

Óptica cuántica II: Espectro angular del *SPDC* tipo II, degenerado y no colinear. Versión 1.0

Héctor Cruz Ramírez¹
Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM
¹hector.cruz@ciencias.unam.mx

septiembre 2017

Índice

1. Objetivos	1
2. Estado cuántico del proceso	1
3. Discusión	3
4. Experimento	3
5. Pormenores de la práctica	5
6. Agradecimientos	5

1. Objetivos

Los objetivos son

1. Introducción al modelo de la generación de las pareja de fotones por el proceso de conversión paramétrica descendente espontánea en un cristal uniaxial y con bombeo de onda continua.
2. Obtener el espectro angular de las pareja de fotones del tipo II, degenerada y no colineal.

2. Estado cuántico del proceso

El estado cuántico que representa la generación de parejas de fotones de tipo II, degenerado, no colineal y en un cristal uniaxial esta dado por[1, 2]



$$\begin{aligned}
 |\Psi\rangle = & |\text{vac}\rangle + \\
 & \eta \int_{\vec{k}_s^\perp} d^2 k_s^\perp \int_{\omega_s} d\omega_s \int_{\vec{k}_i^\perp} d^2 k_i^\perp \int_{\omega_i} d\omega_i \left\{ F(\vec{k}_s^\perp, \omega_s, o, \vec{k}_i^\perp, \omega_i, e) \hat{a}_s^\dagger(\vec{k}_s^\perp, \omega_s, o) \hat{a}_i^\dagger(\vec{k}_i^\perp, \omega_i, e) + \right. \\
 & \left. F(\vec{k}_s^\perp, \omega_s, e, \vec{k}_i^\perp, \omega_i, o) \hat{a}_s^\dagger(\vec{k}_s^\perp, \omega_s, e) \hat{a}_i^\dagger(\vec{k}_i^\perp, \omega_i, o) \right\} |\text{vac}\rangle, \quad (1)
 \end{aligned}$$

donde

- $|\text{vac}\rangle$ es el estado cuántico de ceros pares,
- η la eficiencia del proceso,
- \vec{k}_ν con $\nu = s, i$ es la componente transversal del vector de onda de la señal y el acompañante respectivamente,
- ω_ν con $\nu = s, i$ es la frecuencia angular de la señal y el acompañante respectivamente,
- $e = e\text{-ray}$ (onda extraordinaria),
- $o = o\text{-ray}$ (onda ordinaria).

La función de amplitud conjunta es

$$F(\vec{k}_s^\perp, \omega_s, \beta_s, \vec{k}_i^\perp, \omega_i, \beta_i) = \phi(\vec{k}_s^\perp, \omega_s, \beta_s, \vec{k}_i^\perp, \omega_i, \beta_i) \alpha(\omega_s + \omega_i; \omega_p), \quad (2)$$

donde

- $\beta_\mu = e\text{-ray}$ o $o\text{-ray}$ ($\mu = s$ or i)
- $\alpha = \alpha(\cdot)$ es la función de envolvente espectral,

y la función de empataamiento de fases esta dada por

$$\begin{aligned}
 \phi(\vec{k}_s^\perp, \omega_s, \beta_s, \vec{k}_i^\perp, \omega_i, \beta_i) = & \exp \left\{ i \frac{1}{2} L [\Delta k^{(\beta_s \beta_i)} + k_y^\perp \tan(\rho_0)] \right\} \times \\
 & \exp \left\{ -\frac{1}{4} W_0^2 |\vec{k}^\perp|^2 \right\} \text{sinc} \left\{ \frac{1}{2} L \Delta k^{(\beta_s \beta_i)} \right\}, \quad (3)
 \end{aligned}$$

y considerando las definiciones

- $\Delta k^{(\beta_s \beta_i)} = k_p - \frac{|\vec{k}^\perp|^2}{2k_p} - k_{sz}^{\beta_s} - k_{iz}^{\beta_i} - k_y^\perp \tan(\rho_0)$.
- $\vec{k}^\perp = (k_x^\perp, k_y^\perp) = (k_{sx} + k_{ix}, k_{sy} + k_{iy})$.
- $\rho_0 = -\frac{1}{n_{\text{eff}}} \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial \theta}$ where θ is the angle between optical axes and wavevector.
- $k_p = \frac{n_{\text{eff}}(\omega_p, \theta_{\text{PMI}}) \cdot \omega_p}{c}$
- $(k_{\mu z}^\beta)^2 = (k_\mu^\beta)^2 - (k_{\mu x}^2 + k_{\mu y}^2)$

3. Discusión

Para calcular la probabilidad de que una pareja de fotones (señal y acompañante) con unos determinados valores de las variables fotónicas: $\vec{k}_s^\perp, \omega_s, \beta_s, \vec{k}_i^\perp, \omega_i, \beta_i$, se debe obtener el modulo cuadrado de la función de amplitud compleja $F(\cdot)$ evaluada en los valores antes citados.

El espectro angular es el histograma de emisión en función de $(\vec{k}_s^\perp, \vec{k}_i^\perp)$ sin distinguir la frecuencia angular y polarización. Lo cual, resulta que la suma incoherente de todos los posibles resultados.

