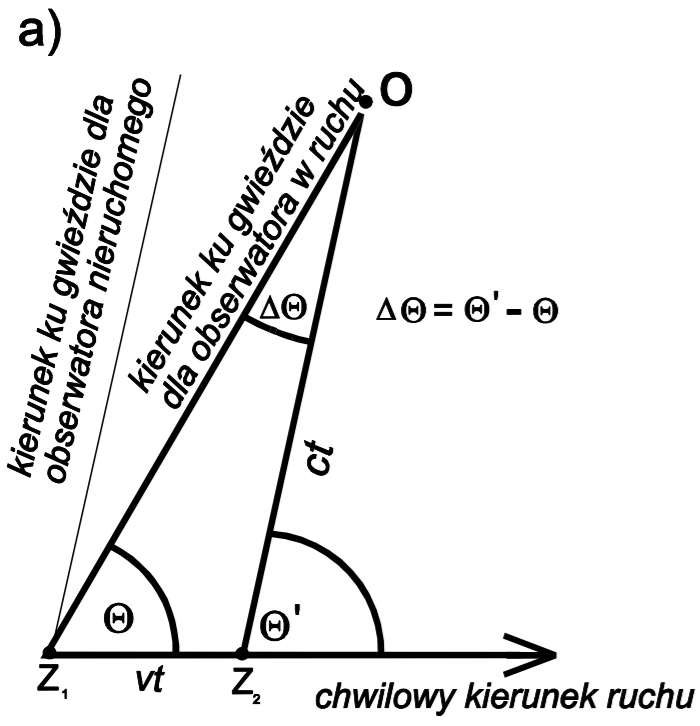


# Aberracja, refrakcja i ekstynkcja światła gwiazd

Naturalną konsekwencją skończonej prędkości rozchodzenia się światła jest zjawisko jego aberracji. **Aberrację** światła odkrył James Bradley w 1725 roku. Zjawisko to polega na zmianie obserwowanego kierunku na źródło światła (np. gwiazdę), wywołanej zmianą prędkości obserwatora. W górnej części rysunku zilustrowano odchylenie obserwowanego kierunku ku gwiazdzie wywołane ruchem obserwatora z prędkością  $v$ , zaś w jego dolnej części naszkicowano elipsy aberracyjne na sferze niebieskiej w zależności od szerokości ekliptycznej obserwowanego obiektu.



Dla zrozumienia zjawiska aberracji można przywołać przykład osoby biegnącej w deszczu z parasolem. Im szybszy bieg, tym bardziej należy pochylić parasol do przodu aby uniknąć zmoknięcia. Podobnie, ruchomy obserwator musi nieco pochylić teleskop w kierunku swego ruchu, żeby utrzymać obiekt w centrum pola widzenia teleskopu.

Posiłkując się rysunkiem wyprowadzimy tu użyteczny wzór na wartość aberracji  $\Delta\theta$ .

Po zastosowaniu twierdzenia sinusów do trójkąta  $Z_1Z_2O$  otrzymamy:

$$\frac{\sin\Delta\theta}{v \cdot t} = \frac{\sin\theta}{c \cdot t}$$

skąd:

$$\sin\Delta\theta = \frac{v \cdot \sin\theta}{c}$$

gdzie  $\Delta\theta$  jest odchyleniem kierunku obserwator – źródło, wywołanym ruchem obserwatora z prędkością  $v$ .

Wobec zjawiska aberracji dla obserwatora spoczywającego na Ziemi obiegającej Słońce z prędkością liniową równą około 30 km/s, współrzędne gwiazd na sferze niebieskiej będą ulegać zmianie. Takie zmiany współrzędnych, najpierw u gwiazdy  $\gamma$  Dra a potem u innych zaobserwował właśnie Bradley, co doprowadziło go do odkrycia zjawiska aberracji światła. Odbiciem ruchu Ziemi po orbicie dookoła Słońca są widome ruchy gwiazd po tzw. elipsach aberracyjnych. Wielka pół osi elipsy aberracyjnej wynosi dla obserwatora współporuszającego się z Ziemią zaledwie  $20''.5$ . Wartość małej półosi zależy od tego, na jakiej szerokości ekliptycznej znajduje się świecący obiekt. Dla gwiazd położonych w biegunach ekliptyki elipsa aberracyjna przechodzi w krzywą zamkniętą zbliżoną do okręgu (gdyby orbita Ziemi była okręgiem, byłby to dokładnie okrąg), natomiast dla gwiazd położonych na ekliptyce elipsa aberracyjna przechodzi w odcinek.

