

Propiedades espaciales y espectrales de fotones enredados de una fuente SPDC.

John Fredy Suárez Pérez

Asesora

Mayerlin Nuñez, Ph D.



Universidad de Los Andes
Grupo de Investigación de Óptica Cuántica
Departamento de Física

Marzo 9 de 2017

Tabla de Contenidos

- 1 Motivación
 - 2 SPDC
 - 3 Mediciones de Joint Spectrum
 - 4 Problema y posible solución
 - 5 Conclusiones
 - 6 To Do List
- Referencias

Medir el espectro conjunto para fuentes de fotones SPDC y de esta forma caracterizar las correlaciones entre los pares de fotones producidos.

Fuente de Fotones Enredados

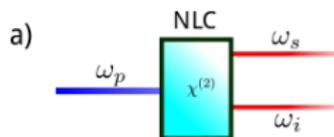
- SPDC (Spontaneous Parametric Down Conversion) es un método de producción de estados Bifotón.
- Se mantienen correlaciones a pesar de la distancia que separa a los fotones.
- Correlaciones en espacio y tiempo. Contenidas en forma de conservación de energía o conservación del momento. (Shih, 2013).

Paradoja EPR

"El valor de un observable no es determinado para ningún subsistema. Sin embargo, si uno de los subsistemas es medido y se obtiene un valor para el observable, el otro queda completamente determinado." (Einstein, Podolsky, y Rosen, 1935).

$$|\Phi\rangle = \sum_{a,b} \delta(a + b - c_o) |a\rangle |b\rangle$$
$$\delta(a + b - c_o)$$

SPDC Process



Phase Matching Conditions

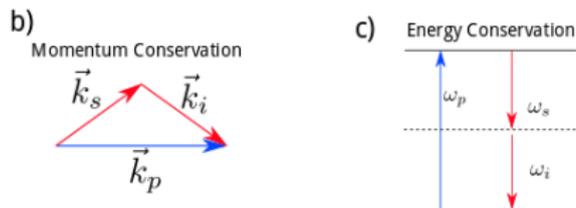


Fig. 1: Condiciones de Phase Matching.

Fuente de Fotones Enredados

$$|\psi\rangle = -\frac{i}{\hbar} \int_{-\infty}^t dt' H_I |0\rangle \quad (1)$$

$$H_I = \epsilon_o \int_V \chi^{(2)} E_p^{(+)}(\vec{r}, t) E_s^{(-)}(\vec{r}, t) E_i^{(-)}(\vec{r}, t) \quad (2)$$

$$|\psi\rangle = -\frac{i}{\hbar} \int_{-\infty}^t \chi^{(2)} dt' \epsilon_o \int d^3\vec{r} E_p^{(+)}(\vec{r}, t) E_s^{(-)}(\vec{r}, t) E_i^{(-)}(\vec{r}, t) |0\rangle. \quad (3)$$

Láser CW

$$E_p^{(+)}(\vec{r}, t) = \xi_p \hat{e} e^{i(\vec{k}_p \cdot \vec{r} - \omega_p t)} \quad (4)$$

$$E_j^{-}(\vec{r}, t) = \int d^3\vec{k}_j \hat{e}_j \xi_j e^{i(\vec{k}_j \cdot \vec{r}_j + \omega t)} \hat{a}^\dagger(\vec{k}_j) \quad (5)$$

Fuente de Fotones Enredados

$$|\psi\rangle = A \int_{-\infty}^t dt' \int d^3\vec{k}_s \int d^3\vec{k}_i e^{i(\omega_p - \omega_s - \omega_i)t'} \hat{a}^\dagger(\vec{k}_s) \hat{a}^\dagger(\vec{k}_i) \int d^3\vec{r} e^{i(\vec{k}_p - \vec{k}_s - \vec{k}_i) \cdot \vec{r}} |0\rangle$$

Componente temporal

$$\int_{-\infty}^t dt' e^{i(\omega_p - \omega_s - \omega_i)t'} = \delta(\omega_p - \omega_s - \omega_i)$$

