تحلیل، بررسی و مقایسه روش های ایجاد در هم تنیدگی کوانتومی بین زوج فوتون ها

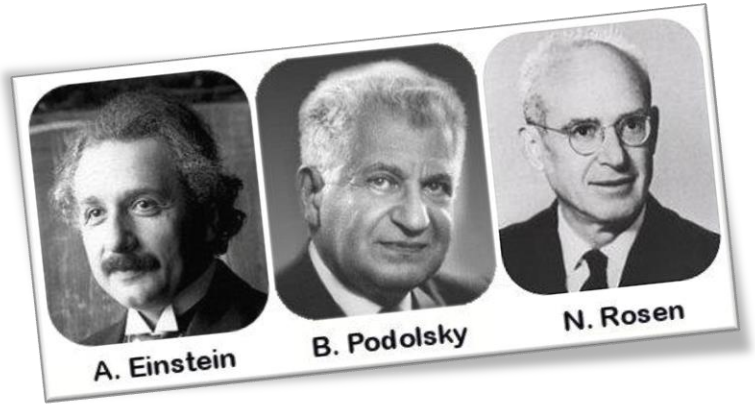
ارائه سمینار درس کوانتوم الکترونیک

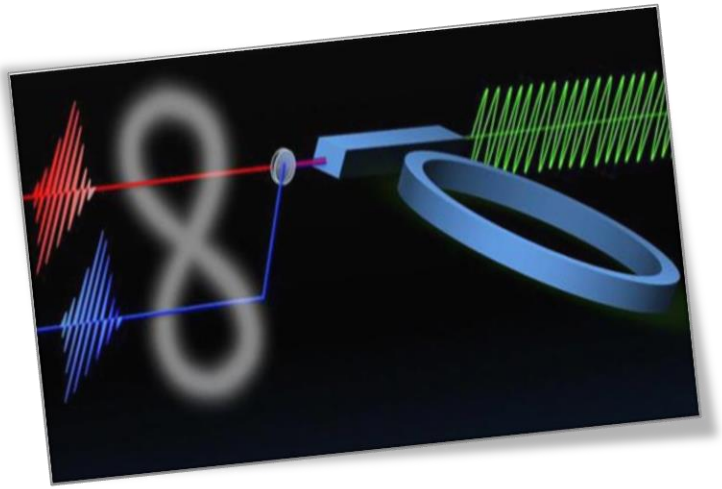
استاد

دکتر شهرام محمدنژاد

مقدمه

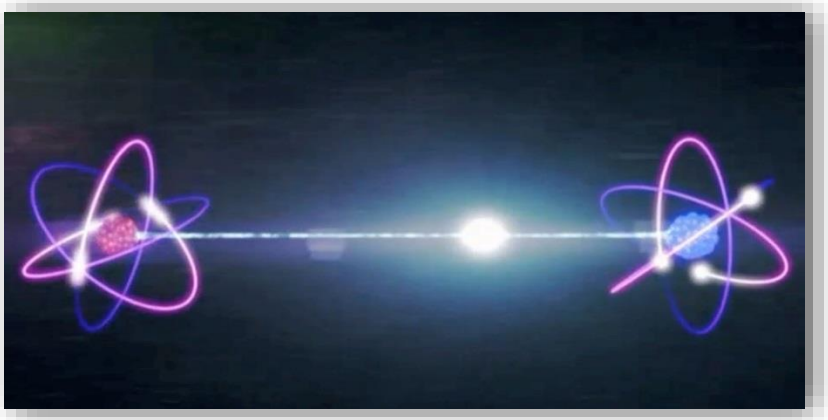
- ✓ اولین بار توسط انیشتین، پودوسکی و روزن EPR
- ✓ آزمایش بل
- ✓ در هم تنیدگی نتیجه طبیعی اصل برهمنهی
- ✓ در هم تنیدگی، اساس دنیای کوانتومی



