

UNIVERSIDAD INCA GARCILASO DE LA VEGA



ESCUELA DE POSGRADO DR. LUIS CERVANTES LIÑAN

MAESTRÍA EN INVESTIGACIÓN Y DOCENCIA UNIVERSITARIA

**APLICACIÓN DEL MODELO DE LOS CUANTOS VECTORIALES EN LA PROPAGACIÓN DE
LA LUZ EN EL VACÍO Y EL LOGRO DEL APRENDIZAJE DE LA VELOCIDAD VARIABLE
DE LA LUZ EN ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS DE LA
UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS**

TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO EN INVESTIGACIÓN Y DOCENCIA UNIVERSITARIA

Presentado por:

OSCAR SANTIAGO MONROY CÁRDENAS

2016

DEDICATORIA

A la memoria de mis padres: Santiago y Esperanza, a quienes más he admirado y amado en este mundo.

AGRADECIMIENTOS

A la Dra. Rosa Puente Saldaña, por su valiosa orientación en la etapa de elaboración del proyecto de investigación.

A mi asesor: Dr. Héctor Vílchez Caceda, por su aporte decisivo en la revisión y complementación de la estructura del presente trabajo de investigación.

Al Mg. Galo Sisniegas Charcape, quien me brindó su colaboración desinteresada en los estudios de investigación previos que condujeron al presente trabajo.

ÍNDICE

	Pág.
Resumen	1
Abstract	3
Introducción	5
Capítulo I: Fundamentos Teóricos de la Investigación	8
1.1. Marco histórico	8
1.2. Investigaciones	9
1.3. Bases teóricas	11
1.3.1. La propagación rectilínea de la luz en el vacío	11
1.3.2. La polarización de la luz	13
1.3.3. Los fundamentos de la teoría electromagnética	15
1.3.4. La velocidad de la luz en el vacío como constante universal	16
1.3.5. Posible detección de la variación de la velocidad de la luz en el vacío	17
1.3.6. Descripción geométrica de la propagación de la luz en un marco de referencia no inercial	20
1.3.7. Perspectivas de la cosmología convencional y de la nueva teoría	29
1.3.8. La ecuación de la velocidad variable de la luz	31
1.3.9. El modelo del cuanto vectorial	36
1.3.10. Perspectivas de la enseñanza – aprendizaje de la ciencia	58
1.3.11. Logros de aprendizaje	63
1.3.12. La programación didáctica	64
1.4. Marco conceptual	71
Capítulo II: El Problema, Objetivos, Hipótesis y Variables	78
2.1. Planteamiento del problema	78
2.2. Finalidad y objetivos de la investigación	83
2.3. Hipótesis y Variables	86
Capítulo III: Metodología	93
3.1. Tipo y nivel del estudio	93
3.2. Diseño de la investigación	93
3.3. Población y Muestra	95
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	95
Capítulo IV: Presentación y Análisis de los Resultados	97
4.1. Presentación de resultados	97
4.2. Contrastación de hipótesis	106
4.3. Discusión de resultados	107

Capítulo V: Conclusiones y Recomendaciones	114
5.1. Conclusiones	114
5.2. Recomendaciones	115
Bibliografía	117
Anexos	121

RESUMEN

La aplicación del modelo de los cuantos vectoriales en la propagación de la luz y el logro del aprendizaje de la velocidad variable de la luz en estudiantes de la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, es un trabajo de investigación que propone la enseñanza de nuevos conocimientos generados de la investigación científica incluyéndolos en una o más unidades didácticas de asignaturas afines con la Física contemporánea.

El estudio muestra que al aplicar el modelo de los cuantos vectoriales en la propagación de la luz en el vacío se obtiene una ecuación que describe la variación de la velocidad de la luz con el tiempo para una magnitud dada del cuanto vectorial asociado a la escala espacial en consideración. Mediante el uso de instrumentos de evaluación adecuados se demuestra el logro del aprendizaje de nuevos conocimientos generados de la investigación fundamental en estudiantes de la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

La hipótesis general de la investigación plantea que la aplicación del modelo de los cuantos vectoriales en la propagación de la luz influye significativamente en el logro del aprendizaje de la velocidad variable de la luz en estudiantes de la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. El estudio muestra que la media ponderada general de las calificaciones asociada a la primera variable del estudio es mayor que la media ponderada general de las calificaciones asociada a la segunda variable del estudio, lo cual permite verificar la hipótesis general de la investigación.

El tipo de investigación es aplicada y el nivel es evaluativo. El diseño es no experimental. Las dimensiones de las variables del estudio son evaluadas simultáneamente bajo los criterios sobre conocimientos y desempeños utilizando indicadores de logro y cuestionarios de ítems. El contenido actitudinal (producto) de los estudiantes es evaluado de acuerdo a criterios e indicadores de logro los cuales están estrechamente relacionados con las variables del estudio, siendo el resultado de la

evaluación estadísticamente significativo. Se considera una muestra de 31 estudiantes que cursan el cuarto y quinto año de la carrera profesional de Física, siendo el muestreo no probabilístico. Se diseña una programación didáctica que es estrictamente de aula. Las técnicas empleadas son la resolución de problemas y la observación. Además, se utilizan cuestionarios de preguntas como instrumentos de evaluación, y el carácter de la evaluación es sumativa.

La conclusión principal y general del estudio es que el logro del aprendizaje de nuevos conocimientos producidos de la investigación científica en estudiantes universitarios de ciencias básicas que cursan el cuarto y quinto año es plausible. Se recomienda reformular los currículos universitarios de ciencias básicas de modo que los docentes – investigadores puedan incluir nuevos conocimientos científicos generados de la investigación básica, como temas de vanguardia, a través de una o más unidades didácticas en asignaturas afines.

Palabras claves: cuanto vectorial, radio de la extensión espacial, magnitud del cuanto vectorial, velocidad variable de la luz, logros de aprendizaje.

ABSTRACT

The applied of the model of the vectorial quanta in the propagation of light and the achieve of learning of the variable speed of light in students of the Faculty of Physical Sciences of the National University of San Marcos is a research work that proposes the teaching of new knowledge generated from scientific research for inclusion them in one or more teaching units related subjects with contemporary physics.

The study shows that by applying the model of the vectorial quanta in the propagation of light in a vacuum an equation is obtained describing the variation of the speed of light with time and the magnitude of the vectorial quanta associated with the spatial scale in consideration. By using instruments for appropriate evaluation is found that it is possible to learn about current knowledge from fundamental research by students of the Faculty of Physical Sciences of the National University of San Marcos.

The general hypothesis of there search raises that applying the model of the vectorial quanta in the propagation of light significantly influences the learning achievement of the variable speed of light in students of the Faculty of Physical Sciences of the National University of San Marcos. The study shows that the overall weighted average of the scores associated with the first variable of the study is greater than the overall weighted average of the scores associated with the second variable of the study, which verificates the general hypothesis of there research.

The kind of this research is rated to as applied and its level is evaluative. The design is not experimental of kind. The dimensions of the study variables are simultaneously evaluated under the criteria of knowledge and performance using indicators and questionnaires items. Attitudinal content (product) of students is evaluated according to criteria and indicators of achievement which are closely related to the study variables, and is concluded that the evaluation is statistically significant it considered a sample of 31 students in the fourth and fifth years of the career of Physics, so that the sampling was non-probability. It is being design of teaching programming strictly for classroom. The techniques used are problem solving and observation. In

addition, the questionnaires of questions as assessment tools are used, and the character of the evaluation is summative.

The main and general conclusion of this study is that achievement of learning of new knowledge generated by scientific research in university students of basic sciences in the fourth and fifth years of career is plausible. It is recommended to reformulate university curricula of basic sciences so that teachers - researchers can transmit the generated new scientific knowledge of basic or applied research students through a thematic unit of a related subject.

Keywords: the vectorial quanta, radio of spatial extent, magnitudes of the vectorial quanta, variable speed of the light, achievement of learning.

INTRODUCCIÓN

El modelo de los cuantos vectoriales aplicado a la propagación de la luz en el vacío constituye una innovación conceptual y una posible contribución para la evolución de la Física contemporánea en un intento por describir la dinámica del universo a toda escala espacial. La introducción de la idea del cuanto vectorial, definida como la velocidad angular que determina la dirección de circulación de los rayos de luz, surgió de la necesidad de explicar las misteriosas vibraciones de fondo existentes en el espacio libre.

La consecuencia relevante de aplicar el modelo de los cuantos vectoriales es la obtención de una ecuación que describe la variación de la velocidad de la luz con el tiempo para una magnitud dada del cuanto vectorial asociado a la escala espacial en consideración. Este resultado significaría una generalización del conocido postulado de la constancia de la velocidad de la luz en el vacío, propuesto por Albert Einstein en su teoría de la relatividad especial de 1905, en el sentido de que es aplicable a un universo dinámico no inercial. Además, la ecuación hallada indica que la velocidad de la luz en el vacío sólo puede ser constante en la aproximación de orden cero, es decir cuando el universo se considere un sistema inercial y en consecuencia se ignore el efecto de los cuantos vectoriales sobre los rayos de luz.

El presente estudio trata sobre la aplicación del modelo de los cuantos vectoriales en la propagación de la luz y el logro del aprendizaje de la velocidad variable de la luz en estudiantes de la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. La investigación propone la enseñanza de nuevos conocimientos generados de la investigación científica a través de asignaturas afines con la Física contemporánea y está enfocada a cultivar la investigación científica a través de la docencia universitaria.

El contexto de la investigación es la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Los contenidos están dirigidos a 31 estudiantes del cuarto y quinto año de la carrera profesional de Física, en asignaturas

afines con la Física contemporánea. El alcance teórico comprende la revisión de la teoría electromagnética de la luz, la introducción del modelo de los cuantos vectoriales asociados a la propagación de la luz en el vacío hasta la obtención de la ecuación de la velocidad variable de la luz. Y el alcance práctico es la enseñanza universitaria de los nuevos conocimientos científicos.

Puesto que la investigación constituye una función esencial y obligatoria de la universidad, se justifica la necesidad de la enseñanza de los nuevos conocimientos científicos producidos como consecuencia del desarrollo de proyectos de investigación. Los nuevos conocimientos pueden ser incluidos como el contenido temático de unidades didácticas en asignaturas pertinentes. Se considera de especial importancia la enseñanza del modelo de los cuantos vectoriales y su influencia en el logro del aprendizaje de la velocidad variable de la luz en el vacío. Por esta razón, estos temas deben ser incluidos en una unidad didáctica de asignaturas afines con la Física contemporánea, porque permitirán una mayor comprensión de la dinámica del universo observable a toda escala espacial.

El propósito del presente trabajo de investigación es demostrar que la aplicación del modelo de los cuantos vectoriales en la propagación de la luz en el vacío es un factor que influye positivamente en el logro del aprendizaje de la velocidad variable de la luz en el vacío en estudiantes de la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Si los resultados del estudio muestran que los estudiantes pueden desarrollar capacidades y competencias que les permitan iniciarse en la tarea de la investigación científica, entonces el estudio puede extenderse de modo que tenga un propósito general: implantar la cultura de la investigación científica en Perú a partir de la etapa del pregrado en estudiantes universitarios de ciencias básicas y carreras afines que cursen el cuarto y quinto año académico mediante la enseñanza de nuevos conocimientos científicos generados del desarrollo de proyectos de investigación.

El trabajo de investigación se ha estructurado en cinco capítulos. En el primer capítulo se presenta el marco histórico (la evolución del conocimiento de la velocidad variable de la luz), el marco teórico (el desarrollo teórico de los cuantos vectoriales y la

obtención de la ecuación de la velocidad variable de la luz) y el marco conceptual (las definiciones de los términos básicos del estudio).

En el segundo capítulo se considera el planteamiento del problema (la descripción la realidad problemática y la definición del problema principal y específicos). Se proponen los objetivos de la investigación (general y específicos), se plantean la hipótesis general y las específicas del estudio, se describen las variables del estudio, las dimensiones e indicadores de logro.

En el tercer capítulo se muestran los aspectos metodológicos de la investigación. Se describe el tipo y nivel del estudio, así como el diseño de la investigación. Se definen la población, la muestra, las técnicas e instrumentos de recolección de datos.

En el cuarto capítulo se presentan los resultados de la investigación, su contrastación con las hipótesis del estudio y la discusión de los resultados.

Finalmente en el quinto capítulo se enuncian las conclusiones relativas a las hipótesis de la investigación, así como las recomendaciones respecto a las posibles implicaciones de los resultados del estudio.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Marco histórico

Desde la época del astrónomo danés Ole Römer (1644 - 1710) y del físico holandés Christian Huygens (1629 - 1695) la medición de la velocidad de la luz en el espacio libre condujo a la conclusión de que tiene un valor finito. El primer método exitoso que permitió medir la velocidad de la luz fue realizado en 1849, por A.H.L. Fizeau utilizando técnicas terrestres. Posteriormente, las mediciones realizadas por otros investigadores dieron el valor aproximado $c = 3 \times 10^8$ m/s. En todas las mediciones el escenario (el espacio libre) a través del cual se propaga la luz se considera implícitamente un sistema inercial, y en consecuencia la trayectoria de los rayos de luz se describe por líneas rectas (Beiser, 1981).

Históricamente el experimento más conocido para investigar cambios en la rapidez de la luz se realizó en 1887 por A.A. Michelson y E.W. Morley. En aquella época el sistema de referencia universal era un éter hipotético, que ocupaba todo el espacio, y cuyo movimiento debería afectar la rapidez de la luz según se propague a favor o en contra de la corriente del éter. Los resultados del experimento de Michelson y Morley (la ausencia del diagrama de interferencia de la luz utilizada) significaba que no existía ningún sistema de referencia absoluto respecto al cual se pueda detectar variaciones de la rapidez de la luz en el vacío (Hawking y Mlodinow, 2005).

Durante casi un siglo, desde que se proclamó el postulado de la constancia de la velocidad de la luz en el vacío en la teoría de la relatividad especial de Einstein de 1905, se aceptó como un hecho irrefutable que la velocidad de la luz en el vacío era una constante cosmológica a toda escala espacial. A finales de la década de 1990 se empezaron a divulgar por medio de artículos científicos sobre modelos cosmológicos del universo con velocidad variable de la luz. Sin embargo, ninguna de las teorías

fueron capaces de sugerir cómo diseñar experimentos para comprobar la variación de la velocidad de la luz en el vacío (Monroy, 2012).

En particular, en la década 1995 – 2005, Joao Magueijo investigó la posible variación de la velocidad de la luz en el vacío. En el año 2006, en su libro de enseñanza: *Más rápido que la velocidad de la luz*, describe la historia de la constancia de la velocidad de la luz en el vacío. Plantea las perspectivas de su teoría sobre la velocidad variable de la luz. Explica las dificultades que produce el postulado de la constancia de la velocidad de la luz en el vacío para elaborar una teoría cuántica de la gravedad. Enfatiza la necesidad de realizar modificaciones mínimas en la teoría de la relatividad especial para obtener ecuaciones no lineales y equivalentes a las transformaciones de Lorentz. Según estas ecuaciones a medida que la luz se acercaba al régimen de Planck su velocidad se incrementaría cada vez más, debido a que el espacio y el tiempo serían cada vez menos flexibles. Cuando la velocidad de la luz se hacía infinita quedaría definida la frontera entre el ámbito de la gravedad clásica y el dominio de la gravedad cuántica.

1.2. Investigaciones

Las teorías VLS (Varying Speed of Light), como las divulgadas en las referencias bibliográficas, significaron el inicio de una nueva etapa de investigación fundamental sobre la naturaleza de la luz. Sin embargo, casi todos los trabajos siempre han estado ligados a las teorías físicas convencionales y los resultados no han trascendido mucho. Algunos de ellos se indican a continuación:

Petit, Jean-Pierre (1988), Francia; en el artículo: *Modelo cosmológico con velocidad variable de la luz: la interpretación del corrimiento hacia el rojo* (Mod. Phys. Lett. A 3(18): 1733–1744), describe un modelo de velocidad variable de la luz c , así como la posible variación en el tiempo de la constante de gravitación G y de la constante de Planck h , extendido al electromagnetismo. Fundamenta que la entropía varía en el tiempo como $\text{Log } t$, y en una representación espacio – entropía, la métrica es conformemente plana. Sugiere una nueva relación de calibración (gauge), basada en consideraciones geométricas, las cuales corresponden a la constante de Ridberg R , variando de modo parecido. Además, se aplica la ley de Hubble. Considera que la edad

del universo es invariable, mientras que fundamenta su periodo como un valor medio de la esfera. Muestra que es posible descifrar completamente la red de corrimientos hacia el rojo. Considera que las distancias desde las fuentes son muy similares. Se observa que las grandes densidades de energía de los cuasars distantes podrían haber sido sobreestimadas en gran medida, mientras que el incremento de su magnitud absoluta, como se deriva de la teoría clásica, puede ser debido a la variación secular de c en el tiempo. Al asumir que la razón de las masas electrón – protón varía de modo parecido a R obtiene una constante de estructura fina α , un radio de Bohr y una razón de la fuerza electromagnética a la fuerza gravitatoria que se comportan como constantes absolutas.

Albrecht, Andreas y Magueijo, Joao (1999), Estados Unidos; en el artículo: *Un tiempo de variación de la velocidad de la luz como una solución a enigmas cosmológicos* (Phys. Rev. D59: 043516), consideran las implicaciones cosmológicas de luz que viaja más rápido en el universo temprano. Proponen una receta para derivar correcciones a las ecuaciones de evolución cosmológica mientras que la velocidad de la luz c está cambiando. Muestran cómo el problema del horizonte y los problemas de las constantes cosmológicas pueden ser resueltos. También estudian las perturbaciones cosmológicas en este escenario y muestran cómo se pueden resolver los problemas de la homogeneidad y de la isotropía. Afirman que en su forma actual, nuestro escenario parece producir más fácilmente homogeneidad extrema, lo que requiere la estructura a ser producido en la época estándar del Big Bang. Plantean que la producción de perturbaciones significativas durante la época anterior requeriría un diseño más cuidadoso de la ecuación de la velocidad variable de la luz $c(t)$. También proponen que la gran entropía del horizonte actual puede tenerse en cuenta en este escenario.

Youm, Donam (2002), Estados Unidos; en el artículo: *La velocidad variable de la luz, cosmología y la segunda ley de la termodinámica* (Phys. Rev. D 66, 043506), se examina si las cosmologías con una velocidad variable de la luz (VSL) son compatibles con la segunda ley de la termodinámica. Concluyéndose que la cosmología VSL con una constante fundamental variable está seriamente limitada por la segunda ley de la termodinámica, mientras que los modelos cosmológicos bimétricos son menos limitados.

Mehdipour, Hamid; Nozari, Kouros y Sadatian, Davood (2008), Inglaterra; en el artículo: *Análisis fraccional de la propagación del paquete de onda y algunos aspectos de la velocidad variable de la luz con el principio de incertidumbre generalizado* (Fractals 16, 33 doi: 10.1142/s0218348x0800379x), consideran el problema de la ampliación del paquete de ondas en el marco del principio de incertidumbre generalizado (GUP) de la gravedad cuántica. Hallan una ecuación fractal de Klein-Gordon para analizar más a fondo la ampliación del paquete de ondas en un espacio-tiempo espumoso. Derivan una relación de dispersión Modificado (MDR) en el contexto de GUP que muestra una ampliación adicional debido a la incertidumbre inducida gravitacional. Como resultado de estas relaciones de dispersión, se obtiene una ecuación de Klein-Gordon generalizada. Resuelven esta ecuación generalizada en ciertas condiciones para hallar tanto los resultados analíticos y numéricos. Demuestran que el GUP puede conducir a una variación de las constantes fundamentales tales como la velocidad de la luz. Con estas nuevas propiedades, hallan una ecuación dependiente del tiempo en fase de fluido perfecto en el modelo de universo de De Sitter e interpretan sus implicaciones físicas.

Shojaie, Hossein (2012), Canadá; en el artículo: *Cosmología de la velocidad variable de la luz como una solución de la anomalía primaria* (Canadian Journal of Physics – NRC Research Press), demuestra que la anomalía primaria es una consecuencia natural de los modelos cosmológicos de la velocidad variable de la luz en donde se supone que la velocidad de la luz es una ley expresada por una función potencial de un factor de escala temporal (tiempo cósmico). En otras palabras, la anomalía primaria puede ser considerada como un efecto no gravitatorio del decrecimiento continuo de la velocidad de la luz, que se muestra como un retardo anómalo en el tiempo de la propagación de la luz en marcos de referencia locales. Este retardo en el tiempo sería interpretado correctamente como un corrimiento Doppler adicional hacia el azul.

1.3. Bases teóricas

1.3.1. La propagación rectilínea de la luz en el vacío

Nuestra visión e interpretación de los fenómenos naturales depende esencialmente de la forma en que se propaga la luz (Monroy, 2013). Además, la luz es la única influencia que permite transmitir información a través del vacío. En los libros de enseñanza tradicionales de Óptica la descripción geométrica de la propagación de la luz en el espacio libre se realiza presuponiendo que es en línea recta (Rossi, 1966 y Hecht – Zajac, 1999).

Considérese una fuente puntual de luz en reposo situada en el espacio libre en un punto O, como muestra la figura 1. Como dicha fuente se encuentra en reposo, los frentes de onda serán superficies esféricas concéntricas cuyos radios crecen con rapidez en el vacío $c = 3 \times 10^8$ m/s. Además, puesto que las ondas electromagnéticas son transversales, los vectores eléctrico \vec{E} y magnético \vec{B} son tangentes en cada punto de los frentes de onda y perpendiculares al vector de propagación \vec{k} .

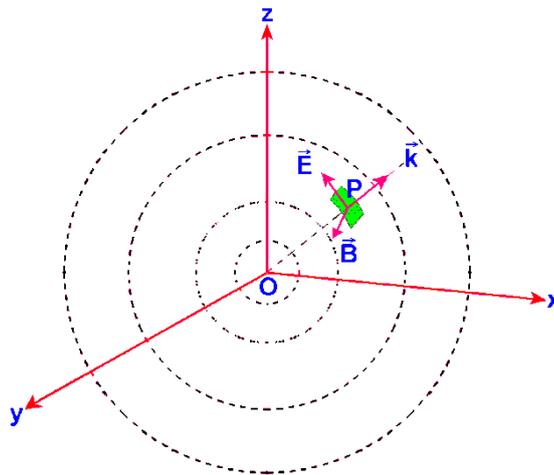


Figura 1. Frentes de onda esféricos procedentes de una fuente puntual de luz en reposo en O. El vector de propagación \vec{k} se traslada rectilíneamente a lo largo de la línea OP.

Es claro que en cada punto de un frente de onda el vector de propagación \vec{k} apunta en la dirección radial a medida que el frente de onda se expande desde la fuente inmóvil. Por ejemplo, a medida que el frente de onda se propaga desde el punto O al punto P el vector de propagación se traslada rectilíneamente hacia el exterior a lo largo de la línea OP. Debido a este comportamiento se dice que la luz viaja en línea recta en el espacio libre. La recta OP sobre la que se desplaza hacia fuera el vector \vec{k} se llama rayo de luz. Puede imaginarse el patrón de rayos de luz emergiendo de la

fuelle puntual, tal como se muestra en la figura 2. Estos rayos siempre serán perpendiculares a los frentes de onda esféricos.

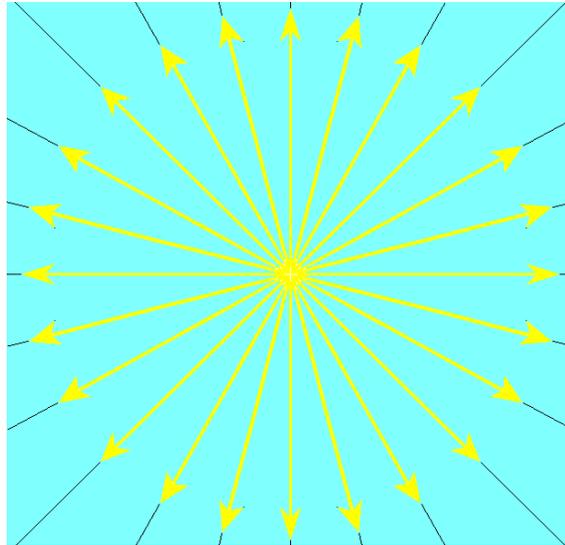


Figura 2. Patrón de rayos de luz que emergen de una fuente puntual inmóvil. Estos rayos siempre son perpendiculares a cualquier frente de onda esférico.

Monroy (2012) señala que si los puntos del espacio tridimensional se consideran fijos o con movimiento de traslación uniforme entonces se justificaría que la trayectoria de los rayos de luz es en línea recta. Por ejemplo, en la figura 1 los puntos O y P permanecen inmóviles a medida que el rayo de luz se desplaza rectilíneamente a lo largo de la recta OP. Pero si el universo es dinámico, los puntos que definimos en el espacio tridimensional cambiarán de lugar a cada instante, porque fluyen, giran y vibran. Por consiguiente, en el intervalo de tiempo en que el rayo de luz se desplaza de O a P su camino no será la línea recta OP sino una línea curva, porque el punto P ya no se encontrará en dicha posición. ¿Existirá una trayectoria definida para la propagación de los rayos luminosos?

1.3.2. La polarización de la luz

En el estudio tradicional de la propagación rectilínea de la luz se presenta un enigma: la polarización de la luz. Este fenómeno se estudia en términos de la dirección de oscilación de los vectores eléctrico y magnético. Cuando decimos que la luz natural no está polarizada significa que los vectores eléctrico y magnético vibran en todas las

direcciones posibles. Si todas las direcciones de vibración son eliminadas, excepto una dirección particular, se dice que la luz está polarizada. Esto se consigue interponiendo en el camino de la luz un filtro polarizador con lo cual la luz emerge con una sola dirección de vibración. A su vez esta dirección de vibración define el eje de polarización del filtro (Monroy, 2012).

Imagínese un experimento que consiste en dos filtros polarizadores orientados de tal modo que impiden totalmente el paso de la luz. Si colocamos un tercer filtro paralelo a los otros dos, ya sea delante o detrás de ellos, la luz no puede pasar y se ve oscuro. Pero si colocamos el tercer filtro entre los dos primeros de tal modo que su eje de polarización tenga una dirección diferente respecto a los ejes de los otros dos filtros, entonces según el sentido común es de esperar que siga viéndose oscuro. Sin embargo, se observa que ¡la luz puede pasar!

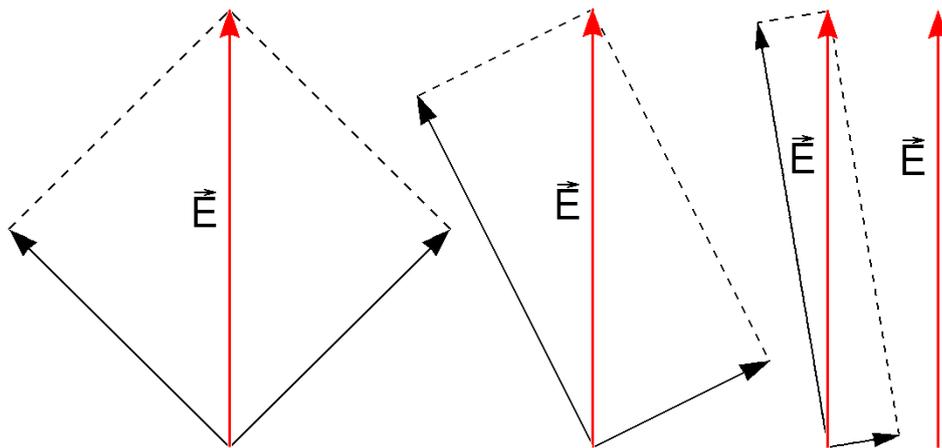


Figura 3. Descomposición del vector eléctrico de una onda electromagnética polarizada. El número de pares de componentes es infinito, porque cambian de dirección en cada instante.

¿Cómo se explica este hecho? Puesto que la luz tiene naturaleza vectorial, la explicación se puede realizar mediante la descomposición del vector eléctrico. Para una dirección dada del vector eléctrico existirán infinitos pares de componentes perpendiculares entre sí. En la figura 3 se muestran algunos componentes del vector eléctrico \vec{E} . Los componentes que tengan la dirección del eje de polarización lograrán pasar, pero esto significará que la luz nunca sería bloqueada completamente, lo cual está en contradicción con el experimento descrito en el párrafo anterior. Además,

obsérvese que los componentes del vector eléctrico están girando, cambiando de dirección a cada instante debido a la descomposición continua del vector eléctrico. Pero, ¿qué es lo que está girando realmente? A continuación se investigará este misterio y se intentará descifrarlo (Monroy, 2012).

1.3.3. Los fundamentos de la teoría electromagnética de la luz

Hecht – Zajac (1999) señalan que las ecuaciones de Maxwell de la teoría electromagnética de 1865 están formuladas en un medio isotrópico, homogéneo, lineal (no ferroeléctrico ni ferromagnético) el cual está físicamente en reposo (es decir, un sistema inercial). En el medio especial no conductor del vacío (espacio libre), al combinar las ecuaciones de Maxwell se deducen las ecuaciones de onda electromagnéticas:

$$\nabla^2 \vec{E} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (1.1)$$

$$\nabla^2 \vec{B} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \quad (1.2)$$

donde los vectores \vec{E} y \vec{B} denotan el campo eléctrico y el campo magnético respectivamente. Cuando se reemplazan los valores empíricos de la permitividad eléctrica del vacío ϵ_0 y la permeabilidad magnética del vacío μ_0 se predice para la velocidad de la luz el valor:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (1.3)$$

También enfatizan que las Ecs. (1.1) y (1.2) son válidas solamente en un sistema de referencia inercial. Por consiguiente, parece lógico afirmar que el valor de c , que se deduce de ellas, también lo será. Esto significaría que los experimentos para medir c darían un valor ficticio, pero que estaría de acuerdo con nuestra percepción sensorial. Tampoco podría aceptarse como una primera aproximación a un valor más objetivo,

porque simplemente no existe sistema de referencia inercial. Además, obsérvese que las Ecs. (1.1) y (1.2) sólo describen vibraciones de los campos \vec{E} y \vec{B} en cada punto del espacio y en cada instante de tiempo t . Análogamente, la cuantificación del campo electromagnético (realizada en una cavidad finita del espacio) muestra solamente modos de vibración de los fotones de la radiación y la descripción de la propagación rectilínea de la luz en el nivel microcósmico se mantiene como válida (Cohen-Tannouji, Diu y Laloe, 1977).

El hecho de que la materia, así como el espacio libre (el vacío), tienen propiedades eléctricas y magnéticas caracterizadas por la permitividad eléctrica y la permeabilidad magnética del vacío, sugiere pensar que el campo electromagnético ocupa todo el espacio tridimensional. A su vez, esto induce a plantear la siguiente pregunta: ¿podrá considerarse el campo electromagnético como el sistema de referencia no inercial universal?

1.3.4. La velocidad de la luz en el vacío como constante universal

Cuando se mide la velocidad de la luz en el vacío se presupone que el escenario, es decir el espacio físico, es un sistema inercial. Se sabe que un sistema en el cual no actúan fuerzas externas se llama sistema de referencia inercial y que las leyes de Newton de la mecánica clásica son aplicables solamente en esta clase de sistema de referencia (Monroy, 2012).

Einstein e Infeld, (1986) llegaron a la conclusión de que no hay modo de hallar un sistema de referencia inercial en el espacio físico, y por consiguiente es una ficción. Las leyes de la Física clásica, en particular las leyes de la Óptica que describen la propagación de la luz, carecen de un sistema de referencia en el cual sean válidas.

Hawking (2003) enfatiza que la teoría electromagnética de Maxwell se fundamenta en la existencia de campos que transmiten las acciones de las fuerzas de un lugar a otro del espacio y que Maxwell advirtió que los campos que transmiten las perturbaciones eléctricas y magnéticas son entidades dinámicas que pueden oscilar y propagarse por el espacio físico.

El segundo postulado de la teoría de la relatividad especial de Einstein (principio de la constancia de la velocidad de la luz) establece que: *la velocidad de la luz en el vacío es constante, para cualquier movimiento relativo entre la fuente de luz y el observador.*

Beiser (1993) muestra didácticamente que el postulado de la constancia de la velocidad de la luz es una consecuencia directa de los resultados del experimento de Michelson – Morley, así como de otros investigadores. En particular Michelson y Morley compararon la velocidad de la luz en la dirección del movimiento de la Tierra, con la velocidad de la luz en la dirección perpendicular a dicho movimiento. El resultado fue que las velocidades eran exactamente iguales. Por consiguiente, el postulado dice que lo único absoluto es la velocidad de la luz en el vacío, lo cual se ha admitido correcto hasta la fecha.

1.3.5. Posible detección de la variación de la velocidad de la luz en el vacío

El hecho de que en el experimento de Michelson – Morley no se detectó, aparentemente, variación de la velocidad de la luz no significa necesariamente que es una constante a toda escala espacial. En el nivel macrocósmico una razón sería que la velocidad de traslación de la Tierra respecto al Sol, o la velocidad de traslación de las estrellas respecto al centro de la vía láctea son pequeñas comparadas con la velocidad de la luz que sus efectos sobre la trayectoria de los rayos de luz son despreciables.

Beiser (1993) realiza una analogía entre la velocidad de la luz respecto a un observador ubicado en la Tierra (cuyo movimiento es a través de un éter hipotético) con la velocidad de un bote que se desplaza a través de un río. En la figura 4 se muestra el movimiento de la Tierra en su órbita en torno al Sol y a su vez la trayectoria del movimiento del Sol, que será en torno al centro de la Vía láctea. Como la rapidez de traslación de la Tierra en su órbita alrededor del Sol es aproximadamente de 3×10^4 m/s (que es 10 000 veces menor que la rapidez de la luz en el vacío) era de esperar que en el interferómetro no se observara desplazamiento alguno de las franjas brillantes y oscuras en el diagrama de interferencias, el cual sugiriera una variación de la velocidad de la luz. Pero si imaginamos el experimento de Michelson – Morley en el nivel microcósmico el resultado sería totalmente opuesto, porque la rapidez de

traslación de los electrones puede ser próxima a la rapidez de la luz y su efecto sobre la trayectoria de los rayos de luz ya no sería despreciable.

