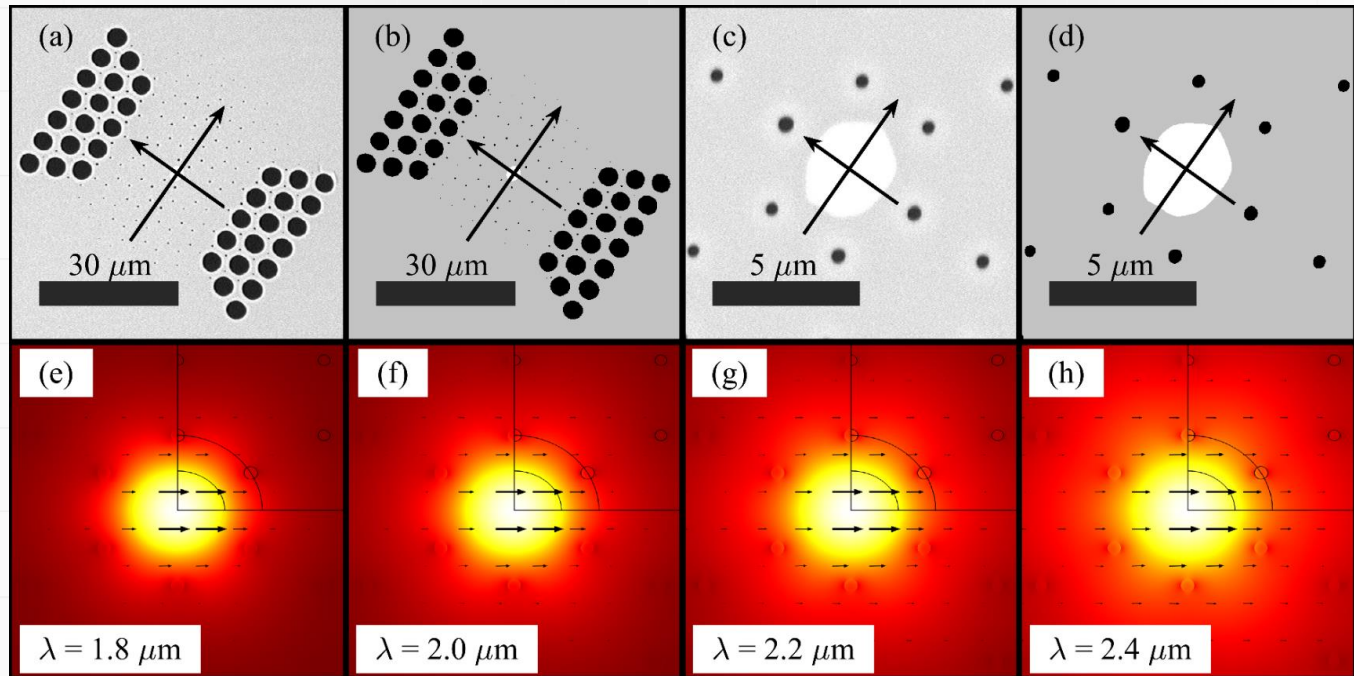


# Generacja superkontinuum i inne zjawiska nieliniowe w światłowodach



*Karol Tarnowski*

Wydział Podstawowych Problemów Techniki, Katedra Optyki i Fotoniki, Grupa Optyki Światłowodów

I Dzień Wroclawskiej Fizyki

03.06.2023



# Na dobry początek

- Czy czerwone samochody zawsze są szybsze od niebieskich?
- Czy galopujący koń odrywa od ziemi wszystkie cztery kopyta?
- Dlaczego te pytania są ważne w kontekście światłowodowych źródeł superkontinuum?

## Wydział Podstawowych Problemów Techniki



WYDZIAŁ PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW TECHNIKI POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ

### KIERUNKI STUDIÓW



#### FIZYKA TECHNICZNA

specjalność: Nanoinżynieria



#### INŻYNIERIA BIOMEDYCZNA

specjalności: Biomechanika inżynierska, Elektronika medyczna,  
Optyka biomedyczna



#### BIG DATA ANALYTICS

II stopień



#### INŻYNIERIA KWANTOWA



#### OPTYKA

specjalności na I stopniu: Inżynieria optyczna i  
fotoniczna, Optyka okularowa

specjalności na II stopniu: Inżynieria Optyczna i  
Fotoniczna, Optometria

### NOWY KIERUNEK (2023/2024)



#### MEDICAL INFORMATICS

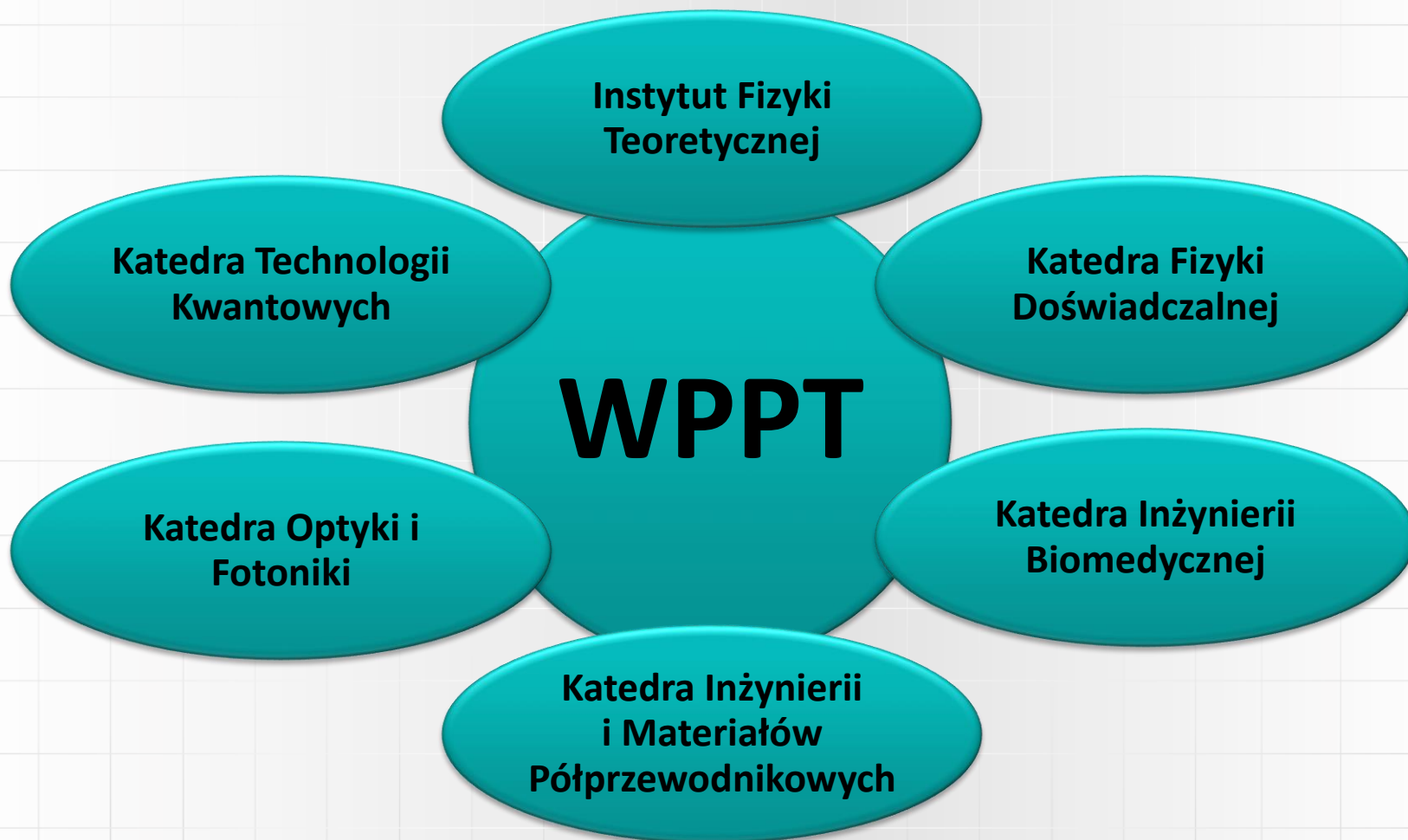


Wydział Podstawowych Problemów Techniki  
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50 – 370 Wrocław, bud. A1



[wppt.pwr.edu.pl](http://wppt.pwr.edu.pl)

# Wydział Podstawowych Problemów Techniki





# Grupa Optyki Światłowodów



Fiber Optics  
Group

fog.pwr.edu.pl



Prof. Wacław Urbańczyk

📍 L1/218

☎ +48 713 203 385

✉ Waclaw.Urbanczyk@pwr.edu.pl



Dr. Katarzyna Komorowska

📍 L1/221

☎ +48 713 204 117

✉ Katarzyna.Komorowska@pwr.edu.pl

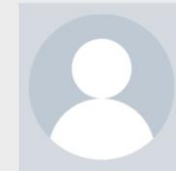


Dr. Tadeusz Martynkien

📍 L1/220

☎ +48 713 202 604

✉ Tadeusz.Martynkien@pwr.edu.pl



Dr. Maciej Napiórkowski

📍 L1/220

☎ +48 713 204 441

✉ Maciej.Napiorkowski@pwr.edu.pl



Dr. hab. Michał Nikodem

more info

📍 L1/221

☎ +48 713 204 117

✉ Michal.Nikodem@pwr.edu.pl

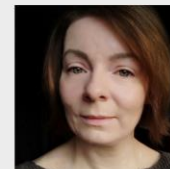


Dr. Jacek Olszewski

📍 L1/220

☎ +48 713 204 441

✉ Jacek.Olszewski@pwr.edu.pl



Dr. hab. Gabriela Statkiewicz-  
Barabach

📍 L1/221

☎ +48 713 204 117

✉ Gabriela.Statkiewicz@pwr.edu.pl



Dr. Karol Tarnowski

📍 L1/220

☎ +48 713 204 441

✉ Karol.Tarnowski@pwr.edu.pl



Dr. Kinga Żołnacz

📍 L1/215

☎ +48 713 204 902

✉ kinga.zolnacz@pwr.edu.pl



# Grupa Optyki Światłowodów



Fiber Optics  
Group

fog.pwr.edu.pl



Prof. Waclaw Urbanczyk

📍 L1/218

☎ +48 713 203 385

✉ Waclaw.Urbanczyk@pwr.edu.pl



Edyta Środa

📍 L1/213

☎ +48 713 204 872

✉ edyta.sroda@pwr.edu.pl



Piotr Pala

📍 L1/213

☎ +48 713 204 872

✉ piotr.pala@pwr.edu.pl



Marta Bernas

📍 L1/213

☎ +48 713 204 872

✉ marta.bernas@pwr.edu.pl



Grzegorz Gomółka

📍 L1/213

☎ +48 713 204 872

✉ grzegorz.gomolka@pwr.edu.pl



Karolina Stefańska

📍 L1/213

☎ +48 713 204 872

✉ karolina.stefanska@pwr.edu.pl



Magdalena Zatorska

📍 L1/213

☎ +48 713 204 872

✉ magdalena-zatorska@pwr.edu.pl





# Grupa Optyki Światłowodów



Fiber Optics  
Group

[fog.pwr.edu.pl](http://fog.pwr.edu.pl)

- projektowanie światłowodów specjalnych (w tym światłowodów fonicznych) o innowacyjnych właściwościach
- modelowanie i charakteryzowanie światłowodów specjalnych, komponentów światłowodowych oraz urządzeń optyki zintegrowanej
- projektowanie czujników światłowodowych

# Plan prezentacji

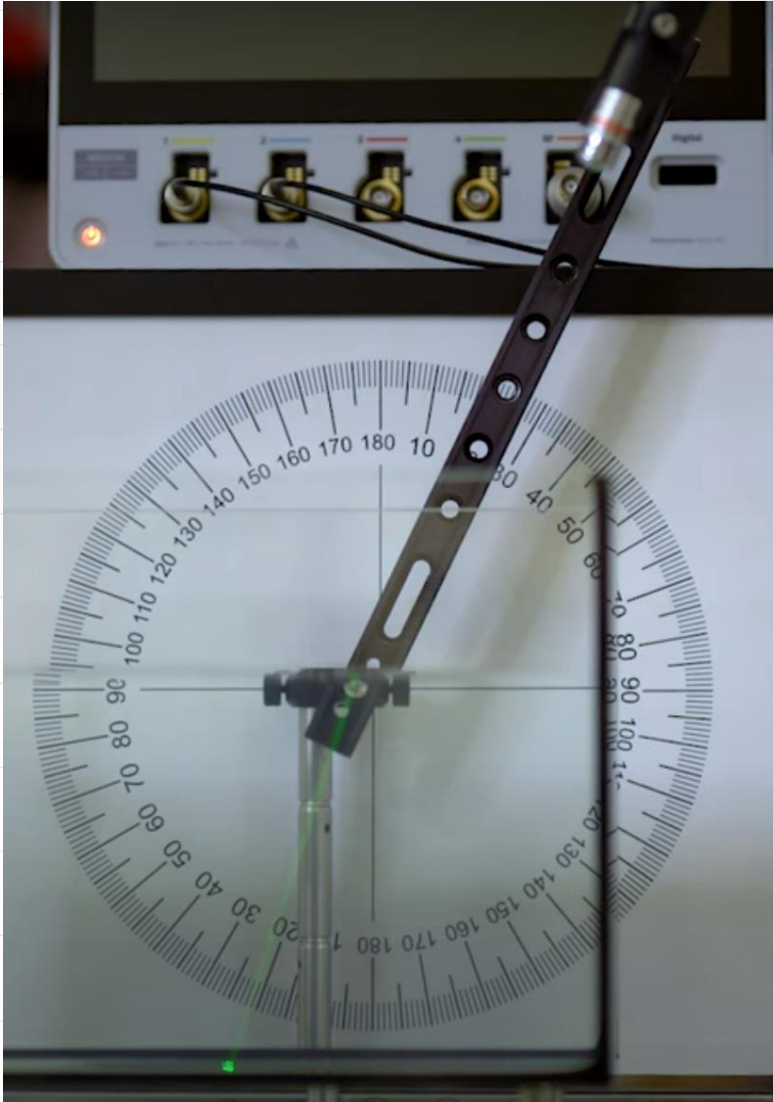
- Zasada działania światłowodów
- Światłowody i ich właściwości
- Światłowody mikrostrukturalne
- Zjawiska nieliniowe w światłowodach
- Generacja superkontinuum
- Inne zjawiska nieliniowe





# Zasada działania światłowodów

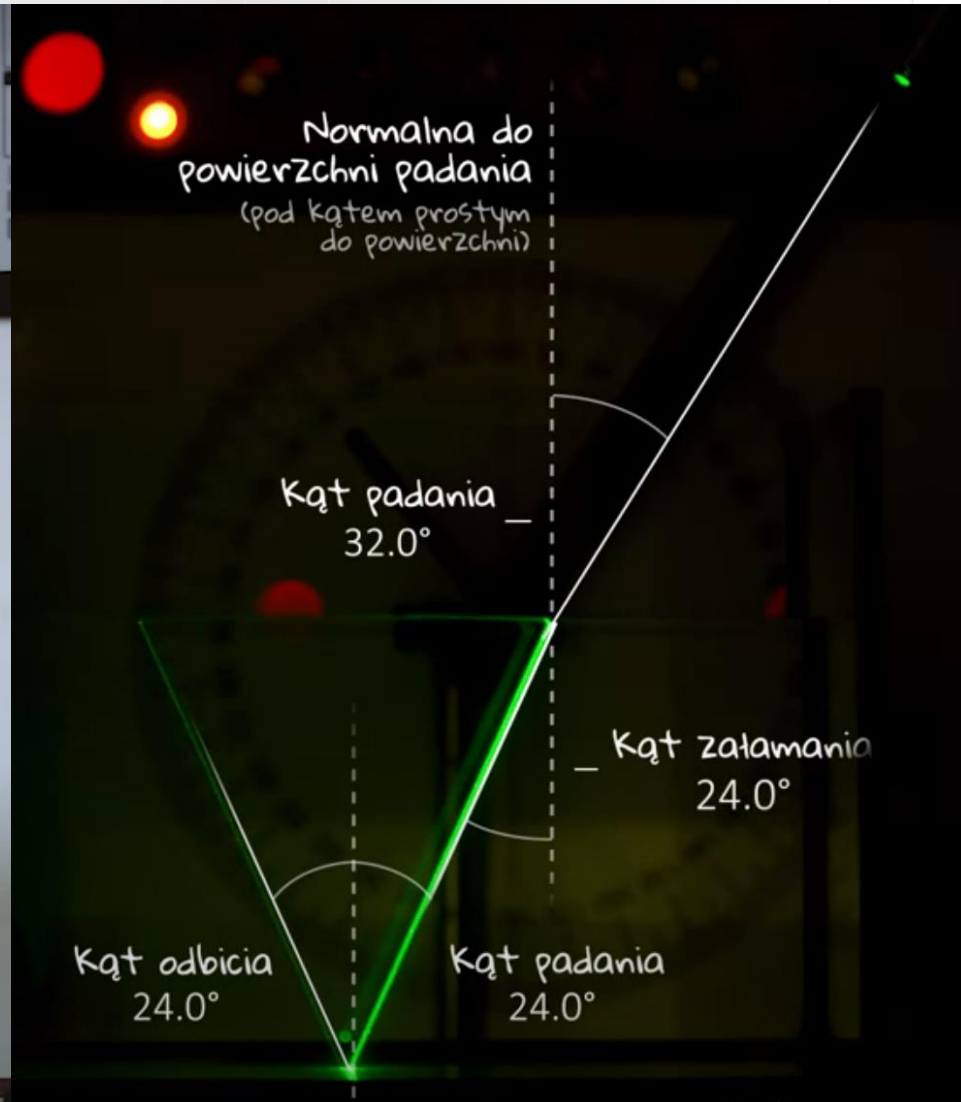
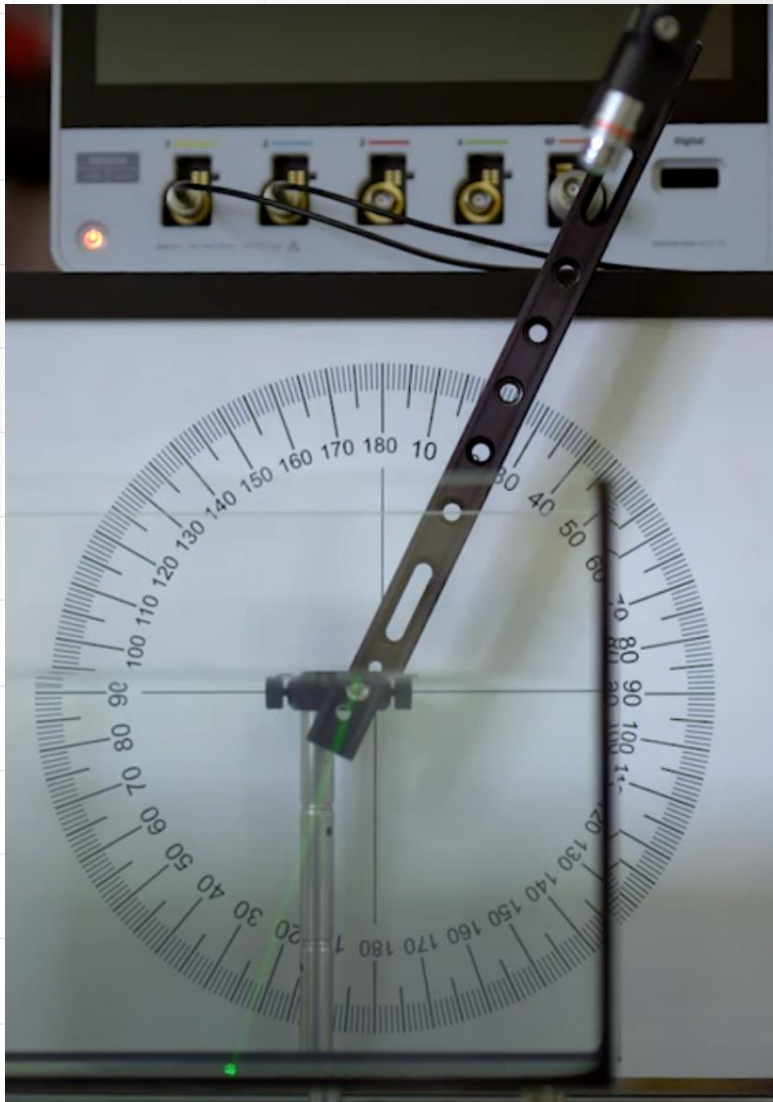
# Odbicie i załamanie światła