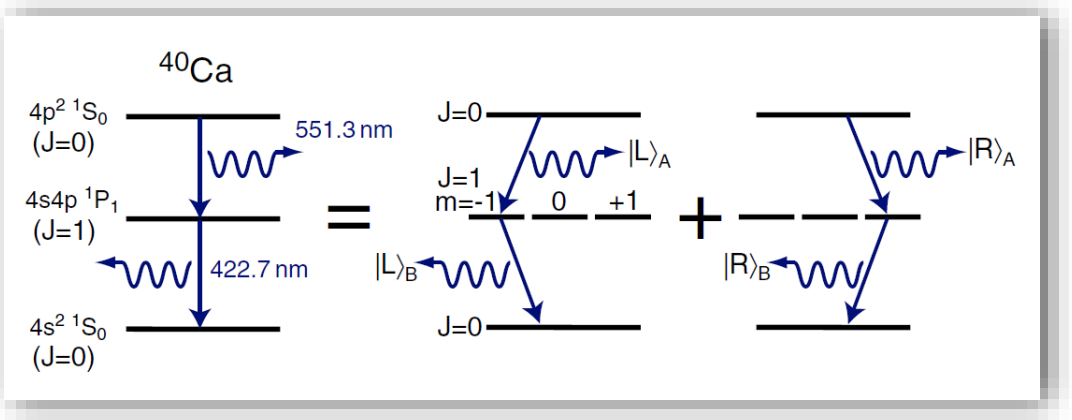


انواع روش های ایجاد درهم تنیدگی

- ✓ منابع اتمی (Atomic sources)
- ✓ تبدیل کاهنده ی پارامتری (Parametric down-conversion)
- ✓ منابع نیمه هادی (Semiconductor sources)



منابع اتمی



دیاگرام شماتیک جفت فوتون گسیل شده از فروریزش اتمی در اتم کلسیم

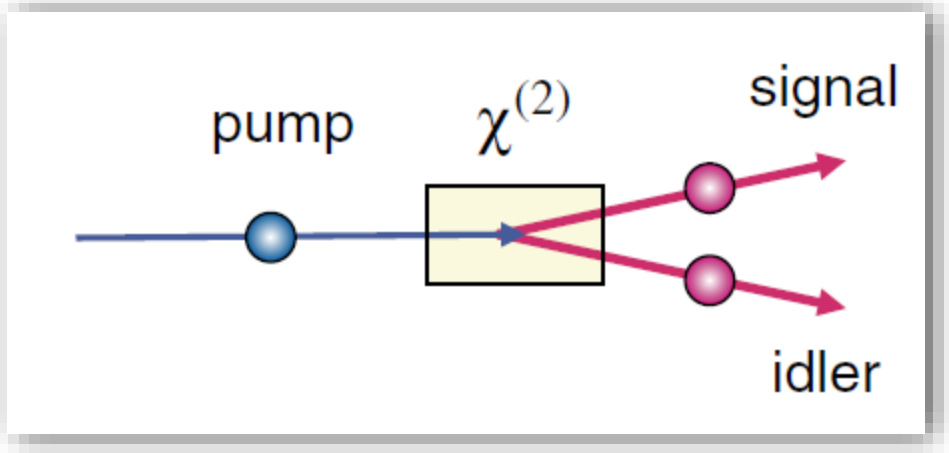
حالت پایه: $|g\rangle = (4s^2\ {}^1S_0)$ حالت برانگیخته: $|e\rangle = (4p^2\ {}^1S_0)$

$$|e\rangle = \frac{1}{\sqrt{3}}(|+1\rangle_A|-1\rangle_B - |0\rangle_A|0\rangle_B + |-1\rangle_A|+1\rangle_B).$$

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|L\rangle_A|L\rangle_B + |R\rangle_A|R\rangle_B) \equiv \frac{1}{\sqrt{2}}(|LL\rangle + |RR\rangle),$$

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|HH\rangle - |VV\rangle)$$

تبدیل کاهنده ی پارامتری PDC

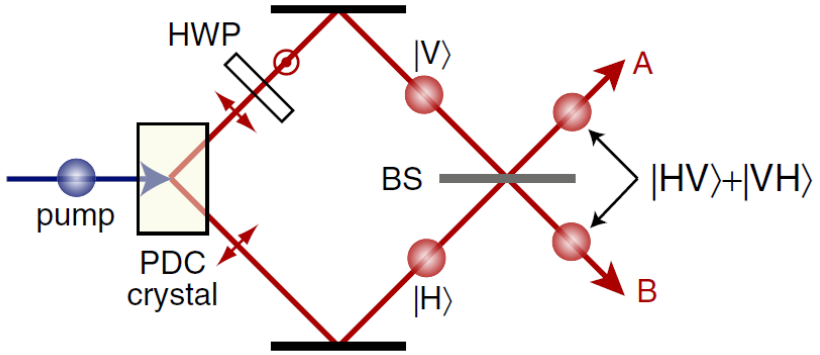


تصویر تبدیل کاهنده پارامتری در یک کریستال غیر خطی

$$H = \hbar g(\hat{a}_1^\dagger \hat{a}_2^\dagger \hat{a}_0 + \hat{a}_0^\dagger \hat{a}_2 \hat{a}_1)$$

