

Planetare Verteidigung gegen Asteroiden und Kometen*

– Ereignisse, Technologieansätze und Missionen –

Prof. Dr. Victor David Sánchez, Ph.D.
Brilliant Brains. Palo Alto, California

Januar 2017

Zusammenfassung

Die Verteidigung vom Planeten Erde gegen den gefährlichen Einschlag auf die Erdoberfläche von Erdbahnkreuzern: Asteroiden und Kometen aus dem Weltall bzw. ihren Explodieren, Verglühen, Verdampfen (Zerfall) in der Erdatmosphäre wird untersucht. Dabei wird der Stand der Forschung und Technik systematisch dargestellt. Ausgehend aus der Darstellung einer Auswahl einschlägiger Ereignisse aus der Vergangenheit werden Verteidigungsansätze und Missionen, vergangen, gegenwärtig und künftig, vorgestellt. Die Missionen dienen der Exploration, der Technologiedemonstration und schließlich der eigentlichen Verteidigung der Erde bei solchen Ereignissen. Aufgrund seiner regen Aktivitäten beim Entwurf und Entwicklung der nötigen Technologien, Systeme und Missionen zu den genannten Himmelskörpern und zur Verteidigung der Erde gegen ihre latenten Einschläge und deren Zerfall bzw. Explosion in der Erdatmosphäre, die ohne Zweifel eine große Gefahr für unseren Planeten darstellen, ist der Verfasser überzeugt, daß wir in der Lage sind, mit der Zeit zunehmend diese Gefahr zu minimieren, wie schnell hängt nur von uns ab. Um die notwendigen Entwicklungen voranzutreiben, läßt sich u.a. auf zurückliegende Erfahrungen zurückgreifen.

Die NEAP Mission war der erste kommerzielle Entwurf für eine Raumfahrtmission zu einem Asteroiden. Sie wurde ursprünglich von SpaceDev in 1997 konzipiert als eine mit einem 350 kg Minisatelliten, der mit einem Rocket Trägerrakete gestartet werden sollte. Sie wurde später aktualisiert als eine mit einem 200 kg Mikrosatelliten (Mikro-Raumsonde), der als sekundäre Nutzlast mit der Ariane V starten sollte. Die Aktualisierung wurde auf der Basis von Varianten unseres Entwurfs von Missionen und Raumsonden zum Roten Planeten Mars möglich, der im Rahmen eines gewonnenen Auftrages der NASA im Jahre 1999 geliefert worden war [12, 13] und u.a. mit Gravitationsunterstützungsmanövern für die Orbitalmechanik (engl. Gravity Assist) ausgestattet waren [29, 1]. Andere Varianten wurden auch für Mondmissionen angeboten. Abbildung 1 zeigt in (a) das Konzept der NEAP Mission, in (b) die ursprüngliche Flugtrajektorie zum Asteroiden, in (c) den NEAP ursprünglichen Raumfahrtzeugentwurf und in (d) den aktualisierten Entwurf der Raumfahrzeugevionik, Basis für MicroNEAP, und verschiedene Varianten der NASA gelieferten Raumfahrzeugkonfigurationen¹.

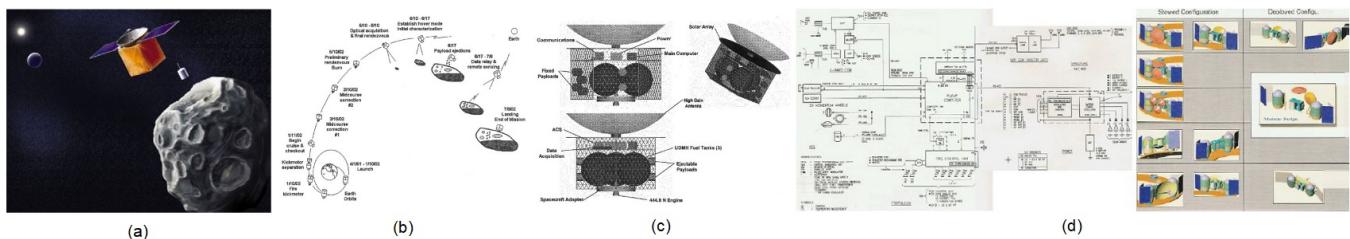


Abbildung 1: NEAP Mission zu einem Asteroiden und Raumfahrzeugentwurf [12]