Zjawisko aberracji światła z chwilą jego odkrycia stało się niezbitym dowodem na słuszność twierdzenia Kopernika, wypowiedzianego około dwa wieki wcześniej, że Ziemia krąży wokół Słońca. I mimo że w XVIII wieku nikt poważny już nie powątpiewał w słuszność teorii heliocentrycznej (a to dzięki wspaniałym i niepodważalnym odkryciom Johannesesa Keplera na początku XVII wieku), to twardego dowodu na ruch orbitalny Ziemi, przed odkryciem aberracji światła, nie było. Doniosłość odkrycia Bradley'a nie polegała na wykazaniu aberracji jako takiej. Aberracji światła nie trzeba było odkrywać, bo jej istnienie było pewną i naturalną konsekwencją skończonej prędkości rozchodzenia się światła, którą pomierzono metodą Rømera już kilkadziesiąt lat wcześniej. Wykazanie faktu, że gwiazdy na

niebie wykonują ruchy aberracyjne i pomierzenie dużej osi elipsy aberracyjnej ( $20''.5$ ) były nie tylko dowodem ruchu Ziemi dookoła Słońca, ale też pozwalały (wprost z wyżej przytoczonego wzoru) wyznaczyć prędkość ruchu orbitalnego Ziemi i tym samym jej odległość od Słońca, która w tamtym czasie była szacowana z pierwszych obserwacji tranzytów Wenus z bardzo małą precyzją. Wobec tego, że wszystkie oceny odległości obiektów we Wszechświecie bazują na wartości jednostki astronomicznej (t. j. średniej odległości Ziemi od Słońca), każde uściślenie wartości tej jednostki miało znaczenie kardynalne. Stąd i doniosłość odkrycia Bradley'a.

Wobec faktu, że światło rozchodzi się ze skończoną prędkością, gwiazdy które oglądamy na niebie nie są tam gdzie je widzimy, ani nie są takie jakie widzimy (bo widzimy je takimi jakie były dawno temu, a nie w czasie obserwacji; a przecież w międzyczasie coś mogło się zmienić).

Światło rozchodzi się prostoliniowo w ośrodkach jednorodnych. Jeśli właściwości optyczne ośrodka, determinowane przez tzw. współczynnik załamania  $n$ , zmieniają się wzdłuż drogi przemierzanej przez światło, światło ulega ugięciu, tzw. **refrakcji**. Sam zaś współczynnik  $n$  wyraża stosunek prędkości światła w próżni do prędkości światła w danym ośrodku.

Zjawisko refrakcji sprawia, że światło biegnąc od gwiazdy do obserwatora na powierzchni Ziemi, tj. znajdującego się na dnie atmosfery, odgina się nieco od swego pierwotnego kierunku (w próżni). W efekcie obserwator postrzega gwiazdę nieco wyżej nad horyzontem niż jest ona w rzeczywistości. Refrakcja nie dotyczy tylko obiektów obserwowanych w zenicie. W horyzoncie przyjmuje ona maksymalną wartość, w przybliżeniu równą  $0^\circ35'$ . Wobec tego mamy do czynienia z refrakcyjnym przyspieszaniem wschodów i opóźnianiem zachodów ciał niebieskich.