Componente espacial

$$\int d^3\vec{r} e^{i(\vec{k}_p - \vec{k}_s - \vec{k}_i) \cdot \vec{r}} = \int_0^L dz e^{i(k_{zp} - k_{zs} - k_{zi})z} \int d^2\vec{x} e^{-i(\vec{q}_s + \vec{q}_i - \vec{q}_p) \cdot \vec{x}}$$

$$\int_0^L dz e^{i(k_{zp} - k_{zs} - k_{zi})z} = L\Phi(\Delta kL)$$

$$\int d^2\vec{x} e^{-i(\vec{q}_s + \vec{q}_i - \vec{q}_p) \cdot \vec{x}} = h_{tr}(\Delta \vec{q})$$

Estado Bifotón

$$|\psi\rangle = A \int dk_{zs} \int dk_{iz} L \Phi(\Delta k L) \delta(\omega_p - \omega_s - \omega_i) \\ \times \int d^2 \vec{q}_s \int d^2 \vec{q}_i h_{tr}(\Delta \vec{q}) \hat{a}^\dagger(\vec{k}_s) \hat{a}^\dagger(\vec{k}_i) |0\rangle$$

Distribución Espectral

$$\Phi(\Delta k L) \\ \Phi = \text{sinc}\left(\Delta k \frac{L}{2}\right)$$

$$\delta(\omega_p - \omega_s - \omega_i) \\ \omega_p = \omega_s + \omega_i$$

Condición para el momento transverso

Asumiendo un área transversal del haz de bombeo mucho más grande que la longitud de onda.

$$\int d^2\vec{x} e^{-i(\vec{q}_s + \vec{q}_i - \vec{q}_p) \cdot \vec{x}} = \delta(\vec{q}_s + \vec{q}_i - \vec{q}_p)$$
$$h_{tr}(\Delta\vec{q}) = \delta(\vec{q}_s + \vec{q}_i - \vec{q}_p)$$
$$\vec{q}_p = \vec{q}_s + \vec{q}_i$$

Conservación del momento transverso !!!

SPDC

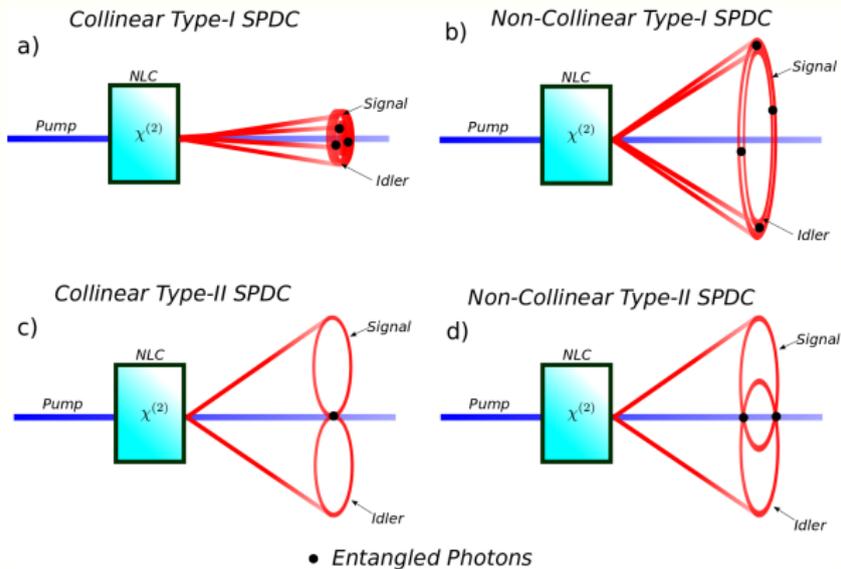


Fig. 2: Producción de fotones enredados mediante proceso SPDC.

