

Dwójłomność kryształów,  
dwójłomność światłowodów,  
dwójłomność próżni  
(z ang. *vacuum birefringence*)

Agata Saternus

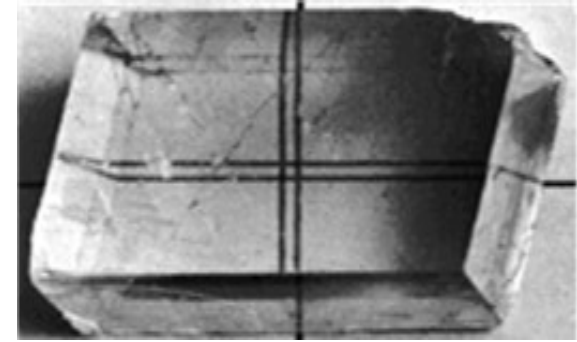
piątek 29.07.2011

# Dwójłomność

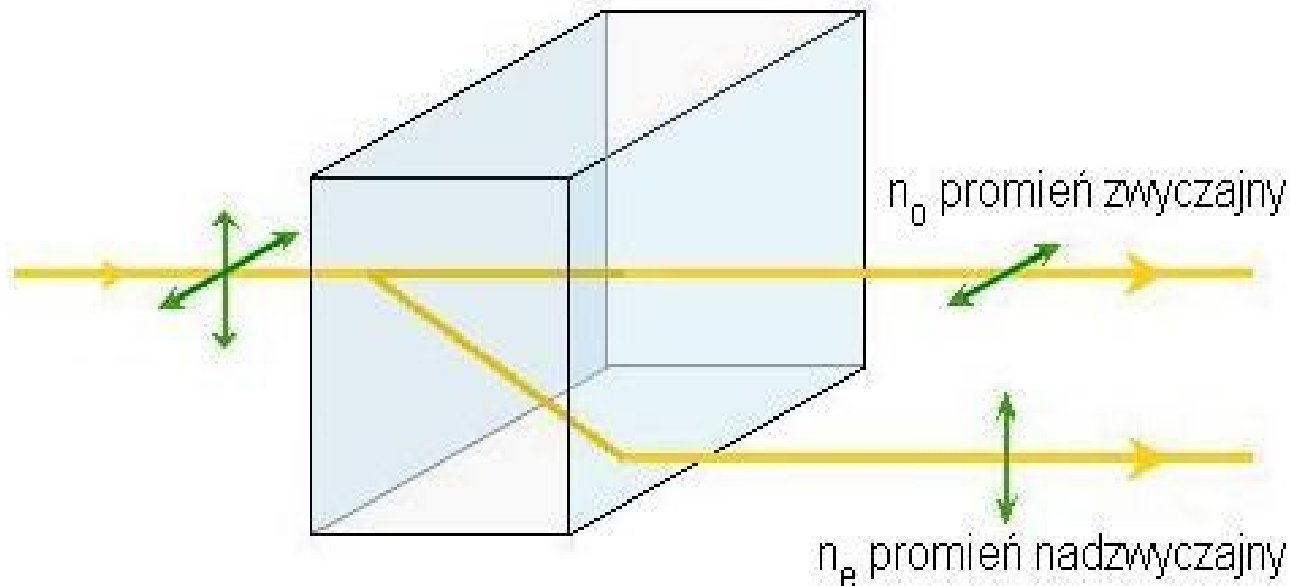


- odkrył Rasmus Bartholin w 1669 roku, dwójłomność kryształu szpatu islandzkiego, zwanego inaczej kalcytem –  $\text{CaCO}_3$
- w pierwszej połowie XIX wieku wyjaśnił Augustin J. Fresnel