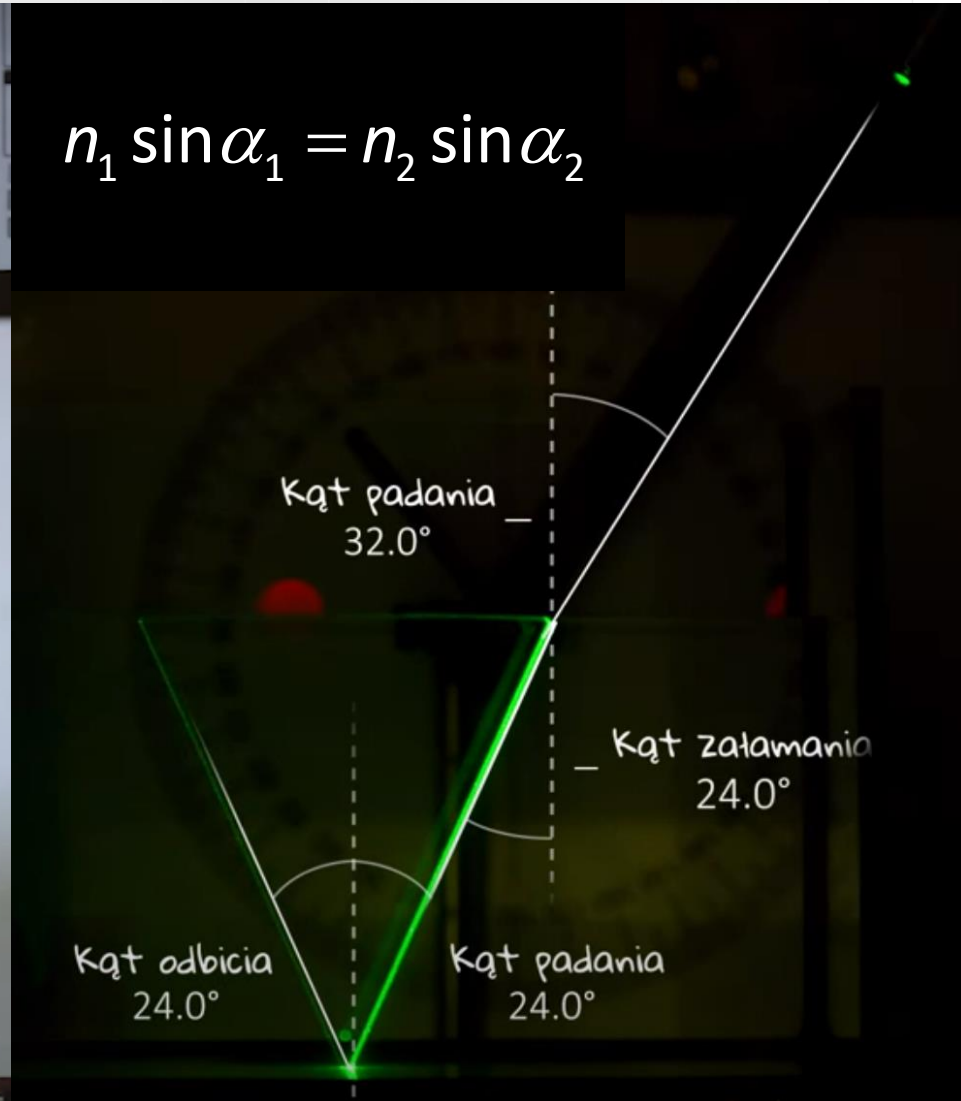
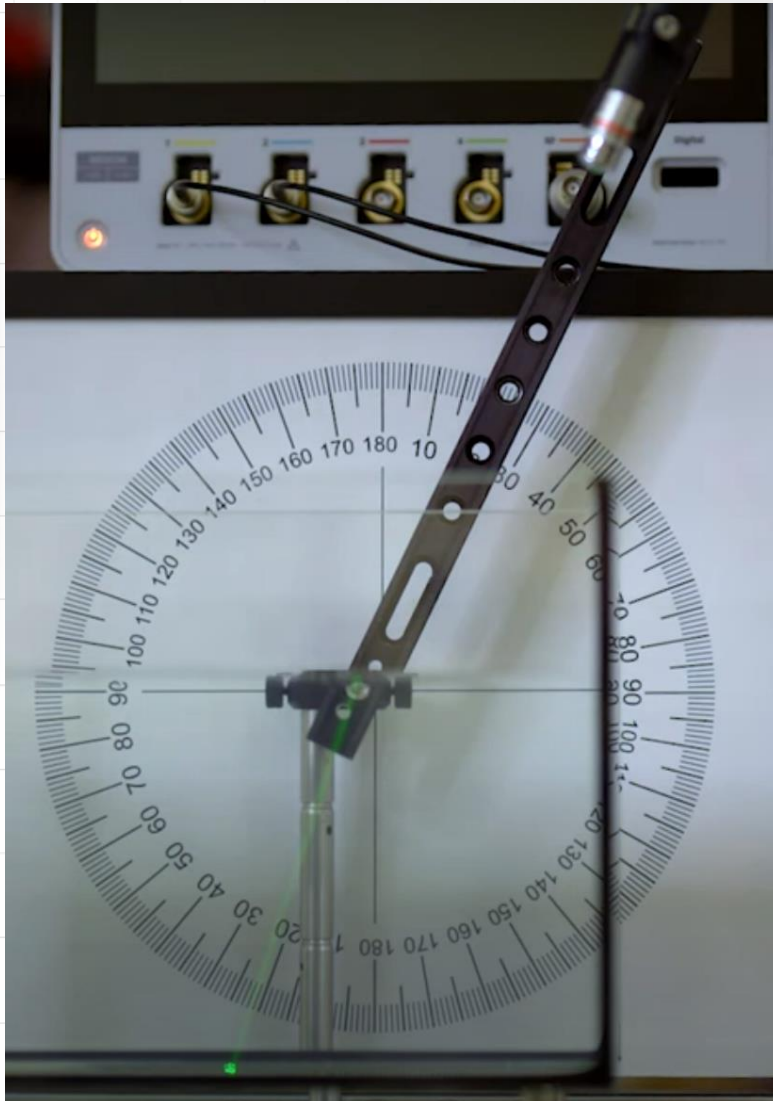
**Prawo odbicia i załamania  
światła - eksperymenty!**

<https://www.youtube.com/watch?v=YnqPODUW-mk>

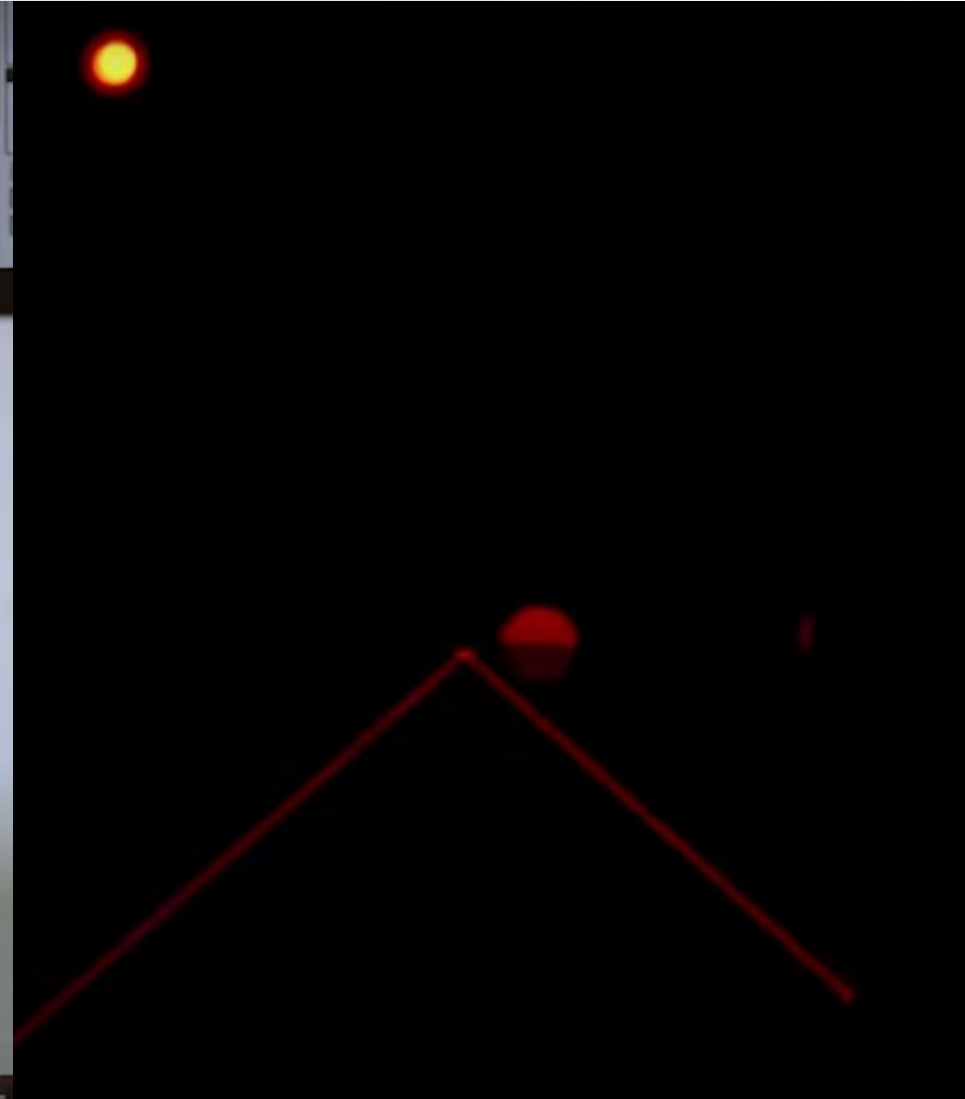
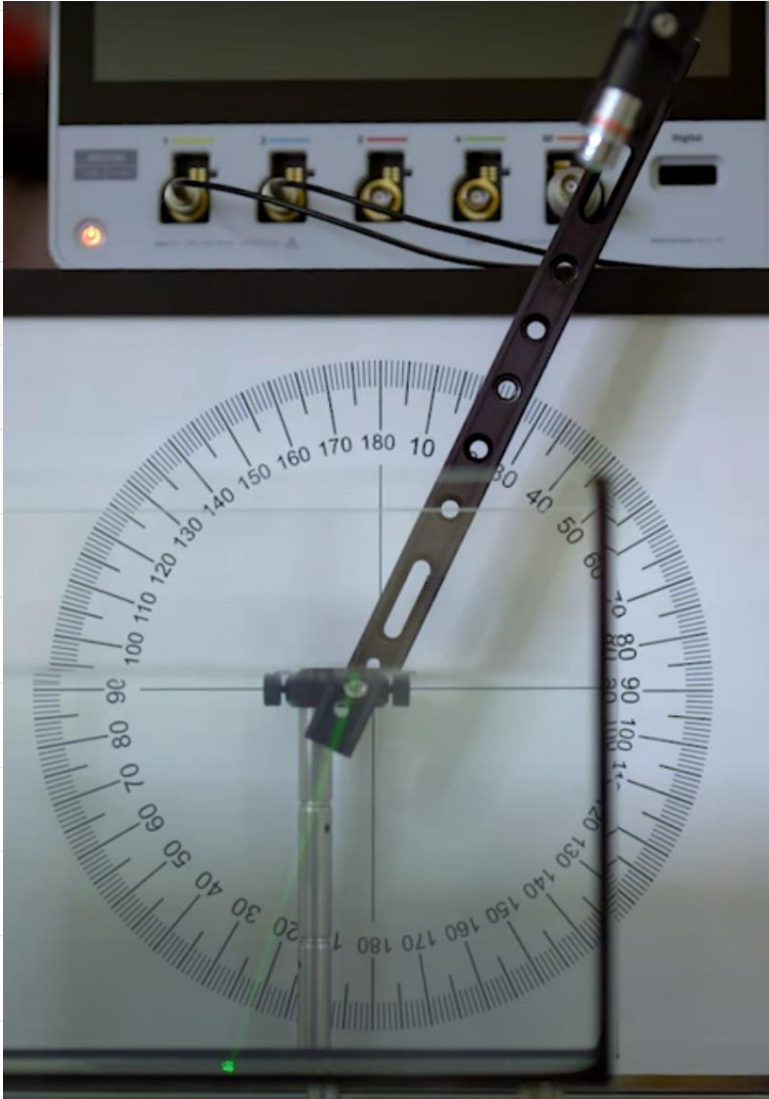
# Odbicie i załamanie światła



# Odbicie i załamanie światła



# Zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia





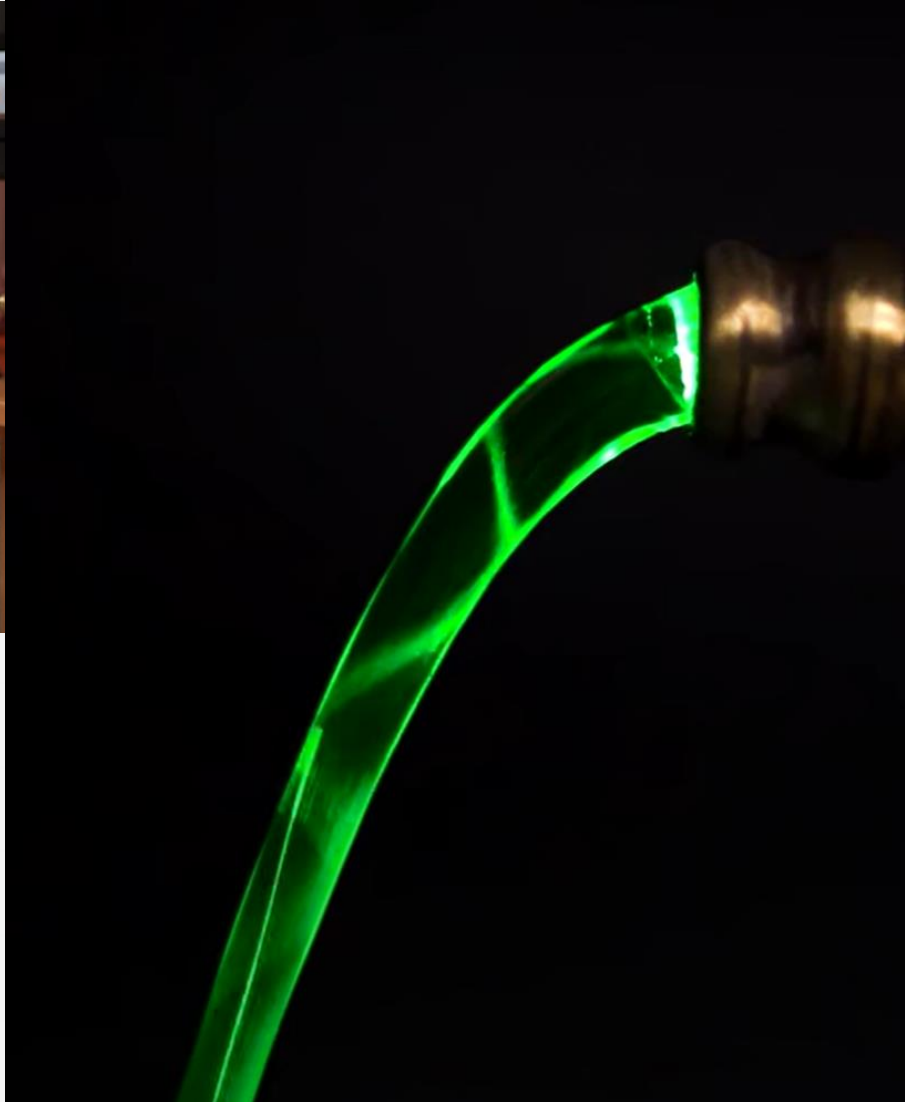
# Zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia



Światłowody - czym są? Jak działają?

<https://www.youtube.com/watch?v=9fznsDFT7Mw>

# Zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia



ak działają?

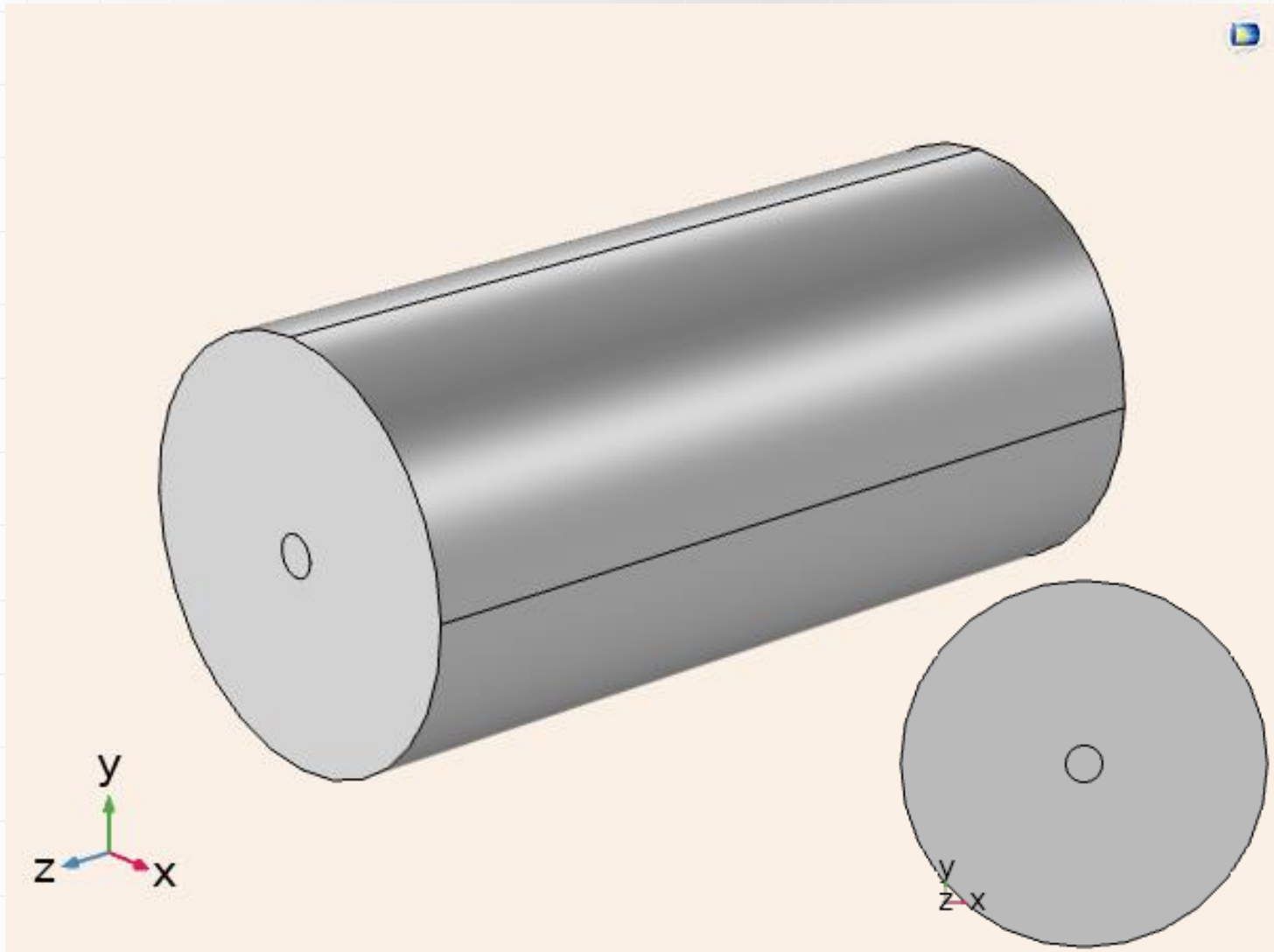
[watch?v=9fznsDFT7Mw](#)





# Światłowodowy i ich właściwości

# Światłowody i ich właściwości



# Światłowody - historia



1841 – **Colladon**

1854 – **Tyndall**

przewodzenie światła w strumieniu wody



1910 – **Hertz, Debye**

teoria falowodu cylindrycznego



1954 – **van Heel, Hopkins, Kao**

włókna pokryte płaszczem



1966 – 1969 **Kao**

wykorzystanie światłowodów  
w telekomunikacji (*Nagroda Nobla 2009*)

# Światłowody – opis propagacji światła

## Równania Maxwella

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

## Równania materiałowe

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$$

## Równanie falowe

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} - \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{P}}{\partial t^2}$$

