BIULETYN POLSKIEGO STOWARZYSZENIA NAUCZYCIELI PRZEDMIOTÓW PRZYRODNICZYCH

NAUCZANIE PRZEDMIOTÓW PRZYRODNICZYCH

TOM NR 29 (1/2009) TORUŃ 2009 rok ISSN 1509-6351

KALENDARZ SŁONECZNY MIKOŁAJA KOPERNIKA

- Energia geotermalna
- Interdyscyplinarne nauczanie
- TI w nauczaniu
- Międzynarodowe praktyki
- EU-HOU – srebrny medal

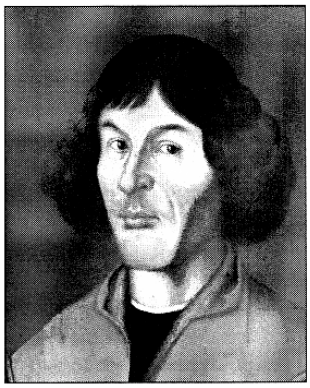
Wyniki konkursu
Przyroda – Pierwsze kroki, Informacje

O KALENDARZU SŁONECZNYM MIKOŁAJA KOPERNIKA[1]. CZĘŚĆ I.

Zygmunt Turło*, Agnieszka Witkowska**, Józefina Turło*
* Instytut Fizyki UMK w Toruniu, ** student Magisterskich Studiów Nauczycielskich Wydziału Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej UMK w Toruniu

1. Wstęp

1.1. Życie i działania Mikołaja Kopernika



Mikołaj Kopernik (portret z sali Mieszczańskiej w Ratuszu Staromiejskim w Toruniu, z 1580 r.) urodził się jako najmłodszy syn Barbary Watzenrode i Mikołaja Kopernika, w Toruniu przy ulicy Św. Anny (aktualnie ul. Kopernika) 17, w 1473 roku, 19 lutego o godzinie 16.30. Jego matka była córką Łukasza Watzenrode – najwybitniejszego przedstawiciela stronnictwa antykrzyżackiego w Toruniu. Wuj polskiego astronoma pochodził ze śląskiej rodziny z Ziębic, a po wojnie trzynastoletniej stał się jednym z najwybitniejszych przedstawicieli mieszczaństwa toruńskiego. Wciąż trwają dyskusje nad narodowością Mikołaja Kopernika, ponieważ sądzi się, że jego matka była z pochodzenia Niemką. Jednakże w czasach kiedy żył, nie istotnym było, czy przebywa się na ziemi polskiej czy niemieckiej, ale któremu z władców się służy. Wynika więc stąd, że Mikołaj Kopernik jako poddany króla polskiego był Polakiem. Natomiast ojciec Mikołaja Kopernika, również Mikołaj był mieszczaninem krakowskim, który przeniósł się do Torunia. Zajmował się głównie handlem miedzią.

Pierwsze nauki Mikołaj Kopernik pobierał w szkole parafialnej przy kościele Św. Janów w Toruniu. W 1483 roku Mikołaj stracił ojca i przeszedł pod opiekę swojego wuja biskupa Łukasza Watzenrode, który wpłynął na dalsze jego życie. Studia Kopernik podjął w Krakowie jesienią 1491 roku. Nie jest pewne, czy tam Mikołaj Vodka, przez jakiś czas wykładowca na uniwersytecie w Bolonii, zaszczepił w nim zamiłowanie do astronomii. Pewnym jest natomiast, że używał tam ksiąg: *Elementy Euklidesa, Tabulae Directionum Regiomontana, Tablice Alfonsyńskie*. W ostatniej z nich znajdują się jego notatki, świadczące o tym, że Kopernik poważnie zajął się studiowaniem astronomii, z której sławny był również w tamtym okresie uniwersytet krakowski. Księgi te wywiezione zostały dużo później przez Gustawa Adolfa do Szwecji. Dzięki temu dzieła te zachowały się po dziś dzień i mogły posłużyć do prowadzonych ostatnio badań nad ustaleniem miejsca pochówku Kopernika.

W 1496 roku Mikołaj Kopernik wyjechał do Bolonii, by tam rozpocząć naukę prawa kościelnego. Zabrał ze sobą ww. księgi, a zatem pragnął dalej je studiować. W tym czasie miał już ukształtowaną zasadniczą koncepcję krytyki teorii Ptolemeusza, jednak brakowało mu doświadczenia i danych obserwacyjnych, by obronić własny pogląd o systemie Wszechświata. W Bolonii pozostał do 1500 roku. O pogłębieniu jego wiedzy podczas pobytu na studiach prawniczych może świadczyć fakt, że w 1501 roku podczas krótkiego pobytu w Rzymie wystąpił gościnnie z wykładem na uniwersytecie Sapienza. Podczas swojego wykładu wskazał na pomyłki Ptolemeusza, popierając swoje zdanie zgromadzonymi obserwacjami. Jeszcze w 1501 roku wyjechał do Padwy, by tam studiować medycynę. Rozwinął tam również swoją znajomość astronomii i greki, czego skutkiem było przetłumaczenie kilku utworów, w tym listów bizantyjskiego autora Teofilakta Simokatta, które wyszły drukiem w Krakowie w 1509 roku [1].

W 1503 roku po uzyskaniu dyplomu doktora prawa kanonicznego na Uniwersytecie w Ferrarze wrócił do Polski na Warmię. Tam wuj powołał go do swojego dworu na

[1] **Nieco żartobliwa przedmowa Zygmunta Turło**

„Dostatecznie jasno zdaję sobie sprawę z tego, że znajdą się ludzie, którzy gdy tylko zobaczą, iż pozwalam sobie język przedmowy dzieła znakomitego męża Mikołaja Kopernika *De revolutionibus orbium coelestium* parafrazować, zaraz podniosą krzyk, że należy mnie w tych poczynaniach potępić. Kiedy więc to właśnie dokładnie w sobie rozważałem, lęk przed szyderstwem, którego miałem się obawiać, skłonił mnie niemal zupełnie do tego, aby powziętych zamiarów całkowicie zaniechać.

Ale po długim z mej strony zwlekaniu (3 x 9 lat) odwiedli mnie od tego moi Przyjaciele, wśród nich przede wszystkim Pani Redaktor „Nauczania Przedmiotów Przyrodniczych", z niemałym trudem i gorliwością Pismo to redagująca, a także inni znakomici mężowie, usilnie nalegając, aby chociażby w małej cząstce wspomóc tych, którzy nad wykształceniem młodego pokolenia gorliwie się trudzą, a „zabiegają". Wszelako z niemałą troską dostrzegam, iż wielu jest też takich, którzy wręcz przesadnym umiłowaniem pamięci znakomitego Torunianina kierowani, nie tylko wielkie a świątobliwe dzieła i instytucje Jego imieniem nazywają, ale też zgoła pospolite rzeczy, ba nawet gorzałkę – alias „Copernicus Vodka" Jego imieniem zowią.

Czy zatem nie jest bardziej godnym wyrazem szacunku dla uczonego męża Mikołaja Kopernika, aby Jego własne słowa z gorliwością rozważać, Jego własną ręką uczynione instrumenta rozpatrywać, a śladami Jego rozmyślań i obserwacji nieba z uwagą podążać?... Lecz, aby się nie wydawało, iż więcej pożytku obiecuję, niż rzeczywiście dać mogę, przechodzę już do samego „wykładu", w napisaniu którego moi Przyjaciele mi usilnie pomagali."

zamku lidzbarskim i wciągnął go w wir spraw politycznych. Kopernik jako lekarz, doradca prawny i sekretarz, towarzyszył mu podczas wielu sejmików i zjazdów. W tym czasie Kopernik myślał już bardziej konkretnie o nowej koncepcji układu Wszechświata. Powstał wówczas *Komentarzyk o hipotezach ruchów niebieskich*. Był to wynik jego głębokich przemyśleń oraz upust wszystkiego, co w nim od lat dojrzewało, co w myślach zbierał, układał i budował. W 1510 r. Mikołaj Kopernik przeniósł się z dworu biskupiego z Lidzbarka, pozostawiając wujowi tłumaczenie na łacinę z greki wyżej w/w zbioru moralizatorskich utworów Teofilakta Simocatta. Do dzieła tego został dodatkowo napisany wstęp Wawrzyńca Korwina oraz dedykacja Kopernika. W obu tych tekstach umieścili oni komplementy dla Łukasza Watzenrode [2].

