

A world map with a dark background, overlaid with a complex network of glowing blue and yellow lines representing submarine cables. The lines are most dense in the North Atlantic and Indian Oceans, connecting major global hubs. Numerous cities and countries are labeled in white text across the map, including Canada, United States, Mexico, Europe, Africa, Asia, and Australia. The text is centered over the Atlantic Ocean.

JAK PRZEBIEGA PROCES TRANSMISJI DANYCH W ŚWIATŁOWODACH PODMORSKICH?

WPROWADZENIE

Skala i statystyki podmorskiej infrastruktury telekomunikacyjnej

Współczesna gospodarka cyfrowa, często postrzegana jako oparta na niematerialnej „chmurze” i technologii bezprzewodowej, w rzeczywistości bazuje na rozbudowanej, fizycznej infrastrukturze światłowodów ułożonych na dnach oceanów.

Ta w dużej mierze niewidoczna sieć umożliwia nieprzerwany przepływ danych o kluczowym znaczeniu dla bezpieczeństwa narodowego, stabilności systemów finansowych oraz rozwoju nowoczesnych technologii, w tym sztucznej inteligencji.



694

**Aktywne i Planowane
Systemy Kablowe**



**1,97 – 2,7
mln km**

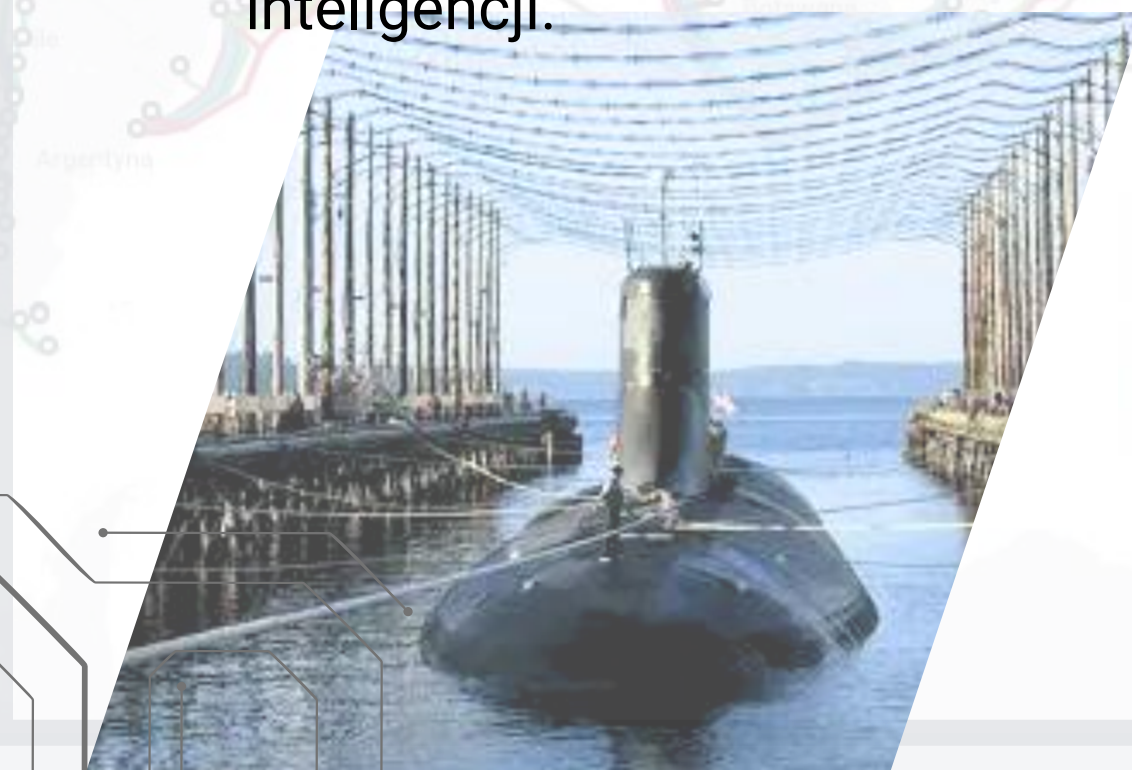
Łącznej Długości Sieci



1 893

**Stacje Lądowania na
Całym Świecie**

Stan na 2026 rok



Skala i statystyki podmorskiej infrastruktury telekomunikacyjnej

Kable podmorskie obsługują od **97% do 99%** całej międzykontynentalnej transmisji danych. **Satelity**, mimo rozwoju konstelacji niskoorbitowych, pełnią jedynie funkcję pomocniczą (**ok. 1% ruchu**), głównie w regionach odizolowanych lub w sytuacjach kryzysowych.

Każdego dnia przez podmorskie magistrale przesyłane są transakcje finansowe o wartości przekraczającej **10 bilionów USD**. Rosnący popyt (średnio 35–40% rocznie) napędza rekordowe inwestycje. Szacuje się, że w latach **2025–2027** wartość nowych systemów wprowadzonych do eksploatacji wyniesie **13 miliardów USD**, co stanowi niemal dwukrotny wzrost w stosunku do poprzedniego okresu.

Nastąpiła fundamentalna zmiana w strukturze własnościowej infrastruktury. Obecnie giganci technologiczni (tzw. Hyperscalers: Google, Meta, Microsoft, Amazon) generują ponad 70% całkowitego zapotrzebowania. Na kluczowych trasach (Transatlantyk, Pacyfik) ich udział przekracza nawet 80%.

Całkowita przepustowość przekroczyła próg

6,4 Pbps (petabitów na sekundę)

wykorzystywana międzynarodowa

Jeden petabit (Pb) odpowiada milionowi gigabitów (Gb). W praktyce przepustowość 1 Pbps umożliwia jednoczesne przesyłanie 100 milionów rozmów telefonicznych lub strumieniowanie milionów filmów w wysokiej rozdzielczości w tej samej sekundzie

