



Sumber: www.shoppingemporiumuk.com

2

B a b 2

Gravitasi

Pada bab ini, Anda akan diajak untuk dapat menganalisis gejala alam dan keteraturannya dalam cakupan mekanika benda titik dengan cara menganalisis keteraturan gerak planet dalam tata surya berdasarkan Hukum-Hukum Newton.

Gambar tersebut merupakan gambar *orrery*, yaitu suatu model mekanik tata surya yang tertata teratur. Semua benda yang berada di alam semesta telah diatur oleh Tuhan Yang Maha Kuasa agar selalu beredar teratur menurut orbitnya masing-masing.

Dalam Fisika, gaya yang berperan penting menjaga keteraturan gerak planet-planet dan interaksi antarbenda ini disebut gaya gravitasi. Gaya gravitasi ini sangat sulit diamati, jika massa objek pengamatannya jauh lebih kecil daripada massa planet-planet. Akibatnya, Anda akan sangat sulit mengetahui berapa besar gaya gravitasi yang terjadi antara Anda dan benda-benda di sekitar Anda. Namun, Anda akan dapat dengan mudah menentukan besar gaya gravitasi yang tercipta antara Bumi dan Bulan. Dalam pembahasan materi Bab 2 ini, Anda akan mempelajari tentang gaya gravitasi dengan lebih rinci, melalui hukum-hukum yang dinyatakan oleh Johannes Kepler dan Isaac Newton.

- A. Hukum-Hukum Kepler**
- B. Gaya Gravitasi**

Soal Pramateri

1. Jelaskanlah tentang Hukum Ketiga Newton
2. Massa seorang astronot di Bumi adalah 80 kg. Berapakah berat astronot tersebut di Bulan yang percepatan gravitasinya satu per enam percepatan gravitasi Bumi? (g Bumi = 10 m/s^2)
3. Berdasarkan pemahaman Anda, bagaimanakah bentuk orbit planet tata surya saat mengelilingi Matahari?

A Hukum-Hukum Kepler

Ilmu perbintangan atau astronomi telah dikenal oleh manusia sejak beribu-ribu tahun yang lalu. Sejak dahulu, gerakan bintang-bintang dan planet yang terlihat bergerak relatif terhadap Bumi telah menarik perhatian para ahli astronomi sehingga planet-planet dan bintang-bintang tersebut dijadikan sebagai objek penyelidikan. Hasil penyelidikan mereka mengenai pergerakan planet-planet dan bintang tersebut, kemudian dipetakan ke dalam suatu bentuk model alam semesta. Dalam perkembangannya, beberapa model alam semesta telah dikenalkan oleh para ahli astronomi.

Sebuah model alam semesta yang dikenalkan oleh **Ptolomeus** sekitar 140 Masehi, menyatakan bahwa Bumi berada di pusat alam semesta. Matahari dan bintang-bintang bergerak mengelilingi Bumi dalam lintasan lingkaran besar yang terdiri atas lingkaran-lingkaran kecil (*epicycle*). Model alam semesta Ptolomeus ini berdasarkan pada pengamatan langsung gerakan relatif bintang dan planet-planet yang teramati dari Bumi. Model alam semesta Ptolomeus ini disebut juga model geosentris.

Pada 1543 Masehi, **Copernicus** mengenalkan model alam semesta yang disebut model Copernicus. Pada model ini, Matahari dan bintang-bintang lainnya diam, sedangkan planet-planet (termasuk Bumi) bergerak mengelilingi Matahari. Hal ini dituliskannya melalui buku yang berjudul *De revolutionibus orbium coelestium* (Mengenal revolusi orbit langit). Model Copernicus ini disebut juga model heliosentris.

Model alam semesta selanjutnya berkembang dari model heliosentris. **Tycho Brahe**, seorang astronom Denmark, berhasil membuat atlas bintang modern pertama yang lengkap pada akhir abad ke-16. Model alam semesta yang dibuat oleh Tycho Brahe ini dianggap lebih tepat dibandingkan dengan model-model yang terdahulu karena model ini berdasarkan pada hasil pengamatan dan pengukuran posisi bintang-bintang yang dilakukannya di observatorium. Observatorium yang dibangun oleh Tycho Brahe ini merupakan observatorium pertama di dunia.

