

dr Ireneusz Włodarczyk  
Rozdrażewski Oddział Polskiego Towarzystwa Astronomicznego  
Rozdrażew  
[astrobit@ka.onet.pl](mailto:astrobit@ka.onet.pl)

## **CZY PLANETOIDY MOGĄ ZAGROZIĆ ZIEMI ?**

**uaktualniony na 2013/04/25**

**autorski artykuł opublikowany w czasopiśmie Urania Postępy Astronomii 4/2002**

### **1. Wstęp**

W prasie naukowej, a przede wszystkim w masmediach pojawiają się ostatnio liczne doniesienia o możliwości zderzenia planetoid z Ziemią. I tak w sierpniu 2001 r. alarmowano o prawdopodobnym zderzeniu z planetoidą 2001 PM9 w 2005 lub 2007 r. W 1998 r. kolejna planetoida 1997 XF11 miała zderzyć się z Ziemią w latach 2028, 2033 lub 2044. Ponadto inna planetoida 1999 AN10 podobno miała znaleźć się na orbicie kolizyjnej z Ziemią w latach 2027, 2034, 2036 lub 2040 r. Wkrótce astronomowie mechanicy nieba zaczęli dementować te prasowe informacje. Żadnych zderzeń z tymi planetoidami w tych okresach nie będzie. Dziennikarze spekulują informacjami zawartymi m.in.

na oficjalnych stronach NASA (<http://neo.jpl.nasa.gov/risk/>).

Znajdują się tam informacje o 439. znanych do tej pory (25 kwietnia 2013) tzw. potencjalnie niebezpiecznych planetoidach. Jednak wszelkie możliwe zderzenia opatrzone są tam zastrzeżeniami o małym prawdopodobieństwie tego faktu, związanym m.in. z niedokładnością aktualnego obliczenia elementów orbitalnych planetoidy, czyli z niemożnością dokładnego określenia jej położenia w przestrzeni kosmicznej.

### **2. Opis ogólny**

Rozmieszczenie ponad 611 tys. planetoid znanych w kwietniu 2013 i uaktualnione ich pozycje są dostępne pod adresami:

<http://www.minorplanetcenter.net/iau/lists/InnerPlot.html>

<http://www.minorplanetcenter.net/iau/lists/OuterPlot.html>

Również zaznaczone są pozycje planet. Widać wyraźnie obszar występowania największej liczby planetoid w tzw. pasie głównym planetoid leżącym między orbitami Marsa a Jowisza. Ponadto zauważmy rozmieszczenia tzw. trojańczyków Jowisza, znajdujących się w pobliżu jego orbity w trójkątnych punktach libracji ( $L_4$  i  $L_5$ ). Jest ich około 4870.

Planetoidami bliskimi Ziemi, dalej w skrócie NEAs (ang. Near Earth Asteroids) lub szerzej NEOs (ang. Near Earth Objects) nazywamy takie planetoidy, których peryhelia,  $q \leq 1,3$  AU, tzn. takie, które zbliżają się do Słońca na odległość mniejszą niż 1.3 AU (1 AU jest to średnia odległość Ziemia – Słońce, wynosi ok. 149 600 000 km).

Dotychczas odkryte planetoidy z grup: Ateny ( $a < 1,0$  AU,  $Q \geq 0,983$  AU ( $Q$  oznacza odległość w aphelium, czyli największe możliwe oddalenie planetoidy na orbicie wokół Słońca)), Apolla ( $a \geq 1$  AU,  $q \leq 1,0167$  AU) i Amora ( $1,0167$  AU  $< q \leq 1,3$  AU) razem 9796 na 25 kwietnia 2013 r.

<http://www.minorplanetcenter.net/iau/lists/Unusual.html>

wchodzą w skład NEAs i stanowią odpowiednio około 8%, 50% i 42% populacji NEAs. Amory przybliżają się do orbity Ziemi z zewnątrz jej orbity, Apolla przecinają orbitę Ziemi, Ateny przybliżają się do orbity Ziemi z wnętrza jej orbity.

NEAs są to małe, na ogół kamieniste ciała o rozmiarach od około 3 m do około 40 km. Całkowitą liczbę NEAs o średnicy powyżej 1 km ocenia się na około 1000. Aktualnie, kwiecień 2013 r., znamy ich 861. Szacuje się, że 90 % z nich zostanie odkryte do 2020 r. Liczbę NEA o rozmiarach powyżej 10 m oblicza się na około 1 mln, powyżej 100 m - 50 tys. sztuk.

Dwie największe NEAs należą do grupy Amora. Największy to (1036) Ganymed o średnicy około 40 km, a drugi to (433) Eros – o wymiarach 33x13x13 km. NEAs o średnicy powyżej 10 km znamy około 25, powyżej 7 km około 60, a powyżej 5 km około 125. Uważa się, że wszystkie NEAs o średnicy powyżej 7 km są już znalezione. Jednak należy zwrócić uwagę, że obliczane średnice planetoid opierają się głównie na obserwacjach fotograficznych i na założeniu z góry wartości albedo planetoidy, co może prowadzić do niedokładnego oszacowania ich rozmiarów.

