

Caracterización del Espacio-tiempo de Minkowski.

Mauricio Andrés Vargas Durango.

Asesor : Yesid Javier Cruz Bonilla.

Línea de Profundización La Enseñanza
de la Física y su Relación Física Matemática.

Universidad Pedagógica Nacional.

Índice general

Índice general	III
RESUMEN ANALÍTICO.	v
PROBLEMATICA	XI
0.1. OBJETIVOS	XI
0.1.1. GENERAL	XI
0.1.2. ESPECÍFICOS	XI
INTRODUCCION	XIII
1. Caracterización de Espacio y Tiempo en Newton	1
1.1. Influencias de Dios en Newton	1
1.2. Sobre el movimiento y la simultaneidad	8
2. La relatividad	13
2.1. La simultaneidad y la importancia de la geometria.	13
2.2. El Observador dentro del proceso de medición	16
2.3. Aspectos epistemológicos en la relatividad	18
3. El espacio-tiempo de Minkowski.	29
3.1. La geometria en la formalización Minkowskiana	29
3.2. El universo de Minkowski	37
3.2.1. Gráficamente	37
3.2.2. Físicamente	37
3.2.3. Matemáticamente	38
3.3. Conos de luz y sus consecuencias causales.	41
3.3.1. Eventos como de Tiempo	41
3.3.2. Eventos como de Espacio	42

3.3.3. Eventos como de Luz	42
3.3.4. Otras nociones analíticas ofrecidas por Minkowski	42
Conclusiones	47
Bibliografía.	1
Apéndice	1

RESUMEN ANALÍTICO.

TIPO DE DOCUMENTO: Trabajo de grado.

ACCESO AL DOCUMENTO: Universidad Pedagógica Nacional.

TITULO DEL DOCUMENTO: Caracterización del Espacio-tiempo de Minkowski

AUTOR: Mauricio Andrés Vargas Durango

PUBLICACIÓN: Bogotá, 2009.

PALABRAS CLAVES:

Espacio
Tiempo
Espacio-tiempo
Geometria
Simultaneidad
Curvatura
Variedad
Absolutismo
Convencionalismo
Relacionismo

■ DESCRIPCIÓN

Este escrito muestra por medio de un estudio epistemológico los conceptos de espacio y tiempo en las concepciones clásicas y modernas de la física; más concretamente dentro de la física clásica y la teoría de la relatividad. Se realiza un

análisis de los momentos cruciales de la ruptura epistemológica que conlleva a cambios en la estructura causal que se reflejan en puntos de vista, creencias, ideologías científicas y condiciones de producción del discurso involucradas en la evolución de estos conceptos.

■ **FUENTES:**

- Anacona, Maribel y Gómez G, Susana. *Einstein y el rol de las matemáticas en la física*. Praxis Filosófica. Nueva serie, No. 22. Universidad del Valle. 2006.
- Arriasecq, Irene y Greca Ileana María. *Algunas consideraciones históricas, epistemológicas y didácticas para el abordaje de la teoría de la relatividad especial en el nivel medio y polimodal*. Ciencia & Educação, v.8, nº1, p.55 – 69, 2002.
- Einstein, Albert. *Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento*. Annalen der Physik. 1905.
- Fonseca Moreno, Diego Fernando. *Análisis de sistemas no inerciales en la T.E.R.*. Universidad Pedagógica Nacional. Bogotá. 2007. Ochoa, Felipe. *Isaac Newton, una mirada al absolutismo*. Revista Colombiana de Filosofía de la ciencia. Vol 1. Número 2-3. Universidad del Bosque. pp.125-138. Bogotá. 2000.
- H. Minkowski. *Space and time*. German Natural Scientist Physicians, at Cologne, 21 september 1980.
- Orozco C., J, C,. “*Newton: Humano... Demasiado humano*”, Revista Física y Cultura N° 5, Universidad Pedagógica Nacional, Santafé de Bogotá. 1999.
- Pacheco Codina, Adolfo Manuel. *Conceptos de espacio y tiempo en la física*. Profesor asociado a la UPN. Digitalizado por Red Académica.
- Quintero Mateus, Chrystian Israel. *Tratamiento del espacio de Minkowski a partir de la relación álgebra geometría*. Universidad Pedagógica Nacional. Bogotá. 2005.
- Rago A., Héctor. *La ruptura imposible*. Centro de Astrofísica Teórica. Universidad de Los Andes. Mérida. 1995.
- Rañada, Manuel F. *David Hilbert, Hermann Minkowski, la Axiomatización de la Física y el Problema número seis*. LA GACETA DE LA RSME, Vol.6.3 , P ags. 641-664. 2003.

- Romero Medina, Olga Lucia. *Algunos elementos epistemológicos para la enseñanza de la teoría especial de la relatividad*. Universidad Pedagógica Nacional. Bogotá. 1993.
- Sánchez Ron, José. *El origen y desarrollo de la relatividad*. Madrid: Alianza, 1983 - 1985.
- Unesco. *El tiempo y las filosofías*. Ediciones Sígueme. 1979. El concepto filosófico del tiempo.
- Voltaire. *Elementos de la filosofía de Newton*. Colombia: Universidad del Valle. 1996.

■ CONTENIDOS:

● **Introducción.**

Se presenta una panorámica de la problemática y justificación del trabajo, en donde se hace referencia a la importancia de estudiar conceptos, especialmente el espacio y el tiempo en la física desde un ámbito epistemológico que permita identificar rupturas en contextos históricos de una manera dinámica y enriquecedora a partir de una herramienta metodológica diseñada por el grupo de investigación en relatividad de la Universidad Pedagógica Nacional. También se expone a manera de contexto del trabajo el desarrollo en la multisignificación que han tenido los conceptos de estudio.

● **Capítulo I: Caracterización de Espacio y Tiempo en Newton.**

La gran obra de Newton en física y matemática se ve enriquecida por la influencias de cuestionamientos metafísicos poco aceptables por la comunidad científica de los siglos XVII y XVIII, pero que dan gran sentido epistemológico en la ruta de forjar bases en la física clásica y moderna. También es enriquecida por la formalización de algunos aspectos de representaciones geométricas, que contribuyen al entendimiento de las concepciones que poseía Newton acerca del espacio y el tiempo con ayuda de contraposiciones como la de los cartesianos y los leibnizianos.

● **Capítulo II: La Relatividad.**

Se recopilan aspectos importantes para el entendimiento de la simultaneidad y el papel que jugó dicho concepto dentro de la formulación de la teoría. La importancia de la simultaneidad permite independizar la geometría euclidiana y el movimiento, con respecto a los sistemas de referencia, en donde

recae el concepto de tiempo como ente fundamental. También se evidencia un problema en la definición de observador con respecto a la medición, evidenciado en la contracción de la longitud y la dilatación del tiempo. Por último se enfatiza en la influencia que tuvieron el convencionalismo y el positivismo en la formulación de la teoría de la relatividad.

- **Capítulo III: El Espacio-tiempo de Minkowski.**

La influencia de los estudios de Poincaré y el análisis a la geometría, generan el rompimiento de los postulados de Euclides, permitiendo la existencia de geometrías curvas relacionadas a coeficientes de curvatura negativos, como lo es el caso de la geometría hiperbólica. Dicha geometría es la que retoma Minkowski, y que por medio de una solución meramente matemática destaca la explicación de la unificación del Espacio-tiempo por medio de su representación (los conos de luz); tal geometría permite evidenciar de una nueva forma el principio de causalidad, como una red que se explica a través de los conos de luz y el formalismo de la geometría diferencial.

- **METODOLOGÍA**

- Análisis de la ruptura epistemológica en los conceptos de espacio y tiempo que se llevara a cabo por medio de los dos ejes siguientes:
 - 1. Epistemológica: realizando el estudio de la ruptura epistemológica y el cambio de paradigma que afectaron el contexto de descubrimiento y justificación.
 - 2. Formal: recopilar y reconstruir desarrollos matemáticos de personajes y teorías influyentes en el desarrollo de la ruptura epistemológica.

- **CONCLUSIONES:**

- Los conceptos de espacio y tiempo introducidos por Newton y aceptados sin discusión por mucho tiempo son conceptos absolutos. Esto quiere decir, que para la mecánica Newtoniana la medición del espacio y del tiempo es independiente de los sistemas de referencia inerciales, es decir, de los observadores inerciales.
- La ruptura epistemológica se lleva en el momento en que se establece que la simultaneidad no es necesariamente absoluta, sino que es relativa cuando las coordenadas espaciales son diferentes. Esta ruptura históricamente tiene

lugar con la aparición de la monografía de Einstein, lo cual significa un cambio profundo en la explicación física de los fenómenos naturales.

- La geometría de Minkowski es un instrumento geométrico especialmente adaptado para la explicación geométrica de los fenómenos relativistas, de acuerdo con la hipótesis Einsteiniana de la relatividad de la simultaneidad.
- El Espacio-tiempo de Minkowski pone de manifiesto de una forma bastante intuitiva la unificación de las coordenadas Espacio-tiempo. Esta unificación fue puesta de manifiesto analíticamente por Einstein, pero la consideración geométrica al suponer que el tiempo es un eje en el mismo plano epistemológico que los ejes espaciales añade un elemento importante desde el punto de vista pedagógico.

■ **AUTOR DEL RESUMEN ANALÍTICO.**

- Mauricio Andrés Vargas Durango

Revisado por el director del trabajo de grado: Yesid Javier Cruz.

Bogotá, Octubre de 2009.

PROBLEMÁTICA

La importancia del trabajo de Minkowski radica en la realización de una representación base en la transición de los conceptos de espacio y tiempo al concepto de espaciotiempo (transición en la cual sucede la ruptura epistemológica), Minkowski introdujo estas ideas en una conferencia que se efectuó el 21/07/1908 ante la asamblea de naturalistas y médicos alemanes en Colonia, permitiendo que sea una herramienta fundamental en el desarrollo de la teoría especial de la relatividad.

- ¿Cuáles son los momentos esenciales de esta ruptura a nivel de la comprensión de la transición de los conceptos de espacio y tiempo y el concepto de espaciotiempo en la formulación Minkowskiana (lo tetradimensional)?

0.1. OBJETIVOS

0.1.1. GENERAL

- Identificar los aspectos influyentes de orden epistemológico en la comprensión de la causalidad en el modelo Minkowskiano desde el desarrollo conceptual de espacio y tiempo en el modelo Newtoniano.

0.1.2. ESPECÍFICOS

1. Examinar la ruptura epistemológica generada en los conceptos de espacio y tiempo desde el modelo Newtoniano al modelo Minkowskiano.
2. Analizar el nuevo paradigma fundacional en la estructura causal del espaciotiempo Minkowskiano.
3. Realizar una caracterización formal desde la geometría diferencial al modelo Minkowskiano.

INTRODUCCION

Las teorías son más que el uso de conceptos, debido a que los conceptos son la base de la realización de los análisis que generan una teoría, pero el estudio de las teorías es clasificado según sus aspectos externos e internos, contexto de justificación o de descubrimiento y asuntos ontológicos o metafísicos. Podríamos decir que los fundamentos de la física provienen de la historia y la epistemología de la ciencia, con lo cual se explica la significación de un concepto dependiendo de su contexto.

Max Jammer afirma que la física moderna atribuye el estudio histórico a la formación conceptual, tomando como ejemplo la importancia por el estudio de la historia que se da en los siglos XIX y XX por Faraday, Maxwell y Einstein refiriéndose a los principios de la mecánica formulados por Hertz, que sirvieron como fundamento en la explicación del contexto de la teoría relativista. Y no solo eso, también cerciora lo difícil que es realizar estudios de conceptos científicos, debido a la ambigüedad inherente a sus definiciones, ya que el carácter discontinuo de las ciencias no permite ver las reformas de cosmovisión y superaciones epistemológicas precedentes, que es lo que nos permite evolucionar en el conocimiento de algo y lograr una mayor comprensión de aquello que se está investigando. La historia de la ciencia es esencialmente juzgada, no se restringe y es por eso que el autor expresa la importancia de analizar las teorías por encima de los conceptos; pero ¿será que la teoría valora el concepto?, pues en realidad no se deben tomar como entes separados, van de la mano, aludiendo a que el concepto al ser multisignificativo depende del descubrimiento y de la justificación que se le haga.

Realizando el estudio epistemológico y formal, podemos despreocuparnos de caer en el error de filosofar indefinidamente sin llegar a algo concreto. La teoría es una visualización del concepto y lo importante es cómo conceptualizar las bases de la teoría y sabiendo que tanto la historia de las ciencias, como las teorías están en constante reevaluación, los conceptos se pueden definir como analogías de la realidad, en donde el físico descubre en la naturaleza la explicación a los conceptos.

Ahora bien, como todos sabemos, la formación de profesores en ciencias, la historia como herramienta para la realización de críticas conceptuales a los fundamentos,

propósitos y practicas de la ciencia en donde el rol del papel de los estudios histórico-críticos¹ con relación a su pertinencia y sentido, en juego con la enseñanza de las ciencias, donde el papel del maestro en formación no tiene los elementos necesarios para asumir una postura crítica en relación al tema, se cree pertinente realizar estudios de los conceptos y la historia, ya que juegan un papel importante en el desarrollo y entendimiento integro disciplinar, debido a que dicho conocimiento ha sido opacado a través del tiempo por las instituciones religiosas en muchas ocasiones.

El Espacio y el Tiempo son fundamentales para la construcción y el desarrollo de las teorías físicas. Hablar de los conceptos de espacio y tiempo ha sido durante el transcurso de la historia de la física muy importante para la reorganización y restructuración de la misma, no solo porque son parte fundamental de la ciencia física sino que también obedecen a otros patrones del conocimiento como lo son el filosófico, el ontológico, el epistemológico, etc; los cuales han permitido que el hombre posea un acercamiento a su entorno, de tal manera que para el entendimiento de lo natural, dichos conceptos adquieren una condición crucial para la formalización de esta relación.

Un conjunto de relaciones históricamente determinadas, de producción de conceptos, permiten generar una reorganización permanente del pensamiento científico en lucha de la razón con ella misma, es un tejido de juicios implícitos sobre el valor de los pensamientos y de los descubrimientos científicos. Establecer lo difícil de la ciencia y volverlo inteligible y sensible (en donde la epistemología de Bachelard es historia de las ciencias), es donde se genera la parte mas crucial en los conceptos de espacio y tiempo, a lo que denominamos Ruptura Epistemológica y que es de mucha importancia en la física durante el desarrollo entre los conceptos de espacio y tiempo al concepto de espaciotiempo.

La evolución histórica de dichos conceptos ha permitido llegar a muchas representaciones, que para el contexto de estudio, las más pertinentes son las realizadas por Newton y Einstein (quien se baso en la representación geométrica de Herman Minkowski) para observar como dicha representación geométrica sirve como plataforma no solo a la teoría clásica de la física, sino también a la teoría especial y general de la relatividad.

Para Newton, la mecánica clásica es una formulación para describir el movimiento de partículas físicas de sistemas macroscópicos y a velocidades pequeñas comparadas con la velocidad de la luz. La representación del espacio y del tiempo resulta ser un inmenso escenario que contiene a toda la materia, en el que se desplazan los móviles, se transforman las energías y en donde imperan de forma absoluta, las leyes invariantes de

¹FELIPE PARDO FARIÑA, PBRO. *El método histórico crítico en Jesús de Nazaret de Joseph Ratzinger*. Seminario Mayor Cristo Rey (Chile). VERITAS, vol. III, n° 18 (2008) 129-146

la Mecánica Clásica. La transformación de coordenadas válida entre sistemas inerciales es la transformación de Galileo.

Las formulaciones realizadas por Newton, Lagrange y Hamilton con relación a la representación anteriormente descrita admitía como hipótesis definidora de su carácter absoluto, no-relativista, la finitud para la velocidad máxima de propagación de las interacciones. Esta Hipótesis fue modificada por Albert Einstein a principios del presente siglo introduciendo el relativismo en la teoría de la Mecánica Clásica.

Einstein incorporó la invariancia de c (velocidad límite de la naturaleza: la velocidad de la luz) a su teoría de la relatividad. La teoría también exigió un cuidadoso replanteamiento de los conceptos de espacio y tiempo, y puso de manifiesto la imperfección de las nociones intuitivas sobre los mismos. De la teoría de Einstein se desprende que un reloj perfectamente sincronizado con otro reloj situado en reposo en relación con él se retrasará o adelantará con respecto al segundo reloj si ambos se mueven uno respecto del otro. Igualmente, dos varillas que tengan igual longitud cuando están en reposo tendrán longitudes distintas cuando una se mueva respecto a la otra. Las diferencias sólo son significativas cuando las velocidades relativas son comparables a c . El espacio y el tiempo están estrechamente ligados en un continuo de cuatro dimensiones: las tres dimensiones espaciales habituales y una cuarta dimensión temporal.