Po przeniesieniu się do Fromborka Kopernik rozpoczął cykl obserwacji. Pierwszego stycznia 1512 roku obserwował koniunkcję Marsa z najjaśniejszą gwiazdą w Wadze, a w czerwcu wyznaczył moment opozycji tej planety. Następnie, 24 lutego 1514 roku wyznaczył położenie Saturna, w celu określenia jego odległości od Słońca. Poza tym, w maju wykonał obserwację jego opozycji. 11 marca 1515 roku rozpoczął pracę nad wyznaczeniem wielkości precesji, a co za tym idzie długości roku gwiazdowego. Pomiar ten wykonał na podstawie obserwacji drogi Słońca poprzez punkty charakterystyczne na sferze niebieskiej – środek znaku Byka (26 kwietnia), środek znaku Lwa (29 lipca) i Skorpiona (29 października). Co więcej, 14 września (według ówczesnego kalendarza) wyznaczył moment równonocy jesiennej. Pomiary te były początkiem prac nad reformą kalendarza juliańskiego, na której zależało przede wszystkim najwyższym władzom kościelnym [1]. Terminy ruchomych świąt określane były bowiem na podstawie zjawisk astronomicznych. Wielkanoc według kalendarza rzymskiego (juliańskiego) ustalono na pierwszą niedzielę po równonocy wiosennej. Jednakże przesunięcia faktycznych zjawisk astronomicznych w stosunku do ich oznaczeń czasowych (kalendarzowych) w okresie życia Kopernika stały się znaczne i wynosiły około 10 dni.

Od czasów Kopernika za czas obiegu Ziemi wokół Słońca zaczęto przyjmować 365 dni, 5 godzin, 48 minut, i około 46 sekund, natomiast rok według kalendarza juliańskiego (wprowadzonego przez Juliusza Cezara, stąd ta nazwa) trwał 365 i jedną czwartą dnia. Zatem różnica między nimi wynosiła 11 minut i około 14 sekund. Natomiast, w trakcie soboru nicejskiego, czyli w 325 roku różnica wynikająca z nierówności długości trwania tych lat nie była dostrzegalna. Dlatego biskupi przyjęli wcześniej opisany sposób określania terminów obchodzenia świąt kościelnych. Jednak już w czasach Kopernika równonoc wypadała 11 marca, zamiast 21 marca. Co prawda, już około roku 700 uczony mnich Beda zwrócił uwagę na te niedokładności, lecz dopiero w trakcie trwania soboru nicejskiego w latach 1512–1517, sprawa kalendarza powróciła jako ważny temat do rozważań [3]. Kluczową kwestią było wyznaczenie długości roku zwrotnikowego poprzez znalezienie dwóch kolejnych momentów równonocy wiosennej lub równonocy jesiennej.

Przyjrzyjmy się tej sprawie bliżej. W połowie 1513 roku Mikołaj Kopernik otrzymał list z Rzymu od biskupa fossobońskiego, Pawła z Middelburga z prośbą o wzięcie udziału w pracach nad „poprawą" kalendarza. Dlatego też z takim zapałem i tak efektywnie prowadził obserwacje w latach 1512–1516 we Fromborku. 31 marca 1516 roku wyznaczeniem równonocy wiosennej zakończył obserwacje służące potwierdzeniu swoich tez, dotyczących nowego układu słonecznego oraz reformie kalendarza. W tym momencie miał on zebrane wszelkie dane liczbowe i był gotowy do napisania swojego dzieła *De revolutionibus*, które miało mieć formę spisu tablic z opisem i być skierowane do wąskiej grupy naukowców. W tym jednak przeszkodziło mu nagłe i niespodziewane wydarzenie. Otóż 8 listopada 1516 roku został on wybrany na posadę administratora dóbr kapituły warmińskiej, co wiązało się z przeniesieniem się do Olsztyna. Formalnie jego prace nad modyfikacją kalendarza zostały zakończone, czego dowodem był list Pawła z Middelburga (4 czerwca 1516 roku) do papieża Leona X świadczący o tym, że do soboru laterańskiego wpłynęły pisma w tej sprawie od Mikołaja Kopernika. Dotarł on również, jak sądzi M. Biskup, do władz kościelnych na Warmii [4]. Chociaż w późniejszym czasie astronom nie wysyłał już niczego do Rzymu, co świadczy o sfinalizowaniu prac, to jednak po przyjeździe do Olsztyna kontynuował obserwacje. Dlatego też, skoro formalnie spadł z niego obowiązek pracy na rzecz kościoła powszechnego, mógł zająć się sprawami o zasięgu bardziej lokalnym. Stąd decyzja władz o tym, że po rezygnacji Krzysztofa Suchtena przejmie on obowiązki administratora dóbr kapitulnych [2].

Po przeniesieniu się Kopernika do Zamku w Olsztynie kontynuował swoje badania nad nierównomiernością obiegu Ziemi. Próbując wytłumaczyć zjawisko przesuwania się punktów równonocy na ekliptyce (precesję) obserwował momenty ich występowania. Obserwacje te są więc kontynuacją badań prowadzonych wcześniej we Fromborku. Jednakże w nowym miejscu zamieszkania zwracał on uwagę głównie na rozbieżności przypadania rzeczywistych momentów zrównania dnia z nocą, z terminami przewidzianymi kalendarzem juliańskim. Efekt tych pomiarów możemy do dziś podziwiać na ścianie krużganku Olsztyńskiego, jako że ręką Kopernika została wykonana tablica astronomiczna zawierająca wyniki jego prac.

9 listopada 1519 roku Kopernik ukończył sprawowanie urzędu administratora dóbr kapituły warmińskiej i przeniósł się ponownie do Fromborka. Tam przygotowuje pierwszą księgę *O obrotach ciał niebieskich*. W styczniu 1521 roku nastąpił zbrojny najazd Zakonu Krzyżackiego na Warmię. Zaatakowany został również Zamek w Olsztynie, który wcześniej został ufortyfikowany zgodnie z zaleceniem Kopernika. Oblężenie Krzyżaków zostało odparte, dzięki obronie kierowanej przez astronoma.

Po 1530 roku, dzięki osobom z otoczenia Kopernika, z którymi rozmawiał na temat swojej nowej teorii, wieść o nowym modelu Wszechświata zaczęła się rozpowszechniać. Już w 1533 roku *De revolutionibus* zainteresował się papież Klemens VII. Dwa lata później do Wiednia został wysłany kalendarz astronomiczny, z załączoną wypowie-

dzią o ruchach Ziemi i planet. W 1536 roku Kopernik został poproszony przez kardynała Schomberga o listowne wyjaśnienie jego tez. Wiadomość o tekstach astronoma dotarła do Wittenbergii, gdzie matematykę i astronomię wykładał Retyk. Gdy dowiedział się o nowych pomysłach kosmologicznych, wyruszył na Warmię, aby osobiście przekonać się, czy dochodzące do niego wieści są prawdziwe. Następnie pomaga on Kopernikowi w przygotowaniu do druku jego dzieła, a sam w 1540 roku wydaje w Gdańsku *Opowiadania pierwsze (Narraitio Priama)* – prospekt do pracy Kopernika. Rok później ponownie wydana zostaje ta praca, tym razem w Bazylei. Dzieło Kopernika nie mogło jednakże zostać wydane w Wittenberdze w całości, ze względu na negatywny stosunek Lutra do przedstawionych w nim teorii. Dlatego też wyszła tu drukiem tylko jej matematyczna część, dotycząca trygonometrii. Pozostałe księgi wydane zostały w Norymberdze. Ostatecznie, dzieło ukazuje się w 1543 roku, lecz ze zmienionym tytułem i przedmową, która traktuje dzieło jako pomysłowe przypuszczenie, nie mające nic wspólnego z naukowością, a w tytule dodano słowa „orbium coelestium" dla odwrócenia uwagi od obrotu Ziemi. Zmian tych dokonał A. Osiandr nadzorujący druk pod nieobecność Retyka[2]. Jednak wśród znajomych astronoma rozeszły się egzemplarze z dedykacją Retyka i skreślonymi ww. dodatkowymi słowami [1].

