

Karolina Rożko

Rozwój teorii powstawania planet wokół pulsarów

„Chodzi mi o to, że każdą interesującą teorię otacza ocean anomalii, których elementy rodzą dalsze anomalie, kiedy próbujemy je potwierdzić”¹.

P.K. Feyerabend

Głównym celem tego artykułu* jest opisanie pewnych mechanizmów rozwoju teorii naukowych na przykładzie konkretnego problemu z zakresu astrofizyki: powstawania planet wokół pulsarów². We wstępie uzasadnię wybór poruszanego problemu. Następnie przedstawię fakty historyczne związane z tym zagadnieniem oraz z ukazywaniem się publikacji na ich temat. W drugiej części artykułu skoncentruję się na teoretycznym aspekcie powstawania

¹P.K. Feyerabend, *Dialogi o wiedzy*, tłum. J. Nowotniak, Fundacja Aletheia, Warszawa 1999, s. 84.

*Autorka chciałaby bardzo serdecznie podziękować za wnikliwą lekturę oraz uwagi anonimowemu recenzentowi oraz dr Wojciechowi Lewandowskiemu (z Instytutu Astronomii UZ).

²Pulsary są szybko rotującymi gwiazdami neutronowymi. Charakteryzują się bardzo silnym polem magnetycznym. Powszechnie akceptuje się model „latarni morskiej”, zgodnie z którym pulsary wysyłają promieniowanie w postaci dwóch wiązek omiatających Wszechświat.

planet wokół pulsarów. Na zakończenie postaram się opisać rozwój teorii powstawania pulsarów oraz wspomnę o kilku interesujących obserwacjach, które są „pewnego rodzaju” anomalią z punktu widzenia standardowego modelu powstawania planet.

Istnienie planet wokół pulsarów jest bardzo interesujące z kilku powodów. Po pierwsze, planety wokół pulsarów były pierwszymi odkrytymi planetami znajdującymi się poza Układem Słonecznym³. Dlatego też początkowo ich odkrycie stało się istotnym impulsem do poszukiwania planet pozasłonecznych. Po drugie, pulsary powstają w końcowym etapie ewolucji bardzo masywnych gwiazd, który to etap najczęściej kończy się wybuchem supernowej typu II. Jest bardzo mało prawdopodobne, aby jakikolwiek układ planetarny taką eksplozję. Dlatego też istnienie planet wokół pulsarów wymagało zrewidowania funkcjonujących w owym czasie teorii powstawania układów planetarnych oraz teorii powstawania i ewolucji pulsarów podwójnych i milisekundowych⁴. Po trzecie, mimo znacznego postępu technologicznego, dzięki któremu obecnie odkrytych jest ponad 800 planet pozasłonecznych⁵ oraz 2008 pulsarów⁶, zaobserwowano jedynie trzy pulsary, wokół których najprawdopodobniej krążą planety.

Na początku lat 90-tych znane były już cztery doniesienia o zaobserwowaniu planet wokół gwiazd neutronowych: pulsara w Mgławicy Krab, PSR 0329+54, optycznego pulsara w SN 1987a

³Niektóre źródła jako pierwszą odkrytą planetę wymieniają HD 114762b (obiekt zaobserwowany w 1989 r.), jednakże do dnia dzisiejszego nie rozstrzygnięto z całą pewnością, czy jest to planeta, czy brązowy karzeł.

⁴Proces powstawania pulsarów podwójnych i milisekundowych został bardzo przystępnie opisany w artykule: W. Lewandowski, „Powstanie pulsarów podwójnych i milisekundowych”, *Postępy Astronomii*, 44, z.1 (1996), s. 16–22.

⁵J. Schneider, *Encyklopedii Pozasłonecznych Układów Planetarnych*, <<http://exoplanet.eu>>, 10.09.2012.

⁶*ATNF Pulsar Catalogue*, <<http://www.atnf.csiro.au/research/psrcat>>, 10.09.2012 oraz R. N. Manchester, G. B. Hobbs, A. Teoh, M. Hobbs, „The Australia Telescope National Facility Pulsar Catalogue”, *The Astronomical Journal*, 129 (2005), s. 1993–2006.

oraz PSR 1829-10⁷. Po dokładniejszej analizie okazało się jednak, że te doniesienia były przedwczesne. W większości przypadków za zaobserwowane zniekształcenia odpowiedzialny był tzw. szum chronometrażowy. Zaś w przypadku PSR 1829-10 źle zredukowano dane, pozostawiając w nich ślad ruchu heliocentrycznego Ziemi. W 1992 r. w *Nature* ukazał się artykuł „A planetary system around the millisecond pulsar PSR 1257+12”⁸. W artykule tym zostały zaprezentowane wyniki obserwacji PSR 1257+12. Przychodzące pulsy cechowały się niezwykle nieregularnością. Nieregularność tę można wyjaśnić, przyjmując założenie, że pulsar obiegany jest przez dwie planety: pierwszą o masie około 3,4 mas Ziemi oraz okresie obiegu 66,5 dnia, drugą o masie około 2,8 mas Ziemi i okresie obiegu równym 98,2 dnia. Podczas późniejszych obserwacji odkryto jeszcze trzecią planetę o masie około 0,02 masy Ziemi i okresie obiegu 25 dni.