Capítulo 1

Caracterización de Espacio y Tiempo en Newton

1.1. La importancia de Dios en las nociones de Newton y sus diferencias con otros pensadores

La gran obra de Newton en física y matemática se ve enriquecida por la influencia de cuestionamientos metafísicos poco aceptables por la comunidad científica de los siglos XVII y XVIII, pero que dan gran sentido epistemológico en la ruta de forjar bases en la física clásica y moderna. También es enriquecida por la formalización de algunos aspectos de representaciones geométricas, que contribuyen al entendimiento de las concepciones que poseía Newton acerca del espacio y el tiempo con ayuda de contraposiciones como la de los cartesianos y los leibnizianos como se presentara a continuación.

Acerca de las diferentes concepciones que se han tenido a lo largo de la historia de los conceptos de espacio y tiempo (con el fin de mostrar la multisignificación que tienen los conceptos), se podrá llegar a tener una mejor discusión del desarrollo integral de dichas nociones y la influencia que tales concepciones han causado en el desarrollo de la ciencia física. La historia determina en sí, los valores de progreso, consolida la ciencia actual y forja el espíritu científico.

El siglo XIV y buena parte del siglo XV fueron escenario de innumerables conflictos: depresión económica, fractura cultural y resquebrajamiento político en un escenario de guerras que marcaron el tránsito hacia el siglo XVI. De la necesidad imperiosa por conseguir la paz en los diferentes reinos europeos, se derivaron dos repercusiones principales en el terreno político.

El absolutismo, fue el principal modelo de gobierno en Europa durante la época moderna, caracterizado por la teórica concentración de todo el poder del Estado en manos del monarca gobernante. La implantación del absolutismo representó un cambio sustancial en la concepción sobre la dependencia de las autoridades intermedias entre el súbdito y el Estado, situación que comportó la creación de una burocracia eficaz, un ejército permanente y una hacienda centralizada. La andadura política se inició en los siglos XIV y XV, alcanzó la plenitud entre los siglos XVI y XVII, y se declinó entre formas extremas e intentos reformistas a lo largo del siglo XVIII. El absolutismo fue muy influyente en la orientación de las ideas de Newton y son muy notorias en sus concepciones de nuestros conceptos de interés como se explicaran a continuación.

A raíz de que el gobierno al estar centralizado en un solo sujeto, éste era fácilmente manipulado por las instituciones, la institución mas influyente en la monarquía inglesa fue el cristianismo, en donde su poder llego a tal punto, en el cual se aplicaban castigos, cárcel y hasta la muerte en nombre del Rey a personas que los miembros de la iglesia consideraran herejes por tener concepciones contrarias (el entorno intelectual, gira alrededor de la Providencia). Debido a que el Reino de Gran Bretaña al mando de Jorge II estaba encaminado a la expansión territorial (colonias en Norteamérica y Asia) y por lo cual le dio el poder al parlamento dentro del reino, la iglesia pudo libremente manipular a los ministros por medio de la reforma protestante, generando así una decadencia en el poder. Es allí en donde Newton con algunos de sus estudios, en cierta manera encaja en personajes bíblicos para que tuvieran autoridad y evitara persecuciones en su momento, como lo hizo con el atomismo, que a la época era mal visto por lo que dichas ideas venían de Demócrito quien era ateo, pero que pudieron encajarlas en Moisés con la característica corpuscular para que tuvieran el realce que necesitaban en esos momentos, debido a que Newton creía que los átomos eran animados por la gravedad, ya que: "introducir en ellas un principio activo constituye un riesgo de ateísmo pues quedaría dentada la posibilidad de un universo que puede prescindir de su creador"¹. Sobra decir que la institución judeo-cristiana, jugaba no un papel importante, sino fundamental en el desarrollo de las ciencias del entonces, y que para Newton y los suyos, sus ideas acerca de los conceptos de estudio (tiempo y espacio) y de toda la ciencia desarrollada por ellos, tenía que estar acorde con los dogmas de dicha institución.

Pero no solo el absolutismo llevo a que Newton tuviera estas nociones, de hecho, la metafísica jugo un papel muy importante. Como afirmaba Voltaire en 1737 en una

¹OROZCO C., J, C., (1999), "*Newton: Humano. . . Demasiado humano*", Revista Física y Cultura N° 5, Universidad Pedagógica Nacional, Santafé de Bogotá.

carta hacia Federico de Prusia², no había mejor manera de entender la física de Newton que da cuenta del mundo sensible, que la misma metafísica que compete a lo racional y al contexto cultural en el que él vivió en Inglaterra (siglo XVII y siglo XVIII). De hecho, Voltaire clasifica la metafísica en dos partes: lo que sabrán los hombres, y lo que nunca sabrán. La primera, y en la que nos centraremos, hace referencia a la moral y a la estrecha relación de los hombres con la naturaleza, la sociedad y Dios, que los llevaría a un comportamiento acorde con el bien común, razón por la cual, la geometría simplemente debía dar cuenta del comportamiento del espacio así como la moral del humano, es decir, que se empieza a caracterizar el espacio con la planitud, debido a las concepciones de la moral y la libertad; no a la regularidad que presentaba el mundo localmente como debía de esperarse.

No obstante, la influencia de Dios en Newton como un orfebre hábil de relaciones de causalidad, donde dichas relaciones se manifiestan en los fenómenos naturales y le daban el poder y control total del mundo, de modo que los humanos tenían la opción de ser "libres", en cuanto que podía hacer lo que él quisiera, quedaba relegada al pensamiento de libertad en la cuestión de que el actuar esta regulado por las leyes naturales creadas por Dios, por ende el ser humano actúa dentro del esquema de Dios, muy acorde con las ideas de Kant acerca del espacio, que posteriormente se puede ver como el aspecto geométrico en el que se basa la mecánica clásica y por el cual el hombre pierde su "libertad".

Es allí, en cierta manera, donde el espacio ha sido creado por Dios y por consecuencia debe ser perfecto e inalterable como lo plantea Newton en su mecánica clásica, haciendo referencia a la homogeneidad e isotropía del espacio, de no ser así, no solo el mundo natural corría peligro, sino también el mundo moral, y en su defecto el hombre mismo, ya que Dios sería imperfecto, para lo cual Newton hace referencia al *sensorium* que se refiere a la suma de un organismo de la percepción, el *asiento de la sensación*, donde interpreta las experiencias y los ambientes en que el hombre vive; estos incluyen la sensación, la percepción y la interpretación de la información sobre el mundo de los sentidos, la percepción de los sistemas y las mentes. Recayendo así la imperfección en los humanos (debido al impedimento que le dan sus sentidos) y no en Dios. Por lo tanto, se alimenta la idea, afirmando que el hombre no puede ver en donde no esta y mucho menos hacer otro tipo de cosas. En cierta manera esta limitado, mientras que Dios al ser omnipresente puede dar razón pura del espacio como un todo. Mientras tanto, el mayor opositor de Newton (Leibniz) afirmaba que el espacio se definía desde las acciones de

²Voltaire. *Elementos de la filosofía de Newton*. Universidad del valle. Santiago de Cali, 1996. Metafísica de Newton.

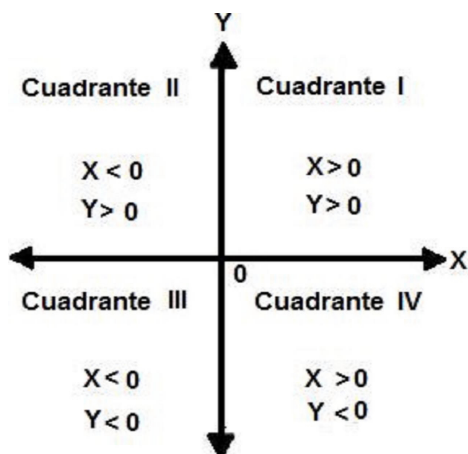


Figura 1.1: Plano Cartesiano

las cosas y las distancias, posición acorde a la idea griega de atomismo del mundo, pero que de igual manera daba otras nociones sobre este concepto.

Newton se apoya en la representación geométrica a la que se refiere y divulgo René Descartes con ayuda de Alexis Cloud Clairout, la cual se construye dibujando dos rectas numéricas, una horizontal y la otra vertical, que se atraviesan una a la otra en sus respectivos ceros; este cruce en el cero se le llama origen y a cada una de las rectas se les llama ejes cartesianos o ejes coordenados. Pero Newton desecha la idea de Descartes del Dios ajeno al devenir del mundo. Sería para Newton *el señor del mundo* que esta presente eternamente (que hace referencia a la continuidad del tiempo que no altera la materia) desde el infinito hasta el infinito (que hace referencia a la omnipresencia vista en la infinitud que posee cada uno de los ejes coordenados).

El espacio y el tiempo fueron concebidos durante mucho tiempo entes homogéneos como los formulo Newton en sus Principia: *El espacio absoluto, en su propia naturaleza, sin relación con nada externo, permanece igual e inmóvil (...)* *El tiempo matemático absoluto, verdadero y matemático, por su propia naturaleza, fluye uniformemente sin referencia a nada externo (...)* *El espacio absoluto, por su propia naturaleza y sin referencia a nada externo, permanece homogéneo e inmóvil.*³

Por otro lado, se le atribuyen al tiempo y al espacio características especiales, debido que al ser consideradas como cantidades, debían ser reales para no entrar en contradicciones con las creencias de la época y con las razones anteriormente mencionadas. Por ende se puede asumir al espacio y a la duración como entes positivos dentro del marco físico, ya que no todas las cosas suceden en el mismo instante ni en el mismo espacio.

³Newton, Isaac. *Principios Matemáticos de la Filosofía Natural*. Trad. Eloy Rada García. Madrid, Alianza Editorial. 1987

De hecho, el espacio y el tiempo es un resultado de la existencia de Dios aunque Newton siempre pensó que Dios no se encontraba en el espacio, sino que era el espacio mismo por ser omnipresente, y el tiempo mismo por ser eterno, razón que justifica en cierta manera la cantidad positiva y real que deben tener estos entes físicos.

Otra característica que posee el espacio y el tiempo según Newton, es su continuidad y su inseparabilidad, ya que el lugar que ocupa un objeto no puede ser remplazado por otro en el mismo instante. La inseparabilidad se manifiesta en la unión de lugares, que no genera un nuevo espacio, sino es el mismo espacio en sí, no se puede introducir un objeto dentro del lugar de otro, al igual que el tiempo, en donde cierto lapso de duración puede existir en múltiples lugares mas no en diferentes tiempos, es decir, el presente, pasado y futuro tienen un orden causal que es inalterable debido a que el tiempo no se mueve dentro de sí mismo. Por otro lado, Eddington es el primero que caracteriza la estructura del tiempo por medio de un vector en una sola dirección. Su propósito era darle un sentido unidireccional al tiempo que posteriormente vendría a entenderse como un hilo conductor de la estructura causal de la mecánica clásica, en donde primero sucede la causa y luego su respectivo efecto, en este instante, es donde se le da el carácter al tiempo de ser sucesivo (el tiempo era concebido como una sucesión de términos en una dimensión, es decir que el tiempo fluye así hallan cambios o no en los objetos). Además, el tiempo se considera como un extracto vacío en donde cualquier cambio se registra en él, mas no quiere decir que los cambios hagan parte de la naturaleza del tiempo en sí, postura que heredo Newton de Kant, ya que las nociones de tiempo son "*a priori*" al igual que las de espacio. Como lo menciona Newton en sus principios "*El tiempo verdadero, absoluto y matemático, en sí mismo y por su propia naturaleza fluye uniformemente sin relación a nada externo y se dicen con otro nombre duración. El tiempo relativo, aparente y vulgar es alguna medida sensible y exterior (precisa o desigual) de la duración mediante el movimiento, usada por el vulgo en lugar del verdadero tiempo; hora, día, mes y año son medidas semejantes...*"⁴

En sí, el único que verdaderamente puede conocer el tiempo y el espacio según Newton es Dios, ya que nosotros nos damos cuenta de la existencia de estas entidades a partir de nuestra interacción con el universo por medio de nuestros sentidos, muy concorde fielmente a las ideas que poseían algunos presocráticos como Demócrito y Epicuro acerca de tales entes. Lo que llevo a Newton a tales pensamientos metafísicos anteriormente mencionados, fue el querer encontrar revelaciones del Ser supremo por medio de su lenguaje, lenguaje por el cual se explicaba el cosmos, a lo que se vino

⁴Ibid.

llamar con el tiempo Física, como lo plantea Juan Carlos Orozco⁵: Los latitudinaristas⁶, también marcan el pensamiento de Newton, ya que: "*el carácter del orden ideal del orden en el mundo y, consiguientemente la necesidad de un Dios ordenador*"⁷ es plausible en la trilogía ontológica de espacio, tiempo y materia en la edificación de Newton en cuanto a la unicidad de Dios.

Pero a pesar de todas estas ideas, a Newton también se le atribuye un pensamiento atomista del mundo en cuanto a la materia y no referente al espacio, debido a que sus convicciones teológicas y sus estudios en la alquimia lograron encaminar su trabajo de tal manera que logro evidenciar empíricamente la fuerza atómica, mas no quiere decir que las concepciones que Newton tenga con el espacio tengan que ver con la distribución atómica en el universo como si lo hicieron los atomistas griegos.

Según el régimen cartesiano, Newton poseía vacíos en sus postulados, no debido a sus cálculos sino a que la base metafísica era casi nula debido a que no encajaba dentro de la cartesiana. Newton por lo tanto fue astuto, y para poder promulgar sus conocimientos la doto por medio de un método, que no solo le otorgo el pedestal metafísico sino que también le permitió mostrar sus resultados encajándola en la misma favorablemente. Dicho método consiste en sus cuatro Reglas para filosofar"que son mas efectivas que la metodología usada por Descartes "la reglas para la dirección de la mente". Las reglas para filosofar le dan a la naturaleza un comportamiento de mínima energía, el cual manifiesta que la maquina natural no hace mas de lo que debe hacer (lo que actualmente conocemos como estado de mínima energía). También asume que los postulados son sacados de la fenomenología natural y sino corresponde a ello debe ser no mas que una hipótesis. Dichos postulados deben tender a la generalización de los fenómenos, de no ser así, las inferencias no tienden a la objetividad que busca el saber científico.

Ahora bien, si se analiza el tema del comportamiento atómico de la materia para dar razón de la aplicación que tuvieron las reglas para filosofar en las teorías formuladas por Newton, debemos remitirnos al estudio que realizo del átomo.

El hecho de que el átomo fuera inanimado dentro del contexto de Newton, daría cabida a lo que en la actualidad conocemos como primera ley de Newton (La Inercia), ya que todo objeto tendería a estar en estado de reposo o uniformidad. Esto le daba a la naturaleza un carácter autónomo, prescindiendo de Dios, en ese caso, para no ir

⁵OROZCO C., J, C., (1999), "*Newton: Humano... Demasiado humano*", Revista Física y Cultura N° 5, Universidad Pedagógica Nacional, Santafé de Bogotá.

⁶Latitudinaristas: congregación de teólogos anglicanos que pretendían dar preferencia a la razón sobre la tradición de la Biblia o de la Iglesia. Se alejaban de lo dogmático y buscaban presentar la religión desde la teología natural.

