

RICHARD P. FEYNMAN

RECORRIENDO SU OBRA

Por Eduardo IVORRA

1. MOTIVACIÓN PARA ESCRIBIR

El motivo de este, mi segundo "paper" acerca de temas científicos, apunta a escarbar en cierta bibliografía de un físico teórico neoyorquino ya desaparecido, quien aparentemente, e intento confirmarlo a través de las lecturas de algunas de sus obras, fue uno de los más importantes de este siglo, habiendo sido comparado con hombres de la magnitud de Albert Einstein.



Richard P. Feynman, premio Nobel de Física en 1965

"Por su trabajo en la electrodinámica cuántica, con amplias consecuencias en la física de las partículas elementales"

En realidad mi interés por saber y leer mas acerca de su persona y sus trabajos, surgen de algunas de sus ideas más filosóficas que científicas las cuales a mí me han llamado la atención. También me intereso por su tarea como maestro de algo tan complejo como es la ciencia. A pesar de esta complejidad, pudo crear un ámbito de gran cariño por parte de sus alumnos, lo cual, a mi criterio, habla muy bien de la persona, porque a pesar de su grado superior de conocimientos, esto no lo ha inhibido para que pueda humildemente comunicarse con otros y enseñar.

Nuevamente, debo aclarar que este trabajo será una recopilación de aquellas ideas y conceptos, muchos de estos científicos, que a mí me impactan. Intentare que los mismos tengan una ilación conceptual, que permita al que lea este trabajo adquirir o reforzar ciertos conocimientos acerca de los temas que aquí se desarrollaran.

Es decir este escrito tendrá mas las características de un ensayo científico, que de una novela o historia de vida. Siempre por supuesto sujeto a mis limitaciones, no solo acerca de mi comprensión de los conceptos científicos, sino también de mis habilidades como escritor.

La bibliografía a partir de la cual encaró este intento es la siguiente:

El carácter de la Ley Física. R.P. Feynman.
The pleasure of finding things out. R.P. Feynman.
QED. The strange theory of light and matter. R.P.Feynman.
Six easy pieces. R.P.Feynman.
Six not-so-easy pieces. R.P.Feynman.
Are you joking Mr. Feynman? R.P.Feynman
The Meaning of It All. R.P.Feynman

2.INTRODUCCIÓN:

2.1. El comportamiento de la Naturaleza

Lo primero que captura mi interés y también admiración por la persona de Richard P. Feynman, fue lo que el mismo expresa en su libro QED (Quantum Electrodynamics). Este libro surgió a partir del interés que tenía la mujer de un amigo de Feynman por conocer y saber que es lo que los físicos teóricos estudian. Dado que esta persona- Alix G. Mautner- tenía una carrera en Literatura inglesa, sus posibilidades de captar el rigor científico y el lenguaje matemático de la física eran tal vez nulas. No obstante esto, Feynman, menciona en este libro su interés por poder acercar a personas comunes todo aquello que hace a sus quehaceres y conocimientos científicos, aquellas cosas que los físicos han podido conocer acerca de cómo se comporta la Naturaleza. La parte donde Feynman dice quedar colgado por lo locas de las ideas, es lo que para él es lo más interesante: la mecánica cuántica. Es así que le dice a su amiga su intención de preparar algunas clases o lecciones que por supuesto le tomaran más de una hora explicarlas, acerca de este tema. Se lanza en este proyecto con unas lecciones que luego presento y expuso en Nueva Zelanda donde las mismas resultaron exitosas. Estas fueron luego recopiladas en el libro mencionado.

Feynman aclara que lo que intenta explicar no es aquello que aun no se conoce, es decir no hará una elucubración de algo que ronda en su cabeza, sino que hablara de lo que si se conoce y se ha comprobado totalmente, porque dice que esto es maravilloso.

Si bien más adelante se desarrolla el tema específico de estas lecciones acerca de la interacción de la luz con la materia (los electrones), quiero aquí ir al núcleo de lo que me fascina de Feynman. Él le dice en la introducción a su audiencia que si bien ya saben de lo que se tratarán las charlas, surge la pregunta si entenderán algo de lo que se diga. Agrega también que lo que él expondrá es lo que enseña a sus alumnos en el tercero o cuarto año de la escuela para graduados. ¿Cómo podrán entonces entender, siendo que nadie tiene conocimientos científicos avanzados? La respuesta es simple: no entenderán mucho o tal vez nada...!!, pero no deben preocuparse porque tampoco los alumnos entienden, y esto se debe a que el maestro-Feynman- tampoco entiende: "Nobody does!!!" dice Feynman.

Llegado a este punto Feynman se extiende acerca del concepto de "entender". Uno puede no entender porque el lenguaje utilizado es malo, o porque se usen palabras

cuyos conceptos científicos sean diferentes al que entiende el común de la gente, tales como energía, o acción, o trabajo, o incluso luz. Pero la razón más profunda del no entendimiento, habiéndose superadas las causas anteriores, reside en que si bien Feynman esta describiendo COMO la Naturaleza trabaja, no es posible entender el PORQUE trabaja de esa manera. Eso es lo que nadie puede entender, el porque del comportamiento de la Naturaleza en una manera peculiar. Esto es un misterio. A mi personalmente esto me fascino porque en el mundo actual parecería que todo aquello que es un misterio, sobre todo en materia religiosa, debe ser descartado, no es verdadero porque la razón no lo puede comprender. Que un científico de la magnitud de Feynman, describa así el significado de un misterio, me parece maravilloso, sobre todo cuando el mismo se declara agnóstico o mas bien contrario a la religión que no acepta la duda.

Finalmente Feynman, continua diciendo que a partir de la descripción de cómo la Naturaleza trabaja, podrá ser que muchos no lo crean, no lo acepten y por lo tanto inconscientemente cierran sus oídos impidiendo así entender lo que si es entendible. En ese aspecto esto es parte del aprendizaje científico: no importa si una teoría a uno le gusta o le disgusta, o si es entendible o no, o razonable desde el sentido común, lo que importa es si la misma puede predecir resultados que luego concuerden con los experimentos. Pues bien la teoría denominada electrodinámica cuántica QED, describe la Naturaleza como absurda desde el punto de vista del sentido común, pero sus predicciones son asombrosamente exactas. Por eso Feynman remata, "espero que puedan ACEPTAR la Naturaleza tal cual Ella es: absurda!!".

Un detalle que para mi no es menor, a lo largo de este trabajo que aquí menciono, cuando Feynman se refiere a la Naturaleza lo hace en mayúscula, como nombre propio. Notable!!

2.2. Ciencia y Religión

El segundo punto que capturo mi interés acerca de la personalidad de Feynman es su discusión acerca de la relación entre ciencia y religión. Su razonamiento esta basado en lo que el considera central para la religión que es la creencia en Dios, mencionando que si bien no tiene estadísticas considera que mas de la mitad de los científicos no cree en Dios. Para Feynman el problema esta en hacer consistente la creencia en la ciencia con la creencia en Dios, y a pesar de que esta consistencia es algo difícil de lograr, no es imposible. A partir de esta premisa de búsqueda de la consistencia, Feynman se preguntaba porque es difícil de lograr, y si vale la pena intentarlo.

Para Feynman la primera fuente de dificultad surge de que para la ciencia es imperativo dudar, es decir aceptar la existencia de la incertidumbre como una característica fundamental de la propia naturaleza del científico. Para hacer progresos en el entendimiento de algo, Feynman dice que debemos ser modestos y permitirnos no saber. Nada es cierto o probado fuera de toda duda. Uno investiga por curiosidad, porque las cosas son desconocidas y no porque se sabe la respuesta. A medida que mas se avanza en la investigación científica no significa que se esta encontrando la verdad, sino que se esta encontrando que esto o aquello sea mas probable que esto otro. Es así que las expresiones científicas no son acerca de lo que es verdad o lo que es falsedad, sino acerca de lo que se conoce con diferentes grados de certidumbre. Creo que es bueno, dice Feynman, aceptar esta idea no solo para las ciencias, sino también para otras cosas; tiene un gran valor conocer la propia ignorancia. Esta actitud de aceptación de la incertidumbre es vital para los científicos y llega a transformarse en un habito del pensamiento. A partir de allí se reformula la pregunta:

¿Existe Dios?

a esta otra:

¿Qué grado de certeza tengo acerca de la existencia de Dios?

Este cambio tan sutil es de una magnitud enorme y Feynman cree que aquellos científicos que creen en Dios, no piensan a Dios de la misma manera que lo puede hacer el común de las personas, si es que son consistentes con su hábito de pensamiento científico. No creo, dice Feynman, que un científico pueda obtener la absoluta certeza de la existencia de un Dios tal como la tienen las personas religiosas. Aquí es donde a mi criterio existe un error de apreciación por parte de Feynman. Las personas religiosas, pueden hablar de tener la certeza, pero como la creencia en un Dios esta basada en la fe, considero que la fe no es certeza, sino que permite la duda, los cristianos en particular piden o deberían pedir constantemente a Dios para que aumente su Fe, porque la Fe no es certeza. Y si no es certeza entonces ¿da lugar a la duda? Yo pienso que si.

Finalmente Feynman establece que existe una cierta independencia entre las ideas religiosas y muchas ideas que están relacionadas con la moral que a su vez proviene de la religión, es así que dice ser posible dudar de la divinidad de Cristo, a pesar de acordar y comportarse de acuerdo con las máximas del cristianismo.

En otra de sus conferencias acerca de la incertidumbre de los valores, cuando Feynman intenta explicar la inconsistencia implícita entre ciencia y religión, vuelve a mi criterio a incurrir en un error de concepto acerca de la naturaleza divina. Feynman dice:

“es una gran aventura contemplar el universo mas allá del hombre, contemplarlo como habría sido sin la existencia del hombre tal como en realidad ha sido a lo largo de la historia desde el big bang. Cuando esto se logra y el misterio y la majestuosidad de la materia son totalmente apreciadas, entonces se puede volver a mirar al hombre como un pedazo de materia, a mirar la vida como parte de este misterio universal de gran profundidad, es sentir algo raro y excitante, que finalmente termina en forma graciosa por la inutilidad de tratar de entender que es este átomo del universo que llamamos hombre, átomos con curiosidad que se miran a si mismos y se cuestionan porque se cuestionan. Así estas visiones científicas del universo, finalizan en un misterio, al borde de la incertidumbre total pero que son tan profundas e impresionantes que, **aquella teoría que dice que todo el universo esta arreglado por Dios tal como si fuera un escenario donde el hombre lucha la pelea entre el bien y el mal** suena inadecuada”.

Creo que “aquella teoría” de la cual habla Feynman es equivocada; Dios no creó el Universo como quien crea una obra de teatro para divertirse, Dios es el misterio implícito en la naturaleza del Universo que nos habla Feynman, Dios es quien le dio la curiosidad al átomo-hombre para que se cuestionara su origen, Dios es el creador de la majestuosidad que Feynman menciona al decir que todo en el universo, desde las estrellas mas lejanas hasta las bacterias mas microscópicas e inclusive el hombre, están hechos de los mismos ladrillos fundamentales que interactúan misteriosamente para que la vida sea posible.

Es impresionante como Feynman parecería captar lo que otros lo aceptan sin discutir o cuestionar o simplemente si son honestos con sus conciencias por lo que llamamos Fe. Digo esto porque en la misma conferencia, Feynman dice:

“Algunos me dirán que he descrito una experiencia religiosa...,bien diría entonces que esa experiencia religiosa es de tal clase que la religión de su iglesia es inadecuada para describirla y abarcarla. El Dios de la iglesia no es lo suficientemente grande”.

Yo diría que Feynman describe mejor que nadie que yo haya escuchado la grandeza de Dios, él puede hacerlo porque ha captado la grandeza de la Naturaleza; tal vez a lo que se opone o esta en desacuerdo, y por eso se manifiesta contrario a la religión, es a la concepción de un Dios autoritario, poderoso y que no acepta la duda; que difunden algunas iglesias particulares.

3. CIENCIA:

Feynman nos dice que a pesar de que las ideas acerca del desarrollo de la ciencia son viejas, no son la clase de ideas que todos pueden apreciar, sin embargo es importante que las mismas puedan ser traspasadas de generación en generación, porque son grandes ideas de la historia del hombre.

En cierta ocasión Feynman se preguntaba lo curioso que era que cuando lo invitaban a tocar el bongo en publico, algo que hacia bien, al presentador no se le ocurría mencionar que también se dedicaba a la física teórica. Su respuesta a este interrogante a mi me parece que es clave y digna de tener en cuenta sobre todo por aquellos vinculados con la educación de los mas jóvenes:

"...pienso que esto puede deberse a que respetamos mas las artes que las ciencias...esta justificado hablar de otras cosas... de mayor placer estético. Pero hay también ritmos y formas en los fenómenos naturales que no son aparentes a simple vista, sino mediante la lupa del análisis. Estos ritmos y formas son los que llamamos leyes físicas."

¿Qué es la ciencia? Feynman nos revela tres conceptos:

3.1. Método

Ciencia es un **método** para descubrir cosas nuevas. Este método esta basado en el principio que la observación es el único juez acerca de si algo es lo que es o no. Todos los otros aspectos y características de la ciencia pueden ser entendidos directamente cuando entendemos que la observación es el criterio final para probar acerca de la veracidad o no de una idea. Probar significa aquí testear, es decir hacer un test. La excepción prueba o es el test de la regla, significa esto que la excepción prueba que la regla es incorrecta. Este es el principio de la ciencia: si existe una excepción a una regla cualquiera y si esta excepción puede ser probada mediante la observación, entonces la regla científica es incorrecta. El científico trata de encontrar mas excepciones a la regla y determinar las características de estas excepciones, este proceso es en si mismo excitante a medida que se desarrolla. El científico no intenta evitar demostrar que las reglas son incorrectas, sino que por el contrario su motivación esta puesta justamente en lo opuesto. Intenta probar que esta equivocado lo mas rápidamente posible.

El principio que solo a través de las observaciones se determina la verdad de una regla o teoría, impone una limitación muy severa al tipo de preguntas que pueden responderse. Son limitadas las preguntas que pueden formularse de la siguiente manera: ¿si hago esto, que ocurrirá?. Por eso Feynman nos aclara que si algo no es científico, es decir si no puede ser sometido al test de la observación, no significa que eso sea malo o estúpido, no se trata de decir que aquello que no es científico no es bueno. Los científicos toman solo aquellas cosas que pueden ser analizadas a través de la observación. Todo aquello que no se ajusta a estas posibilidades no es científico, no obstante lo cual son cosas importantes para la vida de las personas.

Existe una serie de consecuencias técnicas que se derivan del principio de observación, por ejemplo el método de observación debe ser sumamente meticuloso, se debe rechequear varias veces y cuidadosamente para estar seguros de entender cuales son todas las condiciones y que no se malinterpreten los resultados. El razonamiento científico, requiere de una cierta disciplina rigurosa, la cual debe ser enseñada. Otra característica importante de la ciencia es su objetividad. Es necesario mirar los resultados de una observación objetivamente porque el experimentador podría tener una cierta preferencia de obtener un resultado específico, lo cual invalidaría el carácter científico del mismo.

Se dice que la observación es el juez acerca de la verdad de una idea, pero ¿de donde provienen las ideas? Feynman afirma que no importa tanto de donde provienen, seguramente de otros seres humanos a través de su pensamiento, sin importar si estos están o no capacitados para emitir dichas ideas porque en ciencias, cualquier idea debe ser testeada contra el juez de la observación, si pasa este filtro la idea es aceptada como válida, de lo contrario no. Vemos entonces que dentro del denominado pensamiento científico, no es tan importante quien genera las ideas sino que las mismas sean efectivamente generadas para ser luego chequeadas. No hay una autoridad que decida cual es una idea verdadera y cual una falsa, en ciencias no es importante conocer el background del autor de una idea o su interés en exponer la misma. Es evidente que Feynman tiene un concepto de la autoridad diferente al que tienen la mayoría de las personas, que a mi me cautiva.

Porque realmente el no ve la autoridad en la persona per se, es decir no considera que una persona por tener un cierto grado de autoridad, el cual no es más que un reconocimiento de legitimidad por parte de otras personas dentro de la sociedad, pueda dar veracidad o falsedad a una idea si esta no pasa por el test de la observación. Lamentablemente como el también ha mencionado, no todas las ideas pueden ser tratadas como científicas; es más, existen muchas ideas muy importantes para los hombres que no se adaptan al sistema de observación científico, por el cual están sujetas a que las mismas sean evaluadas por autoridades, siendo imposible establecer una prueba objetiva mediante la observación. Es así que aparecen tantos gurús y maestros que a lo mejor no son tales.

