



آزمایش درهمتنیدگی کوانتومی بین دو فوتون

استاد

دکتر شهرام محمد نژاد

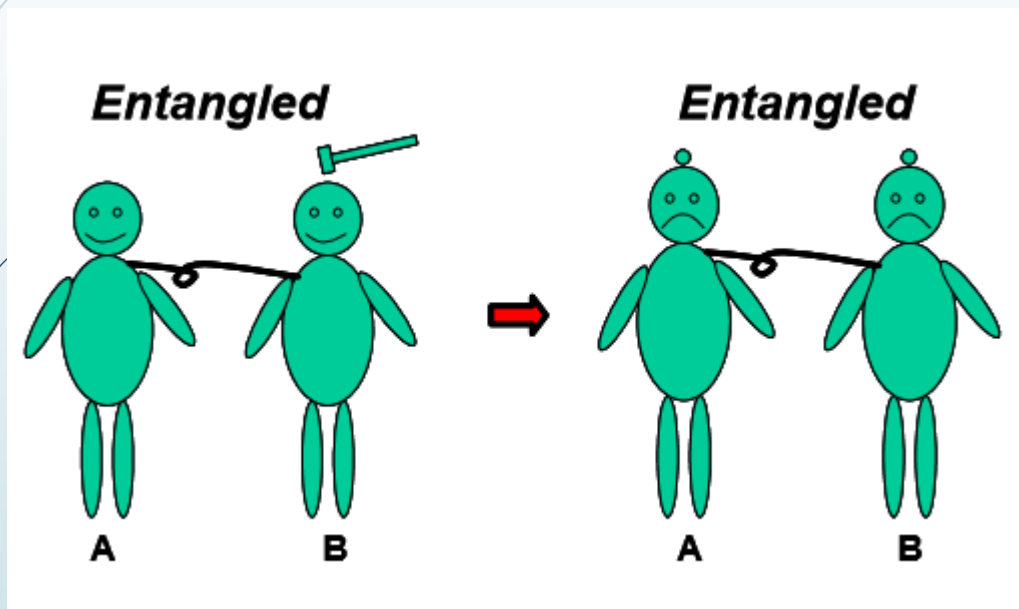


در سال ۱۹۳۵ انیشتن پودولسکی و روزن (EPR) مقاله ای تحت عنوان آیا مکانیک کوانتومی میتواند واقعیت فیزیکی را به طور کامل توصیف کند؟ به چاپ رساندند این مقاله به اسم EPR معروف شد انیشتن به دنبال این بود که ناسازگاری مکانیک کوانتومی را نشان دهد و به همین جهت به آزمایش های فکری گوناگونی متوسل شد او میخواست نشان دهد رابطه عدم قطعیت برای زمان و انرژی نقض میشود.

فرض شد دو فوتون درهمتنیده از یک منبع از هم دور میشوند اگر قطبش یک فوتون در جهت $+Z$ باشد قطبش فوتون دیگر باید در جهت $-Z$ باشد.