Erdnahe Objekte (engl. Near-Earth Objects (NEOs)) sind Asteroiden und Kometen, die binnen 45 Millionen Km vom Erdorbit fliegen. NASA wird das Ziel nicht erreichen, binnen 10 Jahren bis 2020 90% aller NEOs mit einem Durchmesser gleich oder grösser als 140 m zu identifizieren und katalogisieren, trotz 10-facher Haushaltserhöhung im NEO-Programm in den vergangenen 5 Jahren, bis dato sind rund 11,000, schätzungsweise lediglich 10% solcher NEOs identifiziert worden. Erhebliche, mangelnde Programmorganisation wurde vom Büro des NASA Generalinspekteurs [26] berichtet, u.a. fehlende Kooperation nationaler und internationaler Natur mit anderen Agenturen einschl. DoD, NSF in den Vereinigten Staaten. Statistiken über erdnahe Asteroiden (engl. Near-Earth Asteroids (NEAs)), Stand bis Anfang 2016, werden in Abbildung 2 gezeigt, in (a) bekannte NEA Zahlen, in (b) prozentuale Entdeckung per Observatorium, und in (c) NEA Zahl und Prozent entdeckt je nach Größe.

Weltweit sind die zur Verteidigung vom Planeten Erde formell beteiligten Organisationen sehr bescheiden, der Haushalt für erforderliche Aktivitäten jeglicher Art vollkommen unzureichend. Dazu gehören z.B. internationaler Ausschuss für die friedliche Nutzung des Weltraums der Vereinigten Nationen (UN-COPUOS) [25], das Internationale Asteroid-Warnnetzwerk (IWAN) [15] und die Beratungsgruppe für die

*Diese Zusammenfassung wurde zur Veröffentlichung freigegeben. ¹ geht z.T. auf meine Zusammenarbeit mit Jim Benson, SpaceDev Vorstandsvorsitzender – leider verstorben – und ehemaliges Personal der U.S. amerikanischen Luftwaffe (USAF) zurück.

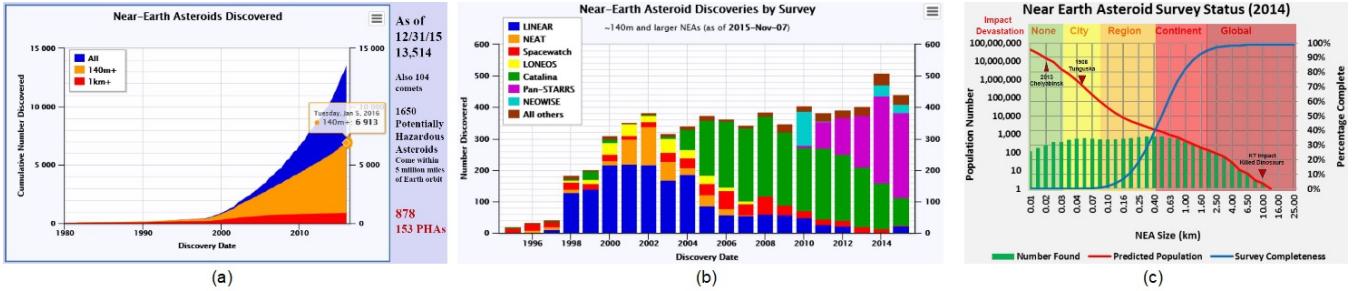


Abbildung 2: Statistiken der erdnahen Asteroiden NEAs [18]

