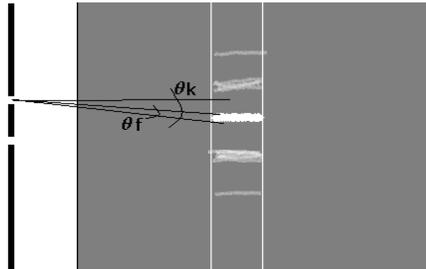
Cada fotón por lo tanto tiene un momento mayor que  $h/a$ .

Su dispersión, que ocurre en una dirección aleatoria, le provoca a la partícula una desviación cuya componente normal a la dirección del haz de partículas tiene una magnitud cambiante de  $\delta p > h/a$ .

Este cambio aleatorio produce una variación en el ángulo  $\Delta\theta \approx \Delta p / p \geq h / ap = \lambda / a$ , del impulso de la partícula.

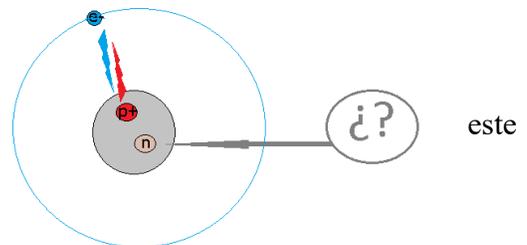


La magnitud de esta variación angular es mayor que la separación angular  $\theta_f$  de las franjas vistas desde las ranuras, lo que da como resultado una imagen borrosa del patrón de interferencia.

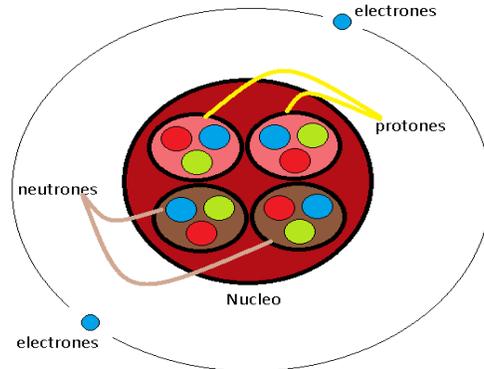


### *Papel de los neutrones en el núcleo atómico*

Ya hemos repasado la constitución de los átomos como los entendemos a través del modelo estándar y sabemos que en forma simplificada podemos decir que están formados por *electrones*, *protones* y *neutrones*. Los protones dentro del núcleo atraen electromagnéticamente a los electrones que orbitan a su alrededor, este es su papel, pero dentro de modelo ¿qué función cumple el neutrón? No parecería haber una razón para mantenerse unidos, salvo por el efecto residual de la fuerza fuerte. Existe además otro motivo por el cual el núcleo se mantiene fuertemente unido.



Los protones y neutrones no son partículas elementales, están formadas por quarks como hemos visto. Teniendo en cuenta lo dicho, la imagen del átomo sería la siguiente,



La fuerza que mantiene unidos a los quarks es la *fuerza fuerte* que se manifiesta a través de sus mediadores llamados gluones, la fuerza residual une a protones y neutrones.

Existe una dinámica dentro del núcleo que podemos describir de la siguiente forma:

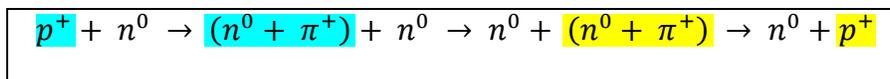
Cada protón o neutrón absorbe y emite piones (con carga negativa o positiva o sin carga) a modo de mensajeros entre ellos de la siguiente manera, según sea el caso, por ejemplo,

**Caso 1)** a)  $p^+ + n^0$ , el protón junto al neutrón en el núcleo.

b)  $p^+ \rightarrow (n^0 + \pi^+)$ , el protón emite un pion y se convierte en un neutrón.

c)  $(n^0 + \pi^+) + n^0$ , el pion interactúa con neutrón más cercano.

d)  $n^0 + (n^0 + \pi^+) \rightarrow n^0 + p^+$ , luego vuelve a formar un protón, volviendo a la configuración inicial



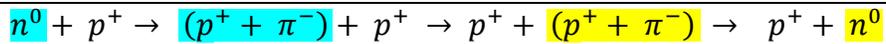
Este es el proceso completo descrito anteriormente.

**Caso 2)** a)  $n^0 + p^+$  , el neutrón junto al protón dentro del núcleo.

b)  $n^0 \rightarrow (p^+ + \pi^-)$  , el neutrón emite un pion y se convierte en un protón.

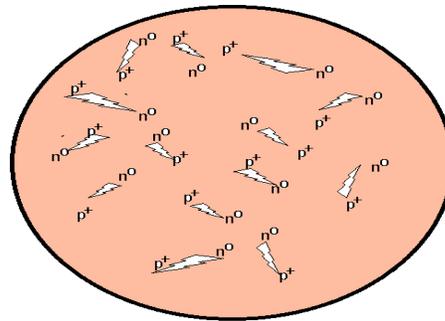
c)  $(p^+ + \pi^-) + p^+$  , el pion interactúa con el protón más cercano.

d)  $p^+ + (p^+ + \pi^-) \rightarrow p^+ + n^0$  , al unirse se vuelve a formar otra vez el neutrón retornando a la configuración original.



Este intercambio es incesante, dando lugar a la cohesión dentro del núcleo.

Podemos decir, que esta es la función del neutrón dentro del núcleo, la de participar activamente en la unión y estabilidad del núcleo y además compensar la repulsión coulombiana entre protones.



Así pensamos que se vería un núcleo de Silicio (Z=14)

### Condensado de Bose-Einstein

El espín de las partículas es un cuarto número cuántico que define el estado energético de una partícula, está asociado al momento magnético intrínseco de ella y su valor es un múltiplo de  $\hbar$ . Si este múltiplo es un número fraccionario se los denomina *fermiones* y si es entero se los denomina *bosones*. Los bosones pueden compartir sus estados de energía en los lugares que ocupan (pueden tener los mismos números cuánticos) y los fermiones no comparten los estados de energía que ocupan (no pueden tener los mismos números cuánticos). Un condensado es un sistema de partículas que comparten el mismo nivel energético.

Podemos aclarar aún más lo que hemos dicho con el siguiente ejemplo:

Si tenemos dos fermiones  $\Delta_1$  y  $\Delta_2$  (el símbolo representa cada fermión) y tenemos dos estados para que ellos los puedan ocupar, lo harán en principio de cuatro formas posibles, podríamos representarlo de la siguiente manera,

Estado	1° posibilidad	2° posibilidad	3° posibilidad	4° posibilidad
A	$\Delta_1\Delta_2$	$\Delta_1$	$\Delta_2$	
B		$\Delta_2$	$\Delta_1$	$\Delta_1\Delta_2$

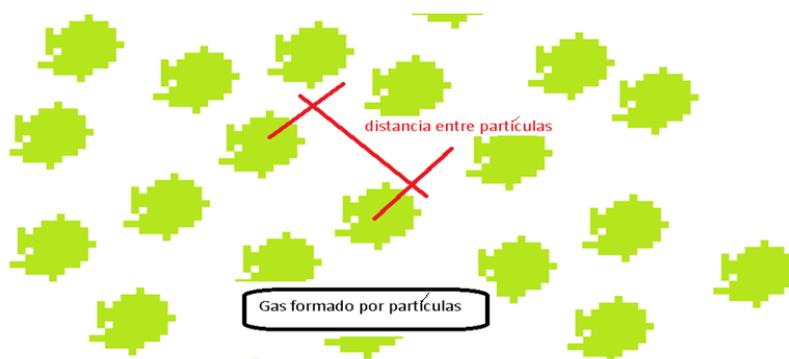
La posibilidad 1° y 4° quedan excluidas, no pueden estar juntos como dijimos antes.