En los comienzos de la física, las discusiones científicas eran mayormente argumentativas, es decir se discutía porque las ideas eran materia opinable. Hoy esto no es así dada la gran cantidad de observaciones que se han realizado sobre las ideas en discusión. Lo que hoy no es normal en física, tal vez lo sea en otras disciplinas científicas donde aun no existe la cantidad de observaciones que permita realizar el test acerca de la veracidad o falsedad de las ideas. Las consecuencias de esto es la dimensión argumentativa de estas disciplinas, por ejemplo economía. En este proceso científico de conocer más el comportamiento de la naturaleza, Feynman nos remarca que todas las conclusiones a las que arribamos en ciencias son inciertas, son solo estimaciones que hacemos acerca de lo que consideramos que ocurrirá, y uno no puede saber con certeza que es lo que ocurrirá porque no es posible realizar los experimentos en forma perfecta. Por eso los científicos están acostumbrados a lidiar con la duda y la incertidumbre, y esta experiencia es muy importante. Feynman considera que esta característica de los científicos es de gran valor, incluso va más allá del pensamiento científico, porque para resolver un problema que nunca antes fue resuelto, se debe dejar abierta la puerta de lo desconocido. Debemos permitir la posibilidad de no resolverlo correctamente, porque de lo contrario si de antemano nos limitamos a algún tipo de solución que este de acuerdo con ciertos preconceptos, podríamos no resolver el problema nuevo nunca. Dado que existe la duda es que se proponen nuevas direcciones para nuevas ideas.

La tasa de crecimiento del desarrollo de la ciencia no esta dada por la tasa de crecimiento de las observaciones realizadas, sino por la de crecimiento de nuevas ideas y cosas para probar. Si no reconocemos la duda y la ignorancia, no obtendremos nuevas ideas, por lo tanto el avance de la ciencia se detendría. Lo que hoy denominamos conocimiento científico, no es nada mas -ni nada menos- que un conjunto de afirmaciones con diferentes grados de certidumbre respecto de cada una de ellas, las cuales conforman un cuerpo de conocimientos. Algunas de estas son mayormente inciertas, otras son mayormente ciertas, pero ninguna es absolutamente cierta. Feynman aquí recalca una virtud propia de los científicos, que a mi juicio seria importante rescatar para todas las personas. Los científicos están acostumbrados a vivir y no saber, es decir conviven con la incertidumbre. Feynman recalca que ante el asombro de algunos que le dicen: "¿cómo podes vivir y no saber?" , el responde que siempre ha vivido sin saber y que su preocupación es como llegar a saber, es decir como adquirir el conocimiento. Esto permite una humildad intelectual que hace posible el progreso a partir de la duda y de la libertad de pensamiento, nadie puede imponer a nadie que dudar y que pensar. Si sabemos que no estamos seguros de algo, dice Feynman, tenemos la posibilidad de mejorar la situación, mediante el esfuerzo y la creatividad del pensamiento. Si creemos saber todo, nada podremos cambiar. Por eso la duda es algo de valor en el pensamiento científico, y a mi juicio también en otros campos, a pesar de que Feynman también duda de esto.

3.2. Contenidos

Ciencia es el cuerpo de conocimientos que surge de esas cosas nuevas. Los denominados **contenidos**, lo que se ha logrado conocer a fondo. Estos son para Feynman la frutilla de la torta de los científicos. Los científicos piensan y siguen un riguroso y disciplinado trabajo de pensamiento, no por querer encontrar aplicaciones a lo que están pensando, sino por la sensación de gozo que encuentran al descubrir algo nuevo, esta es la razón real por la que existe la ciencia. Quiero aquí aportar una experiencia personal: estando en un curso de física cuántica, cuando el profesor, un joven licenciado en física, nos contaba los años que Einstein había dedicado a su teoría general de la relatividad, la cual finalmente no era algo de gran aplicación en el mundo moderno actual, y que en esa área el estaba desarrollando su tesis doctoral, le pregunte que era lo que lo motivaba a el como a otros físicos teóricos a dedicar tanto esfuerzo a algo que para muchos resulta intrascendente. No supo contestarme, o bien me dijo que nunca se había hecho esa pregunta. Bueno creo que Feynman me la contesto. Salvando las distancias, es algo similar al porque yo escribo esto. La motivación pasa mas por una especie de satisfacción profunda producida por lo nuevo. En esta línea de motivación es posible que encontremos también a los exploradores, a los grandes marinos de la antigüedad.

No es posible entender a la ciencia y sus relaciones con todo lo demás, a menos que podamos apreciar la gran aventura de nuestro tiempo. Feynman nos desafía diciendo que no vivimos en nuestro tiempo a menos que entendamos que este es una tremenda aventura, algo excitante y salvaje. Se pregunta si creemos que la ciencia, y sus contenidos son aburridos. A partir de esta pregunta, y con una idea antigua inicia una recorrida por diferentes aspectos de la ciencia que muestran a la misma como excitante. Los antiguos creían que la tierra se apoyaba en las espaldas de unos elefantes, los que a su vez se paraban en la caparazón de una tortuga gigante que nadaba en un mar sin fondo. ¿Qué sostenía al mar? Era una pregunta sin respuesta. La creencia era resultado de la imaginación, era una idea poética. ¿Que vemos hoy? El mundo es una bola que gira y las personas están mantenidas sobre esta bola en todas las direcciones, algunas para arriba otras para abajo (¿qué es arriba y abajo?). Además giramos alrededor de una bola de fuego. ¿Qué es lo que nos mantiene? La fuerza de gravedad que no es solo algo característico de la tierra, sino que es lo que hace que la tierra sea redonda, que mantiene al sol unido

y nos mantiene a nosotros moviéndonos alrededor de él en un intento perpetuo de escapar.

La gravedad no solo ejerce su influencia en todas las estrellas, sino también entre ellas. Este universo ha sido descrito por muchos, pero continúa con su extremo tan desconocido como el fondo del mar sin fondo donde nadaba la tortuga gigante, tan misterioso y poético ahora como en la antigüedad. Pero la imaginación de la naturaleza es mucho más grande que la imaginación del hombre. Pasemos a otro de los grandes misterios, el de la tierra y el tiempo. ¿qué es el tiempo? ¿que poeta ha escrito algo acerca del tiempo comparable con el significado real de este, con el largo y lento proceso que percibimos en la evolución? Primero era la tierra sin nada de vida sobre ella. Durante miles de millones de años, esta bola giraba sin que nadie apreciara todo lo que sobre ella ocurría. Feynman se pregunta si podemos llegar a concebir el significado este de la tierra sin vida sobre ella. Dice que estamos tan acostumbrados al hecho de la existencia de la vida que no podemos aprehender el significado de la tierra sin vida, no obstante lo cual, la mayor parte del tiempo de existencia de la tierra desde su origen hasta ahora, transcurrió sin vida sobre ella. La vida misma, ¿que significa? La maquinaria interna de la vida, la química de las partes, todo eso es algo maravilloso. Y resulta también que toda la vida está interconectada.

La clorofila, una sustancia química importante que procesa el oxígeno dentro de las plantas, tiene una parte que sigue un patrón hexagonal, un anillo denominado anillo bencénico. Lejos de las plantas, están los animales como el hombre, donde en nuestro sistema de transporte de oxígeno existe la hemoglobina que contiene el mismo tipo de anillo, en cuyo centro en lugar de magnesio hay hierro, por eso son rojos y no verdes, pero son los mismos anillos.

Las proteínas de las bacterias y de los seres humanos son exactamente las mismas. La universalidad de la química más profunda de todos los seres vivos es algo fantástico y maravilloso. Todo el tiempo nosotros, los seres humanos, nos hemos enorgullecido por nuestro reinado sobre los animales, no parecería existir tal superioridad, al menos no desde un punto de vista puramente científico. O los átomos, cosas que parecen quietas como un vaso de agua cubierto durante varios días, están en actividad continua, átomos separándose de la superficie, rebotando en las paredes del vaso, retornando a la forma de agua. Lo que a nuestros ojos se presenta calmo es una danza dinámica y salvaje. Y de nuevo se ha descubierto que todo el mundo está hecho de átomos, que las estrellas están hechas de los mismos componentes que nosotros, entonces nos surge la pregunta ¿de donde viene esto que compone todo? Parece como si una estrella explotó en algún momento tal como hoy explotan, y de los residuos de dicha explosión durante 4.500 millones de años que evolucionan y cambian, surge una extraña criatura que se para frente a una audiencia también de extrañas criaturas para explicar y explicarse de donde provienen. "Que mundo maravilloso!!" finaliza Feynman.

Siguiendo con el tema de los contenidos Feynman menciona a la electricidad, las fuerzas de atracción entre las cargas positivas y negativas, el balance eléctrico de todas las sustancias que impidió durante mucho tiempo detectar el fenómeno de las cargas eléctricas, y de que los ladrillos de la naturaleza eran cargas eléctricas, que aunque ahora nos suena razonable, ¿que es esa fuerza de atracción, esa acción a distancia entre dos cuerpos?, lo mismo que nos preguntamos en el caso de la gravedad. Vemos que existe una tremenda maquinaria dentro de todo lo que investigamos, pero la ciencia no es aún totalmente apreciada. Feynman describe su experiencia en la lectura de un libro escrito por Michael Faraday: "Historia química de una vela", donde dice que el punto del autor era que no importa lo que uno observe, si uno lo observa detenidamente, se involucra en todo el universo. Faraday describe en este libro que ciertas propiedades de algunos elementos hacen

que estos se unan a otros por las atracciones eléctricas dado que algunos son positivos y otros negativos, describe que la electricidad viene en unidades dentro de los átomos. Esto para Feynman fue un momento dramático dentro de la historia de la ciencia porque fue uno de esos momentos donde dos grandes campos de estudio científico se juntaban y se unificaban. Dos cosas aparentemente diferentes eran en realidad diferentes aspectos de la misma cosa. La electricidad se estudiaba y la química también se estudiaba, de repente la unión, los cambios químicos se producen como resultado de las fuerzas eléctricas. Este tipo de unificaciones son para los científicos momentos gloriosos.

3.3. Tecnología

Ciencia significa las cosas nuevas que se pueden hacer o que se hacen con los descubrimientos alcanzados. Este último concepto, se conoce más precisamente como **tecnología**, lo cual no es más que la ciencia aplicada. Este sea tal vez el aspecto o la característica más obvia de la ciencia; el hecho de que como consecuencia del avance de la ciencia uno tiene el poder de hacer cosas. Este poder está a la vista, la revolución industrial, las posibilidades de producción de alimentos para alimentar a todo el planeta, los avances en materia de salud, la producción de energía, son consecuencias de la ciencia. Ahora bien este poder de hacer cosas no viene con un manual de instrucciones, es decir no viene con instrucciones acerca de lo que está bien y lo que está mal. Los productos de este poder son buenos o malos según como sea utilizado. Se mejora la producción, pero la automatización deja gente sin trabajo; mejoramos la salud, pero existen personas en laboratorios secretos fabricando armas químicas, algo que se nos ha hecho bien tangible después del 11 de septiembre de 2001 (WTC: RIP), la palabra ántrax está en nuestro vocabulario.

Estamos felices dice Feynman con el desarrollo del transporte aéreo, pero nos horrorizamos con las guerras. La energía nuclear presenta posibilidades asombrosas pero también la sombra de las bombas nucleares, empalidecen este avance científico. Entonces ¿podemos decir que la ciencia tiene algo de valor para la humanidad? Su respuesta me parece brillante, si tiene valor, porque el poder de hacer cosas nuevas que puedan ayudar a la vida humana tiene valor. Que los resultados sean buenos o malos, dependen de cómo dicho poder es utilizado, pero es el poder mismo lo que tiene valor. Y nos da una metáfora muy buena; estando en un templo budista en Hawái un hombre le dijo que a cada hombre se le daba al nacer la llave que abre las puertas del paraíso. Esa misma llave también abre las puertas del infierno.

Así también es la ciencia, y la misma no nos dice cuál es cuál puerta, nosotros debemos descubrirlas para abrir una y mantener la otra cerrada. ¿Debemos tirar la llave y resignarnos a no poder abrir las puertas del paraíso? ¿o debemos pelear con los problemas para aprender como utilizar la llave? Este es el cuestionamiento fundamental, y no creer que la llave no tiene ningún valor, porque sí lo tiene. La forma de controlar el poder que tiene la ciencia es lo complejo, y esto es algo no tan científico de lo cual, los científicos poco conocen.

4. PARA QUÉ SIRVEN LAS MATEMÁTICAS:

En una entrevista le preguntaron a Feynman, si las teorías físicas continuaran siendo tan abstractas y matemáticas como hasta ese momento se estaba viendo, o si podrían surgir físicos como Faraday a principio del siglo XIX quien no era muy

sofisticado en matemáticas pero tenía una poderosa intuición física. Su respuesta lamentablemente para los que pretendemos no entrar tanto en las abstracciones matemáticas fue que las chances de que un símil Faraday aparezca son bastante bajas. Las matemáticas son necesarias incluso para entender lo que se ha hecho hasta ahora. Mas allá de esto, el comportamiento de los sistemas sub-nucleares es tan extraño comparado con aquellos con los que el cerebro humano se ha tenido que enfrentar hasta ahora, que los análisis a realizar tienen que ser muy abstractos. Los modelos de Faraday eran mecánicos, con resortes, alambres, y sus imágenes eran de geometría básica. Ya hemos comprendido todo lo que surge desde este punto de vista mas sencillo. En este siglo, las nuevas teorías son lo suficientemente diferentes y oscuras como para que se haga necesario la utilización de mucha matemática. Esto no significa para Feynman que solo algunos estarán en condiciones de contribuir y entender con los nuevos desarrollos físicos, sino que posiblemente algunos otros desarrollen nuevos métodos para entender los procesos matemáticos mas fácilmente e incluso a una edad mas temprana. La matemática es un descubrimiento humano y como tal es factible de ser entendida por cualquier humano.

Las reglas que describen la naturaleza parecen ser matemáticas. Esto no resulta por el hecho de que la observación es el único juez de la veracidad o no de las ideas científicas, tampoco es una característica necesaria de la ciencia; simplemente resulta que en física, se pueden establecer leyes matemáticas que permiten realizar predicciones muy poderosas. ¿Por qué la naturaleza es matemática o mejor se expresa a través de un lenguaje que denominamos matemático? Esto es un misterio!!!. Es imposible comunicar honestamente la belleza de las leyes de la naturaleza, de manera que la gente pueda realmente sentirla, si no se posee un conocimiento profundo de la matemática. Para Feynman, las matemáticas no son solo un lenguaje que con paciencia puede ser traducido; las matemáticas son lenguaje mas razonamiento, lenguaje mas lógica. Las matemáticas son en definitiva un instrumento para razonar, de hecho son una gran colección de resultados obtenidos por un cuidadoso proceso de pensamiento y razonamiento. A través de ellas se pueden establecer conexiones entre diferentes afirmaciones científicas.

Las complejidades aparentes de la naturaleza, con todas sus reglas y leyes, están estrechamente vinculadas entre si. Sin matemáticas es imposible descubrir entre la enorme variedad de hechos y fenómenos, la lógica que permite pasar de uno a otro. Así Newton mediante razonamientos del tipo geométricos logro demostrar algunas de sus leyes. Hoy se ha sustituido este tipo de razonamiento por otro mas analítico que utiliza símbolos, dado que estos son mas rápidos y eficientes para explicar los fenómenos de la naturaleza. Cuando en física un problema se complica, lo toman los matemáticos, quienes establecen una línea y lógica argumental para seguirlo, si esto no existiera, es necesario inventar un razonamiento propio. Así, cualquiera que razone sobre cualquier cosa contribuye al conocimiento de lo que ocurre cuando se piensa en algo. Si se hace abstracción de ese algo, esta se convierte en una rama de la matemática. Pensemos que así fue como Newton invento el llamado calculo infinitesimal para resolver ciertos problemas de física. Vemos como las matemáticas son muy importantes para la física, dado que existen tantas maneras diferentes para hablar de las cosas que ocurren y se observan, que las matemáticas permiten simplificar, obtener consecuencias, analizar situaciones y conectar las diferentes proposiciones.

En otro orden de cosas relativas a la matemática, Feynman nos aclara que a los matemáticos, solo les importa la estructura del razonamiento, sin importarle de lo que están hablando o si eso de lo que hablan es cierto. Simplemente enuncian los axiomas ya partir de estos emprenden un camino de razonamiento lógico. Si los axiomas son precisos en su enunciado y completos, la persona que los utiliza para

razonar, no necesita conocer el significado de las palabras para deducir conclusiones. Por ejemplo, si en los axiomas se usa la palabra triángulo, en las conclusiones estará esta palabra también por más que la persona que hizo la deducción a partir de los axiomas, no tenga idea lo que esto- triángulos- significa. Los matemáticos preparan razonamientos abstractos usables, si se dispone de un conjunto de axiomas sobre el mundo real. En cambio para el físico todas las frases tienen significado, en física, a diferencia de en matemáticas, hay que conocer la conexión entre las palabras y el mundo real.