Szybko rośnie liczba odkrywanych NEAs:

data	liczba znanych NEAs
kwiecień 1999	680
kwiecień 2000	940
kwiecień 2001	1357

kwiecień 2002 (artykuł w UPA)	1841
maj 2009	6171
styczeń 2010	6674
styczeń 2011	7577
lipiec 2011	8037
kwiecień 2013	9796

### 3. Ruch chaotyczny planetoid

W ruchu planetoid krążących wokół Słońca panuje chaos deterministyczny. Oznacza on, że choć warunki początkowe są ściśle określone, to minimalne zaburzenie w startowych elementach orbitalnych planetoid może prowadzić do różnego zachowania się tych elementów w czasie. Wynika stąd, że nie można przewidzieć dokładnie położenia planetoid w długim okresie czasu. Głównymi przyczynami takiego chaotycznego ruchu planetoid są:

- a. Zbliżenia z planetami, podczas których gwałtownie zmieniają się parametry orbity planetoidy
- b. Zderzenia planetoid z sobą, w wyniku czego powstają nowe fragmenty mogące utworzyć pojedyncze planetoidy lub rodzinę planetoid
- c. Rezonanse w ruchu średnim planetoid z planetami wielkimi. Wielokrotnie powtarzające się zbliżenia planetoidy np. z Jowiszem mogą spowodować gwałtowną zmianę orbity planetoidy. Przykładowo rezonans 3:1 w ruchu średnim z Jowiszem oznacza, że w ciągu jednego obiegu Jowisza wokół Słońca planetoida dokona ich trzech, czyli w ciągu około 12 lat (średni okres obiegu Jowisza wokół Słońca) planetoida 3-krotnie zbliży się do Jowisza napotykając jego silne oddziaływanie grawitacyjne, co może prowadzić do niestabilności orbity planetoidy
- d. Rezonanse wiekowe, czyli współmierności częstości długości peryhelium i długości węzła wstępującego odpowiednio planetoidy i planety. Te rezonanse powodują m.in. precesję peryhelium planetoidy

W mechanice nieba długość peryhelium określa orientację linii apsyd planety (planetoidy), która z kolei jest linią ze Słońca do punktu, w którym planeta (planetoida) na swojej orbicie jest najbliżej Słońca. Z kolei długość węzła wstępującego planety (planetoidy) określa położenie linii węzłów planety (planetoid), które są zdefiniowane jako przecięcie płaszczyzny orbity planety (planetoidy) z płaszczyzną orbity Ziemi wokół Słońca.

Ogólnie znaną miarą chaotyczności jest wykładnik Lapunova i określony przez niego czas Lapunova. Jest to czas, po którym zaburzenie początkowe w przestrzeni fazowej rośnie średnio  $e$ -krotnie (około 2,72 razy). W przypadku planetoid czas Lapunova określa czas, po

którym na przykład odległość dwóch planetoid leżących początkowo blisko siebie rośnie e-krotnie. Czas Lapunova NEAs jest bardzo krótki, rzędu kilkudziesięciu czy kilkuset lat. Czym ten czas jest dłuższy, tym orbita jest bardziej stabilna, tym łatwiej i dokładniej można przewidzieć jej zachowanie się w przestrzeni. Natomiast dla planet wewnętrznych czas Lapunova wynosi około 5 mln lat, a dla planet zewnętrznych około 100 mln lat. Jednak ten parametr mierzący chaos nie podaje dokładniejszego przepisu na obliczenie położenia planetoidy w czasie.

Autor niniejszego artykułu wprowadził dodatkowy parametr mierzący chaos i nazwał go czasem stabilności. Jest to czas, po którym różnica anomalii średnich planetoid leżących na sąsiednich orbitach rośnie gwałtownie. Po tym czasie niemożliwe jest określenie położenia planetoidy na orbicie. Ten czas można nazwać też czasem stabilności elementów orbitalnych. Autor zbadał zmiany różnicy anomalii średnich planetoidy (1543) Anteros, należącej do grupy Amora, dla jej orbity nominalnej najbardziej dopasowanej do obserwacji i orbity zmienionej przez dodanie do startowej pólki wielkiej błędu jej wyznaczenia z obserwacji wynoszącego zaledwie około 6 km. Okazało się, że po około 1 tys. lat, jak i przed około 2 tys. lat różnice anomalii średnich gwałtownie rosną. Stąd wynika wniosek, że skoro anomalia średnia określa położenie planetoidy na orbicie, to trudno przewidzieć zachowanie się Anterosa poza tym okresem. Podobne gwałtowne wzrosty różnic anomalii średnich obserwujemy, gdy kolejno zmieniamy pozostałe elementy startowe planetoidy. A więc w przypadku Anterosa czas stabilności wynosi około 1 tys. lat przy obliczaniu jego położenia wprzód oraz około 2 tys. lat przy obliczaniu jego położenia wstecz. Okazuje się, że czasy stabilności NEAs są bardzo krótkie, rzędu kilkuset czy kilku tys. lat. Tylko w tych przedziałach czasu możemy poprawnie podać efemerydy tych planetoid. Poza tym okresem nasze obliczenia byłyby mało sensowne.