Cuando tenemos dos bosones  $\varphi_1$  y  $\varphi_2$ , y dos estados que pueden ser ocupados, lo pueden hacer de tres formas posibles,

Estado	1° posibilidad	2° posibilidad	3° posibilidad
A	$\varphi_1 \varphi_2$	$\varphi_1, \varphi_2$	
B		$\varphi_2, \varphi_1$	$\varphi_2 \varphi_1$

Como los bosones pueden compartir el estado de energía, pueden entrar en un mismo estado cuántico la cantidad que uno quisiese de bosones.

Supongamos que tenemos un gas (formado por partículas, por supuesto), a una temperatura baja de unos cuantos grados kelvin, y con partículas muy separadas entre sí.



Viendo el problema desde la mecánica cuántica, las partículas no tienen una posición definida, sino que solo podemos dar una probabilidad de su posición en función de la velocidad que tiene.



La mecánica ondulatoria desarrollada por Louis de Broglie, nos dice que, así como una onda electromagnética da lugar a un comportamiento de partícula, del mismo modo una partícula tendrá comportamiento ondulatorio.

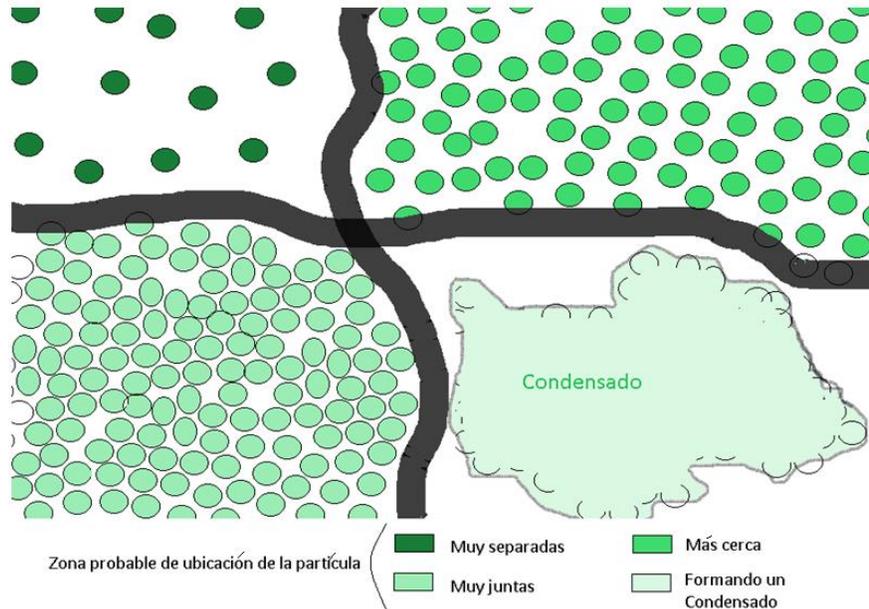
Cada partícula en movimiento tiene una longitud de onda asociada. De acuerdo a la velocidad que tenga, según la ecuación de Louis de Broglie es  $\lambda = \frac{h}{p}$  donde,  $h$  es la constante de Planck,  $p$  la cantidad de movimiento y  $\lambda$  es la longitud de onda asociada a la partícula.

Si la velocidad aumenta su longitud de onda disminuye y viceversa.

Si este gas lo encontramos a una cierta temperatura, las partículas tendrán entonces una cierta velocidad, y por lo tanto una cierta longitud de onda que nos dará la medida de su indeterminación en relación a la posición.

Pero si reducimos la temperatura, entonces su velocidad promedio disminuirá y la longitud de onda aumentará, las partículas comenzarán a ocupar una zona donde será probable encontrarlas cada vez más grande hasta que estas zonas comiencen a solaparse unas con otras hasta llegar a una temperatura llamada *temperatura crítica*, donde las partículas se encontrarán formando *una sopa* y se comportaran todas como si fueran una sola.

El requisito que pedimos inicialmente de que las partículas estuviesen muy separadas es para evitar que cuando enfriamos el sistema se convierta en un sólido.



Las temperaturas a las cuales se da este fenómeno son del orden de los nano Kelvin, (más frías que las temperaturas que encontramos en el espacio interestelar), esto es aproximadamente  $0,000000001\text{K} = 10^{-9}\text{K}$ .

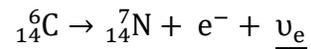
El resultado es un sistema macroscópico que se comporta como un estado microscópico y es muy útil para el estudio, ya que toda la masa del condensado tiene un comportamiento cuántico, pero es mucho más grande que una partícula cuántica elemental.

Un fenómeno físico relacionado con este condensado de Bose-Einstein como se lo denomina, es el de la *superfluididad*, que es cuando un fluido pierde su viscosidad y la *superconductividad*, que es cuando la corriente eléctrica es conducida por pares de electrones llamados *pares de Cooper* y se comportan como bosones, (debido a que los electrones comparten un mismo nivel energético) circulando sin ninguna resistencia por el material y expeliendo el campo magnético.

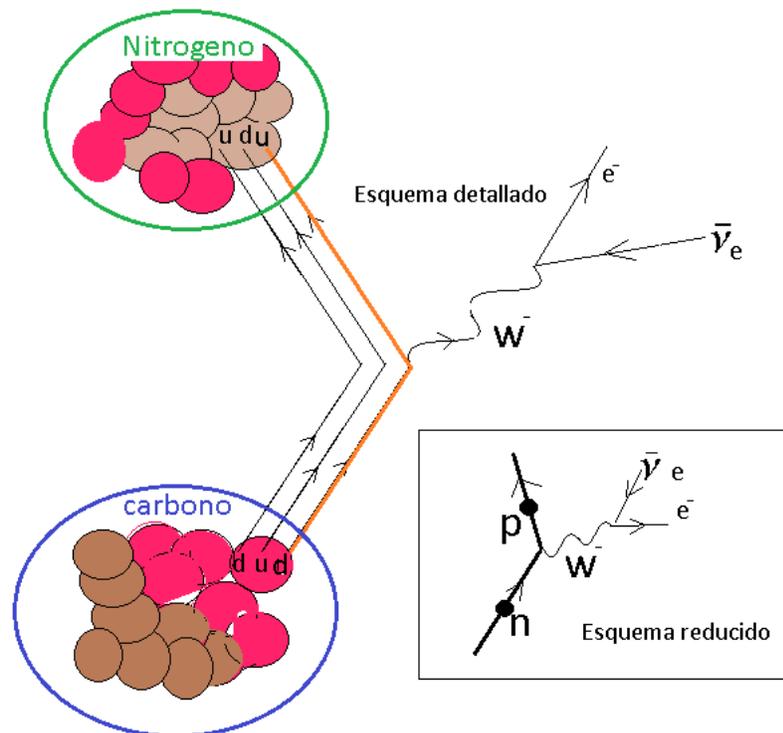
### Decaimiento del carbono 14 y producción de neutrinos en el sol

Es interesante ver lo que sucede en la desintegración del carbono 14, y como se aprovecha para hacer dataciones de los restos de seres que alguna vez estuvieron vivos.