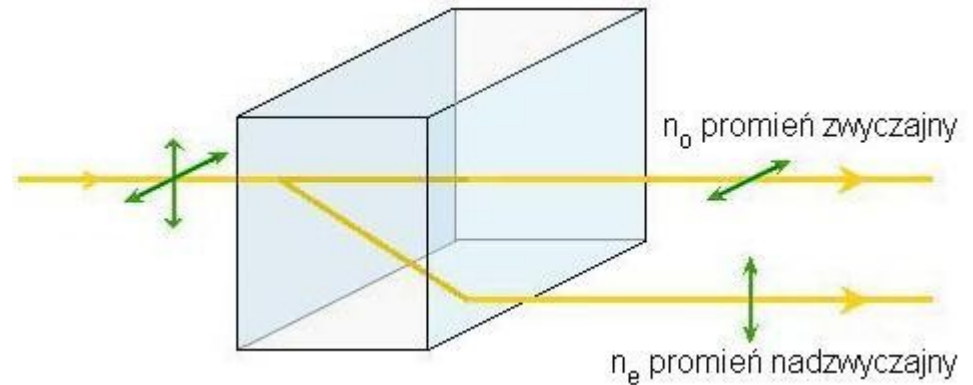
# Dwójłomność



zjawisko występujące w kryształach o niskiej symetrii polegające na rozszczepieniu promienia światła – przechodzącego przez kryształ – na dwa promienie – zwyczajny i nadzwyczajny.



# Dwójłomność



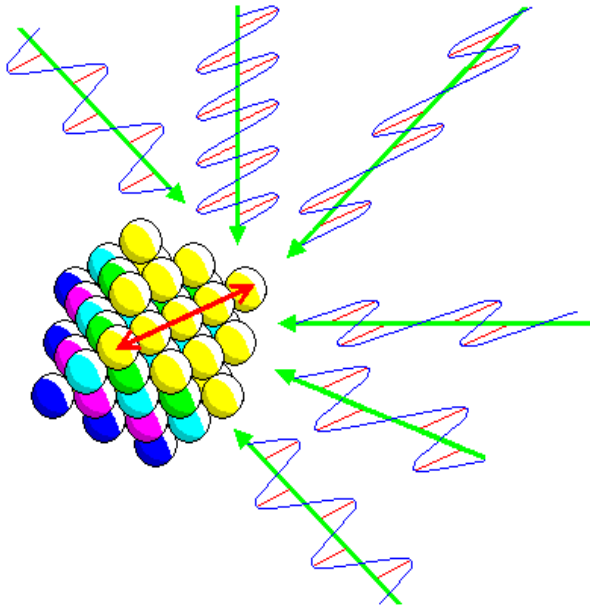
Miarą dwójłomności jest różnica między współczynnikiem załamania promienia nadzwyczajnego  $n_e$ , a współczynnikiem załamania promienia zwyczajnego  $n_o$ .

$$\Delta n = n_e - n_o$$

$\Delta n$  będzie dodatnie gdy  $n_e > n_o$   
lub ujemne gdy  $n_e < n_o$

# Oddziaływanie światła z kryształem

Światło wchodzące do ośrodka materialnego oddziałuje z elektronami w atomach.



Każdy promień o takim samym kierunku drgań pola elektrycznego będzie w danym materiale oddziaływać identycznie.

To oznacza, że ważny jest kierunek drgań pola elektrycznego, a nie kierunek rozchodzenia się światła.

Światło rozchodzące się w tym samym kierunku, ale inaczej spolaryzowane będzie inaczej oddziaływać z materiałem.

# Oddziaływanie światła z kryształem

Kryształy izotropowe mają regularną strukturę, światło rozchodzi się we wszystkich kierunkach z taką samą prędkością.

Nie obserwujemy dwójłomności.

Kryształy anizotropowe wykazują w różnych kierunkach różne wartości współczynnika załamania światła, a co za tym idzie inna wartość współczynnika przenikalności elektrycznej  $\epsilon$  i inna prędkość światła. Obserwujemy dwójłomność.

# Wyprowadzenie z równań Maxwella

Przyjmijmy, że współczynnik przenikalności elektrycznej i współczynnik załamania światła są tensorami.