Autor badał również zmiany mimośrodów orbity planetoidy z grupy Apolla, Geographosa (średnica planetoidy wynosi około 2,5 km). Wyniki obliczeń pokazują wyraźnie, jak duży wpływ na ewolucję mimośrodu orbity planetoidy mają różne początkowe wartości elementów orbitalnych. Jedne zostały obliczone na podstawie obserwacji do roku 1985 i opublikowane w Efemerydach Małych Planet na 1986 r. [EMP 1986] a drugie na podstawie obserwacji do 1997 roku i opublikowane w Efemerydach Małych Planet na 1998 r. [EMP 1998]. Trudno przewidzieć zachowanie się Geographosa w tak długim okresie czasu, gdy kolejne obliczone orbity prowadziły do aż tak różnych ewolucji mimośrodu. Zmiany pozostałych elementów orbitalnych zachowują się równie odmiennie. Czas stabilności dla Geographosa wynosi zaledwie 400 lat. Tylko w tym przedziale czasu można dokładnie przewidzieć położenie planetoidy na orbicie.

Znaczna większość NEAs porusza się po orbitach przecinających orbity planet grupy ziemskiej. Stąd badanie ruchu NEAs nie może opierać się na uproszczonych modelach Układu

Słonecznego, zawierających tylko największe planety, jak Jowisz i Saturn. Zachowaniem NEAs rządzą, oprócz Słońca i Jowisza, również planety grupy ziemskiej. Dochodzi do częstych zbliżeń z Merkurem, Wenus, Ziemią i Marsem, które powodują silne oddziaływanie grawitacyjne na PPZ.

Jednak główną siłą perturbującą ruch większości planetoid wokół Słońca jest oddziaływanie grawitacyjne Jowisza. Wśród NEAs dużą rolę odgrywają dodatkowe perturbacje pochodzące od planet grupy ziemskiej: Merkurego, Wenus, Ziemi i Marsa. Z obliczeń wynika, że po pewnym czasie wkład do ogólnego potencjału grawitacyjnego oddziałującego na planetoidę potencjału grawitacyjnego planet grupy ziemskiej jest znaczny.

Autor badał, jaki jest udział tych dodatkowych perturbacji na ruch planetoid i wprowadził dodatkowy parametr mierzący chaos. Nazwał go czasem stabilności potencjału grawitacyjnego,  $T_{pot}$ . Jest to czas, po którym stosunek sumy wartości potencjałów grawitacyjnych pochodzących od planet grupy ziemskiej do wartości potencjału grawitacyjnego pochodzącego od Jowisza przekracza 0,5. Po momencie równym  $T_{pot}$ , widać gwałtowny wzrost różnic anomalii średnich sąsiednich orbit, co może wskazywać na trudności w przewidywaniu zachowania się planetoidy po tym okresie. Widać wyraźne podobieństwo do zdefiniowanego wcześniej przez autora czasu stabilności. Dłuższe czasy stabilności potencjału grawitacyjnego mówią o bardziej regularnej orbicie, krótsze – o większym chaosie w ruchu planetoidy spowodowanej zbliżeniami z planetami wewnętrznymi.

Równania ruchu 1357 NEAs autor artykułu całkował w okresie 10 tys. lat. Wyniki obliczeń wyprowadzano co 10 dni. Gdy stosunek sumy wartości potencjałów grawitacyjnych pochodzących od planet grupy ziemskiej do wartości potencjału grawitacyjnego od Jowisza przekraczał 0,5, wtedy obliczenia przerywano. Obliczony moment czasu był poszukiwanym czasem stabilności potencjału grawitacyjnego,  $T_{pot}$ .

Gdy  $T_{pot} > 0,5$ , wtedy występują oczywiście zbliżenia z planetami grupy ziemskiej. 394 planetoidy, które miały  $T_{pot} < 1000$  lat zbliżyły się w okresie 1000 lat na minimalną odległość do tych planet, co przedstawia Tab. 1.

Tab. 1

<b>planeta</b>	<b>liczba największych zbliżeń</b>	<b>%</b>
Merkury	0	0
Wenus	72	19
Ziemia	313	81
Mars	2	1

Zauważmy wyraźną przewagę zbliżeń z Ziemią. Wykonano również dodatkowe obliczenia, z których wynika, że w okresie najbliższych 8 tys. lat aż połowa z NEAs będzie miała zbliżenia z planetami grupy ziemskiej, w tym najwięcej z Ziemią.