$$\omega_0 = \omega_1 + \omega_2,$$
$$\boldsymbol{k}_0 = \boldsymbol{k}_1 + \boldsymbol{k}_2,$$

تبدیل کاهنده ی پارامتری نوع اول



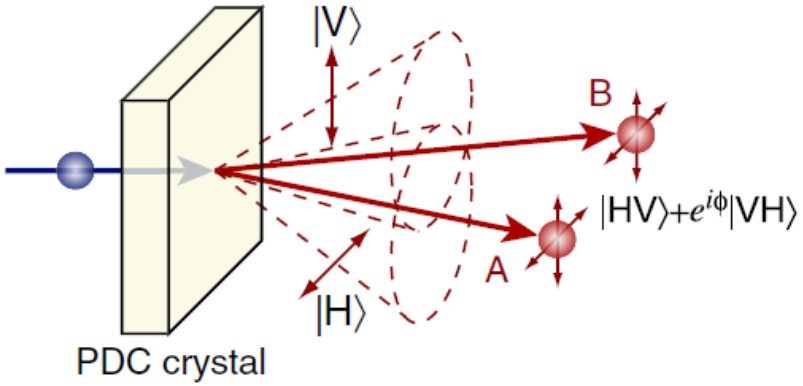
تولید جفت فوتون‌های در هم تنیده قطبی با استفاده از PDC نوع اول و BS.

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\mathrm{H}\rangle_\mathrm{A} + i|\mathrm{H}\rangle_\mathrm{B}) \otimes \frac{1}{\sqrt{2}}(-i|\mathrm{V}\rangle_\mathrm{A} + |\mathrm{V}\rangle_\mathrm{B})$$

$$= \frac{1}{2}(|\mathrm{H}\rangle_\mathrm{A}|\mathrm{V}\rangle_\mathrm{B} + |\mathrm{V}\rangle_\mathrm{A}|\mathrm{H}\rangle_\mathrm{B} - i|\mathrm{H}\rangle_\mathrm{A}|\mathrm{V}\rangle_\mathrm{A} + i|\mathrm{V}\rangle_\mathrm{B}|\mathrm{H}\rangle_\mathrm{B}),$$

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\mathrm{HV}\rangle + |\mathrm{VH}\rangle).$$