⁷RADA. Eloy, op.cit., p.p. 25 el paréntesis es nuestro.

en contra de la iglesia Newton tenía que manifestarse frente a esto, haciendo a Dios responsable de la movilidad, por medio de su segunda ley, que le proporcionaría a la mecánica el equilibrio entre las ideas de reposo y movimiento prescindido por Dios, que sería posteriormente su mayor disputa con Leibniz dentro del contexto metafísico. He ahí el sentido de la mecánica newtoniana: "*En cuanto a las cosas inanimadas debemos tener por seguro que, aunque Dios ha señalado a cada una de ellas su propiedad, no obstante ninguna puede producir efecto alguno, más que en cuanto son dirigidas por la mano de Dios. No son, pues, sino instrumentos, por lo cuales Dios hace fluir de continuo tanta eficacia cuanta tiene a bien, y conforme a su voluntad las cambia para que hagan lo que a Él le place.*"⁸

Dentro de este contexto metafísico, la crítica de los cartesianos a Newton radicaba en: "*El supuesto de que solo las verdades últimas merecen ser aceptadas como parte del conocimiento y que los rasgos generales de la estructura "esencial" del universo son reconocibles a priori.*"⁹. Además los cartesianos desarrollaron toda la filosofía que después daría a conocer Spinoza¹⁰ al adoptar la geometría euclidiana y que estaría resabiada en el teísmo que poseía Newton, ya que la esencia y grandeza de la naturaleza se la daban a las cosas y no al Dios creador como lo afirmaban los newtonianos. Es decir, el universo es un todo que actúa independientemente, que todo lo que dentro de él se genere hace parte exclusivamente del mismo (donde se da la importancia al espacio y al tiempo en el marco de la física, ya que son dos entidades que permiten no solo explicar el movimiento, sino que son la plataforma en sí para la producción del mismo a lo que el llama universo); gracias a su acción es que se genera, que es eterno e infinito por necesidad, mas no por conveniencia de un ser; el universo como tal, tiene naturaleza propia (el movimiento que es necesario), viene de la nada como lo afirma Clarke en una de sus obras y Leibniz refiriéndose a un axioma planteado por Arquímedes. Es inadmisibles que los cartesianos (ateos) creyeran en un Dios, ya que se preguntaban por que un Ser omnipresente y eterno no era capaz de darles felicidad e igualdad, ya que no todos parecían descender de Él mismo (refiriéndose al trato hacia los Negros). Preferían entonces creer en la "necesidad como ente generador de causas en el universo que creer en un Dios creador de criaturas infortunadas.

La condición absoluta de espacio y tiempo en las ideas de Newton, da el carácter de estudio al objeto y surge de sus vacíos metafísicos y creencias teológicas, es decir: Dios

⁸Calvino, Juan. L. *Institución de la religión cristiana*. Editorial Nueva Creación. Buenos Aires. 1988 (1536).

⁹LAKATOS, Imre., "*La metodología de los programas de investigación científica*". Alianza Editorial S. A., Madrid 1983, p.p. 258.

¹⁰Todo debe ser reducido geoméricamente a partir de la idea de Dios, la cual es una idea innata.

así mismo es el encargado de darle orden a la naturaleza por medio del movimiento, de manera que hace parte del universo. No obstante, personajes como Descartes, Kant y Eddington permiten fortalecer sus creencias por medio de sus contribuciones físicas, al concepto de espacio y tiempo; por otro lado, Spinoza fortalece sus vacíos metafísicos dándole poder y fuerza sobre los cartesianos.

1.2. Sobre el movimiento, la simultaneidad y las concepciones Newtonianas

Para Leibniz, el movimiento hace parte de la máquina magna (la naturaleza) y no es Dios quien la genera. Dicha máquina actúa por necesidad como anteriormente se menciona. Newton por el contrario al igual que Voltaire, cree que el movimiento viene dado de las leyes que Dios incorporó en la naturaleza por medio de una fuerza activa (haciendo referencia al misticismo de Spinoza) que generó un rompimiento en Europa.

Por un lado se encontraba Bernoulli, Leibniz, los Hermanos, los Poleni y por el otro Descartes, Varignon, Newton, etc., debido a que los cálculos que realizaba cada grupo no eran congruentes, esta disolución de pensadores llevó a plasmar explícitamente que existía una falla en las medidas que no correspondían a que se estuvieran realizando malos cálculos, sino a los patrones que se estaban siguiendo para hacerlas.

Clarke pudo esclarecer tal rompimiento que generó nuevas visiones en la geometría de la mecánica. Inicialmente le dio la razón a los leibnizianos, afirmando que el movimiento que poseía un cuerpo que era retardado por obstáculos correspondía a la fuerza por el cuadrado de su velocidad inicial, haciendo referencia a una cantidad especial de dicha fuerza. Ahora bien, se pone del lado de los Newtonianos cuando estos consideran que lo importante es mirar el tiempo, ya que no se puede medir de manera absoluta cuando se tiene en cuenta alguna desigualdad temporal en el movimiento; es en aquel instante donde recae el malentendido.

Hay que considerar inicialmente que las acciones dentro de tiempos iguales, es lo que se conoce como simultaneidad, en donde existe una relación de igualdad de posición o intervalo temporal entre observadores o sistemas de referencia. En este instante, es donde la mecánica clásica empieza a reformular dentro de su cuadro un poco dogmático, las concepciones de *espacio y tiempo*, en donde se tiene en cuenta el punto de referencia como punto crucial, en el cual instauramos un sistema adaptado de Descartes que nos suministra la posibilidad de generar coordenadas, permitiendo identificar la posición con afinidad a nuestro marco de referencia.

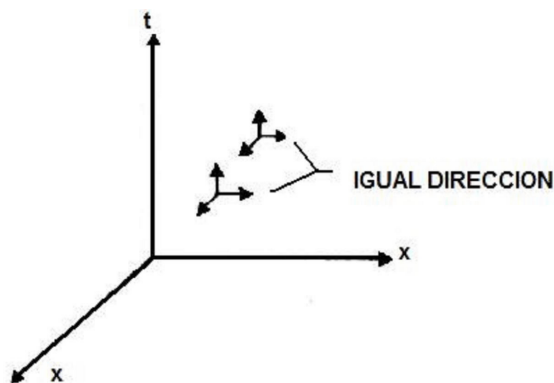


Figura 1.2: Marcos de referencia, homogeneidad e isotropía del espacio

La simultaneidad y el movimiento generan dependencia, debido a que se necesita que exista un cuerpo que, posea o no, movimiento para la realización de las mediciones (magnitudes esencialmente observables). Justo aquí, aparece la importancia del trabajo realizado por Galileo en cuanto al principio de relatividad de la mecánica clásica, escrito en sus Diálogos de Galileo (1632), en donde manifiesta la importancia de no recaer en el absolutismo aplicado a los conceptos y lo pone en claro cuando habla de trayectoria. Dice que no tiene sentido el preguntarse por la trayectoria absoluta, ya que psicológicamente estamos atrapados en la localidad de los fenómenos. Esto quiere decir, que nuestros análisis la mayoría de las veces salen de nuestras vivencias empíricas como lo atribuye el estudio realizado por Jaime Duvan Reyes Roncancio y Janett Barbosa Urbano, en donde concluyen "*La información inicial obtenida por la aplicación de la escala Likert, muestra una fuerte tendencia del profesor, en nuestro estudio de caso, hacia una alta aprobación de la visión newtoniana del espacio, 60 % de valoración a las afirmaciones planteadas. Por otro lado, se aleja más de la visión aristotélica que de la contemporánea y queda el interrogante de la inseguridad en la valoración de la visión cuántica (...) La naturaleza del pensamiento del profesor en cuanto a la noción de espacio tiene un carácter principalmente newtoniano*"¹¹. Dando así razón suficiente al sentido pedagógico que tiene salir de ese marco psicológico, un poco empírico al que se refería Galileo y que se le atribuía a Newton.

No obstante, el absolutismo en los conceptos permitió edificar la física clásica, por medio de las deducciones de las nociones teológicas postular los primeros principios de la mecánica. Así mismo, se empezó el hombre a cuestionar acerca del movimiento

¹¹ REYES, Jaime Duvan y BARBOSA, Janett. *El pensamiento del profesor de física desde el concepto de espacio*. En: Revista ieRed: Revista Electrónica de la Red de Investigación Educativa [en línea]. Vol.1, No.4 (Enero-Junio de 2006).

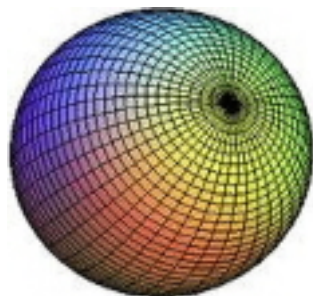


Figura 1.3: Curvatura de la tierra

relativo, para lo cual se tendrá en cuenta el movimiento uniforme y rectilíneo al cual denotaremos como sistema inercial.

Cabe aclarar, que los sistemas inerciales son aquellos que cumplen y generan evidencia experimental del principio de inercia, en donde no hay interacción del punto de referencia con alguna fuerza de acción a distancia como la gravitación, es decir, nuestro sistema inercial debe encontrarse en la región galileana¹². Los sistemas inerciales no son rigurosos al estar vinculados con la tierra debido al campo gravitacional y debido a la curvatura que posee la misma¹³, este problema se puede poner de manifiesto con el péndulo de Foucault, la desviación de la vertical en caída libre, desviación de los proyectiles de las armas de fuego, el comportamiento de un giroscopio, etc.¹⁴. La solución al problema local (tierra), se realizó al tener sistemas de referencia como las estrellas, que siempre van a permanecer fijas, permitiendo la aplicación de las leyes de Newton.

En cierta manera, el movimiento uniforme al igual que los sistemas inerciales son ideales, pero igual, permiten explicar eventos que son independientes a los marcos de referencia. Desafortunadamente, Galileo murió sin darse cuenta de la importancia de sus postulados, hasta que el matemático francés Descartes inventó la geometría analítica. Las transformaciones de Galileo permitieron evidenciar la invariancia de la aceleración, la masa y la fuerza lo cual permitió definir el movimiento rectilíneo y uniforme de un sistema que se traslada respecto a otro. Aquí también se evidencia que ningún sistema está privilegiado, es decir, que cumple con las características de espacio y tiempo absolutos al ser considerado como un sistema inercial.

No obstante, *ningún experimento mecánico, efectuado totalmente dentro de un sistema inercial, puede indicarle al observador cuál es el movimiento de dicho sistema con*

¹²Es un punto lejano al sol y las demás estrellas, en donde sea despreciable la fuerza gravitacional.

¹³En geometría diferencial, esta propiedad la poseen las variedades, las cuales localmente son planas pero globalmente no.

¹⁴Ledel, Enrique. *Física Relativista: La relatividad en la física clásica*. pág. 5. Editorial Kapelusz S.A.. 1955

*respecto a cualquier otro sistema inercial.*¹⁵

Finalmente destacamos, que en la mecánica clásica, las entidades físicas que no permanecen invariantes son: la velocidad y la trayectoria, mientras que la aceleración, la masa, la fuerza, la distancia entre dos puntos (el espacio) y el intervalo de tiempo que separa dos acontecimientos si permanecen invariantes. Por otra parte, las nociones absolutas que se tenían de los conceptos de estudio, les crea una dependencia natural a los sistemas de referencia.

El carácter absoluto y la dependencia empieza a deteriorarse cuando aparecen las consecuencias del estudio de la simultaneidad y el movimiento relativo, dichas consecuencias juegan un papel importante en las mediciones del espacio y del tiempo que revolucionaran la física clásica, pero que conservan el carácter inercial, como veremos en el siguiente capítulo.

¹⁵Resnick, Robert. *Conceptos de relatividad y teoría cuántica*. Editorial Limusa. México. 1976

Capítulo 2

La relatividad

2.1. La simultaneidad y la importancia de la geometría.

Se pretende recopilar aspectos importantes para el entendimiento de la simultaneidad y el papel que jugó dicho concepto dentro de la formulación de la teoría. La importancia de la simultaneidad permite independizar la geometría euclidiana y el movimiento, con respecto a los sistemas de referencia, en donde recae el concepto de tiempo como ente fundamental.

Recordemos que, las transformaciones de galileo permanecen invariantes en la mecánica clásica, pero en el caso de la óptica y el electromagnetismo dichas invariancias no se cumplen. Fácilmente, se conseguía certificar, que la velocidad de la luz cambiaba de sistema a sistema para estos dos campos diferentes a la mecánica y no solo era plausible en su magnitud sino también en su dirección. En consecuencia, debería existir un



Figura 2.1: La Persistencia de la Memoria. Salvador Dalí. (1989-1904).

sistema de referencia privilegiado que dejara la velocidad de la luz constante. A mediados del siglo XIX lo llamarían éter, pero en realidad la idea se excluyó por falta de evidencia experimental y se reemplazó en la teoría por lo que hoy llamamos plano de simultaneidad, en donde la premisa básica de la mecánica newtoniana era que la misma escala de tiempo se aplicaba a todos los sistemas inerciales de referencia.¹

Estos planos de simultaneidad permitían privilegiar un sistema físico, pero los objetos dependían de la velocidad intrínseca con la que se movían y no dependían de este plano. Esto quiere decir, que empiezan a existir dos nociones de tiempo y espacio en el hombre. La primera, en donde existe el tiempo subjetivo, que es el tiempo que calculamos y con el cual coincidimos con otras personas, pero que no nos permite cuantificar debido a su carácter subjetivo y otro tipo de tiempo que está dado por los términos sucesivos (oscilaciones) de una máquina (como el reloj) que también dan cuenta de otro tipo de medida subjetiva, debido a que los relojes no toman los mismos tiempos en dos sistemas de referencia acerca de un mismo evento (depende de la velocidad con que se mueva el observador). Por desgracia, para ese entonces, se tenía que desechar esas ideas a priori de los conceptos de tiempo y espacio, para que así, se pudiera llegar a unas nociones más objetivas e independientes de nuestras experiencias directas (en donde recae el empirismo y surge la importancia de los experimentos mentales).

En la física prerrelativista se supuso que las leyes que rigen la orientación de cuerpos idealmente rígidos son compatibles con la Geometría Euclídea², en donde no importaba el tipo de objeto que se movía y el lugar donde se encontraba, es decir que la geometría euclídea daba independencia al movimiento respecto a los cuerpos (forma, tamaño, texturas, etc.) y al espacio (en donde se encontrara o respecto al espacio que el objeto ocupaba). Por lo tanto, las mediciones recaen sobre las rectas existentes entre los puntos (que se conoce también como geodesica), lo que se denomina como *espacio euclídeo* y los cambios de un sistema a otro en *transformaciones lineales*.

"Es evidente que en la geometría euclídea solo tienen significado objetivo las cantidades y todas las cantidades que pueden expresarse, independientemente de un sistema de coordenadas cartesiano particular elegido, mediante un invariante respecto de las transformaciones lineales ortogonales"³. Esto quiere decir, que los vectores base de los sistemas de referencia son perpendiculares entre sí y poseen la misma magnitud (están normalizados), pero no la misma dirección. Para el caso de las transformaciones, podemos referirnos a las transformaciones realizadas por Galileo

¹Resnick, Robert. *Conceptos de Relatividad y teoría cuántica*. Editorial Limusa. México. 1976

²Einstein, Albert. *El significado de la relatividad*. Editorial Planeta-De Agostini. S.A.. pag. 54. 1985

³ibid. pag. 60.

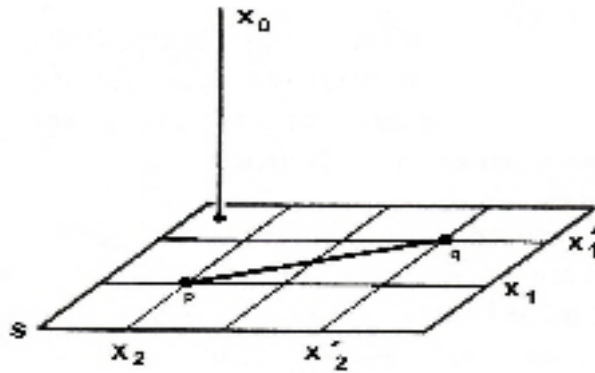


Figura 2.2: Geometría euclídea sobre un plano de simultaneidad.

$$u' = u - v \quad (2.1)$$

En donde se pasa de un sistema U a un sistema U' en términos de la velocidad; se le da el carácter de linealidad debido a que conserva las bases.

En este instante, es donde empieza a gestarse el principio de la relatividad especial basado en las transformaciones de Galileo, en donde existe la simultaneidad dentro del marco absoluto del espacio y el tiempo.

Como dijo Einstein: "¡Hasta que se me ocurrió que el tiempo era sospechoso!"⁴ con lo cual, hacia referencia a que existía un tiempo universal para todos los observadores, por lo tanto se puede deducir que para Einstein el mayor problema radicaba en la simultaneidad de los eventos, ya que desde su corta edad empezó a tener presente este problema y que tardó más de diez años para solucionarlo por medio de su teoría de la relatividad.

