

Estudio de la sensibilidad de detección de fotones correlacionados con Skipper-CCDs

Muriel Bonetto

Director: Darío Rodrigues ^{1,2}

Codirectora: Agustina Magnoni ^{3,2}

¹ Laboratorio Argentino de Mediciones con Bajo umbral de Detección y sus Aplicaciones (LAMBDA), IFIBA, (UBA-CONICET)

² Departamento de Física, FCEyN (UBA)

³ Laboratorio de Óptica Cuántica, DEILAP (UNIDEF, CITEDEF-CONICET)

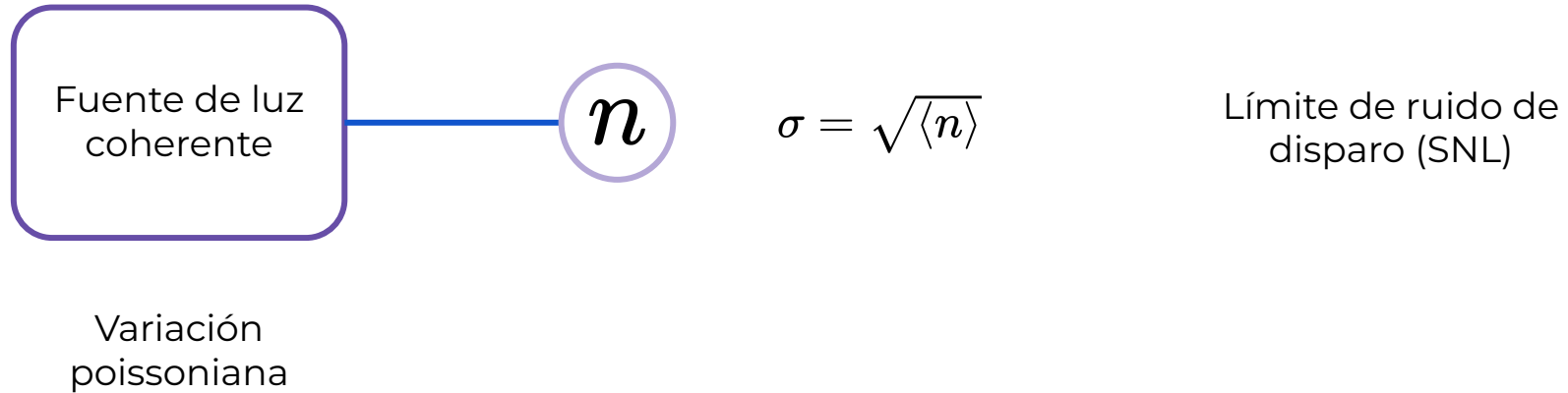
Índice de la presentación

- Experimentos con fuentes de pares de fotones
- Detectores CCDs
- Motivación del trabajo: Skipper-CCDs en experimentos de SPDC
- Simulación de un sistema con un cristal BBO tipo I y correlación en N imágenes
- Propuesta experimental
- Simulación de un sistema con un cristal BBO tipo II y correlación en una imagen
- Estimación de la absorbancia en experimentos de pares de fotones correlacionados
- Conclusiones y perspectivas

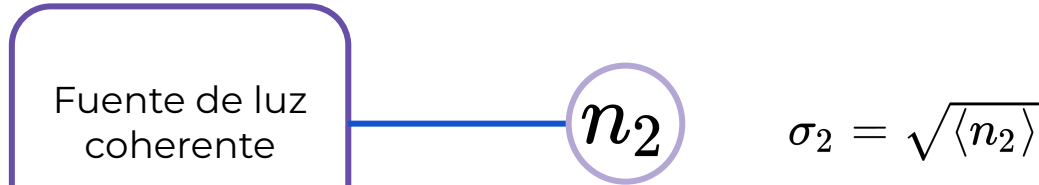
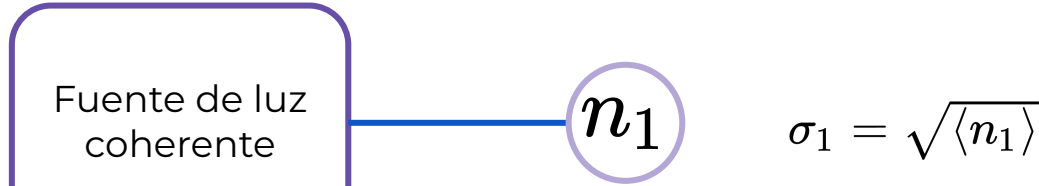
Índice de la presentación

- **Experimentos con fuentes de pares de fotones**
- Detectores CCDs
- Motivación del trabajo: Skipper-CCDs en experimentos de SPDC
- Simulación de un sistema con un cristal BBO tipo I y correlación en N imágenes
- Propuesta experimental
- Simulación de un sistema con un cristal BBO tipo II y correlación en una imagen
- Estimación de la absorbancia en experimentos de pares de fotones correlacionados
- Conclusiones y perspectivas

Experimentos con pares de fotones



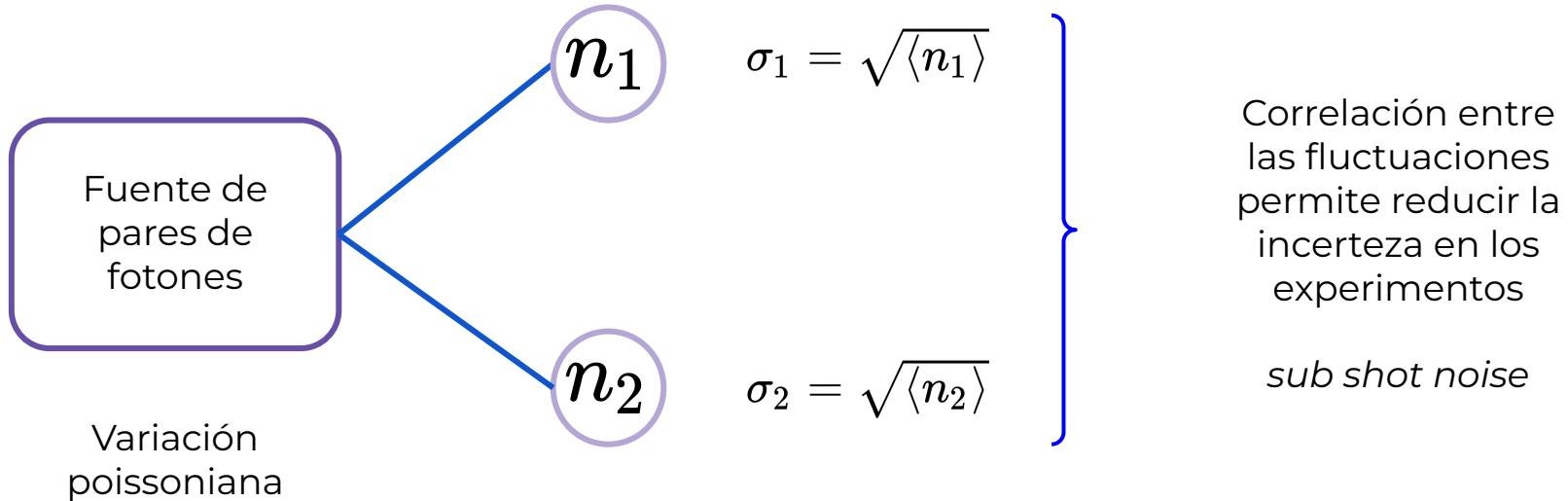
Experimentos con pares de fotones



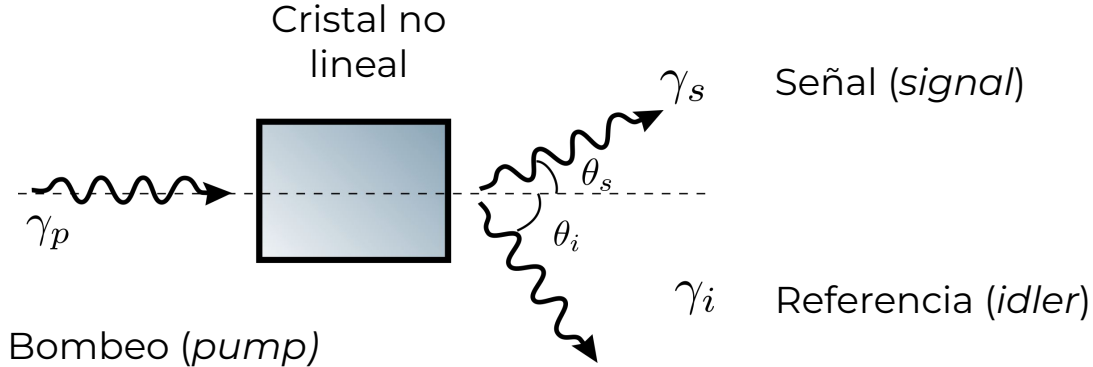
Variación
poissoniana

Límite de ruido de
disparo (SNL)

Experimentos con pares de fotones



Spontaneous Parametric Down-Conversion (SPDC)

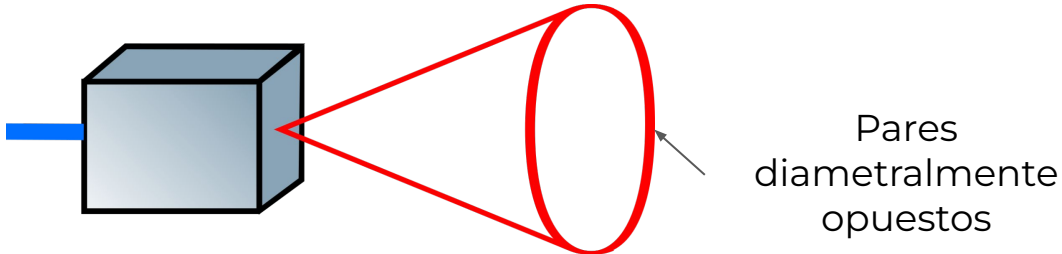


Conservación de energía

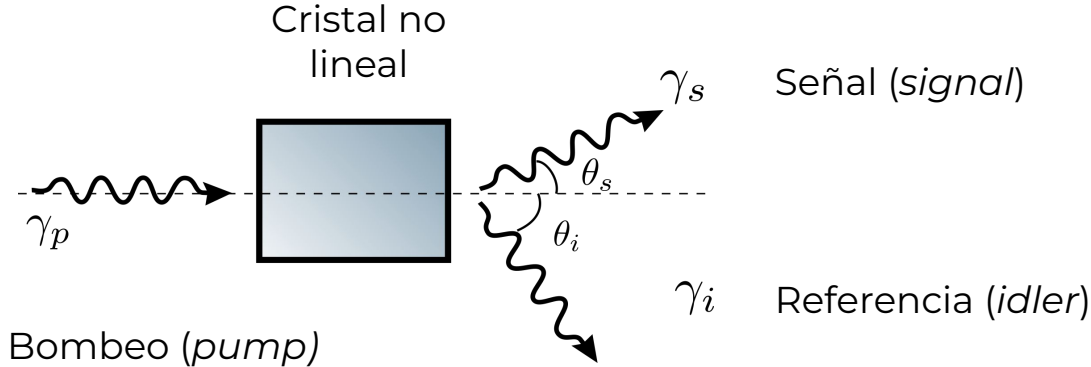
$$\omega_p = \omega_s + \omega_i$$

Conservación del momento

$$\mathbf{q}_p = \mathbf{q}_s + \mathbf{q}_i$$



Spontaneous Parametric Down-Conversion (SPDC)

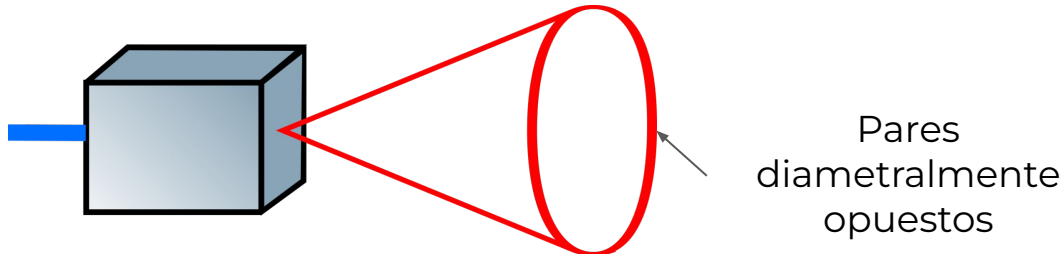


Conservación de energía

$$\omega_p = \omega_s + \omega_i$$

Conservación del momento

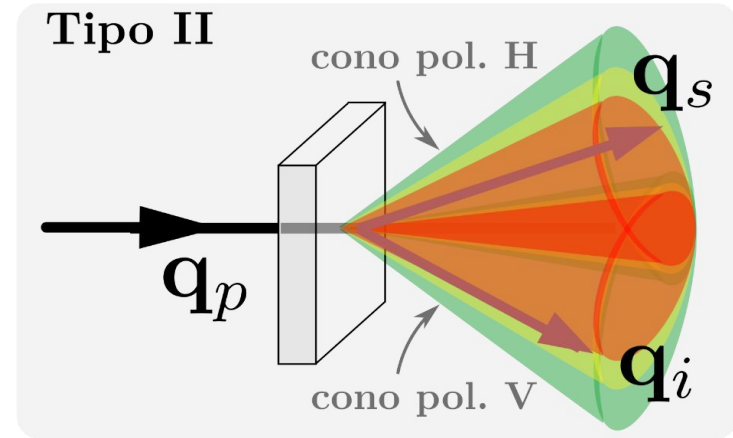
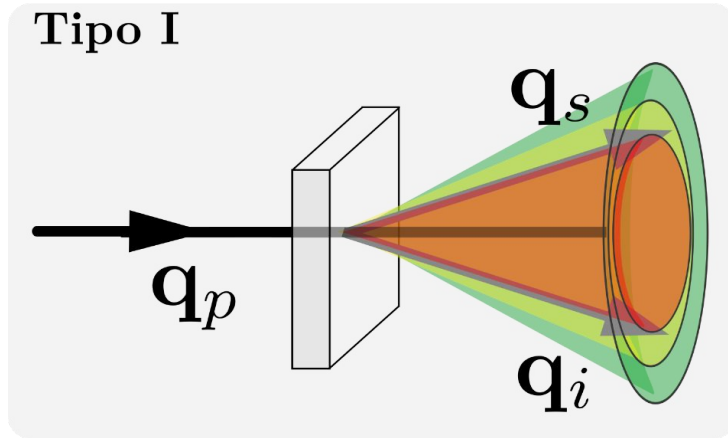
$$\mathbf{q}_p = \mathbf{q}_s + \mathbf{q}_i$$



Caso degenerado

$$\omega_s = \omega_i = \omega_p/2$$

SPDC - tipo I y II



Experimentos con pares de fotones

Aplicaciones

- Estimaciones de absorbancia de una muestra
- Microscopía cuántica
- Ghost imaging
- Quantum illumination
- Calibración absoluta de detectores

Experimentos con pares de fotones

Aplicaciones

- Estimaciones de absorbancia de una muestra
- Microscopía cuántica
- Ghost imaging
- Quantum illumination
- Calibración absoluta de detectores

Limitación

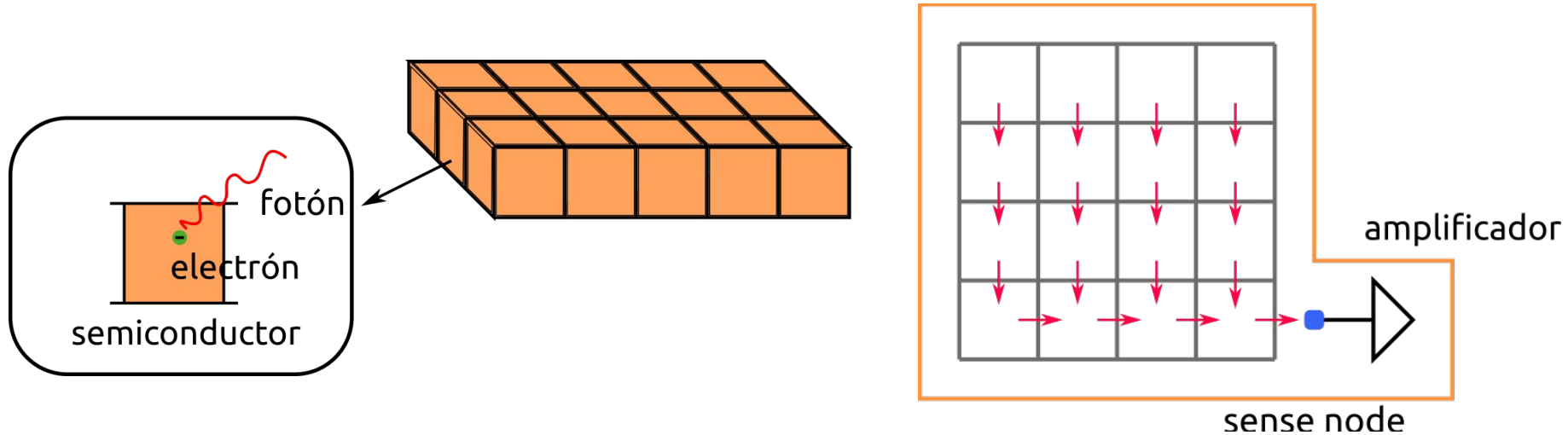
$$\sigma_{RN} \simeq \sqrt{\langle n \rangle}$$

Ruido de lectura

Índice de la presentación

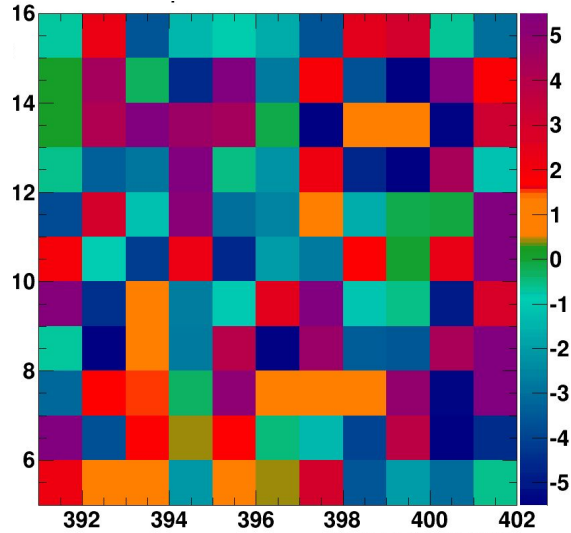
- Experimentos con fuentes de pares de fotones
- **Detectores CCDs**
- Motivación del trabajo: Skipper-CCDs en experimentos de SPDC
- Simulación de un sistema con un cristal BBO tipo I y correlación en N imágenes
- Propuesta experimental
- Simulación de un sistema con un cristal BBO tipo II y correlación en una imagen
- Estimación de la absorbancia en experimentos de pares de fotones correlacionados
- Conclusiones y perspectivas

¿Cómo detectar luz? Detectores CCDs



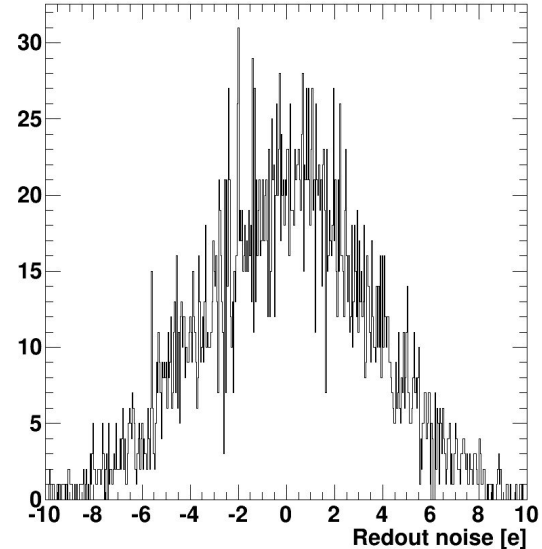
Detectores CCDs: ruido de lectura

Número de cuentas por píxel



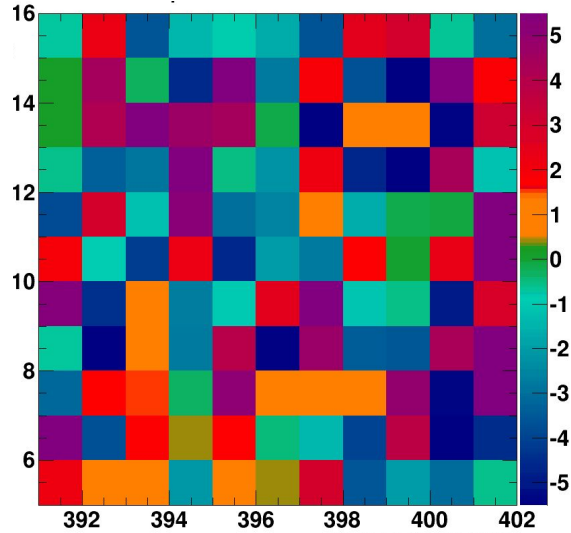
Distribución de la carga por píxel

Ruido de lectura: 5 rms e^- / píxel



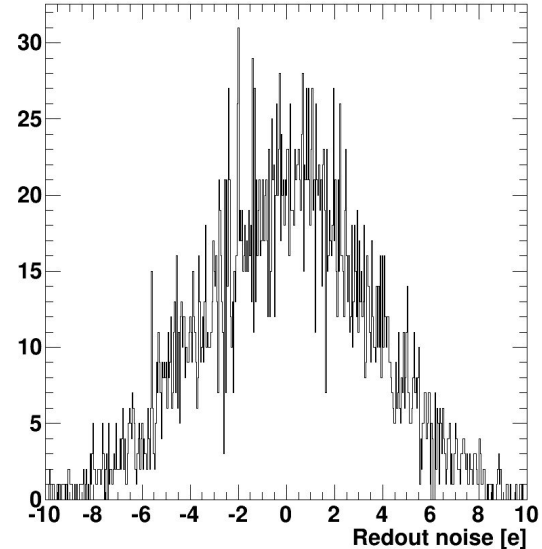
Detectores CCDs: ruido de lectura

Número de cuentas por píxel



Distribución de la carga por píxel

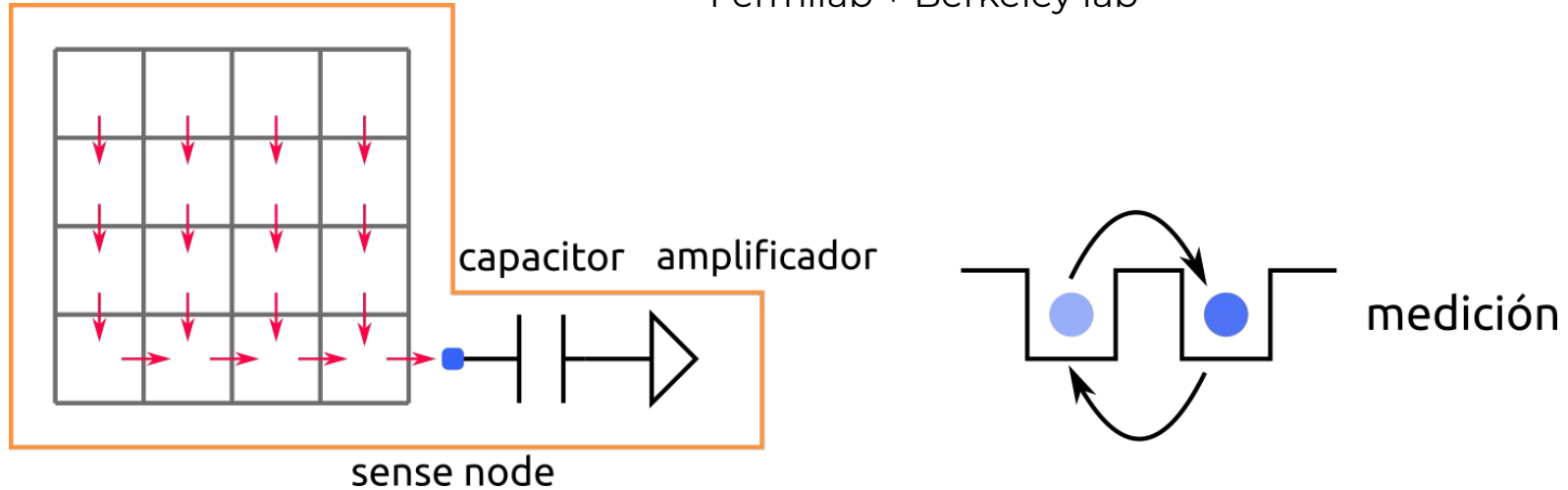
Ruido de lectura: $5 \text{ e}^- / \text{píxel}$