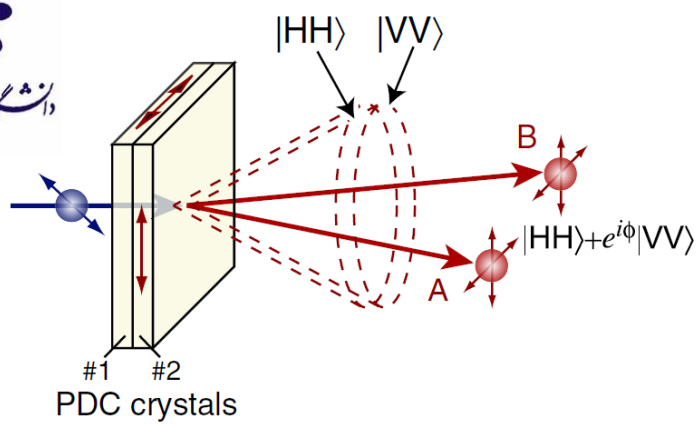
تبدیل کاهنده ی پارامتری نوع دوم



تولید جفت فوتون‌های در هم تنیده به روش PDC نوع دوم

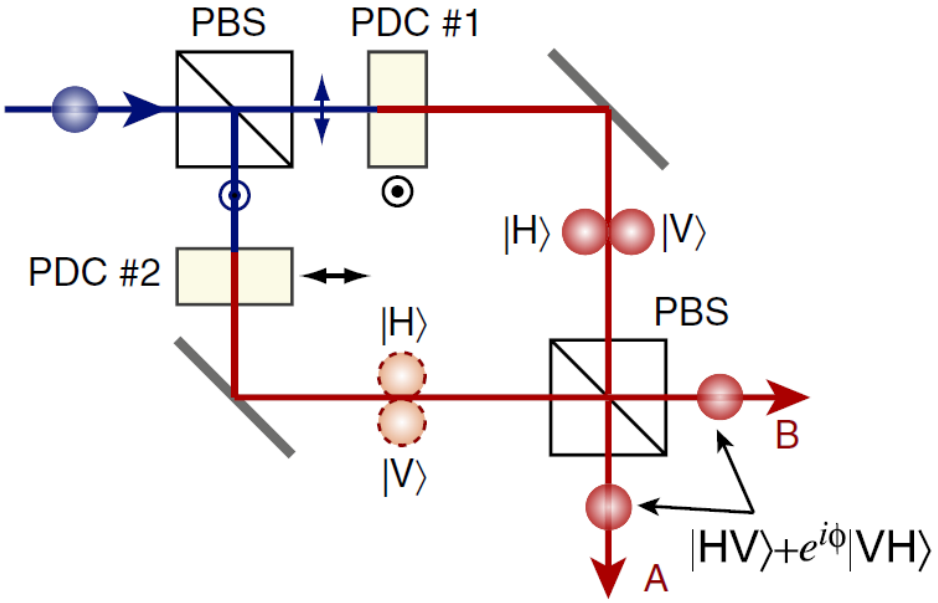
$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\mathrm{HV}\rangle + e^{i\theta}|\mathrm{VH}\rangle).$$

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\mathrm{HH}\rangle + e^{i\theta}|\mathrm{VV}\rangle).$$



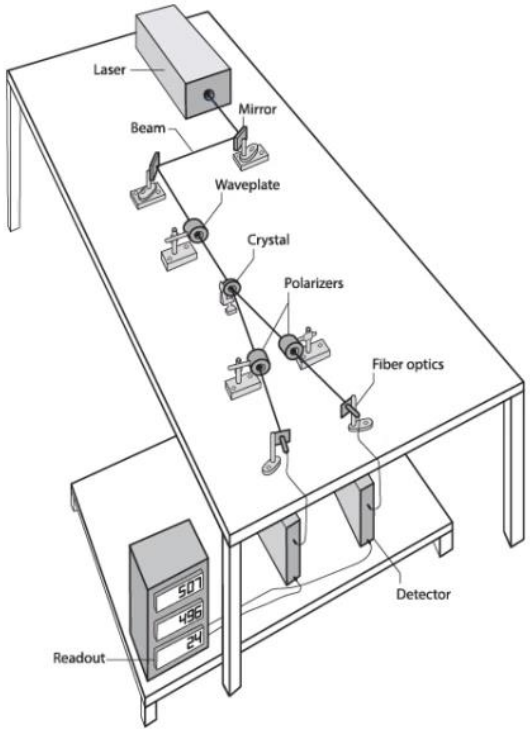
$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\mathrm{HH}\rangle + e^{i\theta}|\mathrm{VV}\rangle).$$