Cztery miesiące po ogłoszeniu tego odkrycia na uniwersytecie Caltech odbyła się konferencja dotycząca planet wokół pulsarów. Rok później ukazała się praca zbiorowa *Planets around pulsars*⁹, w której zebrano referaty wygłoszone podczas tej konferencji. Znajduje się tam między innymi artykuł Aleksandra Wolszczana, w którym opisany został układ planetarny wokół PSR 1257+12¹⁰. Planety tworzące ten układ poruszają się po kołowych orbitach i ogólnie przypominają skaliste planety Układu Słonecznego. Ponadto są bliskie stabilnemu rezonansowi, wynoszącemu 3:2. Dla tego też Wolszczan odrzucił wyjaśnienie, że efekt ten mógłby być spowodowany zmianą precesji osi gwiazdy neutronowej.

W czasie konferencji zaprezentowane zostały również alternatywne wyjaśnienia obserwowanych zmian w czasie przychodzenia

⁷J.M. Cordes, „The detectability of planetary companions to radio pulsars”, [w:] *Planets around pulsars*, Astron. Soc. Pac. Conf. Ser. Vol. 36, 1993, s. 43–60.

⁸A. Wolszczan, D.A. Frail, „A planetary system around the millisecond pulsar PSR 1257+12”, *Nature*, 355 (1992), s. 145–147.

⁹*Planets around pulsars*, ed. J.A. Phillips, S.E. Thorsett, S.R. Kulkarni, Astron. Soc. Pac. Conf. Ser. Vol. 36, 1993 r.

¹⁰A. Wolszczan, „PSR 1257+12 and its planetary companions”, [w:] *Planets around pulsars*, Astron. Soc. Pac. Conf. Ser. Vol. 36, 1993, s. 3–10.

pulsów PSR1257+12. W artykule „On quasiperiodic variations of pulsars period: an alternative to the planetary interpretation of PSR 1257+12”¹¹ przedstawiony został model, który uwzględnia dwa fizyczne procesy: wolną precesję oraz wpływ obrotu zewnętrznych warstw gwiazdy neutronowej względem jej jądra. Autorzy przyjmują model budowy gwiazdy neutronowej, zgodnie z którym we wnętrzu gwiazdy neutronowej znajduje się solidne jądro, otoczone nadciężką materią. Obie te części gwiazdy obracają się niezależnie, aczkolwiek ich ruchy są nawzajem ze sobą powiązane. Ponieważ budowa wnętrza gwiazd neutronowych do dziś nie została jednoznacznie określona, zaprezentowane wyjaśnienie jest bardzo hipotetyczne. Drugie alternatywne wyjaśnienie zaproponowali Janusz Gil i Axel Jessner, dla których niezwykłą okazała się być mała ekscentryczność zaproponowanych orbit. Ich wyjaśnienie jest następujące: „Proponujemy, że za występowanie obserwowanych residuów PSR 1257+12 odpowiedzialne jest połączenie efektów związanych z precesją i/lub nutacją osi obrotu i/lub przemieszczanie się osi magnetycznej wokół osi obrotu¹²”. Autorzy ci nie wykluczyli, że zaobserwowane zmiany mogły zostać spowodowane przez planety obracające się wokół pulsara i doszli do wniosku, że dalsze obserwacje pozwolą ocenić, które wyjaśnienie jest najbardziej zadowalające.

W przeciwieństwie do wspomnianych wyżej odkryć, to związane z planetami wokół PSR 1257+12 było bardziej wiarygodne z kilku powodów. Po pierwsze, odkryte zostały dwie planety pomiędzy którymi zachodzi wyraźna korelacja (rezonans bliski 2:3). W przypadku pojedynczej planety mogło się okazać, że po prostu nie uwzględniono jakiegoś czynnika. Zaobserwowane zmiany miały jednak bardziej złożony charakter. Znaczenie może mieć też fakt,

¹¹A. Z. Dolginov, T.F. Stepinski, „On quasiperiodic variations of pulsars period: an alternative to the planetary interpretation of PSR 1257+12”, [w:] *Planets around pulsars*, Astron. Sot. Pac. Conf. Ser. Vol. 36, 1993, s. 61-70.

¹²J. A. Gil, A. Jessner, „Are there really planets around PSR 1257+12?”, [w:] *Planets around pulsars*, Astron. Sot. Pac. Conf. Ser. Vol. 36, 1993, s. 77, tłum. własne.

że „żaden z okresów obiegu planet wokół gwiazdy nie jest oczywiście wielokrotnością okresowości orbity Ziemi, ani innych zjawisk mogących zakłócić obserwacje lub interpretacje”¹³. Po drugie, szum zakłóceń chronometrażu dla pulsarów milisekundowych jest o wiele mniejszy od szumu zakłóceń dla pulsarów „normalnych”. Po trzecie, otrzymane rezultaty zostały potwierdzone przez niezależne dane i analizę wykonaną w obserwatorium w Green Bank¹⁴. Po czwarte, dzięki wykonaniu analizy porównawczej obserwacji dwóch pulsarów PSR 1257+12 oraz PSR 1534+12¹⁵ wykluczono możliwość wpływu szumu zakłóceń, interferencji lub błędów użytych instrumentów badawczych. Po piąte, na podstawie analizy dynamiki układu planetarnego obliczono, w jaki sposób powinny zmieniać się parametry orbit w przyszłości. W 1994 r. Wolszczan opublikował wyniki analizy trzyletnich obserwacji PSR 1257+12¹⁶, które przedstawił na konferencji poświęconej pulsarom milisekundowym „Millisecond Pulsars. a Decade of Surprise”, która odbyła się w Aspen. Paweł Artymowicz tak pisze o tym potwierdzeniu:

Na niedawnej konferencji na temat pulsarów milisekundowych A. Wolszczan ogłosił, że po analizie zebranych danych znaleziono drobne zmiany elementów orbitalnych planet wynikające z ich wzajemnego przyciągania (różnice w czasie przybywania pulsów promieniowania, w stosunku do modelu planet nieoddziałujących, sięgnęły bardzo drobnej, ale mierzalnej już wartości 10 mikrosekund). Otrzymaliśmy przez to ostateczne potwierdzenie istnienia dwóch planet¹⁷.

