

Fisika Tata Surya

Buku ini diambil dan dikembangkan dari Lecture Notes, catatan kuliah yang kami himpun di blog-pribadi <http://personal.fimipa.itb.ac.id/suryadi>. Kuliah yang pernah kami ampu selama berkarir sebagai dosen di Institut Teknologi Bandung, maupun berbagai Perguruan Tinggi Swasta lainnya. Pengalaman yang cukup dalam mengampu mata kuliah ; Mekanika Benda Langit, Solar System maupun Benda Kecil Tata Surya, serta kuliah pendukung lainnya telah sangat membantu dalam memperkaya materi buku ini. Saya berterima kasih pada semua staf Program Studi Astronomi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung yang telah memberikan masukan, bantuan dan koreksi sehingga buku ini dapat diterbitkan. Photo photo yang dipublish oleh NASA dan telah menjadi public domain banyak diambil sebagai ilustrasi. Demikian pula literatur yang ada di Observatorium Bosscha sangat membantu dan membuat pekerjaan ini menjadi lebih mudah dan menyenangkan. Semoga upaya mendokumentasikan semua catatan kuliah di Program Studi Astronomi dapat berlangsung dengan baik.

ISBN 978-602-74668-6-9

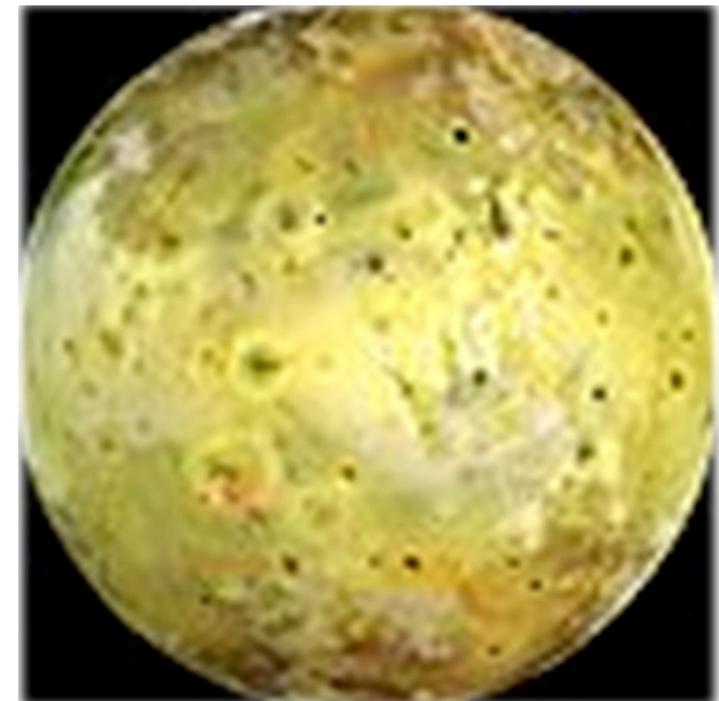
Penerbit
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Bandung
Labtek VIII Lt. 1, Gedung Achmad Bakrie
Jl. Ganesa 10 Bandung
Telp.: 022 2515032, Fax.: 022 2502360
<http://www.fmipa.itb.ac.id>



Prof. Dr. Suryadi Siregar, DEA. **FISIKA TATA SURYA**

Fisika Tata Surya

Prof. Dr. Suryadi Siregar, DEA.
Program Studi Astronomi



FMIPA

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Bandung

Cetakan 1, 2017

Hak Cipta dilindungi undang-undang

All Rights Reserved

@Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam ITB

Dilarang mengutip atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam ITB

Hak cipta pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam ITB, 2017

Data katalog dalam terbitan

SIREGAR, SURYADI

Fisika Tata Surya

Oleh Suryadi Siregar. - Bandung.

Penerbit Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam ITB, 2017

Labtek VIII Lantai 1

Jl. Ganesa 10 Bandung

Telp.: 022 2515032, Fax.: 022 2502360

<http://www.fmipa.itb.ac.id>

Fisika Tata Surya

Prof. Dr. Suryadi Siregar
Program Studi Astronomi

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Bandung
2017

Cetakan 1, 2017

Hak Cipta dilindungi undang-undang

All Rights Reserved

@Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam ITB

Dilarang mengutip atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam ITB

Hak cipta pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam ITB, 2017

Data katalog dalam terbitan

SIREGAR, SURYADI

Fisika Tata Surya

Oleh Suryadi Siregar. - Bandung.

Penerbit Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam ITB, 2017

Labtek VIII Lantai 1

Jl. Ganesa 10 Bandung

Telp.: 022 2515032, Fax.: 022 2502360

<http://www.fmipa.itb.ac.id>

Fisika Tata Surya

Prof. Dr. Suryadi Siregar
Program Studi Astronomi

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Bandung
2017

Kata Pengantar

Tata Surya bukan hanya sekumpulan planet, satelit, komet, asteroid dan anasir kosmik lainnya. Explorasi angkasa luar di abad yang lalu dan dikombinasikan dengan perjalanan misi antariksa ke planet-planet telah memberikan gambaran yang baru tentang Tata Surya. Mekanika Benda Langit merupakan dasar utama untuk mengerti dan memecahkan persoalan dalam Tata Surya.

Salah satu persoalan besar bagi masa depan umat manusia adalah yang berkaitan dengan hilangnya sumber energy. Saat ini penduduk dunia berjumlah enam milyar lebih. Jumlah ini akan terus meningkat, selain itu lingkungan hidup semakin rusak akibat perbuatan dan pengelolaan sumber daya alam yang tidak bijak. Kerusakan alam dapat diakibatkan oleh perbuatan manusia itu sendiri (antropogenik) maupun akibat evolusi alami yang terjadi di Bumi. Oleh sebab itu Tata Surya dimana planet Bumi merupakan salah satu anggotanya harus menjadi concern dan tanggung jawab kita semua. Pengetahuan tentang Tata Surya dapat diekstrapolasi dengan menguasai pengetahuan tentang Bumi kita, sekarang eksplorasi mineral di asteroid telah menjadi kenyataan, perjalanan antar planet, pemanfaatan energy Matahari dan bermukim di angkasa luar (space colony) bukan lagi mimpi di siang hari. Satu saat nanti bila diperlukan hijrah ke planet lain kita sudah siap. Sebagian teknologi telah kita kuasai. Dongeng dalam science fiction star trek boleh jadi akan menjadi kenyataan. Buku ini memberikan sedikit tentang gambaran fisik Tata Surya dan anggotanya. Semoga bermanfaat

Bandung, Oktober 2017

Suryadi Siregar

Acknowledgments

Buku ini diambil dan dikembangkan dari Lecture Notes, catatan kuliah yang kami himpun di blog-pribadi <http://personal.fimipa.itb.ac.id/suryadi>. Kuliah yang pernah kami ampu selama berkarir sebagai dosen di Institut Teknologi Bandung, maupun berbagai Perguruan Tinggi Swasta lainnya. Pengalaman yang cukup dalam mengampu mata kuliah ; Mekanika Benda Langit, Solar System maupun Benda Kecil Tata Surya, serta kuliah pendukung lainnya telah sangat membantu dalam memperkaya materi buku ini. Saya berterima kasih pada semua staf Program Studi Astronomi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung yang telah memberikan masukan, bantuan dan koreksi sehingga buku ini dapat diterbitkan. Photo photo yang dipublish oleh NASA dan telah menjadi public domain banyak diambil sebagai ilustrasi. Demikian pula literatur yang ada di Observatorium Bosscha sangat membantu dan membuat pekerjaan ini menjadi lebih mudah dan menyenangkan. Semoga upaya mendokumentasikan semua catatan kuliah di Program Studi Astronomi dapat berlangsung dengan baik.

Daftar Isi

| | | |
|--------------|---|-----------|
| BAB 1 | MENGENAL TATA SURYA | 1 |
| 1.1 | Monoistik versus duolistik | 1 |
| 1.2 | Mekanika Sistem Tata Surya | 3 |
| 1.2-1 | Hukum Kepler | 4 |
| 1.2-2 | Hukum Titius-Bode | 5 |
| 1.2-3 | Planet dilihat dari Bumi | 5 |
| 1.3 | Problem Tiga Benda dan Titik Lagrange | 6 |
| 1.4 | Konfigurasi Bumi-Bulan | 7 |
| 1.5 | Keadaan Fisik Tata Surya | 12 |
| 1.6 | Radiasi dan Refleksi thermal Matahari | 12 |
| 1.6-1 | Radiasi Benda Hitam | 12 |
| 1.6-3 | Radiasi Bumi | 17 |
| 1.7 | Planet Kebumian (Terrestrial) dan Raksasa | 22 |
| 1.8 | Atmosfer Primordial dan Sekunder | 23 |
| 1.9 | Tujuh Satelit Terbesar | 26 |
| BAB 2 | SATELIT, BENDA KECIL DAN KUIPER BELT OBJECTS | 30 |
| 2. 1 | Asal muasal Bulan | 30 |
| 2. 2 | Cincin Planet | 35 |
| 2. 3 | Asteroid | 36 |
| 2. 4 | Komet | 39 |
| 2. 5 | Benda Kecil Bersifat Ganda | 41 |
| 2. 6 | Medium Antar Planet | 43 |
| 2. 7 | Angin Matahari (Solar Wind) | 43 |
| 2. 8 | Debu Antar Planet | 45 |
| 2. 9 | Keragaman Tata Surya | 46 |
| 2.9- 1 | Keubahan oleh Matahari | 46 |
| 2.9- 2 | Keubahan akibat proses internal | 47 |

| | | |
|--------------|--|----|
| 2.9- 3 | Gerak relative Benda Langit terhadap Bumi | 48 |
| 2.9- 4 | Konfigurasi Spesifik Sistem Matahari – Bumi – Objek | 49 |
| 2.9- 5. | Konfigurasi Spesifik dari Sistem Bumi-Planet-Satelit atau Sistem Matahari-Planet-Satelit | 49 |
| 2.9- 6 | Studi Kasus | 51 |
| 2. 10 | Kuiper Belt Objek | 55 |
| 2. 11 | Beberapa data dan informasi | 57 |
| 2. 12 | Distribusi dan klasifikasi | 58 |
| 2. 13 | Plutoids | 61 |
| Bab 3 | Komet | 64 |
| 3.1 | Struktur Fisik Komet | 64 |
| 3. 2 | Inti Komet | 69 |
| 3.3 | Efek Poynting–Robertson | 72 |
| 3.4 | Koma | 74 |
| 3.5 | Debu Komet | 75 |
| 3.6 | Evolusi Fisis Komet | 76 |
| 3.7 | Model inti komet | 77 |
| 3.8 | Model Permukaan | 82 |
| 3.9 | Model Interior | 83 |
| 3.9-1 | Sifat es inti komet | 84 |
| 3.9-2 | Konduktivitas termal (\square) | 84 |
| 3.9-3 | Evolusi fisis komet | 84 |
| 3.9-4 | Evolusi tahap akhir | 85 |
| 3.10 | Metoda Mass-Loss | 86 |
| 3.11 | Model Pembungkusan Debu | 86 |
| 3.12 | Kala Hidup | 87 |
| 3.13 | Variasi Kecerlangan | 87 |
| 3.14 | Tinjauan Evolusi Dinamis Orbit Komet | 88 |
| 3.15 | Perturbasi Planet dan Bintang | 89 |
| 3.16 | Lepasnya Komet dari Tata Surya | 90 |
| 3.17 | Perturbasi oleh Bintang | 91 |
| 3.18 | Evolusi di kawasan Planet | 92 |

| | | |
|--------------|--|-----|
| Bab 4 | Asteroid dan Debu Antar Planet | 95 |
| 4. 1 | Asal Mula Asteroid | 95 |
| 4. 2 | Syarat Terjadinya Tumbukkan Asteroid-Bumi | 100 |
| 4. 3 | Persamaan Elemen Orbit Asteroid Kandidat Penabrak Bumi | 101 |
| 4. 4 | Masalah Tiga Benda Terbatas | 106 |
| 4. 5 | Konstanta Tisserand | 109 |
| 4. 6 | Vulcanoid asteroid hipotetik | 113 |
| 4. 7 | Karakteristik Fisik | 114 |
| 4. 8 | Kestabilan Dan Struktur Orbit Asteroid Pada Sistem Tiga Benda | 115 |
| 4.9 | Kestabilan Orbit Periodik Mendekati Lingkaran (Orbit periodik tipe I) | 118 |
| 4.10 | Kestabilan orbit periodik berbentuk elips (Orbit periodik tipe II) | 119 |
| 4. 11 | Struktur Ruang Fasa | 119 |
| 4. 12 | Bunga Rampai Asteroid | 120 |
| 4. 13 | Telaah Asteroid (State of the Arts) | 122 |
| 4.14 | Dampak Asteroid yang Menabrak Bumi | 125 |
| 4. 15 | Tumbukan Benda Kecil | 127 |
| 4.16 | Misi mengungkap rahasia asteroid | 132 |
| 4.16-1 | Proyek NEO | 132 |
| 4.16-2 | LINEAR | 133 |
| 4.16-3 | NEAT | 133 |
| 4.16-4 | LONEOS | 135 |
| 4.16-5 | Klasifikasi NEO | 135 |
| 4.16-6 | PHA (Potentially Hazardous Asteroids) | 136 |
| 4.16-7 | Misi-misi luar angkasa proyek NEO | 137 |
| 4.17 | Skala Bahaya Tabrakan Torino (Torino Impact Hazard Scale) | 138 |
| 4.18 | NEO yang nyaris menumbuk Bumi | 141 |
| 4.19 | Materi Antar Planet | 142 |

| | |
|--------------------------------------|-----|
| Daftar Pustaka | 184 |
| Daftar Index | 185 |
| Daftar Konstanta Astronomi | 191 |
| Daftar Elemen Orbit dan Massa Planet | 194 |

Bab 1 Mengenal Tata Surya

1. 1 Monoistik versus duolistik

Sampai dengan tahun enampuluan ada dua mazhab utama yang mencoba menjelaskan tentang asal-mula Tata Surya kita. Yang pertama adalah [mazhab monoistik](#). Matahari dan planet serta anasir yang ada didalamnya berasal dari materi yang sama, pencetus hipotesis ini adalah Laplace dan beberapa pemikir sebelumnya seperti Descartes, Immanuel Kant dan von Weizsaker.

Mazhab yang kedua adalah mazhab duolistik yang dianut oleh Buffon, Chamberlain, Moulton, Jeans, Jeffrey, Woolfson, Schmidt dan Lyttleton. Intinya adalah Matahari, planet serta anasir kosmik lainnya yang ada dalam Tata Surya tidak harus berasal dari materi yang sama, serta bisa saja terbentuk pada kurun waktu yang berbeda. Setiap teori memiliki keberhasilan dalam memecahkan masalah tertentu namun bisa jadi mempunyai kelemahan untuk kasus yang berbeda.

Teori monoistik tidak bisa menjawab bagaimana nebula tunggal bisa berevolusi secara spontan dan menghasilkan momentum sudut dengan fraksi yang kecil dari materi totalnya. Salah seorang yang mencoba menjelaskan hal ini adalah Roche yang mengajukan hipotesis tentang adanya nebula terkondensasi dengan kerapatan tinggi. Pendekatan lain mempostulatkan piringan yang tidak terlalu terpusat tetapi memiliki rapat masa yang cukup sehingga fraksi massa nebula bisa mencapai 10% -50% massa Matahari, dalam kondisi seperti ini bagian terbesar piringan akan terlepas dan akhirnya membentuk planet.

Teori duolistik yang melibatkan interaksi dua bintang, mencoba menghindari masalah spin Matahari yang lambat dengan mengasumsikan adanya sebagian materi yang lepas tatkala dua bintang saling berpapasan. Materi yang lepas ini kemudian menjadi planet. Sayangnya tidak ada mekanisme yang bisa menjelaskan bagaimana caranya memindahkan materi ke jarak tertentu dari Matahari agar bisa memberikan momentum sudut yang cukup. Belakangan teori kreasi Schmidt-Lyttleton mencoba memecahkan masalah momentum sudut dengan mengajukan penangkapan materi dalam kondisi yang tersebar, dan bisa menghasilkan momentum sudut yang cukup untuk bisa menjelaskan gerak planet. Teori tumbukan Jeffrey untuk materi yang terlontar dari Matahari hanya memberikan daerah yang terbatas disekitar Matahari. Model lainnya adalah model planetesimal yang merupakan hasil kondensasi materi padat yang tidak sempat menjadi Matahari. Teori yang diajukan oleh Chamberlain-Moulton merupakan salah satu teori yang banyak diacu orang. Sampai saat ini teori planetesimal telah menghasilkan banyak hal baru dalam cosmogony. Pada dasarnya untuk mempelajari Tata Surya ada enam hal yang dijadikan syarat batas, yaitu;

Tata Surya terdiri dari objek-objek benda langit yang bergerak pada bidang orbit yang dikontrol oleh gravitasi Matahari. Objek ini mengalami tekanan radiasi atau berinteraksi dengan angin matahari (*solar wind*).

Hal pertama yang perlu kita ketahui adalah massa planet dan anasir kosmik di dalam Tata Surya menunjukkan fraksi kurang dari 0,015 massa Matahari dan yang kedua adalah kebanyakan dari anggota Tata Surya mengorbit dekat dengan bidang ekuator Matahari.

Planet merupakan objek yang massive di dalam Tata Surya, memiliki orbit yang hampir lingkaran, mengitari Matahari, dan berada pada rentang jarak heliosentrik antara 0,4 – 40 au. Diameternya berkisar antara ribuan kilometer sampai lebih dari 100000 km.

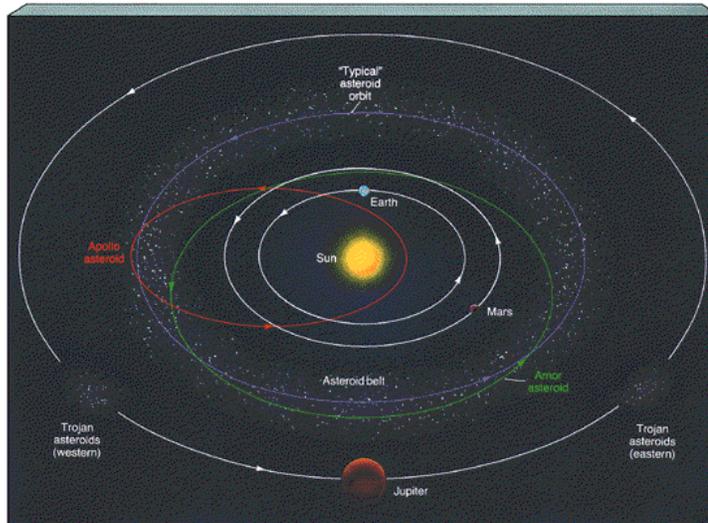
Di antara lintasan Mars dan Jupiter, terdapat benda-benda kecil yang dikenal sebagai Asteroid atau planet minor. Asteroid mengorbit mengitari Matahari dan berdiameter dari beberapa meter sampai dengan beberapa ratus kilometer.

Komet, objek yang lebih kecil dengan radius sekitar beberapa kilometer dan bergerak dalam orbit elips memiliki inklinasi tinggi terhadap bidang orbit Bumi, disebut juga bidang ekliptika. Objek lainnya adalah satelit, yang mengorbit mengitari planet.

Medium antar planet (*interplanetary medium*), dalam Tata Surya terdiri dari butiran-butiran debu dan plasma. Plasma terdiri dari electron dan ion, yang sebagian besar berada didalam korona Matahari.

Medium antar planet sebagian besar merupakan sisa dari pembentukan bintang oleh awan primordial. Awan primordial dibangun oleh beragam komposisi kimia misalnya; H₂O (air), CH₄ (methan), CH₃OH (methanol) dan macam-maca zat lainnya. Bintang dapat terbentuk apabila cukup massa yang tersedia. Bintang yang massive dapat terbentuk apabila rapat massa awan primordial tinggi. Selanjutnya Tata surya dapat terbentuk apabila rapat massa awan primordial tidak terlalu besar sehingga bintang massiv tidak terbentuk. Gaya pasang surut akan menceraikan beraikan awan primordial dan keruntuhan gravitasi (collaps) sulit terjadi apabila massa awan primordial tidak terlalu besar. Apa bila massa awan primordial lebih besar dari massa Matahari maka akan terbentuk

1.2 Mekanika Sistem Tata Surya



Gambar 1- 2 Anggota Tata Surya planet dan asteroid, komet bergerak dalam kaedah hukum Mekanika Sistem Tata Surya kita.

1.2-1 Hukum Kepler

Karena massa total planet dan satelit jauh lebih kecil dari massa Matahari, maka pengaruh antar planet dapat diabaikan untuk kalkulasi orbit yang tidak terlalu teliti. Aproksimasi yang dilakukan mengacu pada “two-body problem”, dengan mengambil batasan massa salah satu objek itu dapat diabaikan terhadap masa Matahari. Kepler memberikan 3 hukum yang ia pakai dalam perhitungan yakni:

Orbit planet itu berbentuk elip. Matahari berada di salah satu titik apinya, dan gerak objek dapat dinyatakan oleh :

$$r = \frac{a(1-e^2)}{1+e\cos\theta} = \frac{p}{1+e\cos\theta} \quad (1.1)$$

r = jarak heliosentrik

a = setengah sumbu panjang elips (semi major axis)

e = eksentrisitas

θ = sudut yang dibentuk oleh radius vektor objek terhadap sumbu panjang elip

Radius vektor (garis hubung Matahari dan planet) dalam selang waktu yang sama akan menyapu luas daerah yang sama. Akibatnya planet bergerak cepat ketika dekat Matahari dan bergerak lambat saat jauh dari Matahari, dinyatakan dengan :

$$\frac{dA}{dt} = \frac{1}{2} \frac{r^2 d\theta}{dt} = \frac{h}{2} \quad (1.2)$$

Kuadrat kala edar planet mengitari Matahari sebanding dengan pangkat tiga setengah sumbu panjang elips dan selalu konstan

$$\frac{a^3}{P^2} = K \quad (1.3)$$

Untuk kasus gaya tarik gravitasi antara 2 objek dengan massa m dan m' , (1.1) dan (1.2) dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{p}(1 + e \cos \theta) \quad (1.4)$$

dan

$$\frac{a^3}{P^2} = \frac{G(m + m')}{4\pi^2} \quad (1.5)$$

Dengan p didefinisikan sebagai

$$p = \frac{h^2}{G(m+m')} \quad (1.6)$$

Kemiringan bidang orbit planet, asteroid dan komet, mengacu pada bidang ekuatorial. Untuk satelit, bidang yang dijadikan acuan adalah bidang ekuatorial planet. Lintasan planet menembus bidang ekuatorial pada dua titik yang dikenal sebagai ascending dan descending nodes (titik simpul naik dan titik simpul turun). Lintasan satelit menembus bidang ekuator pada dua titik yang dikenal sebagai ascending node dan descending node (titik simpul naik dan titik simpul turun).

Untuk komet, asteroid dan planet, parameter yang digunakan adalah:

Jarak perihelion, $q = a(1 - e)$

Jarak aphelion, $Q = a(1 + e)$

Untuk komet periode panjang rasio Q/q cukup besar dibandingkan planet maupun asteroid. Hal sebaliknya berlaku untuk komet periode pendek.

1.2-2 Hukum Titius-Bode

Seperti yang telah kita ketahui, jarak kedelapan (sampai 25 Agustus 2006, Pluto masih dianggap sebagai planet), planet berkisar antara 0,4au untuk Merkurius dan sekitar 40au untuk Pluto. Pada abad ke-18, astronom Jerman, Titius dan Bode kemudian Wolf, menunjukkan jarak rata-rata heliosentrik planet mengikuti hukum empiric Titius Bode :

$$D = 0,4 + 0,3 \times 2^n \quad (1.7)$$

D merupakan jarak heliosentrik dalam au, n berharga $-\infty$ untuk Merkurius, 0 untuk Venus dan bertambah 1 untuk setiap planet.

Hukum ini memiliki tingkat kesalahan 5% untuk Venus, untuk Neptunus terdapat 22% derajat kesalahan dan 49% untuk Pluto. Nilai $n = 3$ diberikan bukan untuk planet melainkan untuk sabuk asteroid.

1.2-3 Planet dilihat dari Bumi

Seperti objek lainnya dalam Tata Surya, planet merupakan objek yang dingin, temperaturnya dalam order beberapa ratus Kelvin. Visibilitas radiasi planet sangat lemah dibandingkan dengan radiasi Matahari yang dipantulkan oleh planet. Ada 2 konfigurasi yang dapat kita lihat:

Untuk planet dalam (inferior), jarak heliosentrik kurang dari 1 au, planet Merkurius dan Venus selalu terlihat dekat dengan Matahari, artinya dapat diamati pada sore atau pagi hari. Fraksi iluminasi permukaan bergantung pada posisinya sebagai fungsi dari sudut fasa (*phase angle*) yaitu sudut yang dibentuk oleh Matahari-Objek-Bumi. Posisi ketika planet inferior berada diantara Bumi dan Matahari disebut konjungsi inferior dan kedudukan planet ketika posisinya membentuk konfigurasi Bumi-Matahari-Planet dikenal sebagai konjungsi superior.

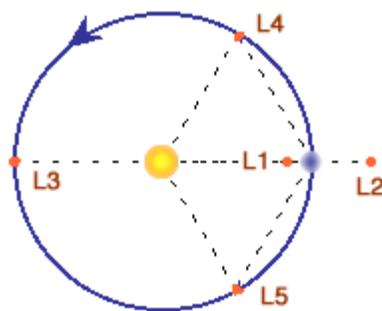
Untuk planet superior, jarak heliosentrik lebih besar dari 1 au, planet ini dapat terlihat sepanjang malam. Ketika planet berada pada konfigurasi Planet- Bumi dan Matahari, disebut oposisi (*opposition*) dalam hal ini jarak planet ke Bumi menjadi minimum relatif. Jarak maksimum dicapai pada saat planet berada dibelakang Matahari, pada posisi Bumi-Matahari dan Planet sudut fasa pada jarak maksimum ini adalah 11° untuk Jupiter

Selain dari Merkurius dan Venus, setiap planet umumnya memiliki satu atau banyak satelit, jumlah satelit semakin besar untuk planet yang massanya massive (bermassa besar).

1.3 Problem Tiga Benda dan Titik Lagrange

Peredaran satelit mengelilingi planet, mengalami pengaruh gravitasi dari satelit lain dan gaya tarik gravitasi yang berasal dari Matahari. Untuk menghitung orbit, tidak bisa lagi mengandalkan kaedah masalah dua benda tapi harus diselesaikan dengan teori N-body problem.

Dalam beberapa kasus, three-body problem dapat digunakan untuk mempelajari gerak benda kecil dalam pengaruh gravitasi Matahari dan planet atau dalam medan gravitasi planet dan satelit itu sendiri. Pada titik tertentu akan ditemukan suatu posisi kesetimbangan gravitasi. Titik ini dikenal sebagai Titik Lagrange. Tiga dari lima titik Lagrange berada di garis hubung satelit-planet (Matahari-planet) dan dua titik lainnya merupakan puncak dari segitiga samasisi



Kasus seperti ini ditemukan pada asteroid kelompok Trojan, yang bergerak dalam orbit Jupiter pada dua titik Lagrange L4 dan L5, asteroid membentuk sudut, sebesar 60° satu kelompok berada di depan dan kelompok lainnya berlokasi di belakang Jupiter

Gambar 1- 3 Lokasi titik Lagrange pada sistem 3-benda

1.4 Konfigurasi Bumi-Bulan

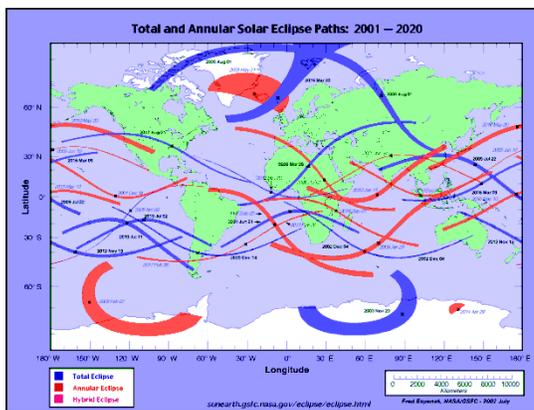
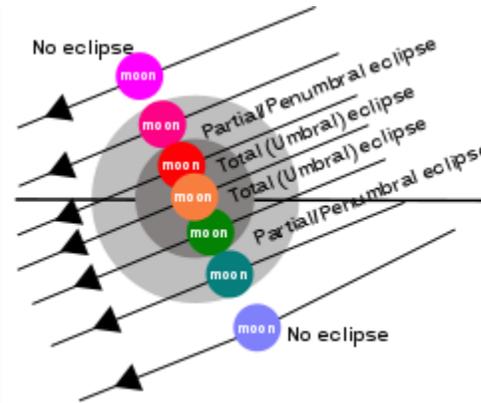
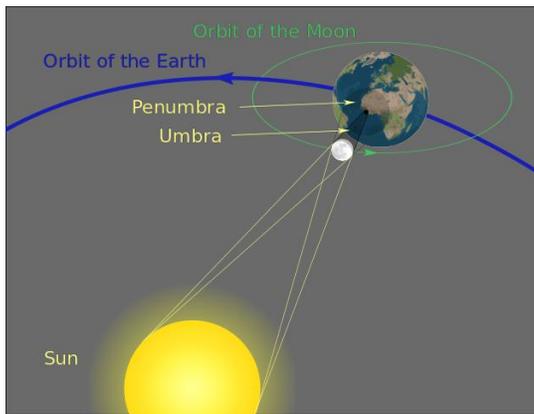
Jika bidang orbit Bulan berimpit dengan ekliptika, maka akan terjadi gerhana Matahari atau gerhana Bulan ketika Bulan berkonjungsi (bulan baru), atau saat oposisi (bulan purnama). Kenyataannya tidak demikian, bidang orbit bulan membentuk sudut sebesar 5° terhadap bidang ekuator, akibatnya fenomena gerhana hanya terjadi jika Bulan juga berada pada titik simpul (node) dari orbitnya. Frekuensi terjadinya gerhana dengan konfigurasi yang identik secara berulang akan terjadi setiap 18 tahun 10 hari, periode ini dikenal sebagai siklus Saros.

Gerhana Bulan terjadi saat oposisi ketika pusat bulan lebih kecil dari 9° pada salah satu titik orbitnya; ini dapat terjadi bila pusatnya lebih kecil dari $12,5^\circ$ dari titik simpul. Menurut konfigurasi geometrinya, dapat terjadi gerhana total ataupun gerhana sebagian. Gerhana bulan yang paling lama dapat terjadi selama 1 jam 45 menit.

Gerhana Matahari terjadi apabila pusat Matahari lebih kecil dari $13,5^\circ$ dari salah satu titik simpul dari orbit bulan; ini akan terjadi ketika pusatnya lebih kecil dari $18,5^\circ$ dari titik simpul. Gerhana yang dapat berlangsung adalah gerhana total ini terjadi ketika Bumi berada jauh dari Matahari atau dekat dengan bulan, sedangkan gerhana cincin dapat terjadi saat Bumi dekat dengan Matahari dan jauh dari Bulan. Dalam kedua hal tersebut gerhana sebagian masih dapat terjadi. Maksimum berlangsungnya gerhana Matahari adalah 7 menit.

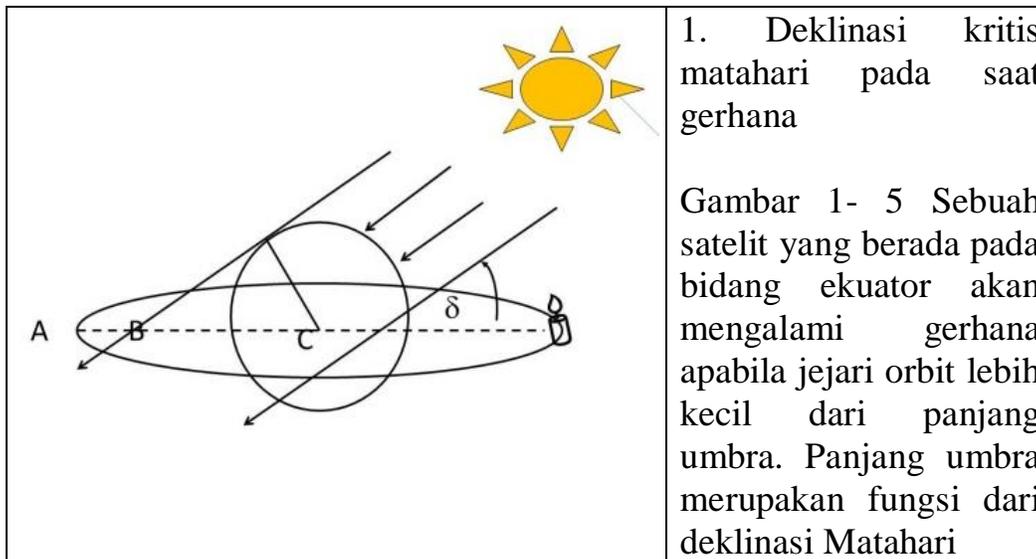
Gerhana adalah peristiwa terhalangnya cahaya Matahari yang seharusnya diterima oleh suatu benda langit oleh benda langit yang

lain, oleh sebab itu gerhana yang ideal terjadi kalau ketiga benda langit berada dalam satu garis lurus. Gerhana Bulan terjadi kalau konfigurasi Matahari-Bumi-Bulan. Konfigurasi Matahari-Bulan-Bumi menyebabkan terjadinya gerhana Matahari. Bidang orbit Bulan membentuk sudut sebesar 5° dari bidang ekuator oleh sebab itu bidang ekliptika dan bidang orbit bulan tidak berimpit sehingga tidak dapat terjadi gerhana Bulan atau Matahari setiap bulan. Gerhana hanya bisa terjadi ketiga Bulan-Bumi dan Matahari terletak dalam satu bidang dan satu garis lurus. Oleh sebab itu kita mengenal dua macam gerhana; gerhana total dan gerhana parisal(sebagian).



Gambar 1- 4 Orbit bulan dan fenomena gerhana. Untuk terjadi gerhana, deklinasi matahari harus lebih kecil dari deklinasi kritis. Dimana $\delta_c = \sin^{-1}\left(\frac{R}{r}\right)$ dalam hal ini R - jejari planet dan r -jejari orbit bulan/satelit. Jenis gerhana bergantung pada posisi Bulan dalam bayangan Bumi

Beberapa kesimpulan yang perlu diketahui.



Gerhana satelit terjadi bila radius orbit satelit (AC) berada dalam bayang-bayang planet (umbra) dimana panjang umbra adalah BC. Dengan demikian syarat terjadi gerhana adalah $AC \leq BC$

$$AC \leq \frac{R}{\sin \delta} \rightarrow \sin \delta \leq \frac{R}{r}$$

Jadi untuk satelit yang bergerak pada bidang ekuator dia akan memasuki bayangan planet (terjadi gerhana satelit/Bulan) bila deklinasi Matahari lebih kecil dari deklinasi kritis, δ_c dimana.

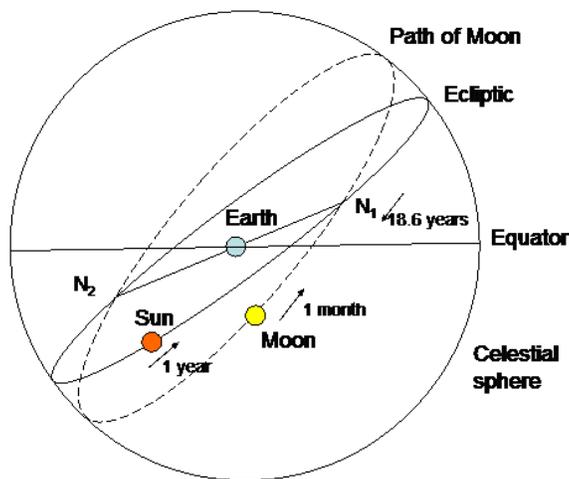
$$\delta_c = \arcsin\left(\frac{R}{r}\right)$$

dalam hal ini R = jejari bumi dan r = jejari orbit geosentrik Bulan

2. Gerhana yang sama akan dapat berulang bila dipenuhi tiga syarat berikut:

Syarat pertama: Gerhana bisa terjadi apabila Bulan berada pada phase bulan baru (gerhana matahari) atau bulan purnama (gerhana bulan). Waktu yang dibutuhkan dari satu phase ke phase yang sama disebut dengan periode sinodis (Moon's *synodic period*). Yaitu sekitar 29,53 hari

Syarat kedua: Selain itu gerhana juga baru dapat terjadi apabila bulan berada pada titik nodal. Waktu yang diperlukan bulan untuk memotong titik simpul (node atau nodal) yang sama pada titik simpul naik (ascending node) ataupun titik simpul turun (desending node) disebut dengan periode draconic (*draconic month*), yang berkisar sekitar 27,21 hari.

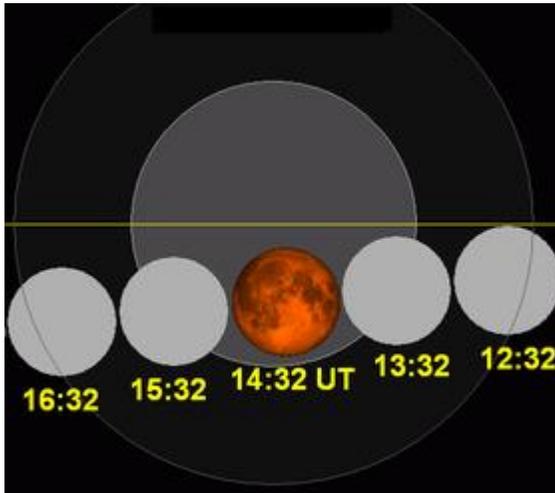


Syarat ketiga: Bulan kembali lagi pada jarak yang sama relative terhadap Bumi, misalnya dari perigee ke perigee atau dari apogee ke apogee lagi. Tempo yang dibutuhkananya disebut dengan periode anomalistic (*anomalistic month*) atau sekitar 27,55 hari

Gambar 1- 6 Gerhana terjadi apabila ketiga benda langit Matahari-Bumi-Bulan terletak disepanjang garis $N_2 N_1$. Gerhana Bulan terjadi bila sinar Matahari terhalang oleh Bumi, oleh sebab itu konfigurasinya adalah Matahari-Bumi-Bulan. Sedangkan gerhana Matahari terjadi apabila konfigurasinya adalah Matahari-Bulan-Bumi.

Titik nodal akan kembali pada posisi yang sama relative terhadap latar belakang bintang-bintang setelah 223 bulan sinodis (satu bulan sinodis = 29,53 hari) atau ekivalen dengan 6585, 3213 hari atau

setara dengan 18, 6 tahun. Oleh sebab itu gerhana yang sama akan terjadi setiap 18, 6 tahun dan ini disebut sebagai periode Saros. Satu periode saros juga ekuivalen dengan 242 bulan dragonis dan 239 bulan anomalistic.



Gambar 1- 7 Perjalanan gerhana Bulan 10 Desember 2011. Bulan memasuki penumbra pada jam 12:32 UT memasuki umbra pada jam 13:32 Gerhana mulai terjadi pada jam 13:32 GMT dan Bulan mulai meninggalkan umbra pada jam 15:32. Keluar dari penumbra pada jam 16:32 UT

Tabel 1- 1 Kronologi gerhana bulan parsial dan gerhana bulan total

| No | Gerhana parsial | | Gerhana Total |
|----|-------------------------------------|---|-------------------------------------|
| 1 | 2012 Jun 4-2013 Apr 25-2017 Aug 7 |  <p>Gerhana Bulan pada 28 Oktober 2004</p> | 2011 Dec 10-2014 Apr 15-2014 Oct 8 |
| 2 | 2019 Jul 16-2021 Nov 19-2023 Oct 28 | | 2015 Apr 4-2015 Sep 28-2018 Jan 31 |
| 3 | 2024 Sep 18-2026 Aug 28-2028 Jan 12 | | 2018 Jul 27-2019 Jan 21-2021 May 26 |
| 4 | 2028 Jul 6--2030 Jun 15-2034 Sep 28 | | 2022 May 16-2022 Nov 8-2025 Mar 14 |
| 5 | 2035 Aug 19-2037 Jul 27-2039 Jun 6 | | 2025 Sep 7-2026 Mar 3-2028 Dec 31 |
| 6 | 2039 November 30 | | 2029 Jun 26-2029 Dec 20-2032 Apr 25 |

| | | | |
|----|-------------------|--|--|
| 7 | 2041 May 16 |  <p>Gerhana Bulan terjadi pada tanggal 7 September 2006</p> | 2032 Oct 18-2033 Apr 14-2033 Oct 8 |
| 8 | 2041 November 8 | | 2036 Feb 11-2036 Aug 7-2037 Jan 31 |
| 9 | 2042 September 29 | | 2040 May 26-2040 Nov 18-2043 Mar 25 |
| 10 | 2046 January 22 | | 2043 Sep 19-2044 Mar 13-2044 Sep 7 |
| 11 | 2046 July 18 | | 2047 Jan 12-2047 Jul 7-2048 Jan 1 |
| 12 | 2048 June 26 | | 2050 May 6-2050 Oct 30 |

Tabel 1- 2 Prakiraan gerhana Matahari dan gerhana Bulan dan daerah yang dilewati bayangan dari tahun 2012-2017

| No | Tanggal | Jenis | Durasi | Kawasan yang dilewati |
|----|---------------|-----------------------------|--------|--|
| 1 | 20 Mei 2012 | Gerhana Matahari. Saros 128 | 05m04s | Asia, Pacific, Amerika Utara (Annular:China, Jepang, Pacific, Barat US) |
| 2 | 4 Juni 2012 | Gerhana Bulan. Saros 140 | 02h08m | Asia, Australia,Pacific, Amerika |
| 3 | 25 April 2013 | Gerhana Bulan. Saros 112 | 00h32m | Eropa, Afrika, Asia, Australia |
| 4 | 10 Mei 2013 | Gerhana Matahari. Saros 138 | 06m03s | Australia, New Zealand, Central Pacific (Annular: Australia Utara, Kepulauan Salomon, Central Pacific) |
| 5 | 25 Mei 2013 | Gerhana Bulan. Saros 150 | - | Amerika, Afrika |

| | | | | |
|----|------------------|-----------------------------|-----------------|---|
| 6 | 15 April 2014 | Gerhana Bulan. Saros 122 | 03h05m (01h19m) | Australia, Pacific, Amerika |
| 7 | 29 April 2014 | Gerhana Matahari. Saros 148 | Non-central | India Selatan, Australia, Antartika, (Annular:Antarctica) |
| 8 | 20 Maret 2015 | Gerhana Matahari. Saros 120 | 02m47s | Iceland, Eropa, Afrika Utara, Asia (Total: Atlantik Utara, Faero Island, Svalbard) |
| 9 | 9 Maret 2016 | Gerhana Matahari. Saros 130 | 04m09s | Asia Timur, Australia, Pacific (Total: Sumatra, Kalimantan, Sulawesi, Pacific) |
| 10 | 11 February 2017 | Gerhana Bulan. Saros 114 | - | Amerika, Eropa, Afrika, Asia |
| 11 | 26 February 2017 | Gerhana Matahari. Saros 140 | 00m44s | Amerika Selatan, Atlantik, Afrika, Antartika (Annular: Pacific, Chile, Argentina, Atlantik, Afrika) |

1.5 Keadaan Fisik Tata Surya

Perbedaan yang esensial antara bintang dan planet adalah massanya. Gumpalan awan primordial yang berkontraksi belum tentu menjadi sebuah bintang, ia dapat menjadi bintang apabila temperatur pusatnya cukup tinggi untuk melakukan reaksi thermonuklir yang pertama yang dikenal sebagai reaksi proton-proton atau proton-deutrium.

Agar terjadi pemanasan (pembakaran) di pusat, maka massa minimal yang harus dimiliki awan primordial itu adalah seperduapuluh kali masa Matahari, M_{\odot} , atau setara dengan 10^{32} gram. Karena tidak memiliki reaksi termonuklir, benda langit (planet, komet dan asteroid) dalam Tata Surya kita hanya mempunyai energi internal yang kecil, yang dihasilkan oleh

beberapa sumber radioaktif, khususnya yang ada pada planet terrestrial. Untuk planet raksasa energy internal berasal dari kontraksi atau perubahan internal (internal differentiation). Akibatnya, temperatur permukaan sangat bergantung pada fluks Matahari yang diterimanya, inilah faktor dominan yang menyebabkan penurunan temperatur seiring dengan bertambahnya jarak dari Matahari.

1.6 Radiasi dan Refleksi thermal Matahari

1.6-1 Radiasi Benda Hitam

Hukum Kirchoff

Sumber radiasi yang berwujud padat, cair atau gas mampat akan memancarkan radiasi dengan spektrum yang kontinyu

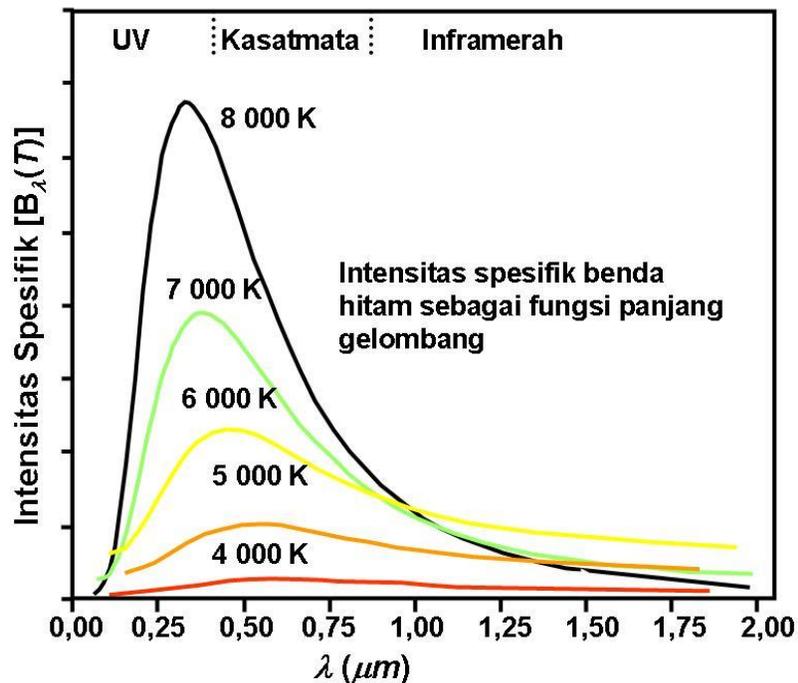
Sumber radiasi yang berwujud gas, renggang akan memancarkan radiasi pada gelombang diskrit (garis emisi)

Berkas radiasi dengan spektrum kontinyu bila melewati gas renggang yang suhunya lebih rendah dari sumbernya akan menghasilkan spektrum kontinyu yang diselingi garis-gelap (garis absorpsi)

Definisi, benda hitam adalah benda dengan sifat sebagai berikut;

Merupakan benda ideal yang menyerap seluruh energi yang diterima

Bila menyerap energi suhu akan naik, hingga mencapai temperatur kesetimbangan. Laju energi yang diserap sama dengan laju energi yang dipancarkan kembali



Gambar 1- 8 Fungsi distribusi energi benda hitam. Pada suhu yang tinggi fungsi distribusi bergeser ke arah panjang gelombang yang lebih kecil, demikian pula sebaliknya benda hitam dengan temperatur rendah berkecendrungan bergeser ke arah panjang gelombang yang lebih besar.

Hukum Stefan

Intensitas radiasi(energi yang dipancarkan persatuan waktu persatuan luas kesegala arah) adalah

$$\mathfrak{R} = \sigma T^4 \quad (\text{I. 20})$$

Dimana, $\sigma = 5,67 \times 10^{-5}$ cgs, konstanta Stefan-Boltzman

T = derajat Kelvin, yaitu $273^0 \text{ K} = 0^0 \text{ C}$

R = radiance

1.6-2 Model Distribusi Radiasi Benda Hitam

Hukum Planck, radiance benda hitam yang dipancarkan pada frekuensi ν dan $\nu+d\nu$ adalah;

$$\mathfrak{R}_\nu(T) = \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (\text{I.21})$$

h = tetapan Planck = $6,6 \times 10^{-27}$ erg.detik

k = tetapan Boltzmann = $1,4 \times 10^{-16}$ erg/derajad

c = kecepatan cahaya

Bentuk yang identik dapat diperoleh dengan mengganti $\nu = \frac{c}{\lambda}$

dengan demikian kita peroleh;

$$\mathfrak{R}_\lambda(T) = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad (\text{I.22})$$

Dengan menggabungkan hukum Stefan-Boltzmann yang berlaku untuk semua panjang gelombang kita peroleh;

$$\sigma T^4 = \int_0^\infty \mathfrak{R}_\lambda(T) d\lambda = \int_0^\infty \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} d\lambda = 2\pi h c^2 \int_0^\infty \frac{\lambda^{-5}}{e^{hc/\lambda kT} - 1} d\lambda \quad (\text{I.23})$$

Kalau diselesaikan kita peroleh;

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} \quad (\text{I.24})$$

Definisi

Temperatur efektif benda langit adalah temperatur benda hitam yang radiancanya sama dengan benda langit tersebut; $\mathfrak{R} = \sigma T^4$

Luminositas adalah energi total yang dipancarkan sumber kesegala arah;

$$L = 4\pi R^2 \mathfrak{R} \rightarrow L = 4\pi R^2 \sigma T^4 \text{ erg/detik} \quad (\text{I.25})$$

Catatan: $\mathfrak{R}_\lambda(T)$ mencapai maksimum bila dipenuhi syarat

$$\frac{d\mathfrak{R}_\lambda(T)}{d\lambda} = 0$$

Nlai λ yang memenuhi adalah bila ;

$$\lambda = \frac{hc}{4,965kT} \rightarrow \lambda_{max} = \frac{0,290}{T} \text{ cm} \quad (\text{I.26})$$

Pernyataan ini dikenal sebagai hukum pergeseran Wien. Bentuk lain adalah ;

$$\nu_{max} = \frac{2,821kT}{hc} \text{ hertz} \quad (\text{I.27})$$

Untuk $T=290^0$ K (temperatur kamar) $\lambda_{max} \approx 10^5$ Angstrom

Tinjau kembali fungsi Planck dan tulis $\mathfrak{R}(T) = \pi B(T)$

Maka dapat kita tulis kembali;

$$1) B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} = \frac{2hc^2}{\lambda^5} (e^x - 1)^{-1} \quad (\text{I.28})$$

dalam hal ini dimisalkan $x = \frac{hc}{\lambda kT}$

$$2) B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} = \frac{2h\nu^3}{c^2} (e^x - 1)^{-1} \quad (\text{I.29})$$

Distribusi Rayleigh-Jeans

Dalam hal apabila $x \rightarrow 0$ atau $x \ll 1$ maka $e^x - 1 \approx x$

Fungsi yang diperoleh disebut fungsi distribusi Rayleigh-Jeans, fungsi ini dapat diterapkan dalam hal radiasi pada rentang panjang

gelombang yang besar, inframerah misalnya. tetapi suhu objek tidak boleh terlalu rendah.

$$B_\nu(T) = \frac{2\nu^2}{c^2} kT \quad (\text{I.30})$$

$$B_\lambda(T) = \frac{2c}{\lambda^4} kT \quad (\text{I.31})$$

Distribusi Wien

Dalam hal apabila $x \rightarrow \infty$ atau $x \gg 1$ maka $e^x - 1 \approx e^x$

Fungsi yang diperoleh disebut fungsi distribusi Wien, fungsi ini dapat diterapkan dalam hal radiasi pada rentang panjang gelombang yang kecil, biru atau sebelumnya misalnya ultraviolet, tetapi suhu objek tidak boleh terlalu tinggi.