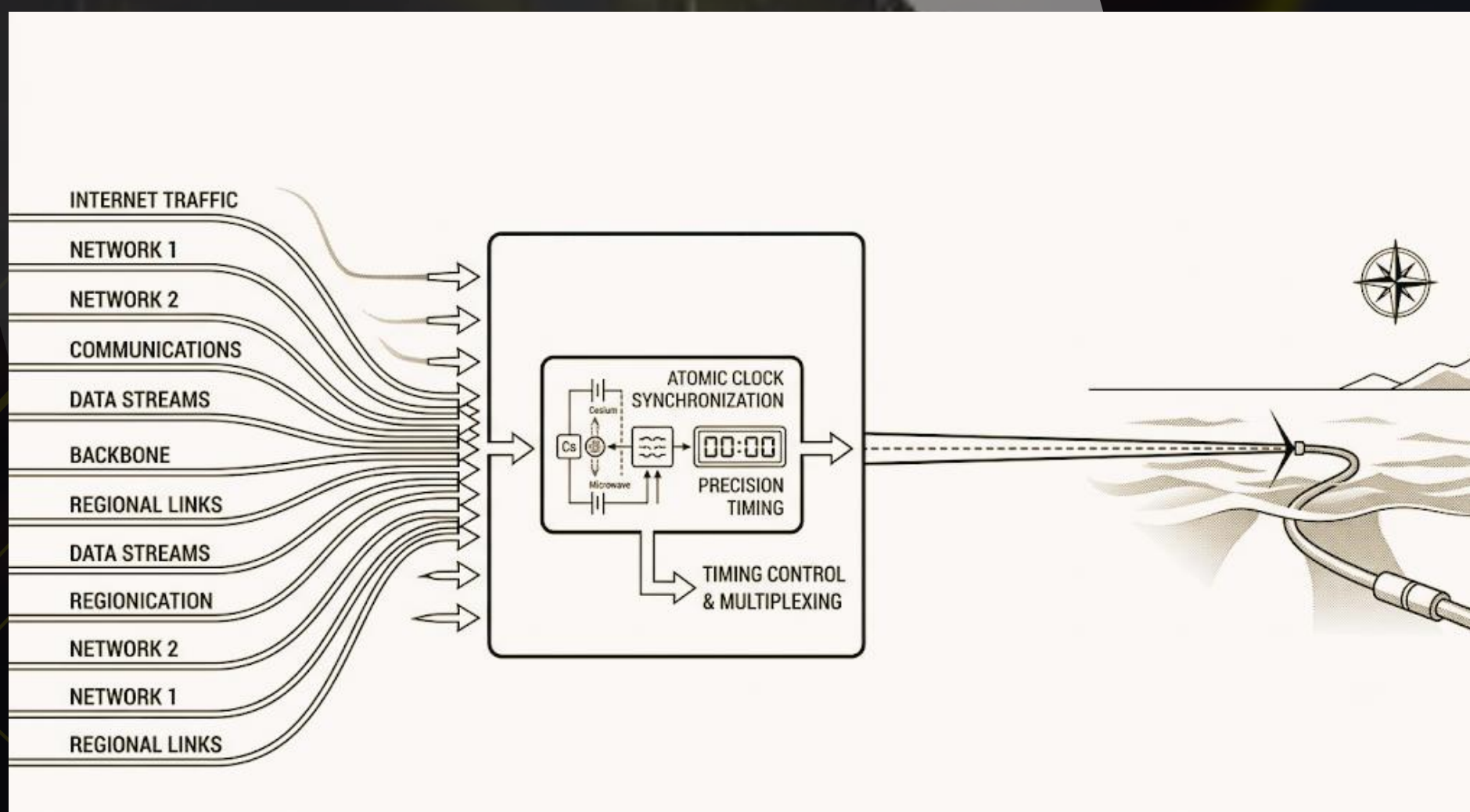


Google Meta amazon Microsoft



POZOSTALI DOSTAWCY USŁUG
INTERNETOWYCH

ŁĄCZENIE I PORZĄDKOWANIE SYGNAŁÓW W STACJI BRZEGOWEJ (CLS)



Podróż każdego pakietu danych rozpoczyna się w Stacji Brzegowej (*Cable Landing Station – CLS*). Są to specjalnie ufortyfikowane, żelbetowe bunkry wznoszone na wybrzeżach, projektowane tak, by przetrwać uderzenia tsunami oraz trzęsienia ziemi. **Stanowią one fizyczny punkt węzłowy łączący lądową sieć krajową z magistralą oceaniczną.**

Urządzenia w stacji CLS przyjmują miliony rozproszonych strumieni informacji od różnych operatorów lądowych. Ponieważ pakiety te napływają z losowymi, mikrosekundowymi opóźnieniami, aparatura musi je uporządkować i scalić w jeden spójny, gigantyczny ciąg logiczny.

Kluczem do tego procesu są lokalne, ultraprecyzyjne **zegary atomowe**, które eliminują wahania czasu, czyli tak zwany **jitter**.

Precyzja rzędu nanosekund (10^{-9} s) gwarantuje, że odbiornik po drugiej stronie oceanu będzie dokładnie wiedział, w którym punkcie osi czasu odczytać dany bit. Po zsynchronizowaniu sygnału elektrycznego, steruje on emiterami laserowymi, dokonując konwersji energii elektrycznej na strumień fotonów.

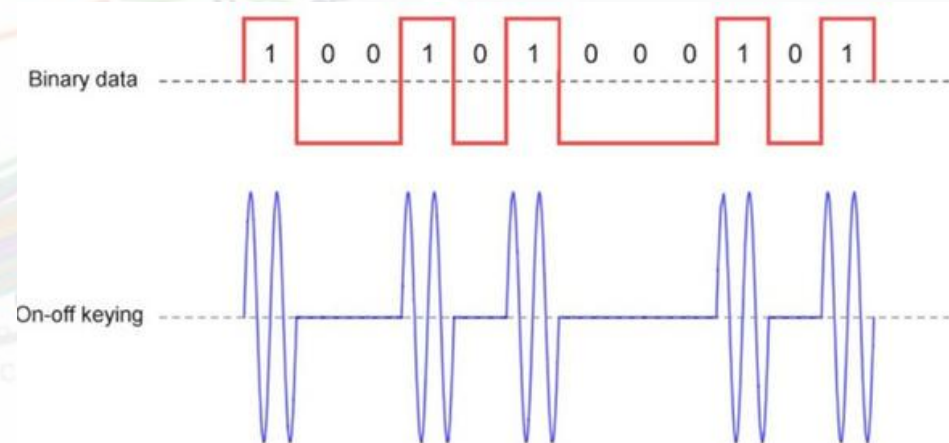
LASER DFB I ZWALCZANIE DYSPERSJI CHROMATYCZNEJ

Głównym problemem podczas dalekobieżnej transmisji optycznej jest **dyspersja chromatyczna**. Wynika ona z faktu, że klasyczne lasery emitują światło o pewnym zakresie częstotliwości. Ponieważ prędkość fali w szkle zależy od jej długości, poszczególne składowe impulsu poruszałyby się w różnym tempie, co na dystansie oceanu doprowadziłoby do całkowitego rozmycia sygnału (początek impulsu dogoniłby koniec poprzedniego).

Aby rozwiązać ten problem, stosuje się zaawansowane lasery z rozproszonym sprzężeniem zwrotnym (*Distributed Feedback – DFB*). Wzdłuż ich warstwy aktywnej wytłoczona jest periodyczna struktura mikroskopijna, czyli tak zwana **siatka Braggowska**, która działa jak bezwzględny rezonator i filtr optyczny.

