بسم الله الرحمن الرحيم

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و
نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه
متعلق به دانشگاه رازی است.

دانشکده علوم پایه
گروه فیزیک

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشدرشته‌ی فیزیک
گرایش نظری

عنوان پایان نامه:

بررسی شرایط شکل گیری، خصوصیات زمانی و فضایی و نحوه انتشار سالیتون ها در فیبرهای غیر خطی

استاد راهنما:
دکتر کیومرث منصوری

نام دانشجو:
حامدکریمی

مهرماه ۱۳۹۲

تقدیم به

پدر و مادر

و

همسر مهربانم

سپاس گذاری

با سپاس و تشکر فراوان از زحمات استاد عزیزم جناب آقای دکتر کیومرث منصوری که در تمام مراحل نگارش این پایان نامه مرا همراهی نموده واز رهنمودهای خود بی نصیب نگذاشتند. همچنین از زحمات تمامی اساتید و معلمان عزیزم از سرآغاز تحصیل تا امروز کمال تشکر را دارم. و در پایان از زحمات پدر و مادر و همسرم که در طول نگارش این پایان نامه همواره پشتیبانم بوده اند قدردانی می کنم.

حامد کریمی

مهر ۱۳۹۲

چکیده

در این پایان نامه قصد داریم علاوه مرور انواع سالیتون های فضایی و پیشرفت های اخیر در این زمینه، رفتار سالیتون ها در فیبرهای غیرخطی را بررسی کنیم. در مرحله اول معادله انتشار پالس را با شرایط مناسب حل می‌کنیم و سپس با استفاده از روش Split-Step Fourier Method معادلات را حل عددی کرده به بررسی شرایط شکل گیری و خصوصیات سالیتون های فضایی به وجود آمده می پردازیم. و در صورت امکان برهمکنش بین سالیتون ها در فیبر خطی نیز بررسی می شود.

کلید واژه ها: سالیتون– Split-Step Fourier Method – معادله انتشار پالس

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: آشنایی با سالیتون های اپتیکی فضایی

۱-۱- مقدمه ۲
۱-۲- سالیتون‌های اپتیکی فضایی ۲
۱-۲-۱- تاریخچه سالیتون‌های اپتیکی فضایی ۳
۱-۳- دلیل جذابیت سالیتون‌های اپتیکی فضای ۴
۱-۴- سالیتون‌های فضایی در محیط‌های غیرخطی مختلف ۵
۱-۴-۱- سالیتون‌های فوتورفرکتیو ۵
۱-۴-۲- سالیتون‌های درجه دو ۶
۱-۴-۳- سالیتون‌های فضایی در محیط‌های غیرخطی دیگر ۷
۱-۵- خانواده سالیتون‌های فضایی ۷
۱-۵-۱- سالیتون‌های تاریک و گرداب‌های اپتیکی ۷
۱-۵-۲- سالیتون‌های فضایی برداری ۸
۱-۵-۳- سالیتون‌های غیرهمدوس ۸
۱-۵-۴- سالیتون‌های فضا زمانی ۱۰
۱-۵-۵- سالیتون‌های اتلافی و کاواکی ۱۱
۱-۶- سالیتون‌های فضایی در محیط‌های گسسته ۱۱
۱-۶-۱- سالیتون‌های گسسته در موجبرهای یک‌بعدی ۱۱
۱-۶-۲- سالیتون‌های گسسته در شبکه‌های فوتونیکی دوبعدی ۱۲
۱-۶-۳- سالیتون‌های گسسته سطحی ۱۴
۱-۶-۴- سالیتون‌های گسسته در سایر محیط‌ها ۱۵

فصل دوم: انتشار پالس در فیبر نوری

۲-۱- فیبر نوری ۱۸
۲-۲- اتلاف و پراکندگی در فیبر نوری ۱۹
۲-۳- انتشار پالس در فیبر نوری ۲۲
۲-۳-۱- انتقال پالس پیکو ثانیه در فیبر نوری ۲۳
۲-۳-۱-۱- حل معادله انتشار ۲۳
۲-۴- پاشندگی سرعت گروه ۲۶
۲-۵- مدولاسیون خودفازی ۲۷
۲-۵-۱- تغییرات شکل طیفی ۲۹
۲-۶- اضافه کردن اثر پاشندگی سرعت گروه ۳۰

فصل سوم : روش‌های حل معادله انتقال پالس درفیبرهای غیرخطی

۳-۱- ناپایداری مدولاسیونی ۳۴

۳-۱-۱- تحلیل پایداری خطی..... ۳۴
۳-۲- تشکیل سالیتون‌ها در فیبر..... ۳۵
۳-۲-۱- روش پراکندگی معکوس..... ۳۵
۳-۲-۲- سالیتون اصلی..... ۳۷
۳-۲-۳- سالیتون‌های مرتبه بالاتر..... ۳۸
۳-۳- برهمکنش سالیتون‌ها ۳۸
۳-۴- حل عددی معادله انتقال پالس در فیبر غیرخطی به روش Split-Step Fourier..... ۴۰

فصل چهارم: نحوه انتشار پالس اپتیکی در فیبر و شکل‌گیری سالیتون‌ها

۴-۱- نحوه انتشار انواع پالس‌ها در فیبر و در ناحیه پراکندگی غیرعادی..... ۴۸
۴-۱-۱- انتشار پالس گاوسی..... ۴۸
۴-۱-۲- انتشار پالس سکانت هیپربولیک..... ۵۲
۴-۲- تاثیر پراکندگی مرتبه ۳..... ۵۶
۴-۳- برهمکنش سالیتون ها..... ۵۸
منابع ۶۳