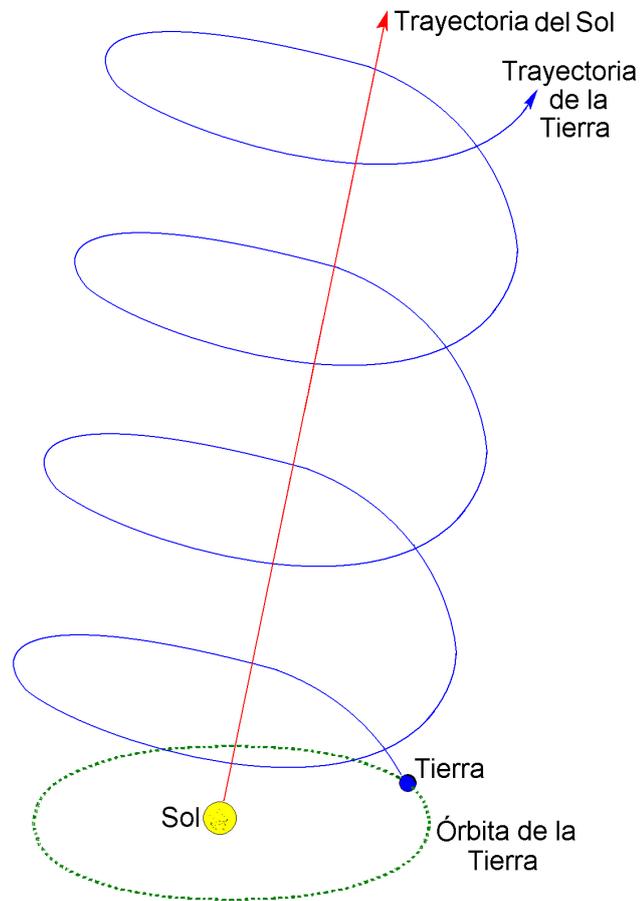


Figura 4. Movimiento de la Tierra relativo al Sol. El interferómetro de Michelson – Morley, en reposo respecto a Tierra, nunca podría detectar variaciones de la velocidad de la luz, porque la rapidez de traslación de la Tierra es muy pequeña comparada con la de la luz.

Sin embargo, la posibilidad de diseñar experimentos para detectar variaciones de la velocidad de la luz en el vacío sería más sutil, porque dependería del estado de la mente del observador. La mente humana parece hallarse en el centro de dos umbrales de movimiento extremos: la rotación extremadamente lenta del macrocosmos a gran escala y la rotación extremadamente rápida del microcosmos a escala cuántica. El estado de cuasiequilibrio en que se hallaría la mente del observador en el universo sería la razón por la cual se plantea la paradoja de que el sistema de referencia de cada observador puede considerarse inercial a pesar de que el universo es un sistema no inercial. Más adelante se realizará una explicación más exacta de este misterio que

envuelve a la Cosmología contemporánea, al considerar la percepción rectilínea de los rayos de luz (Monroy, 2012).

Magueijo (2006) describe un atisbo de la posible variación de la velocidad de la luz. El astrónomo australiano John Webb y su equipo de investigadores han encontrado pruebas de lo que podría ser una variación de la velocidad de la luz examinando la luz proveniente de galaxias muy lejanas a la nuestra (la vía láctea).

En las teorías físicas convencionales la velocidad de la luz c aparece en muchas ecuaciones de la Física, tanto en el nivel microcósmico como en el nivel macrocósmico a gran escala. En particular, la constante de estructura fina atómica α es una cantidad adimensional definida por la expresión:

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c}$$

donde e es la magnitud de la carga eléctrica del electrón, \hbar es la constante de Planck y ϵ_0 es la permitividad eléctrica del vacío. La constante de estructura fina α ha sido estimada con bastante exactitud en los laboratorios terrestres (Magueijo, 2006).

Cuando se ilumina una nube de gas, sus electrones absorben luz de determinadas frecuencias (o colores), lo que genera un patrón de líneas oscuras que conforman el espectro, lo cual se interpreta como niveles de energía que ocupan los electrones en el interior de los átomos del gas (Eisberg, 1978). Sin embargo, cuando se observa el fenómeno más detenidamente, se descubre que algunas de esas líneas se desdoblán en realidad en varias líneas muy próximas, lo que significa que los espectros atómicos tienen una estructura peculiar. Por consiguiente, analizando los espectros de líneas se puede medir la velocidad de la luz c mediante la expresión matemática de la constante de estructura fina α (Magueijo, 2006).

Sin embargo, mediante datos astronómicos se puede realizar la misma medición de α con mucha mayor exactitud observando la luz que atraviesa nubes de gas muy distante de nosotros. Los trabajos de John Webb y su equipo mostraban que la luz

proveniente de galaxias próximas a la vía láctea confirmaba los valores de α obtenidos en laboratorios terrestres. Pero la luz proveniente de las nubes de gas remotas parecía indicar que α tenía otro valor. Ahora bien, cuando miramos objetos muy lejanos los vemos como fueron en el pasado, porque a la luz con su velocidad c le lleva bastante tiempo en recorrer la enorme distancia que los separa de nosotros. Por consiguiente, los resultados obtenidos por John Webb parecían indicar que el valor de α cambiaba con el transcurso del tiempo. Observaciones posteriores realizadas hasta el 2010 han confirmado la variación de α (Magueijo, 2006).

Si John Webb hubiese hallado que α era constante, entonces no se dudaría que e , c y \hbar son constantes universales. Pero halló exactamente lo contrario, es decir que α varía con el tiempo. Ahora bien, ¿a cuál de los términos hay que atribuirle la variación de α , a la carga del electrón (e), a la constante de Planck (\hbar) o a la velocidad de la luz (c)? Quizás la respuesta más objetiva sea afirmar que e , c y \hbar cambian con el tiempo. La consecuencia inmediata es que las leyes de la Física no serían las mismas en cualquier lugar del universo y deberían considerarse sólo aproximaciones de una nueva teoría física holística (Magueijo, 2006).

1.3.6. Descripción geométrica de la propagación de la luz en un marco de referencia no inercial

Monroy (2012) demuestra con un razonamiento geométrico sencillo que, considerando el campo electromagnético como el marco de referencia no inercial, la dirección del vector de propagación de la onda electromagnética cambia a cada instante y que la trayectoria real de un rayo luz en el espacio libre procedente de una fuente luminosa puntual no es una línea recta sino una espiral cónica. Indica que la curvatura de los rayos luminosos tendría implicaciones relevantes en nuestra concepción de la dinámica del universo observable, ya que significaría que la velocidad de la luz en el vacío varíe.

Considérese el siguiente experimento: imagínese que un rayo de luz natural (no polarizada) se dirige directamente hacia los ojos del lector saliendo perpendicularmente del plano del papel. Los vectores eléctricos de dicho rayo vibran en todas las

direcciones posibles. Estas vibraciones están representadas por las flechas dobles (véase la figura 5a). Si interponemos en el camino del rayo un filtro polarizador cuyo eje de polarización está orientado horizontalmente, sólo los componentes horizontales de cada vector eléctrico pueden atravesar el filtro y la luz que emerge estará polarizada linealmente en la dirección horizontal (véase la figura 4b). En lo que sigue se omite la descripción de la vibración del vector magnético por ser análoga a la del vector eléctrico (Monroy, 2012).

Si el vector eléctrico varía armónicamente, entonces los puntos del espacio físico (que constituyen el sustrato) deben tener movimiento oscilatorio (en particular movimiento armónico simple). Pero sabemos que este tipo de movimiento es una proyección (un componente) del movimiento circular uniforme, entonces podemos imaginar que a medida que la onda avanza cada punto del espacio tiene movimiento circular uniforme en el plano de vibración del vector eléctrico, tal como se indica en la figura 5b. El mismo análisis es válido para el vector magnético. Entonces el propio campo electromagnético podría considerarse un sistema no inercial, pero no puede considerarse como sustrato para describir la propagación de la luz (Monroy, 2012).

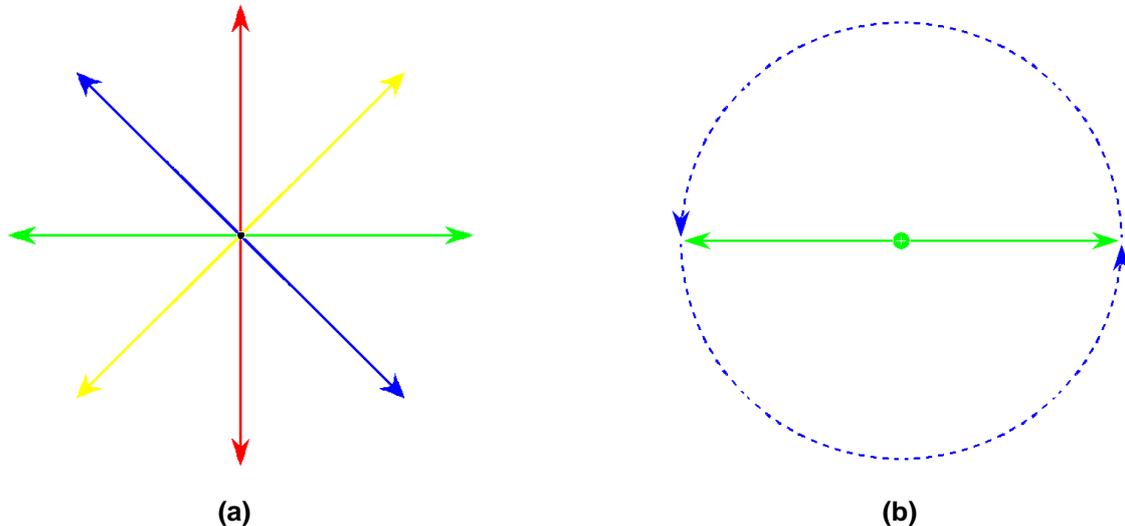


Figura 5. Diagramas del vector eléctrico para: (a) luz no polarizada y (b) luz polarizada linealmente. La circunferencia indica el ciclo del vector eléctrico asociado a su vibración armónica y el punto central indica la dirección del vector propagación saliendo perpendicularmente del plano del papel.

Por consiguiente, las oscilaciones del campo electromagnético se deberían a las oscilaciones del sustrato. Existirá una velocidad angular perpendicular al plano de

vibración del vector eléctrico/magnético, y como consecuencia de ello el vector de propagación no puede permanecer en línea recta en una sola dirección, excepto si la velocidad angular tiene efectos despreciables en la propagación de la luz (Monroy, 2012).

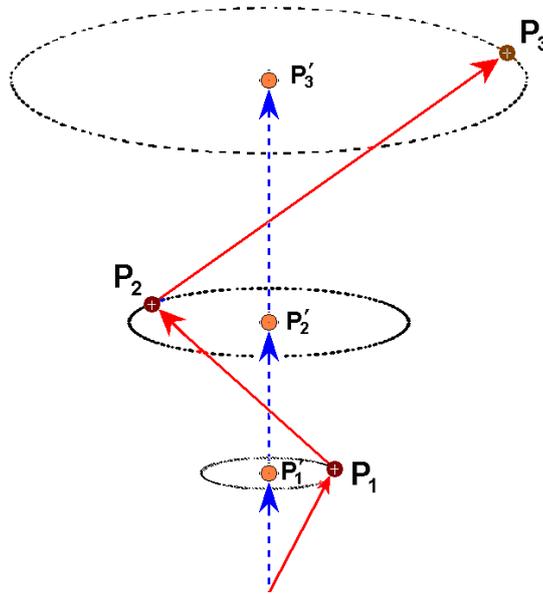


Figura 6. Diagrama que muestra tres desplazamientos sucesivos del vector de propagación. Las flechas discontinuas indican los desplazamientos, cuando los puntos del espacio permanecen fijos y las flechas continuas indican los desplazamientos, cuando los puntos del espacio giran, fluyen y vibran.

A medida que la onda avanza el vector de propagación cambiará de dirección de acuerdo al sentido de la rotación. El diagrama de la figura 6 muestra tres desplazamientos sucesivos del vector de propagación. Las flechas discontinuas indican desplazamientos aparentes del vector de propagación cuando los puntos del espacio P_1' , P_2' , P_3' ,... permanecen fijos. Las flechas continuas indican desplazamientos reales del vector de propagación cuando los puntos del espacio P_1 , P_2 , P_3 ,... giran, vibran y fluyen. Es evidente que debe existir una velocidad de rotación que obligue al vector de propagación a cambiar de dirección en cada instante. Esta velocidad angular tendrá la dirección en que se propagaría la luz si el marco de referencia fuese inercial. Por consiguiente, si la velocidad angular asociada a un rayo de luz no es nula y el marco de referencia fuese solamente el espacio físico, con independencia de la consciencia del observador, deberían percibirse vórtices luminosos. Sin embargo, no se perciben, lo

cual significaría que nuestra percepción dependerá también de otro marco de referencia: la mente del observador (Monroy, 2012).

Para comprender mejor el cambio de dirección del vector de propagación, considérese una fuente puntual de luz y algunos frentes de onda esféricos concéntricos, como muestra la figura 7. Por simplicidad podemos suponer que en el intervalo de tiempo de $t_0 = 0$ a t_1 el vector de propagación es perpendicular al frente de onda esférico. En el instante t_1 el vector de propagación tendrá otra dirección y llegará al siguiente frente de onda esférico en el instante t_2 en una dirección no perpendicular. Análogamente, en el instante t_2 el vector de propagación volverá a cambiar de dirección llegando al siguiente frente de onda esférico en otra dirección no perpendicular, y así sucesivamente (Monroy, 2012).

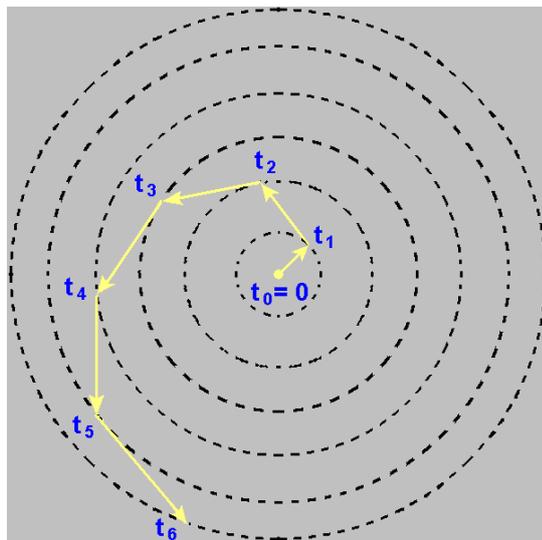


Figura 7. Frentes de onda esféricos (líneas discontinuas) en los instantes t_1, t_2, t_3, \dots emitidos por una fuente puntual de luz en reposo desde el instante $t_0 = 0$. En un universo dinámico los vectores de propagación (flechas continuas) no serán perpendiculares a los frentes de onda esféricos sino tangentes a ellos, porque a medida que se expanden el vector de propagación cambiará de dirección. Reduciendo los intervalos de tiempo entre frentes de onda tanto como queramos, el rayo de luz se curvará de acuerdo al sentido de la rotación.

Obsérvese que a medida que los frentes de onda se expanden el sentido (antihorario) en que cambia de dirección el vector de propagación es de acuerdo a la dirección de la velocidad angular asociada a las vibraciones armónicas del vector

eléctrico. Reduciendo los intervalos de tiempo tanto como queramos, el rayo luminoso se curvará, como se muestra en la figura 8. La trayectoria aparente del rayo luminoso se indica con líneas discontinuas y la trayectoria real (que nuestra mente no percibe) se indica con línea continua. Por tanto, la trayectoria real de un rayo de luz procedente de una fuente puntual sería una espiral cónica (Monroy, 2012).

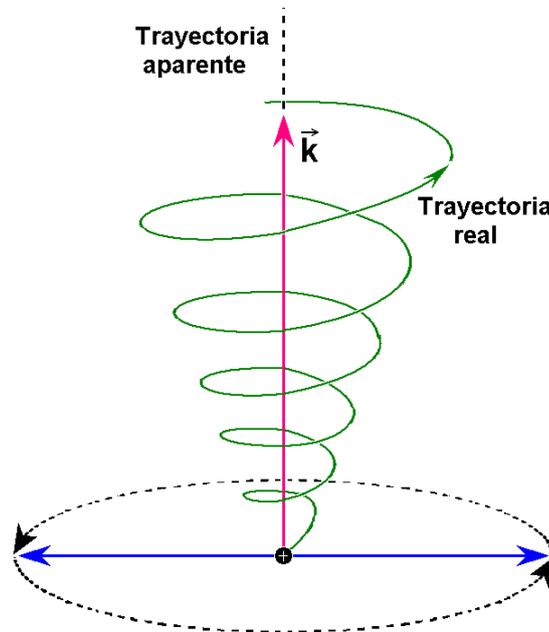


Figura 8. La espiral cónica. Como resultado del cambio de dirección del vector de propagación de una onda electromagnética la trayectoria real de un rayo de luz es una espiral cónica. La trayectoria aparentemente rectilínea solo sería posible en un sistema inercial.

Además, obsérvese que en un marco de referencia inercial el vector de propagación es perpendicular a cada frente de onda esférico (véase la figura 2); por el contrario en el contexto del universo dinámico el marco de referencia es no inercial y el vector de propagación es tangente a cada frente de onda esférico (véase la figura 7). Experimentalmente un haz de luz rectilíneo que incida perpendicularmente sobre una pantalla formará un punto luminoso de máxima intensidad; en cambio un vórtice cónico de luz que incida sobre la pantalla formaría un anillo luminoso quedando oscuro en su interior (Monroy, 2012).

Resumiendo, considerando el sistema de referencia no inercial al campo electromagnético y la nueva propuesta del universo dinámico se sustenta, mediante el análisis geométrico del cambio de dirección del vector de propagación de la onda

electromagnética, que la trayectoria real de un rayo luz en el espacio libre procedente de una fuente luminosa puntual no sería en línea recta sino una espiral cónica (véase la figura 8). La curvatura, es decir, el enrollamiento de los rayos de luz tendría implicaciones relevantes en nuestra concepción de la dinámica del universo observable, ya que significaría que la velocidad de la luz en el vacío varía con el tiempo (Monroy, 2012).

¿Por qué no percibimos la curvatura de los rayos luminosos? Es probable que la dificultad de comprobar experimentalmente la curvatura de los rayos luminosos se deba al problema de la escala espacial. Esto induce a pensar que la curvatura de los rayos de luz sería importante en una escala extremadamente grande (mucho mayor que la distancia entre dos galaxias vecinas contiguas) o en una escala extremadamente pequeña (mucho menor que el tamaño de un núcleo atómico típico). Más adelante se dará una explicación más convincente (Monroy, 2012).

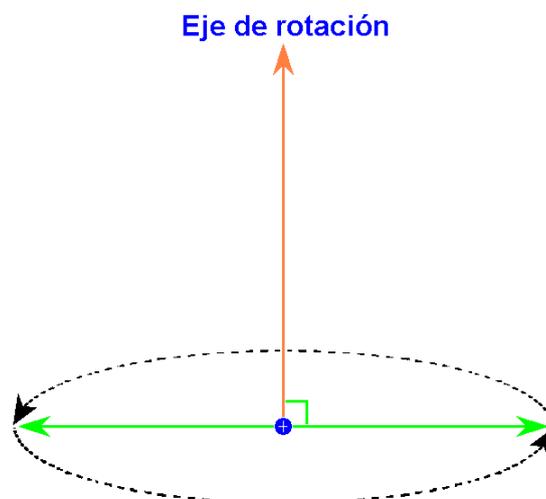


Figura 9. El eje de rotación asociado a las vibraciones del vector eléctrico de una onda electromagnética se encuentra en una dimensión extra a la superficie bidimensional donde vibra dicho vector.

Un detalle que debemos percatarnos es que todo eje de rotación siempre se encuentra en una dimensión espacial extra a una superficie bidimensional dada. Por ejemplo, en el caso de una onda electromagnética el eje de rotación asociado a las vibraciones del vector eléctrico se encuentra en una dimensión extra a la superficie bidimensional donde oscila dicho vector (véase la figura 9). Si extrapolamos este razonamiento podríamos suponer que estos ejes de rotación localizados en el espacio

tridimensional proceden a su vez de un eje de rotación situado en una dimensión espacial adicional el cual generaría la velocidad angular asociada a las vibraciones del vector eléctrico, y en consecuencia la curvatura de los rayos luminosos (Monroy, 2012).

En el macrocosmos a gran escala puede postularse la existencia de un eje de rotación situado en una dimensión extra al espacio tridimensional cuyos efectos (aparentemente despreciables) engendrarían la interacción que llamamos gravedad, mediante un mecanismo aún desconocido. Sin embargo, no podemos percibir la curvatura de los rayos luminosos porque la velocidad de rotación en la dimensión espacial superior es extremadamente pequeña con respecto a las velocidades de rotación típicas que se perciben en la escala humana (Monroy, 2012).

Curiosamente en el microcosmos a escala cuántica la situación física es similar. Puede postularse la existencia de un eje de rotación localizado en una dimensión extra al espacio tridimensional cuyos efectos engendrarían las interacciones que llamamos electromagnética, nuclear débil y nuclear fuerte, mediante un mecanismo aún desconocido. En esta escala la curvatura de los rayos luminosos sería muy importante, pero tampoco se percibe en la escala humana. El efecto principal que percibimos son las vibraciones, las cuales estarían asociadas con vectores velocidad angular de gran magnitud. En consecuencia, se puede pensar que las misteriosas fluctuaciones cuánticas tendrían su origen en velocidades de rotación ultra altas, y el llamado vacío cuántico tendría su origen en un espacio de dimensión superior (Monroy, 2012).

Por tanto, la propia dinámica rotacional del universo sería la responsable de que la mente del observador perciba la propagación rectilínea de la luz en el vacío. Nuestra mente parece hallarse en el centro de dos umbrales de movimiento: la rotación extremadamente lenta del macrocosmos a gran escala y la rotación extremadamente rápida del microcosmos a escala cuántica. La mente humana parece tener una especie de eje de rotación asociado a la visión con una peculiar frecuencia angular calibrada de tal modo que no permite percibir la curvatura de los rayos luminosos. La figura 10 muestra un diagrama en un intento por explicar este efecto. Se indica un eje de rotación asociado a la visión o mente del observador. Las flechas indican el vector de

propagación, el cual estará a cada instante dirigido hacia los ojos del observador, lo que le impide ver la curvatura de los rayos luminosos (Monroy, 2012).

Cuando se mide la velocidad de la luz en el vacío se presupone que el escenario, es decir el espacio físico, es un sistema inercial. Se sabe que un sistema en el cual no actúan fuerzas externas se llama sistema de referencia inercial y que las leyes de Newton de la mecánica clásica son aplicables solamente en esta clase de sistema de referencia. Además, el concepto de sistema de referencia inercial es una consecuencia del principio de inercia de Newton, el cual afirma que un cuerpo permanecerá en reposo o tendrá movimiento rectilíneo uniforme si no hay fuerzas externas que actúen sobre él. Pero si admitimos que el universo observable es un sistema dinámico (con aceleración), no será posible describir el movimiento de los objetos materiales con las leyes de la mecánica newtoniana (Monroy, 2012).

¿Habrá alguna manera de hallar un sistema inercial en el espacio tridimensional respecto al cual se pueda comprobar experimentalmente que la velocidad de la luz en el vacío es constante? La Tierra no es un sistema de referencia inercial porque gira alrededor de su eje y a su vez alrededor del Sol. El Sol no es un sistema de referencia inercial porque gira alrededor del centro de la vía láctea. Las galaxias y los cúmulos de galaxias tampoco son sistemas de referencia inerciales porque giran las unas alrededor de las otras. Entonces nos hallamos en un universo dinámico donde todo gira. No existe ningún objeto material en el espacio tridimensional el cual pueda considerarse un sistema inercial. Por tanto, la materia no es un sistema de referencia inercial (Monroy, 2012).

Todo sistema natural tiene un eje de giro propio. La Tierra tiene su eje de giro propio; el sistema solar tiene su eje de giro propio en torno al Sol; una galaxia tiene su eje de giro propio a través de su centro y así sucesivamente. Pero estos ejes no pueden considerarse inerciales, porque están localizados en el espacio tridimensional. Entonces parece muy razonable pensar que el universo observable, visto como el sistema más grande posible, debe tener también un eje de giro propio. Pero para que este eje se considere inercial deberá localizarse en una dimensión independiente a las tres dimensiones espaciales que habitualmente percibimos. Esto significa que el universo debe ser un sistema abierto con ejes de giro situados en el espacio

tetradimensional; de lo contrario no recibiría energía para girar y en consecuencia sería un sistema estático carente de rotación, traslación y vibración (Monroy, 2012).

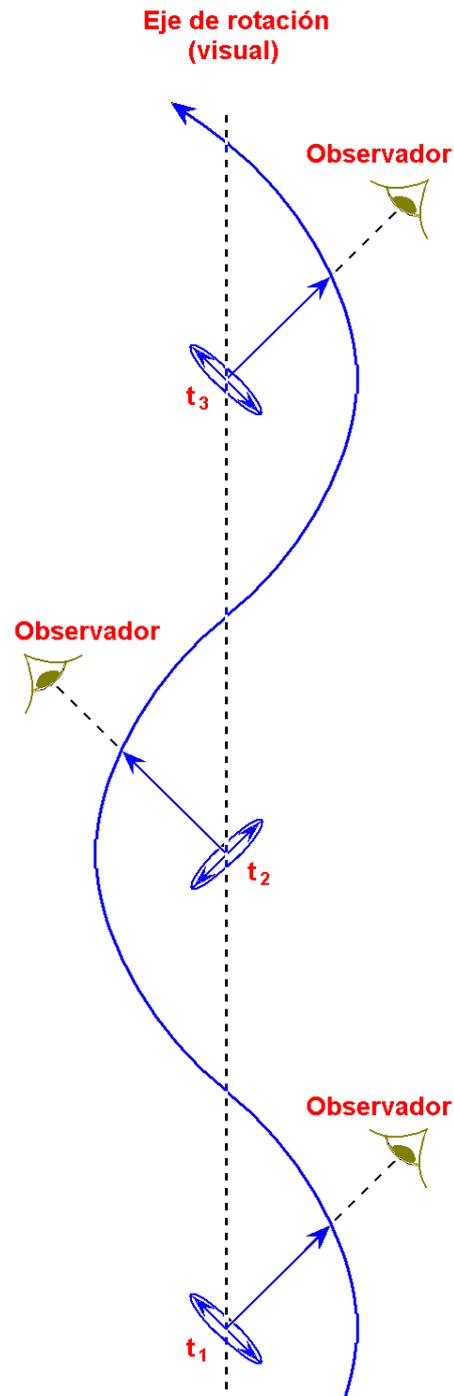


Figura 10. Diagrama que intenta explicar por qué no se percibe la curvatura de los rayos luminosos. Si existiera un eje de rotación asociado a la mente del observador podría tener la sensación psicológica de que el vector de propagación (flecha) tiene una sola dirección. Pero en realidad cambiará de dirección a cada instante.

1.3.7. Perspectivas de la cosmología convencional y de la nueva teoría

Según Bondi (1970) la teoría de la relatividad especial siempre ha sido la base para la construcción de las teorías cosmológicas contemporáneas, pese a que su validez es con respecto a observadores en marcos inerciales y en regiones espaciales pequeñas donde se puede aplicar la geometría euclidiana (el teorema de Pitágoras).

De acuerdo con esto un acontecimiento es algo que ocurre en un punto particular del espacio y en un instante específico de tiempo. Por ello, se puede describir mediante cuatro números: tres coordenadas espaciales (x, y, z) y la coordenada temporal t . En la relatividad especial un observador inercial localiza un acontecimiento con las coordenadas $(t; x, y, z)$. La condición para la velocidad de las partículas materiales y para la velocidad de cada punto de un rayo de luz es:

$$\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2 \leq c^2 \quad (1.4)$$

donde la desigualdad se cumple para las partículas materiales y la igualdad se cumple para los rayos de luz en el vacío (Bondi, 1970).

La nueva concepción del universo dinámico que se plantea en este trabajo se fundamenta en el siguiente principio: *cada punto del espacio físico gira, fluye y vibra con independencia de la consciencia del observador*. Por consiguiente, la trayectoria de los rayos de luz depende del movimiento de los puntos del espacio físico. Es decir, dependerá de la forma en que se desplazan los puntos del espacio en el curso del tiempo. Por supuesto, que esto contrasta con nuestra intuición de sentido común, ya que en la vida cotidiana percibimos el espacio como inmutable (Monroy, 2013).

Por consiguiente, en el nuevo contexto del universo dinámico y teniendo en cuenta los argumentos geométricos expuestos anteriormente, considérese un rayo de luz en el espacio libre emitido por una fuente puntual situada en el punto $x = 0, y = 0, z = 0$ en el instante de tiempo $t = 0$. Si el sistema de referencia es el campo electromagnético puede considerarse que los campos \vec{E} y \vec{B} vibran armónicamente a medida que la onda se expande y que el vector de propagación \vec{k} cambia de dirección

debido a la acción de un vector velocidad angular local $\vec{\omega}$, resultando la trayectoria del rayo de luz una espiral cónica, como se muestra en la figura 11. Puesto que el espacio físico tridimensional es el escenario de fondo (es decir, el sustrato) donde se manifiesta el campo electromagnético, es conveniente comparar los elementos del campo electromagnético (\vec{E} , \vec{B} , \vec{k}) con las coordenadas espaciales (x , y , z) del espacio físico, tal como lo sugieren las figuras 11(a) y 11(b).

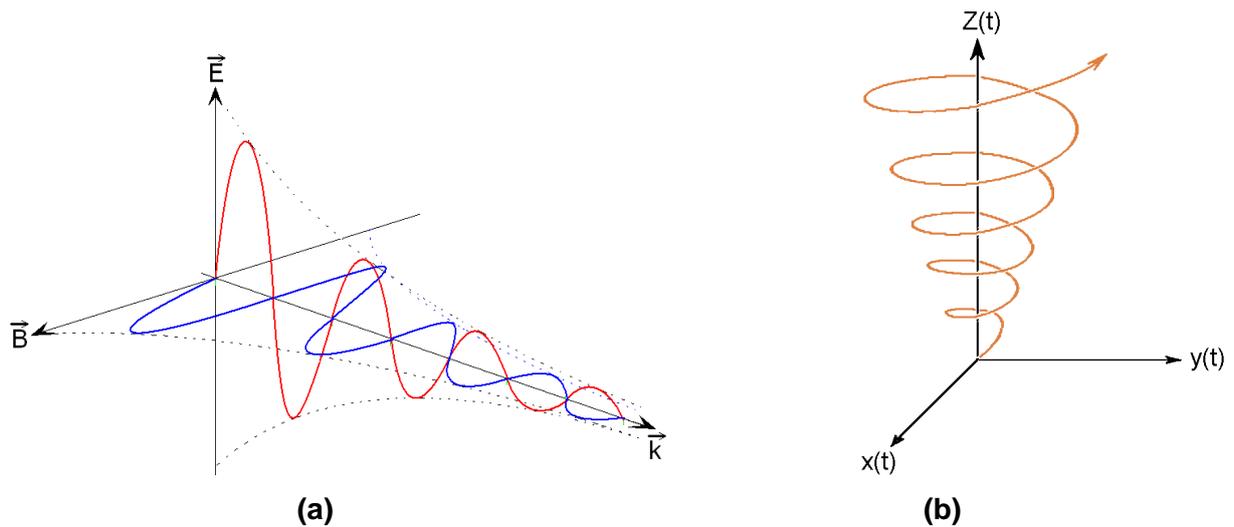


Figura 11. Comparación entre dos descripciones de la propagación de la luz emitida desde una fuente puntual. (a) La onda electromagnética con amplitud decreciente. (b) La espiral cónica como resultado del movimiento los puntos del espacio físico (sustrato)

En la figura 11(a) los campos \vec{E} y \vec{B} oscilan armónicamente y la onda electromagnética se expande. Por otro lado, en la figura 11(b) las coordenadas espaciales $x(t)$ e $y(t)$ también deben oscilar armónicamente, pero sus amplitudes de vibración deben incrementarse en el tiempo para que la luz natural se pueda expandir y sus efectos puedan transmitirse detectándose a toda escala espacial. En la figura 11(a) el vector de propagación \vec{k} indica la dirección de propagación de la onda electromagnética. En cambio en la figura 11(b) la coordenada $z(t)$ no puede oscilar armónicamente, sino que debe variar de modo creciente en el tiempo a medida que la luz se propaga (Monroy, 2013).

1.3.8. La ecuación de la velocidad variable de la luz

De acuerdo con el principio del universo dinámico y teniendo en cuenta los argumentos anteriores que condujeron a la figura 11(b), las coordenadas (x, y, z) de un punto del rayo de luz se pueden describir de manera simple por las ecuaciones paramétricas:

$$x(t) = \alpha t \cos \omega t \quad (1.5)$$

$$y(t) = \alpha t \sin \omega t \quad (1.6)$$

$$z(t) = bt \quad (1.7)$$

donde α y b son constantes positivas. La cantidad ω es la frecuencia angular local asociada a la escala espacial en consideración. De acuerdo con el principio del universo dinámico la trayectoria de un rayo de luz en el vacío (la espiral cónica) indica el desplazamiento de cada punto del espacio físico, es decir, del sustrato (Monroy, 2013).