Ahora bien, Paul Dirac descubrió las leyes de la mecánica cuántica relativista simplemente suponiendo la ecuación, a veces suponer la ecuación es un método efectivo para concebir nuevas leyes físicas. Esto confirma que las matemáticas son una manera profunda de expresar la naturaleza y que cualquier intento de describir la naturaleza a partir de principios filosóficos o intuiciones puramente mecánicas, no es eficiente.

Me resulta maravilloso lo que Feynman dice acerca de una preocupación suya:

"...siempre me ha preocupado el hecho que, de acuerdo con nuestro conocimiento actual de las leyes de la física, a una computadora le cueste un número incontable de operaciones lógicas descubrir lo que ocurre en cualquier lapso de tiempo, por pequeño que sea, y en cualquier lapso del espacio por pequeño que sea. ¿Cómo puede ser que en una región tan pequeña ocurran tantas cosas?...Esta inquietud me ha llevado a menudo a proponer la hipótesis que, en última instancia, la física no necesitara de un enunciado matemático, que al final se nos revelara su maquinaria y las leyes resultaran ser simples, como las de una partida de damas con sus aparentes complejidades..." "...Pero esta especulación es prejuiciosa del tipo me gusta o no me gusta, y por lo tanto, tal vez no sea conveniente."

"El Gran arquitecto sin embargo parece ser un matemático, a aquellos que no saben matemáticas les resulta difícil sentir realmente la profunda belleza de la naturaleza"

Por eso si se quiere conocer la naturaleza, si se quiere captarla, es necesario conocer el lenguaje en el que nos habla. La naturaleza ofrece su información solo de una manera, y no debemos ser tan poco humildes como para pedirle que cambie antes de prestarle atención.

Ninguno de los argumentos intelectuales podrá hacer entender a unos oídos sordos lo que significa la experiencia musical. De igual forma los argumentos intelectuales no podrán proporcionar un conocimiento de la naturaleza a aquellos que no dispongan de "oídos" matemáticos. Esta limitación de horizontes dice Feynman, sea quizás lo que hace suponer a algunos que el centro del universo es el hombre cuando en realidad tal vez no lo sea.

5. LA FÍSICA:

La física es para Feynman, la más fundamental de todas las ciencias naturales, la que incluye a todas las otras ciencias, y que ha tenido un efecto muy profundo en todo el desarrollo científico que se ha dado a lo largo de la historia del hombre. Es a partir de la física o de lo que antiguamente se conocía como filosofía de la naturaleza, de donde todas las otras ciencias han emergido. Desde el comienzo

debemos entender que la física no está en la misma categoría que la matemática, esta última no es una ciencia de la naturaleza dado que la validez de sus predicciones no surgen de la experimentación. Feynman entiende a la matemática como un lenguaje; el lenguaje de la naturaleza, es decir la manera como la naturaleza expresa los fenómenos físicos que en ella ocurren. Veremos más adelante como se relaciona la física con otras ciencias.

Cuando Feynman encara las primeras lecciones de física que dio en Caltech, las cuales dieron lugar a la publicación de sus famosas "Lectures on physics", les advierte a sus alumnos que para llegar a ser físicos es necesario estudiar doscientos años de desarrollos de los más rápidos que se produjeron en uno de los más importantes campos de conocimiento. Esto que parecería imposible hacerlo en una carrera de cuatro años no lo es. ¿Por qué? Para Feynman es posible dado que se ha podido condensar esta enorme masa de resultados y conocimientos, en leyes que resumen todo este conocimiento. Ahora bien, ¿por qué entonces no se estudian directamente estas leyes básicas y luego se muestra como las mismas funcionan en diferentes circunstancias?. Del mismo modo como se hace en el caso de la geometría euclidiana, donde se dan los axiomas y desde ellos se producen las deducciones. "No satisfechos con aprender física en cuatro años, la quieren aprender en cuatro minutos" les dice Feynman a sus alumnos. La respuesta a este interrogante es clara y sencilla. A criterio de Feynman, esta imposibilidad se da por dos motivos:

No conocemos todavía todas las leyes básicas. Sigue existiendo una frontera de ignorancia expansiva, o sea a medida que se avanza, nuevas incógnitas aparecen.

Volviendo al capítulo referente a las matemáticas, Feynman resalta que las expresiones correctas de las leyes de la física, implican algunas ideas poco familiares que requieren una matemática avanzada para su descripción. Es así que se necesita un considerable tiempo de preparación y entrenamiento, para poder incluso aprender lo que las palabras significan.

Por eso la física debe estudiarse parte por parte, es decir a través de aproximaciones desde lo más simple a lo más complejo. Cada una de estas partes del todo de la naturaleza, es una mera aproximación a la verdad completa, dado que lo único que sabemos con seguridad, es que todavía no conocemos todas las leyes de la naturaleza.

Como antes se mencionó, el principio de la ciencia es que la prueba del conocimiento es la experimentación, es decir los experimentos son los únicos jueces de la verdad científica, pero aquí Feynman va más allá, ¿de dónde salen las leyes físicas que se deben probar a través de los experimentos?



Con el físico Murray Gell-Mann, que también obtendría el Premio Nobel de Física en 1969

Como antes se mencionó, el principio de la ciencia es que la prueba del conocimiento es la experimentación, es decir los experimentos son los únicos jueces de la verdad científica, pero aquí Feynman va más allá, ¿de dónde salen las leyes físicas que se deben probar a través de los experimentos? Y su respuesta siempre simple y contundente: Por un lado de los propios experimentos que nos

brindan ciertas claves acerca de algún patrón de comportamiento de la naturaleza que pudiera transformarse en una ley general; y por otro lado con el mismo grado de importancia, de la propia imaginación del ser humano, que a partir de esas pequeñas claves o pruebas encontradas al azar, se le ocurre generalizarlas en leyes para luego volverlas a probar a través de la experimentación. Este proceso de imaginación, es tan difícil dice Feynman, que se ha creado en la física un tipo de división del trabajo. Así los físicos teóricos imaginan, deducen y adivinan (se tiran a la piletta) y los físicos experimentales, que experimentan, aunque también en dichos experimentos tienen que imaginar, deducir y tirarse a la piletta.

En este avance de la física, las leyes descubiertas, se van corrigiendo a medida que nuevos experimentos demuestran su inconsistencia, las nuevas leyes que son superadoras de las anteriores se muestran cada vez mas difíciles de captar o entender. Quiero aquí volver sobre lo que para Feynman es el concepto de "entender". A partir del desarrollo del método científico, consistente en observar, razonar, experimentar e imaginar, el hombre fue explicándose aquellas cosas que veía y quería saber como y porque eran así, por simple curiosidad. De esta forma se fue construyendo una visión básica del funcionamiento de la naturaleza, a la que denominamos física fundamental. Pero no queda totalmente claro que significa entender. Personalmente me impactó mucho la analogía del juego de ajedrez que utiliza Feynman para explicar este concepto. Imaginemos por un momento, que todo el arreglo complejo de cosas que se mueven y ocurren al que denominamos "el mundo" es como un gigantesco juego de ajedrez jugado por los dioses, y que nosotros somos observadores externos a dicho juego. No conocemos cuáles son las reglas del mismo, solo tenemos permitido observar lo que pasa, es decir ver como los dioses mueven las piezas para jugar. Si destinamos un tiempo suficiente a observar, podríamos captar como son algunas de las reglas de este ajedrez gigante. Las reglas estas son lo que llamamos la física fundamental, es decir las leyes básicas de la física. Aun si conociéramos todas las reglas del juego (todas las leyes físicas de la naturaleza), podríamos no entender el porque de ciertos movimientos, simplemente porque el juego es complejo y nuestras mentes limitadas. Si uno sabe algo de ajedrez, sabe que es posible saber como se mueven todas las piezas, pero aun así no saber como jugar o porque en una partida jugar de una manera u otra, o si vemos una partida de grandes maestros, porque mueven las piezas como las mueven en cada una de las jugadas. Así ocurre en la naturaleza, solo que en forma mucho mas complicada, no obstante lo cual luego de cientos de años de observación de "la partida" se han podido determinar gran cantidad de leyes fundamentales, aunque aun no todas.

El estado del conocimiento físico actual, es que conoce la casi totalidad de los movimientos posibles de las piezas. O sea que además de no conocer todas las reglas, lo que podemos explicar a partir de las leyes que conocemos es bastante limitado, porque casi todas las situaciones son tan enormemente complicadas que no podemos seguir el juego con las reglas que conocemos, mucho menos con aquellas que aun no conocemos. Debemos entonces limitarnos a las cuestiones más básicas de las reglas del juego, y decir que si conocemos las reglas, consideramos entonces que "entendemos" el mundo.

Pero ¿cómo podemos decir que las reglas que estamos imaginando son las correctas siendo que no podemos analizar el juego muy bien? continua preguntándose Feynman. Su respuesta, metafórica con el juego de ajedrez es que existen tres caminos a saber:

En primer lugar puede haber situaciones en la naturaleza con muy pocas partes intervinientes, que nos permita darnos cuenta y predecir como se comportaran dichas partes. Es como si hubiera pocas fichas en un rincón del tablero de ajedrez, con pocas posibilidades de movimientos.

Otra posibilidad es chequear las reglas a partir de reglas menos específicas derivadas de las anteriores. Por ejemplo sabemos que un alfil se mueve en diagonal, por lo que siempre un alfil estará ubicado en una casilla del mismo color, es así que podríamos predecir las ubicaciones posibles del alfil aunque no supiéramos que se mueve siempre en diagonal. Puede ocurrir en el transcurso del juego que un peón se transforme en alfil en un casillero de diferente color, produciendo así una confusión acerca de la regla que estábamos utilizando, esto pasa en la física continuamente, durante mucho tiempo tenemos una ley que funciona o predice efectos perfectamente y de repente aparece algo nuevo, que contradice a la ley que creíamos fundamental y cierta. Esto es lo que permite descubrir nuevas leyes, a partir de ver donde las viejas no funcionan más.

Por último como tercer camino de respuesta acerca de si nuestras ideas son correctas, Feynman nos menciona el mas crudo pero el mas poderosos de todos. Si observando una partida de ajedrez podríamos no saber porque el jugador (un gran maestro) mueve una ficha de una determinada manera, podríamos entender groseramente que el está por ejemplo protegiendo al rey, dado que de acuerdo a lo que vemos es razonable que así lo haga en las circunstancias de la partida en las cuales se encuentra. De la misma manera a menudo podemos entender a la naturaleza en forma grosera o gruesa sin estar en condiciones de ver lo que cada parte de esta está haciendo. Es decir entendemos por aproximación.

En un principio, los fenómenos de la naturaleza fueron divididos a grosso modo en clases. Así surgieron los conceptos o teorías acerca de calor, electricidad, mecánica, magnetismo, propiedades de las sustancias, fenómenos químicos, luz y fenómenos ópticos, rayos x, física nuclear, gravedad, fenómenos con mesones, etc. Sin embargo el objetivo siempre ha sido y es, poder llegar a ver y a entender la naturaleza en forma completa, como diferentes aspectos de un mismo conjunto de fenómenos; es decir poder unificar y relacionar, y no ver las explicaciones como si estos se dieran en compartimentos estancos. Este es el problema actual de la física teórica básica: encontrar las leyes generales detrás de los experimentos que realizamos con las observaciones; amalgamar/ unir estas clases, conceptos o teorías.

Haciendo u recorrido histórico vemos como los físicos han logrado amalgamar muchos de estos conceptos, pero a medida que los experimentos continúan, nuevas cosas son descubiertas que impiden, obstaculizan y hacen más complejas, las intenciones de unificación. En este proceso de amalgamar, encontramos que en un momento teníamos el tema del calor y del movimiento o mecánica; con la teoría de los átomos, se comprobó que los átomos en movimiento producen calor, es así que se lograba explicar el calor y los efectos de la variación de la temperatura a partir de las leyes de la mecánica. Otra unión tremenda fue el descubrimiento de la relación entre la electricidad, el magnetismo y la luz; los cuales fueron explicados como diferentes aspectos de un mismo fenómeno, que hoy se conoce como el campo electromagnético. Otra unificación importante fue la de los fenómenos químicos, con las propiedades de las sustancias físicas, con el comportamiento de las partículas atómicas, lo cual se conoce como la mecánica cuántica de la química. Así se fueron unificando las teorías o las ideas, pero siempre fueron apareciendo nuevas cosas, los rayos x, los mesones, los quarks.

¿Será posible alguna vez unificar todo, ver que todo lo que ocurre en la naturaleza puede reducirse a diferentes aspectos del mismo fenómeno fundamental? Nadie lo sabe. Solo podemos continuar descubriendo piezas y viendo como las colocamos en este gigantesco rompecabezas que es la naturaleza. Si el numero de piezas es finito, y si el rompecabezas tiene un borde donde termina, es algo desconocido hasta que terminemos de armarlo, si es que en algún momento esto ocurrirá. Lo

que sí podemos ver ahora es a que estado de unificación han llegado los físicos hasta ahora, y cual es la situación de entendimiento de fenómenos básicos en términos de los principios mas pequeños y elementales, algo así como preguntarnos como están hechas las cosas y cuantos son los elementos componentes fundamentales y últimos.

Feynman se pregunta entonces por donde empezamos, si por las leyes más fáciles aunque incorrectas al menos en ciertos campos, o por aquellas que son mas generales aunque difíciles de captar. En términos concretos, su pregunta es ¿empezamos por la relatividad, la cuántica, el espacio de cuatro dimensiones, o por la ley de la masa constante, las leyes de Newton, etc.? Su respuesta concreta es: mejor iniciarnos con un mapa general de la física, para luego comprender los puntos particulares en su inserción en la física general. Por eso es que empezamos con la siguiente afirmación: **la materia está hecha de átomos**, este es el punto de partida propuesto.

Un recorrido histórico en el desarrollo de la física

Podemos tener un buen panorama de la física a partir de un momento histórico, que algunos dicen divide a la física en dos: clásica y moderna. Este momento es alrededor de comienzos del siglo XX (1900-1920). Antes de esa fecha la visión del universo consistía en un espacio geométrico tri-dimensional tal como lo describía Euclides; y las cosas cambiaban en un medio denominado tiempo. Los elementos existentes en esta visión del universo son partículas, tales como por ejemplo los átomos, las cuales tienen determinadas propiedades definidas. ¿Cuáles son estas propiedades?:

Inercia: por la cual si una partícula se esta moviendo en una dirección, así continuara mientras no actúe una fuerza sobre ella.

Fuerzas: que a esta altura se las consideraba de dos tipos. Primero una interacción bastante compleja a través de la cual los átomos se mantienen juntos formando las diferentes sustancias en diferentes condiciones físicas. Mientras que el otro tipo de interacción consistía en una de largo alcance. Una atracción suave entre cuerpos que varia inversamente con el cuadrado de la distancia que separa a ambos cuerpos. Esta fuerza se la conoce como gravitación o fuerza de gravedad. Porque los cuerpos se mantienen en movimiento- es decir tienen inercia- o porque existe la ley de la gravitación era algo desconocido.

Presión: en este intento de descripción de la naturaleza, se explica que un gas, y también toda la materia puede entenderse simplemente como una gran cantidad de partículas que se mueven. De esta manera muchas de las cosas que observamos por ejemplo en la costa del mar se conectan entre si. Primero la idea de presión, que proviene de los choques de los átomos contra aquello donde medimos la presión. Si todos los átomos se en el aire, se movieran en una misma dirección, tendríamos el viento.

Calor: si por el contrario los átomos en un sólido, se mueven en forma totalmente aleatoria y frenéticamente, tendremos el calor.

Densidad: existen también ondas con exceso de densidad en el aire, esto significa que muchas partículas se agolpan en un sitio y empujan a las que están mas adelante en la dirección de su movimiento. así podemos explicar el sonido. Sabemos que donde no hay partículas (en el vacío) no hay sonido. Es impresionante todo lo que podemos explicarnos a partir de esta concepción del universo.

¿Qué clase y cuantas partículas existen? En ese momento se consideraba la existencia de 92 diferentes tipos de partículas (92 diferentes tipos de átomos o elementos). Sus nombres se asocian a sus propiedades químicas.

Carga: siguiendo con esta explicación, ¿qué es lo que mantiene a los diferentes átomos unidos entre si para conformar diferentes sustancias? ¿por qué un átomo de carbono atrae uno o dos átomos de oxígeno pero no tres? ¿es la gravitación lo que los mantiene unidos? La respuesta es no, dado que esta fuerza es demasiado débil para esto. Imaginemos entonces una fuerza similar a la de la gravedad en el sentido de que varía inversamente con el cuadrado de la distancia, pero muchísimo mas poderosa y con una diferencia. Cuando explicamos el fenómeno gravitatorio, cualquier cuerpo atrae a otro cuerpo, pero en este caso – que por cierto es el caso de las fuerzas eléctricas- vemos que partículas con una característica similar se repelen, mientras que si la característica es diferente o contraria, se atraen. Esta característica que produce la atracción o repulsión eléctrica es lo que denominamos carga.