Jeśli chodzi o histogram czasu stabilności potencjału grawitacyjnego w zależności od pól wielkich planetoid, to jest już on zróżnicowany. Mniejsze wartości tych czasów mają planetoidy leżące bliżej Słońca. W tych miejscach wpływ potencjału grawitacyjnego planet grupy ziemskiej na ruch planetoid może być większy niż podobne oddziaływanie Jowisza. Ponadto wyraźnie mniejsze są wartości tych czasów dla pól wielkich równych około 1,0 AU (Ziemia) oraz około 1,5 AU (Mars), co wytłumaczyć możemy podobnie większym wpływem oddziaływań grawitacyjnych Ziemi i Marsa w tych miejscach. Również mniejsze wartości czasów stabilności potencjałów grawitacyjnych występują w pobliżu rezonansów w ruchu średnim planetoidy z Jowiszem, 4:1 oraz 3:1.

Zdefiniowane przez autora pojęcie czasu stabilności potencjału grawitacyjnego może być, oprócz wprowadzonego wcześniej czasu stabilności, miarą chaosu umożliwiającą badanie zachowania się planetoid w długich okresach czasu.

Warto w tym miejscu podkreślić wkład prac prof. Grzegorza Sitarskiego z Centrum Badań Kosmicznych PAN w Warszawie w dziedzinie badań ruchu NEAs. W szczególności chodzi o wykonanie programów komputerowych, umożliwiających obliczenie najbardziej dokładnych momentów największych zbliżeń NEAs z Ziemią. Jedną z prac dotyczy zachowania się jednej z najbardziej niebezpiecznych planetoid spośród NEAs, mianowicie (4179) Toutatis (*Acta Astronomica*, v.48, pp.547-561, (1998)). Należy ona do planetoid typu Apolla. Radarowe obserwacje Toutatis pozwoliły określić jej rozmiary na 1,92 x 2,40 x 4,6 km. Zderzenie z tak dużą planetoidą może spowodować globalną katastrofę na Ziemi. Największe zbliżenia Toutatis z Ziemią nastąpiły ostatnio we wrześniu 2004 r., około 0,0104 AU oraz w latach 2008 (0,050 AU), 2012 (0,046 AU) a spodziewane jest kolejne zbliżenie w 2069 roku (0,020 AU). Tak więc prawdopodobnie zderzenie z tą planetoidą na razie nam nie grozi.

Procedury znajdowania orbit zderzeniowych NEAs z Ziemią opisane są przez prof. G. Sitarskiego w „*Acta Astronomica*” z 1999 r. Podobne rozważania dotyczące słynnej planetoidy 1997 XF11, która, jak ogłosili pospiesznie dziennikarze, miałyby się zderzyć wkrótce z Ziemią, są również opisane przez prof. Sitarskiego w tym samym roczniku. Okazuje się, że w najbliższym czasie żadnego zderzenia nie będzie, choć w październiku 2028 r. planetoida zbliży się do Ziemi na odległość zaledwie 0,006 AU, czyli poniżej 1 mln km. Jak wynika z omawianej pracy, największe zbliżenie tej planetoidy z Ziemią miało nastąpić i w rzeczywistości nastąpiło w odległości około 0,064 AU 31 października 2002 r. Obserwacje tej interesującej planetoidy w

okresach zbliżeń do Ziemi pozwolą na zwiększenie precyzji obliczenia jej orbity, a przez to umożliwią lepsze prognozowanie ruchu tej niebezpiecznej dla Ziemi planetoidy.

#### **4. Zagrożenia dla Ziemi**

##### **a. Wzrost liczby odkrywanych planetoid.**

Uczeni wydają się być zgodni, że nadejdzie taki dzień, kiedy Ziemia stanie się celem potencjalnie niszczącej planetoidy i dążą do oddalenia katastrofy w przyszłości. Uderzenie planetoidy o średnicy co najmniej 1 km może zmienić globalny klimat Ziemi na wiele lat. Planetoida o rozmiarach około 100 m może zniszczyć miasto lub utworzyć niszczące fale tsunami. Jak się uważa, ziemska atmosfera chroni nas przed obiektami o średnicy mniejszej niż 50 m. Natomiast obiekty powyżej 50 m mogą przeżyć przejście przez naszą atmosferę i zagrozić Ziemi.

Pierwszym celem jest znalezienie tych planetoid. Ostatnio liczba odkrywanych planetoid gwałtownie rośnie. Pierwszą planetoidę, Ceres, odkryto w 1801 r. Prawie 200 lat, do roku 1999, zajęło odkrycie 9,999 „krewnych” Ceres.