Es aquí en donde "Las ideas sobre el espacio y el tiempo que deseo mostrarles hoy descansan en el suelo firme de la física experimental, en la cual yace su fuerza. Son ideas radicales. Por lo tanto, el espacio y el tiempo por separado están destinados a desvanecerse entre las sombras y tan sólo una unión de ambos puede representar la realidad."⁵. De esto se infiere el *método* de la teoría de la relatividad, en donde la relatividad de la simultaneidad dependiera de la velocidad de la luz, generando una

⁴Resnick, Robert. *Conceptos de Relatividad y teoría cuántica*. Editorial Limusa. Mexico.1976

⁵Discurso de inauguración de la 80 reunión de la Asamblea general alemana de científicos naturales y físicos el 21 de septiembre de 1908.

equivalencia entre el tiempo y el espacio dado en las transformaciones de Lorentz como:

$$l = ct \tag{2.2}$$

De ningún modo se tendrá una escala de tiempo universal si los diferentes observadores inerciales no están de acuerdo en la simultaneidad de los dos eventos⁶. Dada la equivalencia, podemos suponer que dos relojes separados no pueden marcar el mismo tiempo, ya que en dicha ecuación no se considera sino la simultaneidad para un solo observador, mientras que si el otro quiere observar el tiempo, medirá $\frac{2l}{c}$. Prácticamente, en este principio se desprecia el hecho que la luz viaje de un observador a otro, con lo cual se puede evidenciar que el problema de Einstein seguía existiendo.

La corrección al carácter absoluto del tiempo, se realiza cuando se empieza a tener en cuenta la propagación de la luz, en donde surge la necesidad de relacionar lugares dentro de un plano de simultaneidad. Esta corrección la realizan Maxwell y Lorentz que es mas conocida con el nombre de transformación de Lorentz., en donde recae la importancia de la invariancia de c , la cual permite que el tiempo sea independiente a los marcos de referencia.

La independencia del tiempo respecto a los marcos de referencia genera automáticamente la tetradimensionalidad, donde permanece invariante el principio de homogeneidad del tiempo y el espacio (que le da el carácter de transformación lineal que permite la no preferencia de algún sistema físico) e isotropía del espacio (en donde se evita poner relojes en el plano $y-z$); se empieza a generar geoméricamente lo que llamaremos espacio-tiempo, donde la importancia de las mediciones no se encuentra en la geometría misma sino en los eventos en si, es decir, lo que tiene realidad física no es ni el punto en el espacio ni el instante del tiempo en que algo ocurre sino únicamente el acontecimiento mismo⁷, como lo estudiaremos en el siguiente capítulo.

2.2. La importancia del Observador dentro del proceso de medición

Se pretende mostrar un problema en la definición de observador con respecto a la medición, evidenciado en la contracción de la longitud y la dilatación del tiempo, por ultimo se enfatiza en la influencia que tuvieron el convencionalismo y el positivismo en la formulación de la teoría de la relatividad.

⁶Resnick, Robert. *Conceptos de Relatividad y teoría cuántica*. Editorial Limusa. Mexico.1976

⁷ibid. pag. 84.

El termino Observador, cumple un papel muy importante dentro del desarrollo de la relatividad, para lo cual, empezaremos definiéndolo como el conjunto de todos los relojes simultáneos que se encuentran abarcando todo el espacio.

No obstante, como consecuencias de las transformaciones de Lorentz, tenemos modificaciones en las mediciones de tiempo y espacio, debido a los principios de la relatividad y debido al observador. El primero de ellos, es la contracción de la longitud de un cuerpo en movimiento que se da respecto al observador en reposo, dicha contracción no se da sino en la misma dirección del movimiento, con lo cual se explica que la medición perpendicular de la longitud de los objetos se mantenga constante. Por el otro lado, se encuentra la dilatación del tiempo, que se evidencia en un sistema en movimiento debido al intervalo que se demora un rayo de luz en viajar de un punto de un sistema al otro, el retraso se da en el observador en reposo.

Justo cuando se tiene en cuenta el tiempo, empiezan a existir problemas con el entendimiento del término observador, ya que en toda la mecánica clásica estábamos acostumbrados también al absolutismo de dicho termino. Como corrección al absolutismo, que no estaba acorde con la medición del tiempo y de la longitud de los experimentos, se genera una clasificación del observador con respecto a la medida. Se genera entonces, el carácter propio e impropio de los sistemas de referencia, los cuales dependen intrínsecamente del movimiento. Es decir, los relojes y los cuerpos en movimiento, serán considerados como impropios respecto a un observador en reposo, con lo cual podemos concluir que la propiedad se aplica al sistema de referencia en donde se analice el evento, quien puede ser el propio y su primado (o impropio).

El principal problema radica en definir observador con el carácter de quien ve, en vez de asociarlo con el carácter de quien mide. No se considera intuitivamente que la luz viaje a través del espacio desde el objeto hasta nuestros ojos, ya que clásicamente la emisión de fotones es constante debido a que las velocidades con las que se mueven los objetos de análisis son despreciables respecto a las de la luz. En relatividad, debido a que el movimiento de los objetos es comparable con la velocidad de la luz, hay que tener en cuenta dicha rapidez. En este instante, se debe asumir que la emisión de fotones no es continua en todos los puntos del objeto debido al movimiento del objeto, es preciso recalcar, que la importancia radica en entender que la luz viaja y se demora desde el objeto hacia nuestro sistema sensible (los ojos); dicha razón, permite entender que la emisión de fotones no es constante y que los puntos del objeto mas alejado a nuestro ojos emiten primero con respecto a los que están mas cerca.

La naturaleza demuestra en verdad que la relatividad es teoría práctica de la medición y no filosóficamente idealista, como lo es la teoría clásica (...) es importante notar que

la relatividad dice simplemente que en la longitud o intervalo de tiempo medidos entre un par de eventos influye en el movimiento relativo de los eventos y el observador⁸. Esto no quiere decir, que la medición afecte la realidad de los objetos, simplemente son mediciones aparentes debido a la dinámica que existe en la naturaleza.

El rompimiento epistemológico se da al concebir la simultaneidad a la hora de hacer mediciones cuantitativas, lo cual permite hablar de sistemas de referencia inerciales dentro del contexto clásico de la mecánica, por otro lado se encuentra el relacionismo de Leibniz que ofrece una postura contraria a la de Newton, en donde se explica que los fenómenos y el problema de la medición se da al crear relaciones entre los objetos.

El problema de la relatividad del movimiento, en los siglos XVII y XVIII logro romper los absolutismos de los conceptos de espacio y tiempo, debido a que los experimentos no encajaban dentro de la teoría clásica ya que los observadores se encuentran en movimiento. Como solución, surge la relatividad, la cual se encarga de resignificar conceptos, como el de medición y observador, que son influyentes a la hora de estudiar el movimiento en cuanto permiten entender la dinámica de la luz, dejando aún lado la experiencia sensible y dándole paso a los experimentos mentales.

2.3. Aspectos epistemológicos influyentes en la relatividad

Las posturas positivistas influyentes en Einstein llevan a tener en cuenta el convencionalismo, que permite alternativas verídicas, en donde el papel del estudio de la naturaleza recae sobre el sujeto y no sobre el objeto como clásicamente se realizaba. Por otro lado, las influencias de Kant, permiten entender que las evidencias a priori del espacio y del tiempo permiten recaer en el absolutismo, con lo cual surge el interés por estudiar la geometría como se mostrara a continuación.

La filosofía empirista fue destacada en el trabajo de Einstein, debido a que fueron fundamento de los principios matemática de Newton y además porque se preocupó por el conocimiento deductivo, en donde esperaba y se cuestionaba acerca de si se podía o no abstraer de la fenomenología de la naturaleza la estructura causal. Sin embargo, no tuvieron el realce merecido debido a la distinta aplicación en la relatividad,⁹ el problema radicaba en las concepciones existentes en el entendimiento de lo obser-

⁸ibid. pag. 85.

⁹en donde el papel de la metafísica es importante, un ejemplo de ello es para no caer en la especulación referida a los experimentos mentales

vacional y lo teórico,¹⁰ en donde una serie de fenómenos observables no determinan indiscutiblemente la naturaleza de las relaciones causales que los unen.

Así pues, la descripción de las relaciones causales se deduce, hasta cierto punto, independientemente de la observación directa. A raíz de la relatividad especial, la observación y la teoría adquieren una relación intrínseca clave para el entendimiento de la teoría, ya que por medio de esta relación se construye el conocimiento de manera que cualquier ente conceptual existe, pero es utilizado siempre y cuando concuerde con la observación de los fenómenos. Clásicamente la mecánica dejaba entender dicha relación de otra manera, la teoría se fundamentaba como tal, en la acumulación de datos empíricos y su relación con las matemáticas, en donde Einstein no veía una filosofía positiva para la interpretación de sus trabajos. La relatividad por el contrario, la reconstruye o le da sentido positivo en el momento de eliminar las concepciones de movimiento absoluto pero no logra llegar muy lejos debido a que los sistemas son inerciales.

El convencionalismo¹¹ encamina a Einstein y a los positivistas, en la medida que permite generar equivalencias entre alternativas teóricas respecto a las coincidencias en la observación (en particular como los sistemas inerciales en la teoría de la relatividad), es decir, el carácter objetivo de la ciencia se pierde en medida que existan criterios de simplicidad y comodidad, que al ser analizados, deben tener en cuenta la matemática porque juega un papel importante en la medida que permite sintetizar y representar de manera compacta lo observado, por ende, tiene la facultad de generar distintas interpretaciones a las teorías físicas entre los saberes subjetivos, en donde la ciencia no es del todo fáctica contrariamente a las ideas positivistas debido a que la inducción del conocimiento no atribuía certeza a las afirmaciones de la ciencia experimental.

Por lo tanto, según el convencionalismo las leyes físicas no son ni verdaderas ni falsas, en realidad no importa conocer las causas que generan los hechos, sino establecer relaciones entre los fenómenos naturales observables, dichas relaciones están fundamentadas en las matemáticas y no en la experiencia, contrario a lo que sucedió con los pensadores clásicos, en donde solo establecieron un tipo de relaciones, en donde se ve reflejado el absolutismo de entidades como el tiempo y el espacio bajo la geometría euclidiana.

Un ejemplo, es generar recolección de datos empíricos y explicarlos por medio de

¹⁰Lo entendido a la teoría y no a la experiencia como sucede en la relatividad, en donde empieza a jugar un papel importante la aplicación de los experimentos mentales.

¹¹El fundador del convencionalismo fue Poincaré y fue desarrollado por Reichenbach (postura en la cual se enfatizara). La base del convencionalismo radica en la posibilidad real de dar interpretaciones distintas a nuestras formaciones teóricas (ante todo en la esfera de la matemática), lo que lleva a la tentación de considerar la teoría científica como cierta estructura lógica pura (en donde se retoman las concepciones de Kant), respecto a la cual carecen de sentido los conceptos de verdad o no-verdad.

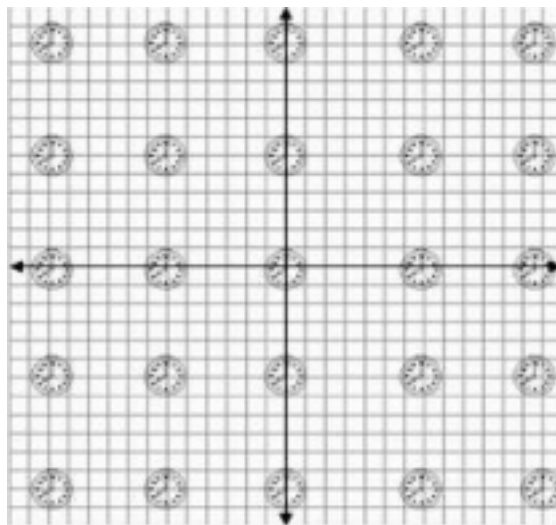


Figura 2.3: La medición depende de los sistemas de referencia.

dos teorías o particularmente por algún tipo de funciones que describan y suavicen los datos recolectados, ante los análisis realizados lo que debe esperarse es que de una u otra manera se pueda dar razón física del fenómeno, independientemente del tipo de explicación o fundamento teórico que se acoja o acomode.

Lo anterior se refleja cuando analizamos la caída libre de los cuerpos desde dos marcos de referencia y uno de ellos tiene movimiento, posiblemente uno vea un movimiento rectilíneo y el otro observe un movimiento parabólico. Desde la mecánica clásica, teniendo en cuenta el absolutismo, podríamos afirmar que solo uno tiene la razón, pero desde la relatividad y las virtudes que brinda la corriente convencionalista, se puede entender un solo movimiento como una serie de alternativas, en donde puede ser caracterizado de diferente manera según el observador, es decir, rectilíneo o parabólico.

En realidad, "lo que se ha de probar no es que nuestros criterios garanticen resultados verdaderos a largo plazo, sino que tengan grandes probabilidades de producir resultados verdaderos en el mundo real y actual"¹² como se mostro anteriormente con el ejemplo de la caída libre de los cuerpos. Sin embargo, la metodología que usemos para describir la naturaleza se perfecciona con el tiempo, hasta el punto de no solo buscar la explicación real y actual, sino una explicación futura o a largo plazo que se da *a priori* como lo plantea Reichembach detro del convencionalismo.

En otras palabras, lo que pretendía manifestar Reichembach en sus análisis, era la facilidad de convertir supuestos en concretos, donde el papel de la ciencia es fundamen-

¹²Friedman, Michael. *Fundamentos de las teorías del espacio-tiempo*. Física Relativista y Filosofía de la Ciencia. Editorial Alianza S.A.1983. pág. 327.

tal, al punto de ser la encargada de darle fundamento (a las explicaciones) y generar los dogmas suficientes para dar seguridad a la razón humana para afirmar cosas y estar seguros de que sean ciertas. Después de este punto es que las cosas se entienden habituales y adquieren un carácter cotidiano; es allí donde entra Reichenbach con sus afirmaciones a priori, que a mi parecer, no es una buena forma de entender a priori como lo planteaba Kant, sino más bien, es una interpretación propia para entender que las ideas después de planteadas y aceptadas por las sociedades, empiezan a heredar características cotidianas.

La postura reichenbachiana se refleja en la teoría de la relatividad al realizar los experimentos mentales, que se dan de manera a priori (donde se justifica Reichenbach asumiendo que están dentro de la razón pura como la afirmaba Kant y como se realizara posteriormente la contemplación del concepto de espacio), con los cuales el acto de conocer las consecuencias físicas de los experimentos se remite a una reestructuración y revisión de bases teóricas preestablecidas, en donde se pone en juego los conocimientos particulares de cada sujeto con relación a su experiencia.

Lo que se pretende, es entender como todas estas concepciones están en el mundo de las ideas y como es que allí se trabajan y se modifican. En realidad, lo que hacemos como científicos, es idealizar el mundo desde las bases que hemos creado, donde constantemente -en física- nos cuestionamos por la naturaleza del espacio y del tiempo hasta el punto de jugar solo con nuestras mentes e ideas como se hace en los experimentos mentales a partir de las seguridades que nos ofrece la ciencia.

En cierta manera, el relacionismo aporta en gran sentido a la revisión del conocimiento (la explicación futura o a largo plazo), debido a que es con las relaciones entre los objetos y los conceptos que poseemos, que llegamos a tener la seguridad de predecir, sin temor a equivocarnos; este proceso de creación de relaciones se realiza a medida que se va generando el análisis de los datos obtenidos empíricamente, o durante el transcurso de la revisión o reestructuración de las bases teóricas que posea el sujeto que realiza el análisis.

Esta postura es bien aceptada en la mecánica clásica, pero en la teoría de la relatividad no es pertinente hacerlo. Las relaciones se mantienen entre los objetos como se hacía en mecánica clásica según un observador, pero en la relatividad se empiezan a crear relaciones entre observadores, es decir que la naturaleza de las relaciones cambia, generando una ampliación de posibilidades del mundo natural. En este sentido, el relacionismo se abandona y entra el convencionalismo generando equivalencias de las relaciones entre observadores, algo que no podía ofrecer el relacionismo sino entre los objetos.

En este sentido, es que el convencionalismo cumple un papel fundamental como corriente epistemológica y filosófica, porque nutre el proceso por el cual se modifican las relaciones ya no entre objetos, sino entre observadores. A parte de eso, nos permite establecer equivalencias a pesar de que las relaciones existentes cambien de forma de un observador a otro y esto se logra porque su fondo no ha cambiado, como se desea realizar en el ejemplo de la caída libre, en donde el fondo (ósea la relación primitiva) hace referencia al movimiento y los asuntos de forma a su clasificación (sea rectilíneo o parabólico).