Podemos así explicar que las sustancias están conformadas por partículas que tienen diferente carga, manteniéndose así fuertemente unidas, las sustancias son de esta manera neutras desde el punto de vista eléctrico. La base de la interacción entre los átomos es entonces eléctrica. Todas las cosas incluso nosotros mismos estamos compuestos por átomos. Estos átomos se consideraban conformados por un núcleo cargado positivamente (pensemos ¿que es la carga?), y otras partículas mucho mas pequeñas alrededor del núcleo denominadas electrones. Para que exista neutralidad eléctrica es necesario que existan la misma cantidad de electrones como de cargas positivas denominadas protones, ubicándose estas en el núcleo.

Concluimos en nuestro modelo de las partículas que las propiedades de los diferentes elementos dependerán de la cantidad de electrones que estos tengan, principalmente de los electrones en la ultima capa es decir aquellos que están en condiciones de interactuar con otros elementos.

No es sencillo explicar o entender el significado de la carga eléctrica, diciendo que las iguales se repelen y las diferentes se atraen. Una representación mas adecuada consiste en visualizar que la existencia de una carga positiva, en cierto sentido distorsiona o crea una condición en el espacio, de manera tal que cuando se coloca una carga negativa en dicha zona, esta siente la influencia de la otra carga positiva. Esta potencialidad de producir una fuerza se denomina campo eléctrico. De esta manera concluimos en dos reglas: a) Una carga genera un campo eléctrico, b) cargas dentro de un campo sufren fuerzas sobre ellas y se mueven. Hagamos el siguiente experimento, frotamos un peine de manera tal que le daremos una cierta carga eléctrica. Si luego colocamos a una cierta distancia un papel también cargado eléctricamente y movemos el peine hacia ambos lados, veremos como el papel también se mueve apuntando hacia el peine. Si el movimiento del peine se hace mas rápido, el papel tendrá como una demora en seguirlo, esta demora en realidad esta producida por otro fenómeno que surge cuando hay cargas eléctricas en movimiento relativo entre si. Este fenómeno se lo conoce como magnetismo. Decimos entonces que las fuerzas eléctricas y magnéticas pueden ser atribuidas al mismo fenómeno, siendo aspectos diferentes de la misma cosa. Un campo eléctrico cambiante no puede existir sin producir magnetismo.

Imaginemos, dice Feynman, un corcho en una pileta, podemos moverlo empujando al mismo hacia abajo. Si hacemos esto con una cierta frecuencia de repetición, el agua pegada al corcho comenzara a oscilar y estas oscilaciones se alejaran del corcho formando círculos concéntricos. Si a una cierta distancia ponemos otro corcho, este comenzara a oscilar por la acción de las ondas del agua, es decir se

mueve por una acción indirecta que se propaga a través del agua. Volviendo al tema de las cargas eléctricas, al oscilar una de ellas como el corcho, produce una onda que se propaga en un campo electromagnético. Este campo puede transportar ondas. Estas ondas conocidas como ondas electromagnéticas, pueden tener la forma de luz, ondas de radio, rayos x, etc. Lo que las diferencia a una de otra es la frecuencia de oscilación de la carga (el corchito) que las origina.

Cuando en este tema de las ondas electromagnéticas, entramos en la zona de alta frecuencia, dichas ondas se comportan como partículas. Este es el campo de la física moderna posterior al 1900, que se conoce con el nombre de mecánica cuántica. Una nueva visión se desarrolla a partir de los trabajos de Einstein, la separación entre espacio tridimensional y tiempo se diluye combinándose en una idea espacio-tiempo, y posteriormente la idea de espacio-tiempo curvo para incorporar el concepto de gravedad. Luego se determinó que las leyes de la mecánica, las leyes de Newton eran erróneas en el mundo de los átomos. Las cosas en el mundo atómico, el mundo de las partículas atómicas, no se comportan como cosas, como lo que nuestro sentido común nos dice que es una partícula en el macro mundo, como si las mismas fueran pequeñas bolas de billar.

Esto, afirma Feynman, es lo que hace a la física difícil pero muy interesante. Difícil porque la forma en que las cosas se comportan en el mundo a escala pequeña es anti-natural, no tenemos experiencia directa en esto como para imaginarnos que es lo que ocurre. Las cosas no se comportan como nada de lo que si conocemos, por eso describir estos comportamientos se hace imposible, quedando solo la posibilidad de hacerlo en una forma analítica, de allí las matemáticas y lo abstracto de las explicaciones. La mecánica cuántica tiene muchos aspectos, en primer lugar lo que se conoce como principio de incertidumbre por el cual es imposible conocer dos propiedades de una partícula en forma simultánea y con la máxima certidumbre. No podemos conocer la posición y la velocidad de la misma. Ahora bien, esto que parece una trivialidad, imposibilita el conocimiento de lo que denominamos trayectoria, es decir no podemos saber con seguridad donde se encuentra la partícula o hacia donde se dirige. Nuevamente podríamos preguntarnos ...¿y? Bien esta regla explica una misteriosa paradoja: si los átomos están hechos por cargas positivas y negativas, que se atraen entre si, ¿por qué no ocurre que las cargas negativas simplemente se ponen en contacto directo con las positivas de manera tal de cancelarse unas con las otras? ¿Por qué los átomos son tan grandes? Se pregunta Feynman. Imaginemos que si un átomo mide 10^{-13} cm como diámetro de la orbita de electrones mas externa, el núcleo mide solo 10^{-8} cm es decir es 100.000 veces mas chico que todo el átomo, ¿por qué el electrón no se "cae" hacia el núcleo? Si esto ocurriera, conoceríamos con exactitud la posición del electrón, y por el principio de incertidumbre, su velocidad debería ser infinitamente variable e incierta, algo imposible, dado que con dicha velocidad (energía cinética) rompería la atadura que le produce el núcleo y escaparía.

La cuántica trajo otro cambio a las ideas y a la filosofía de la ciencia: no es posible predecir con exactitud que ocurrirá en ninguna circunstancia, en un experimento. Por ejemplo se puede excitar a un grupo de átomos para que emitan luz (fotones) los cuales son detectados al momento de la emisión. Sin embargo antes de que esta emisión ocurra, es imposible saber cual es el átomo que lo producirá ni cuando. La naturaleza se comporta de forma tal que es imposible predecir exactamente lo que ocurrirá a partir de un experimento determinado. Esto desde el punto de vista científico es algo que suena a tremendo, dado que siempre se considero que: si se establecen las mismas condiciones para un experimento, se deben obtener los mismos resultados. Esto no es cierto, no es una condición fundamental de la ciencia. Solo es posible obtener resultados estadísticos.

La mecánica cuántica ha producido una unión adicional dentro de la física. Ha determinado que lo que se conoce como partículas se comportan como tales y también como ondas, y lo que se conoce como ondas también adoptan comportamiento como partículas. Se unifican así las ideas de campo, ondas y partículas. Cuando las frecuencias son bajas, estamos en lo que denominamos condición de onda y cuando las frecuencias aumentan, el comportamiento corpuscular se hace mas evidente. En realidad el limite de detección de frecuencias esta en el orden de 10^{12} ciclos/seg. Para frecuencias mas grandes esta solo se deduce a partir de la energía de las partículas y asumiendo la validez de la dualidad onda-partícula. Es así que agregamos una partícula mas a las conocidas- protón, neutron y electrón-, a la cual denominamos fotón. Así surge la denominada electrodinámica cuántica.

Esta teoría que fue desarrollada por Feynman, es la teoría fundamental de interacción entre la luz (ondas electromagnéticas) y la materia (electrones) y actualmente es considerada como la mas precisa de las teorías existentes, en términos de su posibilidad de predicción de ocurrencia de fenómenos físicos, excepto aquellos que tengan que ver con la gravedad y los fenómenos dentro del campo nuclear. De esta teoría de electrodinámica cuántica surgen las explicaciones para todas las leyes eléctricas, mecánicas y químicas, las leyes de choque entre dos cuerpos macro, el calor especifico de las substancias, el color de las luces que emiten los diferentes elementos químicos (luces de neón), la densidad de la sal, las reacciones del oxigeno e hidrógeno para formar agua. Esta teoría en principio es la que explica toda la química y por lo tanto también la genética y la biología, es decir la vida en todas sus formas.

6. MATERIA Y ÁTOMOS:

Habiendo ya recorrido a vuelo de pájaro el avance del conocimiento científico a partir de la física, volvamos al punto de partida propuesto por Feynman. Si supusiéramos que debido a un gran cataclismo se pierde todo el conocimiento científico, ¿ que frase debería ser transmitida a la generación futura para que desde esta, pudieran reconstruir el conocimiento perdido?. Feynman afirma que dicha frase debería encapsular la hipótesis atómica de que todas las cosas están hechas de átomos, pequeñas partículas que están en estado de movimiento perpetuo, que se atraen una a otra cuando están a muy cortas distancias, pero que también se repelen si las intentamos juntar mas allá de cierto limite.

A partir de esta afirmación o hipótesis atómica, Feynman avanza en una explicación sencilla de diferentes fenómenos físico-químicos, tomando como base la molécula de agua compuesta por dos átomos de hidrógeno y uno de oxigeno. En el desarrollo de estas explicaciones, nos da una idea de la dimensión de un átomo que resulta impresionante. Dice que si a una manzana común se la agranda hasta que tenga la dimensión de la tierra, la relación de tamaño entre la manzana agrandada (tamaño tierra) y la original es la misma que la de la manzana real y uno de sus átomos componentes. Para nuestra dimensión macro, los átomos son insignificantes.

Volviendo a los fenómenos físico-químicos que explica a partir de la hipótesis atómica, están:

La evaporación por acción del calor que al dar mayor movimiento a las moléculas de agua hace que se separen unas de otras.

Si esto (la evaporación) ocurre dentro de un recipiente, las moléculas golpearán las paredes del mismo, ejerciendo una fuerza sobre esta. Este es el significado de la presión en este caso del vapor de agua.

La cantidad de moléculas existentes da una idea de la densidad.

Si la temperatura se aumenta aun mas, mayor será la movilidad de las moléculas, por lo que mayor será la cantidad de golpes de estas contra la pared, podemos así deducir que la presión de vapor aumenta con la temperatura.

Bajando la temperatura, el movimiento molecular será cada vez menor llegando un punto donde prácticamente estarán quietas en una posición. Este estado lo denominamos para el agua hielo, en este estado sólido, las moléculas adoptan una ubicación del tipo cristalina y no en cualquier lugar al azar.

Así, Feynman continua describiendo, la presión de evaporación, la disolución de sal en agua, las reacciones químicas para formar diferentes compuestos, el proceso de la combustión, la generación de calor el cual se manifestara por el movimiento molecular dentro de un gas. Cuando este movimiento alcanza situaciones extremas, produce luz que la vemos en lo que denominamos llamas.

Es así como Feynman dice que, con imaginación y experimentación, a partir de la hipótesis: todo esta compuesto por átomos, los resultados demuestran que la misma es acertada, lo que permite transformarla -la hipótesis de partida-, en una teoría fundamental y básica para explicarnos el comportamiento de la naturaleza.

Ahora bien ¿como son esos átomos? En primer lugar tienen un núcleo, cuya carga es positiva y el mismo esta equilibrado eléctricamente por cargas negativas llamadas electrones. ¿De que esta compuesto el núcleo? El núcleo esta compuesto por partículas denominadas protones y neutrones, que hasta no hace mucho eran consideradas partículas fundamentales, es decir que no podían subdividirse en otras mas pequeñas. ¿Qué es lo que mantiene a estas partículas unidas? A partir de intentar contestarse estas preguntas surge toda la investigación del mundo de las partículas, la denominada fuerza o interacción fuerte, que se realiza a través del intercambio de gluones, tal como la fuerza electromagnética se realiza a través del intercambio de fotones. Llevar a cabo toda esta investigación se hizo posible a partir de la construcción de los aceleradores de partículas-ciclotrones-, que permitieron detectar, como suele llamarse en la física, un zoológico de alrededor de 30 partículas sub-atómicas de diferentes masas y vidas.

Es muy difícil entender cual es la relación o conexión que existe entre ellas, y para que la naturaleza las "quiere". Esto da la pauta que las teorías hasta ahora desarrolladas acerca de lo que pasa en el interior de los núcleos atómicos son incompletas y /o erróneas. Luego del gran éxito de la teoría de la electrodinámica cuántica, se genero una cierta cantidad de conocimiento de la física del núcleo atómico o nuclear, el cual podemos catalogarlo como conocimiento en bruto, parte teoría, parte experiencias, a partir del cual se construyo esta concepción del tipo de fuerza que mantiene a los neutrones y protones unidos en el interior del núcleo. No obstante, aun no esta claro de donde proviene esta fuerza.

En siglo pasado, Mendeleev creo la tabla que lleva su nombre donde pudo clasificar a los diferentes elementos conocidos de la naturaleza, a partir de sus propiedades o características químicas; esto permitió pronosticar la existencia de otros elementos aun no conocidos. De la misma manera hoy en día, se esta intentando construir una tabla de partículas sub-atómicas. Nishijima en Japón y Gell-Mann en USA son creadores de una tabla de este tipo, ambos trabajando

independientemente. Así como en la tabla de Mendeleev existe una base a partir de la cual realizar la clasificación de todos los elementos, lo mismo ocurre en el caso de las partículas sub-atómicas. La base para clasificar los elementos en la tabla de Mendeleev, es la carga eléctrica (el número de electrones en la capa exterior); en esta tabla de partículas la base de clasificación es un número denominado "extrañeza" o número "s". Cuando se producen reacciones nucleares, este número se conserva, de la misma manera como se conserva la carga en las reacciones químicas. Se conserva significa que el valor total del número s antes de la reacción nuclear es el mismo que se calculara luego de que esta se ha producido. Valga por ahora esa definición de conservación.

De este zoo de partículas podemos decir que solo 5 son estables, el resto decae en mayor o menor tiempo, es por eso que una de las características de estas partículas es lo que llamamos vida. Entre estas partículas se encuentran las que para nosotros son más conocidas, tales como el neutrón, el protón, el electrón y el fotón. Todas ellas pueden clasificarse en tres grandes grupos:

Bariones: estando el protón y el neutrón dentro de este grupo, junto con otras partículas de mayor masa que estos.

Mesones

Leptones: estando en este grupo los electrones y los neutrinos.

En este zoo de partículas, existen algunas que tienen masa cero, tales como el fotón, el gravitón (aun no fue detectado; su existencia intenta explicar que es lo que transmite la fuerza de gravedad. Es el portador de dicha interacción a distancia). Pero... ¿qué significa masa cero? Siempre se habla de las masas de las partículas en reposo. Que una partícula tenga masa cero en reposo nos indica que dicha partícula no puede estar en reposo nunca, es decir siempre se mueve. El fotón por ejemplo siempre se está moviendo a 300.000 km/seg, la velocidad de la luz, lo cual es obvio porque el fotón es luz o más propiamente radiación electromagnética. Este concepto de masa en reposo es un concepto relativista, que solo podrá ser captado a partir de la teoría especial de la relatividad, la cual veremos someramente más adelante.

Así llegamos al punto donde nos encontramos hoy: con un conjunto de partículas que parecen ser los constituyentes fundamentales de la materia y todo lo que existe. Estas partículas, interactúan entre sí bajo cuatro formas diferentes, conocidas como las cuatro fuerzas de la naturaleza, que en orden decreciente de magnitud son: la fuerza nuclear, la interacción electromagnética, la interacción débil, que se produce en la emisión beta, y la gravedad.

En esta instancia de lo descrito acerca de la materia y los átomos, es bueno escuchar como Feynman resume la situación de la física en la actualidad:

"Afuera del núcleo parece que ya sabemos todo. Adentro del núcleo la mecánica cuántica es válida. Donde estamos poniendo ahora todo nuestro conocimiento es en el concepto relativista de espacio - tiempo, donde la gravedad también está incluida... ...Estamos creciendo gradualmente en el entendimiento del mundo de las partículas sub-atómicas, aunque no sabemos cuanto más profundamente tenemos aun que internarnos en esta tarea".

7. LAS OTRAS CIENCIAS:

Química: La teoría de los átomos, considerada como parte de la física, se comprobada a través de los experimentos en química. La química es de todas las ciencias, la mas afectada por la física. La teoría química, la de las reacciones químicas, esta resumida en la tabla periódica de Mendeleev, en la cual a partir de algunas extrañas relaciones entre los elementos, surgen un conjunto de reglas acerca de cual sustancia se combina con cual y como, esto se conoce como química inorgánica. Todas estas reglas se explican finalmente por la mecánica cuántica, por eso decimos que la química teórica es en realidad física. La otra rama de la química la llamada química orgánica, que es la química de las sustancias que están asociadas con las cosas vivas. En realidad estas sustancias son similares a las descritas por la química inorgánica, pero donde el arreglo entre los átomos es mas complejo. Estos arreglos de todas formas también pueden explicarse a partir de la mecánica cuántica. La química orgánica tiene una relación alta con la biología.

