

## CAPÍTULO 1

### INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

#### 1.1 Resumen

En esta primera parte de la tesis se menciona la importancia que motiva el estudio de las ondas ópticas en medios con no linealidad cuadrática como son los solitones ópticos espaciales cuadráticos y la finalidad general del presente trabajo que incluye a esta clase de ondas y a las ondas armónicas en estos medios. Se describe además qué es la óptica no-lineal y los distintos fenómenos que presenta esta rama de la óptica, la fotónica con algunos de sus aspectos, la importancia mundial de este tipo de tecnologías y finalmente se explican las formas de solitones que existen, haciéndose una breve clasificación de éstos que termina con los solitones cuadráticos espaciales, los cuales son parte del objetivo principal de estudio del presente trabajo de investigación.

#### 1.2 Motivación

El concepto de ondas no lineales solitarias en medios con no-linealidad cuadrática (o solitones espaciales multicolor) ha sido muy investigado durante los últimos años [1]. Debido a sus condiciones de ser robustos frente a pequeñas perturbaciones de su forma, así como a aquellas causadas por los parámetros del medio, son muy útiles en distintas aplicaciones de procesamientos de información óptica, dispositivos de control de luz por luz, interruptores lógicos totalmente ópticos para sistemas de comunicación, así como para las futuras aplicaciones que involucran el mejoramiento de mayor integración de varios componentes de guías de onda, y la implementación de sistemas compactos que operen con LASERs semiconductores [2].

Desde el punto de vista fisicomatemático podemos considerar dos tipos de ondas: Por un lado las ondas armónicas, cuyo perfil puede expresarse por medio de funciones periódicas de tipo senoidal o cosenoidal, y por otro lado los solitones, que en su forma más típica poseen la forma de funciones de secante hiperbólica o tangente hiperbólica, según sean brillantes (con máximo de intensidad lumínica en el centro) u oscuros (con mínima intensidad lumínica en el centro) respectivamente [3]. El trabajo que se pretende seguir, trata de encontrar soluciones de tipo solitón considerando los parámetros bajo los cuales ocurren, así como encontrar una unión entre la brecha que se da entre estos dos tipos de ondas no lineales: Armónicas y solitones. Para este fin se opta por hacer uso de tres métodos matemáticos que en cierto rango de frecuencias puedan hallar soluciones en las regiones de existencia de solitones ópticos espaciales cuadráticos y por otro lado convergir en el dominio de existencia de ondas armónicas.

### **1.3 Fotónica**

Gracias a la invención de LASER en la década de los años sesenta como una fuente de luz coherente [4], nace la era moderna de la fotónica cuyo impacto en las telecomunicaciones fue posible con el perfeccionamiento a fines de 1970 de las fibras ópticas de pérdida de señales bajas [5], que ha dado origen y gran desarrollo a este área de la óptica, contribuyendo a su vez a la fotónica con todas las aplicaciones que conlleva.

Podemos definir la fotónica como la tecnología que genera y manipula la luz y otras formas de energía radiante cuya unidad cuántica es el fotón. El rango de aplicaciones de este área científico-tecnológico se extiende desde la generación y detección de energía, hasta comunicaciones y procesamiento de información. Según el diccionario de fotónica de

Laurin Publishing, este área comprende: Óptica, LASERs, Procesamiento de Imágenes, Fibras Ópticas, Electro-Óptica y Optoelectrónica [6].

Tanto la invención de LASER como de las fibras ópticas han contribuido a un acelerado desarrollo de las telecomunicaciones con base en la óptica y los sistemas de información. Los dispositivos existentes abarcan distintos componentes ópticos. Mientras los chips usados en las computadoras hacen uso de las bandas de energía en cristales de silicio para regular el flujo de electrones, los cristales fotónicos funcionan mediante capas de materiales que con diferentes índices de refracción, crean condiciones en las cuales la luz no puede existir a ciertas longitudes de onda, siendo atrapadas en el cristal. Todo esto permite a los componentes que manejan datos ópticos ser reducidos a tamaños microscópicos. Estos pueden ser densamente empacados, como son los circuitos electrónicos en un chip de silicio. Existen amplificadores que al igual que en electrónica, tienen como fin reamplificar las señales a intervalos regulares para contrarrestar su debilitamiento. También conectores y canales de transmisión como son las fibras ópticas que superan en mucho la capacidad de los cables eléctricos, pues estos últimos no permiten transmisión en ambas direcciones ni tanta capacidad de transferencia de información como sus análogos ópticos [7].