Setup de la Fuente

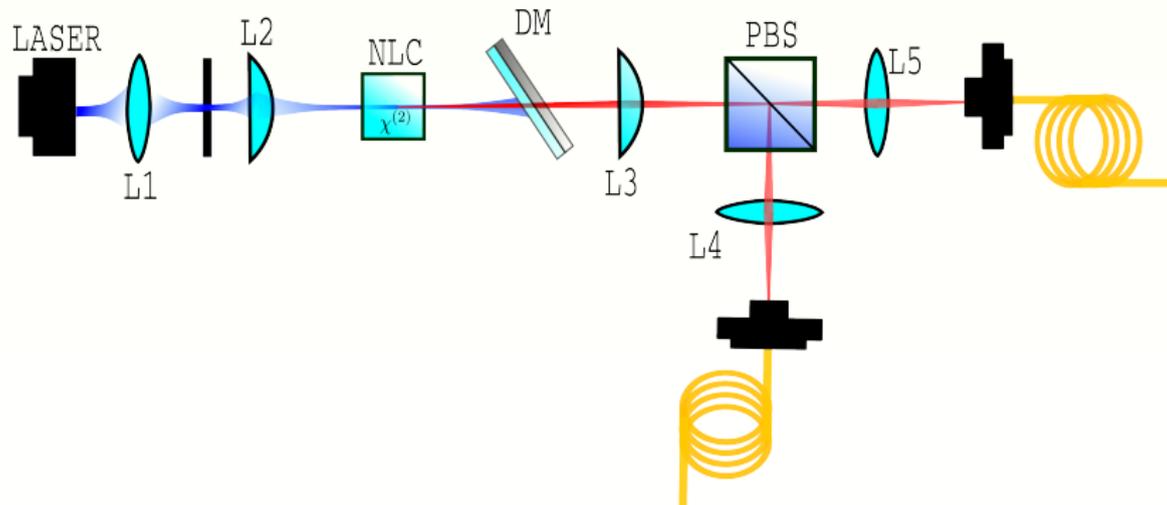


Fig. 3: Montaje para la fuente SPDC Type II.

Anillos

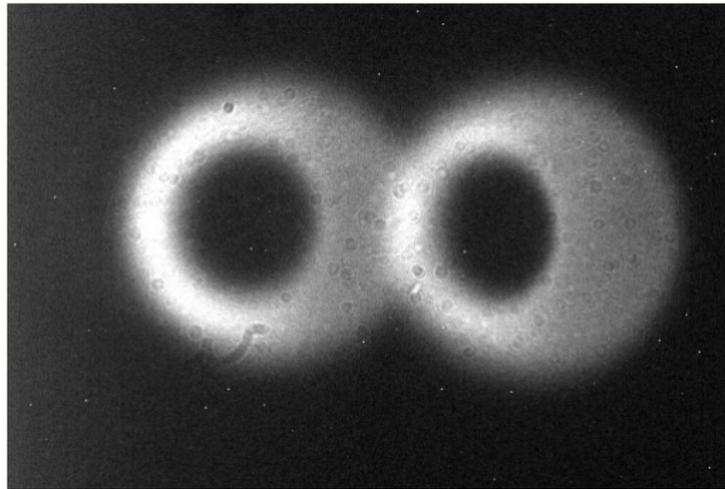


Fig. 4: Anillos característicos de fotones enredados mediante SPDC Type II colineal. $\omega_o = 60\mu m$ a una distancia $d = 190mm$.
Tomada por Víctor Buesaquillo.

Setup

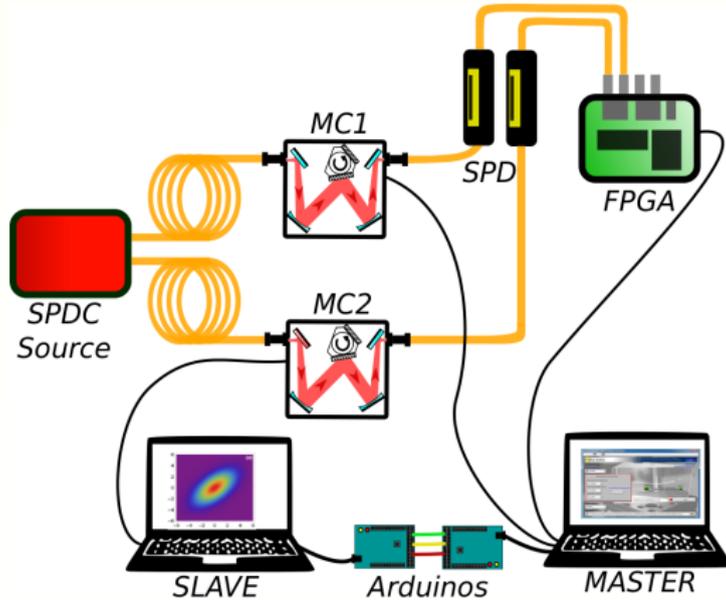


Fig. 5: Montaje para la medición del espectro conjunto de pares de fotones enredados.