Biología: es el estudio de las cosas vivas. Hubo una temprana relación entre la biología y la física dado que a partir de la biología, los físicos pudieron descubrir el principio de conservación de la energía, el cual fue demostrado en primer lugar por Mayer en relación a la cantidad de calor que podía absorberse y disiparse por un ser viviente. Si observamos de una manera mas precisa, el proceso biológico de los animales vivientes, encontraremos muchos fenómenos físicos: la circulación de la sangre, el bombeo de la misma, la presión en los conductos que la transportan, las transmisiones nerviosas. En el estudio de los nervios, los biólogos, concluyen que los nervios son tubos muy finos con paredes complejas también muy delgadas; a través de estas las células bombean iones positivos hacia fuera quedando iones negativos en el lado interno de la pared del nervio, conformándose algo similar a un capacitor, que finalmente produce señales eléctricas, las cuales finalmente producen las sensaciones de en los seres vivos.

Las señales provenientes del cerebro, producen la descarga de determinada sustancia química, la cual en contacto con otras sustancias presentes en los músculos, producen la contracción de estos que finalmente produce el movimiento mecánico. No obstante la maquinaria que produce la modificación de las dimensiones del músculo ante la reacción química que antes mencionamos, no es totalmente conocida. Existen infinidad de temas físicos relacionados con la biología imposibles de mencionar todos, como la luz interactúa en el ojo permitiendo la visión, como funciona el sonido en la interrelación del tipo mecánica entre la presión del aire y los huesitos del oído. Todos estos temas de todas maneras no son fundamentales en biología, dado que entender los mismos no nos hace entender al proceso de la vida misma. Al investigar mas en profundidad encontramos que todas los seres vivos (animales-vegetales, sin importar el tamaño) tienen muchas cosas en común. La mas común de todas es que todas ellas están hechas por células, dentro de la cual existe una compleja maquinaria para hacer cosas químicamente, en ellas se producen muchas reacciones químicas elaboradas, en las cuales un compuesto es cambiado en otros.

Astronomía: esta ciencia en realidad es mas vieja que la física. A partir de esta comenzó el estudio de la física, cuando se pudo comprobar y entender la simplicidad del movimiento de los planetas y las estrellas. Pero el descubrimiento mas impresionante en toda la astronomía, es que las estrellas están hechas de átomos de la misma clase que los que están en la tierra. Esto se ha comprobado a partir de la utilización de la espectroscopia, técnica que permite distinguir de que esta compuesta una estrella o planeta, por la frecuencia de la luz que se recibe desde ella. Incluso dos elementos fueron descubiertos antes en las estrellas que en la tierra, el helio en el sol y el tecnecio en ciertas estrellas frías. Uno de los descubrimientos mas impresionantes fue el origen de la energía de las estrellas que

permite que estas continúen brillando. Es la combustión nuclear del hidrógeno la que aporta la energía al sol, el hidrógeno es así convertido en helio. De lo que nosotros estamos hechos, fue cocinado alguna vez en una estrella y arrojados desde allí hacia fuera.

8. GRAVEDAD:

A partir de la ley de la gravedad y los fenómenos gravitatorios, Feynman explica lo que es una ley física. El mismo dice que elige esta ley como ejemplo no por algo en especial, simplemente esta fue una de las primeras leyes descubiertas y con una historia interesante. Se dice que la ley de gravedad es la mayor generalización lograda por la mente humana. Lo maravilloso de esta ley para Feynman, es que la naturaleza obedece a una ley tan simple como esta. Por eso dice que se concentra no en describir lo inteligente del hombre por descubrir esta ley, sino en lo "inteligente" de la naturaleza por obedecer a esta ley.

La ley de la gravedad dice que dos cuerpos ejercen entre si una fuerza de atracción que varía inversamente al cuadrado de la distancia que separa a ambos cuerpos y directamente con el producto de sus masas:

$$F = G.m.M / r^2$$

Por otro lado sabemos por Newton que un cuerpo responde a la acción de una fuerza acelerándose, es decir cambiando su velocidad por unidad de tiempo en relación inversa a su masa:

$$a = F/m$$

Estas dos leyes son todo lo que hay que decir sobre la ley de gravedad. Todo lo demás afirma Feynman es una consecuencia matemática de estas dos cosas. A partir de esto Feynman se pregunta, ¿ que es lo que hace que un planeta? ¿acaso mira al sol, evalúa la distancia a la que se encuentra y calcula como moverse? A Newton también se le recriminaba que su teoría no dice nada, a lo que el respondía que si dice: "dice como algo se mueve, lo cual debería ser suficiente", es cierto que no explica el porque se mueve de la manera que lo hace.

Desde los tiempos de Newton nadie ha dado una explicación del porque detrás de la ecuación matemática que define la ley de la gravedad. Actualmente no existe ningún modelo de la teoría de la gravedad aparte de su expresión matemática. Lo notable es que esto que se da con esta ley, se da prácticamente con todas las leyes físicas que se han ido descubriendo. Cada una de las leyes es una afirmación puramente matemática, algunas mas complejas que otras. La de la gravedad viene en una matemática simple. Pero a medida que se avanza en el descubrimiento de nuevas leyes, la matemática se hace mas compleja, ¿por que?, "Ni idea" dice Feynman.

¿Como se descubrió la ley de la gravedad?

Lo primero que se observo era que los planetas y la tierra incluida se movían alrededor del sol. A partir de esta observación surgieron preguntas tale como si el sol esta en el centro de una circunferencia, que tipo de movimiento describen los planetas, a que velocidad se mueven, etc. Así surgieron debates acerca de si realmente el sol era el centro del universo o la tierra. Llegado este punto aparece

Tycho Brahe a quien se le ocurre que seria bueno hacer observaciones muy precisas de la posición de los planetas en el cielo, para poder distinguir unas teorías de otras. Esta, dice Feynman, es la base de la ciencia moderna y el principio del verdadero conocimiento de la naturaleza: fijarse en una cosa, anotar los detalles y confiar en que esta información puede aportar claves para diferenciar entre las distintas teorías propuestas. Así Tycho comenzó a recopilar datos tomados en una isla cerca de Copenhague. Estos datos llegaron a manos de Kepler quien comenzó a utilizar el método de prueba y error para poder distinguir el movimiento que describían los planetas. Así descubrió que estos describían elipses alrededor del sol, con este en uno de los focos de la elipse. Kepler también descubrió a que velocidad giraban los planetas, haciendo el procedimiento siguiente:

Tomamos la posición de un planeta en dos momentos distintos separados por un intervalo x de tiempo por ejemplo de una semana, en la zona que este se encuentra mas cerca del sol.

Trazamos los radio vectores que van desde el sol a cada una de las posiciones antes definidas. Nos quedara así definido un triangulo con vértices en el sol, y en las dos posiciones de observación, cuya base será la orbita descripta por el planeta en el tiempo definido, en nuestro caso: una semana.

Si realizamos exactamente los mismo que hicimos en a) y b) pero en la zona que el planeta se encuentra mas alejado del sol. Tendremos así otro triangulo, con diferentes radio vectores y base dada por la orbita descripta.

Lo que Kepler detecto, es que la superficie de ambos triángulos es igual, concluyendo así que cuando el planeta se encuentra mas cerca del sol debe ir mas rápido.

Por ultimo descubrió una tercera ley que calcula el tiempo que tarda en dar una vuelta completa alrededor del sol, siendo este proporcional al tamaño de la orbita, entendiendo a este como la longitud del eje mayor de la elipse. La proporcionalidad esta dada por esta longitud elevada a la $3/2$.

Así Kepler a través de la observación dijo:

Los planetas describen orbitas elípticas alrededor del sol.

Áreas iguales se cubren en tiempos iguales.

El periodo o tiempo en que se da una vuelta completa es proporcional al tamaño de la orbita (eje mayor de la elipse) elevado a la $3/2$.

Estas tres leyes dan una descripción completa del movimiento de los planteas alrededor del sol.

Pero ¿Por qué los planetas se mueven alrededor del sol?.

En la misma época Galileo estudiando el movimiento de los objetos terrestres, descubre el principio de inercia que dice: si nada actúa sobre un objeto y este se esta moviendo en línea recta a una velocidad definida, este se mantendrá moviendo en la misma dirección y a la misma velocidad para siempre. Este principio no tiene explicación conocida.

Por otro lado Newton se pregunto ¿ que pasa si el objeto no va en línea recta? Su respuesta fue que es necesario que exista una fuerza que cambie su dirección, el cambio de la velocidad (sea en magnitud o en dirección) por unidad de tiempo se

denomina aceleración, y esta multiplicada por un coeficiente de inercia (la masa del objeto), se obtiene la fuerza que produjo dicho cambio de velocidad del cuerpo. Y esta fuerza puede medirse. Si tenemos una piedra atada a una soga y la hacemos girar, vemos que hay que tirar de la soga, tanto mas fuerte cuanto mas pesada es la piedra, de lo contrario piedra y soga saldrán disparadas en línea recta. Es decir ejercemos una fuerza para lograr que la piedra gire, que significa cambiar la dirección de su velocidad, y esta fuerza esta en la dirección radial y no tangencial del movimiento de la piedra, se transmite a través de la soga.

De la misma manera si tomamos dos objetos distintos (dos planetas) y vemos que estos giran uno alrededor de otro, deducimos que debe existir una fuerza que produzca este cambio en la dirección de la velocidad, esta fuerza, que también debe estar en la dirección radial, es proporcional a la masa de los cuerpos o inercia. Los planetas en orbita alrededor del sol, se inclinan o "caen" (caer aquí significa la desviación respecto al movimiento en línea recta) hacia el sol debido a la fuerza de gravedad que el sol ejerce sobre ellos. Newton no hizo mas que explicar lo que Kepler ya había dicho de otra manera. Que la fuerza se dirige hacia el sol (sentido radial) y que la fuerza es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. La idea brillante fue darse cuenta que no era necesario ejercer una fuerza tangencial para que un planeta describa una orbita alrededor del sol. El principio de inercia permite mostrar entonces que la fuerza que desvía a los planetas de su movimiento rectilíneo y uniforme, y controla el movimiento de los mismos, es una fuerza en dirección al sol.

En esa época se sabia que otros satélites giran alrededor de otros planetas, era como si todas las cosas se atrajeran mutuamente. así se concluía que la tierra tira de la luna, como el sol de los planetas; y también que la tierra tira de todas las cosas, fenómeno este conocido como la fuerza de gravedad. Lo genial de Newton fue darse cuenta que la misma fuerza que mantenía a la luna girando alrededor de la tierra era la que explica la atracción de la tierra para con cualquier objeto que tenga masa.

La gravedad no tiene limites, existe hasta los confines del universo lo cual puede explicarse a partir de las observaciones telescópicas de pares de estrellas, galaxias y sus formas. El campo gravitatorio nunca se acaba.

Si bien esta ley explica el funcionamiento de la maquinaria del universo a gran escala, es diferente a la mayoría de las otras leyes físicas; tiene relativamente pocas aplicaciones practicas en comparación con las demás leyes de la física. Solo encontramos aplicaciones en las prospecciones geofísicas, la predicción de las mareas, el calculo de la trayectoria de los satélites artificiales y cohetes. Otro caso donde la gravedad tiene un efecto real sobre el universo se da en la formación de nuevas estrellas, dado que a partir de concentraciones de gas este se comprime por efecto de la gravedad, así grandes volúmenes de gas y polvo estelar se aglomeran y a medida que caen hacia su propio centro se genera calor que enciende la masa de gas convirtiéndola así en una estrella.

La ley de la inversa del cuadrado de la distancia aparece en las leyes de la electricidad. Se podría pensar entonces que esta relación tiene un significado mas profundo. Sin embargo nadie aun ha logrado establecer que la gravedad y la electricidad son aspectos diferentes de una misma cosa. Las leyes de la física son como piezas de un rompecabezas que no encajan del todo bien, no hay una estructura a partir de la cual se pueda deducir todo. Lo extraño es encontrar aspectos compartidos. La gravedad y la electricidad son fuerzas proporcionales a la inversa del cuadrado de la distancia entre los cuerpos que experimentan la fuerza, sin embrago lo notable es la tremenda diferencia de intensidad entre ambas fuerzas. Tomando una partícula fundamental creada por la naturaleza, que

experimenta ambas fuerzas, podemos ver la relación de intensidad entre ambas. Esta partícula es el electrón que tiene masa, por lo cual dos electrones se atraen según nos dice la ley de la gravedad, y también tiene carga eléctrica por lo cual se repele de acuerdo a la ley de la electrostática. ¿Cuál es la relación de esas fuerzas?, la electrostática es mas intensa que la gravedad en una proporción de 1 vs. $4,17 \times 10^{42}$.

Einstein modifico la ley de gravedad dado que dijo que un fenómeno físico no podía ocurrir en forma instantánea, la información entre un punto del espacio y otro se transmite con una velocidad finita de allí la imposibilidad de lo instantáneo. Newton por el contrario decía que la fuerza de gravedad que experimentan dos cuerpos es instantánea y se experimenta en el mismo momento que aparece el cuerpo que genera el campo gravitatorio.

Otro punto importante acerca de la gravedad descubierto por los físicos modernos, es que esta ley no rige en la pequeña escala, no existe aun una teoría cuántica de la gravedad.

9. ¿QUÉ SON LAS LEYES DE CONSERVACIÓN?:

Una de las leyes fundamentales y básicas de toda la física es la denominada ley de conservación de la energía. No hay excepción a esta ley que dice que existe una cierta cantidad de algo que llamamos energía que no cambia a través de los muchos cambios que pueda experimentar la naturaleza. Esta es la expresión mas abstracta dado que este es un principio matemático que dice lo siguiente: existe una cantidad o valor numérico que no cambia cuando algo ocurre o cambia. No es la descripción de un mecanismo o algo concreto, es solo un hecho extraño que podamos calcular algún numero y que cuando terminamos de realizar la observación de la naturaleza, vamos a través de sus trucos y calculamos el mismo numero de vuelta, este permanece invariable. Relacionando esto con lo que veíamos en las reglas del ajedrez, un alfil que esta en un casillero negro, siempre estará en el mismo color de casilla no importa la cantidad de jugadas que se hagan. Feynman ilustra esta idea abstracta de conservación mediante una analogía.

Imaginemos un chico que juega con bloques los cuales son indestructibles e indivisibles. Cada uno de ellos son exactamente iguales, supongamos que tiene 28 bloques. Al comienzo del día su madre lo pone en un cuarto con todos sus bloques. Supongamos que al final de sucesivos días, la cantidad de bloques que su madre encuentra varia, y que ella va dando explicaciones al respecto, a partir de la idea de que la cantidad de bloques no puede variar, es decir: se conserva. Un día arrojo uno por la ventana, otro día trajo 2 bloques de lo de un amigo, otro día que cuenta 25 bloques, no encuentra ninguno hasta que ve una caja cerrada. Dado que no puede abrir la misma, pero tiene información adicional: sabe cuanto pesa la caja vacía (16kilos) y cuanto pesa cada bloque (3 kilos). Así deduce una relación en función de los pesos:

$$\text{(cantidad de bloques encontrados)} + (\text{peso de la caja} - 16 \text{ kilos}) / 3 \text{ kilos} = 28.$$

En otra oportunidad ocurre lo mismo pero cuando realiza el calculo anterior no llega al mismo valor, se da cuenta entonces que en una pileta con agua sucia puede haber algún bloque. Para esto cuenta con otra información adicional: sabe que originalmente la altura de agua era de 15 cm, y que cuando se agrega un bloque

esta altura aumenta en 1 cm, por lo tanto la nueva formula para darse cuenta si están y en donde todos los bloques es:

$$\text{(cantidad de bloques encontrados)} + (\text{peso de la caja} - 16\text{ks}) / 3\text{ks} + (\text{altura del agua} - 15\text{cm}) / 1\text{cm} = 28.$$

De esta forma, y a través de estos artificios matemáticos, a medida que se hace mas compleja la búsqueda de los bloques, ella va encontrando la manera de saber donde están los mismos aunque no pueda verlos. Lo que esta haciendo es calcular una cierta cantidad que ella sabe cuanto vale (28) y que no puede cambiar; se conserva.

Esta analogía sirve para explicar en una primera instancia la ley de conservación de la energía. No sabemos que es la energía, pero la asumimos como los bloques, y sabemos que nada debe entrar o salir de nuestro calculo sin que nos percatemos y lo tomemos en cuenta. La complejidad en el caso de la energía es que esta adopta diferentes formas. Así tenemos energía gravitacional, cinética, calorífica, elástica, eléctrica, química, radiante, nuclear y de masa (mase y energía son cantidades equivalentes en términos relativistas $E = m.c^2$). Todas estas formas de energía deben ser tenidas en cuenta en los cálculos de conservación. En física hoy en día no se tiene conocimiento de lo que es la energía. Pero si se sabe que cuando sumamos la totalidad de la energía nos da un numero que se mantiene constante, el 28 en el ejemplo de los bloques.

