PIOTR BŁASZCZYK, KAZIMIERZ MRÓWKA

Dwie tęcze Kartezjusza

1. Rozprawa Kartezjusza *O tęczy* stanowi ósmą część traktatu *Meteory*, który także jest częścią większej całości. Zarysujemy pokrótce ów szerszy kontekst, w jakim należy umieścić rozważania o tęczy.

22 czerwca 1633 roku Święte Oficjum ogłasza potępiający wyrok w sprawie Galileusza. W jego następstwie Kartezjusz zrezygnował z wydania *Świata albo Traktatu o świetle*, dzieła, w którym bronił hipotezy heliocentryzmu. Traktat został opublikowany dopiero w 1664 roku, a więc po śmierci filozofa. Pełny tytuł tego wydania brzmiał: *Świat Pana Kartezjusza albo Traktat o Świetle i o innych głównych przedmiotach Zmysłów*. Traktat był pierwszą częścią większego dzieła, z którego zachowała się ostatnia część, *Traktat o człowieku*. Innym ważnym dziełem, które należy wymienić w kontekście późniejszej *Rozprawy o metodzie*, były *Reguły kierowania rozumem*. Dzieło to również nie zostało wydane za życia Kartezjusza, lecz – w odróżnieniu od *Świata* – nie wiemy, dlaczego filozof zdecydował się pozostawić *Reguły* w manuskrypcie.

W 1637 r., bez nazwiska autora, ukazuje się *Rozprawa o Metodzie, w celu prawidłowego kierowania swym rozumem i poszukiwania prawdy w naukach oraz Dioptryka, Meteory i Geometria, które są esejami tej Metody*. Chociaż układ dzieła daje pierwszeństwo *Rozprawie o Metodzie*, to u źródeł nowego projektu Kartezjusza była *Dioptryka*. Tytuł nawiązuje do dzieła Keplera z 1611 r., a jego przedmiotem jest optyka geometryczna. Esej składa się z dziesięciu rozpraw: 1. *O świetle*; 2. *O załamaniu*; 3. *O oku*; 4. *O zmysłach ogólnie*; 5. *O obrazach, które tworzą się na dnie oka*; 6. *O wzroku*; 7. *O sposobach udoskonalenia wzroku*; 8. *O kształtach, jakie powinny mieć ciała przeźroczyste, aby przez załamanie zmieniać kierunek promieni na wszystkie sposoby, które służą oku*; 9. *Opis lunet*; 10. *O sposobie szlifowania soczewek*. Drugim esejem dołączonym do wydania z 1637 roku były *Meteory*. Tytuł nawiązuje do *Meteorologiki* Arystotelesa, który meteorami określał wszystkie zjawiska sublunarne, w tym zjawiska atmosferyczne. Podobnie jak *Dioptryka*, drugi esej składa się z dziesięciu rozpraw wyznaczających treść dzieła: 1. *O naturze ciał ziemskich*; 2. *O oparach i wyziewach*; 3. *O soli*; 4. *O wiatrach*; 5. *O chmurach*; 6. *O śniegu, deszczu i gradzie*; 7. *O burzach, piorunie i innych ogniach, które zapalają się w powietrzu*; 8. *O tęczy*; 9. *O kolorach chmur i o okręgach lub koronach, które dostrzega się czasem wokół gwiazd*; 10. *O ukazywaniu się kilku słońc*. Trzecim esejem dopełniającym całość była *Geometria*, poświęcona matematyce. *Geometria* składa się z trzech ksiąg: 1. *O problemach, w których linie proste i okręgi wystarczą do przeprowadzenia konstrukcji*; 2. *O naturze linii krzywych*; 3. *O konstrukcjach zagadnień, w których występują bryły i nadbryły*[1].

Wszystkie eseje miały dowodzić skuteczności praktycznego zastosowania metody przedstawionej teoretycznie w rozprawie wprowadzającej.