Se basa en el decaimiento del isótopo radioactivo  ${}_{14}^{6}\text{C}$ , que es inestable y decae espontáneamente de la siguiente manera,



Esto es, a un carbono que tiene seis protones y ocho neutrones uno de sus neutrones se convierte en protón aumentando su cantidad de seis a siete y por lo tanto el elemento se convierte en nitrógeno, también se suman un electrón y un antineutrino,

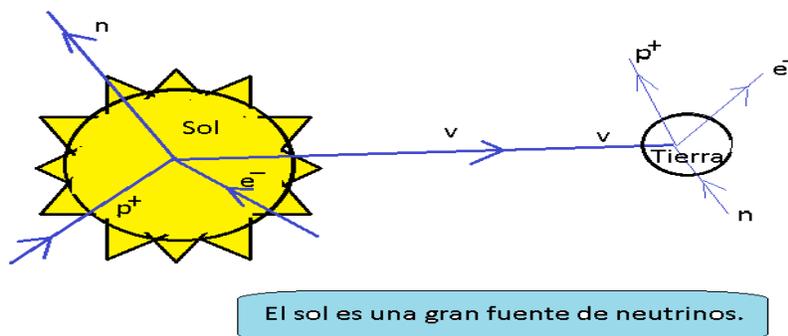


El carbono 14 (radioactivo) se crea a raíz del bombardeo que sufren los átomos de nitrógeno por parte de los rayos cósmicos, y su cantidad se encuentra equilibrada con la cantidad de carbono 12 (estable).

Los átomos de carbono se encuentran con catorce nucleones,  ${}_{14}^{14}\text{C}$ , y doce nucleones,  ${}_{12}^{12}\text{C}$  que no son radioactivos. Se incorporan a las plantas a través del proceso de fotosíntesis y luego a los animales que comen esas plantas.

Es conocida la tasa de disminución de este isótopo, le toma 5730 años reducirse aproximadamente a la mitad, es por eso que midiendo la emisión radioactiva de los restos se puede medir la antigüedad tomando como referencia el año de la realización del experimento,

Otro proceso que se realiza muy cerca de nosotros es el que se da en el sol,



### ***ACTIVIDADES DESARROLLADAS PARA LA REALIZACIÓN DE LA TESIS***

De acuerdo con el título de la tesis, el motivo del trabajo es relevar *Sobre la presencia en el aula de los conceptos de la física contemporánea en la enseñanza secundaria y una propuesta para su implementación.*

Los Núcleos de Aprendizajes Prioritarios (NAPs) de carácter obligatorio en Argentina, contemplan la enseñanza de la física contemporánea, se buscó conocer cómo los y las docentes, abordamos estos objetivos, para ello se los consultó a través de un cuestionario para saber cómo perciben la enseñanza de la física contemporánea.

Posteriormente, se creó una página web en la que se publicaron fichas temáticas y se recibieron por parte de los docentes, otras enviadas como aportes sobre las cuales se hizo un relevamiento de sus contenidos.

Como contribución de esta tesis quedará no solo el análisis de las repuestas enviadas por los docentes sino que se mantendrá el sitio abierto para la recepción de material de clase en relación a los temas de la física contemporánea para su uso en el desarrollo de material de cursos o seminarios dentro de la materia. Dicho material será revisado por docentes o estudiantes avanzados de la Universidad Nacional de La Plata. El objetivo será asegurar de este modo un riguroso apego a la exactitud, utilizando matemática básica y ejemplos delimitando su alcance, para lograr transmitir esos conocimientos en el nivel adecuado a los estudiantes de escuelas secundarias.

### ***Recolección de datos.***

Luego de recoger las respuestas del cuestionario presentado en el anexo, desde el 22 de enero de 2020 hasta el 4 de marzo de 2020, el resultado es el siguiente.

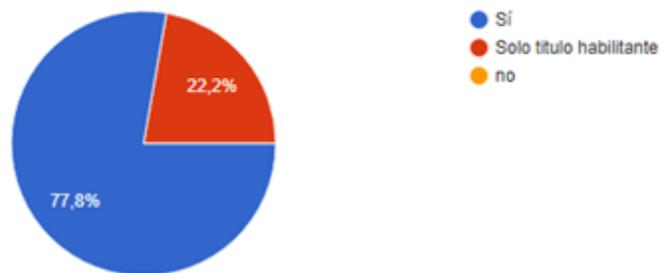
1- ¿Hace cuánto que es docente de física?

18 respuestas



2- ¿Qué título tiene? (es docente, no es docente o tiene título habilitante)

18 respuestas



¿Cual es su titulo habilitante?

4 respuestas

Ingeniero electrónico
Lic en Física y Prof de Matemática
Bachiller Universitario en Física
Ingeniero

3- Ejerce la docencia en un colegio, (Marque la opción elegida).

3.1- técnico

3.2- bachiller con especialidad técnica

3.3- bachiller con especialidad no técnica

3.4- artístico

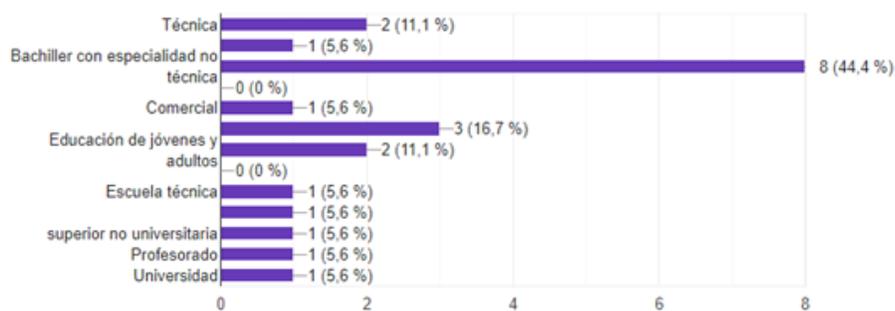
3.5- comercial

3.6- centro de formación profesional

3.7- colegio de adultos

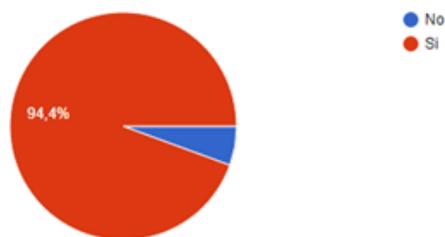
3.8- rural

18 respuestas



4- ¿Tuvo en su formación como profesor materias de física contemporánea?

18 respuestas



¿Qué materias cursó?

17 respuestas

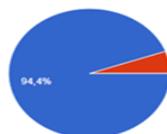
- "Física Moderna y Contemporánea" y "Laboratorio de Física Moderna"
- Física Contemporánea I y II
- Física IV, Astrofísica y Geofísica
- Relatividad y cuántica
- varias todas las correspondientes a la carrera de ingeniería electronica.
- cuerpo negro, incerteza, dilatacion y contracciones de tiempo y longitudes, ....etc.
- Física contemporánea 1 y 2
- Física IV (Relatividad Especial y Fundamentos de cuántica) // Astrofísica y Geofísica
- Física atómica
- Física 3
- Física contemporánea I y II
- particulas - relatividad
- Física Moderna, Mecánica Cuantica I y II. Mecánica Cuántica Estadística, Física Nuclear, Física del Estado Sólido
- relatividad y mecanica cuantica basico
- Relatividad - Cuántica
- 2 cuatrimestrales (equivalente a una anual de 5 hs cátedra semanales)
- Física Conteporánea I y II (INSPT-UNT)

5- ¿Cree necesario impartir los conocimientos de la física contemporánea?, (Marque la opción elegida).

5.1- Si      5.1.1- ¿Por qué?

5.2- No      5.2.1- ¿Por qué?

18 respuestas



● Si  
● No

¿Porque piensa que si es necesario dictar materias de fisica contemporánea?

17 respuestas

La tecnología presente y futura se basa en ellas

Para comprender que hay más allá de lo visible.

Incorpora conocimiento y desarrolla caminos neuronales. Ambas cosas son fundamentales para el desarrollo cognitivo del estudiante.

Es lo que mas les interesa a les estudiantes y de paso es apasionante para mi

Es más cercano a la ciencia actual (especialmente comparado con la física clásica que se suele enseñar en el secundario) y eso genera más interés en los alumnos

Hace que el proceso de enseñanza-aprendizaje no se estanque en viejas tradiciones de transmisión de conocimiento descontextualizado, y da una mirada más profunda de la física como actividad científica y humana.