## Polaryzacja elektryczna

$$\mathbf{P} = \varepsilon_0 \chi^{(1)} \cdot \mathbf{E}$$



# Światłowody – opis propagacji światła

## Równanie falowe

$$\nabla \times \nabla \times \tilde{\mathbf{E}}(\mathbf{r}, \omega) = \varepsilon(\omega) \frac{\omega^2}{c^2} \tilde{\mathbf{E}}(\mathbf{r}, \omega)$$

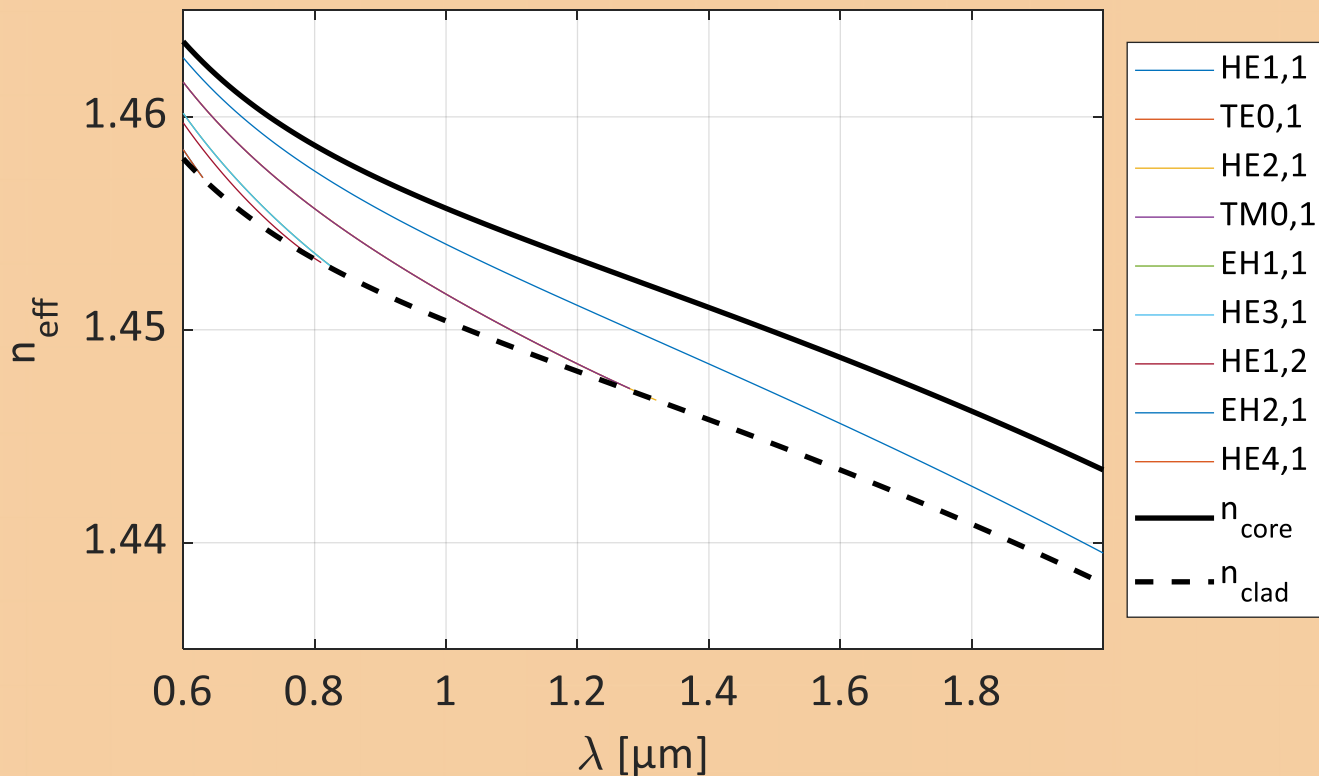
$$\nabla^2 \tilde{\mathbf{E}} + \varepsilon(\omega) \frac{\omega^2}{c^2} \tilde{\mathbf{E}} = 0$$

$$\tilde{\mathbf{E}}(x, y, z) = \tilde{\mathbf{E}}(x, y) \exp(i\beta z)$$

$$\beta = \frac{n_{\text{eff}} \omega}{c}$$

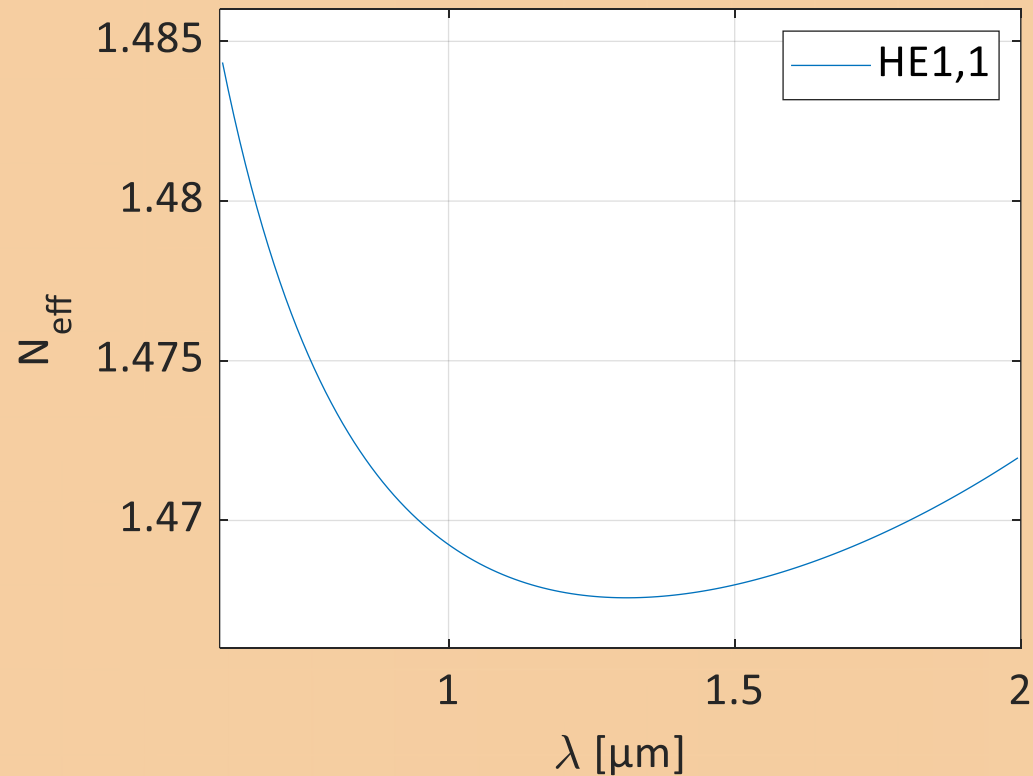
# Światłowody – właściwości

## Efektywny współczynnik załamania



# Światłowody – właściwości

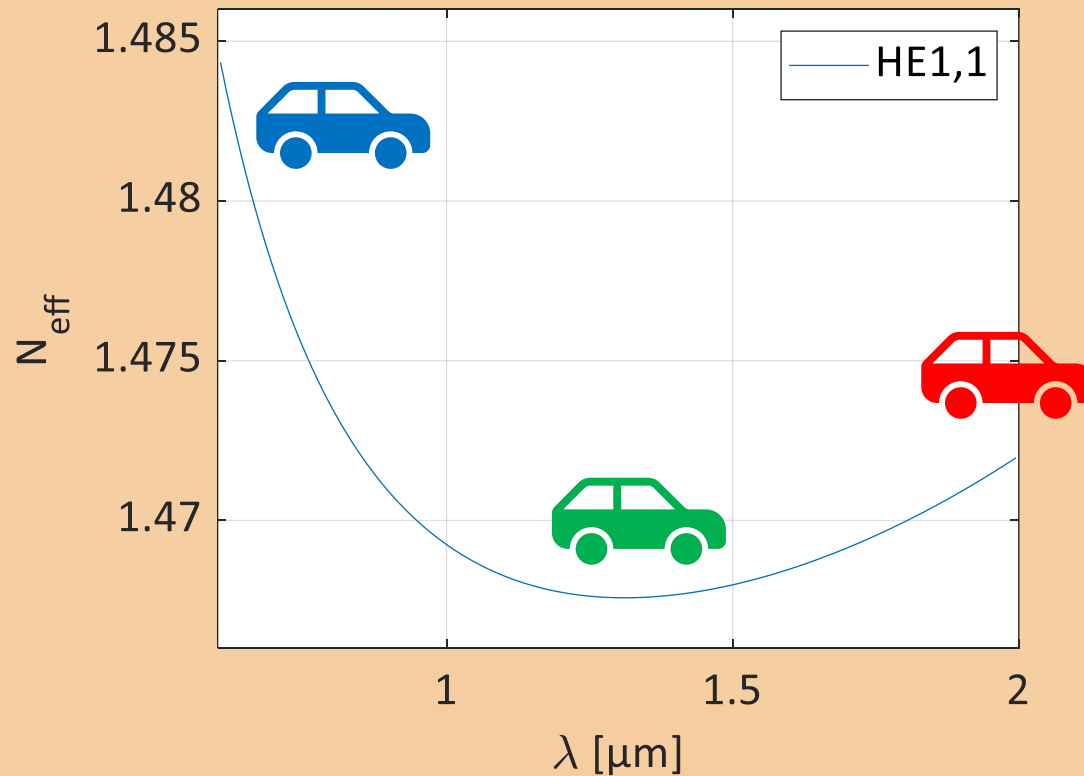
## Grupowy współczynnik załamania





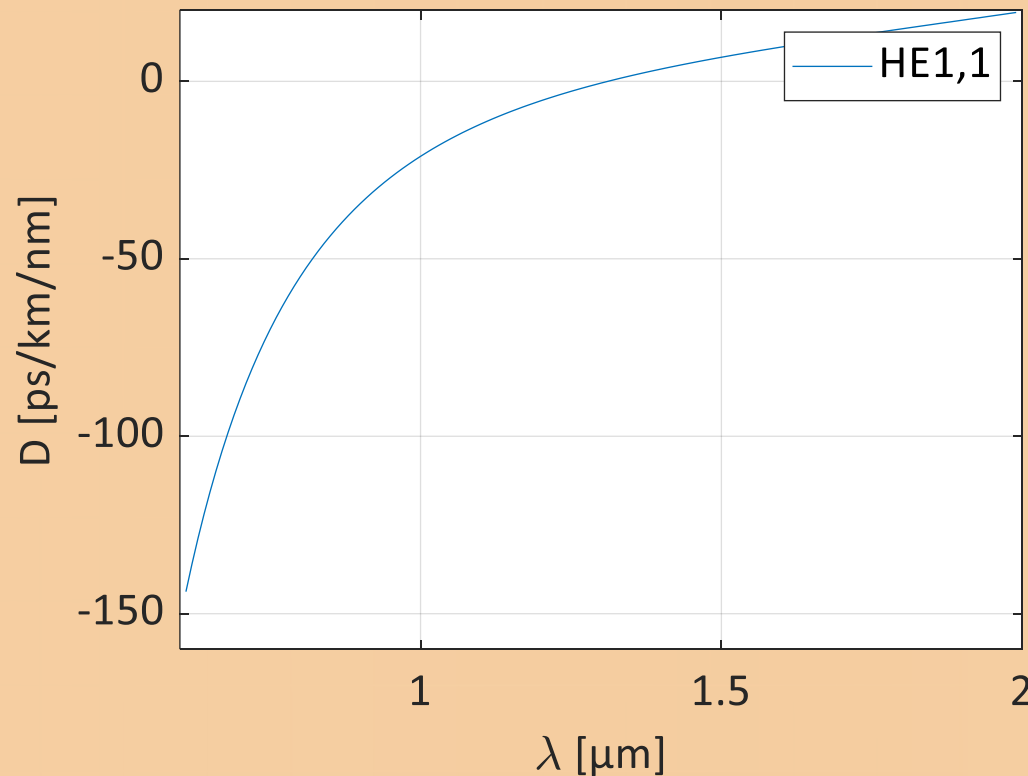
# Światłowody – właściwości

## Grupowy współczynnik załamania



# Światłowody – właściwości

## Dyspersja prędkości grupowej





# Światłowody mikrostrukturalne



# Światłowody mikrostrukturalne

October 1, 1996 / Vol. 21, No. 19 / OPTICS LETTERS 1547

## All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding

J. C. Knight,\* T. A. Birks,\* P. St. J. Russell\* and D. M. Atkin

*Optoelectronics Research Centre, University of Southampton, Southampton, SO17 1BJ, UK*

Received April 8, 1996

We report the fabrication of a new type of optical waveguide: the photonic crystal fiber. It consists of a pure silica core surrounded by a silica-air photonic crystal material with a hexagonal symmetry. The fiber supports a single robust low-loss guided mode over a very broad spectral range of at least 458–1550 nm.

© 1996 Optical Society of America



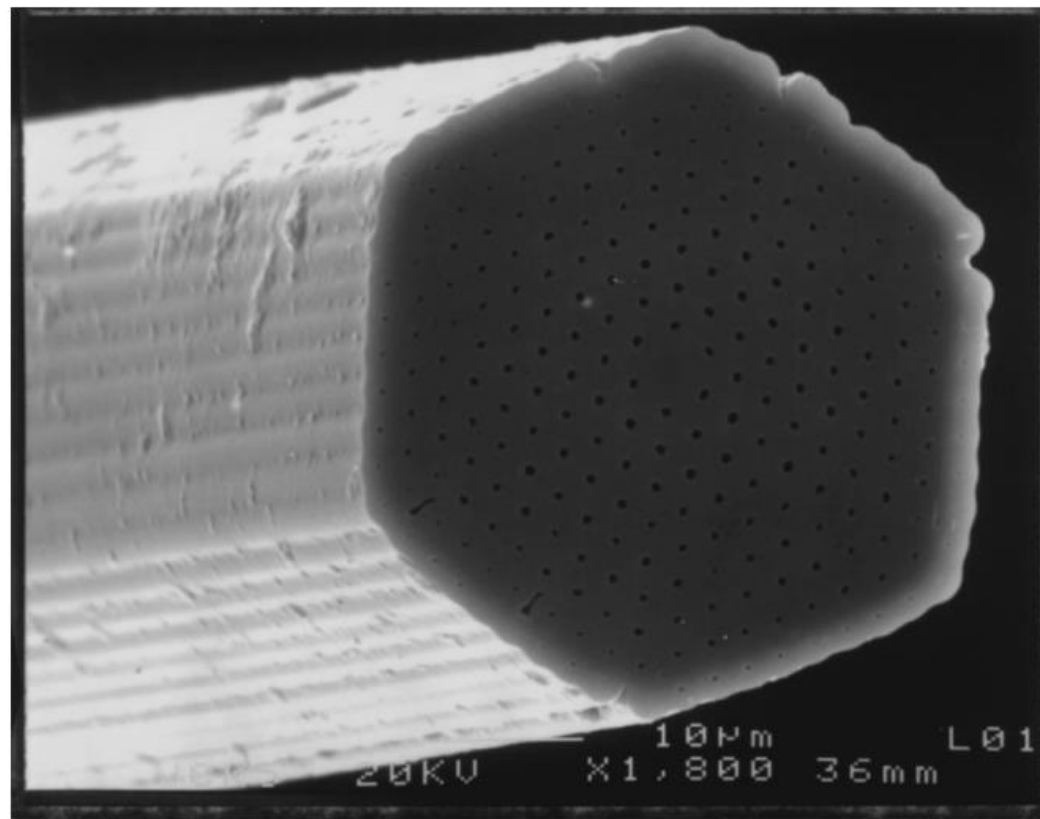
# Światłowody mikrostrukturalne

October 1, 1996 / Vol. 21, No. 19 / OPTICS LETTERS 1547

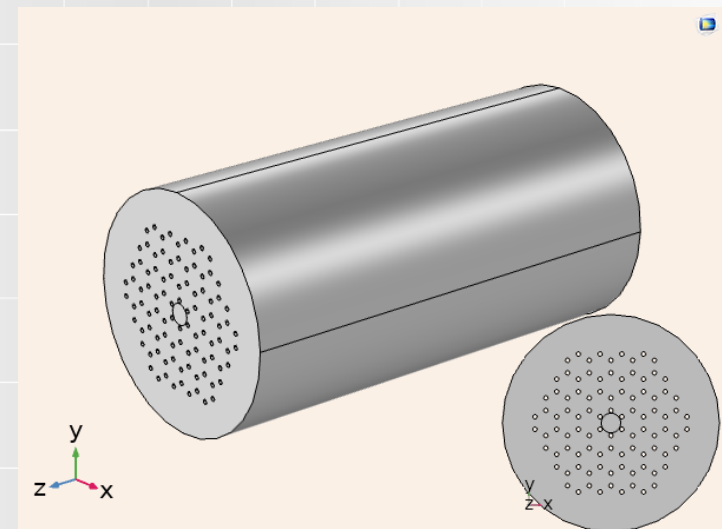
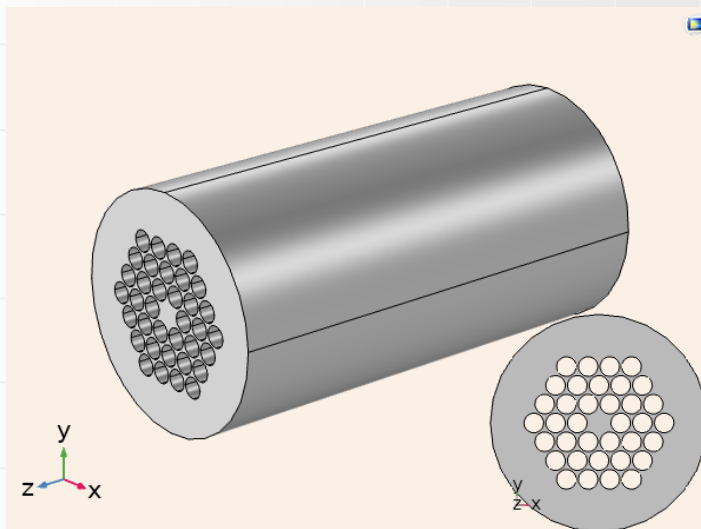
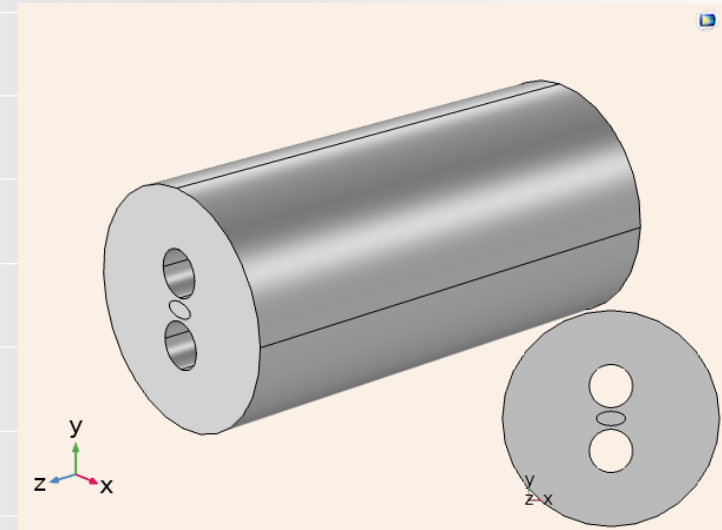
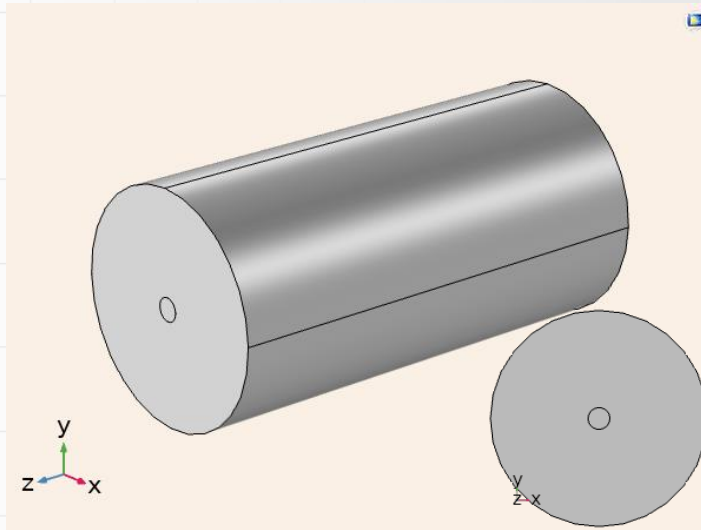
All-silica single-mode optical fiber with

We report  
pure silica  
supports  
© 1996 O

sts of a  
ne fiber  
550 nm.