2. Badania tęczy, poczynając od Arystotelesa, przez scholastyków, po współczesnych Kartezjuszowi, koncentrowały się wokół trzech tematów: warunki atmosferyczne, w jakich powstaje tęcza, geometria oraz kolory tęczy. Kartezjusz

[1] O *Geometrii* piszemy w: P. Błaszczyk, K. Mrówka, *Metafizyka ruchu w* Geometrii *Kartezjusza*, „Argument", 2014, nr 2 (w druku), http://www.argument-journal.eu/.

podejmuje kwestię drugą i trzecią. Położenie tęczy pierwotnej i wtórnej wyjaśnia na tyle dokładnie, że jego ustalenia zgadzają się ze współczesnymi wynikami[2]; natomiast proponowana teoria kolorów jest niemal czystą spekulacją w duchu scholastycznym. Zagadkę kolorów tęczy rozwikłał dopiero Newton w *Optyce* – ogłoszonej drukiem w 1704 r., a wcześniej, w roku 1666, w *Wykładach z optyki*.

Sięgnijmy do poprzedników. Arystoteles dowodził, że promienie słoneczne odbite od chmur tworzą stożek. Teoria ta pozwoliła mu wyjaśnić kolisty kształt tęczy. Tradycja scholastyczna, nazywana w rozprawie *filozoficzną*, skupiała się na rozważaniach jakościowych, Kartezjusz należy do grona nowożytnych przyrodników formułujących prawa ilościowe. Jego badania zaliczają się do geometrii optycznej, gdzie promienie światła są opisywane jako linie proste wychodzące z pewnego źródła i biegnące do oka. Nauka ta wywodzi się z *Optyki* Euklidesa, chociaż w antycznej teorii przyjmowano aksjomat, że promień światła ma swój początek w oku obserwatora. Podstawową rolę w rachunkach Kartezjusza odgrywa prawo odbicia światła, znane jako twierdzenie 1 *Katoptryki* Euklidesa, oraz prawo załamania światła, które po raz pierwszy zostało zastosowane w badaniach tęczy właśnie przez Kartezjusza[3].

Odkrycie szklanych soczewek w istotny sposób zmieniło geometrię optyczną. Soczewki były używane w Europie już na początku XIV w., jednak załamania światła, jakie wywołują zaczęto badać dopiero pod koniec XV wieku. Do pionierów w tej dziedzinie należał Francesco Maurolico (1494–1575), wymieniony z nazwiska w rozprawie Kartezjusza[4]. Istotny wpływ na badania dotyczące powstawania obrazów w soczewkach wywarł Johannes Kepler (1571––1630); to właśnie on wprowadził termin *dioptryka* na określenie matematycznych badań soczewek[5].

3. Przejdźmy do samej rozprawy. Na wstępie Kartezjusz opisuje doświadczenie, dzięki któremu znalazł kąty, pod jakimi widzimy tęczę pierwotną i wtórną; w istocie, dla uproszczenia opisu, uwaga czytelnika jest kierowana tylko na czerwone łuki pierwszej i drugiej tęczy.

Punkt wyjścia jest zupełnie oryginalny. Kartezjusz przyjmuje, że źródłem tęczy jest sposób, w jaki światło zachowuje się w zetknięciu z kroplą wody; aby to zbadać wystarczy rozważać tylko jedną kroplę, przy czym jej wielkość nie ma – jak pisze – wpływu na wynik: „to, czy [krople] są większe lub mniejsze nie wpływa wcale na sposób ukazywania się łuku, wpadłem na pomysł zrobienia jednej bardzo dużej, by móc ją lepiej zbadać" (s. 250)[6].

Podstawowe ustalenia Kartezjusza objaśnimy odwołując się do pierwszej ilustracji z rozprawy. Pomyślmy stożek o wierzchołku w punkcie obserwacji, na rysunku jest to punkt E, którego oś, prosta ZEM, biegnie od słońca, przez punkt obserwacji, a tworzącą stanowi linia ED. Promień światła AB, równoległy do ZEM, pada na kroplę deszczu, kulę BCD, załamuje się, odbija wewnętrznie w punkcie C, wychodzi z kropli w punkcie D, załamuje się raz jeszcze i kieruje do obserwatora przebiega-

[2] Zob. E. Dereniak, T. Dereniak, *Geometrical and Trigonometric Optics*, Cambridge 2008, rozdz. *Rainbows*.