Penelitian Tycho Brahe ini, kemudian dilanjutkan oleh **Johannes Kepler**. Melalui data dan catatan astronomi yang ditinggalkan oleh Tycho Brahe, Kepler berhasil menemukan tiga hukum empiris tentang gerakan planet. Hukum Kepler tersebut dinyatakan sebagai berikut.

1. Hukum Pertama Kepler

Setiap planet bergerak pada lintasan elips dengan Matahari berada pada salah satu titik fokusnya.

2. Hukum Kedua Kepler

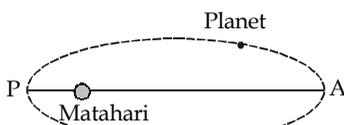
Garis yang menghubungkan Matahari dengan planet dalam selang waktu yang sama menghasilkan luas juring yang sama.

3. Hukum Ketiga Kepler

Kuadrat waktu edar planet (*periode*) berbanding lurus dengan pangkat tiga jarak planet itu dari Matahari.

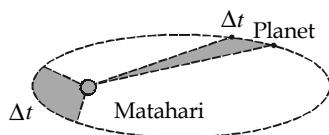
$$T^2 \approx r^3 \rightarrow \frac{T_2^2}{T_1^2} = \frac{r_2^3}{r_1^3} \quad (2-1)$$

dengan: T = periode planet mengelilingi Matahari, dan
 r = jarak rata-rata planet terhadap Matahari.



Gambar 2.1

Lintasan planet mengitari Matahari berbentuk elips.



Gambar 2.2

Luas juring yang dihasilkan planet dalam mengelilingi Matahari adalah sama untuk selang waktu yang sama.

Johannes Kepler
(1571-1630)

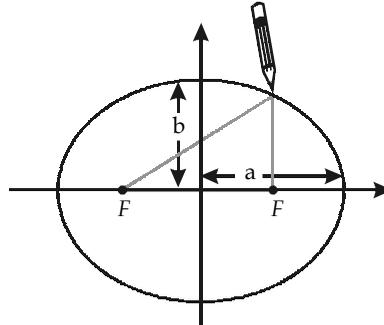
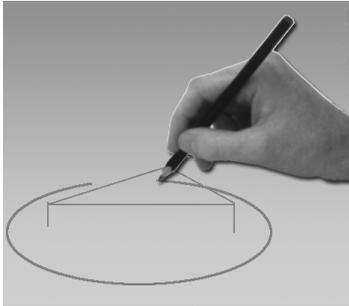


Johannes Kepler adalah seorang pakar matematika dan astronomi yang berasal dari Jerman. Berkat kesungguhannya dalam melakukan penelitian, ia berhasil menemukan Hukum Kepler mengenai bentuk lintasan atau orbit planet-planet.

Sumber: Jendela Iptek, 1997

Kerjakanlah 2.1

Anda dapat membuat gambar sebuah elips dengan cara menancapkan dua jarum atau dua paku payung pada kertas atau papan, kemudian menghubungkannya dengan ikatan benang. Ikatan benang ini digunakan untuk mengatur pensil Anda, seperti yang ditunjukkan pada gambar. Kedua jarum merupakan titik fokus elips, jarak a dinamakan sumbu semimayor, dan jarak b dinamakan sumbu semiminor.



Contoh 2.1

Jika perbandingan jarak planet X ke Matahari dengan jarak Bumi ke Matahari 9 : 1, hitunglah waktu yang dibutuhkan oleh planet X untuk satu kali mengelilingi Matahari.

Jawab

Diketahui $r_x : r_b = 9 : 1$

$$\left(\frac{T_x}{T_b}\right)^2 = \left(\frac{r_x}{r_b}\right)^3 \rightarrow T_x = T_b \left(\frac{r_x}{r_b}\right) \sqrt{\frac{r_x}{r_b}} = 1 \times \left(\frac{9}{1}\right) \sqrt{\frac{9}{1}} = 27 \text{ tahun}$$

Soal Penguasaan Materi 2.1

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

- Jarak rata-rata Jupiter dari Matahari adalah 5,20 satuan astronomi (AU). 1 AU = $1,50 \times 10^{11}$ m adalah jarak rata-rata antara Bumi dan Matahari. Berapakah periode Jupiter?
- Periode Neptunus adalah 164,8 tahun. Berapakah jarak rata-ratanya dari Matahari?