Derivando las Ecs. (1.5), (1.6) y (1.7) respecto a t , se obtienen las componentes de la velocidad del rayo:

$$\frac{dx}{dt} = \alpha \cos \omega t - \alpha \omega t \sin \omega t \quad (1.8)$$

$$\frac{dy}{dt} = \alpha \sin \omega t + \alpha \omega t \cos \omega t \quad (1.9)$$

$$\frac{dz}{dt} = b \quad (1.10)$$

Elevando al cuadrado las Ecs. (1.8), (1.9) y (1.10) y sumando se define:

$$\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2 = c^2(t)$$

donde $c(t)$ denota la velocidad variable de la luz dependiente del parámetro del tiempo t . Entonces sustituyendo (1.8), (1.9) y (1.10) se tiene:

$$c^2(t) = (a \cos \omega t - a \omega t \sin \omega t)^2 + (a \sin \omega t + a \omega t \cos \omega t)^2 + b^2$$

$$c^2(t) = a^2 \cos^2 \omega t + a^2 \omega^2 t^2 \sin^2 \omega t - 2a^2 \omega t \cos \omega t \sin \omega t + a^2 \sin^2 \omega t \\ + a^2 \omega^2 t^2 \cos^2 \omega t + 2a^2 \omega t \sin \omega t \cos \omega t + b^2$$

De donde se obtiene:

$$c^2(t) = a^2 + b^2 + a^2 \omega^2 t^2 \quad (1.11)$$

O también:

$$c(t) = \pm \sqrt{a^2 + b^2 + a^2 \omega^2 t^2} \quad (1.12)$$

Los signos \pm en la Ec.(1.12) significan que la velocidad de la luz tendría dos direcciones simultáneas posibles (Monroy, 2013), siendo una dirección la opuesta de la otra. Si el universo observable fuese un sistema inercial: $\omega = 0$, y la Ec.(1.12) se reduce al resultado:

$$c(t) = \pm c \quad (1.13)$$

donde:

$$c = \sqrt{a^2 + b^2} = 3 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (1.14)$$

es la rapidez de la luz medida en el espacio libre en un sistema de referencia inercial. Nótese que las cantidades a y b tienen significado de rapidez, siendo:

$$a^2 + b^2 = c^2 \quad (1.15)$$

De donde necesariamente:

$$a < c, \quad b < c \quad (1.16)$$

Por consiguiente, la Ec.(1.12) puede reescribirse como sigue:

$$c_{\omega}(t) = \pm \sqrt{c^2 + a^2 \omega^2 t^2} \quad (1.17)$$

donde el subíndice ω indica que la velocidad de la luz depende de la frecuencia angular local asociada a la escala espacial.

La Ec.(1.15) y las condiciones (1.16) sugieren que las cantidades a y b sean las componentes de la velocidad de la luz c correspondiente al sistema de referencia inercial del observador. Esto puede interpretarse geoméricamente asociando vectores a las cantidades a , b y c , tal como muestra la figura 12. Si θ es el ángulo que forma el vector asociado a c con el eje de rotación local, se verifican las relaciones: $a = c \sin \theta$ y $b = c \cos \theta$. Entonces las cantidades a y b tienen significado de velocidad transversal y velocidad longitudinal respectivamente con respecto al eje de rotación local. Obsérvese que la velocidad transversal está asociada con la extensión espacial ocupada por los rayos luminosos y la velocidad longitudinal está asociada con el eje de rotación local (Monroy, 2013).

Es claro que en la Ec. (1.15) no se conocen las cantidades a y b . Para determinarlas, considérese una sección transversal de la espiral cónica mostrada en la figura 11(b). Elevando al cuadrado las Ecs. (1.5) y (1.7) y luego sumándolas se obtiene:

$$x^2 + y^2 = a^2 t^2$$

De donde radio de la sección transversal de la espiral cónica está descrito por:

$$r(t) = \alpha t \quad (1.18)$$

Esta cantidad indica la extensión espacial ocupada por los rayos luminosos en un intervalo de tiempo t . Se le puede denominar *radio de la extensión espacial*. Puesto que un rayo luminoso se curva debido a la acción del vector velocidad angular, entonces su enrollamiento determinaría la escala espacial (Monroy, 2013).

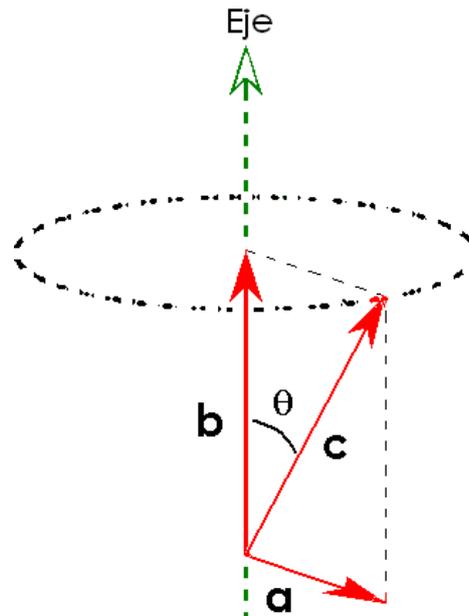


Figura 12. La velocidad constante de la luz c , tendría dos componentes respecto a un eje de rotación local: la velocidad transversal a y la velocidad longitudinal b .

Según Monroy (2013) para determinar las cantidades a y b es necesario introducir un criterio razonable y coherente como sigue: *las dimensiones de las estructuras físicas y su evolución temporal sólo tienen sentido a partir de la escala de Planck*. Esto significa que:

$$r \geq \lambda_p, \quad t \geq t_p \quad (1.19)$$

donde λ_p y t_p denotan la longitud y el tiempo de Planck respectivamente. Las condiciones (1.19) pueden denominarse *criterio del régimen de Planck*. Por consiguiente, todas las ecuaciones anteriores (relacionadas con el estudio) y las subsiguientes serán válidas siempre que se cumplan las condiciones (1.19).

Evaluando la Ec.(1.18) en el régimen de Planck se tiene:

$$r(t_p) = \alpha t_p = \lambda_p \quad (1.20)$$

De donde:

$$\alpha = \frac{\lambda_p}{t_p} \approx \frac{10^{-35}}{10^{-43}} \approx 10^8 \text{ m/s} \quad (1.21)$$

O también:

$$\alpha \approx \frac{1}{3} c \quad (1.22)$$

Reemplazando (2.18) en la Ec.(1.15) se obtiene:

$$b \approx \frac{2\sqrt{2}}{3} c \quad (1.23)$$

Reemplazando (1.22) en la Ec.(1.17), la expresión para la velocidad variable de la luz queda completamente determinada por:

$$c_\omega(t) = \pm c \sqrt{1 + (\omega t / 3)^2} \quad (1.24)$$

donde $t \geq t_p$ y ω es la frecuencia angular local asociada a la escala espacial en consideración.

Obsérvese que en la ecuación de la velocidad variable de la luz (1.24) la frecuencia angular local ω aún no está determinada. Sin embargo, es claro que para una frecuencia angular fija ω la velocidad de la luz es creciente en el curso del tiempo. Además, obsérvese que los signos \pm indican dos posibles direcciones de la velocidad

de la luz; una de ellas corresponde a la propagación en el espacio físico. ¿Y la otra dirección? (Monroy, 2013).

Por otro lado, utilizando el teorema del binomio de puede desarrollar la fórmula (1.24) en serie de potencias para expresar la rapidez de la luz en el vacío. El resultado es:

$$c_{\omega}(t) = c + \frac{1}{2} \left(\frac{\omega t}{3} \right)^2 c - \frac{1}{8} \left(\frac{\omega t}{3} \right)^4 c + \dots$$

El primer término c , de esta serie corresponde a la rapidez constante de la luz en el vacío y es una aproximación de orden cero. Esto significa que el postulado de la constancia de la rapidez de la luz de Einstein es solamente una aproximación de orden cero. La rapidez de la luz en el vacío c , sólo sería constante cuando el espacio físico es un sistema inercial (no dinámico): $\omega = 0$.

1.3.9. El modelo del cuanto vectorial

Cualquiera que sea la orientación del plano de vibración de los vectores \vec{E} y \vec{B} de la onda electromagnética siempre existirá un vector velocidad angular $\vec{\omega}$, perpendicular a dicho plano que tiene la dirección en la que se propagaría la luz en un sistema inercial (véase la figura 13). Este vector obligará al vector de propagación a cambiar de dirección. Como consecuencia de ello la trayectoria real del rayo de luz (que nuestra mente no percibe) tendrá la tendencia a seguir una espiral cónica.. Por consiguiente, dicha trayectoria del rayo de luz sería independiente del sistema de coordenadas, es decir, será un modelo de la realidad objetiva independiente de la consciencia del observador (Monroy, 2013).

El vector velocidad angular $\vec{\omega}$ es cuantificable a toda escala espacial y se puede denominar *cuanto vectorial local*; determina la dirección de circulación del rayo de luz en cada ciclo de 2π rad. En particular, en el nivel microcósmico los cuantos vectoriales serían de gran magnitud con respecto a los del nivel macrocósmico; su acción sobre los rayos de luz no debe despreciarse y sus efectos serían significativos. Las

frecuencias de vibración que se miden en todos los niveles de estructuras físicas (microcómico y macrocómico) serían manifestaciones que justifican la introducción de los cuantos vectoriales (Monroy, 2013).

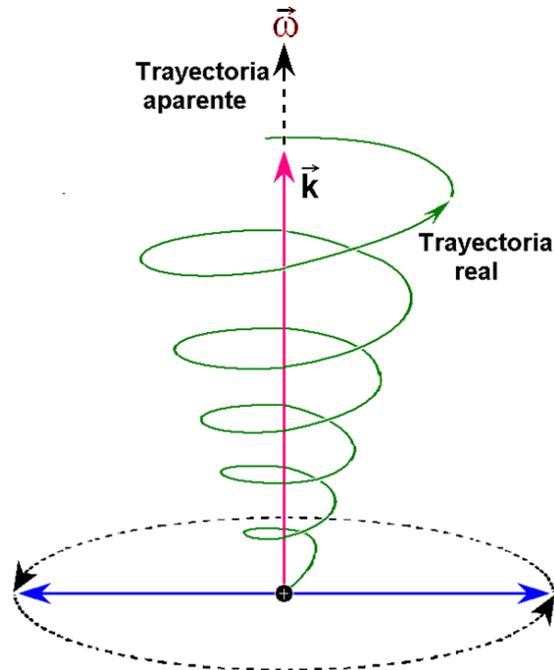


Figura 13. Cualquiera que sea la orientación del plano de vibración del vector eléctrico (doble flecha) de la onda electromagnética siempre existirá un vector velocidad angular $\vec{\omega}$, perpendicular a dicho plano que tiene la dirección en la que se propagaría la luz en un sistema inercial. La acción de este vector sobre un rayo de luz le induciría a que se enrolle de acuerdo al sentido de la rotación.

Según el desarrollo de Monroy (2013), al sustituir (1.22) en la Ec.(1.18) se obtiene:

$$t = \frac{3r}{c} \quad (1.25)$$

Como t es el intervalo de tiempo que tarda el rayo de luz en ocupar la extensión espacial de radio $r \geq \lambda_p$, entonces en un ciclo de circulación del rayo de luz (que es igual al ciclo que realiza cada punto del espacio físico) podemos realizar la aproximación:

$$t \approx \frac{2\pi}{\omega} \quad (1.26)$$

De donde la frecuencia angular local asociada a la escala espacial es:

$$\omega \approx \frac{2\pi C}{3r} \quad (1.27)$$

donde el factor 2π corresponde al ciclo realizado por el rayo de luz.

La Ec. (1.27) define la magnitud del cuanto vectorial local $\bar{\omega}$. Es una expresión aproximada (no es exacta) para describir el comportamiento del cuanto vectorial local. Obsérvese que ω es inversamente proporcional al radio de la extensión espacial r . Esto significa que a medida que aumenta el radio de la extensión espacial en consideración disminuye la magnitud del cuanto vectorial (es decir la frecuencia angular local). La figura 14 muestra la representación geométrica del cuanto vectorial local, siendo su magnitud dependiente del radio $r(t)$ de la extensión espacial, que es su radio de acción (circunferencia) sobre cada punto del espacio físico (Monroy, 2013).

Puesto que los niveles microcósmico y macrocósmico se caracterizan por escalas de longitudes típicas, digamos: r_1, r_2, r_3, \dots , entonces según la Ec.(1.27) existirán frecuencias angulares características: $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots$, asociadas a cada una de ellas, tales que disminuyen a medida que aumenta las escala espacial:

$$\omega_1 > \omega_2 > \omega_3 \dots \quad (1.28)$$

Las frecuencias de vibración que se miden en los sistemas naturales no corresponden a las magnitudes de los cuantos vectoriales, pero serían los efectos residuales de ellos (Monroy, 2013).

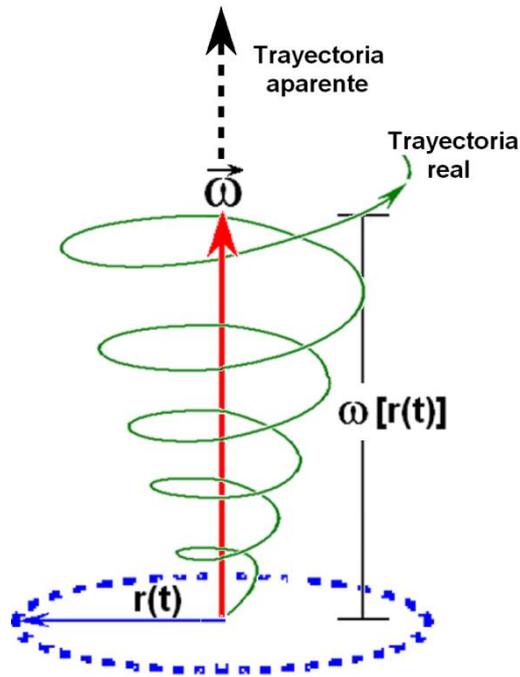


Figura 14. Representación geométrica del cuanto vectorial local. Su radio de acción sobre los puntos del espacio físico está indicado por la circunferencia.

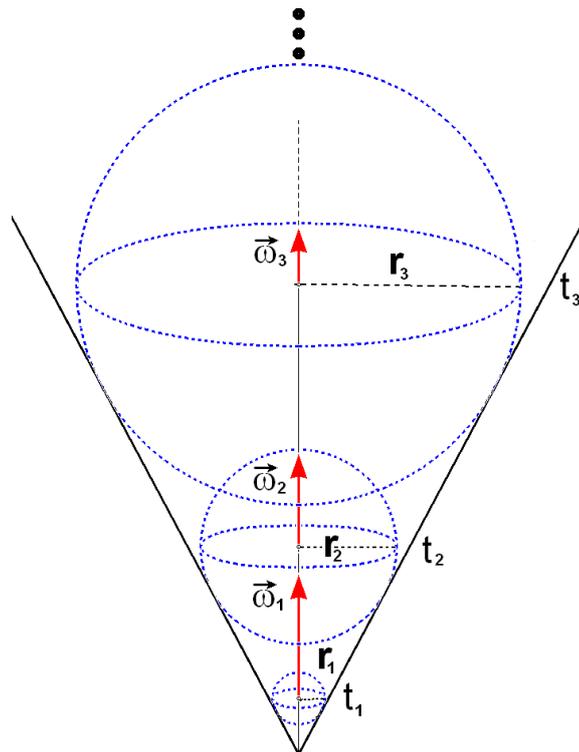


Figura 15. Distribución simple de los cuantos vectoriales a través de extensiones espaciales definidas por esferas. A medida que aumenta el radio de la extensión espacial la magnitud de los cuantos vectoriales representativos disminuye progresivamente.

En la figura 15 se muestra una distribución simple de los cuantos vectoriales. A medida que aumenta el radio de la extensión espacial la magnitud del cuanto vectorial asociado disminuye progresivamente de acuerdo a la Ec.(1.27). Es claro que los cuantos vectoriales $\vec{\omega}_1, \vec{\omega}_2, \vec{\omega}_3, \dots$, son representativos de las esferas espaciales de radios r_1, r_2, r_3, \dots , en los periodos de tiempo característicos t_1, t_2, t_3, \dots , respectivamente (Monroy, 2013).

Sin embargo, nuestros sentidos comunes detectan diferentes frecuencias de vibración asociadas a las diversas estructuras físicas, entonces esto significaría que los cuantos vectoriales locales se pueden desdoblar en otros cuantos vectoriales cuyas magnitudes serán cada vez menores, conformando distribuciones compatibles con algún patrón geométrico existente en la naturaleza. Las posibles distribuciones de los cuantos vectoriales asociados al espacio físico deben corresponder al programa (o lenguaje) intrínseco con que se expresaría la naturaleza en el curso del tiempo (Monroy, 2013).

Puesto que la propagación de los rayos luminosos determina nuestra visión de los acontecimientos a toda escala espacial, es de crucial importancia conocer cómo se distribuyen los cuantos vectoriales locales a través del espacio físico; pero es prematuro en esta etapa de la investigación. Por ahora es de interés comprender la velocidad variable de la luz [Ec.(1.24)] en las regiones espaciales ocupadas por los sistemas físicos. En la Tabla 1.1 se muestran algunos órdenes de magnitud de los radios típicos (r) de las regiones del espacio que ocupan algunos sistemas físicos. También se muestran los correspondientes órdenes de magnitud para las frecuencias angulares características (ω). Además, se evalúa la rapidez de la luz en el espacio libre para $t = 1$ s. Es evidente que esta evaluación es holística (Monroy, 2013).

Los valores de las frecuencias angulares características (ω) mostrados en la Tabla 1.1 confirman su comportamiento decreciente de acuerdo a la Ec.(1.27). Es de particular importancia interpretar la frecuencia angular característica correspondiente a la escala humana: $\omega_h \sim 10^8$ rad/s. Este valor (equivalente a cien millones de vibraciones por segundo) es una frecuencia bastante grande respecto a las frecuencias de vibración típicas que detectan nuestros órganos sensoriales. Pero como se indicó

anteriormente, el cuanto vectorial característico $\bar{\omega}_h$ se desdoblaría en múltiples cuantos vectoriales locales cada vez de menor magnitud. Esto significaría que la frecuencia característica de 1 vibración/segundo (comparable a la frecuencia cardiaca humana) sería una reducción (a través del espacio) de la frecuencia característica ω_h (Monroy, 2013).

En la Tabla 1.1 se muestran los cálculos realizados por Monroy (2013). Los valores que se obtienen para la rapidez de la luz cuando se evalúa en $t = 1$ s, en regiones del espacio comparables al tamaño de un núcleo atómico ($10^{23}c$), de un átomo ($10^{18}c$), y del propio cuerpo humano (10^8c). La impresión subjetiva puede ser aún mayor cuando la rapidez de la luz se evalúa para $t \gg 1$ s porque, según la Ec.(1.24), inclusive a gran escala se obtiene $|c_\omega(t)| \gg c$. Estos resultados parecen inconcebibles, porque la mente humana es un sistema que se encontraría en cuasiequilibrio con el entorno, y además no está acostumbrada a usar leyes físicas en escenarios no inerciales en los cuales no son suficientes los cinco sentidos comunes. Es conveniente interpretar estos resultados en el contexto de la nueva concepción del universo dinámico mediante la gráfica de la velocidad variable de la luz $c_\omega(t)$.

Sistema	r (m)	$\omega/2\pi$ (Hz)	$c_\omega(t = 1 \text{ s})$ (m/s)
Núcleo atómico	10^{-15}	10^{23}	$10^{23}c$
Átomo	10^{-10}	10^{18}	$10^{18}c$
Humano	1	10^8	10^8c
Tierra - Luna	10^9	10^{-1}	c
Solar	10^{11}	10^{-3}	c
Vía láctea	10^{20}	10^{-12}	c

Tabla 1.1. Valores de la velocidad variable de la luz en $t = 1$ s para sistemas físicos especiales a toda espacial.

La velocidad de la luz puede incrementarse indefinidamente con el transcurso del tiempo en cada nivel de estructuras físicas, como los sistemas que se muestran en la Tabla 1.1. Cada nivel de estructuras físicas tiene un cuanto vectorial representativo que puede considerarse constante durante su periodo de acción sobre los rayos de luz y como dicho intervalo de tiempo tiene infinitos valores de t , la velocidad de la luz puede incrementarse indefinidamente (Monroy, 2013).

En la figura 16 se muestra la distribución de los cuantos vectoriales en una línea de tiempo correspondientes a los sistemas indicados en la Tabla 1.1. Definiendo la cantidad $\bar{\omega} = \omega/2\pi = \alpha/r$, ($\alpha = c/3$) como la magnitud natural del cuanto vectorial, se puede demostrar fácilmente (utilizando órdenes de magnitud) que en cada ciclo de circulación de los rayos de luz (que equivale al ciclo de operación del cuanto vectorial) y en cualquier escala de estructuras físicas se cumple: $\bar{\omega}t = 1$. Cada cuanto vectorial (principal) representativo de una escala de estructuras físicas se puede considerar esencialmente constante durante su periodo de acción indicado por un orden de magnitud típico de la escala espacial en consideración. ¿Qué le sucederá al cuanto vectorial principal en los rangos de tiempo que se indican en la figura 16?

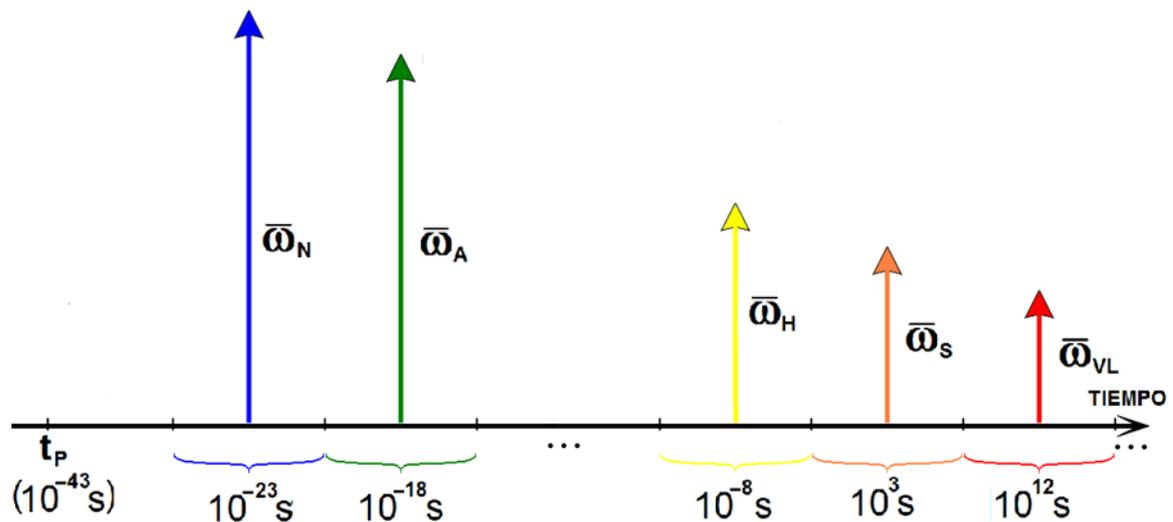


Figura 16. Distribución de los cuantos vectoriales representativos de las escalas de estructuras físicas y sus periodos de acción sobre los rayos de luz. Cada cuanto vectorial representativo se puede considerar constante durante su periodo de acción.

En la figura 17 se muestra el comportamiento de la velocidad variable de la luz para tres frecuencias angulares características ω_1 , ω_2 , ω_3 , tales que $\omega_1 > \omega_2 > \omega_3$,

reduciéndose asintóticamente a los valores $c_0(t) = \pm c$ para $\omega=0$. Para cada frecuencia angular local dada, la rapidez de la luz en el espacio libre se incrementa de modo continuo en el curso del tiempo, tal como lo prescribe la Ec.(1.27). La rapidez de la luz será mayor en las regiones espaciales donde la frecuencia angular local es grande. Por el contrario, será menor en las regiones espaciales donde la frecuencia angular local es menor. Por ejemplo, para un mismo intervalo de tiempo la luz es mucho más rápida a escala microscópica que a escala macroscópica, porque según la Ec.(1.27) la magnitud del cuanto vectorial a escala microscópica es mucho mayor que a escala macroscópica (Monroy, 2013).

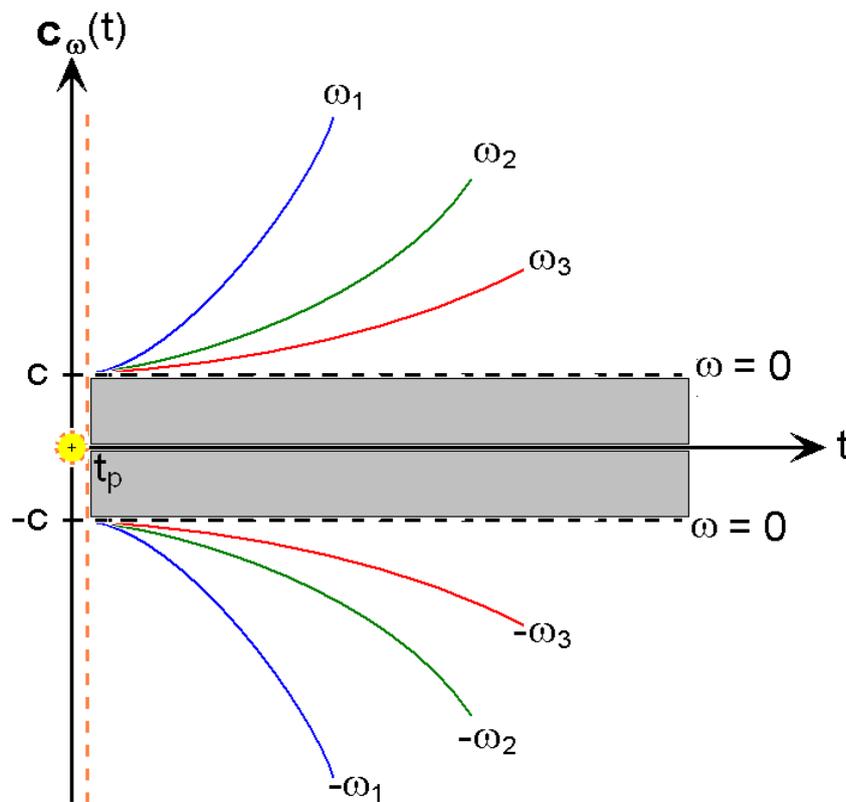


Figura 17. Comportamiento de la velocidad variable de la luz en el vacío en el transcurso del tiempo ($t \geq t_p$) para tres frecuencias características ($\omega_1 > \omega_2 > \omega_3$). Nótese que en todo instante hay dos direcciones de propagación opuestas correspondientes a los cuantos vectoriales $\pm\omega$. También hay simetría especular respecto al rango de velocidades entre $\pm c$ (región sombreada). El valor límite $\omega = 0$ corresponde a un sistema inercial donde la rapidez de la luz se reduce al valor constante c .

Se observa que la velocidad variable de la luz en el vacío tiene en todo instante dos direcciones opuestas simultáneas, siempre que:

$$|c_{\omega}(t)| \geq c \quad (1.29)$$

A estas direcciones le corresponden respectivamente dos cuantos vectoriales locales opuestos $\pm\omega$. Además, la velocidad variable de la luz es simétrica respecto a la región de velocidades:

$$-c < v < c \quad (1.30)$$

Esta región (véase la parte sombreada en la figura 17) corresponde a las velocidades que puede adquirir la luz en un marco inercial cuando se propaga en la materia ordinaria (Monroy, 2013).

Según la interpretación de Monroy (2013) la simetría especular con respecto al rango de velocidades entre $\pm c$ (donde $\omega=0$) que se muestra en la figura 17 significaría que la luz siempre tiene dos estados determinados por dos cuantos vectoriales opuestos. Ahora tratemos de interpretar la profunda significación filosófica del doble signo \pm que muestra la fórmula de la velocidad variable de la luz (1.24).

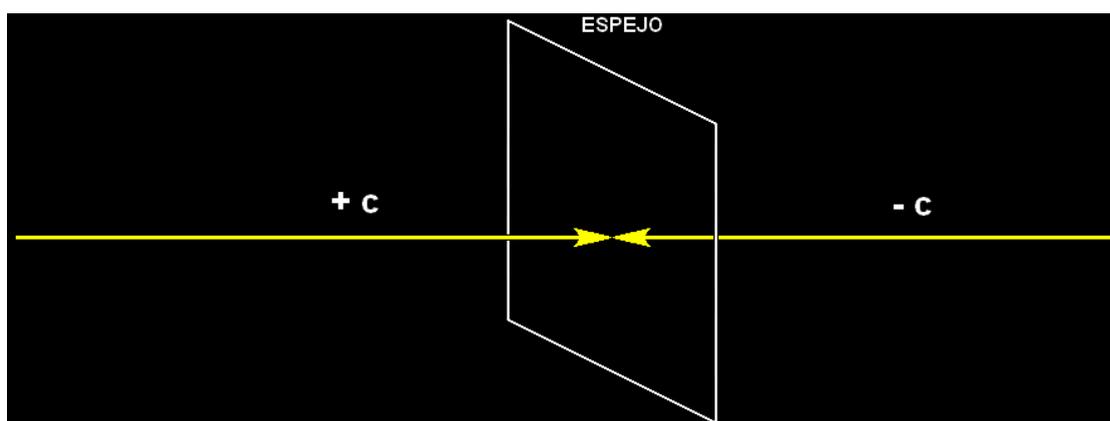


Figura 18. La doble dirección de la velocidad de la luz. Si un rayo de luz se dirige perpendicularmente hacia un espejo plano con velocidad $+c$, el mismo rayo se dirigirá en la dirección opuesta con velocidad $-c$. Este experimento nos conduciría a la conclusión de que los espacios a ambos lados del espejo coexisten conformando una sola entidad.

Gardner (1985) enfatiza que existe una profunda significación filosófica en las imágenes especulares. Alumbremos un espejo plano con una linterna en la oscuridad. Veremos que la luz atraviesa sin dificultad la superficie del espejo enfocando cualquier objeto en el espacio al otro lado del espejo; al cual llamaremos *espacio virtual*. Por consiguiente, la superficie del espejo se comporta como si fuese una ventana abierta que permite el paso de la luz hacia el espacio virtual. Y viceversa, la luz procedente del espacio virtual también ilumina simultáneamente el espacio donde somos conscientes; al cual llamaremos *espacio real* (Monroy, 2010).

Esto significaría que ambos espacios coexisten conformando las dos caras del espacio tridimensional. En la figura 18 se muestra un rayo de luz incidiendo perpendicularmente en un espejo plano con velocidad $+c$ en el espacio real. A su vez en el espacio virtual la velocidad del rayo de luz será $-c$. Como ambos espacios coexisten entonces este experimento simple demuestra que la velocidad de la luz puede tener dos direcciones opuestas simultáneas, tal como lo sugiere la Ec.(1.24). Por supuesto que si nuestra mente pudiera percibir la curvatura de los rayos de luz, se tendrían dos cuantos vectoriales opuestos, uno de ellos asociado al espacio real y el otro asociado al espacio virtual (Monroy, 2010).

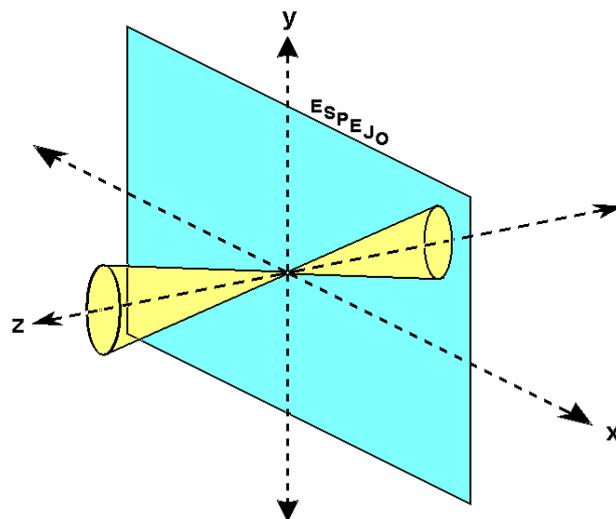


Figura 19. No hay distinción física entre espacio real y espacio virtual. Ambos espacios coexisten.

El principio de conservación de la Paridad implica que nunca podemos estar completamente seguros si estamos observando un fenómeno físico en el espacio real o en el espacio virtual. En el espacio tridimensional no se pueden distinguir sus dos caras. Pero si observáramos los objetos desde el espacio tetradimensional, se podría distinguir el anverso y el reverso de un objeto tridimensional, y conformarían una sola entidad. Lo que ocurre es que nuestra mente está acostumbrada a observar el espacio tridimensional superficialmente, y por un solo lado, adquiriendo la profunda sensación subjetiva de que el espacio virtual es solo ilusión óptica (Monroy, 2010).

Del análisis anterior, surge una aparente paradoja: si los espacios real y virtual coexisten, y cada persona junto con su imagen observan simultáneamente los fenómenos físicos desde ambos lados del espacio tridimensional, entonces no habría una sola posición de observación, sino dos. Sin embargo, es posible observar simultáneamente los objetos en el espacio real y en el espacio virtual. Por ejemplo, el cono en la posición mostrada en la figura 19, puede verse simultáneamente en ambos espacios. Entonces, ¿desde qué posición estamos observando realmente los objetos del espacio tridimensional? La única posibilidad es que nuestra posición de observación no se encuentre en el espacio físico, sino en un espacio de dimensión mayor: el espacio tetradimensional (Monroy, 2010).

Si el espacio virtual fuera ilusorio, entonces no existiría la sombra. Para aclarar esto, podemos considerar otro experimento. Sabemos que la sombra que se proyecta sobre una superficie opaca es parte inseparable de todos los cuerpos materiales. Si pulimos indefinidamente una superficie rígida opaca, sobre la cual se proyecta la sombra de un objeto material, se convertirá finalmente en un espejo ideal y veremos que la sombra desaparece. ¿Dónde se encontrará la sombra?, ¿ya no existe? Sí existe; lo que ocurre es que se ha proyectado sobre el espacio virtual. Pero a su vez, la imagen especular también se proyectará sobre el espacio real. Por consiguiente, los espacios real y virtual coexisten conformando una sola entidad. Un objeto material o su imagen especular no constituyen un sistema de referencia objetivo, sino el sistema de referencia de la mente. El origen de este sistema de referencia sería el punto de concurrencia de las líneas de visión humana, y se localizaría en un lugar común: el centro de una inimaginable esfera tetradimensional (al menos en primera

aproximación). Por tanto, el universo debe ser un sistema abierto hacia este mundo trascendente (Monroy, 2010).