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱- سالیتون فضایی اپتیکی در حال انتشار در یک کریستال فوتورفرکتیو با طول ۵ میلی‌متر.....۳
شکل ۱-۲- خاصیت خود محدودکنندگی با نور سفید و باریکه‌ای با همدوسی جزئی. ۹
شکل ۱-۳- سالیتون‌های ناشی از باریکه ناهمدوس.....۱۰
شکل ۱-۴- شکل‌گیری سالیتون‌های گسسته در آرایه موجبر نیمرسانای $AlGaAs$ با طول ۴ میلی‌متر.....۱۲
شکل ۱-۵- سالیتون دو بعدی گسسته در شبکه فوتونیکی القا شده نوری.....۱۳
شکل ۱-۶- شکل گیری سالیتون سطحی دوبعدی.....۱۵
شکل ۲-۱- ساختار فیبر نوری.....۱۸
شکل ۲-۲ - منحنی جذب فیبر سیلیکا تک مدی در طول‌موج‌های متفاوت.....۱۹
شکل ۲-۳- وابستگی ضریب شکست به طول موج در سیلیکا.....۲۰
شکل ۲-۴- تغییرات D و β_2 بر حسب طول موج در
سیلیکا.....۲۱
شکل ۲-۵- پهن شدن زمانی پالس بر اثر پراکندگی مد در فیبر چند مدی.....۲۱
شکل ۲-۶- اثر پاشندگی سرعت گروه روی پال گاوسی در هنگام انتشار در فیبر نوری.....۲۷
شکل ۲-۷- انتقال فاز و چیرپ القا شده را برای حالتی که شکل پالس ورودی گاوسی یا سوپرگاوسی یا
است..... ۲۹
شکل ۲-۸ - تغییرات شکل صیفی پالس گاوسی را بر حسب $\Phi_{\max}$.....۳۰
شکل ۲-۹- تغییرات یک پالس گاوسی بدون چیرپ را در ناحیه پراکندگی عادی.....۳۱
شکل ۲-۱۰- تغییرات یک پالس گاوسی بدون چیرپ را در ناحیه پراکندگی غیر عادی..... ۳۲
شکل ۳-۱ طرح کلی روش پراکندگی معکوس..... ۳۶
شکل ۳-۲- روش SSFM برای یک تکرار با طول قدم h که از $z=(j-1)h$ شروع می‌شود.....۴۲
شکل ۳-۳- یک موج سینوسی با فرکانس $1Hz$ ۴۳
شکل ۳-۴- فرکانس نمونه‌گیری‌های مختلف برای تقریب موج سینوسی.....۴۳
شکل ۳-۵- طرح کلی برای یک قدم الگوریتم متقارن SSFM.. ..... ۴۵
شکل ۴-۱- تغییرات زمانی پالس گاوسی در حین انتشار در فیبر.. ..... ۴۹
شکل ۴-۲- تغییرات زمانی پالس گاوسی با چیرپ اولیه ۱ در حین انتشار در فیبر.. ..... ۵۰
شکل ۴-۳- تغییرات زمانی پالس گاوسی با چیرپ اولیه ۱- در حین انتشار در فیبر.. .....۵۰
شکل۴-۴- تحول زمانی پالس سوپرگاوسی در ناحیه پراکندگی غیر عادی $m=3$ و $N=1$.... ..... ۵۱
شکل۴-۵- تحول طیفی پالس گاوسی در ناحیه پراکندگی غیر عادی $N=3$.. ..... ۵۲
شکل ۴-۶- تغییرات زمانی پالس سکانت-هیپربولیک با چیرپ اولیه ۱ در حین انتشار در فیبر.. .....۵۳
شکل ۴-۷- تغییرات زمانی پالس سکانت در حین انتشار در فیبر.. ..... ۵۴
شکل ۴-۸- سالیتون مرتبه دو..... ۵۵
شکل ۴-۹- سالیتون مرتبه ۳..... ۵۵
شکل ۴-۱۰- تاثیر پراکندگی مرتبه ۳ روی پالس گاوسی ($\bar{N}=0.8$) در انتشار داخل فیبر..... ۵۶

شکل ۴-۱۱- تغییرات طیفی پالس گاوسی در هنگام عبور از فیبر ($N = 0.8$) ۵۷
شکل ۴-۱۲- تغییرات طیفی پالس گاوسی در هنگام عبور از فیبر ($\bar{N} = 8$) ۵۷
شکل ۴-۱۳- تاثیر پراکندگی مرتبه ۳ روی پالس گاوسی در انتشار داخل فیبر ($\bar{N} = 8$).. .....۵۸
شکل ۴-۱۴- تاثیر β_3 روی انتشار سالیتون مرتبه ۱.. ..... ۵۸
شکل۴-۱۵- انتشار دو سالیتون با فاز نسبی صفر و دامنه یکسان در فیبر و $q = 3.3$ ۵۹
شکل۴-۱۶- انتشار دو سالیتون با فاز نسبی $\pi / 2$ و دامنه یکسان در فیبر و $q = 3.3$ ۶۰
شکل۴-۱۷- انتشار دو سالیتون با فاز نسبی $\pi / 3$ و دامنه یکسان در فیبر و $q = 3.3$ ۶۱
شکل ۴-۱۸- تاثیر دامنه نسبی اولیه در برهمکنش سالیتون‌ها برای $q = 3.3$ و $r = 1.2$ ۶۱

پیشگفتار

سالیتون ها را می توان به صورت ساده به عنوان موج هایی منزوی در نظر گرفت که بدون اتلاف در محیط منتشر می شوند. سالیتون ها هنگامی شکل می گیرند که اثرات غیرخطی با پراش ذاتی در ماده اپتیکی که عامل پهن شدگی پرتو نوری است برابری نماید و پراش در محیط غیرخطی کنترل شده و پرتو شکل اولیه خود را حفظ نماید.