Esta es la ley de conservación mas importante aunque podemos decir que no entendemos su significado, porque no sabemos muy bien cual es el significado de la energía. Además existen otras leyes de conservación como la conservación del momento lineal y la del momento angular. Hay otras leyes de conservación mas claras dado que si existe algo para contar como en el caso de los bloques. Son las leyes de conservación de la carga eléctrica, la de conservación de bariones (Neutrones y protones son bariones), la de conservación de leptones (electrones, mesón mu y neutrinos son leptones). Así llegamos a establecer las seis leyes de conservación que conocemos, las primeras tres mas sutiles que tienen en cuenta el espacio y el tiempo; mientras las ultimas tres mas simples ya que solo se trata de contar cosas que existen

- De la energía / masa.
- Del momento lineal.
- Del momento angular.
- De la cantidad de carga.
- Del numero de Bariones.
- Del numero de Leptones.

Otro concepto interesante que nos da Feynman, es que si bien la cantidad de energía total se conserva, la energía utilizable por el hombre no se conserva tan fácilmente, dado que parte de esta se pierde en energía no utilizable (calor por ejemplo) Las leyes que gobiernan cuanta energía existe para utilizar son las leyes de la termodinámica, las cuales involucran un concepto denominado entropía, que tiene en cuenta los procesos termodinámicos irreversibles.

Cuando Feynman intenta explicar el carácter de la ley física, nos dice que tras el amplio abanico de leyes físicas, existen grandes principios que todas ellas cumplen. Los principios de conservación son uno de esos, que coexisten con: ciertas propiedades de simetría, los principios de la mecánica cuántica, y la forma matemática de las leyes físicas. Existen otros principios de conservación pero mas específicos que no vale la pena desarrollar.

10. LA CUÁNTICA:

En el inicio del capítulo 6 de libro "El Carácter de la ley física", Feynman nos relata algo que a mi modo de ver es muy singular y muy atrayente acerca de lo que es el significado de la ciencia, la investigación, las matemáticas y los modelos:

*en los orígenes de la observación experimental o cualquier observación de carácter científico, la intuición es la que sugería las explicaciones razonables de los fenómenos. La intuición a su vez esta basada en la experiencia simple de los objetos cotidianos. Pero a medida que intentamos abarcar un campo mas amplio de hechos y dar explicaciones mas consistentes de lo que vemos, las explicaciones simples dejan el paso a las llamadas leyes. Una curiosa característica de estas leyes es que a menudo parecen hacerse **cada vez menos razonables y mas alejadas de lo que resulta intuitivamente obvio**. Por ejemplo en la teoría de la relatividad se afirma que si uno piensa que dos cosas ocurren al mismo tiempo (simultáneamente), esto es una mera opinión subjetiva...mediante nuestra experiencia directa solo accedemos a una porción muy pequeña de los fenómenos naturales. Solo a través de mediciones refinadas y una cuidadosa experimentación podemos ampliar nuestra visión del mundo. **Entonces descubrimos cosas insospechadas, mas allá del alcance de nuestra imaginación.***

Así Feynman comienza a relatar algunos fenómenos que tienen que ver con la denominada física cuántica. Empieza por el fenómeno de la luz donde dice que en primer momento era considerada como partículas, luego mas tarde los fenómenos luminosos daban lugar a entender la luz como una onda, y mas tarde nuevamente a partir del denominado efecto fotoeléctrico, se considero a la luz como un haz de partículas. De la misma forma cuando el electrón fue descubierto, se le dio la forma de partícula, aunque luego haciendo pruebas con una lluvia de electrones se vio que presentaban comportamientos ondulatorios. Esta confusión de si eran ondas o partículas fue resuelta en 1925 con la formulación de las ecuaciones correctas de la mecánica cuántica.

Feynman dice entonces *ahora si sabemos como se comportan los electrones y la luz, el problema es como describirlo*. Las partículas de luz denominadas fotones y los electrones se comportan a su manera, a la que denominaremos mecanicocuanticamente. Este comportamiento no se parece a nada de lo cual tengamos experiencia en el mundo macro de los sentidos. "Nuestra experiencia de los hechos cotidianos es incompleta" dice Feynman.

Tan fuera de lo común es este comportamiento que Feynman nos advierte que el solo puede describir que es lo que pasa, y no porque pasa; se anima a decir que nadie entiende la mecánica cuántica que es la ciencia que describe el comportamiento de las partículas muy pequeñas, de la dimensión de los átomos o aun mas pequeñas. Lo interesante es que este supuesto no entendimiento, para Feynman es una dificultad psicológica, que surge del deseo incontrolado de intentar ver todo en términos familiares, lo cual no tiene sentido.

La explicación del comportamiento mecanicocuantico de fotones (la luz) y electrones (la materia) que da Feynman es mas o menos así:

En primer lugar vale decir que según sus propias palabras esta explicación se hará mediante una mezcla de analogía y contraste con cosas que resulten familiares. La

analogía será que cuando hable de partículas hablara de balas que salen disparadas desde una ametralladora, mientras que cuando hable de ondas, hablara de las ondas que forma el agua, sea en el mar o en una pileta. Con esta analogía hará un experimento que consiste en lanzar hacia una pared o plancha que tiene un orificio en el centro, primero balas y después agua en forma de ondas. Del otro lado de esta plancha existe otra similar pero con dos orificios equidistantes hacia arriba y hacia abajo, del orificio central de la primera plancha. Entonces observara que es lo que pasa a través de dichos orificios o ranuras.

Luego repetirá el experimento y lo describirá cuando es realizado con fotones (análogo a las ondas de agua) y electrones (análogo a las balas), mostrando así como difieren entonces el comportamiento normal o familiar de las balas y el agua, del comportamiento que llamamos mecanicocuántico.

Este experimento se ha diseñado, según Feynman, para contener todo el misterio de la mecánica cuántica y para enfrentarnos con lo paradójico y peculiar del comportamiento de la naturaleza. En este experimento está contenido todo el misterio de la cuántica.

Cuando inicia el experimento con balas desde una ametralladora que baila en su soporte, y haciendo una descripción detallada, Feynman concluye que la cantidad de balas que luego de pasar por el orificio central, pasan por alguno de los otros dos orificios de la plancha seguirá una ley de distribución que se conoce como campana de Gauss, donde una mayor cantidad de balas estarán alineadas con el orificio mientras que un número decreciente se repartirá a ambos lados del orificio. Esto ocurrirá con los dos orificios de manera que si dibujamos en un gráfico la cantidad de balas nos quedara como una doble joroba, estando el pico de la misma a la altura del orificio. Esta doble joroba dice Feynman es la superposición de los gráficos que obtendría si se repite el experimento por separado para cada uno de los orificios estando el otro cerrado. A esto lo llama Ley de la "No interferencia".

Ahora repite el experimento con ondas de agua, donde existe la primer plancha o barrera con un orificio donde pasan las ondas, formando círculos concéntricos al pasar, con centro en el orificio por donde pasan, al llegar estas ondas a la siguiente plancha con los dos orificios, también pasan por cada uno de ellos formando círculos concéntricos con centro en cada uno de ellos. Al viajar las ondas que salieron de los dos orificios, se comienzan a encontrar produciendo lo que se denomina interferencia, sea esta constructiva, cuando las dos ondas llegan al mismo tiempo y se suman o destructivas cuando una onda esta arriba y la otra onda para abajo y se restan. Así si medimos a una cierta distancia de la plancha de dos ranuras como llega la intensidad de las ondas veremos que si dibujamos esto en un gráfico nos daría zonas de altura hacia un lado, otras de altura hacia el otro, y aun otras de altura cero o planas. Este gráfico además no tendría nada que ver con el que se obtuviera al hacer el experimento con un orificio cerrado, luego el otro y sumando los resultados, como en el caso de las balas.

Con alguna notación matemática simple, diremos esto:

Llamamos N al gráfico hecho a partir del experimento con las balas. así N_1 es el gráfico cuando el orificio 1 esta abierto y el 2 cerrado; N_2 es cuando 2 esta abierto y 1 cerrado; mientras que N_{12} es cuando ambos orificios están abiertos. La conclusión era que $N_{12} = N_1 + N_2$ a la que llamábamos Ley de la No interferencia.

Llamamos I al gráfico hecho a partir del experimento con agua. Así I_1 significa 1 abierto y 2 cerrado, mientras que I_2 es la inversa: 2 abierto y 1 cerrado. I_{12} es cuando ambos orificios están abiertos. Aquí se da la ley de la interferencia por la que $I_{12} \neq I_1 + I_2$, sin embargo si se dan las siguientes igualdades: $I_1 = N_1$, $I_2 = N_2$.

Ahora bien cuando se realiza el experimento con electrones verdaderos y fotones, algo que la técnica sí permite realizar, ocurre lo siguiente:

Se lanzan electrones o fotones de a uno, lo cual se puede determinar dado que se coloca un sensor que cada vez que llega un electrón o foton hace un click, es decir medimos unidades físicas que llegan tal como hacíamos en el experimento de las balas. Ahora bien si hacemos esto durante bastante tiempo y vamos contando con el sensor adonde terminan cada una de estos proyectiles cuánticos, veremos que lo hacen en lugares totalmente aleatorios y diferentes uno del otro, pero después de haber lanzado miles de estos, empezamos a notar un cierto patrón de llegada. Dicho patrón es el mismo que nos muestra la grafica de las ondas, es decir un patrón de interferencia. Esto significa que si hacemos el experimento con estas partículas, con cualquiera de los dos orificios cerrados, las mismas se distribuyen de una manera similar a la que adoptaban las balas, pero al dejar ambos orificios abiertos, en lugar de distribuirse como si fuera la superposición de las anteriores – no interferencia- lo hacen como en el caso de las ondas- interferencia- ¿Cómo es que un conjunto de proyectiles pueden provocar interferencia, algo que es propio de las ondas?. Se dice entonces que los electrones, o para el caso cualquier entidad cuántica, en este experimento de las dos ranuras, llegan en unidades enteras adoptando así el comportamiento de las partículas materiales (balas), pero la probabilidad de llegada o la distribución de dicha probabilidad de llegada, se determina como si fueran ondas. Es en este sentido dice Feynman, en el que los electrones se comportan a veces como partículas y a veces como ondas. Se comportan de dos maneras diferentes al mismo tiempo.

11. SIMETRÍA:

Feynman se pregunta porque debe tratar el tema de la simetría y las leyes físicas. Su opinión al respecto es que desde siempre la mente del ser humano se fascina con todas aquellas formas o patrones que son simétricos. Es un hecho interesante, nos dice Feynman que la naturaleza muestra a menudo ciertas clases de simetría en aquellos objetos que encontramos en el mundo que nos rodea. Por ejemplo una de las formas mas simétricas es la esfera, y la naturaleza muestra muchos objetos esféricos tales como los planetas, las estrellas, las gotas de agua. Los cristales de las rocas muestran estructuras simétricas que nos dan pautas acerca de la estructura de los sólidos. Incluso en el mundo animal y vegetal encontramos formas simétricas. Pero la simetría de la cual se interesa Feynman no es acerca de las formas, sino de una simetría mucho mas profunda dentro del universo. Es la simetría que presentan las leyes básicas en si mismas, las que gobiernan la operación o el comportamiento del mundo físico.

Lo primero en responder será entonces ¿que significa simétrico?, ¿cómo una ley física puede ser simétrica?. Para definir simetría, lo primero que menciona Feynman es la definición de un tal Weyl: cualquier cosa es simétrica, si existe algo que podamos hacerle a esa cosa, de manera tal que luego de haberlo hecho, esa cosa permanece igual que antes de nuestra acción. Por ejemplo un vaso es simétrico si podemos reflejarlo en un vidrio o rotarlo, de manera tal que luego de esa acción (reflejarlo o rotarlo) el vaso permanece igual, o sea sin cambio aparente alguno. El inconveniente en nuestro caso es detectar que le podemos hacer a un fenómeno físico o a una situación física en un experimento, de manera tal que los resultados permanezcan invariables.

A partir de esta definición, Feynman da una lista de operaciones que mantienen invariables a los fenómenos físicos, es decir que los fenómenos no cambian antes o después que sobre ellos realizamos la operación mencionada:

- Traslación en el espacio.
- Traslación en el tiempo.
- Rotación angular.
- Velocidad uniforme en línea recta.
- Reversión del tiempo.
- Reflexión en el espacio.
- Intercambio de átomos idénticos o partículas idénticas.
- Fase mecánico-cuántica.
- Materia-antimateria.

Simetría espacio-tiempo

Si realizamos un experimento en una cierta región del espacio y luego con un aparato similar realizamos lo mismo en otra región del espacio, cualquiera haya sido el resultado en el primer experimento se repetirá exactamente igual en el segundo; si mantenemos las mismas condiciones en ambos experimentos. Esta traslación en el espacio, también puede visualizarse como una rotación de un ángulo fijo alrededor de un centro o eje.

De la misma manera que hablamos de traslación en el espacio físico, lo hacemos en el temporal, es decir iguales experimentos repetidos en las mismas condiciones externas, pero en dos momentos de tiempo diferentes, darán los mismos resultados. Para entender esto mejor, en un experimento que no es simétrico pensemos en que si el experimento consiste en comprar acciones de una empresa, los resultados no serán los mismos si lo hacemos en diferentes momentos, es decir la ley del mercado que gobierna el comportamiento de los precios de las acciones no presenta simetría respecto a la traslación en el tiempo.

En un nivel mas avanzado tenemos la simetría que se da bajo un movimiento a velocidad uniforme en línea recta. Este es un efecto notable: si tomamos un aparato lo hacemos trabajar en una cierta forma y luego a este mismo aparato lo ponemos en un auto que se desplaza en línea recta a velocidad uniforme, todos los experimentos que aquí realicemos, en el auto darán resultados iguales a los que obtuvimos con el aparato fuera del auto. Fue el estudio de la relatividad lo que concentro la atención de los físicos en los temas de la simetría de las leyes físicas.

Todas estas simetrías mencionadas, son de naturaleza geométrica. Existen otro tipo de simetrías, por ejemplo aquella que describe que podemos reemplazar un átomo por otro de la misma clase, sin producir ninguna alteración en la sustancia donde realizamos el reemplazo. Es decir existen átomos de la misma clase.

Ahora bien parecería que todo es simétrico cuando hemos definido simetría de esa manera. ¿Que no es simétrico? Por ejemplo, las leyes físicas ¿son simétricas cuando realizamos un cambio de escala? Supongamos que construimos dos aparatos idénticos pero uno 5 veces mas grande que el otro, el mismo experimento realizado en ambos ¿dará los mismos resultados? La respuesta es no. La longitud de onda emitida por un átomo de sodio en un caja de átomos de sodio, y la longitud de onda emitida por gas de átomos de sodio cinco veces mas grande en volumen que la caja del primer experimento, no es cinco veces mas grande sino que es exactamente igual. Las leyes de la física no permanecen invariables a los cambios de escala; esta realidad fue descubierta por Galileo. El se dio cuenta que la fuerza o resistencia de los materiales no era exactamente proporcional a la dimensión del cuerpo compuesto por dichos materiales. Para explicar esto Galileo pensaba en dos huesos de perro, uno en la proporción exacta para poder sostener

el peso del perro, y el otro hueso imaginario de un superperro que fuera diez o cien veces mas grande que el otro, llegando a la conclusión que un perro de esta proporción no podría ser sostenido por un hueso en la misma proporción, es decir diez o cien veces mas grande. Esto es así porque el peso dependerá del volumen del animal (dimensión al cubo) mientras que la resistencia del hueso aumenta con la superficie de la sección (dimensión al cuadrado); por lo tanto no se mantiene la proporcionalidad o sea no hay simetría.

La simetría y las leyes de la conservación

Las simetrías de las leyes físicas son mas interesantes al nivel de la mecánica cuántica. Esto es así porque en este nivel, por cada una de las reglas de simetría, existe una ley de conservación que se corresponde. Hay una conexión definida entre las leyes de conservación y la simetría de las leyes físicas. Así la simetría en la traslación espacial se corresponde con la ley de conservación del momento, la simetría de las leyes en la traslación temporal se corresponde con la ley de conservación de la energía; la simetría de las leyes ante la rotación en un ángulo fijo, se corresponde con la conservación del momento angular. Feynman considera a estas conexiones como una de las cosas mas profundas que ocurren en la física. Existen también una serie de simetrías que solo se dan en el ámbito de la cuántica sin correspondencia en la física clásica, como por ejemplo la simetría respecto al cambio de fase de la función de onda, cuya ley de conservación asociada es la correspondiente a la conservación de la carga eléctrica.