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} e^{-\frac{h\nu}{kT}} \quad (\text{I.32})$$

$$B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} e^{-\frac{hc}{\lambda kT}} \quad (\text{I.33})$$

Ilustrasi, jika seandainya Matahari dan Bumi bersifat sebagai benda hitam maka energi radiasi yang dia pancarkan adalah; $\mathfrak{R} = \sigma T^4$

Untuk Matahari: $T = 5700^0$ K maka energi radiasinya adalah $\mathfrak{R} = \sigma(5700)^4$

Untuk planet Bumi : $T = 260^0$ K maka energi radiasi yang dia pancarkan adalah sebesar $\mathfrak{R} = \sigma(260)^4$

Dengan demikian nisbah energi yang dipancarkan oleh Matahari terhadap Bumi adalah;

$$\frac{\mathfrak{R}_\odot}{\mathfrak{R}_\oplus} = 2,3 \times 10^5 \rightarrow \mathfrak{R}_\odot = 2,31 \times 10^5 \mathfrak{R}_\oplus$$

Selain itu untuk Matahari dapat juga diturunkan;

$$\lambda_{max} = \frac{0,290}{T} = 5 \times 10^{-5} \text{ cm} = 5000 \text{ \AA}$$

$$\mathfrak{R}_{max} = \frac{3,74 \times 10^{-8} \lambda^{-5}}{e^{1,439/\lambda T} - 1} = 7,73 \times 10^{11} \text{ W / m}^2$$

Contoh lain yang dapat dihitung dari pernyataan diatas diperlihatkan dalam Tabel 1-3;

Tabel 1-3 Temperatur dan energi radiasi maximum pada panjang gelombangnya

| No | Objek | T(K) | λ_{max} (cm) | R_{max} (W/m ²) |
|----|----------|------|-----------------------|-------------------------------|
| 1 | Matahari | 5700 | $5,09 \times 10^{-5}$ | $7,73 \times 10^{11}$ |
| 2 | Mars | 250 | $1,16 \times 10^{-3}$ | $1,25 \times 10^5$ |
| 3 | Callisto | 125 | $2,32 \times 10^{-3}$ | $3,92 \times 10^3$ |
| 4 | Titania | 75 | $3,87 \times 10^{-3}$ | $3,05 \times 10^2$ |
| 5 | Pluto | 55 | $5,27 \times 10^{-3}$ | 6,47 |

Radiasi yang diterima oleh planet dari Matahari

Dari Matahari:

$$L = 4\pi R^2 \mathfrak{R} \rightarrow L = 4\pi R^2 \sigma T^4 \quad (\text{I.34})$$

Diterima oleh planet;

$$F = \frac{L}{4\pi r^2} \rightarrow F_{\lambda} = \frac{4\pi R^2 \sigma T^4}{4\pi r^2} = \left[\frac{R}{r} \right]^2 \sigma T^4 \quad (\text{I.35})$$

Dengan

F = Energi yg diterima dari Matahari persatuan waktu persatuan luas ,Fluks

R = Radius Matahari

r = Jarak heliosentrik planet

T = Temperatur Matahari dalam derajat Kelvin

1.6-3 Radiasi Bumi

Telah diketahui sebagian radiasi matahari diserap langsung di atmosfer, akan tetapi kebanyakan diteruskan melewati atmosfer dan diserap oleh permukaan bumi. Penyerapan ini memanaskan permukaan bumi. Permukaan bumi yang dipanaskan oleh penyerapan radiasi matahari ini akan menjadi sumber radiasi gelombang panjang, dan dinamakan *radiasi bumi* . Suhu [permukaan bumi rerata tahunan dan rerata globalnya hanya 10°C , sedangkan suhu permukaan matahari 6000 K. Menurut hukum pergeseran Wien kebanyakan energi radiasi yang dipancarkan bumi terletak didaerah panjang gelombang inframerah, yaitu antara $4\ \mu\text{m}$ dan $120\ \mu\text{m}$ dengan puncaknya disekitar $10\ \mu\text{m}$.

Radiasi bumi disebut juga *radiasi malam* karena merupakan sumber radiasi utama pada malam hari. Perlu diperhatikan bahwa radiasi inframerah tidak hanya berarti radiasi bumi, karena berbagai unsur atau komponen atmosfer juga memancarkan energi radiasi dengan panjang gelombang inframerah. Radiasi infra,erah dipancarkan baik siang maupun malam hari dan radiasi ini lebih banyak dipancarkan pada malam hari, saat radiasi matahari tidak ada.

Biasanya permukaan bumi dianggap sebagai benda kelabu dalam pancaran dan penyerapan radiasi di daerah panjang gelombang inframerah sehingga fluks radiasi bumi dapat dinyatakan dengan ;

$$F = \epsilon \sigma T^4$$

Dengan σ adalah tetapan Stefan-Boltzmann, T suhu mutlak dari permukaan bumi dan ϵ adalah keterpencaran inframerah permukaan bumi, yakni nisbah antara emisi atau pancaran suatu permukaan terhadap pemancaran permukaan benda hitam pada suhu dan panjang gelombang yang sama. Keterpencaran inframerah dari berbagai permukaan dapat dilihat pada Tabel 2.2

Tabel 2.2 Keterpencaran berbagai permukaan

| | Permukaan | Keterpencaran (%) |
|---|---------------------|-------------------|
| 1 | Tanah gundul lengas | 95-98 |
| 2 | Hutan | 90 |
| 3 | Gurun | 90-91 |
| 4 | Pasir kering | 89-90 |
| 5 | Pasir basah | 95 |
| 6 | Air | 92-96 |
| 7 | Salju | 82-99,5 |

Seperti radiasi matahari, radiasi inframerah yang dipancarkan oleh bumi di dalam atmosfer akan mengalami pula proses-proses berikut ; yaitu penyerapan-reradiasi dan penerusan.

Penyerapan. Sebagai penyerap utama di dalam atmosfer ialah ozon, karbon dioksida dan awan. Ozon menyerap inframerah dalam daerah panjang gelombang antara 9,4 μm dan 9,8 μm . Karbon dioksida dalam daerah antar 13,1 μm dan 16,9 μm , sedangkan awan menyerap dalam daerah semua panjang gelombang. Selain penyerap utama tersebut uap air menyerap radiasi radiasi bumi pada daerah panjang gelombang dari 5,3 μm sampai 7,7 μm dan diatas 20 μm .

Reradiasi. Bagian radiasi bumi yang diserap bersama-sama dengan bagian radiasi matahari yang diserap memanaskan atmosfer. Pemanasan ini mendorong atmosfer memancarkan radiasi.

Jadi atmosfer memancarkan kembali radiasi bumi yang diserapnya. Pemancaran kembali ini berlangsung ke semua arah, sebagian ke atas menuju angkasa luar dan sebagian ke bawah, ke permukaan bumi kembali. Yang terakhir ini dinamakan *radiasi balik*. Awan juga memancarkan kembali radiasi bumi yang diserapnya, dalam hal ini awan berlaku sebagai benda hitam, sehingga awan dan suhu puncaknya dapat diamati dari satelit, baik pada siang maupun malam hari dengan menggunakan sensor inframerah.

Diteruskan banyaknya radiasi bumi yang diserap atmosfer adalah 95 persen sedangkan sisanya 5 persen, diteruskan tanpa dipengaruhi atmosfer sama sekali dan langsung meninggalkan bumi menuju angkasa luar. Radiasi bumi yang langsung ke angkasa luar ini mempunyai panjang gelombang yang terletak antara 8 μm dan 14 μm . Daerah panjang gelombang ini dinamakan *jendela atmosfer* atau jendela radiasi.

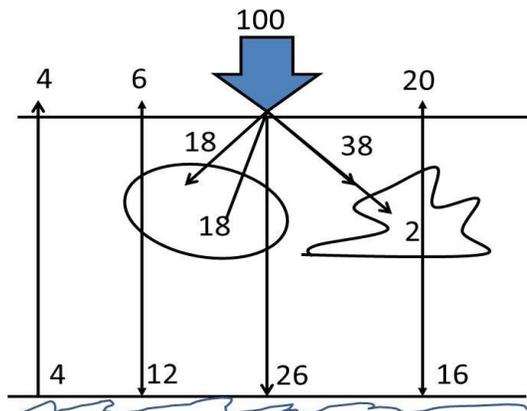
Untuk planet Bumi telah diketahui prosentase rerata radiasi Matahari yang diserap maupun disebarkan. Dalam hal ini komponen tersebut setelah dibulatkan adalah

| Diserap | Dipantulkan |
|------------------------|------------------------------------|
| Debu dan molekul = 15% | Debu dan molekul (Scattering) = 5% |
| Awan = 3% | Awan = 21% |
| Permukaan Bumi = 50% | Permukaan = 6% |
| Jumlah $i_o = 68\%$ | Jumlah $I = 32\%$ |

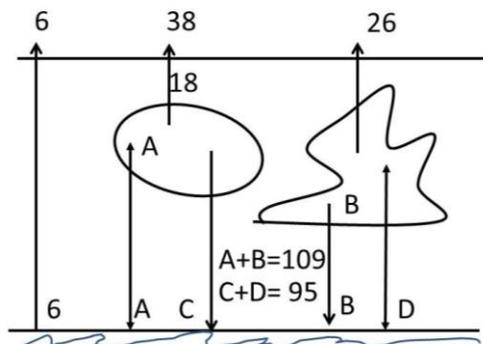
Jadi albedo Bumi adalah $A = \frac{I}{I_0} = 47\% = 0,5$

Selanjutnya diperlihatkan sisitim neraca radiasi sistim bumi-atmosfer

Neraca radiasi sistem bumi-atmosfer



Radiasi matahari dalam perjalanannya memasuki sistim bumi-atmosfer mulai dari puncak atmosfer, atmosfer dan permukaan bumi
 Masuk puncak atmosfer
 $100 - 4 - 6 - 20 = 70$
 Diserap atmosfer
 $18 + 2 = 20$
 Masuk permukaan bumi
 $12 + 26 + 16 - 4 = 50$



Radiasi bumi dalam perjalanannya meninggalkan permukaan bumi.
 Meninggalkan puncak atmosfer $6 + 38 = 26 = 70$
 Meninggalkan atmosfer
 $(C + D) + 38 + 26 - (A + B) =$
 Meninggalkan permukaan bumi
 $6 + 109 - 95 - 4 = 20$

Neraca Radiasi Atmosfer Titan

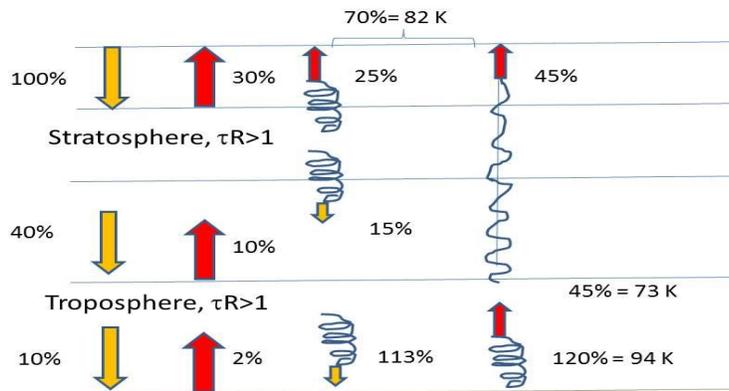


Diagram neraca radiasi pada daerah stratosfer dan troposfer Titan. Garis lurus menunjukkan radiasi matahari dan garis bergelombang menunjukkan radiasi panas infra merah. Unit fluks merupakan persen dari rata-rata global radiasi matahari pada atmosfer atas Titan. Temperatur emisi troposfer (dekat daerah tropopause) dapat dijelaskan oleh efek anti rumah kaca, temperaturnya 9 K (82-73 K) lebih dingin dari temperatur efektif. Peningkatan temperatur dari daerah tropopause hingga permukaan akibat efek rumah kaca yaitu 21 K (94-73 K), hasil dari radiasi panas infra merah (113%) yang diemisikan dari atmosfer rendah dan menghangat di permukaan. τ_{IR} menyatakan tebal optik dalam infra merah.

Anggota Tata Surya memancarkan energi radiasi sebagai fungsi dari temperatur dan panjang gelombang yang dapat dinyatakan oleh Hukum Planck :

$$B(\nu) = \frac{\left(\frac{2h\nu^3}{c^2}\right)}{\left\{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1\right\}} \quad (1.8)$$

Besaran ini menyatakan fluk yang dipancarkan persatuan frekuensi persatuan sudut ruang, dalam sistem cm-gram-detik (CGS) dimensi untuk $B(\nu)$ adalah $[\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{Hz}^{-1} \text{sr}^{-1}]$ Atau dapat juga dinyatakan dalam bentuk yang identik

$$B(\lambda) = \frac{\left(\frac{2hc}{\lambda^3}\right)}{\left\{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1\right\}} \quad (1.9)$$

Dalam hal ini untuk sistem cm-gram-detik (CGS) dimensi untuk $B(\lambda)$ adalah $[\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{sr}^{-1}]$. Dan dapat diperlihatkan hasilnya adalah untuk semua panjang gelombang atau frekuensi adalah ;

$$\int_0^{\infty} B(\nu) d\nu = \int_0^{\infty} B(\lambda) d\lambda = \sigma T^4 \quad (1.10)$$

Satuan dalam sistim cgs adalah;

$B(\nu)$ adalah fluks yang dipancarkan persatuan frekuensi persatuan sudut ruang (dalam $\text{ergs}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{Hz}^{-1} \text{sr}^{-1}$), σ konstanta Stefan, h konstanta Planck, k konstanta Boltzman, c kecepatan cahaya (dalam cms^{-1}), ν frekuensi (dalam Hz) dan T temperatur (dalam K). $B(\lambda)$ menyatakan fluks yang dipancarkan persatuan panjang gelombang persatuan sudut ruang ($\text{ergs}^{-1}, \text{cm}^{-2} \text{sr}^{-1}$).

Dua besaran lain yang sering digunakan dalam astrofisika adalah;

Satu persentimeter, Cm^{-1} (bilangan gelombang), satuan frekuensi. Kebalikan dari panjang gelombang dinyatakan dalam cm, misalnya bilangan gelombang persatuan jarak

Micron (μm), satuan panjang gelombang, 10^{-6}m , 10^{-4} cm. Panjang gelombang $100\mu\text{m}$ ($=10^{-4}\text{m}$), berkaitan dengan bilangan gelombang 100. Panjang gelombang $1 \mu\text{m}$ ($=10^{-6}$ m) berkaitan bilangan gelombang 10000

Temperatur benda hitam dengan frekuensi ν_0 ketika emisi menjadi maksimum dapat diperoleh dengan meletakkan syarat $dB/d\nu = 0$. Diperoleh pernyataan tentang hukum Wien;

$$T/\nu_0 = 0,5099 \text{ cm K} \quad (1.11)$$

Selain itu panjang gelombang λ_m yang mengakibatkan $B(\lambda)$ maksimum dapat dihitung dari pernyataan hukum Wien dalam bentuk hubungan panjang gelombang dan temperatur

$$\lambda_m T = 2880 \mu\text{m K} = 0,288 \text{ cm K} \quad (1.12)$$

Semakin dingin objek itu, semakin besar panjang gelombangnya, akibatnya objek Tata Surya tersebut tidak dapat terlihat dalam rentang optic (optical region) karena pantulan cahaya dari Matahari; ini merupakan komponen kedua dari emisinya. Ketika foton yang berasal dari Matahari dihadang oleh benda Tata Surya (solar system body) foton akan diabsorpsi atau dipantulkan kembali ke angkasa. Dalam hal terjadi absorbs, foton tersebut akan dikonversi menjadi energi termal, kemudian disebarkan kembali dalam bentuk radiasi inframerah. Dalam kasus yang kedua foton akan langsung dipantulkan atau didifusi sebelum dipancarkan lagi ke angkasa. Kedua komponen spectral ini, thermal dan reflected (pantulan) ditemukan pada semua planet, demikian pula halnya untuk komet.

Intensitas komponen refleksi dari radiasi Matahari tidak bergantung pada temperatur objek, melainkan pada kuantitasnya yang dikenal sebagai *albedo*. Menurut definisi Bond (1861), albedo adalah rasio dari fluks pantulan objek ke semua arah dengan fluks cahaya parallel yang diiluminasi atau diserap. Albedo ini berhubungan dengan koefisien refleksi (pantulan) dari permukaan atau dari awan yang memantulkan kembali radiasi Matahari.

Untuk kasus planet terrestrial dan objek minor, sumber energi internal tidak memainkan peran penting dalam menentukan

keseimbangan energi permukaan. Akibatnya, pancaran energi thermal yang dihasilkan bukan dari pengubahan radiasi Matahari yang tidak dipantulkan, melainkan yang diserap oleh objek. Hubungan sederhana albedo dan temperatur dinyatakan sebagai persentase energi pantul Matahari. Temperatur benda hitam akan memancarkan energi termal dalam jumlah yang sama dengan yang dia terima. Suhu ini dikenal sebagai temperatur efektif. Apabila energi thermal tidak ada, maka temperatur efektif akan mempunyai hubungan sebagai berikut: (Blanc, 1998)

Untuk objek berotasi cepat,

$$\frac{F_o}{D} \pi R^2 (1-A) = \sigma T_e^4 4\pi R^2 \quad (1.13)$$

Untuk objek berotasi lambat (misal Venus)

$$\frac{F_o}{D} \pi R^2 (1-A) = \sigma T_e^4 2\pi R^2 \quad (1.14)$$

Sedangkan untuk temperatur efektif dapat dinyatakan sebagai berikut :

Untuk objek berotasi cepat,

$$T_e = 273 D^{-1/2} (1-A)^{1/4} \quad (1.15)$$

Untuk objek berotasi lambat, temperatur efektif dapat dihitung dari pernyataan

$$T_e = 324 D^{-1/2} (1-A)^{1/4} \quad (1.16)$$

dalam hal ini;

F_o = fluks Matahari pada jarak 1 sa (yang diterima di Bumi)

T_e = temperatur efektif planet

A = albedo planet

D = jarak heliosentrik objek dalam au

1.7 Planet Kebumian (Terrestrial) dan Raksasa

Secara fisik, planet dalam Tata Surya dapat dibagi menjadi 2 kelompok ;

Planet Terrestrial (Mercurius, Venus, Bumi, dan Mars), dekat dengan Matahari, berukuran kecil, planet ini lebih kecil dari Bumi tapi memiliki kerapatan yang tinggi (dari 3 – 6 gr/cm³). Memiliki beberapa satelit dan ada yang tidak memiliki satelit, juga tidak memiliki cincin. Planet terrestrial memiliki permukaan yang padat dan memiliki atmosfer dimana untuk Venus sangat rapat, dan renggang untuk Mercurius.

Planet Gas atau Raksasa (giant Planets) terdiri dari Jupiter, Saturnus, Uranus, dan Neptunus, memiliki kemiripan satu dengan yang lainnya, berada jauh dari Matahari, memiliki ukuran yang lebih besar dari terrestrial planet. Rapat masanya rendah, mengandung hydrogen dan helium. Atmosfer planet mencapai tekanan yang beragam karena banyaknya lapisan atmosfer, memiliki inti yang padat di pusatnya. Memiliki beberapa satelit, lebih dari 63 untuk Jupiter.

Jupiter dan Saturnus sangat terang dibanding planet yang lain, sedang Uranus dan Neptunus memiliki jarak yang lebih jauh. Pluto, setelah Neptunus, dia digolongkan dalam kelas tersendiri, berukuran kecil, kerapatan rendah, dan lebih mirip satelit dari planet. Dapat dikatakan bahwa planet terbentuk dari pertumbuhan secara perlahan-lahan dari materi antar planet yang membentuk kelompok-kelompok yang lebih besar. Semakin jauh dari Matahari, temperatur

semakin rendah, sehingga es tidak dapat menyublim karena temperatur yang sangat rendah itu.

1.8 Atmosfer Primordial dan Sekunder

(Primitive and Secondary Atmosphere)

Untuk dapat memahami komposisi kimia dari atmosfer planet, diperlukan penjelasan tentang kecepatan lepas, *escape velocity*. Untuk objek dengan massa m , berada pada medan gravitasi planet dengan massa M , dan jarak R dari pusat, maka escape velocity V_{esc} dinyatakan dengan:

$$\frac{1}{2}mV_{esc}^2 = \frac{GMm}{R} \quad (1.17)$$

Dari bentuk diatas kita dapatkan :

$$V_{esc} = \sqrt{\frac{2GM}{R}} \quad (1.18)$$

Jika temperatur atmosfer planet dinyatakan dengan T , dan m massa partikel maka dengan menggunakan distribusi [Maxwell-Boltzmann](#), kita dapatkan kecepatan thermal.

$$V_{th} = \sqrt{\frac{2kT}{m}} \quad (1.19)$$

dalam hal ini k -konstanta Boltzmann, m massa molekul gas, kemungkinan molekul akan meninggalkan atmosfer yang ada bergantung pada hubungan v_{esc} dan v_{th} .

Untuk gas ideal pernyataan dipenuhi hubungan; $PV = nRT$ dimana P -tekanan (pascal), V -volume (m^3), n -jumlah gas (molar), R -tetapan gas $=8,314 \text{ J mol}^{-1}\text{K}^{-1} = 8314 \text{ gm}^2\text{mol}^{-1}\text{K}^{-1}\text{s}^{-2}$ dan T -temperatur (Kelvin). Masing-masing gas mempunyai tetapan yang spesifik (R_s)

hubungannya adalah $R_s = \frac{R}{M} = \frac{k}{m}$ dengan M-berat molekul (gram mol⁻¹) sehingga (1.19) dapat diubah menjadi,

$$V_{th} = \sqrt{\frac{2RT}{M}}$$

Berat molekuler (molar) untuk bermacam molekul gas ditunjukkan dalam Tabel 1-3

Tabel 1- 4 Berat molekul untuk bermacam unsur gas diragakan dalam table berikut.

| Unsur | CO2 | O2 | N2 | H2O | He | H |
|----------|-----|----|----|-----|----|---|
| M(g/mol) | 44 | 32 | 28 | 18 | 4 | 1 |

Sedangkan kecepatan thermal untuk gas tersebut untuk berbagai nilai T tertentu diragakan dalam Tabel 1-4

Tabel 1- 5 Kecepatan paling mungkin untuk masing-masing gas sebagai fungsi temperature T

| | Kecepatan paling mungkin V_{th} untuk bermacam gas dalam km/s | | | | | |
|------|---|------|------|------|-------|-------|
| T | CO2 | O2 | N2 | H2O | He | H |
| 1000 | 6,15 | 7,21 | 7,71 | 9,61 | 20,39 | 40,78 |
| 900 | 5,83 | 6,84 | 7,31 | 9,12 | 19,34 | 38,69 |
| 800 | 5,50 | 6,45 | 6,89 | 8,60 | 18,24 | 36,47 |
| 700 | 5,14 | 6,03 | 6,45 | 8,04 | 17,06 | 34,12 |
| 600 | 4,76 | 5,58 | 5,97 | 7,44 | 15,79 | 31,59 |
| 500 | 4,35 | 5,10 | 5,45 | 6,80 | 14,42 | 28,83 |

| | | | | | | |
|-----|------|------|------|------|-------|-------|
| 400 | 3,89 | 4,56 | 4,87 | 6,08 | 12,90 | 25,79 |
| 300 | 3,37 | 3,59 | 4,22 | 5,26 | 11,17 | 22,33 |
| 200 | 2,75 | 2,75 | 3,22 | 3,45 | 4,30 | 9,12 |
| 100 | 1,94 | 1,94 | 2,28 | 2,44 | 3,04 | 6,45 |
| 50 | 1,37 | 1,61 | 1,72 | 2,15 | 4,56 | 9,12 |
| 10 | 0,61 | 0,72 | 0,77 | 0,96 | 2,04 | 4,08 |

Escape velocity, tidak bergantung pada massa partikel, akan semakin besar pada planet yang lebih massive. Sedangkan kecepatan thermal akan semakin besar jika harga T semakin besar dan semakin kecil massa molekuler partikel yang ditinjau. Dari kecepatan [lepas molekul](#) dapat kita lihat molekul akan lebih mudah meninggalkan atmosfer jika planetnya bermassa kecil dan bertemperatur tinggi.

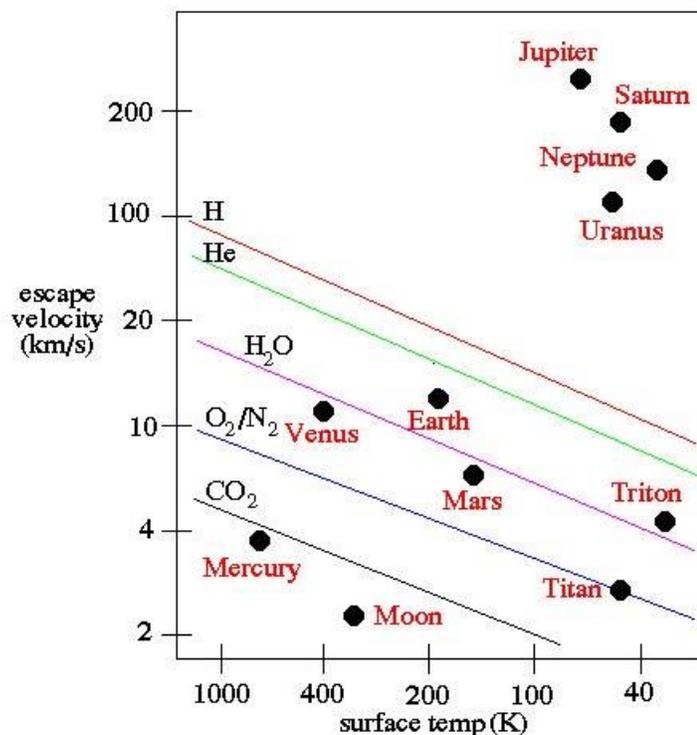
Hal ini juga menjelaskan mengapa planet besar dapat menyimpan hampir semua elemennya, bahkan yang paling ringan. Atmosfer planet ini, yang komposisinya menggambarkan sifat gas nebula, yang sederhana “primitive”, terdiri dari 90% hydrogen dan 10% helium, elemen lainnya merupakan CH_4 , NH_4 , dll.

Tabel 1- 6 Temperatur permukaan rerata (baris-2) dalam derajat K dan kecepatan lepas (baris-3) dalam km/s untuk anggota Tata Surya.

| Merku rius | Ven us | Bu mi | Bul an | Ma rs | Jupit er | Satur nus | Tit an | Uran us | Neptu nus | Plu to |
|---------------|-----------|----------|-----------|----------|-------------|--------------|-----------|------------|--------------|-----------|
| 620 | 400 | 350 | 253 | 320 | 120 | 90 | 90 | 63 | 50 | 44 |
| 4,3 | 10,3 | 11,2 | 2,4 | 5 | 59,5 | 35,6 | 2,65 | 21,2 | 23,6 | 1,2 |

Planet kebumihan/mirip Bumi (terrestrial), tidak dapat menyimpan elemen yang ringan. Atmosfernya terdiri dari C, N dan O. Atmosfer sekunder (secondary atmosfer), kemungkinan berasal dari proses *degassing* atau dari evolusi kimia dan evolusi biologi.

Proses ini menjelaskan kenapa terjadi perbedaan komposisi kimia dalam [atmosfer](#) planet terrestrial. Semua satelit alam umumnya berasal dari planet induk. Kecuali Bulan untuk Bumi, Phobos dan Deimos untuk Mars atau Charon untuk Pluto. Menjelang abad 21 ketika Voyager melintasi Saturnus dan Neptunus ditemukan pola orbit satelit alami yang tidak lazim, *irregular moons* [di Saturnus](#) maupun [di Neptunus](#).



Gambar 1- 9 Kecepatan lepas untuk bermacam planet dan komposisi molekul di atmosfer.

1.9 Tujuh Satelit Terbesar

Berikut diberikan informasi mengenai 7 satelit terbesar dalam Tata Surya kita.

Tabel 1- 7 Tujuh satelit terbesar dalam Tata Surya. D=diameter dalam km, M=massa satelit dalam kg, ρ =rapat massa dalam kg/m^3 dan Atm=keberadaan atmosfer benda langit. D garis tengah planet {km}. d-jejari satelit [km]. ρ [kg/m^3]. Atmosfer [ada/tidak ada]

| | <u>Bulan</u> | Io | Europa | Ganymede | Callisto | Titan | <u>Triton</u> |
|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| D | Bumi 12756 | Jupiter 142800 | Jupiter | Jupiter | Jupiter | Saturnus 120000 | Neptunus 48600 |
| D | 3476 | 3642 | 3130 | 5268 | 4806 | 5150 | 2706 |
| M | $7,35 \times 10^{22}$ | $8,93 \times 10^{22}$ | $4,80 \times 10^{22}$ | $1,48 \times 10^{23}$ | $1,08 \times 10^{23}$ | $1,34 \times 10^{23}$ | $2,15 \times 10^{22}$ |
| ρ | 3340 | 3530 | 2970 | 1940 | 1850 | 1880 | 2050 |
| Atm | Tidak ada | Ada | Ada |

Gambaran tentang ke tujuh satelit terbesar dalam Tata Surya diperlihatkan dalam ilustrasi berikut.



Gambar 1- 10 Profil tujuh satelit besar dalam sistim Tata Surya kita.

Titan adalah satu-satunya satelit Saturnus yang mempunyai atmosfer, menarik banyak ilmuwan untuk menelitinya. Komposisi kimia yang ditemukan di atmosfer Titan ditunjukkan dalam Tabel 1-3 berikut.

Tabel 1-8 Komposisi kimia atmosphere Titan (menurut Hunten, D., Saturn, T. Gehrels, ed, Tucson, University of Arizona Press). SR=Spektral region, rentang spectral dalam mili meter. T=tahun ditemukan. ABD=abundance, rasio kelimpahan relative terhadap hydrogen.

| Molekul | SR (μm) | T[year] | ABD |
|------------------------|----------------------|---------|---------------------------------------|
| N_2 | 0,1 | 1981 | 0,65-0,98 |
| A | Indirect detection | 1981 | 0-0,25 |
| CH_4 | 0,8 | 1944 | 0,02-0,10 |
| H_2 | 0,6 | 1975 | 2×10^{-3} |
| C_2H_2 | 13,7 | 1975 | 2×10^{-6} |
| C_2H_6 | 12,1 | 1975 | 2×10^{-5} |
| C_2H_4 | 10,5 | 1975 | 4×10^{-7} |
| CH_3D | 8,6 | 1975 | |
| C_3H_4 | 15,8 dan 30,8 | 1981 | 3×10^{-8} |
| C_3H_8 | 13,4 | 1981 | 4×10^{-6} |
| HCN | 14,0 | 1981 | 2×10^{-7} |
| C_2N_2 | 42,9 | 1981 | $10^{-8}-10^{-7}$ |
| HC_3N | 20 dan 15,1 | 1981 | $10^{-8}-10^{-7}$ |
| C_4H_2 | 45,4 dan 15,9 | 1981 | $10^{-8}-10^{-7}$ |
| CO_2 | 15,0 | 1982 | $1,5 \times 10^{-9}$ |
| CO | 1,6 | 1983 | $6 \times 10^{-5}-1,5 \times 10^{-4}$ |

Triton dideteksi mempunyai atmosfer namun hanya sedikit informasi yang baru diketahui yaitu ditemukan molekul CH_4 pada rentang spectrum 1,7 μm dan 2,3 μm

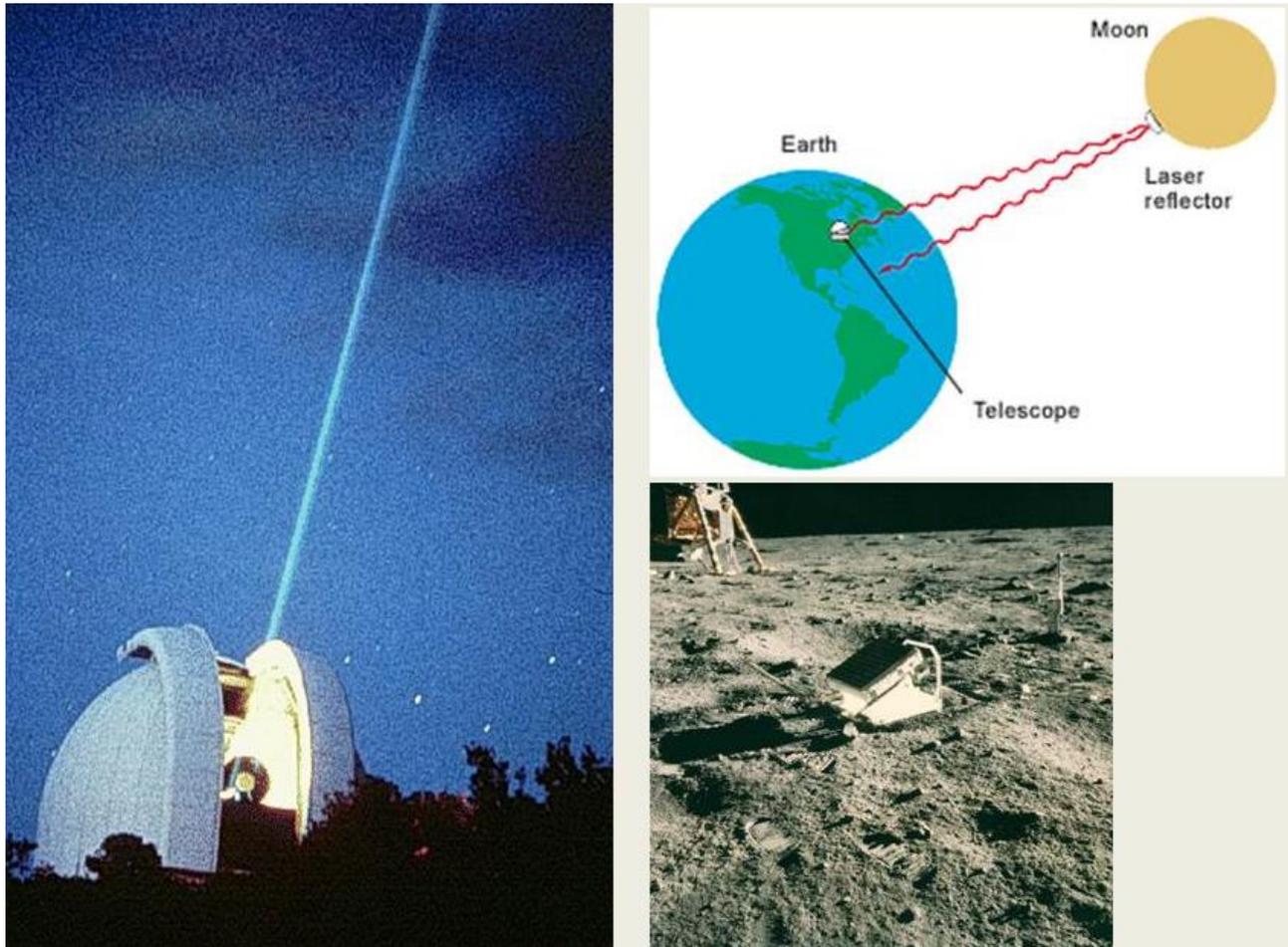
BAB 2 SATELIT, BENDA KECIL DAN KUIPER BELT OBJECTS

2. 1 Asal muasal Bulan

Pada tahun 1898 George Howard Darwin mengajukan teori tentang asal muasal Bulan. Menurut dia Bulan dan Bumi adalah suatu benda langit yang berasal dari anasir yang sama. Darwin mengatakan bahwa Bulan lepas dari Bumi akibat gaya sentrifugal. Dengan menggunakan mekanika Newton dia menunjukkan bahwa orbit Bulan sesungguhnya pada masa yang lalu lebih dekat dari sekarang dan berangsur-angsur menjauhi Bumi. Fakta ini didukung oleh percobaan yang dilakukan Amerika Serikat dan Sovyet. Penembakan dengan laser pada target yang telah ditempatkan di Bulan oleh awak Apollo memang menunjukkan jarak Bulan-Bumi semakin membesar. Perhitungan mundur Darwin tidak dapat membuktikan bahwa Bulan dulu pernah mempunyai jejari orbit yang sama dengan jejari orbit Bumi. Pandangan orang mulai berubah ketika Reginald Aldworth Day dari Harvard University pada tahun 1946 mengajukan teori lain. Inti sarinya, pembentukan Bulan lebih dimungkinkan oleh tumbukan dan bukan oleh gaya sentrifugal. Teori ini diperkuat kembali oleh William K Hartman dan Donald R Davis pada tahun 1975 dalam sebuah risalah di *Icarus Journal* gagasannya tentang asal mula Bulan dikenal dengan jargon hipotesa tumbukan dahsyat (*the giant impact hypothesis*). Bulan terbentuk akibat Bumi bertumbukan dengan asteroid Theia 4,5 milyar tahun lalu ketika Bumi masih sangat muda. Theia adalah proto planet yang menghuni titik Lagrange L5 dalam sistim Bumi-Matahari. Asteroid Theia yang menempati titik L5 tidaklah diam

tapi berayun-ayun disekitar titik kesetimbangannya. Akibat gangguan gravitasi dari planet yang lewat didekatnya rentang ayunan membesar secara gradual dan akhirnya menumbuk Bumi. Teori ini dikenal sebagai hipotesa tumbukan dahsyat (*the giant impact hypothesis*) sebagian material terlepas dari Bumi. Theia sendiri melebur ke dalam Bumi. Material yang *inelastic* menyebabkan serpihan tersebut beraglomerasi dalam tempo 20 sampai 30 juta tahun setelah tumbukan terjadi, makin lama makin padat dan terbentuklah Bumi dan Bulan seperti sekarang ini. Beberapa informasi yang telah diketahui orang adalah:

Bulan, memiliki ukuran yang besar dibandingkan dengan Bumi untuk bisa disebut sebagai satelit. Beberapa teori diberikan untuk mencoba menjelaskannya; mengatakan Bulan merupakan bagian yang terpisah dari Bumi, tertangkap oleh Bumi, atau merupakan anggota suatu formasi system ganda yang terpisah akibat gaya yang mendorong massa kearah luar secara radial, disebut gaya sentrifugal dari Matahari. Karena massa yang rendah, Bulan tidak dapat menyimpan atmosfer yang rapat; permukaannya, tertutup oleh bayangan gelap dan potongan-potongan bersinar yang disebut “laut” (maria) dan “continents” (terrae) – ditutupi oleh kawah yang terbentuk akibat tumbukan meteor.

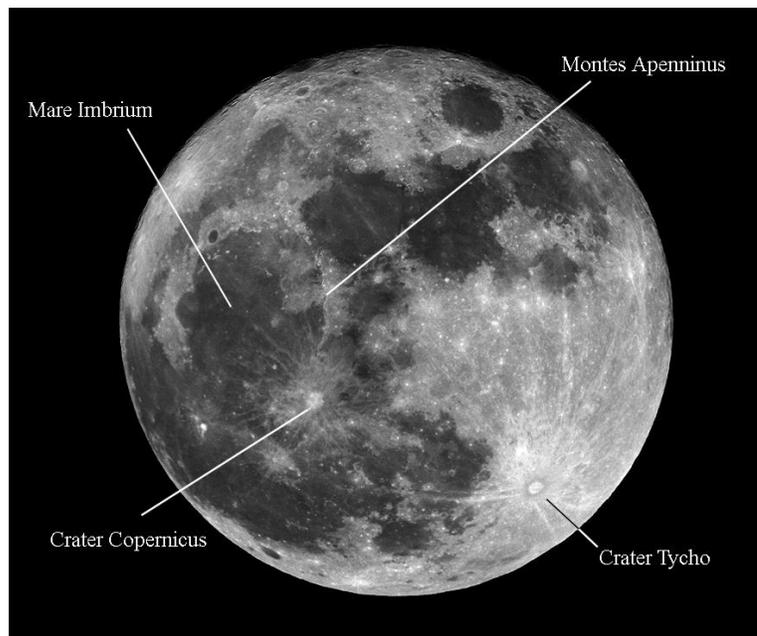


Gambar 1- 11 Pengukuran jarak Bumi-Bulan dengan menembakkan laser ke reflector yang telah ditempatkan oleh misi Apollo. Dengan mengetahui interval waktu ketika laser ditembakkan dan diterima kembali, jarak Bumi-Bulan dapat diketahui.

Karena massa yang rendah Bulan tidak dapat menyimpan atmosfer yang rapat. Permukaannya ditutupi oleh kawasan gelap yang disebut “laut” (maria) dan kawasan lain yang bercahaya disebut “continent” (terrae). Permukaan Bulan juga dipenuhi oleh kawah yang terbentuk akibat tumbukan meteor. Umur relative satu kawasan dapat

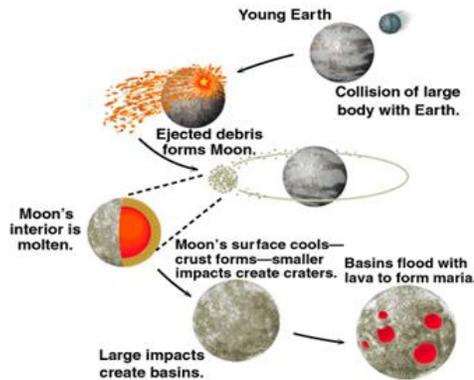
diperkirakan dengan cara membandingkan dengan kawasan yang lain. Berwarna cerah dan kemilau menunjukkan umurnya lebih muda dari yang berwarna gelap. Kawasan yang berada pada lapisan terbawah lebih tua dari yang ada di atasnya, menentukan umur dengan cara ini disebut metode sayatan melintang [sayatan melintang](#).

Sifat pantulan dari permukaan Bulan menunjukkan umur, kawasan berwarna gelap mempunyai umur yang lebih tua dari kawasan yang cemerlang.

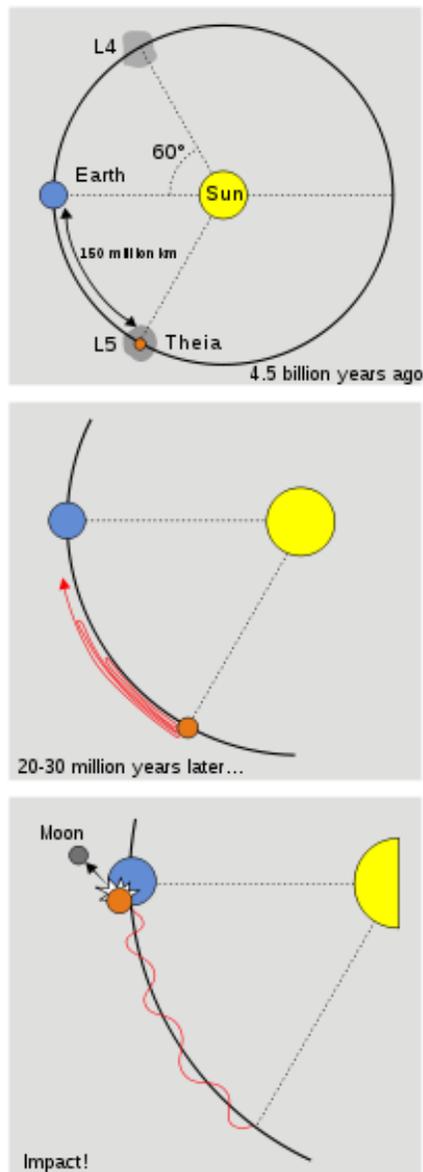


Gambar 1- 12 Kalau diurut kawasan yang terang adalah Crater Tycho-Crater Copernicus. Untuk Montes Apenninus dan Mare Imbrium tampak daerah yang lebih gelap adalah Mare Apenninum, selain itu Montes Apenninus adalah daerah yang ditutupi oleh Mare Imbrium dengan demikian kawasan ini lebih muda dari Montes Apenninus. Tidak cukup pasokan lava untuk menutup Crater

Copernicus. Tampak jejak lava yang mengalir dari crater Copernicus, namun tidak jelas disekitar crater Tycho. Oleh sebab itu urutan usianya dari yang paling muda ke tua adalah Crater Crater Tycho > Copernicus > Mare Imbrium > Montes Apenninus >



Gambar 1- 13 Proses terbentuknya Bulan. Asteroid menumbuk Bumi, pecahan yang *inelastic* mengakibatkan materi beraglomerasi dan membentuk embryo Bulan, dengan berjalannya waktu, Bumi dan Bulan akhirnya membentuk dirinya menjadi bola sempurna.



Sebagian materi Bumi yang terlempar dengan cepat menggumpal dan melekat satu sama lain. Proses ini diperkirakan berlangsung kurang dari satu abad. Bulan yang sudah terbentuk masih menerima materi sisa yang pernah ada sebelumnya, proses berlangsung secara kontinyu dan akhirnya membentuk Bulan. Teori ini didukung oleh fakta bahwa Bulan tidak mempunyai inti cair yang dapat terbentuk akibat dari tumbukan.

Hipotesa ini didukung oleh fakta bahwa permukaan Bulan pernah melebur. Bulan mempunyai inti besi yang relative kecil, hal yang sama ditemukan pada tumbukan dalam sistim bintang. Namun hipotesa ini masih meninggalkan banyak pertanyaan, antara lain; contoh bebatuan yang dibawa para astronaut dari Bulan tidak memperlihatkan rasio elemen volatile dengan iron oxide, seperti seharusnya diperlihatkan oleh unsur *siderophile*, yaitu unsur dengan rapat massa tinggi

Seperti Au, Co, Fe, Ir, Mn, Os, Pd, Pt, Re, Rh, dan Ru.

Unsur ini diikat dengan metallic iron dalam bentuk padat atau dalam keadaan meleleh. Kelemahan lainnya adalah Bumi tidak

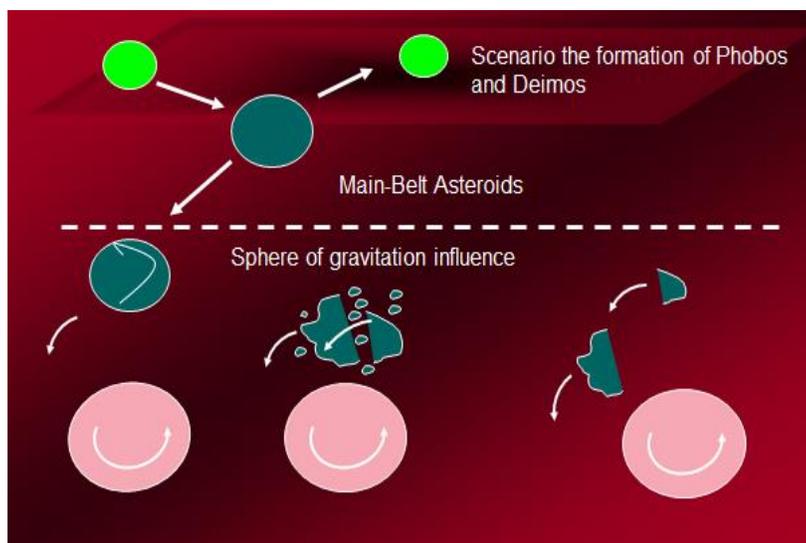
mempunyai lautan magma akibat tumbukan ini. Sebagai ringkasan dapat disimpulkan ada beberapa kelemahan hipotesa *giant impact*; Rasio element volatile Bulan tidak konsisten dengan hipotesa *giant impact*

Tidak ada bukti kuat bahwa Bumi pernah mempunyai lautan magma (sebagai akibat tumbukan besar masa lalu) dan ada material yang tidak pernah ditemukan pada lautan magma di Bulan.

Iron oxide (FeO) mengandung 13% gumukan material asal Bumi.

Jika gumukan material proto-lunar berasal dari impactor, Bulan akan diperkaya dengan siderophilic, namun tidak demikian yang terjadi.

Phobos dan Deimos, yang mengorbit Mars, merupakan objek yang solid dengan ukuran kecil dan bentuk yang tidak teratur (irregular); dengan ukuran masing-masing 25 km dan 15 km. Permukaannya, sangat tidak beraturan dan ditutupi oleh padatan bekas tumbukan batu meteor dalam jumlah besar yang terjadi sepanjang pembentukan Tata Surya.

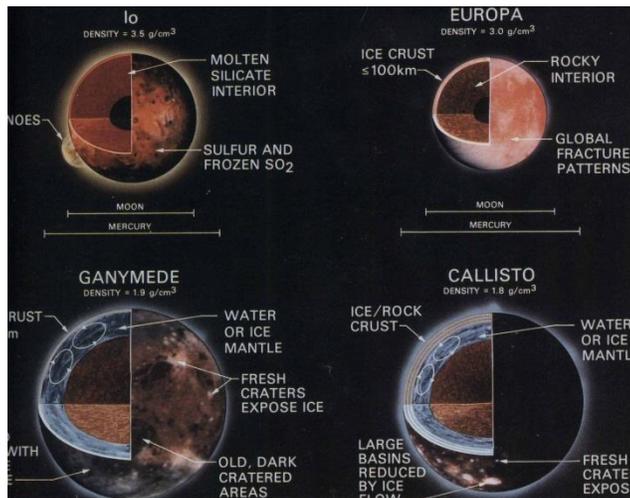


Gambar 1- 14 Proses terbentuknya satelit Mars. Ada dua asteroid yang bertumbukan tumbukan menyebabkan terbelahnya asteroid yang kurang masive. Asteroid masive meneruskan perjalanannya mengorbit Matahari, yang kurang masive masuk dalam bola pengaruh gravitasi Mars, kemudian pecah dua dan akhirnya menjadi satelitnya Mars

Satelit planet raksasa/planet Jovian dapat diklasifikasikan dalam beberapa kelompok. Jupiter mempunyai 4 satelit besar yang ditemukan oleh Galileo dan disebut Satelit Galilean (Io, Europa, Ganymede, dan Callisto). Permukaan dan bagian dalam Io mengalami perubahan yang drastis akibat evolusi pasang surut yang diterimanya ketika dekat dengan Jupiter. Ini merupakan sumber terjadinya peristiwa vulkanisme di satelit, Io. Satelit Galilean lainnya, tidak seperti satelit Bumi dan Mars, satelit Jupiter terdiri dari campuran es dan karang (rock); tidak satupun diantaranya yang mempunyai atmosfer. Disamping yang besar Jupiter juga memiliki satelit dengan diameter sekitar 100 km.