$$\sigma_{RN} \simeq \sqrt{\langle n \rangle}$$

Detectores Skipper-CCD

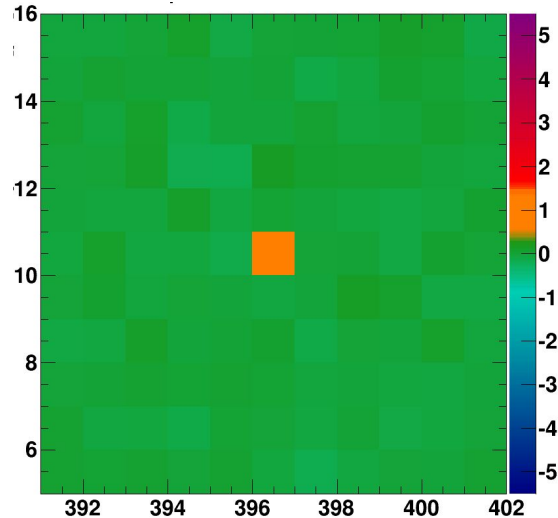
Fermilab + Berkeley lab



$$\sigma = \frac{\sigma_{RN}}{\sqrt{N}}$$

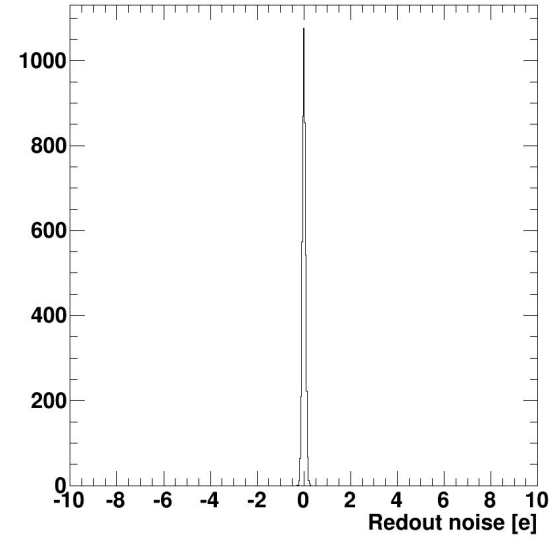
Detectores Skipper-CCD: ruido de lectura

Número de cuentas por píxel



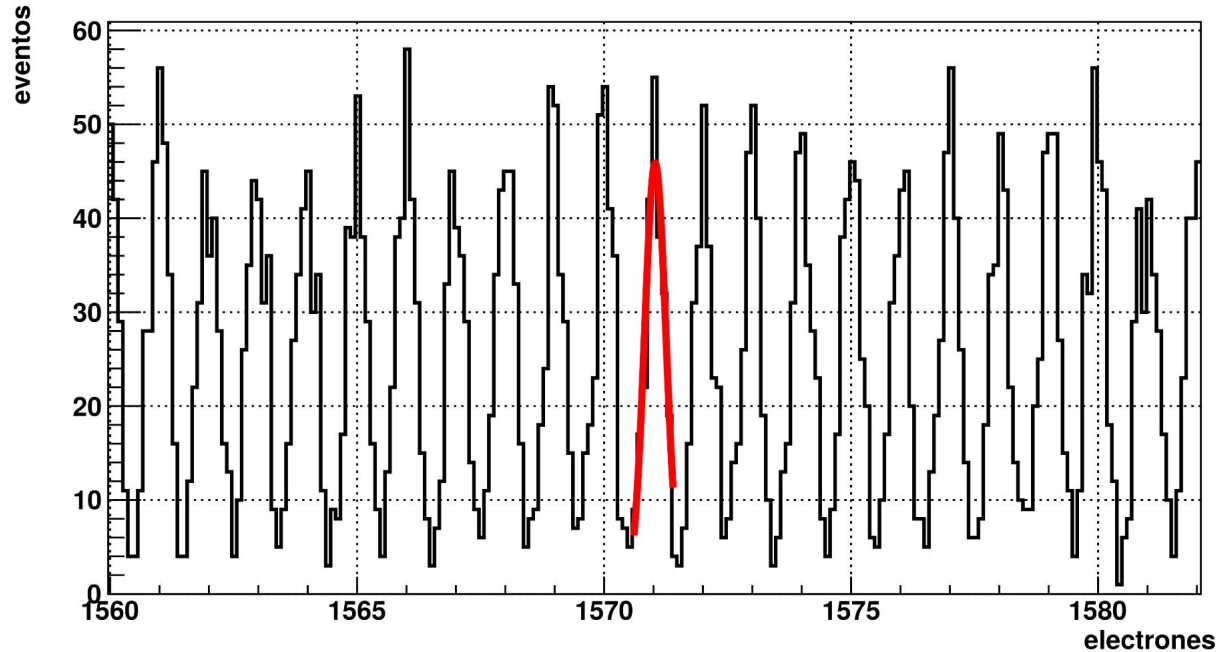
Distribución de cuentas por píxel

Ruido de lectura: $0.068 \text{ e}^- / \text{píxel}$
4000 mediciones



Detectores Skipper-CCD: ruido de lectura

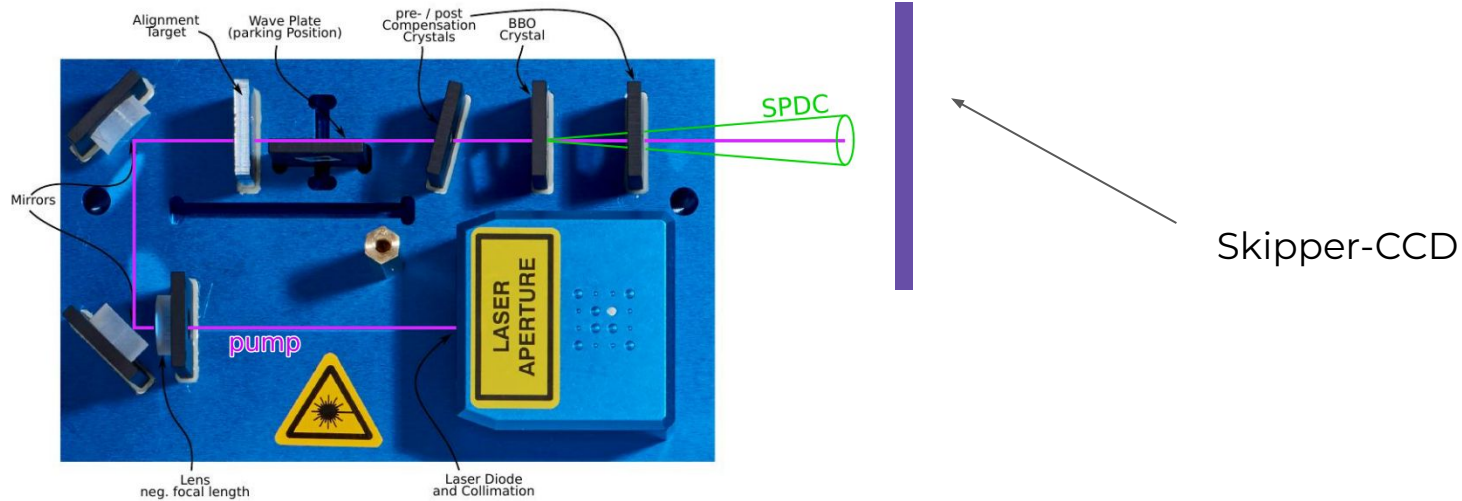
Rango dinámico 0 - 2000 e⁻



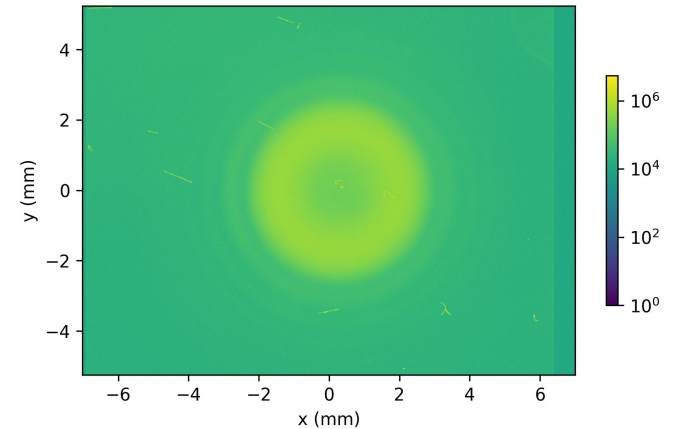
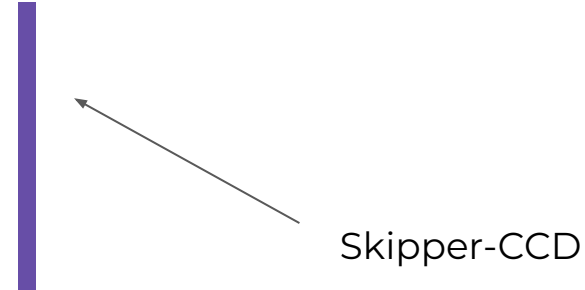
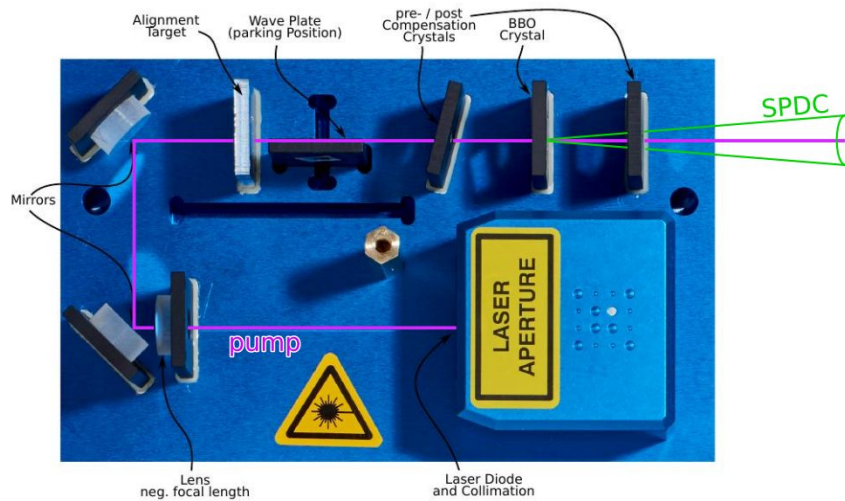
Índice de la presentación

- Experimentos con fuentes de pares de fotones
- Detectores CCDs
- **Motivación del trabajo: Skipper-CCDs en experimentos de SPDC**
- Simulación de un sistema con un cristal BBO tipo I y correlación en N imágenes
- Propuesta experimental
- Simulación de un sistema con un cristal BBO tipo II y correlación en una imagen
- Estimación de la absorbancia en experimentos de pares de fotones correlacionados
- Conclusiones y perspectivas

Motivación: sistema a diagnosticar



Motivación: sistema a diagnosticar



Cálculo de correlación

¿Qué tan distintas son dos variables? $\longrightarrow$ Estimador del coeficiente de correlación

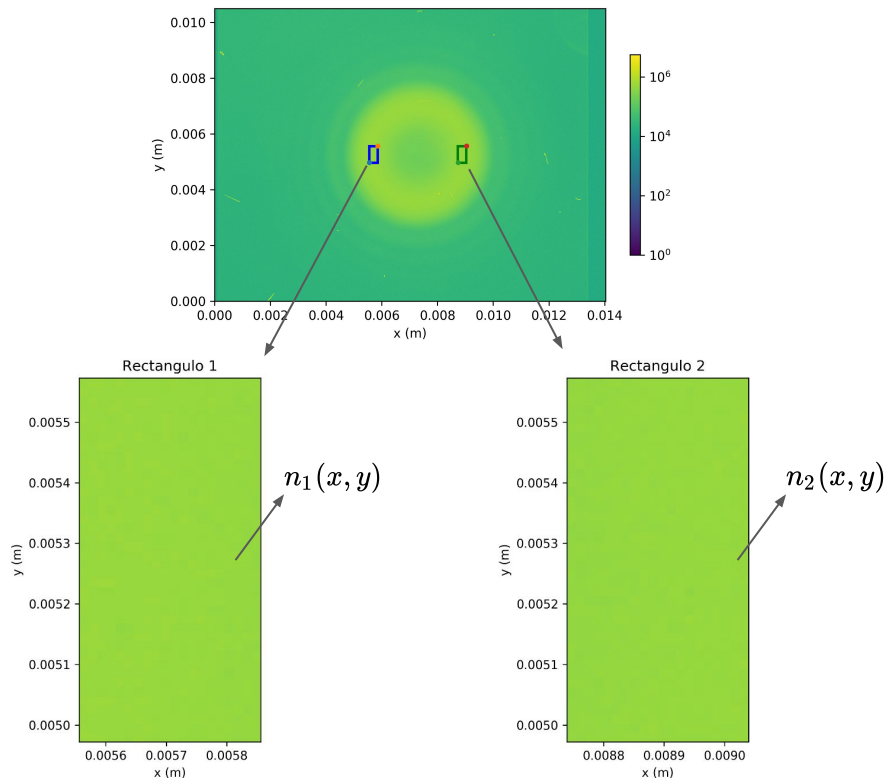
$$X, Y \quad \{x\}_{i=1}^N, \{y_i\}_{i=1}^N$$
$$\hat{\rho} = \frac{\hat{\text{Cov}}(X, Y)}{\sqrt{\hat{\text{Var}}(X) \hat{\text{Var}}(Y)}}$$

Si se trata de variables normales bivariadas

$$\mathbb{E}[\hat{\rho}] = \rho - \frac{\rho(1-\rho^2)}{2n} + O(n^{-2})$$

$$\text{Var}[\hat{\rho}] = \frac{1}{n}(1 - \rho^2) + O(n^{-2})$$

Cálculo de correlación



$$\rho = \frac{\text{Cov}(n_1, n_2)}{\sqrt{\text{Var}(n_1)\text{Var}(n_2)}}$$

$n_{1,i}$ $n_{2,i}$

Número de cuentas total
en una región por imagen

Cálculo de correlación y motivación del trabajo

- En un estudio preliminar no encontramos correlación sistemática
 - ¿Cuáles son las fuentes de descorrelación?
 - ¿Cómo se puede mejorar la configuración experimental?

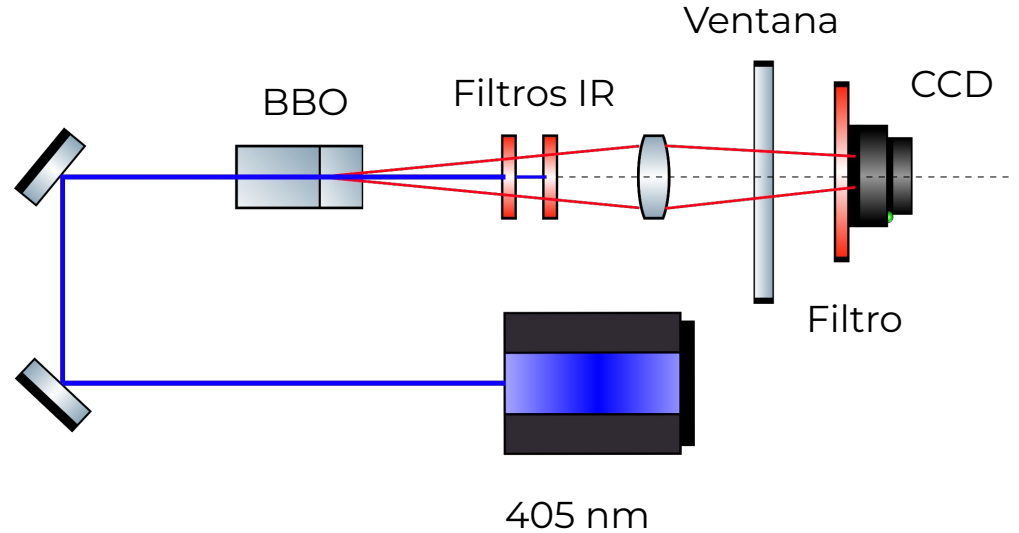
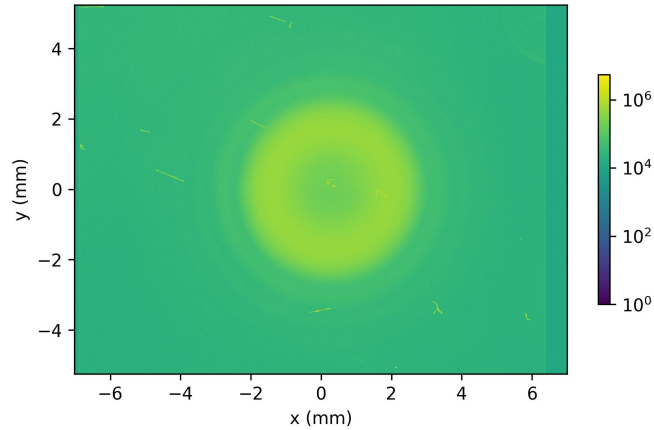


Simulación del sistema

Índice de la presentación

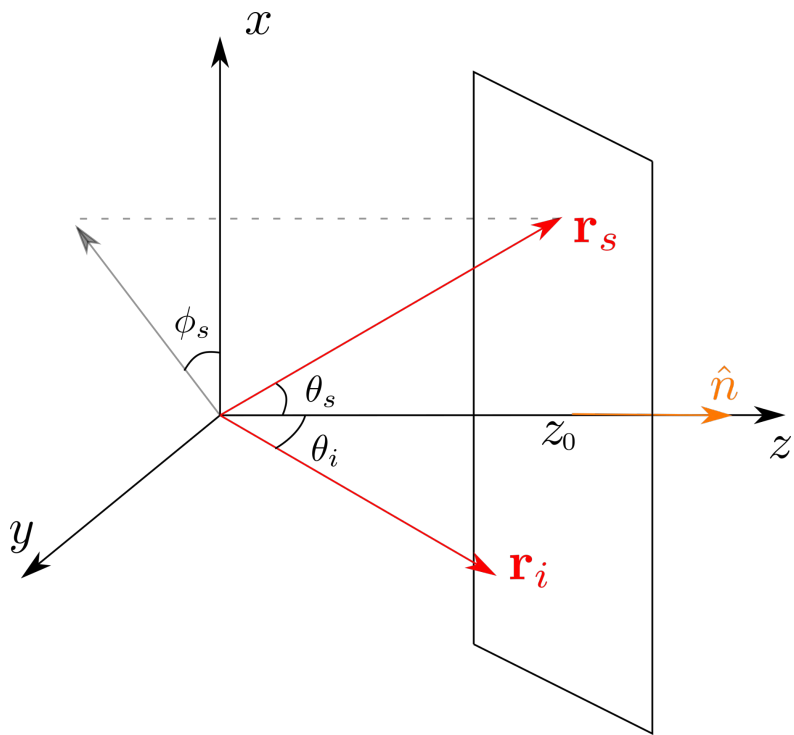
- Experimentos con fuentes de pares de fotones
- Detectores CCDs
- Motivación del trabajo: Skipper-CCDs en experimentos de SPDC
- **Simulación de un sistema con un cristal BBO tipo I y correlación en N imágenes**
- Propuesta experimental
- Simulación de un sistema con un cristal BBO tipo II y correlación en una imagen
- Estimación de la absorbancia en experimentos de pares de fotones correlacionados
- Conclusiones y perspectivas

Sistema con BBO tipo I



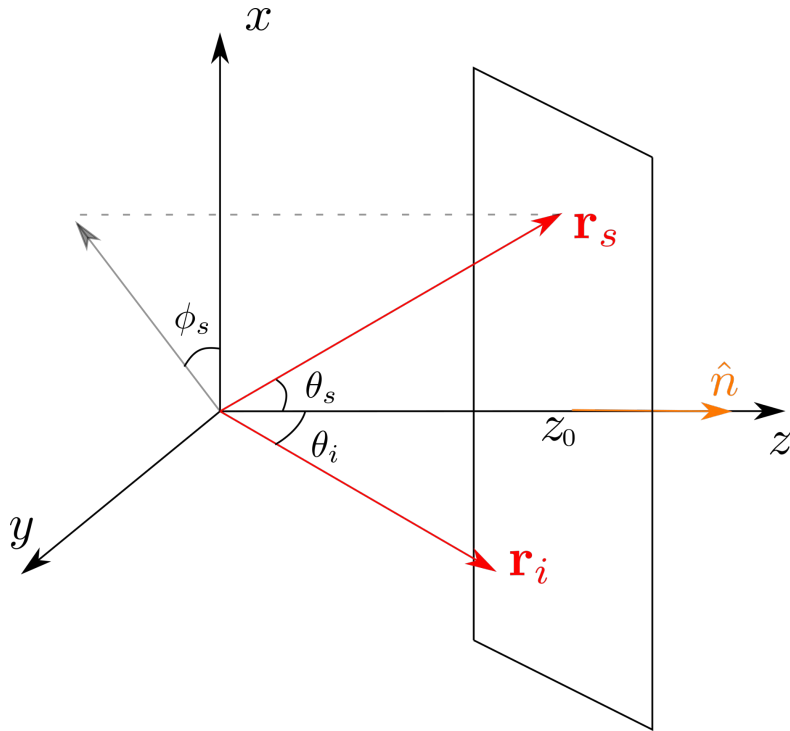
Sistema con BBO tipo I

Distribución angular



Sistema con BBO tipo I

Distribución angular



$$\omega_s = \omega_i = \frac{\omega_p}{2}$$

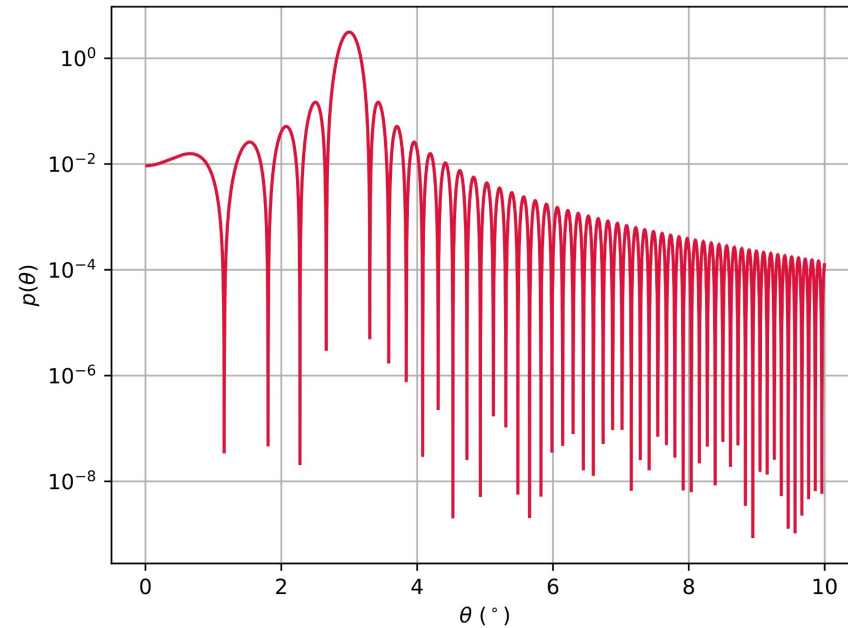
$$\theta_s = \theta_i = \theta$$

$$g(\theta) \propto \text{sinc}^2 \left[\pi \frac{l}{\lambda_p} (n \cos \theta - n_p) \right]$$