Los avances en el campo de la fotónica han contribuido a superar lo desarrollado en el área de la electrónica. Mientras esta última consiste en la transferencia, control, manipulación y almacenamiento de información mediante el uso de la electricidad, la fotónica hace lo mismo y más, pero usando la luz [8]. Es así como en este siglo, le toca a la fotónica jugar el papel crucial en el desarrollo tecnológico que desempeñó la electrónica en el pasado siglo XX.

## 1.4 Importancia mundial de las tecnologías ópticas

Estando en una aldea global que es controlada adiestrando las mentes de la población a través de los medios de comunicación [9], no es de extrañar el gran interés y capital invertido en numerosas investigaciones científicas que tienen su base en la fotónica, además de las aplicaciones bélicas que puedan tener. Nos dirigimos ahora hacia otra revolución industrial, la era de la información. La información producida por la humanidad se incrementa enormemente cada día. Muchas personas y países han amasado más fortunas de la industria de la información que en otros ámbitos y la tendencia va en crecimiento [10].

Siendo testigos de cómo están afectando las tecnologías las formas y escalas de organización social y vida individual, resultan de suma importancia las contribuciones científicas que han conducido a las innovadoras aplicaciones tecnológicas que hemos contemplado en los últimos años y que han sido un gran logro por parte de muchos científicos, ingenieros y tecnólogos de diversas partes del mundo.

## 1.5 Óptica no lineal

Históricamente el origen de la óptica no lineal es anterior al haz LASER, pero es realmente gracias a esta invención, como se logra desarrollar esta área de la física. Ésta, es una rama de la óptica que se ocupa del estudio de la interacción de radiación electromagnética y la materia, en la cual la materia responde de una manera no lineal a los campos de radiación que inciden en ella [11].

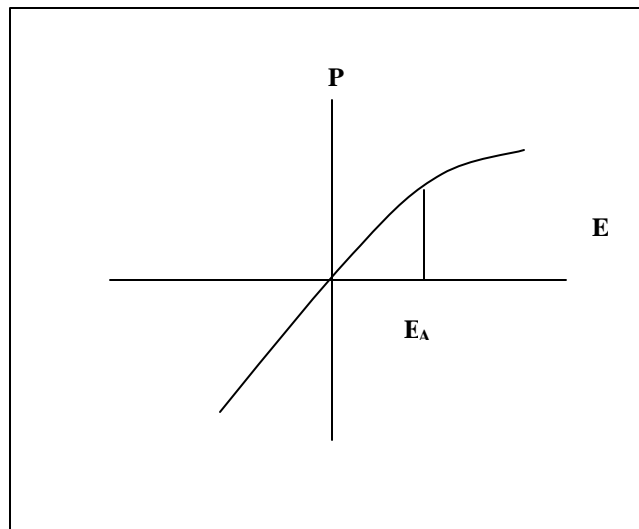
La intensidad de los campos eléctricos en las ondas luminosas no son muy fuertes en comparación con aquella de haces LASER. El campo eléctrico que mantiene unido un electrón a su núcleo, en el caso del átomo de hidrógeno es aproximadamente de  $5.13 \times 10^9 \text{ V/cm}$  considerando que el radio de Bohr es  $r = 0.53 \text{ \AA}$ . Los electrones en otros

átomos o compuestos se encuentran ligados con menor intensidad. Tratándose de electrones externos, según del modelo atómico de Bohr, se ha constatado experimentalmente que el campo de intensidad es aproximadamente del orden de ( $\sim 10^8 V/cm$ ) para la mayoría de los materiales utilizados en óptica no lineal.