[3] Zjawiska towarzyszące tęczy związane z falową naturą światła (np. efektem polaryzacji czy interferencji) opisuje H. M. Nussenzveig (*The Theory of the Rainbow*, „Scientific American" 1977 (4)).

[4] „Maurolycus, który, jak sądzę, jako pierwszy przypisał jednej 45 stopni, przypisuje drugiej około 56, co pokazuje, że małą wiarę należy dawać obserwacjom, którym nie towarzyszy prawdziwy rozum" (s. 266).

[5] Zob. F. J. Dijksterhuis, *Refraction*, [w:], *Encyclopedia of the Scientific Revolution from Copernicus to Newton*, red. W. Applebaum, London 2000.

[6] W 1304 roku Teodoryk z Fryburga postawił tezę, że dla wyjaśnienia zjawiska tęczy wystarczy zbadać zachowanie światła na jednej kropli wody. Przeprowadził też stosowne eksperymenty, w których funkcję kropli pełniło duże, kuliste i przezroczyste naczynie wypełnione wodą. Wyniki tych badań długo były nieznane. Po trzystu latach odnalazł je Antonio de Dominis i ogłosił w 1610 r. Kartezjusz mógł je znać dzięki tym relacjom, bo na wstępie rozprawy opisuje dokładnie taki sam eksperyment. Zob. H. M. Nussenzveig, dz. cyt. Pracę Antonia de Dominis wymienia Newton w *Optyce*, w rozdziale poświęconym tęczy.

jąc linię *ED*. Gdy kąt między osią *ZEM* a tworzącą wynosi 42°, to na przekroju stożka rysuje się tęcza pierwotna; na rysunku jest ona przedstawiona jako część wydłużonej elipsy, tak jakby mogła być oglądana w skrócie perspektywicznym. Kartezjusz tak ją opisuje: „te punkty, oglądane wszystkie razem, poznając miejsce, w którym są, tylko przez kąt pod którym dają się dostrzec, powinny ukazać się jako ciągłe koło w kolorze czerwonym; i że takie same powinny być punkty, w tych oznaczonych *S* i *T*, z których linie pociągnięte do *E* tworzą z *EM* trochę bardziej ostre kąty, które tworzą koła o słabszych kolorach" (s. 252).

Pomyślmy teraz stożek, który różni się od poprzedniego tylko tym, że tworzącą stanowi promień wychodzący z kropli deszczu nachylony do osi *ZEM* pod kątem 52°, jak linia *EK*. Jego przekrój przedstawi drugą (wtórną) tęczę, o barwach mniej intensywnych i ułożonych w odwróconym porządku. Kartezjusz tak pisze o niej: „jeśli kąt *MEX* wynosi 52 stopnie, to powinno ukazać się koło czerwone w kroplach oznaczonych *X*, zaś inne koła o słabszych kolorach w kroplach oznaczonych *Y*, i że na tym zasadza się druga i mniej ważna tęcza" (s. 252).

Kąty, pod którym widziana jest tęcza pierwotna i wtórna były wyznaczane przed Kartezjuszem i to z podobną dokładnością[7]. O wyjątkowości rozprawy Kartezjusza stanowi to, że przedstawia odpowiedź na pytanie, dlaczego właśnie te dwa kąty są wyróżnione. Problem jest następujący: na kroplę wody padają promienie pod różnymi kątami, jedne odbijają się od niej, jak od lustra, inne wpadając do kropli odbijają się wewnętrznie jeden, dwa, lub więcej razy. Wśród tych, które odbijają się tylko raz są takie, które wychodzą pod innymi kątami niż 42°. W związku z tym czytamy: „Pozostawała jednak jeszcze zasadnicza trudność: skoro jest wiele innych promieni, które po dwóch załamaniach i jednym lub dwu odbiciach mogą dążyć do oka, kiedy okrągłe naczynie jest w innym położeniu, to dlaczego jednak tylko te, o których mówiłem, sprawiają, że pojawiają się kolory?" (s. 254). I właśnie ten problem znajduje w rozprawie oryginalne rozwiązanie, Kartezjusz pokazał mianowicie, że w tych wyróżnionych kątach następuje koncentracja promieni:

> Odkryłem, że po jednym odbiciu i dwu załamaniach jest dużo więcej tych [promieni], które można zobaczyć pod kątem od 41 do 42 stopni, niż pod dowolnym mniejszym, i nie ma żadnych, które można zobaczyć pod większym. Dalej, odkryłem również, że po dwu odbiciach i dwu załamaniach jest dużo więcej tych, które biegną do oka pod kątem od 51 do 52 stopni, niż pod jakimkolwiek większym, i że nie ma w ogóle takich, które wpadają pod mniejszym (s. 261).