Wykorzystując zjawisko interferencji niszczącej, siatka Braggowska sprawia, że **wszystkie niepożądane długości fal odbijają się wewnątrz lasera i wzajemnie wygaszają**. Przetrwąć i opuścić układ może wyłącznie jedna, perfekcyjnie czysta długość fali. W ten sposób generowane jest stabilne **światło monochromatyczne** (jednobarwne), które redukuje dyspersję chromatyczną niemal do zera i pozwala zachować ostrość impulsów.

KOHERENTNA MODULACJA QAM ORAZ MULTIPEKSACJA POLARYZACYJNA (PM)



W pierwotnych systemach światłowodowych stosowano proste **kodowanie binarne**: światło włączone oznaczało jedynkę, wyłączone - zero. Przy prędkościach rzędu setek gigabitów na sekundę fizyczne komponenty nie byłyby w stanie migać tak szybko, a sygnał uległby natychmiastowej degradacji.

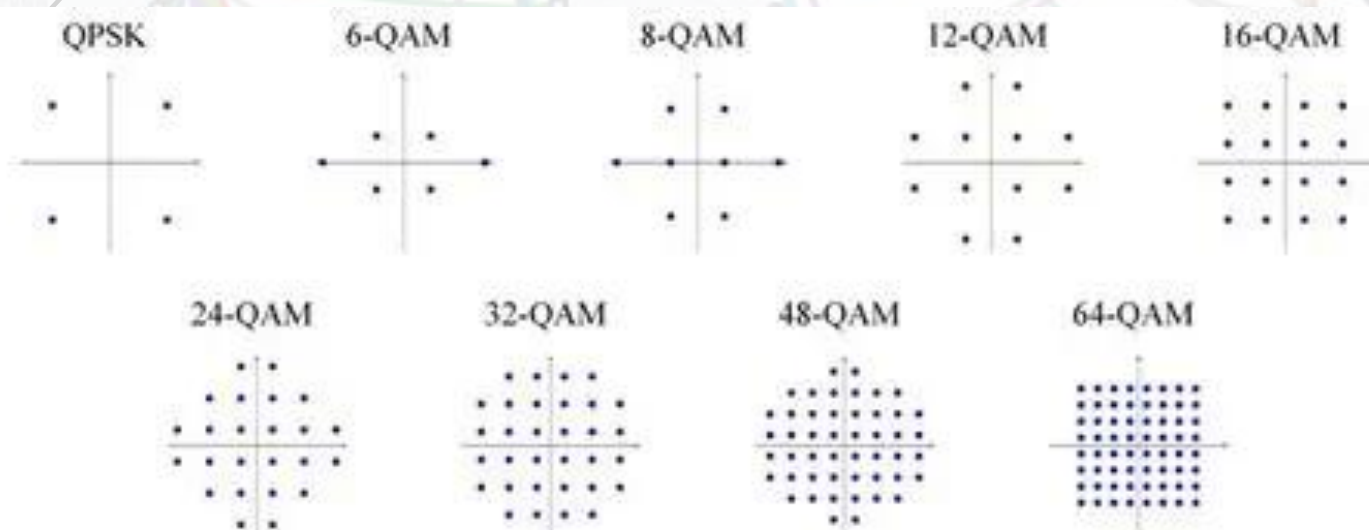
Współczesna inżynieria optyczna wykorzystuje zaawansowaną modulację fazowo-amplitudową (**QAM – Quadrature Amplitude Modulation**) połączoną z detekcją koherentną.

Światło jest falą elektromagnetyczną posiadającą trzy kluczowe parametry:

- jasność (amplitudę),
- przesunięcie w czasie względem fali wzorcowej (fazę),
- płaszczyznę drgań pola (polaryzację).

Modulacja QAM polega na **jednoczesnym, precyzyjnym sterowaniu amplitudą i fazą fali**. Dzięki temu pojedynczy impuls światła (nazywany symbolem) nie niesie już tylko jednego bitu informacji, lecz całą ich kombinację (np. 4 bity w 16-QAM lub więcej).

Dodatkowo, dzięki **multipleksacji polaryzacyjnej (PM)**, w tym samym włóknie szklanym wysyła się niezależnie dwa strumienie światła: **jeden spolaryzowany pionowo, drugi poziomo**. Ponieważ drgają one w prostopadłych płaszczyznach, nie zakłócają się wzajemnie, co pozwala na natychmiastowe podwojenie przepustowości bez konieczności kładzenia nowego kabla.



DWDM (DENSE WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING)

Przez pojedyncze, mikroskopijne włókno szklane nie wysyła się tylko jednego strumienia danych.

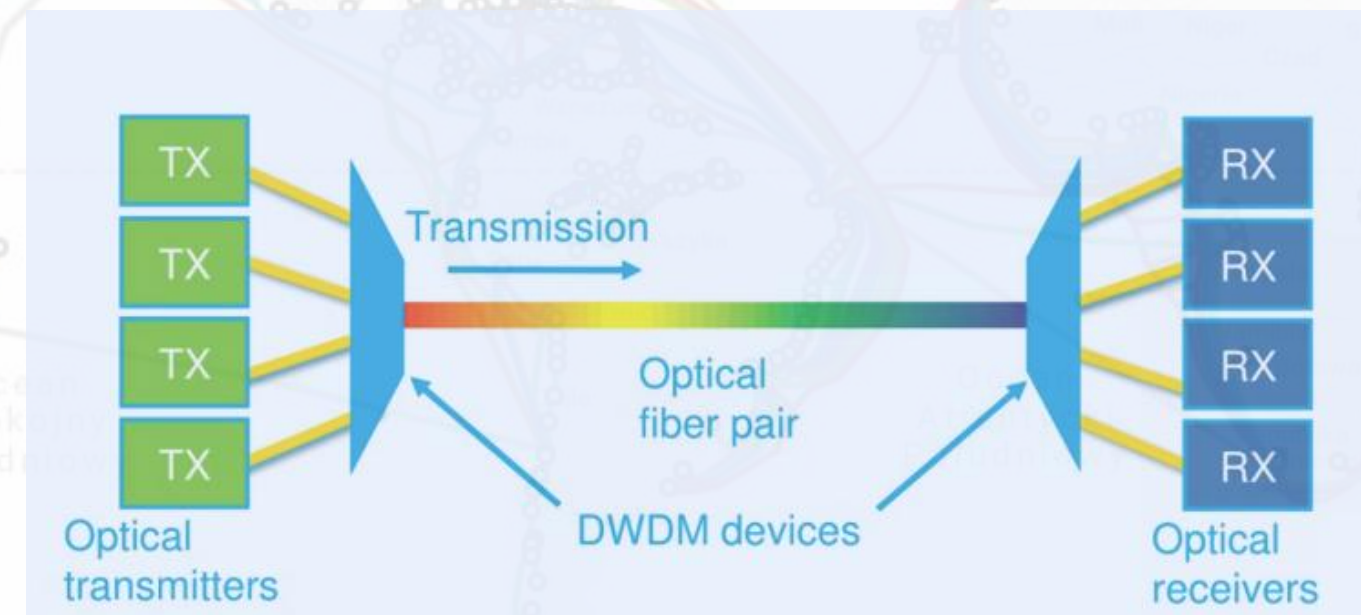
Dzięki technologii DWDM, która pozwala na jednoczesną transmisję wielu niezależnych kanałów informacyjnych wewnątrz jednego, mikroskopijnego rdzenia, **do jednego światłowodu wpuszcza się jednocześnie nawet do 100 różnych sygnałów z osobnych laserów DFB.**