Mikołaj Kopernik zmarł w tym samym roku, dnia 24 maja w swojej wieży we Fromborku.

1.2. Historyczne wprowadzenie do doświadczeń

Burzliwe koleje losu spowodowały, iż większość materialnych śladów działania Mikołaja Kopernika znalazła się poza granicami naszego kraju, choć może właśnie dlatego zachowała się do naszych czasów. Na szczególną uwagę zasługuje zatem jeden z nielicznych instrumentów wykonanych niewątpliwie przez samego Kopernika, który znajduje się obecnie w Polsce, a mianowicie tzw. „tablica astronomiczna" Kopernika na Zamku w Olsztynie. Obiekt ten po śmierci Kopernika przez długie lata pozostawał w kompletnym zapomnieniu, jednakże szczęśliwie przetrwał w stosunkowo dobrym stanie mimo kolejnych przebudów i remontów Zamku Olsztyńskiego podejmowanych przez kolejnych jego administratorów. Na istnienie tego interesującego śladu obserwacji Kopernika zwrócił uwagę po raz pierwszy Jan Śniadecki [5]. Przypkowski pisze „Pierwszą naukową wiadomość o tej tablicy podał światu już w 1802r. Jan Śniadecki w swej pracy o Koperniku" [1]. Jan Śniadecki, zidentyfikował tę tablicę jako zegar słoneczny. Kolejni badacze, podążając tym zresztą błędnym tropem, poszukiwali dalszych elementów zegara, i co ciekawe, udało im się odnaleźć ślady skomplikowanego systemu luster, sztolni i kanałów, przy pomocy którego Kopernik rzekomo kierował promienie Słońca z zamkowej wieży wprost na ściany swojej komnaty. Podejmowano też próby „oprawienia" zegara słonecznego Kopernika dodając stosowne cyfry i napisy, które zresztą pozostały do dzisiaj.

Inną, jak można sądzić, tym razem poprawną interpretację owego zegara słonecznego podał w roku 1956 Tadeusz Przypkowski z Jędrzejowa, znany skądinąd kolekcjoner i znawca zegarów słonecznych. Przypkowski doszedł do wniosku, że głównym celem Kopernika, dla którego kontynuował on w 1517 roku konstrukcję tablicy astronomicznej było wyznaczenie momentu równonocy wiosennej, tak więc rysunek zachowany na ścianie olsztyńskiego Zamku należałoby nazwać raczej „kalendarzem słonecznym" choć sam Przypkowski zasugerował przyjętą aktualnie nazwę „tablicy astronomicznej".

Wczesną wiosną 1517 roku w Olsztynie Kopernik podjął więc kolejną próbę obserwacyjnego wyznaczenia momentu, w którym Słońce znajdzie się dokładnie na równiku niebieskim. Niestety, nie zachowały się żadne listy, czy materiały Kopernika w tej sprawie. Nie wiemy więc, jakie wnioski wynikały z jego obserwacji, a w szczególności jaką dokładność można uzyskać przy zastosowaniu metody i warunków przyjętych przy konstrukcji „tablicy astronomicznej". Koncepcja tablicy astronomicznej jest genialnie prosta, podobnie jak i inne instrumenty i pomysły Kopernika. Na tyle prosta, iż może być z powodzeniem zrealizowana przez uczniów w szkole, przy użyciu dostępnych środków. Co więcej, jeżeli skorzystamy z faktu, iż dysponujemy obecnie precyzyjną służbą czasu, koncepcję tablic możemy rozwinąć i wykonać obserwacje, które gdyby wykonał je sam Kopernik wprawiłyby go w niemałe zakłopotanie, gdyż wykazałyby niezbicie, iż przyjęty przez niego model układu heliocentrycznego nie jest do końca poprawny[3].

Punktem wyjścia dla konstrukcji tablic astronomicznych Kopernika jest wykorzystanie idei najstarszego i najprostszego instrumentu astronomicznego jakim był gnomon – w najprostszej realizacji kij wbity w ziemię. W doskonalszej wersji słup wkopany w ziemię, czy wreszcie kamienny obelisk ustawiony pionowo na solidnym fundamencie. Obserwując cień gnomonu, a dokładniej mierząc odległość pomiędzy krawędzią cienia szczytu gnomonu a środkiem jego podstawy, możemy wyznaczyć moment lokalnego południa, mierzyć upływ czasu, wyznaczyć strony świata. Kontynuując pomiary w przeciągu roku możemy wyznaczyć szerokość geograficzną, kąt nachylenia osi obrotu Ziemi w stosunku do płaszczyzny jej orbity, określić porę roku, w szczególności wyznaczyć moment równonocy, a także wykazać, iż orbita Ziemi w rzeczywistości nie jest kołem, jak zakładał Kopernik, a elipsą. W klasycznym wykonaniu gnomon ma jednakże szereg wad, które utrudniają uzyskanie wysokiej dokładności. Przede wszystkim trudno jest dokładnie określić granice cienia, który jest rozmyty (ze względu na znaczne wymiary kątowe Słońca) i mało kontrastowy (jako, że obserwacje wykonujemy w pełnym świetle słonecznym). Ponadto trudno jest zapewnić stałość

[2] Georg Joachim von Lauchen, pierwotnie Georg Joachim Iserin, używał też nazwiska matki de Porris i jego niemieckiego tłumaczenia von Lauchen. Najbardziej znany z przybranego nazwiska Retyk (łac. Rheticus; ur. 16 lutego 1514 w Feldkirch, dzisiejsza Austria, zm. 4 grudnia 1574 w Koszycach, Węgry) – profesor matematyki z Wittenbergii, kartograf, twórca przyrządów nawigacyjnych i innych, lekarz i nauczyciel [6].

[3] Chodzi tu o wykreślenie na suficie lub ścianie szkolnego korytarza krzywej zwanej „analemą" albo równaniem czasu, ale wymaga to obserwacji trwających co najmniej rok i może być tematem kolejnego, innego artykułu.

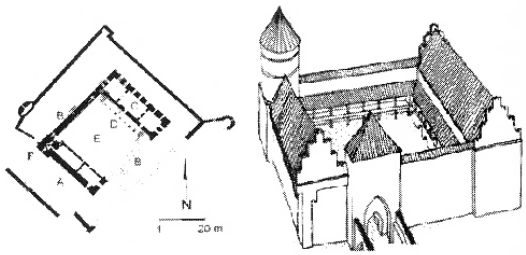
położenia samego gnomonu, zwłaszcza w czasie długotrwałych obserwacji i sezonowych zmian pogody. Trudno też w trwały sposób zaznaczyć położenia cienia w różnych porach roku na nie osłoniętej płaszczyźnie. Zapewne zdając sobie sprawę z tych trudności, Kopernik konstruując swoje „tablice astronomiczne" wykorzystał koncepcję tak zwanego gnomonu refleksyjnego pozbawionego w znacznym stopniu wspomnianych powyżej wad. Słoneczne zegary refleksyjne były już znane we Włoszech, w czasie studiów Kopernika w Bolonii i Ferrarze. Wydaje się więc prawdopodobne, że Kopernik wykorzystał znany już pomysł, aby zamiast klasycznego gnomonu zastosował odpowiednio ustawione zwierciadło. Dla powodzenia obserwacji Kopernika zasadnicze znaczenie miało zapewnienie, aby odbijająca powierzchnia zwierciadła była bardzo stabilna, natomiast powierzchnia, na którą był rzutowany odbity od zwierciadła promień Słońca była możliwie stabilna i płaska, choć mogła być dowolnie zorientowana w stosunku do stron świata. Aby spełnić pierwszy warunek Kopernik mógł użyć w charakterze zwierciadła swobodnej powierzchni cieczy, która przy braku wiatru i wstrząsów jest zawsze dokładnie pozioma. Znawcy przedmiotu spierają się teraz co do tego, czy Kopernik wykorzystał w swojej konstrukcji rtęć, która daje doskonałe odbicie, jednakże jest trudno dostępna i trująca, czy też może czerwone wino, które było zapewne łatwiej dostępne na Zamku Olsztyńskim, jakkolwiek dawało „ciemniejszy" obraz i podobnie jak rtęć jest wrażliwe na podmuchy wiatru i wstrząsy. Można w tym miejscu postawić nieco żartobliwą hipotezę, że do wykonania zwierciadła Kopernik, znany z zamiłowania do prostych, a jednocześnie skutecznych rozwiązań użył prawdopodobnie płynnego miodu! Jak można łatwo sprawdzić miód odbija światło słoneczne nie gorzej niż czerwone wino, a także ze względu na znacznie większą lepkość, zapewnia lepszą stabilność „obrazu Słońca", nie mówiąc już o tym, iż jest produktem jak byśmy dziś powiedzieli ekologicznym, w przeciwieństwie do wspomnianej wyżej rtęci.