Sistema con BBO tipo I

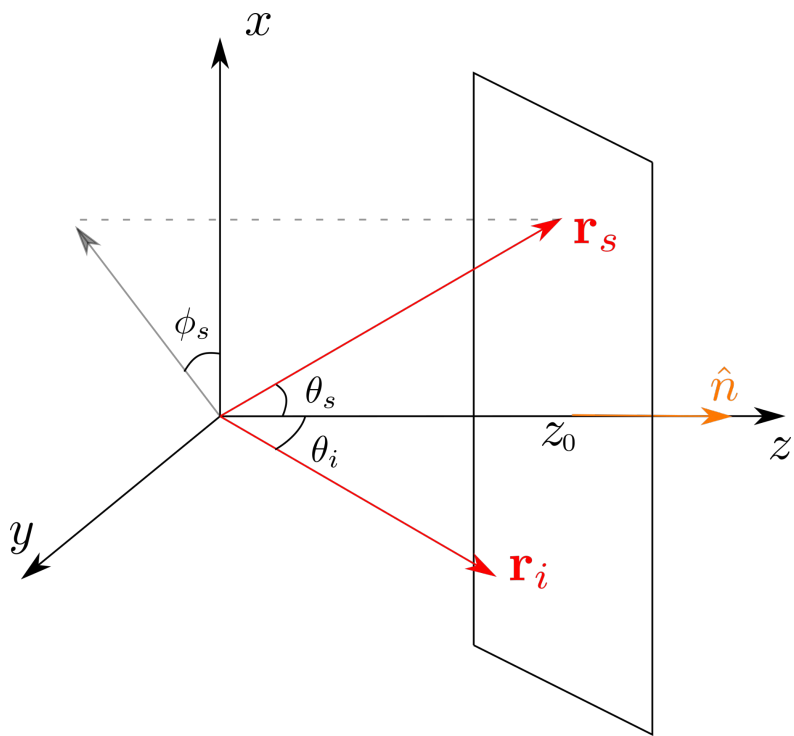
Distribución angular

$$g(\theta) \propto \text{sinc}^2 \left[\pi \frac{l}{\lambda_p} (n \cos \theta - n_p) \right]$$



Sistema con BBO tipo I

Distribución angular



$$\omega_s = \omega_i = \frac{\omega_p}{2}$$

$$\theta_s = \theta_i = \theta$$

$$g(\theta) \propto \text{sinc}^2 \left[\pi \frac{l}{\lambda_p} (n \cos \theta - n_p) \right]$$

$$\phi_s \sim U[0, 2\pi]$$

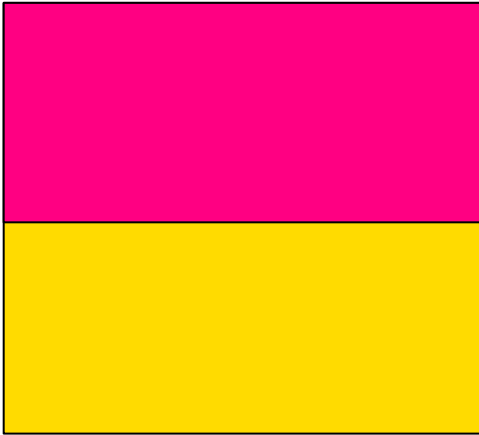
$$\phi_i = \phi_s + \pi$$

$$\theta, \phi_s \rightarrow \mathbf{r}_s, \mathbf{r}_i$$

Sistema con BBO tipo I

Aceptación y rechazo - realizaciones de una variable aleatoria

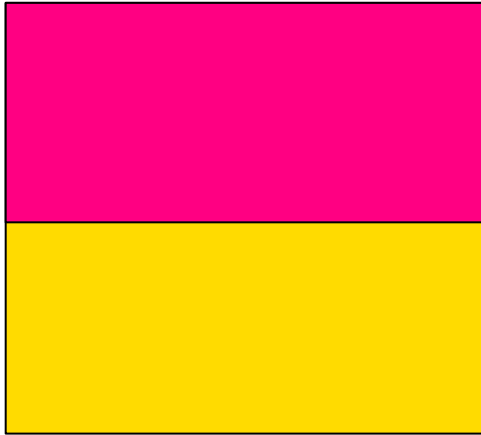
$$p = 1/2$$



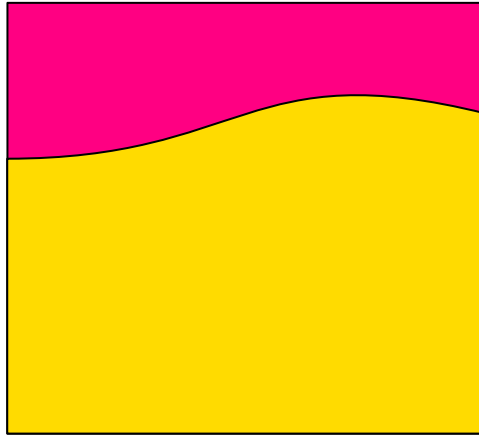
Sistema con BBO tipo I

Aceptación y rechazo - realizaciones de una variable aleatoria

$$p = 1/2$$



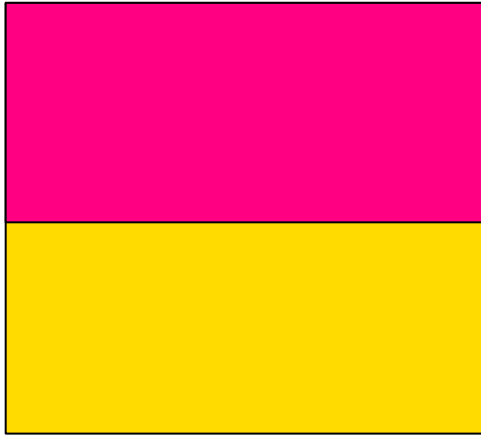
$$p = \text{área}$$



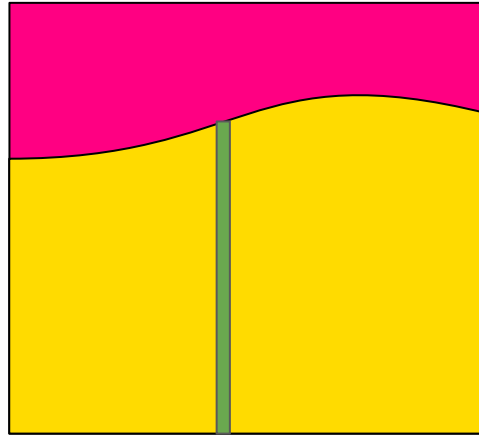
Sistema con BBO tipo I

Aceptación y rechazo - realizaciones de una variable aleatoria

$$p = 1/2$$



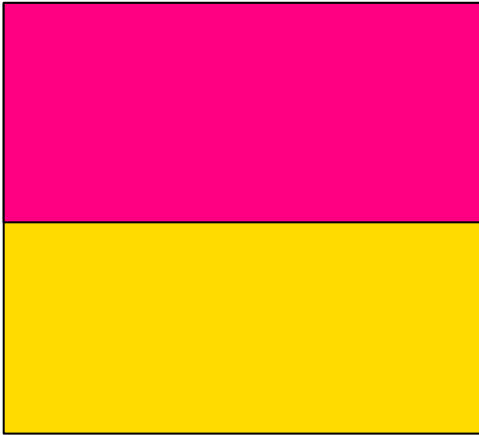
$$p = \text{área}$$



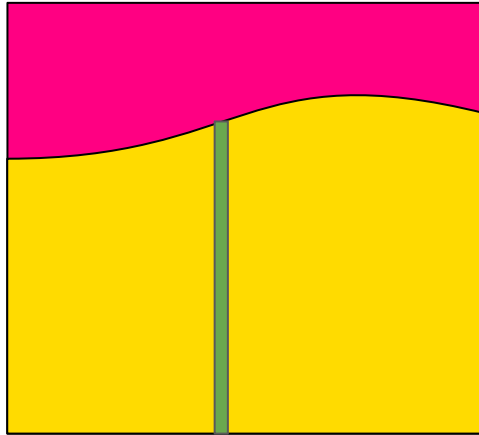
Sistema con BBO tipo I

Aceptación y rechazo - realizaciones de una variable aleatoria

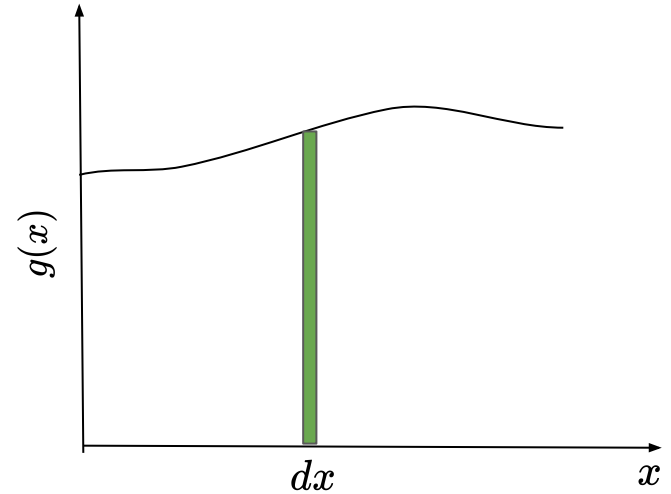
$$p = 1/2$$



$$p = \text{área}$$



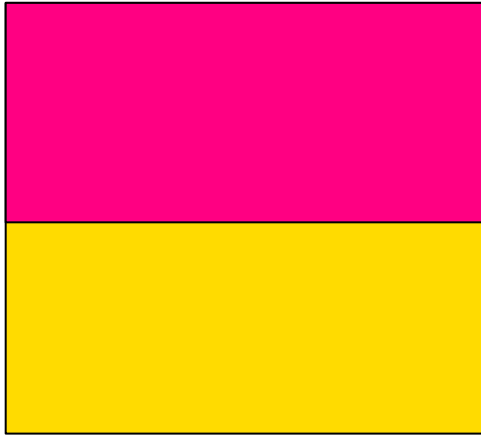
$$p = g(x)dx$$



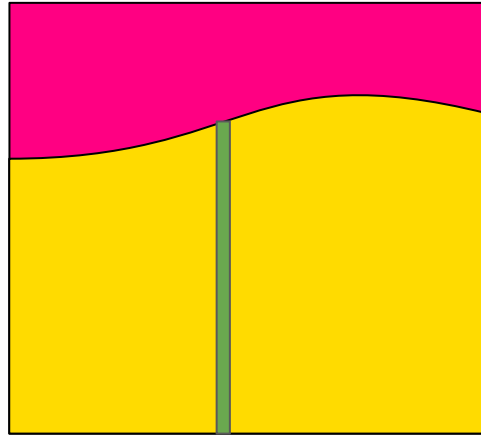
Sistema con BBO tipo I

Aceptación y rechazo - realizaciones de una variable aleatoria

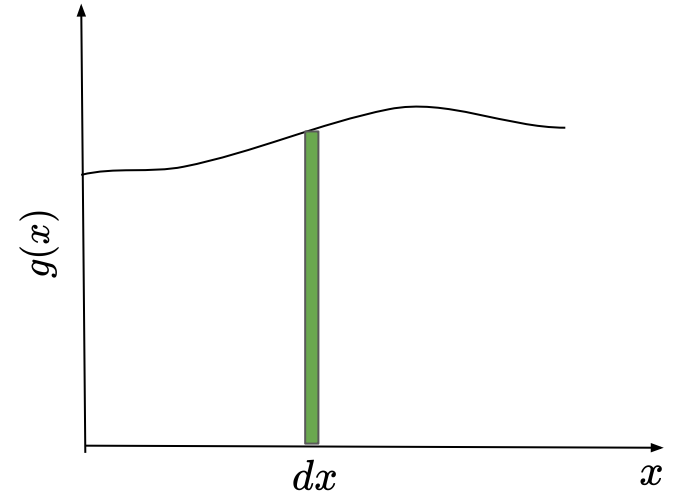
$$p = 1/2$$



$$p = \text{área}$$



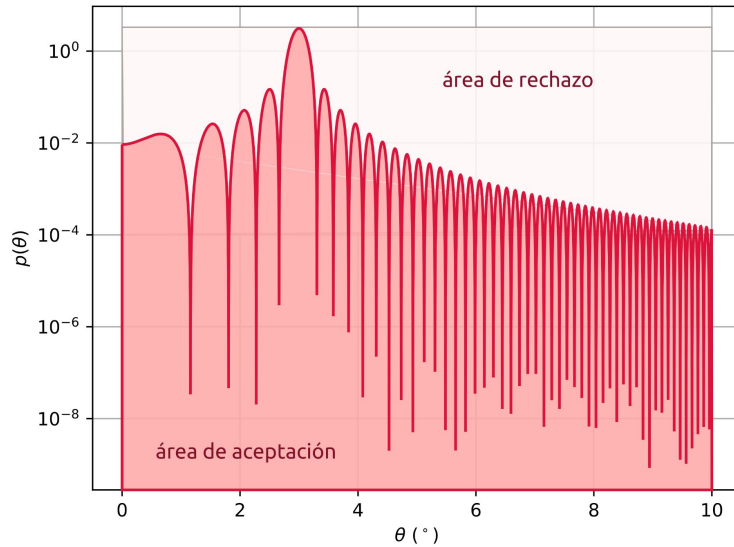
$$p = g(x)dx$$



Los valores de x que caigan en el rectángulo tendrán probabilidad $g(x)dx$

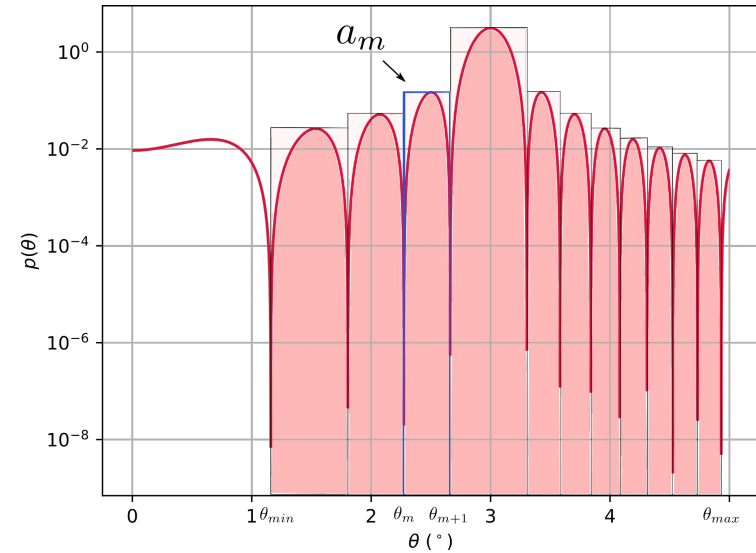
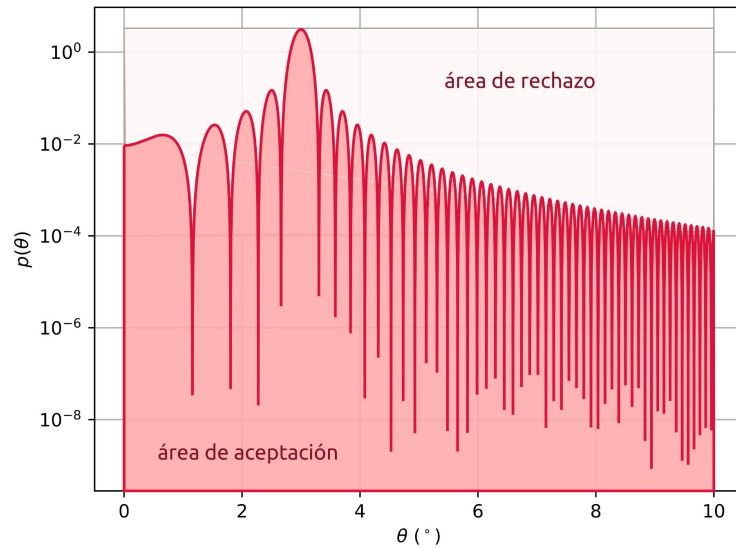
Sistema con BBO tipo I

Generación de realizaciones de una variable aleatoria



Sistema con BBO tipo I

Generación de realizaciones de una variable aleatoria



Sistema con BBO tipo I: eficiencia

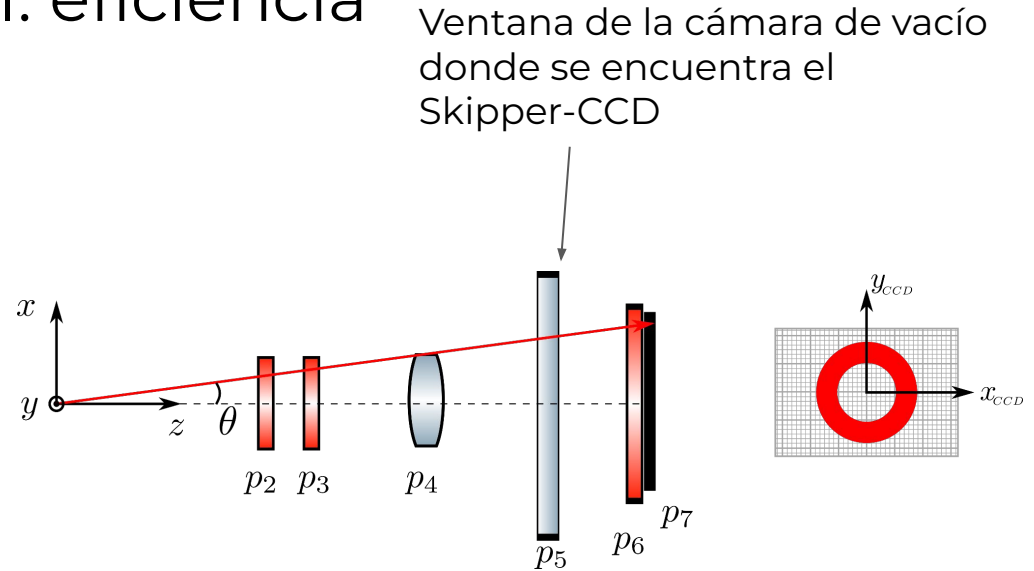
$$\mathbf{r}_s, \mathbf{r}_i$$

$$k \sim B(n = 2, p = \eta)$$

$$\eta = p_{tot} = \prod p_i$$

$$k = 2 \longrightarrow \mathbf{r}_s, \mathbf{r}_i$$

$$k = 1 \longrightarrow \mathbf{r}_s$$



Sistema con BBO tipo I: eficiencia

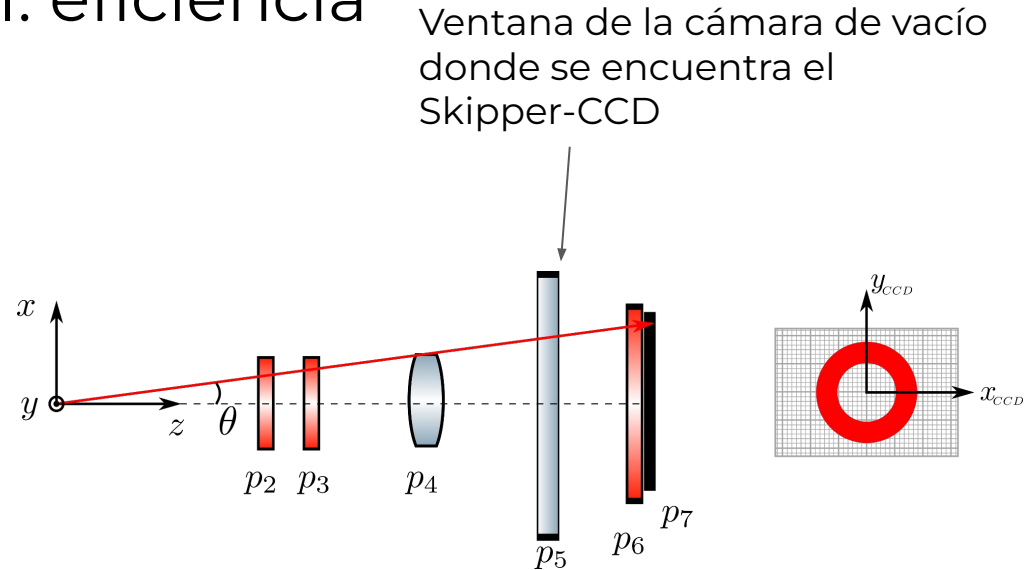
$$\mathbf{r}_s, \mathbf{r}_i$$

$$k \sim B(n = 2, p = \eta)$$

$$\eta = p_{tot} = \prod p_i$$

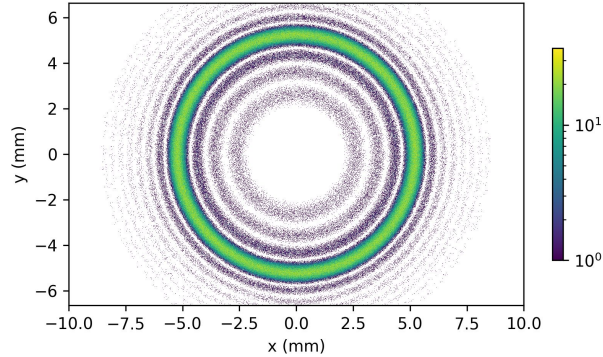
$$k = 2 \longrightarrow \mathbf{r}_s, \mathbf{r}_i$$

$$k = 1 \longrightarrow \mathbf{r}_s$$



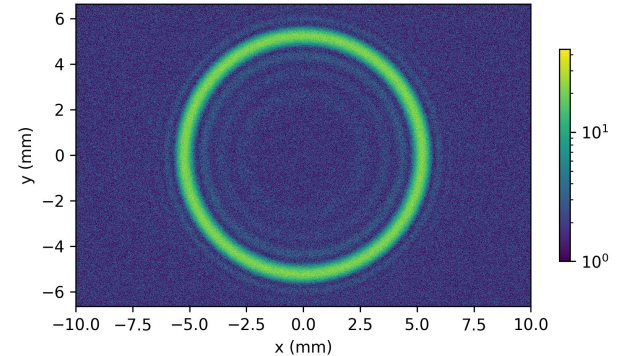
Repite N veces $\longrightarrow$ Proyecto sobre el plano $\longrightarrow$ Histograma con bins del tamaño de un píxel

