



بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۴-۱۲ بهمن ۱۴۰۰



تداخل سنجی کوانتومی تک فوتون

زهرا باقری^۱ هدی سادات لطفی پور^{۱,۲*} مجید خدابنده^۱

^۱گروه بایوفوتونیک کوانتومی، مرکز فناوری های کوانتومی ایران، تهران، ایران

^۲پژوهشکده فوتونیک و فناوری کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، تهران، ایران

hodalotfipoor@gmail.com

چکیده- در این مطالعه، به یکی از رمز آلودترین مفاهیم مکانیک کوانتومی یعنی تداخل یک تک فوتون پرداخته می شود. به کمک یک کریستال غیرخطی در چیدمانی تجربی و تحت تبدیل پایین پارامتری خودبه خودی، جفت فوتون های همبسته تولید می شوند که یکی از آن ها پس از عبور از یک تداخل سنج ماخ زندر به دلیل اصل تمایزناپذیری مسیرهای طی شده در بازوهای تداخل سنج، با خودش تداخل می کند. با ثبت همزمانی بین فوتون های همبسته طرح تداخلی بدست می آید.

کلیدواژه- تبدیل پایین پارامتری خودبه خودی، تداخل تک فوتون، تداخل سنج ماخ زندر، فوتون های همبسته

Single photon interferometry

*Zahra Bagheri¹, Hoda Sadat Lotfipoor^{*1,2}, Majid Khodabandeh¹*

¹*Quantum BioPhotonics Group, Iranian Center for Quantum Technologies (ICQTs), Tehran, Iran*

²*Photonics and Quantum Technologies Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), Tehran, Iran*

hodalotfipoor@gmail.com

Abstract- *The interference of a single photon which is one of the most mysterious concepts of quantum mechanics is studied. Using a nonlinear crystal, a pair of photons by spontaneous parametric down conversion are produced. One of them passing through a Mach-Zehnder interferometer due to the principle of indistinguishability of the paths, interferes with itself. An interference pattern is obtained by recording the coincidence between the correlated photons.*

Keywords: *spontaneous parametric down conversion, single photon interferometry, Mach-Zehnder interferometer, correlated photons*

مقدمه

تداخل یک تک فوتون با خودش، پدیده ای است که درک آن چالش برانگیز می باشد. تا پیش از ظهور مکانیک کوانتومی، در علم فیزیک بنا براین شده بود که همه چیز یا ذره است و یا موج. اما پس از مدتی، فیزیک کلاسیک ناگزیر شد که برای درک تابش در بعضی موارد نظیر "اثر فوتوالکتریک" به الگوی ذره ای و در دیگر موارد مثل "پراش پرتوهای ایکس"، به الگوی موجی توسل جوید. پس از آن بود که اصل دوگانگی موج-ذره برای کوانتاهای نور یعنی فوتون مطرح شد. تا پیش از کشف منبعی که بتواند تک فوتون را تولید کند، خروجی دوشکاف یک طرح تداخلی مشتمل بر نوارهای تاریک و روشن بود. انتظار می رفت با شلیک تک فوتون به سمت دو شکاف، فوتون ها دیگر مانند موج رفتار نکرده، رفتار ذره ای از خود نشان داده و طرح تداخلی از بین برود. اما برخلاف انتظار در خروجی، یک طرح تداخلی ثبت شد. در سال های اخیر محققان تداخل تک فوتون را با انجام دو نوع آزمایش دنبال کردند: تداخل از دو شکاف [۱] و تداخل از دو مسیر مختلف در تداخل سنج ماخ زندر [۲ و ۳]. در این مقاله با استفاده از فرآیند تبدیل پائین پارامتری در یک کریستال غیرخطی، ابتدا یک تک فوتون جاززنده تولید می شود. سپس در مسیر تک فوتون یک تداخل سنج ماخ زندر تعبیه می گردد که در نهایت منجر به تداخل تک فوتون با خودش می شود.