Wartość refrakcji zależy od stanu atmosfery, jej gęstości, ciśnienia, temperatury, wilgotności. Dla potrzeb obserwacji astronomicznych sporządza się odpowiednie tabele, podające wartości refrakcji w zależności od warunków atmosferycznych i wysokości obiektów nad horyzontem. Dla wysokości  $h > 30^\circ$ , przybliżoną wartość refrakcji można otrzymać ze wzoru:  $r = 58'' \text{tg}(90^\circ - h)$ , gdzie  $r$  jest refrakcją wyrażoną w sekundach łuku. Refrakcja atmosferyczna ma jeszcze tę niewygodną cechę, że ustawicznie zmienia swoją wartość w określonym zakresie – fluktuuje. Turbulencje powietrza w atmosferze powodują drobne fluktuacje wartości współczynnika załamania w stosunku do jego średniej wartości. W konsekwencji mamy do czynienia z chaotycznymi odchyleniami obiektów od ich średnich położen. Efekt ten nazywamy *seeingiem*. Im mniej spokojna atmosfera, tym seeing większy.

Zjawiska aberracji i refrakcji światła wprowadzają istotne utrudnienie przy próbach obserwacyjnego ustalenia współrzędnych gwiazd czy innych obiektów na niebie. Nawet jeśli dokonamy obserwacji położenia obiektu z maksymalną przyrządową precyzją, to pozostaje problem uwzględnienia wielu poprawek, w tym na aberrację i refrakcję światła. Im większej potrzebujemy precyzji wyznaczeń położen, tym wymienione zjawiska stają się bardziej dokuczliwe. Dlatego, przy dzisiejszych wymaganiach co do precyzji obserwacji astrometrycznych (czyli położen obiektów na niebie), konieczne jest wynoszenie odpowiednich teleskopów astronomicznych poza atmosferę, w przestrzeń kosmiczną. Dokładność wszelkich systemów pozycjonowania (jak np. Global Positioning System, GPS), zależy wprost od dokładności, z jaką znamy położenia gwiazd.

Światło podążające od źródła (np. gwiazdy) do obserwatora ulega po drodze osłabieniu wskutek oddziaływania z materią rozproszoną w przestrzeni w postaci wolnych atomów, molekuł i ziarenek pyłu kosmicznego. Fotony oddziałują z rozproszonymi w przestrzeni drobinami. Ulegają przy tym absorpcji albo odbiciom (rozproszoniu). W konsekwencji światło przychodzące do obserwatora od gwiazdy jest w jakimś stopniu osłabione i nie odzwierciedla dokładnie blasku źródła. Na szczęście przestrzeń międzygwiazdowa jest bardzo rozrzedzona i nie przedstawia jakiegokolwiek drastycznego przeszkody dla propagacji światła. Jednak, mimo to, światło ma do pokonania zwykle niewyobrażalnie ogromne odległości i po drodze uszkłada się trochę materii. Takie osłabienie światła nazywamy **ekstynkcją**. Dla jakościowego zilustrowania zjawiska ekstynkcji odwołajmy się do przykładu do światła słonecznego, dla którego największą przeszkodą po drodze do ziemskiego obserwatora jest atmosfera. Zauważmy przy okazji, że wiązka światła słonecznego zawiera ogromną ilość fotonów, zróżnicowanych energetycznie, tj. odpowiadają im różne długości fali (barwy). Zjawisko tęczy separuje w naturze barwy światła słonecznego, a precyzyjniej daje się to zrobić z użyciem pryzmatu albo siatki dyfrakcyjnej. Ekstynkcja światła słonecznego w ziemskiej atmosferze jest zależna od barwy (długości fali) światła oraz od stanu atmosfery, zwłaszcza troposfery, gdzie rozgrywają się zjawiska meteorologiczne. I tak, kiedy gęsta chmura zasłoni Słońce, przestajemy je widzieć. Jeśli chmura jest cienka, Słońce jest widoczne, ale słabsze niż przy braku zachmurzenia. Dla lepszego zrozumienia ekstynkcji odpowiemy sobie na kilka pytań:

1. Z czego składa się atmosfera? Atmosfera jest mieszaniną wolnych cząsteczek (tlenu, azotu, pary wodnej i in.) w fazie gazowej oraz z drobin pyłu. Za pył uznajemy tu nie tylko aglomeracje atomów i cząsteczek w fazie stałej (jak np. sadza, kryształki lodu czy drobniutkie okruchy gleby), ale także kropelki cieczy (wody). Molekuły składają się z małej liczby atomów i są przestrzennie bardzo małe w porównaniu z ziarnami pyłu, zawierającymi niepoliczalnie miliony atomów i cząsteczek. Proporcje ilości molekuł do ilości ziaren pyłu, tj. ilości małych i olbrzymich przeszkód dla światła, jest bardzo zmienna – tak zmienna jak zjawiska pogodowe i dzienny wygląd nieba.

