

# Měření koherence světla pomocí SHS

Libor Motka

Z. Hradil, J. Řeháček, B. Stoklasa, L.L. Sánchez - Soto

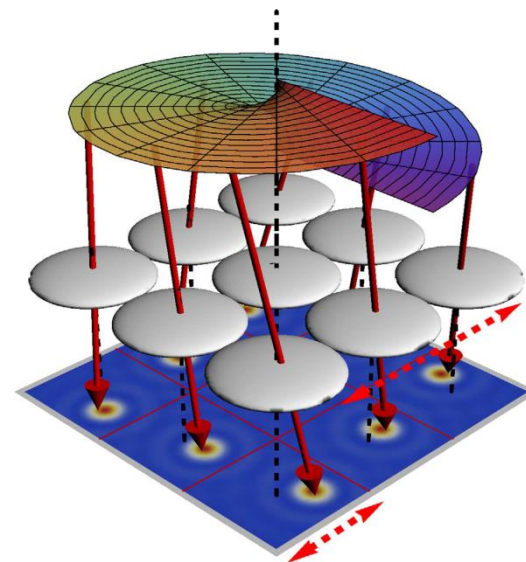
D. Sych



# Shackův-Hartmannův senzor vlnoplochy

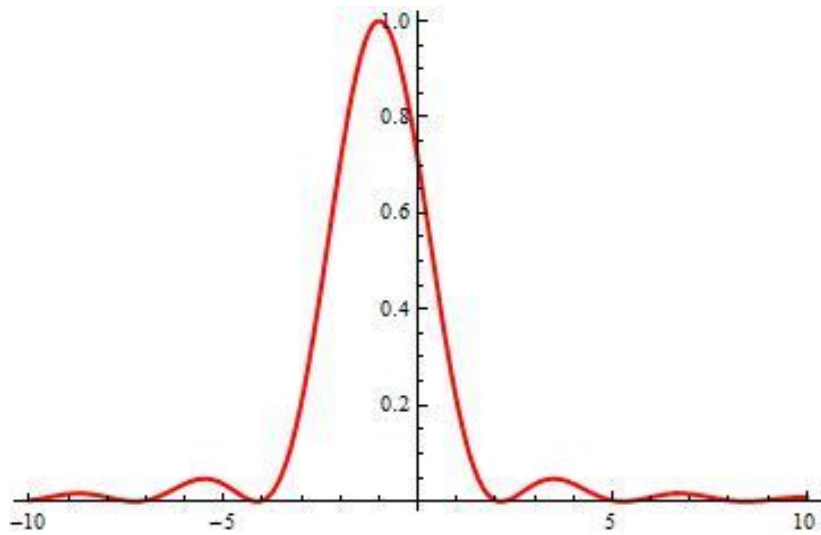


CCD kamera + matice mikročoček



# Zobecnění měření SH senzoru

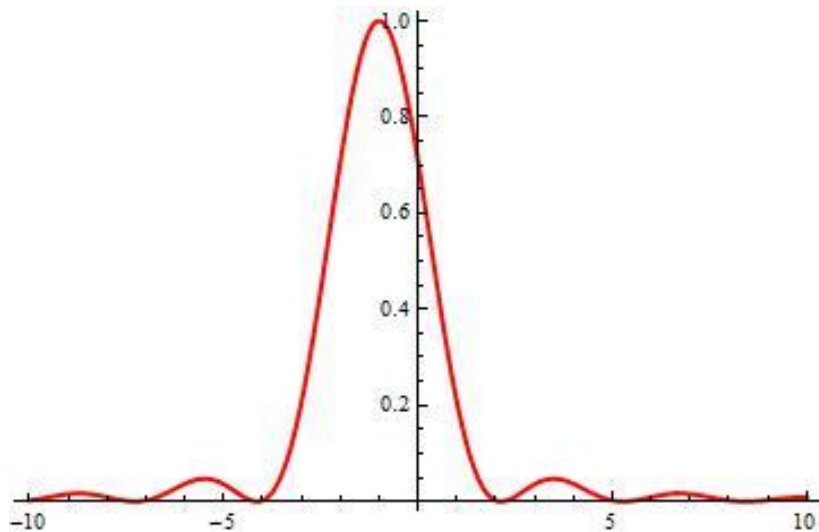
koherentní světlo



# Zobecnění měření SH senzoru

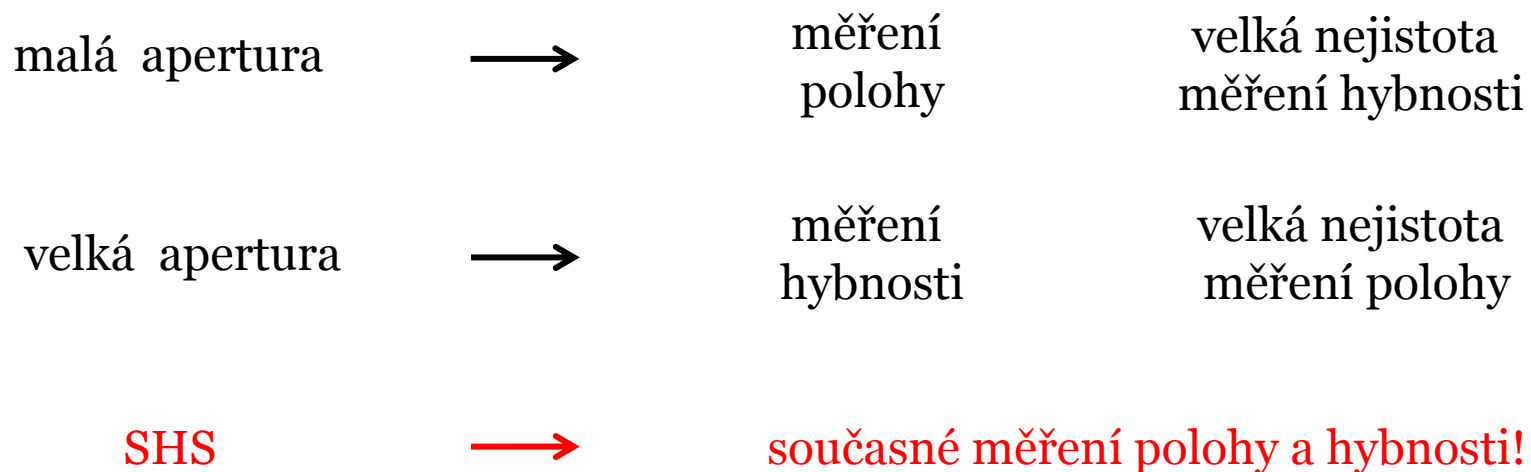
koherentní světlo

částečně koherentní světlo



?

# Současné měření polohy a hybnosti



Problém současného měření nekomutujících proměnných je dobře známý z kvantové optiky.

# Kvantový formalismus

→ **elegantní popis** pomocí Diracovy symboliky

→ systém s vnějšími stupni volnosti světla  
popsán koherenční maticí

$\rho \geq 0$  → rekonstrukce pomocí **QIP**

→ intenzifikovaná CCD kamera

možnost měření **slabých signálů**