*Od tego czasu do kwietnia 2013 r. liczba dokładnie znanych, tzw. numerowanych orbit planetoid wzrosła do około 360 tys.*

„Przypuszczam, że w roku 2004 będzie ich około 200 000 (optymistyczna prognoza z 2002 r., w rzeczywistości było ich o połowę mniej),” - twierdził Brian Marsden, dyrektor Minor Planet Center, koordynator obserwatorów planetoid i komet na świecie. Centrum przetwarza dziennie około 70 000 obserwacji, obliczając nowe orbity. Tylko w 2001 r. obliczono ostateczne orbity blisko 13 tys. nowych numerowanych planetoid,

*w 2012 r. ok. 43 tys. !*

Wiele nowoodkrytych planetoid czeka w kolejce na swoją dokładną orbitę i na swój numer. Tylko gdy orbita planetoidy jest obliczona z pewną przyjętą dokładnością, taki numer dostaje. Marsden w trzyosobowym zespole pracuje „na okrągło”, obliczając orbity planetoid.

W pracy Zeljko Ivezica z Uniwersytetu Princeton, zamieszczonej w „Astronomical Journal” w 2001 r. ocenia się, na podstawie obserwacji teleskopów optycznych, że w pasie głównym planetoid znajduje się około 700 tys. planetoid wystarczająco dużych (powyżej 1 km średnicy), by zniszczyć cywilizację.

W kwietniowym numerze „Astronomical Journal” na 2002 r. ukazała się praca Edwarda Tedesco i Francois-Xaviera Deserta szacująca liczbę tych planetoid na około 1,1 do

1,9 mln. Autorzy opracowali wyniki pomiarów teleskopu w podczerwieni, ISO, działającego w latach 1995 – 1998 w ramach Europejskiej Agencji Kosmicznej.

Różnice w szacunkach liczby planetoid większych niż 1 km wynikają głównie ze sposobu odbioru światła w dziedzinie widzialnej i w podczerwieni od planetoid o różnym albedo. Można przyjąć ostatecznie, że tych planetoid jest około 1,2 mln.

Według najnowszych ocen, planetoid powyżej 1 km może być w obszarze NEAs od około 1100 do 1200. Około 800 z nich już odnaleziono. Żadna z tych znanych planetoid nie jest na orbicie kolizyjnej z Ziemią grożącej zderzeniu w tym stuleciu. Co więcej, orbity wielu z tych planetoid nachylone są do orbity Ziemi pod stosunkowo dużym kątem, co zmniejsza ryzyko zderzenia z Ziemią. Co za tym idzie, poszukiwania nowych planetoid tego typu muszą dotyczyć obszaru prawie całego nieba. Stąd m.in. trudności w ich odkrywaniu.

Planetoidy o rozmiarach mniejszych od 1 km są odkrywane zazwyczaj zaledwie na dzień lub kilka dni, zanim znajdują się najbliżej Ziemi. Przykładowo 8 października 2001 planetoida o rozmiarach między 50 m a 100 m przeszła koło naszej planety w odległości tylko nieco większej niż dwukrotna odległość Ziemia-Księżyc. Planetoidę zaobserwowano zaledwie 2 dni wcześniej. Dopiero następnego dnia po odkryciu obliczono jej orbitę.

Uważa się, że zderzenie się z Ziemią planetoidy o średnicy około 10 km, które spowodowało m.in. wyginięcie dinozaurów 65 mln lat temu, może powtarzać się co około 100 mln km.

### **b. „Kraterowanie” układu Ziemia-Księżyc.**

Z obserwacji liczby i powstawania kraterów w układzie Ziemia-Księżyc wynika, że stan tzw. kraterowania jest mniej lub bardziej stały w okresie ostatnich 3 mld lat. Jeśli jest to prawda, wówczas liczba NEAs jest w równowadze. Stąd wynika, że obszar NEAs musi być zasilany w sposób ciągły z zewnątrz. Naturalnym takim rezerwuarem jest pas główny planetoid. Wg Toma Quinna z Uniwersytetu w Waszyngtonie kamienne i węglowe planetoidy z pasa głównego dzielą się na dwa główne obszary. Większość planetoid kamiennych znajduje się w odległości około 390 mln km od Słońca, podczas gdy węglowych jest najwięcej w odległości około 450 mln km od Słońca.

Na konieczność zasilania obszaru NEAs z zewnątrz wskazuje też ich stosunkowo krótki czas życia, rzędu 10 mln lat. Jak pokazują najnowsze obliczenia mechaników nieba z Obserwatorium Astronomicznego Cote d'Azur we Francji, w tym okresie około 10-20 % planetoid zderza się z planetami grupy ziemskiej, głównie z Ziemią i Wenus, ponad połowa spada na Słońce, a kilkanaście procent zostaje wyrzucone z Układu Słonecznego.

### **c. Skąd się biorą NEAs?**



Zderzenia planetoid między sobą mogą spowodować powstanie drobniejszych odłamków, które docierając w obszar oddziaływań rezonansowych Jowisza tak mogą zwiększyć mimośród planetoidy, że przetną orbitę Ziemi, stając się wtedy zagrożeniem dla naszej planety. Ponadto istnieje tzw. efekt Yarkovskiego polegający na działaniu na powierzchnię planetoidy nieizotropowej absorpcji i emisji promieniowania słonecznego, co może spowodować w długim okresie czasu istotną zmianę parametrów orbity planetoidy, przez co stanie się niebezpieczną dla Ziemi. Szacowana wartość dryfu wskutek efektu Yarkovskiego planetoid o rozmiarach ok. 1 km wynosi około  $\pm 10^{-4}$  AU na milion lat.