سالیتون ها در بسیاری از شاخه های فیزیک از جمله اپتیک، پلاسما، حالت جامد، سیالات و حتی نجوم مورد مطالعه قرار می گیرند. بخصوص در دو دهه اخیر به دلیل تحقیقات و یافته های عملی در حوزه اپتیک غیرخطی این شاخه از فیزیک به شدت رشد داشته است. سالیتون های اپتیکی در دوناحیه فضایی و زمانی مورد بررسی قرار می‌گیرند ولی بیشتر تحقیقات در ناحیه فضایی انجام می شود و این به خاطر این است که سالیتون های زمانی به عنوان موجودات یک بعدی در نظر گرفته می شوند ولی سالیتون های فضایی ابعاد بیشتری دارند و زمینه تحقیقات بیشتر را فراهم می آورند.برخلاف سالیتون های زمانی، سالیتون های فضایی در بسیاری از محیط های غیر خطی غیر آنی مانند کریستال های مایع و موادی که با نور یا گرما اثرات غیر خطی بروز می دهند، قابلیت تشکیل و انتشار را دارند.

در فصل اول یک مرور کلی از انواع سالیتون ها در محیط های متفاوت ارائه می دهیم.در فصل دوم این پایان نامه تئوری انتقال پالس در فیبر را با در نظر گرفتن اثرات غیرخطی و پاشندگی ارائه می دهیم و معادله ای غیرخطی را برای انتقال پالس دراین محیط بدست می آوریم. در فصل سوم به صورت اجمالی به راه حل تحلیلی این معادله با استفاده از تئوری پراکندگی معکوس می پردازیم و در ادامه روش حل عددی این معادله را به صورت کامل شرح می دهیم. در فصل آخر به بررسی تغییرات انواع پالس ها در عبور از فیبر می پردازیم و شرایط شکل گیری سالیتون ها، نحوه انتشار و برهمکنش آنها را با استفاده از حل عددی معادله انتقال پالس در فیبر بررسی می کنیم.

فصل اول

آشنایی با سالیتون های اپتیکی فضایی

۱-۱- مقدمه

در این بخش ما یک مقدمه‌ای برای آشنایی با سالیتون‌های اپتیکی فضایی و تاریخچه آنها ارائه می‌دهیم. آشنایی با پیشرفت‌های جدید در این حوزه هدف دیگر این فصل است.