Spectro cristal BBO Type II Collinear

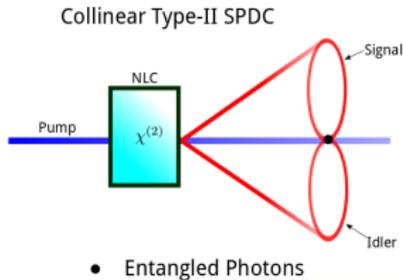


Fig. 6: Producción de fotones SPDC en cristal BBO Type II Collinear.

- *Signal* y *idler* tienen polarizaciones ortogonales.

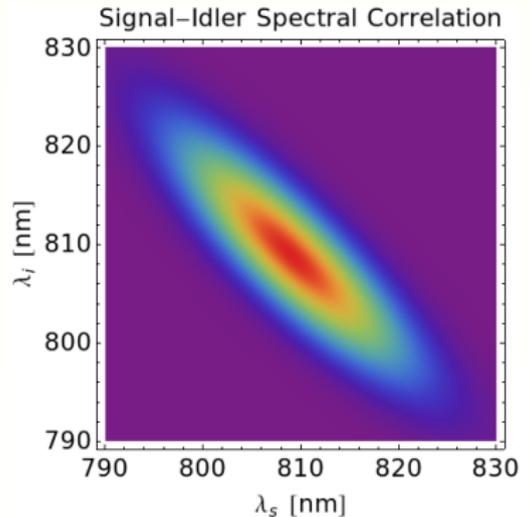


Fig. 7: Espectro conjunto para un proceso SPDC en un cristal BBO tipo II colineal, de longitud $L = 4\text{ mm}$, bombeado con luz a 404 nm . Simulado con Mathematica.

Mediciones

Conteos con polarización V

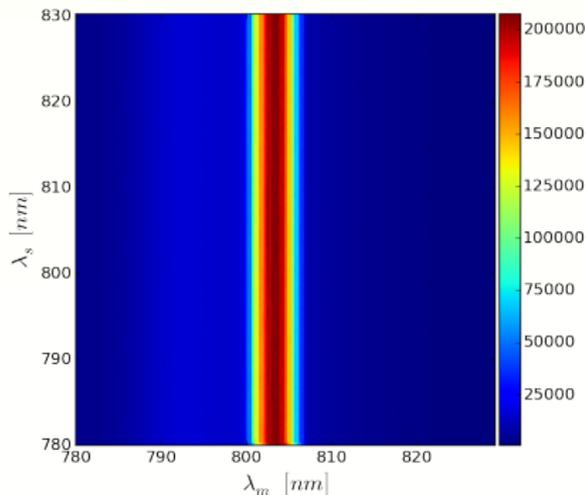


Fig. 8: Conteos de fotones con polarización Vertical (single-extraordinario).

Conteos con polarización H

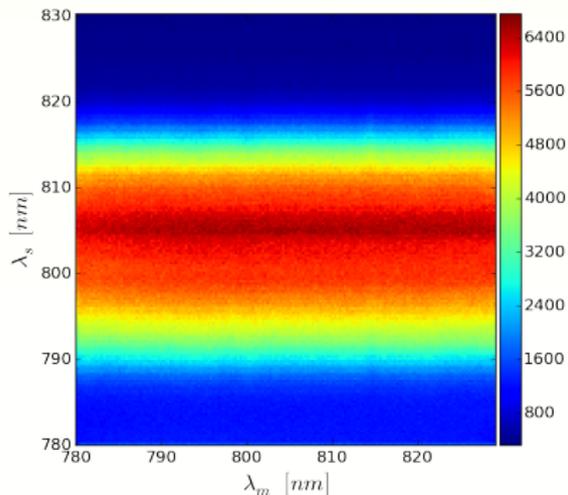


Fig. 9: Conteos de fotones con polarización Horizontal (idler-ordinario).