¹³P. Artymowicz, *Astrofizyka układów planetarnych*, PWN, Warszawa 1995, s. 454–455.

¹⁴Obserwacje te opisane są w artykule: D.C. Backer, „A pulsar timing tutorial and NRAO Green Bank observations of PSR 1257+12”, [w:] *Planets around pulsars*, Astron. Sot. Pac. Conf. Ser. Vol. 36, 1993, s. 11–18.

¹⁵Szczegóły można znaleźć w artykule V.M. Kaspi, A. Wolszczan, „A preliminary analysis of pulse profile stability in PSR 1257+12”, [w:] *Planets around pulsars*, Astron. Sot. Pac. Conf. Ser. Vol. 36, 1993, s. 81–85.

¹⁶A. Wolszczan, „Confirmation of earth-mass planets orbiting the millisecond pulsar PSR B 1257+12”, *Science*, 264 (1994), s. 538–542.

¹⁷P. Artymowicz, *Astrofizyka układów planetarnych*, wyd. PWN, Warszawa 1995 r., s. 457.

W międzyczasie w 1993 r. w *Nature* ukazał się artykuł D.C. Backera, R.S. Fostera i S. Sallmena, w którym donosili o odkryciu towarzysza wokół podwójnego milisekundowego pulsara PSR1620-26¹⁸, najprawdopodobniej planety, która została wcześniej przechwycona. Jest to dość prawdopodobne wyjaśnienie, ponieważ PSR1620-26 znajduje się w gromadzie kulistej M4, a więc w otoczeniu, w którym do kolizji między gwiazdami dochodzi o wiele częściej, niż w dysku Galaktyki. Wkrótce zaczęły ukazywać się artykuły poświęcone temu odkryciu. Również na wspomnianej wyżej konferencji poświęconej pulsarom milisekundowym zostało wygłoszonych kilka referatów poświęconych odkryciu towarzysza PSR1620-26. Większość astronomów ostrożnie podeszła do stwierdzenia, że drugim towarzyszem pulsara PSR1620-26 jest planeta. Między innymi Frederic Rasio w artykule „Is there a planet in the PSR 1620-26 triple system?”¹⁹ rozważał dwie alternatywne możliwości: obserwujemy zakłócenia spowodowane obecnością planety albo kolejnej gwiazdy. Jednocześnie zwrócił uwagę na fakt, że w ciągu kilku lat będzie można rozstrzygnąć na rzecz jednego z tych dwóch wyjaśnień. W 1999 r. Eric Ford, Kriten Joshi, Frederic Rasio i Boris Zbarsky opublikowali wyniki szczegółowej analizy czasów przyjścia pulsów PSR1620-26, dzięki której ustalili, że trzecim towarzyszem w tym układzie najprawdopodobniej jest planeta.²⁰

W 2011 r. ukazała się publikacja „Transformation of a Star into a Planet in a Millisecond Pulsar Binary”²¹, w której opisano odkrycie planety wokół pulsara PSR J1719-1438. Autorzy zaproponowali, że może to być pozostałość po gwiazdzie (białym karle),

¹⁸D. C. Backer, R.S. Foster, S. Sallmen, „A second companion of the millisecond pulsar 1620-26”, *Nature*, 365 (1993), s. 817–819.

¹⁹F. A. Rasio, „Is there a planet in the PSR 1620-26 triple system?”, *The Astrophysical Journal Letters*, 427 (1994), s. 107–110.

²⁰E. B. Ford, K. J. Joshi, F. A. Rasio, B. Zbarsky, „Theoretical Implications of the PSR B1620?26 Triple System and its Planet”, *preprint*, <<http://arxiv.org/>>, 02.07.2012.

²¹M. Bailes, „Transformation of a Star into a Planet in a Millisecond Pulsar Binary”, *preprint*, <<http://arxiv.org/>>, 02.07.2012.

która została „odparowana” w wyniku procesów fizycznych zachodzących w układach podwójnych gwiazd neutronowych i białych karłów. Wyznaczona wielkość oraz gęstość tej planety wskazują, że najprawdopodobniej jest ona zbudowana z diamentu.

Podsumowując, w ciągu ostatnich dwudziestu lat zaobserwowano trzy pulsary wokół których znajdują się planety. Każdy z tych przypadków jest wyjątkowy. PSR 1257+12 jest pojedynczym pulsarem milisekundowym i posiada układ planetarny, który przypomina skalistą część Układu Słonecznego. Milisekundowy pulsar PSR 1620-26 znajduje się w gromadzie kulistej M4, jest składnikiem hierarchicznego układu potrójnego złożonego z pulsara, małomaszynego białego karła oraz planety krążącej na odległej, dość ekscentrycznej orbicie. PSR J1719-1438 również jest pulsarem milisekundowym i posiada planetę, która ze względu na swoją gęstość, przypomina białego karła o bardzo małej masie (zbliżonej do masy Jowisza). Jednakże zgodnie z definicją planety, która została zatwierdzona przez Międzynarodową Unię Astronomiczną w 2003r., jest to planeta. Ze względu na tę różnorodność powstaje trudność ze znalezieniem tylko jednej teorii tłumaczącej powstanie wszystkich trzech układów. W dalszej części artykułu postaram się pokazać, w jaki sposób wyżej opisane obserwacje wpłynęły na rozwój teorii powstawania planet wokół pulsarów.