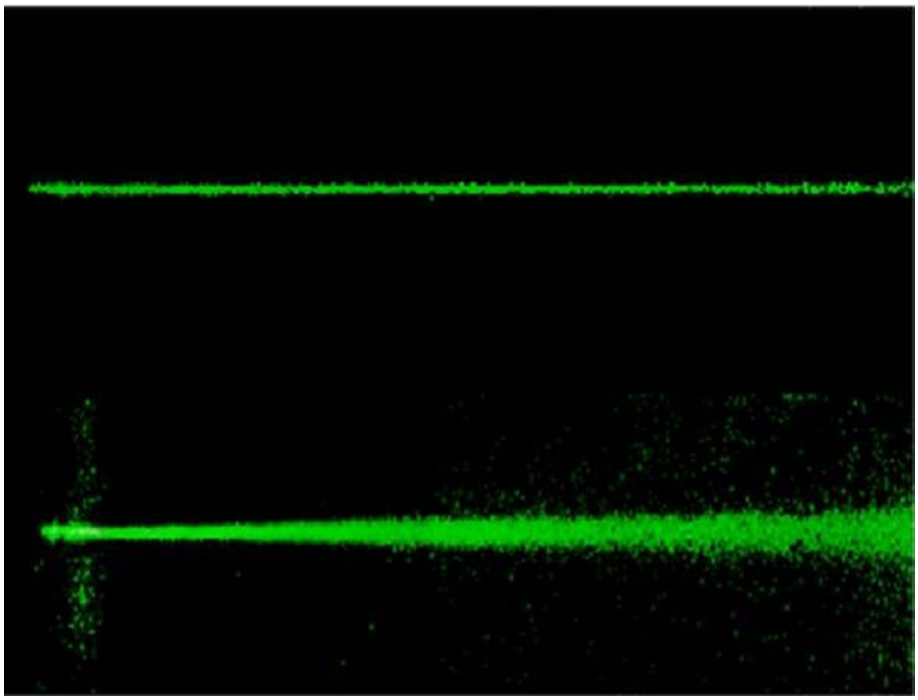
۱-۲- سالیتون‌های اپتیکی فضایی

سالیتون‌ها موج‌های موضعی هستند که بدون تغییر شکل در محیط‌های غیر خطی منتشر می‌شوند. این پدیده در بسیاری از شاخه‌های فیزیک مانند هیدرودینامیک، پلاسما، اپتیک غیرخطی و چگالش بوز-انیشتین رخ می‌دهد. در اپتیک یک بسته موج نوری(پالس یا باریکه) به صورت طبیعی به دلیل پراکندگی و پراش پهن می‌شود و اگر با استفاده از اثرات غیرخطی بتوان پراکندگی و پراش را خنثی کرد در این صورت بسته موج بدون تغییر شکل فضایی،زمانی یا هر دو در محیط منتشر می‌شود. اثرات غیر خطی به خصوصیات نور منتشر شونده در محیط بستگی دارند بنابراین نور می‌تواند روی نحوه انتشار خود در محیط اثر بگذارد و در حالات خاصی پراکندگی و پراش را جبران کند. به همین خاطر به سالیتون‌ها بسته‌های خود محدود کننده[1] می‌گویند. قسمت بالای شکل ۱-۱ انتشار سالیتون را در یک کریستال فوتوریفرکتیو نشان می‌دهد و قسمت پایین شکل برای حالتی است که عدم تعادل بین پراکندگی و پراش را با اثرات غیرخطی نشان می دهد.

در سال‌های اول مشاهده این پدیده واژه سالیتون را با شک به کار می‌بردند زیرا مبدا این واژه در ریاضیات بود. سالیتون‌ها به یک دسته جواب خاص اتلاق می‌شوند که در یک سری معادلات مشتقات جزئی غیرخطی انتگرال‌پذیر صدق می‌کنند. در اپتیک غیرخطی با استفاده ازمعادلاتی که از معادلات ماکسول به دست می آید حرکت موج را در داخل محیط غیرخطی توصیف می‌کنیم. این معادلات را می‌توان در محیط کر ایده آل با تئوری پراکندگی معکوس[2] حل کرد [۱] ولی در فیزیک سیستم‌های زیادی داریم که خاصیت کر کامل را ندارند یا انواع‌دیگری از خاصیت غیر خطی در آنها وجود دارند که با معادلات انتگرال ناپذیر توصیف می‌شوند. در گذشته به جواب‌های خود محدودکننده این معادلات موج‌های سالیتونی[3] می‌گفتند تا بین خواص برهمکنش و برخورد آنها با سالیتون‌های کامل (جواب خودمحدودکننده معادلات انتگرال پذیر)

[1] self-trapped
[2] inverse scattering theory
[3] solitary waves

تمایز قائل شوند ولی در حال حاضر از این نامگذاری استفاده نمی‌شود و به هر دو دسته سالیتون اپتیکی فضایی گفته می‌شوند.



شکل ۱-۱- سالیتون فضایی اپتیکی در حال انتشار در یک کریستال فوتورفرکتیو با طول ۵ میلی‌متر.(قسمت پایین مربوط به حالتی است که اثرات غیرخطی در تعادل با پراکندگی و پراش نیست)

۱-۲-۱- تاریخچه سالیتون‌های اپتیکی فضایی

ایده القای خاصیت موج‌بری توسط باریکه اپتیکی و تصحیح مسیر انتشار خود اولین بار توسط اسکریان[۱] در سال ۱۹۶۲ ارائه گردید [۲]. چند سال بعد پدیده خودکانونی در یک ماده با خاصیت غیرخطی کر مشاهده شد[۳]. چیاوو[۲] برای بررسی این پدیده معادله موج را در این نوع محیط‌ها در یک و دو بعد حل کرد و خود-محدودکنندگی[۳] باریکه اپتیکی را پیشنهاد داد [۴]. کمی بعد نشان داده شد که این سالیتون‌های دوبعدی ناپایدار هستند و به سرعت میرا از بین می‌روند [۵]. سالیتون‌های یک بعدی هم در محیط سه‌بعدی توده[۴] غیرخطی به علت ناپایداری‌های عرضی[۵] به چندین قسمت شکسته و ناپایدار می‌شوند. بنابراین سالیتون‌های پایدار در محیط کر فقط در حالتی ایجاد می‌شوند که یکی از دو بعد عرضی بی‌اثر شوند (پراش در یک بعد محدود می‌شود). شبیه‌سازی عددی نشان دادند که سالیتون‌های دوبعدی پایدار در محیط‌های با خاصیت غیر

[1] Askar'yan
[2] Chiao
[3] Self-traping
[4] Bulk
[5] Transverse dimensions

خطی اشباع‌پذیر ایجاد می‌شوند[۶]. این ایده تا بیست سال نادیده گرفته شد تا در دهه ۱۹۹۰ با پیدایش کریستال‌های فوتورفرکتیو سالیتون‌های دو بعدی پایدار مشاهده شد.