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} n_x^2 & 0 & 0 \\ 0 & n_y^2 & 0 \\ 0 & 0 & n_z^2 \end{bmatrix}$$

$$-\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = \frac{\varepsilon}{c^2} \cdot \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \varepsilon \cdot \mathbf{E} = 0$$

Wstawiając do równań Maxwella poniższą postać fali płaskiej:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \exp[i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)]$$

Otrzymujemy następujące warunki:

$$|\mathbf{k}|^2 \mathbf{E}_0 - (\mathbf{k} \cdot \mathbf{E}_0) \mathbf{k} = \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon \cdot \mathbf{E}_0$$

$$\mathbf{k} \cdot \varepsilon \cdot \mathbf{E}_0 = 0$$

# Wyprowadzenie z równań Maxwella

Podstawiając  $\varepsilon$  i rozpisując wektory  $\mathbf{E}_0$  i  $\mathbf{k}$  w bazie  $\varepsilon$  otrzymujemy układ równań, który będzie miał rozwiązanie jeżeli spełniona będzie następująca równość:

$$\frac{\omega^4}{c^4} + \frac{\omega^2}{c^2} \left( \frac{k_x^2 + k_y^2}{n_z^2} + \frac{k_x^2 + k_z^2}{n_y^2} + \frac{k_y^2 + k_z^2}{n_x^2} \right) + \left( \frac{k_x^2}{n_y^2 n_z^2} + \frac{k_y^2}{n_x^2 n_z^2} + \frac{k_z^2}{n_x^2 n_y^2} \right) (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2) = 0$$

Dla kryształów jednoosiowych, gdzie  $n_x = n_y = n_o$  i  $n_z = n_e$ , można to równanie przekształcić do:

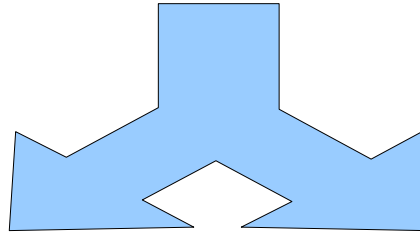
$$\left( \frac{k_x^2}{n_o^2} + \frac{k_y^2}{n_o^2} + \frac{k_z^2}{n_o^2} - \frac{\omega^2}{c^2} \right) \left( \frac{k_x^2}{n_e^2} + \frac{k_y^2}{n_e^2} + \frac{k_z^2}{n_o^2} - \frac{\omega^2}{c^2} \right) = 0$$

Pierwszy czynnik definiuje sferę - tak rozchodzi się promień normalny.

Drugi czynnik to elipsoida - tak rozchodzi się promień nadzwyczajny.



# Dwójłomność



## Spontaniczna

Występuje w kryształach anizotropowych do których należą:

kalcyt

lód

kwarc

cukier

## Wymuszona

Zjawisko powstawania lub zmiany dwójłomności ośrodka izotropowego lub anizotropowego pod wpływem zewnętrznych czynników fizycznych.

temperatura, ciśnienie,

naprężenia, odkształcenia,

pole elektryczne, pole magnetyczne,

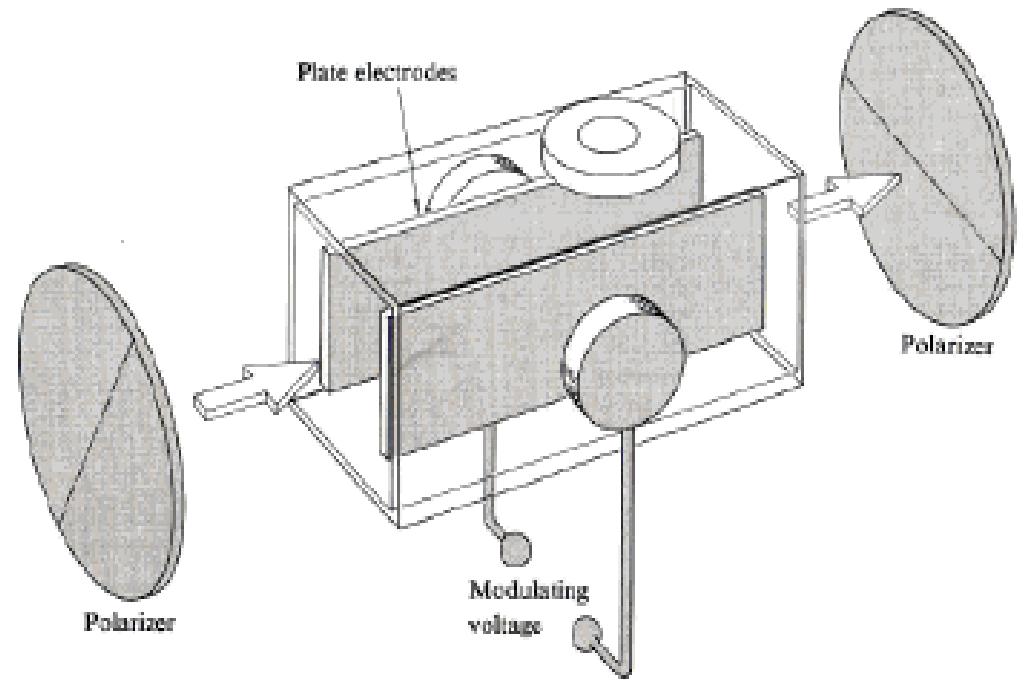
inne.