Mediciones

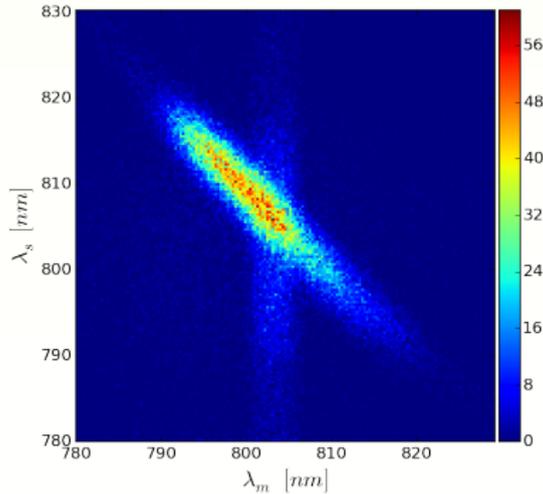


Fig. 10: Joint Spectrum medido para una fuente SPDC Type II Collinear.

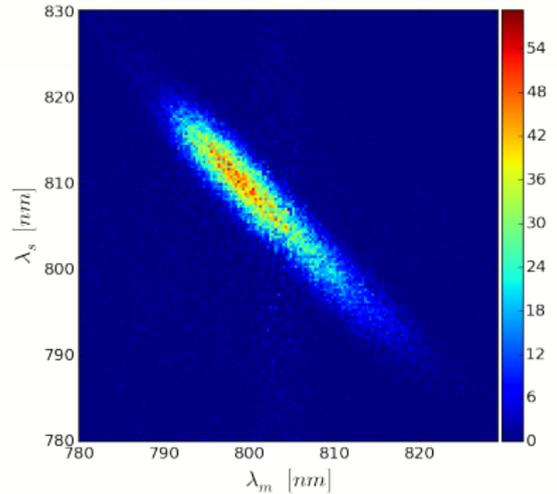


Fig. 11: Joint Spectrum medido para una fuente SPDC Type II Collinear con corrección de conteos accidentales $\tau = 8 \text{ ns}$.

Problema

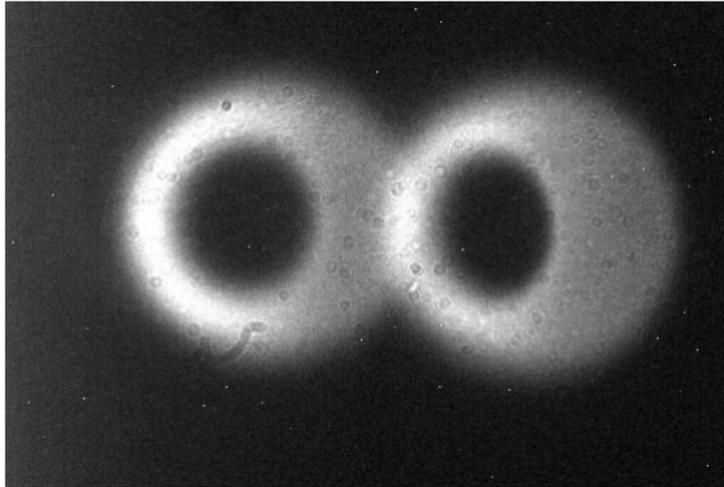


Fig. 12: Anillos característicos de fotones enredados mediante SPDC Type II collineal. $\omega_o = 60\mu m$ a una distancia $d = 190m m$. Tomada por Víctor Buesaquillo.

$$\omega_o = 60\mu m$$

(6)

PHYSICAL REVIEW A **77**, 063828 (2008)

Observation of spectral asymmetry in cw-pumped type-II spontaneous parametric down-conversion

Zhi Zhao, Kent A. Meyer, William B. Whitten, Robert W. Shaw, Ryan S. Bennink,^{*} and Warren P. Grice
Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee 37831, USA
(Received 12 February 2008; published 18 June 2008)

We report on a spectral asymmetry in cw-pumped type-II spontaneous parametric down-conversion. We observe that when the pump beam is focused, the spectra of ordinary and extraordinary down-converted photons broaden unequally. Theoretical analysis indicates that this asymmetry can be attributed to the difference in the angular dispersion (walk-off) of the two kinds of photons, coupled with the well-known correlation between wavelength and emission direction.