مشاهده سالیتون‌های اپتیکی فضایی اولین بار توسط اشکین[1] گزارش شد [۷]. آنها خود-محدودکنندکی یک باریکه دوبعدی با قطبش دایره‌ای در بخار سدیم را در توان‌های بالا مشاهده کردند. خاصیت غیرخطی القا شده در بخار سدیم از نوع اشباع‌پذیر بود که در سیستم‌های دوترازی در نزدیکی حالت رزونانس رخ می-دهد. اشباع‌پذیری به‌این دلیل رخ می‌دهد که میدان پرشدت اختلاف جمعیت بین دو تراز را کاهش می‌دهد و افزایش شدت از یک مقدار آستانه به بعد اختلاف جمعیت و در نتیجه ضریب شکست را تغییر نمی‌دهد. ولی چون این پدیده اطراف فرکانس رزونانس رخ می‌دهد اتلاف خیلی زیاد خواهد بود وامکان مشاهده و بررسی خصوصیات سالیتون‌ها در فاصله‌های زیاد امکان پذیر نبود و به همین خاطر این گروه مطالعه در این زمینه را ادامه ندادند تا در سال ۱۹۸۵ دومین مشاهده سالیتون‌های ۱ بعدی در یک موجبر مسطح که با Cs_2 پر شده بود صورت گرفت [۸]. این آزمایش راه را برای مشاهده سالیتون‌های یک بعدی در محیط‌هایی با خاصیت کر غیرخطی همچون شیشه، نیمرساناها و پلیمرها هموار کرد [۹-۱۲]. همه تحقیقات انجام شده در آن دوران روی سالیتون‌های یک بعدی در محیط‌هایی که خاصیت غیرخطی از نوع کر دارند متمرکز بود. امکان مطالعه تئوری کامل این نوع سالیتون‌ها و تصور اشتباه در این مورد که فقط این ساختارها قادر به ایجاد سالیتون‌های پایدار هستند باعث تمرکز تحقیقات در یک جهت خاص شده بودند. آزمایش‌ها برای مشاهده سالیتون‌های دوبعدی در آن زمان اکثرا با شکست مواجه می‌شدند دلیل این شکست‌ها را می‌توان در دو موضوع جستجو کرد. اثر کر اپتیکی چون ماهیت الکترونیکی دارد (ضعیف هستند) بنابراین به شدت‌های بالایی نیاز داریم و همچنین برای اثر کر اشباع‌نشده اثر خود متمرکزی در شدت‌های بالا باعث می‌شود که چگالی انرژی در کانون خیلی بالا برود و باریکه بشکند.

۱-۳- دلیل جذابیت سالیتون‌های اپتیکی فضای

بیشترجذابیت سالیتون‌های فضایی اپتیکی را می‌توان در برهمکنش ذره گونه آنها دربرخورد با هم دانست. پیشنهاداتی برای کاربرد سالیتون‌ها در زمینه‌هایی همچون موجبری، باریکه شکاف، اتصال اپتیکی[2]، تبدیل فرکانس[3]، انتقال تصویر، محاسبات بدون‌گیت[4] و حتی ارتباطات دریایی شده است.

رفتار ذره گونه سالیتون ها اولین بار در سال ۱۹۶۵ پیشنهاد شد [۱۳]. مشخص شد که در برخورد با یکدیگر به هم نیرو وارد می‌کنند. این نیرو می‌تواند جاذبه یا دافعه باشد[۱۴]. رفتار ذره گونه آنها با استفاده از سالیتون‌های یک‌بعدی کر به صورت تجربی مشاهده شد[۱۵،۱۶] و نشان داده شد که اگر سالیتون‌ها هم فاز

[1] Ashkin
[2] optical interconnects
[3] frequency conversion
[4] gateless computing

باشند نیرو جاذبه و اگر غیر هم‌فاز باشند نیروی بین آنها دافعه خواهد بود. پدیده coherent four-wave mixing نیز در برهمکنش سالیتون‌ها مشاهده شد [۱۷]. تحت شرایط استاندارد برخورد بین سالیتون‌های کر یک‌بعدی همیشه الاستیک و تعداد آنها ثابت است و تحت شرایط اولیه خاص تبادل انرژی بین آنها صورت می‌گیرد. بعد از کشف سالیتون‌های فوتورفرکتیو جهش عظیمی در تحقیقات صورت گرفت [۱۸-۲۶]. برای مثال نشان داده شد که در برهمکنش غیرالاستیک بین دو سالیتون فضایی (در محیطی با خاصیت‌غیرخطی اشباع پذیر) ممکن است سالیتون از بین برود یا متولد شود [۲۷،۲۸].

خصوصیت جالب دیگری که سالیتون‌های فضایی را از سالیتون زمانی متمایز می‌کند (۲+۱) بعدی آنهاست (سالیتون‌های زمانی در(۱+۱) بعد تحول می‌یابند). برهمکنش ۳بعدی، سالیتون‌های گردابی[1] و اثر ممنتوم زاویه‌ای و سالیتون‌های دوقطبی چرخان همه بعد از پیدایش سالیتون‌های فضایی دوبعدی پایدار کشف شدند.

۱-٤- سالیتون‌های فضایی در محیط‌های غیرخطی مختلف

قبل ازدهه ۱۹۹۰ تقریبا همه آزمایش‌ها در محیط‌هایی با خاصیت غیرخطی کر یا شبیه کر انجام شده بود. بعد از کشف سالیتون‌های فوتورفرکتیو و چهار قطبی تحول زیادی در پیشرفت این رشته صورت گرفت. در این قسمت به صورت خلاصه به توضیح این دو نوع سالیتون می‌پردازیم.