Feynman con un grupo de estudiantes

Posiblemente toda esta explicación de la simetría a alguno le parezca algo ridículo. A mi personalmente me admira el final de la lección que da Feynman. En esta Feynman dice que en realidad la naturaleza vista a través de sus leyes es casi simétrica, es decir no todas las leyes físicas tienen la cualidad de la simetría, es decir existe la simetría pero no en forma absoluta. ¿Porque ocurre esto? Se pregunta Feynman. En primer lugar debemos aceptar que la simetría de las leyes físicas son una muestra de la perfección de la naturaleza, al menos a los ojos de los científicos. Feynman comenta entonces que en una puerta construida en Japón durante la influencia del arte chino, se ven infinidad de dibujos y arabescos perfectos y simétricos esculpidos. Solo en un sector pequeño se nota una asimetría. La pregunta de porque esto fue así, la responden diciendo que de esta manera los dioses no tendrán celos de los hombres dado que son imperfectos. Dando vuelta el argumento para el caso de las leyes de naturaleza, ¿por qué Dios creo estas leyes de la naturaleza casi simétricas, es decir cuasi perfectas y no perfectas? La respuesta de Feynman es que de esta manera los hombres no están celosos de la perfección de Dios. Me parece admirable este argumento de un hombre que se manifestaba como no creyente.

12. RELATIVIDAD ESPECIAL:

Durante 200 años se consideraba que las ecuaciones de movimiento enunciadas por Newton, describían la naturaleza correctamente. La primera vez que se descubrió que esto no era así, también se descubrió la manera de corregir este error. Esto fue logrado por Einstein en 1905.

La segunda ley de Newton define la fuerza como el cambio de la cantidad de movimiento respecto al tiempo:

$$F = d(mv)/dt$$

En esta ecuación existe la premisa de que la masa es una magnitud constante; esta premisa es la que hoy sabemos es incorrecta. Einstein nos dice que la masa de un cuerpo aumenta con la velocidad con la que este se mueve de acuerdo a la siguiente formula:

$$m = m_0 / (1-v^2/c^2)^{1/2},$$

donde m_0 es la masa del cuerpo en reposo, v la velocidad del cuerpo y c la velocidad de la luz. Para valores de v pequeños en relación a c , el termino v^2/c^2 tiende a cero, por lo tanto la masa puede considerarse como constante $m=m_0$.

En esto consiste toda la relatividad especial, es decir en aplicar a las formulas de Newton un factor de corrección para la masa.

Esta formula ha sido ampliamente verificada a través de las observaciones de muchas clases diferentes de partículas que se mueven a velocidades cercanas a las de la luz. Para realizar estas investigaciones es que se construyen y utilizan los aceleradores de partículas o ciclotrones. Estas comprobaciones experimentales fueron realizadas posteriormente al desarrollo teórico de Einstein.

El llamado principio de relatividad fue enunciado por Newton como un corolario de sus leyes de movimiento: los movimientos de cuerpos dentro de un espacio dado, son iguales entre estos (los cuerpos), sea que el espacio se encuentre en reposo o en movimiento rectilíneo y uniforme. Esto significa que si por ejemplo lanzamos una pelota hacia arriba dentro de un auto en movimiento, esta nos caerá en las manos de la misma forma que lo haría si el auto estuviera parado. La teoría de la relatividad lo que en realidad quiere significar es que no existe en el universo un estándar absoluto para medir el movimiento, todos los objetos se mueven respecto de otros y solo podemos decir que algo se está moviendo en tanto y en cuanto podamos establecer un sistema de referencia. Todos los sistemas de referencia son igualmente válidos; cualquier punto de vista es tan bueno como cualquier otro.

Si llamamos x, y, z, t a un sistema en reposo, y x', y', z', t' a las coordenadas que definen los puntos de un sistema en movimiento a velocidad u en la dirección de x . Resulta que las ecuaciones que relacionan las coordenadas de ambos sistemas según el principio de relatividad de Newton son:

$$\begin{aligned}x' &= x - ut \\ y' &= y \\ z' &= z \\ t' &= t\end{aligned}$$

Este principio de relatividad enunciado por Newton no resulto ser valido cuando fue aplicado a las ecuaciones de Maxwell del campo electromagnético, esto significa que en un sistema en movimiento: un auto o una nave espacial, los fenómenos eléctricos y ópticos no son iguales a los mismos fenómenos cuando el sistema esta en reposo.

La constancia de la velocidad de la luz c

Einstein estableció como postulado de su nueva teoría de la relatividad especial, que la velocidad de la luz es una constante independiente del estado de movimiento o reposo de la fuente que la origina. Es decir si estamos en reposo y hacia nosotros se acerca una nave a una velocidad v , cuando esta nave enciende una luz, dicho haz de luz nos llega a nosotros a la velocidad c y no como supondríamos a la velocidad compuesta $c+v$. Lo mismo ocurriría si la nave se aleja de nosotros, la luz no nos alcanzaría a una velocidad menor $c-v$, sino que lo seguiría haciendo a la velocidad c . Este postulado, junto con el que establece que la velocidad de la luz es una velocidad máxima que no puede ser superada por ningún objeto, cuerpo o radiación, suena muy raro para el sentido común, pero fue finalmente comprobado experimentalmente. ¿Cómo es posible?

Einstein advirtió entonces que la única forma de explicar este "sin sentido" de que la luz se mueva a una velocidad idéntica para un observador en reposo que para otro en movimiento, es que el sentido del tiempo y del espacio para cada uno de ellos difieran, es decir el tiempo y el espacio dejan de ser valores absolutos o constantes sino que dependen del estado de movimiento del sistema de referencia. Los relojes del interior de una nave que se mueve a una velocidad muy alta (cercana a la de la luz) marchan mas despacio que los que están en la tierra en reposo. El viajante de la nave diría que se daría cuenta si esto ocurre pero no es factible dado que su cerebro también ira mas lento, es mas su cuerpo siendo un reloj biológico también envejecerá mas lentamente. Entonces se dice que dentro de la nave se mide la velocidad de la luz como 300.000 km base nave por segundo base nave, mientras que en la tierra el resultado es el mismo aunque los km y los segundos son base tierra.

Las transformadas de Lorentz

En una primera instancia, cuando se comprobó que las ecuaciones de Maxwell no cumplían con el principio de relatividad newtoniano se creyó que estas estaban mal, y por ende se intento modificarlas de manera tal que se ajustaran al cumplimiento de dicho principio. El problema fue que cuando se hizo esto, los resultados de las predicciones que arrojan estas ecuaciones correspondían a fenómenos que no se observaban en la realidad.

Lorentz detecto que cuando hizo las siguientes sustituciones en las ecuaciones de Maxwell:

$$\begin{aligned}x' &= (x-ut)/(1-u^2/c^2)^{1/2} \\ y' &= y \\ z' &= z \\ t' &= (t-ux/c^2)/(1-u^2/c^2)^{1/2}\end{aligned}$$

las mismas permanecían invariables. Einstein dijo entonces que todas las leyes físicas debían ser de tal forma que se mantuvieran invariables bajo las transformaciones de Lorentz. Así concluyo que no eran las ecuaciones de Maxwell que había que cambiar sino las de la mecánica Newtoniana.

De aquí resulto que el único cambio necesario consistía en dejar de considerar a la masa como un valor constante y tomar el valor dado según la ecuación anterior

donde la misma aumenta con la velocidad del cuerpo, siendo este aumento significativo a velocidades cercanas a la de la luz. De esta forma las leyes de Newton y las de la electrodinámica permanecen invariables en los diferentes sistemas de coordenadas.

Ahora bien, las transformaciones de Newton llamadas Galileanas parecen ser de sentido común, no así las de Lorentz, por esta razón Einstein, para encontrar el sentido de estas transformaciones, comenzó por revisar los conceptos de espacio y tiempo.

18 años después de que Michelson y Morley fracasaron en su intento de medir la velocidad absoluta de la tierra respecto al éter, fluido este que nunca existió, Einstein explico lo que pasaba. Los cuerpos que se mueven a una velocidad cercana a la de la luz se contraen en la dirección del movimiento. El factor de contracción esta dado por las llamadas transformaciones de Lorentz. Lo que en un primer momento pareció ser un artificio matemático para lograr un resultado, se pudo comprobar experimentalmente junto con la no menos descabellada idea de que el tiempo transcurre mas lentamente para aquellos cuerpos en movimiento a velocidades comparables con la de la luz

13. ESPACIO TIEMPO:

La teoría de la relatividad muestra que la relación de posiciones y tiempos medidas en dos sistemas de coordenadas no son lo que hubiéramos esperado sobre la base de nuestra intuición. Por el contrario estas siguen las relaciones dictadas por las transformaciones de Lorentz. Para realizar una analogía con mediciones en dos sistemas de coordenadas y su significado, consideremos las transformaciones que tienen lugar cuando a un sistema se lo rota un cierto ángulo θ respecto al centro del sistema. Así las ecuaciones que relacionan las posiciones entre ambos sistemas, el original y el rotado son:

$$\begin{aligned}X' &= x \cos\theta + y \operatorname{sen}\theta \\Y' &= y \cos\theta - x \operatorname{sen}\theta \\Z' &= z\end{aligned}$$

Siendo los valores primos las coordenadas en el sistema rotado y los valores no primos las coordenadas en el sistema original. Los valores primos pueden considerarse como un mix ponderado de los valores no primos, siendo los factores de ponderación que ponderan a los valores no primos, función del ángulo de rotación del sistema.

Veamos ahora una analogía físico-geométrica. Cuando miramos a un objeto, existen dos dimensiones del mismo, el ancho y la profundidad. La realidad es que el ancho puede pasara a ser profundidad y viceversa, dependiendo de cómo nos ubiquemos respecto al objeto. Es decir, ambas medidas son aparentes dado que según estemos ubicados nosotros respecto al objeto, las mismas serán diferentes (imaginemos que miramos al objeto desde diferentes ángulos). Estas medidas aparentes son una combinación o mix de las medidas reales del objeto, su ancho y su profundidad, y se pueden calcular aplicando las formulas anteriores de rotación. Si no pudiéramos cambiar de posición respecto al objeto que observamos, este ejercicio de pensamiento seria irrelevante dado que siempre veríamos los mismo del objeto, es decir para nosotros el ancho y la profundidad serian dos medidas

diferentes, que denominaríamos las verdaderas medidas del objeto. Es debido a que podemos caminar alrededor del objeto, que podremos darnos cuenta que el ancho y la profundidad son de alguna manera dos aspectos diferentes de la misma cosa. Supongamos que el objeto es un rectángulo, si lo miramos de frente el ancho es una dimensión, mientras que si nos colocamos de costado perpendicular a la posición anterior, el ancho es lo que antes era la profundidad.

Ahora bien ¿podemos pensar a las transformadas de Lorentz de la misma manera? En estas también los valores primos son un mix de los no primos. Recordemos que los valores primos son los correspondientes al sistema en movimiento, mientras los no primos son los correspondientes al sistema en reposo.

Lo complicado es que dicho mix, es un mix de espacio y tiempo. En el sistema en movimiento (el primo) valores de posición que denotan espacio, son una mezcla de valores de posición del sistema en reposo y valores de tiempo en el mismo sistema. Lo que una persona en el sistema en movimiento ve como espacio, la otra persona en el sistema en reposo lo ve en parte como paso del tiempo. Feynman genera la siguiente idea: la "realidad" de un objeto al cual miramos, es de alguna manera mas amplia (lo que miramos no es la realidad objetiva e intrínseca del objeto) que el "ancho" y la "profundidad" del objeto porque estos dependen del hecho de cómo miremos al mismo, es decir desde que lugar. Cuando nos movemos a una nueva posición, nuestro cerebro inmediatamente recalcula el ancho y la profundidad, dándonos una idea real de lo que es el objeto.

Pero nuestro cerebro no puede recalcular inmediatamente coordenadas de espacio y de tiempo cuando nos movemos a altas velocidades, debido a que no tenemos la experiencia efectiva de viajar a velocidades cercanas a la de la luz, adonde podríamos apreciar que el espacio y el tiempo son como "el ancho y la profundidad" dimensiones de la misma naturaleza. A nosotros nos ocurre como en el caso de aquella persona que mira a los objetos siempre desde la misma posición, sin poder caminar alrededor de ellos.

De esta manera intentaremos pensar a los objetos en una nueva clase de mundo de espacio-tiempo combinado, de la misma manera que en el espacio dimensional podemos observar los objetos desde diferentes posiciones. Así consideraremos a los objetos que ocupan un cierto espacio y duran un cierto tiempo, como ocupando un cierto "blob" (es la palabra de Feynman) en este nuevo mundo al que denominamos espacio-tiempo. Un punto en este espacio-tiempo definido por cuatro coordenadas (x, y, z, t) se denomina evento.

La geometría del espacio-tiempo así definido no es euclidiana. El espacio-tiempo es un espacio curvo, estando la curvatura dada sobre la dimensión tiempo de dicho espacio. ¿Que tal?!!!

14. ESPACIO CURVO:

El tema este me parece interesante porque si bien el titulo suena a algo estrambótico, la realidad es que entenderlo abre la mente, porque da la casualidad que nosotros vivimos en un espacio curvo. Muchos de los conceptos que adquirimos en las escuelas aprendiendo geometría euclidiana en un plano, no son validos en los espacios curvos.

La explicación que da Feynman acerca de los espacios curvos surge a partir de la teoría general de la relatividad y de la teoría de la gravedad de Newton.

Newton decía que cualquier cuerpo con masa atrae a otros cuerpos con masa, con una fuerza que de acuerdo a una fórmula sencilla era igual al producto de las masas dividido por el cuadrado de la distancia que separa a ambos. Si bien sencilla, el fundamento físico de esta fórmula no es para nada claro, ¿por qué se produce esa atracción? Es una pregunta sin respuesta.

Einstein tenía una interpretación diferente de la fuerza de gravedad o atracción entre los cuerpos. Según él, el espacio y el tiempo, que conforman el denominado espacio-tiempo, sufren una curvatura considerable cerca de grandes masas. Es así que el intento de las cosas de continuar el movimiento en línea recta en este espacio-tiempo curvado lo que hace que las cosas se muevan como lo hacen, es decir atrayéndose entre ellas según la fórmula de Newton. Esto dice Feynman es una idea compleja para entender, así que comienza su explicación ocupándose solamente del concepto de espacio curvo sobre todo en la aplicación de Einstein. Como en tres dimensiones es un tema complejo, empieza a desarrollarlo en dos dimensiones.

Para esto Feynman se imagina seres vivos que habitan en un mundo de dos dimensiones. Estos insectos obviamente no tienen posibilidad de imaginarse como es un mundo como el nuestro de tres dimensiones, por lo tanto por analogía que hagamos al pasar de dos a tres dimensiones, podremos comprender, no sin esfuerzo como transformar nuestras ideas y pasar de nuestras tres dimensiones a cuatro dimensiones (espacio-tiempo). Así Feynman nos habla de un insecto que vive en un plano, otro que habita la superficie de una esfera, donde podrá caminar pero sin tener el concepto de mirar para arriba o para abajo o para afuera de la esfera, y un tercero que vive en un plano más complejo y con ciertas características: la temperatura es diferente en diferentes zonas de dicho plano, tanto el insecto como las reglas que utiliza para medir están hechas de un material que se expande cuando aumenta la temperatura. En este plano que denominamos plato caliente, todo se expande con el calor en la misma proporción.

Ponemos ahora a nuestros insectos a estudiar geometría.

Primero aprenden el concepto de línea recta como la distancia más corta que hay entre dos puntos. El insecto en el plano dibuja una línea recta; el que está sobre la esfera también lo hace aunque nosotros (individuos en tres dimensiones) veremos que es una curva sobre la esfera que une ambos puntos. Para el tercer insecto en el plato caliente, el dibujo también resultará en una línea curva pero que requiere más explicación. Digamos primero que el plato está más caliente en el centro que en los bordes, y digamos que los puntos que debe unir están a ambos lados del centro. Dada la definición que la línea recta es la menor distancia entre dos puntos, el insecto comenzará a trazar esta línea con su regla, pero dado que la misma se expande en las zonas de mayor temperatura, los cm que él mida sobre esta regla serán más grandes en las zonas calientes que en las frías por lo tanto al querer trazar la línea más corta, esta tendrá, viéndola desde arriba (algo que nuestro insecto no puede hacer), una curvatura hacia fuera del plato, que son las zonas de mayor temperatura. Vemos así que el mismo concepto adopta diferentes formas para nosotros. Estas formas se producen según es el punto de vista de los insectos que dibujan las líneas.

Veamos ahora la construcción de figuras geométricas sencillas: un cuadrado, un triángulo y un círculo.

Empezando por el insecto que esta en un plano, el dibujara un cuadrado trazando a partir de un punto A, una línea de longitud d definida; marcando luego un ángulo de 90° con esta, trazara otra línea de longitud d, y así repetirá el procedimiento dos veces mas, comprobando que vuelve al punto de partida A. Esta figura es un cuadrado.