تولید جفت فوتون‌های در هم تنیده به وسیله‌ی دو کریستال عمود بر هم

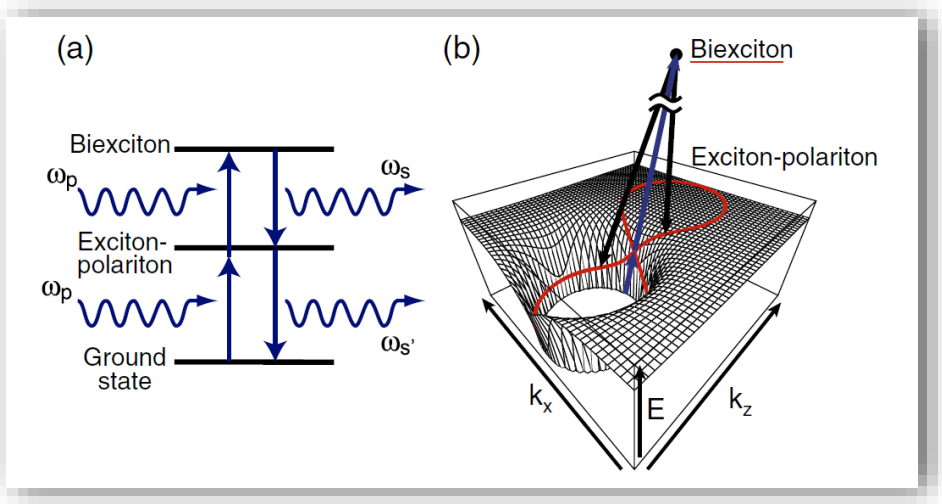


تولید فوتون‌های در هم تنیده با استفاده از PDC نوع دوم در تداخل سنج Mach-Zehnder

انیمیشن تولید فوتون های در هم تنیده با قطبش های متفاوت

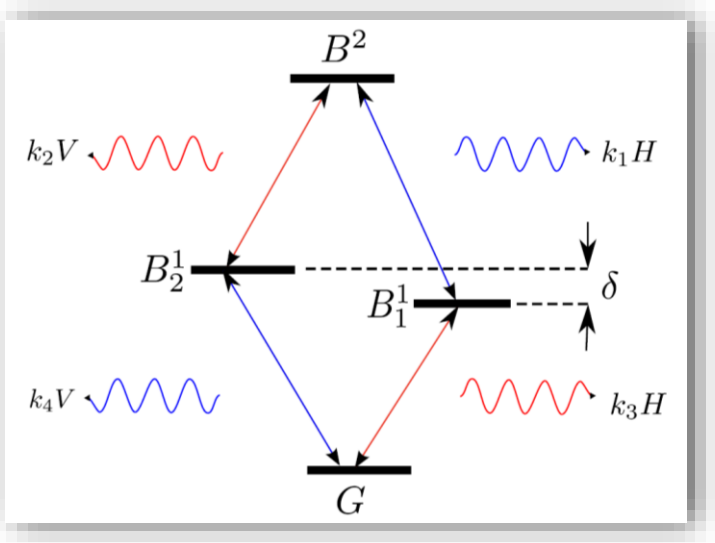


منابع نیمه هادی

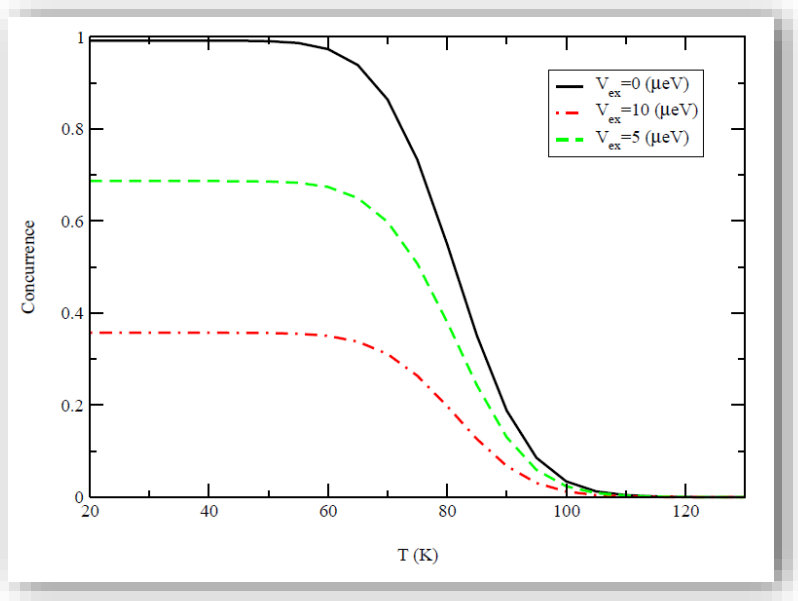


شماتیک دیاگرام تولید فوتود در هم تنیده توسط بیواکسیتون

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|VV\rangle + |HH\rangle\right)$$