۱-٤-۱- سالیتون‌های فوتورفرکتیو

مواد فوتورفرکتیو در سال‌های اخیر کاربردهای فراوانی در اپتیک پیدا کرده‌اند. خاصیت غیرخطی اشباع پذیر در این نوع مواد را می‌توان بدین صورت توضیح داد که در ابتدا کریستال را با یک پرتو با پروفایل غیر یکنواخت (در بعضی از کاربردها با استفاده از دو پرتو همدوس، یک الگوی تداخلی رو سطح کریستال ایجاد می‌کنند) روشن می‌کنند. در جاهایی که شدت نور بیشتر است الکترونها در تراز ناخالصی (با انرژی بین انرژی تراز ظرفیت و رسانش) می‌توانند فوتون جذب کنند و به تراز رسانش بروند و حفره در تراز ناخالصی به جا گذارند. الکترون‌ها در تراز رسانش می‌توانند حرکت کنند و حتی به خارج کریستال دیفیوژ کنند. جریان دیفیوژن به سمت مکان‌هایی هست که شدت نور در آنجا کمتر است و در آنجا ممکن است الکترونها با حفره ها ترکیب شده و به تراز ناخالصی برگردند و تا زمانیکه فوتون جدیدی جذب نکنند همانجا می‌مانند. بنابراین در مکانهایی که شدت نور کم است بار خالص منفی داریم و در مکان‌های پرشدت تعداد حفره‌ها بیشتر است و بار خالص مثبت است و یک میدان موضعی در اثر جدایی بار به وجود می‌آید. ضریب شکست بر طبق اثر الکترو-اپتیک تغییر خواهد کرد. پاسخ غیرخطی کریستال به نور تابیده شده غیر موضعی (به علت جابجایی بارها در مقیاس میکرونی) و با تاخیر خواهد بود. این پدیده به علت مکانیزم توضیح داده شده در

[1] vortex

بالا اشباع پذیر نیز است و بنابراین قابلیت پشتیبانی از سالیتون دو بعدی، سالیتون ناهمدوس و چرخش سالیتون‌ها به دور هم را دارند.

این نوع سالیتون‌ها اولین بار در سال ۱۹۹۲ و در ناحیه شبه ایستا پیش‌بینی شدند [۱۸،۱۹]. کمی بعد خود-متمرکزی پایدار گزارش شد [۲۲] سپس سالیتون‌های فوتورفرکتیو پایدار (screening solitons) پیش‌بینی و در یک سری آزمایش مشاهده شدند[۲۵-۱۵]. شکل ۱ یک نمونه از این نوع سالیتون‌های دوبعدی را در کریستال استرونیوم-باریم-نیوبات نشان می‌دهد.

کشف سالیتون‌های فوتورفرکتیو به چند دلیل خیلی با اهمیت بود. برای مثال توان لازم برای ایجاد این سالیتون‌ها در حد میلی‌وات است. سالیتون‌های ضعیف در این محیط می‌تواند شرایط لازم برای موج‌بری برای باریکه‌های پرشدت در طول موج‌هایی که این محیط کمتر به آنها حساس است را ایجاد کند [۲۹].

۱-٤-۲- سالیتون‌های درجه دو

این نوع سالیتون‌ها در دهه ۱۹۷۰ در محیط‌هایی با خاصیت غیرخطی درجه دو پیش‌بینی شدند [۳۰] و به صورت تجربی در سال ۱۹۹۵ مشاهده شدند [۳۱]. در این حالت به دام‌اندازی از طریق تبادل انرژی بین هارمونیک اصلی و دوم صورت می‌گیرد. در این آزمایش دو باریکه با قطبش عمود برهم به یک کریستال دوشکستی (KTP) تابانده شد و با استفاده از شرایط انطباق‌فاز نوع ۲ به دام اندازی حاصل شد. چیدمان آزمایش به صورتی بود که باریکه غیرعادی و هارمونیک دوم تولید شده به علت موازی نبودن سرعت گروه از باریکه اصلی فاصله می‌گرفتند. نشان داده شد در نزدیکی شرایط انطباق فاز باریکه اصلی و هارمونیک دوم تولید شده به هم جفت می‌شوند و این جفت شدگی باعث می‌شود اثرات پراکنده کننده خنثی شوند و دو باریکه بدون تغییر حرکت کنند. هرچند سالیتون درجه دو در این آزمایش در برهمکنش هم‌فاز باریکه اصلی و هارمونیک دوم تولید شده است ولی ایجاد این نوع سالیتون با یک باریکه هم امکان‌پذیر است. در حقیقت نشان داده شده است که در همه فرایندهای پارامتریک که با تولید دو باریکه همراهند (مثلا تولید هارمونیک-های بالاتر در محیط‌های غیر خطی) امکان به‌دام‌اندازی بر اثر جفت شدگی باریکه‌ها وجود دارد. در همان سال‌ها این نوع سالیتون‌ها در موجبر $LiNbO_3$ مشاهده شدند [۳۲]. تفاوت با آزمایش قبلی در میزان تولید هارمونیک دوم بود. این آزمایش از شرایط انطباق فاز دور بود و میزان هارمونیک دوم خیلی کمتر از آزمایش قبلی بود. نشان داده شد که این میزان کم هم می‌تواند یک انتقال فاز وابسته به شدت به هارمونیک اصلی منتقل کند. این مکانیسم به cascading معروف است و منجر به به‌دام اندازی و تولید سالیتون مرتبه دو می‌شود. این آزمایش همچنان نشان داد که اثرات غیرخطی در این حالت به میزان دوری از شرایط انطباق فاز بستگی دارند یعنی علاوه بر اندازه، علامت آنها هم قابل کنترل است. همین ویژگی‌ها بود که باعث شد سالیتون‌های مرتبه دو زمانی در یک بعد مشاهده شوند[۳۴،۳۳].