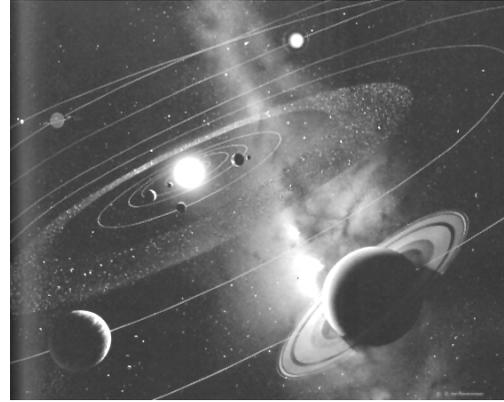
B Gaya Gravitasi

1. Hukum Gravitasi Newton

Gejala munculnya interaksi yang berupa gaya tarik-menarik antarbenda yang ada di alam ini disebut gaya gravitasi. Setiap benda di alam ini mengalami gaya gravitasi. Jika Anda sedang duduk di kursi, sedang berjalan, atau sedang melakukan kegiatan apapun, terdapat gaya gravitasi yang bekerja pada Anda. Gaya gravitasi merupakan gaya interaksi antarbenda. Pernahkah Anda bertanya kenapa gaya gravitasi yang Anda alami tidak menyebabkan benda-benda yang terdapat di sekitar Anda tertarik ke arah Anda, atau sebaliknya? Di alam semesta, gaya gravitasi menyebabkan planet-planet, satelit-satelit, dan benda-benda langit lainnya bergerak mengelilingi Matahari dalam sistem tata surya dalam lintasan yang tetap.

Kata Kunci

- Hukum Pertama Kepler
- Hukum Kedua Kepler
- Hukum Ketiga Kepler



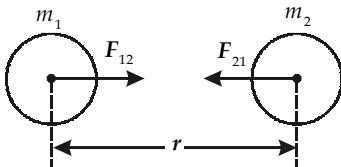
Sumber: universe review.ca

Gambar 2.3

Gaya gravitasi mengikat planet-planet dan benda langit lainnya untuk tetap beredar menurut orbitnya.

Isaac Newton adalah orang pertama yang mengemukakan gagasan tentang adanya gaya gravitasi. Menurut cerita, gagasan tentang gaya gravitasi ini diawali dari pengamatan Newton pada peristiwa jatuhnya buah apel dari pohonnya. Kemudian, melalui penelitian lebih lanjut mengenai gerak jatuhnya benda-benda, ia menyimpulkan bahwa apel dan setiap benda jatuh karena tarikan Bumi.

Menurut Newton, gaya gravitasi antara dua benda merupakan gaya tarik-menarik yang berbanding lurus dengan massa setiap benda dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara benda tersebut. Secara matematis, pernyataan mengenai gaya gravitasi tersebut dituliskan sebagai berikut.



Gambar 2.4

Gaya gravitasi adalah gaya yang ditimbulkan karena adanya dua benda bermassa m yang terpisah sejauh r .

$$F_{12} = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \mathbf{r}$$

$$F_{12} = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \mathbf{r}$$

$$F_{21} = F_{12} = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \mathbf{r} \quad (2-2)$$

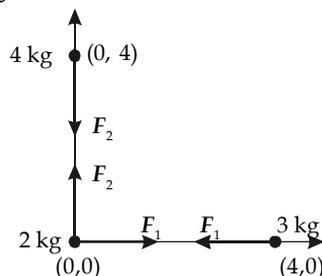
dengan: F = gaya gravitasi (N),
 G = konstanta gravitasi = $6,672 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kgs}^2$, dan
 r = jarak antara pusat massa m_1 dan m_2 (m).

Contoh 2.2

Tiga benda homogen masing-masing bermassa 2 kg, 3 kg, dan 4 kg, berturut-turut terletak pada koordinat (0, 0), (4, 0), dan (0, 4) dalam sistem koordinat Cartesius dengan satuan meter. Tentukanlah:

- gaya gravitasi antara benda 2 kg dan 3 kg,
- gaya gravitasi antara benda 2 kg dan 4 kg, dan
- gaya gravitasi total pada benda 2 kg.

Jawab



Diketahui: $m_1 = 2 \text{ kg}$ di (0, 0), $m_2 = 3 \text{ kg}$ di (4, 0), dan $m_3 = 4 \text{ kg}$ di (0, 4).