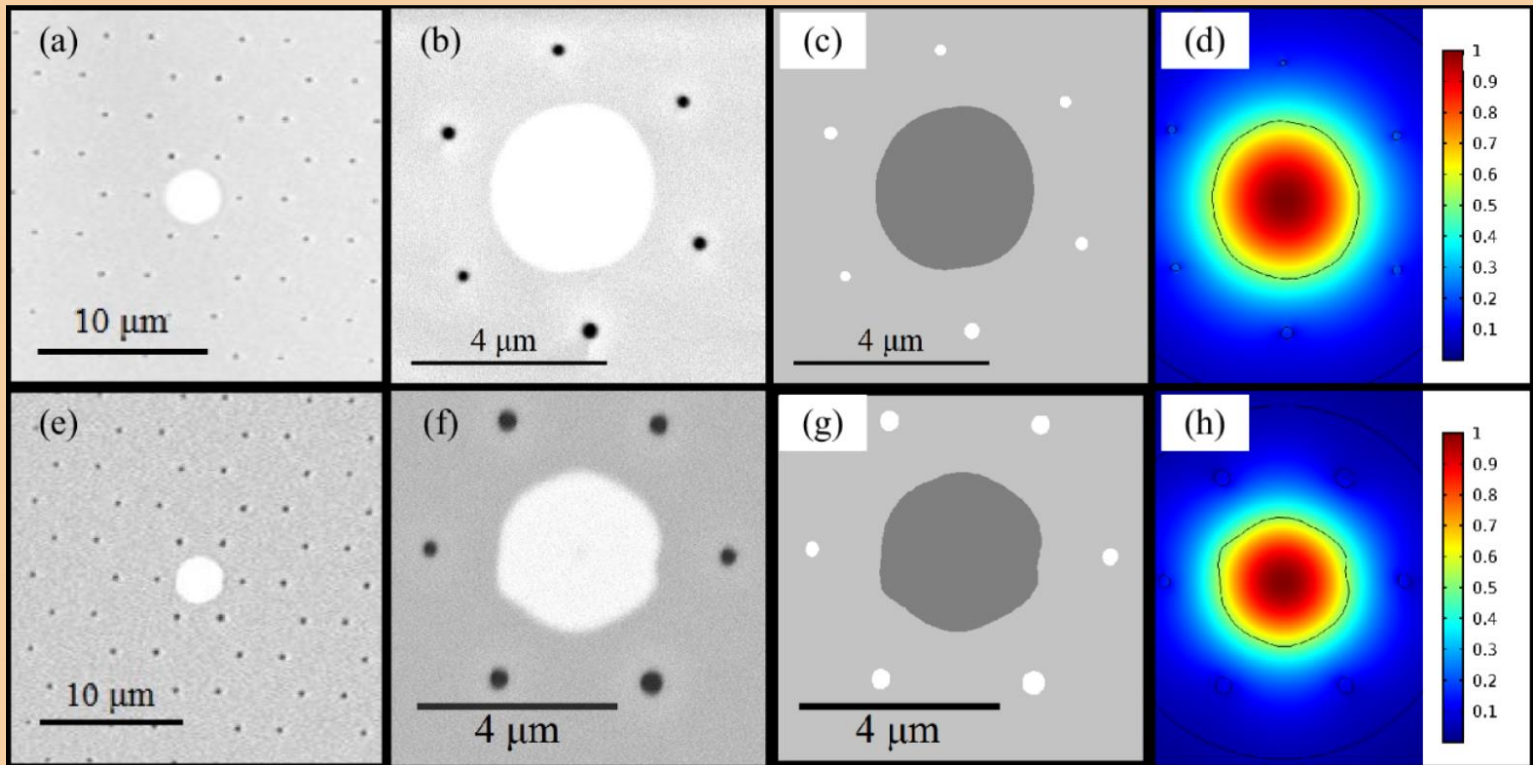


# Światłowody mikrostrukturalne



# Światłowody mikrostrukturalne

**Równanie falowe – metoda elementów skończonych (MES)**







# Zjawiska nieliniowe w światłowodach



# Światłowody – opis propagacji światła

## Równania Maxwella

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

## Równania materiałowe

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$$

## Równanie falowe

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} - \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{P}}{\partial t^2}$$

## Polaryzacja elektryczna

$$\mathbf{P} = \varepsilon_0 \left( \chi^{(1)} \cdot \mathbf{E} + \chi^{(2)} : \mathbf{E}\mathbf{E} + \chi^{(3)} : \mathbf{E}\mathbf{E}\mathbf{E} + \dots \right)$$



# Światłowody – zjawiska nieliniowe

## Uogólnione nieliniowe równanie Schrödingera

- równanie różniczkowe stopnia pierwszego, które rozwiązywane jest jako zagadnienie początkowe
- zmienną niezależną jest dystans propagacji  $z$ , zmienną zależną jest obwiednia amplitudy impulsu  $A(z,t)$
- warunek początkowy zadajemy określając kształt impulsu w czasie na wejściu do włókna  $A(0,t)$

$$\frac{\partial A}{\partial z} = \underbrace{-\frac{\alpha}{2} A + i \sum_{n=1}^{\infty} \frac{i^n \beta_n}{n!} \frac{\partial^n A}{\partial t^n}}_{D(A)} + \underbrace{i\gamma A \int_0^{\infty} R(t') |A(z, t-t')|^2 dt'}_{N(A)}$$



# Światłowody – zjawiska nieliniowe

## Uogólnione nieliniowe równanie Schrödingera

$$\frac{\partial A}{\partial z} = \underbrace{-\frac{\alpha}{2} A + i \sum_{n=1}^{\infty} \frac{i^n \beta_n}{n!} \frac{\partial^n A}{\partial t^n}}_{D(A)} + \underbrace{i \gamma A \int_0^{\infty} R(t') |A(z, t - t')|^2 dt'}_{N(A)}$$

- $\alpha$  – współczynnik tłumienia
- $\beta_n$  – współczynniki rozwinięcia stałej propagacji w szereg Taylora wokół częstości centralnej  $\omega_0$

$$\beta(\omega) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\beta_n}{n!} (\omega - \omega_0)^n$$



# Światłowody – zjawiska nieliniowe

## Uogólnione nieliniowe równanie Schrödingera

$$\frac{\partial A}{\partial z} = \underbrace{-\frac{\alpha}{2} A + i \sum_{n=1}^{\infty} \frac{i^n \beta_n}{n!} \frac{\partial^n A}{\partial t^n}}_{D(A)} + \underbrace{i \gamma A \int_0^{\infty} R(t') |A(z, t - t')|^2 dt'}_{N(A)}$$

- $\gamma$  – współczynnik nieliniowości
- $R(t')$  – funkcja odpowiedzi opisująca rozpraszanie Ramana

$$\gamma = \frac{n_2 \omega_0}{c A_{\text{eff}}}$$

$$R(t') = \underbrace{(1 - f_r) \delta(t')}_{\text{odpowiedź elektronowa}} + \underbrace{f_r (\tau_1^{-2} + \tau_2^{-2}) \tau_1 \exp\left(-\frac{t'}{\tau_2}\right) \sin\left(\frac{t'}{\tau_1}\right)}_{\text{odpowiedź jądrowa - rozpraszanie Ramana}}$$



# Światłowody – zjawiska nieliniowe

## Nieliniowe równanie Schrödingera

$$\frac{\partial A}{\partial z} = \left( -\frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} + i\gamma |A|^2 \right) A$$

## Zależne od czasu równanie Schrödingera

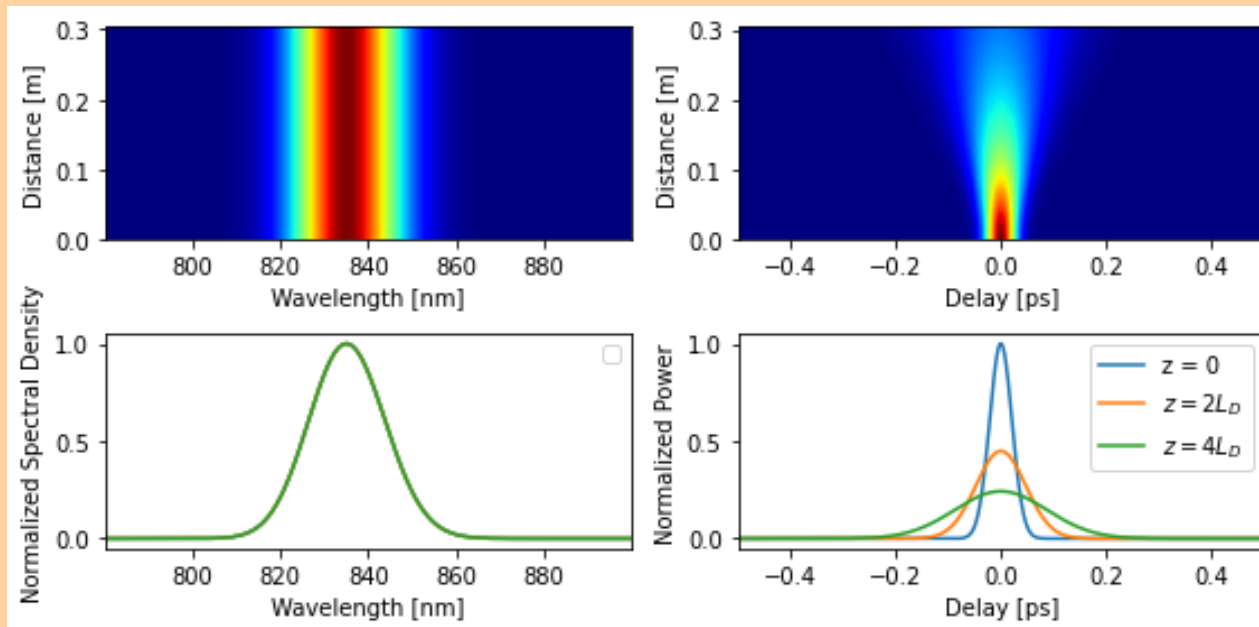
$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi = \left( -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V \right) \Psi$$

# Przegląd zjawisk

## Poszerzenie czasowe impulsu gaussowskiego

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = i\gamma |A|^2 A$$

$$A(0,t) = \sqrt{P_0} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{T}{T_0}\right)^2\right)$$



$$L_D = \frac{T_0^2}{|\beta_2|}$$





# Przegląd zjawisk

## Samomodulacja fazy

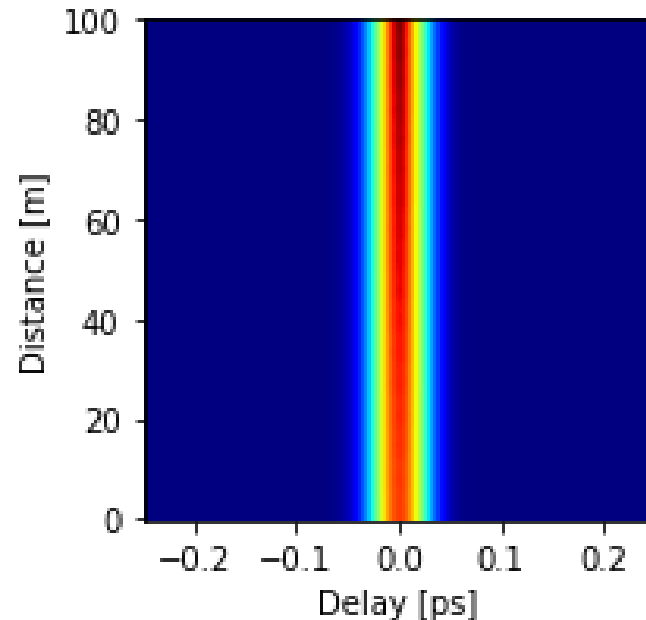
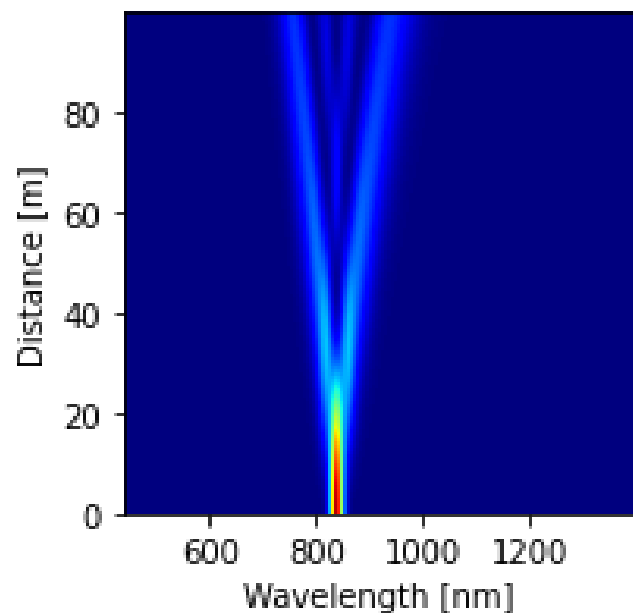
$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = i\gamma |A|^2 A$$

- impuls doznaje dodatkowego przesunięcia w fazie  $\varphi_{NL}$ , które zależy od mocy
- powoduje to ciągłą generację nowych częstotliwości i poszerzenie spektralne impulsu
- w obszarze początkowym (końcowym) impulsu pojawiają się częstotliwości mniejsze (większe) niż częstotliwość centralna

# Przegląd zjawisk

## Samomodulacja fazy

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = i\gamma |A|^2 A$$



$$L_{\text{NL}} = \frac{1}{\gamma P_0}$$

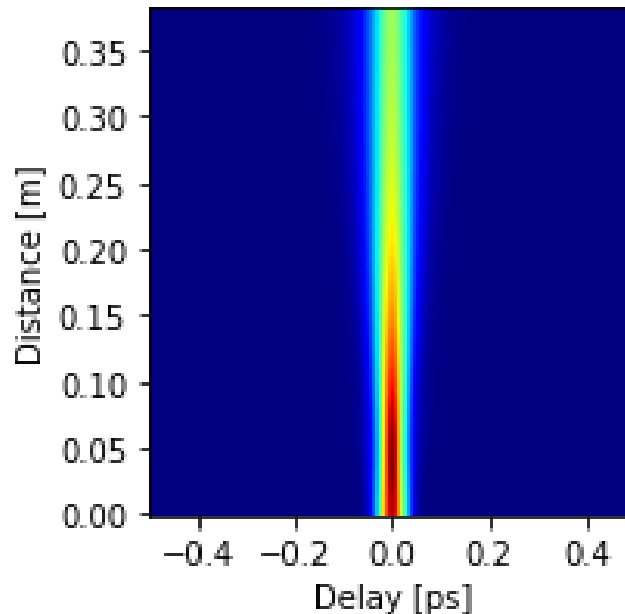
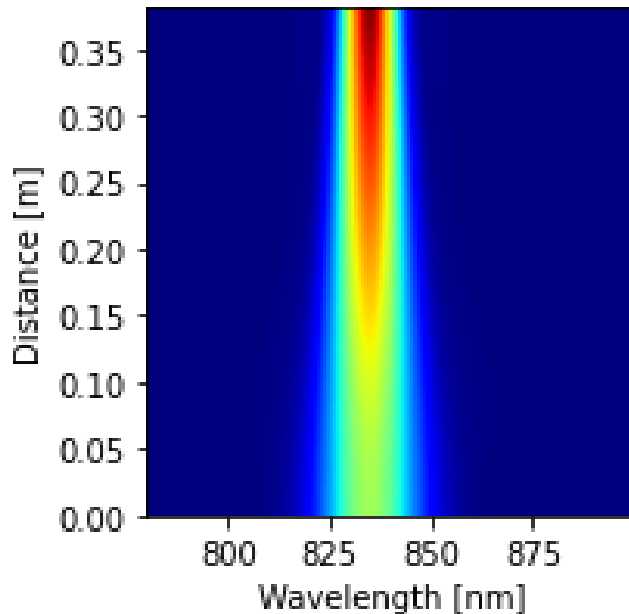
# Przegląd zjawisk

## Formowanie solitonów

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = i\gamma |A|^2 A$$

$$\beta_2 < 0$$

$$L_{\text{NL}} = L_D$$

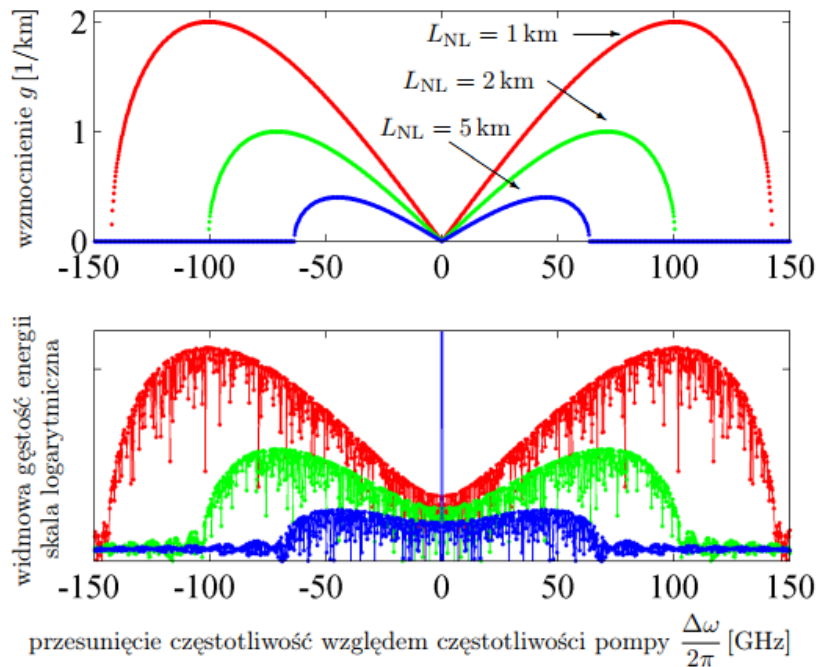




# Przegląd zjawisk

## Niestabilność modulacyjna

- propagacji fali ciągłej w reżimie dyspersji anomalnej towarzyszy generacja bocznych pasm



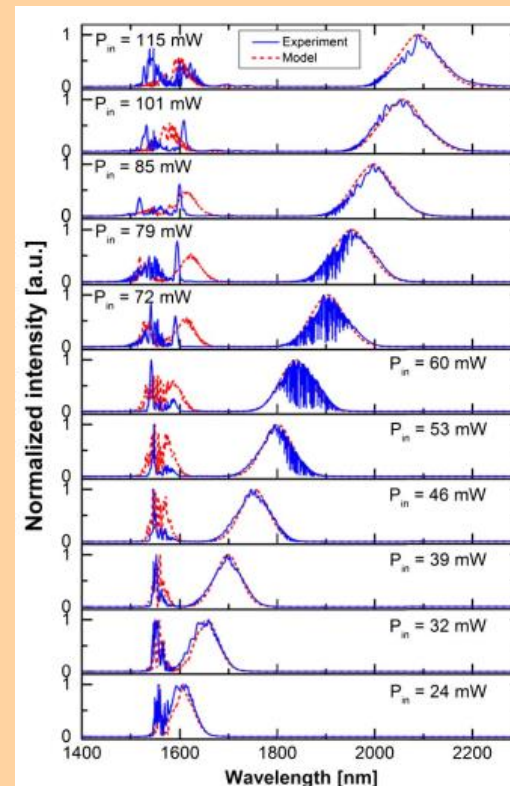
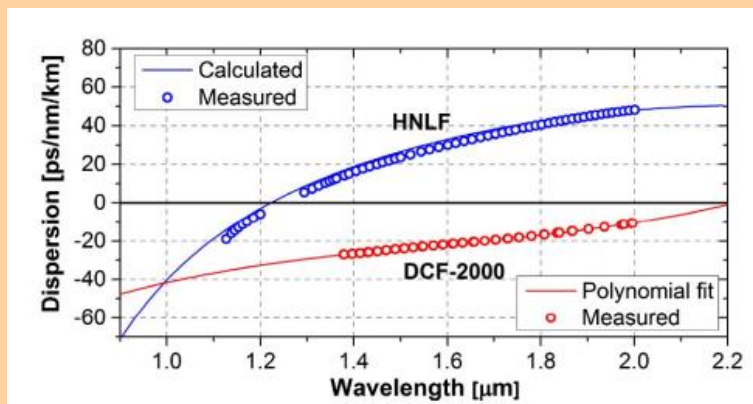
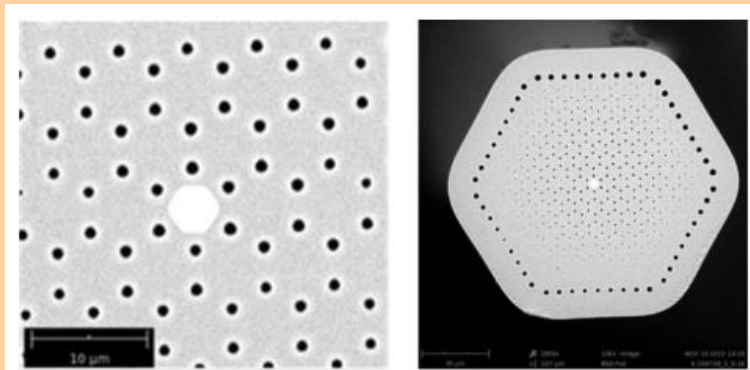
$$\Omega_c^2 = \frac{4\gamma P_0}{|\beta_2|} = \frac{4}{|\beta_2| L_{NL}}$$

$$g(\Omega) = |\beta_2 \Omega| \sqrt{\Omega_c^2 - \Omega^2}$$

$$|\Omega| < \Omega_c \quad \Omega_{\max} = \pm \frac{\Omega_c}{\sqrt{2}}$$

# Przegląd zjawisk

## Rozpraszanie Ramana





# **Generacja superkontinuum w światłowodach**



# Generacja superkontinuum

VOLUME 24, NUMBER 11

PHYSICAL REVIEW LETTERS

16 MARCH 1970

## EMISSION IN THE REGION 4000 TO 7000 Å VIA FOUR-PHOTON COUPLING IN GLASS

R. R. Alfano and S. L. Shapiro

Bayside Research Center of General Telephone & Electronics Laboratories Incorporated,  
Bayside, New York 11360

(Received 9 January 1970)

Four-photon stimulated scattering has been observed in borosilicate glass under high-power 5300-Å picosecond-pulse excitation. Parametric emission is generated from 4000 to 7000 Å from filaments formed in the glass, the wavelength depending on the emission angle.