# Popis měření SH senzorem

koherentní světlo

$$|U\rangle \quad U(\mathbf{x}) = \langle x|U\rangle$$

$$U(\mathbf{x} - \Delta x_i) = \langle x | e^{-i\Delta x_i \mathbf{p}} |U\rangle$$

$$U(\Delta p_j) = \langle A | e^{-i\Delta p_j x} e^{-i\Delta x_i \mathbf{p}} |U\rangle$$

částečně koherentní světlo

$$\rho \quad G(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = \langle x|\rho|x'\rangle$$

$$|\pi_{ij}\rangle = e^{i\Delta x_i \mathbf{p}} e^{i\Delta p_j x} |A\rangle$$

$$I_{ij} = \text{Tr}(\rho |\pi_{ij}\rangle\langle\pi_{ij}|)$$

## reprezentace

$$I_{ij} = \text{Tr}(\rho |\pi_{ij}\rangle\langle\pi_{ij}|)$$

$$|m\rangle \quad m = 1 \dots d$$

$$(\Pi_{ij})_{mn} = \langle\Pi_{ij}|m\rangle\langle n|\Pi_{ij}\rangle$$

1D-čtvercová aperturní funkce

$$(\Pi_{ij})_{mn} = \text{sinc}(\Delta p_j + p_m) \text{sinc}(\Delta p_j + p_n) e^{i(p_m - p_n)\Delta x_i}$$