Fizyczne i orbitalne własności NEAs sugerują, że wiele z tych planetoid powstaje w pasie głównym. Fragmenty planetoid powstałych w wyniku zderzeń mogą być bezpośrednio wrzucone w obszar NEAs, lub powoli poruszając się w wyniku wspomnianego wyżej efektu Yarkovskiego, natrafiają w obszar rezonansów w ruchu średnim z planetami i w obszar tzw. wiekowych rezonansów, w których częstości orbitalne planetoid są współmierne z odpowiednimi częstościami orbitalnymi planet, skąd mogą dostać się do obszaru NEAs.

Znane są trzy najważniejsze mechanizmy powodujące zasilanie NEAs z pasa głównego poprzez:

1. rezonans w ruchu średnim 3:1 z Jowiszem
2. rezonans wiekowy  $\nu_6$
3. ewolucję orbit planetoid przecinających orbitę Marsa, tzw. Mars Crossers

Ocenia się, że udział tych mechanizmów wynosi odpowiednio 36%, 29% i 35%. Powodują one powstanie orbit planetoid o dużym mimośrodku, w wyniku czego mogą dostać się w obszar Ziemi i stać się NEAs. Dodatkowymi mechanizmami mogą być również:

1. rezonans 5:2 w ruchu średnim z Jowiszem
2. rezonans wiekowy  $\nu_{16}$
3. rezonans wiekowy  $\nu_5$

Okazuje się, że rezonanse wiekowe związane z planetami wewnętrznymi są efektywniejsze niż te związane z planetami zewnętrznymi. Wiekowe rezonanse związane z planetami wewnętrznymi mogą:

- powodować wzrost mimośrodu i nachylenia orbit NEAs
- być mechanizmem wyrzucającym planetoidy z obszaru Mars Crossers w obszar NEAs

Wg Morbidelliego, jednego z czołowych mechaników nieba, zajmujących się dynamiką NEAs, istnieje dodatkowe źródło zasilania NEAs z Jowiszowej rodziny komet.

O tym, jak przebiegała ewolucja naszego pasa planetoid można dowiedzieć się poprzez obserwacje podobnych układów wokół innych gwiazd. Jeden z takich kandydatów może znajdować się wokół gwiazdy zeta Leporis (gwiazdozbiór Zająca, nieco poniżej gwiazdozbioru

Oriona). Gwiazda znajduje się w odległości około 70 lat świetlnych od nas, jest dwa razy masywniejsza od Słońca, a wiek jej szacuje się na około 100 mln lat. Nasze Słońce ma wiek około 4,5 mld lat. Przymuszalny pas planetoid może mieć średnicę około 6 AU. Nasz pas planetoid skoncentrowany jest w odległości około 2,7 AU od Słońca.

## 5. Zbliżenia

Aby nastąpiło zderzenie planetoidy muszą zajść następujące warunki:

a. orbita Ziemi i planetoidy musi się przecinać, jak jest to w przypadku NEAs (wynika to z definicji tych planetoid). Oczywiście, że zderzenie może nastąpić nawet wtedy, gdy te dwie orbity nie leżą w tej samej płaszczyźnie,

b. odległość w węźle między Ziemią a planetoidą musi być mniejsza niż rozmiary Ziemi,

c. Ziemia i planetoida musi przejść w tym samym czasie przez punkt przecięcia się ich orbit.

Po uwzględnieniu dodatkowych czynników m.in. silnego oddziaływania grawitacyjnego Ziemi w jej pobliżu, prawdopodobieństwo zderzenia z Ziemią pojedynczej planetoidy o średnich elementach orbitalnych wynosi około  $5 \cdot 10^{-8}$ . Znając liczbę planetoid o danych rozmiarach można oszacować częstość ich zderzeń z Ziemią (tab. 2).

Tab. 2

Średnica planetoidy, d	Częstość zderzenia
$d > 10$ km	co 50 mln lat
$1 \text{ km} < d < 10$ km	co 500 tys. lat
$100 \text{ m} < d < 1$ km	co 5 tys. lat
$30 \text{ m} < d < 100$ m	co 500 lat

Z tabeli wynika m.in., że w tym stuleciu prawdopodobieństwo niebezpiecznego dla Ziemi zderzenia z planetoidą o rozmiarach większych od 1 km wynosi aż 1 do 5 000!