- szkło borokrzemowe
- impulsy  $\sim 5$  mJ, czas trwania 4-8 ps, długość fali 530 nm
- uzyskano widmo w zakresie 400-700 nm





# Superkontinuum w światłowodach

## **New nanosecond continuum for excited-state spectroscopy**

Chinlon Lin and R. H. Stolen

*Bell Telephone Laboratories, Holmdel, New Jersey 07733*

(Received 20 October 1975; in final form 1 December 1975)

A new nanosecond broad-band continuum source is described. The continuum is generated by nonlinear optical processes in fiber waveguides pumped with a 20-kW 10-ns dye-laser pulse of broad spectral width ( $\sim 150 \text{ \AA}$ ). The continuum has a bandwidth of several thousand  $\text{cm}^{-1}$  in the visible with a total power  $\sim 1$  kW. The new continuum is in many aspects superior to previously known continuum sources for nanosecond time-resolved excited-state spectroscopy.

- światłowód krzemionkowy (średnica rdzenia  $7 \mu\text{m}$ )
- 0,7-1,2 kW moc pompy
- superkontinuum w zakresie 434-614 nm
- poszerzenie dzięki wymuszonemu rozpraszaniu Ramana i samomodulacji fazy (dyspersja normalna)



# Superkontinuum w światłowodach

January 1, 2000 / Vol. 25, No. 1 / OPTICS LETTERS

## Visible continuum generation in air-silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion at 800 nm

**Jinendra K. Ranka, Robert S. Windeler, and Andrew J. Stentz**

*Bell Laboratories, Lucent Technologies, 700 Mountain Avenue, Murray Hill, New Jersey 070974*

Received October 13, 1999

We demonstrate experimentally for what is to our knowledge the first time that air-silica microstructure optical fibers can exhibit anomalous dispersion at visible wavelengths. We exploit this feature to generate an optical continuum 550 THz in width, extending from the violet to the infrared, by propagating pulses of 100-fs duration and kilowatt peak powers through a microstructure fiber near the zero-dispersion wavelength.

© 2000 Optical Society of America



# Superkontinuum w światłowodach

January 1, 2000 / Vol. 25, No. 1 / OPTICS LETTERS

1,7  $\mu\text{m}$  średnica rdzenia  
1,3  $\mu\text{m}$  średnice otworów  
powietrznych

Generation in air-silica microstructure  
anomalous dispersion at 800 nm

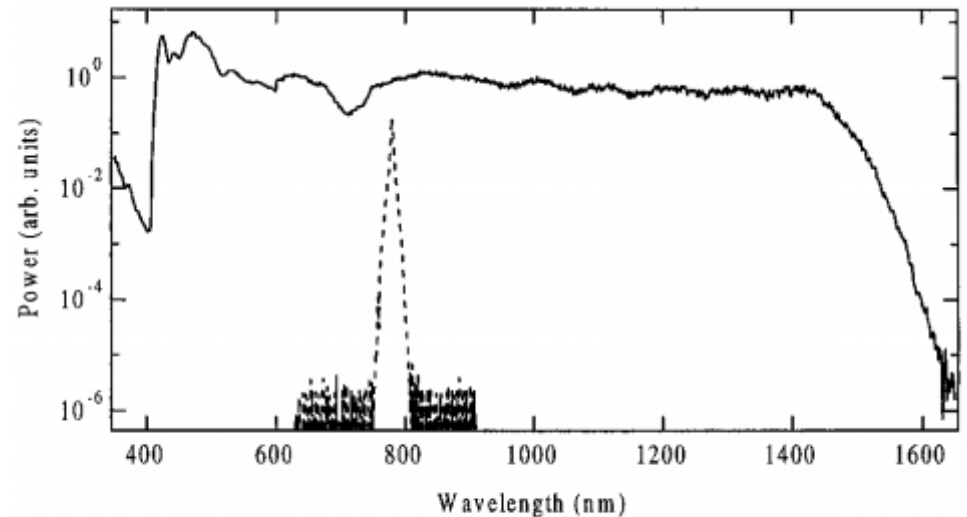
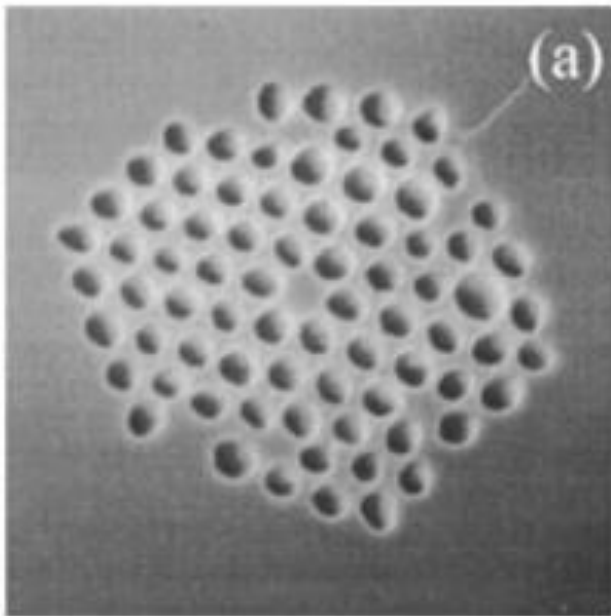


Fig. 4. Optical spectrum of the continuum generated in a 75-cm section of microstructure fiber. The dashed curve shows the spectrum of the initial 100-fs pulse.



# Superkontinuum w światłowodach

550 J. Opt. Soc. Am. B/Vol. 27, No. 3/March 2010

Alexander M. Heidt

## Pulse preserving flat-top supercontinuum generation in all-normal dispersion photonic crystal fibers

Alexander M. Heidt<sup>1,2,\*</sup>

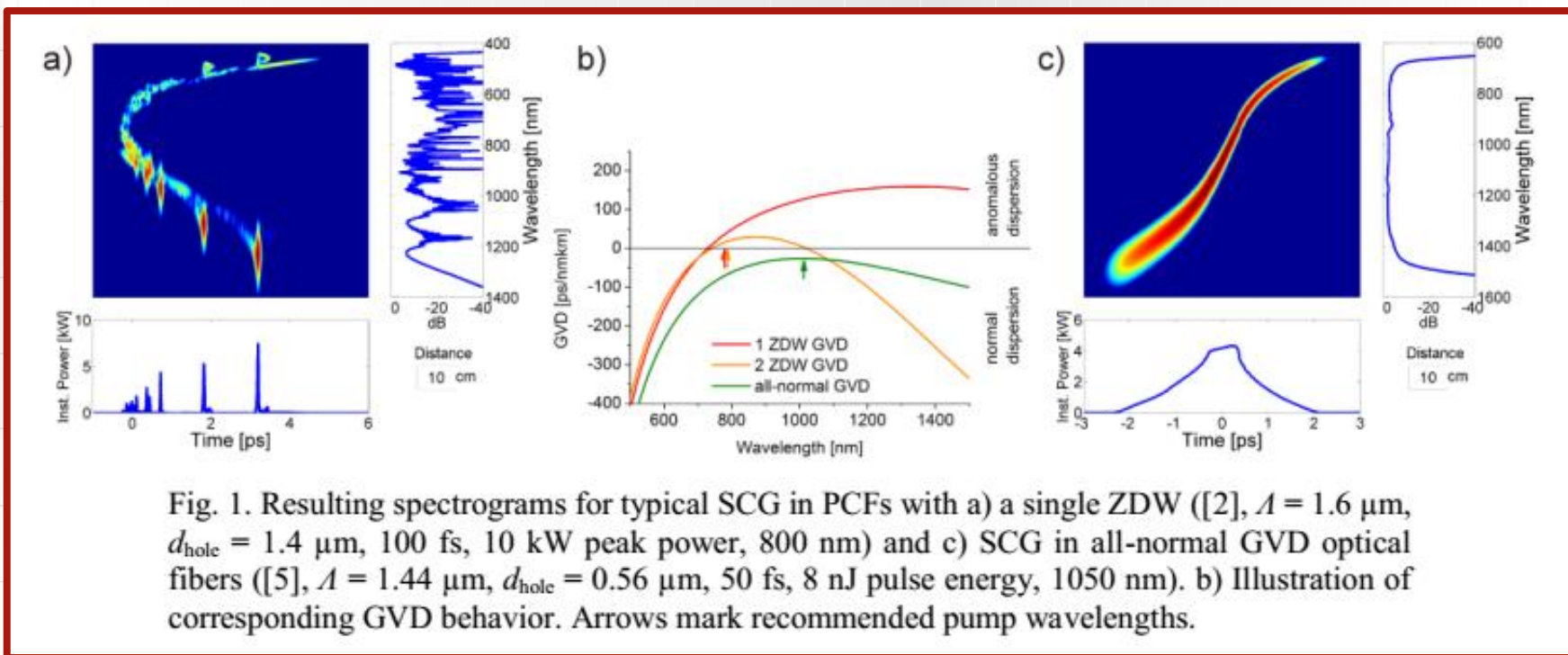
<sup>1</sup>*Laser Research Institute, Physics Department, University of Stellenbosch,  
Private Bag X1,  
Matieland 7602, South Africa*

<sup>2</sup>*Institute of Photonic Technology, Albert-Einstein-Str. 9, 07745 Jena, Germany*

*\*Corresponding author: heidt@sun.ac.za*

Received December 15, 2009; accepted December 26, 2009;  
posted January 12, 2010 (Doc. ID 121318); published February 25, 2010

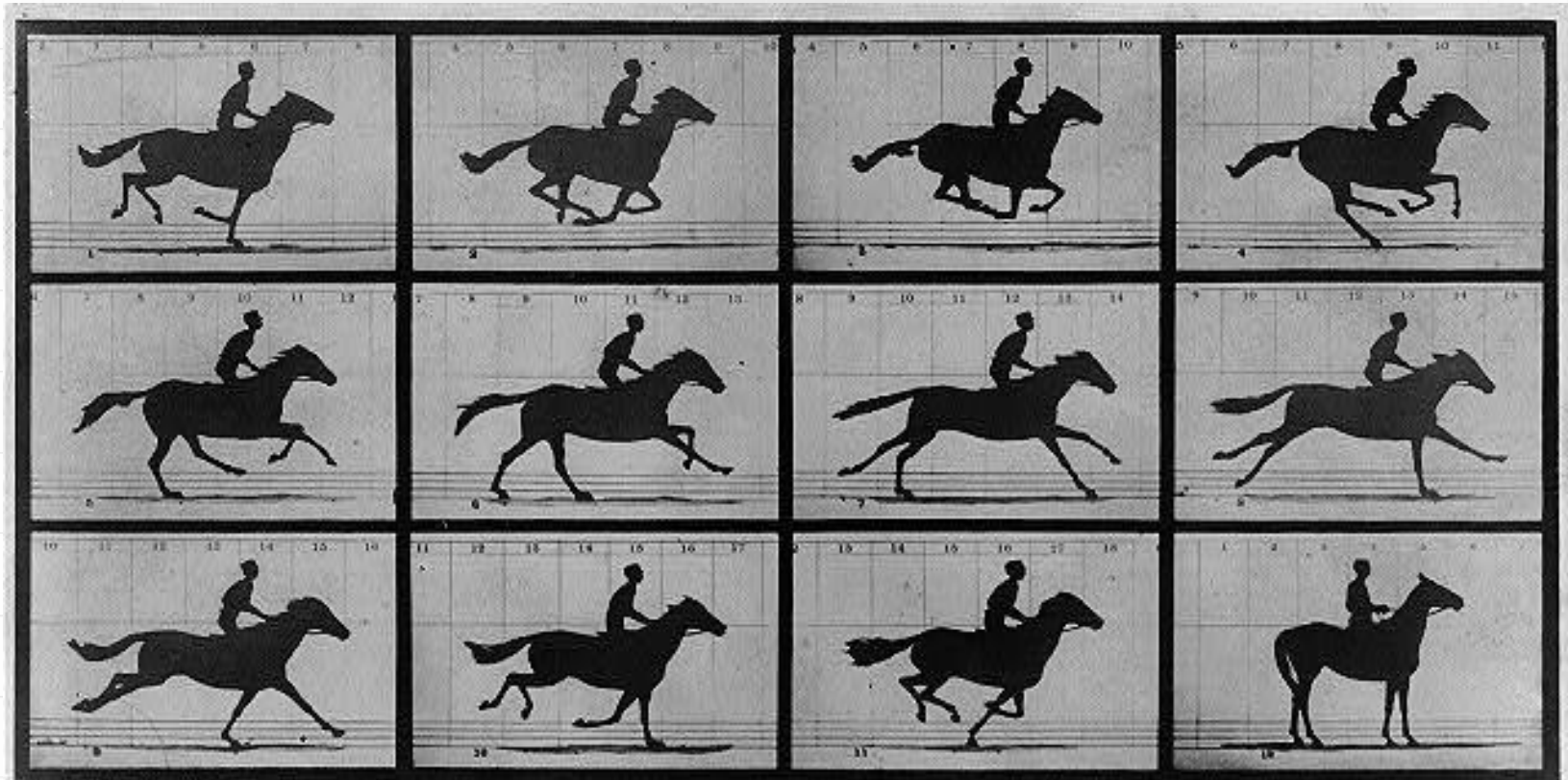
# Superkontinuum w światłowodach



A. Hartung, A. M. Heidt, H. Bartelt, Opt. Express 19(8): 7742 (2011)



# Superkontinuum w światłowodach



Copyright, 1875, by MUYBRIDGE.

MORSE'S Gallery, 417 Montgomery St., San Francisco.

## THE HORSE IN MOTION.

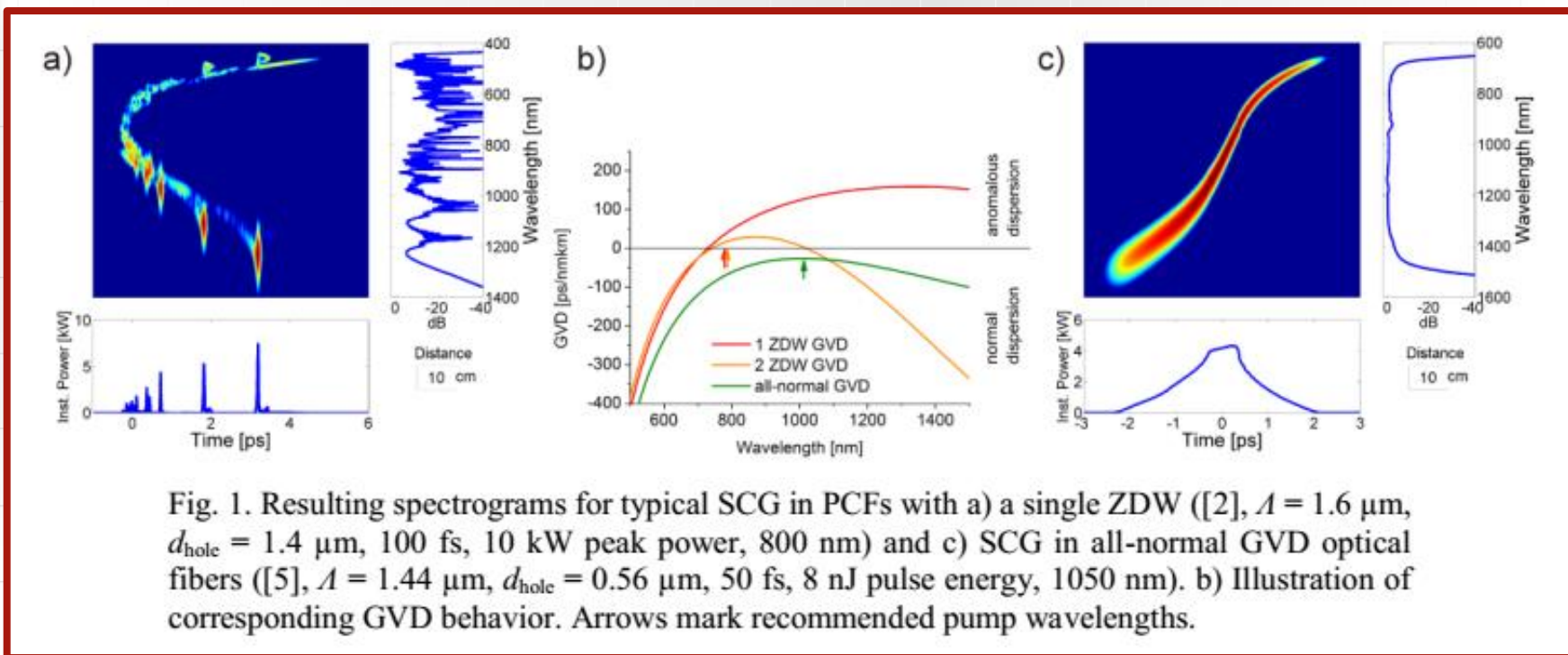
Illustrated by  
MUYBRIDGE.

AUTOMATIC ELECTRO-PHOTOGRAPH.

"SALLIE GARDNER," owned by LELAND STANFORD; running at a 140 gait over the Palo Alto track, 19th June, 1875.

The negatives of these photographs were made at intervals of twenty-seven inches of distance, and about the twenty-fifth part of a second of time; they illustrate consecutive positions assumed in each twenty-seven inches of progress during a single stride of the horse. The vertical lines were twenty-seven inches apart; the horizontal lines represent elevations of four inches each. The exposure of each negative was less than the two-thousandth part of a second.