Co do drugiego wymagania – dokładniej płaskości ściany Olsztyńskiego Zamku, na którą rzutowany był odbity promień Słońca, Kopernik doskonale zdawał sobie sprawę, jak istotne znaczenie dla powodzenia eksperymentu ma jakość i dokładność położenia tynku. Tak więc musiał zapewne osobiście nadzorować, czy wręcz własnoręcznie wykonać krytyczne etapy prac murarskich. Badając płaskość ściany olsztyńskiego zamku dostępnymi obecnie, na przykład holograficznymi metodami, możemy po blisko 500 latach obiektywnie zweryfikować biegłość Kopernika w zakresie sztuki murarskiej...

1.3. Opis doświadczeń Kopernika

Ponieważ na układ, którego używał Kopernik do wykonywania swoich obserwacji w Olsztynie składało się kilka elementów zamieszczonych we fragmentach murów Zamku, warto na wstępie omówić jego plan architektoniczny i funkcje (Rys. 1).

Zamek oprócz funkcji administracyjnej pełnił również funkcje gospodarcze, sądowe i obronne. W twierdzy tej oprócz administratora, rezydował burgrabia, wraz z podległą mu załogą wojskową. Dlatego też Mikołaj Kopernik potrzebował spokojnego miejsca do wykonywania swoich obserwacji. Jednocześnie musiało do tego miejsca docierać światło słoneczne, ze względu na to, że jego pomiary związane były z obserwacją położeń Słońca na niebie [1,9].



Rys. 1. Plan architektoniczny Zamku w Olsztynie i schemat wyglądu zewnętrznego. A – lewe skrzydło, B – mury kurtynowe, C – komnata zamieszkiwana przez Mikołaja Kopernika, D- prawe skrzydło, E- dziedziniec, F- wieża

Nowe miejsce pracy astronoma składało się z dwóch wielopiętrowych, równoległych względem siebie skrzydeł, zorientowanych na południowy – wschód i północny – zachód. Zatem na lewe skrzydło (A) światło słoneczne padało od zewnętrznej strony, prawe (D) natomiast oświetlane było od strony wewnętrznej – dziedzińca (E). Dziedziniec ten miał kształt kwadratu o boku 33 metrów i tworzyły go oprócz skrzydeł mury kurtynowe (B) o wysokości 12 metrów. W północno – wschodnim narożu dziedzińca znajdowała się trzydziestometrowa wieża (F) w kształcie cylindra o średnicy 9,2 m, która uniemożliwiała popołudniami dotarcie światła słonecznego na dziedziniec. Mikołaj Kopernik mieszkał w komnacie (C) na pierwszym piętrze prawego skrzydła, którego okna wychodziły na północny wschód w kierunku fosy, a nie w kierunku dziedzińca. Jedno okno jego komnaty wychodziło na północny zachód, oraz drugie kaplicy zamkowej – na południowy wschód. Zatem żadne z nich nie było użyteczne do prowadzenia obserwacji, ponieważ do ściany zewnętrznej tego skrzydła nie dochodziło światło słoneczne. Natomiast wewnętrzna ściana, do której słońce miałoby dobry dostęp była zasłonięta arkadowym krużgankiem.

Ponieważ Mikołaj Kopernik nie miał w swoim najbliższym otoczeniu miejsca z jednej strony spokojnego, jakim mogłaby być jego komnata, a z drugiej odpowiednio usłonecznionego, musiał poradzić sobie z tą niedogodnością. A jak się okazuje, zrobił to naprawdę szybko. Do tej pory do wykonywania swoich obserwacji wykorzystywał przez siebie wykonane przyrządy [11], takie jak trikwetrum[4] kwadrant[5] czy astrolabium[6], których projekty pochodzą ze starożytnej Grecji.

[4] Trikwetrum (przyrząd paralaktyczny) – jeden z instrumentów ptolemeuszowskich zbudowany z dwu przecinających się ramion podwieszonych do pionu; służył do pomiaru odległości kątowej ciał niebieskich i ich ruchu na niebie.

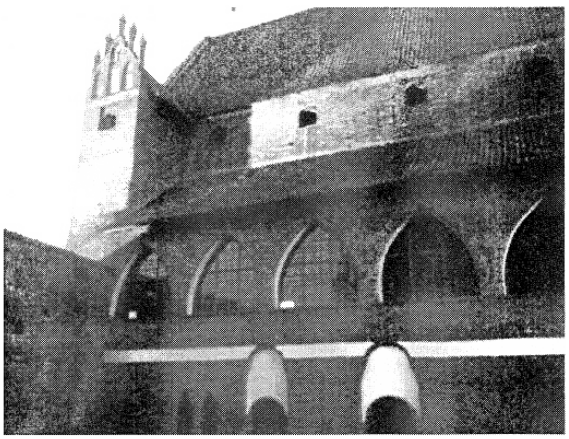
[5] Kwadrant (prostokąt) – dawny przyrząd do wyznaczania położenia gwiazd. Miał kształt ćwiartki okręgu z naniesioną podziałką kątową, po której przesuwał się przeziernik. Znany już w starożytnej Grecji, stosowany jeszcze w XVII w.

[6] Astrolabium (strefa armilarna) – jeden z instrumentów ptolemeuszowskich, służący do wyznaczania współrzędnych ekliptycznych planet i gwiazd oraz określania miejscowego czasu.

Jednak w warunkach, które panowały na Zamku nie mógł ich używać. Zaprojektował więc i wykonał swój instrument – tablicę astronomiczną [8-10]. Znajdowała się ona dokładnie naprzeciwko drugiej i trzeciej arkady ponad wejściem do komnaty Kopernika. Był to płaski fragment ściany, naprzeciw której na parapecie arkady znajdowało się niewielkich rozmiarów zwierciadło płaskie, rzucające odbicie słońca właśnie na tablicę. Zwierciadło znajdowało się 140 centymetrów poniżej szczytu arkady. W ciągu dnia „słońce przesuwając się po niebie" powodowało przesuwanie się „zajączka" od dołu tablicy ku jej górnej części. Ślad ten był zaznaczany przez Kopernika. Linie, które wykreślał, urywają się u góry w fazie wznoszenia się, co świadczy o tym, że obserwacje wykonywane były tylko przed południem. Biorąc pod uwagę wcześniej przedstawioną architekturę zamku, możemy stwierdzić w jakich godzinach wykonywane były pomiary. Zimą, kiedy zostały one rozpoczęte, słońce zaczynało oświetlać lewy skraj krużganku o godzinie 9:45. Następnie porusza się w prawo na tle arkad i o godzinie 10:00 obejmuje dwie pierwsze arkady, by potem (10:15) oświetlić również i trzecią, czyli cały fragment ściany zajmowany przez tablicę. Po godzinie ucieka ono już z tego obszaru, a w południe oświetlone są dwie ostatnie arkady. Widać stąd, że czas na wykonanie pomiarów wynosił zaledwie trochę ponad godzinę. Ze sposobu padania światła słonecznego możemy również wywnioskować, że lusterko które służyło do kierowania „zajączka" na tablicę, musiało się znajdować w lewym rogu pierwszej z arkad (Rys. 2).