انواع درهمتنیدگی



قطبش
فرکانس
اندازه حرکت

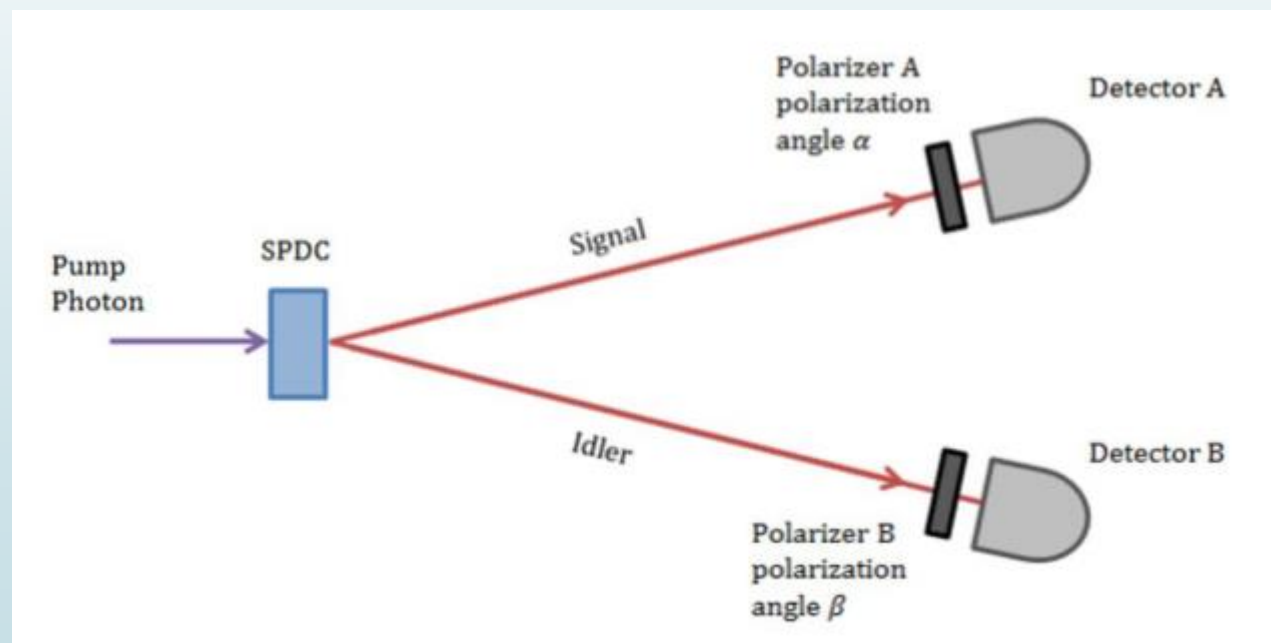
روشهای درهمتنیدگی

منابع اتمی
تبدیل کاهنده پارامتری
منابع نیمه هادی



آزمایش spdc نوع دوم

هدف از انجام این آزمایش تولید دو فوتون از یک تک فوتون است. یکی از این فوتون ها بیکار و دیگری سیگنال نامیده میشود. جمع فرکانس آنها برابر فرکانس فوتون اولیه است.



شکل ۱: spdc



یک متغیر پنهان λ با توزیع $\rho(\lambda)$ داریم که :

$$\rho(\lambda) \geq 0 \text{ and } \int \rho(\lambda) d\lambda = 1.$$

$$A(\alpha, \lambda) = \pm 1 \quad B(\beta, \lambda) = \pm 1$$

احتمال اندازه گیری خروجی :

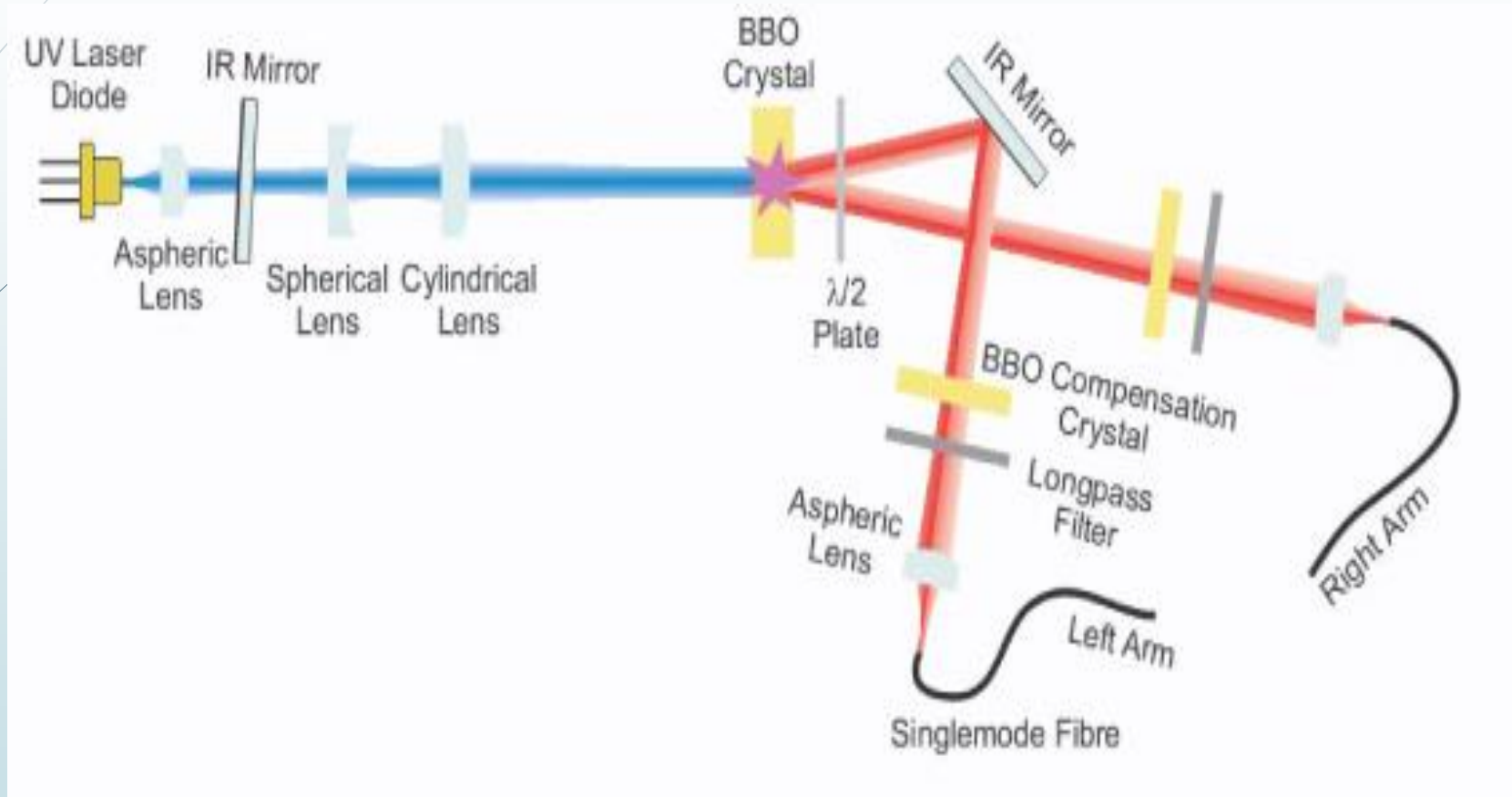
$$P_{VV}(\alpha, \beta) = \int \frac{1 + A(\alpha, \lambda)}{2} \frac{1 + B(\beta, \lambda)}{2} \rho(\lambda) d\lambda$$