## rekonstrukce

přímá inverze  $\text{rank}[\langle m|\rho|n\rangle] = d^2 \quad \longrightarrow \quad \text{rank}[(\Pi_{ij})_{mn}] \geq d^2$

QIP  $\rho \geq 0$



# Úplnost měření

$$\text{rank}[(\Pi_{ij})_{mn}] \geq d^2$$

čtvercová apertura

	1	2	3	4	5
<b>2</b>	1	0	0	0	0
<b>3</b>	3	0	0	0	0
<b>4</b>	7	2	0	0	0
<b>5</b>	13	6	0	0	0
<b>6</b>	21	12	3	0	0
<b>7</b>	31	20	9	0	0
<b>8</b>	43	30	7	4	0

kruhová apertura

	1	2	3
<b>2</b>	1	0	0
<b>3</b>	3	0	0
<b>4</b>	6	0	0
<b>5</b>	10	0	0
<b>6</b>	15	0	0
<b>7</b>	21	0	0

# HD vs. SHS měření

**SHS**

*vnější*

$(\Pi_{ij})_{mn}$

**HD**

*vnitřní*

$$\text{sinc}(\Delta p_j + p_m) \text{sinc}(\Delta p_j + p_n) e^{i(p_m - p_n)\Delta x_i}$$

$$H_m(x_j) H_n(x_j) e^{i(m-n)\theta_i}$$

# HD vs. SHS měření

**SHS**

*vnější*

$(\Pi_{ij})_{mn}$

**HD**

*vnitřní*

$$\text{sinc}(\Delta p_j + p_m) \text{sinc}(\Delta p_j + p_n) e^{i(p_m - p_n)\Delta x_i}$$

$$H_m(x_j) H_n(x_j) e^{i(m-n)\theta_i}$$

mikročochky

	1	2	3	4	5
<b>2</b>	1	0	0	0	0
<b>3</b>	3	0	0	0	0
<b>4</b>	7	2	0	0	0
<b>5</b>	13	6	0	0	0
<b>6</b>	21	12	3	0	0
<b>7</b>	31	20	9	0	0

fáze lokálního oscilátoru

	1	2	3	4	5	6
<b>2</b>	1	0	0	0	0	0
<b>3</b>	4	1	0	0	0	0
<b>4</b>	9	4	1	0	0	0
<b>5</b>	16	9	4	1	0	0
<b>6</b>	25	16	9	4	1	0
<b>7</b>	36	25	16	9	4	1

# Robustnost měření <sup>1D</sup>

5% šum

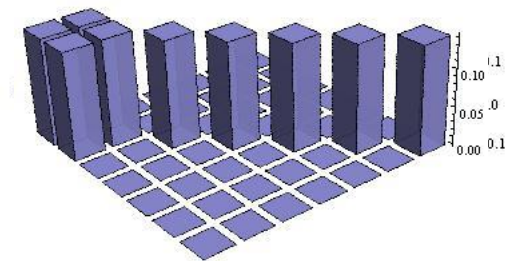
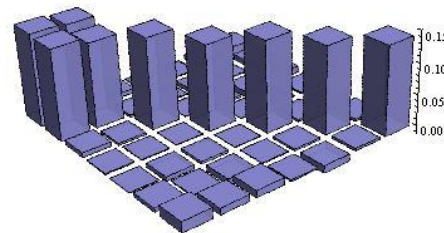
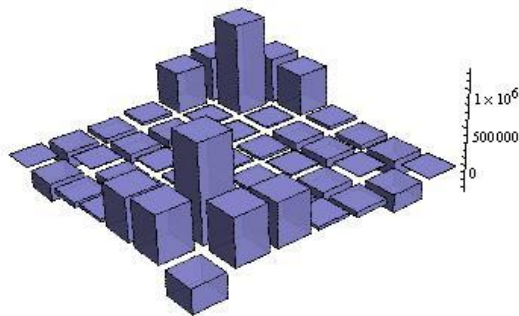
d=7