Każdy strumień danych jest nadawany przez oddzielny laser DFB na minimalnie innej długości fali, czyli w innym „kolorze” niewidzialnej podczerwieni. Odstępy między tymi kanałami są skrajnie małe i wynoszą zaledwie **0,4 do 0,8 nanometra.**

W stacji brzegowej urządzenie optyczne o nazwie siatka falowodowa (AWG) działa jak odwrócony pryzmat, scalając te wszystkie niezależne wiązki w jeden zbiorczy strumień światła.

Ponieważ w fizyce fale o różnych częstotliwościach są niezależne i nie zakłócają się wzajemnie, poruszają się w tym samym szkłe obok siebie, nie wywołując interferencji.

Technologia DWDM pozwala podnieść przepustowość pojedynczego włókna do poziomu kilkudziesięciu Terabitów na sekundę ($1 \text{ Tb/s} = 10^{12} \text{ bitów/s}$)

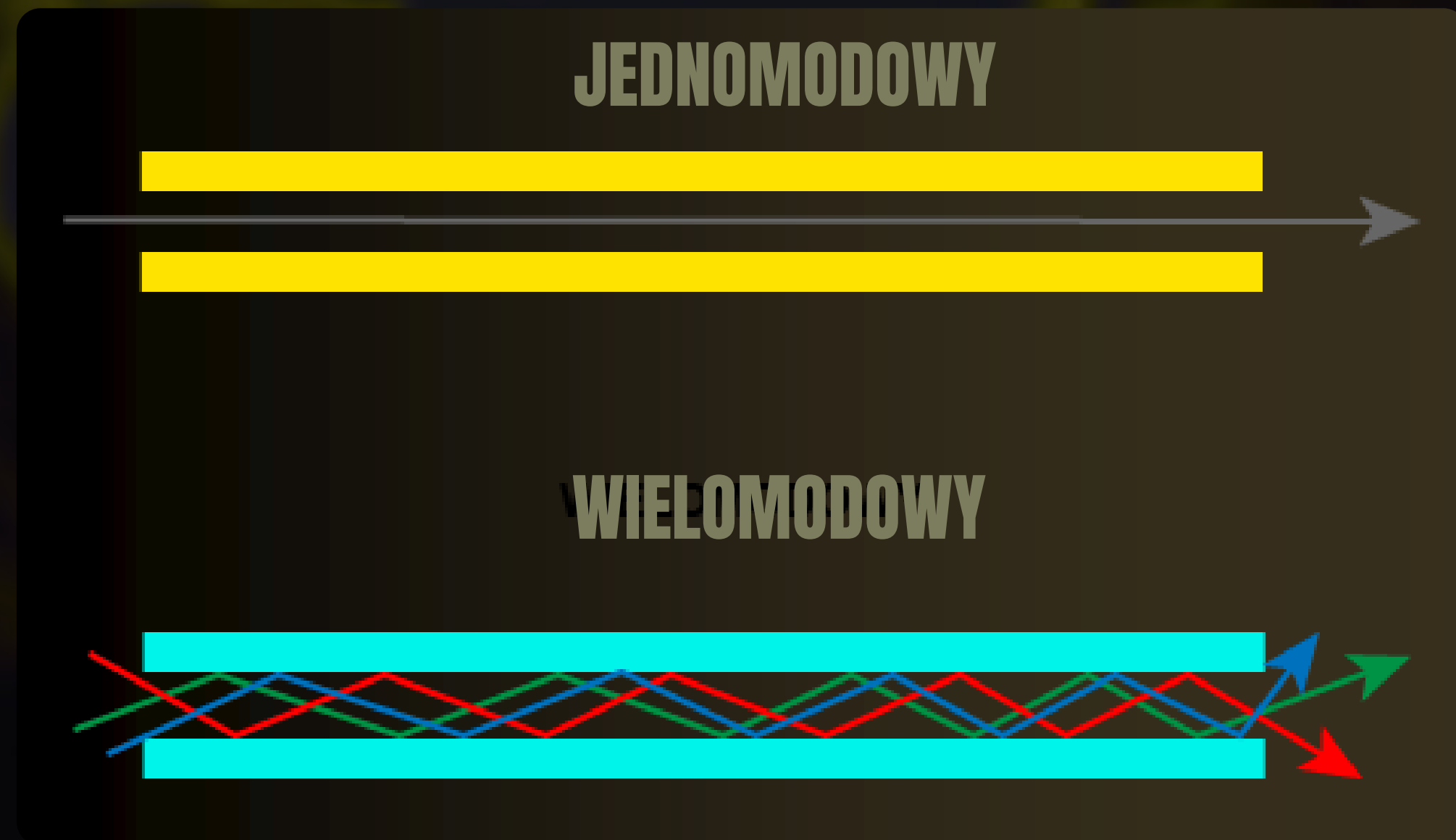


ŚWIATŁOWÓD JEDNOMODOWY

Z miksera DWDM sygnał trafia bezpośrednio do światłowodu jednomodowego. Składa się on z dwóch warstw szkła kwarcowego: **wewnętrznego rdzenia i otaczającego go płaszczu**. Średnica rdzenia jest ekstremalnie mała i wynosi zaledwie około 9 mikrometrów $\approx 9\mu m$

Tak miniaturowa przestrzeń, porównywalna z długością fali samego światła, zmusza falę do poruszania się tylko jedną, prostą ścieżką wzdłuż osi włókna.

Gdyby rdzeń był grubszy (wielomodowy), światło odbijałoby się pod różnymi kątami - niektóre promienie leciałyby zygzakiem szybciej, inne wolniej, co na dystansie oceanu doprowadziłoby do całkowitego rozmycia, nałożenia się na siebie i zniszczenia struktury przesyłanych impulsów.



ZAŁAMANIE ŚWIATŁA I PRĘDKOŚĆ FALI W MEDIUM SZKLANYM

Światło osiąga swoją maksymalną prędkość wynoszącą
wyłącznie w próżni.

$$c \approx 300\,000 \text{ km/s}$$

Wchodząc w strukturę ciała stałego, jakim jest szkło kwarcowe, fotony zaczynają stale oddziaływać z chmurami elektronowymi atomów krzemu i tlenu, co powoduje spowolnienie biegu całej fali elektromagnetycznej.