Sistema con BBO tipo I: Primeros resultados

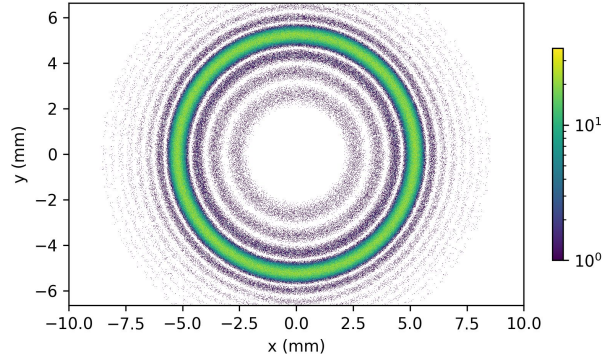


Distribución uniforme de electrones

- Ruido de lectura
- Fondo luz espuria
- Cuentas oscuras

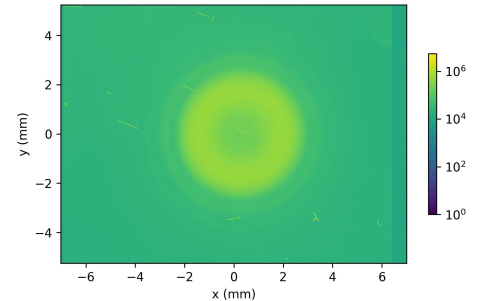
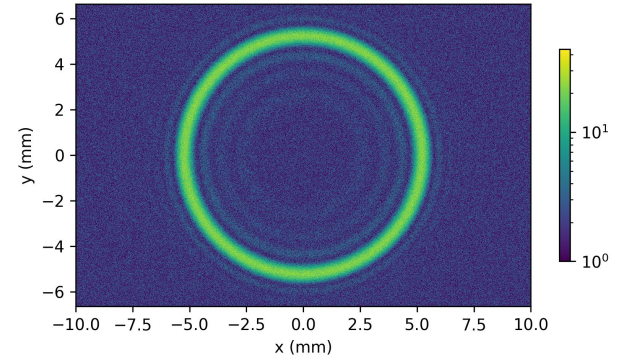


Sistema con BBO tipo I: Primeros resultados



Distribución uniforme de electrones

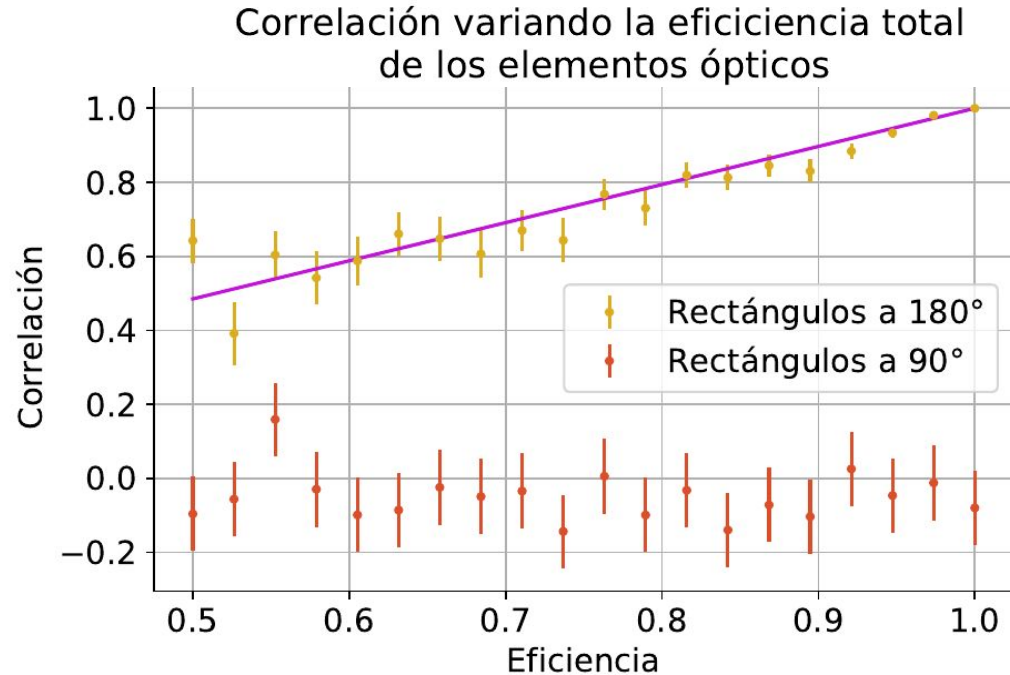
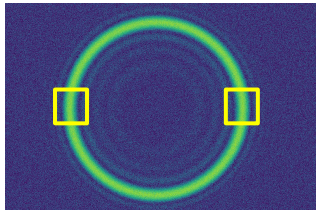
- Ruido de lectura
- Fondo luz espuria
- Cuentas oscuras



Efecto de la transmitancia total del sistema óptico

$$\rho = \frac{\text{Cov}(n_1, n_2)}{\sigma_1 \sigma_2}$$

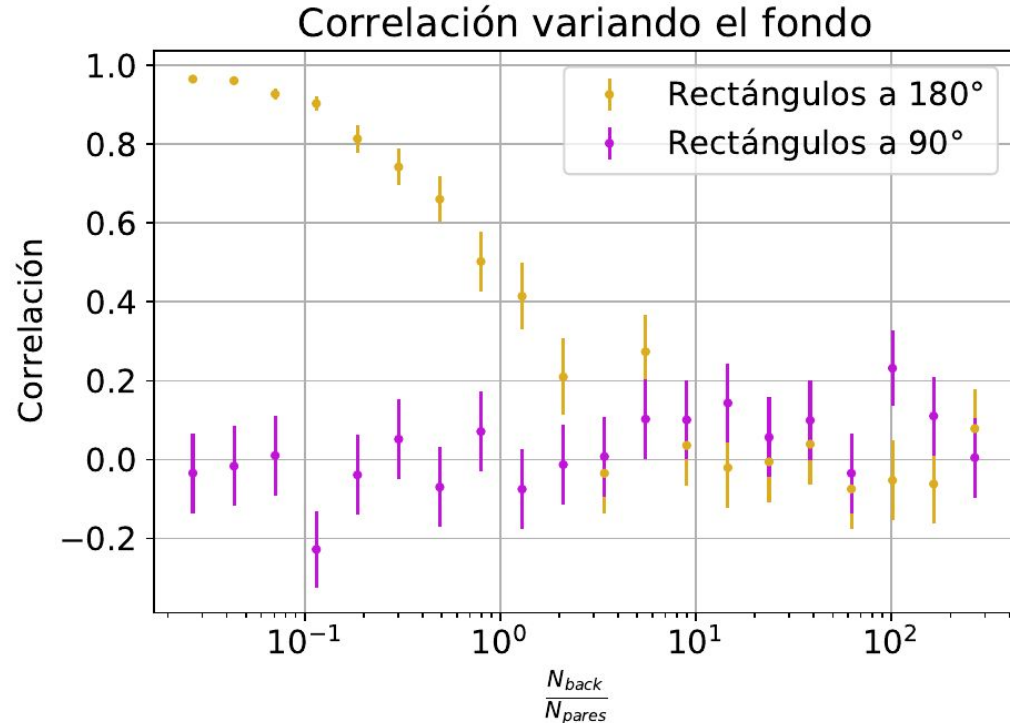
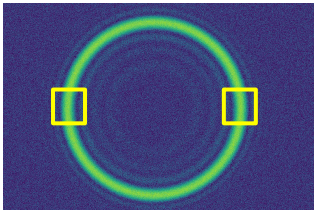
$$N_{im} = 100$$



Efecto del fondo no correlacionado

$$\rho = \frac{\text{Cov}(n_1, n_2)}{\sigma_1 \sigma_2}$$

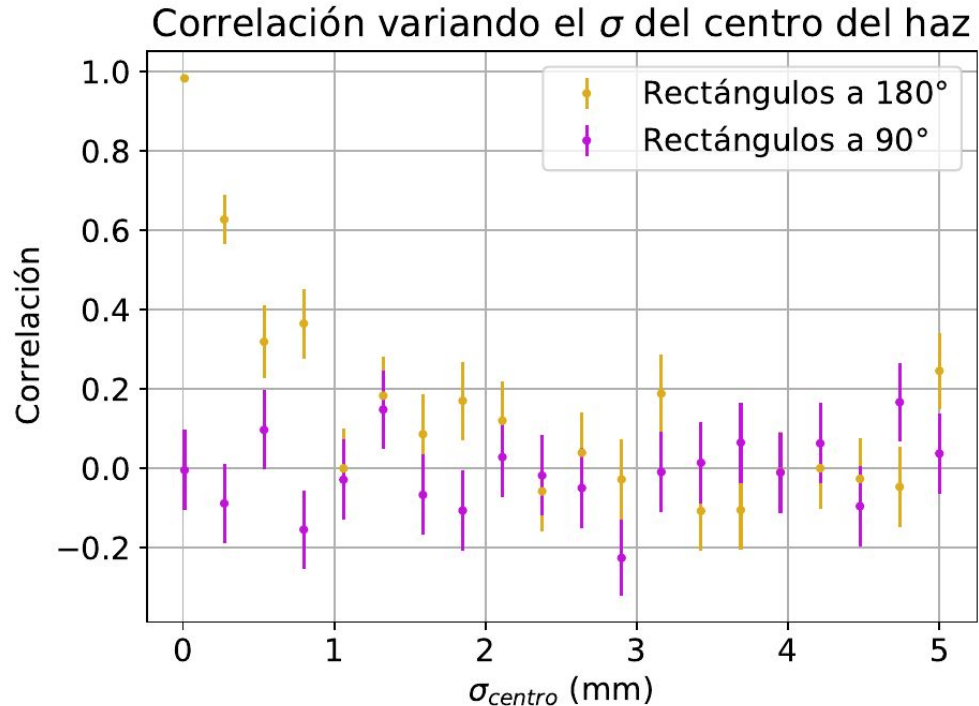
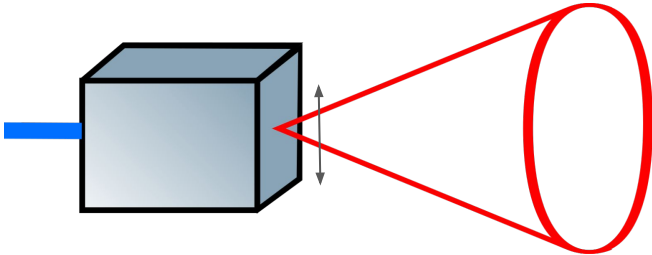
$$N_{im} = 100$$



Desplazamiento del centro del haz

$$\rho = \frac{Cov(n_1, n_2)}{\sigma_1 \sigma_2}$$

$$N_{im} = 100$$



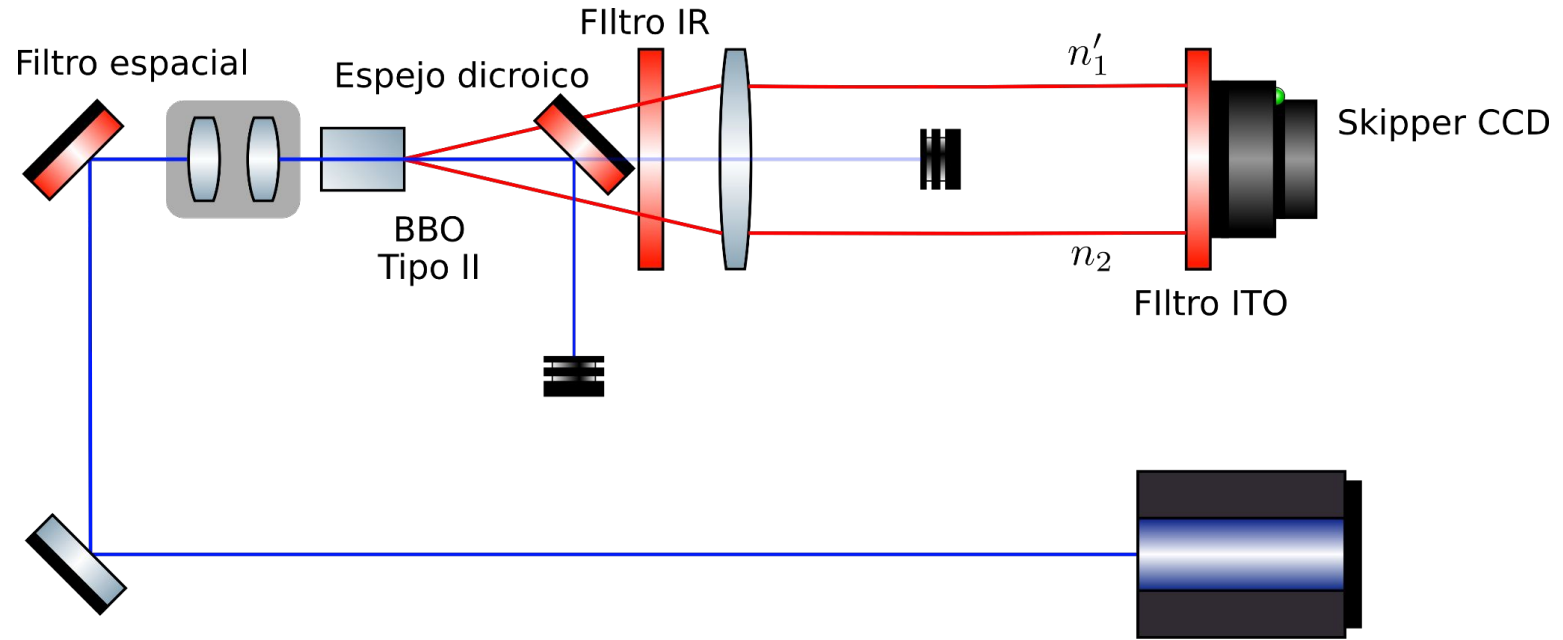
Conclusiones del análisis

- Reducir el número de elementos ópticos y maximizar su eficiencia
- Luz no correlacionada: minimizar fluorescencia de los elementos ópticos
- Estabilidad del centro del haz y *gaussianeidad* del frente de onda

Índice de la presentación

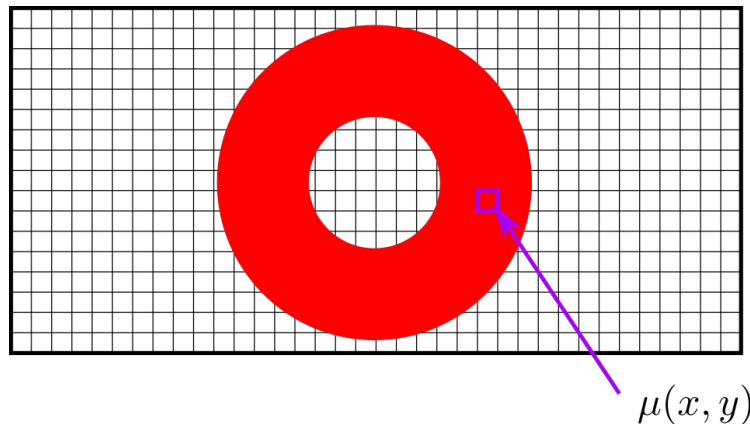
- Experimentos con fuentes de pares de fotones
- Detectores CCDs
- Motivación del trabajo: Skipper-CCDs en experimentos de SPDC
- Simulación de un sistema con un cristal BBO tipo I y correlación en N imágenes
- **Propuesta experimental**
- **Simulación de un sistema con un cristal BBO tipo II y correlación en una imagen**
- Estimación de la absorbancia en experimentos de pares de fotones correlacionados
- Conclusiones y perspectivas

Propuesta experimental con BBO tipo II



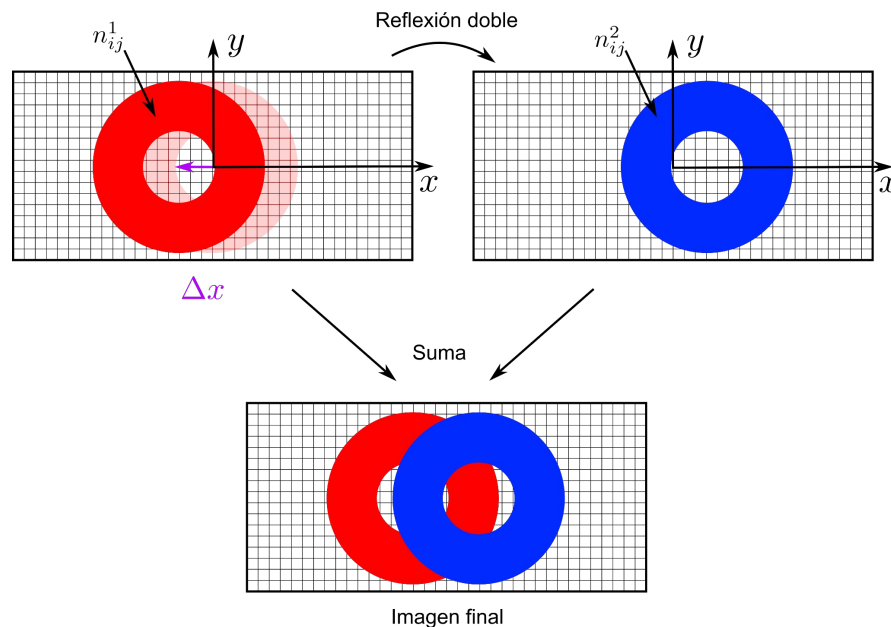
Simulaciones con cambio de variable

$$p(x, y) = p(\phi, \theta) |J| \quad \mu(x, y) \approx Np(x, y) \quad n(x, y) \sim \text{Poi}ss(\mu(x, y))$$



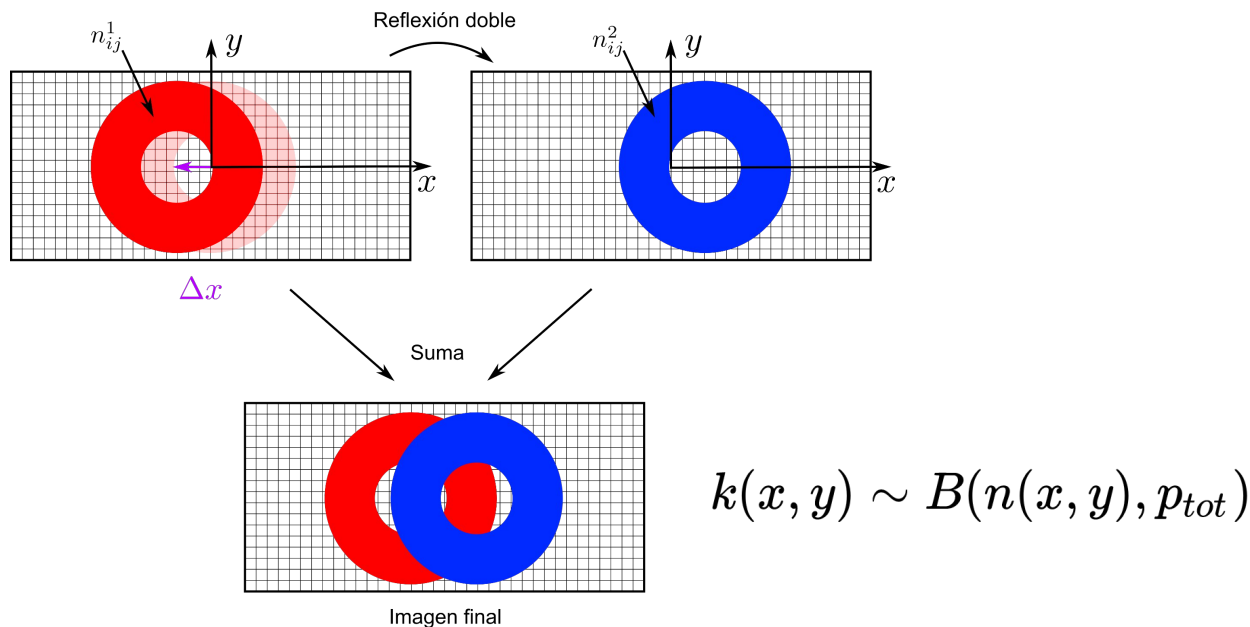
Simulaciones con cambio de variable

$$p(x, y) = p(\phi, \theta) |J| \quad \mu(x, y) \approx Np(x, y) \quad n(x, y) \sim \text{Pois}(\mu(x, y))$$

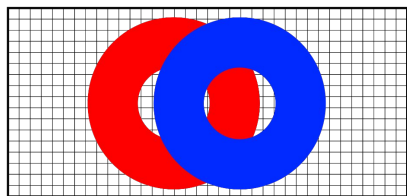


Simulaciones con cambio de variable

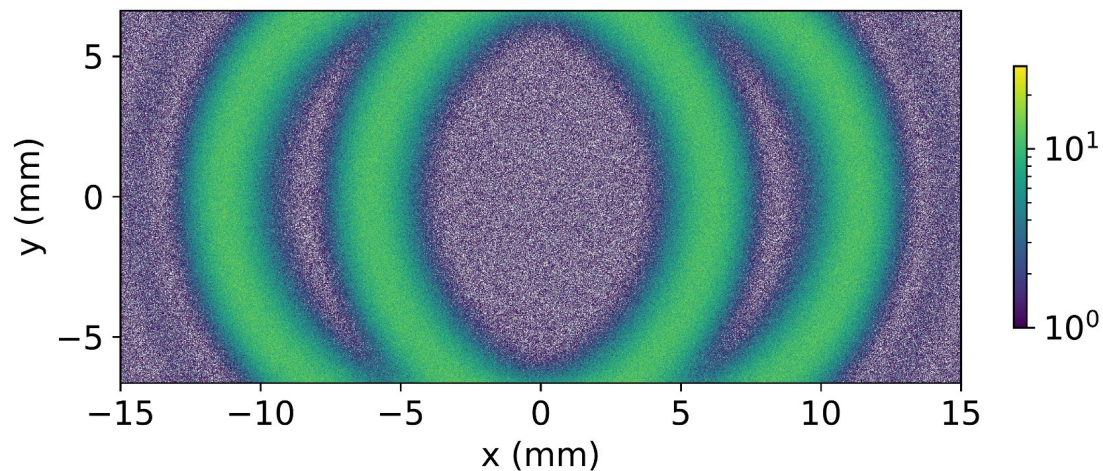
$$p(x, y) = p(\phi, \theta) |J| \quad \mu(x, y) \approx Np(x, y) \quad n(x, y) \sim \text{Pois}(\mu(x, y))$$