Los conceptos y teorías se forman en el transcurso de la actividad práctica de la humanidad, reflejan determinados aspectos del mundo, que una vez formulados, pueden ser tomados a conveniencia de los sujetos haciendo abstracción de su base real y convertirse en instrumento, es decir como aparato para describir fenómenos completamente heterogéneos o diferentes.

Por esto, en cierta manera (como consejo según lo anteriormente planteado), se debe hacer una revisión continua de la ciencia, para no caer en el error de dar explicación a fenómenos naturales poco habituales dentro de teorías que se fundamentan en la cotidianidad. Aquí surgen reestructuraciones o nuevos paradigmas de la ciencia, en donde tiene mucho que ver el papel del sujeto como ente cognoscente como se explicara a continuación.

El problema del conocimiento que en la física clásica no tenía nada que ver con el sujeto, sino directamente con el objeto, se transforma en la importancia que se le da al sujeto como ente cognoscente (perdiendo así el carácter objetivo), como se evidencia en la relatividad especial en cuanto los observadores (sistemas de referencia) dan razón de la dependencia del espacio y el tiempo, según estos posean o no movimiento.

En otras palabras, el conocimiento depende de la deducción de quien lo estudie, en la forma en que es el único que puede dar certeza de ello (como para nuestro caso particular se evidencia en las mediciones realizadas) y no de manera global, ya que se perderían los caracteres propios e impropios que se generan en la relatividad y que dependen netamente del observador.

La corriente convencionalista se cuestiona en realidad por la verdad, negando su manera absoluta y dejándole carta abierta a la relativa, donde se busca la fiabilidad de la autenticidad, que traducido a las ciencias, radica en encontrar altas posibilidades a que se cumplan ciertas alternativas, en las cuales recae el papel de la medición en la teoría de la relatividad especial, ya que cada alternativa es generada por la medición de un observador inercial y es altamente posible para cualquier otro que sea comóvil al anterior, esto quiere decir que si los dos observadores se encuentran moviéndose a

la misma velocidad y en el mismo sentido (a lo que me refiero con comoviles), las mediciones son equivalentes, mientras que en el caso contrario son heterogéneas.

Según como se han planteado las ideas anteriores, no cabe duda que el convencionalismo es la fuente de generar equivalencias teóricas y que totalmente de acuerdo se esta con el aporte que le realiza a la relatividad. Por consiguiente, no queda otro camino que aceptar que el mundo convencional nos abre la visión del mundo en la medida que nos permite contemplar más alternativas, de nosotros esta el comprenderlas para dar cuenta del universo.

Este tipo de alternativas se categorizan como autenticas según la percepción sensorial, el grado de aceptación de la comunidad científica y el grado de fiabilidad que posean. Por ejemplo, el movimiento respecto al espacio absoluto es indetectable y por eso es que existe la relatividad de la velocidad, pues empíricamente son compatible en cuanto a su magnitud debido a las percepciones sensoriales que se vivencia. El grado de aceptación de la misma, se debe a la indistinguibilidad que posee la velocidad con relación al espacio absoluto como se evidenciaba en el espacio euclideo newtoniano analizado en el capítulo anterior; y el grado de fiabilidad esta dado por las mediciones, es decir, los datos recolectados empíricamente.

En la relatividad especial, todos los marcos de referencia son inerciales (al igual que en el universo de Minkowski), en ese sentido los valores de la velocidad son igualmente correctas, esto no quiere decir que los objetos posean la misma velocidad, sino que no existe un sistema de referencia privilegiado desde el cual se tomen las mediciones de velocidad, por lo tanto su elección se realiza de manera arbitraria y se distingue claramente la postura convencionalista en lo concerniente a la relativización y la equivalencia de descripciones como se anheló realizar.

Por otro lado se encuentra Kant , quien fue mucho más importante en Einstein que los mismo positivistas, "Para Kant, representación pura es aquella en la cual no se halla nada de lo que pertenece a la sensación. De aquí se deduce que la forma pura de las intuiciones sensibles en general, en la que es percibida toda diversidad de los fenómenos bajo ciertas relaciones, se encuentra a priori en el espíritu. Esta forma pura de sensibilidad se llama intuición pura"¹³.

La representación pura es la síntesis de todas las posibilidades de conocimiento, en donde Minkowski juega un papel muy importante en la manera como representa el mundo Einstein, ya que Hermman como buen matemático deduce a través de la fragmentación de los postulados de Euclides, la geometría curva, que se desprende

¹³Adolfo Manuel Pacheco Codina. *Conceptos de espacio y tiempo en la física*. Profesor asociado a la UPN. Digitalizado por Red Académica.

de concepciones netamente racionales y no empíricas que corresponden al carácter de intuición sensible en Kant y que se encuentran a priori en el espíritu porque obviamente Minkowski no se acude a la experiencia a la hora de describir formalmente el espacio-tiempo, es decir que la percepción que él posee de este tejido es netamente matemático como lo postula en su escrito original de Espacio y tiempo en donde afirma que la relación es necesaria para que no desvanezcan estos conceptos en donde recae la intuición pura (ya que el aspecto conceptual recae únicamente en los pensamientos).

El espacio, es una representación necesaria a priori que sirve de fundamento a todas las intuiciones externas, no representa ninguna propiedad de las cosas (intuición pura y no empírica) y es la única condición subjetiva de la sensibilidad. Por otro lado, el tiempo es una representación necesaria que sirve de base a todas las intuiciones y es la condición formal a priori de todos los fenómenos en general, en donde la forma esta dada por el mundo de las ideas y el contenido por la naturaleza.

Las ideas de Kant no estan conformes en la postura positivista al momento de afirmar que las concepciones de espacio y tiempo son apriori al darle universalidad a la validez de la teoria clasica formulada por Newton, las cuales dan un carácter (global) al espacio y al tiempo¹⁴ como se muestra en la representación clásica euclideo-newtoniana en donde se tiene en cuenta la filosofia trascendental¹⁵ (y en donde se recae al absolutismo).

Entendiendo lo trascendental en Kant, como las posibles explicaciones que se le pueden dar al objeto sin necesidad de acudir a la experiencia (en analogía¹⁶ de esto, como lo hace Newton por medio de sus influencias teológicas al construir la noción de espacio y tiempo) o las razones que me puedan generar el conocimiento a priori del mismo, es decir las ideas que descansan solamente en la razón y que son generadas por elementos o estructuras del conocimiento mismo.

"Kant no tenía razón al afirmar que los axiomas de la geometría son juicios sintéticos a priori, tesis que constituye un punto fundamental de partida en la elaboración de su propuesta epistemológica y en su reflexión filosófica sobre el espacio y la geometría euclídea. La tesis falla en dos puntos: uno, al afirmar que los axiomas de la geometría

¹⁴Entendido para Kant (espacio y tiempo), como definiciones arbitrarias provenientes de una forma (que es conceptual o dependiente del intelecto) de intuición sensible. Mientras que para los positivistas el espacio y el tiempo toman un carácter sustancial que cumple con las leyes del movimiento.

¹⁵En donde su problema general, es el estudio de las proposiciones sintéticas apriori. En palabras de Kant: es el conocimiento que versa no sobre objetos sino sobre nuestro modo de conocer a priori los objetos. Generalmente a alguna de estas dos cuestiones: o a toda condición no empírica de la posibilidad de los objetos, o a todo conocimiento que muestra cómo es posible el conocimiento sintético a priori.

¹⁶Se dice analogía, porque en este punto es una manera de contrastar siempre y cuando se tenga en cuenta que la naturaleza de los análisis es distinta, en este caso no son identificables, sino de manera que buscan métodos diferentes a la experiencia para dar razón a sus ideas.

tienen una validez apodíctica (que no admite contradicción); y dos, al implicar que el conocimiento de la estructura espacial del mundo se obtiene de forma a priori, independientemente de la observación y la experiencia¹⁷.

Es decir, Kant se encarga de realizar un análisis epistemológico al espacio, donde dota las ideas de Newton de espacio absoluto de reflexión filosófica (mientras que Newton las dotaba de reflexiones teológicas), que permite entender la estructura conceptual de la geometría a partir de las nociones de espacio; mientras que el espacio mismo de cuenta del espacio Kant afirma que son juicios sintéticos¹⁸ a priori¹⁹ (en su *Critica a la razón pura*) y no se preocupó por estudiarlos, sino que reflexionó sobre como existen estos juicios, haciendo recaer en la geometría el carácter epistemológico y en los axiomas los juicios sintéticos a priori (es decir, Kant no cuestiona los juicios, los da por ciertos e irrefutables), debido a que pretende justificar la geometrización del espacio o la relación existente entre espacio y geometría a través del relacionismo de Leibniz como se observa en el tercer capítulo.

Todo lo anterior falla cuando Kant intenta justificar la geometría, respondiendo así a ¿Que es el espacio? y no centra sus reflexiones hacia la relación existente entre la geometría, la física y las matemáticas. Por otro lado, da por hecho que la geometría euclidiana es correcta y parte de dicha tesis, lo cual se rompe en el momento de descubrimiento de las geometrías no euclidianas. Y recae, cuando le da el sentido a priori por necesidad, en cuanto a que las ideas recaen en los axiomas que viven en la razón y por ende son facticos y no necesitan de la experiencia para su comprobación.

La aparición de las geometrías no euclídeas refuta los juicios sintéticos en la medida en que si realmente fueran a priori, no se podría construir otra geometría que no fuera euclidiana y generar una teoría que se fundamentara en la misma. Por otro lado, deja en vilo a la segunda en cuanto a que Poincare desarrolla las geometrías no euclidianas descubiertas por Saccheri, Lambert, Schaweikart, Taurinus y Weitcher que en relatividad general se evidencian de manera física y matemática como lo plasma Einstein al decir que el espacio es semiesférico, por lo tanto no euclideo.

Einstein se refería al espacio semiesférico porque al ser la geometría la estructura del espacio, siempre y cuando mantuviera un objeto su extensión a pesar de que se traslade,

¹⁷Germán Guerrero Pino. *Teoría Kantiana del espacio, geometría y experiencia*. Praxis Filosófica. Nueva serie, No. 20, Universidad del Valle. 2005

¹⁸Entendiendo los juicios sintéticos como una relación concreta entre dos conceptos básicos, un ejemplo de ello es: *por dos puntos pasa una y solo una recta*, donde se evidencian los conceptos de punto y recta dejando explícita la relación sinterizada de los dos.

¹⁹En este caso particular, se refiere a que esta presente en nuestra mente de manera inmediata por necesidad y por ende no hay necesidad de acudir a la experiencia. Para Kant es apodíctico por este simple hecho, y es de entenderse dentro del carácter Puro que le da al mundo racional.

sería el espacio, un espacio euclidiano; resulta, que al momento de que Einstein plantea la contracción de la longitud, el objeto no mantiene su extensión, por consecuencia tiene que abandonar la geometría euclidiana, es decir, debe acudir a las geometrías no euclidianas, llamadas también semiesféricas o semirriemánianas para la explicación del cambio de estado que sufren los objetos.

Los positivistas lógicos corrigen las ideas de Kant al aplicar la matemática del siglo XX en la distinción de poder llegar a concebir el conocimiento como propiedad del intelecto, es decir como se realiza el proceso de conocer, ya que estaban convencidos de que la matemática aplicada a las ideas de Kant ya estaba caduca. Las aproximaciones iniciales de los positivistas, las dan por medio de la teoría de superficies de Gauss (formulada en 1827 y que es la que permite adentrar las ideas de Kant al siglo XX) en donde se expresa de coordenadas cartesianas

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 \quad (2.3)$$

que describen la geometría euclidiana (en cuanto a hallar la distancia de un punto a otro se refiere) a coordenadas arbitrarias

$$ds^2 = g_{11}dx_1^2 + g_{12}dx_1dx_2 + g_{21}dx_2dx_1 + g_{22}dx_2^2 \quad (2.4)$$

en donde los coeficientes que acompañan la métrica aparentemente euclídea ($g_{11}, g_{12}, g_{21}, g_{22}$) dan cuenta de la curvatura que puede llegar a tener el espacio, encontrando en la geometría caracteres poco euclidianos que reflejan la existencia de curvaturas poco habituales en donde no se pueden realizar transformaciones entre las coordenadas cartesianas y las arbitrarias. Esto se debe a que existen dos tipos de propiedades, las extrínsecas que dependen de las coordenadas y que varían al hacer transformaciones de un sistema a otro, y las intrínsecas que definen la estructura geométrica de las superficies, las cuales son independientes a las coordenadas.

"Punto culminante del proceso fue la lección inaugural de Riemann, en 1854. Riemann considera espacios arbitrarios, o variedades, de número cualquiera de dimensiones; los puntos de tales variedades pueden quedar unívocamente determinados por n -*tu-plas* de números reales. Establecido en una variedad n -dimensional un sistema particular de coordenadas x_1, x_2, \dots, x_n podemos definir un elemento de arco en n dimensiones, también llamado tensor métrico, mediante la fórmula²⁰:

²⁰Michael Friedman. *Fundamentos de las teorías del espacio-tiempo*. Física Relativista y Filosofía de la Ciencia.

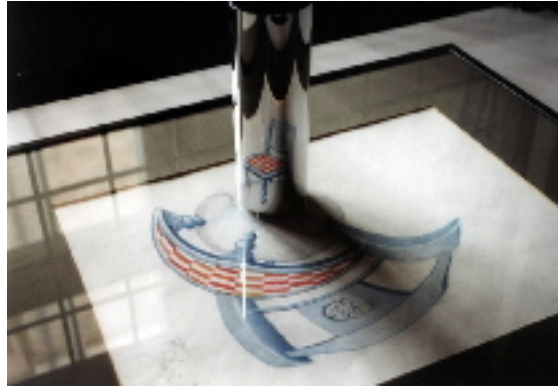


Figura 2.4: Anamorfosis.

$$ds^2 = \sum_{i,j=1}^n g_{ij} dx_i dx_j \quad (2.5)$$

donde el trabajo de Riemann *Ueber die Hypothesen, Welche der Geometrie zu Grunde liegen* (1854) Publicado en *Werke* dan el fundamento y las ideas positivistas para corregir a Kant (concerniente a la geometría del espacio como una intuición a priori, en cierta manera equivocada, debido a que la geometría euclidiana no es apodíctica como se pensaba), redondea y sintetiza los estudios de Poincaré concernientes a la formulación de las geometrías, en donde desarrolla una generalización de los principios de la geometría euclidiana y la no euclídea.²¹

Actualmente, la unificación de las geometrías se conoce como geometría de Riemann, dicha geometría sirve como base para la formulación matemática de la teoría de la relatividad de Einstein y sirvió como fundamento matemático en lo concerniente a la contracción de la longitud y la dilatación del tiempo.

El surgimiento de geometrías no euclidianas, rompe con los paradigmas clásicos acerca del espacio y el tiempo. Los estudios más influyentes para este análisis son los realizados por Poincaré y Lobachevski, quienes dan razón de las curvaturas y ponen a la geometría euclidiana como caso particular de las suyas. La síntesis de estos estudios la realizó Gauss con su teoría de superficies, en donde permite recopilar a Minkowski todo ello para formular su representación espacio-temporal que sirve como fundamento

²¹Anamorfosis en un espejo cilíndrico del dibujo de una silla, en donde se muestra claramente la incidencia de las geometrías no euclidianas en el arte. Como consecuencia de lo anterior, la perspectiva ya no se puede representar con estirar o contraer el plano cartesiano o espacio "n donde recae el plano clásico y la geometría euclidiana", para explicar la anamorfosis se debe recurrir a las fórmulas de Bernhard Riemann, y nuevamente se soluciona el problema de pasar de una perspectiva plana a una curva, en donde el espacio se retuerce sobre sí mismo como se evidencia al pasar de una círculo a una elipse.

a la teoría de la relatividad. Por otro lado Mach aporta en cuanto al entendimiento de lo inercial, en donde se ve como un proceso de movimiento, lo cual es evidente en los conos de luz, ya que dan cuenta únicamente de sistemas inerciales.

Quien realiza las representaciones que explican las anteriores afirmaciones encasilladas en la teoría de la relatividad, es Minkowski, permitiendo abstraer estas contemplaciones por medio de la geometría hiperbólica como se pretende mostrar en el siguiente capítulo.

Capítulo 3

El espacio-tiempo de Minkowski.