# Superkontinuum w światłowodach

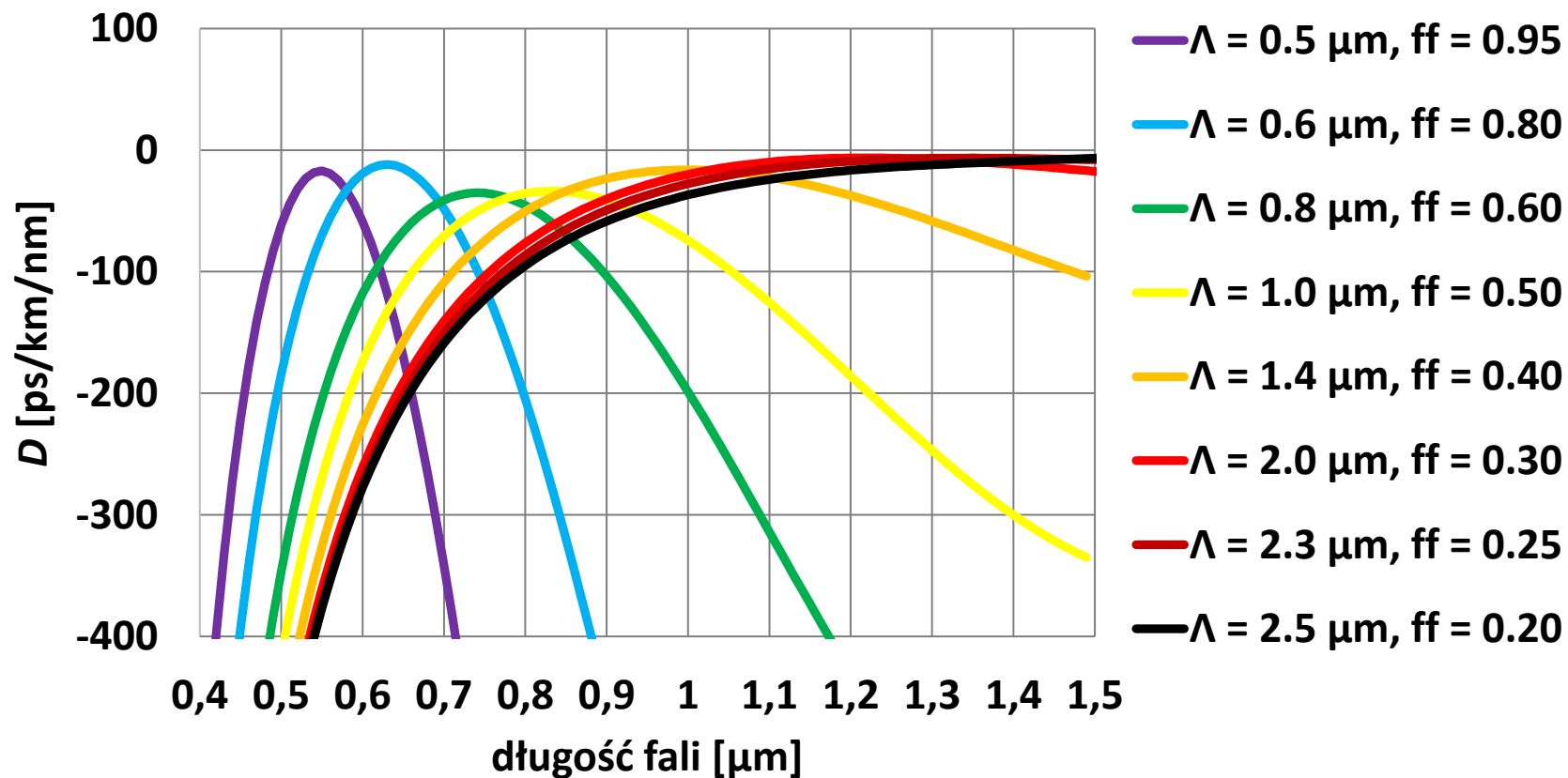


A. Hartung, A. M. Heidt, H. Bartelt, Opt. Express 19(8): 7742 (2011)



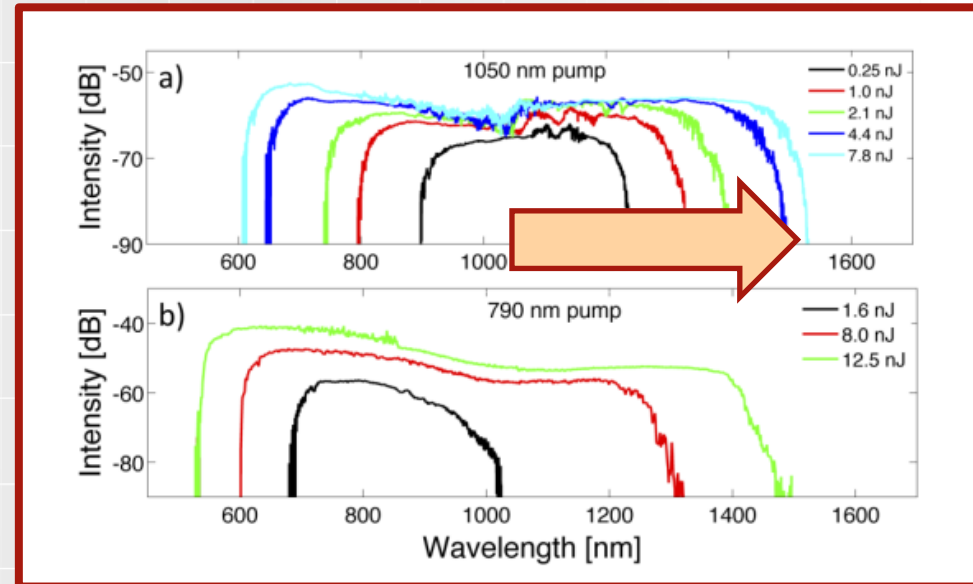
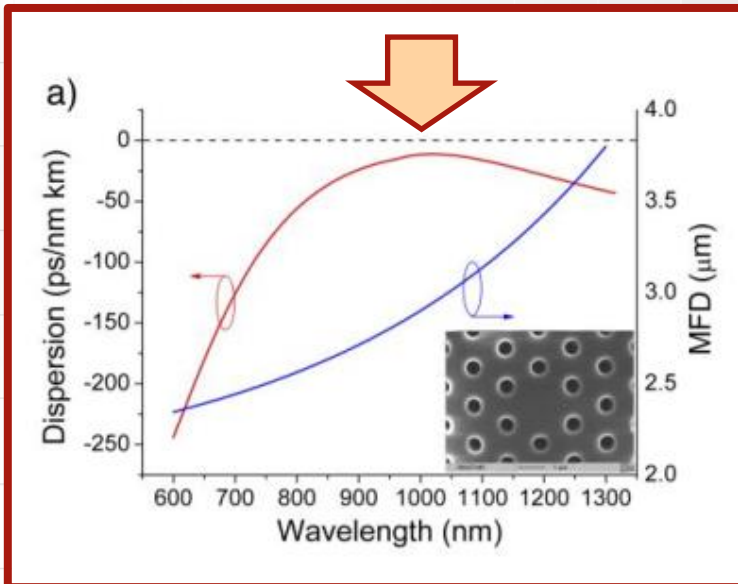


# Superkontinuum w światłowodach

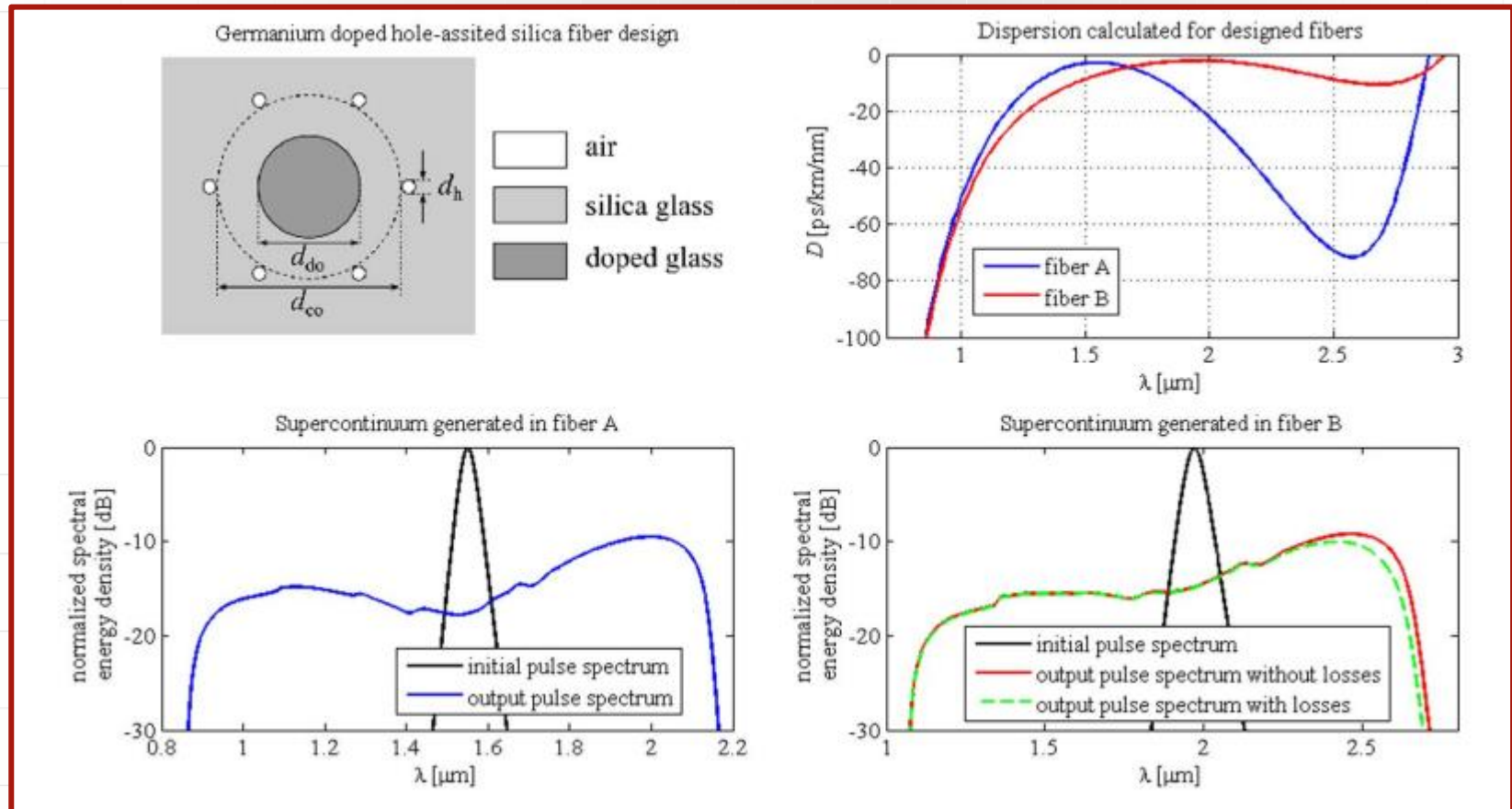


na podstawie: A. Hartung, A. M. Heidt, H. Bartelt, Opt. Express 19(8): 7742 (2011)

# Superkontinuum w światłowodach

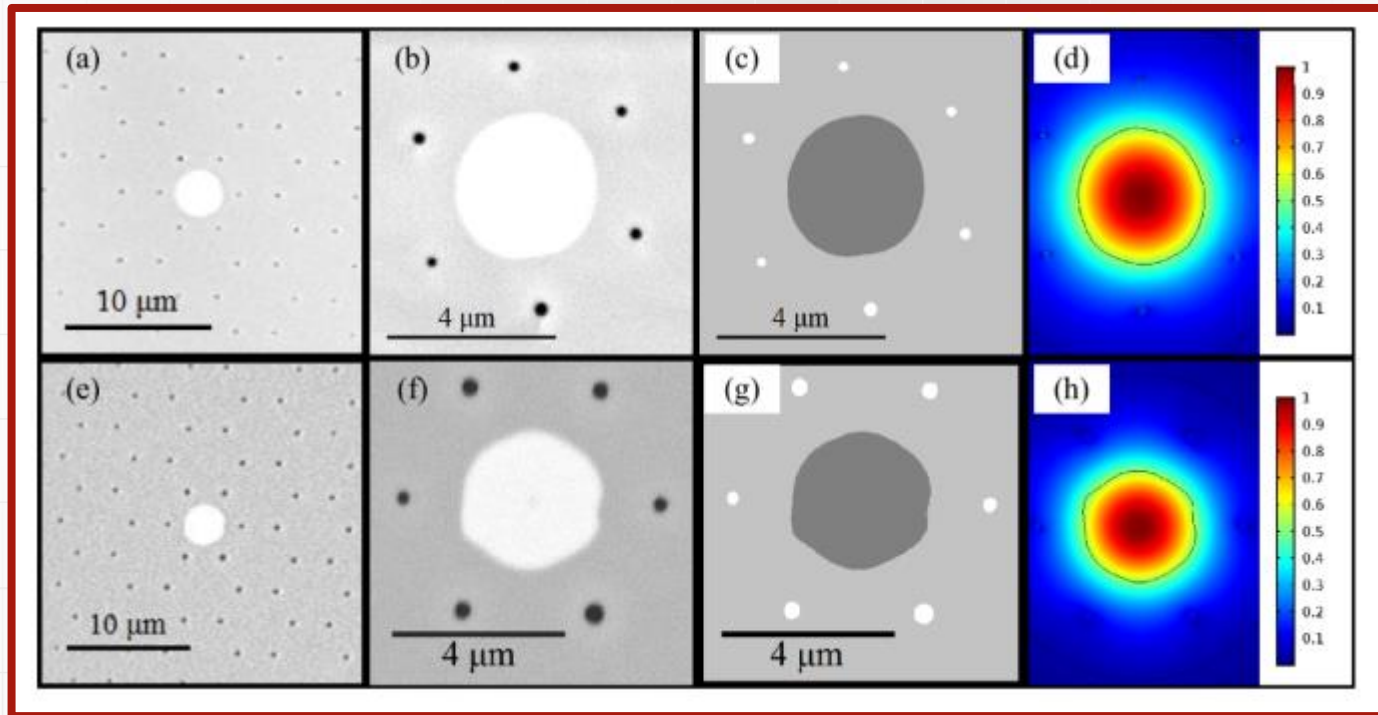


# Superkontinuum w światłowodach



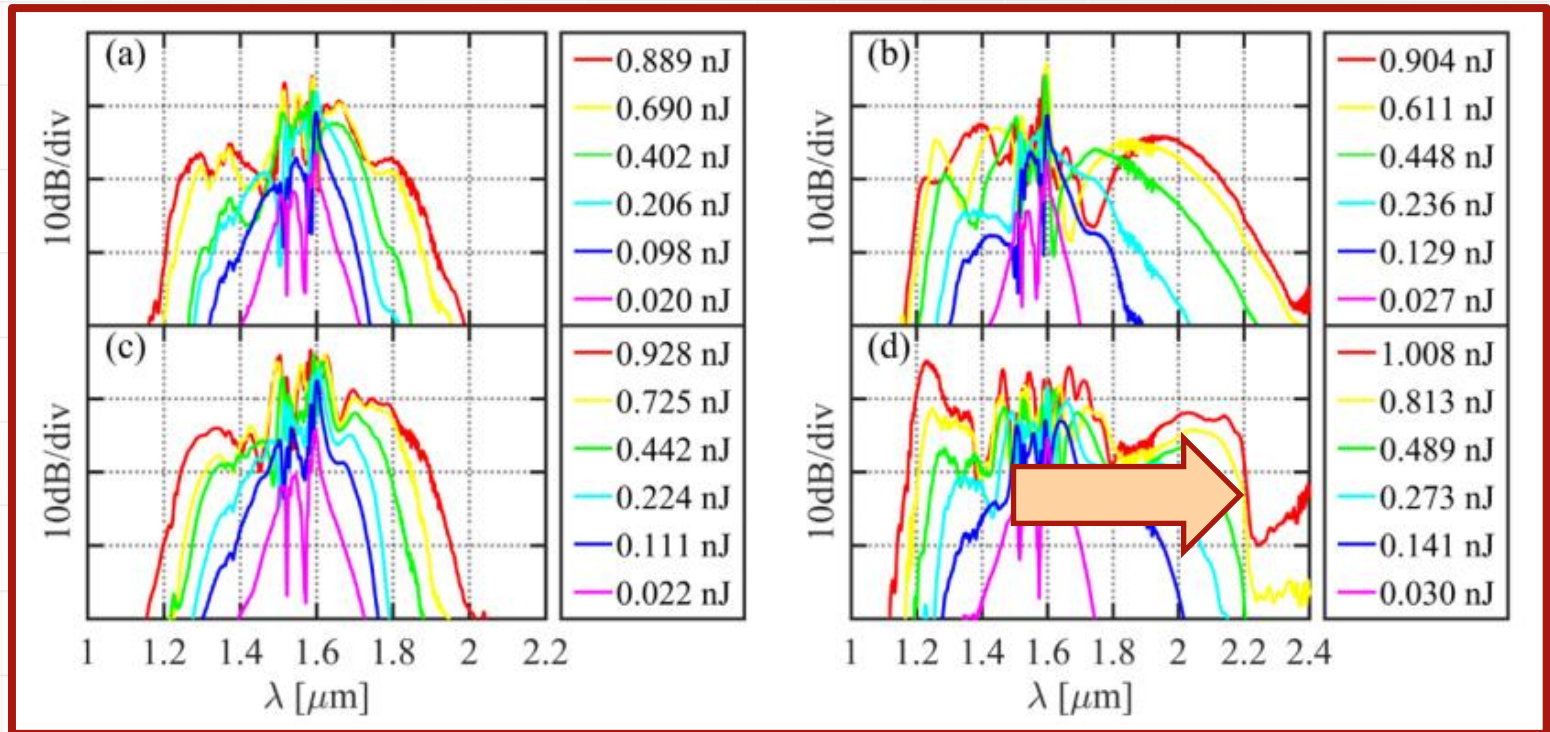


# Superkontinuum w światłowodach



K. Tarnowski, T. Martynkien, P. Mergo, K. Poturaj, G. Soboń, W. Urbańczyk, Coherent supercontinuum generation up to 2.2 μm in an all-normal dispersion microstructured silica fiber, *Opt. Express* 24(26): 30523 (2016)

# Superkontinuum w światłowodach

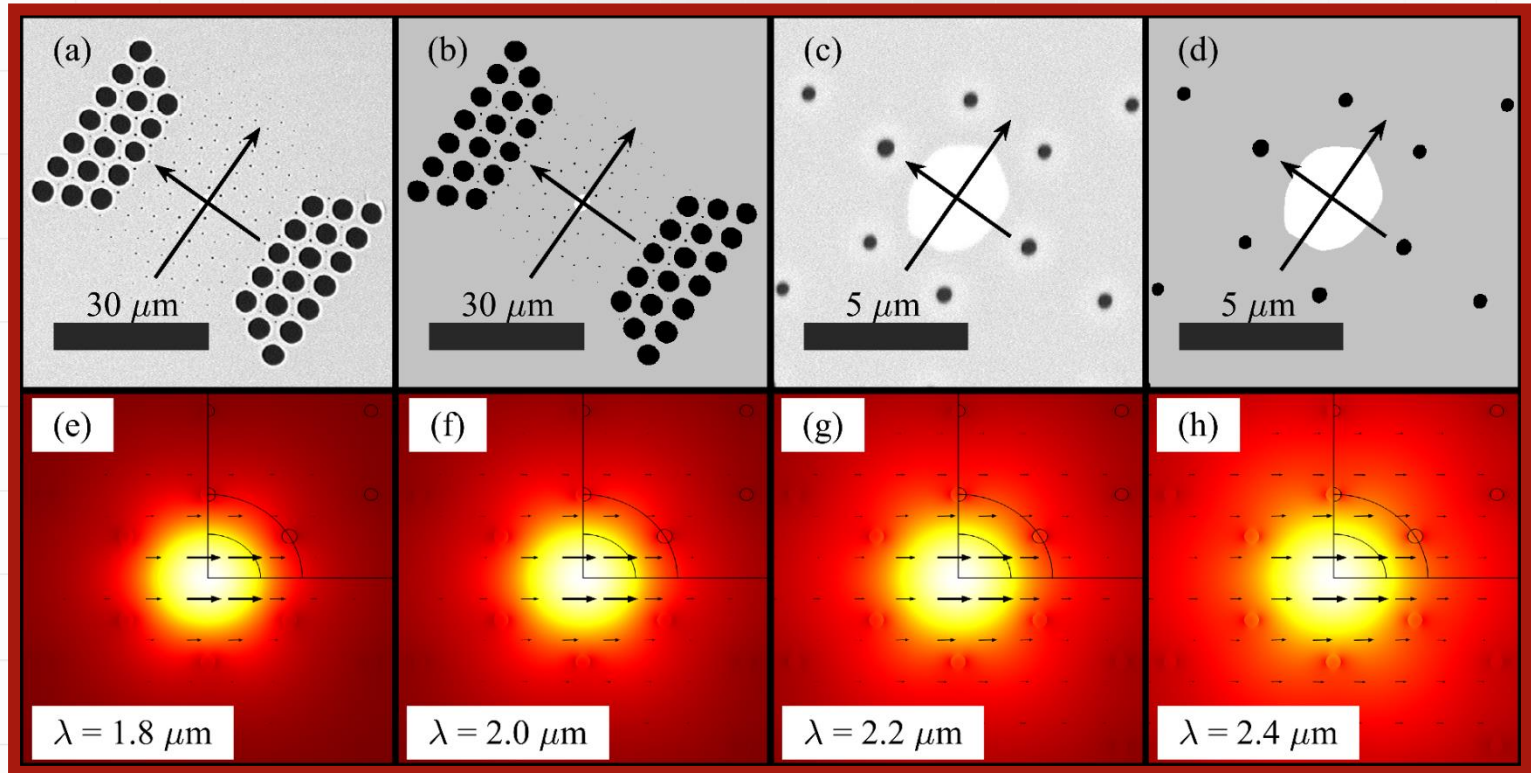


K. Tarnowski, T. Martynkien, P. Mergo, K. Poturaj, G. Soboń, W. Urbańczyk, Coherent supercontinuum generation up to 2.2  $\mu\text{m}$  in an all-normal dispersion microstructured silica fiber, *Opt. Express* 24(26): 30523 (2016)