DOI: [10.1103/PhysRevA.77.063828](https://doi.org/10.1103/PhysRevA.77.063828)

PACS number(s): 42.65.Lm, 42.50.Dv, 03.67.Mn

Fig. 13: Observation of spectral asymmetry in cw-pumped type-II spontaneous parametric down-conversion.

- Los fotones ordinario (idler) y extraordinario (signal) tienen diferentes anchos de banda.
- Un bombeo monocromático dadas las condiciones de phase matching se esperaría que signal y idler fuera uno espejo del otro.
- El problema se presenta debido a una asimetría espacial asociada al waist del bombeo.(Zhao y cols., 2008)

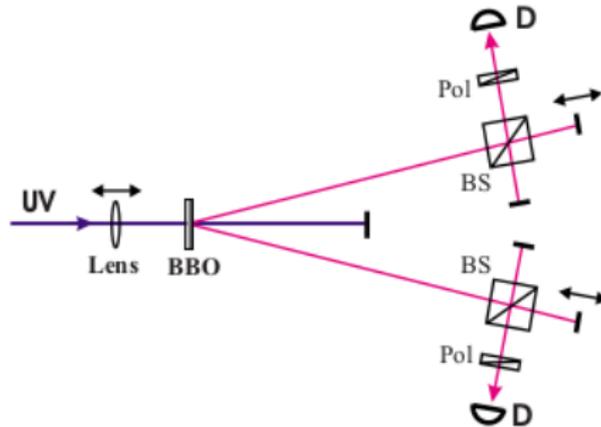
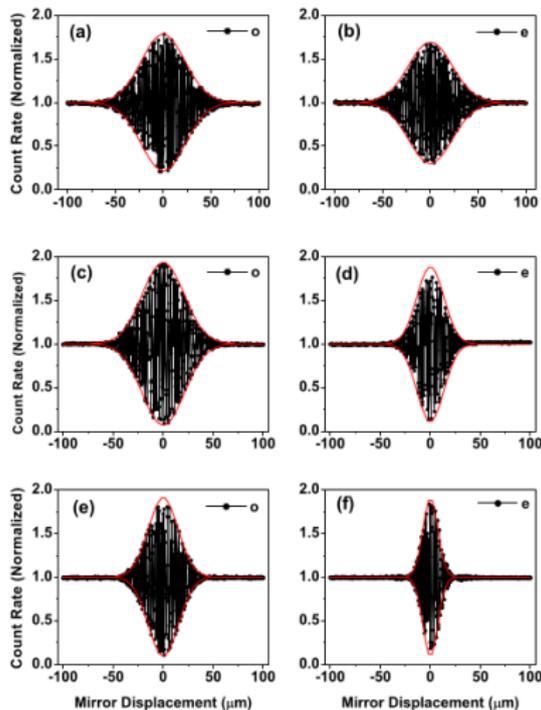


Fig. 14: Montaje Interferometro Michelson. Tomada de (Zhao y cols., 2008)



Waist

1. a) y b) con $74\mu\text{m}$
2. c) y d) con $30\mu\text{m}$
3. e) y f) con $20\mu\text{m}$

Longitud de Coherencia

- a) $46\mu\text{m}$
- b) $46\mu\text{m}$
- c) $42\mu\text{m}$
- d) $27\mu\text{m}$
- e) $30\mu\text{m}$
- f) $15\mu\text{m}$

$$k_{\parallel} \approx \frac{n\omega}{c} + \alpha k_{\perp} + \frac{n'}{c}\Omega \quad (7)$$

$$\Delta k = k_p - k_s - k_i \quad (8)$$

$$\Delta k_{\parallel} \approx \frac{n'_i - n'_s}{c}\Omega_s + (\alpha_p - \alpha_s)k_{\perp s} + (\alpha_p - \alpha_i)k_{\perp i} \quad (9)$$