Na początku lat 90-tych XX wieku przyjmowano, że planety powstają w momencie, w którym powstają gwiazdy. Model ten wspierany jest faktem, że wiek Ziemi i innych planet oraz wiek Słońca wydają się być zbliżone. Ponadto, wokół wielu tzw. protogwiazd zaobserwowano dyski materii, w których mogą powstawać planety. Przyjmując ten model spodziewano się w przyszłości wielu obserwacji układów planetarnych podobnych do Układu Słonecznego. Fakt, że pierwsze planety pozasłoneczne zostały zaobserwowane wokół pulsara, zmusił teoretyków do zrewidowania istniejącej teorii powstawania układów planetarnych. Wielu astronomów zaproponowało, aby podzielić te wyjaśnienia na dwie główne klasy: pierwszą, zakładającą, że planety powstały w „normalny” sposób (tzn. zgodnie z przyjmowanym wówczas modelem

powstawania planet w momencie narodzin gwiazd), a następnie przetrwały burzliwą ewolucję swojej gwiazdy oraz drugi rodzaj wyjaśnień zgodnie z którymi planety powstały już po wybuchu supernowej.²² E.S. Phinney i M. S. Hansen zaproponowali nazywanie tych wyjaśnień odpowiednio scenariuszami „Salamandry” i „Memnonidesa”²³. Rozpatrywano również możliwość, że planeta została przechwycona przed lub po wybuchu supernowej w układzie podwójnym (przy czym drugie wyjaśnienie jest bardziej prawdopodobne).

Przykładowo, Philipp Podsiadlowski²⁴ i Paweł Artymowicz²⁵ zwrócili uwagę, że jest bardzo mało prawdopodobne, aby jakiegokolwiek planety były w stanie przetrwać ewolucję gwiazdy stającej się gwiazdą neutronową. Po pierwsze, po zejściu z ciągu głównego gwiazda zwiększa swoje rozmiary na tyle, że pochłonełaby najbliższe planety. Po drugie, wybuch supernowej jest na tyle energetycznym wydarzeniem, że powinien zniszczyć planety wokół gwiazdy. Po trzecie, gdyby nawet ich nie zniszczył, zmiana masy w układzie (gwiazda o masie około 10 mas Słońca pozostawia po sobie gwiazdę neutronową o masie około 1,4 masy Słońca) sprawia, że siła przyciągania grawitacyjnego ulega osłabieniu i planety mogą wówczas opuścić układ, w którym się znajdowały przed wybuchem. Dlatego też wyjaśnienia pierwszego typu zostały dość szybko odrzucone.

Zdaniem Podsiadlowskiego najbardziej prawdopodobne scenariusze drugiego typu to:

- 1) Ewolucja układu podwójnego, który składa się z dwóch białych karłów lub białego karła i gwiazdy neutronowej. Końcowym

²²Wymionione scenariusze w języku polskim zostały opisane, między innymi, w artykule: W. Lewandowski, „Salamandry, Memnonidesy i Znaleziska, czyli powstawanie planet wokół pulsarów”, *Postępy Astronomii*, 45, z.1 (1997), s. 30–36.

²³E. S. Phinney, M.S. Hansen, „The pulsar planet production process”, [w:] *Planets around pulsars*, Astron. Sot. Pac. Conf. Ser. Vol. 36, 1993, s. 371–390.

²⁴P. Podsiadlowski, „A planet formation scenarios”, [w:] *Planets around pulsars*, Astron. Sot. Pac. Conf. Ser. Vol. 36, 1993, s. 149–165.

²⁵P. Artymowicz, *Astrofizyka układów planetarnych*, PWN, Warszawa 1995.

etapem tego typu ewolucji jest połączenie się ze sobą białych karłów (i utworzenie w ten sposób gwiazdy neutronowej) lub połączenie się ze sobą białego karła i gwiazdy neutronowej. Powstała gwiazda neutronowa byłaby otoczona dyskiem materii, w którym teoretycznie mogłyby powstawać planety. Podsiadlowski zwraca jednak uwagę, że proces „zlewania się” gwiazd może doprowadzić do bardzo niestabilnego wybuchu, w wyniku którego nie pozostanie żadna dodatkowa materia lub może dojść do powstania czarnej dziury;