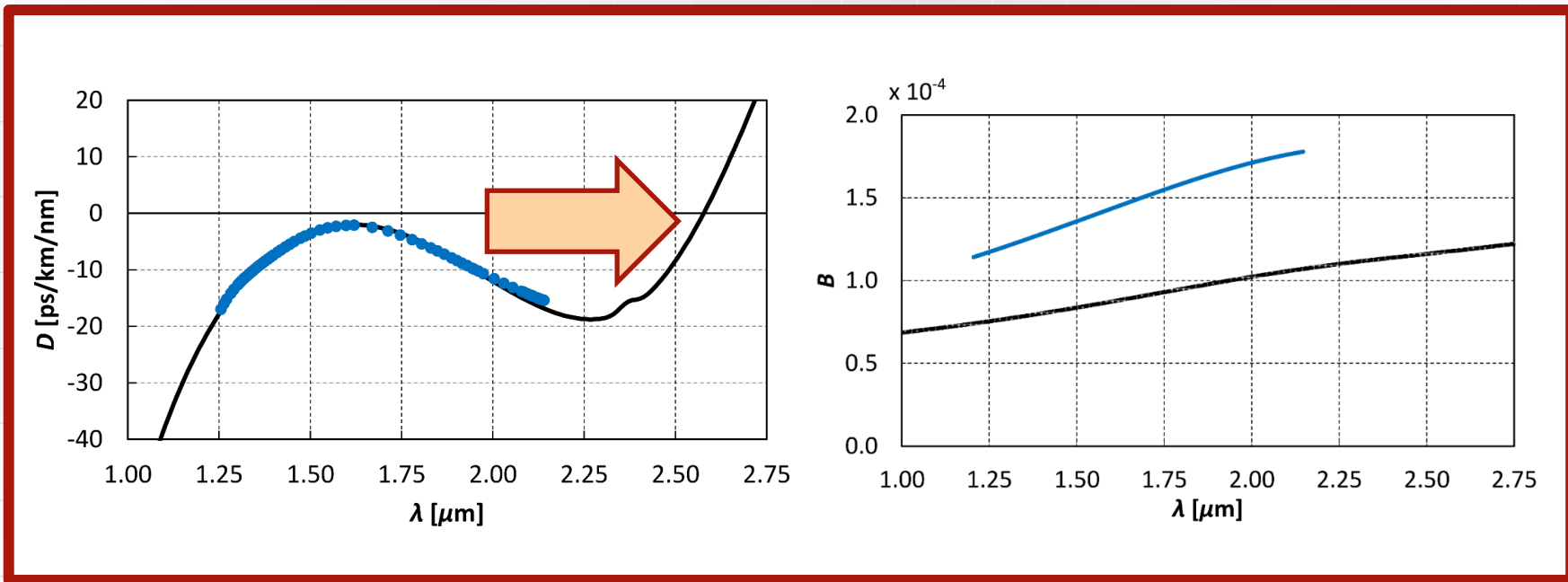
# Superkontinuum w światłowodach



K. Tarnowski, T. Martynkien, P. Mergo, K. Poturaj, A. Anuszkiewicz, P. B ejot, F. Billard, O. Faucher, B. Kibler, W. Urbanczyk, Polarized all-normal dispersion supercontinuum reaching 2.5  $\mu\text{m}$  generated in a birefringent microstructured silica fiber, *Opt. Express* 25(22): 27452-27463 (2017).



# Superkontinuum w światłowodach



K. Tarnowski, T. Martynkien, P. Mergo, K. Poturaj, A. Anuszkiewicz, P. Béjot, F. Billard, O. Faucher, B. Kibler, W. Urbanczyk, Polarized all-normal dispersion supercontinuum reaching 2.5  $\mu\text{m}$  generated in a birefringent microstructured silica fiber, *Opt. Express* 25(22): 27452-27463 (2017).





# Superkontinuum w światłowodach

Pompa przestrajalna

(non-collinear optical parametric amplifier NOPA):

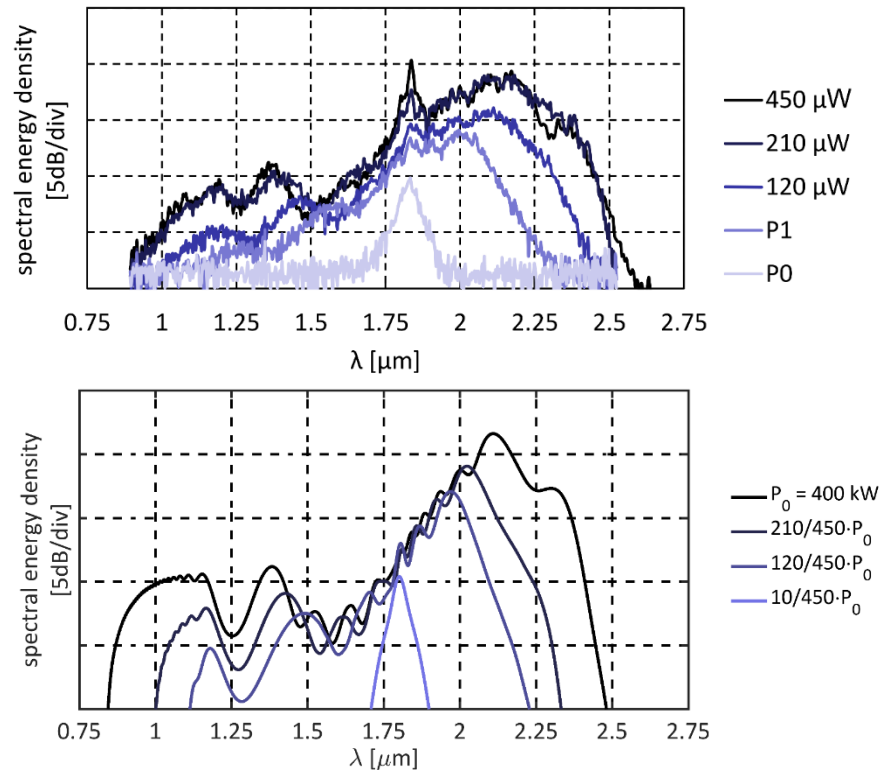
- środkowa długość fali w zakresie 1,8–2,4  $\mu\text{m}$ ,
- częstotliwość powtarzania 1 kHz,
- maksymalna energia impulsu 300  $\mu\text{J}$ ,
- czas trwania  $\sim 70$  fs.

K. Tarnowski, T. Martynkien, P. Mergo, K. Poturaj, A. Anuszkiewicz, P. Béjot, F. Billard, O. Faucher, B. Kibler, W. Urbanczyk, Polarized all-normal dispersion supercontinuum reaching 2.5  $\mu\text{m}$  generated in a birefringent microstructured silica fiber, *Opt. Express* 25(22): 27452-27463 (2017).



# Superkontinuum w światłowodach

długość włókna = 48 mm

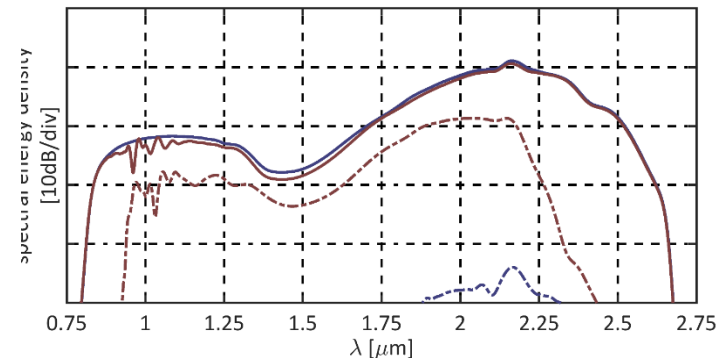
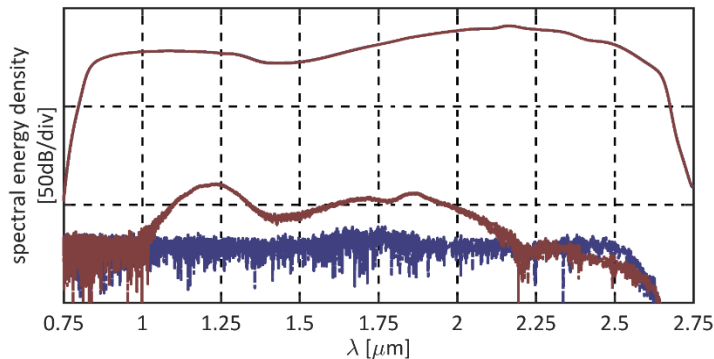
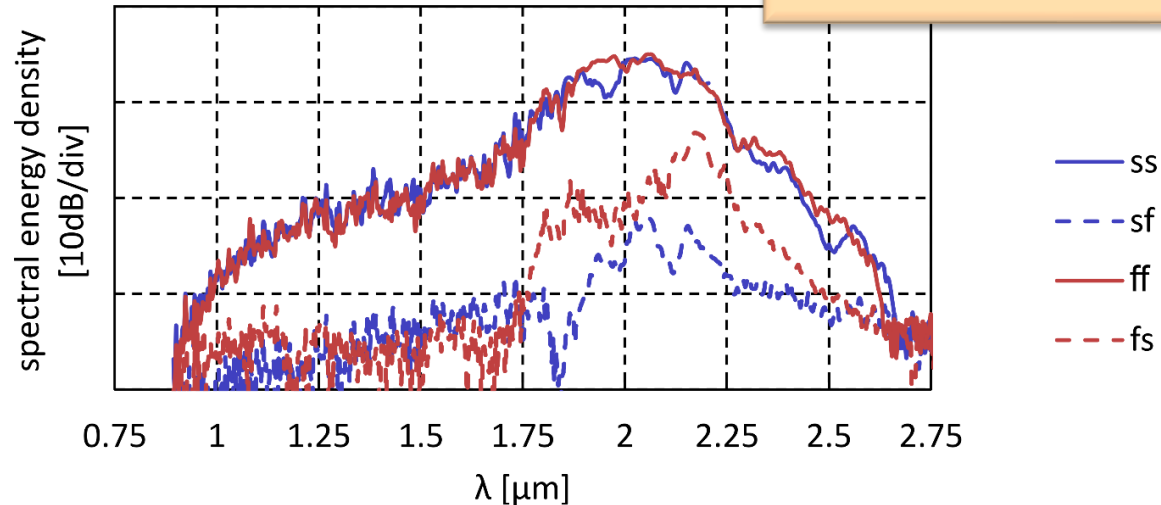


K. Tarnowski, T. Martynkien, P. Mergo, K. Poturaj, A. Anuszkiewicz, P. Béjot, F. Billard, O. Faucher, B. Kibler, W. Urbanczyk, *Opt. Express* 25(22): 27452-27463 (2017).



# Superkontinuum w światłowodach

długość włókna = 122 mm

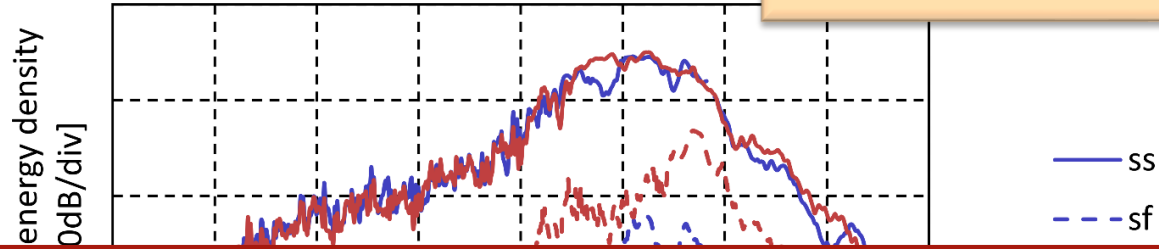


K. Tarnowski, T. Martynkien, P. Mergo, K. Poturaj, A. Anuszkiewicz, P. Béjot, F. Billard, O. Faucher, B. Kibler, W. Urbanczyk, Opt. Express 25(22): 27452-27463 (2017).

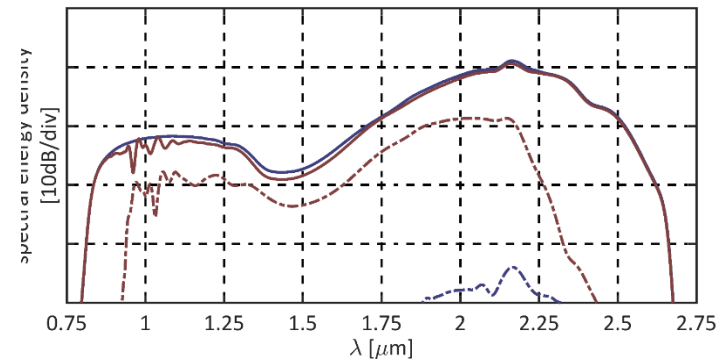
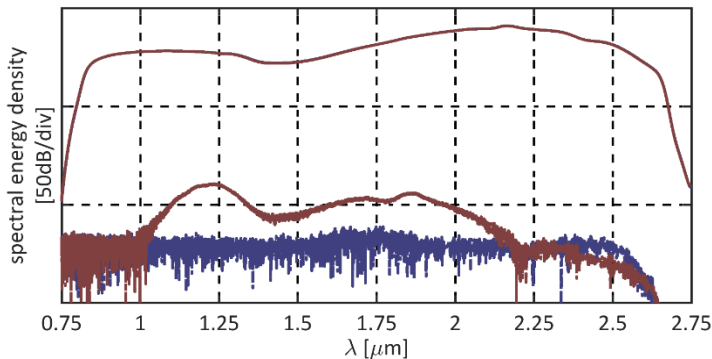


# Superkontinuum w światłowodach

długość włókna = 122 mm



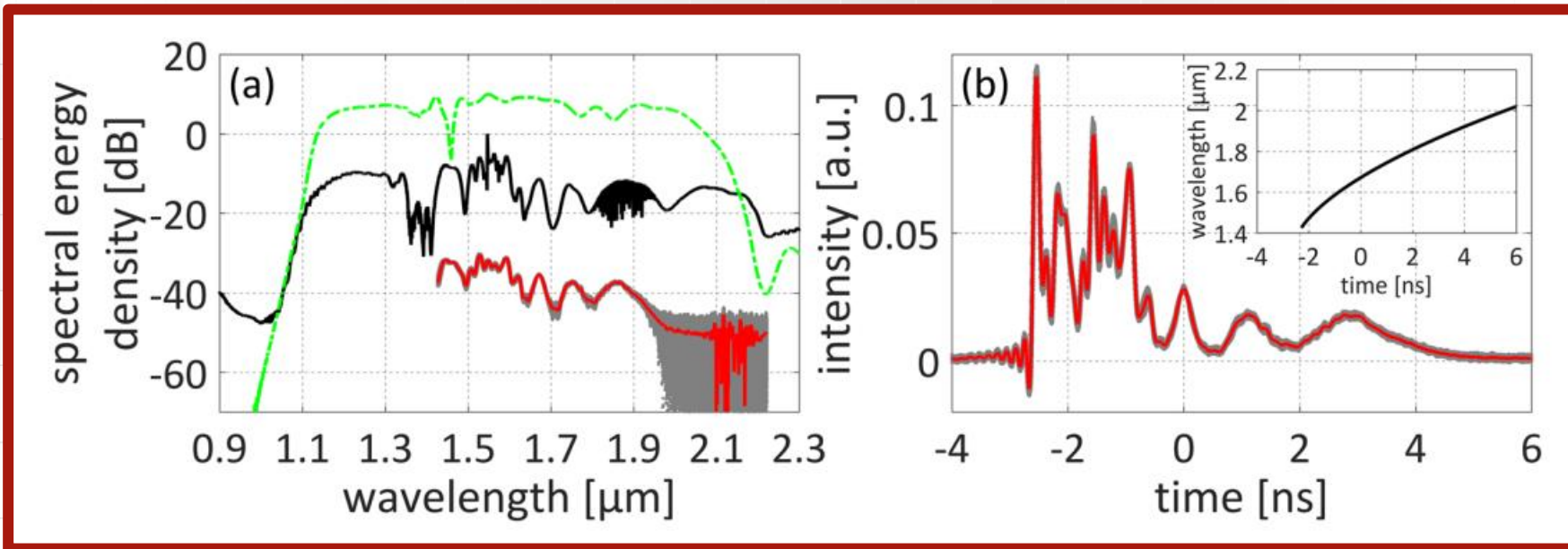
## PolAND SC (Polarized ANDi SC)



K. Tarnowski, T. Martynkien, P. Mergo, K. Poturaj, A. Anuszkiewicz, P. Béjot, F. Billard, O. Faucher, B. Kibler, W. Urbanczyk, Opt. Express 25(22): 27452-27463 (2017).