Planung von Weltraummissionen (SMPAG) [30], in den U.S.A. das Zentrum für NEO Studien an der NASA JPL (CNEOS) [17] und das neue Koordinationsbüro für planetare Verteidigung der NASA (PDCO) [24], in Europa z.B. das NEO Koordinationszentrum der ESA [5] und in Deutschland das von der deutschen Luftwaffe und dem DLR betriebene Weltraumlagezentrum (WRLageZ) [2]. Um es in einfacher Sprache zu formulieren: selbst wenn ein logisches Netzwerk von Aktivitäten das Finden, Verfolgen, Charakterisieren, Gefahrenausschluss durch Ablenken oder Zerstören, Koordinieren und Erzielen miteinschliessen soll, wenn man von der idealen aber auch erforderlichen Situation ausgeht, daß die Erde und wir schon jetzt ein operationelles Verteidigungssystem haben sollen, kann man um die Situation überspitzt darzustellen, z.B. nicht warten bis alle oder nicht einmal ein wesentliches Prozent aller NEOs erst identifiziert worden sind, sondern ein gewaltiger Fortschritt ist unabdingbar, in neuen erforderlichen Technologien, Raumfahrtssystemen und Raumfahrtmissionen, vorbereitend und operationell für ähnliche Situationen wie beim Ernstfall, daher der Fokus unserer Abhandlung.

Abbildung 3 zeigt die Verteilung von Asteroiden und Kometen in unserem Sonnensystem, außerhalb des Sonnensystems werden solche Himmelskörper auch vermutet, sind aber z.Zt. praktisch unbekannt. Abbildung 3(a) und (c) zeigen jeweils ein Beispiel für einen Asteroiden: 243 Ida und seinen Mond Dactyl aufgenommen von der Raumsonde Galileo – sie flog am 28. August 1993 ca. 2,400 km vom Asteroiden entfernt – und für einen Kometen: 73P/ Schwassmann-Wachmann, der am 12. Mai 2006 mit einer kürzesten Distanz zur Erde von ca. 11,9 Mio. km samt Fragmenten flog, Fragment B gezeigt, aufgenommen mit dem Hubble-Weltraumteleskop (engl. Hubble Space Telescope HST). Abbildung 3(b) zeigt die Lage der Asteroiden und Kometen in unserem Sonnensystem. Der Kuipergürtel ist eine ringförmige Asteroidenzone jenseits der Neptunbahn. Er erstreckt sich über einen Entfernungsbereich von der Sonne weg von 30 bis etwa 50 Astronomische Einheiten, wobei eine Astronomische Einheit (AE) die Entfernung zwischen der Erde und der Sonne, ca. 150 Mio. km, gleicht. Die Oortsche Wolke ist ein kugelschalenförmiger Bereich, in dem Asteroiden das Sonnensystem umkreisen und aus dem langperiodischen Kometen stammen. Seine Entfernung von der Sonne liegt ca. 300 bis 6.000 AE (5.000 AE gleichen etwa einem Lichtjahr).

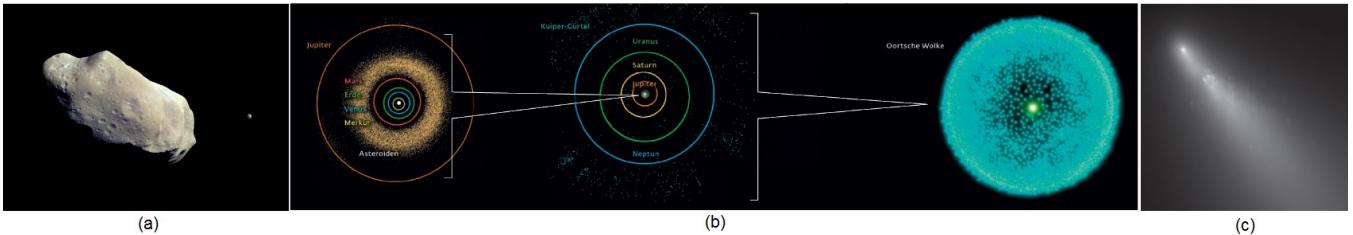


Abbildung 3: Asteroide und Kometen in unserem Sonnensystem [NASA, ESA, APL, MPS] [3]