Miarą tego spowolnienia jest bezwymiarowy parametr nazywany **współczynnikiem załamania (n)**, definiowany wzorem:

$$n = \frac{c}{v}$$

c - prędkość światła w próżni
v - prędkość światła w ośrodku
n- współczynnik załamania
materiału
(dla powietrza ≈ 1.0
dla szkła kwarcowego
 ≈ 1.45)

Co oznacza, że światło w kablu podmorskim porusza się z prędkością zredukowaną do:

$$v = \frac{300\,000 \text{ km/s}}{1,45} \approx 207\,000 \text{ km/s}$$

PRAWO SNELLA (SNELLIUSA)

Prawo Snella

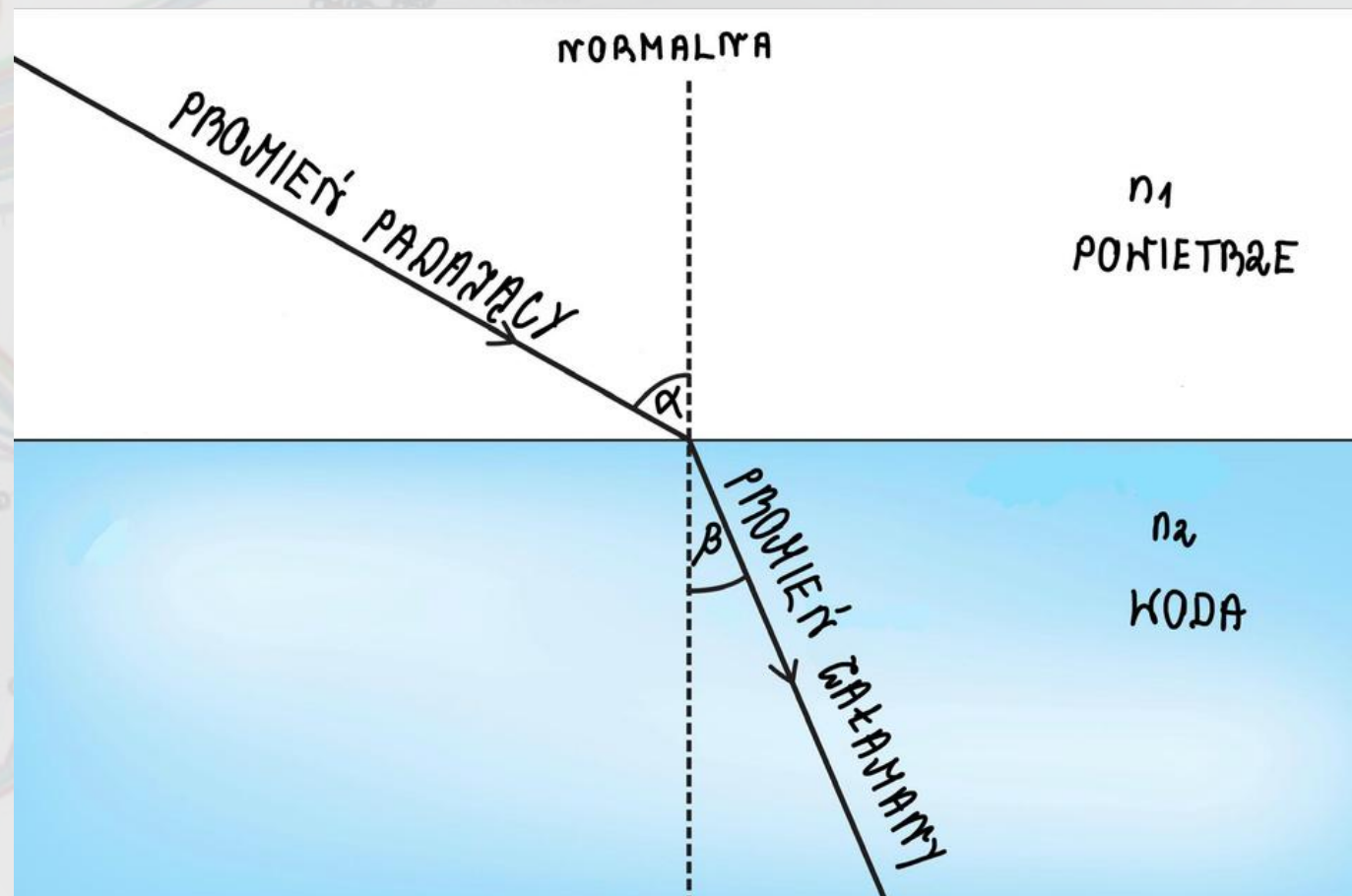
(prawo załamania światła), zostało sformułowane przez holenderskiego matematyka i astronoma Willebrorda Snella w 1621 roku i opisuje, jak promień światła zmienia kierunek przy przejściu z jednego przezroczystego ośrodka do drugiego o innym współczynniku załamania

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$$

$$n_2 > n_1$$

Promień padający, załamany i normalna leżą w jednej płaszczyźnie nazywanej płaszczyzną padania.

Jeśli światło przechodzi z ośrodka o mniejszym współczynniku załamania światła do ośrodka o współczynniku większym, to kąt załamania jest mniejszy od kąta padania.



α – kąt padania

β – kąt odbicia

CAŁKOWITE WEWNĘTRZNE ODBICIE (CWO)

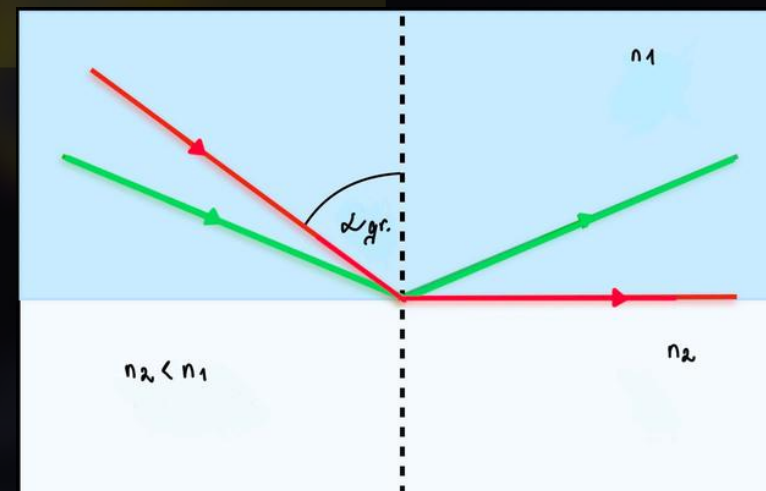
Prawo Snella pozwala także wyjaśnić zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia, które zachodzi, gdy kąt padania przekracza tzw. kąt graniczny.