Swoje ustalenia Kartezjusz zestawił w tabelach. Przyjrzyjmy się zatem, jak oblicza drogę wybranego promienia, na rysunku jest to *EF*. Czytamy:

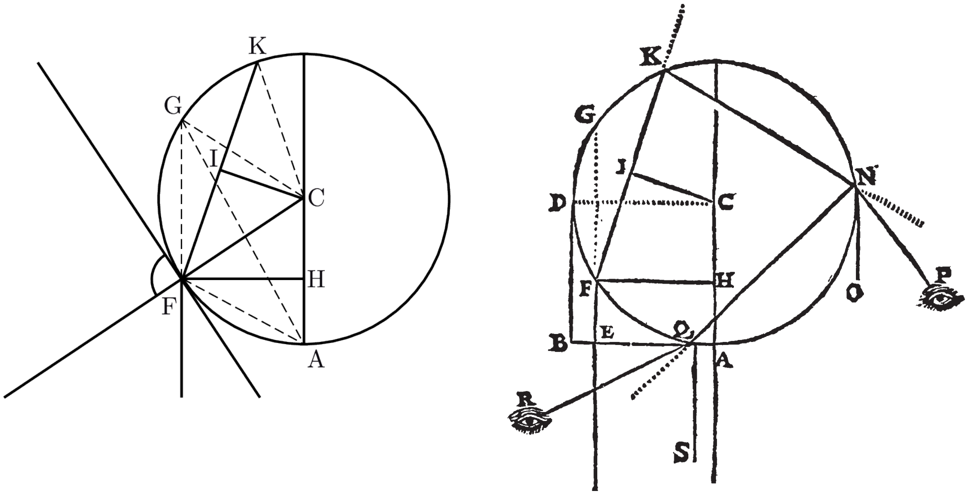
> I prowadząc *CI* pod kątami prostymi do *FK*, wiem, na podstawie tego, co zostało powiedziane w Dioptryce, że *AE* lub *HF* i *CI*, są w proporcji, którą mierzy się załamanie wody. Tak, że jeśli *HF* zawiera 8000 części, zaś *AB* zawiera ich 10 000, to *CI* będzie ich zawierać 5984, ponieważ załamanie wody jest choć trochę większe niż trzy do czterech, a najdokładniej jak mogłem zmierzyć, wynosi 187 do 250 (s. 262–263).

Zacznijmy od wyjaśnienia, dlaczego *HF*, *CI* „są w proporcji, którą mierzy się załamanie wody". Promień *EF* jest równoległy do osi *CHA* zatem kąt, pod jakim pada na powierzchnię kropli jest równy $\angle HCF$ (patrz rys. 1 z lewej strony). Przyjmując, że znamy prawo Snella, otrzymujemy

$$\frac{\sin\angle HCF}{\sin\angle CFI} = \frac{\frac{HF}{r}}{\frac{CI}{r}} = \frac{HF}{CI} = \frac{250}{187}.$$

Stąd, gdy $HF = 8000$, a promień koła wynosi 10 000, to $CI = 5984$; następnie, rozpatrując odpowiednie trójkąty prostokątne, otrzymujemy $FG = 12\,000$ oraz $FK \approx 16\,002{,}4$. Dalej obliczenia mogą tak przebiegać. Na podstawie twierdzenia sinusów zachodzi

[7] W roku 1266 Roger Bacon zmierzył kąty pierwszej i drugiej tęczy – wynosiły one odpowiednio 42° i 50°. Zob. H. M. Nussenzveig, dz. cyt.. W rozprawie Kartezjusza znajdujemy natomiast informację o dużo mniej dokładnych wynikach Francesco Maurolico; zob. s. 266.