Es precisamente este orden de magnitud, el requerido para el campo de radiación incidente en los materiales, a fin de presentar fenómenos que impliquen la absorción y emisión de fotones, y todo esto, gracias a la posibilidad de concentración de energía lograda en los haces LASER [11].

Para entender la razón por la cual se habla de no linealidad es necesario empezar por explicar lo siguiente:

Cuando la luz se propaga a través de un medio denso, existe una proporción entre la polarización  $\vec{P}$  (momento dipolar inducido por unidad de volumen) y el campo eléctrico incidente  $\vec{E}$ . En caso de que el campo eléctrico sea suficientemente grande, situación que se presenta con los haces de LASER, la proporcionalidad deja de ser lineal



**Fig 1.1:** Relación entre P y E mostrando el valor del campo atómico

De esta manera, la relación lineal entre la polarización y el campo eléctrico constituye sólo una parte de una expansión más amplia de manera polinomial, desarrollo en series que puede ser hecho debido a que la dirección de la polarización coincide con la del campo. Esta expresión involucra términos no lineales del campo eléctrico. Así, para materiales homogéneos e isotrópicos se presenta la relación:

$$P = \mathbf{c}^{(1)}E + \mathbf{c}^{(2)}E^2 + \mathbf{c}^{(3)}E^3 + \dots . \quad (1.1)$$

Donde  $\mathbf{c}^{(1)}$  es la susceptibilidad lineal del medio y  $\mathbf{c}^{(2)}$ ,  $\mathbf{c}^{(3)}$  y demás términos de orden superior son susceptibilidades no lineales y describen propiedades ópticas no lineales del medio [12].

La respuesta no lineal puede resultar en una variación de las características de los campos de radiación dependientes de la intensidad o en la creación de campos de radiación que se propagan a nuevas frecuencias o en nuevas direcciones. Existiendo una intensidad luminosa suficientemente alta, siempre es posible observar fenómenos no lineales de varios tipos en cualquier material [11].

La no linealidad es una propiedad del medio a través del cual viaja la luz más que una propiedad de la luz misma. La luz puede así interactuar con luz a través del medio, provocando con esto la interacción de fotones. Es por estas razones que los comportamientos no lineales ópticos no se podrían presentar en el vacío [13].

Actualmente, el desarrollo de nuevos materiales ópticos es de tal grado que se han creado cristales con fuertes propiedades no lineales que pueden ser usados con LASERs de potencia extremadamente baja con el fin de crear solitones ópticos con usos de aplicaciones tecnológicas. Este último desarrollo, permite que haya solitones ópticos mucho más

estables, siendo adaptables a viajar en muchos otros tipos de condiciones como en las regiones superficiales de circuitos integrados ópticos [14].

### **1.5.1 Descripción física de la interacción entre haz LASER y materia**

Hemos indicado cómo un haz LASER al poseer campos electromagnéticos intensos, puede dar lugar a comportamientos no lineales, ya que sus campos son capaces de perturbar la unión que tienen los electrones con cada uno de los átomos del material óptico utilizado.

Para bajas intensidades lumínicas, las cargas pueden seguir el campo casi exactamente, siendo la relación entre el campo eléctrico y la polarización de manera lineal. Es de esperar que los electrones más afectados sean los de valencia, pues los electrones de las capas más internas de los átomos se hallan fuertemente atraídos hacia el núcleo atómico.

Ante un campo eléctrico de gran magnitud se provoca una oscilación de los electrones que poseen una variación no sinusoidal, excediendo el rango en el que pueden imitar el comportamiento de las ondas luminosas, de tal suerte que comienzan a oscilar en modos diferentes. Bajo este efecto, los electrones pueden saltar entre las distintas posiciones, llegando incluso a ser arrancados [15].

Cuando la luz se propaga a través de la materia, la componente correspondiente al campo eléctrico inducirá movimiento en las partículas cargadas que constituyen el material. En un medio dieléctrico, las cargas se encuentran juntas y oscilarán en el campo eléctrico aplicado, produciendo dipolos eléctricos oscilantes. Se produce así, una polarización que es proporcional al campo eléctrico de la luz. Existe también una contribución debida al campo magnético de la luz y otra debida a los cuadrupolos eléctricos sin embargo, por ser mucho más débiles, no son considerados. Esta exclusión permite simplificar los cálculos y constituye lo que se conoce como aproximación de dipolos eléctricos [16].