Listę najbliższych największych zbliżeń planetoid z Ziemią możemy znaleźć na stronie

<http://www.minorplanetcenter.net/iau/lists/CloseApp.html>

Nie tak dawno, 7 stycznia 2002 r. planetoida 2001 YB5, odkryta dwa tygodnie wcześniej, przeleciała w pobliżu Ziemi w odległości 830 tys. km, czyli zaledwie około dwukrotnie większej niż odległość Ziemia-Księżyc. Kosmiczny kamień o średnicy między 250 m a 500 m miał jasność poniżej 12 wielkości gwiazdowej, a więc mógł być obserwowany przez amatorskie teleskopy. Planetoid o tych rozmiarach w obszarze NEAs jest około 100 tys. Mogą one zderzać się z Ziemią, jak się przypuszcza, co około 10 – 20 tys. lat.

Natomiast zderzenie z 60-cio metrową planetoidą, która, jak się przypuszcza eksplodowała nad Syberią w 1908 r. z siłą około 600 razy większą niż bomba atomowa zrzucona na Hiroszimę, zdarzyć się może raz lub dwa razy na stulecie. Między 20 tys. a 50 tys. lat temu mała planetoida o średnicy około 24 m uderzyła w Ziemię i uformowała krater w Arizonie o średnicy około 1,2 km.

16 grudnia 2001 r. można było obserwować przelot jednej z NEAs o średnicy około 1 km. 1998 WT24 o jasności nieco ponad 9<sup>m</sup> przeleciał wtedy w odległości zaledwie około 5 razy większej niż odległość Ziemia-Księżyc. Poprzedni 1 km obiekt, 1999 RD32, przeleciał blisko Ziemi 27 sierpnia 1969 r. w odległości 3,7 większej niż odległość Ziemia-Księżyc twierdzi szef programu badającego NEAs w NASA Donald Yeomans. 32 lata temu nikt nie widział 1999 RD32, gdyż nie był wtedy jeszcze odkryty. Do roku 2027 pojawi się jeszcze tylko jeden taki obiekt jaśniejszy niż 10<sup>m</sup>. Będzie to (4179) Toutatis o jasności nieco poniżej 9<sup>m</sup>, gdy zbliży się do Ziemi w 2004 r. Jednak wtedy w obserwacji będzie przeszkadzał Księżyc w pobliżu pełni. Tak napisałem w 2002 r. Ale pojawiła się w 2004 roku niebezpieczna dla Ziemi planetoida Apophis. Może zderzyć się z Ziemią w 2068 r.:

<http://arxiv.org/abs/1301.1607>

a w 2029 r. znajdzie się w odległości ok. 0.0002 AU od Ziemi (ok. 30 tys. km) i powinna być widoczna u nas gołym okiem. Ma średnicę ok. 270 m.

Wspomniane planetoidy należą do tzw. potencjalnie niebezpiecznych planetoid, ang. potentially hazardous asteroids (PHA). Tak Don Yeomans, szef programu badającego NEAs w NASA, nazywa planetoidy, które mogą zbliżyć się do Ziemi na odległość około 0,5 AU (7,5 mln km) i mają średnice ponad 150 metrów. Zbliżają się one na tyle blisko orbity Ziemi, że stanowią potencjalne niebezpieczeństwo, ale niekoniecznie w tej chwili. Na szczęście żadna ze znanych dotychczas PHA w najbliższym czasie nie zderzy się z Ziemią, choć ruch tych planetoid podlega silnym wpływom planet i ich orbity mogą zmienić się na wyraźnie kolizyjną z Ziemią.

W prestiżowym magazynie Science z 5 kwietnia 2002 ukazała się informacja o możliwym zderzeniu z Ziemią planetoidy (29075) 1950 DA o średnicy około 1 km 16 marca 2880 r. Prawdopodobieństwo tego zderzenia wynosi aż 1/300 (najwyższe spośród wszystkich znanych dla planetoid o tych rozmiarach). Na tak dużą precyzję obliczeń pozwoliły ponad 50-cio letnie obserwacje optyczne oraz obserwacje radarowe tej planetoidy. Jednak dopiero dalsze precyzyjne obserwacje tej planetoidy podczas jej największych zbliżeń z Ziemią w 2032 r. i w 2074 r. oraz na pewno bardziej wyrafinowane metody numeryczne mechaniki nieba w owym czasie pozwolą rozwiązać wątpliwości nasze i następnych pokoleń, czy do zderzenia dojdzie.

W tym miejscu warto zwrócić uwagę na fakt, że wreszcie po ponad dwuletnich przygotowaniach, 12 marca 2002 r. ruszył automatyczny system monitorowania zderzeń planetoid NASA nazwany SENTRY –

<http://neo.jpl.nasa.gov/risk/>

a podobny włosko-hiszpański jest też już uruchomiony –

<http://newton.dm.unipi.it/neodys/index.php?pc=4.1>

## **6. Poprawianie przewidywań**

Aktualnie, 25 kwietnia 2013 r. znamy ponad 611 tys. orbit planetoid, z czego 360 tys. orbit jest dokładnie obliczonych, a blisko 18 tys. ma swoją nazwę.