Rysunek 1

$$\frac{FG}{2\,CA} = 0{,}6 = \sin \angle\, FAG.$$

Z tablic trygonometrycznych odczytujemy, że $\angle\, FAG = 36°50'$, a stąd:

$$\angle\, GCF = 2\ \angle\ 73°40'.$$

Podobnie,

$$\frac{FK}{2\,CA} = 0{,}8 = \sin \angle\, FAK.$$

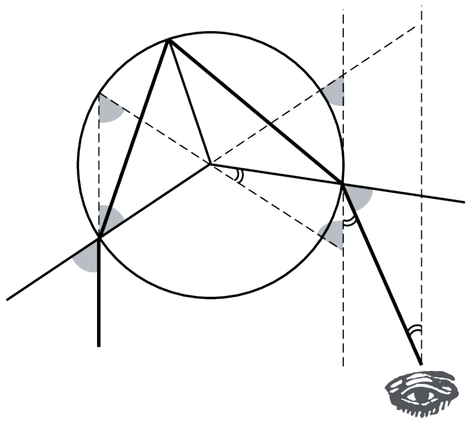
i z tablic trygonometrycznych odczytamy, że

$$\angle\, FCK = 2\ \angle\, FAK \approx 106°.$$

Kartezjusz korzysta z tablic Ptolemeusza, a nie tablic trygonometrycznych, i podaje: „Mając więc dwie linie *HF* i *CI* łatwo poznaję dwa łuki, to jest *FG*, który ma 73 stopnie i 44 minuty oraz *FK*, 106,30” (s. 263).

Znając już kąt *CKF*, na podstawie prawa odbicia poznamy kąt *KNC*, a chcąc obliczyć kąt *ONP*, raz jeszcze możemy skorzystać z prawa Snella. Tak samo Kartezjusz wskazuje czysto geometryczny sposób obliczenia kąta *ONP*: „Odejmując podwojenie łuku *FK*, od łuku *FG* dodanego do 180 stopni, otrzymuję 40,44 jako wielkość kąta *ONP*, ponieważ przyjmuję *ON* za równoległy do *EF*” (s. 263).

Poniższy rysunek ilustruje zależności, które uzasadniają wniosek Kartezjusza.



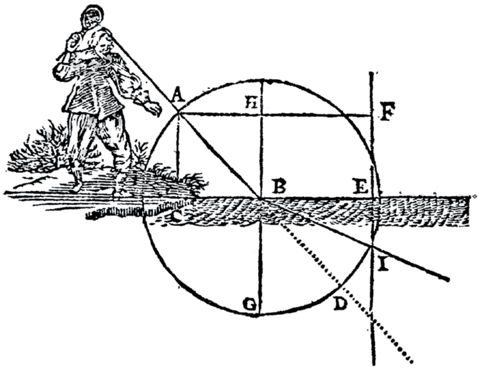
Rysunek 2

Dalej czytamy: „I odejmując te 40,44 od *FK*, otrzymuję 65,46 dla kąta *SQR*”. W tym wypadku uzasadnienie pozostawiamy Czytelnikowi.

Rachunki przeprowadzone przez Kartezjusza są, jak widać, uciążliwe; i wypełnienie tabel zamieszczonych w rozprawie wymagało dużej cierpliwości. Współcześnie te same wyniki osiąga się za pomocą rachunku różniczkowego[8]. W roku 1670 Newton potwierdził obliczenia Kartezjusza, stosując przy tym inne techniki matematyczne[9].