### 1.5.2 Tipos de fenómenos ópticos no lineales

Los efectos ópticos no lineales provienen debido a las propiedades no lineales del medio tales como los cambios en el índice de refracción y el coeficiente de absorción que se tiene durante la fuerte intensidad de la luz. Los haces de luz, bajo condiciones de este tipo, pueden interactuar con otros haces lumínicos. En estas circunstancias el principio de superposición ya no es aplicable [17].

A partir de la ecuación (1.1) se puede ver, mediante la sustitución del valor del campo  $E = E_0 \cos \omega t$ , la presencia de fenómenos no lineales, los cuales aparecen para los demás términos del campo eléctrico de orden dos o superior, en el caso de un haz LASER incidente sobre un material. Estos términos son responsables de la generación de armónicos ópticos, los cuales decrecen en intensidad a medida que el orden se vuelve mayor. Esta ecuación toma así, la forma:

$$P = cE_0 \cos \omega t + c^{(2)} E_0^2 \cos^2 \omega t + c^{(3)} E_0^3 \cos^3 \omega t + \dots \quad (1.2)$$

Haciendo uso de algunas identidades trigonométricas es fácil ver que la polarización posee también términos de valores dobles, triples o mayores de la frecuencia inicial [18].

De manera análoga, se pueden presentar otros fenómenos no lineales cuando entran dos haces LASER a un medio, para ver esto se puede hacer la sustitución del campo eléctrico como:  $E = E_1 \cos \omega_1 t + E_2 \cos \omega_2 t$ , en donde se han considerado los dos valores para cada uno de los haces. Esta expresión posee la forma:

$$P = c(E_1 \cos \omega_1 t + E_2 \cos \omega_2 t) + c^{(2)} (E_1 \cos \omega_1 t + E_2 \cos \omega_2 t)^2 + c^{(3)} (E_1 \cos \omega_1 t + E_2 \cos \omega_2 t)^3 + \dots \quad (1.3)$$

Podemos explicar de manera general los tipos de fenómenos no lineales atendiendo al tipo de no linealidad. De esta manera, se pueden presentar fenómenos para no linealidades



cuadráticas y para no linealidades cúbicas, dependiendo del tipo de no linealidad que sea más dominante en el medio, además se presentan fenómenos distintos según entren uno o dos haces LASER dentro del material

Medios cuadráticos ( $\mathbf{c}^{(2)} \gg \mathbf{c}^{(3)}$ ):

Para este tipo de materiales, la polarización no lineal de la luz posee la forma:

Entrada de un haz:

$$P^{NL} = \frac{1}{2} \mathbf{c}^{(2)} E_0^2 (1 + \cos 2\omega t). \quad (1.4)$$

Esta expresión posee un término constante que es responsable del fenómeno llamado rectificación óptica y otro término que involucra un coseno de doble ángulo que se refiere a la formación de segundo armónico, situación para la cual se absorben dos fotones y se emite uno con una frecuencia doble de la inicial.

Entrada de dos haces:

$$P^{NL} = \frac{1}{2} \mathbf{c}^{(2)} \left\{ E_1^2 (1 + \cos 2\omega_1 t) + E_2^2 (1 + \cos 2\omega_2 t) + 2E_1 E_2 [\cos(\omega_1 + \omega_2) + \cos(\omega_1 - \omega_2)] \right\}. \quad (1.5)$$

De esta ecuación se observan doblamientos en la frecuencia y procesos no lineales de combinación de ondas como son la generación de suma ( $\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$ ) o diferencia ( $\omega_3 = \omega_1 - \omega_2$ ) de frecuencias. En estos fenómenos, uno de los haces actúa a manera de señal. En este proceso de mezclado de las 2 ondas, que provienen de una misma dirección, se produce un tercer haz luminoso que tiene una frecuencia equivalente a la diferencia de los otros dos iniciales [15].