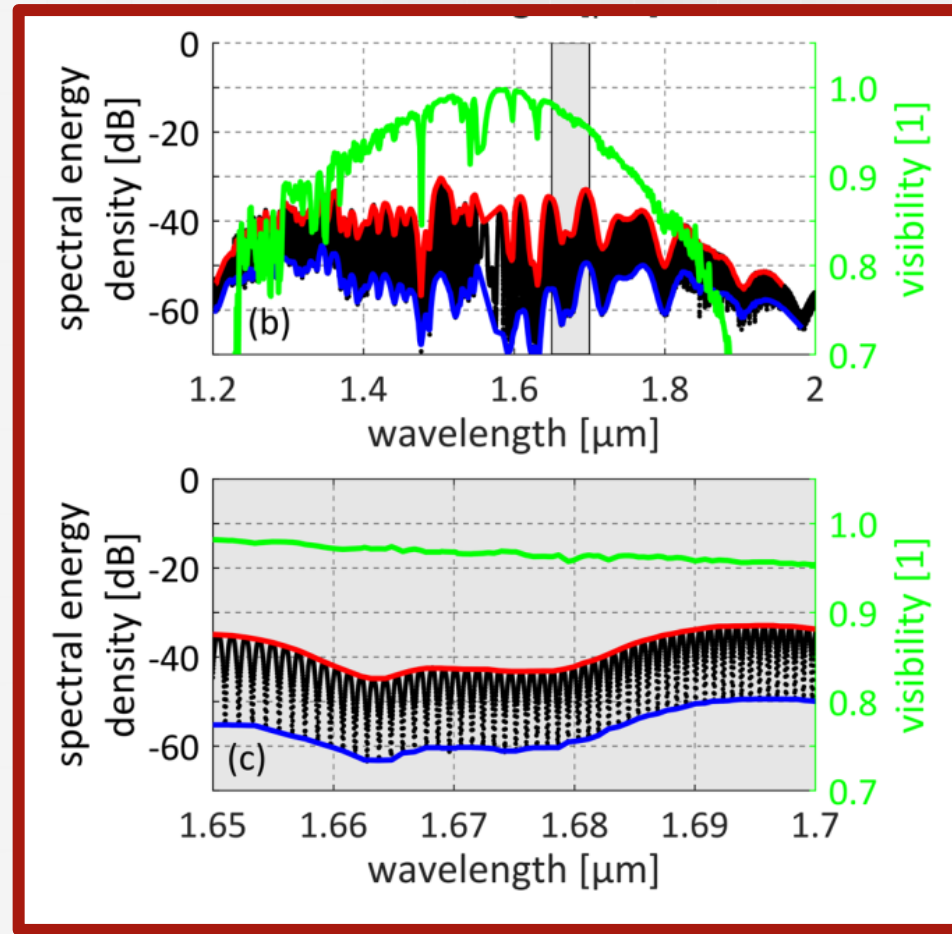
# Superkontinuum w światłowodach



K. Tarnowski, T. Martynkien, P. Mergo, J. Sotor, G. Soboń, Scientific Reports, vol. 9, 12313, 2019, DOI: 10.1038/s41598-019-48726-9;



# Superkontinuum w światłowodach

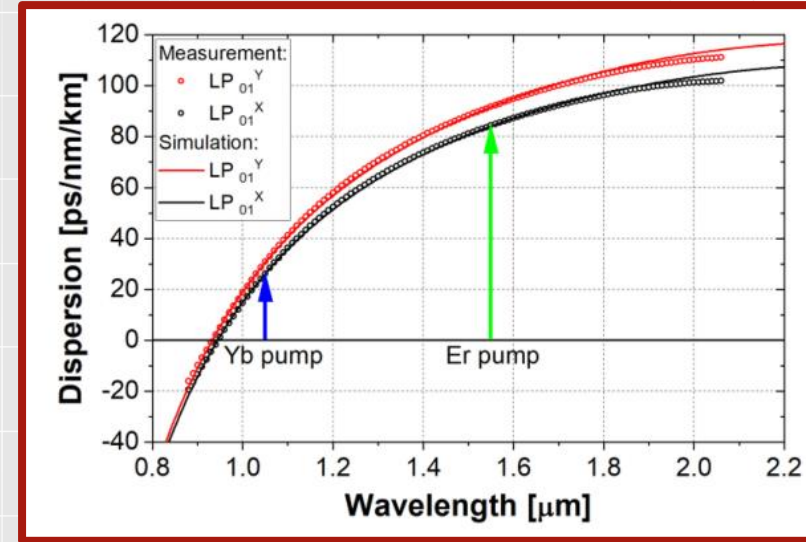
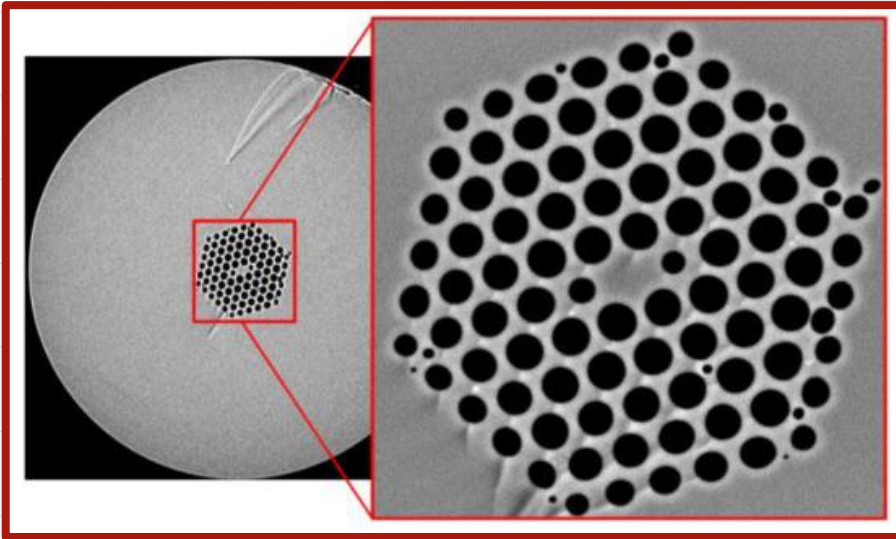




# Inne zjawiska nieliniowe

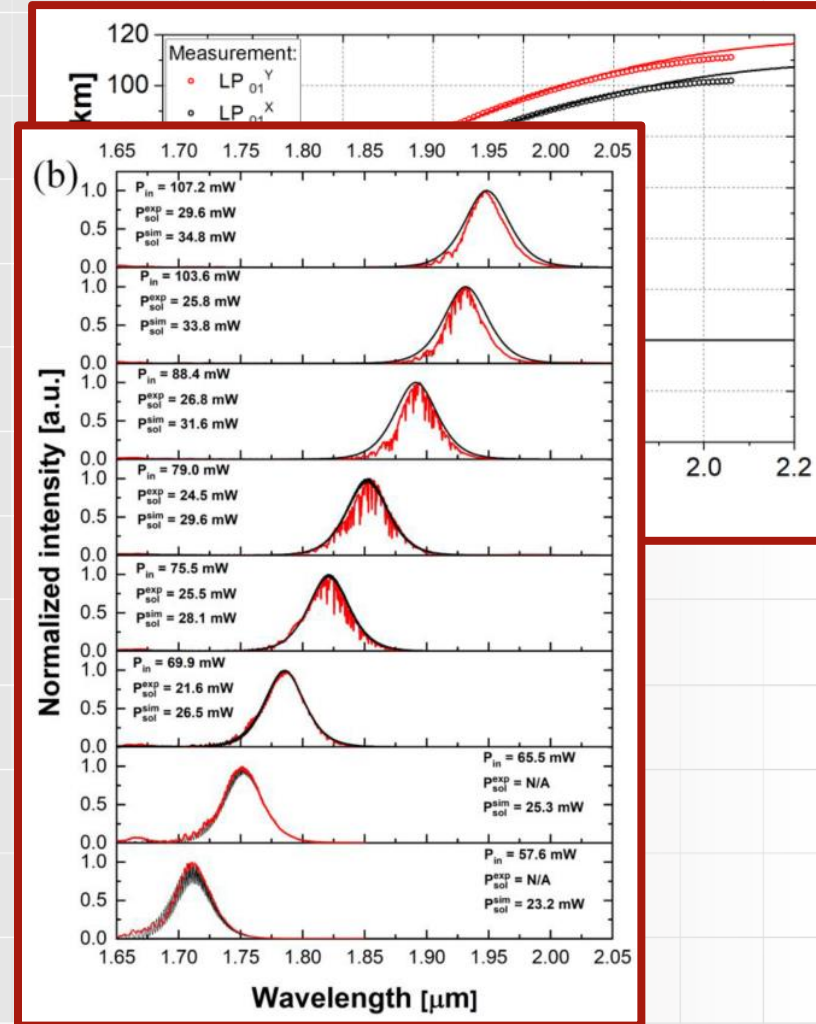
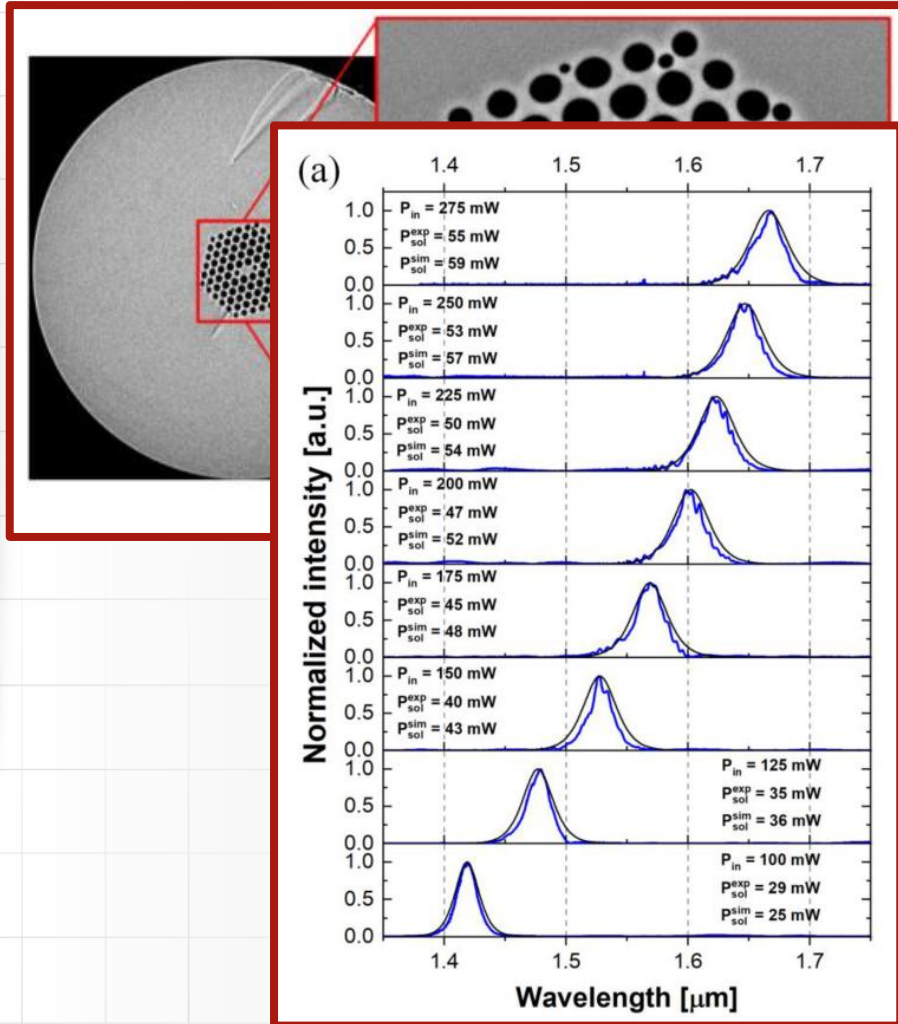


# Przestrzajanie solitonów



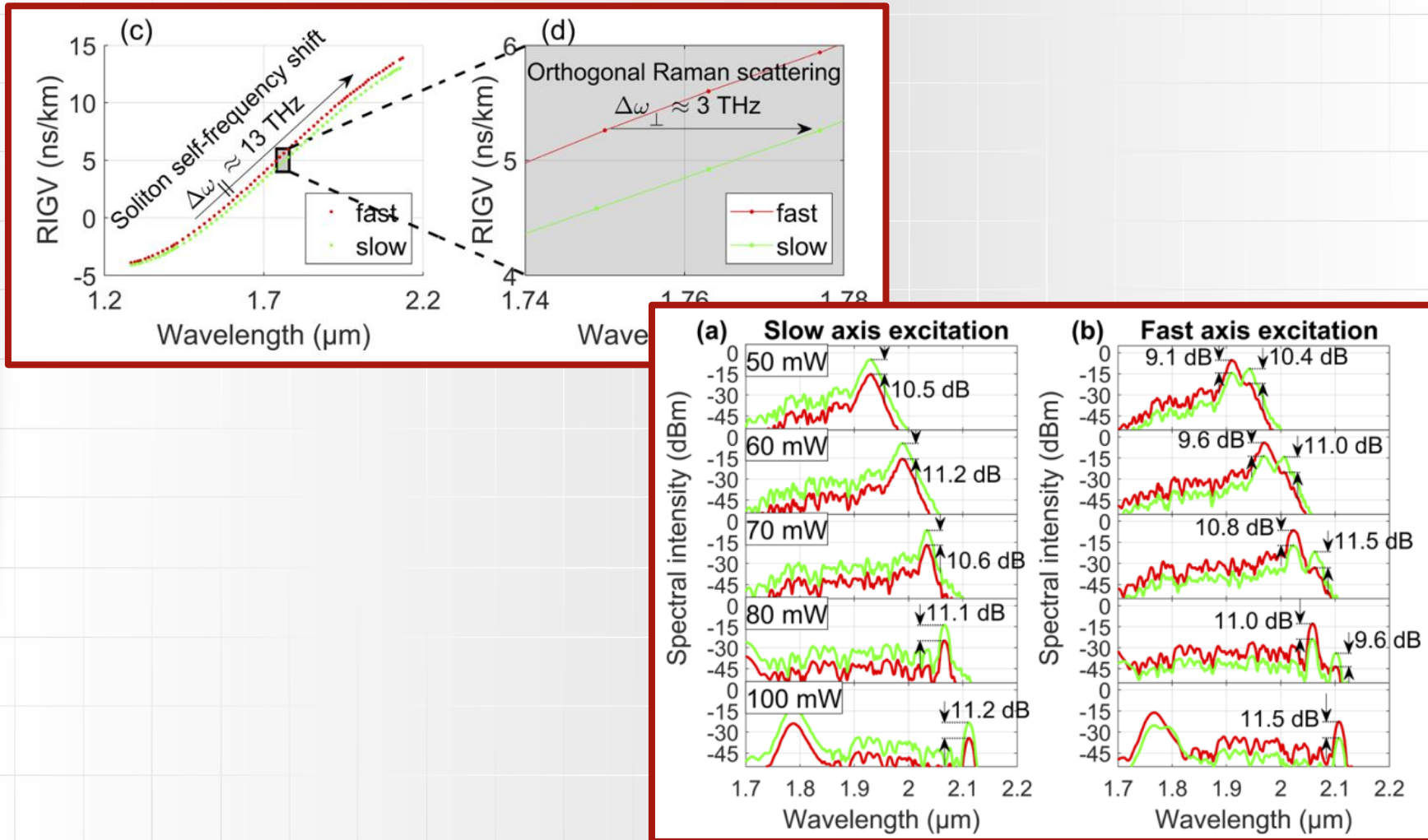


# Przestrzajanie solitonów

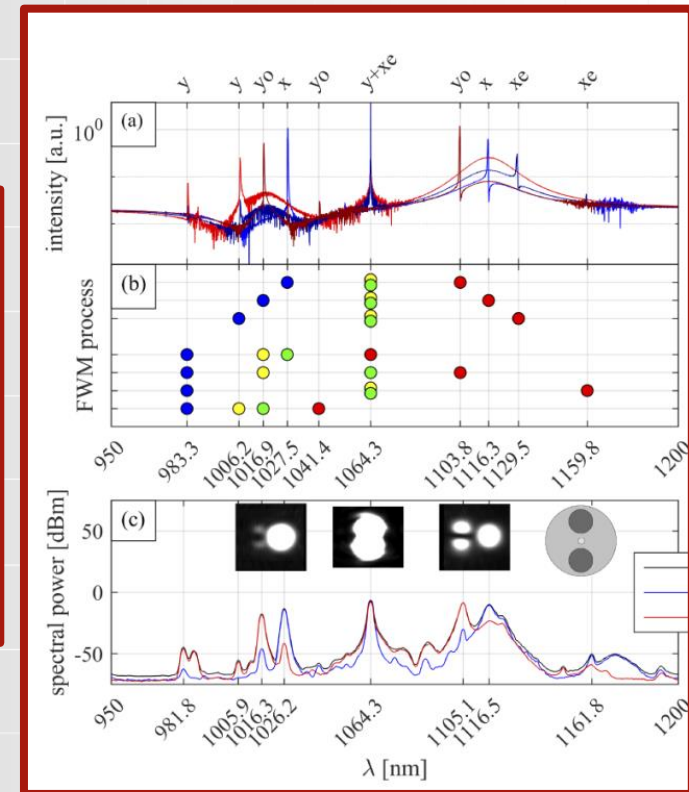
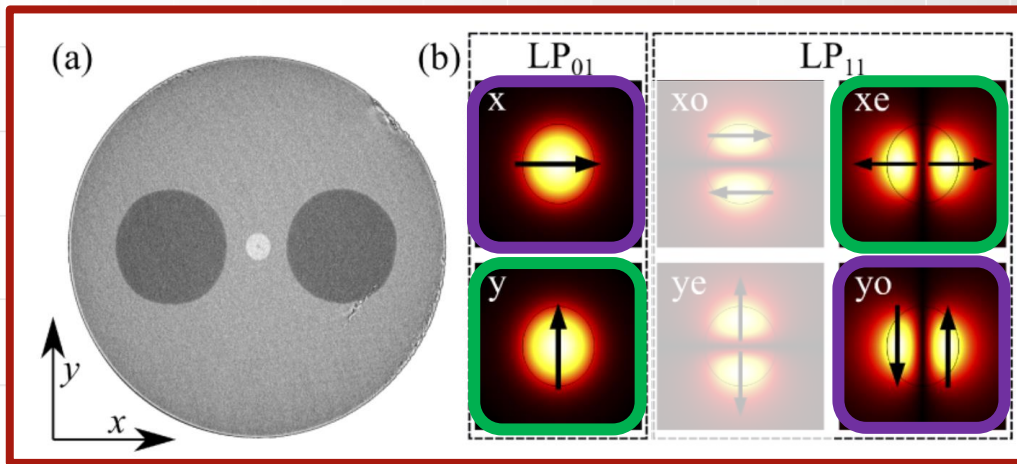




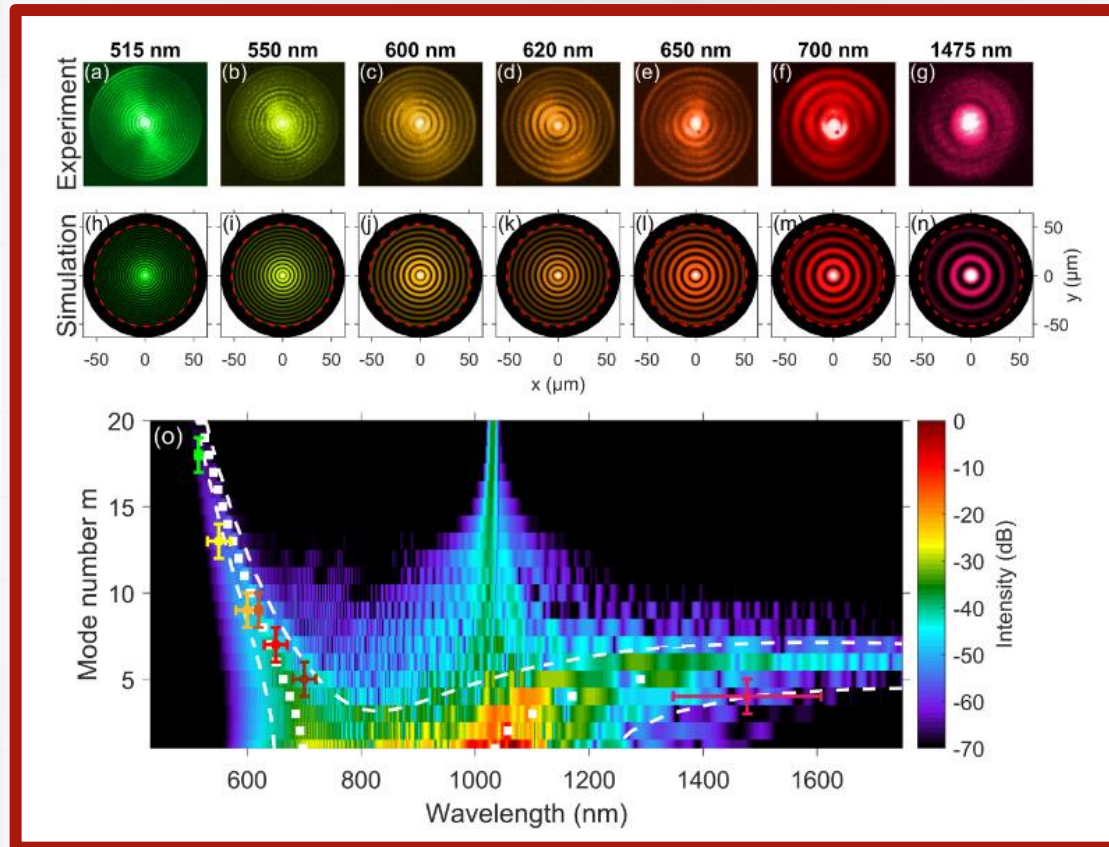
# Przestrajanie solitonów



# Polaryzacyjne procesy międzymodowe



# Emisja stożkowa



**K. Stefańska, P. Bejot, K. Tarnowski, B. Kibler, *Experimental Observation of the Spontaneous Emission of a Space–Time Wavepacket in a Multimode Optical Fiber*, ACS Photonics, vol. 10(3), pp. 727-732, 2023, DOI: 10.1021/acsphotonics.2c01863;**

# Współpraca

## Grupa Optyki Światłowodów

Prof. Wacław  
Urbańczyk

Tadeusz  
Martynkien

Kinga Żołącz

Sylwia  
Majchrowska

Karolina  
Stefańska

## Pracownia Technologii Światłowodów, UMCS, Lublin

Paweł Mergo

Krzysztof  
Poturaj

## Grupa Elektroniki Laserowej i Światłowodowej, PWr, Wrocław

Jarosław Sotor

Grzegorz  
Soboń

Olga Szewczyk

## Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne, Dijon

Bertrand Kibler

Karolina  
Stefańska

Pierre Béjot



# Podziękowania

## Narodowe Centrum Nauki

- 2014/13/D/ST7/02090, Sonata 7
- 2018/30/E/ST7/00862, Sonata Bis 8
- 2016/22/A/ST7/00089, Maestro 8



NARODOWE CENTRUM NAUKI

## Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

- POIR.04.01.01-00-0037/17



Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

## National Agency for Academic Exchange

- Polonium 2019-2021
- Polonium 2023-2024



NARODOWA AGENCJA  
WYMIANY AKADEMICKIEJ



# Podziękowania

Dziękuję za uwagę!