Przygotowania do obserwacji Kopernik rozpoczął zaraz po przyjeździe do Olsztyna w listopadzie 1516 roku. Zanim wykonał pierwszy pomiar – 25 stycznia 1517 roku, ściana na której utworzona została tablica musiała być, odpowiednio przygotowana. Oryginalną warstwę tynku ściany krużganku pokrył dodatkowo kolejną warstwą, tak aby powierzchnia była idealnie gładka. Wymiary tej warstwy są znacznie większe niż rozmiary tablicy (140 x 705 cm). Prace te musiały zostać wykonane jeszcze przed nastaniem mrozów, a więc pod koniec listopada. Zatem czas od powstania koncepcji nowego przyrządu, do jego realizacji był bardzo krótki.

Współczesny obraz tablicy astronomicznej Kopernika przedstawiony jest na rysunku (Rys.3). Na otynkowanym fragmencie ściany zaznaczone są czerwone linie – prawie poziome, czarne – niemal pionowe, a także jedna niebieska. Poza tym widnieją tam liczby rzymskie i arabskie. Linie czerwone powstawały podczas obserwacji biegu obrazu słońca w ciągu dnia (upływającego czasu). Wyglądają one jak zbiór równoległych względem siebie prostych. Jedna z nich wyróżniona kolorem niebieskim jest rzeczywiście prostą. Jednakże pozostałe są hiperbolami o bardzo rozwartym kształcie. Ten charakterystyczny ślad w postaci prostej był celem poszukiwań Kopernika, gdyż powstawał on w momencie zrównania dnia z nocą, czyli w dniu równonocy wiosennej lub jesiennej. Początkowo była to jedyna linia, pociągnięta przez astronoma farbą o barwie niebieskiej (sprowadzonej prawdopodobnie z Włoch[7] jeszcze za czasów jego studiów), jednak została ona później przemalowana na kolor czerwony, tak jak pozostałe linie. Opatrzona została również napisem AEQUINOCTIUM. Aktualnie na tablicy widoczne są tylko pozostałości po tym wyrazie – trzy litery: pierwsza – wyglądająca jak T, będąca jednak lingaturą[8] AE, z przeciągniętą górną beleczką, czwarta I oraz ósma C. Linia równonocy jest odchylona od kierunku poziomego o pewien kąt. Równoległe obliczenia T. Przypkowskiego i F. Koebcke na podstawie wyznaczonego odchylenia ściany zamku od kierunku południowego (33°3') oraz zmierzonej szerokości geograficznej Olsztyna (53°45') potwierdziły obserwowane na tablicy odchylenie prostej równonocy. Hiperbole, które znajdują się na tablicy zostały przez Kopernika oznaczone liczbami arabskimi. Znaki te metodą paleografii[9] można ocenić na połowę XVI w., a ich elementy kroju są analogiczne do znajdujących się w ręcznych zapisach astronoma. Na tablicy można znaleźć liczby od 0 do 30, liczone co pięć jednostek określające, każdą z hiperbol. Początkowo T. Przypkowski interpretował je jako oznaczenie ilości dni przed lub po równonocy.



Rys. 2. Widok na krużganek zamku olsztyńskiego; w rogu pierwszej z arkad umieszczone było zwierciadło – element układu pomiarowego; przez szybę trzeciej z arkad widoczne jest światło w komnacie zamieszkiwanej przez Kopernika

Rys. 3. Oryginalna tablica astronomiczna na zamku w Olsztynie [8]

[7] Według prof. B Marconiego (Przypkowski).

[8] Ligatura - czcionka lub font, w których oczko (obraz) zawiera dwie (co najmniej) połączone litery w postaci jednego wspólnego, nowego znaku, np. w połączeniu liter „fi", gdy kropka z litery „i" stanowi jednocześnie kulkę na końcu litery „f". Innym przykładem tak zbudowanego znaku są litery „f" i „l" stojące na wspólnym szeryfie (w tym wypadku stopce).[http://pl.wikipedia.org/wiki/Ligatura_(pismo)].

[9] Paleografia - jedna z nauk pomocniczych historii, zajmująca się badaniem rozwoju pisma w procesie historycznym, zajmuje się także badaniem środowiska, w jakim żył i tworzył naukowiec/artysta jak również rozpoznawaniem skrótów (brachygrafia) i „rozszyfrowywaniem" (odczytywaniem) dawnego pisma.[http://pl.wikipedia.org/wiki/Paleografia].

Jednakże po dokładnym odczytaniu przez Tadeusza Przypkowskiego zapisu znajdującego się przy znaku rzymskiej XI jako 10, a nie jak wydawało mu się wcześniej 40, stwierdził, że cyfry te określają ilość stopni długości na ekliptyce położenia słońca w ramach poszczególnych znaków zodiaku. Obie interpretacje są do siebie bardzo zbliżone ze względu na to, że ilość dni w okresie miesiąca lub dni danego znaku zodiaku pokrywa się z pozycjami długości ekliptycznej podanej w stopniach[10]. Na tablicy widnieją również cyfry rzymskie znajdujące się przy zakończeniach czarnych, matowych niemal pionowych linii godzinnych. Wskazywały one godziny przedpołudniowe z użyciem lusterka umieszczonego w rogu pierwszej arkady, natomiast do odczytu godzin popołudniowych musiało zostać użyte drugie zwierciadło. Jednakże zgodnie z badaniami T. Przypkowskiego, który linie te uważa za niezgodne z rzeczywistymi wskazaniami[11] oraz wynikami prac konserwatorskich, linie te zostały wykreślone empirycznie przez inną osobę niż Kopernik, jednak jeszcze za jego życia, zaraz po wyjeździe astronoma z Olsztyna, po 1521 roku. Zostało to wykonane na podstawie niedokładnie chodzącego zegara mechanicznego, wykorzystując źle wypolerowane i wypoziomowane zwierciadła.

Fakt nachylenia linii równonocy przeciwnie niż wskazywałby na to azymut ściany, prawdopodobnie świadczy o tym, że Kopernik wykorzystał do tworzenia tablicy metodę gnomonicznego rzutu refleksyjnego. Stąd też wiemy, że odbity w lusterku obraz słońca wędrował jak już zostało wspomniane wzdłuż czerwonych linii od dołu ku górze. Urwanie linii u góry w fazie wznoszenia się świadczą, iż wykres powstawał wyłącznie w godzinach przedpołudniowych[12], co również potwierdzają możliwości związane z architekturą Zamku.

Hiperbole powstawały jak widać na tablicy, co 5 dni. Kopernik zaznaczał położenie obrazu słońca na tablicy zmieniające się w ciągu dnia. Jednakże mogło się zdarzyć, że w dniu w którym wypadała obserwacja, warunki atmosferyczne nie były sprzyjające. Wówczas brakujące ślady mogły być wykreślone na podstawie obliczeń. Należało zsumować wartości kątowe otrzymanych w wyniku późniejszych obserwacji hiperbol i podzielić przez ich liczbę. Można stwierdzić, w które dni Mikołaj Kopernik wykonywał swoje pomiary, dzięki znajomości konstrukcji tablicy oraz wiedząc, że w 1517 roku, według obowiązującego kalendarza, równonoc przypadała na dzień 11 marca. Obliczenia wskazują, że obserwacje zostały rozpoczęte 25 stycznia, a zakończone 20 kwietnia. Licząc co pięć dni od początkowej daty otrzymujemy moment drugiej obserwacji w dniu 30 stycznia, a potem 4, 9, 14, 19, 24 lutego oraz w marcu: dwa pomiary: 1 i 6 a także 11, a następnie 16, 21, 26, 31 marca. Na następny miesiąc pozostają cztery obserwacje w dniach: 5, 10 , 15 i 20 kwietnia [9].