Medios cúbicos ( $\mathbf{c}^{(3)} \gg \mathbf{c}^{(2)}$ ):

Entrada de un haz:

$$P^{NL} = \frac{1}{4} E_0^3 \mathbf{c}^{(3)} (3\cos \omega t + \cos 3\omega t). \quad (1.6)$$

De esta expresión se observa una conservación de la frecuencia original, resultado de una absorción y emisión de un fotón de misma frecuencia, fenómeno llamado auto-acción y el triplicado de frecuencia o formación de tercer armónico, que resulta de absorberse tres fotones de misma frecuencia y emitirse un solo fotón de frecuencia triplicada.

Entrada de dos haces:

$$P^{NL} = \mathbf{c}^{(3)} \frac{1}{4} \left\{ E_1^3 (3\cos \omega_1 t + \cos 3\omega_1 t) + E_2^3 (3\cos \omega_2 t + \cos 3\omega_2 t) + 6E_1 E_2 [E_2 \cos \omega_1 t + E_1 \cos \omega_2 t] + \dots + 3E_1^2 E_2 [\cos(2\omega_1 + \omega_2)t + \cos(2\omega_1 - \omega_2)t] + 3E_1 E_2^2 [\cos(2\omega_2 + \omega_1)t + \cos(2\omega_2 - \omega_1)t] \right\} \quad (1.7)$$

En esta ecuación se pueden presenciar fenómenos de auto-acción y de formación de tercer armónico para cada una de las frecuencias de los haces incidentes, así como mezclado de cuatro ondas [18], caso en el cual dos haces intensos de frecuencias distintas o iguales que viajan en direcciones opuestas sobre un medio no lineal, se mezclan y se unen a un haz de referencia, apareciendo dos nuevos haces de luz, unos con una frecuencia equivalente a la diferencia de los haces incidentes y el otro con frecuencia de valor igual a la suma de los dos primeros haces que intervienen en el fenómeno. Ocurre así una mezcla de frecuencias que pueden ser iguales o diferentes, transfiriéndose energía al haz de referencia formando una salida que sale paralelamente al mismo [15].

Las no linealidades de segundo orden son responsables a su vez de fenómenos como son: Dispersiones Raman y Brillouin, efecto Raman inverso, refracción dependiente de la intensidad, opacidad y reflectividad inducidas [19].

Para no linealidades de tercer orden o polarización no lineal cúbica, se dan además fenómenos ópticos no lineales como pueden ser: Inestabilidad modulacional, autoenfocamiento, autodesenfocamiento, solitones ópticos paramétricos, vórtices, efecto electro-óptico cuadrático, y efectos de índice refractivo dependiente de la intensidad, entre otros [19].

Otros desarrollos que se han dado, lo constituyen: La espectroscopia no lineal múltiple y sus aplicaciones a la ciencia de los materiales, óptica de guías de onda no lineales, conjugación de fase, biestabilidad conducente a conceptos de procesamientos de señales ópticas, el avance en fuentes altamente controlables en cambio a través de osciladores paramétricos ópticos, la óptica no lineal de fibras ópticas así como el estudio de las distintas variedades de solitones ópticos y temporales, las fuentes de terahertz, pulsos ultracortos del orden de femtosegundos y la generación de decenas de más altos armónicos en gases entre otros.

A pesar de que la óptica no lineal sea un área relativamente nueva, posee una diversidad de ramas y una tecnología asociada bastante desarrollada. Según establece el catálogo *Physics Abstract*, las ramas son las siguientes [20]:

- Espectros y dispersión Raman estimulados, CARS, dispersión Brillouin estimulada (*Stimulated Raman scattering and spectra; CARS; stimulated Brillouin scattering. Rayleigh scattering and spectra*)