Saturnus memiliki beberapa satelit kecil yang terpisah dari kelompok utama (12 satelit) bergaris tengah antara 300 sampai 1500 km, tanpa atmosfer, dan permukaan banyak goresan dan sompal akibat benturan meteor padat.

. Umumnya mereka terdiri dari es. Beberapa satelit kecil telah ditemukan dekat cincin. Ada satu satelit Saturnus yang berbeda dari satelit lainnya namanya Titan, ini merupakan satelit terbesar dalam Tata Surya, setelah Ganymede, satelit ini diselubungi oleh atmosfer tebal dan ditemukan molekul organik kompleks. Oleh sebab itu sangatlah mungkin permukaan Titan ditutupi oleh lautan cairan



Gambar 1- 15 Struktur dalam satelit Galileo terdiri dari Io, Europa, Ganymede dan Callisto. Pada Io ditemukan aktivitas gunung api.

2. 2 Cincin Planet

Cincin Saturnus terdiri dari berbagai macam partikel dengan ukuran yang berbeda, yang terbesar berukuran sekitar beberapa kilometer. Galileo merupakan orang pertama yang melihat adanya perubahan cahaya dipancarkan di sekitar Saturnus. Dengan teleskop waktu itu belum dapat melihat jelas cincin Saturnus

Huygens kemudian memecahkan teka-teki ini, terdapat piringan disekeliling bidang ekuatorial planet, dari cahaya yang dipancarkan dan terlihat dari Bumi kemudian dikenali sebagai sebuah cincin.

Cassini kemudian menduga bahwa cincin tersebut tidaklah seragam, tetapi terdiri dari kawanan satelit kecil. Ide ini berasal dari kalkulasi mekanika benda langit oleh Laplace dan kemudian dikembangkan lagi oleh Maxwell.

Dari eksplorasi Voyager, kita ketahui bahwa cincin dibangun oleh banyak sekali objek kecil, yang kemungkinan tersusun dari es dan

butiran-butiran yang sulit dipecahkan oleh gaya gravitasi planet, partikel ini berputar bebas dalam orbit concentric. Asal mula cincin ini boleh jadi akibat fragmentasi satelit atau gumukan awan-awan primordial sisa-sisa pembentukan Saturnus sebagai sebuah planet. Planet yang memiliki cincin yang ditemukan kemudian adalah Jupiter dan Uranus. Perbedaan cincin pada ketiga planet ini; Uranus memiliki cincin dengan bentuk yang tajam, yang mempunyai albedo beberapa persen, dan mengandung es H₂O seperti yang ditemukan pada Saturnus. Cincin Jupiter, tipis dan gelap dan berada dekat dengan planet. Cincin juga ditemukan di planet Neptunus.



Gambar 1- 16 Jupiter, Saturnus, Uranus, dan Neptunus adalah planetluar yang mempunyai cincin.

2. 3 Asteroid

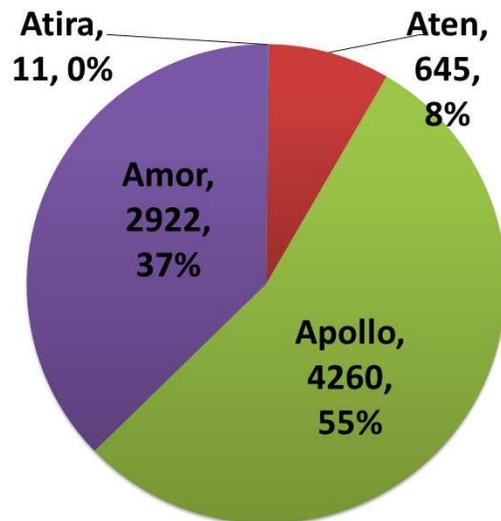
Asteroid pertama kali ditemukan pada awal abad ke-19, setelah para astronom menyadari adanya planet yang hilang antara Mars dan Jupiter dari perhitungan Hukum Bode pada $n = 3$. Asteroid besar adalah Cerres, Pallas, Juno dan Vesta.

Kebanyakan dari planet minor ini mengorbit pada jarak 2,2 dan 3,4au; dikenal sebagai kawasan sabuk asteroid. Sebagian besar berada dalam orbit Mars dan Jupiter, seperti halnya kasus Trojan. Lainnya memiliki orbit eliptik yang sangat lonjong dan hampir mendekati Bumi. Asteroid dengan pola orbit seperti ini dikenal dengan NEAs (Near Earth Asteroids) dikelompokkan dalam tipe Apollo-Amor-Aten (menjelang awal tahun 2010 diperkenalkan kelompok baru Atira). Sehingga AAA (Apollo-Amor-Aten) sekarang menjadi AAAA (Apollo-Amor-Aten-Atira)

Tabel 1- 9 Deskripsi dan kriteria orbit Asteroid Dekat Bumi (Near Earth Asteroids. NEAs). Q -jarak aphelium, q -jarak perihelium dan a -setengah sumbu panjang elips

| No | Kelompok | Deskripsi | Definisi |
|----|----------|--|--|
| 1 | Atiras | NEAs dimana orbitnya berada dalam orbit Bumi (mengikuti nama asteroid pertama yang memenuhi kriteria ini. 163693 Atira). | $Q < 0.983\text{au}$ |
| 2 | Atens | Asteroid memotong orbit Bumi (mengikuti nama asteroid pertama dalam kelompok ini, 2062 Aten). | $a < 1.0\text{au}$, dan $Q > 0.983\text{au}$ dan $q < 0.983\text{au}$ |
| 3 | Apollos | Asteroid memotong orbit Bumi (mengikuti nama asteroid pertama dalam kelompok ini, 2062 Aten). | $a > 1.0\text{au}$, dan $q < 1.017\text{au}$ |

| | |
|---|--|
| | Bumi (mengikuti nama asteroid pertama dalam kelompok ini, 1862 Apollo). |
| 4 | Amors Asteroid yang mendekati Bumi, $a > 1.0\text{au}$, dan 1.017 diluar orbit Bumi tapi masih $< q < 1.3\text{au}$ didalam orbit Mars (mengikuti nama asteroid pertama dalam kelompok ini, 1221 Amor). |



Gambar 1- 17 Populasi NEAs berdasarkan masing-masing keluarga per Desember 2011

Dari fisiknya, asteroid diklasifikasikan dari telaah komposisi permukaannya, dan umumnya dari albedo. Kelompok terbanyak adalah Tipe C (objek sangat gelap, mungkin memiliki permukaan carbon, albedo dibawah 0,06). Asteroid tipe C memberikan kontribusi populasi sekitar 60% dari total asteroid yang diketahui orang.

Asteroid type S (permukaan silikat, albedo sekitar 0,2 dengan spectra yang menunjukkan adanya silikat), sekitar 30% asteroid bertipe S; dan type M (objek dengan albedo 0,1, diperkirakan kaya akan metal/logam). Ada juga asteroid yang tidak mengikuti pola ini. Asteroid yang terakhir ini diklasifikasikan sebagai U-type asteroid (unclassified). Contohnya antara lain adalah Vesta, memiliki albedo 40% dan spektrumnya didominasi oleh pyroxene dan feldspar.



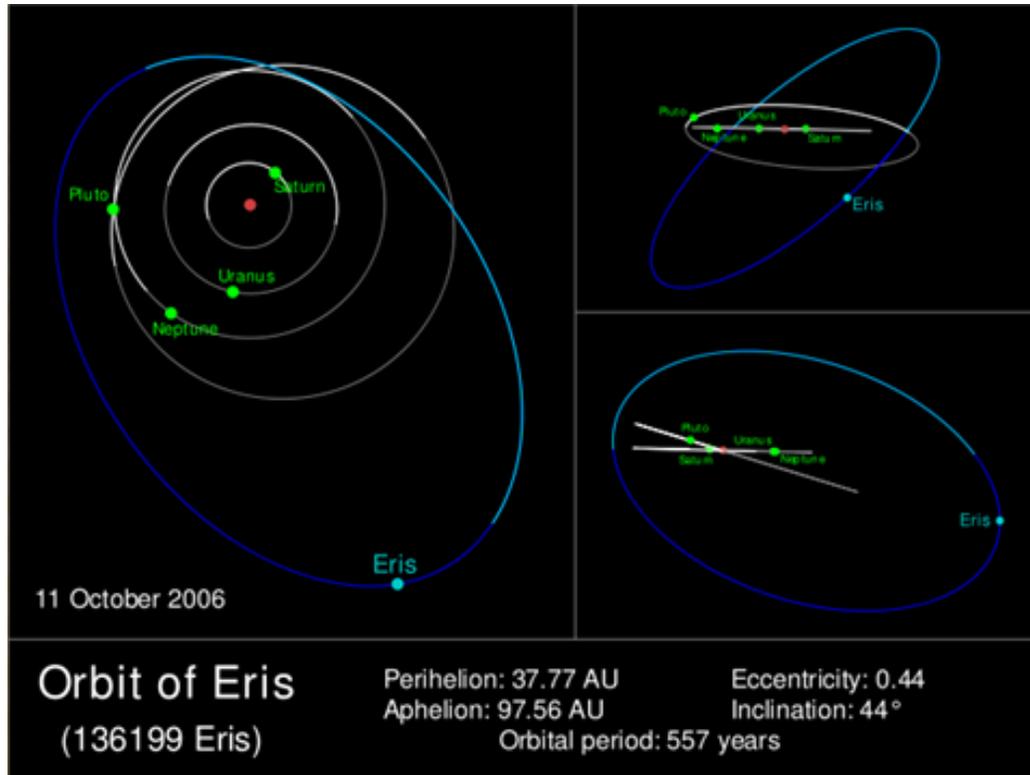
Gambar 1- 18 Dari kiri searah dengan putaran jarum jam. Asteroid Eros dipotret oleh misi NEAR (Near Earth Asteroid Rendezvous), Ida dan satelitnya Dactyl dipotret oleh misi Galileo, citra radar Galevka dan kawah besar di Vesta (warna biru), kanan bawah kawah besar Eros

Tabel 1- 10 Beberapa contoh asteroid dan besaran fisisnya

| Asteroid | Type | Mag semu | Diameter[km] | a [AU] |
|----------------|------|-------------|--------------|----------|
| 1 Ceres | C | 7,5 | 1032 | 2,767 |
| 2 Pallas | U | 8 | 588 | 2,772 |
| 3 Vesta | U | 6,5 | 576 | 2,361 |
| 10 Hygeia | C | 10 | 430 | 3,134 |
| 704 Interamnia | U | 11 | 338 | 3,061 |
| 511 Davida | C | 11 | 324 | 3,175 |
| 65 Cybele | C | 12 | 308 | 3,433 |
| 52 Europa | C | 11 | 292 | 3,103 |
| 451 Patienti | C | 11,5 | 280 | 3,063 |
| 15 Eunomia | S | 9,5 | 260 | 2,643 |

2. 4 Komet

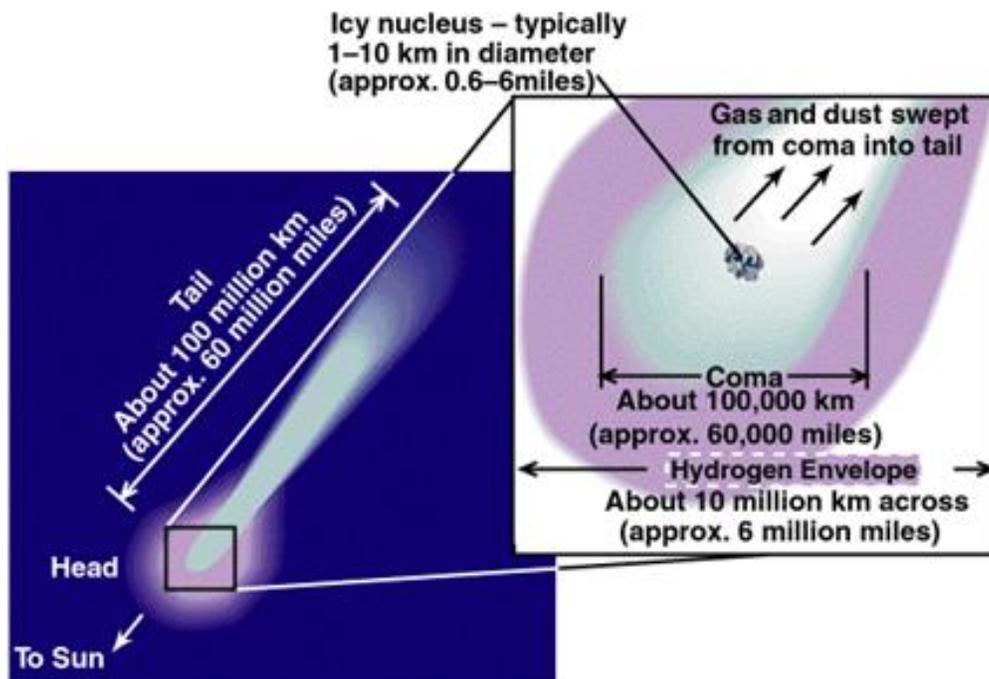
Seperti asteroid, komet merupakan objek “primitive” (sederhana). Tetapi karena massanya, yang tidak begitu besar tampak adanya inti(nuclei) komet, yang sangat kecil dan berevolusi dalam daerah yang sangat dingin. Akibat temperatur yang rendah di lingkungannya, komet juga berkemampuan "melindungi" dirinya dan tidak cepat rusak tidak hanya dari materi yang terkondensasi, tapi juga elemen yang mudah menguap. Ini menjelaskan mengapa komet kaya akan es dibanding planet minor.



Gambar 1- 19 Eris salah satu Kuiper Belt Objek (KBOs) mempunyai orbit dengan inklinasi besar dan periode panjang. Secara fisik menunjukkan asteroid, namun secara dinamik ia memperlihatkan sifat komet.

Komet bergerak sangat cepat. Pada jarak heliosentrik yang besar, komet mengandung nucleus lembam, tidak dapat dilihat mata bugil dan kemungkinan terdiri dari debu dan es, dengan diameter tidak lebih dari beberapa kilometer. Orbit komet membawa objek-objek yang dekat dengan Matahari, bersamaan dengan itu nukleus mengalami pemanasan oleh radiasi Matahari dan mulai menyublim,

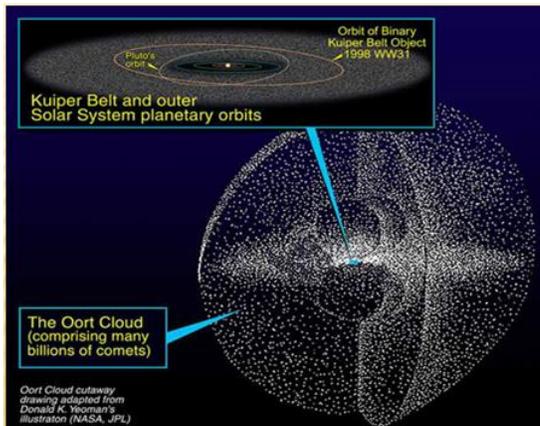
gas menguap, dan memancarkan partikel-partikel debu. Karena komet terus bergerak mengikuti orbitnya semakin dekat jaraknya ke Matahari semakin cepat proses ini, bekerja, itulah sebabnya kenapa terang maksimum akan terlihat ketika komet berada di perihelion.



Gambar 1- 20 Struktur komet, inti, koma dan ekor. Selubung hidrogen merangkum kawasan sampai 10 juta kilometer, sedangkan ekornya dapat mencapai 100 juta kilometer. Gas dan debu menyembur dari koma ke ekor.

Ditilik dari periodenya, komet dapat dibagi menjadi dua bagian: Komet periode pendek, memiliki orbit elips dengan periode kurang dari 200 tahun, dalam beberapa kasus periodenya hanya beberapa tahun.

Komet periode panjang, mempunyai periode lebih besar dari 200 tahun, orbitnya mungkin elips, parabola atau hiperbola, penemuannya tidak dapat diprediksi.



Komet diperkirakan berasal dari materi antar planet yang membeku, proses ini terjadi ketika ia berada jauh dari Matahari.

Proses membekunya air diduga mulai berlangsung ketika ia berada pada jarak ≥ 100 SA dari Tata Surya. Kawasan utama dimana komet bermukim dikenal dengan Awan Oort. (100000 SA- 200000 SA)

Gambar 1- 21 Awan Oort sebagai reservoir komet dan benda kecil Tata Surya lainnya

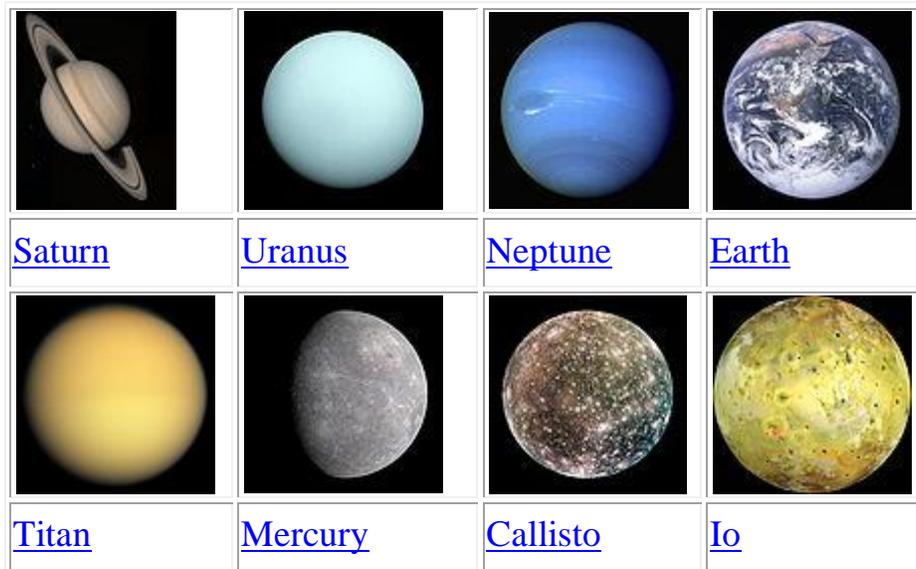
2. 5 Benda Kecil Bersifat Ganda

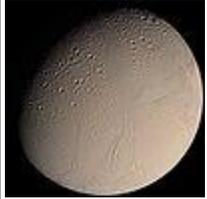
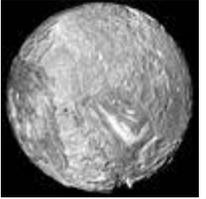
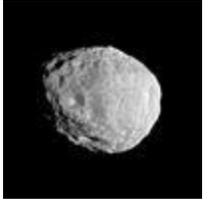
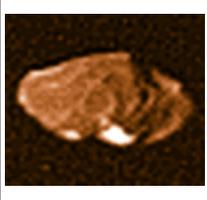
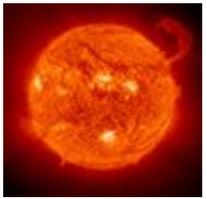
Chiron asteroid yang ditemukan awal tahun 1977, ketika ia mendekati perihelion dideteksi Chiron menyemburkan gas cyanogen dan selubung debu, keadaannya begitu cemerlang kondisi yang tidak normal untuk dapat disebut sebagai sebuah asteroid. Oleh sebab itu Chiron merupakan objek pertama dengan dua penamaan, ia sebagai komet 95P/Chiron dan sebagai asteroid ke 2060. Sejak saat itu Chiron dinyatakan sebagai benda kecil dengan dua personaliti, komet dan asteroid. Dalam nomenklatur sering dinyatakan dengan notasi 95P/Chiron=(2060) Chiron.

Asteroid 1977 VA ditemukan pada tahun 1977 ketika ditemukan orbitnya terlalu lonjong untuk disebut sebagai sebuah asteroid, comet-like asteroid. Ketika mendekati matahari orang menduga akan melihat selubung gas dan ekor. Telaah ulang plat fotografi di Palomar Sky Survey menyimpulkan bahwa orbit asteroid ini identik dengan lintasan komet yang ditemukan oleh Wilson dan Harrington pada tahun 1949. Sehingga asteroid ini kemudian dikenal sebagai 107P/Wilson-Harrington = (4015)Wilson-Harrington.

Komet 133P/Elst-Pizarro mempunyai orbit mirip main-belt asteroid mengelilingi matahari dalam orbit yang berada diantara Mars dan Jupiter, kadang-kadang menampilkan ekor debu. Benda kecil ini kemudian dikenal dengan 133P/Elst-Pizarro=(7968) Elst-Pizarro

Beberapa potret anggota tata Surya



| | | | |
|---|---|--|---|
|  |  |  |  |
| <u>Titania</u> | <u>Rhea</u> | <u>Oberon</u> | <u>Iapetus</u> |
|  |  |  |  |
| <u>Tethys</u> | <u>Vesta</u> | <u>Enceladus</u> | <u>Miranda</u> |
|  |  |  |  |
| <u>Phoebe</u> | <u>Janus</u> | <u>Amalthea</u> | <u>Epimetheus</u> |
|  |  |  |  |
| <u>Sun</u> | <u>Jupiter</u> | <u>Mars</u> | <u>Ganymede</u> |
|  |  |  |  |
| <u>Europa</u> | <u>Triton</u> | <u>Ariel</u> | <u>Dione</u> |

| | | | |
|---|---|--|--|
|  |  | | |
| Mimas | Hyperion | | |

2. 6 Medium Antar Planet

Anggota Tata Surya tidak hanya terdiri dari objek bermassa besar, namun ada anasir lain yang kecil, benda langit tersebut bergerak dalam ruang vakum yang tidak absolut. Namun melintas dalam ruang antar planet yang dihuni oleh awan primitif sisa-sisa pembentukan Tata Surya. Pada dasarnya materi antar planet terdiri dari 2 komponen:

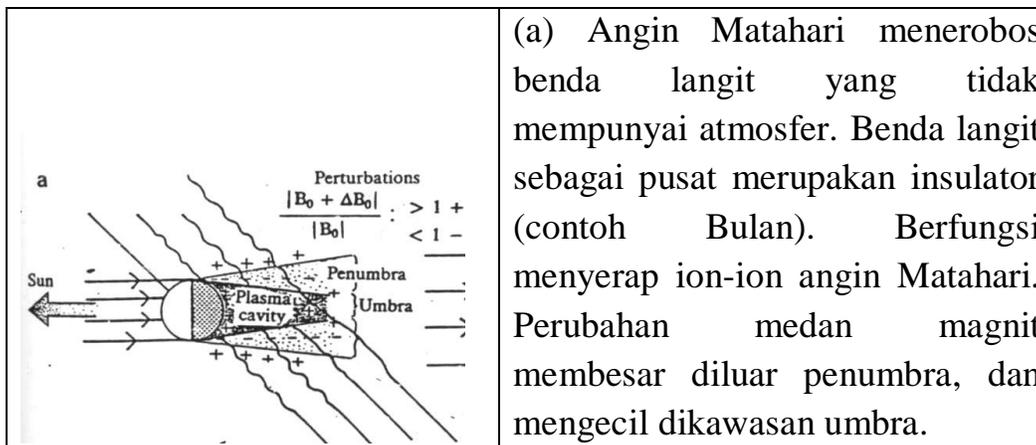
Fluks partikel terionisasi, berasal dari Matahari; yang disemburkan dalam bentuk angin matahari (*solar wind*). Komponen padat terdiri dari debu

2. 7 Angin Matahari (Solar Wind)

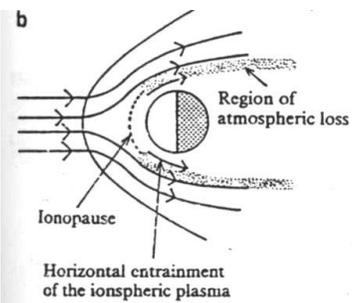
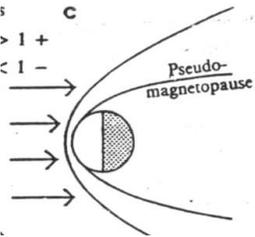
Angin Matahari merupakan partikel bermuatan listrik yang disemburkan oleh Matahari ke segala arah, bergerak dengan kecepatan tinggi. Dikenal dengan nama plasma bertemperatur sangat tinggi, sangat konduktif, bergerak dengan kecepatan supersonik $\cong 400\text{km/s}$ pada jarak 1 AU, membawa sekitar 2×10^8 partikel/cm²/s yang setara dengan 5 ions/cm^3 . Ion-ion ini berkomposisi dengan ratio 95% proton dan 5% inti helium. Mempunyai sifat magnetik yang dibawa dari ruang antar planet dan

Matahari. Pada jarak sekitar 1 au, diketahui bidang magnetik ini menyimpan muatan dari 1 sampai $10 \gamma^3$ ($1 \gamma = 10^{-5}$ Gauss) membesar dengan factor kelipatan 10 saat terjadi letupan energi Matahari yang menghasilkan emisi sinar kosmik.

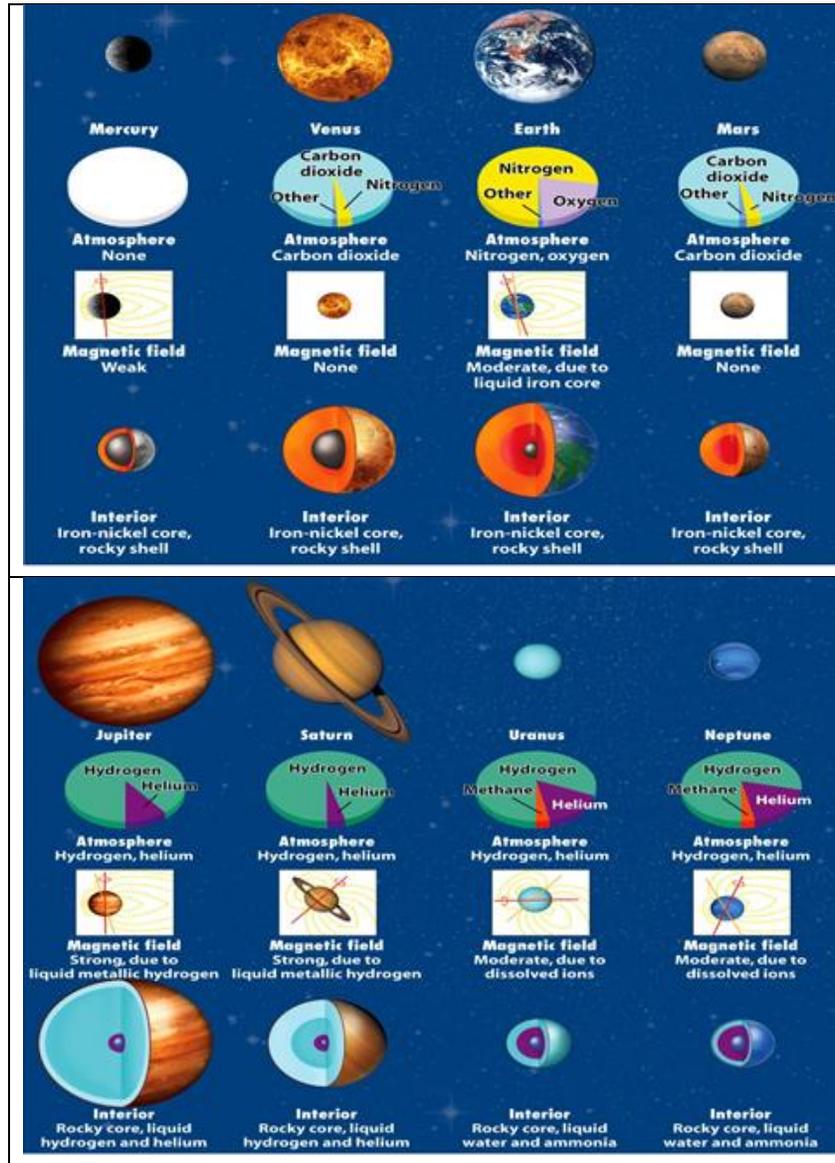
Interaksi angin Matahari dengan objek Tata Surya akan menghasilkan konfigurasi yang berbeda, bergantung pada objek tersebut apakah ia mempunyai selubung gas yang bersifat magnetik atau tidak. Objek yang mempunyai selubung gas bersifat magnetik adalah Venus, Mars, Titan dan Komet. Sedangkan yang tidak mempunyai selubung gas dan sifat magnetik adalah Io, Bulan dan kebanyakan satelit lainnya. Namun khusus untuk Io pendapat itu mulai berubah setelah ditemukannya jejak sulphur pada lintasannya. Sulphur yang berasal dari letupan gunung api. Gunung api yang timbul akibat semburan gas yang berasal dari gesekan diantara lapisan dibagian dalamnya, dikenal dengan sebutan pemanasan gaya pasang surut (*tidal heating*). Selain itu ada juga planet yang mempunyai bidang magnetik seperti Merkurius, Bumi, Jupiter dan Saturnus.



(a) Angin Matahari menerobos benda langit yang tidak mempunyai atmosfer. Benda langit sebagai pusat merupakan insulator (contoh Bulan). Berfungsi menyerap ion-ion angin Matahari. Perubahan medan magnet membesar diluar penumbra, dan mengecil dikawasan umbra.

| | |
|---|--|
|  <p>b</p> <p>Ionopause</p> <p>Horizontal entrainment of the ionospheric plasma</p> <p>Region of atmospheric loss</p> | <p>(b) Angin Matahari berinteraksi langsung dengan atmosfer bagian atas (contoh, Komet, Venus, Mars, dan Titan). Pada bagian siang terdapat kawasan tanpa ion (Ionopause). Pada bagian malam terdapat kawasan atmospheric loss</p> |
|  <p>c</p> <p>Pseudo-magnetopause</p> <p>$> 1 +$</p> <p>$< 1 -$</p> | <p>(c) Benda sentral tidak mempunyai atmosfer dan medan magnetik, merupakan konduktor yang baik. Benda sentral akan menghalangi fluks magnetik angin Matahari untuk masuk kebagian dalamnya. Akibatnya partikel akan melewati benda sentral dan bergerak dalam orbit parabola.</p> |

Gambar 1- 22 Pola angin Matahari disekitar planet dan benda kecil tata surya lainnya



Gambar 1-23 Komposisi kimia atmosfer, medan magnet dan struktur dalam planet untuk planet kebumihan (atas) dan planet raksasa (bawah). Medan magnet terjadi akibat adanya gesekan inti planet yang berbentuk cairan yang bergerak dengan bagian padat yang menimbulkan konduksi listrik (efek dinamo). Planet tanpa

medan magnet berarti hanya mengandung sedikit cairan (tidak ada), atau memiliki cairan tapi dalam keadaan yang tidak bergerak. (Gambar dari Cosmic Connection 7d, Universe, Eight Edition@ W.H.Freeman and Company)

2. 8 Debu Antar Planet

Keberadaan debu antarplanet ini dibuktikan oleh adanya meteor maupun meteorit yang secara kontinyu memasuki atmosfer Bumi.

Debu ini berasal dari erosi dan evolusi dan pecahnya inti Komet. Contohnya adalah yang terjadi pada Leonids, yang berasosiasi dengan komet Temple. Kasus lain Taurids yang berasosiasi dengan komet Encke. Peristiwa pecahnya inti komet akan menghasilkan partikel dengan rentang diameter 200 μm sampai beberapa sentimeter.

Objek yang mencapai permukaan Bumi tanpa dihancurkan total oleh atmosfer adalah meteorit. Massanya ≥ 1 kilogram. Meteorit ini kehilangan massanya saat menerobos masuk atmosfer. Dari beberapa catatan diperkirakan yang dapat mencapai tanah berkisar sekitar 2 – 10 meteor/hari. Hanya unsur masivlah yang dapat bertahan. Komposisi Meteorit terdiri dari logam, dapat juga terdiri dari campuran logam-silikat atau silikat saja. Selain dari Komet, boleh jadi Asteroid juga merupakan sumber asal meteorit. Keberadaan debu antarplanet dapat ditunjukkan melalui pengamatan cahaya zodiac (*zodiacal light*). Cahaya ini terbentuk akibat pantulan sinar Matahari oleh partikel-partikel debu yang ada di dalam Tata Surya. Ditemukan sekitar bidang ekliptika dalam arah berlawanan dengan kedudukan Matahari. Fenomena gerak partikel disekitar bidang ekliptika dikawasan yang berposisi dengan Matahari ketika diamati dari Bumi, dikenal sebagai

Gegenschein. Pada tahun 1983 satelit Iras menemukan fakta, debu ini tidak selalu tepat pada bidang ekliptika tapi dapat muncul pada latitude tertentu.

Tabel 1- 11 Sebaran massa dalam tata Surya kita

| Distribusi Massa dalam Tata Surya | |
|-----------------------------------|---|
| 99.85% | Matahari |
| 0.135% | Planet-planet |
| 0.015% | Comet, Kuiper Belt objects Satelit/bulan planet Planet Kerdil (Asteroid), Meteoroid Medium antar planet |

2. 9 Keragaman Tata Surya

Kajian tentang objek yang berada dalam Tata Surya, dibandingkan dengan observasi astronomi lainnya, terlihat adanya keterlibatan beberapa hal utama yang berubah-ubah terhadap waktu misalnya, luminositas. Penyebab perubahan ini ada bermacam-macam yakni :

2.9- 1 Keubahan oleh Matahari

Keubahan fluks radiasi Matahari yang diterima oleh anggota Tata Surya berakibat pada;

(1)Intensitas cahaya pada rentang UV dan pantulan spectrum objek terlihat jelas

- (2) Untuk kasus ionosfer planetary dan cometary, intensitas radiasi bervariasi pada panjang gelombang terpendek
- (3) Proses foto-kimia(photo-chemistry), proses penguraian dan ionisasi atmosfer planet dan bangun fisik Komet
- (4) Energi termal, energi inframerah yang dipancarkan kembali setelah proses absorpsi radiasi Matahari.

2.9- 2 Keubahan akibat proses internal

Keubahan ini sering terjadi dalam Tata Surya akibat posisi relatif objek terhadap Matahari. Banyak fenomena fisik yang terjadi akibat perbedaan jarak, terutama untuk objek dengan eksentrisitas besar.

Gerak objek mengelilingi Matahari mempunyai implikasi fisik. Sirkulasi atmosfer pada sebuah planet merupakan konsekuensi dari rotasinya. Seperti halnya yang terjadi pada osilasi sumbu rotasi Uranus, dan kemiringan orbitnya yang besar terhadap Matahari, memberikan implikasi pada struktur dalam planet, dan struktur fisik atmosfernya.

Perbedaan jarak heliosentrik dapat berakibat pada efek Doppler. Garis Franhoufer dalam spektrum Matahari memberikan fenomena yang berbeda dalam spectrum radiasi, panjang gelombang UV komet, dengan pola pantulan dalam daerah gelombang radio, yang dikenal sebagai efek Swing. Contoh lain adalah dampak evolusi pasang surut Jupiter terhadap satelit terdekat Io

Ilustrasi Energi Pasang Surut di Io

Sebagai ilustrasi andaikan lapisan Io bergerak turun naik rerata sepanjang $d=50$ m. Massa Jupiter, M_J . Massa Io, m_{Io} . Jarak

terdekat Io dari Jupiter, r_{per} dan jarak terjauh r_{Apo} . Jejari orbit Io r_{Io} .
Periode orbit Io, P_{Io}



Sejak lama diketahui permukaan Io menyemburkan gas H_2SO_4 . Aktivitas vulkanik di Io berasal dari pemanasan pasang surut akibat periode orbit yang sinkron. Magma meleleh di inti dan mencoba menerobos dan menyembul ke angkasa. Pengukuran distorsi di permukaannya menunjukkan bahwa permukaan dapat naik dan turun (kembang-kempis) sampai 100 meter selama setengah periode orbit.

Solusi

Gaya pasang surut,

$$\begin{aligned}
 F_{tidal} &= F(r_{Per} - r_{Io}) - F(r_{Apo} + r_{Io}) = -\frac{GM_J m_{Io}}{(r_{Per} - r_{Io})^2} + \frac{GM_J m_{Io}}{(r_{Apo} + r_{Io})^2} \\
 &= -\frac{GM_J m_{Io}}{r_{Per}^2 \left(1 - \frac{r_{Io}}{r_{Per}}\right)^2} + \frac{GM_J m_{Io}}{r_{Apo}^2 \left(1 + \frac{r_{Io}}{r_{Apo}}\right)^2}
 \end{aligned}$$

Karena, $r_{Per} = a(1-e)$, $r_{Apo} = a(1+e)$, $r_{Per} \gg r_{Io}$, $e \cong 0$ dan a – setengah sumbu major

Maka $F_{total} \approx -\frac{4GM_J m_{Io} r_{Io}}{a^3}$, menyatakan gaya pasang surut di ekuator

Dengan mengganti;

Massa Jupiter, $M_J = 1.89813 \times 10^{27} \text{ kg}$. Massa Io, $m_{Io} = 8.931938 \times 10^{22} \text{ kg}$.
 Jarak perijove, $r_{peri} = 420000 \text{ km}$, apojove $r_{apo} = 423400 \text{ km}$. Periode orbit, $P_{Io} = 152853 \text{ s}$ dan radius orbitnya. $a = 1821,6 \text{ km}$
 $(1+x)^n \approx 1+nx$ untuk $x \ll 1$

Perbedaan gaya pasang surut yang dialami di perijove dan apojove adalah

$$\Delta F = |F_{tidal}(r_{peri}) - F_{tidal}(r_{apo})|$$

$$= 4GM_J m_{Io} R_{Io} \left[\frac{1}{r_{peri}^3} - \frac{1}{r_{apo}^3} \right] = 2.66 \times 10^{19} \text{ N}$$

Akibatnya daya rerata dari kerja yang dilakukan pada bebatuan selama setengah orbit adalah

$$\bar{P} = \frac{\Delta F \cdot d}{P_{Io}/2} = 1.74 \times 10^{16} \text{ joule/s} \text{ atau } \bar{P} = 1,74 \times 10^{16} \text{ Watt}$$

2.9- 3 Gerak relative Benda Langit terhadap Bumi

Perbedaan jarak geosentrik objek dari satu waktu ke waktu yang lain seringkali terlihat, demikian pula halnya dengan rotasi objek. Akibatnya bagian permukaan atmosfer planet akan tampak berbeda dari satu waktu ke waktu yang lain ketika dilihat dari Bumi. Observasi terhadap gerak satelit yang mengelilingi planet dapat digunakan untuk mengetahui parameter orbit dan massanya.

2.9- 4 Konfigurasi Spesifik Sistem Matahari – Bumi - Objek

Observasi objek pada beragam sudut-phase (phase-angle, adalah sudut yang dibentuk pada konfigurasi Matahari-Objek-Bumi) dapat memberikan informasi tentang keadaan fisik partikel yang ada di permukaan maupun di dalam atmosfer. Untuk kasus Bulan, gerhana Matahari yang terjadi akibat radiasi Matahari terhalang oleh Bulan dapat dimanfaatkan untuk mempelajari korona dan kromosfer Matahari

2.9- 5. Konfigurasi Spesifik dari Sistem Bumi-Planet-Satelit atau Sistem Matahari-Planet-Satelit

Ketika Matahari "melewati" bidang ekuatorial planet Jupiter, Saturnus, Neptunus yang dikenal sebagai planet raksasa, akan terjadi gerhana matahari, yang dapat diobservasi dari Bumi, ketika satelit berada diantara Matahari dan planet raksasa tersebut, sedangkan gerhana satelit bisa terjadi apabila satelit berada dibelakang planet. Pengukuran yang telah dilakukan oleh banyak orang menyatakan adanya pemisahan komponen thermal pada rentang infra merah rata-rata.

2.9- 6 Studi Kasus

1. Dari hukum Planck

$$B(\nu) = \frac{\left(\frac{2h\nu^3}{c^2}\right)}{\left\{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1\right\}}$$

dan

$$B(\lambda) = \frac{\left(\frac{2hc}{\lambda^3}\right)}{\left\{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1\right\}}$$

buktikan bahwa hukum Wien dapat ditulis sebagai

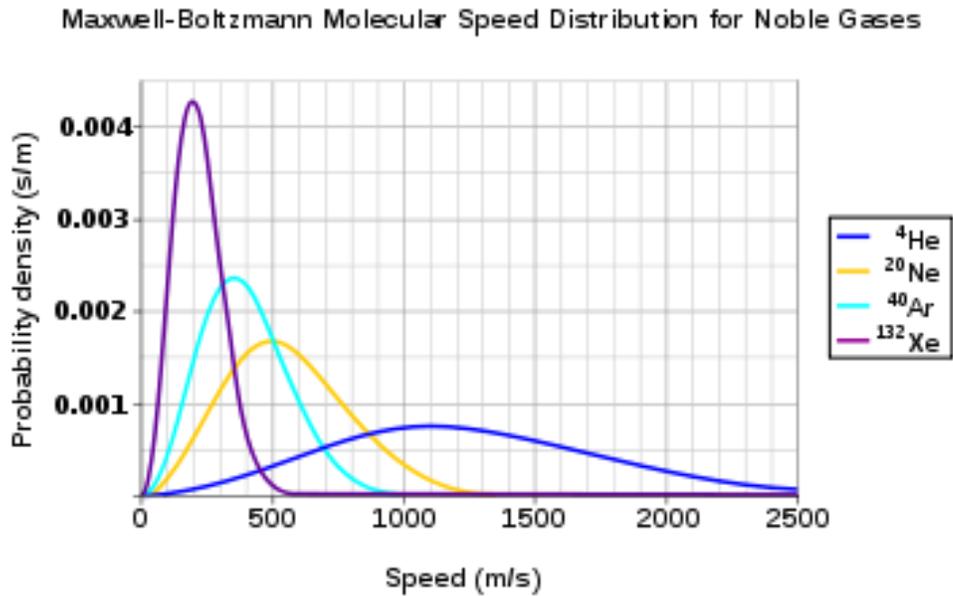
$$T/\nu_0 = 0,5099 \text{ cm K}$$

Selain itu panjang gelombang λ_m yang mengakibatkan $B(\lambda)$ maksimum dapat dihitung dari pernyataan hukum Wien dalam bentuk hubungan panjang gelombang dan temperatur

$$\lambda_m T = 2880 \mu\text{m K} = 0,288 \text{ cm K}$$

2. Dengan asumsi kecepatan partikel dalam suatu ruang bersuhu T mengikuti distribusi Maxwell-Boltzmann.

Ilustrasi



Gambar ini memperlihatkan pdf dari kecepatan gas mulia (noble gas) He, Ne, Ar dan Xe pada temperature 298.15 K (25.15 °C). Sumbu y dalam s/m sehingga luas daerah dibawah kurva tidak mempunyai dimensi (menyatakan probabilitas kecepatan dalam rentang bersangkutan)

Probability density function Maxwell-Boltzmann

$$f(v) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(\frac{m}{kT} \right)^{3/2} v^2 \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right)$$

Dengan parameter distribusi

$$a = \sqrt{\frac{kT}{m}}$$

Untuk keperluan praktis kecepatan dinyatakan sebagai kecepatan rerata partikel daripada kecepatan distribusi. Kecepatan rerata (mean speed), kecepatan median (most probable speed) dan kecepatan akar kuadrat (root-mean-square speed) dapat diperoleh dari distribusi Maxwell.

Distribusi kecepatan relatif

Kecepatan relative didefinisikan sebagai

$$u = \frac{v}{v_p}$$

Tunjukkan bahwa kecepatan thermal partikel tersebut dapat dinyatakan oleh,

$$v_p = \sqrt{\frac{2kT}{m}} = \sqrt{\frac{2RT}{M}}$$

Sebagai kecepatan yang paling mungkin (the most probable speed). Distribusi kecepatan relative bergantung pada temperature dan berat molekul gas (molecular weight).

Kecepatan yang paling mungkin v_p , adalah kecepatan yang dimiliki oleh molekul (dari massa yang sama m) dalam sistim dan berkaitan terhadap nilai maksimum atau median dari $f(v)$. Untuk mendapatkannya turunkan fungsi ini terhadap v dan nyatakan dengan nol

$$\frac{df(v)}{dv} = 0$$

Yang memenuhi:

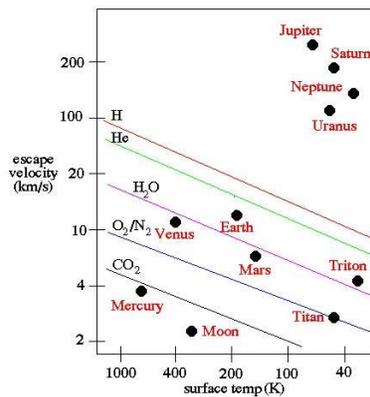
$$v_p = \sqrt{\frac{2kT}{m}} = \sqrt{\frac{2RT}{M}}$$

Dalam hal ini R adalah konstanta gas dan $M = N_A m$ adalah massa molar(molar mass) gas bersangkutan.

Untuk diatomic nitrogen N_2 yang merupakan komponen utama udara pada temperature kamar 300 K, memberikan $v_p = 422\text{m/s}$

4.

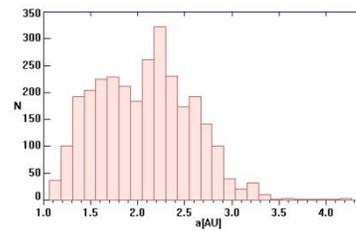
Buat model ikonik komposisi atmosfer planet sebagai fungsi dari temperature dan jelaskan kenapa pada planet terrestrial tidak dapat ditemukan unsur yang ringan. Ilustrasi



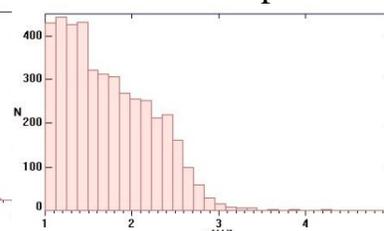
5. Dengan melakukan analisis Chi-Square Test, carilah fungsi distribusi dari element orbit NEAs dari kelompok Apollo, Amor, dan Aten

El.orbit Semimajor axis

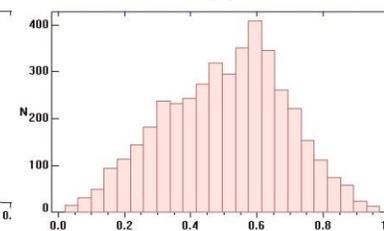
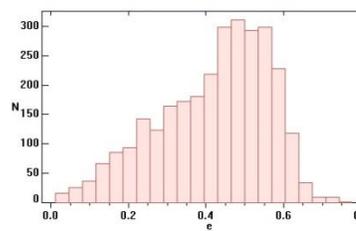
Element orbit Amors



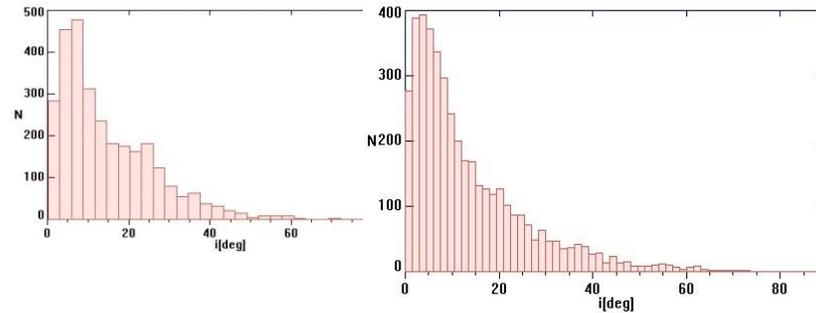
Element orbit Apollos



Eksentrisitas



Inklinasi



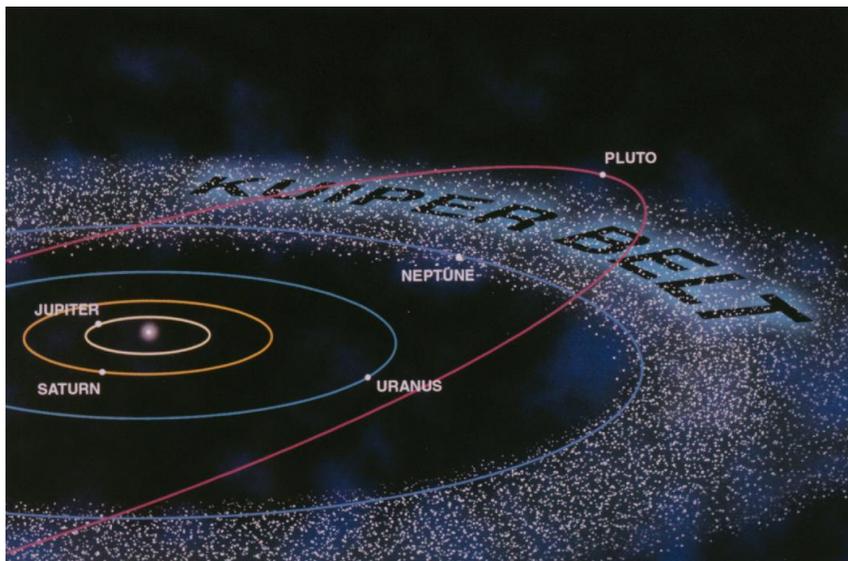
Tabel 1- 12 Ikon dan jenis-jenis planet

| Ikon | Nama | Keterangan |
|---|-----------|--|
|  | Batuan | Objek ini merupakan planet yang tidak memiliki atmosfer. Planet tipe ini bisa saja bertemperatur tinggi, tapi dapat juga bertemperatur rendah. Contoh : Merkurius, Pluto dan objek Kuiper. |
|  | Asteroid | Ini merupakan obyek dengan dimensi sangat kecil dibandingkan planet. Jika ada obyek memiliki massa kurang dari 0,1% massa Bumi ia akan dikategorikan sebagai asteroid. Umumnya berada dalam satu sabuk/kawasan yang tetap. |
|  | Venusian | Planet tipe ini memiliki efek rumah kaca, memiliki atmosfer, dan mempunyai kandungan air kurang dari 5% . Temperatur permukaan, lebih besar dari titik didih air (dengan demikian tidak ada permukaan yang diselubungi air). |
|  | Kebumihan | Planet mirip Bumi mempunyai atmosfer dan lapisan air. Air bisa ditemukan di permukaan, rasionya antara 5% dan 95% luas permukaan total |

| | | |
|---|------------|---|
|  | Air | Planet ini memiliki atmosfer dan lapisan air. Air menutupi permukaan planet lebih dari 95%. Planet ini bisa ditemukan hanya pada kasus-kasus ekstrim. |
|  | Martian | Planet memiliki atmosfer tipis. Air yang menutupi permukaan sangat sedikit atau bahkan tidak ada. Permukaan yang ditutupi air kurang dari 5% sisanya ditutupi es. |
|  | Es | Planet ini diselubungi oleh es. Es menutupi 95% permukaannya. Planet ini akan menjadi planet kebumihan bila temperaturnya lebih tinggi. Sebagian bisa menahan keberadaan hydrogen namun sebagian lagi sangat dingin sampai gas juga membeku. Tidak ada contoh planet ini di Tata Surya. |
|  | Jovian | Merupakan planet gas raksasa dengan massa sedikitnya 20 kali massa Bumi. |
|  | Sub-Jovian | Lebih kecil dari planet gas raksasa (contoh : Neptunus dan Uranus). Massanya kurang dari 20 kali Massa Bumi. |
|  | Gas Dwarf | Planet ini mirip planet gas raksasa yang bisa menahan keberadaan hydrogen, namun terdiri dari batuan. Massa gas-nya kurang dari 20% total massanya. Planet tipe ini berada jauh dari bintangnya. |

2. 10 Kuiper Belt Objek

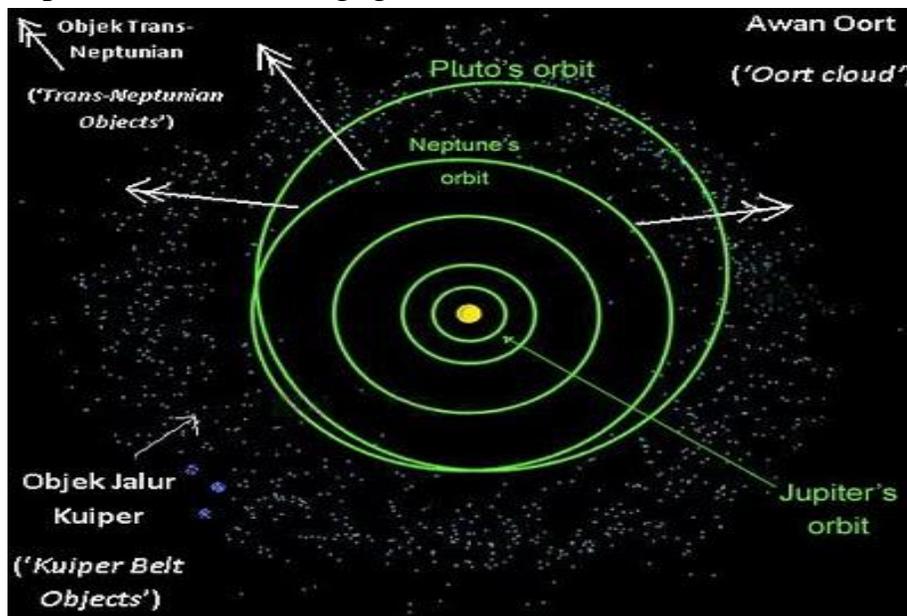
Sekumpulan benda kecil Tata Surya yang mengorbit pada daerah yang berlokasi disekitar orbit Neptunus, kemudian dikenal sebagai Kuiper Belt Object (juga dikenal sebagai Trans Neptunian Object), mengambil nama seorang astronom Belanda-Amerika, Gerard P Kuiper yang pada tahun 1951 mengajukan hipotesa bahwa Tata Surya kita memiliki anggota yang letaknya bisa sangat jauh sehingga mencapai awan Oort.