# Przykłady dwójłomności wymuszonej:

- Efekt piezooptyczny - zmiana dwójłomności wywołana naprężeniami
- Efekt elastooptyczny - zmiana dwójłomności wywołana odkształceniami
- Efekty elektrooptyczne - zmiana dwójłomności wywołana polem elektrycznym
  - ◆ efekt Pockelsa      ◆ efekt Kerra
- Efekty magnetoptyczne - zmiana dwójłomności wywołana polem magnetycznym
  - ◆ Efekt Faradaya      ◆ Efekt Cottona-Mouttona

# Efekt Kerr

Kerr odkrył, że płytka szklana, do której przykładane jest silne pole elektryczne, staje się dwójłomna.

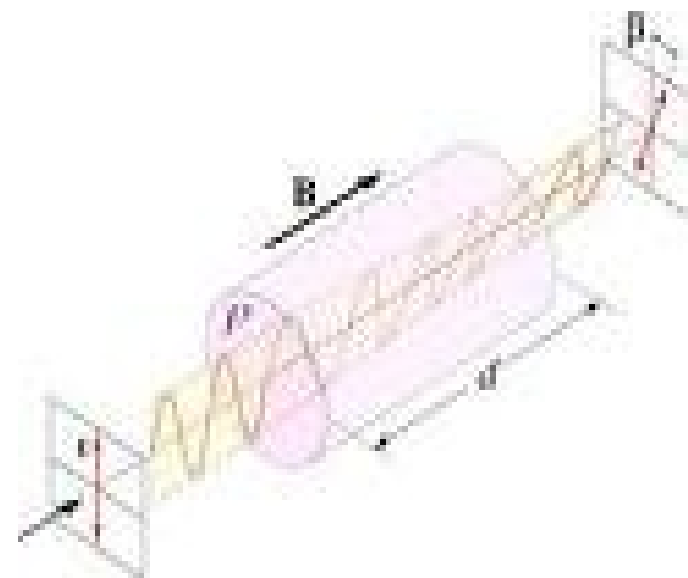


komórka Kerr

Komórka Kerr – naczynie wypełnione cieczą, w którym znajdują się dwie elektrody. Podłączając napięcie do elektrod wytwarzamy pole elektryczne, które wywołuje w ośrodku zjawisko dwójłomności.

# Efekt Faradaya

Liniowy efekt Faradaya polega na skręceniu płaszczyzny polaryzacji światła przechodzącego przez ośrodek umieszczony w zewnętrznym podłużnym polu magnetycznym.



Kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji dany jest wzorem:

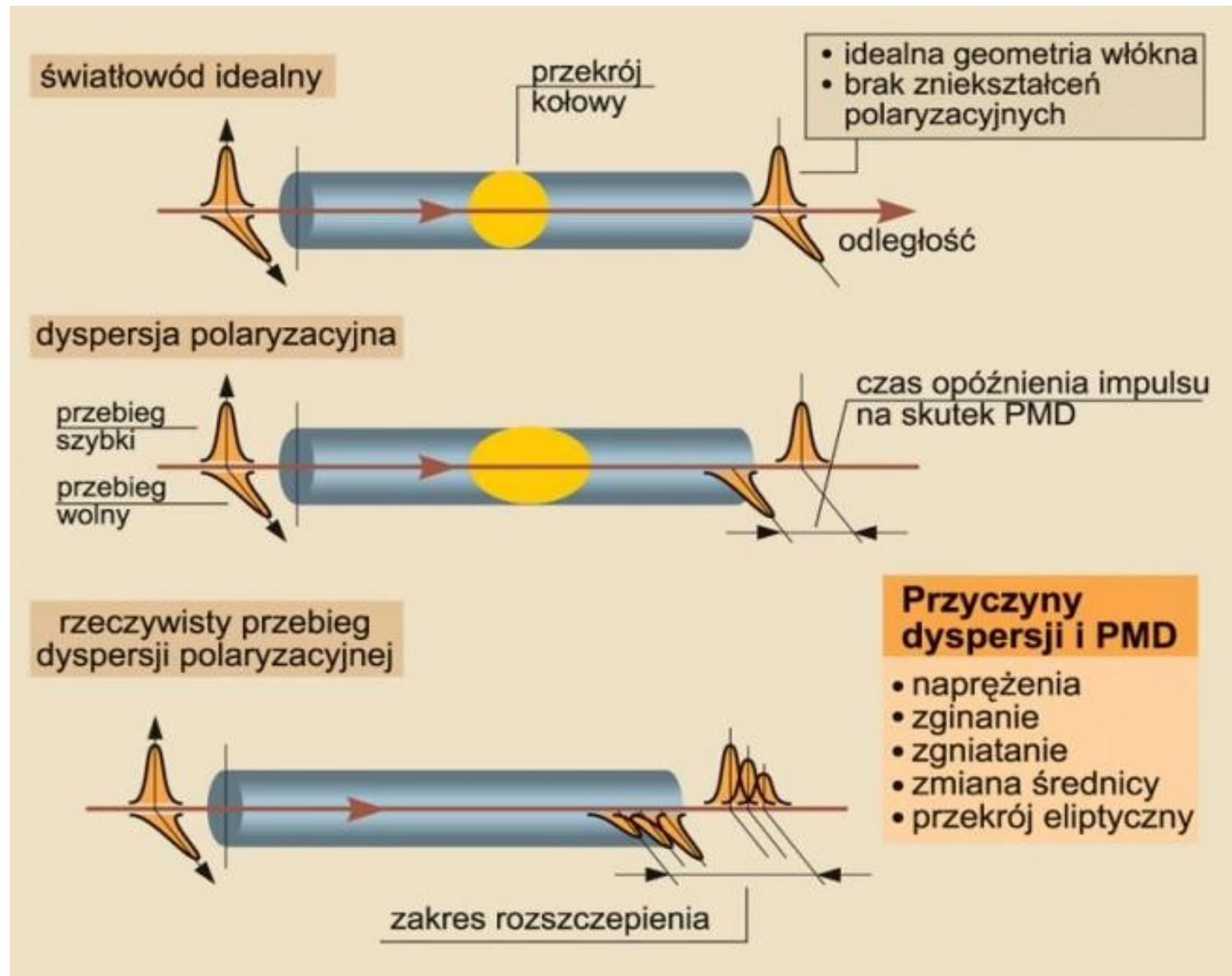
$$\phi = V B d$$

gdzie:  $V$  – stała materiałowa, stała Verdet,

$d$  – długość próbki,

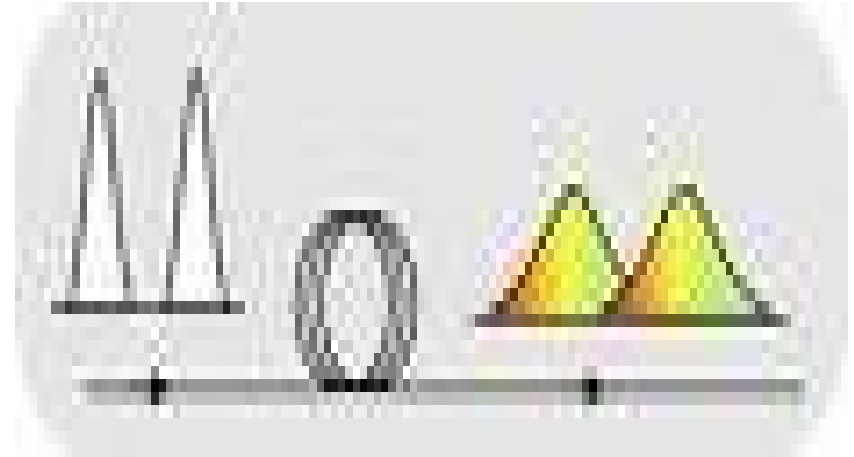
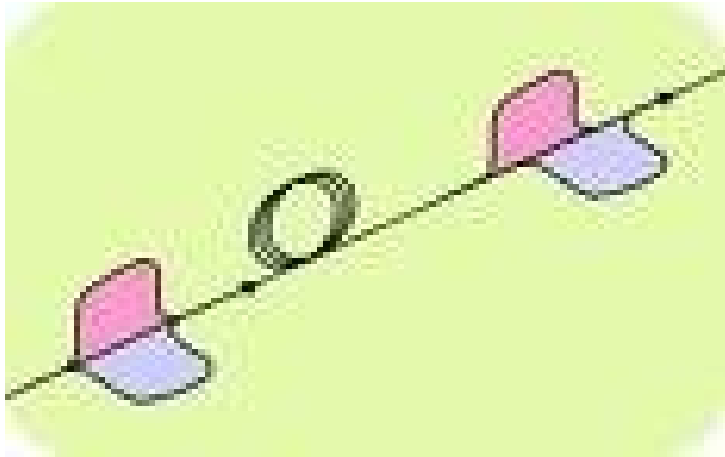
$B$  – wartość indukcji pola magnetycznego;

# Propagacja światła w światłowodzie



# Propagacja światła w światłowodzie

Oprócz dyspersji polaryzacyjnej i chromatycznej



występuje zjawisko dwójłomności, spowodowane naprężeniem, zmianą gęstości, odkształcenia itp.

W konsekwencji dwa promienie wędrują przez światłowód jako promień zwyczajny i nadzwyczajny, z różnymi prędkościami.

# Dwójłomność światłowodu

Różne prędkości dwóch promieni prostopadłych generują różnicę fazy zmieniającą się w czasie propagacji wzdłuż światłowodu i mieszanie dwóch składowych w sposób przypadkowy powodując zmianę polaryzacji.

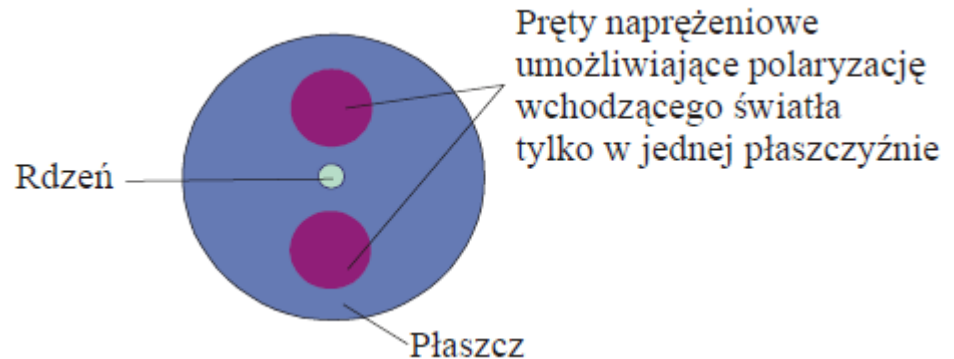
Jeżeli różnica faz wynosi  $\pi/2$ , światło jest spolaryzowane kołowo, gdy  $\pi$  światło jest spolaryzowane liniowo.

Propagacja światła w światłowodzie na długich odległościach powoduje, że polaryzacja zmienia się chaotycznie w czasie

# Dwójłomność światłowodu

Chcąc utrzymać stałą polaryzację możemy:

✿ zastosować asymetryczne naprężenia w szkliwie, aby zwiększyć kontrolowaną dwójłomność.



✿ zastosować doskonale symetryczne, izotropowe włókna, aby nie otrzymać dwójłomności.

✿ Zastosować analizatory polaryzacji, które przepuszczają tylko określoną polaryzację.



# Dwójłomność próżni

Wiele teorii współczesnej fizyki np. kwantowa grawitacja, efektywna teoria pola, złamanie niezmienniczości Lorentza, ... przewiduje istnienie zjawiska dwójłomności próżni.

Dwójłomność próżni (z ang. vacuum birefringence) jest analogiem do dwójłomności w anizotropowym ośrodku, gdzie lewoskrętne i prawoskrętne polaryzacje światła przemieszczają się z inną prędkością fazową i grupową.