- Conjugación de fase óptica (*Optical phase conjugation*)
- Fenómenos ópticos transitorios, transparencia autoinducida, saturación óptica y efectos relacionados (*Optical transient phenomena, self-induced transparency, optical saturation and related effects*)
- Atrapamiento de haces, autoenfocamiento, fluorescencia térmica y efectos relacionados (*Beam trapping, self focusing, thermal blooming and related effects*)
- Generación óptica de armónicos, conversión de frecuencia, oscilación paramétrica y amplificación, mezclado de ondas múltiples (*Optical harmonic generation, frequency conversion, parametric oscillation and amplification, multiwave mixing*)
- Biestabilidad óptica, multiestabilidad e interrupción o conmutación (*Optical bistability, multistability and switching*)
- Solitones ópticos (*Optical soliton*)

### 1.5.3 Formación de segundo armónico

La generación de segundo armónico se presenta cuando una única onda de bombeo que posee una frecuencia  $\omega$  se hace incidir sobre un material de características no lineales y se genera una onda en su segundo armónico  $2\omega$ . Esto se da en un medio dieléctrico que se considera que sólo posee no linealidad óptica de segundo orden, de tal manera que la respuesta del medio al campo eléctrico alternante de frecuencia angular  $\omega$  tiene una simetría par y el medio producirá un campo de polarización con una componente de corriente directa que puede ser usado para generar un voltaje DC a lo largo del cristal no lineal cuando éste último es expuesto a radiación de luz intensa.

La eficiencia en la formación del segundo armónico es proporcional a  $W/A$ , en donde  $W$  es la potencia incidente y  $A$  es el área de la sección transversal [17].

## 1.6 Solitones

También conocidos como ondas solitarias, son entidades ondulatorias localizadas con propiedades de estabilidad, que se propagan con pequeño cambio en su forma y se presentan bajo circunstancias muy particulares a partir de ondas que se propagan en medios dispersivos no lineales. Este fenómeno se presenta en muy distintas ramas científicas, sin embargo los intentos teóricos por entenderlos han sido casi exclusivamente matemáticos, siendo el estudio de estas entidades un área activa de investigación fisicomatemática en la cual se han encontrado unas cien ecuaciones diferenciales no lineales con soluciones de solitones, entre las cuales se encuentran las conocidas ecuaciones KdV (Korteweg-De Vries), NLO (Ecuación no lineal de Schrödinger) y la Sine-Gordon [21]. De esta manera se puede decir que el concepto de solitón es una construcción matemática sofisticada basada en la integrabilidad de una clase de ecuaciones diferenciales no lineales como se subraya en el artículo de Haus y Wong [22].

### 1.6.1 Solitones ópticos

Las ondas solitarias o solitones se pueden considerar como modos localizados coherentes de sistemas no lineales con dinámica de tipo partícula completamente distinta al comportamiento irregular y estocástico que se presenta en los sistemas caóticos [23]. En términos más estrictos una onda solitaria se refiere a una onda que se atrapa a sí misma y si además posee un comportamiento de tipo partícula, entonces recibe el nombre de solitón. Sin embargo es común referirse con el mismo nombre en la literatura científica, en este trabajo tomaremos ambos términos como equivalentes. Existen muchas variedades de solitones ópticos. Estos han cobrado interés, especialmente a raíz del desarrollo de la tecnología de las fibras ópticas, ya que son usados para codificar señales de bits en cadenas

de datos y transmitir las a enormes distancias sin acondicionamiento, así como de la investigación con miras a una nueva industria de comunicaciones de tecnología de sistemas de transmisión óptica de nueva generación, procedentes en su mayoría de los laboratorios Bell [24].

### 1.10 Clasificaciones de solitones ópticos

Aunque existe una enorme clasificación y subclasificación de tipos de solitones ópticos entre los cuales se pueden enumerar: Coherentes, incoherentes, brillantes, oscuros, vectoriales, discretos, multicolor, anillo, de banda, de cavidad, etc., podemos definir las tres principales clases de solitones ópticos [3]:

*Solitones temporales:* Son pulsos de luz en guías de ondas ópticas que bajo ciertas condiciones se pueden propagar sin distorsión sin importar cuan distante viajen. Es una solución especial de onda viajera de tipo pulso que es la única solución estable de una ecuación dispersiva de onda y consiste en un pico moviéndose aisladamente [17].