Gambar 2- 1 Distribusi Objek Kuiper disekitar orbit Neptunus.

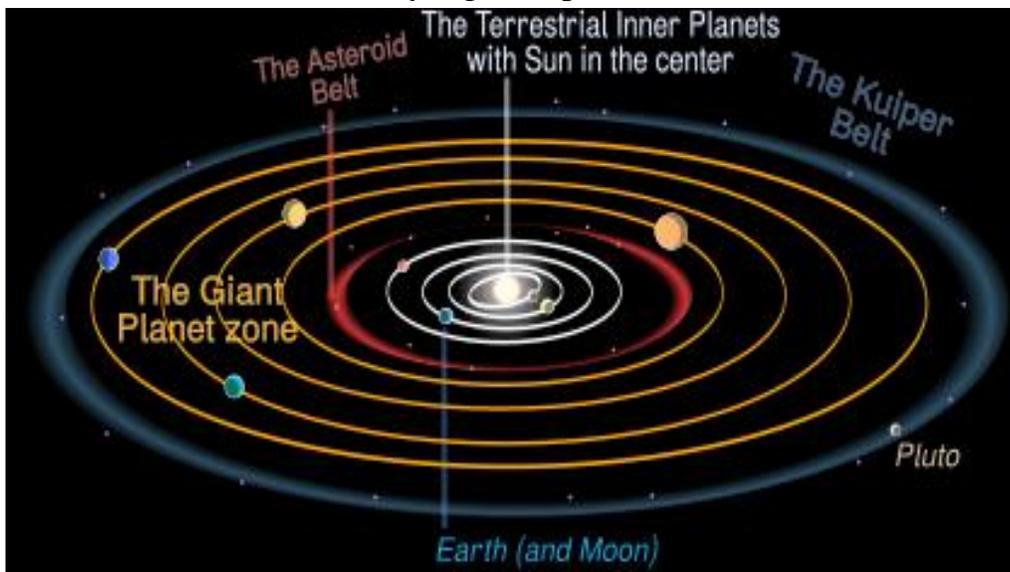
Pluto, adalah benda kecil Tata Surya namun diketahui memiliki tiga satelit alami salah satu bernama Charon ini kemudian menjadi ajang perdebatan dikalangan para astronom. Ukuran planet mini tapi punya 3 satelit. Diantara semua planet anggota Tata Surya, Pluto memiliki beberapa ciri yang tidak lazim untuk sebuah planet Selain ukurannya yang tergolong "mini" dibandingkan planet-planet lainnya, garis edarnya sangat lonjong juga eksentrik, dalam periode tertentu garis edar Pluto memotong orbit Neptunus sehingga

menjadikan Neptunus sebagai planet terluar dari Tata Surya. Pluto juga diketahui memiliki massa yang sangat kecil, kurang dari 1/400 massa planet Bumi. Tidak heran, beberapa astronom lebih suka menggolongkan objek yang ditemukan oleh Clyde Tombaugh pada tahun 1930 sebagai Benda Kecil Tata Surya. Pluto diketahui keberadaannya berdasarkan posisi yang dihitung oleh Percival Lowell. Pluto merupakan Objek Kuiper Belt yang terbesar diantara objek-objek sejenis. Walaupun masih menyisakan ketidakpuasan, "krisis-identitas" ini akhirnya mereda ketika pada bulan Februari 1999, The International Astronomical Union (IAU) menetapkan bahwa Pluto tetap digolongkan sebagai sebuah planet. Namun keputusan kembali di gugat.



Gambar 2- 2 Distribusi Objek Kuiper disekitar orbit Neptunus, selalu bergerak dan memotong orbit Pluto.

Objek Kuiper Belt, ternyata menyimpan banyak hal yang menarik perhatian para ilmuwan untuk menelitinya. Pada bulan Desember 2000, ketika meneliti objek dengan nomor katalog 1998 WW31, astronom Christian Veillet dan dua koleganya menemukan bahwa objek yang ditemukan dua tahun sebelumnya, memiliki pasangan yang saling mengedari satu sama lain (binary object). Kesimpulan ini diperoleh setelah melakukan pengamatan menggunakan teleskop Canada-France-Hawaii yang berdiameter 3,6 meter di Hawaii. Penemuan ini dipublikasikan akhir bulan April 2001, dalam risalah IAU Circular No. 7610. Sementara itu, objek Kuiper Belt yang lain dengan nama Varuna yang ditemukan pada November 2000 kini diketahui memiliki ukuran yang cukup besar.



Dibandingkan dengan diameter Pluto (2.200 km) dan Charon (1.200 km), Diameter Varuna sekitar 900 km, dengan diameter sebesar ini sudah cukup untuk memperkecil "gap" dalam hal ukuran antara Pluto dengan objek-objek Kuiper Belt yang sudah ditemukan sebelumnya yang rata-rata berdiameter hanya sekitar 600 km.

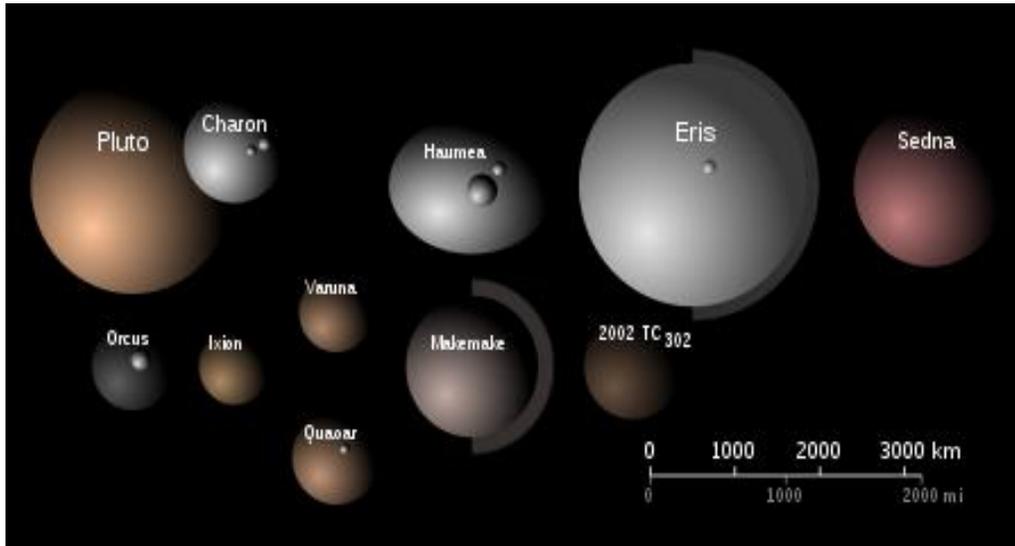
Gambar 2- 3 Lokasi Kuiper Belt Objects dan Main-Belt Asteroid dicirikan pada posisinya yang masing-masing dekat dengan planet raksasa (Jovian) dan kebumihan (Terrestrial).

2. 11 Beberapa data dan informasi

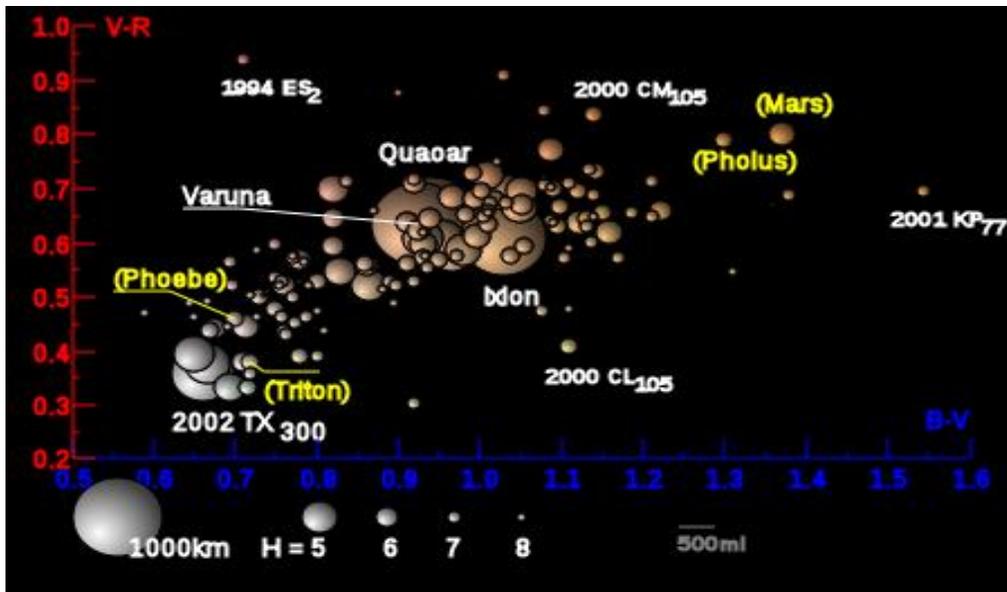
Berikut disampaikan beberapa data dan informasi TNO (Trans Neptunian Objects



Gambar 2- 4 Beberapa Trans Neptunian Objects dengan ukuran besar, dibagian bawah tampak sebagian permukaan Bumi sebagai pembanding ukuran geometrisnya.



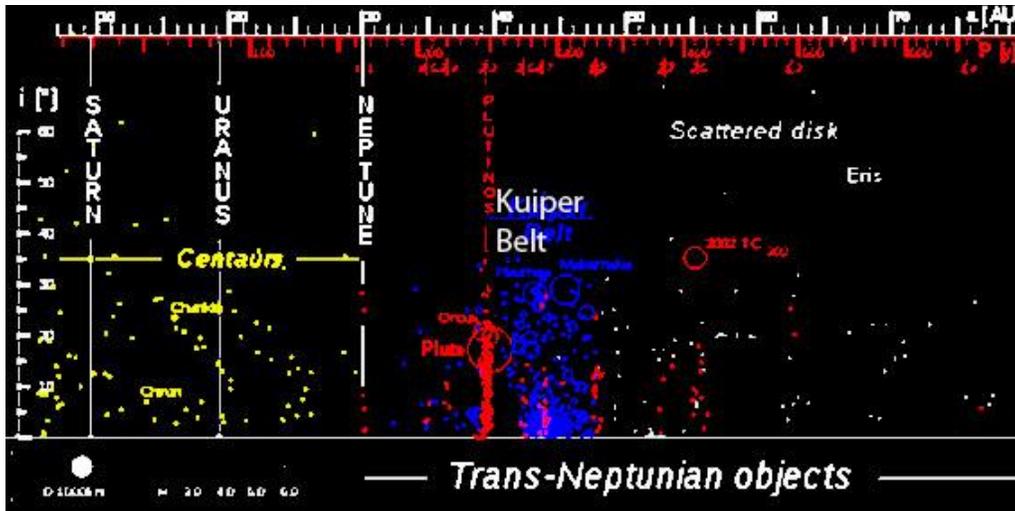
Gambar 2- 5 Beberapa Trans Neptunian Objects dengan ukuran besar, dibandingkan dengan dimensi Pluto, diantaranya tampak Eris dengan ukuran sedikit lebih besar dari Pluto.



Gambar 2- 6 Beberapa Trans Neptunian Objects dengan ukuran besar, diragakan dalam kurva (V-R) versus (B-V).

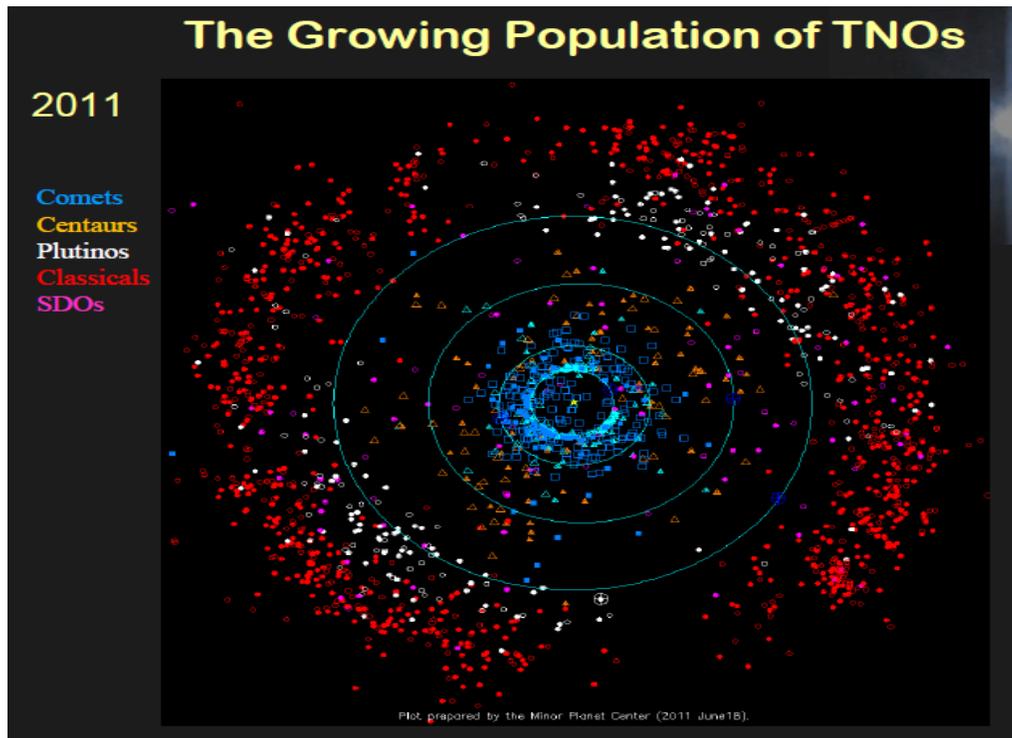
2. 12 Distribusi dan klasifikasi

Berdasarkan jarak ke Matahari dan parameter orbitnya. TNO dibedakan dalam dua kelompok besar:



(a)

Gambar 2- 7a Distribusi objek trans Neptunian (TNO) terhadap jaraknya dari Matahari. Kelompok Centaurus mengisi ruang diantara Saturnus, Uranus dan Neptunus. Sedangkan Object Kuiper Belt lebih banyak ditemukan diluar radius orbit Neptunus, setelah itu baru ditemukan kelompok scattered disk.



(b)

Gambar 2- 8b Distribusi objek trans Neptunian (TNO) terhadap jaraknya dari Matahari, dilihat dari utara ekliptika.. Kelompok Centaurus mengisi ruang diantara Saturnus, Uranus dan Neptunus. Sedangkan Object Kuiper Belt lebih banyak ditemukan diluar radius orbit Neptunus, setelah itu baru ditemukan kelompok scattered disk.

Sabuk Kuiper berisi objek dengan jarak rerata ke Matahari dari 30 sampai 55 au, mempunyai orbit hampir lingkaran dengan inklinasi kecil. Kuiper Belt-Objects (KBO) selanjutnya dibedakan lagi dalam dua kelompok:

1. Resonance Objects (RO) terkunci dalam suatu resonansi orbit dengan planet Neptunus. Benda kecil Tata Surya dengan resonansi

1:2 dikenal sebagai *twotinos*, dan objek dengan resonansi 2:3 dikenal dengan *plutinos*, mengikuti anggota dominan yaitu *Pluto*

Mengingat resonansi Kozai yang selalu tetap :

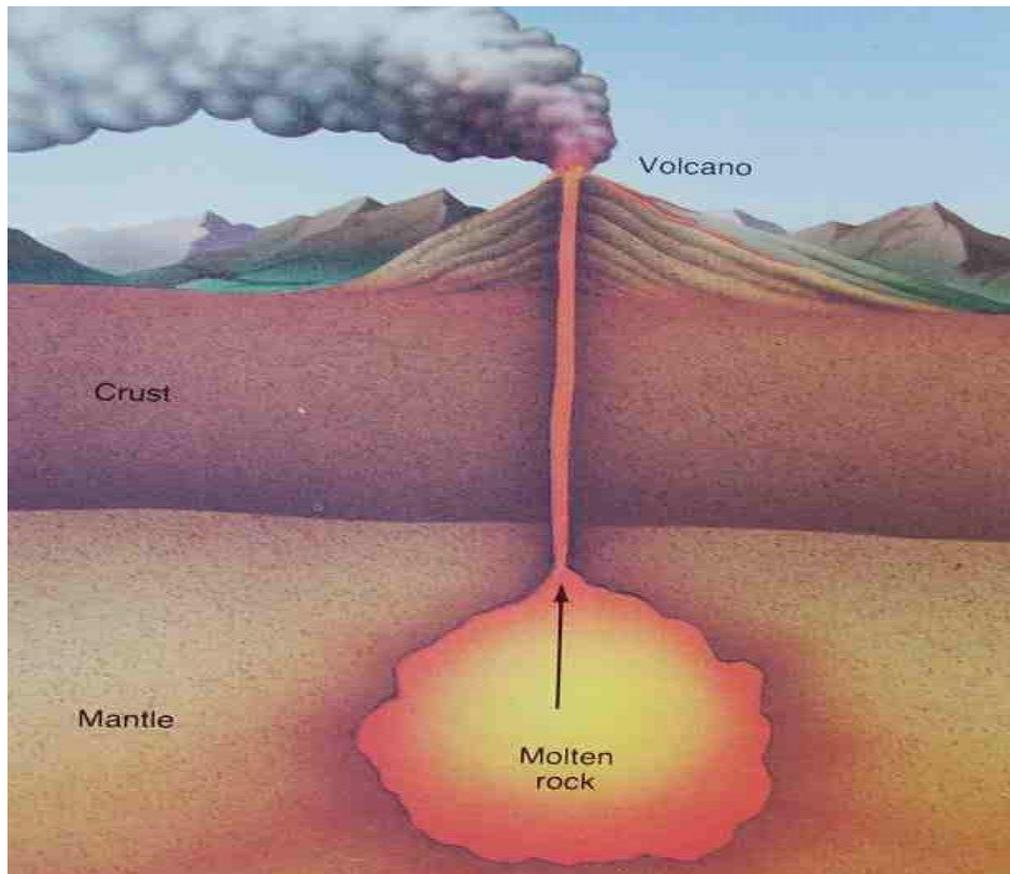
$$H_{Kozai} = \sqrt{a(1-e^2)} \cos i = \sqrt{q(1+e)} \cos i$$

Benda kecil Tata Surya dengan jarak perihelium q , yang tetap ini akan memperlihatkan inklinasi, i membesar kalau eksentrisitas e membesar.

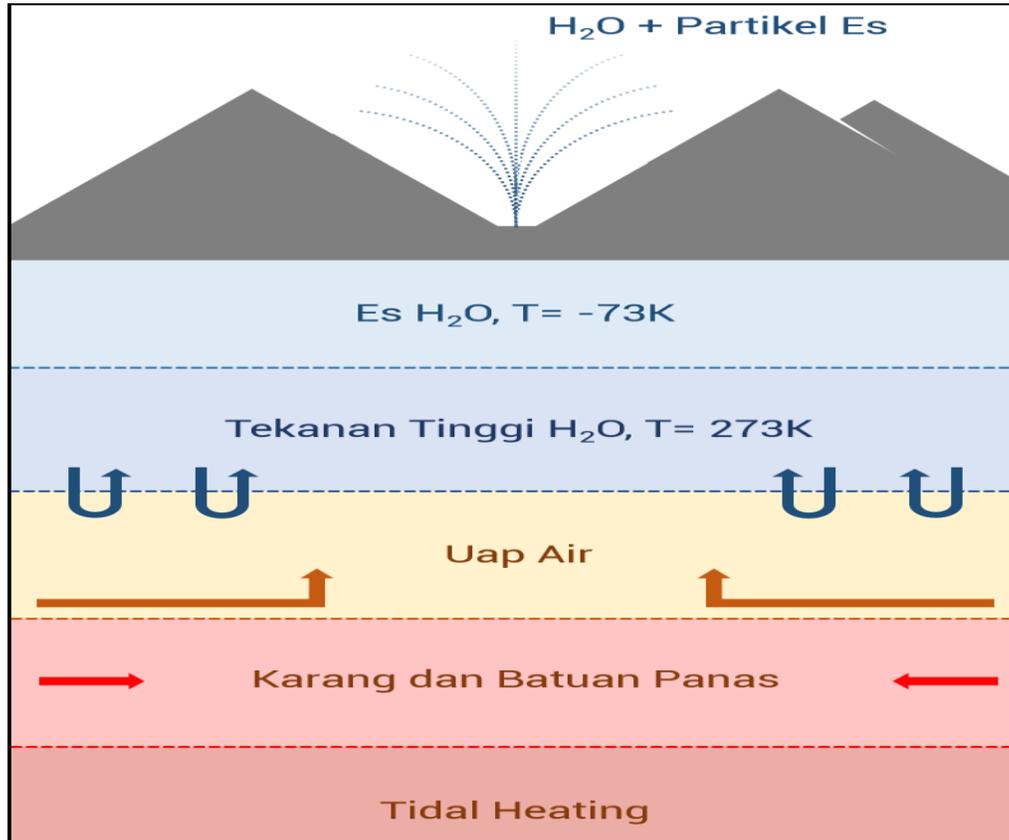
2. Objek sabuk Kuiper Klasik (Classical Kuiper Belt Objects) CKBO disebut juga *cubewanos* tidak mempunyai resonansi, bergerak dengan orbit mendekati lingkaran, tidak mengalami gangguan gravitasional yang berarti dari Neptunus. Contohnya adalah 1992 QB₁, 50000 *Quaoar* dan *Make-make*.

Piringan tersebar berisi objek yang jauh dari Matahari orbitnya tidak beraturan, orbitnya sangat eliptik dan mempunyai inklinasi besar terhadap ekliptika. Contoh khas kelompok ini adalah anggota TNO, yang dikenal dengan nama *Eris*

Bagian kanan diagram menggambarkan distribusi TNO yang telah dikenal orang (sampai 70 au) dalam kaitannya dengan orbit planet dan *Centaurus* sebagai referensi. Kelompok yang berbeda dinyatakan dalam warna yang berbeda. *Resonant Objects* (termasuk Trojan-Neptunus) dirajah dalam merah, *cubewanos* dalam biru. *Scattered disk objects*, SDO menyebar kekanan, jauh diluar diagram, dengan objek dikenal pada jarak rerata lebih dari 500 au (yaitu *Sedna*) dan aphelium diatas 1000 au (87269) dan (2000 OO₆₇)



Proses terjadinya strato-volcano. Contoh gunung api di Bumi



Proses terjadinya cryo-volcano di kawasan bersuhu rendah. Contoh di Enceladus, Triton dan Io

Gambar 2- 9 Strato-volcano ditemukan pada planet kebumihan (kiri) dan cryo-vulcano (kanan) terjadi akibat goyangan gaya pasang surut yang menyebabkan lapisan karang dan bebatuan yang terdapat pada inti yang dingin bergesekan, panas yang timbul akan memberikan tekanan pada uap air dengan suhu 273 K. Uap air menyembur ke lapisan atas yang lebih dingin. Tekanan yang tinggi menyebabkan air dalam bentuk es terlontar keluar sehingga terjadi vulcano, ditemukan pada objek yang sangat dingin misalnya di satelit Saturnus, Triton dan Enceladus.

2. 13 Plutoids

Sebuah TNO (*Trans Neptunian Object*) disebut plutoid jika dia mampu untuk berada dalam keseimbangan hidrostatik. (disebut juga *planet kerdil/dwarf planet*) Ada empat TNO yang dinyatakan sebagai plutoid oleh IAU. Daftar berikut meragakannya, termasuk bulan Pluto terbesar yaitu *Charon* yang kemungkinannya adalah plutoid jika tidak mengorbit Pluto:

Tabel 2- 1 Plutoid dan kriteria fisik H=magnitude absolut, a=semi major axis (au), A=albedo, D=diameter (kilometer), K=klasifikasi, SDO=scater disk object, T=teknik pengukuran dan P=tahun ditemukan

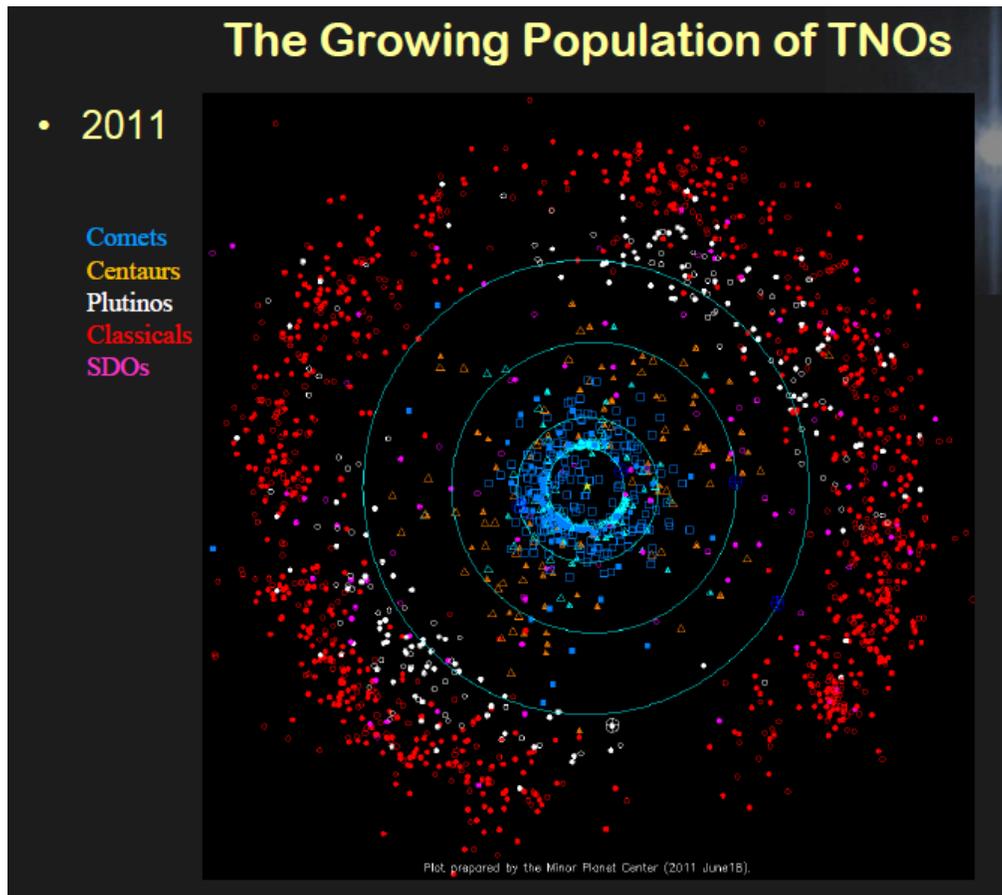
| Nama | H | A | D | a | Klas | P | T |
|----------------------------------|-----------|--------------------|---------------|----------|-----------------|------|-------------|
| Eris (2003 UB ₃₁₃) | -1.2 | ~0.86 ± 0.07 | 2400 ± 100 | 67. 7 | SDO | 2005 | Thermal |
| Pluto | -1.0 | 0.49 to 0.66 | 2306 ± 20 | 39. 4 | KBO | 1930 | Occultation |
| Makemake (2005 FY ₉) | - 0.48 | | | | | 2005 | |
| Haumea (2003 EL ₆₁) | 0.17 | | | | | 2005 | |
| Charon (S/1978 P 1) | 1 | 0.36 to 0.39 | 1205 ± 2 | 39. 4 | Satelit -KBO | 1978 | Occultation |

Kandidat utama plutoid (C=katagori, D=diameter dalam km, H=magnitude absolut, M=massa dalam kelipatan 10^{20} kg dan a=setengah sumbu panjang orbit dalam au).

Tabel 2- 2 Kandidat plutoid yang masih menjadi kontrovesi pendapat.

| Name | C | D | H | M | a (sa) |
|---------------------------|-----------------------|----------------|-----|----------------|--------|
| Orcus | Plutino (1 bulan) | 909 sd 1500 | 2.3 | 6.32 ± 0.05 | 39.2 |
| Huya | Plutino | 480 | 4.7 | 0.6–1.8? | |
| <i>Pluto</i> | 39.4 | | | | |
| Ixion | Plutino | 570 sd 1065 | 3.2 | | |
| Varuna | Cubewano | 500 sd 900 | 3.7 | | |
| <i>Haumea</i> | 43.3 | | | | |
| Quaoar | Cubewano (1 moon) | 844 sd1290 | 2.7 | | |
| <i>Makemake</i> | 45.3 | | | | |
| 2002 AW ₁₉₇ | Cubewano | 735 sd 940 | 3.2 | | |
| 2002 TC ₃₀₂ | 5:2 SDO | 710 sd 1200 | 3.8 | | |
| 2007 OR ₁₀ | 10:3 ? SDO | 1200? | 1.9 | | |
| <i>Eris</i> | 68.0 | | | | |
| 1996 TL ₆₆ | SDO | 460 sd 690 | 5.4 | 2? | 83.9 |
| Sedna | Detached object | 1500 sd 1800 | 1.5 | 8–70? | 509 |

.Estimasi diameter sangat dipengaruhi oleh *albedo* permukaan yang selalu diandaikan dan bukan diukur. Beberapa objek lain yang cukup potensial tidak diikut sertakan.



Gambar 2- 10 Pertumbuhan populasi TNO sampai Juni 2011. Lingkaran konsentris dari jejari terkecil menunjukkan orbit Jupiter, Saturnus, Uranus dan Neptunus.

Bab 3 Komet

3.1 Struktur Fisik Komet

Komet terdiri dari inti, koma dan ekor komet. Inti terdiri dari molekul air (H_2O), karbondioksida (CO_2), amonia (NH_3), metana (CH_4) dan debu yang bercampur di dalamnya. Ekor komet terdiri dari ekor debu dan ekor gas. Ekor debu disebabkan oleh partikel debu yang berasal dari es pada inti komet yang terbentuk saat terjadinya penguapan, bergerak berlawanan arah dengan arah orbitnya. Ekor gas terdiri dari gas yang bergerak keluar akibat angin Matahari.

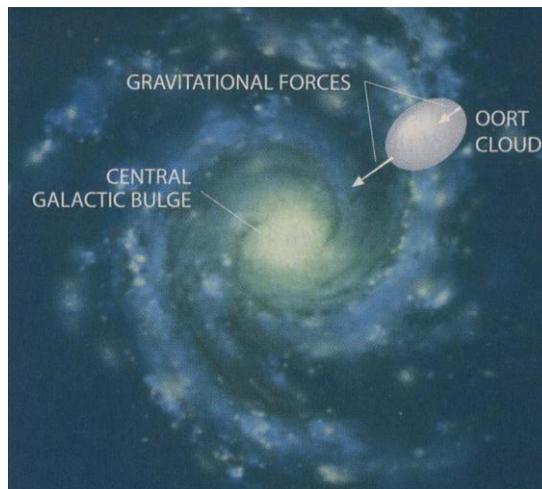


Gambar 3- 1 Komet Neat terlihat pada bulan Januari-Februari 2003 (kiri). Bagian kanan memperlihatkan foto komet West di potret di Observatorium La Silla pada bulan Januari 1976

Komet berasal dari awan Oort (awan dengan massa total 1 sampai 10 kali massa Bumi), menyebar dari kawasan setelah Neptunus hingga jarak 10^6 au atau lebih. Untuk komet periode pendek, selain berasal dari awan Oort bagian dalam (inner Oort), ia juga bisa berasal dari sabuk trans-Neptunians (Kuiper Belt). Inti komet merupakan konglomerasi es dan debu dengan bentuk tidak

beraturan, terdiri dari buliran-buliran kecil yang mengalami keruntuhan gravitasi dalam awan komet, akibat ketidak stabilan gaya gravitasi sehingga membentuk kumpulan yang lebih besar. Proses akresi komet dengan kandungan sebagian besar komponen yang mudah menguap memerlukan temperatur dan kecepatan rendah (sekitar 0,05km/detik). Proses ini tidak memungkinkan inti komet bisa tumbuh lebih besar dari 10 kilometer.

Pembentukan selubung kerak pada komet terjadi akibat keberadaan materi yang mudah menguap dan batu-batuan dalam inti komet. Lapisan kerak berasal dari kepingan-kepingan yang tidak mudah menguap. Kemudian kembali lagi ke inti setelah dilepaskan akibat tekanan gas pada daerah sublimasi. Akibatnya aktivitas komet menurun dan komet menjadi pasif. Proses penguapan akan menyebabkan terbentuknya atmosfer gas dan debu yang disebut koma.



Gambar 3- 2 Awan Oort sebagai reservoir komet berlokasi pada kawasan 100000 au dari Tata Surya. Gaya gravitasi pusat galaksi menarik sebagian materi awan Oort yang kemudian memasuki Tata Surya kita.

Laju produksi gas dan debu bergantung secara dominan pada radiasi matahari, demikian juga dengan ukuran inti dan sifat penguapan unsur es. Sebagian gas yang membentuk koma mengalami ionisasi. Gas terionisasi dipengaruhi oleh medan magnetik yang dibawa angin Matahari sehingga terbentuk *ekor plasma komet*. Ekor plasma ini dapat putus dari kepala komet ketika terjadi penurunan produksi ion, peningkatan tekanan angin Matahari, dan hantaman medan magnetik.

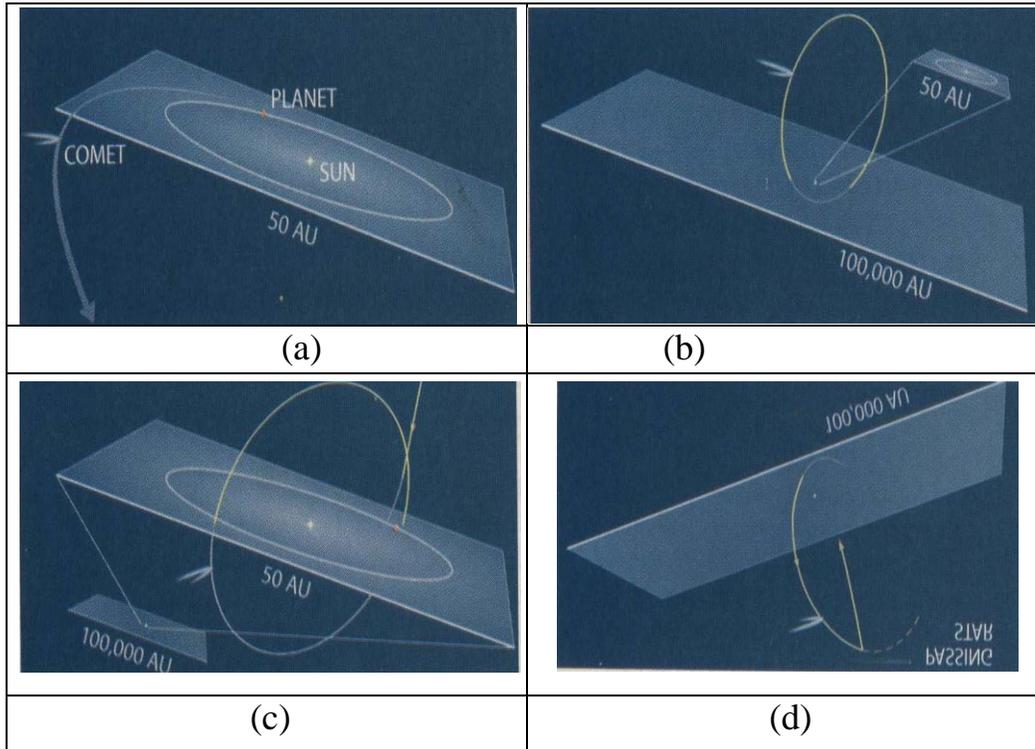
Selain terbentuk di awan Oort, komet juga dapat terbentuk di tepian Tata Surya. Menurut Kuiper (1951), komet terbentuk sebagai bagian proses pendinginan planetesimal di kawasan planet luar dan merupakan kunci penjelasan tentang pembentukan Tata Surya.

Untuk alasan historis pada dasarnya komet dibagi dalam dua kategori utama;

1. Komet periode pendek, mempunyai orbit eliptik dengan periode kurang dari 200 tahun, beberapa diantaranya bahkan cuma beberapa tahun saja.
2. Komet periode panjang, mempunyai periode lebih dari 200 tahun, orbitnya bisa saja elips, parabolik maupun hiperbolik, bergantung pada gangguan gravitasi (perturbasi) yang dialaminya. Kapan komet ini ditemukan tidak dapat diprediksi.

Sejarah komet periode panjang dimulai tatkala mereka berada di sekitar planet besar, suatu ketika mereka terlontar ke kawasan orbit yang lebih lebar. Di sana komet tersebut sangat rentan terhadap gangguan gaya gravitasi dari bintang lewat dan awan raksasa antar bintang, demikian pula gaya pasang surut oleh pringan dan pusat galaksi. Gaya gangguan ini secara acak merombak secara gradual kemiringan bidang orbit, melemparkan komet tersebut menjadi lebih jauh lagi. Pada jarak diatas 20000 au beragam

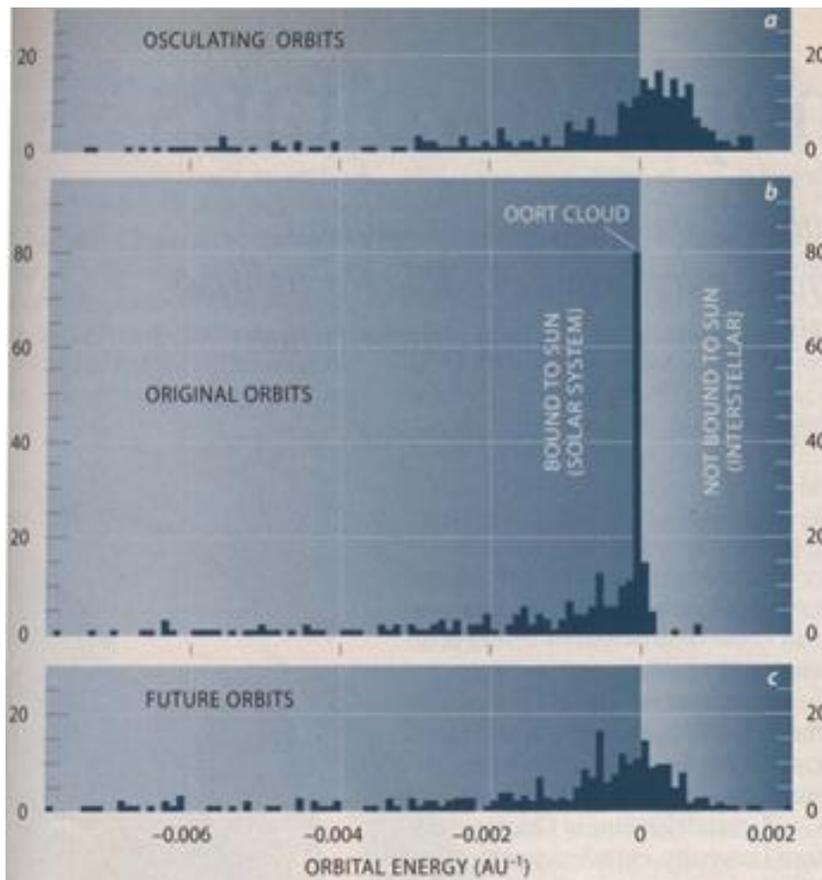
pengaruh gaya ganggu memungkinkan komet itu untuk masuk kembali kedalam sistem Tata Surya kita, sehingga dapat kembali diamati seperti apa adanya;



Gambar 3- 3 Perjalanan komet periode panjang keluar dari Tata Surya dan kemudian kembali lagi ke dalam Tata Surya kita

Telaah energi orbit komet periode panjang dapat mengungkap keberadaan awan Oort. Pengetahuan tentang osculating orbit dapat menentukan pola gerak mereka di masa lalu, sekarang dan masa yang akan datang. Simulasi tentang energi orbit, memperlihatkan kawasan energi positif dan Energi negatif. Pada kondisi komet masih bergerak dibawah kontrol gravitasi Matahari energi orbitnya negatif, diperbatasan awan Oort energi kinetis sama dengan energi potensial yang dialaminya dari Matahari, oleh sebab

itu dikawasan ini energi totalnya nol, sedangkan diluar kawasan bola pengaruh gravitasi Matahari energi orbit bernilai positif, komet dikawasan ini tampak sebagai objek antar bintang.



Gambar 3- 4 Energi orbit sebagai indikator, awan Oort merupakan reservoir cikal bakal komet periode panjang(Weissman,1998)

Gambar diatas menjelaskan tiga hal;

1. Bila pengaruh gravitasi planet diikut sertakan dan dilakukan ekstrapolasi ke masa lalu, energi berangsur negatif hal ini menunjukkan dia datang dari pinggiran Tata Surya kita. Gaya gravitasi Matahari masih mempengaruhi gerak orbit.

2. Hanya sedikit komet yang masih terlihat sebagai objek antar bintang, hal ini boleh jadi ditimbulkan oleh kesalahan observasi (efek seleksi). Ketika planet secara berkesinambungan memberikan pengaruh mereka, beberapa komet akan kembali ke awan Oort sebagian lagi akan terlempar keluar dari Tata Surya untuk kembali lagi dari awan Oort dan akhirnya memasuki bagian dalam Tata Surya kita.

3. Secara teknis energi orbit berbanding langsung dengan balikan setengah sumbu panjang, a dinyatakan dalam persatuan astronomi [1/ au]

Pernyataan untuk energi orbit dapat dihitung dari persamaan hukum kekekalan energi;

Jika m – menyatakan massa komet, M - massa Matahari dan G - konstanta gravitasi, maka energi total sistem adalah

$$E = E_k + E_p \text{ selalu konstan} \quad (3- 1)$$

Energi kinetis, E_k dapat dihitung dari pernyataan;

$$E_k = \frac{1}{2} mV^2 \quad (3-2)$$

sedangkan

$$V^2 = \mu \left[\frac{1}{r} - \frac{1}{2a} \right] \quad (3-3)$$

dalam hal ini $\mu = G(M+m)$

Energi potensial E_p dapat kita hitung dari pernyataan;

$$E_p = -\frac{\mu}{r} \quad (3-4)$$

Tanda negative menunjukkan energy potensial membesar pada nilai r yang besar

3. 2 Inti Komet

Inti komet pada dasarnya dapat dibedakan dalam beberapa macam yaitu;

- 1) Model sandbank
Inti merupakan awan partikel, menyebar dan bergerak secara bersamaan
- 2) Inti merupakan kumpulan es
- 3) Model struktur konglomerasi es
 - a) Adanya material yang mudah menguap dan tidak mudah menguap
 - b) Adanya gaya non-gravitasi
 - c) Adanya pemecahan inti komet
 - d) Kesamaan penampakan komet sebelum dan setelah melewati perihelion (inti komet harus berukuran besar)
- 4) Inti terdiri dari bebatuan yang keropos. Pori-pori diisi oleh es
- 5) Model modifikasi struktur bola salju dari akumulasi planet
- 6) Pembentukan kerak akibat keberadaan materi yang dapat menguap dan berbatu-batu pada inti. Sublimasi materi meninggalkan kerak yang dapat mudah menguap. Tebal kerak bertambah seiring peningkatan sublimasi. Penipisan kerak diakibatkan oleh erosi dan proses pengangkutan.

Mendekatnya komet ke Matahari menyebabkan temperatur permukaan komet perlahan-lahan meningkat. Jika permukaan komet ditutup oleh material yang mudah menguap, keadaan kesetimbangan terjadi apabila dipenuhi syarat;

Fluks matahari yang diserap inti = energi pancaran permukaan

Persamaan keadaan kesetimbangan penguapan material komet;

$$\frac{F_0(1-A)}{r^2} = \sigma T^4 + Z(T)L(T) \quad (3.5)$$

A - albedo inti komet,

r -jarak heliosentrik,

F_0 – fluks sinar Matahari pada jarak 1 AU,

σ - konstanta Stefan,

T -temperatur,

$Z(T)$ - laju produksi gas.

$L(T)$ -produksi panas laten pada keadaan sublimasi

Bagian sebelah kiri persamaan (3.5) menyatakan fluks sinar matahari yang diserap oleh inti, bagian sebelah kanan menyatakan energi yang dipancarkan oleh permukaan. Tabel 3.1 berikut memperlihatkan laju produksi gas untuk jenis es yang berbeda

Tabel 3- 1 Laju produksi gas untuk bermacam jenis-jenis es (Delseme,A,*Comets* L. Wilkening,ed., Tucson, University of Arizona Press, 1982)

| No | Snow controlling vaporization | $Z_0[10^{18} \text{ mol cm}^{-2} \text{ s}^{-1}]$ | $T_0(^{\circ}\text{K})$ | $T_1(^{\circ}\text{K})$ | $d[\text{AU}]$ |
|----|-------------------------------|---|-------------------------|-------------------------|----------------|
| 1. | Nitrogen | 14,3 | 40 | 35 | 77,6 |
| 2. | Carbonmonoxide | 13,0 | 44 | 39 | 62,5 |
| 3. | Methane | 10,6 | 55 | 50 | 14,1 |
| 4. | Formaldehyde | 5,0 | 90 | 82 | 9,7 |
| 5. | Ammonia | 3,7 | 112 | 99 | 8,3 |
| 6. | Carbon dioxide | 3,5 | 121 | 107 | 4,8 |
| 7. | Cyanic acid | 2,3 | 160 | 140 | 2,6 |

| | | | | | |
|-----|-----------|-----|-----|-----|-----|
| 8. | Ammonia | 2,7 | 213 | 193 | 2,5 |
| 9. | Clathrate | 1,9 | 214 | 194 | 2,5 |
| 10. | Water | 1,7 | 215 | 195 | 2,5 |

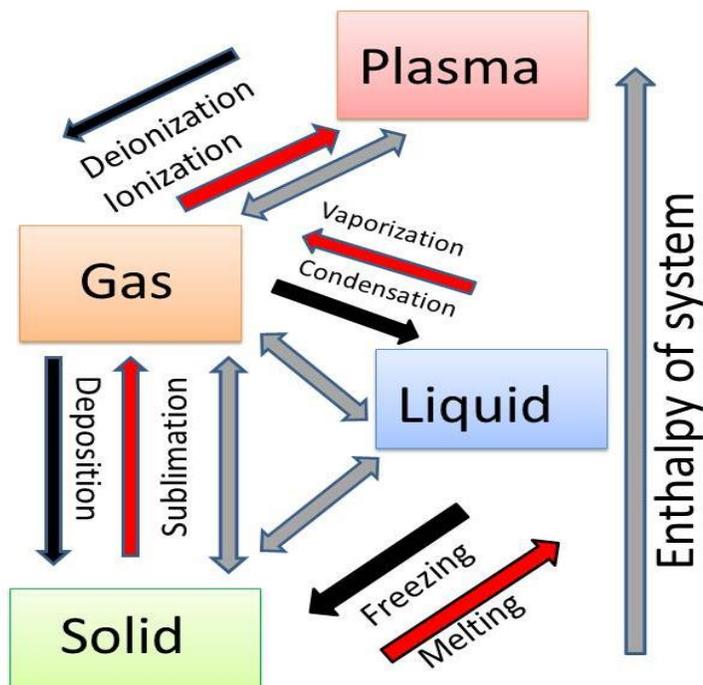
Dalam hal ini;

Z_0 laju penguapan pada titik subsolar pada inti komet dengan serapan sempurna pada jarak 1 AU dari Matahari

T_0 temperatur pada keadaan Z_0 stasioner (subsolar, inti tidak berotasi)

T_1 temperature rata-rata efektif dari inti yang berotasi ($Z_1 = \frac{1}{4} Z_0$)

d jarak heliosentrik dimana laju penguapan dapat diabaikan (kurang dari 2,5% fluks matahari digunakan untuk penguapan)

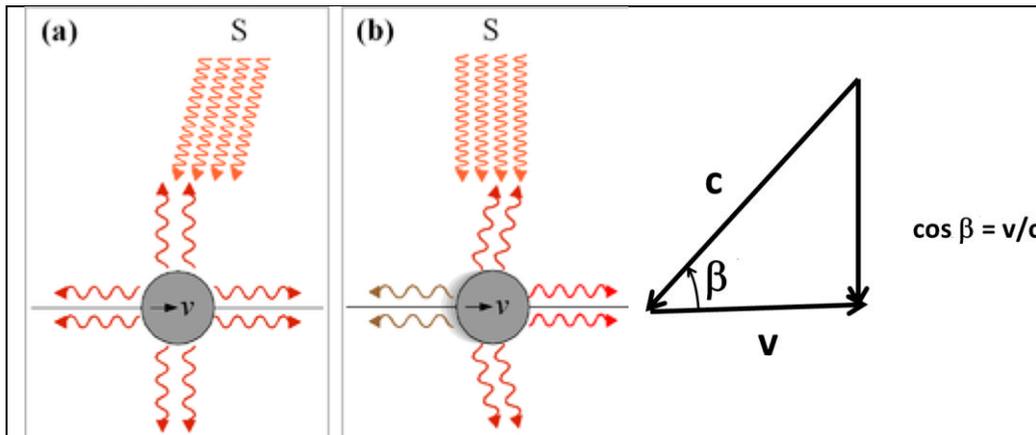


Gambar 3-5 Skema perubahan fase inti komet disebabkan oleh meningkat (panah merah) atau menurunnya (panah hitam) tekanan radiasi matahari. Mendekati perihelium proses yang terjadi adalah perubahan wujud dari padat ke cair/gas dan diakhiri dengan plasma. Mendekati aphelium terjadi proses sebaliknya dari plasma ke gas dan kemudian kewujud cair atau langsung ke padat, bergantung pada titik lebur atau titik didih unsur yang terdapat pada inti komet.