4. Experimento

El arreglo experimental se muestra en la Figura (1). Este se divide en tres partes: 1. preparación del bombeo, 2. generación de las parejas de fotones, y 3. medición del espectro angular. Esto es:

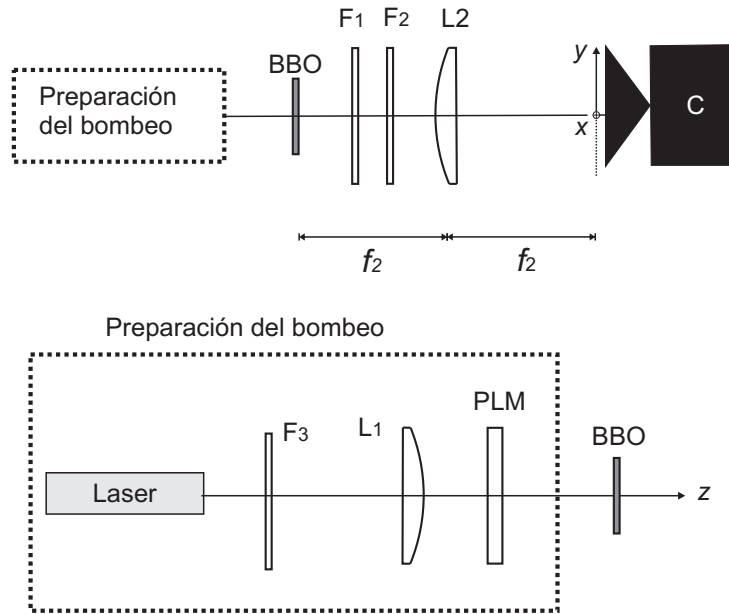


Figura 1: Arreglo experimental.

1. La preparación del bombeo consiste en controlar las propiedades espaciales y temporales del bombeo, el cual es un haz láser que emite en una longitud de onda de 405nm y polarización vertical, V, respecto a la mesa óptica. Respecto a las propiedades temporales se elige que el láser en modo continuo. Respecto a las propiedades espacial elegimos una estructura

gaussiana (determinado por longitud de onda y el radio del cinturón) y que controlamos con la lente L_1 . Con ayuda de la placa retardadora $\lambda/2$, PLM, se controla el estado de polarización del bombeo. Como queremos generar el estado degenerado (810 nm) se requiere un filtro, F_3 que bloquee esa longitud de onda proveniente de la cabeza del láser.

2. La segunda parte consiste en utilizar un cristal no lineal. El cristal es un BBO que es uniaxial, de longitud de 1 mm y ángulo de empatamiento de fases de $\theta_{\text{pm}} = 29.3^\circ$, el cual está colocado en una montura donde se puede controlar el ángulo respecto al eje z (ángulo azimutal), ver Figura (1, 180 grados; y con respecto a otro otro ejes el control es de poco grados. Cambiado el ángulo azimutal se puede establecer las condiciones necesarias para que se produzcan las parejas de fotones: condición de empatamiento de fases. Entonces, eligiendo $\theta_{\text{pm}} = 29.3^\circ$ y una orientación específica del cristal con respecto a la polarización del bombeo tendremos que las parejas de fotones con más probabilidad de emitirse son del tipo II (polarización ortogonal), degenerado y no colineal. Delante del cristal se colocan dos filtros: F_1 para bloquear el bombeo y F_2 un filtro pasabanda centrado en $810 \text{ nm} \pm 5 \text{ nm}$ para limitar los fotones que deseamos observar (que es el estado degenerado).
3. Para medir la distribución de emisión de las parejas de fotones con respecto a $(\vec{k}_s^\perp, \vec{k}_i^\perp)$ se requiere obtener la transformada de Fourier bidimensional (espectro angular). Para lo cual, se usa la configuración $f - f[3]$, en donde un plano focal se coloca el centro del cristal y en otro plano focal se coloca una cámara CCD (C) sensible a ver el régimen espontáneo.

En la Figura (2) se muestran diferentes espectros angular de las parejas de fotones para diferentes valores de los ángulos en los tres ejes. Claramente se ve un cambio significativo.

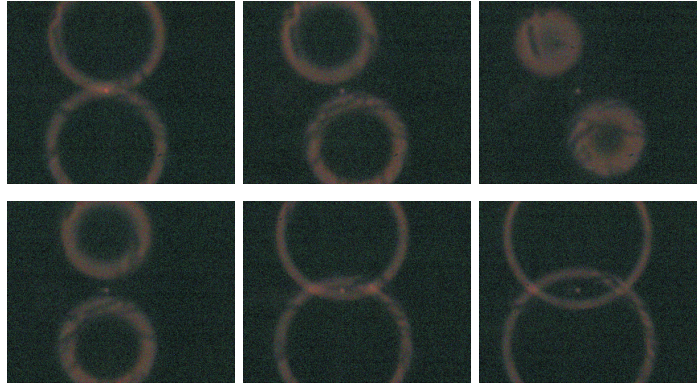


Figura 2: Resultados experimentales.



5. Pormenores de la práctica

Cantidad de sesiones en el laboratorio: 2 sesiones.

6. Agradecimientos

Estas notas fueron realizadas con el apoyo del proyecto PAPIME PE105917.

Referencias

- [1] H. Cruz-Ramirez, "Acondicionamiento del enredamiento espacial en parejas de fotones producidas por conversión paramétrica descendente," Tesis doctoral, UNAM (2014).
- [2] Leonard Mandel and Emil Wolf, "Optical Coherence and Quantum Optics," Cambridge University Press, 1995.
- [3] Joseph W. Goodman, "Introduction to Fourier Optics," Addison-Wesley Longman, 2005.