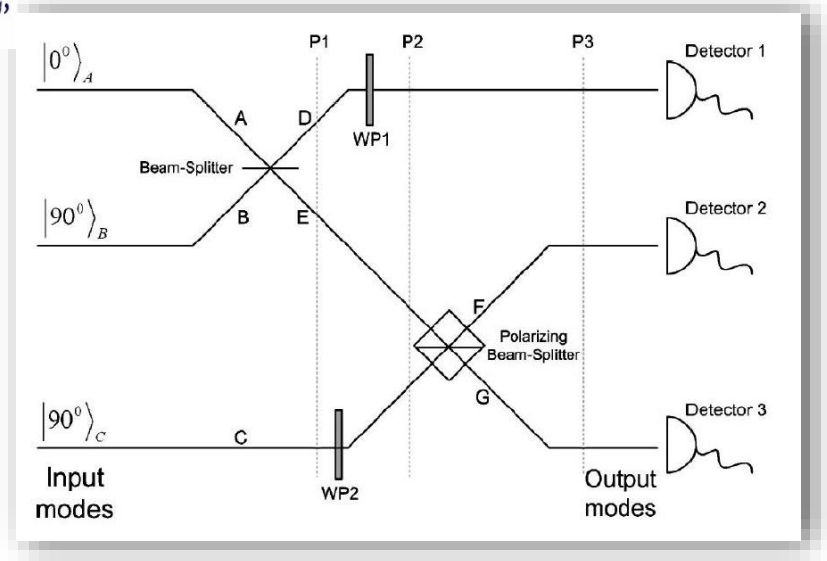


نمودار ترازهای مختلف انرژی در فروافت آبشاری برانگیختگی دو اکسیتونی در یک نقطه کوانتومی و وجود شکافتگی انرژی



رفتار سنجه ی هم تلاقی را بر حسب دما

تولید درهم تنیدگی ۳ فوتونی



طرح کلی برای تولید در هم تنیدگی سه فوتونی

$$|\Psi\rangle_{input} = |0^\circ\rangle_A |90^\circ\rangle_B |90^\circ\rangle_C$$

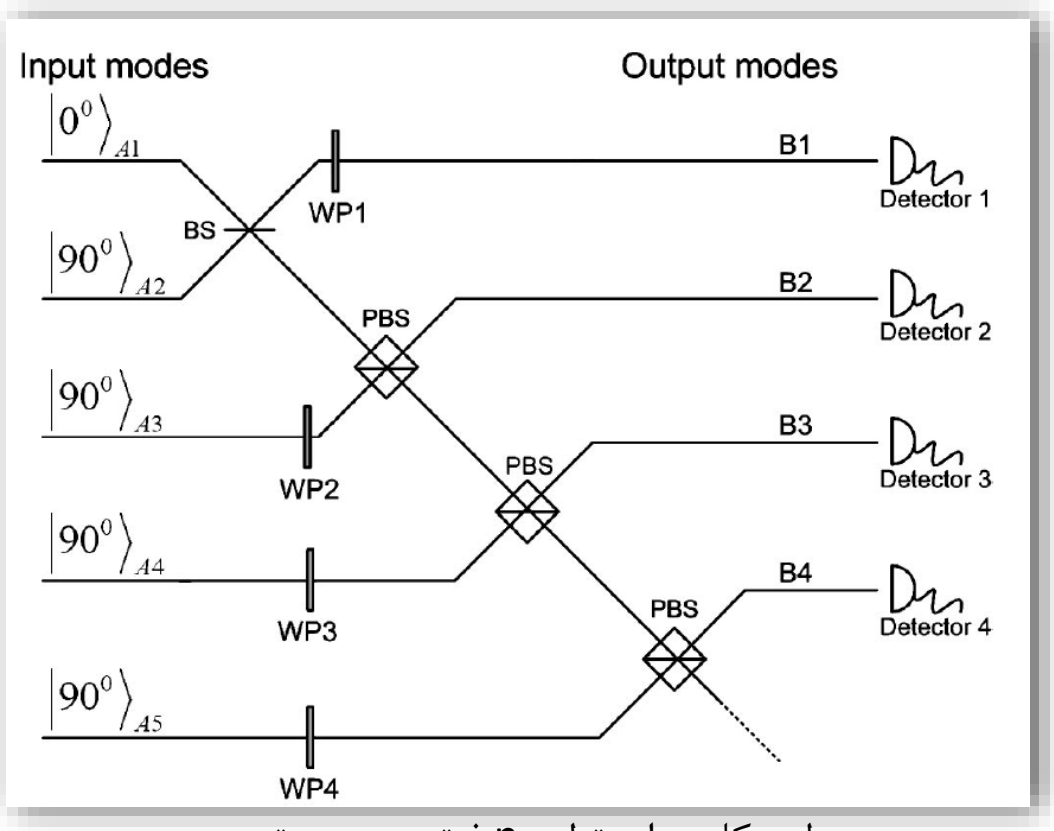
$$|\Psi\rangle_{P1} = \frac{1}{2}\left[\left(|0^\circ\rangle_E |90^\circ\rangle_D - |90^\circ\rangle_E |0^\circ\rangle_D\right)\otimes|90^\circ\rangle_C + \left(|0^\circ\rangle_D |90^\circ\rangle_D - |0^\circ\rangle_E |90^\circ\rangle_E\right)\otimes|90^\circ\rangle_C\right]$$