Porque es una rama mas de la fisica

por que lo que se considera fisica contemporánea es la fisica desarrollada en el último siglo y la mayoría de los objetos tecnológicos actuales requieren conceptos de esta rama de la fisica para ser comprendidos. Sin enseñar fisica contemporánea, los estudiantes no pueden comprender el funcionamiento de la tecnología del siglo XX (ni hablar de la actual) por lo que la enseñanza se vuelve bastante descontextualizada y esteril

forma parte del conocimiento de la realidad

Porque ya tienen más de un siglo de vigencia y explica la mayoría de la tecnología disponible

Porque es necesario brindar a los ciudadanos un conocimiento actual de las ciencias, de sus objetivos, de desarrollos y aplicaciones, y de su carácter generalmente interdisciplinar. Por otra parte, para transmitir (en la medida de lo posible) una visión actualizada sobre cómo entendemos hoy la naturaleza en términos de determinismo, causalidad, elementalidad, etc. Asimismo, es importante brindar herramientas para que los alumnos puedan comprender a grandes rasgos los descubrimientos sobre la física de fronteras y, eventualmente, despertar o alimentar en ellos el interés por la ciencia.

Para que los estudiantes puedan apropiarse de elementos fundamentales de la cultura científica del siglo XXI y tengan la posibilidad de comprender los avances científico-tecnológicos del mundo en el que viven.

Toda nueva tecnología que se esta utilizando ( desde los celulares hasta los ordenadores, pasando por las TV Smart ) tiene su base en la Fisica contemporanea

Los temas actuales de la Física pueden ser un gran incentivo para que los estudiantes de nivel secundario se interesen por esta materia.

porque son temas actuales de los alumnos y forma una idea del mundo en que vivimos

hoy es fundamental, para tener una idea completa de nuestro entorno y como esta ligado a lo tecnologico.

es la actualidad de la fisica

¿Porque piensa que no es necesario dictar materias de fisica contemporánea?

1 respuesta

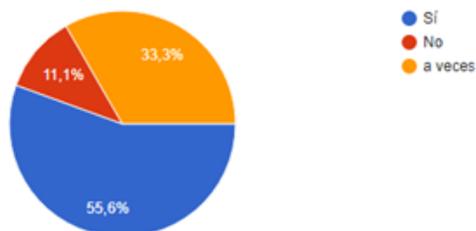
es dificil enseñar los temas de la mecanica clasica, se le agregaria una dificultad mas a los alumnos

6- ¿Enseña conceptos de física contemporánea en el aula?, (Marque la opción elegida).

6.1- Si      6.1.1- ¿Por qué?

6.2- No      6.2.1- ¿Por qué?

18 respuestas



¿Cuales conceptos de fisica contemporanea enseña?

10 respuestas

Espacio-tiempo
Ondas Gravitacionales, Agujeros Negros
Física cuántica
Relatividad Especial, Introducción a la Mecánica Cuántica, Física de Partículas, Física Nuclear, Ondas Gravitacionales, si hay tiempo algo sobre el Big Bang y la Relatividad Gral.
Radiación, fuerzas nucleares etc
Radiactividad, modelos atómicos y su evolución, modelos de conducción eléctrica en metales, cosmología
Cosmología básica (big bang, universo inflacionario, ciclo de vida estelar), modelos atómicos y dualidad partículas-energía, modelo estándar y algo de física nuclear, todo a niveles conceptuales poca veces numéricos.
Cuerpo negro, Efecto Fotoeléctrico, Experimento de Stern-Gerlach, Experimento de Davisson-Germer, Principio de Incertidumbre, Modelos atómicos, Relatividad Especial
analizamos el concepto de simultaneidad, hemos visto ondas gravitacionales, computación cuántica y sus posibilidades,
varios, relatividad especial y general (solo conceptos básicos) - modelo de quarks para hablar del átomo (solo esquemas) -

¿Cuales conceptos de fisica contemporanea enseña a veces?

6 respuestas

Aceleradores de partículas.
Relatividad, modelo atómico actual
El fotón como cuanto de radiación electromagnética, estructura interna de átomos y partículas subnucleares
Estructura atómica moderna, líneas de emisión y absorción de gases, fotones y cuantización de la energía, radiación de cuerpo negro, modelo de bandas para caracterizar materiales aislantes, semiconductores y conductores, entre otros.
Física de las partículas
Cuando llevo bien con el programa vemos algunos conceptos de relatividad o algo sobre partículas

## 7- ¿Qué dificultades encuentra a la hora de tratar estos temas?

16 respuestas

Ninguno....mucho interés !

Los alumnos quieren ver los fenómenos, tocarlos y sentirlos próximos, cuando se presentan los temas es muy abstracto al principio. Es fundamental diseñar estrategias y secuencias didácticas.

Exponer prácticamente los experimentos que se explican teóricamente.

"Tenemos que abandonar el sentido común con el fin de percibir lo que está sucediendo a nivel atómico"  
Richard Feynman, mas claro imposible

Bibliografía de nivel secundario y experiencias de laboratorio en la que los estudiantes puedan hacer mediciones o análisis de datos

Es complejo contestar esta pregunta, ya que los temas se abordan en distintas etapas de la escolaridad. Pero creo que las formalizaciones conceptuales (incluyendo las matemáticas) son aquellos aspectos donde la trasposición didáctica se torna más problemática.

La abstracción de los conceptos

las mismas que encuentro a la hora de tratar temas de física clásica. Fuertes preconcepciones sobre la dificultad de los temas, y falta de seguimiento del trabajo en casa.

La misma que en todos los demás: resistencia a pensar y salir de la zona de confort

En general, la dificultad de realizar experimentos y la necesidad de elaborar material para su tratamiento, dado que si bien existen propuestas de enseñanza, muchas son aisladas o descontextualizadas.

Realizar transposiciones didácticas adecuadas que permitan a los estudiantes apropiarse de estos contenidos de forma coherente y consistente con los conocimientos previamente adquiridos en espacios curriculares de físico-química, física (clásica) y química.

En general es difícil lograr una descripción del mundo microscópico en términos de la física moderna sin "pedir" por parte del alumno un acto de fe respecto de lo que uno está enseñando.

La falta de posibilidad de realizar experiencias

Los enseño en el nivel terciario, en la carrera del Profesorado en Física, donde los contenidos forman parte de la currícula. Sin embargo, cuando me desempeñé en escuelas secundaria, pude comprobar que el factor "tiempo" es primordial. En las cuatro horas semanales que actualmente se dictan, no hay suficiente tiempo para llegar a ver, como es debido, la totalidad de los contenidos de FC. Pese a que en los NAPs se indica su abordaje, la realidad diaria es que no siempre se llegan a enseñar.

Son temas que no forman parte de la experiencia cotidiana y requiere del alumno imaginación y un poco de atención adicional que no consigo siempre

quizá muchas pero se van sorteando a medida que transcurre el curso, con cada curso es distinto.

son poco difundidos y cuesta entrar en tema

## 8- ¿Qué bibliografía consulta sobre los temas de física contemporánea?

18 respuestas

Síntesis de varias...Schaum...otros

Gettys, Sears Zemansky, Revistas Científicas

Desde bibliografía escrita como Holliday Resnick hasta videos expuestos en Internet.

Feynman, Landau, Cohen, Hewitt, Resnick, Holton, y revistas como Enseñanza de las Cs, Eureka, The Physics Teacher, Revista Brasileira de Ensino de Física, Revista de la APFA, Alambique,....

Hewitt, física conceptual. Einstein infield, La física, la aventura del pensamiento. Materiales de internet

Papers o publicaciones de los personajes históricos, libros de texto de secundaria (tipo manual), libros de historia de la ciencia, videos de divulgación.