3.3 Efek Poynting–Robertson

Efek Poynting-Robertson dikenal juga sebagai hambatan Poynting-Robertson (Poynting-Robertson drag) adalah proses yang disebabkan oleh radiasi matahari sehingga buliran dalam Tata Surya bergerak secara spiral menuju Matahari.

Efek ini dapat dijelaskan dengan dua cara bergantung kerangka inersial yang dipilih.



Gambar 3- 6 Radiasi dari Matahari (S) dan radiasi thermal dari partikel jika dilihat dari (a) dari pengamat yang ikut bergerak bersama partikel (b) dari seorang pengamat yang diam relative terhadap Matahari. Kecepatan orbit V jauh lebih kecil dari kecepatan cahaya c , oleh sebab itu tekanan radiasi akan

berlawanan arah dengan laju bulir, bulir akan mendapat tekanan radiasi, fenomena ini disebut dengan Poynting-Robertson drag

Dari perspective buliran debu yang mengelilingi Matahari (panel (a) dari gambar), radiasi Matahari datang dari arah berlawanan (aberasi cahaya). Oleh sebab itu radiasi yang diserap ini akan menghasilkan gaya yang berlawanan dengan arah gerak. (sudut aberasi relatif kecil karena radiasi bergerak dengan kecepatan cahaya dibandingkan dengan kecepatan bulir yang jauh lebih kecil)

Dari perspektif Tata Surya keseluruhan (panel (b) dari gambar), buliran debu menyerap cahaya matahari seluruhnya dalam arah radial, sehingga momentum sudut bulir tetap tidak berubah. Akibatnya photon yang diserap mengakibatkan bertambahnya massa. Akibatnya agar konservasi momentum sudut tetap dipenuhi buliran akan jatuh dalam orbit yang lebih rendah.

Gaya hambat Poynting-Robertson dapat dimengerti sebagai gaya efektif yang berlawanan arah terhadap laju bulir, mengakibatkan menurunnya momentum sudut. Perlu diingat ketika buliran bergerak perlahan menuju Matahari kecepatan orbit akan membesar secara kontinyu.

Gaya Poynting–Robertson diberikan oleh:

$$F_{PR} = \frac{v}{c^2} W \quad (3-5)$$

dimana v adalah kecepatan bulir (grain), c kecepatan cahaya, W adalah fluks/power dari radiasi yang datang.

Asumsikan bulir berbentuk bola, bergerak dalam orbit lingkaran, r radius bulir, G adalah konstanta gravitasi universal, M_s masa

Matahari, L_s luminositas Matahari, dan R radius orbit bulir. Pernyataan (3-5) dapat ditulis sebagai;

$$F_{PR} = \frac{v}{c^2} W = \frac{1}{c^2} \sqrt{\frac{GM_s}{R}} \left\{ \pi r^2 \left(\frac{L_s}{4\pi R^2} \right) \right\} = \frac{r^2 L_s}{4c^2} \sqrt{\frac{GM_s}{R^5}} \quad (3-6)$$

Kalau dibandingkan gaya gravitasi proporsional terhadap $\frac{1}{R^2}$ sedangkan gaya Poynting–Robertson bervariasi dengan $\frac{1}{R^{2.5}}$, maka akibat yang ditimbulkan oleh gaya Poynting–Robertson akan semakin besar ketika objek mendekati Matahari dibandingkan dengan gaya gravitasi, yang akan mereduksi eksentrisitas orbit sehingga lintasan menjadi lingkaran seiring dengan itu gesekan juga bertambah.

Akibat lain dari adanya gaya non-gravitasi ini adalah adanya "rocket effect" yang akan mengubah periode orbit komet. Rickman (vide, Festaou et al., Comets II, 2004) menurunkan pernyataan

$$\Delta P = \frac{6\pi(1-e^2)^{\frac{1}{2}}}{n^2} \left(\frac{e}{p} \int_0^P j_r \sin \theta dt + \int_0^P \frac{j_t}{R_h} dt \right) \quad (3-7)$$

Dengan;

P , θ , dan t masing-masing adalah periode orbit, anomaly benar dan selang waktu yang ditinjau.

e , n , dan p masing-masing adalah eksentrisitas, gerak harian rerata (mean motion) dan semilatus rectum, $p=a(1-e^2)$.

J_r dan J_t komponen gaya dalam arah radial dan transversal

R_h radius vector

3.4 Koma

Ketika komet mendekati Matahari, laju penguapan es pada inti meningkat dan debu yang membungkus inti mengembang. Atmosfer yang menyelubungi inti disebut dengan koma. Koma terdiri dari debu, molekul, radikal netral, jenis-jenis atom dan ion-ion molekul. Seiring dengan pembentukan koma, secara gradual massa komet berkurang. Molekul-molekul yang menyublim akan meninggalkan inti dengan kecepatan v_0 dianggap mengikuti distribusi *Maxwell-Boltzman* (Delsemme, 1982)

$$\frac{1}{2}\bar{v} \leq v_0 \leq \frac{2}{3}\bar{v} \quad (3-7)$$

\bar{v} kecepatan rata-rata molekul pada temperatur T;

$$\bar{v} = \left[\frac{8kT}{\pi m} \right]^{1/2} \quad (3-8)$$

dalam hal ini m = massa molekul dan k = konstanta Boltzmann

Rentang luminositas koma ditentukan oleh laju produksi gas dan debu yang berubah terus-menerus dengan waktu dan jarak heliosentrik. Laju produksi gas dan debu bergantung secara dominan pada medan gravitasi matahari, ukuran inti dan sifat penguapan es.

Beberapa model telah diajukan orang untuk untuk menjelaskan produksi gas. Misalkan laju ekspansi gas dalam koma adalah V konstan, rapat massa molekul pada jarak r dari inti $n(r)$ dan Q laju

produksi dalam mol/s (untuk komet aktif sekitar $\sim 10^{30}$ molekul/s pada jarak heliosentrik ~ 1 au) maka

$$n(r) = \frac{Q}{4\pi Vr^2} \quad (3-9)$$

Setelah kurun waktu tertentu t (dikenal sebagai life time) molekul induk berdisosiasi dan rapat massa dengan jejari bola $V.t$ akan berkurang dengan drastis. Model Haser memberikan distribusi rapat massa gas pada jarak r dari inti dengan pernyataan;

$$n(r) = \frac{Q}{4\pi Vr^2} e^{-\frac{r}{Vt}} \quad (3-10)$$

Dimana;

Q = laju produksi molekul/s

r = jarak dari inti

V = laju ekspansi

t = lifetime

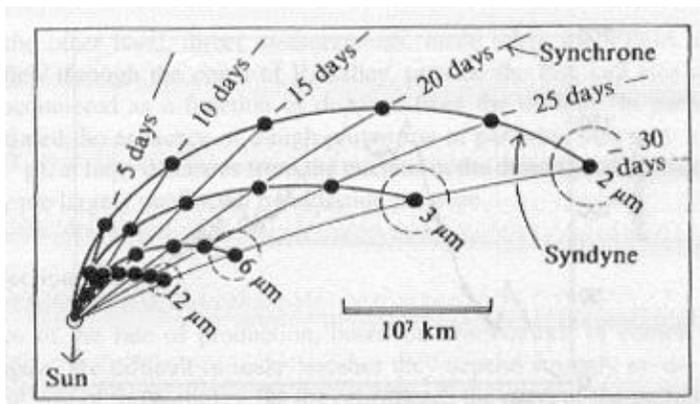
3.5 Debu Komet

Keberadaan debu dalam orde micrometer ($\mu\text{m} = 10^{-6}$ meter) diketahui pertama kali dari spektrum yang memerah dari cahaya matahari yang dipantulkan oleh komet. Debu terdiri dari silikat (komponen utama), karbon, senyawa organik, dan komponen metal ringan. Pada jarak 10^4 km dari inti, partikel debu hanya dipengaruhi oleh tekanan radiasi dan gravitasi matahari dengan kecepatan semburan 0,3 km/detik.

Ukuran partikel debu mengikuti distribusi Sekanina-Miler (1987)

$$n(a) = \begin{cases} 0 & \text{jika } \rho a < 0,45\mu\text{m} \\ (2a - 0,9)a^{-5} & \text{jika } 0,45\mu\text{m} < \rho a < 1,3\mu\text{m} \\ a^{-4.2} & \text{jika } \rho a > 1,3\mu\text{m} \end{cases}$$

Dimana a , adalah radius partikel dan ρ rapat massa dalam g/cm^3 . Distribusi ukuran dan umur partikel pada ekor komet diperlihatkan pada gambar berikut



Gambar 3- 7 Distribusi ukuran dan umur bulir (life time) debu pada ekor komet untuk berbagai selang waktu. Debu dengan umur yang sama disebut synchronic. Sedangkan distribusi debu dengan ukuran yang sama disebut syndyne.

3.6 Evolusi Fisis Komet

Komet adalah anggota Tata Surya yang memiliki periode orbit beragam, jumlah komet cukup banyak, periode orbit komet dapat berubah akibat evolusi demikian pula bentuk fisiknya.

Komet memiliki massa relatif kecil dan periode orbit yang panjang. Kondisi ini mengindikasikan adanya evolusi komet (baik internal maupun eksternal). Kajian atas evolusi fisik komet dilakukan saat komet mendekati Matahari (sekitar perihelion). Berdasarkan

bentuknya, komet dapat dibedakan dalam tiga bagian; kepala, ekor dan koma. Bagian kepala, yang terdiri dari inti, dan koma, serta ekor komet. Bagian inti komet, berbentuk gumpalan materi beku, yakni gumpalan es dimana bulir-bulir debu direkatkan bukan hanya oleh es (H_2O), tetapi juga oleh es (salju) yang diperoleh melalui solidifikasi gas-gas yang mudah menguap pada temperatur rendah seperti CO_2, CH_4, NH_3 . Dengan demikian inti komet terdiri dari es, clathrate (molekul,atom) yang tersimpan dalam es (H_2O , bulir debu). Bagian Koma terdiri dari gas dan debu, akibat penguapan inti komet oleh radiasi Matahari, semakin dekat komet ke matahari maka ukuran kecerlangan koma juga meningkat.

Ekor Komet memanjang dan menjauhi Matahari, terbentuk akibat tekanan radiasi dan angin Matahari. Akibat tekanan radiasi Matahari, partikel debu akan didorong keluar dari koma dan menjauhi koma. Gaya gravitasi Matahari menyebabkan pancaran partikel debu akan melengkung. Ekor komet jenis ini disebut *ekor debu* sedangkan ekor komet yang diakibatkan oleh angin Matahari dinamakan ekor ion, yakni pancaran partikel searah dengan pancaran angin Matahari. Ada banyak hipotesa mengenai keadaan awal dan proses evolusi komet. Salah satu hipotesa dinamakan *evolusi thermal inti komet*. Hipotesa ini menyatakan evolusi inti komet akan dipengaruhi oleh sumber-sumber panas internal dan eksternal (seperti radiasi matahari, sinar kosmik, peluruhan radioaktif) sublimasi, reaksi kimia, serta fase transisi.

Evolusi termal inti komet dibagi dalam dua fase yaitu panjang dan pendek;

1. Fase panjang terjadi saat komet berada pada jarak yang jauh dari Matahari (orde waktu tata surya)

2. Fase pendek, terjadi saat komet berada dalam orbit Tata Surya (evolusi termal baru dimulai)

3.7 Model inti komet

Model inti komet dibagi 2 yaitu;

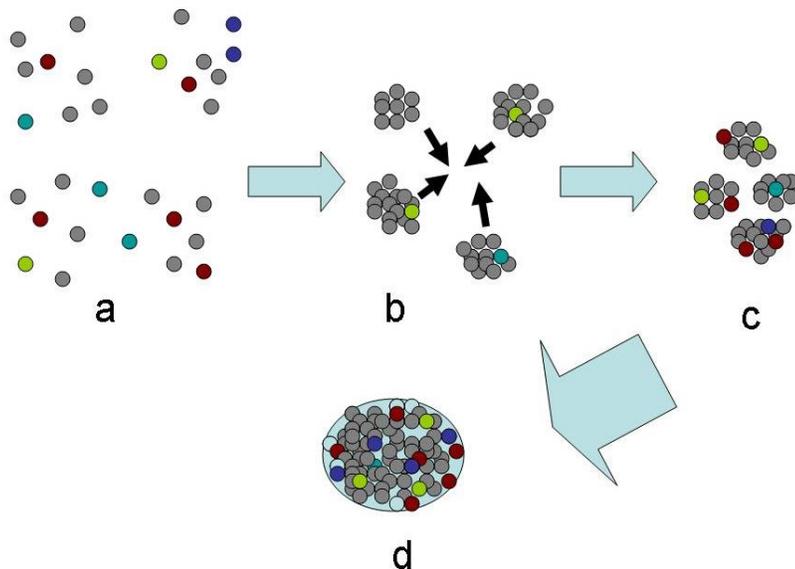
1. Model yang berhubungan dengan penentuan temperatur permukaan dan akibat-akibatnya
2. Model yang berhubungan dengan proses-proses internal

Menurut Whipple, komet terdiri dari campuran es. Model thermal inti komet dikonsentrasikan pada penentuan temperatur permukaan dengan memecahkan masalah difusi panas dan persamaan keseimbangan panas. Pemahaman terhadap model thermal inti komet merupakan dasar memahami karakteristik utama dan mekanisme evolusi sebuah komet. Inti komet terdiri dari bongkahan es yang tercampur dengan bermacam-macam zat. Alasan pendukung teori ini adalah;

1. Nisbah yang relatif cukup besar antara material yang mudah menguap (volatile) dengan yang tidak mudah menguap. Pada saat komet berada di sekitar perihelium proses kehilangan gas terus terjadi berulang-ulang selama beberapa kali periode revolusinya. Untuk komet dengan periode pendek bisa jadi ia akan kehilangan intinya setelah beberapa kali melewati perihelium
2. Fenomena yang disebabkan oleh gaya non gravitasional, tidak berkorelasi dengan model sandbank
3. Tidak terlihat kesamaan penampakan komet disekitar perihelium, saat mendekati maupun sesudah melewati
4. Pecahnya inti komet tidak dapat dicocokkan dengan model sandbank dan sulit untuk menjelaskan inti terdiri dari material berukuran besar

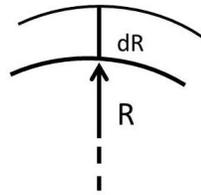
5. Gaya pasang surut dan Poynting-Robertson akan mengganggu inti sandbank dan menegasi model komet merupakan kumpulan partikel

Skenario model inti komet dibangun berdasarkan teori akumulasi



Gambar 3- 8 Model inti komet berdasarkan teori akumulasi. Inti dibangun dari kelompok partikel yang membentuk kumpulan. Kumpulan partikel ini membentuk lagi kumpulan yang lebih besar dan kompak, demikian seterusnya.

Misalkan tekanan pada inti, P_C , percepatan gravitasi, g dan kecepatan lepas partikel V_e Jika, G menyatakan konstanta gravitasi, ρ rapat massa rata-rata dan R menyatakan radius inti komet.



Inti Komet

Maka tekanan pada permukaan dapat dinyatakan oleh;

$$\frac{dP}{dr} = -\rho g(r) = -\rho \frac{GM}{r^2} \rightarrow dP = -\rho \frac{GM}{r^2} dr$$

Jadi ;

$$P = -\rho^2 G \frac{4}{3} \pi \int_0^R r dr = \frac{2}{3} \pi G \rho^2 R^2$$

Jadi tekanan pada inti komet dapat dinyatakan oleh;

$$P_C = \frac{2}{3} \pi G \rho^2 R^2 \quad (3-11)$$

Sedangkan percepatan gravitasi dapat dinyatakan oleh

$$g = \frac{4}{3} \pi G \rho R \quad (3-12)$$

Kecepatan lepas partikel dari inti komet

$$V_e = \left(\frac{8}{3} \pi G \rho \right)^{1/2} R \quad (3-13)$$

Jika diambil $\rho = 1 \text{ gram/cm}^3$ dan percepatan gravitasi maksimal di inti komet $g = 1 \text{ cm/sec}^2$ tabel berikut memberikan gambaran tentang radius inti, percepatan gravitasi dan kecepatan lepas maksimal yang bisa dibentuk oleh teori ini.

Tabel 3- 2 Tekanan, percepatan gravitasi dan kecepatan lepas di inti komet

| No | R[km] | Pc[dyne/cm ²] | g[cm/sec ²] | Ve [km/sec] |
|----|-------|---------------------------|-------------------------|--------------------|
| 1. | 1 | $1,4 \times 10^3$ | 0,02 | 8×10^{-4} |
| 2. | 10 | $1,4 \times 10^5$ | 0,2 | 8×10^{-3} |
| 3. | 100 | $1,4 \times 10^7$ | 2 | 8×10^{-2} |

Dapat dilihat untuk $g < 1 \text{ cm/sec}^2$ mengharuskan $R < 10$ kilometer. Jadi kalau model ini dipercaya tidak mungkin ditemukan komet dengan inti yang mempunyai radius lebih besar dari 10 kilometer. Komet Halley mempunyai inti dengan radius mendekati 10 kilometer. Beberapa peneliti telah menentukan kriteria beberapa inti komet, table berikut meragakan informasi tentang inti dari beberapa komet.

Tabel 3- 3 Sifat inti beberapa komet; periode rotasi (jam, hari untuk Halley)), jejari ekuatorial (kilometer), tekanan kali volume, nisbah jejari ekuatorial terhadap jejari kutub, albedo(%) dan referensi (Jewitt, 1991, 1996)

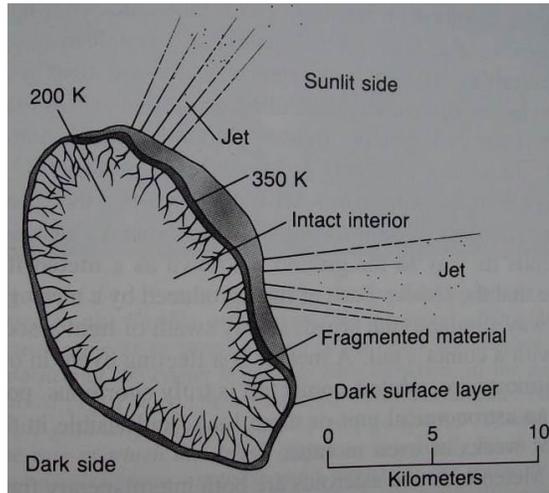
| Nucleus | P(hr) ^a | re(km) ^b | pV ^c | a/b ^d | f ^e (%) | Reference |
|------------------|--------------------|---------------------|-----------------|------------------|--------------------|-----------|
| Arend-Rigaux | 13.56 ± 0.16 | 5 | 0.03 | 1.6/1 | 0.1-1 | 1-6 |
| P/Neujmin | 12.67 ± 0.05 | 10 | 0.03 | 1.6/1 | 0.1-1 | 3, 7, 8 |
| P/Encke | 15.08 ± 0.08 | 3.5 | 0.04f | 3.5/1 | 0.2 | 9, 10 |
| P/Halley | 2.2d, 7.2d | 5 | 0.04 | 2/1 | 10 | 11-15 |
| P/Tempel 2 | 8.95 ± 0.01 | 5 | 0.021 | 1.9/1 | 0.1-1 | 16-21 |
| P/SW2 | 5.58 ± 0.03 | <3.1 | 0.04f | 1.6/1 | ? | 22 |
| P/Levy 1991XI | 8.34 | 5.8 | 0.04f | 1.3/1 | ? | 23 |
| P/Faye | — | 2.7 | 0.04f | — | 3 | 24 |
| P/Swift-Tuttle | 67.5 ± 0.4 | 11.8 | — | — | 3 | 25-31 |
| C/Hyakutake | 6.23 ± 0.03 | 2.1 ± 0.4 | 0.04f | — | 60 | 32-35 |
| C/Hale-Bopp | 11.30 ± 0.02 | 25 | — | — | 20 | 36-38 |
| P/Wilson-Harr | 6.1 ± 0.05 | — | — | 1.2/1 | — | 39 |

Arti upper-crypt

- a Nuclear rotation period.
- b Effective circular radius.
- c Visual geometric albedo.
- d Projected axis ratio.
- e Active fraction $\times 100$.
- f Albedo assumed.

Referensi

1 = Jewitt and Meech 1985; 2 = Millis et al. (1988); 3 = Birkett et al. (1987); 4 = Brooke and Knacke (1986); 5 = Tokunaga and Hanner (1985); 6 = Veeder et al. (1987); 7 = Jewitt and Meech 1988; 8 = Campins et al. (1987); 9 = Jewitt and Meech (1987); 10 = Luu and Jewitt (1990); 11 = Millis and Schleicher (1986); 12 = Sagdeev et al. (1989); 13 = Watanabe (1989); 14 = Samarasinha and A'Hearn (1991); 15 = Belton et al. (1991); 16 = A'Hearn et al. (1989); 17 = Jewitt and Luu (1989); 18 = Boehnhardt et al. (1990); 19 = Wisniewski (1990); 20 = Sekanina (1991); 21 = Mueller and Ferrin (1996); 22 = Luu and Jewitt (1992); 23 = Fitzsimmons and Williams (1994); 24 = Lamy et al. (1996); 25 = Sekanina (1981a); 26 = Yoshida et al. (1993); 27 = Boehnhardt and Birkle (1994); 28 = Jorda et al. (1994); 29 = Fomenkova et al. (1995); 30 = O'Ceallaigh et al. (1995); 31 = McDavid and Boice (1995); 32 = Larson et al. (1996); 33 = Schleicher et al. (1998); 34 = Sarmecanic et al. (1997b); 35 = Jewitt and Matthews (1997); 36 = Sekanina (1997); 37 = Rodriguez et al. (1997); 38 = Serra et al. (1998); 39 = Osip et al. (1995).



Gambar 3- 9 Profil inti komet Halley, inti komet mempunyai temperature 200 K ketika radiasi matahari mulai berperan. Semburan (*Jet effect*) timbul akibat perubahan fase padat-cair-gas. Dimensi jejari inti sekitar 10 kilometer.

3.8 Model Permukaan

Radiasi yang datang pada inti komet sebagian dipantulkan dan sebagian lagi diserap oleh lapisan permukaan inti. Terjadi pertukaran energi antara bagian permukaan dan interior (konduksi). Komet akan mantap bila energi yang diserap sama dengan energi yang dilepas. Whipple mengusulkan bahwa permukaan komet ditutupi oleh lapisan debu tipis. Model permukaan tidak bergantung pada radius komet, jadi temperatur permukaan dan kecepatan berkurangnya radius komet tidak berubah setelah melakukan revolusi berulang kali. Proses pemanasan atau pendinginan sebanding dengan jarak kuadrat, R^2

3.9 Model Interior

Kecepatan pembebasan energi melalui proses-proses internal sebanding dengan R^3 juga proses pemanasan atau pendinginan. Dengan demikian komet dengan R besar akan efisien jika dipanaskan melalui proses internal. Model ini mengasumsikan bahwa kerapatan dan perbandingan massa atau debu adalah homogen. Dugaan ini diperkuat dengan bukti tidak ditemukannya hubungan antara sifat permukaan inti komet yang teramati dengan umur komet. Dengan bertambahnya umur, lapisan bagian dalam inti semakin terbuka dan dapat mengungkapkan keragaman struktur dan komposisi kimia inti komet. Mc Kay(1986) menemukan hubungan antara T rata-rata permukaan dengan T rata-rata interior inti komet yang bergantung pada konduktivitas thermal

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\kappa}{\rho c} \frac{d^2T}{dz^2} \quad (3-14)$$

Dalam hal ini;

T - temperatur permukaan inti

z – ketebalan lapisan inti

κ - konduktivitas thermal permukaan inti

ρ - rapat materi permukaan inti

c – kapasitas thermal

Dengan;

Konstanta difusi termal: $\chi = \kappa/(\rho c)$

Konstanta waktu difusi : $\tau = R^2/(\pi^2 \chi)$

Model interior komet bergantung pada dua parameter:

1. Yang berhubungan dengan struktur, komposisi dan sifat termal materi komet.
2. Yang berhubungan dengan bentuk kelonjongan orbit komet (a,e)

3.9-1 Sifat es inti komet

Inti komet terdiri dari es amorf dan es kristalin. Es amorf terbentuk pada tekanan (P) dan temperatur (T) yang sangat rendah. Pada temperatur, $T = 137^0 \text{ K}$, es amorf bertransformasi menjadi es kubik selanjutnya bertransformasi lagi menjadi es heksagonal ketika temperatur mencapai 160^0 K . Es heksagonal dan es kubik memiliki kapasitas dan konduktivitas yang hampir sama, oleh karena itu dia dinamakan es kristalin.

Komet “tua”(sudah mengalami revolusi beberapa kali) terdiri dari es kristalin (sebagian atau seluruhnya). Komet “baru” terdiri dari es amorf. Kerapatan massa inti komet konstan, $\rho < 0,9 \text{ gram cm}^{-3}$ dan terdiri dari es murni dan debu (fraksi debu antara 0,2-1)

3.9-2 Konduktivitas termal (κ)

Es kristalin: $\kappa (T) = 5,67 \cdot 10^2 / T \text{ (erg cm}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ K}^{-1}\text{)}$

Es Amorf : $\kappa (T) = 2,34 \cdot 10^2 / T + 2,8 \cdot 10^3 \text{ (erg cm}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ K}^{-1}\text{)}$

$\kappa (T)$ bernilai kecil pada T besar

3.9-3 Evolusi fisis komet

Asumsikan pada waktu t tertentu, inti komet merupakan bola sempurna, tidak berotasi dengan;

$M(t)$ - massa total pada waktu t

$R(t)$ - radius pada waktu t , terdiri dari es dan debu

$P(t)$ - tekanan inti pada waktu t

Laju kehilangan massa ketika mengitari Matahari bergantung pada laju sublimasi, dE ;

$$\frac{dM}{dE} = -\frac{dV}{dR} = -\frac{d}{dR} \left(\frac{4\pi R^3}{3} \right) \rightarrow dM = -4\pi R^2 dE \quad (3-15)$$

Materi dilapisan terluar mengalami perubahan akibat proses sublimasi setelah inti komet mengalami pemanasan ketika dia mendekati titik perihelium.

Laju sublimasi dE adalah;

$$\frac{dE}{dt} = P(t) \{2P(t)mkT\}^{-1/2} \rightarrow dE = P(t) \{2P(t)mkT\}^{-1/2} dt \quad (3-16)$$

Dengan menggabungkan (3-16) maka kehilangan massa dM persatuan waktu dapat dihitung.

$$dM = -4\pi R^2 P(t) \{2P(t)mkT\}^{-1/2} dt \quad (3-17)$$

Dalam hal ini,

T dan m masing-masing suhu dalam derajat kelvin dan massa molekular dan

3.9-4 Evolusi tahap akhir

Kala hidup komet didefinisikan sebagai jumlah total revolusi komet mengitari Matahari, namun komet masih tetap aktif.

Ada dua cara untuk menjelaskan evolusi tahap akhir;

1. Metoda Mass-Loss (kehilangan massa)
2. Metoda pembungkusan debu

3.10 Metoda Mass-Loss

Inti komet kehilangan sebagian massanya setiap kali melintasi perihelion. Lapisan permukaan inti mengalami sublimasi, partikel yang lepas menyebabkan inti komet akan menyusut dan kemudian habis. Massa dan ukuran geometri komet menjadi kecil sehingga tidak mampu lagi menghasilkan gas dan debu. Komet akhirnya hilang dan tak dapat diamati lagi. Ada dua konsep tentang kehilangan massa ini, yaitu;

- a) Mass-loss mutlak, laju hilangnya massa meliputi gas, bulir-bulir es, bulir debu dan partikel meteor
- b) Mass-loss relatif, laju hilangnya massa inti komet dibandingkan dengan massa total komet

3.11 Model Pembungkusan Debu

Bulir debu yang tinggal pada permukaan inti makin banyak terkumpul sehingga menutupi daerah sublimatif sampai akhirnya terbentuk lapisan debu penyekat. Akibatnya daerah inti yang tadinya aktif menjadi tidak aktif lagi. Ketika evolusi berlangsung, inti mengalami perubahan, daerah sublimasi berkurang aktifitasnya dan akhirnya inti komet menjadi mati, komet menjadi mirip asteroid. Misalnya, komet keluarga Jupiter.

Dalam jangka panjang kedua skenario itu dapat memprediksi berkurangnya luas daerah sublimasi dan kecerlangan absolut (B) inti komet.

Dalam jangka pendek, model mass-loss dapat memprediksi berkurangnya radius inti (R) sedangkan pada model pembungkusan

debu dapat menjelaskan berkurangnya fraksi sublimasi bebas (f) dari luas daerah permukaan.

Kita tahu percepatan non-gravitasi $A \propto f/R$. Akibatnya adalah, pada model mass-loss akan menambah percepatan non-gravitasi, sedangkan pada model pembungkusan debu akan mengurangi percepatan non-gravitasi.

3.12 Kala Hidup

Umur absolut (N_A)

Rentang waktu dalam satuan periode untuk terjadinya penguapan es H_2O . Peristiwa penguapan ini bisa terjadi ketika $q \leq 2,8$ au

Umur Inkremental (N_i)

Rentang waktu dalam satuan periode sejak berkurangnya q , ketika bertemu Jupiter ($\Delta q \leq 0,5$ au)

3.13 Variasi Kecerlangan

Komet mengalami pertambahan kecerlangan intrinsik dengan berkurangnya jarak q . Selain itu akibat rotasi inti, komet juga mengalami variasi kecerlangan (outburst), karena ada daerah aktif yang mendadak menerima sinar Matahari. Komet dengan f kecil sangat sensitif terhadap fluktuasi dengan kecerlangan besar.

Ada 3 aspek yang diperoleh dari variasi kecerlangan komet yang dapat diamati;

a) Kecerlangan bertambah saat mendekati perihelion dan berkurang saat menjauhi

- b) Perbedaan kecerlangan sebelum dan setelah melewati perihelion sangat jelas walau pada jarak heliosentrik yang sama
 c) Kecerlangan tidak tampak beraturan tapi menyerupai flare, dan outburst

Untuk menentukan magnitudo komet dapat digunakan pernyataan berikut;

$$m = M + 5 \log d + 2,5n \log r \quad (3.9)$$

dengan,

m-magnitudo semu

M-magnitudo mutlak (magnitudo semu pada jarak $r = 1$ au)

r-jarak dari Matahari

d-jarak dari Bumi

n-konstanta kecerlangan bergantung dari variasi kecerlangan dan jarak heliosentrik

3.14 Tinjauan Evolusi Dinamis Orbit Komet

Komet terdiri dari inti (nukleus), halo yang mengitari inti (koma) dan ekor. Dalam perjalanannya, komet mengalami perubahan fisis (evolusi) dan perubahan orbit (perubahan dinamis). Planet, bintang, awan molekul raksasa (giant molecules clouds) dan galaksi berperan dalam evolusi komet.

Evolusi dimulai saat komet berada di titik aphelionnya dalam awan Oort (20.000 au-150.000 au). Pada kondisi ini gangguan gravitasional bintang yang lewat ikut berperan, juga dari bidang galaksi. Pada saat komet memasuki kawasan Tata Surya, gangguan gravitasi dari planet menjadi dominan. Besarnya gangguan ditentukan oleh jarak perihelion dan sudut inklinasi.

Pengaruh gaya ganggu (perturbasi) planet pada evolusi orbit komet berakibat;

1. Hilangnya komet dari Tata Surya
2. Bentuk orbit mendekati parabola, periode lebih panjang
3. Pola energi ($1/a$) diantara populasi komet memperlihatkan distribusi yang berubah

Komet dari sifatnya dapat dibedakan dalam dua hal;

Aktif : Menyemburkan volatile dan debu, koma terdeteksi

Dormant : Inti tidak menyemburkan volatile, koma tidak terdeteksi, kadang-kadang aktif

Extinct : Seluruh volatile telah hilang

Enam aspek signifikan transisi komet-asteroid:

1. Ditemukannya objek baru, comet-like orbit pada asteroid dikenal sebagai cikal bakal extinct atau dormant komet
2. Ditemukannya debu dan volatile coma dari 2060 Chiron, akibatnya Chiron kadang-kala teridentifikasi sebagai komet
3. Studi observational tentang inti komet, sebagai pembanding dengan Near Earth Asteroids (NEA)
4. Studi NEA yang merupakan kandidat extinct komet
5. Ditemukannya ekor debu pada pra-temuan 4015 Wilson-Harrington
6. Observasi ekor debu pada komet periode pendek

Telaah debu koma (dust comae), terhadap 11 asteroid tipe NEA oleh Lau dkk (1992a):

Mass loss rates (dm/dt) bervariasi dari 10^4 gram/s untuk komet periode pendek dan 10^6 gram/s untuk komet periode panjang , dengan ukuran rerata bulir $a = 0,5 \mu\text{m}$

3.15 Perturbasi Planet dan Bintang

Setelah komet mengitari kawasan planet beberapa kali, maka orbit komet akan berubah dari elips menjadi parabola atau hiperbola sehingga terlepas Tata Surya

- a) Komet periode panjang akan kehilangan energi
- b) Jarak aphelion berkurang dan periode semakin pendek
- c) Energi total E berubah tapi tidak mengubah jarak perihelion, kecuali untuk komet periode pendek.

Untuk komet periode panjang perturbasi dapat disebabkan oleh;

- a) Planet utama
- b) Gaya non gravitasional
- c) Bintang lewat secara random

Disintegrasi komet dapat terjadi oleh;

- a) Tabrakan dengan planet atau dengan Matahari
- b) Pecahnya komet akibat gaya pasang surut ketika berpapasan dengan planet
- c) Hilangnya materi akibat penguapan

3.16 Lepasnya Komet dari Tata Surya

Laju kehilangan komet dari Tata Surya dapat ditinjau sebagai fungsi waktu ketika pertama kali melewati perihelion dan fungsi jumlah revolusi mengelilingi Matahari. Untuk menghitungnya digunakan metode random walk yang didasarkan pada perubahan energi ($1/a$) komet berlangsung random hingga hilang ke ruang antar bintang atau masuk ke kawasan planet bagian dalam, angka kritis yang diperoleh adalah $1/a = 1/1300/\text{AU}$

Fakta statistik menunjukkan bahwa;

- a) Lebih dari 90% komet terlempar dari Tata Surya dalam 100 satuan waktu (5 juta tahun) dan prosentasi komet yang tetap tinggal dalam Tata Surya hampir tidak bergantung pada energi awalnya
- b) Prosentase komet yang tetap terikat pada Tata Surya setelah T satuan waktu sebanding dengan $T^{-2/3}$

Peluang agar komet tetap terikat pada Tata Surya mengikuti pernyataan;

$$\alpha \left(\delta \left(\frac{1}{a} \right) \right) = 2\alpha (\delta E) (G(M_0 + M_J))^{-1} \quad (3.10)$$

Jika N - menyatakan laju kehilangan setelah komet melakukan beberapa revolusi. Probabilitas komet agar tetap terikat pada Tata Surya akan mengikuti pernyataan berikut;

$$P_N \sim (\pi N)^{-1/2} \quad (3.11)$$

Dari pernyataan ini diperoleh sekitar 90% komet akan terlempar dari Tata Surya setelah 40 kali revolusi

3.17 Perturbasi oleh Bintang

Sebagian besar komet terkonsentrasi pada rentang setengah sumbu panjang elip $a = 2 \times 10^4 \text{ AU} \sim 3 \times 10^4 \text{ AU}$. Dengan jarak aphelion Q yang berkisar dari $\sim 4 \times 10^4 \text{ AU}$ sampai $\sim 6 \times 10^4 \text{ AU}$. Pada kondisi setengah sumbu panjang a , dan jarak aphelium, Q yang membesar, pengaruh gaya gravitasi (gayasentral) Matahari semakin lemah sehingga komet sangat sensitif terhadap gangguan. Gangguan ini bisa berasal dari;

- a) Medan gravitasi planet besar pengikut Matahari
- b) Bintang-bintang yang lewat

Besarnya gangguan oleh bintang lewat dapat dideteksi dengan metode Impuls kecepatan, I (perubahan kecepatan sebelum dan sesudah perjumpaan) yang dapat dihitung dari pernyataan;

$$I_c = \frac{2GM_b}{V_b D_c} \quad (3.12)$$

$$I_m = \frac{2GM_b}{V_b D_m} \quad (3.13)$$

Besarnya Impuls gangguan terhadap komet $I = I_c - I_m$

Dalam hal ini;

I_c – impuls yang diterima komet persatuan massa

I_m – impuls yang diterima Matahari persatuan massa

M_b – massa bintang

V_b – kecepatan bintang relatif terhadap Matahari

D_c – jarak terdekat bintang dari komet

D_m – jarak terdekat bintang dari Matahari

Makin jauh jarak bintang dari Matahari maka I_m semakin kecil. Metoda ini cocok untuk komet dengan lintasan ellip dan bukan parabola. Oleh karena itu orbit komet dianggap berbentuk ellip yang sangat lonjong, jika lintasan bintang tersebut jauh dari Matahari. Namun tatkala rentang $D_m = 100000$ AU, maka I_m tidak jauh berbeda dari I_c dengan demikian perturbasi yang diterima komet cukup kecil (perjumpaan jauh, distance encounter)

Jika lintasan bintang dekat dengan Matahari, $I_c > I_m$ sehingga perturbasi besar. Jika I_c lebih besar dari kecepatan lepas komet dari Tata Surya maka komet akan meninggalkan Tata Surya (perjumpaan dekat, close encounter).

Ada tiga tahap akhir evolusi orbit sebuah komet akibat perjumpaan dekat (close encounter);

- a) Terlempar dari awan dalam bentuk orbit hiperbola (kasus lemparan)
- b) Perturbasi pada jarak aphelium berlangsung diluar bola pengaruh matahari (kasus ruang bintang)
- c) Perubahan jarak aphelium yang bergeser ke dalam kawasan planet

3.18 Evolusi di kawasan Planet

Dari data statistic komet. Jumlah komet dengan $q < 5$ AU bertambah secara perlahan, di luar itu jumlah komet bertambah cepat sampai $q \approx 20$ AU dan kembali bertambah dengan perlahan-lahan pada rentang perihelium, $q > 20$ AU. Untuk mencapai $q < 5$ AU komet harus melalui orbit planet luar dengan kemungkinan terlempar dari Tata Surya. Ada empat kemungkinan evolusi komet di kawasan Tata Surya;

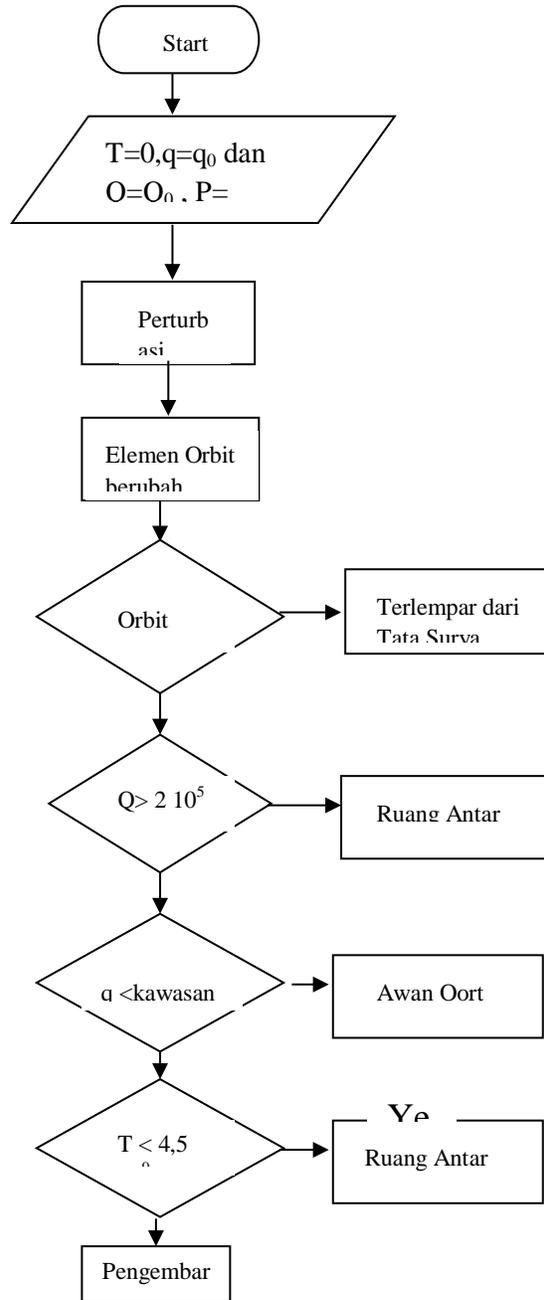
- a) Terlempar dari Tata Surya, komet melewati orbit Jupiter dan Saturnus, pada saat ini, ada kemungkinan komet tersebut akan tertangkap atau terlempar keluar dengan peluang yang sama.
- b) Memasuki ruang antar bintang
- c) Orbit berubah menjadi periode yang lebih pendek
- d) Kembali ke awan Oort

Hampir semua komet yang melewati orbit Uranus dan Neptunus terlempar ke awan Oort. Di awan Oort dia mengalami perturbasi dari bintang, selanjutnya kembali ke kawasan Tata Surya.

Perturbasi oleh planet utama dapat berakibat;

- a) Komet terlepas dari Tata Surya sehingga jumlah komet yang terikat berkurang. Jumlah komet dalam Tata Surya sebanding dengan $T^{-2/3}$ (T-waktu fisis) dan sebanding dengan $N^{-1/2}$ (N-jumlah revolusi). Setelah $N > 40$ sekitar 90% merupakan peluang komet akan terlepas dari Tata Surya
- b) Energi ikat ($1/a$) berubah terhadap waktu tetapi tidak bergantung pada nilai awal $1/a$
- c) Periode komet akan berkurang sebanding dengan $N^{-3/4}$. Akibatnya komet periode panjang akan berubah menjadi komet periode pendek

Berikut digambarkan diagram transformasi komet periode panjang dan periode pendek.



Gambar 3- 10
Transformasi Komet Periode

V_e

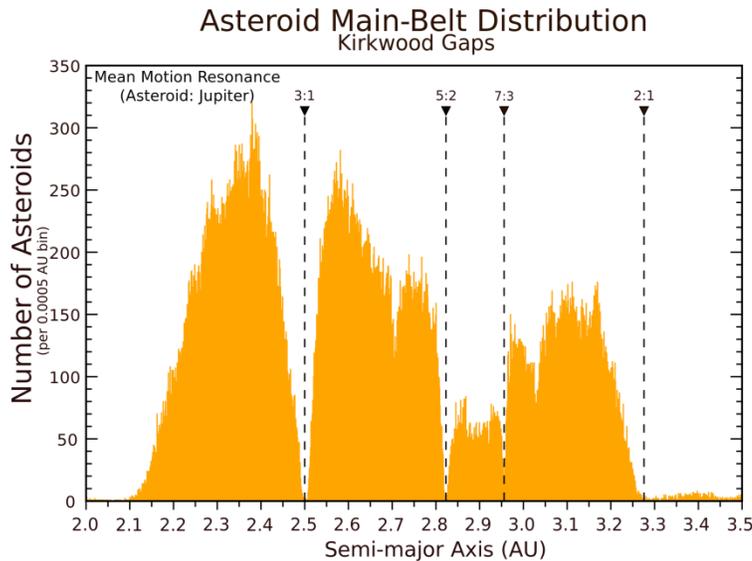
Bab 4 Asteroid dan Debu Antar Planet

4. 1 Asal Mula Asteroid

Ada bermacam teori yang mencoba menjelaskan tentang asal mula asteroid. Teori yang pertama adalah asteroid berasal dari awan-awan primordial pembentuk Tata Surya kita, pada tahap awal terjadinya Tata Surya awan ini tidak sempat menjadi planet, karena gaya gravitasi yang tidak cukup untuk membuat ia seperti planet lain dari Tata Surya kita, teori ini sukses menjelaskan keberadaan asteroid besar yang berbentuk spherical, tapi gagal menerangkan asal mula asteroid yang berbentuk irregular.

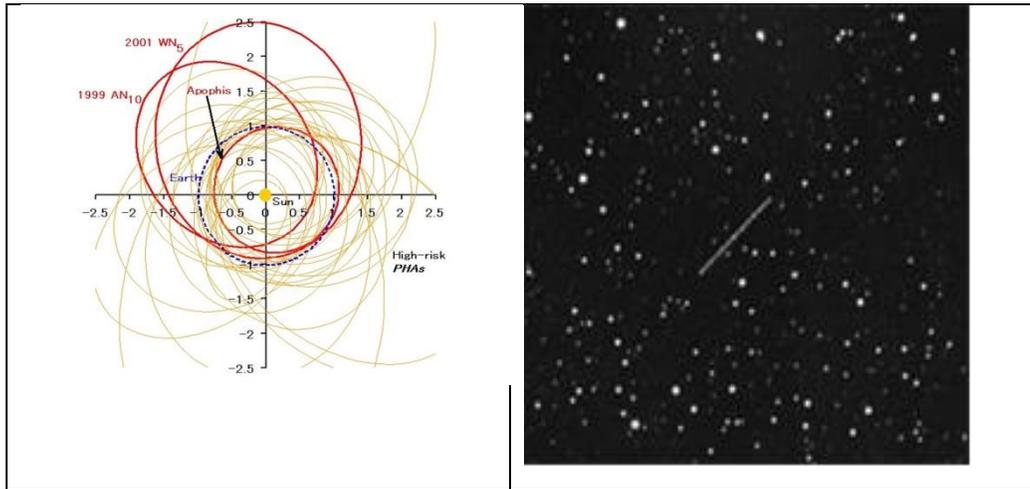
Oleh sebab itu ada teori yang mengatakan bahwa asteroid berasal dari pecahan sebuah planet yang dulu ada diantara Mars dan Jupiter. Gaya pasang surut yang dialami secara periodik dari Jupiter menyebabkan planet tersebut tidak mampu mempertahankan keutuhannya.

Teori ini cocok untuk asteroid berukuran kecil dan berbentuk irregular, namun gagal menjelaskan untuk asteroid berbentuk beraturan atau bola. Sekarang teori ini hanya tinggal sebagai catatan sejarah



Gambar 4- 11 Distribusi asteroid sabuk utama. Kawasan kosong ditemukan pada skala resonansi Asteroid-Jupiter sebesar 3:1, 5:2, 7:3, dan 2:1. Artinya asteroid sudah mengelilingi matahari 3 kali Jupiter baru satu kali, demikian seterusnya pada kawasan 2:1 asteroid mengelilingi Matahari 2 kali Jupiter baru satu kali. Kawasan ini dikenal sebagai Kirkwood Gaps.

. Asteroid umumnya menempati kawasan pada jarak 2,3au yang dikenal sebagai kawasan sabuk asteroid (Asteroid Belt), di kawasan ini asteroid tadi mengorbit dalam beragam bentuk lintasan yang kadangkala satu sama lain saling bertabrakan, pecahan ini adakalanya terlempar keluar dari sabuk tadi dalam bentuk orbit yang menyerupai komet, asteroid ini dikenal sebagai asteroid tipe Apollo-Amor-Aten disingkat AAA. Ada beberapa zona asteroid, kriterianya diajukan oleh Zellner(1979), Kresak(1979), Shoemaker dan kawan-kawan (1979). Ringkasannya disarikan dalam Tabel 4-1 berikut;



Gambar 4- 12 Gambar kiri lintasan maya(simulasi) asteroid dekat Bumi (Near Earth Asteroids, NEAs), asteroid ini menyilang lintasan planet Mars, Bumi dan Venus. Jejak asteroid pada plat potret dengan latar belakang bintang-bintang. Goresan panjang foto sebelah kanan menunjukkan asteroid bergerak lebih cepat dari gerak Teleskop.

Tabel 4- 1 Kriteria gugus asteroid menurut Zellner(1979), Kresak(1979) dan Shoemaker et.al (1979)

| No | Zona | Asteroid | Kriteria | Model |
|----|------|----------|--|---------------|
| 1. | A1 | Aten | $a < 1,0, Q > 0,983$ | Shoemaker dkk |
| 2. | A2 | Apollo | $a \geq 1,0, q \leq 1,017$ | Shoemaker dkk |
| 3. | A3 | Amor | $a > 1,0, 1,017 < q \leq 1,3$ | Shoemaker dkk |
| 4. | Hu | Hungaria | $1,82 < a < 2, e < 0,5$ dan $i > 16^0$ | Zellner |
| 5. | Ph | Phoceas | $2,25 < a < 2,50, e < 0,35$ dan $i > 17^0$ | Zellner |
| 6. | Fl | Floras | $2,06 < a < 2,29$ dan $i < 10^0$ | Zellner |

| | | | | |
|-----|-----|---------------|---|---------|
| 7. | Ny | Nysa | $a \approx 2,43, e \approx 0,17$ dan $i \approx 3^0$ | Zellner |
| 8. | I | Main Belt I | $2,06 < a < 2,50, e < 0,35$ dan $i < 30^0$ | Zellner |
| 9. | II | Main Belt II | $2,50 < a < 2,82, e < 0,35$ dan $i < 30^0$ | Zellner |
| 10. | Eos | Eos | $a \approx 3,01 e \approx 0,17$ dan $i \approx 10^0$ | Zellner |
| 11. | Ko | Kronis | $a \approx 2,85, e \approx 0,05$ dan $i \approx 2^0$ | Zellner |
| 12. | Th | Themis | $a \approx 3,13, e \approx 0,15$ dan $i \approx 1^0$ | Zellner |
| 13. | III | Main Belt III | $2,82 < a < 3,27$ | Zellner |
| 14. | IV | Main Belt IV | $3,27 < a < 3,65, e < 0,35$ dan $i < 30^0$ | Zellner |
| 15. | Hi | Hildas | $3,80 < a < 4,2, e < 0,35$ dan $i < 30^0$ | Zellner |
| 16. | T | Trojan | $5,31 < Q < 5,96$ dan $4,41 < q < 5,15$ | Kresak |
| 17. | Z | Exceptional | Tak terdefinisi | |

Zona Z adalah untuk asteroid yang tidak dapat dimasukkan pada kelas lain, asteroid yang menyerempet Bumi biasanya dimasukkan ke dalam gugus Z

Selain itu karakteristik spektrum asteroid dibedakan dalam 4 kelompok;

1. C-Type asteroids (carboneous) merupakan asteroid yang tergelap dari kelompok yang lain. Asteroid tipe ini ciri-cirinya adalah banyak mengandung silikat terhidrasi dan carbon. Populasinya mencapai 60% dari asteroid penghuni sabuk utama
2. S-type asteroids (siliceous) memiliki kriteria spektrum yang mengandung pyroxene dan oliven. Umumnya asteroid tipe Apollo dan Amor serta sebagian asteroid sabuk utama memiliki ciri ini. 30% dari populasi total asteroid mempunyai kelas spektrum tipe S
3. M-type asteroids (metallic), memperlihatkan dominasi unsur besi dan nikel
4. U-type asteroids (unclassified) merupakan kelas spektrum asteroid yang belum pernah dikenal orang, tidak dapat diklasifikasikan kedalam kelas C,S maupun M. Asteroid Vesta adalah contoh kelas U, mempunyai albedo sekitar 40% dan spektrum yang didominasi oleh kurva penyerapan pyroxene dan feldspar.