Przy $n_1 > n_2$ kąt β rośnie znacznie szybciej niż kąt padania α , istnieje taki krytyczny moment, w którym kąt załamania osiągnie maksimum, czyli dokładnie

$$90^\circ (\sin(90^\circ) = 1)$$

Podstawiając to do Prawa Snella, otrzymujemy wzór na kąt graniczny:

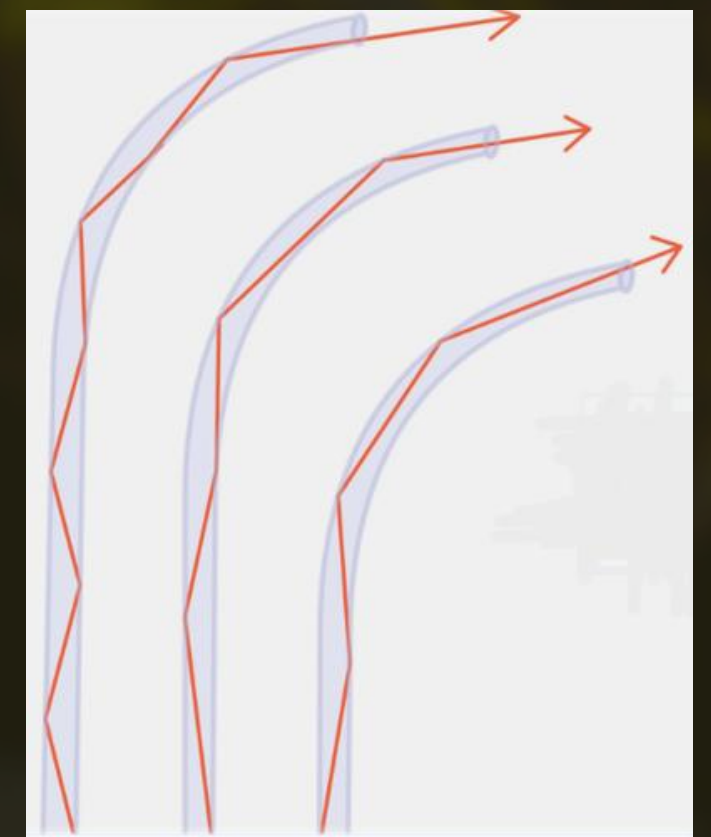
$$n_1 \cdot \sin(\alpha_{gr}) = n_2 \cdot 1 \implies \sin(\alpha_{gr}) = \frac{n_2}{n_1}$$



Prawo Snella udowadnia, że jeśli wpuścimy światło pod kątem większym niż α_{gr} załamanie staje się matematycznie i fizycznie niemożliwe. Światło nie ma innego wyjścia – musi w całości odbić się z powrotem. W ten sposób Prawo Snella definiuje i uruchamia Całkowite Wewnętrzne Odbicie (CWO).

W światłowodzie **rdzeń ma nieco wyższy współczynnik załamania niż otaczający go płaszcz**. Dzięki temu światło poruszające się w rdzeniu pod odpowiednio dużym kątem nie przechodzi do płaszcza.

Zgodnie z Prawem Snella, po przekroczeniu kąta granicznego zachodzi Całkowite Wewnętrzne Odbicie (CWO), przez co granica między ośrodkami działa jak zwierciadło. **W efekcie światło pozostaje zamknięte w rdzeniu i może przemieszczać się na duże odległości.**



OBLICZANIE KĄTA GRANICZNEGO DLA STRUKTUR KABLA PODMORSKIEGO

Kąt padania, dla którego kąt załamania w płaszczu osiąga swoją maksymalną fizyczną wartość (**promień zaczyna ślizgać się po granicy rdzeń-płaszcz**), nazywamy kątem granicznym.

W rzeczywistym procesie produkcji transoceanicznych światłowodów jednomodowych stosuje się bardzo precyzyjne parametry domieszkowania materiałowego:

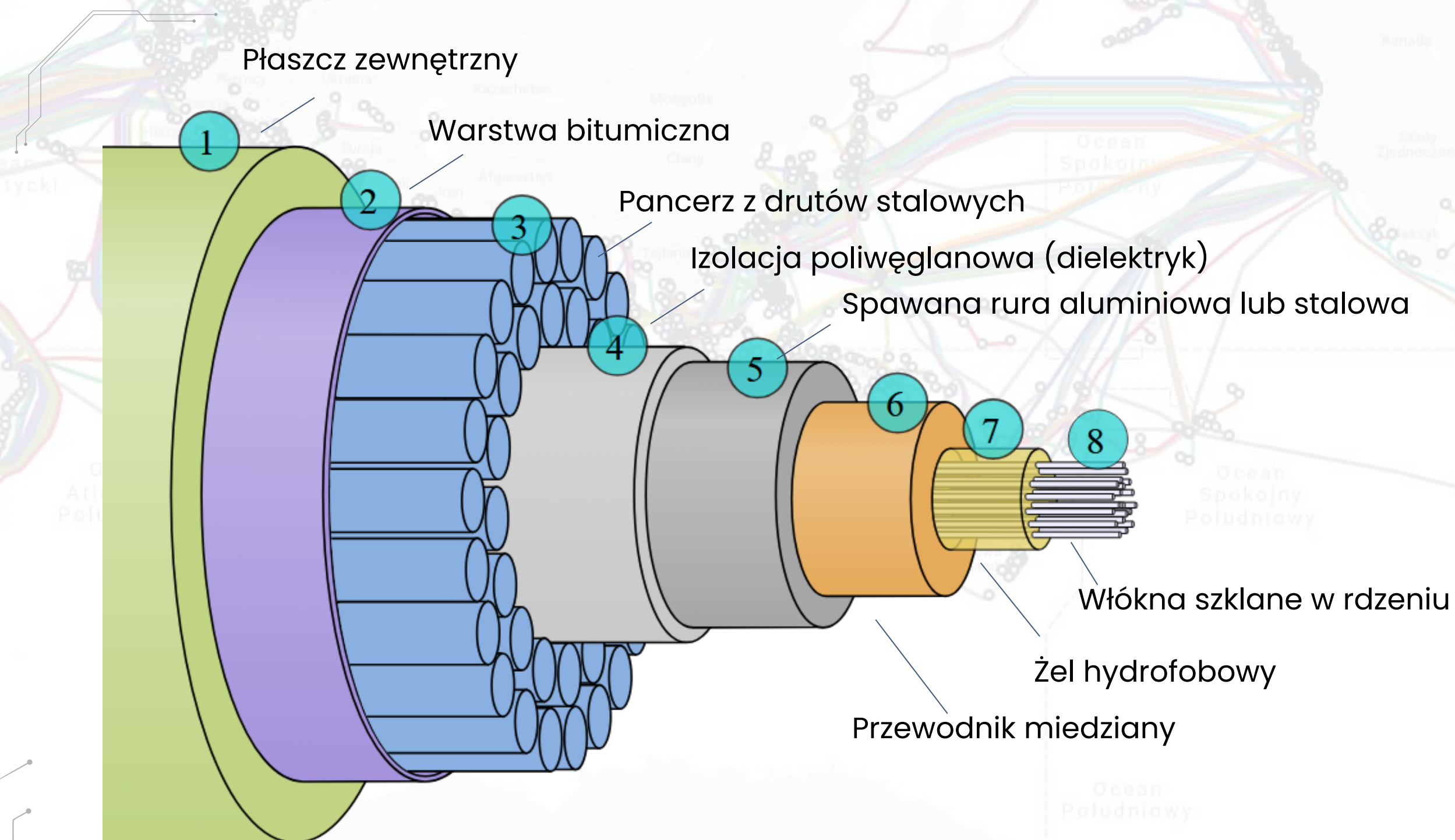
- Płaszcz z czystej krzemionki kwarcowej $(SiO_2): n_2 = 1,444$
- Rdzeń wzbogacony dwutlenkiem germanu $(GeO_2): n_1 = 1,465$