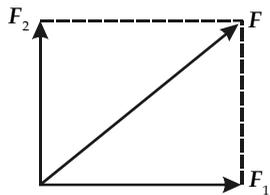
a. Gaya gravitasi antara benda 2 kg dan 3 kg.

$$\begin{aligned} F_1 &= G \frac{m_1 m_2}{r^2} \\ &= (6,672 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kgs}^2) \frac{(2\text{kg})(3\text{kg})}{(4\text{m})^2} \\ &= 2,502 \times 10^{-11} \text{ N} \end{aligned}$$

Perlu Anda

Ketahui

Ketika besaran vektor hanya menyatakan nilainya saja, besaran vektor tersebut harus dituliskan secara skalar, seperti terlihat pada contoh soal.



b. Gaya gravitasi antara benda 2 kg dan 4 kg.

$$F_2 = G \frac{m_1 m_2}{r^2} = (6,672 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg s}^2) \frac{(2 \text{ kg})(4 \text{ kg})}{(4 \text{ m})^2}$$

$$= 3,336 \times 10^{-11} \text{ N}$$

c. Gaya gravitasi total pada benda 2 kg. Benda bermassa 2 kg mengalami dua gaya sekaligus, yaitu F_1 dan F_2 , seperti terlihat pada gambar. Gaya gravitasi total pada benda 2 kg adalah resultan gaya F_1 dan F_2 , yaitu

$$F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2}$$

$$= \sqrt{(2,502 \times 10^{-11} \text{ N})^2 + (3,336 \times 10^{-11} \text{ N})^2}$$

$$= 4,170 \times 10^{-11} \text{ N}$$

Contoh 2.3

Dua benda masing-masing bermassa 6 kg dan 3 kg berjarak 30 cm. Berapakah besar gaya tarik-menarik antara kedua benda tersebut?

Jawab

Diketahui: $m_1 = 6 \text{ kg}$, $m_2 = 3 \text{ kg}$, dan $r = 30 \text{ cm}$.

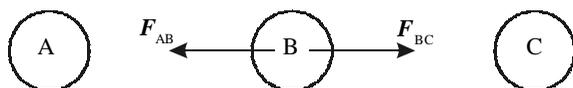
$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} = 6,672 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg s}^2 \frac{(6 \text{ kg})(3 \text{ kg})}{(0,3 \text{ m})^2} = 1,334 \times 10^{-9} \text{ N}$$

Contoh 2.4

Tiga benda masing-masing bermassa $m_A = 4,5 \text{ kg}$, $m_B = 2 \text{ kg}$, dan $m_C = 8 \text{ kg}$ terletak pada satu garis lurus. Berapakah besar gaya gravitasi yang dialami benda B yang terletak di antara benda A dan benda C, jika jarak $AB = 30 \text{ cm}$ dan jarak $BC = 40 \text{ cm}$?

Jawab

Diketahui: $m_A = 4,5 \text{ kg}$, $m_B = 2 \text{ kg}$, $m_C = 8 \text{ kg}$, $r_{AB} = 30 \text{ cm}$, dan $r_{BC} = 40 \text{ cm}$.



$$F_B = F_{BC} - F_{AB} = G \frac{m_B m_C}{r_{BC}^2} - G \frac{m_A m_B}{r_{AB}^2} = 0$$

Sekarang akan ditunjukkan bahwa Hukum Gravitasi Newton menunjuk pada Hukum Ketiga Kepler untuk kasus khusus orbit lingkaran. Sebuah planet yang bergerak mengelilingi Matahari dengan kelajuan dalam orbit berjari-jari lingkaran mendapat gaya tarik dari Matahari yang arahnya ke pusat lingkaran sehingga planet tersebut memiliki percepatan sentripetal.

Sesuai dengan Hukum Kedua Newton tentang gerak, didapatkan persamaan berikut.

$$F = ma$$

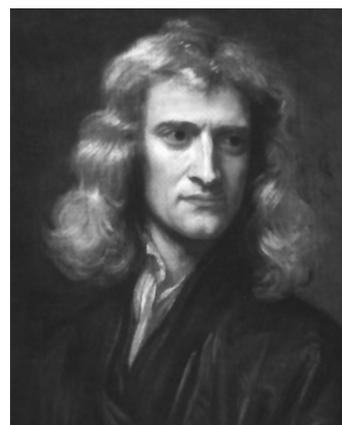
$$G \frac{Mm}{r^2} = m \frac{v^2}{r}$$

$$G \frac{M}{r} = v^2$$

$$G \frac{M}{r} = \left(\frac{2\pi r}{T} \right)^2$$

Jelajah Fisika

Sir Isaac Newton (1642–1727)