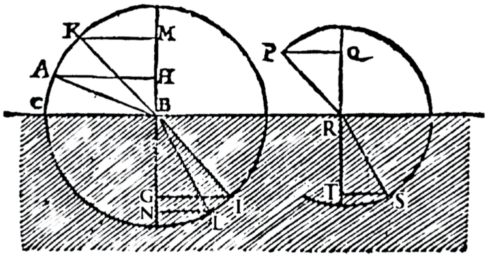
4. Napisaliśmy wyżej, że kluczową rolę w obliczeniach Kartezjusza odgrywa prawo załamania światła. W *O tęczy* jest to zaznaczone słowami: „na podstawie tego, co zostało powiedziane w *Dioptryce*, że *AE* lub *HF* i *CI*, są w proporcji, którą mierzy się załamanie wody”. Istotnie, druga rozprawa *Dioptryki* nosi tytuł *O załamaniu* i właśnie tam Kartezjusz formułuje prawo załamania światła. Jego wywód zbudowany jest na analogii między przebiegiem promienia świetlnego, a lotem piłki tenisowej. Na wstępie Kartezjusz objaśnia prawo odbicia światła, przyjmując w miejsce promienia świetlnego piłkę odbijającą się od ziemi. Następnie przechodzi do eksperymentu myślowego, w którym piłka nie odbija się od podłoża, ale przechodzi przez bardzo cienką tkaninę tracąc przy tym prędkość, aż wreszcie, w kolejnym eksperymencie piłka wpadając do wody zmienia prędkość i odpowiednio odchyla swój lot. Dalej Kartezjusz rysuje obraz, w którym piłka przechodząc do drugiego ośrodka zwiększa prędkość. Czytamy:

> Ale przyjmijmy jeszcze inne założenie i pomyślmy, że piłka, popchnięta z *A* do *B*, jest znowu popchnięta, będąc w punkcie *B*, przez rakietę *CBE*, powiększa siłę swego ruchu na przykład o jedną trzecią, w ten sposób, że może potem pokonać taką drogę w dwu sekundach, którą wcześniej zrobiła w trzech, co da ten sam efekt, co wtedy, gdy napotkałaby w punkcie *B* ciało o takiej naturze, że przeszłaby przez jego powierzchnię *CBE* łatwiej o jedną trzecią niż przez powietrze. Z tego, co zostało już wykazane, wynika jasno, że jeśli rysuje się koło *AD*, jak powyżej, oraz linie *AG*, *HB*, *FE*, w ten sposób, że odległość między *FE* i *HB* byłaby o jedną trzecią mniejsza od odległości *HB* i *AC*, to punkt I, w którym linia prosta *FE* i łuk *AD* przecinają się, wyznaczy miejsce, do którego piłka, będąc w punkcie *B*, powinna się skierować. Można zatem przyjąć również odwrotny wniosek i powiedzieć, że skoro piłka, która zmierza z punktu *A* w linii prostej aż do punktu *B*, skręca będąc w punkcie *B* i obiera stąd kurs do I, to znaczy, że siła lub łatwość z jaką wchodzi w ciało CBEI jest do tej, z którą wychodzi z ciała *ACBE*, jak odległość między *AC* i *HB* jest do tej między *HB* i *FI*, to znaczy jak linia *CB* jest do *BE* ([1], s. 19–20).



Po tym Kartezjusz przechodzi do sformułowania prawa nazywanego powszechnie prawem Snella, z wyjątkiem Francji, gdzie nosi ono nazwę wywiedzioną od nazwiska Kartezjusza.

> Wreszcie, ponieważ działanie światła poddane jest tym samym prawom, co ruch tej piłki, to trzeba powiedzieć, że skoro promienie przechodzą ukośnie z jednego ciała przeźroczystego do innego, które przenikają mniej lub bardzie łatwo od pierwszego, to odchylają się tam w ten sposób, że są wciąż mniej nachylone do powierzchni tych ciał od strony, po której znajduje się to, które przenikają łatwiej, niż od strony, gdzie jest to drugie. I stopień tego nachylenia jest właśnie proporcjonalny do tego, jak jedno jest przenikane łatwiej niż drugie.



> Należy tylko zwrócić uwagę, że nachylenie to musi się mierzyć przez wielkość [*quantité*] linii prostych,

8 Zob. E. Dereniak, T. Dereniak, *Geometrical and Trigonometric optics*, tamże, s. 381–382.

9 Zob. A. Shapiro (ed.), *The Optical Papers of Isaac Newton. The Optical Lectures 1670–1672*, Cambridge 1984, s. 419–422.