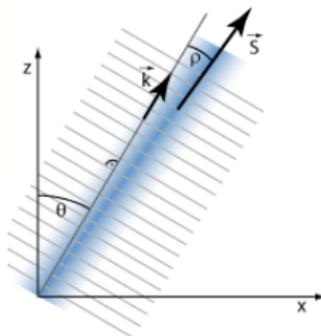


Fig. 16: Ángulo Walk-off. Tomada de

https://www.rp-photonics.com/spatial_walk_off.html

$$A(k_{\perp s}, k_{\perp i}, \Omega) \propto E_p(k_{\perp s} + k_{\perp i}) \operatorname{sinc}(\Delta k_{\parallel} \frac{L}{2}) \quad (10)$$

$$E_p(k_{\perp}) \propto \exp[-(k_{\perp}/K_p)^2] \quad (11)$$

$$K_p = \frac{\omega}{c} \sin \Delta \theta_p \quad (12)$$

Función de transmitancia Gaussiana para filtros espaciales

$$F(k_{\perp}) = \exp[-(k_{\perp}/K_{si})^2] \quad (13)$$

$$K_{si} = \frac{\omega}{c} \sin \Delta \theta_{si} \quad (14)$$

$$S(\Omega_s) = \int |F(k_{\perp s})|^2 |A(k, k_{\perp i}, \Omega)|^2 dk_{\perp s} dk_{\perp i} \quad (15)$$

$$\frac{\Delta\omega_s}{\omega_s} \approx \sqrt{\frac{0.52\lambda_s^2}{(n'_i - n_s)^2 L^2} + \left(\frac{\alpha_s - \alpha_i}{n'_i - n'_s}\right) \sin^2 \Delta\theta_{si} + \frac{\lambda_s^2}{\lambda_p^2} \left(\frac{\alpha_p - \alpha_i}{n'_i - n'_s}\right)^2 \sin^2 \Delta\theta_p}$$

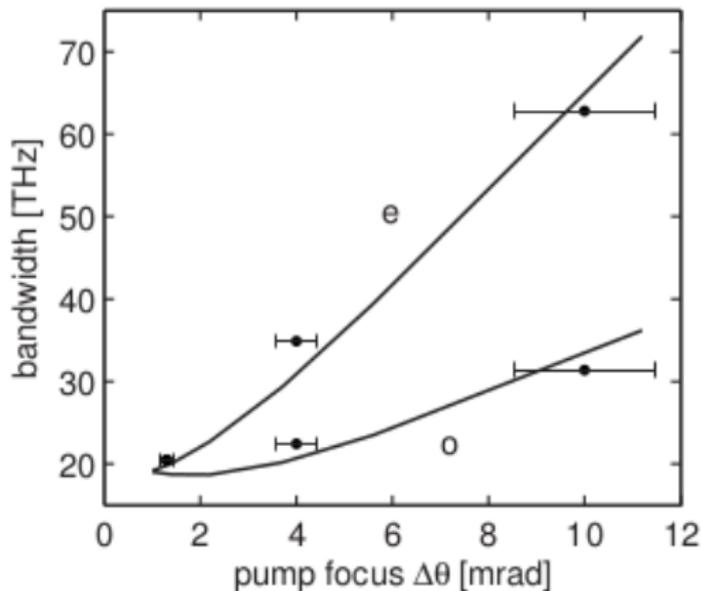


Fig. 17: Predicciones y mediciones del ancho de banda espectral para fotones enredados ordinario y extraordinario.

Paper II



Optics Communications

Volume 366, 1 May 2016, Pages 442–450



Spatial and spectral properties of entangled photons from spontaneous parametric down-conversion with a focused pump

Jong-Chan Lee , Yoon-Ho Kim 

Fig. 18: Spatial and spectral properties of entangled photons from spontaneous parametric down-conversion with a focused pump.