Ponieważ $\sin(90^\circ) = 1$, przekształcając Prawo Snella, otrzymujemy:

$$\sin(\alpha_{gr}) = \frac{n_2}{n_1} \implies \alpha_{gr} = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

$$\alpha_{gr} = \arcsin\left(\frac{1,444}{1,465}\right) \approx \arcsin(0,98566) \approx 80,3^\circ$$

PRZEKRÓJ POPRZECZNY OCEANICZNEGO KABLA ŚWIATŁOWODOWEGO



TŁUMIENIE SYGNAŁU

Pomimo uwięzienia światła wewnątrz rdzenia oraz dbałości o skrajną czystość chemiczną szkła, fotony stopniowo tracą swoją energię w miarę pokonywania odległości. Spadek mocy sygnału nie następuje w sposób liniowy, lecz ma charakter wykładniczy.

Ubytek energii na każdym mikro-odcinku drogi jest wprost proporcjonalny do aktualnej, chwilowej mocy fali w tym punkcie.

$$P(L) = P_0 \cdot 10^{-\frac{\alpha \cdot L}{10}}$$

- $P(L)$ – moc sygnału docierająca do urządzenia odbiorczego po przebyciu trasy
- P_0 – moc początkowa wiązki wprowadzona przez laser w stacji nadawczej CLS
- L – dystans pokonany przez falę świetlną wyrażony w kilometrach [km]
- α – jednostkowy współczynnik tłumienia medium, podawany w decybelach na kilometr [dB/km]



STRATY MATERIAŁOWE

Rozpraszanie Rayleigha

Zjawisko to wynika z amorficznej natury szkła. Ponieważ kwarc nie posiada uporządkowanej struktury krystalicznej, podczas jego szybkiego schładzania w materiale utrwalają się losowe, submikroskopowe fluktuacje gęstości.

Gdy foton napotyka taką nieregularność, ulega rozproszeniu we wszystkich kierunkach. Zaburza to warunki całkowitego wewnętrznego odbicia (CWO), co prowadzi do stopniowej utraty sygnału, ponieważ część światła wydostaje się z rdzenia do płaszcza.

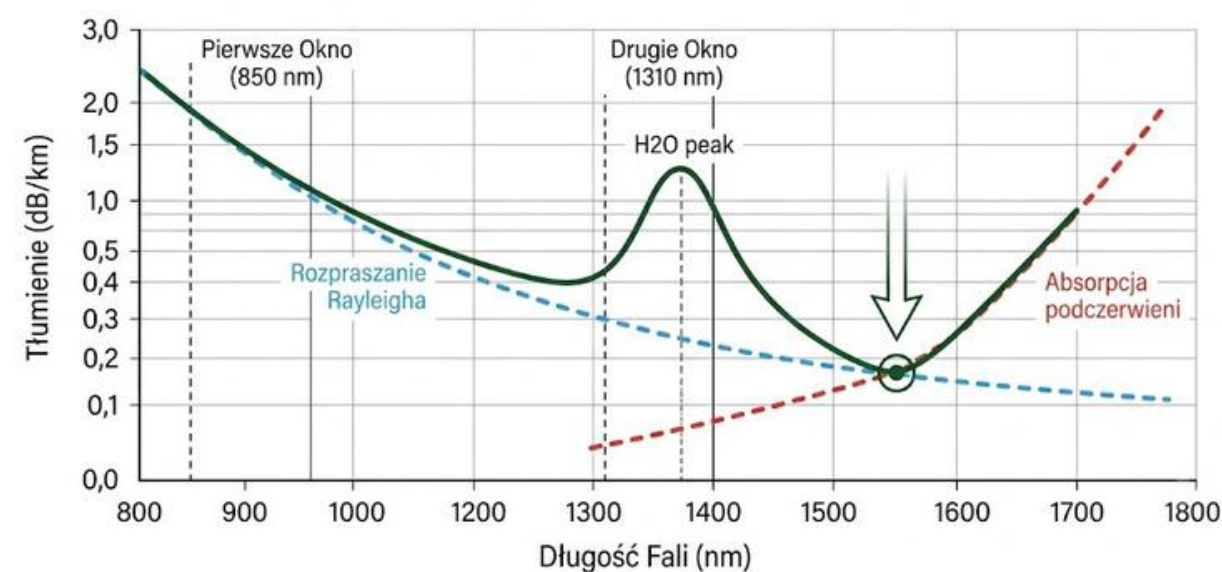
Zanieczyszczenia w postaci wody

Straty te są wywoływane przez **zanieczyszczenia w postaci jonów hydroksylowych (OH^-)**, czyli śladowych cząsteczek wody obecnych w szkłe. W tym przypadku foton nie ulega rozproszeniu, lecz zostaje całkowicie pochłonięty, a jego energia zamienia się w ciepło.

Wiązania tlen–wodór mają określone częstotliwości drgań. Gdy pokrywają się one z częstotliwością światła, zachodzi rezonans, prowadzący do silnej absorpcji. Powoduje to powstawanie tzw. „wodnych pików” (water peaks) na wykresie tłumienności. Najsilniejszy z nich występuje przy długości fali około 1380 nm, dlatego zakres ten nie jest wykorzystywany w transmisji dalekiego zasięgu.