Libros de secundaria y Universidad

Sears Semansky, Tipler (el Física Moderna, libro antiguo), Serway de física moderna, y cuando es algo más avanzado o que quiero entender un poco más a fondo para mí, leo el Eisberg Resnick

nada específico en su mayoría videos

Sitios de universidades, autores como Rojo, Tippens, Ripper, Sears y Zemansky

Desde libros de divulgación hasta textos específicos. Incluso es interesante consultar trabajos (papers) que dieron inicio a alguna línea de investigación.

Física Moderna (Serway), Física Cuántica (Eisberg), Fundamentos Cuánticos y Estadísticos (Alonso-Finn Vol.3)

Libros de la colección " Un paseo por el Cosmos " RBA Contenidos Editoriales y Audiovisuales ( 2016 )

Es variada, pero mi libro de cabecera es: Serway, Raymond A., Moses, Clement J. y Moyer, Curt A - Física Moderna.

videos de youtube principalmente porque allí ya está elaborado para los chicos el tema

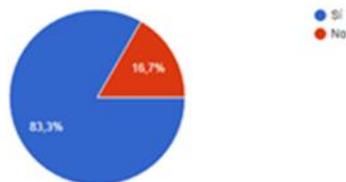
tomo de internet

consulto libros de universidad pero hago el trabajo de armarles resúmenes, mapas , etc. para que podamos tratar esos temas, además de videos y literatura fantástica (por ejemplo Asimov)

beiser, sears ing. Arguello, serway, pero no directamente sino a través de explicaciones en clase

## 9- ¿Recibe preguntas por parte de los alumnos sobre estos temas?

18 respuestas

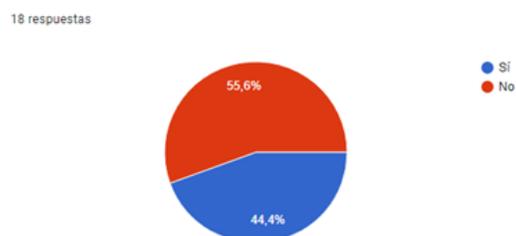


¿Puede decir algunas de las preguntas que sus alumnos le formulan?

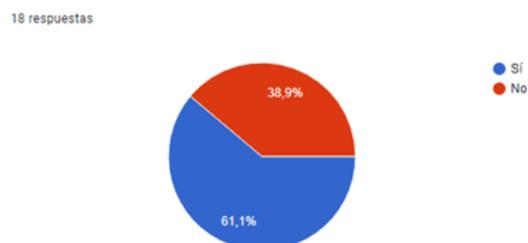
15 respuestas

Por qué hay diferentes "tiempos"...."distancias"
¿Que donny para que sirven las ondas gravitacionales?, ¿ Lo que pasa en la película interestelar es Real?
Como puede ser que en un momento se comporte como partícula y en otro como onda?
¿por qué no hay la misma cantidad de materia que de antimateria? ¿el vacío existe o no? ¿puede haber algo mas chico que la constante de Planck?..... millones de preguntas pero en este momento..... estoy en otra, perdon
Preguntan mucho sobre fisión y fusión nuclear....especialmente este año que se estrenó la serie de Chernobyl
Según lo que recuerdo, qué es la mecánica cuántica o temas de cosmología (agujeros negros, galaxias, etc).
De acuerdo a lo visto en clase surgen preguntas "relacionadas". Tienen preguntas sobre la relatividad y los viajes en el tiempo. Sobre el destino del universo, de la tierra y de nuestro sol. La mecánica cuántica y la energía también los intrigan, desde la generación de energía a los multiversos ( creo que vienen a partir del gato de Schrödinger y la interpretación de copenhague, además de una serie actual que se llama Rick y Morty y cuya veracidad a los chicos les interesa) al igual que la radiactividad y las plantas nucleares. Los agujeros negros este 2019 fueron un tema muy abordado y preguntado por alumnos por la "fotografía" tomada
muchas, pero en su mayoría relacionadas con cosas no científicas.
¿Qué es un orbital? ¿Que es un modelo probabilístico? ¿Por qué c es un límite?
En general todo empieza con un "cómo" o un "por qué". En muchos casos la pregunta es "¿Cómo se sabe que..."
En general muchas preguntas vinculadas con la teoría de la relatividad, sobre posibilidades de "viajes en el tiempo", sobre agujeros negros y cuestiones de cosmología.
¿Cómo desarrollar estos temas en el nivel secundario? ¿Qué recursos utilizar para hacer demostraciones sobre estos temas? Ante la falta de tiempo, ¿cuáles son los temas "fundamentales" que se deberían enseñar? ¿Se pueden hacer experimentos sin aparatos costosos?
viajes en el tiempo, todo lo relacionado con el cine y la televisión
En realidad siempre es sorprendente las preguntas pero los viajes en el tiempo o los universos paralelos, son temas que traen siempre a la clase (tengo entendido que hay mucho dibujos de Anime que tratan esas cosas)
varias, en general relacionadas con juegos de computadora o series

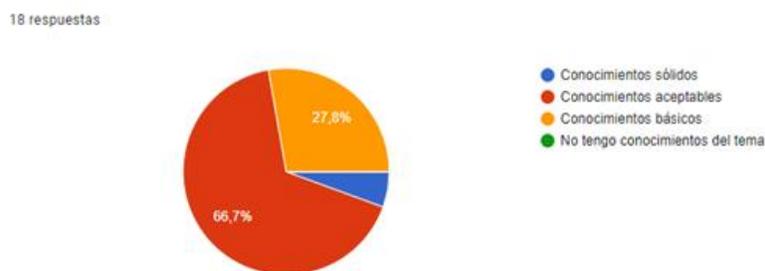
10- ¿Cree que los niveles de matemática son un impedimento para tratar los temas de la física contemporánea?



11- ¿Cree que por la propia naturaleza de los temas de la física contemporánea es difícil abordarlos en el aula?

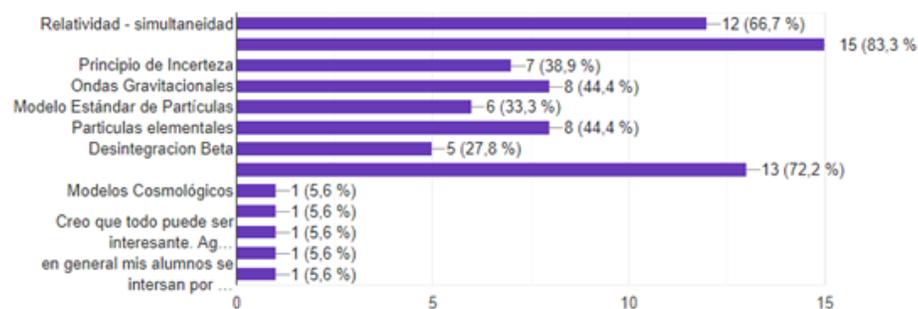


12- ¿Cómo se percibe usted en relación a los conocimientos relativos a la física contemporánea?



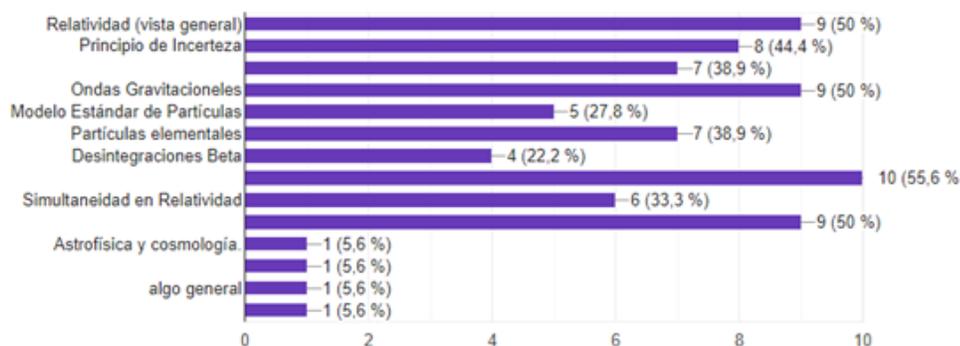
13- ¿Qué temas le parece que podrían interesarle a los alumnos?