Die Gefahren für die Erde sind zweifellos belegt, wie z.B. eine große Anzahl von Kratern auf der Erdoberfläche beweisen. Im Sonnensystem insgesamt sind die Einschläge von Asteroiden und Kometen auf die Atmosphäre und Oberfläche von Planeten und Monden belegt, wie z.B. als Jupiter im Juli 1994 von Fragmenten des Kometen Shoemaker-Levy-9 getroffen wurde, wie eindeutig Bilder vom Hubble-Weltraumteleskop (HST) [7] oder Infrarotaufnahmen vom Caral-Alto-Observatorium, Max Planck Institut für Astronomie (MPIA) zeigten. Ein anderes Beispiel in der allgemeinen Diskussion ist die oft debattierte Hypothese eines Asteroideneinschlags an der Kreide-Paläogen-Grenze vor 66 Mio. Jahren, der u.a. zum Aussterben der Dinosaurier führte [8], es konnte aber auch ein Komet gewesen sein, mit geringerer Wahrscheinlichkeit ist der Stand der Debatte.

Abbildung 4 zeigt zwei jungere Ereignisse, die eine in Chelyabinsk, Russland am 15. Februar 2013, (a) bis (c), und die andere am 15. September 2007 in Carancas, Perú, nahe der Grenze mit Bolivien in Südamerika, (d) bis (f). Sie zeigt in (a) die Lage des Hauptimpakts auf der Erdoberfläche in Chelyabinsk, in (b) eine Aufnahme der Rauchspur der Meteoritenbahn, in (c) die Einschlagstelle des Meteoriten auf der Oberfläche eines gefrorenen Sees, in (d) die Lage des Impakts auf der Erdoberfläche in Carancas, in (e) ein Photo vom Meteoritenkrater und in (f) die Simulation der Kratererzeugung nach den Skalierungsgesetzen (engl. scaling laws) [14], die die kinetische Energie des Projektils mit den Dimensionen des Kraters in Verbindung bringen, abhängig von den Eigenschaften des Zielmaterials [11].

Das Tscheljabinsk Ereignis fand am 15. Februar 2013 im russischen Ural statt. Ein 12.000t-, 19m-erdnaher Asteroid (NEA) bzw. Meteorit trat in die Erdatmosphäre mit einer Geschwindigkeit von ca. $v = 19 \text{ km/s}$ und einer Inkination von $i = 18^\circ$ ein [10, 9]. Es handelt sich um einen LL Chondriten. Sein Auseinanderbrechen und Explosion in einer Höhe von 30 km verursachten eine Druckwelle, einen lauten Knall und einen Lichtblitz, heller als die Sonne. Die geschätzte freigesetzte Energie war 500kt TNT. Durch die Druckwelle wurden ca. 3700 Gebäude beschädigt und 1500 Leute verletzt, die meisten erlitten Schnittwunden und Prellungen.



Abbildung 4: Weltweite Asteroiden-Ereignisse in Chelyabinsk, Russland [9] und Carancas, Perú, Südamerika [11]