Newton lahir di Woolsthorpe, Lincolnshire pada 25 Desember 1642. Banyak teori yang telah dihasilkannya melalui kerja keras, ketekunan, dan ketelitiannya dalam menyelidiki fenomena yang terjadi di lingkungan sekitarnya. Salah satu teorinya yang paling terkenal adalah teori tentang gerak, yaitu Hukum Newton dan teori tentang gaya gravitasi universal. Bukunya yang sangat terkenal adalah Principia. Ia meninggal di Kensington pada 20 Maret 1727 dan dimakamkan secara kenegaraan di Westminster Abbey.

Sumber: we.hao.ucar.edu



Sumber: conceptual physics, 1998

Gambar 2.5

Di luar medan gravitasi Bumi, astronot dapat melayang di angkasa.

$$T^2 = \left(\frac{4\pi^2}{GM}\right)r^3 \rightarrow T^2 \sim r^3 \quad \text{atau} \quad \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^2 = \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2 \quad (2-3)$$

Untuk orbit berbentuk elips, variabel jari-jari diganti dengan jarak rata-rata antara planet dan Matahari.

2. Medan Gravitasi

Medan gravitasi adalah ruang yang masih dipengaruhi oleh gaya gravitasi. Besar medan gravitasi sama dengan gaya gravitasi setiap satuan massa. Secara matematis dituliskan sebagai berikut.

$$g = \frac{F}{m} \quad (2-4)$$

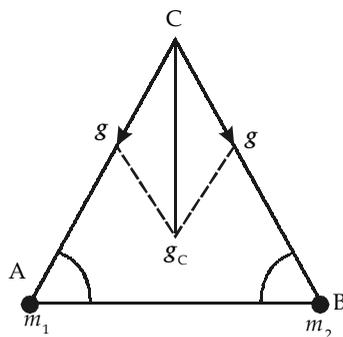
Dengan mengganti nilai F pada **Persamaan (2-4)** dengan persamaan gaya tarik gravitasi **Persamaan (2-2)**, akan diperoleh

$$g = G \frac{m}{r^2} \mathbf{r} \quad (2-5)$$

Kuat medan gravitasi g sering disebut percepatan gravitasi dan merupakan besaran vektor. Apabila medan gravitasi tersebut ditimbulkan oleh lebih dari satu benda, kuat medan yang ditimbulkan oleh gaya-gaya tersebut pada suatu titik harus ditentukan dengan cara menjumlahkan vektor-vektor kuat medannya.

Contoh 2.5

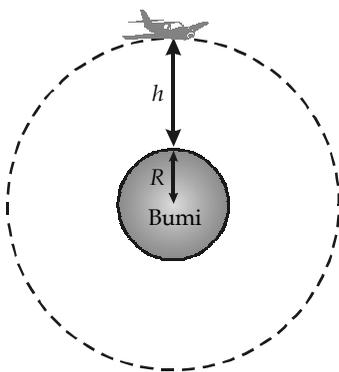
Pada titik sudut A dan titik sudut B dari sebuah segitiga sama sisi ABC disimpan benda bermassa m_1 dan m_2 . Jika $m_1 = m_2$ dan kuat medan gravitasi di titik C oleh salah satu benda adalah g , tentukanlah kuat medan gravitasi di titik C yang disebabkan kedua benda tersebut.



Jawab

Diketahui $m_1 = m_2$ dan ABC = segitiga sama sisi. Medan gravitasi di titik C merupakan resultan dari medan gravitasi yang diakibatkan oleh m_1 dan m_2 , masing-masing sebesar g .

$$\begin{aligned} g_c &= \sqrt{g_1^2 + g_2^2 + 2g_1g_2 \cos 60^\circ} \\ &= \sqrt{g^2 + g^2 + 2g^2 \left(\frac{1}{2}\right)} \\ &= \sqrt{g^2 + g^2 + g^2} = \sqrt{3g^2} = g\sqrt{3} \end{aligned}$$



Gambar 2.6

Percepatan gravitasi pada ketinggian h di atas permukaan Bumi.