18 respuestas



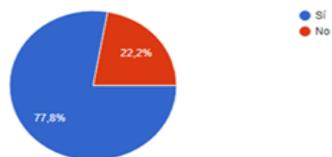
¿Sobre que temas necesitaría materiales de trabajo o de consulta para el aula?

18 respuestas



14- ¿Cuándo presenta el programa de *Física*, incluye o piensa en incluir algún tema relativo a la física contemporánea?

18 respuestas



¿Puede citar algunos ejemplos?

14 respuestas

Lao decisivo de la velocidad" relativa"..su magnitud... para q aparezcan nuevos fenómenos

Relatividad, mecánica cuántica, agujeros negros

Termodinámica, ondas, electromagnetismo, relatividad, mecánica cuántica.

Doy física en los 5 años de Bachillerato, los temas los voy introduciendo de acuerdo a los conocimientos que van teniendo los estudiantes, en 3ero por ejemplo Doy Relatividad Especial: simultaneidad, postulados, velocidad relativa según Einstein, Dilatación del Tiempo y Contracción de longitudes, en cuarto doy la parte de Energía y cantidad de movimiento relativista, en 5to doy Nuclear, algo de Cuántica, y Partículas....

Dualidad onda partícula, efecto fotoeléctrico, radiación de partículas radiactivas. usos de la radiación alfa beta y gama, etc

Estudio histórico de la concepción de galaxia

En realidad no dicto "física" como materia, si no materias de los planes nuevos que no incluyen casi temas de física clásica (salvo ondas y electromagnetismo) y pretenden que se dicte cosmología, modelo estándar, física nuclear y partículas entre otros temas.

Relatividad - simultaneidad

Relatividad, modelo atómico probabilístico, fuerzas naturales

Estructura íntima de la materia (modelo estándar de partículas elementales). Interacción entre radiación y materia a nivel cuántico (fotones)

En mi programa se explicitan los contenidos ya nombrados en preguntas anteriores.

Relatividad Especial, Radiación de cuerpo negro, Efecto fotoeléctrico, Modelos atómicos, Principio de Incertidumbre.

relatividad y cuántica

relatividad

15- Aún cuando no trate temas de la física contemporánea ¿Cree que sus alumnos se interesarían por saber algo de estos temas?

18 respuestas



### ***Trabajos recibidos***

La idea de la recepción de material de trabajo de los docentes fue la de relevar los conocimientos y su forma de comunicarlos en clase. Si bien solo recibí tres trabajos, estos no son de un colegio secundario, con lo cual puedo concluir que se percibe la transmisión de conocimientos de física contemporánea como de elevado nivel, difícil para trabajarlos con los alumnos secundarios. Dice el doctor Ignacio Cirac “...la física cuántica no es tan complicada y quizá algún día exista un libro para niños que la explique...” (conferencia “*Así cambiará el mundo la computación cuántica*” (2018) realizada por la empresa Telefónica y publicada en youtube), este concepto sugerido por Cirac parece no reflejarse en el relevamiento de la tesis.

### ***Una propuesta***

Para la realización de la tesis se creó un sitio web desde donde se realizaron las preguntas a los docentes y desde donde se recibieron los trabajos que aportaron.

La propuesta concreta que hacemos desde esta tesis es conservar el sitio web como un lugar de intercambio de experiencias didácticas entre docentes que posibilite el perfeccionamiento de sus contenidos entre los docentes de secundaria y por parte de los docentes universitarios.

Estos contenidos serán pensados como módulos que cada docente podrá unir y adaptar conformando un curso o seminario, luego podrá publicar el resultado junto con el curso impartido

que quedará a disposición de cualquier otro docente que quiera usarlo y realizarle mejoras para una nueva implementación que continuará el mismo derrotero del curso anterior.

La idea de este sitio es no solo disponer de material para construcción de un trabajo desarrollado para tratar algún tema de física contemporánea sino también para que desde el profesorado *Instituto Nacional Superior del Profesorado Técnico de la Universidad Tecnológica Nacional o la Universidad Nacional de La Plata* se realice la vigilancia epistemológica que garantice que la transmisión se haga sea la correcta en lo que respecta a las bases teóricas. De este modo la posibilidad de acceder al material y a experiencias de clases no quedará repartida en distintos sitios.

#### ***CONCLUSIONES GENERALES A PARTIR DE LOS DATOS COLECTADOS***

Revisando los datos recogidos, primeramente, notamos que las respuestas fueron brindadas en su mayoría por docentes con experiencia.

La porción más grande corresponde a docentes con más de 15 años de experiencia. La mayoría son docentes titulados pero una porción de 22,2 % tiene título habilitante a partir de un título de base, afin a la materia y de grado universitario.

El mayor volumen de respuestas corresponde a docentes que dictan sus materias en escuelas que no son técnicas, la mayoría (casi su totalidad) estudió física contemporánea durante su formación.

La mayoría piensa que es necesario enseñarla, solo una persona menciona la dificultad que se agregaría con su enseñanza.

El 55,6 % dice enseñar física contemporánea en el aula, un 33 % de ellos lo hace a veces y el resto no.

Cuando nos detenemos en los temas que enseñan o que contestaron que enseñan, notamos que son temas propios de un profesorado o de universidad.

En los Núcleos de Aprendizajes Prioritarios (NAPs) se pide un acercamiento a temas de física y tecnología actual, pero temas como física nuclear, modelos de conducción eléctrica en metales, fuerzas nucleares, experimento de Stern-Gerlach, Davisson-Germer...etcétera.

Exceden por mucho los objetivos de la enseñanza secundaria, lo que nos puede hacer pensar en la intención de dar a conocer los temas adecuándolos al nivel secundario.

Podemos concluir que los docentes que contestaron, son de escuelas medias y también lo son de niveles superiores (algunos lo explicitan), en sus respuestas sobre los estudiantes secundarios, incluyen a estos estudiantes de niveles superiores.

Se desprende de lo visto hasta ahora que no existe un camino común, la enseñanza de la física contemporánea parece que transita libremente por caminos que el docente bien intencionado encuentra para hablar de ella, no aparece el seguimiento de un programa o currículo avalado por autores o docentes que propongan actividades o formas de abordaje a los temas de física actual.

Si lo relacionamos con las referencias bibliográficas usadas, notamos que ninguna de ellas es para trabajar con alumnos del nivel medio, respecto a los videos u otros materiales de uso

en el aula mencionados no aclaran si son adaptados por ellos o no, en casi todos los casos vemos en forma explícita o implícita que él realiza una labor de adaptación (transposición didáctica, según Chevallard) para volcar estos materiales en el aula.

Queda claro con la pregunta 9 que los alumnos están interesados en temas de física, hoy más que antes, los alumnos reciben mucha información de las películas o series, en los que se ven elementos que nos remiten a los nuevos conocimientos de física, parece que cada vez más el arte y el entretenimiento toma conceptos de la ciencia y esto motiva a los alumnos a llevar sus inquietudes a la clase.

Los niveles de matemática son percibidos como una dificultad para tratar el tema pero tomando la información en su totalidad, no parece ser un impedimento debido a que, como surge de la encuesta, el docente enseña los conceptos de la física contemporánea en el aula, sumado a las respuestas de que si por la propia naturaleza es difícil abordarlos donde la mayoría piensa que sí, podemos concluir que el docente realiza una tarea de transposición principalmente, esto sumado al hecho de que en la pregunta 13 los docentes indican su necesidad de contar con material para trabajar, nos hace pensar que muchos docentes respecto del tema de física contemporánea encuentran su mayor dificultad en el hecho de la transposición más que en la dificultad de los temas en sí.