3.1. La geometría en la formalización Minkowskiana

En esta sección se pretende resaltar la influencia de los estudios de Poincaré y el análisis a la geometría, generan el rompimiento de los postulados de Euclides, permitiendo la existencia de geometrías curvas relacionadas a coeficientes de curvatura negativos, como lo es el caso de la geometría hiperbólica. Dicha geometría es la que retoma Minkowski, y que por medio de una solución meramente matemática destaca la explicación de la unificación del Espacio-tiempo por medio de su representación (los conos de luz); tal geometría permite evidenciar de una nueva forma el principio de causalidad, como una red que se explica a través de los conos de luz y el formalismo de la geometría diferencial.

Como buen matemático y profesor de Einstein, Minkowski es quien desarrolla la estructura base para la teoría de la relatividad llamada espacio-tiempo cuadrimensional. Esta representación no tiene nada que envidiar a las concepciones físicas de Einstein, ya que para Minkowski, el universo real estaba contenido en esta cuadrimensionalidad sustancial (inmaterial) a lo que hacia referencia Kant por espíritu y conlleva a que solo esté en el mundo de las ideas (propiamente en el intelecto; representación pura).

La idea se apoya en los pensamientos de Platón, en donde no sólo conocemos las sustancias inmateriales, sino que éstas son lo primero que conocemos. Platón sostuvo que las formas inmateriales subsistentes, estas formas las llamo ideas, eran el objeto propio de nuestro entendimiento, por serlo, son conocidas por nosotros de forma directa. Sin embargo, el alma llega al conocimiento de las cosas materiales en cuanto que al entendimiento se une la sensación y la imaginación. Por lo tanto, cuanto más puro sea el entendimiento, tanto mejor se percibe la verdad inteligible de lo inmaterial.

Debido a que las nociones de espacio-tiempo corresponde a principios e ideas que

subyacen el entendimiento empírico, debido al carácter formal que presentan y debido a la ambigüedad que conlleva pensarse el espacio y el tiempo, había que llevarlo de la mano con el comportamiento natural, para lo cual, se hace necesario que el continuo espaciotemporal sea el tiempo conexo¹ a las dimensiones espaciales como en el siglo XVIII fueron pensadas por D'Alembert y Lagrange para entender la mecánica, y que fueron recapituladas por Minkowski para resolver la dinámica de tres dimensiones como estática de cuatro dimensiones, es decir, la relatividad del movimiento presenciando la menor cantidad de entidades absolutas (que en este caso, solo el carácter esta presente en la aceleración)².

El formalismo matemático que desarrolla Minkowski permite que "La teoría de vectores y su extensión, la teoría de tensores (...), permite reconocer sin cálculo, si una ecuación o un sistema de ecuaciones tiene o no la propiedad de transformarse de manera *covariante*"³, entendido como la invariancia de las leyes físicas en una transformación espaciotemporal cualquiera. No obstante, las concepciones de Minkowski eran netamente geométricas y se manifiestan en la noción de tiempo que poseía.

Para Minkowski el tiempo es un imaginario, en esencia, porque es una manera de ver la dimensión temporal igual que si fuera espacial, una interpretación de ello, es el moverse en el tiempo imaginario hacia atrás y hacia delante simplemente como nos movemos en el espacio hacia izquierda y derecha. Este tiempo sería perpendicular al tiempo "normal" que experimentamos a diario (debido a que matemáticamente la $\sqrt{-1}$ es un número complejo⁴) que acompaña a la cuarta coordenada expresado en la métrica, en donde recae todo el carácter físico (en cuanto al principio causal y sus consecuencias) y es negativo debido a la geometría no euclidiana (semirimeniana).

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - dt^2 \quad (3.1)$$

$$s^2 = x^2 + y^2 + z^2 - ict^2 \text{ donde } i = \sqrt{-1}$$

Uno de los personajes mas influyentes en Hermmman Minkowski es Henri Poincaré, quien creía que la geometría espacial era indeterminable, y que lo sustentaba por medio

¹ todos los puntos y caminos del tiempo y el espacio se pueden conectar entre si, sin salirse del contorno.

² Conclusión generada del análisis de: Anacona, Maribel y Gómez G, Susana. *Einstein y el rol de las matemáticas en la física*. Praxis Filosófica. Nueva serie, No. 22. Universidad del Valle. 2006. pag 12.

³ Anacona, Maribel y Gómez G, Susana. *Einstein y el rol de las matemáticas en la física*. Praxis Filosófica. Nueva serie, No. 22. Universidad del Valle. 2006.

⁴ Su principal aplicación, es en relatividad general, para suavizar las singularidades existentes en física como el big-bang o los agujeros negros.

de cambios *fisicogeométricos de largo alcance*. Podemos imaginar el mundo transformado en uno nuevo, el cual es indistinguible del primero y físicamente en todo idéntico a él, por lo que la transformación no supondría un acontecimiento real (...) entendiendo al espacio en sí como un ente sin sentido ni forma propia, dando así existencia a la relatividad del espacio⁵, concibiendo al espacio de la misma forma como lo hacia Kant; estas ideas las desarrolla en 1902 por medio de la geometría propuesta por Nikolái Lobachevski (geometría no euclidiana, como caso particular la geometría hiperbólica) y por medio de sus meditaciones ontológicas, en donde Lobachevski esta en contra de las postulaciones Kantianas ya que asevera que para él, los principios de una ciencia son el resultado último de la investigación, son resultado de un delicado proceso de abstracción⁶. Como dijo el propio Lobachevski⁷:

"Después de esto no podemos afirmar más que la hipótesis según la cual la medida de longitud no depende de los ángulos, aunque muchos geómetras quisieran aceptarla como una verdad rigurosa, dejando a un lado la demostración, quizás se revelaría manifiestamente falsa aún antes de que se hayan franqueado los límites del universo visible. Por otra parte, no estamos en posición de saber qué relaciones podrían existir entre los objetos de la naturaleza y unir en ella magnitudes tan diferentes como las rectas y los ángulos. Por lo tanto, es muy probable que las tesis euclidianas sean las únicas verdaderas, aunque jamás sean demostradas. Como quiera que sea, aún si no está dentro de la naturaleza, la nueva geometría, cuya base ya se encuentra presentada aquí, puede, no obstante, existir en nuestra imaginación y, siendo inútil para medidas reales, abre un vasto y nuevo campo para mutuas aplicaciones de la geometría y del análisis".

Donde se entiende que las meditaciones ontológicas referidas a la dependencia de longitudes y ángulos, ponía a prueba la reflexión de existencia de dichas relaciones existentes demostradas en sus estudios en Astronomía, en donde pretendía interpretar la geometría del universo. Otra meditación, hace referencia a la veracidad que pueden llegar a tener los postulados de Euclides, y si su geometría es aplicable o no a la naturaleza, con lo cual se centra en el problema de la existencia de sus estudios siempre y cuando queden en el mudo de las ideas.

En otras palabras, Lobachevski reflexiona acerca de la diferente veracidad que poseen las leyes geométricas, en donde la geometría euclidiana adquiere un carácter practico en

⁵Friedman, Michael. *Fundamentos de las teorías del espacio-tiempo*. Física Relativista y Filosofía de la Ciencia. Editorial Alianza S.A.1983.

⁶Moreno Armella, Luis. *La construcción del espacio geometrico, un ensayo historico-critico*.CINVESTAV. IPN Mexico.

⁷José María montesinos amilibia. *Las geometrías no euclideas: Gauss, Lobachevsky y Bolyai*.

la medida que se manifiesta fácilmente al instaurarla en la explicación del espacio natural (entendido natural como espacio local y cotidiano no ajeno a nuestras percepciones), por lo tanto, se generan inconvenientes al introducir la geometría hiperbólica, que presenta problemas axiomáticos con la euclidiana (debido a que da cuenta de la curvatura), pero que no se desecha porque se logra adecuar al espacio físico⁸.

Respecto a la veracidad de la misma Poincare afirma que: "La eleccion de geometria, lo mismo que la eleccion de sistemas de coordenadas, es cuestion de convenio arbitrario"⁹, en donde se precisa que el espacio no debe ser euclídeo, sino que obedece a un cambio de coordenadas, que dentro del contexto de Einstein (ósea en el desarrollo de la teoría de la relatividad), se hace necesario para entender el carácter propio o impropio del observador. Es decir, la geometría como estructura del espacio y los fenómenos físicos no dependen de las coordenadas que se escojan, dependen en si, del tipo de transformaciones que yo aplique en ellas, como se mostro anteriormente al aplicar las transformaciones de Galileo y las implicaciones que tuvieron la restructuración de las mismas (evidenciadas en las trasformaciones de Lorentz) en la teoría especial de la relatividad, en donde surge en realidad la red Espaciotemporal del universo.

Por consecuencia se puede afirmar según las razones anteriormente mencionadas, que el espacio-tiempo de Minkowski surge a raíz de una mera simplificación matemática generada a partir del estudio de la geometría. Debido a que en capítulos anteriores resaltamos la importancia de la medición, la importancia del trabajo de Minkowski radica en proponer una red espaciotemporal tetradimensional en donde se busca describir el donde y cuando de un evento, lo cual permite evidenciar la evolución de un objeto desde la representación del cono de luz, permitiendo la aplicación de las transformaciones de Lorentz de una manera gráfica¹⁰ (observada en el grupo de rotaciones en el espacio-tiempo complejo).

Si tenemos en una representación de Minkowski, un sistema de referencia (x', t') que se mueve con velocidad v se representa como un sistema no ortogonal en el sistema de referencia inercial (x, t) donde se sitúa el observador. Ambos sistemas de referencia están relacionados por una transformación de Lorentz.

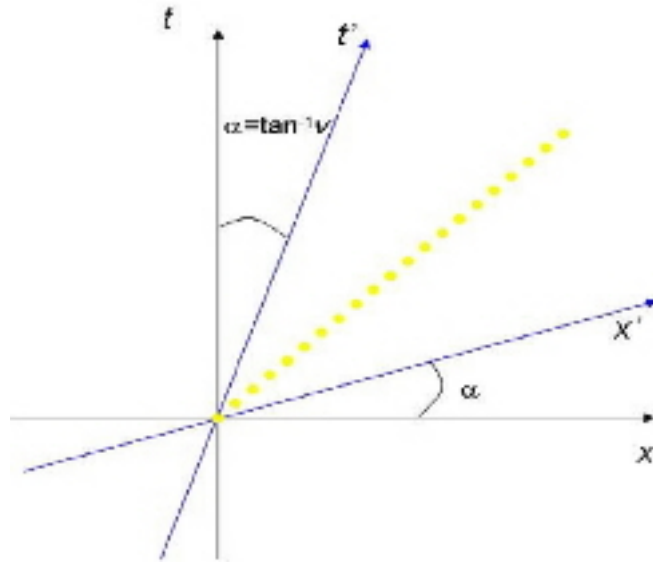
El ángulo θ es tal que se cumple: $\tanh \theta = v/c$, Donde $\tanh \theta$ es la tangente hiper-

⁸Pueden existir sistemas geométricos lógicamente incompatibles pero adecuados para la matematización del espacio.

⁹ibid.

¹⁰cabe decir que en una representación de Minkowski, un sistema de referencia (x', t') que se mueve con velocidad v se representa

como un sistema ortogonal en el sistema de referencia inercial (x, t) donde se sitúa el observador. Ambos sistemas de referencia están relacionados por una transformación de Lorentz. (H.Vázquez B., *Cinemática de la Relatividad Especial*, Manuales UTHEA, Número 318)



bólica del ángulo y esta definida como:

$$\tanh \theta = \frac{(e^{\theta} - e^{-\theta})}{(e^{\theta} + e^{-\theta})}^{11} \quad (3.2)$$

Así, una transformación de Lorentz usando los parámetros de los ángulos de Euler puede ser vista como una rotación en el espacio complejo (x, ict) . Esto se traduce al espacio-tiempo físico (x, t) simplemente cambiando las funciones trigonométricas por sus respectivas hiperbólicas. Así tenemos que:

$$x' = x (\cosh \theta) - ct (\sinh \theta) \quad (3.3)$$

$$ct' = -x (\sinh \theta) + ct (\cosh \theta) \quad (3.4)$$

donde

$$\sinh \theta = \frac{v}{c} \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}} \quad \text{y} \quad \cosh \theta = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}}$$

El espacio-tiempo de Minkowski admite un tratamiento pseudo-euclídeo (que no cumple con uno de los postulados de la geometría euclidiana: cumple con tres postulados, excepto el axioma donde $|A| \geq 0$), es por ello que¹²:

¹¹Vase apndice 1

¹²Fonseca Moreno, Diego Fernando. *Análisis de sistemas no inerciales en la T.E.R.*. Universidad Pedagógica Nacional. Bogotá. 2007.

$$x = (ct, x, y, z) \longrightarrow x = (ict, x, y, z) \quad (3.5)$$

Consecuentemente, lo que se pretende desarrollar en la teoría especial de la relatividad por medio de la explicación geométrica hiperbólica es:

- Tomar explícitamente las entidades geométricas y definir por medio de ellas las entidades de la naturaleza.
- Los sistemas de referencia son tratados como clases particulares de sistemas coordenados.
- Los rayos luminosos y las trayectorias de las partículas, como clases de curvas especiales (Geodésicas o líneas de mundo) en el espacio-tiempo.

Lo anteriormente mencionado se fundamenta en la postura relacionista, en donde se busca relacionar al objeto con el observador (Contrario a la visión absolutista que se trató en el primer capítulo)¹³ y por consecuencia solucionar dicho aspecto metafísico (el de las estructuras más generales refiriéndose a las leyes y principios), en cuanto a la medición en la teoría de la relatividad debido a la modificación que sufre este aspecto debido a la estructura causal y a la nueva concepción de espacio-tiempo.

Por otro lado, Mach aporta a la tesis racionalista (en su forma aplicada¹⁴), en cuanto al análisis de las concepciones de inercia, en cuanto a que está relacionada directamente con la noción de lugar. Esta aclaración realizada por Mach permite entender la inercia como un estado de movimiento y por ende entenderlo como un proceso¹⁵, donde se hace evidente el trabajo de Minkowski al sintetizar por medio de la geometría hiperbólica, la relación intrínseca de espacio y tiempo mas no entra en la descripción de sistemas acelerados. Pero el relacionismo no solo se evidencia en el origen del concepto de espacio-tiempo, viene de antes (Desde la discusión de Newton y Leibniz), en donde se muestra que las concepciones de espacio absoluto (sustancial) y el relacionismo (Leibnesiano) entre los objetos son las tesis que arman clásicamente la noción de espacio relacionista.^{en} donde empieza a tener sentido la relatividad del movimiento en un sentido restringido (ya que obedece a propiedades intrínsecas del objetos en movimiento y no se hace relación con los que lo rodean: "sistemas no inerciales").

¹³El encargado de desarrollar estos primeros análisis fue Leibniz como fue desarrollado anteriormente en contra de la visión Newtoniana del mundo.

¹⁴Gaston Bachelard. *El Racionalismo Aplicado*. 1978

¹⁵G.L., *El principio de la inercia*. Universidad Nacional Autónoma de México. 2002

La postura es complementada por Mach, en donde le da al espacio un sentido un poco atomista al concebir la importancia de la materia al analizar los sistemas inerciales, porque en cierta manera, la materia es encargada de deformar el espacio-tiempo, sirviendo como un ente perturbador al igual que el átomo, suprimiéndole los problemas metafísicos y teológicos (manifestados en las ideas de Newton respecto al espacio) y el carácter relacional (objeto-objetos, según la visión de Leibniz) que permite entender que para cada observador hay un sistema de referencia.

Potencialmente la influencia fuerte a Minkowski viene sustentada en los trabajos anteriormente realizados por Newton y Leibniz debido a las propiedades que posee la representación Minkowskiana del espacio-tiempo (desglosadas tales influencias desde la postura de Mach y haciéndolas inteligibles en el contexto de Minkowski) que comparte algunas de las siguientes conclusiones¹⁶:

- *El espacio es una abstracción que tiene sentido a partir de la interacción (relación) entre todas las cosas*¹⁷

En donde se hace referencia al carácter relacionista de Leibniz y no se tiene en cuenta el carácter a priori de las nociones según Kant. Minkowski lo representa por medio del conjunto de planos de simultaneidad en donde se observa la evolución de las geodésicas o líneas de mundo (debido a que a cada geodésica se le asigna su propio plano de simultaneidad).