Obecny postęp w obliczeniach rozwiązań zderzeniowych w ruchu orbitalnym NEAs pozwala zidentyfikować przyszłe możliwe zderzenia planetoid uprzednio już odkrytych. Niektóre z tych planetoid obserwowano zaledwie przez kilka dni, kiedy były najbliżej Ziemi i wystarczająco wtedy jasne dla obserwatorów. Teraz niepewność obliczenia ich pozycji jest duża, a przez to mogą stać się w dłuższym okresie czasu straconymi.

Gdy planetoida zostaje odkryta nie dostajemy od razu orbity realnego obiektu. Otrzymujemy zbiór możliwych orbit. Wszystkie są jednakowo zgodne z obserwacjami, tworzą wg Andrea Milaniego, jednego z czołowych włoskich mechaników nieba, tzw. obszar ufności w przestrzeni elementów orbitalnych. Możemy mówić o roju wirtualnych planetoid, poruszających się po trochę różniących się orbitach jednakowo dopasowanych do obserwacji. Prawdziwa planetoida porusza się po jednej z tych wirtualnych orbit, może być jedną z tych wirtualnych planetoid. Każda z nich może być realną planetoidą. W miarę upływu czasu orbity wirtualnych planetoid się „rozjeżdżają” tworząc jakby nanizany sznur koralu. Obserwacja obszaru zajmo-

wanego przez dany koralik pozwala zidentyfikować realną planetoidę. W ten sposób poszukuje zespół Milaniego zaginionych planetoid, w tym również tych niebezpiecznych dla Ziemi.

Na świecie tylko 4 organizacje mają wystarczająco dobre własne programy komputerowe do obliczania orbit planetoid. Oprócz Minor Planet Center w Cambridge, Mass. USA to: Lowell Observatory Near-Earth-Object Search (LONEOS) w Arizonie, Uniwersytet w Pizie we Włoszech i Jet Propulsion Laboratory w NASA. Ostatnio działa zespół związany z satelitą WISE.

W Polsce, centra obliczeniowe planetoid działają m.in. w Centrum Badań Kosmicznych PAN w Warszawie pod kierunkiem prof. Grzegorza Sitarskiego oraz w Obserwatorium Astronomicznym w Poznaniu (prof. Edwin Wnuk).

Nowoczesne kamery CCD potrafią zaobserwować obiekty, które dawniej były niewidoczne. W ciągu ostatnich trzech lat sam tylko projekt LINEAR (Lincoln Near-Earth Asteroid Research) odkrył ponad 700 nowych NEAs i ok. 120 tys. nowych planetoid z pasa głównego.

Komputery Minor Planet Center w Cambridge w USA są zasypywane nowymi obserwacjami. Nie mogą nadążyć z ich opracowaniem. Do końca 2009 r. archiwum Minor Planet Center zawierało blisko 68 mln obserwacji planetoid. W kwietniu 2013 r. liczba obserwacji wzrosła do ponad 100 mln!

Globalny system monitorowania planetoid obejmuje luźną współpracę instytucji prywatnych i agencji rządowych, jak również astronomów amatorów i zaledwie kilkudziesięciu zawodowych astronomów na świecie. Rośnie gwałtownie liczba amatorskich obserwacji. Aktualnie około 100 wysoko kwalifikowanych, ale nie opłacanych astronomów (czyli amatorów) prowadzi obserwacje planetoid przy pomocy dobrze wyposażonej aparatury.

Planowane są też badania planetoid przy pomocy sond kosmicznych. W 2006 r. wystartowała misja DAWN, której celem jest zbliżenie się do dwóch planetoid Westy (2010 r.) i Ceres (2014 r.) oraz przelot w pobliżu ich powierzchni i krążenie wokół nich na wysokości od 800 km do 100 km. Misja ma trwać około 9 lat. Pozwoli zapoznać nas z dwoma rodzajami powierzchni planetoid. Ceres ma całkiem pierwotną powierzchnię, złożoną z bogatych w wodę minerałów i prawdopodobnie z bardzo cienką atmosferą. Może być również pokryta szronem. Natomiast Westa jest suchym ciałem, którego powierzchnia jest pokryta strumieniami bazaltowej lawy i oceanem magmy, podobnie jak ma to miejsce na Księżycu. Wydaje się, że większość planetoid, które obserwujemy są fragmentami dużych planetoid, jak właśnie Ceres czy Westa, które w wyniku kosmicznych kolizji zostały zniszczone. Dlatego zbadanie tych planetoid może pozwolić nam zrozumieć mechanizmy fragmentacji planetoid.

Aktualnie na stronie wspomnianego Centrum Badań Kosmicznych PAN w Warszawie:

<http://phas.cbk.waw.pl/neo.htm>

można zobaczyć obliczone orbity zderzeniowe wybranych groźnych dla Ziemi planetoid. Niektóre z nich, samodzielnie obliczone przez autora, zamieszczane są również na stronie Rozdrażewskiego Oddziału Polskiego Towarzystwa Miłośników Astronomii.