Resultados del Paper

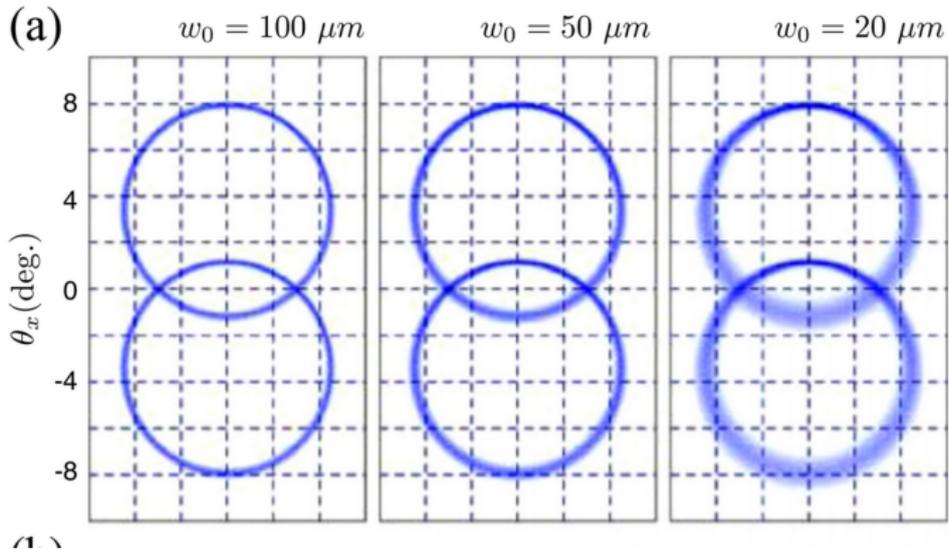


Fig. 19: Configuración espectral para diferentes waist. Tomada de (Lee y Kim, 2016)

Conclusiones

- El waist del bombeo que incide sobre el cristal es un factor que determina el ancho de banda de los fotones signal e idler.
- De acuerdo a las lecturas un waist óptimo esta alrededor de $100\mu m$.

To Do List

- 1 Cambiar el láser para optimizar el *waist* que incide sobre el *NLC*.
- 2 Caracterizar la nueva fuente de fotones *SPDC*.
- 3 Medir el *Joint Spectrum* de la nueva fuente.
- 4 Utilizar el *TDC* para realizar medidas de $G^{(2)}(\tau)$.

Cambiando el láser

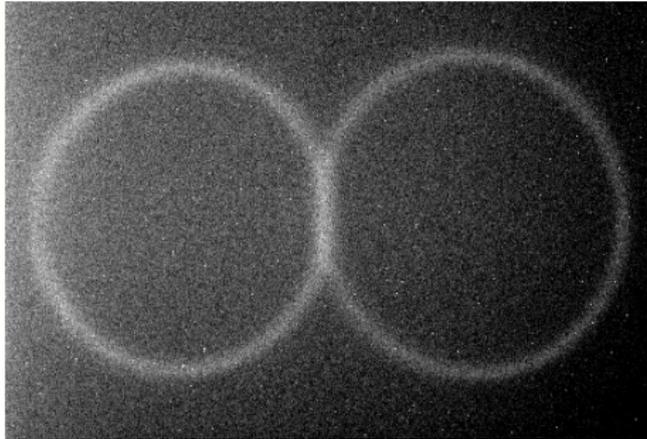


Fig. 20: Anillos medidos a una distancia de 210mm del cristal. $\omega_o = 100\mu m$

Referencias I

- Einstein, A., Podolsky, B., y Rosen, N. (1935, mayo). Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? *Physical Review*, 47, 777-780. doi: 10.1103/PhysRev.47.777
- Lee, J.-C., y Kim, Y.-H. (2016). Spatial and spectral properties of entangled photons from spontaneous parametric down-conversion with a focused pump. *Optics Communications*, 366, 442 - 450. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030401815303837> doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.optcom.2015.12.050>
- Shih, Y. (2013). Entangled biphoton source - property and preparation. *Reports on Progress in Physics*, 66(6), 1009. Descargado de <http://stacks.iop.org/0034-4885/66/i=6/a=203>

Referencias II

Zhao, Z., Meyer, K. A., Whitten, W. B., Shaw, R. W., Bennink, R. S., y Grice, W. P. (2008, Jun). Observation of spectral asymmetry in cw-pumped type-ii spontaneous parametric down-conversion. *Phys. Rev. A*, 77, 063828. Descargado de <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.77.063828>
doi: 10.1103/PhysRevA.77.063828