2. Dlaczego bezchmurne niebo jest niebieskie? W atmosferze z minimalną ilością pyłu, za ekstynkcję światła słonecznego odpowiadają w zdecydowanej przewadze cząsteczki gazu, a ściślej rozpraszanie na tych cząsteczkach (absorpcja fotonów i minimalne rozpraszanie na ziarnach pyłu schodzą tu na dalszy plan). Zgodnie z formułą wyprowadzoną przez Rayleigha na rozpraszanie światła na pojedynczej przeszkodzie o rozmiarach dużo mniejszych niż długość fali świetlnej, rozpraszanie to jest odwrotnie proporcjonalne do  $\lambda^4$ , gdzie  $\lambda$  jest długością fali. Im fala dłuższa (światło czerwone) tym rozpraszana jest mniej efektywnie. Dla fal krótszych (światło niebieskie) rozpraszanie jest drastycznie większe (ze względu na  $\lambda$  w wysokiej potęgze). Dzielne niebo oglądamy w rozproszonym (w atmosferze) promieniowaniu słonecznym. Gdyby atmosfery nie było (jak na Księżycu) niebo byłoby zawsze czarne. Przy atmosferze względnie czystej od pyłu, rozpraszanie Rayleigha tłumaczy kolor nieba.

3. Dlaczego czasem niebo jest białe? Jeśli w atmosferze znajduje się stosunkowo dużo drobin (pyłu, a właściwie kropelek wody lub kryształków lodu) o rozmiarach istotnie przekraczających długość fal świetlnych zakresu widzialnego, to wtedy dominuje rozpraszanie "szare", które nie zależy od  $\lambda$ . Niebo świeci wtedy w przewadze rozproszonym światłem słonecznym, które jest białe. Różne odcienie bieli odpowiadają różnym gęstościom chmur.

4. Dlaczego Słońce gdy jest nisko nad horyzontem (po wschodzie i przed zachodem) czasem bywa czerwone? Zwróćmy uwagę, że w takim przypadku światło słoneczne, zanim do nas dotrze, musi w atmosferze pokonać znacznie większą drogę niż w przypadku, gdy Słońce znajduje się znacząco wyżej. Oznacza to, że w większej mierze światło jest rozpraszane. Bardziej krótkofalowe barwy światła słonecznego praktycznie w całości poszły gdzieś na boki, a Słońce zdaje się świecić na czerwono. Tu warto zwrócić uwagę na to, że nie tylko rozpraszanie Rayleigha jest zdolne odbarwić wygląd tarczy słonecznej. Za to odbarwienie w istotnej mierze może też być odpowiedzialne rozpraszanie na przeszkodach porównywalnych co do wielkości z długościami fal świetlnych. Wtedy też mamy rozpraszanie selektywne, ale jest ono odwrotnie proporcjonalne do  $\lambda$  w potęgze pierwszej. Czerwień tarczy słonecznej zawdzięczamy połączonym efektom rozpraszania na molekułach gazu oraz na drobnoziarnistym pyłe (o submikronowych rozmiarach ziaren). Tarcza słoneczna przy zamgleniach czy przy przezroczystym zachmurzeniu jawi się jako biała, nawet zaraz po wschodzie lub tuż przed zachodem. Znacząco, że górę nad wymienionymi wcześniej selektywnymi rozproszoniami bierze rozpraszanie szare, na względnie dużych kropelkach czy kryształkach wody, zawieszonych w atmosferze.

Aberracja i refrakcja gubią informację o rzeczywistym kierunku ku gwiazdzie, a ekstynkcja sprawia, że gwiazdy gubią swój blask i naturalny kolor po drodze do obserwatora. Od "surowych" obserwacji w astronomii do ich oswojenia ze wszystkich możliwych deformacji prowadzi długa i karkołomna droga przez gąszcz matematycznych formuł, z czego mało kto zdaje sobie sprawę.