Sposób, w jaki korzystał Kopernik ze swojej tablicy opisuje J. Pagaczewski: „Gdy w dowolnym miejscu tablicy na pewien czas przed lub po wiosennej lub jesiennej równonocy ukazał się w danym momencie „zajączek", będący odbiciem światła słonecznego w rtęciowym lusterku, Kopernik zaznaczywszy jego miejsce grafitem na tablicy, mógł obliczyć przy pomocy graficznej interpolacji, ile czasu po tym momencie upłynie jeszcze do momentu równonocy, względnie w jakim czasie po momencie równonocy nastąpiła obserwacja. Średnia arytmetyczna z kilku lub kilkunastu tego rodzaju obliczeń pozwala na wyznaczenie średniego momentu równonocy, co w rezultacie prowadziło do obliczenia długości roku zwrotnikowego."[13]

2. Propozycje „odtworzenia" obserwacji Kopernika

Obserwacje potrzebne do wykreślenia słonecznego kalendarza Kopernika, jakkolwiek proste, wymagają pewnego przygotowania, sporo cierpliwości i systematyczności, gdyż powinny być kontynuowane przez okres co najmniej dwóch miesięcy, najlepiej przez okres co najmniej jednego miesiąca przed i jednego miesiąca po równonocy wiosennej (lub jesiennej). Potrzeba też trochę szczęścia, aby w krytycznych dniach trafić na słoneczną pogodę. Pomieszczenie (na przykład szkolny korytarz lub klasa), które wybierzemy na miejsce obserwacji powinno mieć okna skierowane w przybliżeniu na południe i zapewniać dobrą widoczność Słońca przez możliwie długi okres czasu. Pojedyncze przeszkody, w postaci drzew, czy sąsiednich budynków nie dyskwalifikują miejsca, jeżeli tylko Słońce będzie widoczne w południe i dwu możliwie odległych położeniach na wschód i zachód. Pomieszczenie powinno być wysokie, jeżeli zamierzamy rzutować obraz Słońca na ścianę, lub szerokie, jeżeli obraz będziemy rzutować na sufit. Ogólnie można powiedzieć, że im większe pomieszczenie tym lepiej – w obu przypadkach powierzchnia rzutowania powinna być jak najdokładniej płaska.

Pod tymi względami krużganek Olsztyńskiego Zamku był doskonałym miejscem obserwacji, był bowiem wysoki i odpowiednio zorientowany względem stron świata i z dobrą widocznością Słońca. Mógłby być co prawda nieco szerszy i mieć mniejsze okna, aby było ciemniej, ale nie wymagajmy zbyt wiele – i tak Kopernik dokonał najlepszego wyboru, a o płaskość powierzchni rzutowania, jak można się domyśleć, zadbał z nie mniejszą starannością.

W odpowiednio wybranym miejscu na parapecie lub we framudze okna umieszczamy lusterko tak, aby odbity od niego promień Słońca („zajączek") trafił na wybraną powierzchnię rzutowania (oczywiście w czasie właściwych obserwacji, czyli przy wysokości słońca nad horyzontem w południe w obszarze 28°- 48°). Jako lusterka możemy użyć uprzednio już wspomnianej miseczki z płynnym miodem, co zapewni w każdych warunkach dokładnie poziome położenie powierzchni odbijającej i stabilny obraz Słońca. Jednakże, dla akurat tego eksperymentu w zasadzie nie jest konieczne, aby lusterko było ustawione dokładnie poziomo, gdyż interesuje nas tylko to, w którym dniu tor „zajączka" na powierzchni rzutowania jest zbliżony najbardziej do prostej, co przecież nie zależy od kąta rzutowania. Zastosowanie klasycznego zwierciadła ma nawet istotne

[10] T. Przypkowski, Astronomiczne zabytki Olsztyna, s. 156.

[11] T. Przypkowski, Astronomiczne zabytki Olsztyna ss.157-159.

[12] J. Sikorski, Z zagadnień organizacji pracy badawczej i warsztatu naukowego Mikołaja Kopernika, s.160.

[13] J. Pagaczewski, Obserwatoria, s. 56.

zalety. Po pierwsze, obraz Słońca będzie znacznie jaśniejszy, możemy więc zmniejszyć powierzchnię efektywną zwierciadła przez zastosowanie odpowiedniej przysłony, a to skutkuje zwiększeniem ostrości obrazu, niestety kosztem jego jasności. W przypadku granicznym, gdy wymiary kątowe efektywnej powierzchni zwierciadła widziane od strony powierzchni rzutowania „będą mniejsze od około 0,5'" czyli wymiarów kątowych Słońca, to zajączek nie będzie już odwzorowywał kształtu samego zwierciadła, a na ścianie zobaczymy obraz tarczy słonecznej, co znacznie poprawi dokładność, z jaką potrafimy zaznaczyć jego położenie. Drugą zaleta zastosowania zwyczajnego zwierciadła jest to, że odpowiednio go ustawiając możemy skierować obraz Słońca na dowolnie wybraną część ściany, odpowiednio eksponowaną i wolną od przeszkadzających elementów architektonicznych.

Bardzo istotne jest jednakże, aby zwierciadło zamocować bardzo solidnie tak, aby wykluczyć jakiekolwiek zmiany jego położenia w czasie obserwacji. Ważne jest także, aby w czasie obserwacji zapewnić swobodny bieg promienia od Słońca do ściany z pominięciem szyb, które mogą spowodować znaczne niepewności pomiarowe.

Mimo, iż znawcy przypuszczają, że Kopernik użył ciekłego zwierciadła, a więc rtęci, czerwonego wina, czy może właśnie płynnego miodu, to przytoczone powyżej zalety stałego zwierciadła z pewnością oczywiste dla Kopernika mogły go skłonić do zastosowania tego dogodniejszego rozwiązania. Zwłaszcza, że „miodowe'' lusterko w czasie długotrwałych obserwacji mogło „skrystalizować", nie mówiąc już o tym, że mogło zostać skonsumowane przez pszczoły lub wręcz służbę zamkową, do której Kopernik nie mógł mieć przecież „pełnego zaufania".

Właściwą sesję obserwacyjną należałoby rozpocząć w drugiej dekadzie lutego – (Słońce znajduje się wtedy ok.12° poniżej równika) i kontynuować do drugiej dekady kwietnia. Aby dostosować obserwacje do tygodniowego cyklu pracy w szkole można by je wykonywać co tydzień, np. w soboty lub niedziele. Obserwacja, o ile dopisze pogoda, polegałaby na zaznaczeniu na ścianie położenia „obrazu Słońca" w stałych w przybliżeniu momentach czasu, w co najmniej trzech punktach, możliwie wcześnie przed południem, w południe i możliwie późno po południu. Punkty krańcowe są szczególnie istotne, gdyż dla nich oczekiwane odchylenia od linii prostej są największe. Do zaznaczenia punktów można by użyć odpowiedniego ekranu z otworem, przykładanego w miejscu położenia obrazu Słońca, a zaznaczać je np. farbą w aerozolu (tzw. „sprayem''). Zaznaczone punkty należy oczywiście opatrzyć datą obserwacji. Po zakończeniu sesji, gdzieś pod koniec kwietnia, o ile dopisze nam pogoda, będziemy mieli zaznaczoną na ścianie „rodzinę śladów" obrazu Słońca, spośród których musimy wybrać tor najbardziej prosty. Dla większej dokładności możemy sporządzić wykres, na którym naniesiemy zmierzone odchylenia od prostej, wyznaczonej np. przy pomocy naprężonego sznurka, z uwzględnieniem kierunku zakrzywienia końców toru, w funkcji daty obserwacji. Linia prosta na naszym wykresie, przeprowadzona przez zmierzone odchylenia (o ile nie popełniliśmy błędu grubego) powinna przeciąć oś czasu na dacie 20-21 marca, czyli wyznaczymy interesującą Kopernika datę astronomicznej wiosny.

Gdybyśmy jednak nie zdążyli z przygotowaniami, lub nie dopisała nam pogoda, to następną szansę obserwacji będziemy mieli dopiero za pół roku od końca sierpnia do końca października, czyli podczas przejścia Słońca przez jesienny punkt równonocy przypadający w okolicy 22-23 września.