# Dwójłomność próżni

Relacja dyspersji dla fotonów:

$$\omega_{\pm}^2 = k^2 \pm \xi \frac{k^3}{M}$$

Jak to zaobserwujemy:

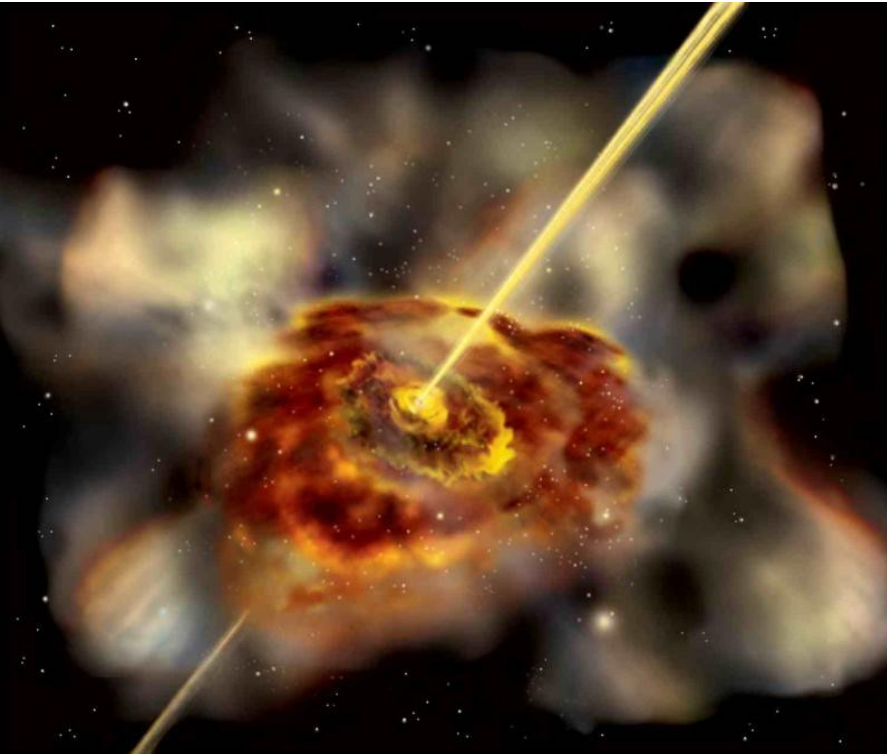


podwójny pik



depolaryzacja

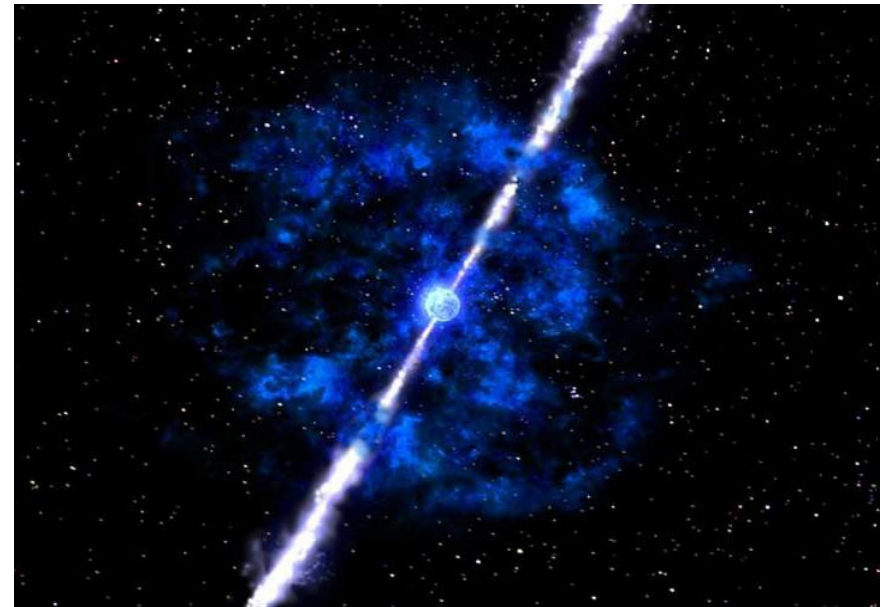
# Źródło światła



**Active Galactic Nucleus**



**Crab Pulsar**



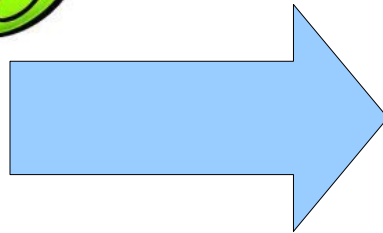
**Gamma-ray Burst**

# Depolaryzacja

Źródło wysyła spójne światło



Inna prędkość fazowa



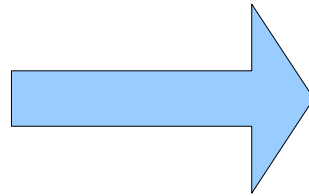
Do Ziemi przychodzi niespójne światło

# Podwójny pik

Fotony startują w tym samym czasie ze źródła



Inna prędkość grupowa



Do Ziemi przychodzą dwa sygnały

# Rysunki:

- <http://www.zso.zabrze.pl/fizyka/naserwer/optyka/polaryzacja/HTM/szpat.htm>
- [http://webphysics.davidson.edu/alumni/milee/jlab/crystallography\\_www/birefringence.htm](http://webphysics.davidson.edu/alumni/milee/jlab/crystallography_www/birefringence.htm)
- <http://plc.cwru.edu/tutorial/enhanced/files/lc/biref/graphics/birefringence.JPG>