- 2) Drugi scenariusz zakłada, że pulsar powstał tak, jak większość pulsarów milisekundowych. Zgodnie z powszechnie przyjmowanym modelem, pulsary milisekundowe powstają w trakcie ewolucji układu podwójnego, który składa się z „normalnej” gwiazdy ciągu głównego oraz gwiazdy neutronowej. Po pewnym czasie „normalna” gwiazda przechodzi kolejne fazy swojej ewolucji. W tym czasie wypełni krytyczną powierzchnię Roche’a i zacznie oddawać materię towarzyszowi. Wokół gwiazdy neutronowej utworzy się dysk akrecyjny, w którym oddawany będzie moment pędu, dzięki czemu tempo rotacji pulsara może wzrastać. W wyniku zachodzących w układzie procesów fizycznych proces ten ustanie po pewnym czasie, a pulsar będzie mógł świecić jako pulsar milisekundowy w układzie podwójnym z gwiazdą o małej masie. Podsiadlowski wymienia kilka scenariuszy, które starały się wyjaśnić powstawanie planet wokół pulsarów zakładając, że pulsar przeszedł przedstawioną wyżej fazę ewolucji. Pierwszy model²⁶ powstał po ogłoszeniu odkrycia planety wokół PSR 1829-10. Przyjęto w nim, że zaobserwowana planeta jest tak naprawdę pozostałością po „odparowanym” przez promieniowanie pulsara małomasyw-

²⁶Patrz: F.A. Rasio, S.L. Shapiro, S.A. Teukolsky, „Formation of a ‘planet’ by rapid evaporation of a pulsar’s companion”, *Astronomy and Astrophysics Letters*, 256, no. 2 (1992), s. 35–37.

nym towarzyszem. Drugi model²⁷ zakładał, że proces „odparowywania” zostaje zakłócony, w wyniku czego dochodzi do zniszczenia towarzysza i powstania dysku z materią wokół pulsara. W trzecim modelu²⁸ autorzy przyjęli założenie, że nie cała „odparowywana” materia opuszcza układ, lecz jej część tworzy dysk wokół układu podwójnego, w którym mogą tworzyć się planety. A po całkowitym „odparowaniu” towarzysza pozostaje układ przypominający PSR1257+12.

Teoretycy zaproponowali oczywiście o wiele więcej możliwych rozwiązań, co Podsiadlowski podsumował następująco: „Ogromna ilość modeli powstawania planet wokół pulsarów (...) jest dowodem na to, jak bardzo odkrycie tego typu układu (najpierw PSR 1829+10, potem 1257+12) pobudziło wyobraźnię astronomów²⁹”.

Niektóre z proponowanych modeli, chociaż nie wyjaśniały dobrze, jak mogą istnieć planety wokół PSR 1257+12, wyjaśniały całkiem dobrze istnienie planet wokół normalnych pulsarów lub wokół pulsarów znajdujących się w gromadach kulistych.

Obecnie przyjmuje się, że powstanie planet wokół PSR1257+12 najlepiej tłumaczy tzw. „scenariusz czarnej wdowy”. Zgodnie z tym modelem pulsar zostaje pulsarem milisekundowym, tak jak w wyżej opisanym modelu. Gdy „normalna” gwiazda zakończy swoją ewolucję powstanie układ typu: biały karzeł oraz gwiazda neutronowa. Zgodnie z Ogólną Teorią Względności układ tego typu będzie emitował fale grawitacyjne, przez co będzie nieustannie się zacieśniał. Gdy pulsar i biały karzeł znajdą się odpowiednio blisko, pulsar może zacząć „odparowywać” powierzchnię białego karła. Im mniejszą masę będzie miał biały karzeł, tym będzie

²⁷Patrz: R. I. Stevens, M.J. Rees, P. Podsiadlowski, „Neutron stars and planet-mass companions”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 254 (1992), s. 19–22.

²⁸Patrz: M. Tavani, L. Brookshaw, „The origin of planets orbiting millisecond pulsars”, *Nature*, 356 (1992), s. 320–322.

²⁹P. Podsiadlowski, „A planet formation scenarios”, [w:] *Planets around pulsars*, Astron. Sot. Pac. Conf. Ser. Vol. 36, 1993, s. 161, tłum. własne.

większy³⁰ i szybciej będzie zachodził proces „odparowywania”, a układ jeszcze bardziej będzie się zacieśniał. W końcu oddziaływania pływowe mogą rozerwać białego karła tworząc wokół pulsara dysk materii, z którego może uformować się system planetarny taki jak PSR1257+12. Ten model wydaje się też dobrze tłumaczyć powstanie planety wokół PSR J1719-1438. Scenariusz „czarnej wdowy” był już znany w latach 80-tych XX wieku³¹. Odkrycie pulsara 1957+20³² w 1998r. dostarczyło dowodów, że faktycznie dochodzi do tego procesu. I chociaż scenariusz ten wydaje się dobrze tłumaczyć fakt istnienia planety wokół PSR J1719-1438, to równolegle opracowywane są alternatywne wyjaśnienia powstania tej planety³³. Warto zwrócić uwagę, że teoria powstawania planet wokół pulsarów w nierozzerwalny sposób połączyła się z teorią opisującą przebieg możliwej ewolucji układów podwójnych gwiazd. Z kolei, jak wcześniej wspomniałam, najbardziej prawdopodobnym wyjaśnieniem istnienia planety w układzie PSR 1620-26 jest scenariusz, według którego planeta ta została przechwycona w trakcie kolizji do której doszło w gromadzie kulistej M4.

Czy zatem można mówić o rozwoju teorii powstawania planet wokół pulsarów na przestrzeni ostatnich dwudziestu lat? Bez wątplenia tak. Odkrycie planet wokół PSR1257+12 stało się istotnym impulsem do szybkiego rozwoju teorii powstawania planet wokół pulsarów, i to zarówno pulsarów zwykłych, jak i milisekundowych. Rozważano również scenariusze przewidujące istnienie planet wo-

³⁰Ta odwrócona relacja promień – masa jest spowodowana budową białych karłów. Są to gwiazdy, które nie zapadają się dzięki tzw. ciśnieniu zdegenerowanych elektronów. Im większa jest masa, tym silniejsze ciśnienie musi powstrzymać proces zapadania się, przez co gwiazda jest mniejsza. Gdy gwiazda traci masę, ciśnienie staje się mniejsze i gwiazda może zajmować większy obszar.