Cuando estos argumentos se aplican al experimento del espejo, significará que los objetos del espacio tridimensional, que se proyectan a través del espejo, tendrán su centro de curvatura en el centro de la esfera tetradimensional. Hay que percatarnos que la proyección de un objeto a través de un espejo significa una inversión de la dirección perpendicular (la normal) al espejo correspondiente a cada punto del objeto y se llama *inversión especular*. La proyección de un objeto bidimensional (la inversión especular) a través de un espejo unidimensional equivale a una rotación de π rad alrededor de un eje inercial situado en una dimensión extra al espacio bidimensional. Es claro que el retorno del objeto a su orientación inicial equivale a una vuelta, que habitualmente se percibe, y la medida del ángulo plano (bidimensional) correspondiente a una vuelta es 2π rad. Análogamente, la inversión especular de un objeto tridimensional a través de un espejo bidimensional equivale a media vuelta por el espacio tetradimensional. Puesto que la medida de un ángulo de rotación tridimensional es el ángulo sólido, entonces la inversión especular equivale a una rotación 2π alrededor de un eje inercial situado en una dimensión extra al espacio tridimensional, el cual no se percibe. El retorno del objeto tridimensional a su orientación inicial equivale a una vuelta por el espacio tetradimensional, y la medida del ángulo sólido correspondiente es igual a 4π . Análogamente, la inversión especular de un objeto tetradimensional a través de un espejo tridimensional equivale a una rotación (media vuelta) 3π por el espacio pentadimensional. Entonces el retorno del objeto a su orientación inicial equivale a una rotación 6π (Monroy, 2010).

Y así, en general la inversión especular de un objeto de dimensión n a través de un espejo de dimensión $n - 1$ equivale a una rotación $(n-1)\pi$ por el espacio de dimensión $n + 1$, (donde $n = 1, 2, 3, \dots$). Por consiguiente, el retorno del objeto a su orientación inicial implica una rotación $2(n-1)\pi$. En cada espacio de dimensión $n + 1$ podemos elegir un eje de rotación inercial, y por consiguiente un sistema de referencia inercial cuyo origen sería el centro de una hiperesfera de dimensión $n + 1$.

En la figura 20, se trata de explicar la inversión especular de un objeto tridimensional (el lápiz). Un espejo invierte la dirección perpendicular a él. La inversión especular de un objeto bidimensional plano (la flecha perpendicular al espejo) se describe mediante el ángulo plano (π radianes) y se requiere considerar un eje de rotación perpendicular al plano. En cambio la inversión especular de un objeto tridimensional (el lápiz perpendicular al espejo) se describe mediante el ángulo sólido (2π estereoradianes) y se requiere considerar un eje de rotación perpendicular al espacio tridimensional, el cual no se percibe (Monroy, 2010).

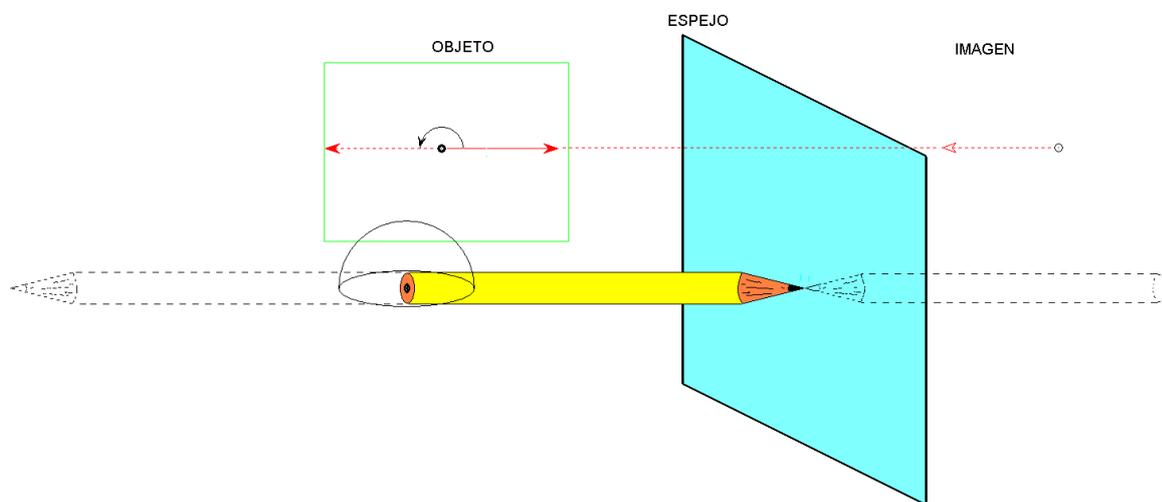


Figura 20. La inversión especular de un objeto bidimensional (la flecha) se describe con el ángulo plano (π radianes) y requiere de un eje de rotación perpendicular al plano. En cambio la inversión especular de un objeto tridimensional (el lápiz) se describe con el ángulo sólido (2π estereoradianes) y requiere de un eje de rotación situado en una dimensión extra.

Puesto que la percepción sensorial no permite comprobar directamente la existencia de este cuarto eje, entonces se requeriría percepción extra sensorial. Además, del análisis del experimento de la inversión especular se deduce que la superficie opuesta de un objeto bidimensional es su imagen en un espejo unidimensional, siempre que las normales al espejo desde cada punto del objeto y desde cada punto de su imagen son opuestas entre si. Análogamente, la superficie opuesta de un objeto tridimensional es su imagen en un espejo bidimensional, siempre que las normales al espejo desde cada punto del objeto y desde cada punto de su imagen son opuestas entre si (Monroy, 2010).

Por ejemplo, en la figura 21 se muestra un lápiz en una posición arbitraria respecto al espejo. La normal desde cada punto del lápiz al espejo es opuesta a la normal desde cada punto de su imagen al espejo. Todas las observaciones descritas anteriormente se pueden generalizar planteando el siguiente postulado: *la superficie opuesta de un objeto de dimensión n es su imagen en un espejo de dimensión $n - 1$, siempre que las normales al espejo desde cada punto del objeto y desde cada punto de su imagen son opuestas entre sí*. Por tanto, el universo observable sería un sistema dual: tendría dos superficies tridimensionales complementarias opuestas con simetría especular las cuales conforman una sola entidad (Monroy, 2010).

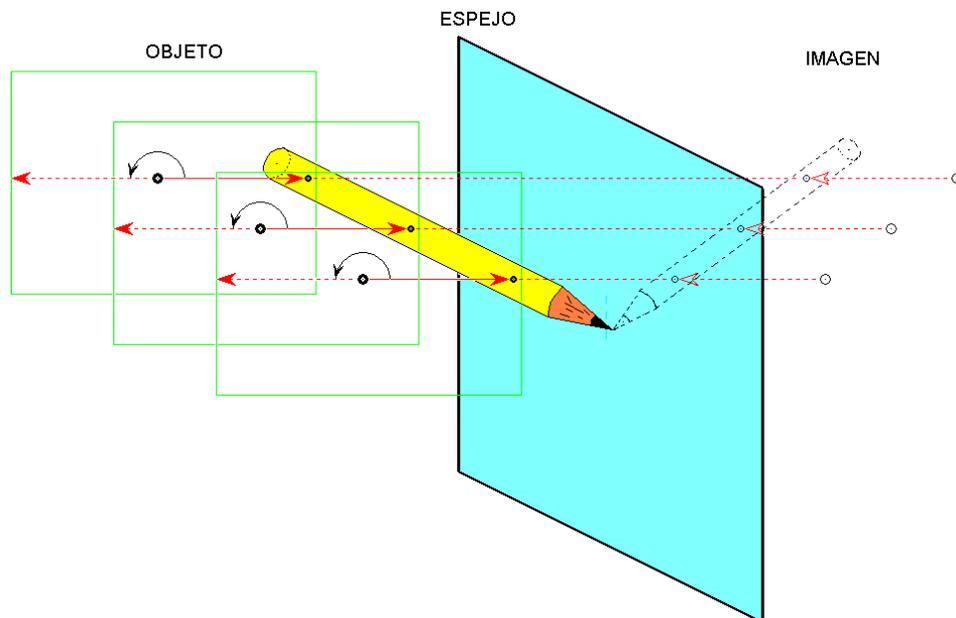


Figura 21. La superficie opuesta de un objeto tridimensional (el lápiz) es su imagen en el espejo, siempre que las normales (flechas) desde cada punto del objeto y desde cada punto de su imagen respecto al espejo son opuestas entre sí.

Por consiguiente, el análisis anterior conduce al concepto de dualidad del cuanto vectorial local. La doble dirección de la velocidad de la luz sería causada por la doble dirección del cuanto vectorial. En la figura 22 se muestra el efecto dual del cuanto vectorial sobre un rayo de luz. Si nuestra mente permitiera percibir la curvatura de los rayos de luz se deduciría que existen dos cuantos vectoriales opuestos asociados a la propagación de la luz $\vec{\omega}$ y $\vec{\omega}'$. Si uno de ellos pertenece al espacio real, que está en

nuestro consciente, el otro pertenece al espacio virtual, que está en nuestro inconsciente (Monroy, 2010).

Por tanto, hemos llegado a la conclusión de que el universo observable sería un sistema dinámico, abierto y dual. La descripción objetiva de la propagación de la luz sería en un escenario como este, siendo el sistema de referencia el centro de una inimaginable esfera tetradimensional, lugar que podría considerarse un sistema inercial (Monroy, 2010).

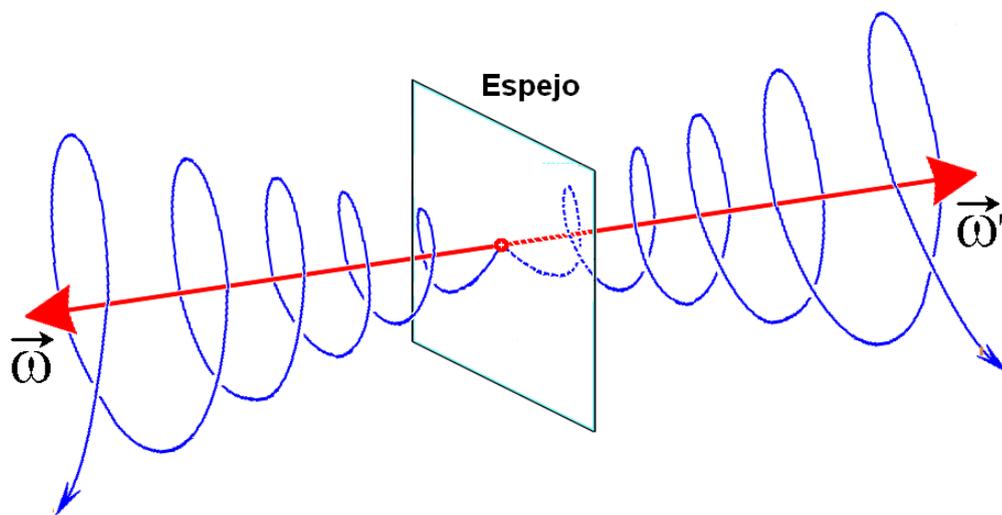


Figura 22. La dualidad del cuanto vectorial. Si nuestra mente permitiera percibir la curvatura de los rayos de luz se deduciría que existen dos cuantos vectoriales opuestos asociados a la propagación de la luz $\vec{\omega}$ y $\vec{\omega}'$. Si uno de ellos pertenece al espacio real (que está en nuestro consciente), el otro pertenece al espacio virtual (que está en nuestro inconsciente).

La idea de que el universo es un sistema abierto es una consecuencia de reinterpretar las fluctuaciones del vacío cuántico. Davies (1986) explica que la relación de incertidumbre energía (ΔE) – tiempo (Δt) de Heisenberg:

$$\Delta E \Delta t \approx h \quad (1.31)$$

donde h es la constante de Planck, plantea la posibilidad de que la energía puede aparecer y desaparecer aparentemente de la nada en una cantidad prescrita por la ecuación de Einstein (de la equivalencia entre la energía y la masa):

$$\Delta E \sim m_0 c^2 \quad (1.32)$$

Esta cantidad de energía puede transformarse en partículas y antipartículas virtuales de masa m_0 , las cuales vibran por debajo del umbral de la realidad observable. A este fenómeno se le llama *fluctuaciones del vacío cuántico*.

Reemplazando (1.32) en (1.31) las partículas y antipartículas virtuales existirían durante un intervalo de tiempo Δt tal que:

$$\Delta t \approx \frac{h}{m_0 c^2} \quad (1.33)$$

Si la relación de incertidumbre energía – tiempo (1.31) plantea la posibilidad de que ingrese energía al universo y su vez, la relación de equivalencia energía – masa (1.32) plantea la posibilidad de que con la energía que ingresa al universo haya creación de pares partícula/antipartícula virtuales, entonces para que nuestra noción de universo abierto tenga sentido deben existir agujeros en el espacio tridimensional a través de los cuales ingrese la energía. Davies (1986) señala que no hay ninguna razón especial para que el universo observable contenga o no agujeros. En consecuencia, las teorías físicas convencionales no pueden predecir ni rebatir la existencia de agujeros en el espacio tridimensional. Feinberg (1987) enfatiza que en el contexto de la teoría del campo cuántico el espacio ya no se concibe como un medio continuo y uniforme sino que tendría una estructura discreta o granular siendo las discontinuidades los agujeros.

¿Cuáles serían estos agujeros en el espacio tridimensional? Serían las estrellas. Admitimos que el Sol y las estrellas no solo constituyen la fuente primaria de energía de donde procede la luz, sino también es la fuente de todos los elementos químicos que se han hallado en la Tierra. Entonces desde la perspectiva del universo abierto el Sol y las estrellas no serían cuerpos finitos, sino agujeros hacia un espacio de dimensión mayor. Por consiguiente, se descartaría la hipótesis de que el Sol y las estrellas se alimenten de la energía disipada de las reacciones nucleares. En otras palabras, la luz, el calor, el hidrógeno, el helio, el carbono, el nitrógeno, el oxígeno y todos los demás elementos químicos serían creados por un mecanismo que aún

desconocemos. Por tanto, el Sol y las estrellas no serían simples fuentes de consumición de hidrógeno tal como se describen en las teorías físicas convencionales (Monroy, 2010).

En la figura 23 se muestra el Sol tal como lo vemos en la vida cotidiana. Se ha comprobado experimentalmente en la Tierra que el Sol se comporta como un cuerpo negro que verifica la ley de radiación de Planck (Davies, 1986) Sin embargo, en la concepción del universo abierto el Sol y las estrellas del universo serían agujeros del espacio tridimensional a través de los cuales ingresa energía (como luz y calor) para sostener el universo observable e inyectarle orden. El orden que presenta la dinámica del universo respondería a un programa inteligente e inherente localizado en el espacio físico. Este programa debe proceder de un espacio de dimensión mayor (Monroy, 2010).

Según Monroy (2010) es importante comprender que esta propuesta del universo abierto con agujeros en la estrellas es una consecuencia de interpretar las fluctuaciones del vacío en el contexto de la nueva concepción de universo dinámico y abierto donde el principio fundamental es que cada punto del espacio gira, vibra y fluye.



Figura 23. El Sol. En la concepción del universo abierto el Sol y las estrellas serían agujeros del espacio tridimensional.

Así como no fue necesario salirse de la Tierra para llegar a la conclusión de que es redonda y finita, tampoco es necesario salirse del espacio tridimensional para deducir (a partir de observaciones realizadas desde su interior) que las estrellas son agujeros del espacio tridimensional (Monroy, 2010).

Entonces el universo observable a gran escala se puede describir como el lugar geométrico de puntos sobre una superficie tridimensional (el espacio físico) con discontinuidades (o singularidades) que corresponden a las estrellas. Estos puntos de discontinuidad en el espacio físico se pueden denominar *puntos físicos*. Es decir, cada estrella se puede identificar como un punto físico (Monroy, 2010).

Ahora bien, todo sistema natural tiene un eje de giro propio. La Tierra tiene su eje de giro propio; el sistema solar tiene su eje de giro propio en torno al Sol; una galaxia tiene su eje de giro propio a través de su centro y así sucesivamente. Pero estos ejes no pueden considerarse inerciales, porque están localizados en el espacio tridimensional. Entonces parece muy razonable pensar que el universo observable, visto como el sistema más grande, debe tener también un eje de giro propio. Pero para que este eje se considere inercial deberá localizarse en una dimensión independiente a las tres dimensiones espaciales que habitualmente percibimos. Por consiguiente, debe ser un sistema abierto con ejes de giro situados en el espacio tetradimensional; de lo contrario no recibiría energía para girar y en consecuencia sería un sistema carente de rotación, traslación y vibración (Monroy, 2010).

Se puede imaginar que el universo observable es una superficie esférica tridimensional en la que se localizan las estrellas (puntos físicos) a través de las cuales ingresa energía desde el espacio tetradimensional para sostener el universo observable. También se puede asociar a cada punto físico un vector velocidad angular tetradimensional $\vec{\Omega}$, que podemos denominar *cuanto vectorial tetradimensional* procedente del centro de la esfera tetradimensional, como se muestra en la figura 24. En consecuencia, los rayos de luz y todos los objetos del universo observable serían afectados indirectamente por esta acción externa mediante los cuantos vectoriales locales $\vec{\omega}$ del espacio tridimensional, aunque no seamos conscientes de ello. Por

consiguiente, los cuantos vectoriales locales serían generados en cada punto físico por la acción del cuanto vectorial tetradimensional (Monroy, 2013).

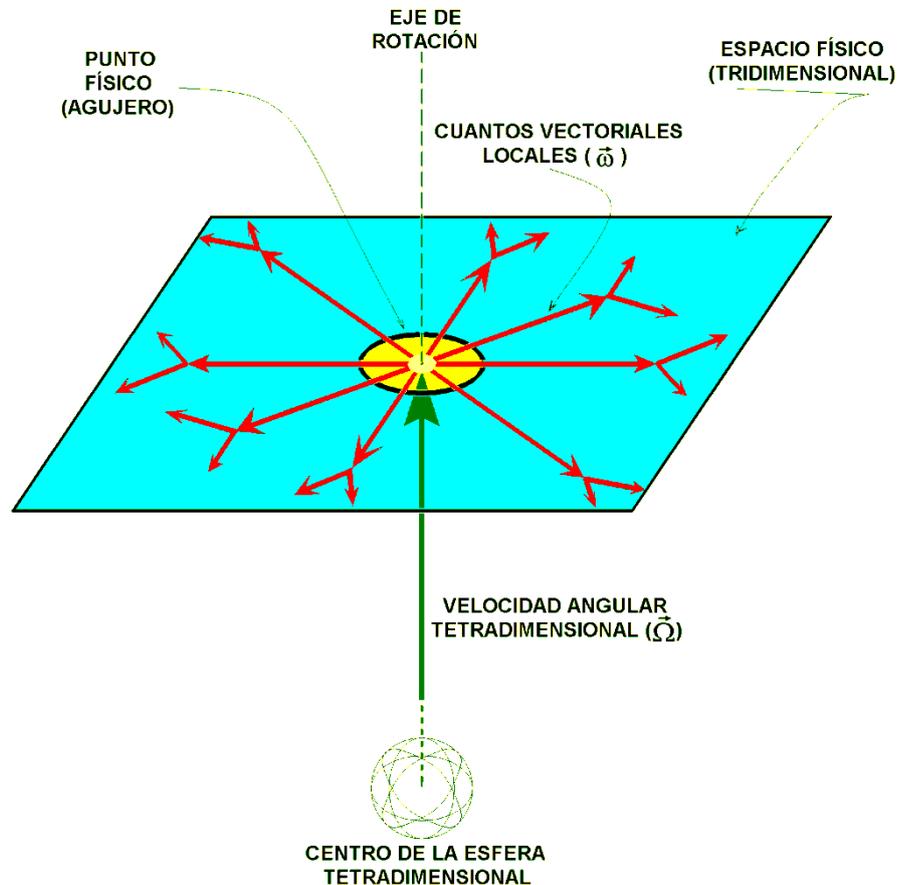


Figura 24. La acción del cuanto vectorial $\vec{\Omega}$ desde el espacio tetradimensional generaría en cada punto físico los cuantos vectoriales locales $\vec{\omega}$. Estos se desdoblarían y determinarían las frecuencias de vibración que detectamos en los sistemas naturales.

Teniendo en cuenta el razonamiento descrito en el párrafo anterior, ¿de qué modo sería afectada la trayectoria de un rayo de luz? En cada ciclo de 4π sr, en que opera el cuanto vectorial tetradimensional, se generaría un campo de fuerza inherente al universo conformado por los cuantos vectoriales locales los cuales dirigirían la trayectoria de los rayos de luz en cada ciclo de 2π rad. Estos cuantos vectoriales locales se desdoblarían de modo repetitivo a través de las escalas espaciales en otros cuantos vectoriales locales, cada vez de menor magnitud. Las frecuencias de vibración que se miden en todos los niveles de estructuras físicas (microcósmico y macrocósmico) estarían asociadas a la acción de los cuantos vectoriales locales a partir de la escala de Planck. (La investigación de cómo se distribuyen los cuantos

vectoriales locales en el espacio físico está más allá del alcance de este trabajo). Por tanto, los cuantos vectoriales locales deben afectar a todas las direcciones posibles de propagación de los rayos luminosos, aunque no seamos conscientes de ello (Monroy, 2013).

En la figura 25 se muestra la gráfica del comportamiento del cuanto vectorial local (ω) en función del radio (r) de la región espacial, a partir de la escala de Planck. A cualquier escala espacial tal que $r \geq \lambda_p$ siempre existirán dos vectores velocidad angular (cuantos vectoriales) opuestos $\pm\omega$. Nótese que no hay comportamiento asintótico cuando $r \rightarrow \lambda_p$, ya que ω tiene un valor finito dado por la Ec.(1.27):

$$\omega_p = \frac{2\pi C}{3\lambda_p} \sim 10^{42} \text{ Hz} \quad (1.34)$$

Por el contrario, de la gráfica se observa que cuando $r \rightarrow \infty$, $\omega \rightarrow 0$. Esto significa que si el universo es infinito se comportaría como un sistema inercial, y no habría actividad en la naturaleza. Pero si el universo es dinámico, entonces sería finito (Monroy, 2013).

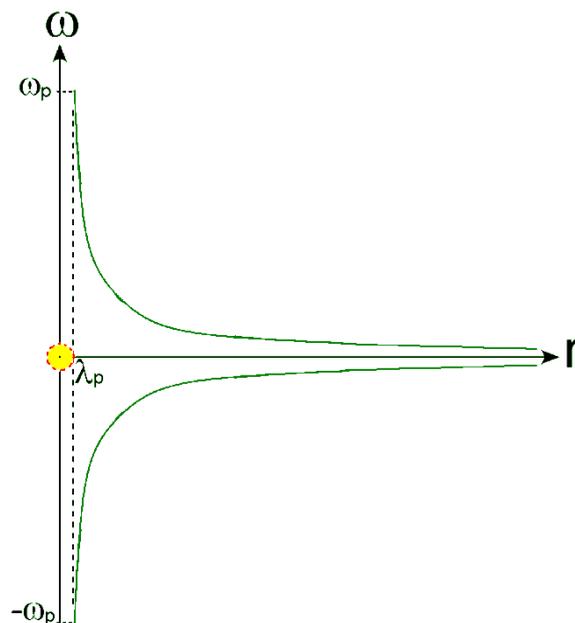


Figura 25. Comportamiento del cuanto vectorial local (ω) en función del radio de la extensión espacial ($r \geq \lambda_p$). Nótese que si el universo fuese infinito ($r = \infty$) podría considerarse un sistema inercial ($\omega = 0$).

Monroy (2013) plantea la siguiente paradoja: si existe un cuanto vectorial correspondiente a la escala humana $\vec{\omega}_h$, y además estamos observando los acontecimientos desde un lugar inercial (centro de la esfera tetradimensional), se debería percibir la curvatura de los rayos luminosos. Sin embargo, se percibe en línea recta. La única posibilidad de salvar esta contradicción es asociando un cuanto vectorial $\vec{\omega}_h^*$ a la mente del observador (a su inconsciente) de modo que se cancele aproximadamente (en cada ciclo de 2π rad del rayo) con el vector $\vec{\omega}_h$, es decir:

$$\vec{\omega}_h + \vec{\omega}_h^* \approx \vec{0} \quad (1.35)$$

El profundo significado de la inversión especular, analizado anteriormente, podría justificar la condición (1.35). Imagínese que el rayo de luz en el espacio físico (real) que incide en el espejo de la figura 18 se enrolle en sentido horario, entonces el rayo de luz en el espacio (virtual) detrás del espejo (que está en nuestra mente) se enrollará en sentido antihorario. Así los, cuantos vectoriales asociados a los rayos serán opuestos y se cancelarán hipotéticamente (Monroy, 2013).

Hemos llegado a la conclusión de que la condición para percibir los rayos de luz en línea recta está dada por la aproximación (1.35). Por tanto, nuestras observaciones no solo depende de la forma en que se propaga la luz sino también del estado de la mente del observador, determinada por los cuantos vectoriales (Monroy, 2013).

Es interesante advertir que si el vector $\vec{\omega}_h^*$ representa un campo de fuerza asociado a la mente del observador. Además, como $\omega_h^* \sim 10^8$ rad/s, entonces cada observador tendría asociado a su mente un campo de fuerza muy poderoso (Monroy, 2013).

En la figura 26 se intenta explicar, con mayor convicción, por qué no se percibe la curvatura de los rayos luminosos (Monroy, 2013). Las flechas indican la dirección aparente de un rayo de luz en cada instante respecto a un observador. El vector $\vec{\omega}_h^*$

asociado a la mente del observador no le permite percibir la curvatura del rayo de luz, porque se cumple la condición (1.35).

Magueijo (2006) afirma que la velocidad de la luz es la piedra angular de la Física, el cimiento aparentemente sólido sobre el cual se han erigido todas las teorías cosmológicas modernas, es el metro patrón que sirve para medir el universo observable a toda escala espacial. También señala que la teoría de la velocidad variable de la luz ha comenzado a tener un papel relevante ante las incongruencias de las teorías físicas convencionales, porque se podría utilizar para resolver otros problemas que se hallan en la frontera del conocimiento científico. Y se tiene la esperanza de que sea posible probar que la velocidad de la luz en el vacío es variable.

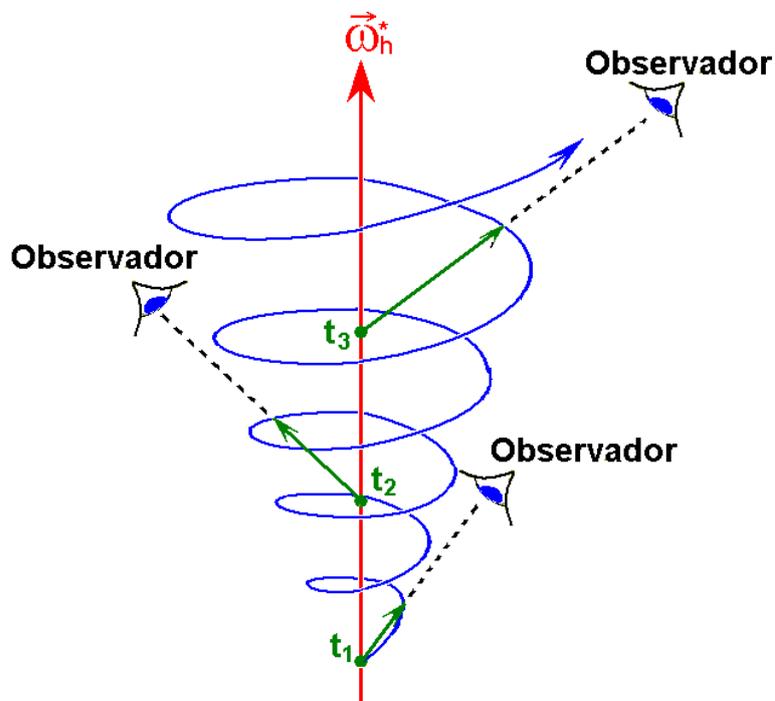


Figura 26. Diagrama que intenta explicar por qué no se percibe la curvatura de los rayos luminosos. Las flechas indican la dirección aparente de un rayo de luz en cada instante respecto a un observador. Los rayos de luz siempre se describirán en línea recta, porque la mente del observador no permite percibir su trayectoria real. Para explicar esto es necesario asignar un cuanto vectorial a la mente del observador (a su inconsciente) $\vec{\omega}_h^*$ el cual se cancela aproximadamente (en cada ciclo del rayo) con el cuanto vectorial $\vec{\omega}_h$ correspondiente a la escala humana.

Por tanto, el estudio de la velocidad variable de la luz es de crucial importancia para la evolución de la Física, tal como lo muestran las teorías VLS (Varying Speed of Light) que se muestran en los artículos afines de las referencias bibliográficas. Además, investigar el papel de la mente no es ningún disparate, ya que constituye un nuevo campo de investigación (Penrose, 1996).

1.3.10. La enseñanza – aprendizaje de nuevos conocimientos

Magueijo (2006) enfatiza que la enseñanza y el aprendizaje de la velocidad variable de la luz es de crucial importancia para la evolución de la Física contemporánea, porque es el cimiento sobre el cual se han de desarrollar las nuevas teorías cosmológicas. Pero, ¿cómo se puede justificar la enseñanza de nuevos conocimientos científicos generados de la investigación básica en los planes de estudios universitarios?

Según el Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, a través de los Programas y Líneas de Investigación 2014, señala que la enseñanza de la Física presenta importantes desafíos en todos los niveles de instrucción. Los avances continuos mueven la frontera del conocimiento de manera que resulta imposible pensar en cubrir todos los temas, ni siquiera en los niveles más especializados como en los cursos para estudiantes universitarios de ciencias naturales. Se plantean entonces una serie de preguntas que han preocupado por mucho tiempo a docentes y científicos: ¿con qué criterio deben seleccionarse los contenidos a ser dictados en las universidades? ¿Es relevante el esfuerzo de incluir tópicos sobre nuevos conocimientos? ¿En qué punto debe terminar la instrucción?

Por consiguiente, la línea de investigación: *Enseñanza de la Física desde diversas perspectivas* (promovida por el Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos en los Programas y Líneas de Investigación 2014) sugiere incluir temas de frontera de la Física que se han desarrollado en estudios de investigación dentro de las asignaturas afines. Por supuesto, esta idea se puede extender a las otras ciencias básicas, y constituye un desafío para la universidad peruana en el siglo 21.

Según Campanario y Moya (1999) los diferentes modelos de enseñanza de las ciencias básicas responden a las diferentes concepciones epistemológicas derivadas de la evolución de la enseñanza de la ciencia que ha sido influenciada por el desarrollo de las diferentes disciplinas que la componen. Este desarrollo disciplinar proveniente tradicionalmente desde el campo de la Física, la Biología, la Química y posteriormente por las ciencias de la vida, como otras ciencias de la Tierra (las ciencias ambientales, la oceanografía, la astronomía entre otras), ha permitido el desarrollo de diferentes modelos en contraposición al modelo tradicional de la enseñanza verbal de las ciencias.

También, es necesario que los docentes adopten una perspectiva epistemológica particular sobre la naturaleza del conocimiento científico y su desarrollo, que guíe la práctica de la enseñanza de la ciencia. Los docentes deben crear un paquete pedagógico que refleje no sólo una filosofía de la ciencia, sino también una filosofía de la educación, lo cual deberá ser adaptado a las limitaciones del aula. Los docentes realizan elecciones pedagógicas que apoyan o limitan la experiencia de los estudiantes en las clases de ciencias, mientras que la disciplina de ciencias a su vez influencia lo que es posible y deseable para que un docente pueda intervenir de manera pedagógica. Así, el docente seleccionaría los ideales científicos y pedagógicos que quiere lograr con los estudiantes (Campanario y Moya, 1999).

Pozo y Gómez (1998) señalan que el modelo tradicional de enseñanza de la ciencia aún se encuentra bastante arraigado en la práctica educativa a pesar de que muchas veces se expone lo contrario en el currículo. Este modelo asume de modo implícito que los conocimientos científicos son verdades definitivas que los docentes desde su área o dominio disciplinar tienen que transmitir a sus alumnos. El docente, bajo este modelo es una fuente de información científica y en consecuencia es también el emisor de esta información. En la mayoría de las veces el docente adaptado a este modelo es un especialista de una de las disciplinas que enseña ciencias con poca e incluso ninguna formación pedagógica. Los estudiantes por otro lado, son vistos como receptores de conocimientos a quienes el docente es el encargado de alfabetizar.

Además, el modelo tradicional de enseñanza de la ciencia asume la lógica de que el conocimiento tradicional que se transmite a los estudiantes es suficiente para que se produzca el aprendizaje del conocimiento científico. Es decir, que la mente de los estudiantes formateada por el conocimiento tradicional está lista para el aprendizaje del conocimiento científico, ya que lo único que falta es que el docente entregue a los alumnos los conocimientos científicos necesarios para que estos puedan reproducirlo en su memoria y adquirir lo que los científicos han descubierto o conocen. En resumen, el aprendizaje de las ciencias en este modelo sostiene que el conocimiento científico es de alta especialización al que los estudiantes sólo pueden tener acceso si es que existe en ellos una determinación genética, además de una verdadera voluntad e intención para alcanzar ese conocimiento, reproducirlo e incorporarlo a sus memorias (Pozo y Gómez, 1998).