- [http://www.invocom.et.put.poznan.pl/~invocom/C/P1-9/swiatlowody\\_pl/p1-1\\_3\\_2.htm](http://www.invocom.et.put.poznan.pl/~invocom/C/P1-9/swiatlowody_pl/p1-1_3_2.htm)
- <http://edu.pjwstk.edu.pl/wyklady/ups/scb/main70.html>
- Prezentacja: „Lorentz – violating, Vacuum Birefringence & Its Astrophysical consequences”, Lijing Shao from Peking University, May 2011

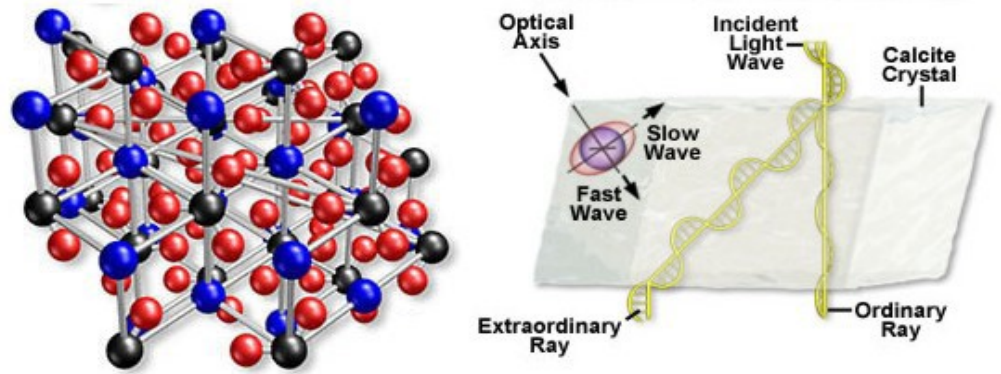
# Literatura:

- Lijing Shao and Bo-Qiang Ma: Lorentz violation induced vacuum birefringence and its astrophysical consequences. China 2011
- P. Laurent, D Gotz, ...: Constraints on Lorentz Invariance Violation using INTEGRAL/IBIS observations of GRG041219A. 2011
- L. Maccione, S. Liberati, A. Celotti:  $\gamma$  ray polarization constraint on Planck scale violations of special relativity. 2008
- Wikipedia, the free encyclopedia
- ...

Dziękuję za uwagę



# Właściwości optyczne i dielektryczne krysztalów



$$n \approx \sqrt{\epsilon}$$

$$\epsilon = 1 + \chi$$

$$n = \sqrt{\mu\epsilon}$$

gdzie:  $n$  – współczynnik załamania światła,  
 $\epsilon$  – przenikalność elektryczna,  
 $\chi$  – podatność dielektryczna materiału;