³¹D. Eichler, A. Levinson, „On black widow evolutionary scenarios for binary neutron stars”, *The Astronomical Journal Letters*, 335 (1988), s. 67–70.

³²A. S. Fruchter, D. R. Stinebring & J. H. Taylor, „A millisecond pulsar in an eclipsing binary”, *Nature*, 333 (1988), s. 237–239.

³³Na przykład w artykule: O. G. Benvenuto, M.A. De Vito, „Evolutionary trajectories of ultra-compact «black widow» pulsars with very low mass companions”, *preprint*, <<http://arxiv.org/>>, 02.07.2012.

kół pulsarów, które znajdują się w gromadach kulistych. Początkowo zagadnienie to było bardzo intensywnie badane. Powracano do starych rozwiązań, modyfikowano już istniejące oraz proponowano całkowicie nowe wyjaśnienia. Z czasem jednak zaczęto odkrywać coraz więcej planet pozasłonecznych wokół normalnych gwiazd oraz coraz więcej pulsarów. Brak nowych odkryć spowodował zanik zainteresowania świata naukowego zagadnieniem istnienia planet wokół pulsarów. Warto jednak zwrócić uwagę na fakt, że wypracowane przez ostatnie dwadzieścia lat i obecnie powszechnie akceptowane wyjaśnienia istnienia planet wokół opisanych wyżej pulsarów nie udzielają odpowiedzi na jedno zasadnicze pytanie: dlaczego nadal obserwuje się tak mało tego typu zjawisk? W świetle braku nowych odkryć każdy z wyżej wymienionych układów nadal stanowi zagadkę sam w sobie.

Oczywiście zarysowany powyżej schemat rozwoju teorii naukowej nie jest niczym nowym w historii nauki. Obserwacje faktów niezgodnych z istniejącymi teoriami wielokrotnie były impulsem do zmiany powszechnie akceptowanych poglądów naukowych. Najbardziej spektakularnym przykładem może być proces powstania mechaniki kwantowej. Na początku XX wieku doszło do serii eksperymentów, które stopniowo podważały słuszność mechaniki klasycznej³⁴. W 1900 r. Max Planck badając widmo promieniowania ciała doskonale czarnego doszedł do wniosku, że aby wyjaśnić obserwowaną krzywą absorpcji należy przyjąć założenie, że promieniowanie elektromagnetyczne może być emitowane lub absorbowane tylko w postaci dyskretnych porcji (nazywanych kwantami) energii. W 1905 r. Albert Einstein wyjaśnił tzw. zjawisko fotoelektryczne przyjmując założenie, że światło składa się ze zlokalizowanych porcji energii, zwanych fotonami. W 1909 r. wykonany został eksperyment Rutherforda, którego rezultat był niezgodny z ówczesnie powszechnie przyjmowanym modelem budowy atomu tzw. modelem „ciasta z rodzynkami”. W 1911 r. Ernst Rutherford zaproponował nowy model zgodnie

³⁴O tym procesie można przeczytać, między innymi, w książce P.T. Mathewsa *Wstęp do mechaniki kwantowej*.

z którym we wnętrzu atomu znajduje się jądro atomowe otoczone krążącymi dookoła niego elektronami. Również obserwacje serii widmowej atomu wodoru oraz rozpraszania fotonów na elektronach przyczyniły się do podważenia panującego na gruncie ówczesnej fizyki teoretycznej paradygmatu mechaniki klasycznej. Wymienione obserwacje, będące z punktu widzenia mechaniki klasycznej anomaliami, spowodowały bardzo gwałtowny rozwój teoretycznych opisów obserwowanych zjawisk. Stały się bezpośrednią przyczyną zmiany panującego paradygmatu, który zastąpiony został paradygmatem mechaniki kwantowej. Po upływie prawie stu lat pomiędzy fizykami wciąż istnieje jednak spór o postulaty mechaniki kwantowej i interpretację jej modeli. Brak nowych obserwacji, które byłyby anomaliami z punktu widzenia powszechnie akceptowanych twierdzeń mechaniki kwantowej powoduje istnienie pewnego rodzaju zastoju w rozwoju teorii kwantów. Niektórzy fizycy są przeświadczeni, że zaproponowany formalizm i sposób opisu mikroświata nie jest jeszcze zupełny. Dopóki jednak nie zostaną zaobserwowane kolejne anomalie, na gruncie teoretycznym najprawdopodobniej będzie utrzymywało się swoiste *status quo*.

Na zakończenie chciałabym nadmienić o innym odkryciu, które miało istotny wpływ na dokonanie rewizji teorii powstawania układów planetarnych. Warto o nim wspomnieć, ponieważ reakcje środowiska naukowego bardzo przypominają te, jakie wywołało odkrycie planet wokół PSR1257+12. Jest nią odkrycie planet o wstecznych orbitach, czyli takich, które okrążają gwiazdę macierzystą w kierunku przeciwnym do jej rotacji. W 2009 r. ogłoszono odkrycie dwóch takich planet. Pierwszą był WASP-17b, dzień później ukazał się artykuł o odkryciu planety HAT-P-7b. Początkowo ostrożnie pisano o fakcie, że odkryte planety mają wsteczne orbity, ponieważ dokładne wyznaczenie wszystkich parametrów ruchu planet nie jest najprostsze. W 2010 r. ukazała się praca potwierdzająca, że WASP-17b ma wsteczną orbitę. Od tego czasu zaobserwowano kilka takich planet.