La función social del modelo tradicional de enseñanza de las ciencias en particular, y de la educación en general, consiste en seleccionar a los estudiantes en dos grupos claramente marcados: aquellos capaces para el aprendizaje de las ciencias y aquellos carentes de esta capacidad de aprendizaje. De esta manera, la educación básica, en particular, se encarga de seleccionar a las personas aptas tanto para el estudio de las ciencias como para el acceso a las carreras relacionadas y aquellas carentes de estas capacidades. Todo esto es tradicionalmente aceptable como normal, porque se piensa que cada uno de nosotros estaría genéticamente programado para desarrollar ciertas habilidades y capacidades que determinan nuestro papel en la sociedad. De esta manera desde la educación básica, y concretamente desde la enseñanza de las ciencias en la secundaria, se excluye a un gran número de personas y se les condiciona a cumplir un determinado papel en la sociedad (Pozo y Gómez, 1998).

Aunque la concepción del aprendizaje como un proceso de investigación no es nueva, con el tiempo las propuestas compatibles con esta idea han adquirido un desarrollo notable, especialmente desde posiciones llamadas constructivistas. García y Cañal (1995) han revisado las propuestas que defienden el aprendizaje como producto de la investigación. Pero, según Gil (1993) uno de los mayores problemas de la enseñanza de las ciencias es el abismo que existe entre las situaciones de enseñanza – aprendizaje y el modo en que se construye el conocimiento científico. En

consecuencia, es útil partir de la metáfora del científico novel que puede alcanzar en un tiempo más o menos corto un nivel de competencia relativamente elevado en un dominio concreto. Ello es posible porque cuando un científico novel se integra en un grupo de investigación empieza a desarrollar pequeñas investigaciones en las que replica los trabajos previos en un área determinada y aborda problemas en los que sus supervisores son expertos. De este planteamiento surge la necesidad de plantear el aprendizaje de las ciencias como una investigación dirigida a situaciones problemáticas de interés.

Gil (1993) también señala que se han propuesto una serie de estrategias. Las más comunes son: (1) se plantean situaciones problemáticas que generen interés en los estudiantes y proporcionen una concepción preliminar de la tarea; (2) los estudiantes, trabajando en grupos, analizan cualitativamente las situaciones problemáticas planteadas, y con la ayuda de referencias bibliográficas apropiadas empiezan a delimitar el problema; (3) los problemas se tratan siguiendo el método científico con la formulación de hipótesis, elaboración de estrategias de resolución y confrontación de resultados con otros grupos de investigación; (4) los nuevos conocimientos se manejan y aplican a otras situaciones para profundizarlos y afianzarlos. En consecuencia deben hacerse explícitas las relaciones entre ciencia, tecnología y sociedad.

Otro aspecto de la enseñanza y aprendizaje en ciencias, que ha recibido especial atención de los especialistas, es la investigación sobre la resolución de problemas que nos remite a cinco habilidades específicas: identificar del problema, analizar el problema, seleccionar estrategias, aplicar las estrategias e interpretar los resultados. También, se ha encontrado que los esfuerzos que los docentes suelen invertir en resolver problemas típicos y en exigir en los estudiantes un trabajo independiente, con el mismo objetivo, no se traduce por lo general en el logro de mayores competencias de resolución de problemas y de comprensión conceptual. Nuevamente, esta constatación indica la necesidad de revisar el enfoque tradicional de los cursos teóricos en el currículo (Proyecto Tuning – América Latina, 2004 – 2007).

En particular, en la Física, actualmente tiende a imponerse el enfoque del aprendizaje de los conceptos y teorías, así como la resolución de problemas en

términos del desarrollo de habilidades de modelación. Este enfoque entronca el aprendizaje de la competencia en discusión directamente con el de las otras competencias específicas (construir modelos, verificar y evaluar el ajuste de modelos). En particular, esto requiere conducir a los estudiantes a concebir la Física como un arte de modelación y facilitarles la adquisición de una red de elementos conceptuales, que actualmente no suele ser objeto de enseñanza, tales como los componentes de un modelo físico, los diferentes tipos de modelos conceptuales; por ejemplo, la idealización de un péndulo simple como un objeto puntual colgado de una cuerda de masa despreciable, etc. (Proyecto Tuning – América Latina, 2004 – 2007).

De acuerdo con la UNESCO (2006) es innegable que los descubrimientos científicos y la tecnología han tenido repercusiones considerables en la vida de la humanidad durante el siglo 20 al provocar transformaciones sociales de gran envergadura. Hoy en día se reconoce que el desarrollo socio – económico y cultural depende en gran medida de los avances de la ciencia y de la tecnología. En nuestras sociedades es imprescindible que los ciudadanos posean conocimientos de ciencia y tecnología. En este contexto, una enseñanza científica y tecnológica que sea pertinente y de buena calidad, representa un instrumento esencial no sólo para la formación de científicos, sino también para fomentar los conocimientos básicos, las aptitudes prácticas y el espíritu crítico de los jóvenes y de los adultos, facilitando así su participación en las sociedades.

Por paradójico que parezca, la enseñanza de los nuevos conocimientos científicos no se ha desarrollado al mismo ritmo que el progreso de la ciencia. El papel fundamental que desempeña la educación superior en estos dos ámbitos ha sido destacado por la UNESCO en la Declaración sobre la Ciencia y el uso del Saber Científico (que se aprobó en la Conferencia Mundial sobre la Ciencia, celebrada en Budapest en 1999) en estos términos: es urgente renovar, ampliar y diversificar la educación para todos los campos de la ciencia, haciendo hincapié en las competencias, los conocimientos científicos y tecnológicos necesarios para participar de manera significativa en la sociedad del futuro (UNESCO, 2006).

En la mayoría de países del mundo, la enseñanza de la ciencia y la tecnología no figura entre los temas prioritarios de los programas de educación. Además, los

currículos universitarios, los métodos y materiales pedagógicos relativos a las disciplinas científicas, así como la formación de docentes especializados en las mismas, suelen ser obsoletos. Por eso, no es sorprendente que en la enseñanza de estas materias, los docentes carezcan a menudo de motivación al no haber sido lo suficientemente formados para la empresa de la investigación científica. La UNESCO tiene plena consciencia de sus responsabilidades y del importante papel que debe desempeñar para aportar una solución a este problema, adoptando medidas concretas a favor de sus Estados Miembros. Por eso, la organización promueve actividades a este nivel para ayudar, en especial a los países en desarrollo, a que fortalezcan sus competencias y base de conocimientos para mejorar sus políticas y programas de enseñanza científica y tecnológica (UNESCO, 2006).

Según las informaciones comunicadas por los Estados Miembros, la campaña mundial promovida por la UNESCO en el ámbito de la enseñanza científica y tecnológica ha conseguido un éxito considerable. Las actividades correspondientes han proseguido hasta la fecha con el fin de conseguir la participación de un número cada vez mayor de Estados Miembros y poder así transmitir los adelantos de la ciencia a través de la enseñanza universitaria, lo que permitirá la iniciación de los estudiantes en el campo de la investigación científica. En particular, en Perú la ley universitaria N° 30220 (Artículos 6 y 7) indica que la investigación constituye una función esencial y obligatoria de la universidad, que la fomenta y realiza, respondiendo a través de la producción de nuevos conocimientos científicos y desarrollo de tecnologías. Entonces esto implica reorientar los currículos de acuerdo a la función de la investigación en la universidad. Además, se afirma que los docentes, estudiantes y graduados deben ser partícipes de la actividad investigadora en su propia institución o en redes de investigación nacional o internacional creadas por las universidades públicas o privadas.

1.3.11. Logros de aprendizaje

Los logros de aprendizaje son los resultados acerca de lo que se espera que el estudiante sea capaz de comprender, hacer y sea capaz de demostrar al finalizar un proceso de aprendizaje (Velasategui, 2012).

El proceso de aprendizaje puede ser, por ejemplo, una clase, un módulo o un programa completo, dado que los docentes planifican resultados de aprendizaje para unidades individuales o clases (Velastegui, 2012).

Así, los logros de aprendizaje se relacionan con la formación de capacidades y destrezas que permiten al estudiante resolver problemas como resultado del dominio de las teorías, metodologías y tecnologías.

Ortiz (2005) señala que, según el contenido del aprendizaje de los estudiantes, se distinguen tres tipos de logros: cognoscitivos (conocimientos), procedimentales (desempeños) y actitudinales (productos).

Los logros cognoscitivos son los aprendizajes esperados de los estudiantes desde el punto de vista cognitivo; representan todo lo que deben conocer. Los logros procedimentales son las actividades ejecutoras de los estudiantes; representan todo lo que deben saber hacer. Los logros actitudinales son las actuaciones de responsabilidad de los estudiantes; representan el comportamiento que deben demostrar, el componente afectivo – motivacional de su personalidad (Ortiz, 2005).

Por consiguiente, los logros de aprendizaje enuncian los conocimientos que los estudiantes deben adquirir, la capacidad de aplicarlos y el comportamiento que deben practicar al finalizar la sesión de aprendizaje.

1.3.12. La programación didáctica

Alcalá (2010), clasifica la programación didáctica en programación de área y programación de aula. La programación de área es el documento cuyo contexto es el del centro de estudios; la responsabilidad está a cargo de un equipo de docentes en un ciclo académico; los objetivos son generales para todo el curso o el ciclo académico; los contenidos están basados en el decreto del currículo, y la evaluación es en función de criterios generales para el curso o ciclo (indicadores e instrumentos de acuerdo a la concreción curricular). La programación de aula es la adaptación a las características concretas de un grupo de estudiantes; el contexto es el aula; la responsabilidad está a cargo del docente; los objetivos (o logros de aprendizaje) son específicos para la

unidad de la asignatura; los contenidos son sólo los que se desarrollan en la unidad de la asignatura, y la evaluación es en función de criterios específicos de la unidad (indicadores de logro relacionados con las tareas incluidas en la unidad y rúbrica para cada instrumento, según lo que se evalúe con el instrumento).

La programación docente puede dividirse en las siguientes etapas:

- **Planeación de clases**

Un plan de clases es una hoja de ruta que guía al docente, sirviéndole como herramienta para orientar su trabajo de enseñanza con la finalidad de lograr los aprendizajes y competencias esperados (Velastegui, 2015).

Durante la planeación de clases los docentes deben responder a tres preguntas: (1) saber a dónde se dirigen, es decir deben definir las metas que desean alcanzar. (2) cómo van a lograr los aprendizajes de sus estudiantes, es decir a través de qué actividades y medios van a alcanzar lo propuesto. (3) cómo va a saber el docente que sus estudiantes han logrado los aprendizajes esperados, es decir cómo se van a obtener los indicadores de logros de aprendizaje de sus estudiantes (Velastegui, 2015).

- **Objetivos de aprendizaje y Competencias**

Los objetivos deben responder a la pregunta: hacia dónde va la programación docente, es decir, qué aprendizajes quiere lograr el docente en sus estudiantes. El docente debe identificar los objetivos de aprendizaje que desea lograr y distribuirlos en el tiempo ya sea por semestres académicos, por unidad, por semana o por día para que sus estudiantes logren el dominio de los contenidos, destrezas, habilidades a demostrar. Los objetivos de aprendizaje se establecen en función de los estudiantes y no del docente. Los objetivos no indican lo que el docente hará sino lo que los estudiantes serán capaces de realizar como resultado de la enseñanza (Velastegui, 2015).

En realidad la programación didáctica no solo sirve para informar a los estudiantes sobre los objetivos de cada clase, sino también para informarles sobre la competencia

general de la asignatura, los logros de aprendizaje que se espera alcanzar en las unidades didácticas (teniendo en cuenta la competencia formulada), lo que se hace comúnmente al inicio de cada sesión de aprendizaje (Guía para la formación del proyecto COMBAS, 2014).

Según el CONEAU (2009), por competencia debe entenderse integrar y movilizar saberes conceptuales, procedimentales y actitudinales para resolver problemas profesionales en forma autónoma y flexible en un contexto determinado. Además, deben distinguirse las competencias profesionales de las competencias laborales. Las competencias profesionales son aquellas que se adquieren dentro de las instituciones educativas. Por el contrario, las competencias laborales son aquellas que se adquieren fuera de las instituciones educativas en el desempeño ocupacional (Ley N° 28740 del SINEACE).

- **Selección de los contenidos de información**

En el plan docente se consideran también los contenidos o temas a tratar de acuerdo a los objetivos de aprendizaje. Los contenidos de información constituyen la base sobre la cual se programarán las actividades de enseñanza – aprendizaje, así como la evaluación de los aprendizajes con el fin de alcanzar lo expresado en los objetivos. En el conjunto de información programada para el proceso educativo se deben seleccionar los contenidos de conocimiento (o conceptual), los contenidos de desempeño (o procedimental) así como el producto (o actitudinal) del estudiante que se espera obtener. Además, hay que recordar que los contenidos de información deben relacionarse con el logro del objetivo (Velasstegui, 2015).

Según Penzo y otros (2010), desde el punto de vista de la programación didáctica, una de las ventajas de centrar la docencia en las actividades de aprendizaje es que permite disponer de criterios para seleccionar y establecer una jerarquía de los contenidos y asegurar que los contenidos que mejor se aprendan sean los más importantes. Además, se afirma que no existe una relación lineal, es decir una proporcionalidad directa entre los contenidos y las actividades de aprendizaje sino recurrente: se escoge un contenido para realizar una actividad de aplicación

determinada; se diseñan las actividades para aprender ese contenido; se observa comúnmente que la información no es suficiente; se realiza modificación; se adapta la actividad de aplicación y así sucesivamente. Pero, desde el punto de vista de la programación docente, es siempre más fácil y más claro definir los contenidos como punto de partida.

- **Actividades de aprendizaje**

Una vez que se han seleccionado los contenidos de información, se debe planificar cómo se van a lograr los aprendizajes en los estudiantes, es decir, a través de qué actividades se espera los logros de aprendizaje (Velastegui, 2015).

Según Marcelo y otros (2014), una de las acciones que caracteriza a los docentes universitarios es el diseño de las actividades de aprendizaje de los estudiantes. Para ello, se centran en describir y analizar las actividades de aprendizaje que el docente selecciona para orientar los procesos de adquisición de competencias de los estudiantes. Los resultados de su investigación muestran que no existen en general diferencias entre docentes de diferentes ramas de conocimientos en función de las tareas de aprendizaje que planifican. Concluyen que para lograr un aprendizaje autónomo de los estudiantes el docente debe ser capacitado para diseñar actividades de aprendizaje que sean pertinentes y relevantes.

Por otro lado, las sesiones de aprendizaje permiten la ejecución del plan de clases y deben realizarse mediante una secuencia didáctica coherente. Así, en las actividades de aprendizaje siempre se distinguen tres etapas de la secuencia didáctica: la preinstruccional (antes), la coinstruccional (durante) y la posinstruccional (después). En particular, las actividades de aprendizaje para los nuevos conocimientos generados de una investigación científica responden a estas tres etapas de la secuencia didáctica (UNAP, 2010).

En la etapa preinstruccional las estrategias de enseñanza del docente tienen las funciones principales de activar los conocimientos previos en los estudiantes, motivar el interés por la situación problemática y organizar la información que se ha de aprender. En esta etapa las estrategias de aprendizaje ejecutadas por los estudiantes pueden

ser: la técnica expositiva (que implica habilidades de comunicación) y la técnica de demostración (que implican habilidades de búsqueda de información, habilidades analíticas, creativas, de toma de decisiones). Los recursos didácticos pueden ser: diapositivas y medios audiovisuales (UNAP, 2010).

En la etapa coinstruccional las estrategias de enseñanza del docente tienen las funciones de detectar la información principal, enlazar los conocimientos previos con la nueva información, representar los fenómenos o conceptos y extraer conclusiones. En esta etapa las estrategias de aprendizaje ejecutadas por los estudiantes pueden ser: la técnica del interrogatorio (que implica habilidades de asimilación, de retención, analíticas, inventivas y metacognitivas); la técnica de discusión (que implica habilidades de búsqueda de información, analíticas, comunicativas, de toma de decisiones); dinámica de grupos (implica actuar como un organismo unitario para producir aprendizajes entre sus miembros). También es útil la técnica expositiva. Los recursos didácticos pueden ser: diapositivas, mapas conceptuales, mapas semánticos, y otros (UNAP, 2010).

En la etapa posinstruccional las estrategias de enseñanza del docente tienen las funciones de permitir la evaluación del estudiante, la retroalimentación de la información y la profundización. En esta etapa las estrategias de aprendizaje ejecutadas por los estudiantes pueden ser: la técnica del interrogatorio, la técnica expositiva y la técnica de discusión. Los recursos didácticos pueden ser materiales de lectura, diapositivas, y otros (UNAP, 2010).

En resumen, las actividades de aprendizaje constituyen el proceso que responde a la pregunta: cómo se organiza el desarrollo de los contenidos de información durante las etapas preinstruccional, coinstruccional y posinstruccional.

- **Evaluación del aprendizaje**

Según Velastegui (2015), la evaluación del aprendizaje debe responder a la pregunta: cómo va a saber el docente que sus estudiantes han logrado los aprendizajes propuestos, es decir, cómo se van a obtener los indicadores de logro.

Los indicadores de logro son los comportamientos observables sobre el desempeño de los estudiantes que nos dicen si estos han alcanzado los objetivos de aprendizajes y competencias que se esperan (Velasategui, 2015).

La evaluación se plantea como un instrumento al servicio del proceso de enseñanza – aprendizaje y se integra en las programaciones de aula y de área. Por consiguiente, la evaluación se concibe como un proceso continuo y personalizado que ha de tener por objeto tanto los aprendizajes de los estudiantes como la mejora de la práctica docente (Guía para la formación del proyecto COMBAS, 2014).

No debe confundirse evaluación con calificación. Calificar significa simplemente emitir un juicio acerca de los aprendizajes alcanzados por los estudiantes que se expresa asignándole valores numéricos, escalas y conceptos. El propósito de la evaluación va más allá del binomio éxito/fracaso, porque por muy rigurosa que sea, no garantiza el éxito en el aprendizaje del estudiante. Los resultados de la evaluación deben guiar los procesos de mejora del aprendizaje. Por consiguiente, la evaluación se entiende como un proceso más global dentro del cual se incluye la calificación (Guía para la formación del proyecto COMBAS, 2014).

Con respecto a los indicadores de logro, se afirma que permiten concretar en las programaciones didácticas los criterios de evaluación y los estándares de aprendizaje (que, a su vez, son los criterios que permiten definir los resultados de aprendizaje del estudiante y que deben ser observables y medibles). Así, los indicadores de logro se definen en la concreción de la técnica de cuantificación como, por ejemplo, en las fichas de control (para constatar las respuestas positivas o negativas), en las rúbricas (para describir el grado de dominio del estándar de aprendizaje) y en las escalas de valoración (para estimar el nivel de logro del aprendizaje). El docente es el responsable de su definición y puesta en práctica (Guía para la formación del proyecto COMBAS, 2014).

En la programación didáctica de área se tiene que definir los indicadores de logro de cada uno de los estándares de aprendizaje evaluables. Estos indicadores de logro se refieren a lo que pretendemos conseguir respecto al estándar de aprendizaje evaluable. Además, es necesario adecuar el indicador de logro definido en la

programación de área al momento y objetivos planteados en las programaciones didácticas de aula (Guía para la formación del proyecto COMBAS, 2014).

La evaluación se lleva a cabo mediante la utilización de técnicas con sus respectivos instrumentos que permiten verificar si los objetivos y competencias han sido alcanzados de acuerdo a los indicadores de logro propuestos. Existen dos tipos de técnicas de evaluación: la técnica de observación y la técnica de desempeño. Las técnicas de observación son auxiliares de las técnicas de desempeño y sirven para definir su valoración (Aceña, 2006).

En particular, la rúbrica es un instrumento de evaluación (utilizado en la técnica de la observación) en el que se establecen criterios por niveles mediante la disposición de escalas de calificación. Los elementos básicos de una rúbrica son: criterios, escala de calificación y los aspectos a evaluar. Se presenta en una tabla donde en el eje vertical se ponen los criterios que se van a evaluar y en el eje horizontal se ponen los rangos de calificación que se van aplicar en cada criterio. Los criterios representan lo que se espera que los estudiantes hayan aprendido (Aceña, 2006).

Además, la rúbrica sirve para tener una idea clara de lo que representa cada nivel en la escala de calificación. Por esa razón se describe el criterio en cada nivel. Además, el estudiante puede saber el aprendizaje que ha alcanzado y lo que le falta alcanzar. Los rangos deben representar los niveles de logro por medio de números (Aceña, 2006).

Por otro lado, con respecto al carácter de la evaluación es importante diferenciar tres dimensiones. (1) La evaluación formativa; encaminada a la evaluación de los procesos de enseñanza – aprendizaje que se dan en la práctica educativa cuyo fin es eminentemente pedagógico y cuyos resultados están expresados en términos de orientaciones que mejoren los procesos. (2) La evaluación sumativa; encaminada a la consecución de logros de aprendizaje (ya que se emite un juicio sobre ellos) cuya finalidad es evaluar productos, por lo que tiene siempre un sentido final de un proceso y un carácter social. (3) La evaluación continua; es consecuencia del concepto de evaluación inicial, evaluación procesual y evaluación final como eslabones

imprescindibles y complementarios, destacando que, en realidad, cada evaluación final es también una evaluación inicial que indica dónde se pondrán los mayores esfuerzos en el siguiente proceso. (Guía para la formación del proyecto COMBAS, 2014).

En una evaluación que tenga carácter continuo y formativo, a diferencia de una evaluación de carácter sumativo, el docente recogerá la información de manera permanente acerca de los métodos de enseñanza y del aprendizaje de sus estudiantes con especial atención en el nivel de adquisición de los estándares de aprendizaje evaluables. Los métodos utilizados deberán permitir la constatación de los progresos realizados por cada estudiante (Guía para la formación del proyecto COMBAS, 2014).

Por tanto, la evaluación debe ser transformadora de la práctica educativa. Debe partir de la consideración de que el estudiante es el protagonista del aprendizaje y que el docente es el orientador y estimulador del mismo y además, debe ser un instrumento que favorece la investigación científica y la innovación (Guía para la formación del proyecto COMBAS, 2014).

1.4. Marco conceptual

- **Cuanto vectorial local**

Se define como el vector velocidad angular localizado en el espacio tridimensional el cual determina la dirección de circulación del rayo de luz en cada ciclo de 2π rad. La acción de los cuantos vectoriales sobre los rayos de luz sería a toda escala espacial. (Monroy, 2013).

En el nivel microcósmico los cuantos vectoriales serían de gran magnitud con respecto a la escala humana. Su acción sobre los rayos de luz no debe despreciarse, porque sus efectos serían significativos.

En el nivel macrocósmico a gran escala los cuantos vectoriales serían de magnitud muy pequeña con respecto a la escala humana. Su acción sobre los rayos de luz se puede despreciar en experimentos terrestres. Sin embargo, cuando sus efectos

sobre los rayos de luz se suman a través de las grandes extensiones espaciales la acción de los cuantos vectoriales sería significativa, porque determinaría nuestra visión del universo a gran escala.

- **Cuanto vectorial tetradimensional**

Se define como un vector velocidad angular localizado en el espacio tetradimensional que actúa sobre un punto físico (estrella) del espacio tridimensional en cada ciclo de 4π sr generando los cuantos vectoriales locales. (Monroy, 2013).

Los rayos de luz y todos los objetos del universo observable serían afectados indirectamente por esta acción externa mediante los cuantos vectoriales locales del espacio tridimensional.

- **Enseñanza de la Física desde diversas perspectivas**

En las ciencias básicas, significa la inclusión de los nuevos conocimientos científicos generados de la investigación fundamental o aplicada para su enseñanza en las asignaturas afines o en tópicos avanzados de la Física como temas de frontera. (Programas y Líneas de Investigación 2014: *Enseñanza de la Física desde diversas perspectivas*, Vicerrectorado de Investigación, Universidad Nacional Mayor de San Marcos).

- **Espiral cónica**

Representa la trayectoria real de un rayo de luz cuando en el contexto del universo dinámico. Es una consecuencia de la acción del vector velocidad angular sobre un rayo de luz. La curvatura o enrollamiento de los rayos de luz significaría que la velocidad de la luz en el vacío varíe en el transcurso del tiempo. (Monroy, 2012).

- **Evaluación sumativa**

Tipo de evaluación que se entiende como progresión en la adquisición de competencias clave y del logro de objetivos de la etapa educativa. Se aplica sobre el final del proceso y sobre el nivel de logro de las metas planteadas, tanto para la evaluación del aprendizaje como de la enseñanza. El análisis de los resultados debe servir para definir el plan de mejora de la programación docente.

- **Frecuencia angular local**

Se define como la magnitud del cuanto vectorial local. Es una cantidad inversamente proporcional al radio de la extensión espacial. Es decir, a medida que aumenta la escala espacial disminuye la magnitud del cuanto vectorial y viceversa. (Monroy, 2013).

- **Indicadores de logro**

Los indicadores de logro son los comportamientos observables sobre el desempeño de los estudiantes que nos dicen si estos han alcanzado los objetivos de aprendizajes y competencias que se esperan. Los indicadores de logro permiten concretar en las programaciones didácticas los criterios de evaluación y los estándares de aprendizaje. (Guía para la formación del proyecto COMBAS, 2014).

- **Logros de aprendizaje**

Son los resultados acerca de lo que se espera que el estudiante sea capaz de hacer, comprender y/o sea capaz de demostrar al finalizar un proceso de aprendizaje (Velasategui, 2012).

- **Marco de referencia inercial**

Se define como el escenario ficticio en el cual no actúan fuerzas externas netas. Las leyes de Newton de la mecánica son aplicables en esta clase de marco de referencia. El concepto de marco de referencia inercial es una consecuencia del principio de inercia de Newton, el cual afirma que un cuerpo permanecerá en reposo o

tendrá movimiento rectilíneo uniforme si no hay fuerzas externas netas que actúen sobre él. (Einstein – Infeld, 1986).

- **Marco de referencia no inercial**

Escenario dinámico con aceleración en el cual no se cumplen las leyes de Newton de la mecánica. La Tierra es un marco de referencia no inercial, porque gira alrededor de su eje y a su vez alrededor del Sol. El Sol es un marco de referencia no inercial, porque gira alrededor del centro de la vía láctea. Las galaxias y los cúmulos de galaxias son marcos de referencia no inerciales, porque giran las unas alrededor de las otras. (Einstein – Infeld, 1986).

- **Onda electromagnética**

Perturbación conformada por un vector campo eléctrico y un vector campo magnético los cuales oscilan en direcciones mutuamente perpendiculares. Se utiliza para describir la propagación de la luz visible y de todas las radiaciones, tales como las radiaciones infrarroja, ultravioleta, microondas, etc. (Hecht – Zajac, 1999).

- **Polarización de la luz**

Consiste en la eliminación de todas las direcciones de vibración de una onda electromagnética que no están en cierta dirección definida. (Hecht – Zajac, 1999).

- **Principio del universo dinámico**

Proposición que indica la dinámica esencial del universo observable: todos los puntos del espacio físico fluyen, giran y vibran con independencia de la consciencia del observador. (Monroy, 2013).

- **Programación didáctica de área y de aula**

La programación didáctica es el documento mediante el cual el docente propone su plan de clases (hoja de ruta) sirviéndole como herramienta para orientar su trabajo

de enseñanza con la finalidad de lograr los aprendizajes y competencias esperados en los estudiantes. La programación de área se circunscribe al centro de estudios; la responsabilidad está a cargo de un equipo de docentes en un ciclo académico y los contenidos de información están basados en la concreción curricular. La programación didáctica de aula es la adaptación a las características concretas de un grupo de estudiantes; el contexto es el aula; la responsabilidad está a cargo del docente; los contenidos de información son sólo los que se desarrollan en la unidad de la asignatura y la evaluación es en función de criterios específicos de la unidad (indicadores de logro relacionados con las tareas incluidas en la unidad y rúbrica para cada instrumento, según lo que se evalúe con el instrumento). (Alcalá 2010).

- **Radio de acción del cuanto vectorial**

Define la extensión espacial ocupada por los rayos de luz y varía linealmente con el tiempo. (Monroy, 2013).

Puesto que los distintos niveles de estructuras físicas tienen radios típicos, entonces para cada uno de ellos existirán cuantos vectoriales representativos cuyas magnitudes permiten evaluar la velocidad de la luz en función del tiempo en el espacio libre existente en los sistemas naturales.

- **Régimen de Planck**

Umbral del nivel microcósmico que indica el criterio de que el tamaño y evolución de los sistemas físicos sólo tienen sentido para longitudes mayores o iguales que la longitud de 10^{-35} metros y para intervalos de tiempo mayores o iguales que 10^{-43} segundos. (Davies, 1986).

- **Relatividad especial**

Teoría de Einstein basada en la idea de que las leyes de la ciencia deben ser las mismas para todos los observadores, sea cual sea la velocidad con que se mueven, en ausencia de campos gravitatorios. (Hawking – Mlodinow, 2005).

- **Relatividad general**

Teoría de Einstein basada en la idea de que las leyes de la ciencia deben ser las mismas para todos los observadores, sea cual sea su movimiento. Explica la fuerza de gravedad como la curvatura de un espacio – tiempo con tres dimensiones espaciales y una temporal. (Hawking – Mlodinow, 2005).

- **Universo abierto**

Se define como el espacio físico que contiene discontinuidades: agujeros. El universo observable a gran escala se puede describir como el lugar geométrico de puntos sobre una superficie tridimensional (el espacio físico) con discontinuidades (o singularidades) que corresponden a las estrellas. (Monroy, 2010).

La idea de que el universo es un sistema abierto es una consecuencia de reinterpretar las fluctuaciones del vacío cuántico a través de la relación de incertidumbre energía – tiempo de Heisenberg.

- **Universo dinámico**

Se define como la totalidad del espacio físico tridimensional en el cual todos los puntos fluyen, giran, y vibran de acuerdo a un programa inherente. En esta concepción, la trayectoria de los rayos de luz dependerá de la forma en que se desplazan los puntos del espacio físico. (Monroy, 2013).

- **Universo dual**

El universo observable es un sistema dual: tiene dos superficies tridimensionales complementarias opuestas con simetría especular las cuales conforman una sola entidad. (Monroy, 2010).

Este concepto se refiere al anverso y al reverso del espacio físico, visto como una superficie tridimensional. Si el anverso corresponde al espacio físico real (en el cual

somos conscientes), entonces el reverso corresponderá al espacio físico virtual (en el cual somos inconscientes) y viceversa.

El hecho de que el universo a gran escala tenga simetría esférica significa que nuestra posición de observación sería un lugar especial: el centro de una esfera tetradimensional.

- **Vector de propagación**

Flecha que indica la dirección de propagación de la onda electromagnética y es perpendicular al plano de oscilación de los campos eléctrico y magnético. Su magnitud es inversamente proporcional a la longitud de onda de la radiación electromagnética. (Hecht – Zajac, 1999).

- **Velocidad variable de la luz**

En el contexto del universo dinámico la velocidad de la luz variaría con el tiempo, dependería de la magnitud del cuanto vectorial local asociado a la escala espacial en consideración y tendría dos direcciones opuestas: una asociada al espacio físico real y la otra asociada al espacio físico virtual (al inconsciente del observador). (Monroy, 2013).

CAPÍTULO II

EL PROBLEMA, OBJETIVOS, HIPÓTESIS Y VARIABLES

2.1. Planteamiento del problema

2.1.1. Descripción de la realidad problemática

En Perú, así como en otros países del mundo, la enseñanza universitaria de nuevos conocimientos científicos generados de la investigación básica se encuentra retrasada. Es decir, no se ha desarrollado al mismo ritmo que los avances científicos de la época. En los currículos universitarios, en particular de las ciencias básicas, no se indica cómo se deben incluir los nuevos conocimientos procedentes de la investigación científica en las asignaturas afines a la especialidad. Como consecuencia de ello la docencia universitaria se reduce principalmente a la reproducción de los temas divulgados en los libros de enseñanza. Por pertinentes que sean las estrategias de enseñanza – aprendizaje que se apliquen serán poco significativas para poder implantar en los estudiantes la cultura de la investigación, como lo exigiría cualquier legislación universitaria que sea consistente con los lineamientos de la UNESCO en la Declaración Mundial sobre la Educación Superior en el siglo 21 de 1998 y con el Proyecto Tuning para América Latina (2004 – 2007).

Desde los primeros treinta años del siglo 20, en que se desarrolló la Física cuántica, hasta la fecha ha pasado desapercibido el hecho de que la percepción del universo a toda escala espacial depende de la forma en la que se propaga la luz y del estado de la mente del observador. Pocos físicos en el mundo han reflexionado sobre el problema de la propagación rectilínea de la luz en el vacío con velocidad constante ($c = 300\,000$ km/s). Como consecuencia de ello surgieron paradojas en la Física contemporánea, como la famosa paradoja de Einstein – Podolsky – Rosen (EPR), el enigma de la polarización de la luz, la radiación de Cherenkov, la paradoja de Ehrenfest y otras más cuya discusión está aún vigente.

La razón es que en todos estos experimentos se admite sin discusión la propagación rectilínea de la luz en el microcosmos, pese a que en este nivel el régimen es ultra acelerado por lo que afectaría la trayectoria de los rayos de luz y el valor de la velocidad de la luz en el vacío. Además, las limitaciones de nuestra percepción sensorial impiden detectar el cambio de dirección de los rayos de luz debido a las condiciones normales de estabilidad a la que nos encontramos con el entorno.

En los textos de enseñanza de Física se divulgan los experimentos que permitieron medir la velocidad de la luz en el espacio libre, pero no se enfatiza explícitamente que el espacio libre es considerado un medio inercial. Esta omisión ha seguido manteniéndose hasta ahora, pese a que el universo se concibe como un sistema dinámico no inercial, donde cada punto del espacio no debe imaginarse inerte ni con movimiento de traslación uniforme. En un modelo coherente de universo dinámico el desplazamiento de los puntos del espacio no sería necesariamente en línea recta, la trayectoria real de los rayos de luz en el espacio libre no sería rectilínea y la velocidad de la luz podría variar con el tiempo. Sin embargo, nadie ha podido diseñar un experimento para medir la velocidad de la luz en un medio ultra acelerado con movimiento de rotación.