Simulaciones con cambio de variable



$$+ \quad n_{\text{back}} \sim \text{Pois}(\mu_{\text{back}})$$



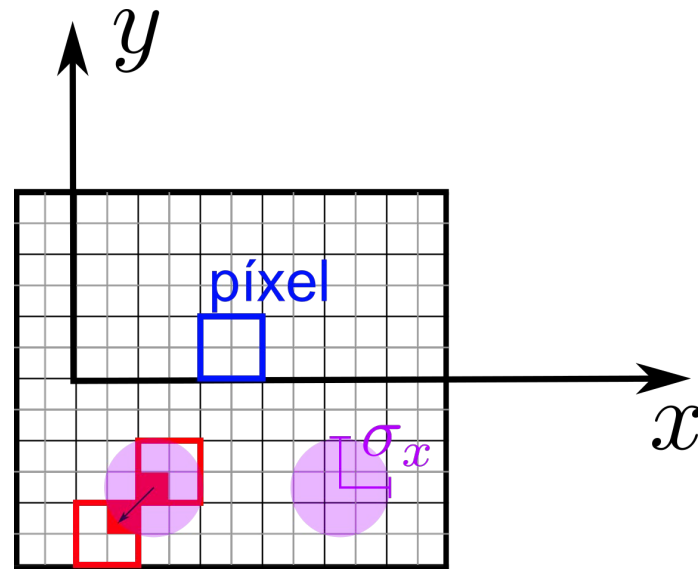
Simulaciones con cambio de variable

Incerteza relativa

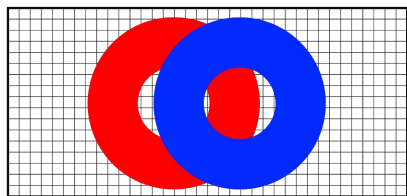
$$\delta_i \sim N(\mu = 0, \sigma = \sigma_x) \quad i = x, y$$

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_s - \mathbf{r}_i = \frac{2cz_0}{\omega_p} \Delta \mathbf{q}$$

$$\Delta q_x, \Delta q_y = \frac{1}{w_p}$$

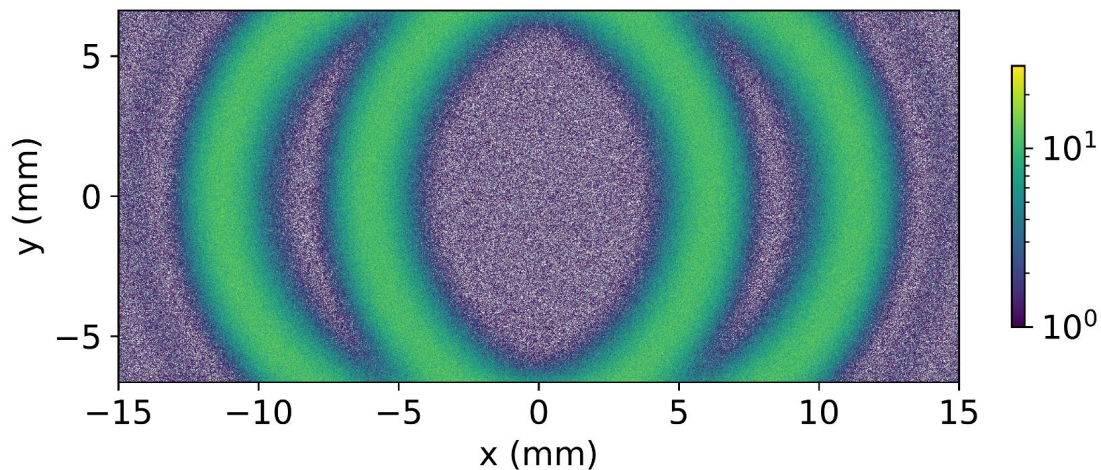


Simulaciones con cambio de variable

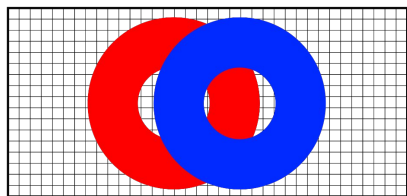


+ $n_{\text{back}} \sim \text{Pois}(\mu_{\text{back}})$ +

Incerteza



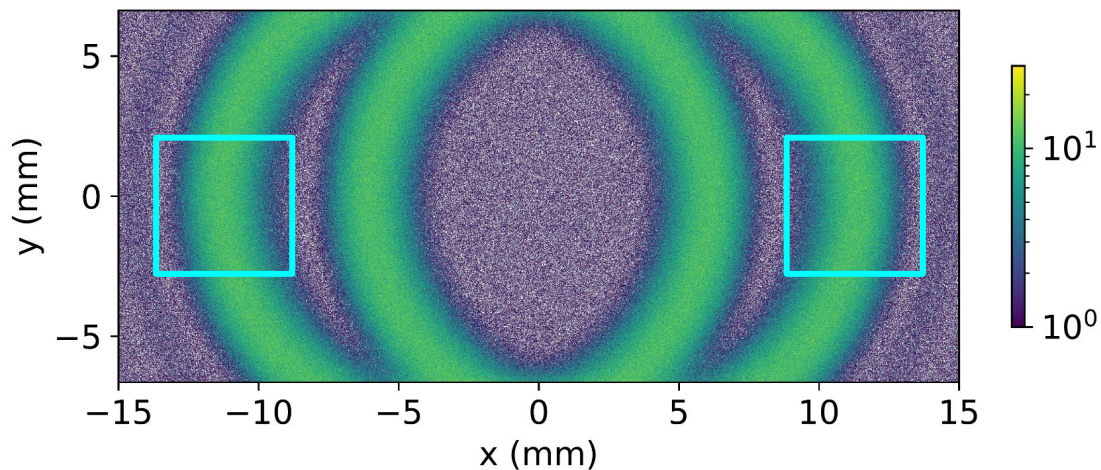
Simulaciones con cambio de variable



$$n_{\text{back}} \sim \text{Pois}(\mu_{\text{back}})$$



Incerteza

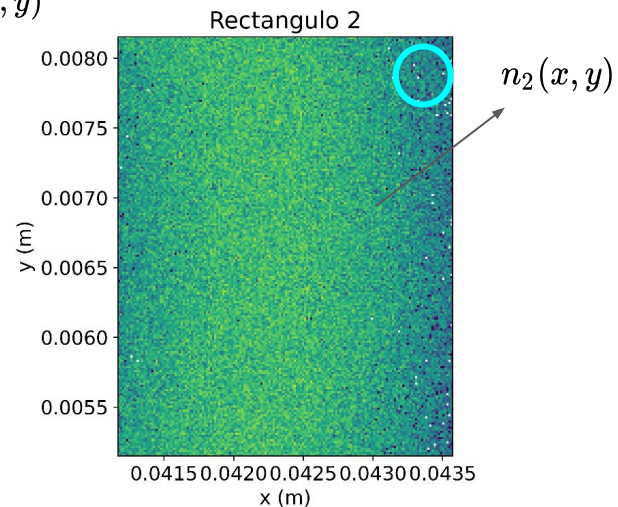
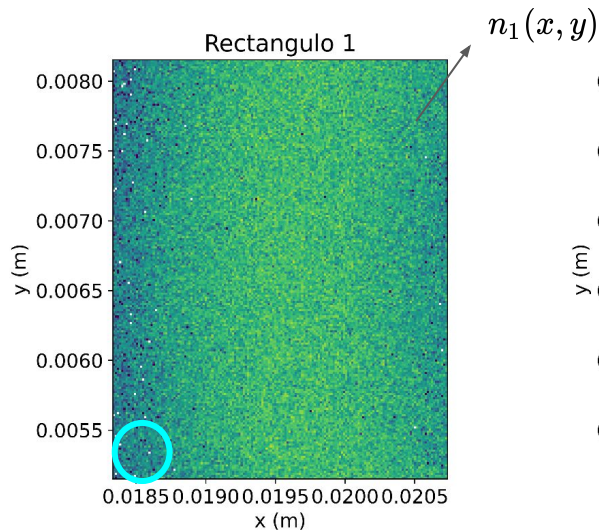
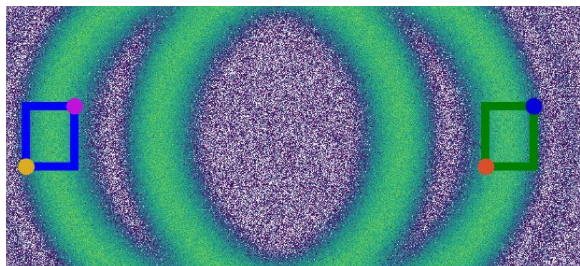


Correlación en una imagen

¿Cómo podemos dar una medida de la correlación por imagen?

$$\hat{\rho}_{\text{mod}}(X, Y) = \frac{\hat{V}_{\text{mod}}(X, Y)}{\hat{\sigma}_{X, \text{mod}} \hat{\sigma}_{Y, \text{mod}}}$$

$$\hat{V}_{\text{mod}}(X, Y) = \sum_i \frac{(x_i - \mu_{x,i})(y_i - \mu_{y,i})}{n}$$

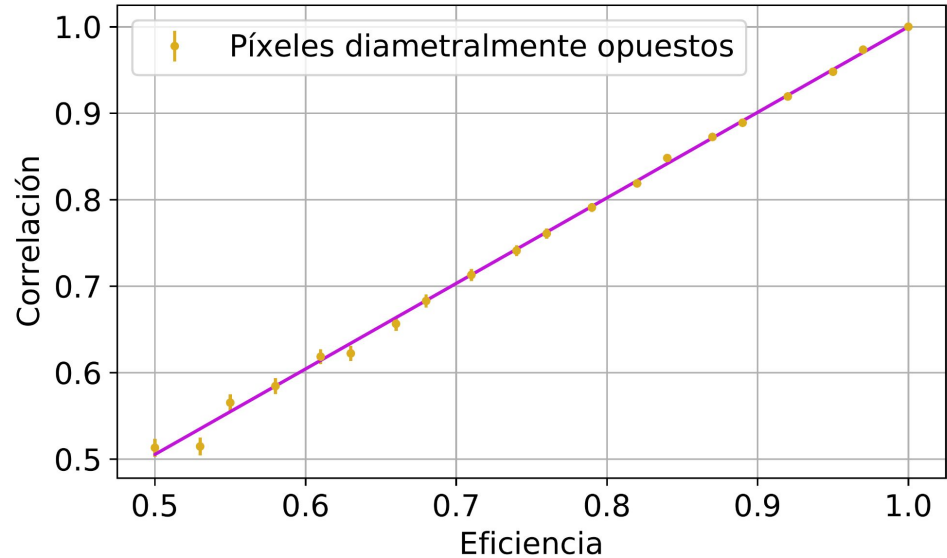


Efecto de la transmitancia total del sistema óptico

$$\hat{\rho}_{\text{mod}}(n_1, n_2) = \frac{\hat{V}_{\text{mod}}(n_1, n_2)}{\hat{\sigma}_{1,\text{mod}} \hat{\sigma}_{2,\text{mod}}}$$

$$\hat{V}_{\text{mod}}(n_1, n_2) = \sum_i \frac{(n_{1,i} - \mu_{1,i})(n_{2,i} - \mu_{2,i})}{n}$$

$$n = N_{\text{píxeles}} = 5000$$

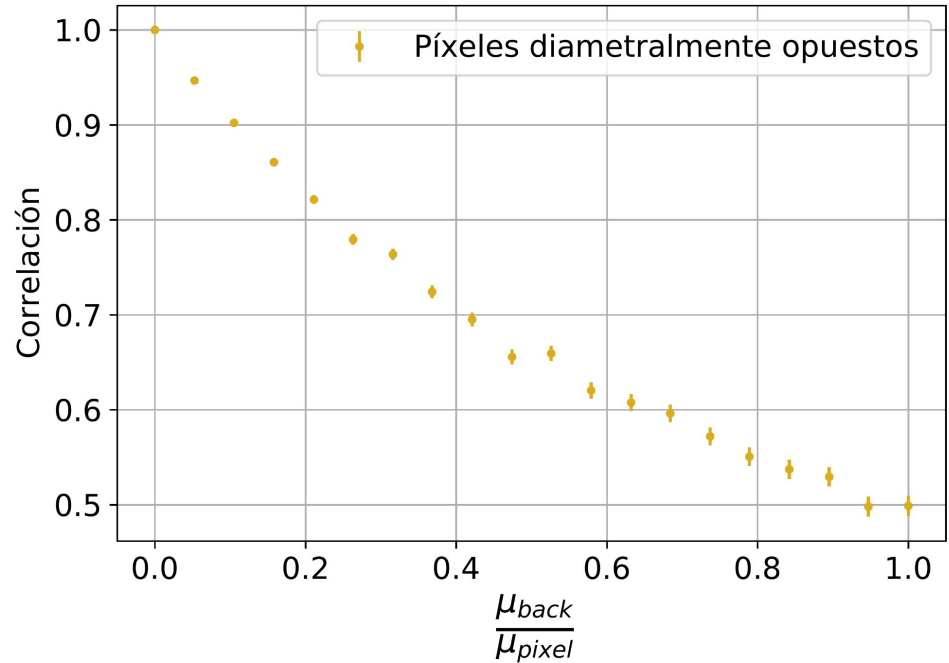


Efecto del fondo no correlacionado

$$\hat{\rho}_{\text{mod}}(n_1, n_2) = \frac{\hat{V}_{\text{mod}}(n_1, n_2)}{\hat{\sigma}_{1,\text{mod}} \hat{\sigma}_{2,\text{mod}}}$$

$$\hat{V}_{\text{mod}}(n_1, n_2) = \sum_i \frac{(n_{1,i} - \mu_{1,i})(n_{2,i} - \mu_{2,i})}{n}$$

$$n = N_{\text{píxeles}} = 5000$$

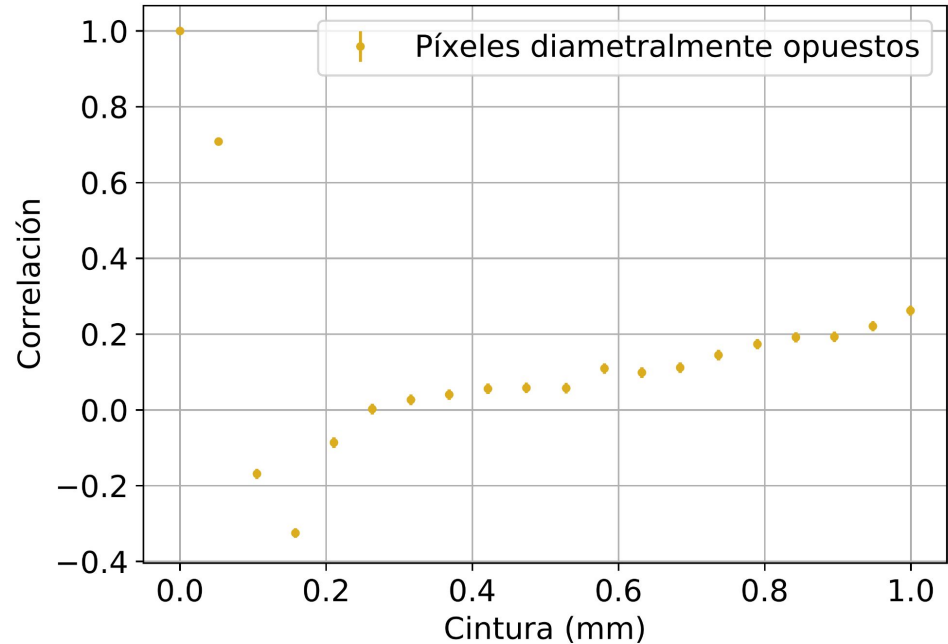


Cintura del haz - Incerteza relativa en la posición

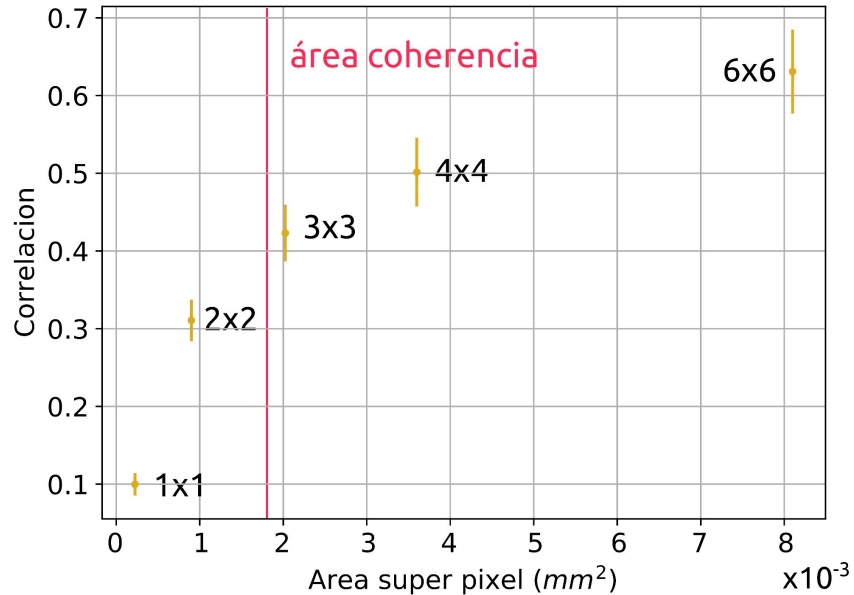
$$\hat{\rho}_{\text{mod}}(n_1, n_2) = \frac{\hat{V}_{\text{mod}}(n_1, n_2)}{\hat{\sigma}_{1,\text{mod}} \hat{\sigma}_{2,\text{mod}}}$$

$$\hat{V}_{\text{mod}}(n_1, n_2) = \sum_i \frac{(n_{1,i} - \mu_{1,i})(n_{2,i} - \mu_{2,i})}{n}$$

$$n = N_{\text{píxeles}} = 5000$$



Área de coherencia - Incerteza relativa en la posición

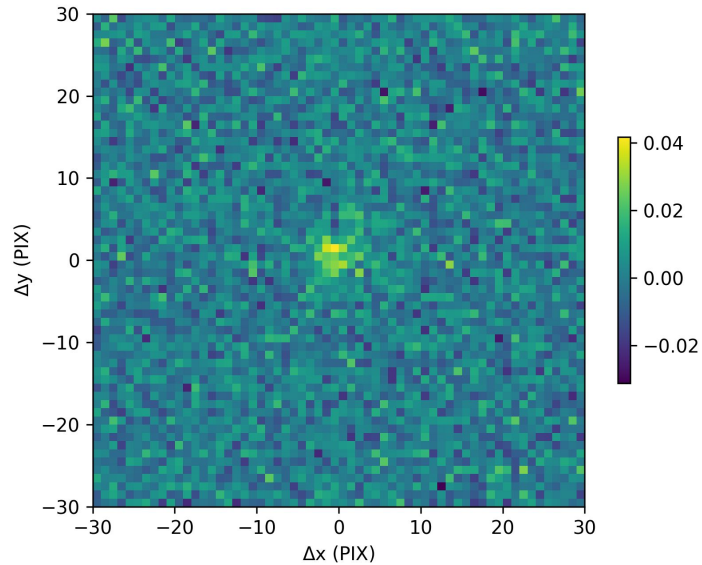


Probabilidad acumulada normal bivariada

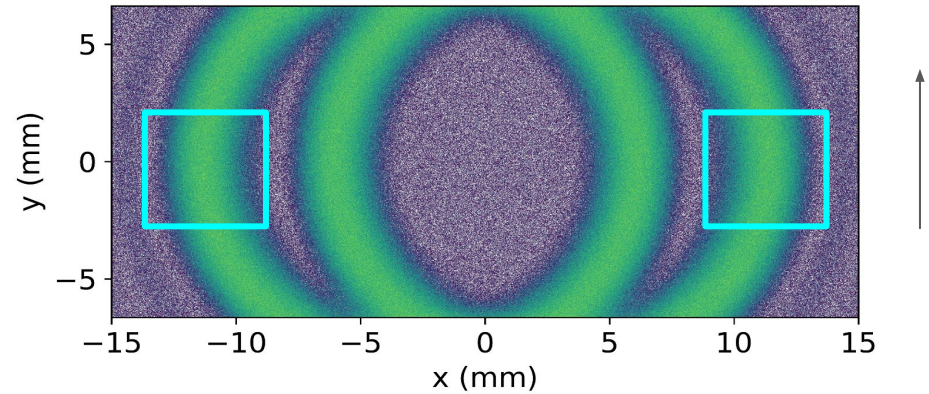
área coherencia -> 50%

2 * área coherencia -> 85%

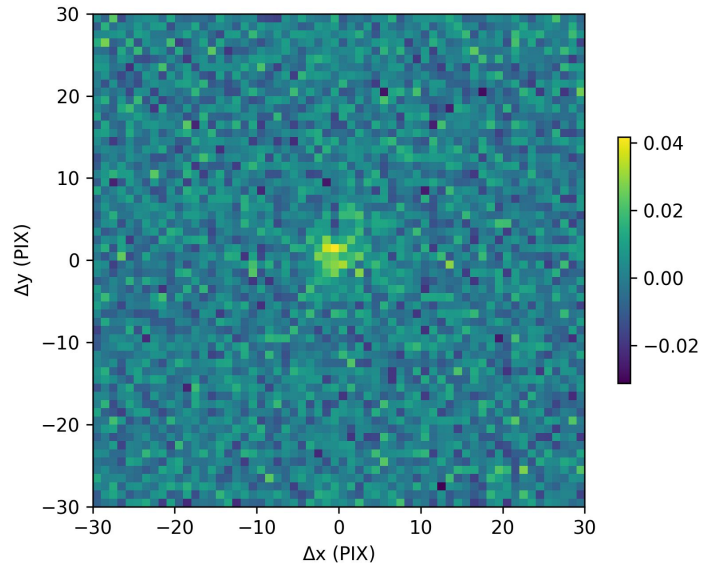
Área de coherencia - Incerteza relativa en la posición