Jasne się więc staje, dlaczego tak istotne jest solidne zamocowanie zwierciadła, czy też zastosowanie zwierciadła ciekłego. Chodzi bowiem o to, aby w tak długich przedziałach czasu położenie i orientacja zwierciadła pozostawały niezmienne. Jeżeli nawet w pewnej próbie nie uda się nam uzyskać satysfakcjonującej dokładności, to mimo to możemy mieć satysfakcję z faktu, iż rozumiemy istotę tablicy znacznie lepiej od często przypadkowego turysty oglądającego tajemnicze symbole i linie wykreślone ręką Kopernika na ścianie olsztyńskiego krużganku (Rys.6), oraz że sami potrafiliśmy przynajmniej częściowo odtworzyć dane zawarte w zaginionym memoriale Kopernika. Jednakże możliwe są też i inne warianty obserwacji.

Oryginalną możliwość w tym względzie oferują wielkie kościelne katedry, zwłaszcza gotyckie o wysokich strzelistych oknach, często ozdobionych witrażami. Jeżeli wybierzemy w jednym z południowych okien fragment witrażu kontrastujący z otoczeniem, to obserwując barwną plamę utworzoną na posadzce przez promienie słońca, przechodzące przez wybrany fragment witrażu, uzyskujemy potencjalną możliwość do wyznaczenia daty równonocy, a także innych wielkości astronomicznych, jednakże przy tym pojawi się problem płaskości posadzki i zapewnienia dostatecznie długiego czasu obserwacji.

Do obserwacji możemy też użyć coś znacznie bardziej nowoczesnego, a mianowicie kamerę. Jeżeli skierujemy sztywno umocowaną kamerę na Słońce, oczywiście z odpowiednim filtrem (aby nie uszkodzić samej kamery), to tory „obrazów Słońca" zarejestrowanych w okolicy równonocy powinny tworzyć rodzinę wychylonych w przeciwne strony hiperboli, z linią prostą w środku. Niestety, nieuchronne zniekształcenia obrazu wywołane filtrem czy też samym obiektywem kamery, prawdopodobnie całkowicie zamaskują oczekiwany efekt. Jeżeli dla uniknięcia zniekształceń zamiast obiektywu zastosujemy przysłonę z małym otworkiem, to przy krótkiej ogniskowej wynikającej z konstrukcji kamery będziemy musieli zastosować bardzo mały otworek, aby obraz Słońca był dostatecznie mały. Ale z kolei, im mniejszy będzie otworek, tym silniejsze będą efekty dyfrakcyjne, które pogorszą dokładność. Jak widzimy, nie jest bynajmniej łatwo, nawet przy użyciu nowoczesnych środków, istotnie poprawić dokładności pomiaru, zrealizowanego według koncepcji Kopernika na Olsztyńskim Zamku.

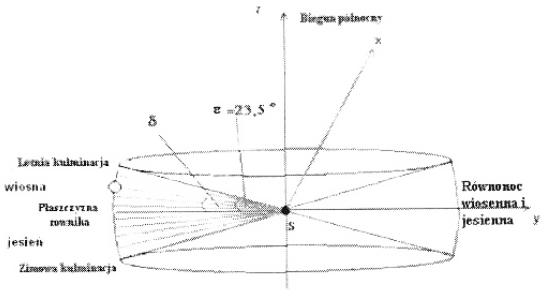
Stąd widać, jak pomysłowym i skrupulatnym obserwatorem był Kopernik, a precyzja jego pomiarów, mimo iż używał niezwykle prostych, wręcz prymitywnych narzędzi, zdumiewała nie tylko jemu współczesnych, lecz także astronomów działających wiele lat po jego śmierci.

3. Matematyczny opis uzyskiwanych wyników obserwacji

Równania drugiego stopnia i tak zwane „przecięcia stożkowe" odkrył już w III w p.n.e., czyli setki lat przed Kopernikiem Apoloniusz z Pergii[14]. Można więc bez żadnej przesady stwierdzić, iż linie wykreślone przez Kopernika na ścianie krużganku Olsztyńskiego Zamku są niczym innym, jak właśnie szczególną postacią przecięć stożkowych, które są geometryczną reprezentacją algebraicznych równań drugiego stopnia dwóch zmiennych. Aby jednak nie wybiegać zbyt daleko w dziedzinę matematycznej abstrakcji, spróbujmy określić teoretycznie, jaki kształt mają tory światła odbitego od stacjonarnego zwierciadła, rzutowane na dowolnie zorientowaną płaską powierzchnię w dowolnym miejscu na Ziemi.

Do rozwiązania tego zagadnienia w zupełności wystarczy współczesny aparat matematyczny na poziomie liceum, tak że średnio uzdolniony uczeń (no może z pewnym matematycznym zacięciem), powinien z nim sobie poradzić. Dla całkowicie wystarczającej dokładności, w tym zadaniu wystarczy uwzględnić tylko dwa podstawowe ruchy Ziemi, które po raz pierwszy określił Kopernik, a mianowicie obrót wokół osi, reprezentujący cykl dobowy oraz obieg po orbicie wokół Słońca, z osią obrotu nachyloną do płaszczyzny orbity pod kątem ε około 23,5°, reprezentujący cykl roczny z porami roku. Pozostałe ruchy, takie jak precesja, nutacje itp. są bądź na tyle powolne lub na tyle małe, że można je w naszym rozważaniu pominąć. W tym miejscu warto zwrócić uwagę na istotną dla metody Kopernika okoliczność, iż nierównomierność pozornego ruchu Słońca na sferze niebieskiej – znana już Kopernikowi, nie wpływa na kształt torów „obrazu Słońca", a jedynie na szybkość z jaką „obraz Słońca" poruszał się po liniach wykreślonych na ścianie olsztyńskiego krużganku.

Obserwator znajdujący się w środku Ziemi, abstrahując na razie od skrajnie niekorzystnych panujących tam warunków, stwierdziłby po dłuższym czasie, że w prostokątnym układzie współrzędnych (x,y,z) z osią „z" pokrywającą się z osią obrotu, promień słońca przechodzący przez środek Ziemi opisuje powierzchnię stożkową, o kącie wierzchołkowym zmieniającym się powoli w czasie roku, od 180° w momencie równonocy wiosennej lub jesiennej (powierzchnia stożkowa przechodzi wówczas w płaszczyznę pokrywającą się z płaszczyzną równika, δ=0) do kąta 180° ±2ε (gdzie, jak pamiętamy kąt ε = 23,5° jest kątem nachylenia osi obrotu Ziemi do płaszczyzny orbity) w momentach letniej i zimowej kulminacji słonecznej (patrz Rys.4).



Rys. 4. Pozorny ruch Słońca po stożku

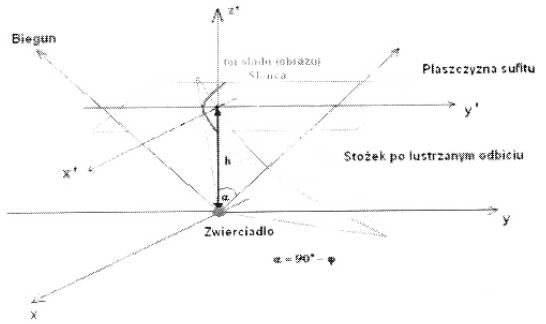
Jeżeli obserwator miałby ponadto zamiłowanie do opisywania obserwacji przy pomocy pojęć i zależności matematycznych to stwierdziłby, że ową powierzchnię stożkową można opisać prostą zależnością:

$$z^2 = tg\delta(x^2 + y^2), \text{ gdzie } (x^2 + y^2) = k^2$$

gdzie δ jest chwilową deklinacją Słońca, czyli jego kątową odległością od płaszczyzny równika.