Casi un 80 % presenta o piensa presentar temas de física contemporánea en el inicio de clase, pero en otra pregunta en la que se les pide que indiquen que temas presentarían y se enumeran aquellos que requieren de una base sólida previa de física, (radiación de cuerpo negro, principio de incerteza, relatividad especial...etcétera.) en vista de estos objetivos, suponiendo que los

aplicamos a el nivel medio, sería muy difícil su tratamiento sin haber previamente estudiado los temas básicos de física.

Con la última pregunta queda claro que los alumnos nos plantean su necesidad de saber sobre los modernos temas de la física, que son parte de su mundo cotidiano y que lo será cada vez más.

### *PARA FINALIZAR*

El trabajo final de la maestría se basó en la pregunta guía “¿Cómo estamos enseñando la física contemporánea en el aula de los colegios secundarios?”, es una pregunta que tiene respuestas que se renuevan cada vez que nos la formulamos.

Cursar la *Maestría en Física Contemporánea* me dio la oportunidad de confrontarme con temas que conocía poco, otros que conocía un poco más y algunos que desconocía totalmente.

Hoy me siento preparado para ofrecer a mis alumnos una enseñanza de mayor calidad en temas de física contemporánea y a la vez me hizo dar cuenta del vasto campo que se abre delante de mi lleno de preguntas y cuestiones por trabajar. Es cierta la máxima que dice que cuanto más uno sabe, más ignorante uno se reconoce.

El desafío para los docentes es dar a conocer cómo la física interpreta hoy el mundo, y los últimos capítulos del “libro” que da esa información son los de la física contemporánea.

Es necesario que cada vez más estos temas tengan presencia en el aula de nuestras escuelas, para que todos estos logros del pensamiento comiencen a ser parte de los saberes de la sociedad.

Es en ese sentido, que nuestro análisis de la situación real, en este momento, puede servir de punto de partida para definir estrategias para el futuro.

Enseñar física contemporánea es enseñar como entendemos el mundo desde la ciencia más actualizada y entender nuestro entorno. Nos vincula con la realidad. Nos despeja la mente de fantasías y nos permite continuar sobre terreno más sólido.

Si se ha arribado a alguna conclusión en esta tesis, es solo temporal. Como dije anteriormente, si nos volvemos a hacer esta pregunta seguramente otra será la respuesta y otro diagnóstico será necesario.

#### ***REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS***

- “*More is Different*” -P. W. Anderson -4 August 1972-Science- Volume 177-n° 4047.
- “*Conceptos de física moderna*” – A. Beiser 2ª edición –editorial Mc Graw Hill-1994
- “*Que es el bosón de Higgs*” - María Teresa Dova- Ed. Paidós.2015.
- “*Una expedición al mundo subatómico*” – Florian, D. de - Eudeba.2007.
- “Teoría Cuántica de Campos” – Carlos Garcia Canal – UNLP –IFLP (CONICET)
- “*100 años de relatividad*” – Diego Harari, Diego Mazzitelli - Eudeba.2007.
- “*Exploring the Quantum, Atoms, Cavities and Photons*”, Serge Haroche - Jean-Michel Raymond – Oxford University Press.
- “Que es la teoría de la relatividad” – L. Landau, Y. Rumer – Ed. MIR .1969.

- “*Heisenberg-El principio de incertidumbre- ¿Existe el mundo cuando no lo miras?*” – Jesús Navarro Faus - Ed. Grandes ideas de la ciencia.2012.
- “*Evolución del concepto de elementalidad*” - Agustín Ozores Paci - Tesis de maestría
- “*Max Planck -La teoría cuántica – La revolución de lo muy pequeño*” – Alberto Tomas Pérez Izquierdo - Ed. Grandes ideas de la ciencia.2012.
- “*El fracaso de las paradojas*” – I. Radunskaya - Ed. MIR.1975
- “*Física Universitaria*” - Sears –Zemansky- Volumen 1 y 2-13ª edición –Ed. Pearson.
- “*Que es la física cuántica*” – Fidel Schaposnik - Ed. Paidós.2014.
- “*Física Moderna*” - Serway – Moses - Moyer -3ª edición Ed. CENGAGE Learning.2005
- (\*)[https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwjtgueqvq7nAhV\\_D7kGHS\\_JDbgQFjAAegQIBBAB&url=https%3A%2F%2Frevistas.unc.edu.ar%2Findex.php%2FrevistaEF%2Farticle%2Fdownload%2F16154%2F15977%2F&usq=AOvVaw3IaZJBfeglrcTB-UC91haF](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwjtgueqvq7nAhV_D7kGHS_JDbgQFjAAegQIBBAB&url=https%3A%2F%2Frevistas.unc.edu.ar%2Findex.php%2FrevistaEF%2Farticle%2Fdownload%2F16154%2F15977%2F&usq=AOvVaw3IaZJBfeglrcTB-UC91haF)
- (\*\*)[http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/57354/Documento\\_completo\\_\\_pdf-PDFA1b.pdf?sequence=3&isAllowed=y](http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/57354/Documento_completo__pdf-PDFA1b.pdf?sequence=3&isAllowed=y)

#### **FUENTES DE INFORMACIÓN AUDIOVISUALES**

- [https://es.wikipedia.org/wiki/Efecto\\_fotoeléctrico](https://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_fotoeléctrico)
- “*HOY SÍ que vas a entender el PRINCIPIO DE INCERTIDUMBRE*”  
<https://www.youtube.com/watch?v=JnEAMYltzi0> (video del Dr. Javier Santaolalla)

- Relatividad [Experimento mental de Simultaneidad]-  
<https://www.youtube.com/watch?v=jiqruSwm17Q> (video)
- “*El Modelo Estándar de Física de Partículas*” -  
<https://www.youtube.com/watch?v=NMXgIFpSst8> - instituto de física teoría de Madrid (ift) – (conferencia del Dr. Luca Merlo).
- “*¡Materia cuántica! Condensados de Bose-Einstein, superfluido, superconductores*”-  
<https://www.youtube.com/watch?v=hFUzP6JukQw> – instituto de física teoría de Madrid (ift) - Investigador Sebastián Montes.
- “Demystifying the Higgs Boson with Leonard Susskind”- Stanford University Channel on YouTube - <https://www.youtube.com/watch?v=JqNg819PiZY> (conference of Dr. Leonard Susskind)
- “*La Partícula de Higgs y el Misterio de la Masa*” - instituto de física teórica Madrid (ift) -  
<https://www.youtube.com/watch?v=kx9gZqwgSCc> (conferencia del Dr. Alberto Casas)

**ANEXO I - CUESTIONARIO**

Se realizaron 15 preguntas que a continuación detallo, más una nota indicando cual fue el objeto de dicha pregunta.