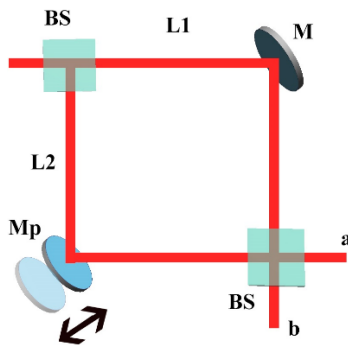
بحث و تحلیل

مکانیک کوانتومی نشان می دهد در چیدمان تداخل سنجی ماخ زندر اگر مسیرها غیرقابل تشخیص^۱ باشند، وضعیت فوتونی که از تداخل سنج خارج می شود، برهم نهی از حالت هایی است که از دو مسیر عبور می کند. در واقع، یک فوتون با حالت $|s\rangle$ وارد تداخل سنج شده و به

شکافنده پرتو اول وارد می شود (شکل ۱). شکافنده پرتو حالت فوتون ورودی را به حالت زیر تغییر می دهد:

$$|s\rangle = t|l_1\rangle + r|l_2\rangle \quad (1)$$

به طوری که $|l_1\rangle$ و $|l_2\rangle$ نشان دهنده حالت فوتون در بازوهای تداخل سنج و t و r به ترتیب ضریب عبور و بازتاب می باشند.



شکل ۱ تداخل سنج ماخ زندر متشکل از دو تقسیم کننده پرتو (BS) و دو آینه (M و M_p).

اگر $|a\rangle$ و $|b\rangle$ حالت فوتون سیگنال در خروجی های a و b تداخل سنج باشد، آنگاه:

$$\begin{aligned} |l_1\rangle &= e^{i\delta_1}(r|a\rangle + t|b\rangle) \\ |l_2\rangle &= e^{i\delta_2}(t|a\rangle + r|b\rangle) \end{aligned} \quad (2)$$

با ترکیب روابط بالا برای حالت $|s\rangle$ خواهیم داشت:

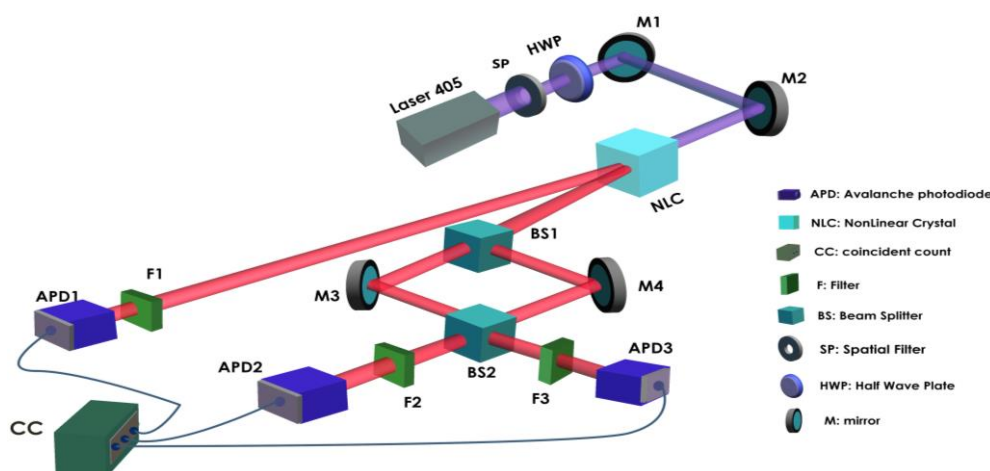
$$|s\rangle = rt(e^{i\delta_1} + e^{i\delta_2})|a\rangle + (tte^{i\delta_1} + rre^{i\delta_2})|b\rangle \quad (3)$$

بنابراین طرح تداخلی ناشی از احتمال آشکارسازی یک فوتون در حالت $|a\rangle$ برابر است با [۳]:

$$P(\delta) = |\langle a|s\rangle|^2 = 2RT(1 + \cos\delta) \quad (4)$$

که در رابطه بالا، $R = rr^*$ و $T = tt^*$ به ترتیب احتمال بازتاب و عبور و $\delta = \delta_1 - \delta_2$ اختلاف فاز ناشی از اختلاف راه دو بازوی تداخل سنج می باشد. شکل ۲ شماتیکی از چیدمان تولید و تداخل تک فوتون را نشان می دهد. در این چیدمان با ارضای شرط تطابق فازی کریستال BBO، جفت