A raíz de los resultados de experimentos terrestres y astronómicos se proclamó la constancia de la velocidad de la luz en el vacío a través del segundo postulado de la teoría de la relatividad especial de Einstein. Esta propuesta se mantuvo en la teoría de la relatividad general y su validez se ha admitido correcta hasta ahora en los niveles macrocósmico y microcósmico. Por esta razón en los libros de enseñanza de la Física contemporánea se describe y se admite este postulado sin mayor discusión. Pero, este postulado presenta dos problemas sutiles. El primero es que parece inconcebible que el valor de la velocidad de la luz c no sea afectada en el macrocosmos donde la fuerza gravitatoria puede ser muy intensa y en el microcosmos por la fuerza electromagnética así como por las fuerzas nucleares débil y fuerte, que son mucho más intensas que la fuerza gravitatoria. El segundo se refiere a la propagación rectilínea de la luz en el microcosmos. Es claro que los experimentos citados anteriormente fueron realizados a escala macroscópica donde se observan a los rayos de luz en línea recta, sin embargo el postulado de la constancia de c se propuso de modo absoluto a toda escala espacial. Entonces, ¿cuál es la trayectoria real de los rayos de luz en el nivel

microscópico? ¿Variará la velocidad de la luz cuando sigue esta trayectoria? Además, existe una evidente incongruencia cuando se aplica el segundo postulado de la relatividad especial (formulado en un sistema inercial) en el universo observable, porque éste se concibe en la cosmología contemporánea como un sistema dinámico no inercial.

Sin embargo, en la Física actual no existe ningún principio físico que indique la dinámica primaria del universo. Por otro lado, recordemos que las ecuaciones de Maxwell de la teoría electromagnética están formuladas en un medio inercial y por consiguiente, no son aplicables en un medio con aceleración. Entonces surge la siguiente paradoja sutil: las ecuaciones de Maxwell están formuladas en un medio inercial, pero el campo electromagnético el cual se extiende por el medio es un sistema no inercial, porque los campos eléctrico y magnético oscilan en cada punto del espacio y en cada instante de tiempo. Ahora bien, si las oscilaciones de los campos son armónicas entonces debe existir un vector velocidad angular perpendicular al plano de vibración de los campos el cual obligará al vector de propagación a cambiar de dirección en cada instante de tiempo y sería inadecuado describir la trayectoria de un rayo de luz en línea recta a toda escala espacial. Por tanto, no es coherente desprestigiar el efecto de los vectores velocidad angular (es decir, de los cuantos vectoriales) sobre los rayos de luz.

Por consiguiente, la ausencia de un nuevo principio físico que indique de manera simple la dinámica primordial del universo imposibilitó hallar una ecuación que describa la variación de la velocidad de la luz con el tiempo la cual sea consistente con la trayectoria de los rayos de luz en el espacio libre. En consecuencia, en los textos de enseñanza de la Física siempre se divulgará que la velocidad de la luz en el vacío es una constante universal y que su propagación en el espacio libre siempre será en línea recta. Lamentablemente la enseñanza de la teoría de la relatividad general de Einstein, además de que no es lo suficientemente simple y manejable para que sea posible el aprendizaje en la mayoría de estudiantes universitarios de ciencias físicas, mantiene la validez del principio de la constancia de la velocidad de la luz, ignorándose que nuestra visión de los fenómenos naturales, a toda escala espacial, depende de la forma en que se propaga la luz y del estado de la mente del observador.

2.1.2. Antecedentes teóricos

Se ha investigado la trayectoria de los rayos de luz considerando el campo electromagnético como el marco de referencia no inercial. Un razonamiento geométrico del cambio de dirección del vector de propagación de la onda electromagnética conduce a la conclusión de que la trayectoria real de un rayo luz en el espacio libre procedente de una fuente luminosa puntual no es una línea recta sino una espiral cónica. La curvatura de los rayos luminosos tendría implicaciones relevantes en nuestra concepción de la dinámica del universo observable, ya que significaría que la velocidad de la luz en el vacío varíe.

También se ha introducido la propuesta de que el universo es un sistema dinámico en el sentido de que todo fluye, todo gira y todo vibra con independencia del observador. También se ha propuesto que el universo es un sistema abierto en el sentido de que actuarían vectores velocidad angular desde un espacio tetradimensional a través de agujeros del espacio tridimensional. El efecto de cada uno de ellos sería engendrar vectores velocidad angular localizados en el espacio tridimensional (cuantos vectoriales locales). La acción de los cuantos vectoriales sobre los rayos de luz determinaría su trayectoria real. Como consecuencia de ello la velocidad de la luz variaría con el tiempo para una magnitud dada del cuanto vectorial local asociado a la escala espacial en consideración.

El modelo del cuanto vectorial local $\vec{\omega}$ se define como el vector velocidad angular localizado en el espacio tridimensional el cual determina la dirección de circulación del rayo de luz en cada ciclo de 2π rad. Es cuantificable a toda escala espacial, su magnitud es inversamente proporcional al radio de la extensión espacial r y está dada por expresión:

$$\omega = \frac{2\pi C}{3r}$$

En el contexto del universo dinámico la velocidad de la luz variaría con el tiempo, dependería de la magnitud del cuanto vectorial local asociado a la escala espacial en consideración y tendría dos direcciones opuestas: una asociada al espacio físico real y

la otra asociada al espacio físico virtual (al inconsciente del observador). La velocidad variable de la luz se describe por la ecuación:

$$c_{\omega}(t) = \pm c \sqrt{1 + (\omega t / 3)^2}$$

Por otro lado, en el contexto de la docencia universitaria la línea de investigación *Enseñanza de la Física desde diversas perspectivas* (promovida por el Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos a través de los Programas y Líneas de Investigación 2014) sugiere incluir temas de frontera de la Física que se han desarrollado en estudios de investigación dentro de las asignaturas afines.

La UNESCO, el proyecto Tuning para América Latina, así como investigadores de la docencia universitaria, han señalado de modo explícito o implícito que la enseñanza de los nuevos conocimientos científicos no se ha desarrollado al mismo ritmo que el progreso de la ciencia. Esto implica que a través de las legislaciones universitarias se norme la reorientación de los currículos con el propósito de transmitir los últimos adelantos de la ciencia mediante la enseñanza universitaria. Por consiguiente, en la universidad del siglo 21 los países emergentes deben adoptar principalmente una enseñanza científica y tecnológica pertinente que represente el instrumento esencial no sólo para la formación de científicos, sino también para fomentar la innovación y las aptitudes prácticas, facilitando así su participación en las sociedades.

Desde el punto de vista de la programación docente la selección de los contenidos constituye la base sobre la cual se programan las actividades de enseñanza – aprendizaje, así como la evaluación de los aprendizajes con el fin de alcanzar lo expresado en los objetivos. Se deben seleccionar los contenidos de conocimiento (o conceptuales), los contenidos de desempeño (o procedimentales) así como el producto (o actitudinales) del estudiante que se espera tener. Cuando se seleccionan los contenidos de información, se planifica a través de qué actividades pertinentes se espera los logros de aprendizaje. A su vez, las actividades de aprendizaje se diferencian en tres etapas: preinstruccional, coinstruccional y posinstruccional. Finalmente la evaluación de los aprendizajes se realiza mediante la utilización de

técnicas con sus respectivos instrumentos que permiten verificar si los objetivos y competencias han sido alcanzados de acuerdo a los indicadores de logro propuestos.

2.1.3. Definición del problema

Problema general:

- ¿De qué modo la aplicación del modelo de los cuantos vectoriales en la propagación de la luz es un factor que influye en el logro del aprendizaje de la velocidad variable de la luz en estudiantes de la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos?

Problemas específicos:

- ¿En qué medida la evaluación del radio de acción del cuanto vectorial es un factor que influye en el logro del aprendizaje de la velocidad variable de la luz en estudiantes de la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos?
- ¿En qué medida la evaluación de la magnitud del cuanto vectorial es un factor que influye en el logro del aprendizaje de la velocidad variable de la luz en los estudiantes de la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos?

2.2. Finalidad y objetivos de la investigación

2.2.1. Finalidad

Con esta investigación, mi finalidad es demostrar el logro del aprendizaje de la velocidad variable de la luz en estudiantes de la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos mediante la aplicación del modelo de los cuantos vectoriales en la propagación de la luz en el vacío.

2.2.2. Objetivos General y Específicos

Objetivo general:

- Determinar si la aplicación del modelo de los cuantos vectoriales en la propagación de la luz es un factor que influye en el logro del aprendizaje de la velocidad variable de la luz en estudiantes de la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Objetivos específicos:

- Determinar que la evaluación de la ecuación del radio de acción del cuanto vectorial es un factor de influencia en el logro del aprendizaje de la velocidad variable de la luz en estudiantes de la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Determinar que la evaluación de la ecuación de la magnitud del cuanto vectorial es un factor de influencia en el logro del aprendizaje de la velocidad variable de la luz en estudiantes de la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

2.2.3. Delimitación del estudio

El estudio se circunscribe al ámbito académico de la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos en Lima, Perú.

El tema de estudio está dirigido a 31 estudiantes del cuarto y quinto año de la carrera profesional de Física a través de asignaturas afines al tema.

El alcance teórico comprende la revisión de la teoría electromagnética de la luz hasta la introducción del modelo de los cuantos vectoriales en la propagación de la luz en el vacío.

El alcance práctico, en el contexto de la enseñanza universitaria de la Física, significa la inclusión de los nuevos conocimientos científicos generados de la investigación fundamental en las asignaturas afines y su aprendizaje.

2.2.4. Justificación e importancia del estudio

La presente investigación está enfocada a cultivar la investigación científica a través de la docencia universitaria. Puesto que la investigación constituye una función esencial y obligatoria de la universidad, es una necesidad la enseñanza de los nuevos conocimientos científicos generados del desarrollo de proyectos de investigación. Los nuevos conocimientos pueden ser incluidos como el contenido temático de unidades didácticas en asignaturas pertinentes. Se considera de especial importancia la enseñanza del modelo del cuanto vectorial y su influencia en el logro del aprendizaje de la velocidad variable de la luz en el vacío. Estos temas pueden ser incluidos en una unidad didáctica de asignaturas afines con la Física contemporánea, porque permitirán una mayor comprensión de la dinámica del universo observable a toda escala espacial.

La investigación se ha elaborado para demostrar que la aplicación del modelo de los cuantos vectoriales en la propagación de la luz es un factor que influye en el logro del aprendizaje de la velocidad variable de la luz en estudiantes de la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Por consiguiente, en cualquier ciencia básica se podría elaborar un estudio similar para demostrar el logro del aprendizaje de nuevos conocimientos generados de la investigación científica en estudiantes universitarios considerándolos como temática en una o más unidades didácticas de asignaturas pertinentes.

El estudio está dirigido a estudiantes que cursan el cuarto y quinto año de la carrera profesional de Física en la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Los resultados de la investigación no solo se utilizarán para sustentar la idea de la inclusión de nuevos conocimientos científicos producidos por la investigación básica en la temática de asignaturas afines sino también permitirá promover la participación de los estudiantes como colaboradores de proyectos de investigación y por consiguiente, iniciarse en la labor investigadora.

2.3. Hipótesis y Variables

2.3.1. Supuestos teóricos

La acción del cuanto vectorial sobre un rayo de luz debe producir un cambio de dirección del vector de propagación de la onda electromagnética, por lo que la trayectoria real de un rayo de luz no sería una línea recta sino una especie de espiral cónica. La trayectoria aparentemente rectilínea sólo sería posible si el sistema de referencia del observador es inercial.

El desplazamiento de los puntos del espacio físico es de acuerdo a las ecuaciones paramétricas de una espiral cónica. Por consiguiente, los rayos de luz deben seguir dicha trayectoria. A partir de las ecuaciones paramétricas de la espiral cónica se deduce de modo natural que la velocidad de la luz en el vacío varía con el tiempo para una magnitud dada del cuanto vectorial.

Con la comprensión y la aplicación de las ecuaciones que describen el radio de acción del cuanto vectorial y de su magnitud, el estudiante podrá adquirir un aprendizaje significativo del modelo de los cuantos vectoriales y en consecuencia de la ecuación de la velocidad variable de la luz, a través de una secuencia didáctica adecuada. Los instrumentos de evaluación pertinentes son: una prueba objetiva para evaluar conocimientos, una prueba desarrollada para evaluar desempeños y exposiciones orales para evaluar el producto del estudiante.

La programación didáctica es en el contexto del aula, adaptada a las características concretas de un grupo de estudiantes de la Facultad de Ciencias Físicas de la UNMSM. Los objetivos (o la selección de logros de aprendizaje) serán específicos para la unidad de la asignatura. Los contenidos de información son específicos, es decir, se refieren principalmente a los nuevos conocimientos que se van a incluir en la unidad de la asignatura. La evaluación es en función de criterios específicos de la unidad, consignando los indicadores de logro.

Por consiguiente, los supuestos teóricos anteriores, los cuales deben conducir a la formulación de las hipótesis del estudio, sugieren elaborar la programación docente mediante sesiones de aprendizaje seleccionando logros de aprendizaje, contenidos de información, actividades de aprendizaje y la evaluación de los aprendizajes.

- **Selección de logros de aprendizaje y contenidos de información**

Logros de aprendizaje: los estudiantes explican el efecto de los cuantos vectoriales sobre los rayos de luz en todos los niveles de estructuras físicas. Describen el contenido conceptual de la ecuación de la velocidad variable de la luz y su evaluación en función del tiempo para una magnitud dada del cuanto vectorial mediante la elaboración de un esquema de exposición oral.

Contenidos de información: propagación de la luz en el vacío, el modelo del cuanto vectorial y la ecuación de la velocidad variable de la luz.

Producto: elaboración de un esquema de exposición oral con extensión de la teoría.

- **Secuencia didáctica**

Etapa preinstruccional (inicio): se activan los conocimientos previos de los estudiantes recordando el patrón de rayos de luz emitidos por una fuente puntual, la propagación rectilínea, la polarización de la luz y los fundamentos de la teoría electromagnética de la luz.

Etapa coinstruccional (proceso): comienza con el enlace entre los conocimientos previos y la nueva información. Los estudiantes serán capaces de interpretar el cambio de dirección del vector de propagación y la trayectoria del rayo de luz en espiral cónica para realizar el enlace mediante la comparación del campo electromagnético con las ecuaciones paramétricas que describen el desplazamiento de cada punto del sustrato (espacio físico) de acuerdo a lo que prescribe el principio del universo dinámico. Luego, trabajando en equipo, los estudiantes proceden a determinar las constantes contenidas

en las ecuaciones paramétricas. Con ello el modelo del cuanto vectorial local quedará totalmente determinado y por tanto, la ecuación de la velocidad variable de la luz.

Etapa posinstruccional (salida): se realiza una retroalimentación sobre la nueva información. El docente plantea preguntas conceptuales y problemas sobre los nuevos conocimientos. Los estudiantes, trabajando en grupos, analizan los resultados obtenidos al evaluar las fórmulas del cuanto vectorial y de la velocidad variable de la luz en todos los niveles de estructuras físicas. Los estudiantes serán capaces de elaborar un comentario sobre los nuevos conocimientos. También podrán realizar un resumen del estudio a través de un mapa conceptual, mental o semántico.

▪ **Evaluación de los aprendizajes**

Al finalizar la unidad temática se administra una prueba objetiva de preguntas conceptuales, para evaluar los conocimientos adquiridos sobre el modelo del cuanto vectorial y la velocidad variable de la luz. Para evaluar desempeños, mediante una prueba escrita (tipo desarrollo), los estudiantes resuelven problemas relacionados con el modelo del cuanto vectorial y con la ecuación de la velocidad variable de la luz. Finalmente para evaluar el producto, los estudiantes realizan exposiciones orales tratando de profundizar y extender el nuevo conocimiento.

La evaluación de los aprendizajes que se realiza en el presente trabajo no es de carácter continuo ni formativo sino de carácter sumativo. Se aplica sobre el final del proceso de enseñanza. Su finalidad es evaluar productos, ya que se emite un juicio en términos numéricos respecto a la consecución de logros de aprendizaje de nuevos conocimientos. El análisis de los resultados debe servir para definir el plan de mejora del estudio y poder extenderlo a mayor escala.

La programación didáctica de aula (con evaluación de carácter sumativo) que se tiene en cuenta en la presente investigación puede mostrarse mediante un modelo de sílabo que sea consistente con el enfoque por competencia. El sílabo, además de ser un instrumento académico orientador del proceso de enseñanza y aprendizaje, representa el documento oficial para el desarrollo de las actividades programadas en una asignatura.

Un ejemplo de unidad didáctica en el sílabo que se puede elaborar para incluir la enseñanza de los nuevos conocimientos generados de la investigación científica descritos en este trabajo, donde se satisfacen los requerimientos de la programación de aula y el carácter sumativo de la evaluación, es como se muestra a continuación.

UNIDAD DIDÁCTICA (*):EL MODELO DELCUANTOS VECTORIALES Y LA VELOCIDAD VARIABLE DE LA LUZ (VVL)			
Logro de la Unidad:			
Al finalizar la unidad los estudiantes serán capaces de exponer la formulación matemática y el significado del principio del universo dinámico; elaborar gráficas para explicar el comportamiento del cuanto vectorial en función de su radio de acción; elaborar gráficas para explicar el comportamiento de la velocidad variable de la luz con el tiempo y discutir las implicaciones cosmológicas.			
Semana	Horas	Contenidos	Estrategia metodológica
1	6	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Estudio tradicional de la propagación de la luz ▪ La propagación rectilínea ▪ Naturaleza vectorial de la luz ▪ Polarización de la luz 	Expositiva dialogada
		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ciclo de oscilación del vector eléctrico ▪ El cambio de dirección del vector de propagación ▪ Curvatura de los rayos de luz ▪ Comparación del campo electromagnético con el movimiento de los puntos del espacio 	Organización de la información Análisis de lectura
2	6	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Principio del universo dinámico ▪ Ecuaciones paramétricas del rayo de luz ▪ El modelo del cuanto vectorial ▪ Criterio del régimen de Planck 	Expositiva dialogada Análisis de lectura
		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ecuación de la velocidad variable de la luz ▪ Comportamiento de la velocidad variable de la luz ▪ La doble dirección de la velocidad de la luz ▪ Evaluación de la velocidad variable de la luz 	Discusión
3	6	<p style="text-align: center;">Prueba de conocimientos (Conceptual)</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Significado del principio del universo dinámico ▪ Interpretación del radio de acción del cuanto vectorial ▪ Interpretación de la magnitud del cuanto vectorial ▪ Cuantificación del cuanto vectorial ▪ Variación de la rapidez de la luz ▪ Rapidez de la luz en los niveles microcósmico y macrocósmico ▪ Interpretación de la doble dirección de la velocidad de la luz ▪ Interpretación de los términos del desarrollo de la ecuación de la velocidad variable de la luz 	Realimentación de la información
		<p style="text-align: center;">Prueba de desempeño (Procedimental)</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Tiempo de acción del cuanto vectorial en los niveles microcósmico y macrocósmico ▪ Ciclo de operación del cuanto vectorial en todos los niveles de estructuras físicas ▪ Rapidez de la luz en cada ciclo de operación del cuanto vectorial ▪ Rapidez de la luz en todos los niveles de estructuras físicas 	Realimentación de la información
4	6	<p style="text-align: center;">Producto (Actitudinal)</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Exposición sobre el significado del principio del universo dinámico ▪ Elaboración de la gráfica del cuanto vectorial ▪ Elaboración de la gráfica de la VVL ▪ Presentación sobre la extensión de la teoría 	Trabajo en equipo Exposición – Diálogo
Instrumentos de evidencia del logro de aprendizaje			
Conocimiento		Desempeño	Producto
Escala de valoración		Rúbrica	Ficha de control
Carácter de la evaluación: Sumativa			
Fuentes de información			
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Monroy, O., (2012). <i>Propagación de la luz en un marco no inercial</i>, Perspectiv@s N° 9, año 9, Fondo editorial UIGV, Perú. ▪ Monroy, O., (2013). <i>Velocidad variable de la luz</i>, Perspectiv@s N° 10, año 10, Fondo editorial UIGV, Perú. ▪ Tipler, P., (2015). <i>Física Moderna</i>, Editorial Reverté, S.A, España. 			

2.3.2. Hipótesis General y Específicas

Hipótesis general:

- La aplicación del modelo de los cuantos vectoriales en la propagación de la luz en el vacío es un factor que influye significativamente en el logro del aprendizaje de la velocidad variable de la luz en estudiantes de la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Hipótesis específicas:

- La evaluación del radio de acción del cuanto vectorial influye significativamente en el logro del aprendizaje de la velocidad variable de la luz en estudiantes de la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- La evaluación de la magnitud del cuanto vectorial influye significativamente en el logro del aprendizaje de la velocidad variable de la luz en estudiantes de la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

2.3.3. Variables, Dimensiones e Indicadores de logro

Tabla 2.1. Variables y Dimensiones

VARIABLES	DIMENSIONES
V₁: Aplicación del modelo de los cuantos vectoriales en la propagación de la luz en el vacío.	1.1) Evaluación del radio de acción del cuanto vectorial. 1.2) Evaluación de la magnitud del cuanto vectorial.
V₂: El logro del aprendizaje de la velocidad variable de la luz en estudiantes de la Facultad de Ciencias Físicas de la UNMSM.	2.1) Contenido conceptual de la ecuación de la velocidad variable de la luz. 2.2) Aplicación de la ecuación de la velocidad variable de la luz.

Tabla 2.2. Operacionalización de la variable V_1

CRITERIOS	INDICADORES DE LOGRO	ÍTEMS
CONOCIMIENTOS	• Comprende el significado físico del principio del universo dinámico.	1.1
	• Conoce el significado físico de la ecuación del radio de acción del cuanto vectorial local.	1.2
	• Conoce el significado físico del modelo del cuanto vectorial local.	1.3
	• Comprende la acción del cuanto vectorial y su efecto sobre los rayos de luz.	1.4
	• Entiende la relación entre los cuantos vectoriales y sus radios de acción a toda escala espacial.	1.5
DESEMPEÑOS	• Determina el tiempo de acción del cuanto vectorial en los niveles nuclear y atómico.	1.6
	• Determina el tiempo de acción del cuanto vectorial en las escalas humana, solar y Vía Láctea.	1.7
	• Calcula y explica la magnitud del cuanto vectorial en los niveles nuclear y atómico.	1.8
	• Calcula y explica la magnitud del cuanto vectorial en las escalas humana, solar y Vía Láctea.	1.9
	• Demuestra que el ciclo de operación del cuanto vectorial es el mismo en todos los niveles de estructuras físicas.	1.10

Tabla 2.3. Operacionalización de la variable V_2

CRITERIOS	INDICADORES DE LOGRO	ÍTEMS
CONOCIMIENTOS	• Comprende el comportamiento de la rapidez de la luz en el vacío en la nueva concepción del universo dinámico.	2.1
	• Interpreta el comportamiento de la rapidez de la luz en los niveles microcósmico y macrocósmico.	2.2
	• Identifica el límite de constancia de la velocidad de la luz.	2.3
	• Interpreta el significado de la doble dirección de la velocidad de la luz.	2.4
	• Interpreta el significado de los términos del desarrollo de la ecuación de la velocidad variable de la luz.	2.5
DESEMPEÑOS	• Demuestra que la rapidez de la luz en cada ciclo de operación del cuanto vectorial es la misma a toda escala.	2.6
	• Determina y explica la rapidez de la luz en los niveles nuclear y atómico.	2.7
	• Determina y explica la rapidez de la luz en la escala humana.	2.8
	• Determina y explica la rapidez de la luz a escala del sistema solar y de la vía láctea.	2.9
	• Compara la rapidez de la luz en los niveles nuclear, atómica, sistema solar y Vía Láctea respecto a la escala humana.	2.10

Tabla 2.4. Operacionalización para evaluar el producto de los estudiantes

	CRITERIOS	INDICADORES DE LOGRO
PRODUCTO	(1) Descripción del principio del universo dinámico.	Expone explícitamente y fundamenta la formulación matemática del principio del universo dinámico.
	(2) Comportamiento del cuanto vectorial local.	Construye y explica la gráfica del cuanto vectorial en función de su radio de acción.
	(3) Comportamiento de la velocidad variable de la luz.	Construye y explica la gráfica de la velocidad variable de la luz en función del tiempo para los distintos niveles de estructuras físicas.
	(4) Extensión y profundización de la teoría.	Elabora un análisis tensorial sobre la cinemática del sustrato (espacio físico) y deduce el tensor cuanto vectorial local.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

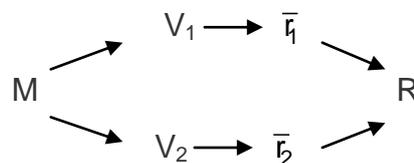
3.1. Tipo y Nivel del estudio

El tipo de investigación es aplicada. Se parte de los nuevos conocimientos generados de la investigación básica en Física (el cuanto vectorial y la velocidad variable de la luz) para luego transmitirlos a través de la enseñanza universitaria.

El nivel de la investigación es evaluativa, porque la meta es valorar logros de aprendizaje de los nuevos conocimientos científicos en estudiantes mediante pruebas de conocimientos, pruebas de desempeños, así como valorando el producto de los estudiantes en el contexto de la nueva teoría.

3.2. Diseño de la investigación

El diseño es no experimental. No se manipulan deliberadamente las variables V_1 y V_2 . Es decir, el modelo del cuanto vectorial y la deducción de la ecuación de la velocidad variable de la luz se presentan a los estudiantes sin modificaciones de principio. Por consiguiente, el diseño es de acuerdo al siguiente esquema:



M: muestra representativa de las variables V_1 y V_2

\bar{r}_1 : media ponderada general de las calificaciones correspondiente a la variable V_1

\bar{r}_2 : media ponderada general de las calificaciones correspondiente a la variable V_2

R: nivel de influencia entre las variables V_1 y V_2 (comparación de \bar{r}_1 y \bar{r}_2)

El diseño de la investigación consiste en una muestra de estudiantes seleccionados. Cada una de las variables V_1 y V_2 tiene dos dimensiones. A su vez, para cada una de las dimensiones de las variables se proponen indicadores de logro y para cada uno de los indicadores se proponen ítems basados en criterios para evaluar conocimientos y de desempeños. Además, las dimensiones de cada una de las variables del estudio son evaluadas simultáneamente debido a que están estrechamente relacionadas a través de las ecuaciones correspondientes.

Considérense las dimensiones (1.1) y (1.2) de la variable V_1 descritas en la tabla 2.1. La valoración de estas dimensiones se realiza mediante indicadores de logro bajo criterios de conocimientos y desempeños. Por consiguiente, se obtendrán resultados parciales r_{11} , respecto a conocimientos y r_{12} , respecto a desempeños correspondiente a la variable V_1 . Así, el resultado final para esta variable será el valor medio:

$$\bar{r}_1 = \frac{1}{2}(r_{11} + r_{12})$$

Análogamente, considérense las dimensiones (2.1) y (2.2) de la variable V_2 descritas en la tabla 2.1. La valoración de estas dimensiones se realiza mediante indicadores de logro bajo criterios de conocimientos y desempeños. Por consiguiente, se obtendrán resultados parciales r_{21} , respecto a conocimientos y r_{22} , respecto a desempeños correspondiente a la variable V_2 . Así, el resultado final para esta variable será el valor medio:

$$\bar{r}_2 = \frac{1}{2}(r_{21} + r_{22})$$

El nivel de influencia R entre las variables V_1 y V_2 se expresa por una sencilla comparación entre \bar{r}_1 y \bar{r}_2 , lo cual conduce a la verificación de la hipótesis general del estudio. Por consiguiente, la condición para que V_1 influya en V_2 es:

$$\bar{r}_1 > \bar{r}_2$$

Además, las hipótesis específicas del estudio también deben verificarse. Por consiguiente, las condiciones son:

$$r_{11} > r_{21} \quad \text{y} \quad r_{12} > r_{22}$$

3.3. Población y Muestra

La población la conforman todos los estudiantes de la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. La unidad de análisis son todos los estudiantes matriculados en el cuarto y quinto año de la carrera profesional de Física, así como también los propios instrumentos de evaluación. Además, la unidad de muestreo es cada estudiante del cuarto o quinto año.

Por consiguiente, el tipo de muestreo es no probabilístico (o dirigido), porque se han seleccionado estudiantes matriculados en el cuarto y quinto año, siendo el tamaño de la muestra de 31 estudiantes.

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La técnica a utilizar será la resolución de problemas. Los criterios de evaluación para cada una de las variables V_1 y V_2 serán de conocimiento, desempeño y producto. Se propondrán 5 ítems básicos sobre conocimientos (conceptuales) y 5 ítems básicos sobre desempeños (procedimentales) para cada una de las variables del estudio V_1 y V_2 , ordenados de acuerdo al desarrollo de los contenidos. El producto se evaluará mediante la técnica de observación utilizando indicadores de logro asociados a las variables V_1 y V_2 .

De acuerdo con la finalidad del estudio y por tratarse de un nivel de investigación con orientación educacional, cuya meta es valorar conocimientos, desempeños y el producto de los estudiantes, se proponen los siguientes instrumentos de medición:

Los instrumentos de recolección de datos que se utilizan para la variable V_1 son: una prueba objetiva constituida por un cuestionario de 5 ítems conceptuales, con

escala valorativa para los aciertos, y una prueba escrita (tipo desarrollo) constituida por 5 ítems procedimentales, con rúbrica para su valoración (véase el Anexo 01).

Análogamente, los instrumentos de recolección de datos que se utilizan para la variable V_2 son: una prueba objetiva constituida por un cuestionario de 5 ítems conceptuales, escala valorativa para los aciertos, y una prueba escrita (tipo desarrollo) constituida por 5 ítems procedimentales, con rúbrica para su valoración (véase el Anexo 02).

Además, el instrumento de calificación que se utiliza para valorar el producto de los estudiantes, correspondiente a las variables V_1 y V_2 , es una ficha de cotejo (véase el Anexo 03).

Por consiguiente, teniendo en cuenta las técnicas y los instrumentos de recolección de datos a utilizar, se pueden definir con mayor exactitud las cantidades r_{11} , r_{12} , r_{21} , y r_{22} , como sigue: r_{11} denotará la media ponderada de las calificaciones de los estudiantes respecto al criterio de conocimientos para la variable V_1 ; r_{12} denotará la media ponderada de las calificaciones de los estudiantes respecto al criterio de desempeños para la variable V_1 ; r_{21} denotará la media ponderada de las calificaciones de los estudiantes respecto al criterio de conocimientos para la variable V_2 y r_{22} denotará la media ponderada de las calificaciones de los estudiantes respecto al criterio de desempeños para la variable V_2 .

CAPÍTULO IV

PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

4.1. Presentación de resultados

En esta sección se muestran los resultados obtenidos para las variables del estudio. Se evalúan conocimientos y desempeños de los estudiantes a partir de indicadores de logro asociados a las dimensiones de las variables. Finalmente se evalúa el producto de los estudiantes a partir de indicadores de logro los cuales están estrechamente relacionados con las dos variables del estudio.

4.1.1. Resultados obtenidos para la primera variable V_1 : el modelo de los cuantos vectoriales

Se presentan los resultados correspondientes a las dos dimensiones de la variable V_1 : (1.1) Evaluación del radio de acción del cuanto vectorial y (1.2) Evaluación de la magnitud del cuanto vectorial. Se utilizaron los cuestionarios de ítems junto con los instrumentos valorativos que se muestran en el Anexo 01 para evaluar conocimientos y desempeños de los estudiantes. Los ítems del (1.1) al (1.5) corresponden al criterio de evaluación sobre conocimientos y los ítems del (1.6) al (1.10) corresponden al criterio de evaluación sobre desempeños de acuerdo a la tabla 2.2 de operacionalización de la variable V_1 .

La tabla 4.1 muestra la valoración de las dimensiones (1.1) y (1.2) que conforman la variable V_1 correspondiente al criterio sobre conocimientos. También, en el gráfico 01 de la figura 27 se muestra la distribución de los porcentajes de aciertos en función del número de aciertos obtenido en la prueba objetiva de conocimientos de acuerdo a la ficha valorativa mostrada en el Anexo 01. La media ponderada de las calificaciones respecto al criterio de conocimientos es: $r_{11} = 2.46$.

Tabla 4.1. Valoración de las dimensiones (1.1) y (1.2) de la variable V_1 (Conocimientos)

Respuesta	Cantidad de estudiantes	Frecuencia	Porcentaje (%)	Media ponderada	Media ponderada (%)
5	28	140	90,32	4,61	93,70
4	3	12	9,68	0,31	6,30
3	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0
Total	31	152	100 %	4,92	100 %
				2,46	50 %

Gráfico 01

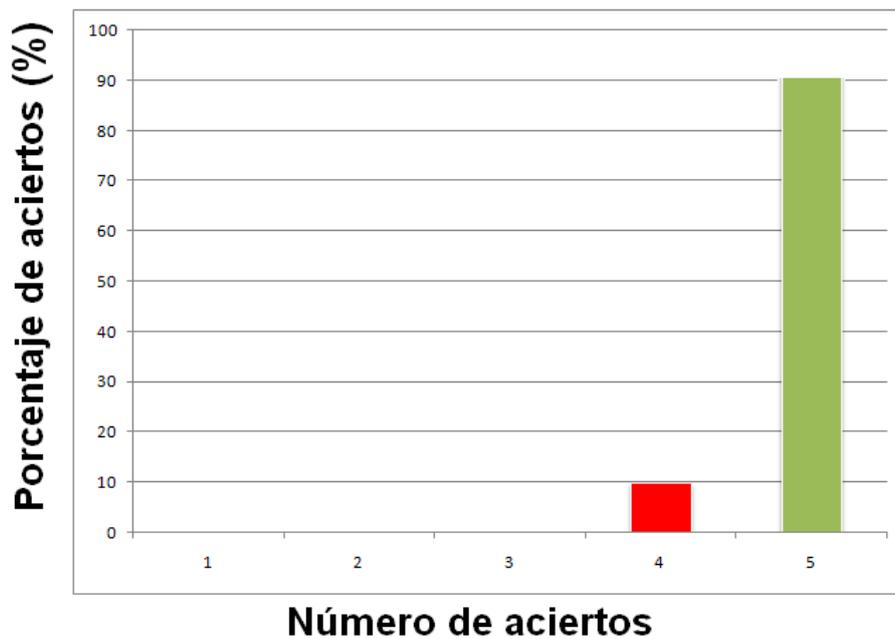


Figura 27. Distribución porcentual de aciertos en función del número de aciertos obtenido en la prueba objetiva de conocimientos correspondiente a la variable V_1 .