..TRZECIE OKNO OPTYCZNE"

TŁUMIENNOŚĆ ŚWIATŁOWODU G.652



Analiza fizyczna strat w czystym krzemionkowym szkłe pozwoliła naukowcom zidentyfikować tzw. **trzecie okno optyczne**. Jest to pasmo fali w bliskiej podczerwieni o długości dokładnie **1550 nanometrów (nm)**. W tym konkretnym punkcie wykresu fizyczne minima rozpraszania Rayleigha oraz absorpcji nakładają się na siebie, dając najniższy możliwy współczynnik tłumienia: $\alpha \approx 0,2 \text{ dB/km}$

Oznacza to, że sygnał może pokonać dystans około 60–80 km zanim osłabnie na tyle, by stopić się z szumem termicznym tła i stać się nieczytelnym dla odbiornika.

FIZYKA GŁĘBIN I SYSTEM ZASILANIA KABLA

Medyczne i podwodne magistrale danych spoczywają na dnie oceanów, gdzie średnia głębokość operacyjna wynosi $h = 5000$ m. Aby zrozumieć warunki panujące w tym środowisku, przeprowadźmy kalkulację ciśnienia hydrostatycznego:

$$P = \rho \cdot g \cdot h$$

Przyjmujemy rzeczywiste stałe fizyczne dla głębin morskich: gęstość słonej wody $\rho = 1030 \text{ kg/m}^3$ oraz przyspieszenie ziemskie $g \approx 9,81 \text{ m/s}^2$.

Otrzymujemy:

$$P = 1030 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 5000 \text{ m} \approx 50,5 \cdot 10^6 \text{ Pa} \approx \mathbf{50,5 \text{ MPa}}$$

Wynik oznacza stały nacisk przekraczający 500 atmosfer. Głównym zadaniem stalowej rury jest przejęcie tej siły. Gdyby doszło do minimalnego ugięcia konstrukcji, kruche szkło uległoby mikrozgięciom. Te mikroskopijne odkształcenia zniszczyłyby geometrię kątową ścianki rdzenia, likwidując warunki dla CWO i wywołując natychmiastowy wyciek światła do płaszcza, co doszczętnie przerwałoby transmisję.

Wzmacniacze na dnie oceanu wymagają energii. Aby przesłać prąd na tysiące kilometrów bez gigantycznych strat, stacje brzegowe wtłaczają w miedzianą żyłę prąd o napięciu aż **10 000 V** przy minimalnym natężeniu $I \approx \mathbf{1 A}$. Zgodnie z Prawem Joule'a-Lenza, tak niskie natężenie minimalizuje wydzielanie ciepła i chroni kabel przed stopieniem. Obwód zamyka się w unikalny sposób-prąd powrotny płynie swobodnie z powrotem przez słoną wodę oceanu, która działa jak przewodnik o zerowym oporze.

WZMACNIACZE EDFA

Z powodu naturalnego tłumienia szkła kwarcowego $\alpha \approx 0,2\text{dB/km}$, impulsy podczerwone po przebyciu 60-80 km drastycznie słabną. Klasyczna zamiana światła na prąd w celu wzmocnienia generowałaby ogromne opóźnienia i ograniczała prędkość sieci.

Rozwiązaniem są **wzmacniacze EDFA** umieszczone w tytanowych kapsułach na dnie oceanu. Sercem urządzenia jest krótki odcinek światłowodu domieszkowany jonami erbu (Er^{3+}). Laser pomocniczy (tzw. pompa 980 nm) nieustannie naświetla te jony, wprowadzając ich elektrony w stan wzbudzony.

Gdy osłabiony foton naszego sygnału (1550 nm) nadlatuje i mija taki atom erbu, wywołuje zjawisko emisji wymuszonej. Elektron opada na poziom podstawowy, emitując nowy foton, który jest identycznym klonem kwantowym fali wejściowej - ma tę samą fazę, kierunek i polaryzację. Sygnał odzyskuje pełną moc bezpośrednio w locie, bez jakichkolwiek opóźnień.



OPÓŹNIENIA PRZESYŁU DANYCH

Przeanalizujemy czas podróży sygnału (RTD) na trasie Londyn - Nowy Jork (6500 km)

Kluczowym parametrem globalnej sieci jest latencja, czyli opóźnienie przesyłu danych, mierzone jako RTD (*Round Trip Delay*) - czas podróży impulsu do celu i z powrotem. Znając prędkość światła [v] w szklanym rdzeniu ok. 207 000 km/s, obliczmy czas transatlantyckiego transferu danych.

Dzieląc długość kabla przez prędkość fali, otrzymujemy czas lotu sygnału w jedną stronę wynoszący **31,4 ms**. Czysty czas podróży w dwie strony to **62,8 ms**. Po dodaniu milisekund potrzebnych na przetworzenie pakietów przez routery na lądzie, otrzymujemy realny, stabilny ping na poziomie **75-80 ms**.

Dla porównania, tradycyjny satelita geostacjonarny (GEO) krąży na wysokości 35,786 km. Choć fala radiowa pędzi w kosmosie z pełną prędkością światła (300 000 km/s), to ze względu na gigantyczny dystans - lot z Ziemi w górę, w dół do odbiorcy i powrót tą samą drogą - czas RTD wynosi tam minimum **480 ms**.

Światłowód podmorski zapewnia więc ponad 6-krotnie mniejsze opóźnienia niż satelita. Ta przewaga decyduje o bezwzględnej dominacji kabli na rynkach finansowych, giełdach wysokiej częstotliwości oraz w globalnych systemach chmurowych, gdzie każda milisekunda ma znaczenie.



DZIĘKUJĘ ZA
UWAGĘ

KLAUDIA JASIONEK

ŹRÓDŁA

Zdjęcia:

Grafiki wygenerowane przy użyciu AI

<https://zpe.gov.pl/a/transmisja-swiatlowodowa-w-praktyce/DzZq7V0gR>

<https://technologia-swiat.pl/jak-przesylany-jest-internet-przez-kable-podwodne/>

<https://forbot.pl/blog/jak-dziala-swiatlowod-czym-jest-prawo-snelliusa-id47385pitu>

<https://resources.telegeography.com/2026-submarine-cable-map>

<https://techdirectory.sg/insights/subsea-cable-industry-outlook-2026>

<https://www.slideserve.com/barnabas-sean/systemy-telekomunikacji-optycznej-powerpoint-ppt-presentation>

[https://www.youtube.com/Jak to jest zrobione: Światłowód | Nici, które napędzają Internet](https://www.youtube.com/Jak%20to%20jest%20zrobione:%20%C5%9awi%C4%85t%C5%82ow%C3%B3d%20|%20Nici,%20kt%C3%B3re%20nap%C4%99dzaj%C4%85%20Internet)

<https://www.dataoptics.com.pl/artykuly/wlokno-jednomodowe.html>

<https://esezam.okno.pw.edu.pl/mod/book/tool/print/index.php?id=42>

Wikipedia.org

oraz wiedza własna.