$$|\Psi\rangle_{P2} = \frac{1}{2\sqrt{2}}[\left(|90^\circ\rangle_D |90^\circ\rangle_E + |0^\circ\rangle_D |0^\circ\rangle_E\right)\otimes\left(|0^\circ\rangle_C + |90^\circ\rangle_C\right) - \left(|0^\circ\rangle_E |90^\circ\rangle_E + |0^\circ\rangle_D |90^\circ\rangle_D\right)\otimes\left(|0^\circ\rangle_C + |90^\circ\rangle_C\right)]$$

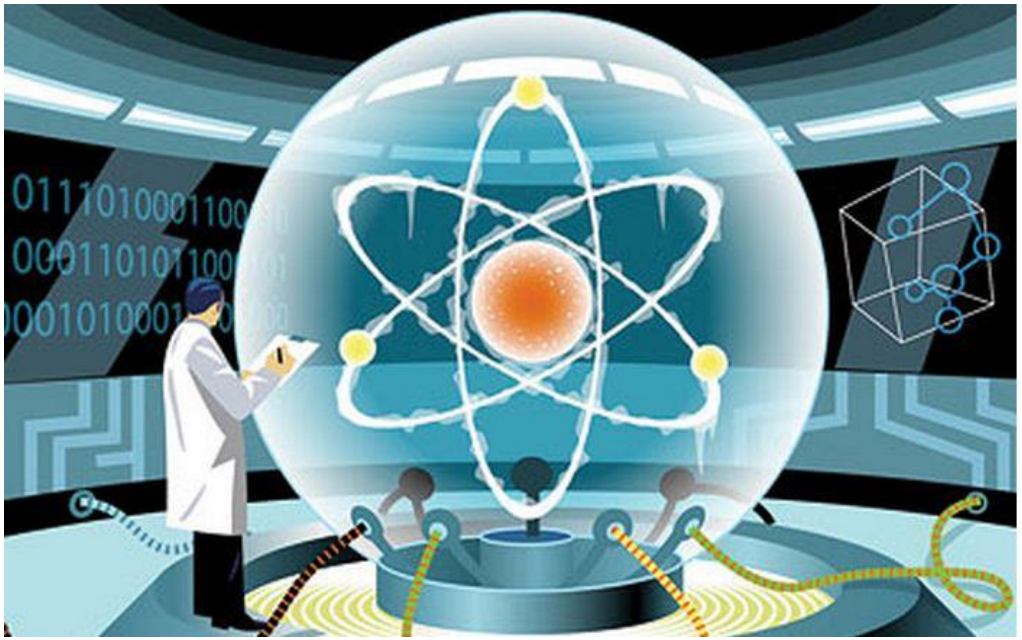
$$|\Psi\rangle_{P3} = \frac{1}{2\sqrt{2}}[\left(|90^\circ\rangle_D |90^\circ\rangle_F + |0^\circ\rangle_D |0^\circ\rangle_G\right)\otimes\left(|0^\circ\rangle_F + |90^\circ\rangle_G\right) - \left(|0^\circ\rangle_G |90^\circ\rangle_F + |0^\circ\rangle_D |90^\circ\rangle_D\right)\otimes\left(|0^\circ\rangle_F + |90^\circ\rangle_G\right)]$$

$$|\Psi\rangle_{PS} = \frac{1}{2\sqrt{2}}\left(|90^\circ\rangle_D |90^\circ\rangle_F |90^\circ\rangle_G + |0^\circ\rangle_D |0^\circ\rangle_F |0^\circ\rangle_G\right)$$

تولید درهم تنیدگی n فوتونی



طرح کلی برای تولید n فوتون در هم تنیده

$$|\Psi\rangle_{input} = |0^\circ\rangle_{A1} |90^\circ\rangle_{A2} \cdots |90^\circ\rangle_{3n} \cdots |90^\circ\rangle_{An}$$

با تشکر از توجه شما