La tabla 4.2 muestra la valoración de las dimensiones (1.1) y (1.2) que conforman la variable V_1 correspondiente al criterio sobre desempeños. También, en el gráfico 02 de la figura 28 se muestra la distribución de porcentajes de las calificaciones en función de la puntuación obtenida de acuerdo a la rúbrica utilizada para valorar desempeños,

que se muestra en el Anexo 01. La media ponderada de las calificaciones respecto a desempeños es: $r_{12} = 1,48$.

Tabla 4.2. Valoración de las dimensiones (1.1) y (1.2) de la variable V_1 (Desempeños)

Puntuación	Cantidad de estudiantes	Frecuencia	Porcentaje (%)	Media ponderada	Media ponderada (%)
5	15	75	48,39	2,82	63,66
4	10	40	32,26	1,20	27,09
3	6	18	19,35	0,41	9,25
2	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0
Total	31	133	100 %	4,43	100 %
				1,48	33,3 %

Gráfico 02

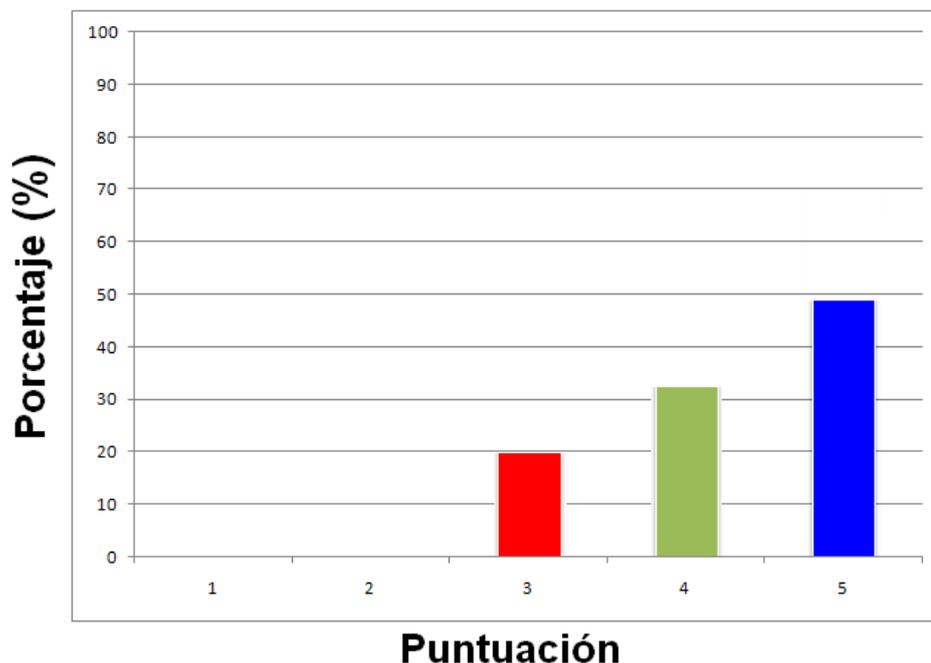


Figura 28. Distribución porcentual de las calificaciones en función de la puntuación obtenida en la prueba desarrollada (para valorar desempeños) correspondiente a la variable V_1 .

En la tabla 4.3 se muestran los resultados obtenidos de la valoración general correspondiente a la variable V_1 considerando los criterios de evaluación sobre

conocimientos y desempeños. También, en el gráfico 03 de la figura 29 se muestran los porcentajes obtenidos de la valoración general de la variable V_1 correspondiente a las medias ponderadas de las calificaciones respecto a conocimientos (barra verde) y respecto a desempeños (barra azul). La media ponderada general de las calificaciones asociada a la variable V_1 es: $\bar{r}_1 = 1,97$.

**Tabla 4.3. Valoración general de la Variable V_1
(Conocimientos y Desempeños)**

N°	Dimensiones	Valor promedio		Porcentaje	
		Conocimientos	Desempeños	Conocimientos	Desempeños
1.1	Ecuación del radio de acción del cuanto vectorial	2,46	1,48	50,0 %	33,3 %
1.2	Ecuación de la magnitud del cuanto vectorial				
\bar{r}_1	Resultado de la valoración general	1,97		41,67 %	

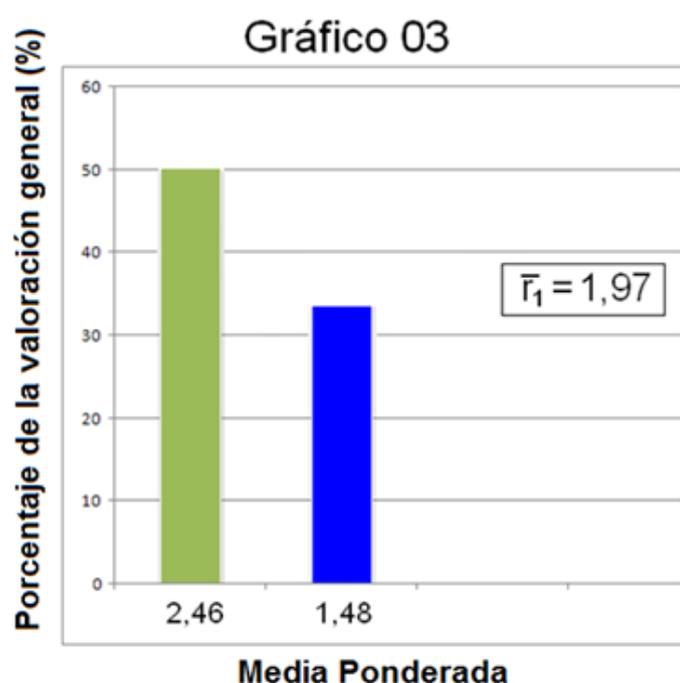


Figura 29. Porcentajes obtenidos de la valoración general de la variable V_1 asociados a las medias ponderadas de las calificaciones respecto a conocimientos (barra verde) y respecto a desempeños (barra azul).

4.1.2. Resultados obtenidos para la segunda variable V_2 : aprendizaje de la velocidad variable de la luz

Se presentan los resultados correspondientes a las dos dimensiones de la variable V_2 : (2.1) Contenido conceptual de la ecuación de la velocidad variable de la luz y (2.2) Aplicación de la ecuación de la velocidad variable de la luz. Se utilizaron los cuestionarios de ítems junto con los instrumentos valorativos que se muestran en el Anexo 02 para evaluar conocimientos y desempeños de los estudiantes. Los ítems del (2.1) al (2.5) corresponden al criterio de evaluación sobre conocimientos y los ítems del (2.6) al (2.10) corresponden al criterio de evaluación sobre desempeños de acuerdo a la tabla 2.3 de operacionalización de la variable V_2 .

La tabla 4.4 muestra la valoración de las dimensiones (2.1) y (2.2) de la variable V_2 correspondiente al criterio sobre conocimientos. También, en el gráfico 04 de la figura 30 se muestra la distribución de los porcentajes de aciertos en función del número de aciertos obtenido en la prueba objetiva de conocimientos de acuerdo a la ficha valorativa, que se muestra en el Anexo 02. La media ponderada de las calificaciones respecto a conocimientos es: $r_{21} = 2,38$.

Tabla 4.4. Valoración de las dimensiones (2.1) y (2.2) de la variable V_2 (Conocimientos)

Respuesta	Cantidad de estudiantes	Frecuencia	Porcentaje (%)	Media ponderada	Media ponderada (%)
5	22	110	70,97	3,77	79,20
4	9	36	29,03	0,99	20,80
3	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0
Total	31	146	100 %	4,76	100 %
				2,38	50 %

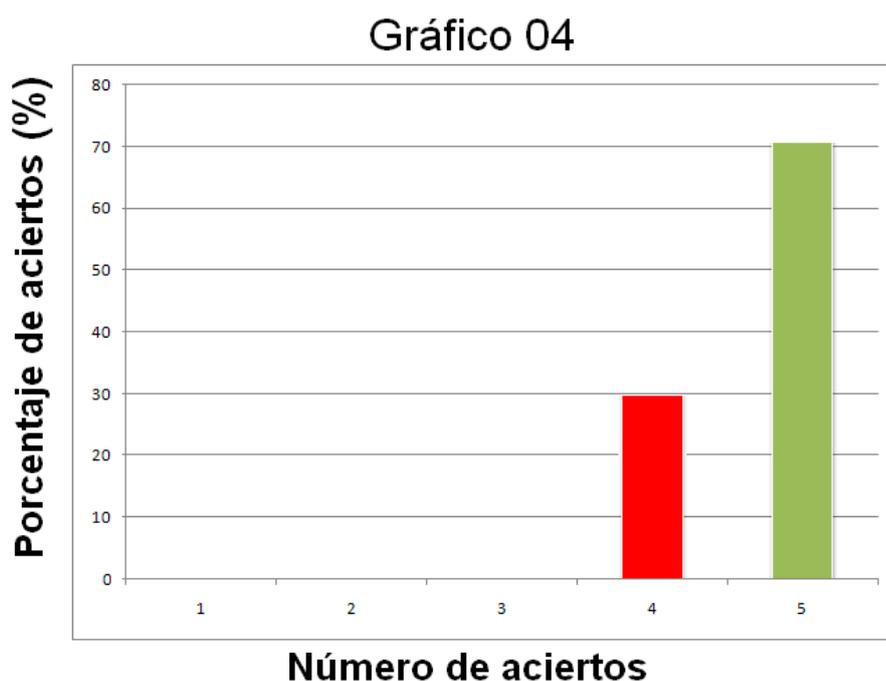


Figura 30. Distribución porcentual de aciertos en función del número de aciertos obtenidos en la prueba objetiva de conocimientos correspondiente a la variable V_2 .

La tabla 4.5 muestra los resultados obtenidos para las dimensiones (2.1) y (2.2) de la variable V_2 correspondiente al criterio sobre desempeños. También, en el gráfico 05 de la figura 31 se muestra la distribución de los porcentajes de calificaciones en función de la puntuación obtenida de acuerdo a la rúbrica utilizada para valorar desempeños, que se muestra en el Anexo 02. La media ponderada de las calificaciones respecto a desempeños es: $r_{22} = 0,92$.

La tabla 4.6 muestra los resultados obtenidos en la valoración general de la variable V_2 correspondiente a los criterios de evaluación sobre conocimientos y desempeños. Finalmente en el gráfico 06 de la figura 32 se muestra la distribución general de los porcentajes de calificaciones asociados a las medias ponderadas respecto a conocimientos (barra verde) y respecto a desempeños (barra azul). La media ponderada general de las calificaciones asociada a la variable V_2 , para los criterios sobre conocimientos y desempeños, es: $\bar{r}_2 = 1,65$.

Tabla 4.5. Valoración de las dimensiones (2.1) y (2.2) de la variable V₂ (Desempeños)

Puntuación	Cantidad de estudiantes	Frecuencia	Porcentaje (%)	Media ponderada	Media ponderada (%)
5	3	15	9,68	0,71	19,40
4	13	52	41,94	1,96	53,55
3	9	27	29,03	0,76	20,77
2	6	12	19,35	0,23	6,28
1	0	0	0	0	0
Total	31	106	100 %	3,66	100 %
				0,92	25 %

Gráfico 05

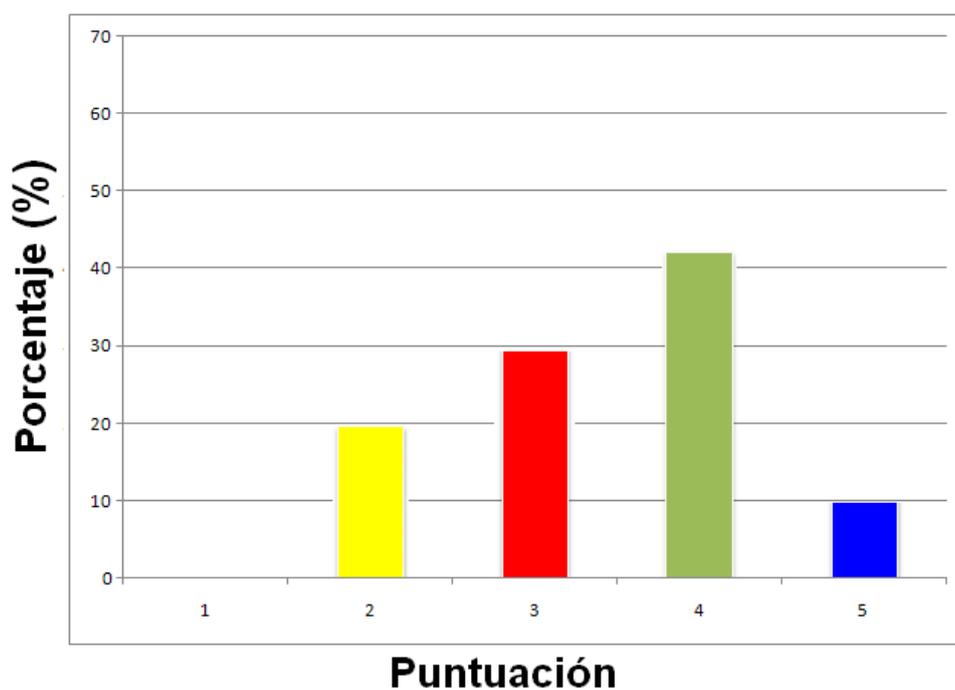


Figura 31. Distribución porcentual de las calificaciones en función de la puntuación obtenida en la prueba desarrollada (para valorar desempeños) correspondiente a la variable V₂.

**Tabla 4.6. Valoración general de la Variable V₂
(Conocimientos y Desempeños)**

N°	Dimensiones	Valor promedio		Porcentaje	
		Conocimientos	Desempeños	Conocimientos	Desempeños
2.1	Contenido conceptual de la ecuación de la velocidad variable de la luz	2,38	0,92	50,0 %	25,0 %
2.2	Aplicación de la ecuación de la velocidad variable de la luz				
\bar{r}_2	Resultado de la valoración general	1,65		37,5 %	

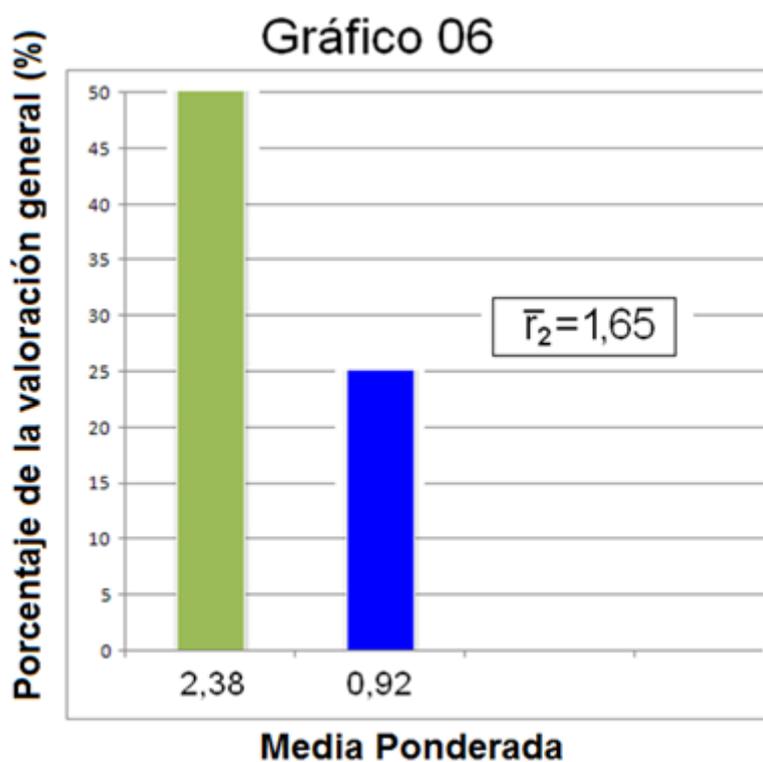


Figura 32. Porcentajes obtenidos en la valoración general de la variable V₂ asociados a las medias ponderadas de las calificaciones respecto a conocimientos (barra verde) y respecto a desempeños (barra azul).

4.1.3. Resultados obtenidos en la valoración del producto de los estudiantes

La tabla 4.7 muestra los resultados obtenidos en la valoración del producto de los estudiantes utilizando la matriz ficha de cotejo que se muestra en el Anexo 03, donde los criterios de evaluación y los indicadores de logro están estrechamente relacionados con las variables del estudio V_1 y V_2 . También, en el gráfico 07 de la figura 33 se muestra la distribución porcentual de las calificaciones positivas (Sí) de los estudiantes que mostraron aprendizaje de los nuevos conocimientos en función de la puntuación obtenida de acuerdo a la escala de valoración que se muestra en el Anexo 03.

En la matriz ficha de control se han establecido cuatro criterios de evaluación: (1) descripción del principio del universo dinámico; (2) comportamiento del cuanto vectorial; (3) comportamiento de la velocidad variable de la luz y (4) extensión y profundización de la teoría. Los criterios (1) y (2) corresponden a la variable V_1 y los criterios (3) y (4) corresponden a la variable V_2 . Además, para cada uno de estos criterios se ha elaborado un indicador de logro.

Tabla 4.7
Valoración del producto asociado a las variables V_1 y V_2

Puntuación	Cantidad de estudiantes	Frecuencia Sí	Porcentaje Sí (%)	Media ponderada	Media ponderada (%)
5	4	20	12,90	0,88	22,74
4	16	64	51,61	2,25	58,14
3	8	24	25,81	0,63	16,28
2	3	6	9,68	0,11	2,84
1	0	0	0	0	0
Total	31	114	100 %	3,87	100 %
				0,97	25 %

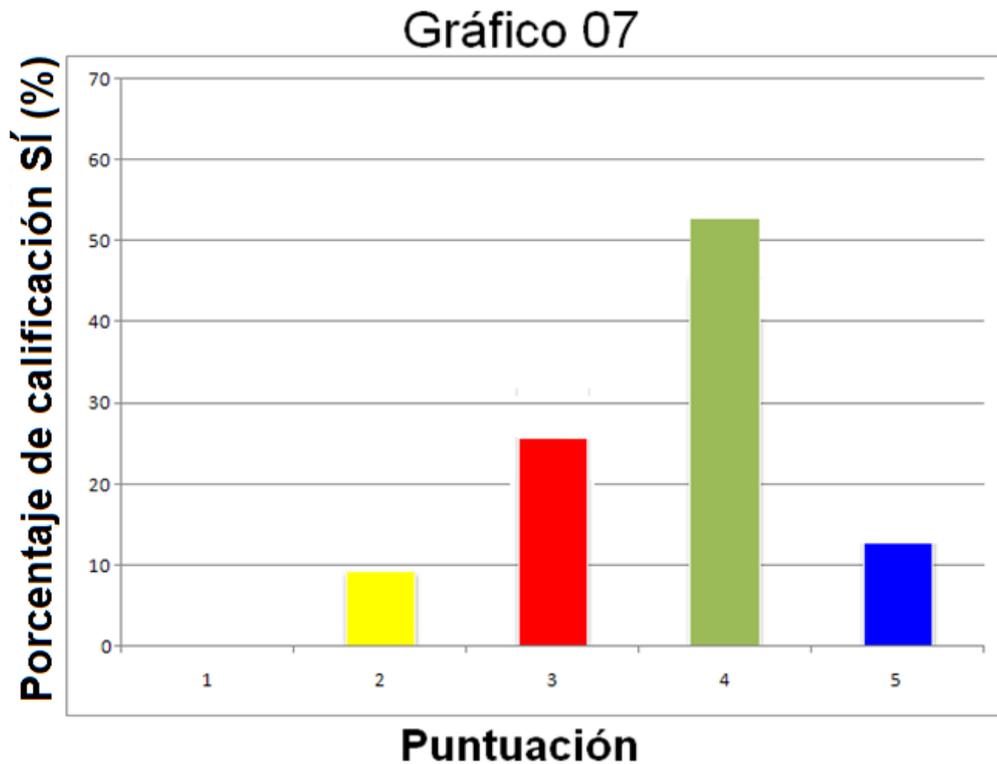


Figura 33. Distribución porcentual de las calificaciones positivas (Sí) correspondiente al producto de los estudiantes asociados a las variables del estudio V_1 y V_2 en función de la puntuación obtenida.

4.2. Contrastación de hipótesis

Según el diseño de la investigación mostrado en la sección (3.2), y teniendo en cuenta los resultados presentados en las secciones (4.1.1) y (4.1.2), la matriz que representa los resultados parciales de las mediciones correspondientes a las variables V_1 y V_2 es:

$$\begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2,46 & 1,48 \\ 2,38 & 0,92 \end{pmatrix}$$

Por consiguiente, los resultados finales de las mediciones correspondientes a las variables V_1 y V_2 se pueden representar por la matriz columna:

$$\begin{pmatrix} \bar{v}_1 \\ \bar{v}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1,97 \\ 1,65 \end{pmatrix}$$

Puesto que el resultado final de la medición de la variable V_1 : $\bar{r}_1 = 1,97$ es mayor que el resultado final de la medición de la variable V_2 : $\bar{r}_2 = 1,65$; entonces se deduce que la aplicación del modelo de los cuantos vectoriales en la propagación de la luz en el vacío es un factor que influye positivamente en el logro del aprendizaje de la velocidad variable de la luz en estudiantes de la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Con respecto a los criterios de evaluación sobre conocimientos; puesto que la media ponderada de las calificaciones respecto al contenido conceptual de la variable V_1 : $r_{11} = 2,46$ es mayor que la media ponderada de las calificaciones respecto al contenido conceptual de la variable V_2 : $r_{21} = 2,38$; entonces se deduce que el contenido conceptual relacionado con las ecuaciones del radio de acción del cuanto vectorial y de la magnitud del cuanto vectorial influyen en el contenido conceptual de la velocidad variable de la luz y su aplicabilidad.

Análogamente, con respecto a los criterios de evaluación sobre desempeños; puesto que la media ponderada de las calificaciones respecto al contenido procedimental de la variable V_1 : $r_{12} = 1,48$ es mayor que la media ponderada de las calificaciones respecto al contenido procedimental de la variable V_2 : $r_{22} = 0,92$; entonces se deduce que el contenido procedimental relacionado con las ecuaciones de la magnitud del cuanto vectorial y de su radio de acción influyen en el contenido procedimental relacionado con la aplicabilidad de la ecuación de la velocidad variable de la luz.

4.3. Discusión de resultados

En esta sección se analizan los resultados presentados en la sección 4.1. Se discuten los resultados obtenidos de la valoración de las dimensiones que conforman las variables del estudio con respecto a los criterios de evaluación sobre conocimientos y desempeños de los estudiantes. Finalmente, se interpretan los resultados obtenidos de la valoración del producto de los estudiantes.

4.3.1. Análisis de las dimensiones de la primera variable V_1 : el modelo de los cuantos vectoriales

Con respecto a las dimensiones (1.1) y (1.2), los resultados de la prueba objetiva de conocimientos mostrados en la tabla 4.1, indican que el mayor porcentaje de aciertos obtenido fue de 90,32 %, el cual corresponde a los estudiantes que respondieron correctamente los cinco ítems propuestos en dicha prueba, siendo la media ponderada de las calificaciones de 4,61 (equivalente a un 93,70 %). El menor porcentaje de aciertos fue de 9,68 %, que corresponde a los estudiantes que respondieron correctamente cuatro ítems propuestos, siendo la media ponderada de las calificaciones de 0,31 (equivalente a un 6,30 %). Se observa que la media ponderada total de estas calificaciones es de 4,92. Por consiguiente, la media ponderada de las respuestas satisfactorias de los estudiantes respecto a conocimientos para las dimensiones (1.1) y (1.2) de la variable V_1 es el valor promedio $r_{11} = 2,46$, lo cual equivale a la media ponderada porcentual del 50 %. Además, obsérvese en el gráfico 01 de la figura 27 que la distribución de los porcentajes de aciertos corresponden solamente a las respuestas de 4 y 5 aciertos, de lo cual se infiere que los estudiantes tendrían las categorías de Bueno y Muy Bueno respectivamente con relación al aprendizaje del contenido conceptual del cuanto vectorial.

Análogamente, con respecto a las dimensiones (1.1) y (1.2), los resultados de la prueba tipo desarrollo (utilizada para evaluar desempeños) mostrados en la tabla 4.2 indican que el mayor porcentaje obtenido fue de 48,39 %, que corresponde a los estudiantes que resolvieron satisfactoriamente los cinco ítems propuestos con puntuación 5 en la rúbrica, siendo la media ponderada de las calificaciones de 2,82 (equivalente a un 63,66 %). El menor porcentaje fue de 19,35 %, que corresponde a los estudiantes que obtuvieron puntuación 3 en la rúbrica, siendo la media ponderada de las calificaciones de 0,41 (equivalente a un 9,25 %). El porcentaje intermedio de 32,26 % corresponde a los estudiantes que obtuvieron puntuación 4 en la rúbrica, siendo la media ponderada de las calificaciones de 1,20 (equivalente a un 27,09 %). Se observa que la media ponderada total de estas calificaciones es de 4,43. Por consiguiente, la media ponderada de las calificaciones respecto a desempeños para las dimensiones (1.1) y (1.2) de la variable V_1 es el valor promedio $r_{12} = 1,48$, lo cual equivale a un 33,3 %. Además, obsérvese en el gráfico 02 de la figura 28 que la distribución de los

porcentajes de calificaciones es creciente con puntuaciones 3, 4 y 5 en la rúbrica, de lo cual se infiere que los estudiantes tendrían las categorías de Regular, Bueno y Muy Bueno respectivamente con respecto al aprendizaje del contenido procedimental del cuanto vectorial.

Finalmente, con relación a la valoración general de la variable V_1 , para los criterios sobre conocimientos y desempeños, los resultados mostrados en la tabla 4.3 y en el gráfico 03 de la figura 29 indican que el mayor porcentaje obtenido corresponde al contenido conceptual: $r_{11} = 2,46$. Y el menor porcentaje obtenido corresponde al contenido procedimental: $r_{12} = 1,48$. Por tanto, el resultado final de la medición de la variable V_1 es el valor medio:

$$\bar{r}_1 = \frac{1}{2}(r_{11} + r_{12}) = \frac{1}{2}(2,46 + 1,48) = 1,97$$

Este resultado equivale al valor medio porcentual de 41,67 % de la valoración general. Obsérvese en el gráfico 03 de la figura 29 que el porcentaje de la valoración general correspondiente a conocimientos, representada por la barra verde, es superior en $50,0 \% - 33,3 \% = 14,67 \%$ al porcentaje de la valoración general correspondiente a desempeños, representada por la barra azul. Esto significa que los estudiantes mostraron un mayor aprendizaje respecto al contenido conceptual del cuanto vectorial que respecto al contenido procedimental.

4.3.2. Análisis de las dimensiones de la segunda variable V_2 : aprendizaje de la velocidad variable de la luz

Con respecto a las dimensiones (2.1) y (2.2), los resultados de la prueba objetiva de conocimientos mostrados en la tabla 4.4 indican que el mayor porcentaje de aciertos obtenido fue de 70,97 %, el cual corresponde a los estudiantes que respondieron correctamente los cinco ítems propuestos en dicha prueba, siendo la media ponderada de las calificaciones de 3,77 (equivalente a un 79,20 %). El menor porcentaje de aciertos fue de 29,03 %, que corresponde a los estudiantes que respondieron correctamente cuatro ítems propuestos, siendo la media ponderada de las calificaciones de 0,99 (equivalente a un 20,80 %). Se observa que la media ponderada

total de estas calificaciones es de 4,76. Por consiguiente, la media ponderada que representa las respuestas satisfactorias de los estudiantes respecto a conocimientos para las dimensiones (2.1) y (2.2) de la variable V_2 es el valor promedio $r_{21} = 2,38$, lo cual equivale a la media ponderada porcentual del 50 %. Además, obsérvese en el gráfico 04 de la figura 30 que la distribución de los porcentajes de aciertos corresponden solamente a las respuestas de 4 y 5 aciertos, de lo cual se infiere que los estudiantes tendrían las categorías de Bueno y Muy Bueno respectivamente con relación al aprendizaje del contenido conceptual de la ecuación de la velocidad variable de la luz.

Análogamente, con respecto a las dimensiones (2.1) y (2.2), los resultados de la prueba tipo desarrollo (utilizada para evaluar desempeños) mostrados en la tabla 4.5 indican que el porcentaje de 9,68 % corresponde a los estudiantes que resolvieron satisfactoriamente los cinco ítems propuestos de la prueba desarrollada con puntuación 5 en la rúbrica, siendo la media ponderada de las calificaciones de 0,71 (equivalente a un 19,40 %). El porcentaje de 41,94 %, corresponde a los estudiantes con puntuación 4 en la rúbrica, siendo la media ponderada de las calificaciones de 1,96 (equivalente a un 53,55 %). El porcentaje de 29,03 % corresponde a los estudiantes con puntuación 3 en la rúbrica, siendo la media ponderada de las calificaciones de 0,76 (equivalente a un 20,77 %). Y el porcentaje de 19,35 % corresponde a los estudiantes con puntuación 2 en la rúbrica, siendo la media ponderada de 0,23 (equivalente a un 6,28 %). Se observa que la media ponderada total de estas calificaciones es de 3,66. Por consiguiente, la media ponderada de las calificaciones, respecto a desempeños para las dimensiones (2.1) y (2.2) de la variable V_2 es el valor promedio $r_{22} = 0,92$, lo cual equivale a un 25 %. Además, obsérvese en el gráfico 05 de la figura 31 que la distribución de los porcentajes de calificaciones tienen las puntuaciones 2, 3, 4 y 5 en la rúbrica, de lo cual se infiere que los estudiantes tendrían las categorías de Bajo, Regular, Bueno y Muy Bueno respectivamente con respecto al aprendizaje sobre la aplicación de la ecuación de la velocidad variable de la luz.

Finalmente, con relación a la valoración general de la variable V_2 , para los criterios sobre conocimientos y desempeños, los resultados mostrados en la tabla 4.6 y en el gráfico 06 de la figura 32 indican que el mayor porcentaje obtenido corresponde al contenido conceptual: $r_{21} = 2,38$. Y el menor porcentaje obtenido corresponde al

contenido procedimental: $r_{22} = 0,92$. Por tanto, el resultado final de la medición de la variable V_2 es el valor medio:

$$\bar{r}_2 = \frac{1}{2}(r_{21} + r_{22}) = \frac{1}{2}(2,38 + 0,92) = 1,65$$

Este resultado equivale al valor medio porcentual de 37,5 % de la valoración general. Obsérvese en el gráfico 06 de la figura 32 que el porcentaje de la valoración general correspondiente a conocimientos, representada por la barra verde, es superior en $50 \% - 25 \% = 25 \%$ al porcentaje de la valoración general correspondiente a desempeños, representada por la barra azul. Esto significa que los estudiantes mostraron un mayor aprendizaje respecto al contenido conceptual de la ecuación de la velocidad variable de la luz que respecto a la aplicación de la ecuación de la velocidad variable de la luz.

4.3.3. Análisis de la valoración del producto de los estudiantes

Teniendo en cuenta la tabla 4.7, la cual muestra los resultados obtenidos de la valoración del producto de los estudiantes asociado a las variables V_1 y V_2 , se observa que el porcentaje de 12,90 % corresponde a los estudiantes que demostraron el aprendizaje de los nuevos conocimientos con respecto a los cuatro criterios de evaluación establecidos en la matriz ficha de cotejo que se muestra en el Anexo 03. La puntuación asignada fue 5 en la escala valorativa. La media ponderada de estas calificaciones es de 0,88 (equivalente a un 22,74 %). El mayor porcentaje fue de 51,61 %, que corresponde a los estudiantes que demostraron el aprendizaje de los nuevos conocimientos con respecto a los tres primeros criterios de evaluación de la ficha de cotejo. La puntuación asignada fue 4 en la escala valorativa. La media ponderada de estas calificaciones es de 2,25 (equivalente a un 58,14 %). El porcentaje de 25,81 % corresponde a los estudiantes que demostraron el aprendizaje de los nuevos conocimientos con respecto a los dos primeros criterios de evaluación de la ficha de cotejo. La puntuación asignada fue 3 en la escala valorativa. La media ponderada de estas calificaciones es de 0,63 (equivalente a un 16,28 %). Finalmente, el menor porcentaje obtenido fue de 9,68 %, que corresponde a los estudiantes que demostraron el aprendizaje de los nuevos conocimientos con respecto al primer criterio de

evaluación de la ficha de cotejo. Aquí, la puntuación asignada fue 2 en la escala valorativa. La media ponderada de estas calificaciones es 0,11 (equivalente a un 2,84 %). Por consiguiente, la media ponderada total de las calificaciones fue de 3,87 con un valor promedio de 0,97 (equivalente a un 25 %).