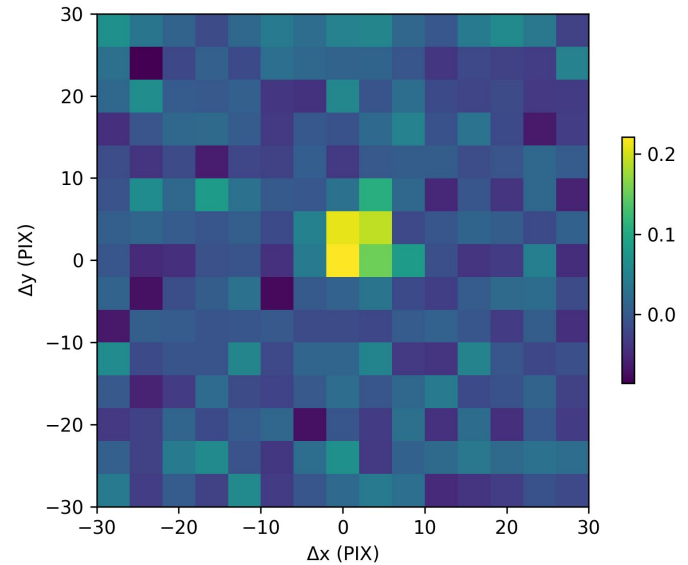
Pixel a pixel



Área de coherencia - Incerteza relativa en la posición



Pixel a pixel

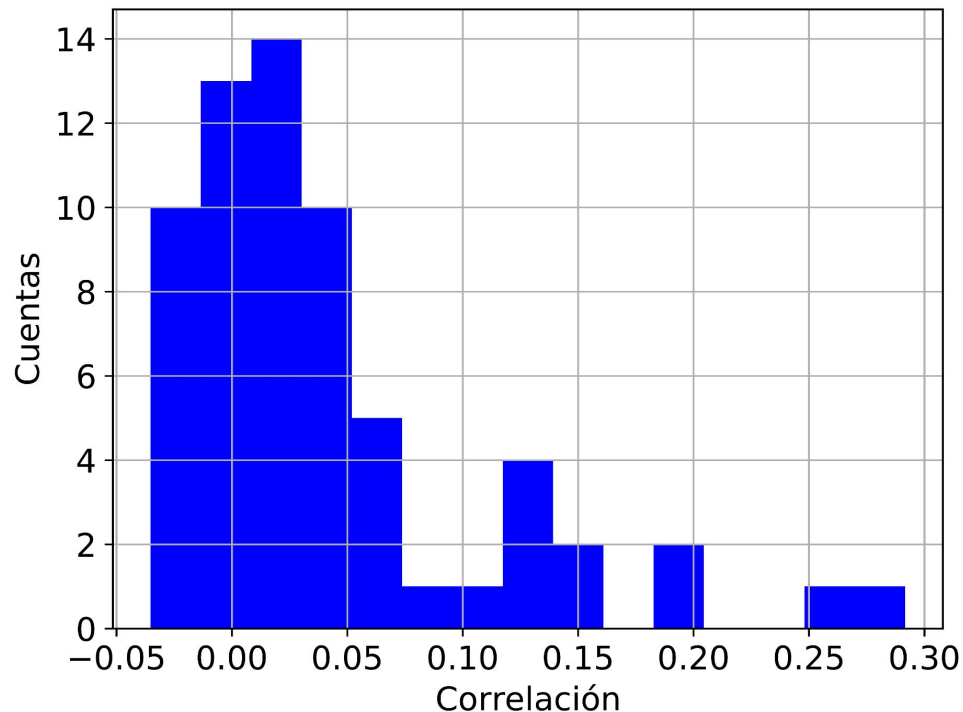


Super pixel de 4 pix

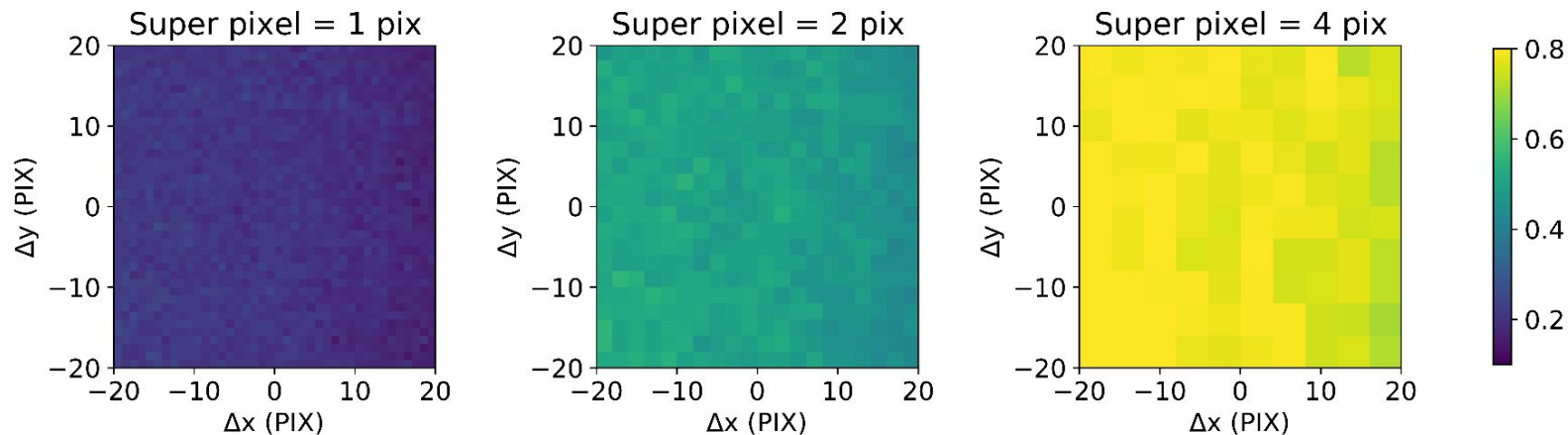
Cálculo de correlación - Imágenes reales

$$\overline{\hat{\rho}}(n_1, n_2) = 0.042 \pm 0.063$$

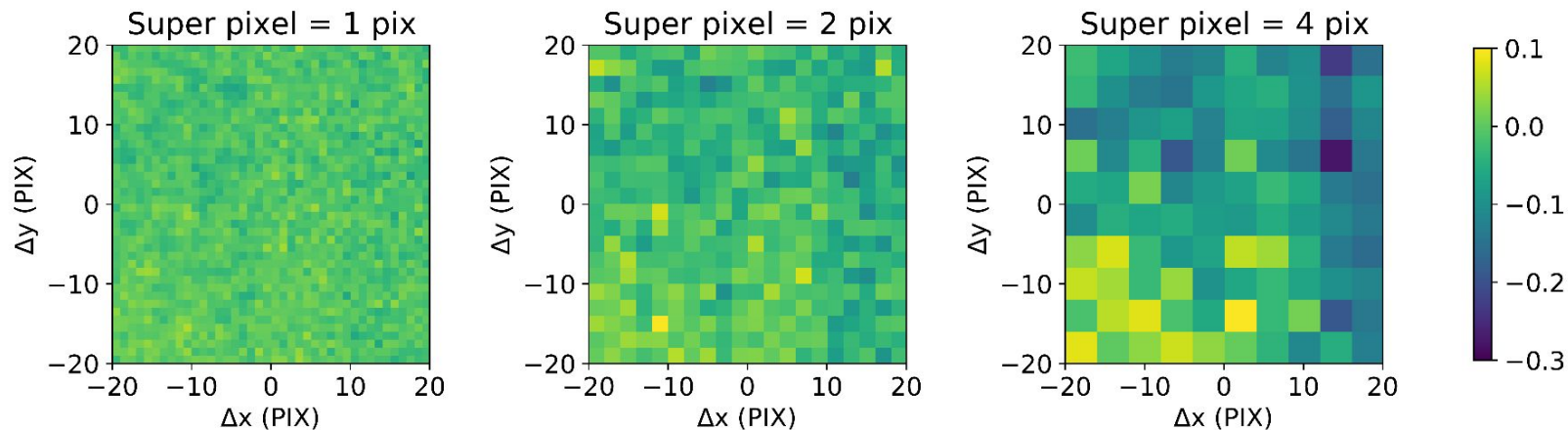
$$N_{\text{im}} = 65$$



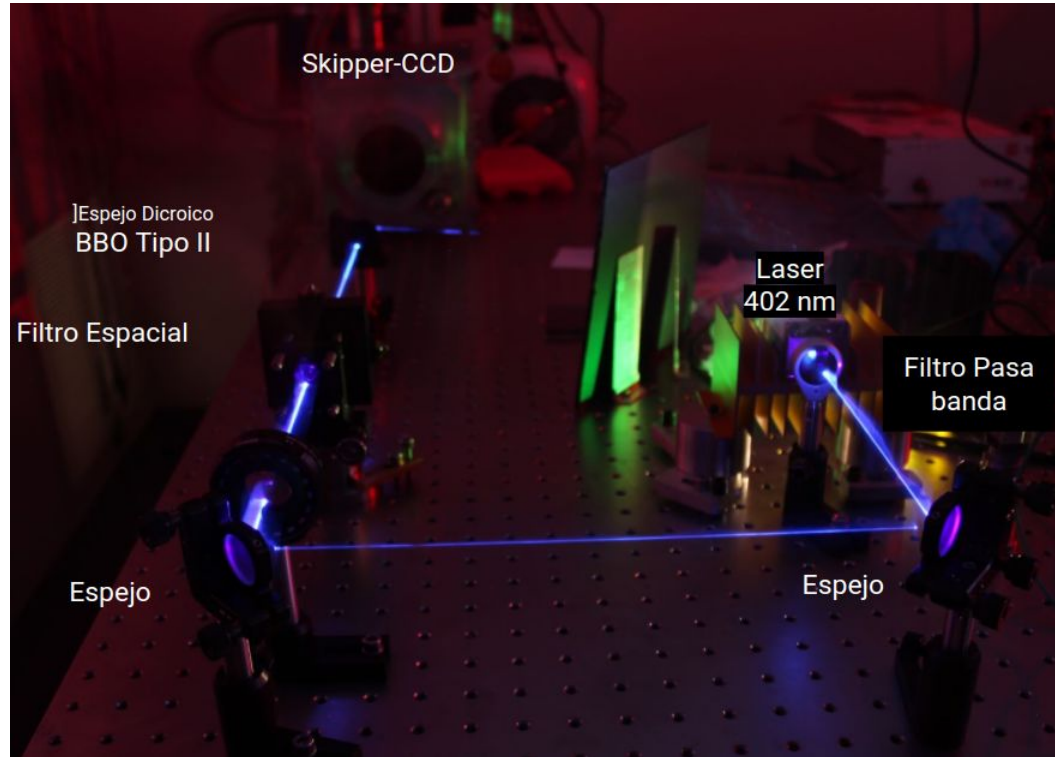
Cálculo de correlación - Imágenes reales



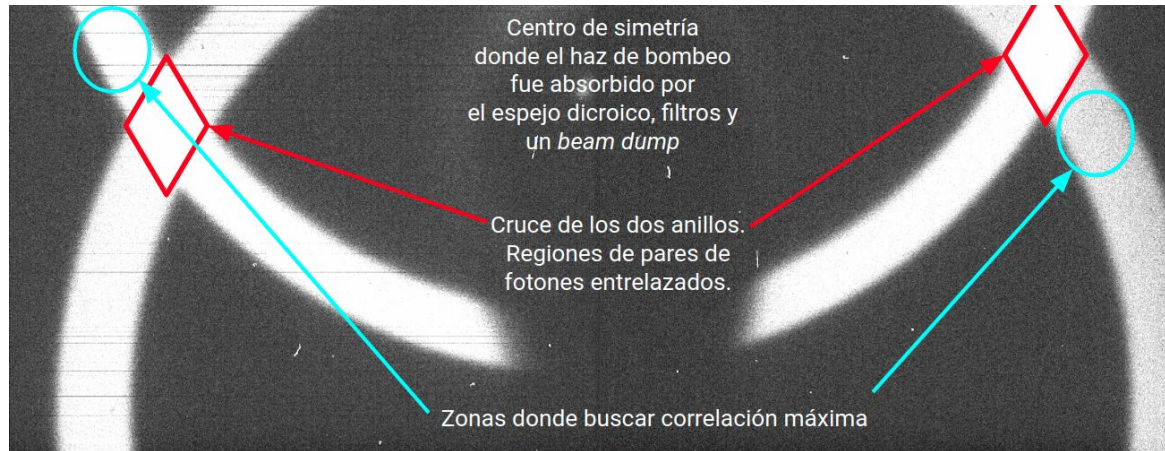
Cálculo de correlación - Imágenes reales



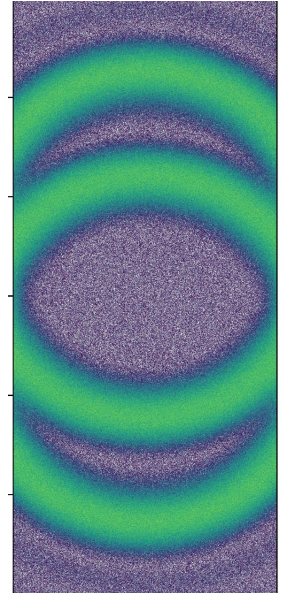
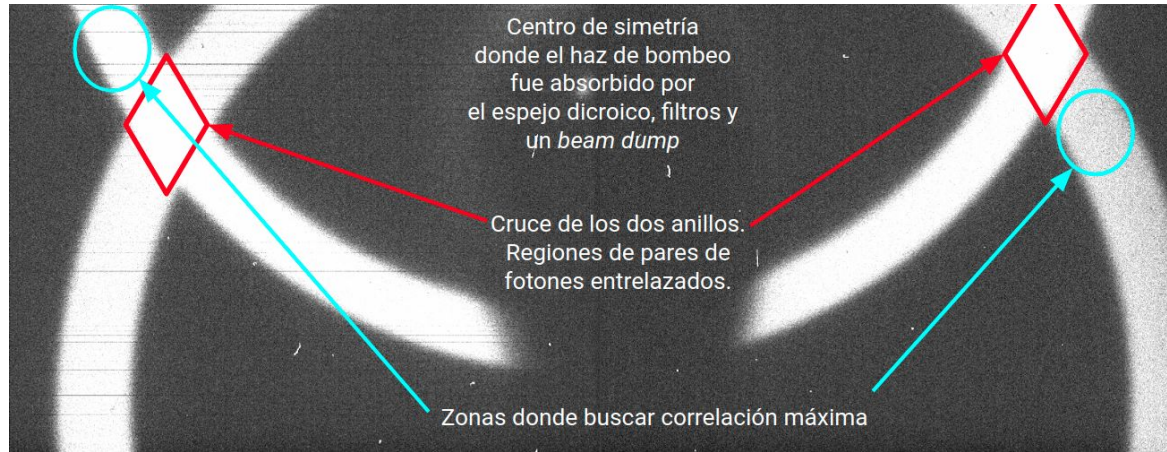
Montaje experimental con BBO tipo II



Primeras imágenes adquiridas en Argentina



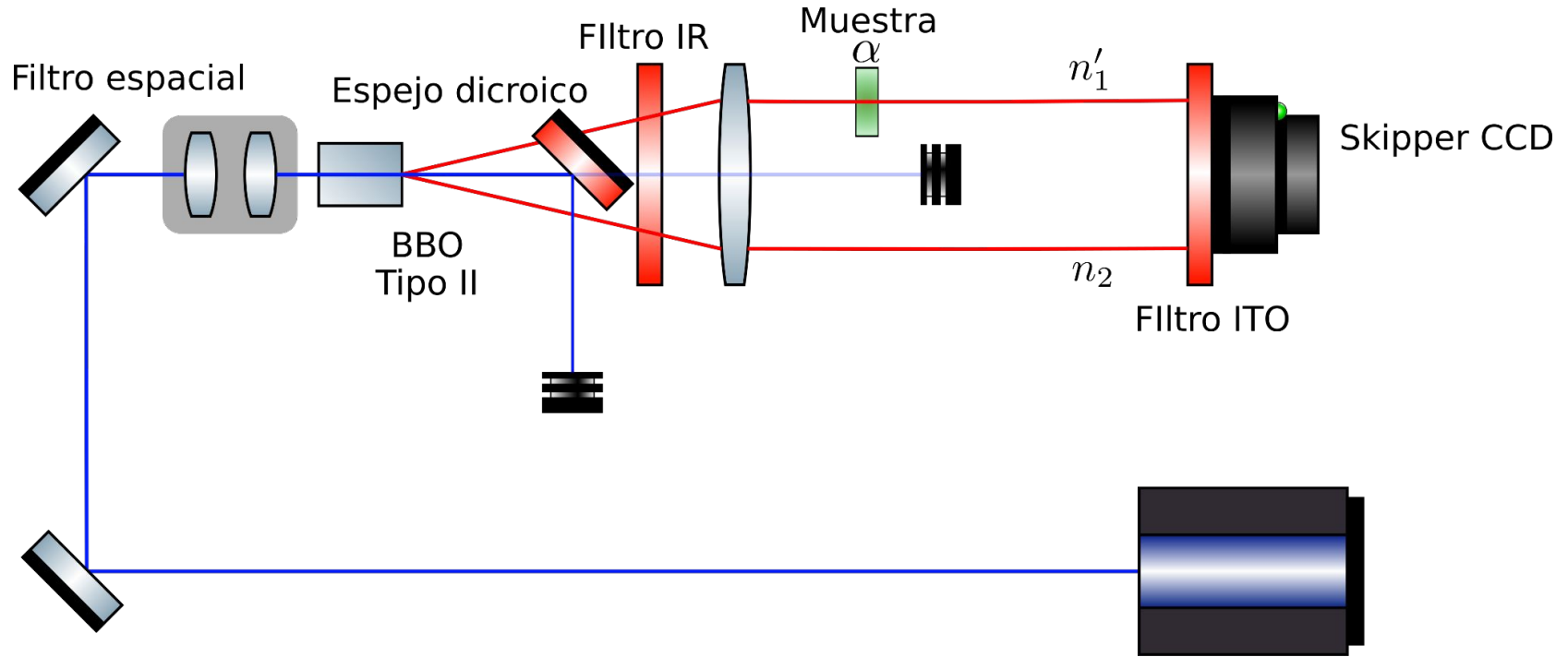
Primeras imágenes adquiridas en Argentina



Índice de la presentación

- Experimentos con fuentes de pares de fotones
- Detectores CCDs
- Motivación del trabajo: Skipper-CCDs en experimentos de SPDC
- Simulación de un sistema con un cristal BBO tipo I y correlación en N imágenes
- Propuesta experimental
- Simulación de un sistema con un cristal BBO tipo II y correlación en una imagen
- **Estimación de la absorbancia en experimentos de pares de fotones correlacionados**
- Conclusiones y perspectivas

Estimación de la absorbancia de una muestra

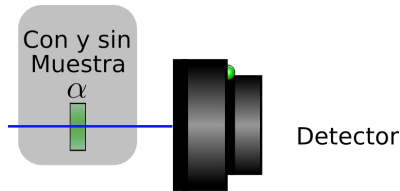


Estimación de la absorbancia de una muestra

Estimador clásico

$$\hat{\alpha}_{\text{cl}} = 1 - \frac{n'}{\langle n_p \rangle}$$

$$\Delta \hat{\alpha}_{\text{cl}} \simeq 1/\sqrt{\langle n_p \rangle}$$

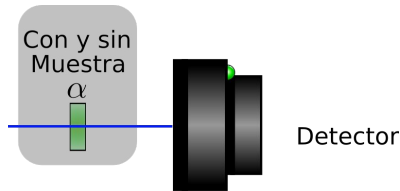


Estimación de la absorbancia de una muestra

Estimador clásico

$$\hat{\alpha}_{cl} = 1 - \frac{n'}{\langle n_p \rangle}$$

$$\Delta \hat{\alpha}_{cl} \simeq 1 / \sqrt{\langle n_p \rangle}$$

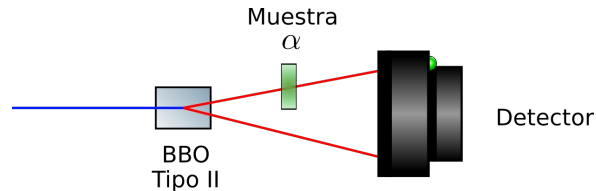


Estimador del cociente

$$\hat{\alpha}_{cc} = 1 - \gamma \frac{n'_1}{n_2} \quad \langle \hat{\alpha}_{cc} \rangle = \alpha + (1 - \alpha) \frac{\langle \Delta n_1 \Delta n_2 \rangle}{\langle n_1 \rangle \langle n_2 \rangle}$$

$$\gamma = \frac{\langle n_2 \rangle}{\langle n_1 \rangle}$$

$$\Delta^2 \hat{\alpha}_{cc} \simeq U_{uq| \langle n_1 \rangle}^2 + 2 \frac{(1-\alpha)^2}{\langle n_1 \rangle} (1 - \eta).$$



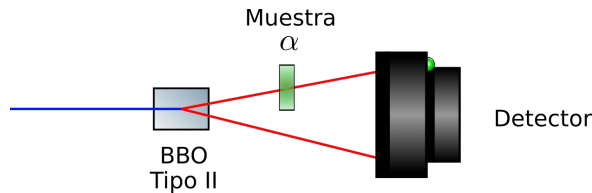
Estimación de la absorbancia de una muestra

Estimador del cociente

$$\hat{\alpha}_{\text{cc}} = 1 - \gamma \frac{n'_1}{n_2} \quad \langle \hat{\alpha}_{\text{cc}} \rangle = \alpha + (1 - \alpha) \frac{\langle \Delta n_1 \Delta n_2 \rangle}{\langle n_1 \rangle \langle n_2 \rangle}$$

$$\gamma = \frac{\langle n_2 \rangle}{\langle n_1 \rangle}$$

$$\Delta^2 \hat{\alpha}_{\text{cc}} \simeq U_{\text{uql} \langle n_1 \rangle}^2 + 2 \frac{(1 - \alpha)^2}{\langle n_1 \rangle} (1 - \eta).$$