Das Carancas Ereignis fand am 15. September 2007 nahe dem Titicaca-See in Puno, Perú auf einer Erdoberflächenhöhe von 3,8 km statt. Ein 10t-Meteoroid trat in die Erdatmosphäre mit einer Geschwindigkeit von 12–16 km/s ein. Mit einer Endmasse von 3t und einer ungewöhnlich schnellen Einschlaggeschwindigkeit von > 3 km/s schlug er auf den Erdboden ein, die freigesetzte Energie war ca. 2t TNT. Der dabei hinterlassene, fast kreisförmige Meteoritenkrater war ca. 14 m in Durchmesser gross, 5 m tief, siehe z.B. [6]. Die Reste des steinigen Meteoriten wurden gefunden, es handelt sich um einen H4/5 Chondriten mit u.a. hohem Gehalt an Eisen, Nickel und der Schwefelverbindung Troilit. Schwefelgase sind bei den vom Einschlag erzeugten hohen Temperaturen freigeworden und waren vermutlich auch die Ursache für Krankheitssymptome der Beobachter. Die Beobachtung vom sprudelnden Wasser im Krater ist eher auf die durch den Aufprall freigewordene komprimierte Luft zurückzuführen.

Einige der z.Zt. in den U.S.A. im Einsatz befindlichen Vermessungsanlagen, Programme, bzw. Missionen sind NEO-WISE [20], LINEAR/SST [22], Catalina Sky Survey [32] und Pan-STARRS [33]. Zur NEO Charakterisierung dienen folgende Observatorien (die ersten zwei sind Radar-Anlagen, die weiteren zwei sind Infrarot-Anlagen): Goldstone [19], Arecibo [31], NASA InfraRed Telescope Facility (IRTF) [23] und Spitzer Infrared Space Telescope [21]. Aufgrund der vorher erwähnten, unerreichten Zielsetzung, gilt es solche Anlagen, Technologien, Systeme und assoziierten Programme und Raumfahrtmissionen weltweit vehement zu verbessern [27, 28]. Die notwendigen politischen Unterstützungsentscheidungen können in der Folge zu reiferen Missionskonzepten im Rahmen der planetaren Verteidigung führen wie z.B. in einer grundlegenden Anfangsphase die „Asteroid Impact and Deflection Assessment (AIDA)“ Doppelt-Mission, die erste Technologie-Demonstration der kinetischen Schlagtechnik um eine Asteroidenbahn zu verändern, an der zwei unabhängige Raumfahrzeuge eingesetzt werden sollen, die der beiden Einzelmissionen: NASA's „Double Asteroid Redirection Test (DART)“ [16] und ESA's „Asteroid Impact Mission (AIM)“ [4].

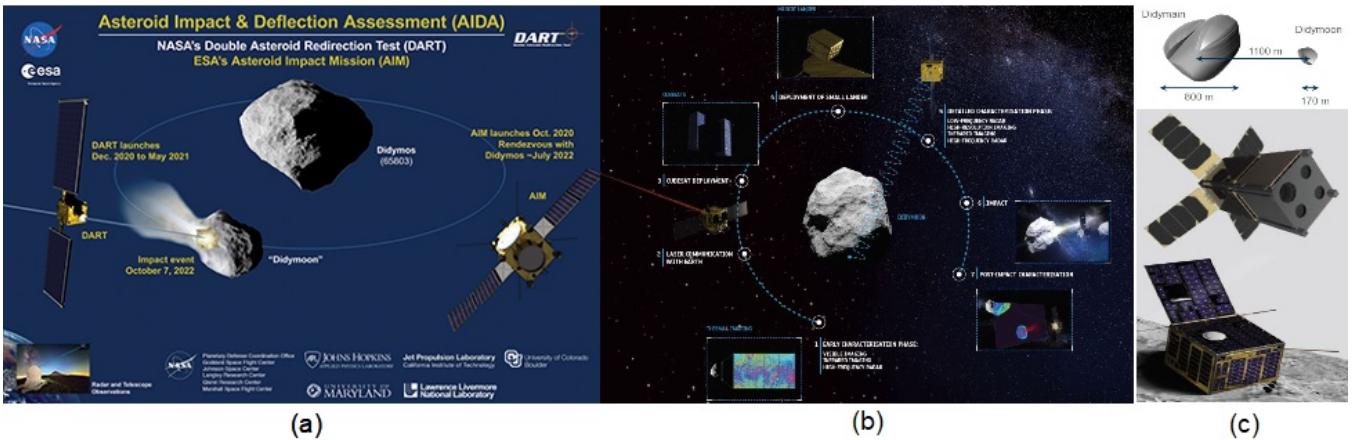


Abbildung 5: Die AIDA Doppelt-Mission: NASA's DART [16] + ESA's AIM [4]