Percepatan gravitasi di permukaan Bumi (jari-jari bumi = R) berbeda dengan percepatan gravitasi pada ketinggian tertentu (h) di atas permukaan Bumi. Jika percepatan gravitasi di permukaan Bumi g dan percepatan gravitasi pada ketinggian h di atas permukaan bumi g_a , maka hubungannya dapat ditentukan dari persamaan :

$$g = G \frac{M}{R^2} \quad \text{dan} \quad g_a = G \frac{M}{(R+h)^2} \quad (2-6)$$

sehingga menghasilkan persamaan :

$$\frac{g_a}{g} = \left(\frac{R}{R+h}\right)^2 \quad \text{atau} \quad g_a = g \left(\frac{R}{R+h}\right)^2 \quad (2-7)$$

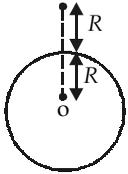
Contoh 2.6

Percepatan gravitasi pada suatu tempat di permukaan Bumi adalah 10 m/s^2 . Tentukanlah percepatan gravitasi di tempat yang memiliki ketinggian R dari permukaan Bumi (R adalah jari-jari bumi).

Jawab

Diketahui: $g_A = 10 \text{ m/s}^2$, dan $h = R$.

Percepatan gravitasi pada ketinggian R di atas permukaan Bumi adalah



$$g_a = g \left(\frac{R}{R+h} \right)^2 = g \left(\frac{R}{R+R} \right)^2 = g \left(\frac{R}{2R} \right)^2 = \frac{1}{4} g = 2,5 \text{ m/s}^2.$$

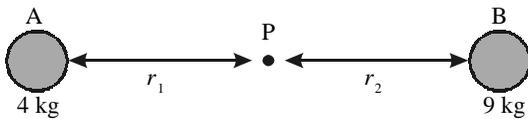
Contoh 2.7

Dua benda bermassa masing-masing 4 kg dan 9 kg terpisah dengan jarak 10 m . Titik P berada pada garis hubung kedua benda. Jika medan gravitasi di titik P adalah nol, tentukanlah jarak titik P dari benda bermassa 4 kg .

Jawab

Diketahui: $m_1 = 4 \text{ kg}$, $m_2 = 9 \text{ kg}$, dan $r = 10 \text{ m}$.

Dari soal dapat digambarkan kedudukan titik P terhadap kedua benda.



Agar medan gravitasi di titik P bernilai nol maka:

$$g_1 = g_2$$

$$G \frac{m_A}{r_1^2} = G \frac{m_B}{r_2^2} \rightarrow G \frac{4 \text{ kg}}{r_1^2} = G \frac{9 \text{ kg}}{(10-r_1)^2}, \text{ G dicoret dan hasilnya diakarkan sehingga}$$

$$\begin{aligned} \text{diperoleh: } \quad \frac{2}{r_1} &= \frac{3}{10-r_1} \\ 20-r_1 &= 3r_1 \\ r_1 &= 5 \text{ m} \end{aligned}$$

3. Kecepatan Satelit Mengelilingi Bumi

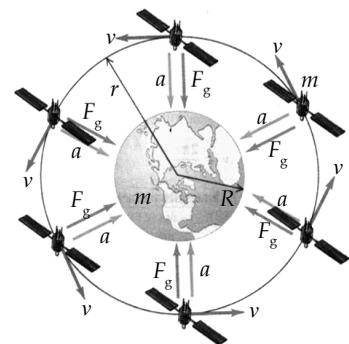
Sebuah satelit berada pada ketinggian h di atas permukaan Bumi yang memiliki jari-jari R . Satelit tersebut bergerak mengelilingi Bumi dengan kecepatan v . Satelit mendapatkan gaya gravitasi sebesar mg_a yang arahnya menuju pusat Bumi, ketika satelit bergerak melingkar mengitari Bumi. Gaya yang bekerja pada sebuah benda yang sedang bergerak melingkar dan arahnya menuju pusat lingkaran disebut gaya sentripetal. Melalui penurunan persamaan gerak melingkar, diperoleh persamaan berikut.

$$m \frac{v^2}{(R+h)} = mg_a$$

$$\frac{v^2}{(R+h)} = g \frac{R^2}{(R+h)^2}$$

Kecepatan satelit mengelilingi Bumi dapat dituliskan dengan persamaan:

$$v = \frac{R}{(R+h)} \sqrt{g(R+h)} \quad (2-8)$$



Gambar 2.7

Gaya gravitasi Bumi menghasilkan percepatan sentripetal yang menahan satelit pada orbitnya.