jak CB lub AH oraz EB lub IG i podobnych, porównanych jedne z drugimi. Nie przez tę kątów, jakimi są ABH lub GBI, tym bardziej przez tę podobnych do DBI, nazwanych kątami załamania (*les angles de réfraction*). Ponieważ stosunek lub proporcja, które są między tymi kątami, zmieniają się w zależności od różnych nachyleń promieni, podczas gdy ten, który jest między liniami AH oraz IG, lub podobnymi, pozostaje taki sam we wszystkich załamaniach wywołanych przez te same ciała. Na przykład, jeśli promień przechodzi w powietrzu z A do B, a napotykając w punkcie B powierzchnię szkła CBR zwraca się do I w tym szkle, i niech inny przejdzie z K do B, który zwraca się do L, i inny z P do R, który zwraca się do S, to musi być ta sama proporcja między liniami KM i LN, co między AH i IG; ale nie ta sama między kątami KBM i LBN, co między ABH oraz IBG ([1], s. 21–22).

$$\frac{KM}{LN} = \frac{AH}{IG} \tag{1}$$

By uchwycić związek, jaki zachodzi między równością (1) a współczesną wersją prawa Snella potrzebny jest krótki komentarz. Przyjmując, że r jest promieniem koła, na ilustracji jest $r = AB$, otrzymujemy

$$\frac{KM}{LN} = \frac{AH}{IG} = \frac{\frac{KM}{r}}{\frac{LN}{r}} = \frac{\frac{AH}{r}}{\frac{IG}{r}} = \frac{\sin\angle KBM}{\sin\angle LBN},$$

czyli prawo Snella we współczesnej postaci.

„I stopień tego nachylenia jest właśnie proporcjonalny do tego, jak jedno jest przenikane łatwiej niż drugie". Współcześnie zapisuje się to w następujący sposób:

$$n \cdot \sin\angle KBM = n' \cdot \sin\angle LBN,$$

gdzie współczynniki n, n' są związane z prędkością rozchodzenia się światła, odpowiednio w ośrodku nad powierzchnią CBR oraz pod nią, równościami

$$v_n = \frac{c}{n},\ v_{n'} = \frac{c}{n'}.$$

Ani w *Dioptryce*, ani w innych pismach nie znajdziemy żadnego szerszego wyjaśnienia, jak Kartezjusz doszedł do zależności (1). W cytowanym wyżej fragmencie filozof nawet nie wzmiankuje, że prowadził odpowiednie eksperymenty, a jedynym uzasadnieniem jest analogia z piłką tenisową. Z drugiej strony lakoniczność jest cechą charakterystyczną wszystkich esejów towarzyszących *Rozprawie o metodzie*.

Willebrord Snell (1580–1626) ustalił w drodze doświadczeń matematyczną formułę załamania światła na 16 lat przed ukazaniem się *Dioptryki*. Nie opublikował swojego odkrycia za życia, tym niemniej było on znane w kręgach naukowych. Istnieją opracowania dowodzące, że Kartezjusz poznał prawo załamania z notatek Snella[10]. Wskazania te nie są jednak ostateczne i dyskusja na ten temat trwa do dzisiaj. Dominuje przekonanie, że Snell i Kartezjusz niezależnie odkryli prawo załamania światła[11].

5. Prezentowany przekład rozprawy o tęczy jest oparty na wydaniu oryginalnym z 1637 r. Zachowujemy w nim układ i formę z pierwszej edycji, tzn. paginację, marginesy, grafiki i ich umiejscowienie w tekście, tabele oraz kustosze. Grafiki i tabele wiernie odwzorowała Katarzyna Kopańska, zaś czcionkę i skład przygotował Tomasz Zacharski. ■

LITERATURA

[1] Descartes R., *Discours de la méthode pour bien conduire sa raison, et chercher la vérité dans les sciences, plus la Dioptrique, les Météores et la Géometrie qui sont des essais de cette méthode*, Jan Maire, Leyde 1637.

[2] Descartes R., *Le monde de Mr Descartes ou le Traité de la Lumière et des autres principaux objets des sens. Avec un discours de l'action des corps et un autre des fièvres, composez selon les principes du même auteur*, T. Girard, Paris 1664.

[10] Zob. A. I. Sabra, *Theory of Light from Descartes to Newton*, Cambridge 1981.

[11] Zob. F. J. Dijksterhuis, *Refraction*, tamże, oraz M. A. Smith, *Descartes's Theory of Light and Refraction. A Discourse on Method*, „Transactions of the American Philosophical Society" 77 (3), 1987, s. 81.