۱-٤-۳- سالیتون‌های فضایی در محیط‌های غیرخطی دیگر

علاوه بر محیط‌های غیرخطی کر، فوتورفرکتیو و مرتبه دو انواع دیگری از محیط‌های با خاصیت غیرخطی وجود دارند. به عنوان مثال می‌توان به اثرات غیر خطی تحریکی در بخار اتمی[1] [۳۵]، photobleaching upconverted در پلیمرهای دوپ‌شده با دای [۳۶]، quadraticelectro-optic effects in paraelectric nonlinear crystals یا اثراتی مانند اثر الکترو-اپتیکی مرتبه دو در کریستال‌های غیرخطی پاراالکتریک و اثرات غیرخطی ناشی از گرما در کریستال‌های مایع [۳۷-۴۱] اشاره کرد. در این نوع مواد هم امکان شکل‌گیری سالیتون با مکانیزم‌های متفاوت وجود دارد.

۱-۵- خانواده سالیتون‌های فضایی

صرف‌نظر از منشا اثرات غیرخطی سالیتون‌های فضایی را می‌توان بر اساس خصوصیات ذاتی‌آنها دسته بندی کرد. این دسته‌بندی شامل سالیتون‌های تاریک، روشن، همدوس و ناهمدوس، فضایی-زمانی، تک مولفه‌ای و چند مولفه‌ای و سالیتون‌های کاواک می‌شود. در این قسمت سعی می‌کنیم برای هر کدام از دسته-بندی‌ها توضیحاتی در باره ساختار و تاریخچه را ارائه دهیم.

۱-۵-۱- سالیتون‌های تاریک و گرداب‌های اپتیکی

این نوع سالیتون‌ها در حالت یک‌بعدی مانند یک شکاف تاریک و در حالت دو بعدی مانند یک حفره در زمینه روشن هستند یعنی میدان در شکاف و حفره صفر می‌شود. سالیتون‌های تاریک یک بعدی در سال ۱۹۷۳ پیش‌بینی شدند و نشان داده شد که برخلاف سالیتون‌های روشن[2] در محیط‌های غیرخطی که نور را واگرا می‌کنند هم امکان به وجود آمدن دارند [۴۲]. ولی نوع دو بعدی آن کمی قبل‌تر و در هنگام مطالعه ابرجریان‌ها پیش‌بینی شدند [۴۳-۴۴].

نخستین مشاهده سالیتون‌های فضایی تاریک یک‌بعدی برمی‌گردد به سال ۱۹۹۰ [۴۵،۴۶]. محیط‌های غیرخطی زیادی، که همگی اشباع‌پذیربودند، در این آزمایش استفاده شدند. برای بار اول این موجودات در صفحه عمود بر باریکه لیزر که در یک محیط با خاصیت واگرا کنندگی مشاهده شدند و کمی بعد نوع دو بعدی آن که شامل گرداب‌های اپتیکی در محیط واگرا کننده بود مشاهده شد[۴۷]. بعد از پیش‌بینی و مشاهده سالیتون فوتورفرکتیو [۱۸،۱۹]، سالیتون‌های تاریک فوتوولتاییک و photorefractive screening پیش‌بینی شدند [۲۱،۲۰]. اولین تلاش برای مشاهده سالیتون‌های یک‌بعدی فوتورفرکتیو و سالیتون گردابی دوبعدی توسط درو و همکارانش در یک کریستال فوتورفرکتیو توده انجام شد [۴۸]. این سالیتون‌ها از نوع غیر موضعی و شبه‌پایا بودند. کمی بعد سالیتون‌های screening و سالیتون فوتوولتاییک تاریک مشاهده شدند[

[1] Resonant nonlinear effects in atomic vapors
[2] bright solitons

۲۵،۴۹،۵۰]. سالیتون‌های گردابی دوبعدی در محیط ایزوتروپیک با خاصیت واگرا کنندگی گزارش شدند[۴۷]. ثابت کردند که در محیط های غیرایزوتروپیک هم می‌توان با استفاده از این دو خاصیت غیرخطی سالیتون گردابی پایدار تولید کرد [۵۱،۵۲].