Przenieśmy się teraz (dla większego komfortu) ze środka Ziemi na jej powierzchnię, umieśćmy obserwatora w środku zwierciadła. Sytuacja oczywiście ulegnie zmianie, gdyż jesteśmy teraz o promień Ziemi poza jej środkiem, ale ponieważ odległość do Słońca jest ponad 20 tysięcy razy większa od promienia Ziemi, zmiana ta będzie tak nieznaczna, że znów ze spokojem możemy twierdzić, że podane powyżej równanie pozostaje w mocy. Patrząc wzdłuż linii tworzącej stożka w określonej porze dnia, Słońce będziemy widzieli dokładnie w środku zwierciadła. Jeżeli teraz powierzchnię stożka przetniemy dowolnie zorientowaną płaszczyzną, to na linii przecięcia będziemy też widzieć „obraz Słońca" w środku zwierciadła, jako że nadal pozostajemy przecież na powierzchni stożka. Poruszając się po linii przecięcia w kolejnych momentach czasu, będziemy widzieli ciągle „obraz Słońca" w środku zwierciadła, a to właśnie będzie poszukiwany obraz Słońca na wybranej płaszczyźnie rzutowania. W tym miejscu możemy uznać, że problem został rozwiązany, a mianowicie, że kształt toru odbijanego od zwierciadła „zajączka" będzie przecięciem stożkowym, czyli jak dziś wiemy z geometrii – kołem, elipsą, parabolą, hiperbolą, czy w granicznym przypadku prostą.

Spróbujmy jednak pójść o krok dalej i zapytać, jaki konkretnie jest tor „zajączka" w zależności od szczegółowych warunków obserwacji. Aby tego dokonać należy punkty leżące na wybranej płaszczyźnie $x, y, z = 0$ przetransponować do układu związanego ze stożkiem i podstawić do równania stożka. Dla uproszczenia zadania, ale bez straty ogól-



Rys. 5. Stożek w układzie współrzędnych oraz rzutowanie na sufit

[14] Apoloniusz z Pergii - żyjący w III wieku p.n.e. (ok. 260 p.n.e. - ok. 190 p.n.e.) matematyk i astronom grecki; interesował się głównie geometrią a zwłaszcza krzywymi stożkowymi; napisał traktat Konika - Stożkowe, w którym opisuje i nadaje nazwy takim krzywym jak elipsa, parabola i hiperbola; zajmował się również badaniem ruchu Księżyca; działał na terenie Pergamonu i Aleksandrii [7].

ności rozwiązania ustalmy, że oś x jest skierowana w kierunku wschód – zachód a oś y w kierunku północ – południe. Natomiast powierzchnia rzutowania jest np. poziomą powierzchnią sufitu (Rys. 5).

Dokonamy zatem trzech kolejnych transformacji układu współrzędnych:

- lustrzanego odbicia powierzchni rzutowania względem poziomego zwierciadła, w wyniku którego zmienia się jedynie skrętność układu, co skutkuje jedynie zmianą kierunku poruszania się „zajączka" (Rys. 5),
- liniowej translacji wzdłuż osi z o odcinek $-h$, tak aby środek układu współrzędnych pokrywał się ze środkiem zwierciadła (h jest odległością płaszczyzny rzutowania od płaszczyzny zwierciadła) (Rys. 5), czyli:

$$x' = x$$
$$y' = y$$
$$z' = -h$$

- rotacji układu wokół osi x o kąt $(90^\circ + \varphi)$, tak aby oś z pokrywała się z osią obrotu Ziemi (kierunkiem na biegun)

$$x = x'$$
$$y' = -y\sin\varphi + h\cos\varphi$$
$$z' = h\sin\varphi + y\cos\varphi$$

Jeżeli podstawimy teraz przetransformowane współrzędne do równania stożka i dokonamy stosownych przekształceń, to uzyskamy równanie toru „zajączka" w postaci:

$$y^2(\cos^2\varphi - A) - x^2 tg\varphi + h^2(\sin^2\varphi - B) +$$
$$2hy\sin\varphi\cos\varphi(1 - tg^2\delta) = 0$$

gdzie:

$$A = tg^2\delta\sin^2\varphi$$
$$B = tg^2\delta\cos^2\varphi$$

Tor „zajączka" na pionowej ścianie opisany będzie tym samym równaniem, z tym że $\sin\varphi$ zastępujemy $\cos\varphi$ i na odwrót, co nie powinno dziwić, gdyż powierzchnie sufitu i pionowej ściany przechodzą w siebie nawzajem po obrocie o kąt prosty. I to jest właśnie wspomniane na początku rozdziału, algebraiczne równanie drugiego stopnia dwóch zmiennych.

W szczególnym przypadku, na równiku $\varphi=0$ i w momencie równonocy $\delta=0$, powyższe równanie upraszcza się do postaci $y=0$, czyli tor zajączka jest linią prostą pokrywającą się z osią x. Natomiast poza momentem równonocy, tj. gdy $\varphi \neq 0$ równanie to przybierze postać:

$$y^2 - x^2 tg^2\varphi - h^2 tg^2\varphi = 0$$

lub

$$\left(\frac{y}{htg\delta}\right)^2 - \left(\frac{x}{h}\right)^2 = 1$$

znane jako równanie hiperboli w postaci kanonicznej. Podobnie nietrudno pokazać, że w momencie równonocy, gdy $\delta = 0$, dla umiarkowanych szerokości geograficznych, tor zajączka będzie prostą o równaniu:

$$y = -htg\varphi.$$

natomiast poza równonocą – hiperbolą. Oczywiście, dla wartości δ bardzo bliskich zeru, odróżnienie czy tor jest już hiperbolą, czy jeszcze linia prostą może być trudne. I to jest punkt wyjścia do konstrukcji tablicy astronomicznej. Kopernik musiał doskonale zdawać sobie sprawę z tych zależności, a dysponował przecież znacznie skromniejszym aparatem matematycznym. Możemy tylko podziwiać niezwykłość jego intuicji i wyobraźni przestrzennej.

Literatura

[1] T. Przypkowski, *O Mikołaju Koperniku,* PWN, Warszawa, 1953.

[2] J. Sikorski, *Z zagadnień organizacji pracy badawczej i warsztatu naukowego Mikołaja Kopernika,* Komunikaty Mazursko-Warmińskie, 1993, nr 2 (200), str. 131-166.

[3] D. Wierzbicki, *O kalendarzu,* Lwów 1878, str. 61-65.

[4] M. Biskup, *Regesta*, nr 103 przypis 1.

[5] J. Śniadecki, *O Koperniku,* Biblioteka Narodowa, Zakład Imienia Ossolińskich, Warszawa, 1955.

[6] http://pl.wikipedia.org/wiki/Jerzy_Joachim_Retyk.

[7] http://pl.wikipedia.org/wiki/Apoloniusz_z_Pergii.

[8] J. Cygański, Astronomiczna tablica Mikołaja Kopernika, *Spotkania z zabytkami,* nr 11, s.16-17.

[9] T. Przypkowski, *Astronomiczne zabytki Olsztyna,* Muzeum Mazurskie w Olsztynie Rocznik Olsztynski, vol. II, 1959, str. 135-172

[10] T. Przypkowski, *Tablica doświadczalna M. Kopernika w Olsztynie w świetle najnowszych odkryć 1956-1957 roku*, Postępy Astronomii, t. VI, 1958.

[11] A. Woszczyk, *Instrumenty Kopernika a narzędzia współczesnej astronomii,* TNT, Toruń, 1973, Nr 26, Biblioteczka Kopernikańska 13.

Uwagi

1. Niniejsza praca została zrealizowana w ramach Europejskiego Projektu FP7-SiS – 2007, Nr 217805 pt. „History and Philosophy in Science Teaching", którego koordynatorami są Prof. D. Höttecke and Prof. F. Rieβ (Niemcy).

2. Kontynuacja powyższego artykułu zostanie zamieszczona w następnym numerze *Nauczania Przedmiotów Przyrodniczych*. Opiszemy wówczas konkretne przykłady metod zastosowanych w Toruniu (zarówno w laboratorium, jak i w szkole) w celu powtórzenia obserwacji Mikołaja Kopernika, ich wyniki i interpretacje.