**1) *¿Hace cuánto que es docente de física?***

*Con esta pregunta tendremos información sobre la experiencia del docente que va a contestar. Consideramos que un docente recibido hace poco tendrá un contexto distinto al de un docente próximo a retirarse.*

**2) *¿Qué título tiene?***

*Buscamos contar con información sobre la formación de la persona frente al alumnado.*

**3) *Ejerce la docencia en un colegio, (Marque la opción elegida).***

- a. *3.1- técnico***
- b. *3.2- bachiller con especialidad técnica***
- c. *3.3- bachiller con especialidad no técnica***

- d. 3.4- artístico*
- e. 3.5- comercial*
- f. 3.6- centro de formación profesional*
- g. 3.7- colegio de adultos*
- h. 3.8- rural*

*La pregunta busca el sesgo que tendrá la encuesta, si las respuestas pertenecen principalmente a docentes de artística, comercial y rural, será indicadora de una dirección distinta que si la contestan docentes de técnica o de centros de formación profesional.*

**4) ¿Tuvo en su formación como profesor, materias de física contemporánea?**

*No es competencia de este trabajo de tesis pero es importante saber la formación recibida por los docentes que deben impartir conocimientos de física contemporánea, como sugiere el trabajo de investigación “Análisis de aspectos relevantes para el abordaje de la Teoría de la Relatividad Especial (TER) en los últimos años de la enseñanza media desde una perspectiva contextualizada histórica y epistemológica” de Irene Arriasecq e Ileana M. Greca, donde dice “Los docentes acuerdan en que la TER es un tema relevante y debería ser incorporado en los planes de estudio de Física del ciclo polimodal, sin embargo parecería que carecen de una comprensión profunda de los conceptos relevantes para interpretar correctamente la TER y sus implicancias, a pesar de haber recibido instrucción formal en el tema.”*

*La presencia o no de los contenidos de física contemporánea pueden sugerir también una carencia en la formación docente.*

5) ***¿Cree necesario impartir estos conocimientos?, (Marque la opción elegida).***

***a. 5.1- Si      5.1.1- ¿Por qué?***

***b. 5.2- No      5.2.1- ¿Por qué?***

*No se debe dejar de suponer que algunos docentes no la enseñen debido a múltiples motivos, que pueden ser económicos, sociales, de tiempo, de competencia del título u orientación con que se reciben los alumnos.*

6) ***¿Enseña conceptos de física contemporánea en el aula?, (Marque la opción elegida).***

***a. 6.1- Si      6.1.1- ¿Por qué?***

***b. 6.2- No      6.2.1- ¿Por qué?***

*La respuesta es justo el motivo del trabajo.*

7) ***¿Qué dificultades encuentra a la hora de tratar estos temas?***

*Se trata de relevar los inconvenientes que experimentan los docentes a la hora de enseñar física contemporánea. Es importante conocer los aspectos más ásperos del abordaje que se hace de los temas.*

**8) *¿Qué bibliografía consulta sobre los temas de física contemporánea?***

*Resultará de interés saber si en el nivel secundario se enseña física contemporánea con textos adecuados a la modalidad.*

**9) *¿Recibe preguntas por parte de los alumnos sobre estos temas?***

*Es importante saber con qué grado de interés los alumnos se disponen a trabajar el tema de física contemporánea, lo que Ausubel llamó en su primer punto para alcanzar un aprendizaje significativo: la predisposición.*

**10) *¿Cree que los niveles de matemática son un impedimento para tratar los temas de la física contemporánea?***

*La pregunta apunta a relevar la percepción de los docentes en relación a la influencia que tienen las dificultades que propone el tratamiento matemático y la posibilidad de tratar el tema en el aula.*

**11) ¿Cree que por la propia naturaleza de los temas de la física contemporánea es difícil abordarlos en el aula?**

*Es un obstáculo muy relevante a la hora de realizar una transposición de los temas de física contemporánea, debido a que en la escuela secundaria se alcanzan niveles de matemática que solo nos permite abordar algunos temas de física contemporánea. Más abajo figuran los contenidos mínimos sugeridos por el Ministerio de Educación de la Ciudad de Buenos Aires, donde queda claro que las herramientas no son suficientes y se hace necesario una transposición. Es por eso que la intención de la pregunta es la de saber si esta trasposición es posible.*

## EJES Y CONTENIDOS

## APLICACIONES DE LA MATEMÁTICA

Ejes	Contenidos
Modelos matemáticos para problemas no físicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estrategias de modelización de problemas de optimización. Programación lineal. Técnicas de resolución de problemas.</li> <li>• Modelización mediante recursos gráficos. Problemas que involucran el uso de recursos geométricos, diagramas y grafos.</li> <li>• Modelización mediante funciones. Problemas no físicos que involucren funciones lineales, cuadráticas, exponenciales y logarítmicas.</li> <li>• Modelización mediante ecuaciones y sistemas de ecuaciones lineales. Problemas que involucren sistemas de dos ecuaciones con dos incógnitas y tres ecuaciones con tres incógnitas.</li> <li>• Posicionamiento por triangulación.</li> </ul>
Matemática para la física	<p><b>Magnitudes vectoriales</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Caracterización vectorial de los movimientos rectilíneos y curvilíneos.</li> <li>• Tratamiento vectorial de la Segunda Ley de Newton. Estudio particular de situaciones de reposo.</li> </ul> <p><b>Nociones de cálculo</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• El límite y la derivada como herramientas para la definición de magnitudes físicas.</li> <li>• Uso de integrales en la física de cuerpos extensos. Cuerpo rígido.</li> </ul> <p><b>Estudio del movimiento armónico y las ondas mecánicas a partir de las funciones seno y coseno.</b></p> <p><b>Desarrollo de prácticas experimentales con:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• implementación del método de cuadrados mínimos y ajuste de curvas;</li> <li>• herramientas de estadística, para la evaluación de las indeterminaciones en las mediciones con análisis de error absoluto y relativo porcentual.</li> </ul>

12) *¿Cómo se percibe usted en relación a los conocimientos relativos a la física contemporánea?*

*Queremos saber qué grado de confianza tiene un docente que aborda el tratamiento de los temas de física contemporánea.*

13) *¿Cree que no hay suficiente material disponible para el desarrollo de estos temas?*

*Con esta pregunta indagamos sobre la disponibilidad de material para el trabajo en clase.*

**14) ¿Cuándo presenta el programa de Física, incluye o piensa en incluir algún tema relativo a la física contemporánea?**

*Es relevante saber si los contenidos de física contemporánea son incluidos en la presentación del programa de la materia a comienzo del año lectivo.*

**15) Aun cuando no trate temas de la física contemporánea ¿Cree que sus alumnos se interesarían por saber algo de estos temas?**

*Relevo sobre que ideas previas tenemos los docentes sobre qué interés produce el tema en los alumnos. Que motivación previa existe a la hora de abordar los temas de física contemporánea.*

## Índice

Agradecimientos.....	2
Prólogo .....	3
Resumen .....	6
Marco Teórico.....	7
Antecedentes .....	11
Física Contemporánea .....	21
Relatividad.....	27
Teoría de la relatividad de Galileo.....	28
Postulados de la Teoría de la Relatividad de Einstein .....	31
Dilatación del tiempo .....	32
Contracción de las longitudes .....	36
Transformaciones de Lorentz .....	39
Transformación de las velocidades en relatividad.....	43
La velocidad de la luz + la velocidad de la luz = ¿velocidad de la luz? .....	44
Simultaneidad de sucesos en relatividad.....	46
Principio de correspondencia en relatividad .....	47
Mecánica Cuántica .....	49
Introducción .....	49
Desde los cuantos al principio de incerteza .....	50
Principio de correspondencia en cuántica.....	69
Teoría cuántica de campos .....	77
Las partículas elementales hoy .....	87
Descripción del modelo estándar de partículas.....	87
Mecanismo de Higgs.....	107
Temas vinculados a la mecánica cuántica para desarrollar en clase .....	111
Experimento de la doble ranura .....	111
Papel de los neutrones en el núcleo atómico .....	123
Condensado de Bose-Einstein.....	126
Decaimiento del carbono 14 y producción de neutrinos en el sol .....	131

Actividades desarrolladas para la realización de la tesis.....	133
Recolección de datos. ....	134
Trabajos recibidos.....	146
Una propuesta .....	146
Conclusiones generales a partir de los datos colectados.....	147
Para finalizar .....	150
Referencias bibliográficas .....	151
fuentes de información audiovisuales .....	152
Anexo I - Cuestionario .....	154