۱-۵-۲- سالیتون‌های فضایی برداری

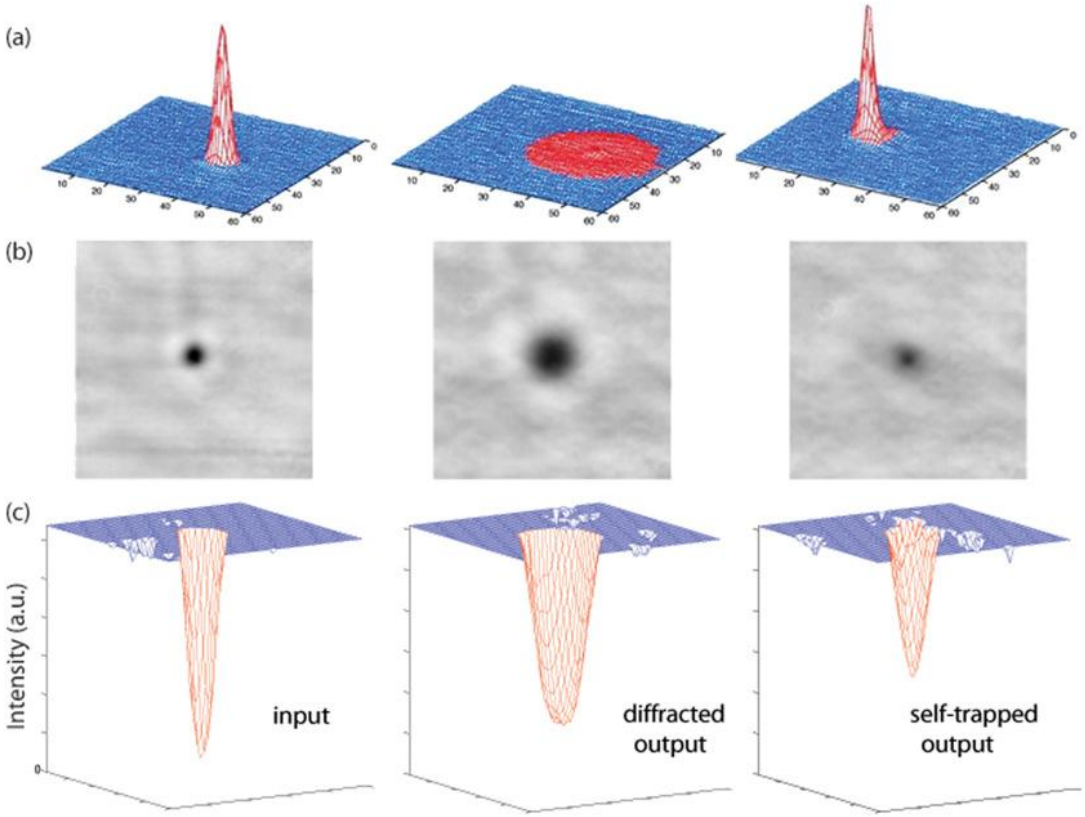
سالیتون‌های برداری جز سالیتون‌های چند مولفه‌ای هستند که باهم جفت شده‌اند. پیش‌بینی آنها به سال ۱۹۷۴ برمی‌گردد [۵۳]. هنگام مطالعه دو سالیتون‌همسان با قطبش‌های عمود برهم که توسط دو اثر مدولاسیون خودفازی و فاز متقابل[1] جفت شده‌اند متوجه وجود این نوع سالیتون فضایی شدند. اولین آزمایش برای مشاهده آنها در سال ۱۹۹۲ در محیط غیرخطی Cs_2 انجام شد و جفت سالیتون تاریک و روشن باهم منتشر می‌شدند (جفت شدگی از طریق فاز متقابل بود) [۵۴].

در سال ۱۹۹۶ این نوع سالیتون در موجبر $AlGaAs$ و مطابق پیش‌بینی اولیه گزارش شدند. پلاریزاسیون میدان‌ها در راستای صفحات $0\ 1\ 1\ 0$ و $0\ 0\ 1\ 0$ کریستال قرار داشتند و اثرات مدولاسیون خودفازی و فاز متقابل باهم برابر می‌شدند و شرط پیش‌بینی شده برای ایجاد آنها ارضا می‌شد.

۱-۵-۳- سالیتون‌های غیرهمدوس

سالیتون‌های غیرهمدوس باریکه‌های خود-محدودکننده با همدوسی جزئی هستند که می‌توانند در محیط-های غیرخطی منتشر شوند. قبل از سال ۱۹۹۶ تصور می‌شد که به علت اینکه سالیتون‌ها ذاتا موجودات همدوسی هستند بنابراین سالیتون ناهمدوس وجود ندارد ولی در این سال یگ گروه موفق شدند خودمحدودکنندگی نور سفید غیرهمدوس را در محیط غیرخطی مشاهده کنند [۵۵] و سپس حالت‌های یک‌بعدی و دوبعدی آنها در آزمایش‌های دیگری ایجاد شد [۵۶] و دیدگاه‌ها را به کلی عوض کرد. شکل ۱-۲ نتایج این آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

[1] cross-phase modulation



شکل ۱-۲- خاصیت خود-محدودکنندگی با نور سفید و باریکه‌ای با همدوسی جزئی. ردیف بالا:توزیع سه‌بعدی شدت نور سفید در موقع ورود، خروجی خطی و غیر خطی. ردیف وسط و پایین: توزیع دو و سه‌بعدی شدت‌ها و سالیتون‌های تاریک غیرهمدوس گردابی

در واقع این سالیتون‌ها زمانی به وجود می‌آیند که میانگین زمانی شدت در محیط خاصیت موجبری چند مدی القا کند سپس با بهره دادن به مدهای مورد نظر حرکت خود را فقط به داخل موجبر محدود کند. تئوری‌های زیادی برای توصیف شکل‌گیری سالیتون‌های ناهمدوس ارائه شده است که از میان آنها می‌توان به تئوری چگالی همدوس[۱]، تئوری مودال[۲] و تئوری همدوسی متقابل[۳] اشاره کرد [۶۰-۵۷]. تحقیقات در این حوزه ادامه پیدا کرد و پدیده‌های جالبی کشف شدند که از جمله می‌توان به شکافتگی سالیتون تاریک و اثر فاز حافظه[۴] [۶۱]، حالت‌های ضد تاریک سالیتون ناهمدوس [۶۲] و ناپایداری modulational ناهمدوس [۶۳] اشاره کرد. در شکل ۱-۳ یک نمونه از سالیتون‌های ناشی از باریکه ناهمدوس را نشان داده‌ایم که مشابهی در سالیتون‌های همدوس ندارد.

[1] coherent density theory
[2] modal theory
[3] mutual coherence theory
[4] Phase memory