Dabei ist AIM hauptsächlich eine Beobachtungsmission während DART den kinetischen Impaktor zum Beweis der Ablenkung der Asteroidenbahn bereitstellt. Es handelt sich um eine günstige Konstellation am Ziel da Didymos, das binäre Zielasteroidensystem, im Oktober 2022 der Erde sehr nahe kommt (0.1 AU), d.h. eine Beobachtung ist sowohl vom AIM Raumfahrzeug als auch vom Boden aus möglich. Mehrere wissenschaftliche Ziele werden auch anvisiert, darunter die Charakterisierung von Didymos, die Untersuchung vom Ursprung dieses binären Asteroidensystems, die Berechnung des Momentumtransfers bei der Asteroidenablenkung, die Erprobung neuer Laserkommunikationsverfahren sowie CubeSats in den Tiefen des Alls und die Ausführung eines Landeexperiments. Abbildung 5 zeigt in (a) das Konzept der AIDA Doppelmision, in (b) eine Übersicht der einzelnen Aktivitäten nahe dem Asteroidenmond Didymoon und in (c) von oben nach unten die Geometrie des binären Asteroidensystems, CubeSat und Lander. Die geplante AIDA Mission sollte zum Doppelasteroiden (65803) Didymos im Jahr 2022 mit einer Ariane 62 Trägerrakete starten. Leider beschloss der ESA-Ministerrat im Dezember 2016 die Finanzmittel in Höhe von 100 Mio. EUR nicht zu bewilligen. Im Anschluss verkündete die NASA an der DART-Raumsonde festzuhalten und zu Not die Beobachtung des Einschlags von der Bodenstation aus zu verfolgen.