- *Todo movimiento es relativo entre cuerpos materiales, incluyendo a los sistemas no inerciales*¹⁸.

Aquí, podemos evidenciar la existencia de conos de luz para cada observador inercial y la diferencia de líneas de mundo que pueden llegar a tener uno al otro (donde se observan las rotaciones de los conos de luz).

- *El conjunto de materia estelar nos representa la estructura inercial.*

No es notoria en Minkowski, debido a que en el universo Minkowskiano solo hay luz. Se desarrolla en la Teoría general de la relatividad, en donde la influencia de la masa es vital y se ve reflejado en los elementos de línea tratados allí.

¹⁶Fonseca Moreno, Diego Fernando. *Análisis de sistemas no inerciales en la T.E.R.*. Universidad Pedagógica Nacional. Bogotá. 2007. pag.37

¹⁷Que hace referencia a la definición gráfica del universo de Minkowski.

¹⁸Que hace referencia a la definición física del universo de Minkowski pero en sentido restringido, ya que en Minkowski solo se tiene en cuenta sistemas inerciales como se demuestra matemáticamente. Véase pág. 29-32

"Tengamos presente que la estructura espaciotemporal de Minkowski vista ... nos lleva a la concepción de tener un tiempo universal (t) ... y un x global (indistinguible) sobre todo el espacio-tiempo de Minkowski, luego para nosotros esta visión tiene un tinte absolutista, esta idea se fija en relación a la descripción Newtoniana que hace referencia a la concepción de un espacio como un contenedor de eventos"¹⁹, en lo cual se fundamenta que el espacio-tiempo de Minkowski ofrece aun condiciones absolutistas que permiten el análisis del movimiento relativo (a partir de la ubicación del punto de referencia en la hipersuperficie del presente) y por ende es netamente inercial (como se sustentara posteriormente, es decir, conserva la aceleración absoluta al igual que la mecánica clásica) ya que sin este carácter, seria imposible comparar o establecer relaciones entre los objetos.

Podemos afirmar, que el logro de Minkowski radica en poder representar las ideas absolutas de Newton (que se hacen evidentes en los sistemas propios) y las relacionistas (de Leibniz) por medio de las rotaciones de los conos de luz (relaciones entre observadores inerciales, descritos por geodésicas, es decir, observadores acelerados) en sus conos de luz si se tiene en cuenta la visión de todo el espacio-tiempo desde observadores acelerados (las ideas racionalistas de Mach).

Ahora bien, analizando las ideas desde la postura convencionalista, que busca aclarar las propiedades y relaciones geométricas, en donde se busca que geometrías incompatibles como la euclídea y la no euclídea son descripciones equivalentes de los mismos eventos debido a su veracidad. Por lo cual, la escogencia de tipo de coordenadas o escalas de medida se vuelva irrelevante a la hora de estudiar algún fenómeno físico (es decir, la naturaleza de lo observado sigue siendo la misma). Un ejemplo de ello es la medición del tiempo y de la longitud desde cualquier sistema, en donde la medida (desde el convencionalismo) se vuelve irrelevante frente a los fenómenos de dilatación y contracción debido a que ya no posee un carácter absolutista.

Digamos, que el convencionalismo es la corriente que permite darle el sentido físico a los diagramas de Minkowski, porque en realidad la mecánica clásica se vuelve un caso particular de la formulación realizada. A pesar de que la geometría clásicamente es euclidiana, se explica posteriormente (formalmente) como a partir de la geometría hiperbólica (no euclídea) se conservan aun las leyes de la física en cualquier punto (sistemas inerciales). Es decir, desde el convencionalismo, las teorías físicas pueden ser equivalentes empíricamente (como lo es nuestro caso) pero son lógicamente incompatibles como lo son la mecánica clásica y la teoría de la relatividad.

¹⁹Fonseca Moreno, Diego Fernando. *Análisis de sistemas no inerciales en la T.E.R.*. Universidad Pedagógica Nacional. Bogotá. 2007. pp. 37-38

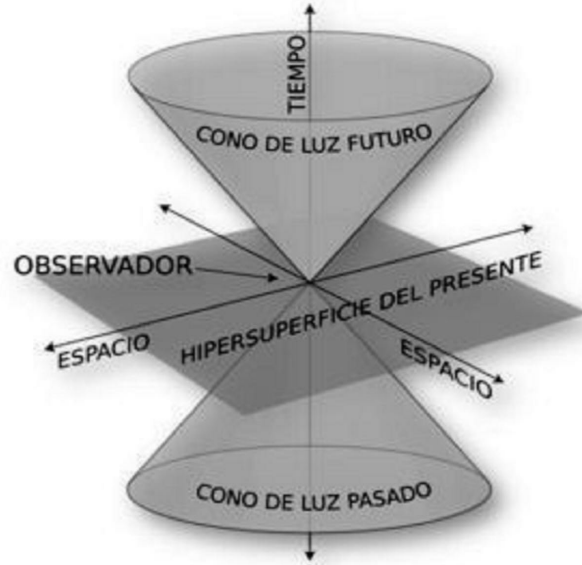


Figura 3.1: Representación Minkowskiana del espacio-tiempo.

3.2. El universo de Minkowski

Se podría definir el universo de Minkowski entendido como:

3.2.1. Gráficamente

El conjunto de todos los lugares en un tiempo o de todos los acontecimientos actuales y posibles (conos de luz). Los conos representan la trayectoria de los rayos de luz que pasan por el punto $x = y = z = 0$ en el momento $t = 0$. El interior de los conos de luz representan posibles trayectorias de observadores que se mueven con velocidad constante pasando por el origen (geodésicas). La hipersuperficie (hiperplano) del presente o plano de simultaneidad representa el espacio tridimensional, el exterior de los conos no está en conexión causal con el origen y la superficie del cono da razón de la velocidad límite de la naturaleza (la luz).

3.2.2. Físicamente

Es un espacio de cuatro dimensiones plano, en que las líneas de curvatura mínima o geodésicas son líneas rectas.²⁰

²⁰Friedman, Michael. *Fundamentos de las teorías del espacio-tiempo*. Física Relativista y Filosofía de la Ciencia. Editorial Alianza S.A.1983. pág. 63.

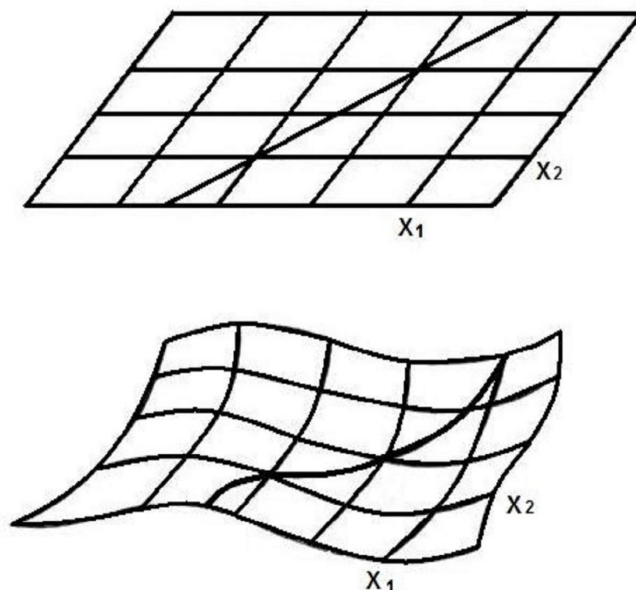


Figura 3.2: Comparación de variedades afines llana y curva.

En otras palabras, la representación de Minkowski se encuentra en un espacio plano, en ese sentido permite que sus lados sean rectos y se puedan dibujar a 45° pues no existe masa que lo desvié, por lo tanto se infiere que en el espacio-tiempo de Minkowski habita la luz.

3.2.3. Matemáticamente

Está formado por una variedad de cuatro dimensiones que es homeomorfa, es decir, identificable topológicamente con R^4 .²¹

Es decir, que el espacio-tiempo de Minkowski localmente tiene la misma forma al espacio euclidiano, por lo tanto cumple con los postulados de dicha geometría y posee una métrica euclídea propia. No obstante, globalmente no conserva algunas características, como lo es el carácter absoluto del espacio, generando así la elección arbitraria (no privilegiada) de los sistemas de referencia.

Ahora bien, definiendo el Espacio-tiempo de Minkowski desde la geometría diferencial, podemos decir que es el par (M, η) siendo:

$$M = \{(x^0, x^1, x^2, x^3) \in R^4 / \langle x, y \rangle = \eta_{ij} x^i y^j\} \quad (3.6)$$

todo el conjunto de posibles cuadvectores medidos por observadores inerciales que

²¹ibid. pág. 60.

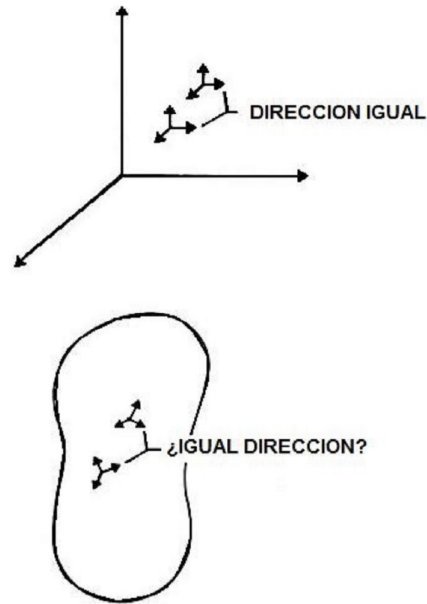


Figura 3.3: Espacios tangentes a puntos próximos.

se puedan expresar en dicho tejido teniendo en cuenta el tensor métrico de Minkowski.

Siendo η_{ij} el tensor métrico o la métrica de Minkowski.

$$\eta_{ij} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

en consecuencia todos los vectores base son perpendiculares entre si (ortogonales) y sus longitudes son de (1) (normalizados) exceptuando el caso del vector base del tiempo que su longitud es ($i = \sqrt{-1}$).

$$ds^2 = -(dx_0)^2 + (dx_1)^2 + (dx_2)^2 + (dx_3)^2 \quad (3.8)$$

Debido a que es una variedad llana ($K=0$ en las ecuaciones de campo).

$$R_{\mu\nu}^{\lambda} = K \left(dx_{\mu}, \frac{dy}{dx_{\mu}}, \frac{dy}{dx_{\nu}}, \frac{dy}{dx_{\lambda}} \right) = \frac{d\Gamma_{\mu\xi}^{\lambda}}{dx_{\nu}} - \frac{d\Gamma_{\mu\nu}^{\lambda}}{dx_{\xi}} + \Gamma_{\mu\xi}^{\delta} \Gamma_{\mu\xi}^{\delta} - \Gamma_{\mu\nu}^{\lambda} \Gamma_{\delta\xi}^{\lambda} \quad (3.9)$$

Se define una conexión afín D^{22} que da razón del espacio-tiempo de Minkowski como

²²Entendido como un operador diferenciable actuando sobre un campo vectorial $X(p)$ definido a lo largo de una curva σ . Su función es determinar la geometría de la variedad en la cual se este aplicando.

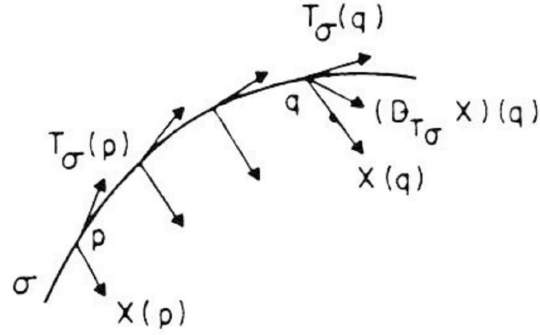


Figura 3.4: Conexión afín, en este caso es un operador diferenciable.

una variedad semiriemanniana al involucrarla con el tensor métrico (como se mostro anteriormente en la metrica).²³

En cierta manera, cualquier línea de universo en el espacio-tiempo debe ser diferenciable no solo para poder generar la forma de la geometría de la variedad, sino para ver como cualquiera de ellas es entendida como un sistema inercial. En síntesis, el observador percibe el universo desde la posición del sistema de referencia al que este ligado o asociado.

Como las componentes de η son constantes los términos covariantes son ordinarios y haciendo que:

$$\frac{d^2 x_k}{dt^2} + \Gamma_{ij}^k \frac{dx_i}{dt} \frac{dx_j}{dt} \quad (3.10)$$

y como la variedad es llana entonces $\Gamma_{ij}^k = 0$, es decir, que los terminos covariantes son ordinarios y las componentes de η son constantes, obteniendo nuestra ecuación de movimiento

$$\frac{d^2 x_k}{dt^2} = 0 \quad (3.11)$$

conocida en física como la ley de la inercia, con lo cual podemos decir, que *la representación minkowskiana es aplicable a sistemas inerciales* y en cualquier punto de este espacio-tiempo las leyes de la física permanecen invariantes. De no ser así, las geodesicas seran líneas curvas que poseen movimiento acelerado; la inclinación de las rectas esta dada por $\theta = \arctan v$.

²³ibid. pág. 61.

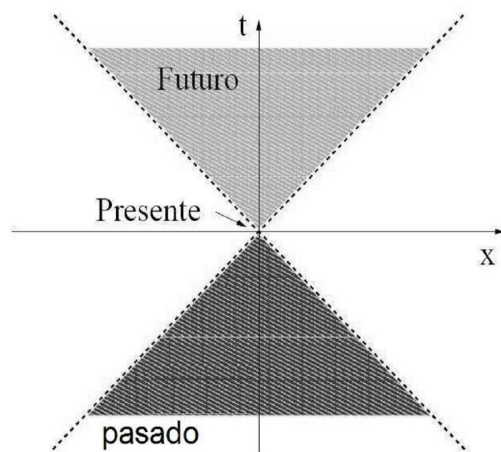


Figura 3.5: Principio causal del cono del luz.

3.3. Conos de luz y sus consecuencias causales.

Los conos de luz realizados por Hermann Minkowski, en física, son destacados en la teoría de la relatividad, porque son la base de las representaciones que podemos tener para el entendimiento de la fenomenología que en dicha teoría se describe (refiriéndonos a las líneas de mundo de cada objeto). La importancia radica en la fácil evidencia que genera el cono de luz acerca de la estructura causal, o principio causal, que es el que relaciona causa y efecto de un evento.

La descripción de un evento o la evolución de un objeto en el espacio-tiempo se conoce como geodésica, entendido como la distancia o ruta más corta entre dos puntos de una variedad (que no necesariamente es plana). A partir de las geodesicas y de su posición en los conos de luz, podemos entender el principio causal de la teoría especial de la relatividad como se mencionó a continuación:

3.3.1. Eventos como de Tiempo

(*timelike*²⁴): es el conjunto de todas las geodesicas o líneas de mundo que se encuentran dentro del cono de Minkowski. Tienen una característica especial, y es que dichos eventos poseen velocidades menores a las de la luz. Por lo tanto, matemáticamente si el vector tangente es $(\frac{dx_0}{du}, 0, 0, 0)$:

$$\eta_{ij} \frac{dx_i}{dt} \frac{dx_j}{dt} = \left(\frac{dx_0}{du} \right)^2 > 0 \quad (3.12)$$

²⁴Timelike: según el artículo original de Space and Time of Minkowski, traduce cromomorfa.

1. y por lo tanto son curvas temporales.

3.3.2. Eventos como de Espacio

(*spacelike*²⁵): es el conjunto de todas las geodesicas o líneas de mundo que se encuentran fuera del cono de Minkowski. Tienen una característica especial, y es que dichos eventos poseen velocidades mayores a las de la luz (son superlumínicos y no poseen conexión causal). Por lo tanto, matemáticamente si el vector tangente es $(0, \frac{dx_1}{du}, \frac{dx_2}{du}, \frac{dx_3}{du})$:

$$\eta_{ij} \frac{dx_i}{dt} \frac{dx_j}{dt} = - \left[\left(\frac{dx_1}{du} \right)^2 + \left(\frac{dx_2}{du} \right)^2 + \left(\frac{dx_3}{du} \right)^2 \right] < 0 \quad (3.13)$$

3.3.3. Eventos como de Luz

(*lightlike*²⁶): es el conjunto de todas las geodesicas o líneas de mundo que se encuentran en la superficie del cono de Minkowski. Los eventos poseen velocidades iguales a las de la luz. Por lo tanto, matemáticamente las geodesicas nulas tendrán que verificar:

$$\left(\frac{dx_0}{du} \right)^2 - \left[\left(\frac{dx_1}{du} \right)^2 + \left(\frac{dx_2}{du} \right)^2 + \left(\frac{dx_3}{du} \right)^2 \right] = 0$$

3.3.4. Otras nociones analíticas ofrecidas por Minkowski

Por otro lado, al hallar la distancia entre dos puntos temporales, es decir, $|t' - t|$ para un punto situado sobre $x_i = cte$ la geometría espacial sobre un plano de simultaneidad es euclídea, debido a que el $|t' - t| = \sqrt{(x_1 - x'_1)^2 + (x_2 - x'_2)^2 + (x_3 - x'_3)^2}$. Esto quiere decir, que el tiempo se puede medir por medio de puntos en el espacio en donde se ve claramente la existencia relacional entre tiempo y espacio ofrecida por el primer postulado de la relatividad y mencionada en 1908 por Hermann Minkowski.