*Solitones espaciales:* Son haces estacionarios de luz robustos, auto-guiados que se propagan sin presentar distorsión en ciertos medios ópticos y exhiben comportamiento como las partículas. Se forman por medio del enfocado y atrapado mutuo de ondas en medios no lineales.

*Solitones espaciotemporales:* Se conocen también como “balas de luz”. Son señales de luz tridimensionales enfocadas-no difractivas, de pulso no dispersivo y autoatrapadas [25].

### **1.11 Solitones ópticos espaciales**

Los solitones espaciales u ondas solitarias espaciales se propagan sin dispersarse como haces autoconfinados. Se presentan cuando existe una no linealidad tal que conduzca a un cambio en el índice de refracción del medio de manera que genere un enfocamiento positivo tipo lente, y el haz luminoso, debido a este factor resulta autoatrapado y se propaga inalterado sin ninguna estructura de guía de onda [26].

Los solitones espaciales se pueden propagar en medios volumétricos o en guías de onda plana como puede ser a través de películas. Para esto se requiere la existencia no-linealidades de mayor intensidad [27].

### **1.12 Solitones ópticos multimodales**

A diferencia de los solitones ordinarios que tienen la característica de viajar con un solo modo o pico de intensidad, existen otro tipo de solitones que pueden tener más de un modo los cuales se pueden presentar siempre y cuando los modos no interfieran unos con otros. Enviando dos haces LASER cada uno con un modo distinto a través de un cristal no lineal (Niobato de estroncio-bario), se presencié como un haz siguió cerca de 10 metros después del otro de manera tal que sus fases relativas fueran tales que el cambio tan rápido para los modos no permitiera interferencia entre éstos. Los investigadores M. Segev, M. Mitchell y D. Christodoulides notaron así, que había un solitón con más de un pico de brillo al ver el perfil de intensidades del haz emergido [28].

### 1.13 Tipos de solitones ópticos espaciales

Atendiendo al tipo de no-linealidad usada, se pueden definir tres clases de solitones ópticos espaciales: Kerr o de tipo Kerr, que se basan básicamente en cualquier efecto físico que produzca un cambio en el índice de refracción dependiente de la intensidad. Pudiendo ser de origen electrónico, térmico u otro. Solitones fotorefractivos: Su física se basa en el efecto electro-óptico y su autoatrapamiento requiere usualmente un campo eléctrico de corriente directa. Solitones cuadráticos para los cuales, la física viene del hecho de la interacción paramétrica de ajuste de fase entre los diferentes componentes de frecuencia del campo óptico [29].

### 1.14 Solitones cuadráticos ópticos espaciales

Se les conoce también como *Simultones* [30]. Se predijo su existencia a mediados de los años setenta y fueron comprobados experimentalmente en el noventa. Consisten en ondas de múltiples frecuencias que se hayan confinados gracias a no-linealidades de segundo orden. Pueden presentar estabilidad tanto en guías de onda como en medios volumétricos y a diferencia de otro tipo de solitones ópticos espaciales, el autoatrapamiento no se da debido a un autoenfocamiento, sino por medio del resultado de un rápido intercambio energético entre las ondas multifrecuencia que conservan la potencia y la amplitud espacial de los haces mutuamente estabilizados [31]. Sin embargo, una vez que el solitón se ha generado en el cristal, ayudado gracias a que la longitud de difracción es comparable a la longitud de dispersión, cesa el intercambio de energía entre las ondas interactuando paraméricamente en el cristal y las envolventes de todas las ondas terminan enlazándose en fase. En el caso más simple de formación de segundo armónico, el solitón resultante de esta



interacción contiene ambos campos de los armónicos: Fundamental y segundo, que exhibe la típica forma de campana como situación más sencilla [32].

Esta clase de solitones poseen la particularidad de no presentar cambio en el índice de refracción debido a que están conformados por ondas multicolor acopladas entre sí por medio de la no-linealidad cuadrática. El frecuente flujo de energía entre las ondas de primer y segundo armónicos conducen a una continua acumulación de cambio de fase no lineal [33].