Na zakończenie chciałabym nadmienić o innym odkryciu, które miało istotny wpływ na dokonanie rewizji teorii powstawa-

nia układów planetarnych. Warto o nim wspomnieć, ponieważ reakcje środowiska naukowego bardzo przypominają te, jakie wywołało odkrycie planet wokół PSR1257+12. Jest nią odkrycie planet o wstecznych orbitach, czyli takich, które okrążają gwiazdę macierzystą w kierunku przeciwnym do jej rotacji. W 2009 r. ogłoszono odkrycie dwóch takich planet. Pierwszą był WASP-17b³⁵, dzień później ukazał się artykuł o odkryciu planety HAT-P-7b³⁶. Początkowo ostrożnie pisano o fackie, że odkryte planety mają wsteczne orbity, ponieważ dokładne wyznaczenie wszystkich parametrów ruchu planet nie jest najprostsze. W 2010 r. ukazała się praca potwierdzająca, że WASP-17b ma wsteczną orbitę³⁷. Od tego czasu zaobserwowano kilka takich planet.

Z punktu widzenia standardowego modelu powstania planet jest to sytuacja niezwykła, ponieważ planety tworzące się w dysku materii, który otacza młodą gwiazdę powinny okrążać gwiazdę macierzystą zgodnie z kierunkiem jej obrotu (jest to związane z zachowaniem momentu pędu w układzie). Tak, jak po odkryciu planet wokół PSR1257+12, również w tym wypadku odkrycie to początkowo stało się impulsem do zaproponowania wielu alternatywnych wyjaśnień. Proponowane rozwiązania można podzielić na dwa typy. Do pierwszego z nich należą modele koncentrujące się na wpływie oddziaływania odległego, trzeciego towarzysza (przykładem takiego układu jest najprawdopodobniej WASP-8b³⁸). Drugi typ zakłada, że w układzie musiało dojść do rozpraszania typu planeta-planeta lub planeta-gwiazda, co spowodowało powstanie obserwowanych zakłóceń w ruchu orbitalnym. Dodat-

³⁵D.R. Anderson i inni, „WASP-17b: an ultra-low density planet in a probable retrograde orbit”, *The Astrophysical Journal*, 709 (2010), s. 159–167.

³⁶N. Narita, B. Sato, T. Hirano, M. Tamura, „First Evidence of a Retrograde Orbit of Transiting Exoplanet HAT-P-7b”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 61, no. 5 (2009), s. 35–40.

³⁷D. D. R. Bayliss, J. N. Winn, R. A. Mardlings, P. D. Sackett, „Confirmation of a retrograde orbit for exoplanet WASP-17b”, *The Astrophysical Journal Letters*, 722 (2010), s. 224–227.

³⁸D. Queloz i inni, „WASP-8b, a retrograde transiting planet in a multiple system”, *Astronomy and Astrophysics*, 517 (2010), s. L1–4.

kowo często uwzględnia się też wpływ oddziaływań pływowych, które zaczynają mieć znaczenie, gdy planeta znacznie zbliży się do gwiazdy macierzystej. Obecnie ilość odkrywanych planet o wstecznych orbitach znacznie zmalała. Brak nowych doniesień powoduje, że problem powstawania planet o wstecznych orbitach jest odsuwany na dalszy plan.

Podsumowując, za każdym razem, gdy z punktu widzenia powszechnie akceptowanych teorii odkrywane były zjawiska, które można uznać za anomalie, reakcje naukowe były bardzo podobne. Początkowo odkrycie jest konfrontowane z alternatywnymi wyjaśnieniami. Po okresie zadowalającym do tego, aby móc rozstrzygnąć obserwacyjnie, które z proponowanych wyjaśnień jest lepsze, dochodzi do zaakceptowania dokonanego odkrycia. Już wówczas na gruncie teoretycznym lawinowo pojawiają się proponowane rozwiązania. Z czasem pozostają te najlepsze. Jeśli jednak przez dłuższy okres czasu nie obserwuje się kolejnych obiektów tego samego typu, zainteresowanie danym problemem gwałtownie spada. a na gruncie teoretycznym nie otrzymuje się jednoznacznych odpowiedzi, ponieważ nie można porównać badanego obiektu do żadnego innego obiektu tego samego typu. Ponadto można również zauważyć zależność, że im bardziej istotna jest zaobserwowana anomalia, tym bardziej gruntowne zmiany zachodzą w sferze teoretycznej. W przypadku powstania mechaniki kwantowej zaobserwowanych faktów niezgodnych z klasyczną teorią było tak dużo, że doprowadziły one wręcz do zmiany całego paradygmatu. W procesach opisanych w tym artykule zaobserwowanie anomalii sprawiło, że teoretycy dokonali rewizji jedynie bardzo konkretnych teorii. Wydaje się, że można z tych rozważań wyciągnąć następujący wniosek: im łatwiej można zlekceważyć daną obserwację, niezgodną z obowiązującym paradygmatem, tym słabsze jest jej oddziaływanie na rozwój teorii.