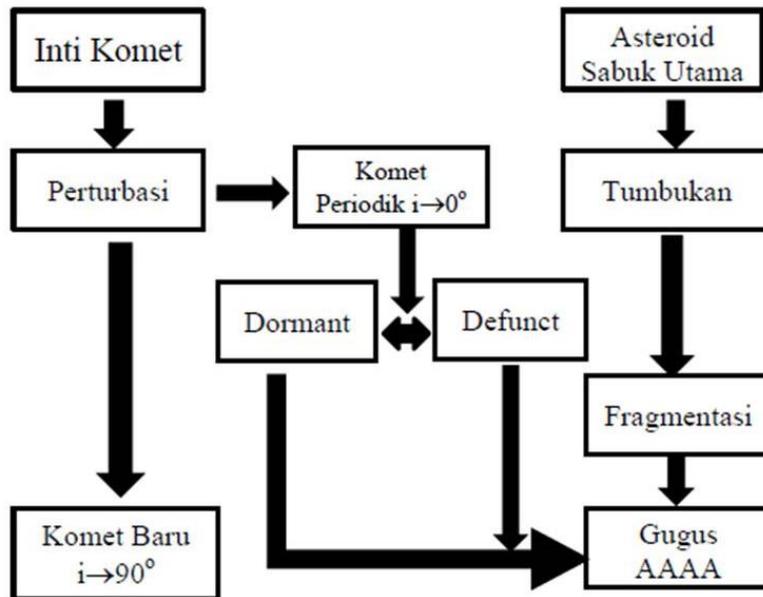


Gambar 4- 13 Searah dengan putaran jarum jam Eros, Ida dan satelitnya Dactyl. Citra kawah besar di Vesta warna biru, citra radar asteroid Galevka dan kawah besar di Eros.

Tabel 4- 2 Komposisi dan rapat massa untuk berbagai kelas utama asteroid (Mirel Birlan, 2002, Dynamics and Physical Consideration on the Asteroid density in Earth, Moon and Planets, 88, 1-10).

| Taxonomic type | Komposisi | Rapat massa (kg/m ³) |
|----------------|--|----------------------------------|
| S | Silicates (olivine, pyroxene), NiFe | 2,600–3,300 |
| C | Carbon compounds, clays, organics | 1,600–2,200 |
| V | Silicates (olivine, pyroxene), plagioclase | 3,000–4,300 |
| M | Fe, Ni | 5,900–7,900 |

Pengamatan yang lebih rinci dilakukan oleh misi GALILEO, wahana pertama yang melintas dekat asteroid. Keluaran ilmiah yang didapat dari misi ini adalah pengukuran yang dilakukan oleh Galileo tidak terganggu oleh gangguan gravitasional 243 Ida dan 951 Gaspra. Estimasi pertama sudah dilakukan oleh Belton et al. (1995), dengan batasan satelit 243 Ida belum diketahui waktu itu mempunyai satelit Dactyl. Dactyl mengelilingi Ida dalam tempo 5jam 24 menit. Pengetahuan tentang periode menghasilkan rapat massa rerata adalah $(2,600 \pm 500) \text{ kg/m}^3$. Nilai ini sangat dekat dengan rerata rapat massa asteroid tipe S, juga dekat dengan rapat massa yang diukur oleh Belton dkk dengan asumsi volume Ida adalah $(16.1 \pm 1.9) \times 10^{12} \text{ m}^3$, sehingga massa Ida adalah $(4.18 \pm 1.3) \times 10^{16} \text{ kg}$.



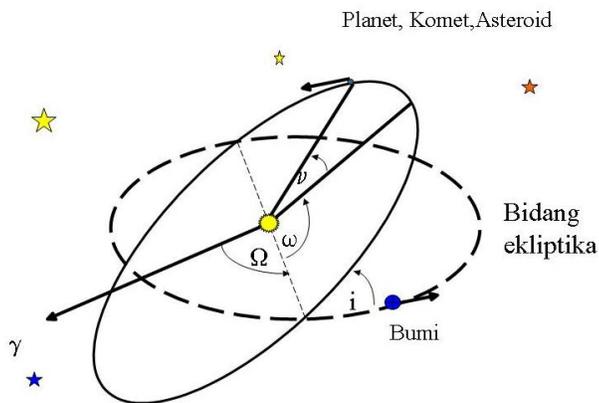
Gambar 4- 14 Diagram hipotesa asal muasal asteroid asteroid dekat Bumi terdiri dari 4 kelompok; Atira, Aten, Apollo dan Amor (AAAA) yang merupakan cikal bakal asteroid lintas dekat Bumi. Dikenal dengan jargon, Near Earth Asteroids (NEAs).

Selain Galileo wahana NEAR juga meneliti asteroid tipe C, wahana terbang sekitar 1212 km dari asteroid 253 Mathilde, dengan albedo geometri 0,047. Mathilde menunjukkan objek yang mempunyai daya pantul kecil. Asteroid berdimensi sekitar $66 \times 48 \times 44$ km, dimensi ini lebih kecil dari data observasi yang dilakukan dari Bumi, selain itu diperoleh massa $(1,033 \pm 0.044) \times 10^{17}$ kg. Mathilde merupakan asteroid dengan rapat massa terkecil yaitu $(1,340 \pm 20)$ kg/m^3 .

4. 2 Syarat Terjadinya Tumbukkan Asteroid-Bumi

Syarat agar dua benda saling bertabrakan ialah pada saat bersamaan kedua benda berada pada satu titik. Ini berarti asteroid akan menabrak Bumi pada waktu t apabila dipenuhi beberapa syarat;

1. Asteroid berada pada titik simpul (node);
2. Asteroid berada pada titik potong antara bidang orbit dengan bidang ekliptika
3. Bumi berada pada bujur titik simpul asteroid yang bersangkutan



Gambar 4- 15 Lintasan Bumi dan Asteroid, tabrakan terjadi apabila Asteroid dan Bumi pada saat bersamaan berada di titik simpul. Makin kecil inklinasi makin besar peluang untuk bertumbukan.

4. 3 Persamaan Elemen Orbit Asteroid Kandidat Penabrak Bumi

Asteroid memiliki lintasan orbit berbentuk elips. Jarak heliosentrik dinyatakan dengan bentuk persamaan lintasan;

$$r = \frac{a(1-e^2)}{1+e\cos\nu} \quad (4.1)$$

dalam hal ini;

r - menyatakan jarak dari Matahari dalam satuan astronomi

a - setengah sumbu panjang elips dalam satuan astronomi

e - eksentrisitas

ν - anomali benar

Terdapat dua macam topologi orbit yang bertabrakan;

1. Linkage: membentuk mata rantai, bentuk kedua orbit menyerupai mata rantai. Hal ini terjadi bila $\omega = 0$ atau $\omega = \pi$
2. Unlikage: membentuk rantai bersambung, terjadi bila $\omega = \pi/2$ atau $\omega = 3\pi/2$

Asteroid akan menabrak Bumi pada saat anomali benar mempunyai nilai;

$\nu = \omega$ atau $360^\circ - \omega$. Dengan demikian dari persamaan diatas dapat ditunjukkan;

$$\omega = \cos^{-1} \pm \frac{1}{e} \left[\frac{a(1-e^2)}{r} - 1 \right] \quad (4.2)$$

Pada saat tabrakan jarak r juga menyatakan jarak Bumi ke Matahari, dengan demikian kita peroleh;

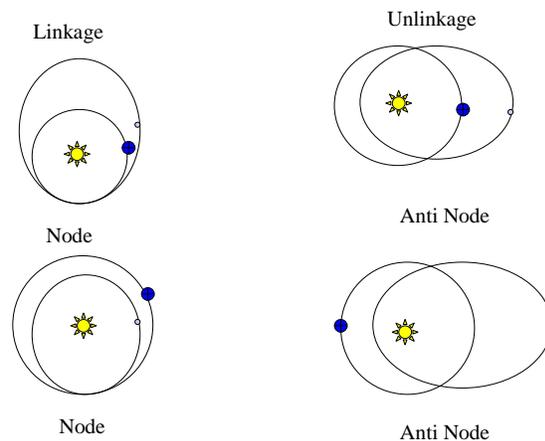
$$\omega = \cos^{-1} \pm \frac{1}{e} [a(1-e^2) - 1] \quad (4.3)$$

Persamaan ini hanya berlaku bila dipenuhi;

$$-1 \leq \frac{1}{e} [a(1-e^2) - 1] \leq 1 \quad (4.4)$$

Beberapa kandidat yang memenuhi syarat ini diperlihatkan dalam tabel berikut;

Topologi Orbit Bumi – Asteroid Yang Bertabrakan



Gambar 4-16 Macam-macam kemungkinan terjadinya tumbukan, linkage dan unlinkage

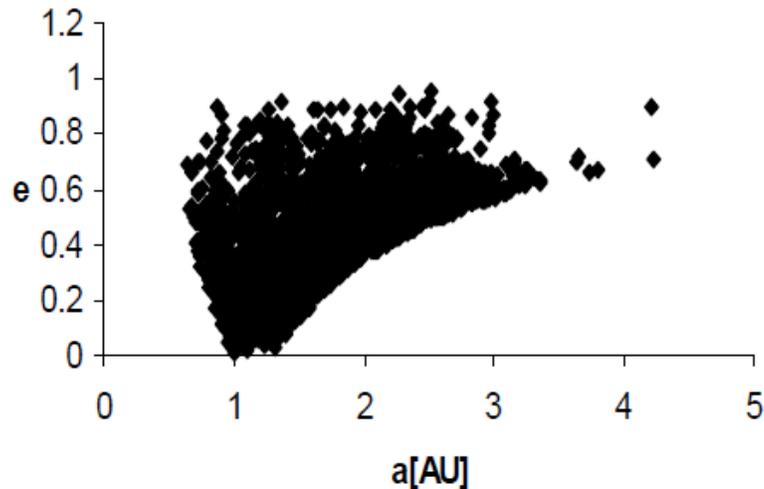
Berikut didaftarkan beberapa kandidat asteroid yang berpotensi untuk bertabrakan dengan Bumi.

Tabel 4- 3 Asteroid, elemen orbit (geometri) dan argumen perihelium ω_0 teoritis agar terjadi tabrakan.

| No | Nama | Kelas | a [AU] | e [.] | ω [Deg] | ω_0 [Deg] |
|----|---------------|--------|-----------|----------|-------------------|---------------------|
| 1 | 1566 Icarus | Apollo | 1,078 | 0,827 | 31,20 | 31,17 |
| 2 | 2102 Tantalus | Apollo | 1,290 | 0,298 | 61,60 | 54,07 |
| 3 | 2201 Oljato | Apollo | 2,176 | 0,712 | 95,81 | 96,23 |
| 4 | 1994 GV | Apollo | 2,030 | 0,523 | 154,30 | 155,35 |
| 5 | 2340 Hathor | Aten | 0,844 | 0,445 | 39,83 | 43,38 |
| 6 | 3362 Khufu | Aten | 0,989 | 0,469 | 54,84 | 60,91 |

Dari tabel diatas tidak terlihat ada objek Amor, hal ini dapat dimengerti karena Amor tidak pernah memotong orbit Bumi, tapi hanya menyinggung lintasan Bumi. Perlu diingat bahwa element

orbit juga berubah sebagai fungsi waktu, karena adanya gaya perturbasi dari planet-planet lain di Tata Surya kita. Namun untuk ilustrasi yang tidak memerlukan ketelitian yang tinggi gambaran diatas sudah cukup untuk menjelaskan kenapa AAA dapat mengancam Bumi.



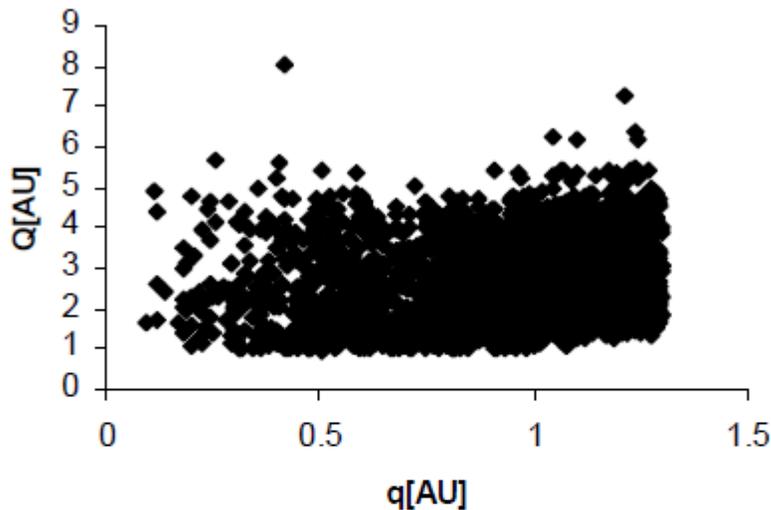
Gambar 4-17 Rajah setengah sumbu panjang versus eksentrisitas orbit NEA.

Beberapa benda kecil ini pernah mendekati Bumi. Salah satu nya adalah yang dikenal dengan nama 1479 Toutatis. Asteroid ini ditemukan oleh Christian Pollas dan kawan-kawan pada tanggal 4 Januari 1989 di Observatorium Caussols, Perancis. Asteroid ini kelihatannya ganda, diperkirakan masing-masing bergaris tengah 2,5 kilometer dan 1,5 kilometer mempunyai massa sekitar $0,05 \times 10^{15}$ kilogram, masing-masing komponen berotasi dengan periode 130 jam dan periode orbit 3,98 tahun kelas spektral S. Objek ini mendekati Bumi pada tanggal 29 September 2004 dengan jarak $1,5 \times 10^6$ kilometer. Toutatis mempunyai orbit yang cukup lonjong dengan eksentrisitas 0,6, jarak perihelion 0,934 SA. Toutais bergerak se-olah olah mengelinding karena bentuknya yang tidak

simetris, tidak beraturan dan sangat lonjong untuk asteroid seukuran dia. Rotasinya terentang dari 5,41 sampai 7,33 hari. Gabungan gerak periodic ini menghasilkan gerak yang tidak periodik seperti halnya planet lain yang hanya berotasi pada satu sumbu.

Selain unik dalam gerak rotasinya 4179 Toutais memiliki gerak *dual resonance* sebab dia memiliki resonansi orbit 3:1 terhadap Jupiter dan resonansi orbit 1:4 terhadap Bumi. Resonansi 3:1 terhadap Jupiter menunjukkan ia akan kembali ke posisi yang sama relative terhadap Jupiter setelah tiga kali putaran mengelilingi Matahari. Sedangkan resonansi orbit 1:4 terhadap Bumi artinya ia akan kembali ke posisi relative terhadap Bumi setelah Bumi mengelilingi Matahari sebanyak empat kali. Asteroid yang sering mendekati orbit Bumi dikenal sebagai Near Earth Asteroid (akronim NEA). Dulu asteroid yang mendekati Bumi berasal dari tiga kelas, yaitu; Aten, Apollo dan Amor (AAA asteroid). Pertengahan tahun 2010 ditemukan kelompok Atira yang mempunyai aphelium $Q < 1$ SA sekarang Atira sudah dimasukkan kedalam kelompok NEA.

Pada saat ini lebih dari 8000 (awal 2012) element orbit NEA yang telah ditentukan orang. Toutatis adalah prototipe kelas Apollo dengan jarak perihelium $q \leq 1,0167$ SA dan setengah sumbu panjang elips $a \geq 1,0$ SA oleh sebab itu lintasannya tumpang tindih dengan orbit Bumi disekitar periheliumnya. NEA dipercaya merupakan objek yang dilontarkan secara kontinyu dari Sabuk Utama asteroid sebagai konsekuensi peristiwa tumbukan yang masih terjadi di sana. Objek yang merupakan pecahan dari asteroid yang lebih besar ini masuk ke dalam radius orbit Bumi.



Gambar 4- 18 Rajah aphelium versus perihelium NEA. Maksimum perihelium dan aphelium masing-masing adalah $q=1,3$ SA untuk 2002 PG43 dan $Q=34.999$ untuk 1999 XS35. Sedangkan minimum perihelium dan aphelium masing-masing adalah $q=0,092$ SA untuk 2000 BD19 dan $Q=0,98$ SA untuk 2003 CP20

Astronom memprediksi ada sekitar 10000 objek, asteroid dengan garis tengah $d \geq 0,5$ kilometer yang dapat menabrak Bumi. Kerusakan yang akan terjadi seandainya objek seperti ini menabrak Bumi, selain terjadinya kepanikan di komunitas. Tumbukkan benda kecil ini (termasuk komet) akan menimbulkan dampak terestrial yang pada dasarnya dapat dibedakan dalam dua hal.

1. Dampak langsung, gempa bumi yang dahsyat, gelombang tsunami, kebakaran dahsyat dan urbanisasi manusia dan hewan. Kurun waktu akibat dari dampak langsung ini relatif singkat
2. Dampak tidak langsung, turunnya temperatur secara drastis, hujan asam, deplesi lapisan ozon. Akibat dampak tidak langsung ini berlangsung dalam kurun waktu yang sangat lama. Turunnya temperatur Bumi menyebabkan terganggunya proses fotosintesis

pada tanaman dan tentu saja akan mengganggu kelangsungan hidup manusia

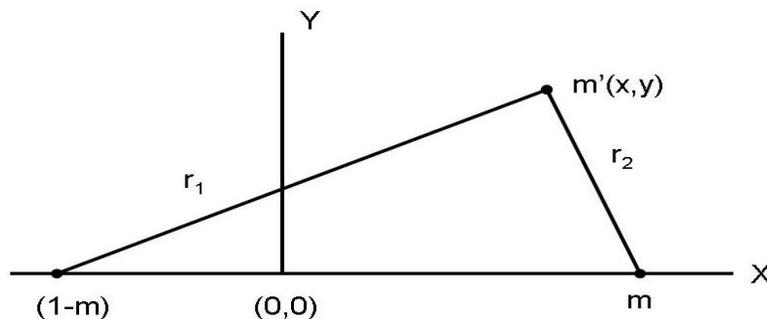
Tumbukan benda kecil terhadap permukaan planet dapat menimbulkan kawah (*impact cratering*). Impact cratering adalah proses tumbukkan antara dua benda antar planet seperti asteroid, komet, meteoroid, dengan permukaan suatu benda padat misalnya permukaan suatu planet maupun satelit yang menghasilkan suatu kawah. Bukti-bukti bahwa proses ini pernah terjadi hampir dapat dilihat pada hampir seluruh permukaan benda padat di Tata Surya kita, antara lain; planet kebumihan (terrestrial planet), satelit-satelit planet Jovian, bahkan asteroid. Fakta ini mengindikasikan bahwa proses impact cratering telah terjadi di seluruh Tata Surya. Proses ini termasuk kedalam salah satu proses geologi yang dominan dalam membentuk dan memodifikasi permukaan Bumi ataupun planet/satelit lainnya. Buktinya dapat ditemukan sebagai kawah yang terdapat pada benda padat Tata Surya lainnya, seperti Bulan, Merkurius, dan lain-lain. Bumi sangat dinamis dan masih aktif secara geologi, sehingga proses-proses geologi seperti erosi dan tektonisme dapat menghilangkan bukti kawah tumbukkan ini, telah ada sejak lama.

Sejak tahun 1980-an muncul kontroversi tentang peristiwa tumbukan yang terjadi secara periodik di Bumi. Alvarez et al (1984) mendeteksi adanya periodesitas 28,4 Myr dalam siklus tumbukan di Bumi. Periode ini mendekati periode yang dideteksi oleh Raup dan Sepkoski (1980) pada catatan kepunahan massal spesies di Bumi, yaitu 26 Myr. Muncul dugaan adanya tumbukan komet periodik yang menyebabkan bencana kepunahan di Bumi (Alvarez & Muller 1984, Davis et al.1984). Diperkirakan ada suatu bintang yang tidak

terlihat (Nemesis) yang menyebabkan gangguan gravitasi terhadap awan Oort sehingga memicu hujan komet yang periodik. Selain itu muncul pula pendapat lain akan asal muasal peristiwa ini, yaitu model "galactic carousel". Awan Oort mengalami gangguan secara periodik oleh *galactic tides* ketika Tata Surya berevolusi mengelilingi pusat galaksi.

4.4 Masalah Tiga Benda Terbatas

Andaikan ada sebuah partikel dengan massa m' yang jauh lebih kecil dari massa benda pertama M maupun benda kedua m . Jumlah massa $M+m$ dan jarak keduanya dianggap sebagai satu satuan dan $m < 0,5M$. Maka pada saat partikel m' berlokasi pada posisi (x,y) berlaku padanya; $L = T-V$ dalam hal ini,



Gambar 2. 1 Titik massa m' bergerak dalam pengaruh gravitasi M dan m , sebagai satuan massa diambil $M+m=1$ atau $M=1-m$. Titik M berlokasi pada $(x_1,0)$ dan m pada $(x_2,0)$.

Sebagaimana biasanya T -menyatakan energi kinetis sistem dan V menyatakan energi potensial

$$T = \frac{1}{2}m' \left[\left(\frac{dx}{dt} - y \right)^2 + \left(\frac{dy}{dt} + x \right)^2 \right] \quad (2.36)$$

dan

$$V = - \left[\frac{m'(1-m)}{r_1} + \frac{m'm}{r_2} \right] \quad (2.37)$$

Persamaan gerak partikel tunduk pada kaedah *Lagrange*

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial x} \right) - \frac{\partial L}{\partial x} = 0 \quad (2.38)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial y} \right) - \frac{\partial L}{\partial y} = 0 \quad (2.39)$$

Diperoleh persamaan diferensial berbentuk;

$$\left(\frac{dx}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 = 2U - C \quad (2.40)$$

adalah;

$$U = \frac{1}{2}(x^2 + y^2) + \left(\frac{1-m}{r_1} + \frac{m}{r_2} \right) \quad (2.41)$$

Bentuk (3.23) menyatakan kuadrat kecepatan partikel m' . Jika partikel dalam keadaan diam maka kecepataannya nol dan ini dipenuhi oleh pernyataan;

$$(x^2 + y^2) + 2 \left(\frac{1-m}{r_1} + \frac{m}{r_2} \right) = C \quad (2.42)$$

Partikel yang berada pada lengkungan ini adalah partikel diam, persamaan ini lazim disebut zero velocity curve. Ada lima titik yang disebut titik *Lagrange* L_1 , L_2 , L_3 , L_4 dan L_5 dimana m' akan mempunyai kecepatan nol akibat seimbangannya gaya gravitasi dari M

dan m . Jarak m' terhadap kedua massa M dan m dari titik *Lagrange* memenuhi relasi (lihat Moulton, 1949):

a) Titik lagrange L_1 (terletak pada sumbu x) diantara M dan m

Jarak terhadap m :

$$r_2 = \left(\frac{m}{3}\right)^{1/3} + \frac{1}{3}\left(\frac{m}{3}\right)^{2/3} - \frac{1}{9}\left(\frac{m}{3}\right) \quad (2.43)$$

Jarak terhadap M :

$$r_1 = 1 - r_2 \quad (2.44)$$

b) Titik Lagrange L_2 (terletak pada sumbu x) disebelah kanan m

Jarak terhadap m :

$$r_2 = \left(\frac{m}{3}\right)^{1/3} - \frac{1}{3}\left(\frac{m}{3}\right)^{2/3} - \frac{1}{9}\left(\frac{m}{3}\right) \quad (2.45)$$

Jarak terhadap M :

$$r_1 = 1 + r_2 \quad (2.46)$$

c) Titik lagrange L_3 (terletak pada sumbu x) disebelah kiri M

Jarak terhadap M :

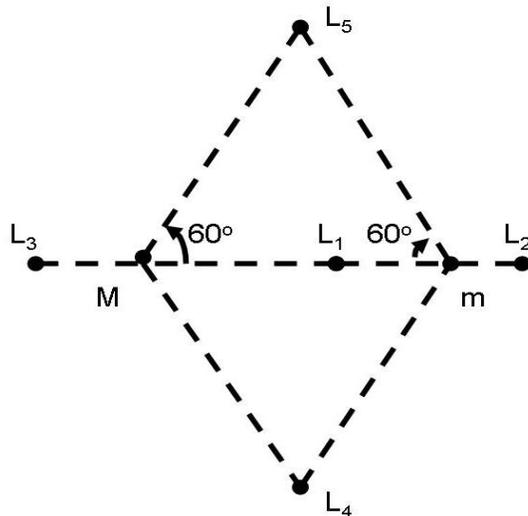
$$r_1 = 1 - \left(\frac{7m}{12} + \frac{1127m}{20736}\right) \quad (2.47)$$

Jarak terhadap m :

$$r_2 = 1 + r_1 \quad (2.48)$$

d) Titik Lagrange L_4 dan L_5 (tidak terletak pada sumbu x)

Untuk titik Lagrange keempat dan kelima, kedua titik ini akan ditemukan apabila m' mempunyai jarak yang sama dari M dan m , dengan lain perkataan $r_1 = r_2 = 1$



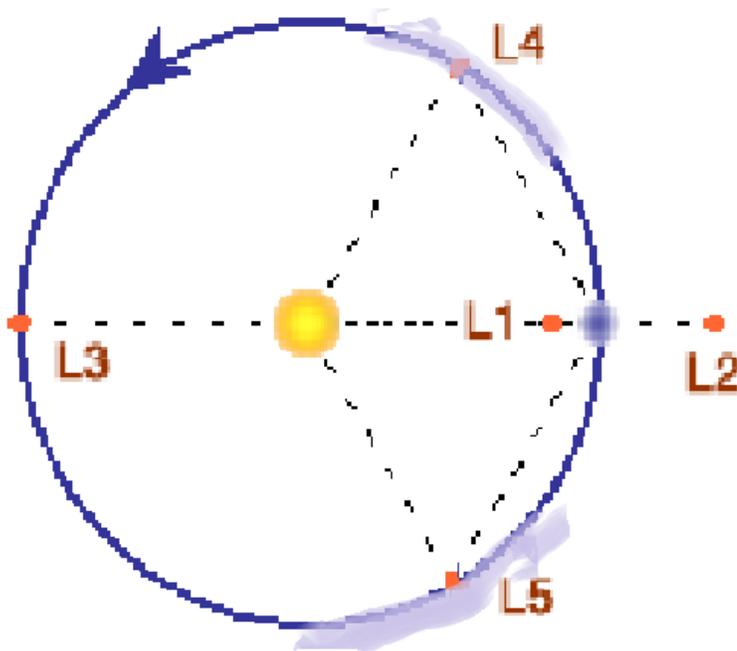
Gambar 2. 2 Posisi titik Lagrange L_1 , L_2 , L_3 , L_4 dan L_5

Disekitar Bumi dapat ditunjukkan ada tujuh titik kesetimbangan. Lima merupakan akar riil, diturunkan dengan menilik sistem Bumi-Bulan dan sisanya merupakan akar imajiner dari solusi persamaan Lagrange (Terenteva, 1974). Terletak di Utara dan Selatan bidang ekuator Bumi

Tabel 3- 1 Jarak titik Lagrange dari Bulan (massa Bulan = $7,34 \times 10^{22}$ kg dan Bumi (massa Bumi = $5,08 \times 10^{24}$ kg) dinyatakan dalam satuan kilometer. Jarak Bumi-Bulan, $d = 1 \text{ LD} = 384000 \text{ km}$

| No | Dari Bumi (km) | Dari Bulan (km) |
|-------|----------------|-----------------|
| L_1 | 327540 | 56459 |
| L_2 | 434776 | 50766 |
| L_3 | 381888 | 765888 |
| L_4 | 384000 | 384000 |
| L_5 | 384000 | 384000 |

Perlu diingat dalam telaah ini hanya ditinjau gerak partikel dalam bidang orbit m dan M . Ada tujuh titik *Lagrange* bila gerak dalam arah sumbu vertical bidang ekliptika turut ditinjau. Diagram pada Gambar 2.13 menggambarkan kerangka acuan gerak partikel m dan posisi ke lima titik Lagrange tersebut



Gambar 2.14 Diagram menunjukkan posisi titik Lagrange L4 dan L5 dari sistim Bumi-Bulan, dimana awan Kordylewski bermukim (Wikipedia, 2017)

Awan Kordylewski . merupakan konstentrasi terbesar dari debu yang ditemukan di L4 dan L5, awan ini dilaporkan oleh seorang astronom Polandia [Kazimierz Kordylewski](#) di tahun 1960 tapi sampai sekarang masih merupakan kontroversi pendapat apakah

awan itu betul ada. Mengingat tipisnya awan tersebut, dan titik L4 dan L5 yang tidak stabil akibat perturbasi planet dalam, diduga awan ini tidak akan bertahan lama.

Dari persamaan (2.40) apabila diambil

$$\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 = 2U - C = 0$$

atau kecepatan partikel adalah nol maka permukaan $2U=C$ disebut permukaan berkecepatan nol; “*zero velocity curve*” untuk dua dimensi dan “*zero velocity surface*” untuk tiga dimensi.

4.5 Konstanta Tisserand

Problem umum dari gerak tiga benda (diandaikan sebagai titik massa) adalah masalah gaya tarik gravitasi-bersama (mutual gravitational attractions). Telah banyak model yang diajukan orang, namun belum ada solusi yang memuaskan banyak pihak. Salah satu teori yang banyak dianut orang adalah pekerjaan klasik J.L. Lagrange pada abad ke 19 yang lalu. Masalahnya adalah apabila ada dua benda titik yang bergerak mengitari satu terhadap yang lain dalam orbit lingkaran. Bagaimana lintasan benda ketiga infinitesimal dengan massa yang dapat diabaikan terhadap kedua titik massa tadi bergerak dalam medan gravitasi mereka. Situasi ini merupakan realita aproksimasi dari banyak kasus dalam Tata Surya kita.

Misalkan sumbu asal pusat massa dari kedua titik massa dan sumbu rotasi mereka terhadap titik pusat massa sistem terletak pada sumbu x. Ambil satuan massa adalah jumlah massa kedua benda titik tersebut dan misalkan massa kedua benda terpisah tadi μ dan $(1 - \mu)$ dimana $\mu \leq 0,5$ sumbu akan berputar dengan kecepatan

sudut yang tetap, ω dan benda tetap berada pada posisi $(x_2, 0, 0)$ dan $(x_1, 0, 0)$ seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-9.

Misalkan sebagai satuan jarak adalah $|x_2 - x_1|$ dan satuan waktu dipilih sehingga $k=1$, maka dalam satuan ini berlaku;

$$\omega^2 = k^2 \left[\frac{(1-\mu) + \mu}{(x_2 - x_1)^2} \right] = 1 \quad (4.5)$$

Jarak massa infinitesimal yang berada pada (x, y, z) terhadap massa $(1-\mu)$ adalah;

$$r_1^2 = (x - x_1)^2 + y^2 + z^2 \quad (4.6)$$

Dan jaraknya terhadap μ adalah;

$$r_2^2 = (x - x_2)^2 + y^2 + z^2 \quad (4.7)$$

Jika V adalah kecepatan dari massa infinitesimal terhadap sumbu yang bergerak itu maka

$$v^2 = \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2 \quad (4.8)$$

Dari persamaan energi total $L = T - V$ dimana T adalah energi kinetis dan V energi potensialnya, kita mempunyai persamaan Lagrange gerak titik tersebut pada bidang $x-y$;

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial L}{\partial x} = 0 \quad (4.9)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{y}} \right) - \frac{\partial L}{\partial y} = 0 \quad (4.10)$$

Solusi dari pernyataan (4.9) dan (4.10) memenuhi;

$$\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2 = 2U - C \quad (4.11)$$

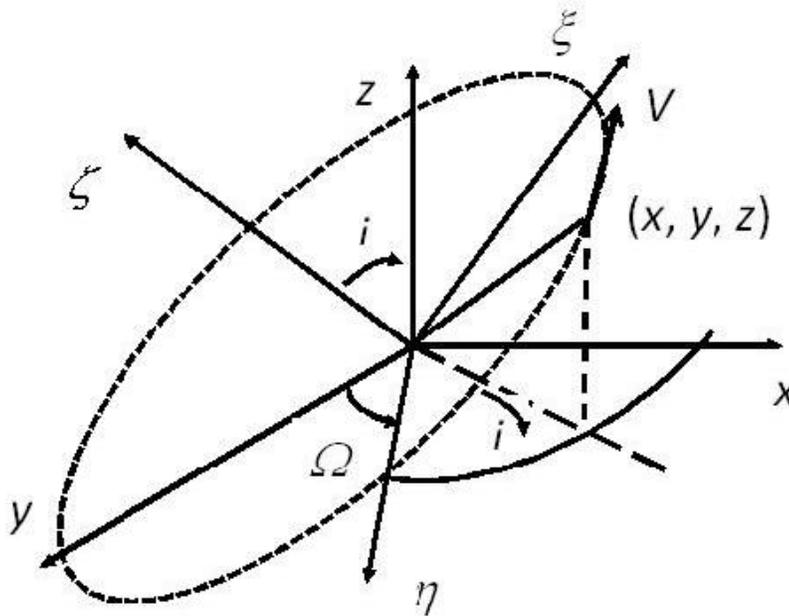
Dalam hal ini C disebut konstanta Jacobi berasal dari integrasi dan U dinyatakan oleh (4.12)

$$U = \frac{1}{2}(x^2 + y^2) + \left(\frac{1-\mu}{r_1} + \frac{\mu}{r_2} \right) \quad (4.12)$$

Jika kita tinjau (4.11) sebagai fungsi dari V^2 maka tanda aljabar dari bentuk tersebut haruslah selalu positif dan ini berarti $2U-C \geq 0$. Akibatnya gerak hanya bisa terjadi dibagian sisi yang memenuhi syarat ini, tidak pada sisi yang lain. Misalkan pula kecepatan titik massa tadi $V=0$ jika ini terjadi haruslah dipenuhi $2U-C=0$

$$(x^2 + y^2) + 2\left(\frac{1-\mu}{r_1} + \frac{\mu}{r_2}\right) = C \quad (4.13)$$

Pernyataan ini dikenal sebagai permukaan berkecepatan nol (zero velocity surfaces)



Gambar 4- 19 Momentum sudut L, benda infinitesimal dalam sistem koordinat yang berotasi, sebagai fungsi ascending node Ω dan inklinasi, i selalu tetap.

Misalkan asteroid diambil sebagai massa infinitesimal. Besaran μ dan $(1-\mu)$ masing-masing adalah massa Jupiter dan Matahari. Jika kita tahu posisi dan kecepatan komet atau asteroid pada saat

observasi t kita dapat menghitung elemen orbit $(a, e, i, \omega, \Omega, T)$ dari persamaan ,

$$\left(\frac{dr'}{dt}\right)^2 = \frac{2}{r} - \frac{1}{a} \quad (4.14)$$

Dalam hal ini $r' = (\xi, \eta, \zeta)$ adalah vektor posisi terhadap sumbu yang tidak berotasi, dengan mengambil pusat sumbu sama seperti sebelumnya. Jika $z = \zeta$ diambil sebagai sumbu rotasi dan r adalah vektor posisi dengan komponen (x, y, z) atau $(\xi, \eta, 0)$ oleh sebab itu momentum sudut $h = \sqrt{a(1-e^2)} = L$ dimana vektor L diberikan oleh pernyataan (4-11). Untuk pembuktian yang lebih detil lihat Danby (1989)

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{v} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \xi & \eta & \zeta \\ \frac{d\xi}{dt} & \frac{d\eta}{dt} & \frac{d\zeta}{dt} \end{vmatrix} = (h \sin i \sin \Omega, h \sin i \cos \Omega, h \cos i) \quad (4.15)$$

Gunakan (4.11), (4.12) dan (4.13) diperoleh pernyataan;

$$C = \frac{1}{a} + 2\sqrt{a(1-e^2)} \cos i \quad (4.16)$$

Konstanta Jacobi ini disebut lebih dikenal sebagai Tisserand invariant, T . Sekarang uraikan T dalam deret Mac Lauren dan ambil jarak perihelium identik dengan jarak Bumi ke Matahari $q = 1$.

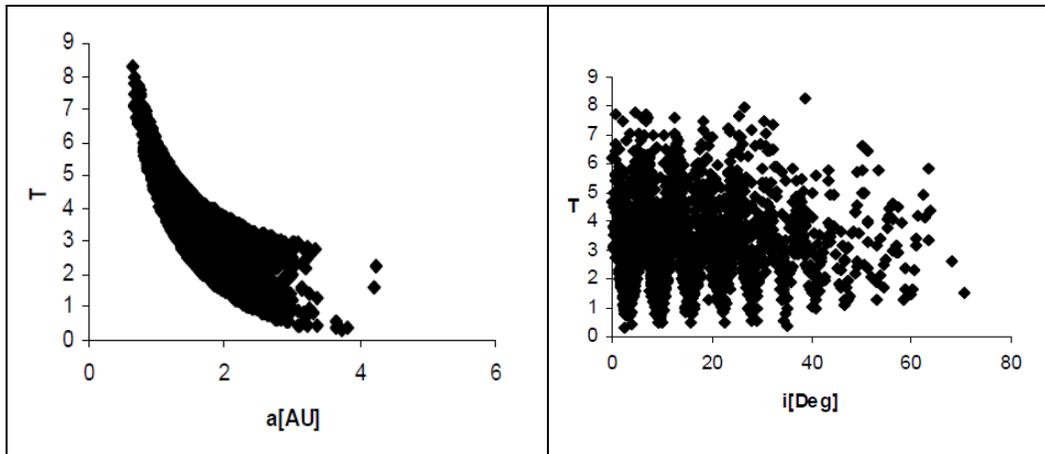
Persamaan (4-16) dapat ditulis kembali sebagai

$$T = 1 - e + 2\left(1 + \frac{e}{2} + O(e^2)\right) \cos i \quad (4.17)$$

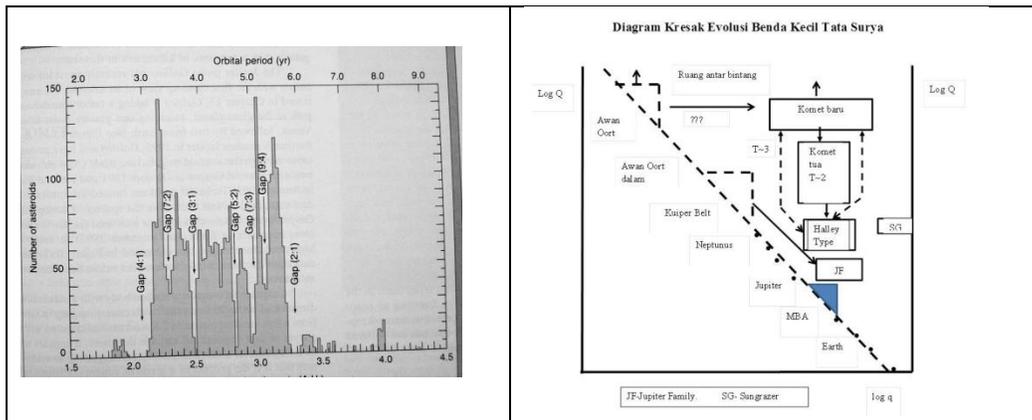
Untuk inklinasi $i \approx 0^\circ$

$$T = 3 + O(e^2) \quad (4.18)$$

Pernyataan ini menunjukkan, objek yang mendekati Bumi akan mempunyai karakteristik nilai Tisserand, $T \approx 3$



Gambar 4- 20 Rajah konstanta Tisserand sebagai fungsi dari a dan i untuk 2382 NEA

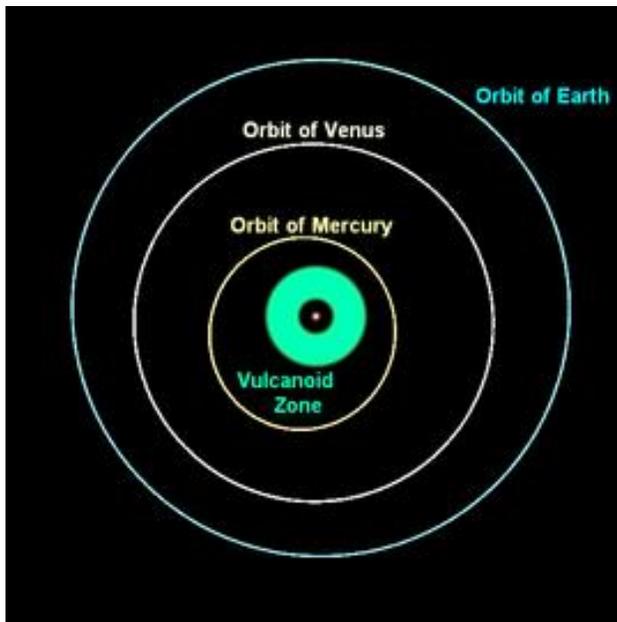


Gambar 4- 21 Distribusi setengah sumbu panjang orbit dan sebaran asteroid sepanjang diagram Kresak

4. 6 Vulcanoid asteroid hipotetik

Vulcanoid adalah asteroid hipotetis yang terletak dalam kawasan orbit Merkurius. Orbitnya stabil dibandingkan dengan Merkurius berbentuk lingkaran. Gambar berikut memperlihatkan lintasan

Vulcan relative terhadap lintasan Merkurius, Venus dan Bumi. Mempunyai jarak heliosentrik 0,06 sampai 0,21au dari Matahari. Gaya non gravitational seperti radiasi Matahari memberikan Poynting-Robertson dan Yarkovsky effect akibatnya boleh jadi Vulcan telah bergeser dari posisi semula. Diperkirakan ada sekitar 300-900 vulcanoid yang besarnya lebih dari 1 kilometer. Stabilitas kawasan orbit vulcnoid bias terjadi karena hanya ada satu tetangga planet Merkurius berbeda halnya dengan objek Kuiper-belt objek.



Gambar 4- 22 Lokasi *Vulcan* dilihat dari utara ekliptika. Bagian terluar, jarak heliosentriknya 0,21au lintasannya tidak stabil karena gangguan dari Merkurius, semakin jauh dari Matahari orbitnya menjadi tidak stabil. Sehingga diperkirakan dalam tempo 100 juta tahun dia akan menyilang orbit Merkurius, temperaturnya mencapai 1000 K lebih, cukup panas untuk menguapkan bebatuan yang menjadi batas kehidupannya.

Volume kawasan vulcanoid sangat kecil kalau dibandingkan dengan asteroid-belt. Tumbukan kerap terjadi sesama vulcanoid,

dengan energy yang cukup besar sehingga merusak bentuknya. Orbitnya mendekati lingkaran mempunyai inklinasi 10° . Ada juga asteroid Mercury-Trojan yang terperangkap di titik Lagrange Merkurius-Matahari yang juga mungkin akan ditemukan.

4. 7 Karakteristik Fisik

Dari analisis data pengamatan SOHO diperoleh perkiraan sebagai berikut;

1. Tidak ada asteroid dengan garis tengah lebih dari 60 kilometer
2. Diameter minimum 100 meter. Partikel dengan ukuran lebih kecil dari $0,2 \mu\text{m}$ sudah lenyap akibat tekanan radiasi Matahari
3. Objek dengan diameter lebih kecil dari 70 meter akan ditarik ke Matahari sebagai konsekuensi Poynting-Robertson drag
4. Diantara batas atas dan bawah diameternya ada kemungkinan populasi asteroid diantara 1 sampai 25 kilometer
5. Boleh jadi vulcanoid kaya dengan element yang titik leburnya tinggi seperti besi dan nikel, tidak terjadi proses seperti regolith
6. Vulcanoid agaknya mempunyai kesamaan dalam warna dan albedo seperti Merkurius
7. Vulcanoid masih menyimpan material awal pembentukan Tata Surya
8. Ada fakta bahwa Merkurius telah ditumbuk oleh objek yang besar yang mengikis crust dan mantle Merkurius, sepanjang sejarahnya. Hal ini dapat menjelaskan kenapa mantle Merkurius itu tipis dibandingkan dengan planet terrestrial lainnya
9. Jika pernah berlangsung tumbukan maka tentu masih banyak serpihan yang mengorbit Matahari di kawasan vulcanoid

10. Jika vulcanoid ada atau pernah ada di masa lalu mungkin dia adalah populasi tambahan impactor yang dipengaruhi hanya oleh Merkurius

11. Jika vulcanoid tidak diketahui keberadaannya ini akan menjadi sandungan dalam teori pembentukan planet dan menunjukkan ada proses lain yang berlangsung dibagian dalam Tata Surya, misalnya perpindahan orbit planet atau *planetary migration*

4. 8 Kestabilan Dan Struktur Orbit Asteroid Pada Sistem Tiga Benda

Asteroid merupakan anggota Tata Surya, berukuran kecil, sehingga sensitif terhadap gangguan/perturbasi dari planet lain, ataupun komet yang melintas didekatnya. Orbit asteroid digambarkan dalam ruang fasa (struktur ruang orbit)

Asteroid berada dalam bidang orbit Jupiter terhadap Matahari akan mengalami gangguan orbit. Gangguan ini akan berpengaruh terhadap kestabilan orbit. Ada kemungkinan pada daerah ruang fase tertentu, lintasan asteroid tetap stabil setelah mengalami perturbasi, tetapi ada juga yang menjadi tidak stabil

Melalui perbandingan frekuensi gerak orbit asteroid terhadap Jupiter (resonansi = ω/ω_k) dapat dipelajari aspek kualitatif kestabilan orbit.

Ada tiga variasi resonansi yaitu;

$$\frac{\omega}{\omega_k} = \frac{n}{n+1} \quad (4.19)$$

$$\frac{\omega}{\omega_k} = \frac{(2n-1)}{(2n+1)} \quad (4.20)$$

Struktur fasa orbit untuk setiap variasi resonansi ditentukan berdasarkan perilaku titik titik tetap pada kurva invarian saat $\mu = 0$ (non-perturbasi)

$$\frac{(\omega_k - \omega)}{\omega_k} = \frac{2}{2n+1} \quad (4.21)$$

$$\frac{\omega}{\omega_k} \neq \begin{cases} \frac{n}{n+1} \\ (2n-1) \\ (2n+1) \end{cases} \quad (4.22)$$

Anggapan Dasar:

1. Sistem Matahari, Jupiter dan Asteroid merupakan sistem tiga benda bergerak dalam orbit lingkaran dan terletak pada bidang yang sama, karena

- a) massa asteroid diabaikan
- b) asteroid bergerak dalam pengaruh gravitasi Matahari dan Jupiter
- c) orbit asteroid sebidang dengan orbit Jupiter
- d) orbit Jupiter berwujud lingkaran

2. gerak asteroid dalam kerangka rotasi sumbu XOY dengan pusat massa Matahari-Jupiter sebagai titik asal, dengan

- a) total massa Matahari+Jupiter = 1
- b) perbandingan massa Jupiter-Matahari dalam μ adalah tetap
- c) radius orbit Jupiter dipilih sebagai satuan jarak dan satuan waktu yang ditentukan dari konstanta gravitasi, $G=1$

Perhitungan persamaan Hamiltonian untuk kasus 3 benda

$$H = H_0 + \mu H_1 \quad (4.23)$$

H_0 = Hamiltonian untuk keadaan non-perturbasi (Keplerian)

μH_1 = faktor perturbasi untuk Jupiter

μ = perbandingan massa > 1

Ilustrasi

Sistem Matahari-Jupiter-Asteroid dalam koordinat berotasi XOY

$$X = r \cos(\varphi + \omega t) \text{ dan } Y = r \sin(\varphi + \omega t) \quad (4.24)$$

Dalam hal ini

$$H_o = \frac{1}{2} \left[P_r^2 + \left(\frac{P_\phi}{r} \right)^2 \right] - \frac{1}{r\omega P_\phi} \quad (4.25)$$

ω - kecepatan sudut rotasi = 1(konstan)

Momentum linier didefinisikan sebagai;

$$P_r = \frac{dr}{dt} \quad (4.26)$$

Momentum sudut persatuan massa asteroid adalah;

$$P_\phi = r^2 \left(\frac{d\phi}{dt} + \omega \right) \quad (4.27)$$

Kasus non perturbasi ($\mu=0$)

Asumsi

Gerak asteroid terikat, massa Jupiter = 0, Matahari sebagai pusat massa sistem, maka;

$H = h$ =konstanta energi,

$P_\phi = C$ = konstanta momentum sudut.

Jadi ada dua derajat kebebasan dan dua integral persamaan gerak.

Dengan memasukkan variabel sudut aksi I_r dan I_ϕ dengan $I_\phi = P_\phi$

$$H(I) = -\frac{1}{2(I_r + I_\phi)^2} - \omega I_\phi \quad (4.28)$$

Diperoleh energi total, E;

$$E = H_o - \omega I_\phi \quad (4.29)$$

$$a = -(2E)^{-1} \quad (4.30)$$

$$I_r + I_\varphi = a^{1/2} \quad (4.31)$$

Maka frekuensi gerak Keplerian adalah

$\omega_k = a^{-3/2}$ dalam hal ini a menyatakan setengah sumbu panjang orbit.

c) Struktur Ruang Fasa Orbit Non-Keplerian

Karena memiliki dua derajat kebebasan maka asteroid bergerak dalam ruang fasa 4-dimensi θ_r , θ_φ , I_r dan I_φ

Dalam hal ini

$$\frac{d\theta_j}{dt} = \frac{dh}{dJ} = \omega_j \quad j = r, \varphi \quad (4.32)$$

Oleh karena itu asteroid terikat dalam bidang gerak berbentuk 2 dimensi

(seperti donat) akibat gerak rotasi;

θ_r, θ_φ = koordinat sudut torus

$I_r = r$ = jari-jari lingkaran torus

I_φ = jarak dari pusat torus ke sumbu lingkaran

Tinjau orbit asteroid yang bersifat direct (P_φ)

$I_\varphi = P_\varphi - a^{1/2}(1-e)^{1/2}$, e -eksentrisitas orbit

$$I_r = a^{1/2}(1-e)^{1/2} \quad (4.33)$$

$$h = \frac{-1}{2a} - \omega a^{1/2}(1-e)^{1/2} = \text{konstan} \quad (4.34)$$

(menyatakan persamaan gerak asteroid)

Untuk lintasan lingkaran, elips dan parabola berlaku;

1) Eksentrisitas, $e = 0$ (orbit lingkaran),

hanya ada satu orbit lingkaran pada nilai a tertentu dengan $I_r = 0$

2) Eksentrisitas, $0 < e < 1$ (orbit elips),

$I_r \neq 0$, a memenuhi $0 < a < I_r$

3) $e = 1$ (orbit parabola)

terjadi apabila nilai $a = I_r$

Periode $T = \frac{2\pi}{\omega_k - \omega}$, saat perturbasi akan muncul μH_1 sehingga h tidak lagi konstan, akibatnya evolusi menjadi tidak stabil

4.9 Kestabilan Orbit Periodik Mendekati Lingkaran (Orbit periodik tipe I)

Pada kondisi non-perturbasi orbit asteroid dalam kurva invarian digambarkan sebagai titik pusat torus 3 dimensi.