Es ist nicht nur wünschenswert sondern sogar erforderlich mit der nötigen Schnelligkeit, operationelle Raumfahrtssysteme und Raumfahrtmissionen zur Verteidigung der Erde zu konzipieren, entwickeln und operationell bereitzustellen. Dazu ist es wie so oft notwendig, auf den Sinn für Prioritäten bei den politischen Entscheidungsträgern hinzuweisen. Wenn die entsprechenden Entscheidungen für Finanzierung und adequate Vorgehensweise getroffen sind, dann könnten wir auf dem besten Weg sein, uns gegen diese Gefahr aus der Tiefe des Weltalls in der Tat verteidigen zu können. Besser spät als gar nicht, hoffentlich nicht zu spät, jeder Tag zählt.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] E. Belbruno. *Capture Dynamics and Chaotic Motions in Celestial Mechanics: With Applications to the Construction of Low Energy Transfers*. Princeton University Press, 2004.
- [2] Bundeswehr-Luftwaffe, DLR-Raumfahrtmanagement. Weltraumlager, Zentrum Luftoperationen, Uedem. <http://www.luftwaffe.de>, <http://www.dlr.de/rd/>.
- [3] Thomas Bürke. Zeugen kosmischer Heimatkunde. *Max Planck Forschung*, (3):34–41, 2009.
- [4] ESA. Asteroid Impact Mission (AIM). http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Engineering_Technology/Asteroid_Impact_Mission/.
- [5] ESA, Space Situational Awareness. NEO Coordination Centre. <http://neo.ssa.esa.int/>.
- [6] A. Le Pichon et al. Evidence for a meteoritic origin of the September 15, 2007, Carancas crater. *Meteoritics and Planetary Science*, 43(1):1797–1809, 2008.
- [7] H.A. Weaver et al. The Hubble Space Telescope (HST) observing campaign on comet Shoemaker-Levy 9. *Science*, 267(5202):1282–1288, 1995.
- [8] L.W. Alvarez et al. Extraterrestrial Cause for the Cretaceous-Tertiary Extinction. *Science*, 208(4448):1095–1108, 1980.
- [9] O.P. Popova et al. Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery and Characterization. *Science*, 342(6162):1069–1073, November 2013.
- [10] P.G. Brown et al. A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors. *Nature*, 503(7475):238–241, November 2013.
- [11] T. Kenkemann et al. The Carancas meteorite impact crater, Peru: Geologic surveying and modeling crater information and atmospheric passage. *Meteoritics and Planetary Science*, 44(7):985–1000, 2009.
- [12] V.D. Sánchez et al. Mars MicroSpacecraft Bus Feasibility and Concept Design Study, Final Report, vol. I – Technical, March 1999. ACIS, JPL PO-No. 1202365, ISS No. 99-037-0.
- [13] V.D. Sánchez et al. Mars MicroSpacecraft Bus Feasibility and Concept Design Study, Final Report, vol. II – Programmatic Assessment, March 1999. ACIS, JPL PO-No. 1202365, ISS No. 99-037-0.
- [14] K.A. Holsapple and K.R. Housen. A crater and its ejecta: An interpretation of Deep Impact. *Icarus*, 191(2):586–597, 2007.
- [15] IAWN. International Asteroid Warning Network. <https://iawn.net/>.
- [16] Johns Hopkins University, Applied Physics Laboratory. DART: Double Asteroid Redirection Test. <http://dart.jhuapl.edu/>.
- [17] NASA JPL. Center for Near Earth Object Studies. <https://cneos.jpl.nasa.gov/>.
- [18] NASA JPL. Center for Near Earth Object Studies – Discovery Statistics. <https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/>.
- [19] NASA JPL. Goldstone Solar System Radar. <https://gssr.jpl.nasa.gov/>.
- [20] NASA JPL. NEOWISE – Near-Earth Object Wide-field Infrared Survey Explorer mission. <https://www.jpl.nasa.gov/missions/neowise/>.
- [21] NASA JPL. Spitzer Space Telescope. <http://www.spitzer.caltech.edu/>.
- [22] MIT Lincoln Laboratory. Lincoln Near Earth Asteroid Research (LINEAR) program using the Space Surveillance Telescope (SST). <https://www.ll.mit.edu/mission/space/linear/>.
- [23] NASA. InfraRed Telescope Facility. <http://irtfweb.ifa.hawaii.edu/>.
- [24] NASA. Planetary Defense Coordination Office. <https://www.nasa.gov/planetarydefense/>.
- [25] United Nations. Office for Outer Space Affairs – Committee on the Peaceful Uses of Outer Space. <https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/copuos/>.
- [26] NASA Office of Inspector General. NASA's Efforts to Identify Near-Earth Objects and Mitigate Hazards, 2014.
- [27] V.D. Sánchez. Advanced Next Generation Near Earth Object (NEO) Impact Detection, June 2002. NASA-CASE-2002-1.
- [28] V.D. Sánchez. Microspacecraft Mission to a Near Earth Object (NEO), June 2002. NASA-CASE-2002-2.
- [29] V.D. Sánchez and E. Belbruno. Gravity Assist for Mars Missions, January 1999. Personal Communication, ACIS San Diego-Pasadena and Princeton University.
- [30] SMPAG. Space Missions Planning Advisory Group. <http://www.smpag.net/>.
- [31] SRI. International Arecibo Observatory. <https://www.sri.com/research-development/specialized-facilities/arecibo-observatory>.
- [32] University of Arizona, Lunar & Planetary Laboratory. Catalina Sky Survey (CSS). <https://catalina.lpl.arizona.edu/>.
- [33] University of Hawaii, Institute for Astronomy. Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System (Pan-STARRS). <http://pswww.ifa.hawaii.edu/pswww/>.