Estimador de la diferencia

$$\hat{\alpha}_{\text{dif}} = 1 - \frac{\tilde{n}_1 + \delta E}{\langle n_{1p} \rangle}$$

$$\tilde{n}_1 = n_1 - k \delta n_2$$

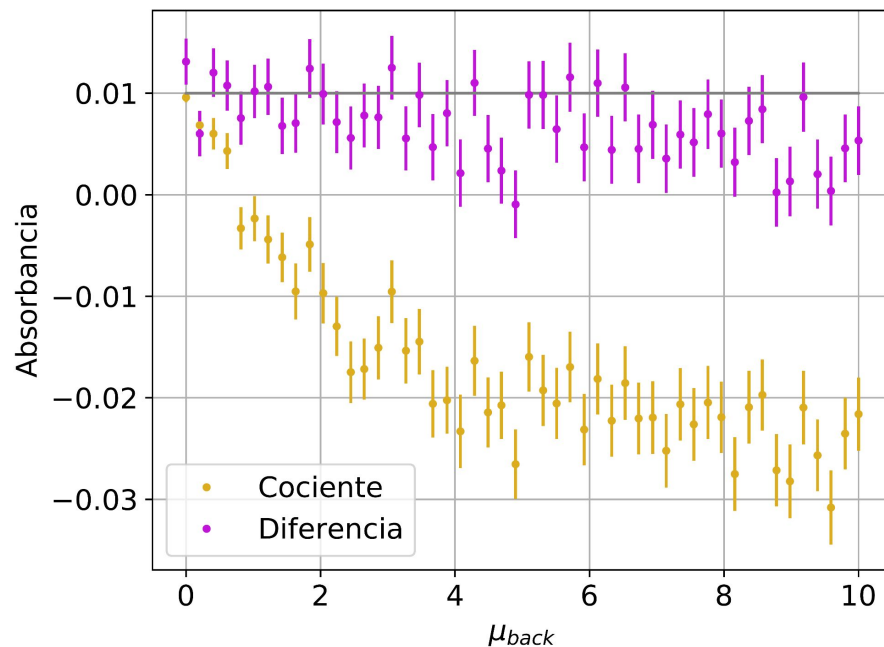
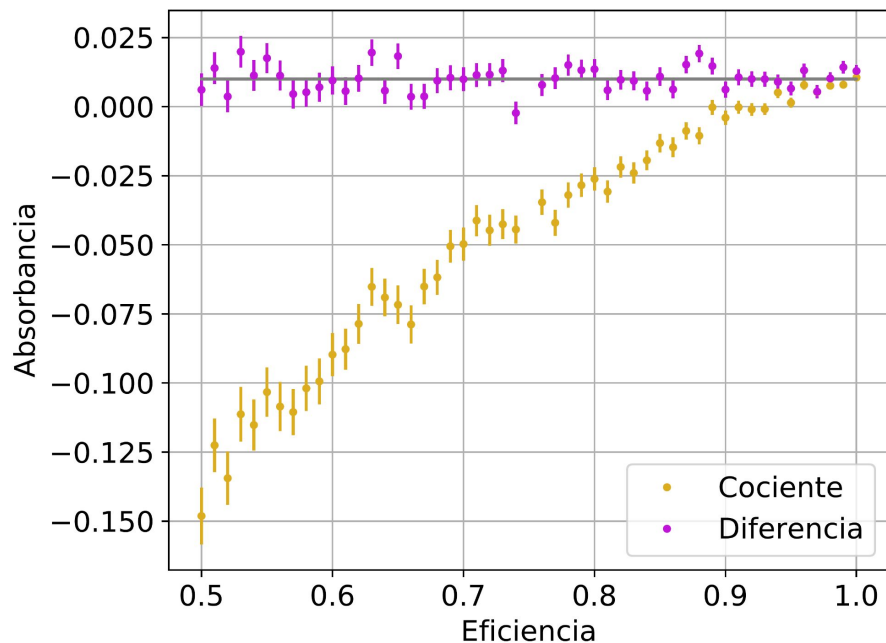
$$\delta n_2 = n_2 - \langle n_2 \rangle$$

$$\delta E = \frac{\eta_1 (1 + \beta n) n'_1}{\langle n_{1p} \rangle^2 (1 + \beta n \eta_2)} \text{COV}(n_1, n_2)$$

Estimación de la absorbancia de una muestra

Dependencia con los parámetros de la simulación

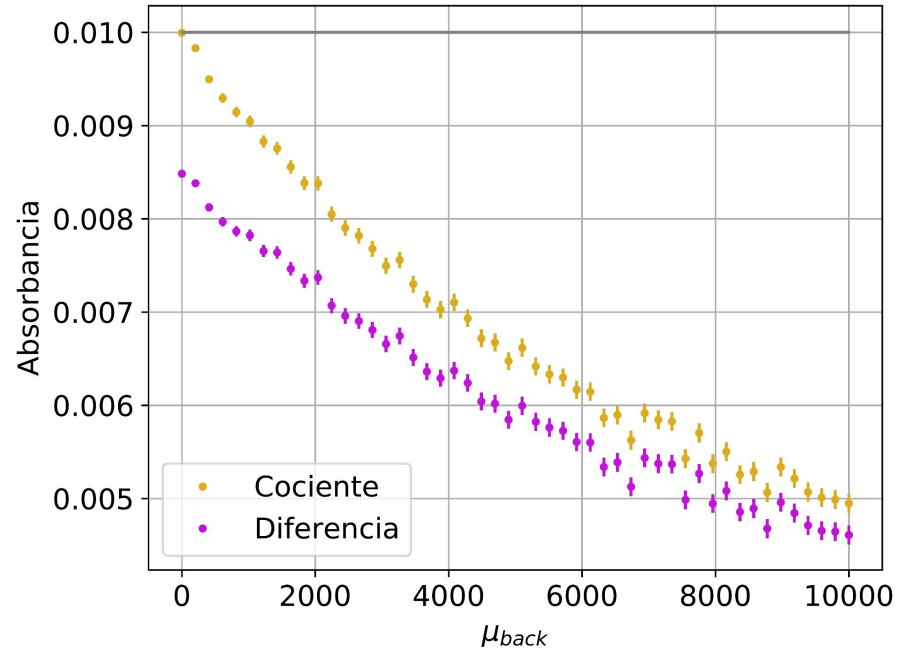
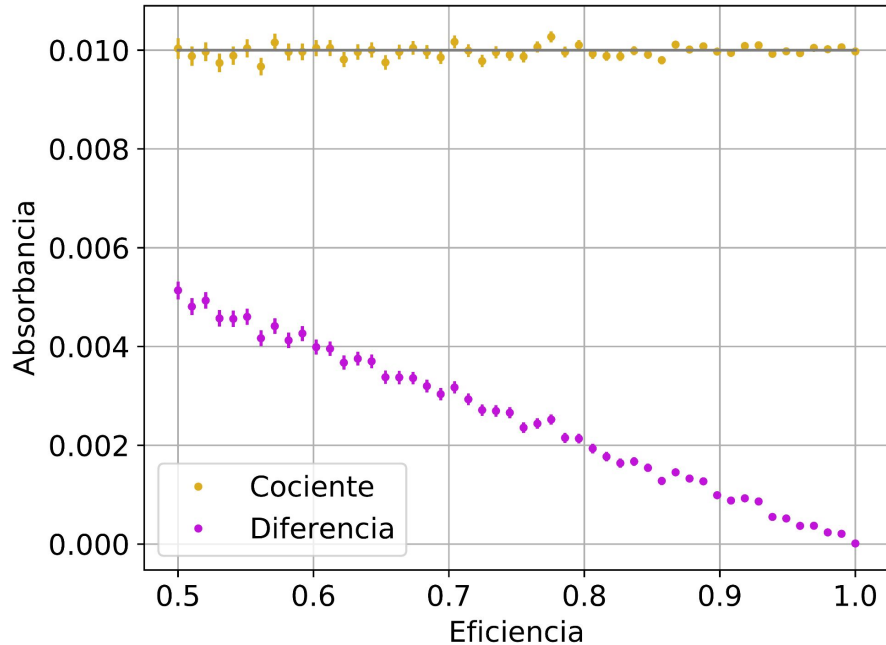
$$\alpha = 0.01 \quad N_{\text{pix}} = 10$$



Estimación de la absorbancia de una muestra

Dependencia con los parámetros de la simulación

$$\alpha = 0.01 \quad N_{\text{pix}} = 10000$$



Estimación de la absorbancia de una muestra

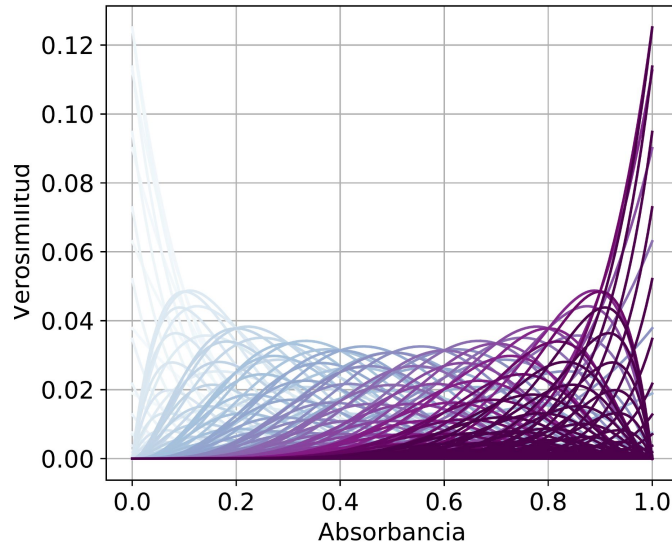
Estimador de máxima verosimilitud

$$L_{TB}(n_1, n_2) = \underbrace{\sum_{n=0}^{\infty} P(n \mid (1 - \beta)N)}_{\text{purple}} \underbrace{\sum_{i=0}^{n_1} B(n_1 - i \mid \eta_1(1 - \alpha), n)}_{\text{green}} \underbrace{P(i \mid \mu\eta_1 + \beta N\eta_1(1 - \alpha))}_{\text{green}} \times$$
$$\times \underbrace{\sum_{j=0}^{n_2} B(n_2 - j \mid \eta_2, n)}_{\text{blue}} \underbrace{P(j \mid \mu\eta_2 + \beta N\eta_2)}_{\text{blue}}$$

Estimación de la absorbancia de una muestra

Estimador de máxima verosimilitud

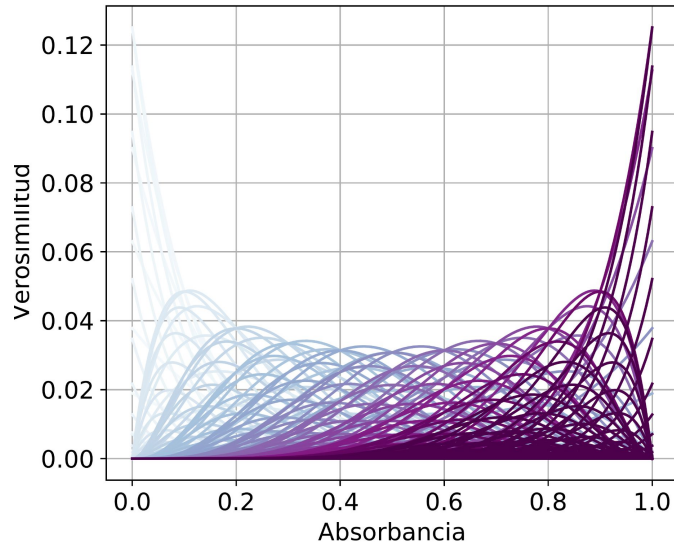
$$L_{TB}(n_1, n_2) = \sum_{n=0}^{\infty} P(n \mid (1 - \beta)N) \sum_{i=0}^{n_1} B(n_1 - i \mid \eta_1(1 - \alpha), n) P(i \mid \mu\eta_1 + \beta N\eta_1(1 - \alpha)) \times \\ \times \sum_{j=0}^{n_2} B(n_2 - j \mid \eta_2, n) P(j \mid \mu\eta_2 + \beta Nn_2)$$



Estimación de la absorbancia de una muestra

Estimador de máxima verosimilitud

$$L_{TB}(n_1, n_2) = \sum_{n=0}^{\infty} P(n \mid (1 - \beta)N) \sum_{i=0}^{n_1} B(n_1 - i \mid \eta_1(1 - \alpha), n) P(i \mid \mu\eta_1 + \beta N\eta_1(1 - \alpha)) \times \\ \times \sum_{j=0}^{n_2} B(n_2 - j \mid \eta_2, n) P(j \mid \mu\eta_2 + \beta Nn_2)$$

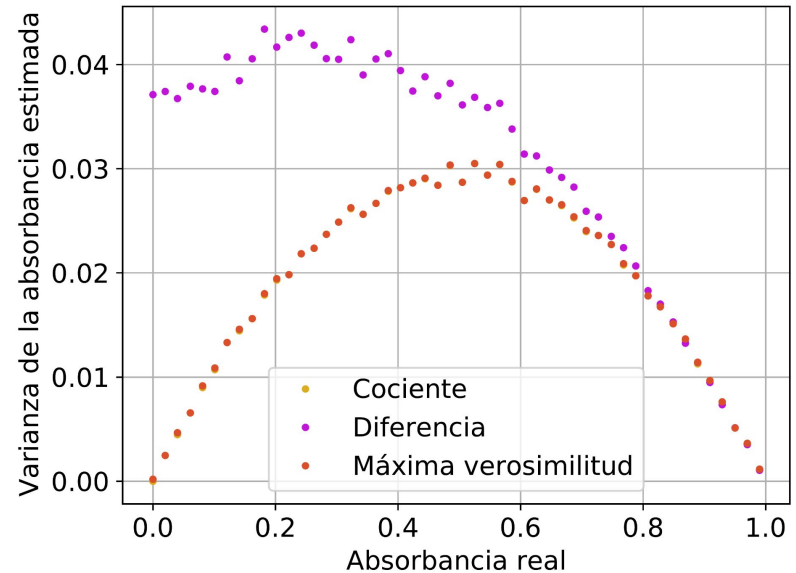
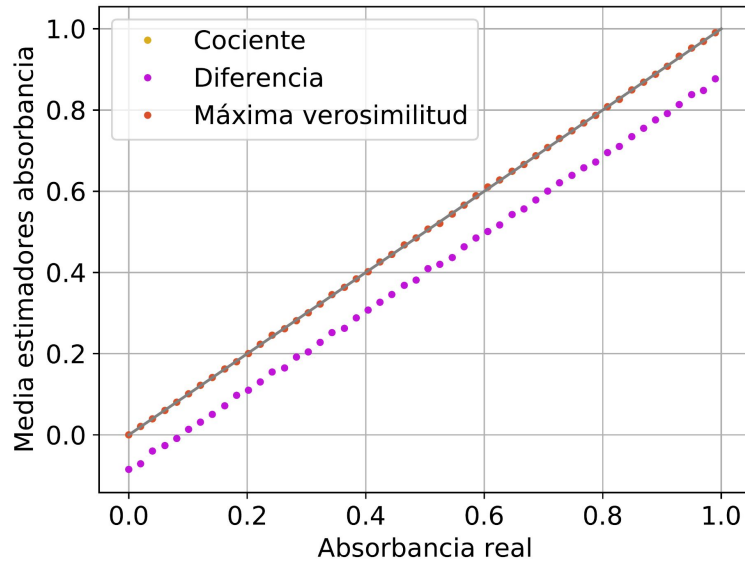


Maximizando numéricamente en
función de la absorbancia

$$\hat{\alpha}_{MV}$$

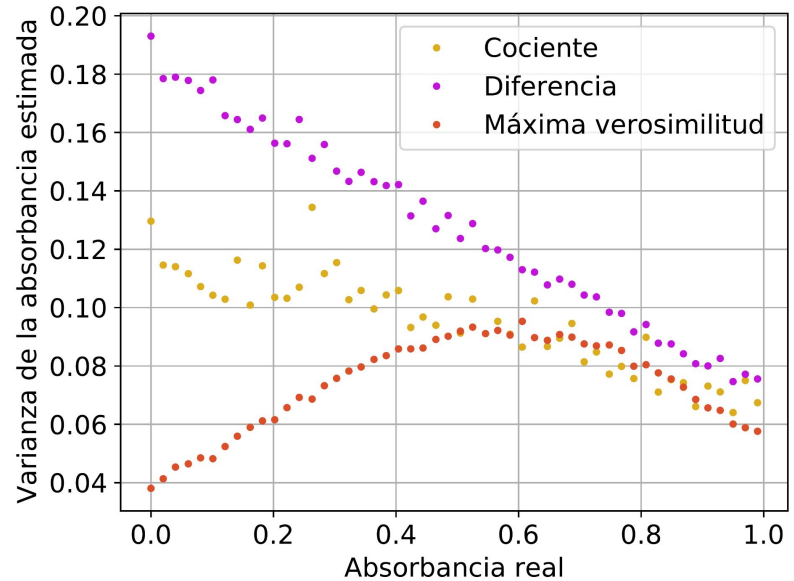
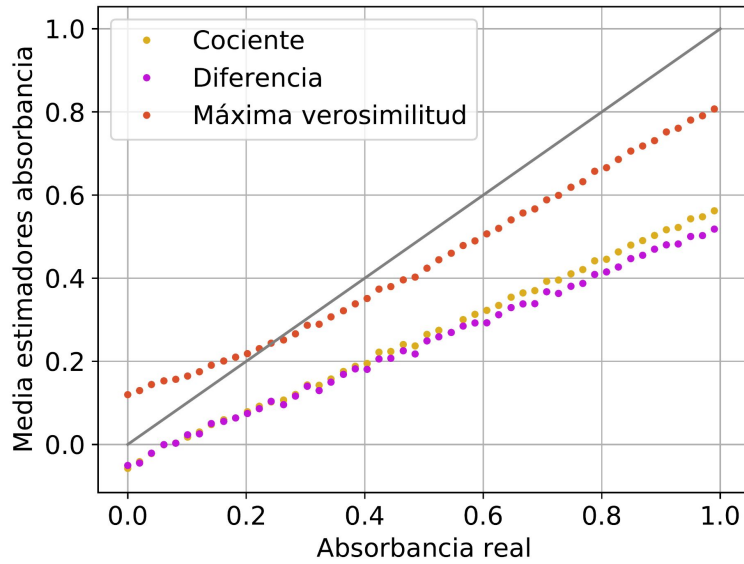
Estimación de la absorbancia de una muestra

$$\eta = 1 \quad \mu_{\text{back}} = 0$$



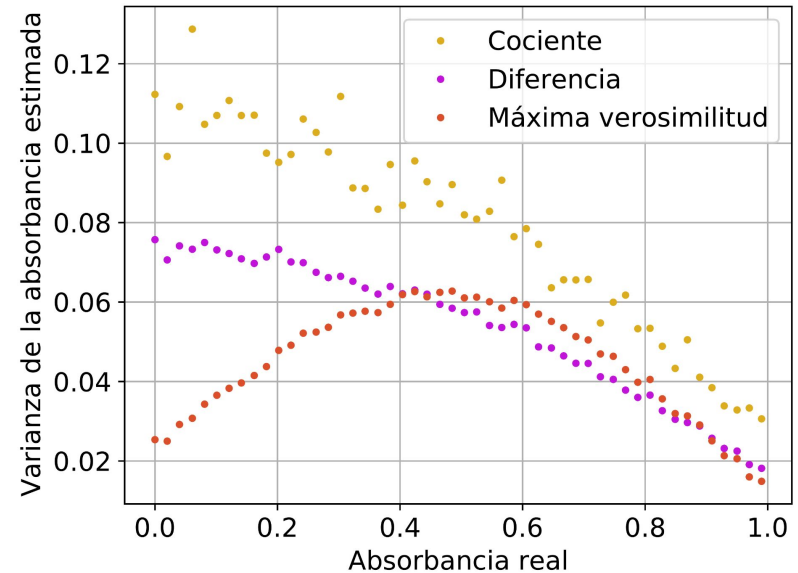
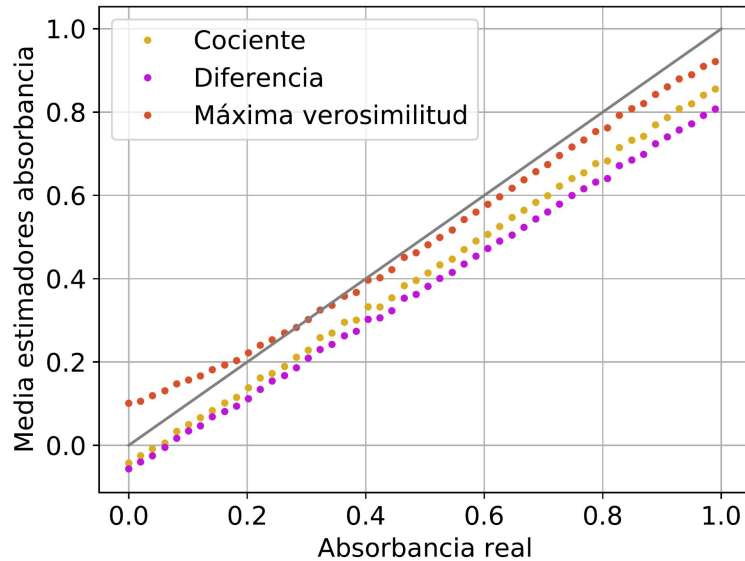
Estimación de la absorbancia de una muestra

$$\eta = 0.8 \quad \mu_{\text{back}} = 5$$



Estimación de la absorbancia de una muestra

$$\eta = 0,8 \quad \mu_{\text{back}} = 1$$



Conclusiones y perspectivas

- Construimos una simulación de un experimento de pares de fotones producto de SPDC
- Implementamos las herramientas de cálculo de correlación
- Estudiamos los efectos sobre la correlación de los parámetros del sistema
- Observamos la ventaja del Skipper-CCD cuantitativamente en este tipo de experimentos
- Estudiamos el desempeño de estimadores de absorbancia usando fuentes de pares correlacionados

Referencias

Skipper-CCD

J. Tiffenberg et al. *Single-electron and single-photon sensitivity with a silicon Skipper CCD* arXiv:1706.00028, 2017.

Detección de fotones correlacionados

O. Jedrkiewicz et al. *Detection of sub-shot-noise spatial correlation in high-gain parametric down-conversion* arXiv:quant-ph/0407211, 2004.