Dicha relación también muestra que el pasado del cono siempre viaja con el origen, es decir, el punto de origen está conectado al vértice del cono de pasado y físicamente se entendería como la asociación de algún objeto con su propio pasado, por consecuencia nunca se deja el pasado de un objeto en movimiento dentro de la representación espaciotemporal de Minkowski.

Esta diferencia temporal, sirve también como calibración de los ejes, ya que al tomar $C = 1$ se toma en cuenta los puntos de corte de las hipérbolas $t^2 - x^2 = -1$ o $t^2 - x^2 = 1$

²⁵Spacelike: según el artículo original de Space and Time of Minkowski, traduce espacimorfa.

²⁶Lightlike: según el artículo original de Space and Time of Minkowski, traduce lumínica o separación nula.

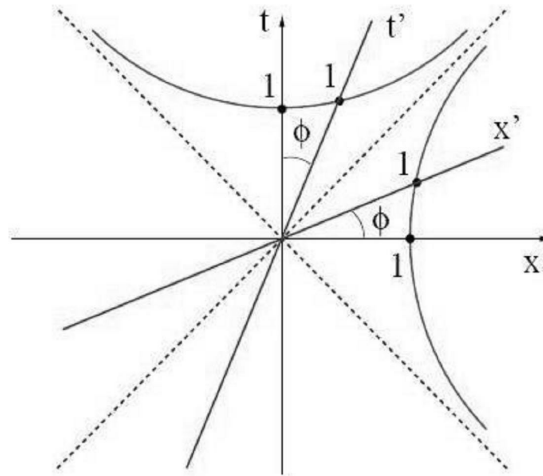


Figura 3.6: Calibración de los ejes del observador (relojes).

dependiendo el tipo de recta (sea temporal o espacial).

En efecto, los planos de simultaneidad que se pueden generar, no se cortan entre si; por ende se genera un conjunto infinito de paralelas que corresponde a la evolución de los objetos, en otras palabras, cada paralela posee su propio valor constante de tiempo, que al unirlos en su orden causal me generan una geodésica o línea de mundo y que dentro de la representación Minkowskiana radica en la unión de todos los hiperplanos ensartados en una recta (que sería el eje temporal).

Cabe aclarar, que todas las nociones que obtuvo Minkowski con relación al espacio-tiempo son analíticas, en medida que dichas relaciones no se pueden representar de manera intuitiva y por consecuencia suscita el carácter convencionalista, refiriéndonos a la equivalencia de afirmaciones de un observador a otro como lo muestra al concebir la constancia de la velocidad de la luz y la sincronización de los relojes. Esto es evidente en la intersección que sufren unos hiperplanos con otros, donde considera la ortogonalidad entre el espacio y el tiempo, y que en efecto recae la importancia de la unificación de los conceptos de estudio y desde donde se entiende el carácter convencional entre los conceptos de espacio y tiempo (en si, radica en el estudio del tejido espaciotemporal, donde existen equivalencias entre el espacio y el tiempo).

Las dimensiones bajo las cuales se maneja la representación minkowskiana (los conos de luz) se manifiesta en el cambio que sufre la ecuación de la recta (da a entender los grados de libertad que puede llegar a tener una partícula o un objeto en movimiento.) al momento de analizarla en todos los hiperplanos posibles tridimensionales, vale decir, que en ese instante es cuando realmente sabemos la dimensión de nuestra variedad

diferenciable, antes queda imposible realizar generalmente cuando no se le asocia ningún sistema de coordenadas. Para mayor entendimiento, el operador diferenciable, no solo nos permite entender la geometría de nuestra variedad, también permite entender la dimensionalidad que tiene debido a la variación que sufre; en el caso particular de Minkowski, observamos a través de la conexión afín como es una variedad llana y las geodésicas mantienen la ecuación de la recta.

Por otro lado, la representación hipercónica que realiza Hermann se le reduce una dimensión por la limitación natural que poseemos de entender la perpendicularidad del espacio tridimensional, en consecuencia debemos acudir a operadores matemáticos (donde recae el carácter analítico anteriormente mencionado) como los diferenciales que generan la geometría del espacio²⁷ con lo cual se evidencia un espacio cuatridimensional como un conjunto tridimensional de puntos análogo a un plano.

Todo este modelo concuerda a la perfección con la teoría especial de la relatividad, los postulados formulados por Einstein y la experiencia sensorial que tenemos del mundo natural. El único problema existente es el entender el mundo de manera cuatridimensional (por lo que se le da el carácter analítico) y no tridimensional (carácter habitual) que intrínsecamente genera la unificación del tiempo y el espacio.

Un ejemplo de esto, es el cumplimiento de los postulados de la relatividad, específicamente nos vamos a referir a la invariancia de la velocidad de la luz. Dicha constante se logró después de relativizar los planos de simultaneidad, en otras palabras, a cada geodésica o línea de mundo le corresponde su propio plano de simultaneidad en donde la relación de ocurrir en el mismo tiempo varía teniendo en cuenta el ocurrir en el mismo lugar.

Dentro del espacio-tiempo minkowskiano se ve reflejado en la inclinación o rotación de los planos de simultaneidad acorde con la ecuación (3,2) hasta la ecuación (3,4) y tal es el poder de la unificación de dicha relación, que la velocidad de la luz se conserva independientemente del marco de referencia. Cada plano de simultaneidad posee su propia métrica euclídea y cada referencia inercial su propia coordenada temporal en donde se cumplen las leyes de Newton.

Gracias a lo anterior se pueden deducir los grupos de simetrías en el espacio-tiempo de Minkowski corresponde en las trayectorias inerciales a tres translaciones de tipo espacial (x_1, x_2, x_3 , donde se evidencia la isotropía del espacio), los conos de luz entendidos como rotaciones espaciales como un tipo de translación temporal y la métrica de Minkowski bajo las transformaciones de Lorentz en donde los parámetros de rotación de los ejes esta dado por los ángulos de Euler. Si se restringiera el tratamiento de las

²⁷Como se mostro en la finalidad de la conexión afín u operador diferenciable.

líneas de mundo a las transformaciones de Lorentz, el espacio-tiempo de Minkowski se convierte en la representación base plana de la relatividad general.

La simultaneidad por otro lado, cumple con los principios de la relatividad, en la medida que se vuelve indistinguible frente a cualquier observador inercial; esto se debe a la indistinguibilidad que posee el movimiento con relación al espacio absoluto, en ese sentido, se puede catalogar como simultáneos o no simultáneos los eventos dependiendo del observador, es decir, la elección arbitraria que realice del marco de referencia como se realizo con la diferencia de tiempos y la calibración de los relojes.

Aquí se fundamentan las ideas concernientes a la formulación Minkowskiana del tejido espaciotemporal como estructura base de la relatividad especial, en donde se evidencia cómo a partir del estudio de la geometría y de la representación propuesta por Minkowski, Einstein tiene herramientas geométricas suficientes para sintetizar la teoría de la relatividad.

No obstante, los análisis minuciosos de las creencias, rupturas epistemológicas, corrientes filosóficas, ideologías científicas, etc., ayudan a identificar los aspectos mas relevantes que se generan a través de los conceptos (espacio y tiempo específicamente) de una manera integral como se mostro anteriormente, dejando el espacio para el análisis, la crítica y los debates posibles que puedan llegar a surgir en los lectores.

Para fortalecer el enfoque pedagógico se realizo el análisis de las relaciones que generaron la geometrización del espacio y el tiempo desde la mecánica clásica de Newton hasta la teoría de la relatividad de Einstein, lo cual definimos como ruptura epistemológica. La importancia del análisis radico en realizar un detallado desarrollo y caracterización del medio en el que se encuentran los objetos, entendidos como un contenedor en donde se llevan a cabo los sucesos que llevan cabo la necesidad de geometrizar el espacio-tiempo con el fin de explicar y explicitar las relaciones existentes.

El recorrido realizado desde las concepciones de Newton y Leibniz hasta las modernas de Einstein y Minkowski, permiten desglosar todo lo concerniente a la naturaleza del espacio-tiempo y a la importancia que adquiere la geometría dentro de la ciencia física. Por consecuencia, surge una nueva visión de la geometría como nueva herramienta de explicación de fenómenos físicos, en donde se generan nuevas relaciones entre entes físicos y por ende un conocimiento más estructurado.

Conclusiones

- Los conceptos de espacio y tiempo introducidos por Newton y aceptados sin discusión por mucho tiempo son conceptos absolutos. Esto quiere decir, que para la mecánica Newtoniana la medición del espacio y del tiempo es independiente de los sistemas de referencia inerciales, es decir, de los observadores inerciales.
- La ruptura epistemológica se lleva en el momento en que se establece que la simultaneidad no es necesariamente absoluta, sino que es relativa cuando las coordenadas espaciales son diferentes. Esta ruptura históricamente tiene lugar con la aparición de la monografía de Einstein, lo cual significa un cambio profundo en la explicación física de los fenómenos naturales.
- La geometría de Minkowski es un instrumento geométrico especialmente adaptado para la explicación geométrica de los fenómenos relativistas, de acuerdo con la hipótesis Einsteiniana de la relatividad de la simultaneidad.
- El Espacio-tiempo de Minkowski pone de manifiesto de una forma bastante intuitiva la unificación de las coordenadas Espacio-tiempo. Esta unificación fue puesta de manifiesto analíticamente por Einstein, pero la consideración geométrica al suponer que el tiempo es un eje en el mismo plano epistemológico que los ejes espaciales añade un elemento importante desde el punto de vista pedagógico.

Bibliografía

- [1] Anacona, Maribel y Gómez G, Susana. *Einstein y el rol de las matemáticas en la física*. Praxis Filosófica. Nueva serie, No. 22. Universidad del Valle. 2006.
- [2] Arriasecq, Irene y Greca Ileana María. *Algunas consideraciones históricas, epistemológicas y didácticas para el abordaje de la teoría de la relatividad especial en el nivel medio y polimodal*. Ciencia & Educação, v.8, n°1, p.55 – 69, 2002.
- [3] Einstein, Albert. *Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento*. Annalen der Physik. 1905.
- [4] Fonseca Moreno, Diego Fernando. *Análisis de sistemas no inerciales en la T.E.R.*.Universidad Pedagógica Nacional. Bogotá. 2007.
- [5] Fraassen, Bass C. Van. *Introducción a la filosofía del tiempo y el espacio*. Barcelona: Labor 1978.
- [6] Friedman, Michael. *Fundamentos de las teorías del espacio-tiempo*. Física Relativista y Filosofía de la Ciencia. Editorial Alianza S.A.1983.
- [7] Friedrich Bollnow, Otto. *Hombre y espacio*. Concepciones del espacio. Barcelona: Labor: 1969.
- [8] Germán Guerrero Pino. *Teoría Kantiana del espacio, geometría y experiencia*. Praxis Filosófica. Nueva serie, No. 20.Universidad del Valle. 2005.
- [9] Gutiérrez, Manuel. *Espacio de Minkowski*. Universidad de Málaga. 2007.
- [10] Héctor Rago A. *La ruptura imposible*. Variaciones, reflexiones e interrogaciones sobre la física y las matemáticas. Publicado en el Boletín VOL.II N°2 de la Asociación Matemática Venezolana. 1995.
- [11] H. Minkowski. *Space and time*. German Natural Scientist Physicians, at Cologne, 21 september 1980.

- [12] H.Vázquez B..*Cinemática de la Relatividad Especial*.Manuales UTHEA. Número 318.
- [13] Kuhn, Thomas . *La estructura de las revoluciones científicas*. México: Fondo de Cultura Económica. 1971 - 2000.
- [14] Monares, Andrés. *Modelos científicos y modelos sociales: "La influencia de Newton en el neoliberalismo"*. Universidad de Chile. 2001.
- [15] Moreno Armella, Luis. *La construccion del espacio geometrico, un ensayo historico-critico*.CINVESTAV. IPN Mexico.
- [16] Niño, Virgilio. *El tiempo en la mecánica de Newton, la relatividad especial y la mecánica cuántica*. Bogotá, Colombia: Revista Colombiana de Filosofía de la Ciencia, año/vol 2, número 4-5. 2001.
- [17] Ochoa, Felipe. *Isaac Newton, una mirada al absolutismo*.Revista Colombiana de Filosofía de la ciencia. Vol 1. Número 2-3. Universidad del Bosque. pp.125-138. Bogotá. 2000.
- [18] Orozco C., J, C,. "*Newton: Humano... Demasiado humano*"., Revista Física y Cultura N° 5, Universidad Pedagógica Nacional, Santafé de Bogotá. 1999.
- [19] Pacheco Codina, Adolfo Manuel. *Conceptos de espacio y tiempo en la física*. Profesor asociado a la UPN. Digitalizado por Red Académica.
- [20] Quintero Mateus, Chrystian Israel. *Tratamiento del espacio de Minkowski a partir de la relación álgebra geometría*. Universidad Pedagógica Nacional. Bogotá. 2005.
- [21] Rago A., Héctor. *La ruptura imposible*. Centro de Astrofísica Teórica.Universidad de Los Andes. Mérida. 1995.
- [22] Rañada, Manuel F. *David Hilbert, Hermann Minkowski, la Axiomatización de la Física y el Problema número seis*. LA GACETA DE LA RSME, Vol. 6.3 , P ags. 641-664. 2003.
- [23] Resnick, Robert. *Conceptos de Relatividad y teoría cuántica*. Editorial Limusa. Mexico.1976.
- [24] Reyes, Jaime Duvan y Barbosa, Janett. *El pensamiento del profesor de física desde el concepto de espacio*. El pensamiento del profesor de física desde el concepto de espacio. En: Revista ieRed: Revista electrónica de la Red de Investigación Educativa [en línea].Vol.1, No.4 (Enero-Junio de 2006).

- [25] Rodríguez, José Alberto. *Leyes del movimiento y su conceptualización*. Universidad Pedagógica Nacional. Bogotá. Cap. 6. 2005.
- [26] Romero Medina, Olga Lucía. *Algunos elementos epistemológicos para la enseñanza de la teoría especial de la relatividad*. Universidad Pedagógica Nacional. Bogotá. 1993.
- [27] Sánchez Ron, José. *El origen y desarrollo de la relatividad*. Madrid: Alianza, 1983 - 1985.
- [28] Unesco. *El tiempo y las filosofías*. Ediciones Sígueme. 1979. El concepto filosófico del tiempo.
- [29] Voltaire. *Elementos de la filosofía de Newton*. Colombia: Universidad del Valle. 1996.

Apéndice

1. Propiedades de las rotaciones: como sabemos, el $\sinh \theta = \frac{e^\theta - e^{-\theta}}{2}$ y el $\cosh \theta = \frac{e^\theta + e^{-\theta}}{2}$, entonces para la $\tanh \theta = \frac{\sinh \theta}{\cosh \theta}$. Por lo tanto, al hacer el remplazo en la $\tanh \theta$ obtenemos:

$$\tanh \theta = \frac{\sinh \theta}{\cosh \theta} = \frac{\frac{e^\theta - e^{-\theta}}{2}}{\frac{e^\theta + e^{-\theta}}{2}} = \frac{e^\theta - e^{-\theta}}{e^\theta + e^{-\theta}}$$

como sabemos que en el espacio-tiempo de Minkowski se cumple $\tanh \theta = \frac{v}{c}$, por lo tanto, $\sinh \theta = v$ y $\cosh \theta = c$, podemos deducir que el ángulo de rotación $\theta = \tanh^{-1} \left(\frac{v}{c} \right)$.