$$P_{HH}(\alpha, \beta) = \int \frac{1 - A(\alpha, \lambda)}{2} \frac{1 - B(\beta, \lambda)}{2} \rho(\lambda) d\lambda$$

$$P_{VH}(\alpha, \beta) = \int \frac{1 + A(\alpha, \lambda)}{2} \frac{1 - B(\beta, \lambda)}{2} \rho(\lambda) d\lambda$$

$$P_{HV}(\alpha, \beta) = \int \frac{1 - A(\alpha, \lambda)}{2} \frac{1 + B(\beta, \lambda)}{2} \rho(\lambda) d\lambda.$$

که P جهت قطبش را مشخص میکند.



شکل ۲: مراحل آزمایش

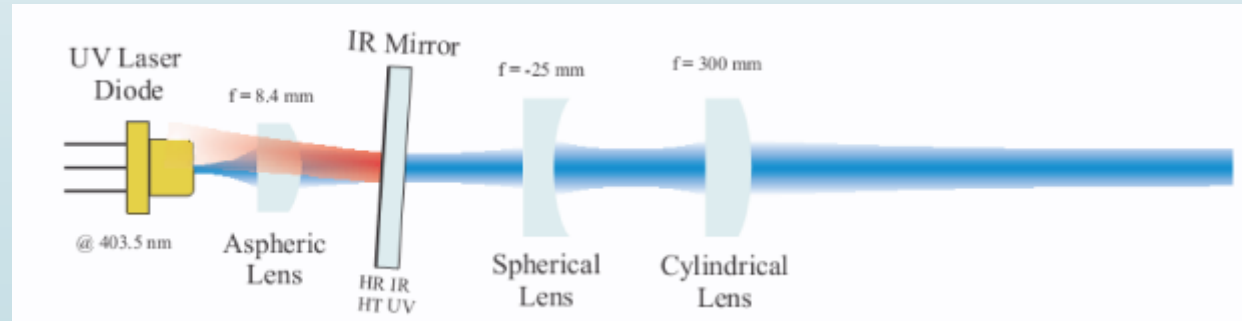


تجهیزات آزمایش

لیزر: لیزر تک رنگ با طول موج 403 nm و توان 26 mW

عدسی: برای اینکه این پرتو پارمتر بهینه ای داشته باشد توسط سه عدسی تغییر شکل پیدا می کند.

کریستال BBO: از یک کریستال (Beta Barium Borate) استفاده میشود. ضخامت کریستال 2 mm متر و ابعاد $7*7*2$ است.