m=4

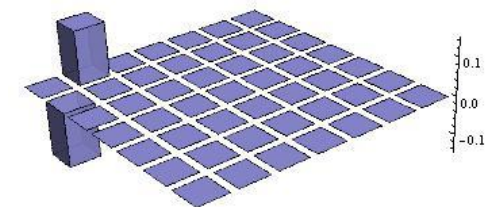
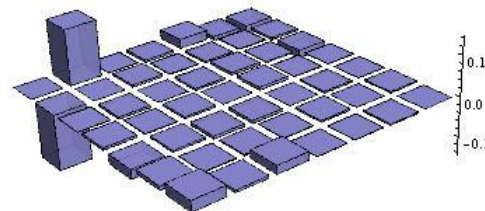
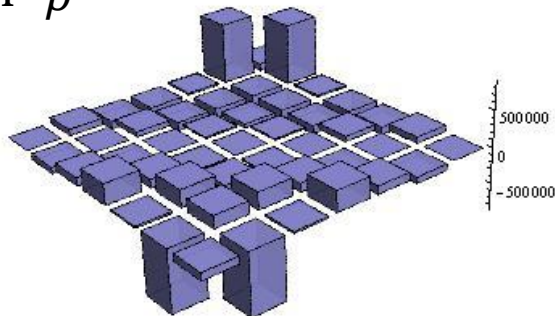
m=15

$\rho_T$

Re  $\rho$



Im  $\rho$



# Probes a patterns

$$\sigma_\xi \rightarrow f_\xi \quad \hat{f} = \sum_{\xi}^d x_\xi f_\xi$$

$$\rho = \sum_{\xi}^d x_\xi \sigma_\xi$$

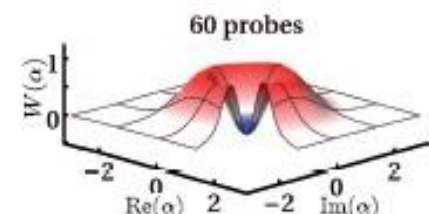
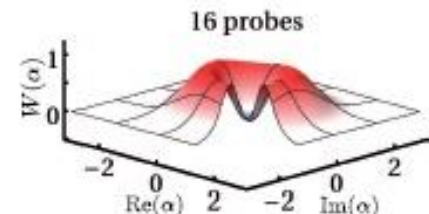
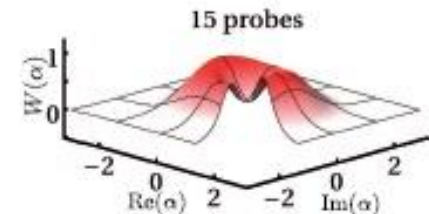
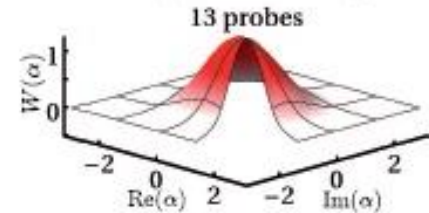
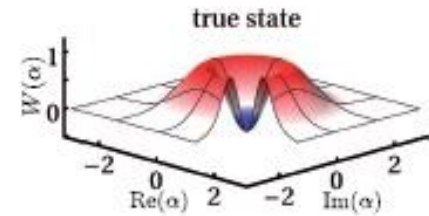
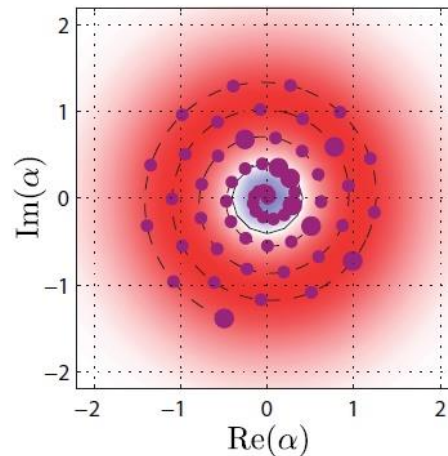
$$F(x_\xi) = \sum_{\xi}^d (\hat{f} - f_\xi)^2$$

min F

za podmínky

$$\rho \geq 0$$

$$\rho_T = \begin{pmatrix} 0.4 & 0 \\ 0 & 0.6 \end{pmatrix}$$



# Aplikace

Měření prostorové koherence UV laseru

Koherence reliktního záření

3D zobrazování

Charakterizace vírových polí

**Děkuji za pozornost!**