¹ indistinguishable



شکل ۲ شماتیک چیدمان تجربی فرآیند تولید تک فوتون به روش SPDC و تداخل تک فوتون در تداخل سنج ماخ زندر و ثبت همزمانی آنها

$g^2(0)$ نشان‌دهنده همبستگی بین شدت‌هاست که با محاسبه آن ماهیت منبع نور (کلاسیکی یا کوانتومی بودن) و همچنین تک فوتون بودن آن مشخص می‌گردد. اگر $g^2(0)$ عددی بیشتر از ۱ بدست آید در رژیم کلاسیک قرار داریم. برای نور غیر کلاسیک $g^2(0)$ کمتر از ۱ بدست می‌آید و هر چه این عدد به سمت ۰ میل کند، به حالت ایده آل کوانتومی تک فوتون نزدیکتر می‌شویم. $g^2(0)$ در این آزمایش مقدار 0.117 ± 0.027 اندازه گیری شد که تایید می‌کند منبع استفاده شده در این آزمایش یک منبع تک فوتون اعلام شده^۲ می باشد. به این معنی که اندازه گیری یک فوتون در یک بازو وجود فوتون در بازوی دیگر را اعلام می‌کند [۳].

برای تنظیم تداخل سنج نیز ابتدا با یک لیزر ۶۳۵ نانومتر ماخ زندر تنظیم شده و فریزهای تداخلی را بر روی یک صفحه در خروجی تداخل سنج مشاهده می‌شود. پس از کمینه کردن تعداد فریزها، منبع نور سفید با پهنای طیفی بالا، جایگزین لیزر مرئی شد. قرار دادن نور سفید و تنظیم مجدد تداخل سنج ماخ زندر از آن روست که دیدن فریزهای تداخلی با نور لیزر ۶۳۵ نانومتر اختلاف دو بازو را به اندازه کافی کمینه نمی‌کند. برای مشاهده تداخل تک فوتون

فوتون همبسته سیگنال و ایدلر تولید می‌شوند. فوتون سیگنال به صورت مستقیم توسط آشکارساز حساس به ثبت تک فوتون ثبت شده و فوتون ایدلر وارد یک تداخل سنج ماخ زندر می‌گردد. در خروجی‌های تداخل سنج نیز آشکارسازهای تک فوتون قرار داده می‌شوند. این ۳ آشکارساز به یک برد الکترونیک همزمانی وارد شده که توسط یک برنامه LabView شمارش هر ۳ آشکارساز و همزمانی آنها کنترل می‌شود.

نتایج تجربی

در ابتدا باید چیدمان SPDC تنظیم شود. اگر نور لیزر پمپ با طول موج ۴۰۵ نانومتر کاملاً عمود به کریستال برخورد کند و جهت‌گیری کریستال برای ارضای شرط تطابق فازی صحیح باشد، دو فوتون با زاویه ۳ درجه نسبت به لیزر فرودی در طول موج ۸۱۰ نانومتر تولید می‌شوند. پس از تنظیمات اولیه، آشکارسازها را روشن، و سعی کردیم بالاترین شمارش تک فوتون را در آشکارسازها ثبت کنیم. انتظار داریم آشکارسازها شمارش فوتون یکسانی را ثبت نمایند. در این مرحله برای آن که مطمئن باشیم در رژیم تک فوتون قرار داریم علاوه بر ثبت همزمانی آشکارسازها، درجه همدوسی مرتبه دوم $g^2(0)$ را محاسبه کردیم. فاکتور

² Heralded single photon source

برای این منظور، جابجا گر متصل به آینه $M2$ را به کمک جابجاگر پیزوالکتریک *Thorlabs* با گام های 0.1 میکرون اسکن می کنیم. با این کار عمداً بین دو بازوی ماخ زندر اختلاف راه کنترل شده ایجاد می کنیم تا بتوانیم طرح تداخلی را در همزمانی ثبت کنیم.

نمونه ای از طرح تداخل ایجاد شده در همزمانی بین دو آشکارساز A و B در شکل ۴ آمده است. داده های تجربی در این نمودار با نقاط آبی مشخص شده اند که به روش *least square* فیت شده است. قله ها و دره های شکل ۴ نمایانگر فریزهای تاریک و روشن در خروجی تداخل سنج و موید تداخل سنجی تک فوتون می باشد.