شکل ۳: تنظیم عدسی ها

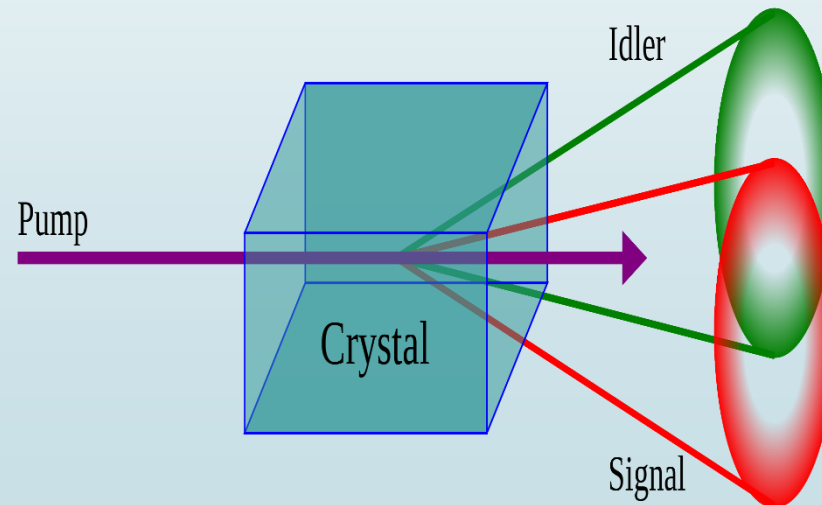


تجهیزات آزمایش



متوقف کننده پرتو (Beam stop): تعدادی از پرتو ها از کریستال عبور میکنند که وارد متوقف کننده پرتو میشوند.

قطبنده (polarizer): یک فیلتر نوری است که تنها نور با قطبش مشخص را عبور می دهد و امواج با دیگر قطبش ها را بلوکه می کند. قطبنده قابلیت تبدیل موجی با قطبش ترکیبی را به نوری با قطبش مشخص دارد.



شکل ۴: قطبش فوتون ها



مراحل آزمایش



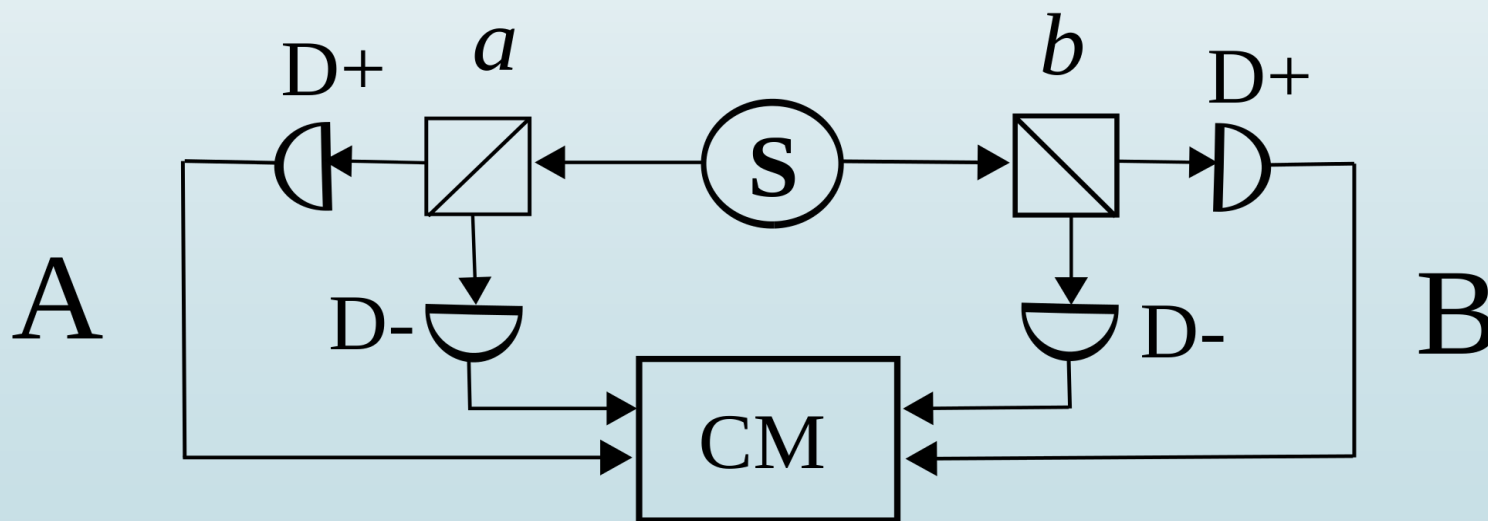
این آزمایش مستلزم دستکاری در زاویه پلارایزر است تا فوتون سیگنال و بیکار تولید شود ابتدا پلارایز a در زاویه ۱۳۵ ثابت نگه میداریم و b را ده درجه افزایش میدهیم سپس پلارایزر b را ثابت نگه میداریم و a را ده درجه افزایش میدهیم مقدار coincidence (تطابق) ، میانگین ۲۰ حاصل میشود. کنتراست منبع زوج فوتون از فرمول زیر حاصل میشود که a تعداد فوتون هاست:

$$V = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}$$



نامساوی Bell-CHSH

یکی از روش های اثبات درهم تنیدگی دو فوتون استفاده از آزمایش بل است. نامساوی CHSH توسط Clauser, Horn, Shimony, Holt در سال ۱۹۶۹ ارایه شد یک نمونه از آزمایش CHSH در زیر نمایش داده شده است جفت فوتون توسط منبع S تولید می شوند به دو جهت مخالف فرستاده می شوند و به قطبنده ها که جهت گیری آن توسط کاربر تعیین شود برخورد می کنند و مقدار Coincidence در CM مشخص میشود.



شکل ۵: آزمایش CHSH



پلارایزرهای a و b را طوری تنظیم میکنند که بیشترین مقدار S حاصل شود پلارایزر را میچرخانیم وقتی زاویه ها با هم تطابق داشتند مقدار معادله زیر را حساب میکنیم.

هر دو پلارایزر را در زاویه 45° درجه ثابت کنیم و مقدار معادله زیر را حساب کنیم

میشود از زوایای اختیاری برای چرخش هر پلارایزر استفاده کرد و معادله را حساب کرد.

N مقدار تطابقی است که زاویه پلارایزر ها دارد.

$$S = E(a, b) - E(a, b') + E(a', b) + E(a', b')$$

$$E(\alpha, \beta) = \frac{N(\alpha, \beta) + N(\alpha_{\perp}, \beta_{\perp}) - N(\alpha, \beta_{\perp}) - N(\alpha_{\perp}, \beta)}{N(\alpha, \beta) + N(\alpha_{\perp}, \beta_{\perp}) + N(\alpha, \beta_{\perp}) + N(\alpha_{\perp}, \beta)}$$



اگر مقدار $-2 < S < 2$ باشد نامساوی بل ثابت می شود پس دو فوتون درهمتنیده هستند. در جدول زیر با قرار گرفتن پلارایزرها در این زوایا نامساوی بل نقض میشود و عدم درهمتنیدگی اثبات میشود.

Polarizer A (Degree)	Polarizer B (Degree)	Singles A Count	Singles B Count	Accidental coincidence	Average coincidence	Net coincidence
-45	-22.5	5368.60	5778.87	1.6133	119.6330	118.0197
-45	22.5	6009.07	5485.50	1.7141	31.4333	29.7192
-45	67.5	5867.90	5082.57	1.5508	10.7000	9.1492
-45	112.5	5868.17	5881.37	1.7947	94.2667	92.4720
0	-22.5	5538.70	6364.77	1.8331	86.8333	85.0002
0	22.5	5487.73	5269.53	1.5037	72.7000	71.1963
0	67.5	5476.13	4942.43	1.4074	9.9333	8.5259
0	112.5	5451.23	5801.03	1.6444	25.2000	23.5556
45	-22.5	4745.37	6290.67	1.5523	6.3667	4.8144
45	22.5	4784.20	5280.93	1.3138	44.3000	42.9862
45	67.5	4852.03	5060.90	1.2769	51.3333	50.0564
45	112.5	4910.50	6025.73	1.5386	15.2333	13.6947
90	-22.5	5188.13	6328.23	1.7072	42.3667	40.6595
90	22.5	5193.77	5366.17	1.4493	5.4000	3.9507
90	67.5	5218.97	5071.27	1.3763	49.4667	48.0904
90	112.5	5145.03	5889.20	1.5756	84.2667	82.6911



مقدار S در جدول قبل 2.75251 ± 0.113 به دست می آید که نامساوی بل را نقض میکند.

$$AccidentalCoincidence = \frac{SingleCount A \times SingleCount B \times TimeWindow(26 ns)}{AcquisitionTime}$$