Substitusikan besar g dari **Persamaan (2-5)** sehingga dihasilkan

$$v = \frac{R}{(R+h)} \sqrt{G \frac{M}{R^2} (R+h)} \quad (2-9)$$

Dengan demikian, kecepatan satelit saat mengelilingi Bumi dapat dituliskan dalam bentuk persamaan:

$$v = \frac{1}{(R+h)R} \sqrt{GM(R+h)} \quad (2-10)$$

Contoh 2.8

Sebuah satelit mengorbit Bumi pada jarak 3.600 km di atas permukaan Bumi. Jika jari-jari Bumi = 6.400 km, percepatan gravitasi dipermukaan Bumi $g = 10 \text{ m/s}^2$, dan gerak satelit dianggap melingkar beraturan, hitung kelajuan satelit dalam km/s.

Jawab

Satuan kelajuan yang diharapkan adalah km/s maka percepatan gravitasi di permukaan Bumi g harus diubah dulu dari m/s^2 menjadi km/s^2 dan diperoleh $g = 0,01 \text{ km/s}^2$. Kelajuan satelit mengorbit Bumi dapat dihitung dengan persamaan:

$$v = \frac{R}{(R+h)} \sqrt{g(R+h)}$$

$$v = \frac{6.400 \text{ km}}{(6.400 + 3.600) \text{ s}} \sqrt{(0,01 \text{ km/s}^2)(6.400 + 3.600) \text{ km}}$$

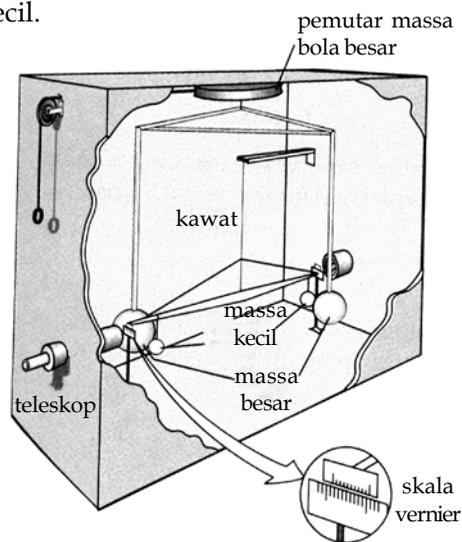
$$v = 6,4 \text{ km/s}$$

Kata Kunci

- Gaya Gravitasi
- Hukum Gravitasi Newton
- Medan Gravitasi
- Percepatan Gravitasi

4. Pengukuran Konstanta Gravitasi Universal

Nilai tetapan semesta G yang sebelumnya tidak dapat ditentukan oleh Newton, ditentukan melalui percobaan yang dilakukan oleh seorang ilmuwan Inggris bernama **Henry Cavendish** pada 1798 dengan ketelitian sebesar 99%. Percobaan yang dilakukan Cavendish menggunakan sebuah neraca yang disebut Neraca Cavendish. Neraca tersebut dapat mengukur besar gaya putar yang diadakan pada lengan gayanya. Gambar berikut adalah sketsa dari peralatan Cavendish yang digunakan untuk mengukur gaya gravitasi antara dua benda kecil.

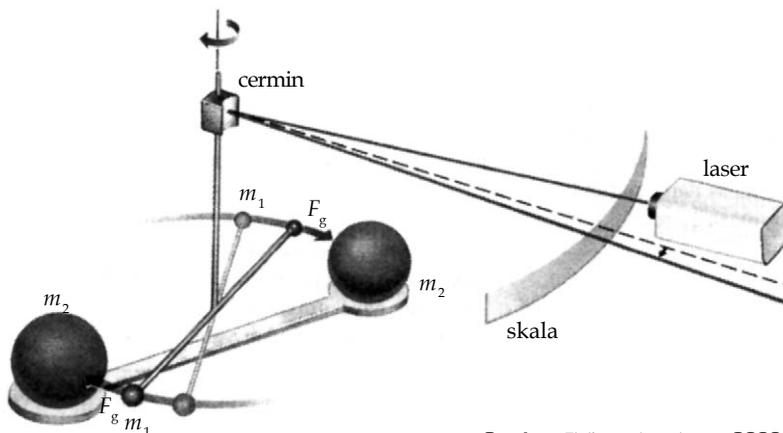


Gambar 2.8

Skema Neraca Cavendish

Sumber: contemporary college physics, 1998

Untuk memahami prinsip kerja lengan gaya yang terdapat pada Neraca Cavendish, perhatikanlah **Gambar 2.9** berikut .