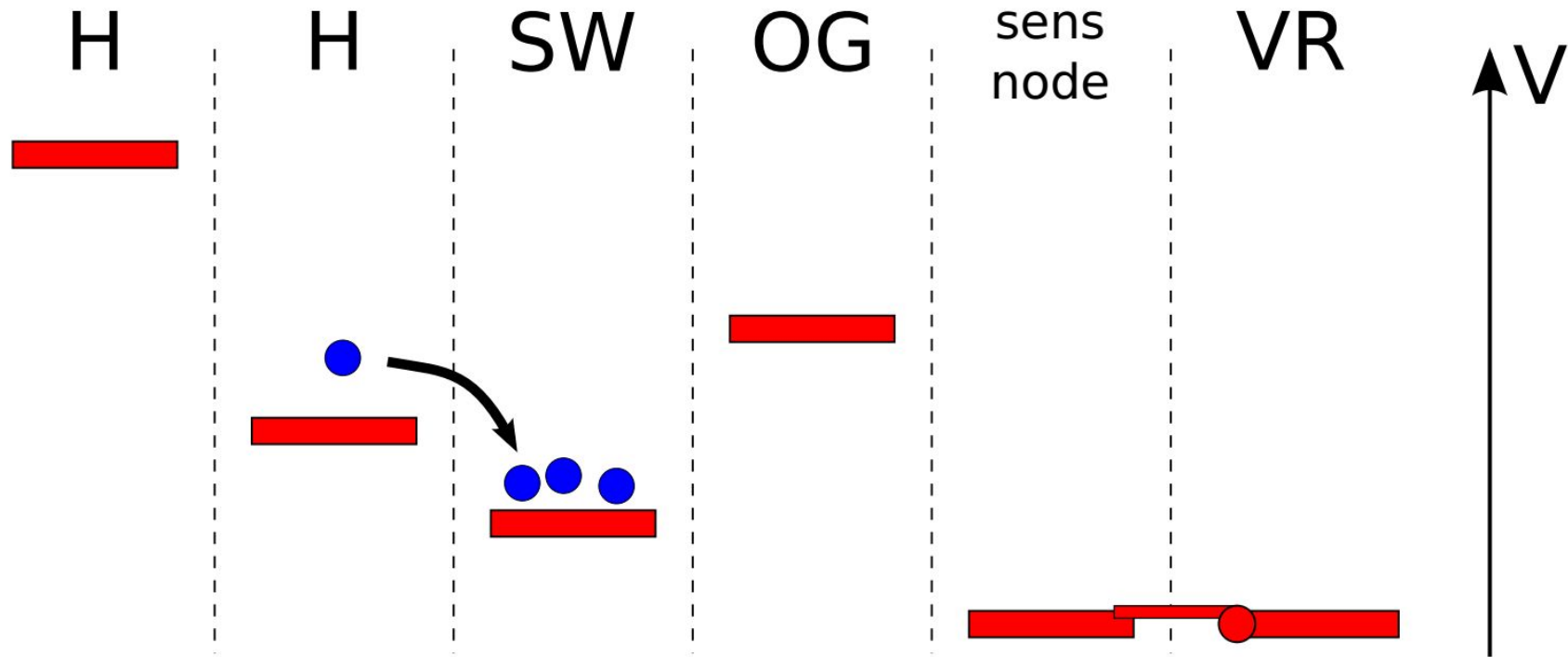
Estimación de la absorbancia en el régimen sub-poissoniano

A. G. Magnoni, L. T. Knoll and M. A. Larotonda. *Scheme for sub-shot-noise transmission measurement using a time multiplexed single photon-source*. arXiv:2007.15842, 2020

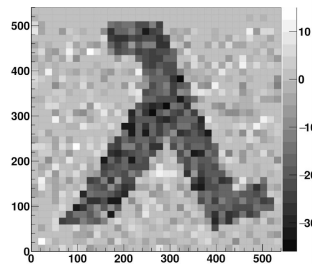
Majeed M. Hayat et al. *Reduction of quantum noise in transmittance estimation using photon-correlated beams*, J. Opt. Soc. Am. A **16**, 348-358, 1999

E. Losero, I. et al. *Unbiased estimation of an optical loss at the ultimate quantum limit with twin-beams*, Scientific reports 8, 1, 2018

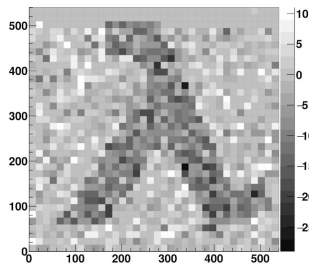
P.-A. Moreau et al. *Demonstrating an absolute quantum advantage in direct absorption measurement*, Scientific reports 7, 1, 2017



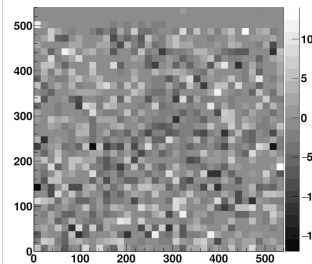
Photons/pixel = 1000 Readout noise = 5.000000 electrons



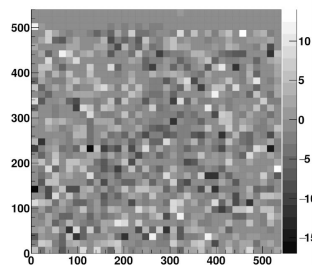
Photons/pixel = 500 Readout noise = 5.000000 electrons



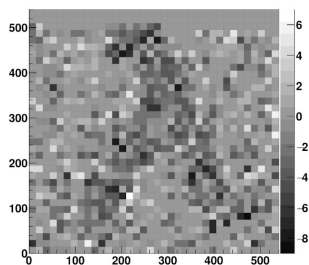
Photons/pixel = 100 Readout noise = 5.000000 electrons



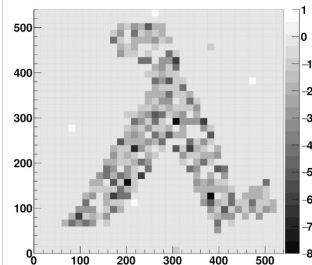
Photons/pixel = 100 Readout noise = 5.000000 electrons



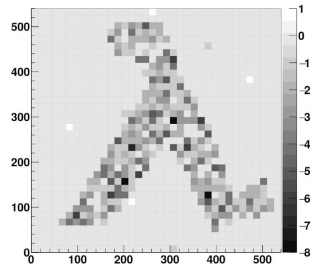
Photons/pixel = 100 Readout noise = 2.500000 electrons



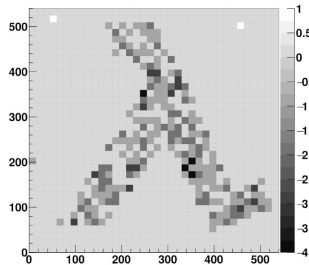
Photons/pixel = 100 Readout noise = 0.100000 electrons



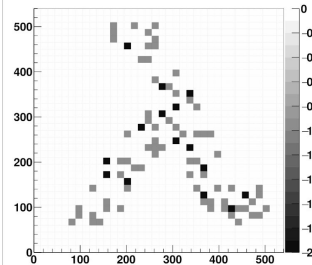
Photons/pixel = 100 Readout noise = 0.100000 electrons



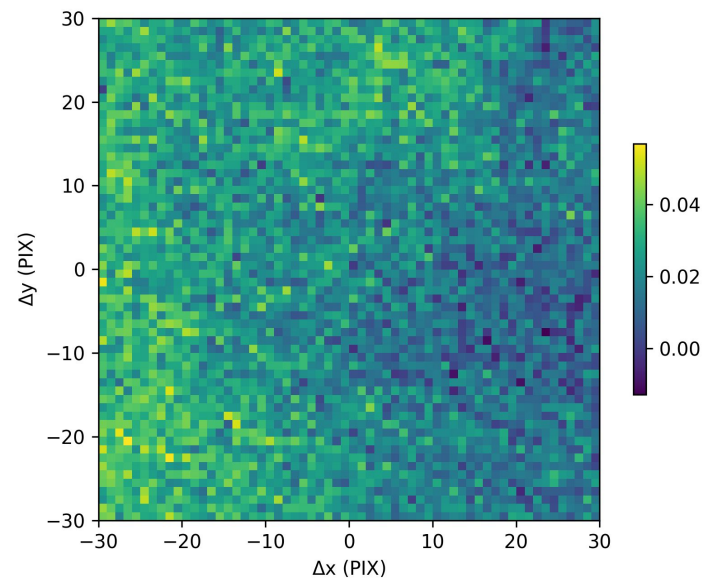
Photons/pixel = 50 Readout noise = 0.100000 electrons



Photons/pixel = 15 Readout noise = 0.100000 electrons

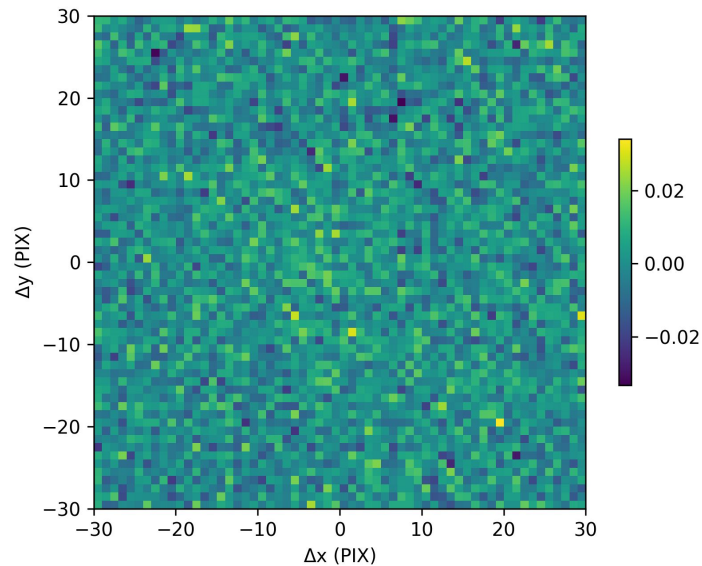


Cálculo de correlación

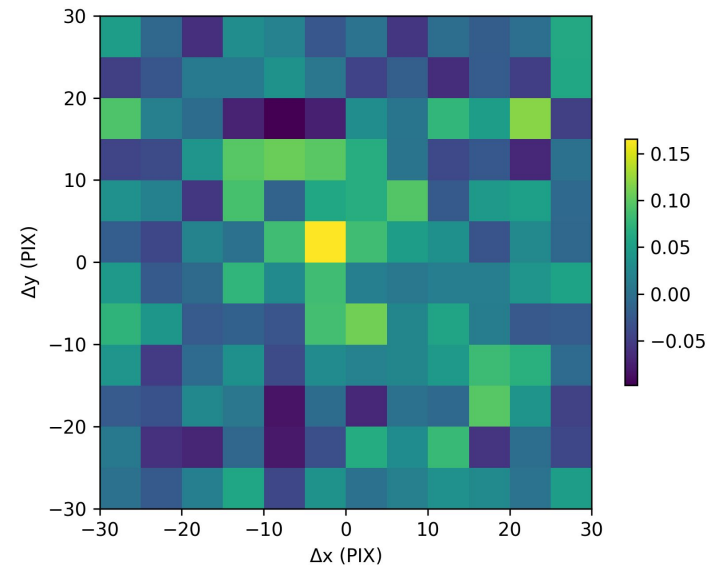


Pixel a pixel

Área de coherencia - Incerteza relativa en la posición

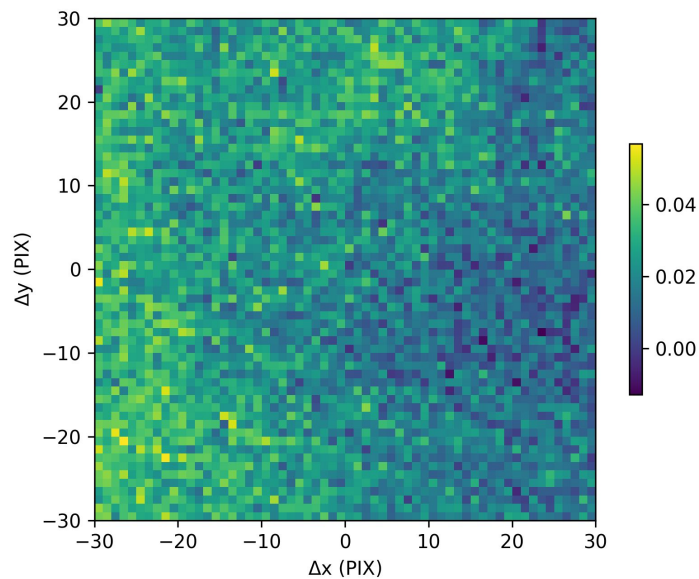


Pixel a pixel

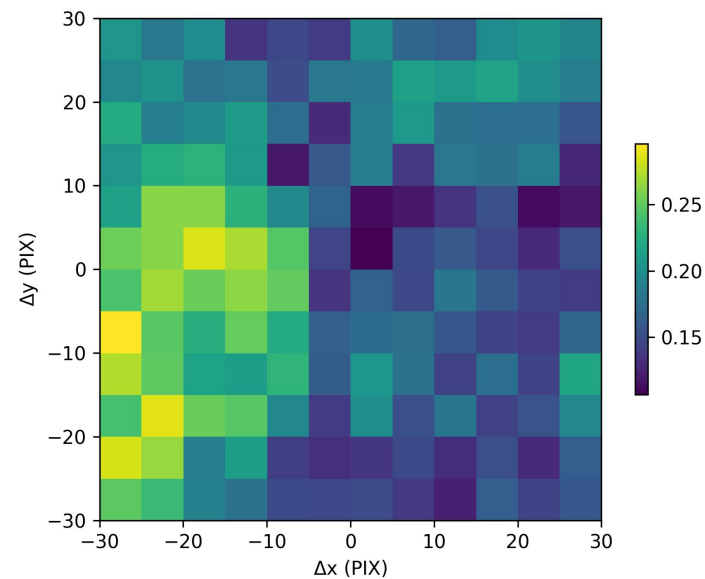


Super pixel de 5 pix

Cálculo de correlación - Imágenes reales (Fermilab)



Pixel a pixel



Super pixel de 5 pix

Temas a tratar

- **Diagnóstico** de un sistema BBO tipo I
 - Algoritmo para cuantificar correlación pixel a pixel
 - Análisis de imágenes reales con diferente bineado
 - Simulación Montecarlo de un sistema completo
 - Sensibilidad de la correlación ante fondo, transmitancia y desvío del haz.

- **Tratamiento** de un sistema BBO tipo II
 - Simulación Montecarlo por cambio de variables
 - Images sintéticas y efecto esperado ante diferentes bineados

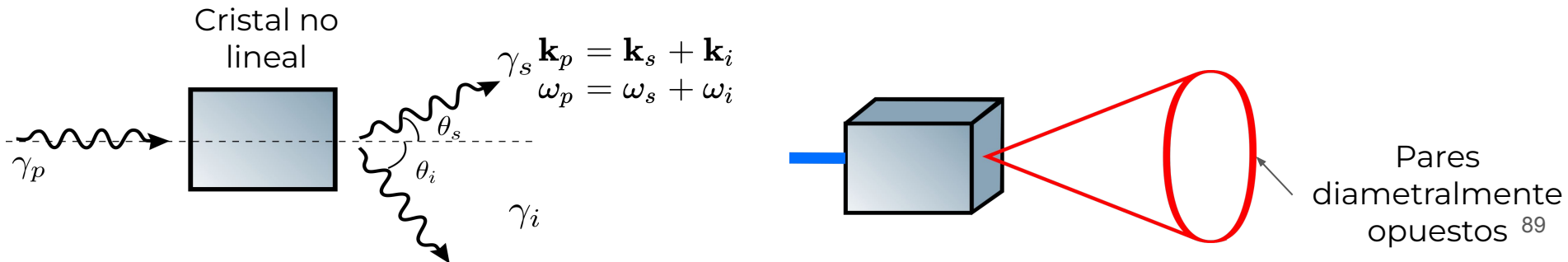
- Futuras aplicaciones, absorbancia y Microscopía (charla de Agustina)

Aplicaciones de la tecnología Skipper

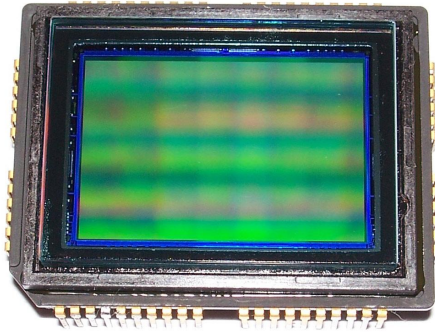
En óptica cuántica

- Metrología cuántica: mediciones de absorbancia
- Microscopía cuántica

Spontaneous Parametric Down Conversion (SPDC)

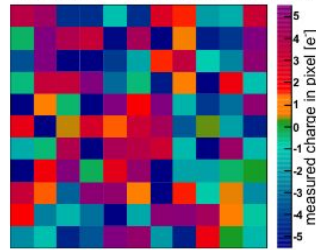


Skipper CCD vs CCD convencionales

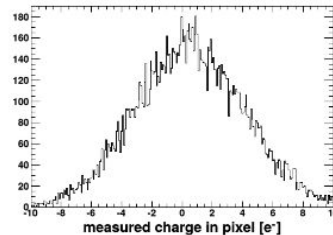


CCD

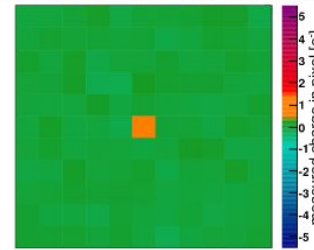
Standard CCD mode: charge in each pixel is measured once



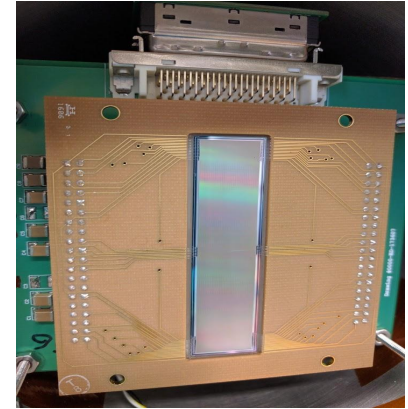
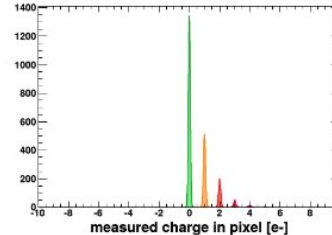
Readout-noise: 3.5 e RMS



New Skipper CCD: charge in each pixel is measured multiple times



Readout-noise: 0.06 e RMS

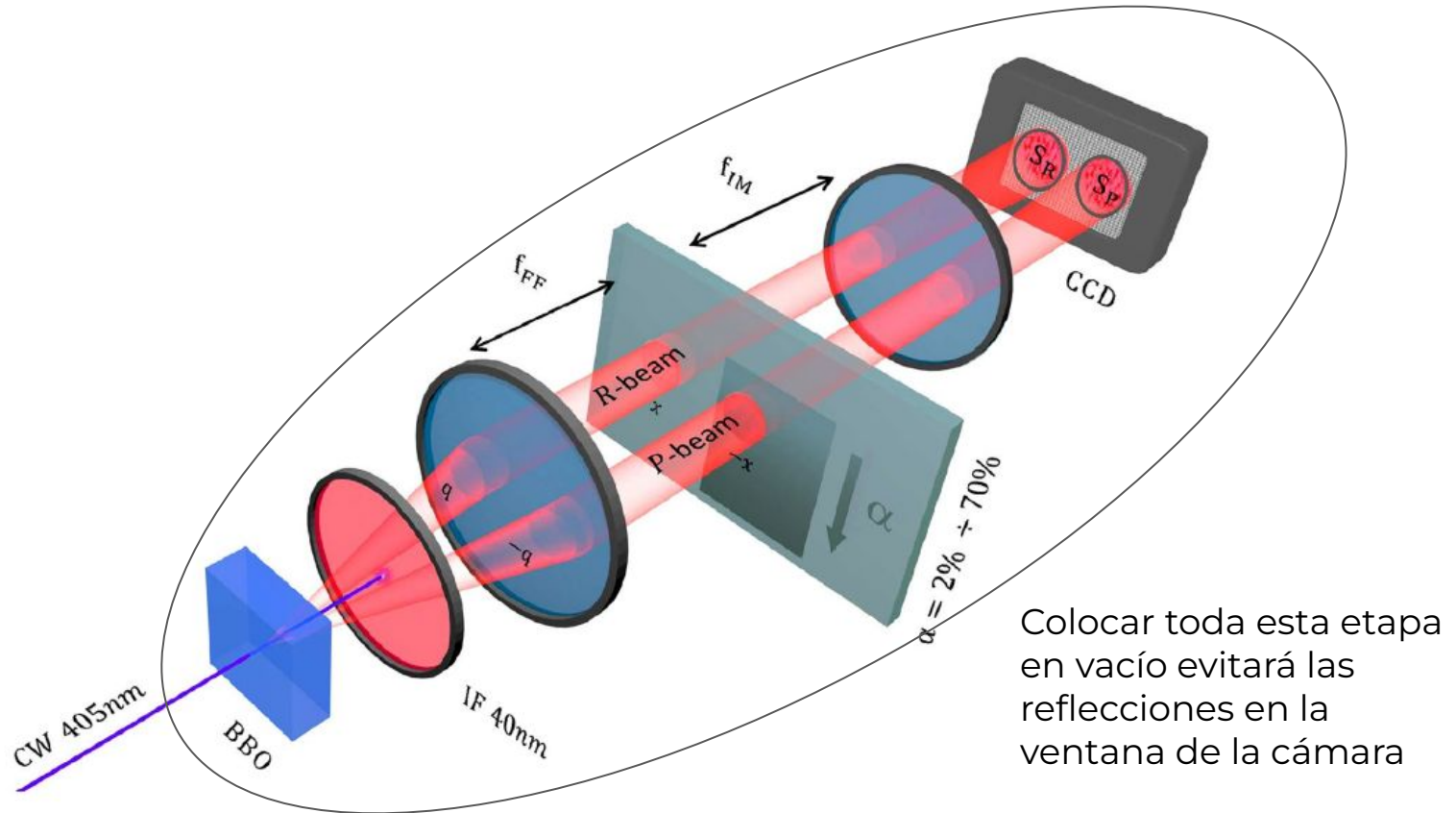


Skipper
CCD

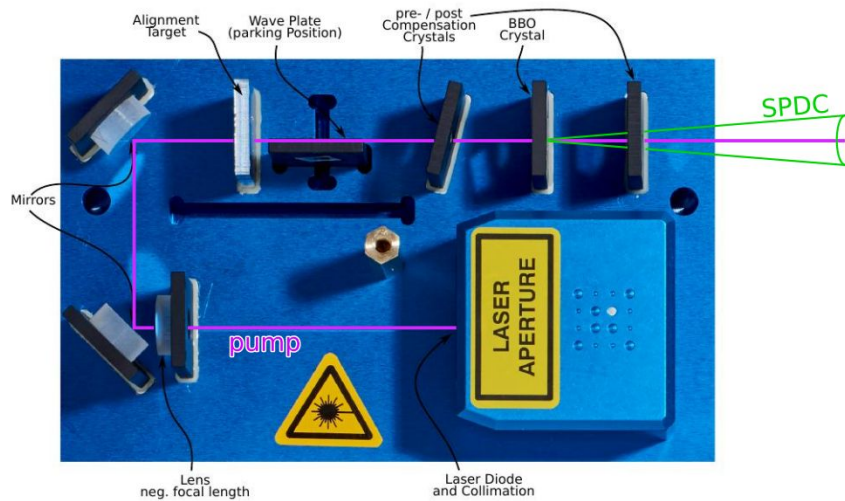
Fermilab + Berkeley lab

J. Tiffenberg et al. *Single-electron and single-photon sensitivity with a silicon Skipper CCD* (2017)⁹⁰

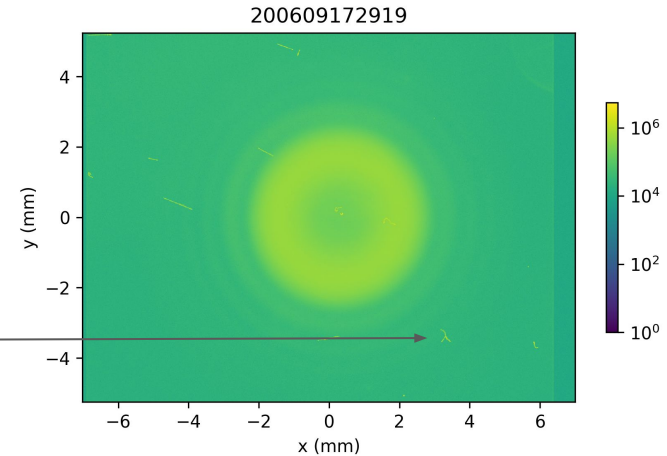
Propuesta experimental con BBO tipo II



Motivación: sistema a diagnosticar



Skipper-CCD



Fuente: Tesis M. Senger