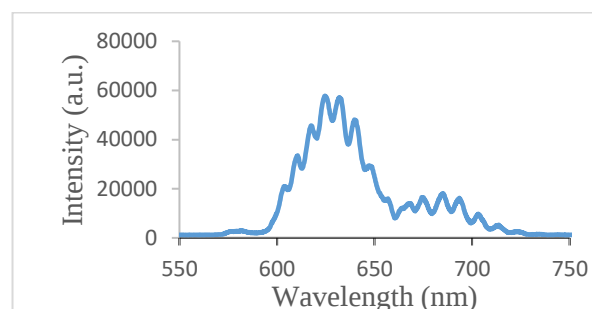
نتیجه گیری

در این مقاله پدیده تداخل تک فوتون به صورت تجربی بررسی شد. برای این منظور لازم بود در مسیر یکی از فوتون های همبسته تولید شده از فرآیند تبدیل پایین پارامتری خودبخودی یک تداخل سنج تعبیه گردد. با تنظیم دقیق چیدمان *SPDC* و ماخ زندر و اعمال اختلاف راه از مرتبه 0.1 میکرون به کمک یک جابجاگر، ثبت نرخ همزمانی آشکارسازها، تداخل تک فوتون مشاهده می شود.

مرجع ها

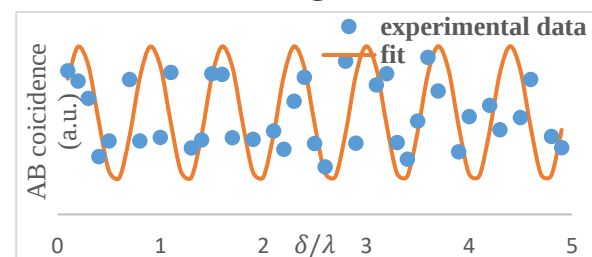
- [1] Dimitrova, T. L., & Weis, A. (2009). Lecture demonstrations of interference and quantum erasing with single photons. *Physica Scripta*, 2009(T135), 014003.
- [2] Dimitrova, T. L., & Weis, A. (2007, March). A double demonstration experiment for the dual nature of light. In *14th International School on Quantum Electronics: Laser Physics and Applications* (Vol. 6604, p. 660400). International Society for Optics and Photonics.
- [3] Pearson, B. J., & Jackson, D. P. (2010). A hands-on introduction to single photons and quantum mechanics for undergraduates. *American Journal of Physics*, 78(5), 471-484.

ناگزیریم اختلاف بازوها را از مرتبه طول همدوسی فرآیند *SPDC* کم کنیم. طول همدوسی فوتون های همبسته به طول موج و پهنای باند فیلتر قبل از آشکارساز بستگی دارد، که در این آزمایش ۳۲ میکرومتر اندازه گیری شد. از آنجا که طول موج فوتون های همبسته تولید شده در محدوده مرئی قرار نمی گیرد، لازم است با نور سفید که در دسترس و در عین حال دارای طول همدوسی بسیار کم می باشد، تنظیمات مجدداً تکرار شود. طول همدوسی نور سفید استفاده شده در این آزمایش ۲ میکرومتر اندازه گیری شد، بنابراین کاستن اختلاف راه بین دو بازو و مشاهده فریزهای تداخلی در این مرحله بسیار دشوار می باشد.



شکل ۳ فریزهای تداخلی با منبع نور سفید

برای دیدن فریزهای تداخلی از طیف سنج (*Teksan TIDA spectrometer*) با دقت 0.1 نانومتری استفاده شد. فریزهای تداخلی این بار بر روی طیف پهن نور سفید نمایان می شود (شکل ۳). در مرحله آخر، مجدداً لیزر پمپ ۴۰۵ نانومتر روشن شده و دو فوتون همبسته در دو بازو از کریستال خارج می شوند. اگر آشکارساز سیگنال را A و آشکارساز خروجی ماخ زندر را B و B' بنامیم، همزمانی بین AB و یا AB' رفتار کسینوسی رابطه (۴) را نشان خواهد داد.



شکل ۴ نرخ شمارش همزمانی بین دو آشکارساز بر حسب اختلاف راه