Si luego dibuja una figura que esta dada por la intersección de tres líneas oblicuas obtendrá lo que se denomina triangulo, figura esta que tiene la propiedad de que sus ángulos internos suman 180° .

Finalmente si desde un punto c, nuestro insecto comienza a dibujar líneas todas de la misma longitud r, comprobara que si une estos puntos obtenidos obtendrá una línea curva que se cierra sobre si misma a la que denominaremos circulo. También haciendo diferentes de estos círculos, podrá comprobar que la relación entre la medida de esta curva (perímetro de la circunferencia) y la distancia desde el punto c (centro) hasta la curva r (radio) es un valor constante, aproximadamente 6,283 (2π).

Ahora bien cuando el mismo procedimiento es seguido por nuestros otros dos insectos, el de la esfera y el del plato caliente, nos encontramos con ciertos inconvenientes. El cuadrado no se cierra, es decir no se vuelve al punto de partida cuando a partir de un punto trazamos líneas en ángulos rectos de la misma dimensión. Los ángulos del triangulo no suman 180° sino mas. Cuando dibujan la circunferencia sobre la superficie de la esfera o sobre el plato caliente, resulta que la relación entre C (perímetro de la circunferencia) y la constante 2π , da un valor que es menor al radio medido sobre el espacio sea de la esfera o del plato caliente. Se define entonces un espacio curvo como aquel en el que ocurren este tipo de incongruencias o diferencias con el espacio euclidiano.

Puede haber diferentes tipos de espacios curvos. Un insecto en una pera tendrá una visión diferente a los otros dos que mencionamos, dado que la curvatura de la pera varia según este en la parte superior o la inferior. Un insecto en una silla de montar también esta en otro tipo de espacio curvo. Según sea la curvatura de estos espacios se puede dar que las incongruencias con el espacio euclidiano sean inversas. Así la suma de los ángulos internos de un triangulo podrán ser inferiores 180° , el radio calculado puede ser menor al radio medido. Se dice de estos que son espacios curvos de curvatura negativa.

Un caso particular es aquel del insecto viviendo en la superficie de un cilindro. Diríamos en principio que este también esta en un espacio curvo. Sin embargo si dibujamos el cuadrado, el triángulo y el circulo sobre la superficie del cilindro, veremos que estas figuras cumplen con los criterios del espacio euclidiano. Esto es simplemente así porque si desenrollamos el cilindro con las figuras en el, veremos entonces que estas son las mismas pero ahora en un plano. De esta manera podemos decir que nuestro insecto no puede detectar que esta sobre un espacio curvo, realizando los experimentos de los dibujos, porque le darán como si fuera un plano. Solo podrá detectar la curvatura comenzando a caminar hacia una dirección y comprobando que regresa al punto de partida. Según nuestra definición técnica, el cilindro no es un espacio curvo. De esta manera, introducimos el concepto de curvatura intrínseca, diciendo que es aquella que puede detectarse mediante una medición local, por ejemplo dibujando el cuadrado y viendo que no llegamos al punto de partida. Decimos entonces que el cilindro no tiene curvatura intrínseca. Este fue el sentido que le daba Einstein cuando definía a nuestro espacio como un espacio curvo. Ya lo vimos en dos dimensiones, debemos extrapolar ahora no sin cierta complicación a tres dimensiones.

Vivimos en un espacio de tres dimensiones y no podríamos imaginar que el mismo puede estar doblado o curvado en alguna dirección, simplemente nos dice Feynman

porque nuestra imaginación no es lo suficientemente buena, de la misma manera que para el insecto que habita la superficie de la esfera, le es imposible darse cuenta de lo que significan las tres dimensiones que nosotros vemos tan claramente. Aun así podemos definir una curvatura sin salir de nuestro mundo tridimensional. Todo lo dicho acerca de el mundo bidimensional de nuestros insectos fue un ejercicio para mostrar que podemos obtener una definición de curvatura del espacio que no requiere que estemos en condiciones de observarla desde una posición externa. Podemos determinar si nuestro mundo esta en un espacio curvo de la misma manera que hacen nuestros insectos que viven en la superficie de una esfera o de un plato caliente. Es cierto que no podremos diferenciar entre ambos, pero si podemos diferenciar ambos de un espacio plano. ¿Cómo lo hacemos? De la misma manera que hicimos hasta ahora, dibujamos un triangulo y medimos sus ángulos interiores, o un circulo y medimos la relación entre su circunferencia y el radio, o una esfera, o tratamos de dibujar un cuadrado o un cubo. En cada uno de estos casos verificamos si se cumplen los postulados de la geometría euclidiana, si esto no ocurre, entonces decimos que nuestro espacio es curvo. No obstante en el caso de tres dimensiones la cosa no es tan sencilla como en el caso de dos dimensiones, dado que en los espacios bidimensionales, en cualquier punto del mismo hay una cierta curvatura, pero en tres dimensiones existen varios componentes de la curvatura, por ejemplo si dibujamos un triangulo en un plano podremos obtener una suma de sus ángulos interiores diferente a la que obtendríamos si lo dibujamos en otro plano, lo mismo ocurriría si dibujamos un circulo.

Una manera de superar este obstáculo seria dibujando una esfera. Definimos la esfera como el conjunto de puntos que en un espacio tridimensional son equidistantes de un punto del mismo espacio al que denominamos centro de la esfera. Podemos medir la superficie de la esfera mediante algún sistema practico tal como colocar sobre dicha esfera una grilla con pequeños rectángulos, hasta cubrirla totalmente, luego sumar las áreas de los rectángulos y esa será la superficie medida de la esfera, como sabemos que la formula de la superficie de una esfera es: $S = 4\pi r^2$, resulta que de esta formula podemos calcular el radio ya que la superficie S fue calculada con el método de la grilla.

Es importante una aclaración; la formula del área de una esfera es correcta si la misma (esfera) existe en un espacio euclidiano, justamente que los resultados de la formula no coincidan con las mediciones realizadas, asumiendo que tenemos instrumentos perfectos para medir, denota la característica de espacio no euclidiano y por ende la denominación del mismo como espacio curvo.

Volviendo a nuestra comprobación, podemos medir directamente el radio de la esfera con los instrumentos perfectos. Si el radio medido es mayor al radio calculado, tendremos un radio en exceso que es la medida de la curvatura media del espacio tridimensional en el cual se encuentra nuestra esfera. Al ser una curvatura media o promedio no se podrá determinar las propiedades geométricas de dicho espacio. En realidad la definición completa de la curvatura de un espacio tridimensional requiere la especificación de seis números de curvatura en cada punto. Esto así esta dicho por Feynman, pero realmente no es sencillo entender a que se refiere.

Ahora bien, el espacio tridimensional en el que vivimos ¿es curvo? A partir de muchas mediciones geométricas realizadas, nadie detecto que nuestro espacio fuera curvo. Simplemente para distancias no muy grandes no es factible detectar si nuestro espacio es euclidiano o no. Pero bajo ciertas circunstancias tales como en lugares donde la fuerza de gravedad es muy intensa o las distancias en cuestión son muy largas, tal como ocurre en los espacios interestelares o cerca de estrellas

que producen fuertes campos gravitatorios, se ha comprobado que el universo es un espacio no euclidianos es decir es un espacio curvo.

Fue Einstein quien estudiando el tema de la gravedad, en su teoría general de la relatividad, quien descubrió la curvatura de nuestro espacio. La explicación que da Feynman no es sencilla, pero esta hecha con lenguaje llano y poca matemática así que aquí la describo.

Einstein dijo que el espacio es curvo y que la causa de esa curvatura es la materia. Como la materia es también la causa de la gravedad, entonces la gravedad estará relacionada on la curvatura del espacio.

15. HIPER-ESPACIO¹:

No es sencillo entender o imaginarnos los conceptos relacionados con la teoría general de la relatividad y la cosmología, porque nos hablan de hiperespacios (espacios de mas de tres dimensiones) y espacios no euclidianos. Por esta razón me pareció importante agregar algunas explicaciones que no vienen de Feynman pero que ayudan a comprender su lectura.

Como primera medida es necesario dar significado al termino "dimensión". Podemos acordar que el lugar donde habitamos es un espacio de tres dimensiones, un plano geométrico o la superficie de una esfera, es un espacio de dos dimensiones, una línea o una circunferencia es un espacio de una dimensión.

En nuestro universo nosotros siempre encontraremos un punto por donde puedan trazarse tres líneas perpendiculares entre ellas, imaginemos la esquina de un cuarto. En un plano solo podemos trazar dos líneas perpendiculares que pasen por el mismo punto. Por lo tanto por extensión decimos que si en un espacio podemos trazar por un punto n líneas que son perpendiculares entre si, dicho espacio será n-dimensional. Esta afirmación que deducimos obviamente no puede captarse con la imaginación, simplemente porque, como decía Feynman, nosotros estamos metidos en un espacio tri-dimensional por lo que todo lo que lo supere no es algo que podamos visualizarlo dado que nuestros sentidos no están preparados para esto.

Un ejemplo típico de espacio bidimensional es la superficie de la tierra, donde solo pueden trazarse dos líneas perpendiculares que pasen por el mismo punto.

Así el concepto de dimensión se define en términos de la cantidad de líneas perpendiculares que pueden pasar por un mismo punto. Dos cosas surgen como validas de esta definición: la cantidad de dimensiones de un espacio es un numero entero, y en un mismo espacio todos los puntos cumplen con la condición de cantidad de líneas perpendiculares, es decir no puede existir una zona donde pasen tres líneas perpendiculares y otra donde pasen dos, por que estaríamos hablando de espacios diferentes.

Otra forma de definir el concepto de dimensión, es a partir de la cantidad de valores que necesitan darse para conocer la posición de un punto en el espacio de referencia. Así en un espacio bi-dimensional solo necesitamos dos valores, sean

¹ Understanding Einstein's Theories of relativity. Man's new perspective on the Cosmos. Stan Gibilisco. Dover Publications, Inc., NY 1983

estos las coordenadas cartesianas (x, y) o lo que mas nos suena en la superficie de la tierra la longitud y la latitud, no olvidemos que en este último caso el espacio es curvo sobre una tercera dimensión, por lo que no existen las líneas rectas para dibujar los ejes cartesianos, salvo en regiones pequeñas del mismo (locales).

Si definimos como superficie de un objeto el límite o la frontera que separa lo interior de los exterior del objeto, en un espacio bi-dimensional, esto será el perímetro del objeto. Si el espacio es además euclidiano podemos entonces decir que el perímetro de un cuadrado es 4 veces el lado, y el de una circunferencia es $2\pi R$. Si queremos medir lo mismo en un espacio curvo como la superficie de una esfera, según habíamos visto en la explicación de Feynman, esto no ocurre, es decir el espacio continuo bi-dimensional que se forma sobre la superficie de una esfera (como la tierra) no es euclidiano sino curvo.

Entrando a nuestro espacio dado por todo el universo que podemos observar, desde Einstein con su teoría general de la relatividad, se considera que el mismo podría ser un espacio de cuatro dimensiones, donde para poder ubicar a cada punto del mismo, se deberían conocer cuatro valores. Estos cuatro valores ubicarían a cada punto en la superficie de un hiper-esfera, es decir cada uno de estos equidistaría (igual distancia) de algún epicentro cósmico. Las desviaciones locales de la perfección euclidiana son muy pequeñas como para ser detectadas, pero los cosmólogos dicen que si iniciáramos un viaje interestelar imaginario, a la larga llegaríamos al punto de partida. Algo así como si iniciamos un viaje alrededor de la tierra. Esto lleva a la idea de que nuestro universo no tiene límites pero es finito. Para marearnos mas, este viaje nos llevaría por una circunferencia cuyo distancia es probablemente del orden de cientos de miles de millones de años luz. Si viajáramos a la velocidad de la luz, máxima permitida según la teoría especial de la relatividad de Einstein, volveríamos cuando nuestro sol esta consumido y la tierra congelada o evaporada.

¿Cuáles son las características de este universo cuya forma es una esfera de cuatro dimensiones? En primer lugar y como ya mencionamos, debemos definir que es una hiper-esfera, y lo hacemos como analogía de una esfera tri-dimensional, diciendo que es el conjunto de puntos que están a la misma distancia de un centro P . En una dimensión una esfera son solo dos puntos, en dos dimensiones es un círculo, en tres dimensiones es lo que conocemos como esfera. Una esfera en una dimensión no tiene superficie o mejor la superficie es de dimensión cero (recordemos como definimos superficie: es el límite entre lo externo e interno del objeto), una esfera en dos dimensiones tiene una superficie de una dimensión (una línea), una esfera de tres dimensiones tiene una superficie de dos dimensiones (una superficie curva. Analogía con la tierra). Y en general decimos entonces que una n -esfera tendrá una superficie de $n-1$ dimensiones. Nuestro Universo si esta definido como una esfera en un espacio cuatri-dimensional, tiene una superficie tri-dimensional que es donde nosotros existimos. Nunca podemos ver nada fuera o dentro de la esfera de 4 dimensiones, solo vemos lo que ocurre en la superficie en la que estamos, dado que la luz viaja en solamente sobre dicha superficie. Para reafirmar esta idea pensemos en el insecto de Feynman que vive en un plano e imaginemos lo encerrado en una circunferencia sobre el mismo, nosotros, seres con capacidad para ver en tres dimensiones, sabemos que para salir del encierro solo tendría que saltar, pero esto implica poder ver esta tercera dimensión que es la altura, algo imposible para nuestro ser bi-dimensional, por eso estar encerrado. Así nosotros nos es imposible salir de nuestro espacio tri-dimensional por las mismas razones. La imaginación ha permitido escribir ciencia ficción donde las maquinas del tiempo permitirían salir de este confinamiento.

¿Cuál es el significado del tiempo como una cuarta dimensión de nuestro espacio? En primer lugar es perfectamente posible definir al tiempo como una variable para

ubicar un punto(evento) en el espacio. Sin ir mas lejos, existen en los textos históricos flechas o líneas de tiempo donde se ubican momentos ocurridos en el pasado. La magnitud de los intervalos puede ser la que uno elija dado que el tiempo es una variable continua. Adicionalmente existe una correlación entre espacio y tiempo que pudiera permitir medir la dimensión del espacio en unidades de tiempo. Esta correlación surge del postulado d Einstein acerca de la constancia de la velocidad de la luz. Así diríamos que una medida de 300.000 Km. puede expresarse en unidades de tiempo como 1 seg dado que es ese el tiempo que tarda la luz en recorrer los 300.000 Km. Evidentemente esta medida es mas adaptable a distancias muy grandes como las interestelares. Así decimos que la distancia del sol a la tierra son 8 minutos, el diámetro del sistema solar es de 10 horas, el diámetro de la vía Láctea es de 100.000 años y el radio del universo conocido es de 10.000 millones de años.

Creo que ya lo mencione pero es a mi criterio importante destacar que nuestro espacio tri-dimensional es no euclidiano, es decir es un espacio curvo. Para que esto sea posible es necesaria la existencia de una cuarta dimensión del espacio, de manera tal que nuestro universo tenga algo respecto a que curvarse. Si descubrimos que nuestro espacio es no-euclidiano, entonces concluiremos que debe existir una dimensión adicional.

Por ultimo algo extraño pero interesante. Si pensamos nuestra ubicación en la superficie de la tierra, vemos que la distancia entre dos puntos es una línea que se denomina geodesia. Esta línea es un arco de circunferencia que une ambos puntos. Esta es para nosotros la distancia mas corta, aunque si nos movemos a tres dimensiones sabemos que hay una distancia mas corta dada por la recta que pasa bajo tierra y une ambos puntos. Si extendiéramos esto al infinito, diríamos lo siguiente:

Así como habitamos en un espacio tridimensional que es la superficie de un espacio cuatri-dimensional, podemos pensar que este espacio cuatri-dimensional es la superficie de un espacio de 5 dimensiones.

Cada uno de estos espacios es como el anterior no-euclidiano. ¿por qué? Simplemente por que hay muchas formas para un espacio de ser curvo y solo una de ser euclidiano.

Tal como ocurre al medir la distancia entre dos puntos en este tipo de espacios curvos, veíamos como cuando se agrega una dimensión, esta distancia es mas corta que la que podíamos medir.

Podríamos entonces concluir que extendiendo el razonamiento al infinito, la distancia entre dos puntos es igual a cero. Es allí donde decimos que toda la creación es un simple punto en un espacio de infinitas dimensiones.

¿Qué es lo que nos ha llevado a decir que nuestro espacio es no euclidiano o curvo? ¿Qué propiedades hemos observado que nos hace creer en esto? La respuesta que dio Einstein a estas es la gravedad. La presencia de la materia causa una distorsión en el espacio-tiempo, y esta es la base para la Teoría General de la Relatividad.

Eduardo YVORRA
eduardoy@house.com.ar