Pada $\mu = 0$, untuk orbit lingkaran dengan resonansi $\frac{\omega}{\omega_k} = \frac{n}{n+1}$ akan

diteruskan menjadi elips. Pada $\frac{\omega}{\omega_k} \neq \frac{n}{n+1}$ atau $\frac{\omega}{\omega_k} \neq \frac{2n-1}{2n+1}$ orbit

asteroid akan diteruskan sebagai orbit periodik yang mendekati lingkaran (orbit periodik tipe 1). Orbit akan tetap stabil pada perturbasi kecil Jupiter.

Pada $\frac{\omega}{\omega_k} = \frac{2n-1}{2n+1}$ menunjukkan ketidak stabilan orbit pada resonansi ini.

4.10 Kestabilan orbit periodik berbentuk elips (Orbit periodik tipe II)

Sebelum ada gangguan Jupiter, orbit asteroid beresonansi dengan

pola $\frac{\omega}{\omega_k} = \frac{s-r}{s}$ dengan s, r adalah integer, dalam hal; ini $r < s$

Pada nilai $\mu = 0$ semua nilai $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ dan $\lambda_4 = 1$

Oleh karena energi internal $H = h$ konstan maka, $\lambda_1 = \lambda_2 = 1$ demikian pula untuk $\lambda_3 = \lambda_4 = 1$ asteroid akan bergerak keluar lingkaran dan ini berakibat orbit menjadi tidak stabil, setengah orbit akan stabil, sebagian lainnya tidak stabil.

Untuk resonansi tertentu $s = r+1$, $\frac{\omega}{\omega_k} = \frac{1}{2}, \frac{2}{3}, \frac{3}{4}$ pada nilai $\mu > 0$ orbitnya akan diwakili oleh satu titik tetap pada bagian permukaan

4. 11 Struktur Ruang Fasa

a) Resonansi $\frac{\omega}{\omega_k} \neq \frac{n}{(n+1)}$, atau $\frac{2n-1}{2n+1}$ orbit asteroid berwujud orbit periodik yang mendekati lingkaran (orbit periodik tipe I) stabil pada $\mu > 0$

b) Resonansi $\frac{\omega}{\omega_k} = \frac{n}{(n+1)}$, orbit lingkaran saat sebelum gangguan tidak akan diteruskan menjadi orbit periodik tipe I (hampir lingkaran) saat $\mu > 0$ tetapi berubah menjadi orbit periodik tipe II (hampir elips) stabil pada $\mu > 0$

Resonansi $\frac{\omega}{\omega_k} = \frac{2n-1}{(2n+1)}$, ketidak stabilan muncul di sekitar titik pusat

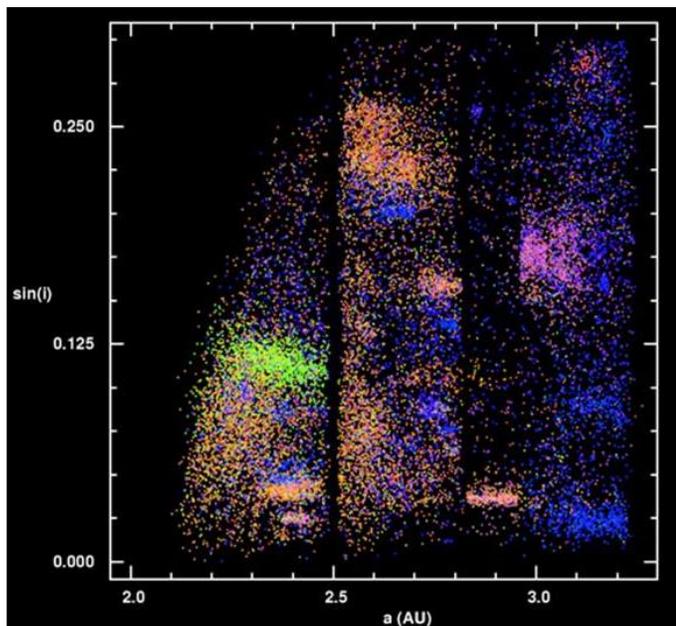
O (karena $\lambda_3 = \lambda_4 = -1$) saat $\mu = 0$ orbit beralih sebagai orbit periodik tipe I.

Orbit perturbasi yang dihasilkan merupakan orbit periodik simetrik sederhana berupa satu titik tetap O, tipe lintasan hiperbolik dan berefleksi.

4. 12 Bunga Rampai Asteroid

Sampai awal tahun enam puluhan pengamatan asteroid dilakukan dengan teknik fotografi. Dari tiga posisi ekuatorial dapat ditentukan orbitnya. Orbit ini masih temporer sifatnya dalam arti masih harus terus dikoreksi dengan posisi berikutnya. Distribusi elemen orbit memperlihatkan keragaman, eksentrisitas mempunyai median $e = 0.10$ dengan mengikuti pola distribusi Rayleigh (Siregar, 1989) sedangkan distribusi setengah sumbu panjang lintasannya yang berbentuk ellip menunjukkan adanya daerah padat asteroid dan terdapat pula daerah tuna asteroid. Jauh sebelum itu pada tahun 1918 Hirayama telah mempelajari gejala tersebut. Asteroid cenderung berkelompok dengan kriteria elemen orbit yang berdekatan yakni a , setengah sumbu panjang orbit, e eksentrisitas dan i , kemiringan bidang orbit terhadap ekliptika. Kemudian pada tahun 1951 Brouwer mempelajari keteraturan ini ditemukan lagi kelompok yang lain. Ditunjukkan pula bahwa dalam kelas Flora masih terdapat gugus sandingan (subclass) dengan ciri yang sama pada argumen perihelium ω dan ascending node Ω . Sampai sekarang persoalan asal mula asteroid masih mengundang kontroversi pendapat. Ada yang mempercayai bahwa asteroid berasal dari pecahan planet besar, yang mengalami gaya pasang surut dari planet Jupiter sebagai konsekuensi problem tiga benda Matahari-Mars dan Jupiter. Mazhab ini didukung oleh fakta bahwa sebagian besar asteroid mempunyai bentuk irregular, tapi peristiwa ini tidak selalu perlu terjadi dari planet besar yang meledak, bisa saja akibat peristiwa benturan yang berlangsung antar asteroid, sejak ia terbentuk dari awan primitif pada zaman primordial pembentukan

Tata Surya kita. Awan ini tidak sempat menjadi planet karena gaya eksternal yang mengganggu proses aglomerasi lebih dominan dari gaya kontraksi gravitasi partikel yang ada.



Gambar 4- 23 Distribusi asteroid penghuni sabuk utama, warna menunjukkan keluarga asteroid. Tampak pada kawasan 2,5au, 2,8au terlihat ada celah kosong. Celah ini dikenal dengan Kirkwood Gap (Sloan Digital Sky Survey. SDSS, <http://www.astro.princeton.edu>)

Bila ditilik dari distribusi setengah sumbu panjang, a . Asteroid dapat ditemukan dimana saja tapi konsentrasi utama terdapat dalam kawasan 2 au sampai 3.2 au, namun ada juga daerah tuna asteroid. Seandainya ditemukan asteroid pada daerah ini maka periode asteroid tersebut akan sebanding dengan $\frac{1}{2}, 1/1, 2/1, 7/3, 5/2, 3/1$ dan $4/1$ periode Jupiter. Kawasan ini disebut dengan Kirkwood Gap (celah Kirkwood). Teori tentang kosongnya daerah tersebut diberikan oleh Greenberg et al(1979)

1. Hipotesa Kosmogoni, yaitu hipotesa yang mengatakan bahwa asteroid sejak terbentuknya sistem Tata Surya memang tidak pernah berada dikawasan ini
2. Hipotesa statistik, mengacu pada asumsi bahwa asteroid bukanlah benda diam, beresilasi di sekitar celah Kirkwood sehingga sebagian besar waktunya dipakai untuk melintasi kawasan ini. Akibat gerak osilasi tersebut pengamat di Bumi tidak pernah punya peluang untuk menemukan asteroid
3. Hipotesa tumbukan, menurut hipotesa ini perjumpaan (encounter) antara asteroid dan Jupiter berlangsung secara regular dan dalam konfigurasi yang sama. Akibatnya gaya gravitasi Jupiter akan mempertinggi laju tumbukan di antara asteroid. Pecahan yang dihasilkan akan terlempar keluar dari daerah itu
4. Hipotesa gravitasional, hipotesa ini membicarakan bahwa asteroid mungkin saja pernah terbentuk dalam celah Kirkwood tetapi kemudian meninggalkannya akibat gaya pasang surut Jupiter-Matahari

Keempat teori ini dapat menerangkan keberadaan asteroid dikawasan Main-Belt (sabuk utama) tapi gagal menjelaskan eksistensi asteroid yang bergerak cepat dan memotong orbit Bumi dengan lintasan mirip komet. Asteroid dengan ciri ini disebut gugus Apollo-Amor-Aten, akronim AAA. Namun tidak semua gugus AAA ini punya peluang untuk menyerempet (close encounter) planet Bumi, parameter orbit seperti kemiringan bidang orbit, maupun eksentrisitasnya juga turut menentukan.

4. 13 Telaah Asteroid (State of the Arts)

Studi tentang benda kecil dalam Tata Surya telah dilakukan di Indonesia resminya sejak tahun 1984 di Departemen Astronomi. Telaah tentang asteroid dimulai dengan riset bersama dibawah payung kerjasama astronomi Jepang-Indonesia. Siregar dan Nakamura(1989) meneliti sifat-sifat dinamik asteroid dekat Bumi dan gugus Trojan, gerak ortogonal dan pola distribusi titik perihelium kelompok AAA ditelaah pula oleh Siregar(1991a, 1991b) Selain itu mengacu pada prinsip three-body-problem, Siregar(1993) mempelajari sifat statistik distribusi perihelium dan konstanta Jacobi gugus AAA. Ada pandangan lain tentang asal mula Apollo-Amor-Aten dan keterkaitannya dengan Komet. Penelitian Drummond (1982) kembali diperhatikan orang. Ada korelasi yang kuat pada rentang radar tertentu tampak bahwa 2101-Adonis dan 2201-Ojalto berasosiasi secara dinamik. Fakta ini, walaupun tidak perlu menunjukkan bahwa asal mula mereka dari komet tapi dapat mengartikan bahwa beberapa asteroid bisa saja berasal dari pecahan yang disebabkan oleh tumbukkan yang kemudian menghasilkan meteor demikian pula kontroversi pendapat diseputar hipotesa bahwa asteroid boleh jadi merupakan *dormant-comet* atau *extinct-comet*. Telaah spektroskopik menunjukkan beberapa kandidat, antara lain P/Arend-Rigaux, P/Neujmin-1, P/Schwassmann-Wachmann-1 sedang berubah menjadi asteroid, demikian pula sebaliknya keberadaan koma pada 2060-Chiron, sebenarnya mengharuskan Chiron bernama P/Kowal-Meech-Belton (Marsden,1990). Jika hipotesa ini dipercaya tentulah komet tersebut harus komet berperiode pendek. Artinya komet itu, tidak harus berasal dari awan Oort, dengan demikian apakah ia merupakan anasir dari sabuk Kuiper (Kuiper-Belt)? Asal mula AAA sudah

dibahas oleh Siregar (1995a, 1995b). Seiring dengan teknologi penyigian yang semakin handal jumlah asteroid yang mendekati Bumi selama sepuluh tahun terakhir memperlihatkan peningkatan yang cukup signifikan, telaah ulang tentang asal mula gugus AAA dirasakan perlu untuk dikaji kembali(Siregar,2000)

1) Keterubahan asteroid dalam Tata Surya dapat dipelajari berdasarkan kaidah Tisserand. Dari penelitian ini akan dibuat daftar anggota gugus AAA yang diperkirakan berasal dari komet yang telah mati. Ada banyak kriteria yang dapat dipakai. Menurut Nakamura dan Yoshikawa(1991), komet mempunyai konstanta Tisserand, $T < 3$ sedangkan asteroid berkecendrungan mengikuti pola $T > 3$. Konstanta Tisserand dinyatakan oleh persamaan;

$$T = \frac{1}{a} + 2\sqrt{a(1-e^2)}\cos i \quad (4.52)$$

Dalam hal ini a -menyatakan setengah sumbu panjang ellip dinyatakan dalam setengah sumbu panjang planet Jupiter. e -eksentristas orbit sedangkan i menunjukkan inklinasi orbit

2) Elemen orbit adalah faktor kunci tentang bentuk dan lintasan asteroid, oleh sebab itu pengetahuan yang komprehensif tentang fungsi distribusi elemen orbit merupakan telaah utama, sebelum kesimpulan ditarik. Bentuk fungsi distribusi untuk asteroid secara umum telah diketahui mengikuti pola Rayleigh untuk eksentrisitas, sedangkan untuk elemen orientasi polanya adalah (Siregar, 1989)

$$f(x) = \alpha x^\beta e^{-\gamma x} \quad (4.53)$$

3) Dalam upaya untuk memilah asteroid yang mendekati Bumi, dari pernyataan (1) dapat dilakukan aproksimasi dalam bentuk uraian deret Taylor dengan mengambil inklinasi $i = 0$ dan objek yang dipilih adalah dengan jarak perihelion $q \approx 1$ au,yaitu jarak rata-rata Bumi-Matahari. Asteroid dengan konstanta Tisserand T yang

memenuhi kriteria ini akan dianggap sebagai objek yang potensial mendekati Bumi dan boleh jadi dapat menubruk Bumi. Dalam terminologi kosmogoni dikenal sebagai Potentially Hazardous Asteroid (PHA).

4) Benda kecil dengan sifat ganda

Chiron asteroid yang ditemukan awal tahun 1977, ketika ia mendekati perihelion dideteksi Chiron menyemburkan gas cyanogen dan selubung debu, keadaannya begitu cemerlang kondisi yang tidak normal untuk dapat disebut sebagai sebuah asteroid. Oleh sebab itu Chiron merupakan objek pertama dengan dua penamaan, ia sebagai komet 95P/Chiron dan sebagai asteroid ke 2060. Sejak saat itu Chiron dinyatakan sebagai benda kecil dengan dua personaliti, komet dan asteroid. Dalam nomenklatur sering dinyatakan dengan notasi 95P/Chiron=(2060) Chiron.

Asteroid 1977 VA ditemukan pada tahun 1977 ketika ditemukan orbitnya terlalu lonjong untuk disebut sebagai sebuah asteroid, comet-like asteroid. Ketika mendekati matahari orang menduga akan melihat selubung gas dan ekor. Telaah ulang plat fotografi di Palomar Sky Survey menyimpulkan bahwa orbit asteroid ini identik dengan lintasan komet yang ditemukan oleh Wilson dan Harrington pada tahun 1949. Sehingga asteroid ini kemudian dikenal sebagai 107P/Wilson-Harrington = (4015)Wilson-Harrington.

Komet 133P/Elst-Pizarro mempunyai orbit mirip main-belt asteroid mengelilingi matahari dalam orbit yang berada diantara Mars dan Jupiter, kadang-kadang menampakkan ekor debu. Benda kecil ini kemudian dikenal dengan 133P/Elst-Pizarro = (7968) Elst-Pizarro

4.14 Dampak Asteroid yang Menabrak Bumi

Pada dasarnya asteroid dapat dibedakan dalam tiga katagori utama;

1) Weak-bodies, kaya dengan unsur carbon, redup bermagnitudo besar, mudah pecah

2) Strong-bodies, sedikit cemerlang, kaya dengan material bebatuan, bermagnitudo kecil

3) Very strong-bodies, didominasi oleh unsur berkerapatan tinggi dengan ciri khas material metalik, dibangun secara solid dan susah pecah

Untuk menghitung berapa besar dampak yang terjadi apabila terjadi NEA menabrak Bumi, besar crater yang terbentuk maupun energi yang dilepaskan.dapat digunakan pernyataan empiris Shoemaker et.al(1978). Dalam formula tersebut satuan yang digunakan MKS, energi yang dihasilkan dinyatakan dalam terminologi bom nuklir(kilotons TNT ekivalent) berdasarkan asal mula model yang dipilih. Diameter kawah akibat benturan Asteroid dapat dihitung dari formula;

$$D = S_g S_p K_n W^{1/3.4} \quad \text{[meters]} \quad (4.54)$$

dalam hal ini ;

S_g = faktor koreksi gravitasi untuk terbentuknya crater di Bulan, dianggap berlaku juga untuk benda yang lain;

$$S_g = \left[\frac{g_e}{g_t} \right]^{1/6} \quad (4.55)$$

Dalam hal ini ;

g_e – percepatan gravitasi Bumi $9,8 \text{ m/s}^2$

g_t – percepatan gravitasi benda target

Sedangkan S_p dapat dihitung dari pernyataan;

$$S_g = \left[\frac{\rho_a}{\rho_t} \right]^{1/3.4} \quad (4.56)$$

Ini adalah faktor koreksi densiti untuk materi target relative terhadap kawah yang terjadi akibat percobaan bom nuklir (Jangle U)

$\rho_a = 1,8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ yang merupakan rapat massa untuk Alluvium, unsur utama kandungan Asteroid yang sampai ke Bumi;

$\rho_t =$ rapat massa di lokasi kejadian. Sebagai acuan rapat massa rata-rata batuan pada lapisan atas Bumi adalah $\rho_t = 2.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3 = 2.6 \text{ gm/cm}^3$

$K_n = 74 \text{ m/(kiloton TNT ekivalent)}^{1/3.4}$ merupakan bilangan empiris yang dijadikan faktor skala untuk bom yang membuat kawah di Jangle U

$W = K_e / (4.185 \times 10^{12} \text{ Joules/KT})$, merupakan energi kinetik asteroid dalam kiloton TNT ekivalen

$$K_e = \frac{1}{2} mV^2 \quad (4.57)$$

menyatakan energi kinetis asteroid dalam Joules, sedangkan, m, menyatakan massa asteroid dianggap berbentuk bola sempurna.

Rapat massa untuk asteroid tipe Silikat, S umumnya adalah $\rho = 3,3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3 = 3 \text{ gm/cm}^3$

V = Impact Velocity Asteroid dalam meter/detik, sekitar 20km/detik untuk Earth-Crossing orbit.

$m = \frac{4}{3} \pi r^3$ menyatakan massa asteroid yang kita anggap berbentuk

bola sempurna, dalam kilogram, sedangkan r- radius asteroid .

Sebagai contoh, kawah Barringer di Arizona mempunyai diameter 1,1 km. Asteroid yang menabraknya diperkirakan mempunyai data sebagai berikut;

r = 40 meter, jejari asteroid

$\rho = 7,8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, rapat massa asteroid

$V = 20 \text{ km/detik} = 2 \times 10^4 \text{ m/detik}$, kecepatan impact

$\rho_t = 2,3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ rapat massa dikawasan tersebut

$S_g = 1$, tidak ada korelasi untuk impact di Bumi

Maka dapat dihitung, dalam satuan MKS;

$S_p = (1,8/2,3)^{1/3,4} = 0,93$

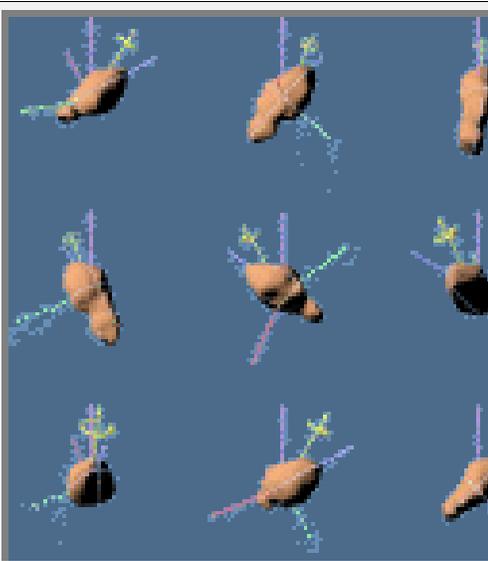
$m = 2,61 \times 10^8 \text{ kg}$

$K_e = 5,22 \times 10^{16} \text{ Joules}$

$W = K_e/4,185 \times 10^{12} \text{ kT} = 12,470 \text{ kT}$

$D = 1 \times 0,93 \times 74 \times 12470^{1/3,4} = 1100 \text{ meter}$

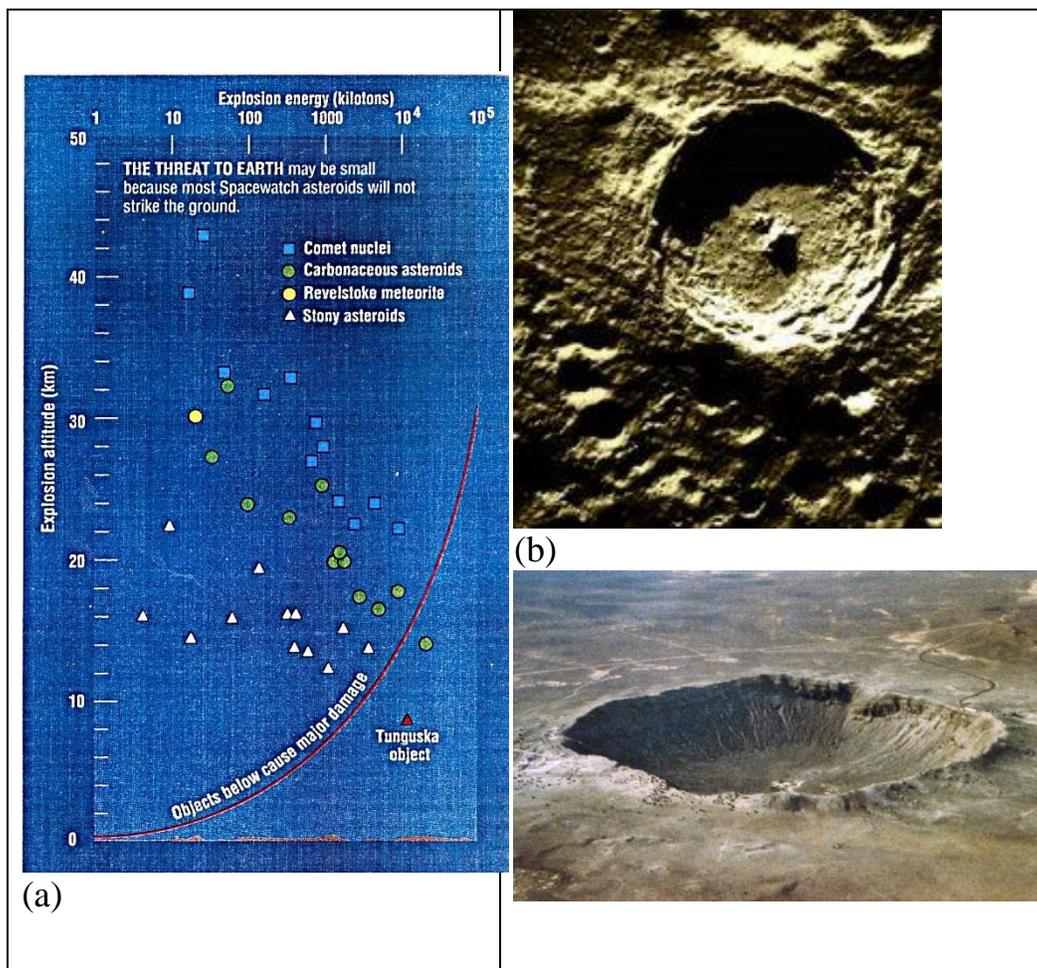
Apabila dinyatakan dalam satuan bom atom yang dijatuhkan Amerika pada saat berakhirnya Perang Dunia II di Hiroshima (= 13 kT), maka Energi yang terjadi pada saat asteroid menumbuk Barringer adalah $\approx 0,99$ kali bom atom yang dijatuhkan di Hiroshima.



Gambar 4- 24 Spin state yang merefleksikan gerak rolling, yawing dan nutasi dari asteroid, 4179-Toutatis pada observasi selama, 9 hari berurutan detil lihat, (<http://www.solarviews.com/cap/ast/toutat9.htm>)

4. 15 Tumbukan Benda Kecil

Sejak terbentuknya planet bumi, tumbukkan benda kecil pada anggota Tata Surya datang silih berganti hal ini ditandai dengan ditemukannya kawah-kawah purba dipermukaan Bumi, Bulan, Merkurius, Mars, Venus dan lainnya. Ada ciri utama yang membedakan kawah akibat tumbukkan dengan kawah meletusnya gunung berapi (peristiwa vulkanisme).



Gambar 4-25 Benda kecil Tata Surya tidak semuanya dapat mencapai permukaan Bumi. Sebagian besar ledakan terjadi ketika benda kecil tersebut masih di atmosfer. Inti komet lebih mudah meledak, dibandingkan dengan asteroid. Profil kawah bergantung pada komposisi dan arah tumbukan, sebagai contoh kawah Barringer di Arizona karena ada erosi (angin, air dan tektonik) permukaan kawah terlihat lebih mulus sedangkan di Bulan karena tidak ada erosi bentuk kawah tidak jauh berbeda dulu dan sekarang.

Kawah akibat meletusnya gunung berapi mempunyai ciri, ditemukannya endapan magma disekitar kawah, pinggir kawah lebih tinggi dari kawasan datarnya, ditengah kawah tidak ditemukan gunung kecil. Beda halnya dengan kawah yang kita lihat di Bulan. Kawah besar umumnya diikuti oleh kawah kecil secara radial, ditengah kawah besar ada sembulan gas yang mencoba keluar dari permukaan sembulan ini membuat bentuk gunung keci di tengah kawah besar. Bentuk ini tidak ditemukan pada kawah akibat meletusnya gunung api. Namun harus diingat juga akibat erosi yang melanda bisa jadi kawah yang terbentuk akibat tumbukan benda angkasa telah mengalami deformasi dan perubahan bentuk. Kawah tabrakan adalah perubahan struktur geologi yang terbentuk ketika meteor besar, asteroid atau komet menabrak planet atau satelit alaminya. Tata surya telah dibombardir dengan meteor sejak dia terbentuk.

Permukaan bulan, Mars, dan Merkurius, yang proses-proses geologinya sudah berhenti jutaan tahun lalu, penuh dengan bekas tumbukan ini. Planet Bumi mengalami tumbukan lebih hebat dan sering terjadi dibandingkan Bulan. Tidak seperti di Bulan dimana kawah tersebut masih bisa kita lihat di Bumi kawah-kawah tersebut secara terus-menerus terkikis oleh erosi, perubahan struktur bumi, aktivitas gunung berapi dan aktivitas tektonik. Ada sekitar 120 kawah tabrakan benda luar angkasa di bumi yang telah diketahui. Sebagian besar berada di belahan Amerika Utara, benua Eropa, dan

benua Australia karena di sanalah sebagian besar ilmuwan berasal dan pengamatan dilakukan. Pesawat luar angkasa yang mengorbit bumi telah membantu mengidentifikasi struktur di tempat-tempat yang sulit untuk didatangi.



Gambar 4- 26 Photo dari kawah Tharsis Tholus di planet Mars. Kawah ini terbentuk akibat letupan gunung api. Tumbukan asteroid disekitarnya menyebabkan regolith tersebar dalam bentuk gumukan disekitar kawah. Erosi angin menyebabkan debu bergeser dari posisi semula. Ditengah gumukan lava yang beku terdapat kaldera yang bentuknya hampir lingkaran diameter landasannya 3km sedangkan dipermukaan 30 km. ilmuwan percaya bahwa magma telah dikosongkan selama letusan dan menggumpal dipermukaan.

Kawah meteor di di padang pasir Arizona (juga dikenal dengan *Barrington Crater*) adalah kawah tabrakan benda luar angkasa yang pertama kali diidentifikasi. Kawah ini pertama kali ditemukan pada tahun 1920. Ilmuwan menemukan bagian-bagian dari meteor penabrak di dalam kawah tersebut. Beberapa kawah yang relatif kecil juga ditemukan memiliki bagian-bagian pecahan benda penabraknya. Berikut adalah daftar kawah tabrakan dengan diameter lebih dari 25 km.

Tabel 4- 4 Daftar kawah tabrakan dengan diameter lebih besar dari 25 km. D = diameter[kilometer], τ = umur [juta tahun], λ = bujur[derajat], ϕ = lintang[derajat] dan R= remarks, catatan dapat dilihat/tidak dapat dilihat.

| No | Nama | Lokasi | D | τ | λ | φ | R |
|----|-----------------|---------------------------|-----|-------------|-----------|-----------|-------|
| 1 | Vredefort | Afrika Selatan | 300 | 2019-2027 | 27.5 | -27.0 | Ya |
| 2 | Sudbury | Ontario, Kanada | 250 | 1847-1853 | -81.18 | 46.60 | Ya |
| 3 | Chicxulub | Yukatan, Meksiko | 180 | 64.93-65.03 | -89.50 | 21.33 | Tidak |
| 4 | Manicouagan | Quebec, Kanada | 100 | 213-215 | -68.70 | 51.38 | Ya |
| 5 | Popigai | Rusia | 100 | 30-40 | 111.67 | 71.67 | Tidak |
| 6 | Acraman | Australia Selatan | 90 | 450 | 135.45 | -32.02 | Ya |
| 7 | Chesapeake Bay | Virginia, Amerika Serikat | 85 | 34.9-36.1 | -76.02 | 37.28 | Tidak |
| 8 | Puchezh-Katunki | Rusia | 80 | 172-178 | 43.58 | 57.10 | Tidak |
| 9 | Morokweng | Afrika Selatan | 70 | 144.2-145.8 | 23.53 | -26.47 | Tidak |
| 10 | Kara | Rusia | 65 | 70-76 | 65.00 | 69.20 | Tidak |
| 11 | Beaverhead | Montana, Amerika Serikat | 60 | 550-650 | -113.00 | 44.60 | Ya |
| 12 | Tookoonooka | Queensland, Australia | 55 | 123-133 | 142.83 | -27.1 | Tidak |

| | | | | | | | |
|----|--------------------|--------------------------|----|---------------------|-----------------|----------------|-----------|
| | | | | | | 2 | |
| 13 | Charlevoix | Quebec, Kanada | 54 | 342- 372 | -70.30 | 47.5 3 | Ya |
| 14 | Kara-Kul | Tajikistan | 52 | 5 | 73.45 | 39.0 2 | Ya |
| 15 | Siljan | Swedia | 52 | 366.9 - 369.1 | 14.87 | 61.0 3 | Ya |
| 16 | Montagnais | Nova Scotia, Kanada | 45 | 49.74 - 51.26 | -64.22 | 42.8 8 | Tida k |
| 17 | Araguainha Dome | Brasil | 40 | 241.5 - 253.5 | -52.98 | - 16.7 8 | Ya |
| 18 | Mjølnir | Norwegia | 40 | 123- 163 | 29.67 | 73.8 0 | Tida k |
| 19 | Saint Martin | Manitoba, Kanada | 40 | 188- 252 | -98.53 | 51.7 8 | Ya |
| 20 | Carswell | Saskatchewan, Ka nada | 39 | 105- 125 | - 109.5 0 | 58.4 5 | Ya |
| 21 | Clearwater West | Quebec, Kanada | 36 | 270- 310 | -74.50 | 56.2 2 | Ya |
| 22 | Manson | Iowa, Amerika Serikat | 35 | 73.50 -74.1 | -94.55 | 42.5 8 | Tida k |
| 23 | Azuara | Spanyol | 30 | 35-45 | -0.92 | 41.1 7 | Ya |
| 24 | Shoemaker | Australia Barat | 30 | 1625- 1635 | 120.8 8 | - 25.8 7 | Ya |
| 25 | Slate Islands | Ontario, Kanada | 30 | 400- 500 | -87.00 | 48.6 7 | Ya |

| | | | | | | | |
|----|-----------------|--------------------------|----|---------|--------|-------|----|
| 26 | Mistastin | NwfnldndLabrador, Kanada | 28 | 34-42 | -63.30 | 55.88 | Ya |
| 27 | Clearwater East | Quebec, Kanada | 26 | 270-310 | -74.12 | 56.08 | Ya |

4.16 Misi mengungkap rahasia asteroid

4.16-1 Proyek NEO

Proyek Near-Earth Object (NEO) adalah proyek-proyek internasional yang dipelopori oleh Amerika Serikat, Uni Eropa dan Jepang, guna menyelidiki dan memetakan obyek-obyek luar angkasa yang diklasifikasikan sebagai NEO. NEO adalah benda-benda angkasa yang bergerak yang memiliki diameter minimum 1 kilometer yang terpengaruh oleh pengaruh gravitasi planet-planet terdekat sehingga orbitnya akan mendekati orbit bumi pada jarak yang dekat pada waktu tertentu. Umumnya NEO terdiri atas asteroid dengan diameter >50 m, meteorit dan komet. Proyek-proyek yang dibentuk untuk mempelajari NEO antara lain adalah:

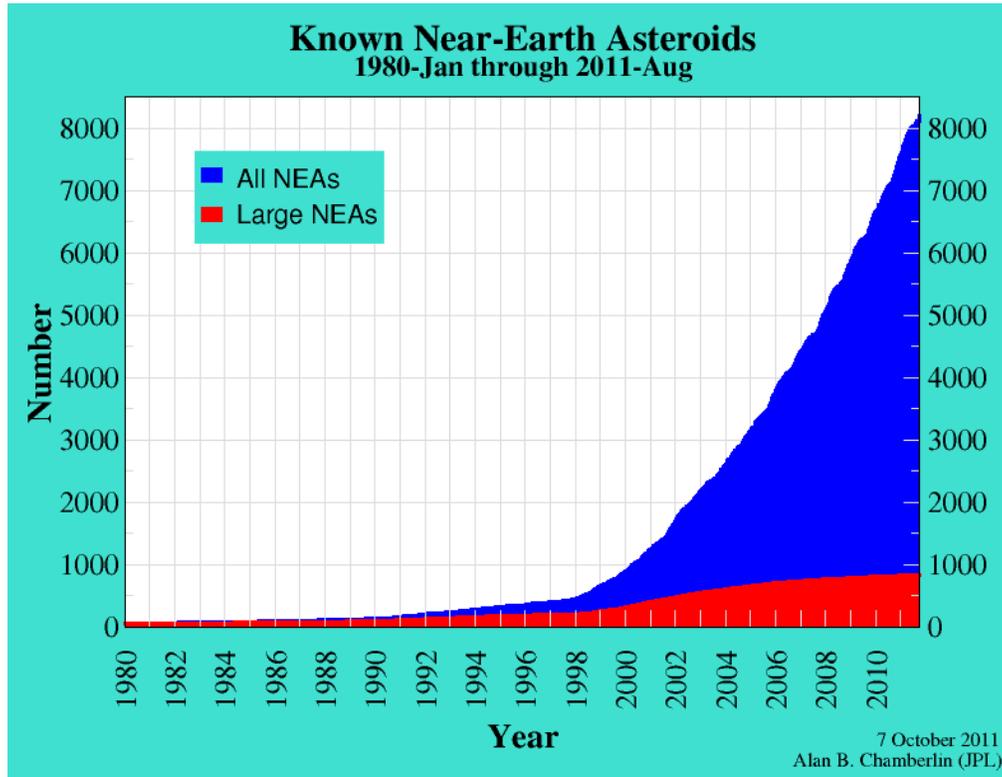
4.16-2 LINEAR

LINEAR atau Lincoln Near-Earth Asteroid Research adalah suatu proyek kerjasama antara Angkatan Udara Amerika Serikat, NASA, dan laboratorium Lincoln MIT untuk pencarian secara skematik benda-benda luar angkasa dekat bumi (NEO). LINEAR telah menemukan banyak asteroid sejak 1998. Per 21 Oktober 2004 LINEAR telah mendeteksi 211.849 obyek dimana 1622 diantaranya

adalah NEO dan 142 buah komet. Semua penemuan LINEAR menggunakan teleskop robotik.

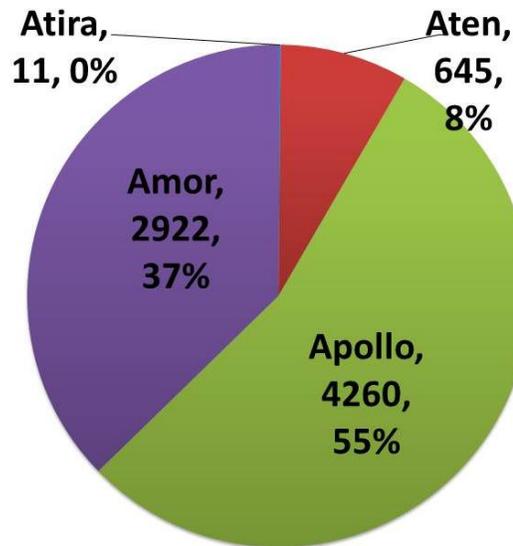
4.16-3 NEAT

NEAT atau Near-Earth Asteroid Tracking adalah suatu program yang dijalankan oleh NASA dan laboratorium propulsi jet untuk menemukan benda-benda NEO. NEAT memulai observasinya sejak Desember 1995. NEAT mempunyai persetujuan dengan angkatan udara AS (USAF) untuk menggunakan teleskop Ground-based Electro-Optical Deep Space Surveillance (GEODSS) yang berlokasi di Haleakala, Maui, Hawaii. Teleskop angkatan udara ini pada dasarnya digunakan untuk memantau pesawat ruang angkasa di orbit bumi. Salah satu asteroid dinamakan 64070 NEAT untuk menghormati jasa ilmuwan yang terlibat dalam proyek tersebut. Asteroid ini ditemukan pada awal tahun 2005.



Gambar 4- 27 Populasi NEAs yang sudah terdeteksi hingga Agustus 2011. Berukuran besar ada 1000 asteroid sedangkan yang berukuran kecil sekitar 8000 asteroid. Luas daerah menyatakan jumlah total asteroid. (<http://nasa.jpl.caltech>).

Dari populasi tersebut dapat dipilah ada 11 asteroid kelompok Atira, 645 asteroid kelompok Aten, 4260 asteroid kelompok Apollo dan 2922 asteroid kelompok Amor. Distribusi ini diperlihatkan dalam gambar berikut.



Gambar 4- 28 Distribusi *NEAs*. Apollo merupakan populasi terbesar, sedangkan Atira merupakan populasi terkecil dalam kelompok *NEAs*.

4.16-4 LONEOS

LONEOS atau Lowell Observatory Near-Earth Object Search adalah sebuah program yang dijalankan oleh NASA dan observatorium Lowell untuk menemukan benda-benda luar angkasa NEO. LONEOS dimulai pada Desember 1997.

Sampai 1 Oktober 2006, sebanyak 4.192 buah NEO sudah ditemukan. Sebanyak 844 di antaranya adalah asteroid dengan diameter mendekati 1 kilometer ada sekitar 803 asteroid di antaranya diklasifikasikan sebagai PHA.

4.16-5 Klasifikasi NEO

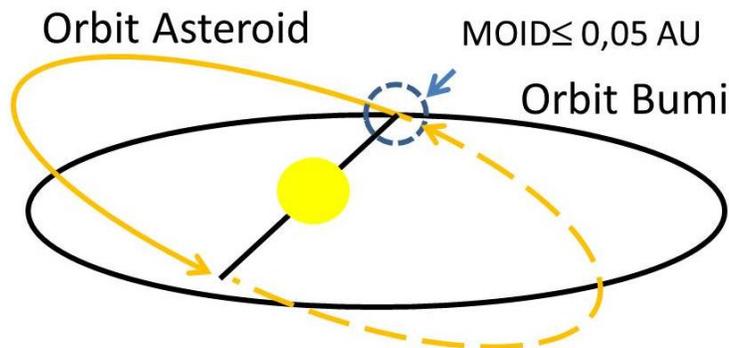
NEO didefinisikan sebagai asteroid dan komet dengan jarak perihelion q lebih kecil dari 1.3 au. NEC (Near-Earth Comets) atau komet-komet dekat bumi lebih dibatasi kepada komet jarak pendek atau periode orbit P kurang dari 200 tahun. Sebagian besar populasi NEO adalah asteroid lintas dekat Bumi atau *Near-Earth Asteroids* (NEA). Kelompok NEA terdiri atas Aten, Apollo dan Amor. Klasifikasi ini berdasarkan atas jarak perihelion (q), jarak aphelion (Q) dan jarak sumbu semi-major (a).

Tabel 4- 5 Klasifikasi dan kriteria umum Near Earth Objects (NEOs) (<http://neo.jpl.nasa.gov>)

| Group | Keterangan | Definisi |
|--------|---|--|
| NEC | Near-Earth Comets | $q < 1.3$ au, dan $P < 200$ tahun |
| NEA | Near-Earth Asteroid | $q < 1.3$ au |
| Aten | NEA dengan sumbu semi-major $<$ sumbu semi-major bumi (contohnya asteroid 2062 Aten) | $a < 1.0$ AU, dan $Q > 0.983$ au |
| Apollo | NEA dengan sumbu semi-major $>$ sumbu semi-major bumi (contohnya asteroid 1862 Apollo) | $a > 1.0$ au dan $q < 1.017$ au |
| Amor | NEA dengan orbit luar terhadap bumi dan orbit dalam terhadap mars (contohnya asteroid 1221 Amor) | $a > 1.0$ au dan 1.017 au $< q < 1.3$ au |
| PHA | NEA dengan jarak minimum interseksi dengan orbit bumi maksimum 0.05 au dan memiliki magnitude absolut (H) 22 atau lebih | $MOID \leq 0.05$ au, $H \leq 22.0$ |

4.16-6 PHA (Potentially Hazardous Asteroids)

PHA (Potentially Hazardous Asteroids) atau asteroid-asteroid yang berpotensi membahayakan didefinisikan berdasarkan parameter yang mengukur tingkat potensial asteroid tersebut dalam menimbulkan ancaman dikarenakan orbitnya yang sangat dekat dengan bumi. Secara spesifik PHA adalah asteroid dengan jarak minimum interseksi dengan orbit bumi pada maksimum 0.05 au dan memiliki magnitudo absolut (H) maksimum 22. Dengan kata lain asteroid yang tidak bisa mendekati bumi sejauh 0.05 au (7.480.000 km) atau memiliki diameter lebih kecil dari 150 m tidak dikategorikan sebagai PHA. Sampai awal tahun 2007 ada 803 obyek PHA yang sudah diketahui. Walaupun demikian ini tidak berarti bahwa obyek PHA tersebut akan menabrak bumi. Tetapi hanya merupakan tingkat probabilitas untuk ancaman tersebut. Dengan memonitor obyek-obyek PHA tersebut dan memperbaharui orbit-orbitnya dengan adanya observasi-observasi terbaru, seseorang dapat meramalkan tingkat statistik kedekatannya dengan bumi dan ancaman terhadap tabrakan dengan bumi. Daftar lengkap asteroid kategori PHA dapat dilihat di web site <http://www.planetary.org/html/neo/>.



Gambar 4- 29 Jika jarak terdekat asteroid ke Bumi lebih kecil dari 0,005 au Asteroid didefinisikan sebagai PHA, namun belum tentu asteroid akan menumbuk Bumi. Peluang terbesar terjadi apabila inklinasi mendekati nol.

4.16-7 Misi-misi luar angkasa proyek NEO

1. Misi NEAR, diluncurkan pada 17 Februari 1996. Bertemu dengan asteroid Mathilde pada 27 Juni 1997, bertemu dengan asteroid Eros pada 23 Desember 1998 dan 14 Februari 2000.
2. Deep Space 1, diluncurkan pada 25 Oktober 1998. Bertemu dengan asteroid 9969 Braille pada 28 Juli 1999, bertemu dengan komet Borelly pada 22 September 2001.
3. Stardust, diluncurkan pada 6 Februari 1999. Bertemu dengan komet Wild-2 pada 2 Januari 2004.
4. Muses-C, diluncurkan pada Desember 2002. Bertemu dengan asteroid 25143 Itokawa pada September 2005.
5. Rosetta, diluncurkan pada 2 Maret 2004. Dijadwalkan untuk bertemu dengan komet Churyumov-Gerasimenko pada Mei 2014.
6. Deep Impact, diluncurkan pada 30 Desember 2004. Menabrak komet Tempel 1 pada 4 Juli 2005.
7. Dawn, diluncurkan May 2006. Dijadwalkan untuk bertemu dengan asteroid Vesta pada Juli 2010 dan dengan asteroid Ceres pada Agustus 2014.
8. Hayabusa, wahana luar angkasa milik badan luar angkasa Jepang bertemu dengan asteroid Itokawa pada 12 September 2005 pukul 18.00 UTC setelah menempuh perjalanan sejauh 1 milyar km. Direncanakan untuk kembali ke bumi pada Juni 2007.

4.17 Skala Bahaya Tabrakan Torino (Torino Impact Hazard Scale)

Skala Torino adalah metode untuk melakukan klasifikasi terhadap bahaya tabrakan benda-benda luar angkasa NEO seperti asteroid dan komet. Dimaksudkan untuk menunjukkan kepada publik tingkat keseriusan prediksi tumbukan benda kecil Tata Surya dengan menggabungkan probabilitas dan potensial kehancuran. Ditunjukkan dalam suatu nilai tertentu. Skala teknikal Palermo (Palermo Technical Impact Hazard Scale) mirip dengan skalam Torino hanya lebih kompleks dalam perhitungannya.

Skala Torino diciptakan oleh Profesor Richard P. Binzel dari Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, di Massachusetts Institute of Technology (MIT). Versi pertama yang berjudul "A Near-Earth Object Hazard Index", dipresentasikan di konferensi PBB pada tahun 1995 dan dipublikasikan di *Annals of the New York Academy of Sciences*, volume 822, tahun 1997. Revisi dari versi "Hazard Index" kemudian dipresentasikan pada Juni 1999 di konferensi internasional NEO yang diselenggarakan di Torino (Turin), Italia. Konferensi memutuskan untuk mengadopsi versi yang sudah direvisi yang kemudian dikenal dengan nama "Torino Scale". Konklusi tersebut disampaikan dalam Tabel 4-6 berikut.

Tabel 4- 6 Skala Torino, klasifikasi tingkat bahaya bila Bumi ditumbuk oleh asteroid, komet dan meteor (benda kecil Tata Surya) .

| Katagori | S | Deskripsi |
|---------------------------------|---|---|
| Tidak Berbahaya (Zona Putih) | 0 | Kemungkinan terjadi tumbukan mendekati nol. Obyek-obyek kecil seperti batu meteor akan terbakar di atmosfer. Keberadaan hujan meteorit yang tidak menimbulkan bencana . |

| | | |
|--|---------|---|
| | | masuk dalam kategori ini. |
| Normal Hijau) | (Zone 1 | Peristiwa rutin obyek yang akan melewati orbit bumi yang diramalkan tidak akan menimbulkan tingkat bahaya termasuk dalam kategori ini. Perhitungan sementara menunjukkan probabilitas tumbukan sangat kecil sehingga tidak perlu untuk dipublikasikan. Katagori ini bisa diturunkan ke level nol jika ada observasi terbaru yang mendukung. |
| Perlu perhatian astronom (Zone Kuning) | 2 | Penemuan suatu obyek yang bisa menjadi rutin dengan memperluas pencarian. Walaupun demikian tingkat kemungkinan tabrakan masih sangat kecil. Observasi terbaru bisa saja memungkinkan untuk menurunkan tingkat bahaya ke level 0. |
| | 3 | Perhitungan sementara menghasilkan kemungkinan tabrakan adalah 1% atau lebih mengakibatkan kehancuran pada bagian tertentu di muka Bumi. Observasi terbaru bisa memungkinkan untuk menurunkan tingkat bahaya ke level 0. Publik perlu diberi tahu jika tabrakan akan terjadi kurang dari 1 dekade. |
| | 4 | Perhitungan sementara menghasilkan kemungkinan tabrakan adalah 1% atau lebih, dapat mengakibatkan kehancuran pada kawasan tertentu. Observasi terbaru bisa memungkinkan untuk menurunkan tingkat |

| | | |
|-------------------------------|----|--|
| | | bahaya ke level 0. Publik perlu diberi tahu jika tabrakan akan terjadi kurang dari 1 dekade. |
| Membahayakan (Zone Oranye) | 5 | Menimbulkan ancaman serius tapi belum pasti akan menimbulkan kehancuran pada kawasan tertentu. Dibutuhkan perhatian astronomer untuk memutuskan apakah akan ada tabrakan atau tidak. Jika waktu tabrakan kurang dari 1 dekade, rencana kontingensi harus segera disiapkan. |
| | 6 | Penemuan obyek besar yang menimbulkan ancaman serius tapi belum tentu menimbulkan kehancuran global. Perlu rencana kontingency jika waktu tabrakan kurang dari 3 dekade. |
| | 7 | Obyek besar akan mendekati orbit bumi dengan jarak yang sangat dekat. Rencana kontingency internasional harus disiapkan. |
| Tabrakan (Zone Merah) | 8 | Pasti akan terjadi tabrakan yang bisa mengakibatkan kehancuran pada kawasan tertentu. Kejadian dapat terjadi rata-rata sekali dalam 50 tahun dan sekali dalam 1000 tahun. |
| | 9 | Pasti akan terjadi tabrakan yang mengakibatkan kehancuran regional dan Tsunami besar. Kejadian dapat terjadi rata-rata sekali setiap 10.000 tahun dan sekali setiap 100.000 tahun. |
| | 10 | Pasti akan terjadi tabrakan yang mengakibatkan kehancuran global. Kejadian dapat terjadi rata-rata sekali setiap 100.000 |

tahun.

Pada tanggal 25 Desember 2004, planet kecil 2004 MN4 atau 99942 Apophis diklasifikasikan 4 pada skala Torino atau yang tertinggi selama ini. Pada 27 Desember 2004 memiliki kemungkinan 2.7% menabrak bumi pada 13 April 2029. Pada Juli 2005 resiko tabrakan dihilangkan menjadi nol, tetapi masih memiliki skala Torino 1 untuk tahun 2035 dan 2036 dan skala kumulatif Palermo -1.3.