Moim zdaniem jednakże, badanie anomalii jest samo w sobie bardzo ważne, ponieważ wielokrotnie stymulowało ono rozwój nauki. Kończąc, warto wspomnieć, że Johannes Kepler doko-

nał swoich odkryć, ponieważ pracował nad wyjaśnieniem różnic w przewidywanym i obserwowanym ruchu orbitalnym Marsa.

Bibliografia

1. Anderson D.R. i inni, „WASP-17b: an ultra-low density planet in a probable retrograde orbit”, *The Astrophysical Journal*, 709 (2010), s. 159–67.
2. Artymowicz P., *Astrofizyka układów planetarnych*, PWN, Warszawa 1995.
3. ATNF Pulsar Catalogue, <<http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/>>, 02.07.2012
4. Backer D.C., Foster R.S., Sallmen S., „A second companion of the millisecond pulsar 1620-26”, *Nature*, 365 (1993), s. 817–819.
5. Bailes M., „Transformation of a Star into a Planet in a Millisecond Pulsar Binary”, *preprint*, <<http://arxiv.org/>>, 02.07.2012,
6. Bayliss D.R., Winn J.N., Mardlings R.A., Sackett P.D., „Confirmation of a retrograde orbit for exoplanet WASP-17b”, *The Astrophysical Journal Letters*, 722 (2010), s. 224–227.
7. Benvenuto O.G., De Vito M.A., „Evolutionary trajectories of ultra-compact “black widow” pulsars with very low mass companions”, *preprint*, <<http://arxiv.org/>>, 02.07.2012.
8. Eichler D., Levinson A., „On black widow evolutionary scenarios for binary neutron stars”, *The Astronomical Journal Letters*, 335 (1988), s. 67–70.
9. Feyerabend P.K., *Dialogi o wiedzy*, tłum. J. Nowotniak, Fundacja Aletheia, Warszawa 1999.

10. Ford E.B., Joshi K.J., Rasio F.A., Zbarsky B., „Theoretical Implications of the PSR B1620?26 Triple System and its Planet”, *preprint*, <<http://arxiv.org/>>, 02.07.2012.
11. Fruchter A.S., Stinebring D.R. & Taylor J.H., „A millisecond pulsar in an eclipsing binary”, *Nature*, 333 (1988), s. 237–239.
12. Lewandowski W., „Powstanie pulsarów podwójnych i milisekundowych”, *Postępy Astronomii*, 44, z.1 (1996), s. 16–22.
13. Lewandowski W., „Salamandry, Memnonidesy i Znaleziska, czyli powstawanie planet wokół pulsarów”, *Postępy Astronomii*, 45, z.1 (1997), s. 30–36.
14. Manchester R.N., Hobbs G.B., Teoh A., Hobbs M., „The Australia Telescope National Facility Pulsar Catalogue”, *The Astronomical Journal*, 129 (2005), s. 1993–2006.
15. Matthews P.T., *Wstęp do mechaniki kwantowej*, PWN, Warszawa 1971.
16. Narita N., Sato B., Hirano T., Tamura M., „First Evidence of a Retrograde Orbit of Transiting Exoplanet HAT-P-7b”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 61, no. 5 (2009), s. 35–40.
17. *Planets around pulsars*, (ed.) Phillips J.A., Thorsett S.E., Kulkarni S.R., Astron. Sot. Pac. Conf. Ser. Vol. 36, 1993 r.
18. Rasio F.A., „Is there a planet in the PSR 1620-26 triple system?”, *The Astrophysical Journal Letters*, 427 (1994), s. 107–110.
19. Rasio F.A., Shapiro S.L., Teukolsky S.A., „Formation of a 'planet' by rapid evaporation of a pulsar's companion”, *Astronomy and Astrophysics Letters*, 256, no. 2 (1992), s. 35–37.

20. Schneider J., *Encyklopedii Pozasłonecznych Układów Planetarnych*, <<http://exoplanet.eu>>, 02.07.2012.
21. Stevens R.I., Rees M.J., Podsiadlowski P., „Neutron stars and planet-mass companions”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 254 (1992), s. 19–22.
22. Tavani M., Brookshaw L., „The origin of planets orbiting millisecond pulsars”, *Nature*, 356 (1992), s. 320–322.
23. Wolszczan A., Frail D.A., „A planetary system around the millisecond pulsar PSR 1257+12”, *Nature*, 355(1992), s. 145–147.
24. Wolszczan A., „Confirmation of earth-mass planets orbiting the millisecond pulsar PSR B 1257+12”, *Science*, 264 (1994), s. 538–542.
25. Queloz D. i inni, „WASP-8b, a retrograde transiting planet in a multiple system”, *Astronomy and Astrophysics*, 517 (2010), s. L1-4.

Abstract

The growth of the theory of planets around pulsars formation

The main purpose of this article is to show some processes of the growth of knowledge. An astrophysical case: a problem of planets around pulsars formation is studied. In the first part reasons for taking this problem are presented. Then some historical facts about discoveries of planets around pulsars are mentioned. The paper focuses on three cases: PSR1257+12, PSR1620-26 and PSR J 1719-1438. In second part of the article the changes in the theoretical point of view, which occurred during the last twenty years, are presented. At the end the attempt is made to describe

the process of the growth of the planets around pulsars within the framework of formation.

Keywords: planets around pulsars, planet formation, discovery, theories, the growth of knowledge