En el gráfico 07 de la figura 33, se muestra la distribución porcentual de las calificaciones positivas (SÍ) correspondiente al producto de los estudiantes (que demostraron el aprendizaje de los nuevos conocimientos) en función de la puntuación obtenida. Se observa que el mayor porcentaje de estudiantes se concentra alrededor de la puntuación 4, que corresponde a la categoría de Bueno con rango de notas en el intervalo de 15 – 17. Esto significa que el mayor porcentaje de calificación positiva (SÍ) corresponde a los estudiantes que lograron un aprendizaje significativo respecto al principio del universo dinámico, el modelo de los cuantos vectoriales y la velocidad variable de la luz.

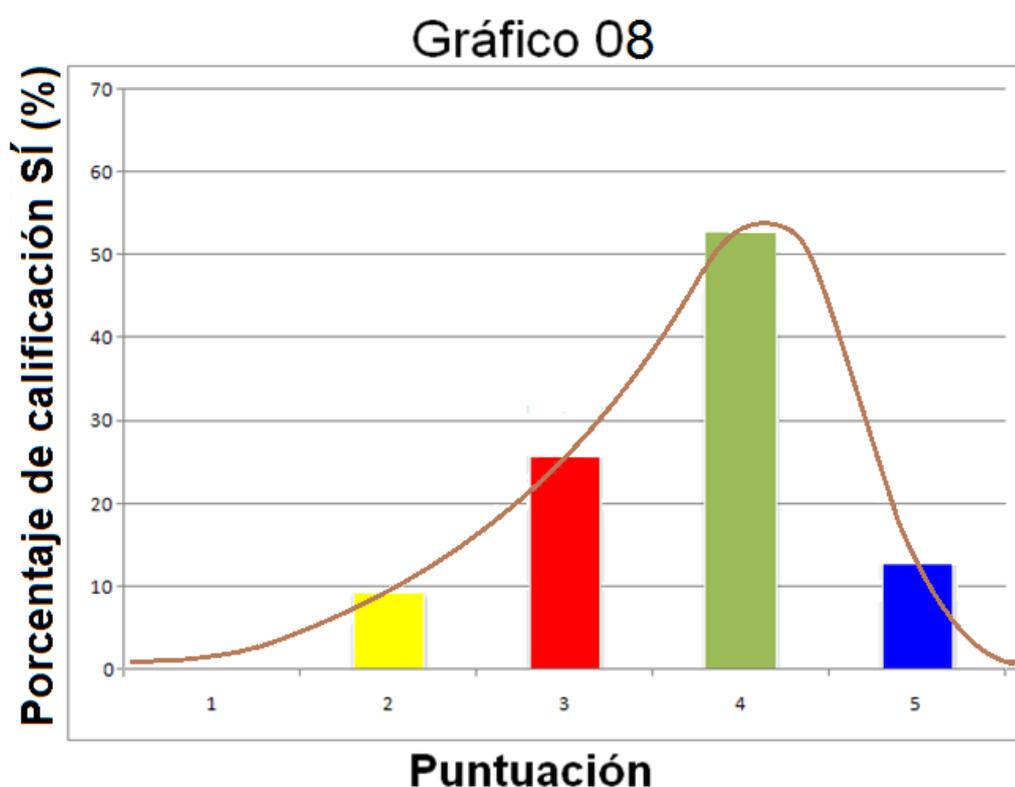


Figura 34. Curva de distribución de los porcentajes con calificación positiva (SÍ) correspondiente al producto de los estudiantes. El sesgo de la curva de aproximación indica que las calificaciones positivas (SÍ) tienden a desplazarse hacia puntuaciones mayores, siendo la mayor concentración de calificaciones positivas alrededor de la puntuación 4.

Puesto que la valoración del producto de los estudiantes es una medida del contenido Actitudinal, el sesgo hacia la derecha (o asimetría negativa) que muestra la curva de aproximación de la figura 34, permite observar que los porcentajes de calificación positiva (SÍ) de los estudiantes tienden a desplazarse hacia puntuaciones mayores. Es de esperar que en muestras similares de estudiantes, y bajo las mismas condiciones de enseñanza, la curva de distribución de los porcentajes de calificación positiva (SÍ) muestre la misma tendencia. Esto significa que el contenido actitudinal adquirido por los estudiantes es positivo y por tanto, se infiere que han logrado un aprendizaje significativo de los nuevos conocimientos científicos presentados en el presente trabajo de investigación. También, queda demostrado que los cuestionarios de ítems elaborados en base a preguntas fundamentales sobre los nuevos conocimientos científicos constituyen los instrumentos de evaluación adecuados que permiten cumplir con los objetivos del presente trabajo de investigación.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- La aplicación del modelo de los cuantos vectoriales en la propagación de la luz en el vacío es un factor que influye significativamente en el logro del aprendizaje de la velocidad variable de la luz en estudiantes de la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, porque, con respecto a los criterios de evaluación para medir conocimientos y desempeños en los estudiantes, la media ponderada general de las calificaciones correspondiente a la primera variable del estudio (V_1) es mayor que la media ponderada general de las calificaciones correspondiente a la segunda variable del estudio (V_2).
- La evaluación del radio de acción del cuanto vectorial influye en el logro del aprendizaje de la velocidad variable de la luz en estudiantes de la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, porque la media ponderada de las calificaciones en conocimientos sobre la magnitud del cuanto vectorial y el radio de acción (correspondiente a la primera variable V_1) es mayor que la media ponderada de las calificaciones en conocimientos sobre la velocidad variable de la luz (correspondiente a la segunda variable V_2).
- La evaluación de la magnitud del cuanto vectorial influye en el logro del aprendizaje de la velocidad variable de la luz en estudiantes de la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, porque la media ponderada de las calificaciones en desempeños sobre la aplicación de las ecuaciones de la magnitud del cuanto vectorial y del radio de acción (correspondiente a la primera variable V_1) es mayor que la media ponderada de las calificaciones en desempeños sobre la aplicación de la ecuación de la velocidad variable de la luz (correspondiente a la segunda variable V_2).

- El Producto o contenido Actitudinal demostrado por los estudiantes es estadísticamente significativo, porque los porcentajes de calificación positiva (SÍ) de los estudiantes asociados a las variables del estudio (V_1 y V_2) tienden a concentrarse hacia puntuaciones mayores (en la calificación de Bueno). Además, los resultados de la investigación indican que las técnicas y los instrumentos de evaluación utilizados son los adecuados, porque se ha verificado la hipótesis general del estudio: la aplicación del modelo de los cuantos vectoriales influye en el logro del aprendizaje de la velocidad variable de la luz en el vacío, así como también las hipótesis específicas.

5.2. Recomendaciones

- Se debe considerar la enseñanza de nuevos conocimientos científicos generados de la investigación básica en los planes de estudios universitarios para estudiantes de ciencias básicas que cursan el cuarto y quinto año de una carrera profesional, con el propósito de cultivar la investigación científica a través de la docencia universitaria.
- Es una necesidad la participación de estudiantes, especialmente del cuarto y quinto año de una carrera profesional, en proyectos de investigación científica, porque ello no solo permitirá que los estudiantes se inicien en la actividad investigadora sino que puedan desarrollar sus propios proyectos de tesis. Sin embargo, primero debe demostrarse el logro del aprendizaje de los nuevos conocimientos científicos mediante el uso de instrumentos de recolección de datos adecuados, donde la unidad de análisis no solo sea cada estudiante sino también los propios instrumentos de recolección de datos.
- Los resultados del estudio sugieren implantar la cultura de la investigación científica en las universidades del país, promoviendo la enseñanza de temas de frontera e incluyéndolos en una o más unidades didácticas de asignaturas afines. Esto implica reformular la programación didáctica y que la actividad del docente universitario no solo se limite a la enseñanza tradicional sino también a la enseñanza de nuevos conocimientos científicos.

- Los currículos universitarios deben ser reformulados gradualmente hasta alcanzar un equilibrio entre la investigación científica y la docencia universitaria. Para tal fin, es conveniente realizar estudios pilotos para sondear la realidad académica y de infraestructura de las universidades del país.

- Se sugiere iniciar y desarrollar el gran proyecto de la nueva universidad peruana del siglo 21 cuya finalidad sea convertir al profesional con la triple cualidad: Docente – Investigador – Innovador. Este estudio muestra que el modo natural de cultivar la investigación científica es a través de la docencia universitaria. También se sugiere que, en una primera etapa, deben realizarse estudios piloto como precursores de los proyectos de investigación, sobre todo cuando se trata de que las universidades reduzcan los costos que demandan el uso de las nuevas tecnologías de la época.

BIBLIOGRAFÍA

1. Aceña, M. (2006). *Herramientas de evaluación en el aula*, USAID, Estados Unidos.
2. Albrecht, A. y Magueijo, J. (1999). *Un tiempo de variación de la velocidad de la luz como una solución a enigmas cosmológicos*, Phys. Rev. D59: 043516, Estados Unidos.
3. Alcalá, N. (2010). *Programación Didáctica y de Aula*. CEP LA GOMERA, España.
4. Barrow, JD. (1999). *Cosmologies with varying light speed*, Physical Review D59 043515, Estados Unidos.
5. Beiser, A. (1981). *Conceptos de Física Moderna*, McGraw-Hill, México.
6. Bondi, H. (1970). *Cosmología*, Nueva colección labor, S.A, España.
7. Campanario, J. y Moya, A. (1999). *¿Cómo enseñar ciencias? Principales tendencias y propuestas*, Investigación didáctica, España.
8. Cohen-Tannouji, C., Diu, B. y Laloe, F. (1977). *Quantum Mechanics*, Vol. 1, John Wiley & Sons, Francia.
9. CONEAU, (2009). *Criterios y estándares para la certificación profesional en el Perú*, SINEACE, Perú.
10. Cruz, A. y Benito, Á. (2007). *Nuevas claves para la Docencia Universitaria en el Espacio Europeo de Educación Superior*, Narcea, España.
11. Davies, P. (1986). *El universo accidental*, Salvat Editores, España.
12. Davies, P. (1986). *Otros mundos*, Salvat Editores, España.
13. De Broglie, L. (1937). *La Física nueva y los Cuantos*, Editorial Losada, Buenos Aires, Argentina.
14. Einstein, A. e Infeld, L. (1986). *La Evolución de la Física*, Salvat Editores, España.
15. Eisberg, R. (1978). *Física Moderna*, Editorial Limusa, S.A, México.
16. Ellis, G., Uzan, J. (2005). *c is the speed of light, isn't it?*, American journal of Physics 73, 240, Estados Unidos.
17. Feinberg, G. (1987). *Caves ciertas*, Salvat Editores, España.

18. Gil, D. (1993). *Contribución de la historia y de la filosofía de las ciencias al desarrollo de un modelo de enseñanza – aprendizaje como investigación*. Enseñanza de las ciencias, España.
19. Gardner, M. (1985). *Izquierda y derecha en el cosmos*, Salvat Editores, España.
20. Gautreau, R. y Savin, W. (1980). *Física Moderna*, McGraw-Hill, México.
21. Greene, B. (2007). *El universo elegante*, Crítica/Planeta, Colombia.
22. Gribbin, J. (1986). *En busca del gato de Schrödinger*, Salvat Editores, España.
23. Hawking, S. (2003). *El universo en una cáscara de nuez*, Crítica, España.
24. Hawking, S. y Mlodinow, I. (2005). *Brevísima Historia del Tiempo*, Crítica, España.
25. Hawking, S. y Mlodinow, I. (2010). *El gran diseño*, Crítica, España.
26. Hecht, E. y Zajac, A. (1977). *Óptica*, Fondo Educativo Interamericano, S.A, Estados Unidos.
27. Hernandez, R. Fernandez, C. y Baptista, P. (2014). *Metodología de la Investigación*, Mc. Graw hill/Interamericana editores, México.
28. Magueijo, J. (2006). *Más rápido que la velocidad de la luz*, Fondo Cultura Económica de Argentina, S.A, Argentina.
29. Magueijo, J., Moffat, J. (2008). *Comments on: Note on varying speed o light Theories*, General Relativity and Gravitation, Springer, Alemania.
30. Magueijo, J. (2009). *Bimetric speed varying of light theories and primordial fluctuations*, Physical Review D, APS, Estados Unidos.
31. Marcelo, C., Yot, C., Mayor, C., Sánchez Moreno, M., Murillo, P., Rodriguez, J., Pardo, A. (2014). *Las actividades de aprendizaje en la enseñanza universitaria: ¿hacia un aprendizaje autónomo de los alumnos?*, Revista de Educación, 313, España.
32. Mehdipour, S., Nozari, K. y Sadatian, D. (2008). *Análisis fraccional de la propagación del paquete de onda y algunos aspectos de la velocidad variable de la luz con el principio de incertidumbre generalizado*, Fractals 16, 33 doi: 10.1142/s0218348x0800379x, Inglaterra.
33. Moffat, J. (1998). *Varying light velocity as a solution to the problems in cosmology*, cds.cem.ch, Canadá.
34. Moffat, J. (2002). *Variable Speed of Light Cosmology and Second Law of Thermodynamics*, cds.cem.ch, Canadá.

35. Monroy, O., (2010). *Perspectiva de un sistema de referencia inercial*, Perspectiv@s N° 7, año 7, Fondo editorial UIGV, Perú.
36. Monroy, O., (2012). *Propagación de la luz en un marco no inercial*, Perspectiv@s N° 9, año 9, Fondo editorial UIGV, Perú.
37. Monroy, O., (2013). *Velocidad variable de la luz*, Perspectiv@s N° 10, año 10, Fondo editorial UIGV, Perú.
38. Ortiz, A., (2005). *Formulación de logros e indicadores de logro: Desarrollo de la capacidad de pensar, sentir y actuar*, Centro de Estudios Pedagógicos y Didácticos (CEPEDID), Colombia.
39. Pedram, P., Jalalzadeh, S. (2008). *Quantum cosmology with varying speed of light: Canonical approach*, Physics Letters B 660 (2008) 1–6, Estados Unidos.
40. Penrose, R. (1996). *La mente nueva del Emperador. En torno a la cibernética, la mente, y las leyes de la Física*, fondo de Cultura Económica, México.
41. Penrose, R. (2008). *El camino a la Realidad*, Random House Mondadori, S.A, México.
42. Penzo, W., Fernández V., García, I., Gros, B., Páges, T., Roca, M., Válles, A., Vendrell, P. (2010). *Guía para la elaboración de las actividades de aprendizaje, (Cuadernos de docencia universitaria N° 15)*. Editorial Octaedro, España.
43. Petit, JP. (1988). *Modelo cosmológico con velocidad variable de la luz: la interpretación del corrimiento hacia el rojo*, Mod. Phys. Lett. A 3(18): 1733–1744, Francia.
44. Pozo, J. y Gómez, M. (1998). *Aprender a enseñar ciencia, del conocimiento cotidiano al conocimiento científico*, Morata, España.
45. Proyecto COMBAS, (2014). *Guía para la formación del proyecto COMBAS*, MECED, España.
46. Proyecto Tuning – América Latina, (2007). *Reflexiones y perspectivas de la Educación Superior en América Latina*, RGM, S.A, España.
47. Racker, J., Sistema, P., Vucetich, H. (2009). *Thermodynamics in variable speed of light theories*, Physical Review D 80, Estados Unidos.
48. Reshetkov, A. (2012). *50 Paradojas de la Física*, Editorial Limusa, S.A, México.
49. Ridnik, V. (1977). *¿Qué es la Mecánica Cuántica?* Editorial MIR, Moscú.
50. Rossi, B. (1966). *Fundamentos de Óptica*, Editorial Reverté, S.A, España.
51. Shojaie, H. (2012). *Variable speed of light cosmology as a solution to the Pioneer anomaly*, Canadian Journal of Physics 90(3): 229-234, Canadá.

52. Tipler, P., (2015). *Física Moderna*, Editorial Reverté, S.A, España.
53. UNESCO, (2006). *Enseñanza de la ciencias y la tecnología*, Oficina de información pública, Francia.
54. UNAP (2010). *Taller de estrategias metodológicas 1*, Universidad Arturo Prat, Chile.
55. Velastegui, W. (2012). *Resultados de aprendizaje*, <http://es.slideshare.net/wilsonvelas/guia-de-logros-de-aprendizaje>, Ecuador.
56. Velastegui, W. (2015). *Guía de plan de clases*, <http://documents.mx/education/guia-de-plan-de-clases.html>, Ecuador.

ANEXOS

ANEXO 01
INSTRUMENTO DE EVALUACIÓN DE LA VARIABLE V₁:
EL MODELO DE LOS CUANTOS VECTORIALES

NOTA:

Estudiante:.....**Fecha:**

PRUEBA OBJETIVA DE CONOCIMIENTOS

1.1) Se puede afirmar correctamente que el principio del universo dinámico es una proposición que indica:

- A) La trayectoria en espiral cónica de los rayos de luz.
- B) El movimiento circular, oscilatorio y lineal de cada punto del espacio físico.
- C) La propagación rectilínea de la luz.
- D) El movimiento oscilatorio de cada punto del espacio físico.

1.2) Con respecto al radio de acción del cuanto vectorial, indicar la verdad (V) o falsedad (F) de las siguientes proposiciones:

- I) El radio de acción del cuanto vectorial indica la extensión espacial ocupada por los rayos de luz.
- II) El radio de acción del cuanto vectorial está determinado por el enrollamiento de los rayos de luz.
- III) El radio de acción del cuanto vectorial varía linealmente con el tiempo.

A) VVV

B) FFV

C) VFV

D) VFF

1.3) Con respecto a la magnitud del cuanto vectorial, se puede afirmar correctamente que:

- A) Varía inversamente proporcional al cuadrado del radio de la extensión espacial.

- B) Es directamente proporcional a su radio de acción.
- C) Varía directamente proporcional al cuadrado del radio de la extensión espacial.
- D) Es directamente proporcional al cuadrado de su radio de acción.

1.4) Con relación a la acción del cuanto vectorial sobre los rayos de luz, indicar la verdad (V) o falsedad (F) de las siguientes proposiciones:

- I) El cuanto vectorial es la velocidad angular que experimentan los rayos de luz.
- II) El cuanto vectorial determina la dirección de los rayos de luz en cada ciclo de 2π rad.
- III) La trayectoria de los rayos de luz es independiente de la acción del cuanto vectorial.

A) FFF

B) VFF

C) VFV

D) VVF

1.5) Con respecto a la cuantificación de los cuantos vectoriales, señale la alternativa correcta:

- A) La magnitud del cuanto vectorial representativo de la escala atómica es del orden 10^5 veces mayor que el de la escala nuclear.
- B) Todos los cuantos vectoriales representativos del nivel microcósmico son del mismo orden de magnitud.
- C) La magnitud del cuanto vectorial representativo de la escala humana es del orden 10^{-5} veces menor que el de la escala atómica.
- D) Todos los cuantos vectoriales representativos del nivel macrocósmico son del mismo orden de magnitud.

PRUEBA DESARROLLADA

1.6) El radio de acción del cuanto vectorial indica la extensión espacial ocupada por los rayos de luz y está dado por la ecuación:

$$r(t) = ct$$

donde r se mide en metros y t en segundos. Además, $\alpha = 1 \times 10^8$ m/s es el valor de la componente de la velocidad constante de la luz c paralela a la sección transversal de la espiral cónica. Determine el tiempo de acción por ciclo del cuanto vectorial en el espacio ocupado por:

- a) Un núcleo atómico típico de radio 10^{-15} m.
- b) Un átomo típico de radio 10^{-10} m.

1.7) Determine el tiempo de acción del cuanto vectorial por ciclo en:

- a) Un radio de 1 m, típico de la escala humana.
- b) La región espacial del sistema solar cuyo radio es de 10^{11} m.
- c) El espacio ocupado por la Vía Láctea cuyo radio es de 10^{20} m.

1.8) La magnitud natural del cuanto vectorial ϖ se puede definir por:

$$0\varpi = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{\alpha}{r}$$

donde ϖ se mide en ciclos/segundo; r es su radio de acción (en metros) y $\alpha = 10^8$ m/s. Determine la magnitud natural del cuanto vectorial:

- a) En el espacio ocupado por un núcleo atómico típico cuyo radio es de 10^{-15} m.
- b) En el espacio ocupado por un átomo típico cuyo radio es de 10^{-10} m.

Comparar estos resultados con la magnitud natural del cuanto vectorial asociado a la escala humana.

1.9) ¿Cuál es la magnitud natural del cuanto vectorial en el espacio ocupado por sistema solar cuyo radio es de 10^{11} m, y en el espacio ocupado por la Vía Láctea cuyo radio es de 10^{20} m respectivamente? Comparar estos resultados con la magnitud natural del cuanto vectorial asociado a la escala humana cuyo radio típico es de 1 m.

1.10) Muéstrase que el ciclo acción del cuanto vectorial satisface la condición: $\varpi t = 1$, en las escalas nuclear, atómica, humana solar y Vía Láctea. Se puede generalizar este resultado a todos los niveles de estructuras físicas del universo. ¿Por qué?

ESCALA DE VALORACIÓN DE CONOCIMIENTOS PARA LA VARIABLE V₁

Estudiante:.....Fecha:

1	2	3	4	5
Muy Bajo	Bajo	Regular	Bueno	Muy bueno
0 ó 1 acierto	2 aciertos	3 aciertos	4 aciertos	5 aciertos

RÚBRICA PARA VALORAR DESEMPEÑOS EN LA VARIABLE V₁

Estudiante:.....Fecha:

CRITERIOS DE EVALUACIÓN	PUNTUACIONES				
	1	2	3	4	5
	Muy bajo	Bajo	Regular	Bueno	Muy bueno
Identificación del problema	No logra la comprensión del enunciado	Comprensión incompleta del enunciado	Comprensión parcial del enunciado	Bastante comprensión del enunciado	Comprensión completa del enunciado
Análisis del problema	Carece de información sobre la fenomenología	Manifiesta poca información sobre la fenomenología	Muestra regular Información sobre la fenomenología	Conoce bastante la fenomenología del problema	Conoce totalmente la fenomenología del problema
Selección de estrategias	No usa ninguna ecuación	Manifiesta poca claridad en el uso de las ecuaciones	Manifiesta relativa claridad en el uso de las ecuaciones	Muestra claridad en el uso de las ecuaciones	Muestra claridad y justifica el uso de las ecuaciones
Aplicación de las estrategias	No evalúa ninguna ecuación	Evaluación incorrecta de las ecuaciones	Evaluación incompleta de las ecuaciones	Evaluación bastante clara de las ecuaciones	Evaluación completa y clara de las ecuaciones
Interpretación de resultados	No hay resultados	Resultados incorrectos	Hay resultados correctos e incorrectos	La mayoría de los resultados son correctos	Todos los resultados son correctos

ANEXO 02

INSTRUMENTO DE EVALUACIÓN DE LA VARIABLE V_2 : APRENDIZAJE DE LA VELOCIDAD VARIABLE DE LA LUZ

NOTA:

Estudiante:..... Fecha:

PRUEBA OBJETIVA DE CONOCIMIENTOS

La ecuación que describe la velocidad variable de la luz en el vacío está dada por:

$$c_{\omega}(t) = \pm c \sqrt{1 + (\omega t / 3)^2}$$

donde $t \geq 10^{-43}$ s y ω es la magnitud del cuanto vectorial asociado a la escala espacial en consideración. Además, $c = 3 \times 10^8$ m/s es la rapidez de la luz en el vacío cuando el sistema referencia del observador es inercial.

2.1) En la nueva concepción del universo dinámico, para una magnitud dada del cuanto vectorial local la rapidez de la luz en el vacío:

- A) Se incrementa en el transcurso del tiempo.
- B) Disminuye en el transcurso del tiempo.
- C) Permanece constante en el transcurso del tiempo.
- D) Se incrementa inicialmente y luego disminuye.

2.2) Con respecto a la rapidez de la luz en los niveles microcósmico y macrocósmico, indicar la verdad (V) o falsedad (F) de las siguientes proposiciones:

- I) La rapidez de la luz en el nivel microcósmico es mayor que en el nivel macrocósmico para un mismo intervalo de tiempo.
- II) La rapidez de la luz en el nivel macrocósmico es mayor que en el nivel microcósmico para un mismo intervalo de tiempo.

III) En cada ciclo de circulación de los rayos de luz, la rapidez de la luz en el nivel microcósmico es la misma que en el nivel macrocósmico.

A) VVV

B) FFV

C) VFV

D) VFF

2.3) A gran escala espacial, cuando la magnitud del cuanto vectorial local $\omega \rightarrow 0$, se puede afirmar correctamente que la velocidad de la luz:

A) Tiende a ser constante y cada rayo de luz será rectilíneo con una sola dirección.

B) Tiende a variar con el tiempo y los rayos de luz serán rectilíneos.

C) Tiende a variar con el tiempo y los rayos de luz no serán rectilíneos.

D) Tiende a ser constante y cada rayo de luz será rectilíneo con dos direcciones opuestas.

2.4) La doble dirección de la velocidad variable de la luz, indicada por los signos \pm , se puede comprobar experimentalmente haciendo incidir un haz de luz perpendicularmente sobre un espejo plano desde el espacio real. Simultáneamente se observará que el haz de luz procedente del espacio virtual también incide perpendicularmente en el espejo, pero su dirección es opuesta. Teniendo en cuenta esta información, indicar la verdad (V) o falsedad (F) de las siguientes proposiciones:

I) Un rayo de luz tiene dos direcciones opuestas simultáneas debido a la acción de dos cuantos vectoriales opuestos $\pm\omega$.

II) La velocidad variable de la luz tiene simetría especular con respecto al rango de velocidades entre $\pm c$.

III) La doble dirección de la velocidad variable de la luz es independiente de la consciencia del observador.

A) FFF

B) FFV

C) VFV

D) VVV

2.5) Utilizando el teorema del binomio se puede desarrollar en serie de potencias la ecuación de la velocidad variable de la luz. Interpretando el desarrollo, se puede afirmar correctamente:

- I) El primer término del desarrollo representa la rapidez c constante.
- II) El principio de la constancia de la velocidad de la luz en el vacío es una aproximación de orden cero.
- III) La velocidad de la luz puede variar linealmente con el tiempo.

A) I, II

B) II, III

C) I, III

D) I, II, III

PRUEBA DESARROLLADA

- 2.6)** Demostrar que en cada ciclo de operación del cuanto vectorial local y en cualquier nivel de estructuras físicas el valor de la velocidad de la luz en el vacío es el mismo.
- 2.7)** Determine la rapidez de la luz en términos de c en el espacio ocupado por un núcleo atómico y por un átomo para $t = 1$ s. Discútanse los resultados para el tiempo de un proceso nuclear típico, donde $t = 10^{-14}$ s y un proceso atómico típico, donde $t = 10^{-8}$ s.
- 2.8)** Determine la rapidez de la luz en términos de c en la región espacial típica de la escala humana para $t = 1$ s. ¿Por qué no se mide este valor en el sistema de referencia del observador?
- 2.9)** Determine la rapidez de la luz en términos de c en el espacio ocupado por el sistema solar y por la Vía Láctea para $t = 1$ s. Discútanse los resultados para el periodo medio de rotación de la superficie del Sol: $t = 30$ días y para el periodo de rotación del Sol alrededor de la Vía Láctea: $t = 2,25 \times 10^8$ años.
- 2.10)** Comparar la rapidez de la luz para $t = 1$ s, en los niveles: nuclear, atómico, sistema solar y Vía Láctea respecto a la rapidez de la luz en la escala humana. Explique los resultados obtenidos.

ESCALA DE VALORACIÓN DE CONOCIMIENTOS PARA LA VARIABLE V_2

Estudiante:.....Fecha:

1	2	3	4	5
Muy Bajo	Bajo	Regular	Bueno	Muy bueno
0 ó 1 acierto	2 aciertos	3 aciertos	4 aciertos	5 aciertos

RÚBRICA PARA VALORAR DESEMPEÑOS EN LA VARIABLE V_2

Estudiante:.....Fecha:

CRITERIOS DE EVALUACIÓN	PUNTUACIONES				
	1	2	3	4	5
	Muy bajo	Bajo	Regular	Bueno	Muy bueno
Identificación del problema	No logra la comprensión del enunciado	Comprensión incompleta del enunciado	Comprensión parcial del enunciado	Bastante comprensión del enunciado	Comprensión completa del enunciado
Análisis del problema	Carece de información sobre la fenomenología	Manifiesta poca información sobre la fenomenología	Muestra regular Información sobre la fenomenología	Conoce bastante la fenomenología del problema	Conoce totalmente la fenomenología del problema
Selección de estrategias	No usa ninguna ecuación	Manifiesta poca claridad en el uso de las ecuaciones	Manifiesta relativa claridad en el uso de las ecuaciones	Muestra claridad en el uso de las ecuaciones	Muestra claridad y justifica el uso de las ecuaciones
Aplicación de las estrategias	No evalúa ninguna ecuación	Evaluación incorrecta de las ecuaciones	Evaluación incompleta de las ecuaciones	Evaluación bastante clara de las ecuaciones	Evaluación completa y clara de las ecuaciones
Interpretación de resultados	No hay resultados	Resultados incorrectos	Hay resultados correctos e incorrectos	La mayoría de los resultados son correctos	Todos los resultados son correctos

ANEXO 03
MATRIZ FICHA DE COTEJO PARA VALORAR EL PRODUCTO EN LAS
VARIABLES V_1 Y V_2

Estudiante:.....Fecha:

CRITERIOS	INDICADORES DE LOGRO	SI	NO
(1) Descripción del principio del universo dinámico.	Expone explícitamente y fundamenta la formulación matemática del principio del universo dinámico.		
(2) Comportamiento del cuanto vectorial.	Construye y explica la gráfica del cuanto vectorial en función de su radio de acción.		
(3) Comportamiento de la velocidad variable de la luz.	Construye y explica la gráfica de la velocidad variable de la luz en función del tiempo para los distintos niveles de estructuras físicas		
(4) Extensión y profundización de la teoría.	Elabora un análisis tensorial sobre la cinemática del sustrato (espacio físico) y deduce el tensor cuanto vectorial local.		

ESCALA DE VALORACIÓN DEL PRODUCTO EN LAS VARIABLES V_1 Y V_2

PUNTUACIÓN				
1	2	3	4	5
Muy Bajo	Bajo	Regular	Bueno	Muy bueno
0 – 5	6 – 11	12 – 14	15 – 17	18 – 20

ANEXO 04:

MATRIZ DE CONSISTENCIA

Título: Aplicación del modelo de los cuantos vectoriales en la propagación de la luz en el vacío y el logro del aprendizaje de la velocidad variable de la luz en estudiantes de la Facultad de Ciencias Físicas (FCF) de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM)

Autor: Oscar Santiago Monroy Cárdenas

Problema	Objetivos	Hipótesis	OPERACIONALIZACIÓN		
			Variables	Dimensiones	Metodología
<p>General: ¿De qué modo la aplicación del modelo de los cuantos vectoriales en la propagación de la luz es un factor que influye en el logro del aprendizaje de la velocidad variable de la luz en estudiantes de la FCF de la UNMSM?</p> <p>Específicos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • ¿En qué medida la evaluación del radio de acción del cuanto vectorial es un factor que influye en el logro del aprendizaje de la velocidad variable de la luz en estudiantes de la FCF de la UNMSM? • ¿En qué medida la evaluación de la magnitud del cuanto vectorial es un factor que influye en el logro del aprendizaje de la velocidad variable de la luz en estudiantes de la FCF de la UNMSM? 	<p>General: Determinar que la aplicación del modelo de los cuantos vectoriales en la propagación de la luz es un factor que influye en el logro del aprendizaje de la velocidad variable de la luz en estudiantes de la FCF de la UNMSM.</p> <p>Específicos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Determinar que la evaluación del radio de acción del cuanto vectorial es un factor de influencia en el logro del aprendizaje de la velocidad variable de la luz en estudiantes de la FCF de la UNMSM. • Determinar que la evaluación de la magnitud del cuanto vectorial es un factor de influencia en el logro del aprendizaje de la velocidad variable de la luz en estudiantes de la FCF de la UNMSM. 	<p>General: La aplicación del modelo de los cuantos vectoriales en la propagación de la luz en el vacío es un factor que influye significativamente en el logro del aprendizaje de la velocidad variable de la luz en estudiantes de la FCF de la UNMSM.</p> <p>Específicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • La evaluación del radio de acción del cuanto vectorial influye significativamente en el logro del aprendizaje de la luz en estudiantes de la FCF de la UNMSM. • La evaluación de la magnitud del cuanto vectorial influye significativamente en el logro del aprendizaje de la luz en estudiantes de la FCF de la UNMSM. 	<p>Variable 1 (V₁): Aplicación del modelo de los cuantos vectoriales en la propagación de la luz en el vacío.</p> <p>Variable 2 (V₂): El logro del aprendizaje de la velocidad variable de la luz en estudiantes de la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.</p>	<p>Dimensiones de V₁:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Evaluación del radio de acción del cuanto vectorial. • Evaluación de la magnitud del cuanto vectorial. <p>Dimensiones de V₂:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Contenido conceptual de la ecuación de la velocidad variable de la luz. • Aplicación de la ecuación de la velocidad variable de la luz. 	<p>Tipo de investigación: Aplicada - Evaluativa.</p> <p>Diseño: No experimental.</p> <p>Esquema:</p> <pre> graph LR M --> V1 M --> V2 V1 --> r1 V2 --> r2 r1 --> R r2 --> R </pre> <p>M: muestra representativa de V₁ y V₂ \bar{r}_1, \bar{r}_2: resultados de la medición R: nivel de influencia entre las variables V₁ y V₂.</p> <p>Técnicas: Resolución de problemas y la observación.</p> <p>Instrumentos: Variable V₁: Prueba objetiva de conocimientos y prueba tipo desarrollo para desempeños (con rúbrica). Variable V₂: Prueba objetiva de conocimientos y prueba tipo desarrollo para desempeños (con rúbrica). Ficha de cotejo para evaluar productos (variables V₁ y V₂).</p> <p>Población: Los estudiantes del cuarto y quinto año de la Facultad de Ciencias Físicas de la UNMSM.</p> <p>Muestra: No probabilística; 31 estudiantes de la FCF, UNMSM.</p>