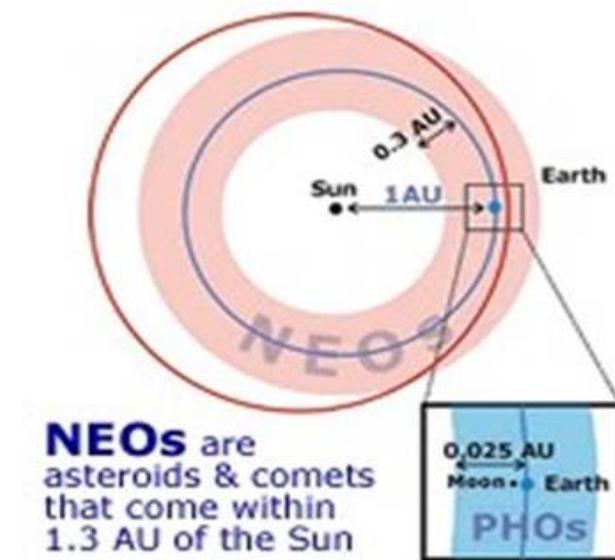
Sekarang ini obyek NEO dengan skala Palermo lebih besar dari nol yaitu (29075) 1950 DA yang diramalkan untuk mendekati atau menabrak bumi ($p \leq 0.003$) pada tahun 2880. Jika tabrakan ini terjadi, energi yang dilepaskan oleh tabrakan tersebut akan mengakibatkan kehancuran global yang akan menghancurkan seluruh kehidupan di bumi. Manusia masih memiliki 800 tahun untuk menyelidiki lebih jauh orbit (29075) 1950 DA tersebut dan mengubah orbitnya jika diperlukan.

NEO 2004 VD17 memiliki skala Torino 1 untuk kemungkinan tabrakan pada tahun 2091-2104. NEO 99942 MN 2004 memiliki skala Torino 1 untuk kemungkinan tabrakan pada tahun 2036-2056. NEO 1997 XR2 juga memiliki skala Torino 1 untuk kemungkinan tabrakan pada tahun 2101. Informasi ini masih bisa berubah seiring dengan adanya observasi dan perhitungan-perhitungan terbaru.

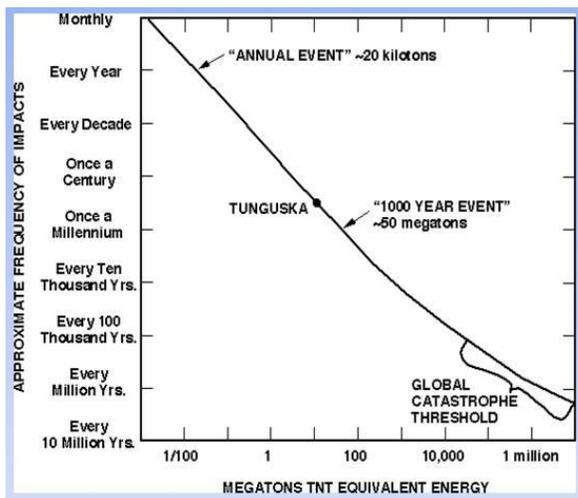
4.18 NEO yang nyaris menumbuk Bumi

Pada tanggal 18 Maret 2004, asteroid 2004 FH dengan diameter sekitar 30 m melewati bumi pada jarak 43.000 km (10 kali lebih dibandingkan Bulan). Astronomer baru mendeteksinya hanya tiga hari sebelumnya. Dua minggu sesudahnya pada 31 Maret 2004, 2004 FU162 kembali membuat rekor terdekat, melewati bumi hanya berjarak sekitar 6.500 km (60 kali lebih dekat dibandingkan Bulan). Obyek tersebut dideteksi hanya sejam sebelum pendekatannya.

Akan tetapi diameter obyek tersebut sangat kecil hanya sekitar 10 m.



Gambar 4- 30 NEO didefinisikan sebagai asteroid atau komet yang bergerak dalam radius orbit lebih kecil dari 1,3 SA atau mempunyai jarak dari Bumi sekitar 0,025 SA



Gambar 4- 31 Frekuensi tumbukan yang dialami Bumi oleh NEO sebagai fungsi dari energy kinetis yang dilepaskan

4.19 Materi Antar Planet

Perubahan luminositas objek Tata Surya disebabkan oleh beberapa faktor;

1. Akibat adanya Matahari, yaitu bervariasinya fluks radiasi Matahari yang diterima objek tersebut
2. Berasal dari objek itu sendiri, misalnya pengaruh vulkanis di Bumi, pengaruh gaya non-gravitasi pada inti Komet serta fenomena fisis lain dari tiap objek bersangkutan
3. Gerak objek relatif terhadap Matahari. Perubahan jarak heliosentrik suatu objek akan mempengaruhi atau mengubah garis-garis Fraunhofer dan efek Dopler pada spektrum Matahari yang menyebabkan perubahan spektrum komet. Contoh yang paling mudah dalam mengamati pengaruh perubahan jarak heliosentrik tersebut adalah fenomena pada saat Komet melewati perihelium
4. Gerak objek relatif terhadap Bumi. Pengaruh jarak geosentrik ini mudah diamati misalnya asteroid dan komet tidak bisa diamati kecuali pada waktu yang tertentu

Perubahan kedudukan objek Tata Surya dapat dimanfaatkan untuk mengamati fenomena fisik objek tersebut misalnya gerhana matahari dapat dimanfaatkan untuk mengamati Korona dan Kromosfer Matahari.

Material-material yang ada dalam ruang antar planet terdiri dari dua komponen, yaitu;

1. Partikel terionisasi yang berasal dari Matahari, yaitu angin matahari
2. Komponen objek padat, yang berupa debu

Angin matahari merupakan plasma yang temperaturnya sangat tinggi. Angin ini membawa medan magnet antar planet. Interaksinya

dengan anggota Tata Surya bergantung pada sifat anggota Tata Surya tersebut misalnya;

1. Berisi gas, tidak mempunyai magnet, mempunyai selubung. Karakteristik seperti ini di jumpai pada Venus, Mars, Titan dan Komet
2. Mempunyai atmosfer dan medan magnet, misalnya pada Io, Bulan dan kebanyakan satelit lain
3. Hanya memiliki medan magnet seperti Merkurius, Jupiter, dan Saturnus

Keberadaan debu antarplanet ini dibuktikan oleh adanya meteor (saat memasuki atmosfer Bumi) maupun meteorit (saat menjangkau permukaan Bumi) yang secara kontinyu memasuki atmosfer Bumi. Debu berasal dari erosi secara perlahan-lahan atau disintegrasi inti komet. Kasus ini terjadi pada Leonids, yang berasosiasi dengan komet Temple; Taurids berasosiasi dengan komet Encke dll. Ini dimungkinkan karena meteor, yang mempunyai rentang diameter partikel 200 μm sampai beberapa sentimeter.

Objek yang mencapai permukaan Bumi tanpa dihancurkan total oleh atmosfer adalah meteorit, dengan massa di atas 1 kg. Meteorit ini kehilangan massa saat melewati atmosfer, dan mencapai tanah dengan frekuensi 2 – 10 per hari. Meteorit mungkin terdiri dari logam, dapat juga terdiri dari logam-silikat atau silikat. Asteroid mungkin merupakan objek asal meteorit.

Keberadaan debu antarplanet juga ditunjukkan melalui observasi *zodiacal light* (cahaya zodiak). Cahaya ini terjadi karena sinar Matahari dipantulkan oleh partikel-partikel debu yang ada di dalam Tata Surya. Pada dasarnya materi antar planet dapat dibedakan dalam empat komponen, yaitu;

1. Debu, sisa awan primordial, semburan ekor komet, benturan antar asteroid

2. Sinar kosmik, sinar ini merupakan kumpulan inti atom yang mempunyai energi tinggi ($E \geq 100$ MeV) yang dihasilkan oleh atmosfer bintang, namun dapat juga disebabkan oleh juluran lidah Matahari

3. Gas netral yang berasal dari pembentukan bintang

4. Angin matahari berwujud plasma yang mengandung H^+ dan He^{++} , plasma ini dihasilkan oleh Korona Matahari

Selubung terluar objek Tata Surya akan mengalami kontak langsung dengan mater-materi antar planet tersebut. Interaksi ini bergantung dari tekanan selubung dan intensitas medan maknetik.

Ada empat macam tipe interaksi angin matahari dengan objek yang ada dalam Tata Surya kita, yaitu;

1. Angin matahari dapat langsung mengenai pusat objek. Pusat objek akan menyerap ion-ion yang terdapat dalam angin matahari. Materi Bulan misalnya, merupakan penghantar yang jelek akibatnya medan maknit bisa masuk melalui cara difusi. Garis-garis medan maknit maupun plasma angin matahari dengan cepat terakumulasi pada bagian atasnya yang bebas dari gangguan. Di sisi bagian bawah akan terbentuk suatu lubang yang bebas dari plasma

2. Angin matahari mengenai atmosfer. Objek yang mempunyai atmosfer tebal tapi tidak mempunyai medan maknit. Angin matahari akan langsung berinteraksi dengan bagian atas atmosfer. Hal ini sering terjadi pada komet dan Venus dan mungkin juga Mars

3. Untuk objek yang tidak mempunyai atmosfer dan medan maknit intrinsik angin matahari dapat langsung mengenai pusat objek. Pusat objek merupakan konduktor yang baik yang dapat mencegah masuknya fluks maknetik dari luar ke dalam. Sampai saat ini belum pernah ditemukan objek langit yang tidak mempunyai atmosfer sekaligus medan maknit

4. Pusat objek mempunyai medan magnet intrinsik sehingga mampu membelokkan angin matahari. Medan magnet akan membuat suatu rongga pada angin matahari tersebut, yang kemudian akan membatasi planet tersebut. Hal ini disebut magnetosfer. Ditemukan pada planet Merkurius, Bumi, Jupiter, Saturnus dan Uranus

Phenomena lain yang teramati adalah peristiwa Aurora. Fenomena ini terjadi sebagai akibat jatuhnya elektron ke kawasan angkasa planet yang kopling elektrodinamikanya kuat yaitu antara ionosfer dan magnetosfer. Untuk Bumi ada di zone Aurora bagian utara dan zone aurora bagian selatan yang ditandai oleh garis-garis medan magnet yang mempengaruhi angin matahari, magnetosfer dan ionosfer.

Daftar Pustaka

Murray.C.D., and Dermott,S.F., Solar System Dynamics, Cambridge University Press, 2008

Peter Bobrowsky, Hans Rickman Editors. Comet /Asteroid Impacts and Human Society, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007

Hanel,R,A, Conrath, B.J Jennings, D.E, Samuelton, Exploration of the Solar System by Infrared Remot Sensing, Cambridge University Press, 2003

Encrenaz, T, Biring, J.P, The Solar System, Springer-Verlag, London, Paris, Tokyo, 1991

Selain itu beberapa pranala dan informasi tambahan dapat juga diperoleh dalam daftar berikut

3. <https://physics.ucf.edu/~fernandes/cometlist.html>

4. <http://www.boulder.wri.edu>

5. <http://www.cs.trinity.edu/mlewis/SwiftVis>

6. <http://ssd.jplnasa.gov>

7. <http://www.minorplanetcenter.net/>,

8. Journal yang berkaitan dengan Solar System juga memperkaya catatan ini

Daftar Index

- air, 2, 3, 18, 40, 52, 58, 121
amonia, 61
angin matahari, 2, 42
anomali benar, 95
aphelium, 98
Apollo-Amor-Aten, 90, 115, 116
argumen perihelium, 96, 114
ascending node, 5
Asteroid, 2, 28, 31, 33, 35, 36, 37, 40, 45, 52, 55, 89, 90, 92, 94, 95, 96, 97, 108, 109, 110, 113, 114, 115, 117, 118, 119, 125, 126, 128, 129, 135
awan Oort, 53, 61, 62, 63, 65, 83, 87
awan primordial, 89, 135
bidang ekliptika, 2, 5, 7, 45
bilangan gelombang, 20
cahaya zodiac, 45
Charon, 53, 55, 59
cryo volcano, 58
C-Type asteroids, 92
cubewanos, 57, 58
Dactyl, 92, 93
descending node, 5
distribusi Sekanina-Miler, 72
dual resonance, 97
duolistik, 1
ekor debu, 61, 73, 84
ekor gas, 61
ekor komet, 61, 73
eksentrisitas, 4, 46, 95, 97, 111, 113, 117
ekuator Matahari, 2
elemen orbit, 96, 105, 113, 116
energi kinetis, 100
Energi kinetis, 66
energi negatif, 64
energi positif, 64
energi potensial, 100
Energi potensial, 66
Energi total, 65, 84
Eris, 56, 57, 59, 60
Eros, 92, 129
foton, 21
Galevka, 92
GALILEO, 93
gaya non gravitasional, 74
Gaya non gravitational, 107
gaya sentrifugal, 27, 28
Gegenschein, 45
Geographos, 90
gerhana Bulan, 7, 10

-
- gerhana Matahari, 7, 9, 48
Hukum Planck, 20
hukum Wien, 21
Ida, 92, 93
inner Oort, 61
inti, 61, 66, 67, 68, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 78, 79, 80, 81, 82, 83
inti komet, 61, 73, 74, 78, 79, 81
Inti komet, 61, 66, 74, 79, 81
Jarak aphelion, 5
jarak heliosentrik, 2, 4, 5, 6, 22, 39, 46
Jarak heliosentrik, 95
Jarak perihelion, 5
karbondioksida, 61
kecepatan supersonik, 42
kecepatan lepas, 23
kecepatan thermal, 23, 24
Kelompok Centaurus, 56, 57
Kepler, 4
koefisien refleksi, 21
koma, 61, 71, 73, 83, 84
Komet, 2, 38, 39, 40, 42, 43, 45, 46, 61, 63, 66, 72, 73, 76, 78, 80, 81, 82, 83, 84, 87, 116, 117, 134, 135
Komet periode panjang, 63, 84
Komet periode pendek, 63
konjungsi, 5
konjungsi inferior, 5
konjungsi superior, 5
Kuiper Belt, 61
Linkage, 95
maria, 28
Mars, 2, 16, 22, 24, 25, 33, 35, 36, 40, 41, 42, 43, 89, 90, 114, 117, 120, 122, 135, 136
Matahari, 1, 2, 4, 5, 6, 7, 9, 11, 12, 15, 16, 18, 21, 22, 28, 33, 39, 40, 42, 43, 45, 46, 48, 56, 57, 61, 62, 64, 65, 67, 68, 69, 70, 71, 73, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 90, 95, 97, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 114, 115, 117, 134, 135
Maxwell-Boltzman, 71
medan magnetik, 43
Medium antar planet, 2, 45
metana, 61
methan, 2, 3
methanol, 2, 3
Molekul, 26
molekul air, 61
monoistik, 1
M-type asteroids, 92
NEAR, 94, 129

-
- objek berotasi lambat,, 22
 - objek berotasi cepat, 21, 22
 - oposisi, 6, 7
 - pemanasan gaya pasang surut, 43
 - penumbra, 10, 43
 - perihelium, 98, 106, 115, 134
 - periode anomalistic, 9
 - periode draconic, 9
 - periode Saros, 9
 - periode sinodis, 9
 - permukaan berkecepatan nol, 102, 104
 - perubahan internal, 12
 - planet dalam, 5, 22
 - Planet Gas, 22
 - planet superior, 6
 - Planet Terrestrial, 22
 - planetary migration, 108
 - plasma, 2, 42
 - plutinos, 57
 - Pluto, 53, 54, 55, 56, 59
 - plutoid, 59
 - Radius vektor, 4
 - Resonance Objects, 57
 - resonansi Kozai, 57
 - satelit, 2, 4, 5, 6, 8, 22, 25, 26, 28, 33, 34, 45, 48
 - sayatan melintang, 29
 - Scattered disk objects, 58
 - setengah sumbu panjang, 65, 85, 95, 97, 98, 106, 111, 113, 114, 116
 - setengah sumbu panjang elips, 4, 35
 - SOHO, 108
 - strato volcano, 58
 - S-type asteroids, 92
 - sudut fasa, 5, 6
 - Temperatur benda hitam, 21
 - temperatur efektif, 21, 22
 - terrae, 28
 - titik Lagrange, 101, 102
 - Titik Lagrange, 6
 - Titius Bode, 5
 - Trojan, 6, 35
 - two-body problem, 4
 - twotinos, 57
 - umbra, 10, 43
 - Unlikage, 95
 - U-type asteroids, 92
 - Varuna, 54, 59
 - Vesta, 92, 130
 - vulcanoid, 107, 108
 - energi kinetis 72
 - energi negatif 70

| | | | |
|------------------------|--|-----------------------|--|
| energi positif | 70 | jarak heliosentrik | 2, 4, 6, 24, 41, 49 |
| energi potensial | 111 | Jarak heliosentrik | 105 |
| Energi potensial | 72 | Jarak perihelion | 5 |
| Energi total | 72, 93 | karbondioksida | 67 |
| Eris | 61, 63, 64, 65 | kecepatan supersonik | 45 |
| Eros | 102, 142 | kecepatan lepas | 25 |
| foton | 23 | kecepatan thermal | 26, 27 |
| Galevka | 102 | Kelompok Centaurus | 62 |
| GALILEO | 103 | Kepler | 4 |
| gaya non gravitasional | 81 | koefisien refleksi | 24 |
| Gaya non gravitational | 118 | koma | 67, 77, 78, 80, 92, 93 |
| gaya sentrifugal | 32, 33 | Komet | 2, 41, 42, 43, 45, 46, 47, 48, 49, 67, 69, 72, 78, 79, 80, 83, 86, 87, 89, 91, 92, 93, 94, 96, 128, 130, 148, 151, 152 |
| Gegenschein | 48 | Komet periode panjang | 69, 93 |
| Geographos | 100 | Komet periode pendek | 69 |
| gerhana Bulan | 8, 11 | konjungsi | 6 |
| gerhana Matahari | 8, 10, 51 | konjungsi inferior | 6 |
| Hukum Planck | 22 | konjungsi superior | 6 |
| hukum Wien | 23 | Kuiper Belt | 67 |
| Ida | 102, 103 | Linkage | 106 |
| inner Oort | 67 | maria | 33 |
| inti | 67, 72, 73, 74, 77, 78, 80, 81, 82, 83, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92 | Mars | 2, 17, 25, 27, 28, 36, 38, 39, 43, 44, 45, 46, 99, 100, 126, 130, 132, 134, 148, 150 |
| inti komet | 67, 80, 81, 85, 86, 89, 90 | | |
| Inti komet | 67, 72, 81, 87, 89 | | |
| Jarak aphelion | 5 | | |

| | | | |
|-----------------------------|--|------------------------------|--|
| Matahari | 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 17, 18, 20, 23, 24, 25, 32, 33, 36, 41, 42, 45, 46, 48, 49, 51, 52, 61, 62, 63, 67, 68, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 80, 88, 89, 91, 93, 94, 95, 100, 105, 106, 108, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 126, 127, 129, 148, 149, 151 | periode anomalistic | 10 |
| Maxwell-Boltzman | 77 | periode draconic | 10 |
| medan magnetik | 46 | periode Saros | 11 |
| Medium antar planet | 2, 48 | periode sinodis | 10 |
| metana | 67 | permukaan berkecepatan nol | 113, 115 |
| methan | 3 | perubahan internal | 13 |
| methanol | 3 | planet dalam | 6, 25 |
| Molekul | 29 | Planet Gas | 25 |
| molekul air | 67 | planet superior | 6 |
| monoistik | 1 | Planet Terrestrial | 25 |
| M-type asteroids | 102 | planetary migration | 120 |
| NEAR | 104, 142 | plasma | 2, 45 |
| objek berotasi lambat, | 24 | plutinos | 62 |
| objek berotasi cepat | 24 | Pluto | 58, 59, 61, 64, 65 |
| oposisi | 6, 8 | plutoid | 64, 65 |
| pemanasan gaya pasang surut | 45 | Radius vektor | 5 |
| penumbra | 11, 46 | Resonance Objects | 62 |
| perihelium | 108, 109, 117, 128, 148 | resonansi Kozai | 62 |
| | | satelit | 2, 4, 5, 7, 9, 25, 28, 33, 36, 37, 48, 51, 52 |
| | | sayatan melintang | 34 |
| | | Scattered disk objects | 63 |
| | | setengah sumbu panjang | 71, 94, 106, 107, 108, 117, 122, 125, 126, 129 |
| | | setengah sumbu panjang elips | 4, 5, 38 |
| | | SOHO | 119 |

strato volcano 63
S-type asteroids 102
sudut fasa 6
Temperatur benda hitam 23,
24
temperatur efektif 24
terrae 33
titik Lagrange 112, 113
Titik Lagrange 7
Titius Bode 6
Trojan 7, 38
two-body problem 4
twotinos 62
umbra 11, 46
Unlikage 106
U-type asteroids 102
Varuna 59, 65
Vesta 102, 143
vulcanoid 118, 119

Konstanta Astronomi dan Fisika

Daftar konstanta ini dapat ditemukan dibanyak buku referensi, Salah satu sumber yang dapat dipercaya yang selalu diperbahatui dapat diunduh dengan gratis di situs <http://ssd.jpl.nasa.gov>

Tabel 1 Daftar Konstanta Astronomi

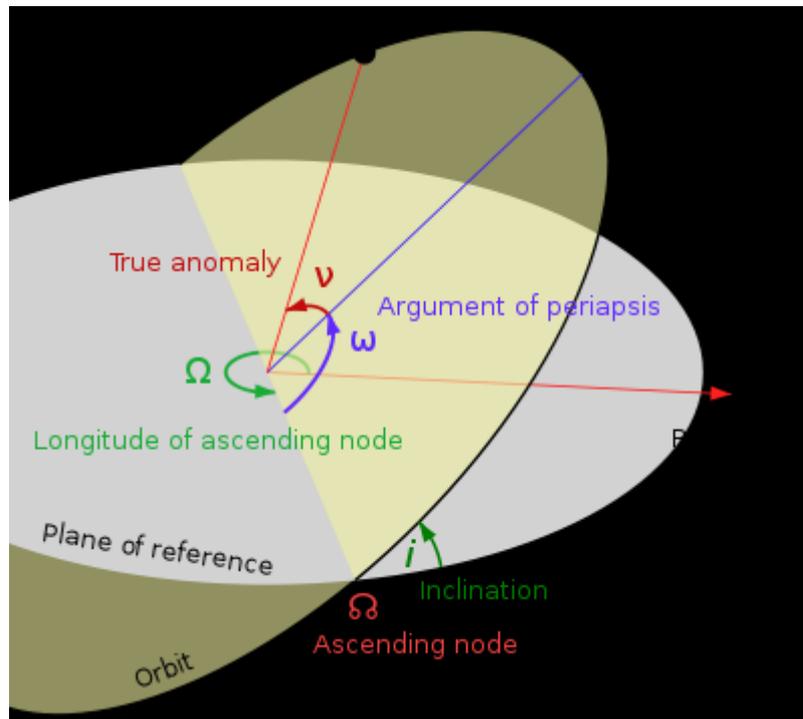
| No | Symbol | Nilai dan satuan | Keterangan |
|-----|---------------|---|---------------------------------------|
| 1. | L_{\odot} | $3,86 \times 10^{26} \text{ J dt}^{-1} = 3,826 \times 10^{26} \text{ Watt}$ | Luminositas Matahari |
| 2. | F_{\odot} | $6,28 \times 10^7 \text{ J dt}^{-1} \text{ m}^{-2}$ | Fluks untuk seluruh panjang gelombang |
| 3. | ε | $1,368 \times 10^3 \text{ J m}^{-2}$ | Konstanta radiasi Matahari |
| 4. | G | $6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$ [N = Newton] | Konstanta gravitasi |
| 5. | g | $9,8 \text{ m dt}^{-2}$ | Percepatan gravitasi Bumi |
| 6. | M_{\oplus} | $5,98 \times 10^{24} \text{ kg}$ | Massa Bumi |
| 7. | M_{ζ} | $7,34 \times 10^{22} \text{ kg}$ | Massa Bulan |
| 8. | M_{\odot} | $1,99 \times 10^{30} \text{ kg}$ | Massa Matahari |
| 9. | σ | $5,67 \times 10^{-8} \text{ J dt}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ | Konstanta Stefan Boltzmann |
| 10. | AU | $1,496 \times 10^{11} \text{ m}$ | Satu Satuan Astronomi |

| | | | |
|-----|--------------|--|---|
| 11. | Pc | $3.0860 \times 10^{18} \text{ cm} =$ 206,265 AU | Parsec (pc) |
| 12. | LD | $3,84 \times 10^8 \text{ m}$ | Jarak rerata Bumi-Bulan |
| 13. | R_{\oplus} | $6,37 \times 10^6 \text{ m}$ | Radius Bumi |
| 14. | R_{\odot} | $6,96 \times 10^8 \text{ m}$ | Radius Matahari |
| 15. | τ | 365,256 hari = $3,16 \times 10^7$ detik | Satu tahun sideris |
| 16. | T_{\odot} | 5880° K | Temperatur efektif Matahari |
| 17. | V_{\oplus} | $2,98 \times 10^4 \text{ meter/det}$ | Kecepatan Bumi mengelilingi Matahari |
| 18. | Ly | $9,5 \times 10^{15} \text{ menit}$ | Satu tahun cahaya |
| 19. | TS | 365.2564 days | Sidereal year |
| 20. | TT | 365.2422 days | Tropical year |
| 21. | TG | 365.2425 days | Gregorian year |
| 22. | TSM | 27.3217 days | Sidereal month |
| 23. | $TSYM$ | 29.5306 days | Synodic month |
| 24. | $TMSD$ | $23^{\text{h}}56^{\text{m}}4^{\text{s}}.091$ of mean solar time | Mean sidereal day |
| 25. | $TMSOD$ | $24^{\text{h}}3^{\text{m}}56^{\text{s}}.555$ of sidereal time | Mean solar day |
| 26. | e | $1.602 \times 10^{-19} \text{ C} = 4.803 \times$ 10^{-10} esu | Electron charge (e) |
| 27. | Me | $5.48579903 \times 10^{-4} \text{ amu}$ | Electron mass (me) |
| 28. | Mp | 1.007276470 amu | Proton mass (mp) |
| 29. | mn | 1.008664904 amu | Neutron mass (mn) |
| 30. | Md | 2.013553214 amu | Deuterium nucleus mass (md) |
| 31. | Hydrogen | 1.00794 amu | Hydrogen mass |

| | | | |
|-----|-----------------------|--|-----------------------------------|
| | mass | | |
| 32. | Helium mass | 4.002603 amu | Helium mass |
| 33. | NA | $6.022045 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ | Avogadro number |
| 34. | $T_{\text{eff}\odot}$ | 5 800 °K | Sun effective temperature |
| 35. | m_{\odot} | -26.8 | Sun apparent magnitude |
| 36. | M_{\odot} | 4.82 | Sun absolute magnitude |
| 37. | $M_{\text{bol}\odot}$ | 4.72 | Sun absolute bolometric magnitude |

| Conversion table | |
|--------------------------|---|
| 1 Å | 0.1 nm |
| 1 barn | 10^{-28} m^2 |
| 1 G | 10^{-4} T |
| 1 erg | $10^{-7} \text{ J} = 1 \text{ dyne cm}$ |
| 1 esu | $3.3356 \times 10^{-10} \text{ C}$ |
| 1 amu (atomic mass unit) | $1.6606 \times 10^{-24} \text{ g}$ |
| 1 atm (atmosphere) | 101,325 Pa = 1.01325 bar |
| 1 dyne | 10^{-5} N |

Daftar Elemen Orbit Planet dan Satelit



- a Setengah sumbu panjang (nilai rerata)
- e Eccentrisitas (nilai rerata)
- ω Argument perihelion ((nilai rerata))
- i Inklinasi terhadap bidang referensi ekliptika (planet) dan bidang ekuator (satelit)
- Ω Sudut simpul naik (Longitude of the ascending node) (nilai rerata) diukur dari titik vernal ekuinox ke garis potong bidang orbit dengan bidang ekliptika
- P Periode sideris (nilai rerata)

Ilustrasi element orientasi planet dan satelit. Untuk planet bidang referensinya adalah bidang ekliptika. Sedangkan untuk satelit bidang referensi diambil bidang ekuator planet

Tabel 2 Daftar Element Orbit dan Massa Planet

| No | Planet | a (AU) | e | i (deg) | Ω (deg) | ω (deg) | M (M_{\odot}) |
|----|---------|-------------|----------|--------------|-------------------|-------------------|------------------------|
| 1 | Mercury | 0,387099 | 0,205634 | 7,004 | 48,331 | 77,455 | 1/6023600,0 |
| 2 | Venus | 0,723332 | 0,006773 | 3,394 | 76,680 | 131,571 | 1/408523,5 |
| 3 | Earth | 1,000000 | 0,016709 | 0,000 | 174,876 | 102,940 | 1/328900,5 |
| 4 | Mars | 1,523692 | 0,093405 | 1,849 | 49,557 | 336,059 | 1/3098710,0 |
| 5 | Jupiter | 5,202437 | 0,048402 | 1,304 | 100,468 | 15,719 | 1/1047,355 |
| 6 | Saturn | 9,551712 | 0,052340 | 2,485 | 113,643 | 90,968 | 1/3498,5 |
| 7 | Uranus | 19,293108 | 0,044846 | 0,773 | 74,090 | 176,615 | 1/22869,0 |
| 8 | Neptune | 30,257162 | 0,007985 | 1,770 | 131,775 | 3,096 | 1/19314,0 |

Tabel 3 Daftar Element Orbit Bulan

| No | Satelit | a (km) | E | ω (deg) | i (deg) | Ω (deg) | P (days) |
|----|---------|-------------|--------|-------------------|--------------|-------------------|---------------|
| 1 | Bulan | 384400 | 0,0554 | 318,15 | 5,16 | 125,08 | 27,322 |

Tabel 4 Daftar Element Orbit Satelit Mars

| No | Satelit | a (km) | e | ω (deg) | i (deg) | Ω (deg) | P (days) |
|----|---------|-------------|--------|-------------------|--------------|-------------------|---------------|
| 1 | Phobos | 9376 | 0,0151 | 150,057 | 1,075 | 207,784 | 0,3189 |
| 2 | Deimos | 23458 | 0,0002 | 260,729 | 1,788 | 24,525 | 12,624 |

Tabel 5 Daftar Element Orbit Satelit Jupiter

| No | Satelit | a (km) | e | ω (deg) | i (deg) | Ω (deg) | P (days) |
|----|----------|-------------|--------|-------------------|--------------|-------------------|---------------|
| 1 | Io | 421800 | 0,0041 | 84,129 | 0,036 | 43,977 | 1,769 |
| 2 | Europa | 671100 | 0,0094 | 88,970 | 0,466 | 219,106 | 3,551 |
| 3 | Ganymede | 1070400 | 0,0013 | 192,417 | 0,177 | 63,552 | 7,155 |
| 4 | Callisto | 1882700 | 0,0074 | 52,643 | 0,192 | 298,848 | 16,69 |
| 5 | Amalthea | 181400 | 0,0032 | 155,873 | 0,38 | 108,946 | 0,498 |

| | | | | | | | |
|----|------------|----------|--------|---------|---------|---------|--------|
| 6 | Thebe | 221900 | 0,0176 | 234,269 | 1,080 | 235,694 | 0,675 |
| 7 | Adrastea | 129000 | 0,0018 | 328,047 | 0,054 | 228,378 | 0,298 |
| 8 | Metis | 128000 | 0,0012 | 297,177 | 0,019 | 146,912 | 0,295 |
| 9 | Himalia | 11461000 | 0,1623 | 331,995 | 27,496 | 57,245 | 250,56 |
| 10 | Elara | 11741000 | 0,2174 | 143,591 | 26,627 | 109,373 | 259,64 |
| 11 | Pasiphae | 23624000 | 0,409 | 170,450 | 151,431 | 312,990 | 743,63 |
| 12 | Sinope | 23939000 | 0,2495 | 346,394 | 158,109 | 303,081 | 758,9 |
| 13 | Lysithea | 11717000 | 0,1124 | 49,486 | 28,302 | 5,528 | 259,2 |
| 14 | Carme | 23404000 | 0,2533 | 28,199 | 164,907 | 113,738 | 734,17 |
| 15 | Ananke | 21276000 | 0,2435 | 100,619 | 148,889 | 7,615 | 629,77 |
| 16 | Leda | 11165000 | 0,1636 | 272,349 | 27,457 | 217,137 | 240,92 |
| 17 | Callirrhoe | 24102000 | 0,2829 | 30,401 | 147,155 | 291,872 | 758,77 |
| 18 | Themisto | 7507000 | 0,2424 | 219,285 | 43,068 | 191,413 | 130,02 |
| 19 | Magacrite | 23808000 | 0,4211 | 287,590 | 152,845 | 286,556 | 752,86 |
| 20 | Taygete | 23363000 | 0,2518 | 239,948 | 165,241 | 312,916 | 732,41 |
| 21 | Chaldene | 23179000 | 0,2514 | 255,976 | 165,171 | 145,101 | 723,72 |
| 22 | Harpalyke | 21104000 | 0,2261 | 140,833 | 148,648 | 37,129 | 623,32 |
| 23 | Kalyke | 23564000 | 0,2464 | 232,768 | 165,181 | 56,116 | 742,06 |
| 24 | Locaste | 21272000 | 0,2151 | 68,320 | 149,436 | 276,822 | 631,6 |
| 25 | Erinome | 23283000 | 0,2656 | 20,169 | 164,921 | 326,560 | 728,46 |
| 26 | Isonoe | 23231000 | 0,2465 | 125,072 | 165,252 | 138,553 | 726,23 |
| 27 | Praxidike | 21148000 | 0,2302 | 196,194 | 148,985 | 287,671 | 625,39 |
| 28 | Autonoe | 24033000 | 0,3166 | 62,045 | 152,284 | 281,030 | 761 |
| 29 | Thyone | 21192000 | 0,2377 | 102,491 | 148,819 | 241,001 | 627,19 |
| 30 | Hermippe | 21300000 | 0,2123 | 307,220 | 150,887 | 338,558 | 633,9 |
| 31 | Aitne | 23315000 | 0,2655 | 107,618 | 165,058 | 16,419 | 730,1 |
| 32 | Eurydome | 23148000 | 0,2758 | 231,855 | 150,206 | 312,918 | 717,34 |
| 33 | Euanthe | 21038000 | 0,2308 | 324,853 | 148,998 | 261,907 | 620,44 |
| 34 | Euporie | 19339000 | 0,144 | 90,162 | 145,499 | 66,471 | 550,69 |
| 35 | Orthosie | 21164000 | 0,278 | 223,181 | 145,937 | 228,744 | 622,55 |
| 36 | Sponde | 23790000 | 0,3132 | 73,467 | 151,153 | 127,419 | 748,31 |
| 37 | Kale | 23302000 | 0,2521 | 54,040 | 165,072 | 68,851 | 729,55 |
| 38 | Pasithee | 23090000 | 0,2668 | 243,393 | 165,033 | 338,036 | 719,46 |
| 39 | Hegemone | 23566000 | 0,3439 | 211,543 | 153,977 | 330,405 | 739,85 |
| 40 | Mneme | 21036000 | 0,2271 | 47,381 | 148,630 | 20,386 | 620,06 |
| 41 | Aoede | 23969000 | 0,4324 | 73,579 | 158,253 | 185,230 | 761,41 |

| | | | | | | | |
|----|------------|----------|--------|---------|---------|---------|--------|
| 42 | Thelxinoe | 21165000 | 0,2194 | 319,126 | 151,335 | 176,805 | 628,1 |
| 43 | Arche | 23355000 | 0,2555 | 182,844 | 164,937 | 349,250 | 731,9 |
| 44 | Kallichore | 23273000 | 0,2424 | 19,438 | 165,121 | 39,120 | 728,28 |
| 45 | Helike | 21064000 | 0,1467 | 308,006 | 154,621 | 97,744 | 626,32 |
| 46 | Carpo | 17078000 | 0,4436 | 90,238 | 51,157 | 43,526 | 456,25 |
| 47 | Eukelade | 23322000 | 0,267 | 319,562 | 165,246 | 202,851 | 730,32 |
| 48 | Cyllene | 23787000 | 0,4175 | 203,208 | 150,202 | 265,547 | 752,01 |
| 49 | Kore | 24486000 | 0,3315 | 146,442 | 145,043 | 322,282 | 776,6 |
| 50 | Herse | 23405000 | 0,2493 | 338,480 | 164,815 | 303,508 | 734,55 |
| 51 | S/2003J2 | 28332000 | 0,4114 | 173,340 | 157,106 | 355,955 | 979,33 |
| 52 | S/2003J3 | 20230000 | 0,2027 | 71,743 | 147,772 | 237,744 | 583,87 |
| 53 | S/2003J4 | 23928000 | 0,3558 | 204,631 | 149,316 | 188,149 | 755,22 |
| 54 | S/2003J5 | 23493000 | 0,2459 | 102,993 | 165,278 | 188,371 | 738,75 |
| 55 | S/2003J9 | 23385000 | 0,2641 | 304,838 | 165,155 | 55,092 | 733,31 |
| 56 | S/2003J10 | 23042000 | 0,4284 | 183,464 | 165,224 | 162,640 | 716,28 |
| 57 | S/2003J12 | 17835000 | 0,4884 | 21,770 | 150,827 | 73,120 | 489,66 |
| 58 | S/2003J15 | 22622000 | 0,1868 | 22,241 | 146,405 | 244,678 | 689,77 |
| 59 | S/2003J16 | 20948000 | 0,2309 | 66,633 | 148,631 | 24,081 | 616,33 |
| 60 | S/2003J18 | 20494000 | 0,1016 | 103,272 | 146,007 | 166,444 | 598,11 |
| 61 | S/2003J19 | 23532000 | 0,262 | 186,391 | 165,174 | 36,396 | 740,39 |
| 62 | S/2003J23 | 23549000 | 0,2702 | 261,641 | 146,267 | 51,018 | 732,47 |

abel 6 Daftar Element Orbit Satelit Saturnus

| No | Satelit | a (km) | e | ω (deg) | i (deg) | Ω (deg) | P (days) |
|----|------------|-------------|--------|-------------------|--------------|-------------------|---------------|
| 1 | Mimas | 185539 | 0,0196 | 332,478 | 1,574 | 173,026 | 0,942 |
| 2 | Enceladus | 238037 | 0,0047 | 188,319 | 0,009 | 343,266 | 1,370 |
| 3 | Tethys | 294672 | 0,0001 | 44,843 | 1,091 | 259,845 | 1,888 |
| 4 | Dione | 377415 | 0,0022 | 284,111 | 0,028 | 290,615 | 2,737 |
| 5 | Rhea | 527068 | 0,001 | 213,663 | 0,333 | 351,018 | 4,518 |
| 6 | Titan | 1221865 | 0,0288 | 179,920 | 0,312 | 28,758 | 15,95 |
| 7 | Hyperion | 1500934 | 0,0232 | 303,162 | 0,615 | 263,882 | 21,28 |
| 8 | Iapetus | 3560851 | 0,0293 | 271,599 | 8,313 | 81,189 | 79,33 |
| 9 | Phoebe | 12947913 | 0,1634 | 342,501 | 175,243 | 241,087 | 550,3 |
| 10 | Janus | 151460 | 0,0068 | 241,778 | 0,163 | 46,899 | 0,695 |
| 11 | Epimetheus | 151410 | 0,0098 | 312,630 | 0,351 | 85,244 | 0,694 |

| | | | | | | | |
|----|------------|----------|--------|---------|---------|---------|---------|
| 12 | Helene | 377420 | 0,0071 | 292,056 | 0,213 | 40,039 | 2,737 |
| 13 | Telesto | 294710 | 0,0002 | 341,795 | 1,180 | 300,256 | 1,888 |
| 14 | Calypso | 294710 | 0,0005 | 234,788 | 1,499 | 25,327 | 1,888 |
| 15 | Atlas | 137670 | 0,0012 | 331,521 | 0,003 | 0,5 | 0,602 |
| 16 | Prometheus | 139380 | 0,0022 | 164,389 | 0,008 | 259,504 | 0,613 |
| 17 | Pandora | 141720 | 0,0042 | 83,461 | 0,05 | 327,215 | 0,629 |
| 18 | Pan | 133580 | 0 | 139,318 | 0,001 | 40,557 | 0,575 |
| 19 | Methone | 194440 | 0,0001 | 292,695 | 0,007 | 321,745 | 1,010 |
| 20 | Pallene | 212280 | 0,004 | 216,475 | 0,181 | 114,430 | 1,154 |
| 21 | Polydeuces | 377200 | 0,0192 | 200,028 | 0,177 | 304,799 | 2,737 |
| 22 | Daphnis | 136500 | 0.0000 | 0.000 | 0.004 | 0.000 | 0,594 |
| 23 | Ymir | 23140400 | 0,3337 | 39,505 | 171,661 | 210,828 | 1315,58 |
| 24 | Paaliaq | 15024000 | 0,5402 | 235,510 | 41,770 | 354,940 | 687,54 |
| 25 | Tarvos | 18263200 | 0,5309 | 277,448 | 35,949 | 89,356 | 925,85 |
| 26 | Ijiraq | 11367400 | 0,458 | 67,015 | 47,123 | 153,384 | 451,52 |
| 27 | Suttungr | 19476700 | 0,1139 | 60,106 | 173,888 | 253,045 | 1016,68 |
| 28 | Kiviuq | 11311100 | 0,1642 | 92,805 | 48,525 | 351,991 | 449,13 |
| 29 | Mundilfari | 18667900 | 0,2051 | 301,221 | 169,206 | 78,072 | 952,83 |
| 30 | Albiorix | 16401100 | 0,4838 | 56,759 | 35,511 | 102,042 | 783,52 |
| 31 | Skathi | 15614300 | 0,2939 | 212,980 | 150,798 | 281,731 | 728,1 |
| 32 | Erriapus | 17611400 | 0,4676 | 287,615 | 38,649 | 134,674 | 870,8 |
| 33 | Siarnaq | 18015400 | 0,4052 | 69,203 | 44,507 | 60,917 | 896,44 |
| 34 | Thrymr | 20439600 | 0,4655 | 97,997 | 173,656 | 258,962 | 1094,09 |
| 35 | Narvi | 19417300 | 0,4261 | 180,865 | 143,242 | 175,404 | 1003,74 |
| 36 | Aegir | 20749800 | 0,2524 | 246,803 | 167,106 | 183,380 | 1117,83 |
| 37 | Bebhionn | 17117800 | 0,484 | 0,182 | 34,563 | 197,913 | 834,93 |
| 38 | Bergelmir | 19338300 | 0,1417 | 138,963 | 158,919 | 206,334 | 1005,78 |
| 39 | Bestla | 20278000 | 0,4738 | 80,900 | 141,739 | 288,848 | 1087,43 |
| 40 | Farbauti | 20387000 | 0,2453 | 344,282 | 158,045 | 135,255 | 1087 |
| 41 | Fenrir | 22454800 | 0,1332 | 125,350 | 164,444 | 230,177 | 1260,42 |
| 42 | Fornjot | 25151200 | 0,2102 | 326,612 | 169,697 | 261,584 | 1494,19 |
| 43 | Hati | 19775000 | 0,3728 | 19,658 | 164,955 | 323,348 | 1039,03 |
| 44 | Hyrokkin | 18437300 | 0,3288 | 270,538 | 151,245 | 42,971 | 931,79 |
| 45 | Kari | 22077100 | 0,4842 | 163,182 | 155,902 | 279,822 | 1230,81 |
| 46 | Loge | 23065500 | 0,1881 | 28,991 | 167,162 | 340,213 | 1311,41 |
| 47 | Skoll | 17663300 | 0,4704 | 194,388 | 160,178 | 298,253 | 878,39 |

| | | | | | | | |
|----|------------|----------|--------|---------|---------|---------|---------|
| 48 | Surtur | 22920400 | 0,4466 | 306,948 | 169,141 | 239,715 | 1296,49 |
| 49 | Jarnsaxa | 19356400 | 0,2171 | 232,068 | 163,322 | 18,065 | 1006,98 |
| 50 | Greip | 18442200 | 0,316 | 137,940 | 173,343 | 335,478 | 935,62 |
| 51 | Tarqeq | 17909900 | 0,1186 | 61,169 | 49,572 | 92,748 | 887,3 |
| 52 | S/2004_S7 | 21005800 | 0,5295 | 80,612 | 164,862 | 337,995 | 1140,04 |
| 53 | S/2004_S12 | 19867500 | 0,3228 | 86,627 | 163,309 | 307,487 | 1046,14 |
| 54 | S/2004_S13 | 18408700 | 0,2604 | 355,364 | 169,079 | 214,792 | 933,55 |
| 55 | S/2004_S17 | 19449900 | 0,181 | 172,481 | 167,968 | 18,768 | 1014,59 |
| 56 | S/2006_S1 | 18797400 | 0,1183 | 155,908 | 154,990 | 335,103 | 963,43 |
| 57 | S/2006_S3 | 22100100 | 0,4042 | 187,263 | 158,904 | 211,265 | 1227,11 |
| 58 | S/2007_S2 | 16723300 | 0,1778 | 55,977 | 175,643 | 109,463 | 808,2 |
| 59 | S/2007_S3 | 18981900 | 0,1847 | 289,603 | 175,704 | 94,763 | 977,8 |

Tabel 7 Daftar Element Orbit Satelit Uranus

| No | Uranus | a (km) | e | ω (deg) | i (deg) | Ω (deg) | P (days) |
|----|-----------|-----------|--------|-------------------|------------|-------------------|-------------|
| 1 | Ariel | 190900 | 0,0012 | 115,349 | 0,041 | 22,394 | 2,520 |
| 2 | Umbriel | 266000 | 0,0039 | 84,709 | 0,128 | 33,485 | 4,144 |
| 3 | Titania | 436300 | 0,0011 | 284,400 | 0,079 | 99,771 | 8,706 |
| 4 | Oberon | 583500 | 0,0014 | 104,400 | 0,068 | 279,771 | 13,46 |
| 5 | Miranda | 129900 | 0,0013 | 68,312 | 4,338 | 326,438 | 1,413 |
| 6 | Cordelia | 49800 | 0,0003 | 136,827 | 0,085 | 38,374 | 0,335 |
| 7 | Ophelia | 53800 | 0,0099 | 17,761 | 0,104 | 164,048 | 0,376 |
| 8 | Bianca | 59200 | 0,0009 | 8,293 | 0,193 | 93,220 | 0,435 |
| 9 | Cressida | 61800 | 0,0004 | 44,236 | 0,006 | 99,403 | 0,464 |
| 10 | Desdemona | 62700 | 0,0001 | 183,285 | 0,113 | 306,089 | 0,474 |
| 11 | Juliet | 64400 | 0,0007 | 223,819 | 0,065 | 200,155 | 0,493 |
| 12 | Portia | 66100 | 0,0001 | 222,433 | 0,059 | 260,067 | 0,513 |
| 13 | Rosalind | 69900 | 0,0001 | 140,477 | 0,279 | 12,847 | 0,558 |
| 14 | Belinda | 75300 | 0,0001 | 42,406 | 0,031 | 279,337 | 0,624 |
| 15 | Puck | 86000 | 0,0001 | 177,094 | 0,319 | 268,734 | 0,762 |
| 16 | Perdita | 76417 | 0,0116 | 253,925 | 0,47 | 309,376 | 0,638 |
| 17 | Mab | 97736 | 0,0025 | 249,565 | 0,134 | 350,737 | 0,923 |
| 18 | Cupid | 74392 | 0,0013 | 247,608 | 0,099 | 182,793 | 0,613 |
| 19 | Caliban | 7231100 | 0,1812 | 354,339 | 141,529 | 171,189 | 579,73 |

| | | | | | | | |
|----|-----------|----------|--------|---------|---------|---------|---------|
| 20 | Sycorax | 12179400 | 0,5219 | 20,103 | 159,420 | 263,034 | 1288,38 |
| 21 | Prospero | 16276800 | 0,4445 | 174,152 | 151,830 | 319,003 | 1978,37 |
| 22 | Setebos | 17420400 | 0,5908 | 359,953 | 158,235 | 250,235 | 2225,08 |
| 23 | Stephano | 8007400 | 0,2248 | 14,956 | 143,819 | 191,411 | 677,47 |
| 24 | Trinculo | 8505200 | 0,2194 | 158,688 | 166,971 | 193,755 | 749,4 |
| 25 | Francisco | 4282900 | 0,1324 | 140,644 | 147,250 | 100,738 | 267,09 |
| 26 | Margaret | 14146700 | 0,6772 | 90,017 | 57,367 | 7,067 | 1661 |
| 27 | Ferdinand | 20430000 | 0,3993 | 156,298 | 169,793 | 217,350 | 2790,03 |

Tabel 8 Daftar Element Orbit Satelit Neptunus

| No | Satelit | a (km) | e | ω (deg) | i (deg) | Ω (deg) | P (days) |
|----|-----------|-----------|--------|-------------------|------------|-------------------|-------------|
| 1 | Triton | 354759 | 0 | 66,142 | 156,865 | 177,608 | 5,877 |
| 2 | Nereid | 5513818 | 0,7507 | 281,117 | 7,090 | 335,570 | 360,13 |
| 3 | Naiad | 48227 | 0,0003 | 2,045 | 4,691 | 42,279 | 0,294 |
| 4 | Thalassa | 50074 | 0,0002 | 237,065 | 0,135 | 145,980 | 0,311 |
| 5 | Despina | 52526 | 0,0002 | 176,857 | 0,068 | 77,060 | 0,335 |
| 6 | Galatea | 61953 | 0,0001 | 343,011 | 0,034 | 37,247 | 0,429 |
| 7 | Larissa | 73548 | 0,0014 | 249,891 | 0,205 | 308,127 | 0,555 |
| 8 | Proteus | 117646 | 0,0005 | 67,968 | 0,075 | 315,131 | 1,122 |
| 9 | Halimede | 16611000 | 0,2646 | 157,509 | 112,712 | 217,477 | 1879,08 |
| 10 | Psamathe | 48096000 | 0,3809 | 149,685 | 126,312 | 317,172 | 9074,3 |
| 11 | Sao | 22228000 | 0,1365 | 62,621 | 53,483 | 61,428 | 2912,72 |
| 12 | Laomedeia | 23567000 | 0,3969 | 137,898 | 37,874 | 53,235 | 3171,33 |
| 13 | Neso | 49285000 | 0,5714 | 87,229 | 136,439 | 51,325 | 9740,73 |
| 14 | Halimede | 16611000 | 0,2646 | 157,509 | 112,712 | 217,477 | 1879,08 |

Tabel 9 Daftar Element Orbit Satelit Pluto

| No | Satelit | a (km) | e | ω (deg) | i (deg) | Ω (deg) | P (days) |
|----|---------|-----------|--------|-------------------|------------|-------------------|-------------|
| 1 | Charon | 17536 | 0,0022 | 71,255 | 0,001 | 85,187 | 6,387 |
| 2 | Nix | 48708 | 0,003 | 270,877 | 0,195 | 273,440 | 24,86 |
| 3 | Hydra | 64749 | 0,0051 | 149,649 | 0,212 | 102,469 | 38,2 |