Sumber: Fisika niversitas ,2000

Gambar 2.9

Skema lengan gaya pada neraca Cavendish dan uraian gaya gravitasi yang bekerja pada kedua jenis bola.

Dua bola kecil, masing-masing dengan massa m_1 , diletakkan di ujung batang ringan yang digantungkan pada seutas tali halus. Di samping bola-bola kecil tersebut, digantungkan bola-bola besar dengan massa m_2 . Apabila tali penggantung massa m_1 dipuntir dengan sudut sebesar θ dan besar m_2 , m_1 , serta jarak antara kedua massa itu (d) diketahui, besarnya G dapat dihitung.

Beberapa metode dan alat ukur telah dikembangkan oleh para ilmuwan untuk mendapatkan nilai konstanta gravitasi yang lebih akurat. Walaupun G adalah suatu konstanta Fisika pertama yang pernah diukur, konstanta G tetap merupakan konstanta yang dikenal paling rendah tingkat ketelitiannya. Hal ini disebabkan tarikan gravitasi yang sangat lemah sehingga dibutuhkan alat ukur yang sangat peka agar dapat mengukur nilai G dengan teliti. Hingga saat ini , nilai konstanta gravitasi universal G yang didapatkan oleh Cavendish, yaitu $(6,70 \pm 0,48) \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$ tidak jauh berbeda dengan nilai G yang didapat oleh para ilmuwan modern, yaitu $6,673 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$.

Tabel 2.1 berikut memperlihatkan nilai konstanta gravitasi universal G yang dihasilkan oleh beberapa ilmuwan serta metode yang digunakannya.

Tabel 2.1 Pengukuran G

Pengamat	Tahun	Metode	G ($10^{-11} \text{ Nm}^2 / \text{kg}^2$)
Cavendish	1798	Timbangan torsi, penyimpangan	6,754
Poynting	1891	Timbangan biasa	6,698
Boys	1895	Timbangan torsi, penyimpangan	6,658
Von Eotos	1896	Timbangan torsi, penyimpangan	6,65
Heyl	1930	Timbangan torsi, periode	
		Emas	6,678
		Platinum	6,664
		Kaca	6,674
Zahrandicek	1933	Timbangan torsi, resonansi	6,659
Heyl dan Chrzanowski	1942	Timbangan torsi, periode	6,673
Luter dan Towler	1982	Timbangan torsi, periode	6,6726

Sumber: Fisika niversitas ,2000

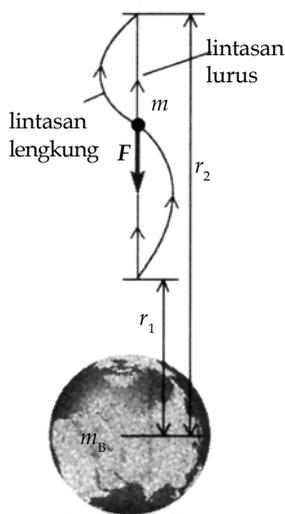
Perlu Anda

Ketahui

$$\int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{r^2} dr = \int_{r_1}^{r_2} r^{-2} dr$$

$$= -r^{-1} \Big|_{r_1}^{r_2}$$

$$= \left(-\frac{1}{r_2}\right) - \left(-\frac{1}{r_1}\right)$$

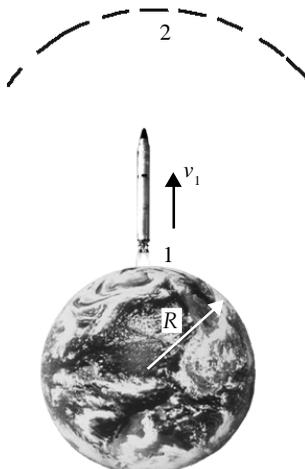


Gambar 2.10

Usaha yang dilakukan oleh gaya gravitasi ketika sebuah benda bergerak dari r_1 ke r_2 . Usaha yang dilakukan oleh gaya gravitasi tersebut adalah sama, tidak bergantung pada bentuk lintasannya (lurus atau lengkung).

Gambar 2.11

Sebuah roket lepas landas dari permukaan Bumi (posisi 1) dengan kecepatan v_1 menuju orbit (posisi 2).



5. Energi Potensial Gravitasi

Gaya gravitasi Bumi yang bekerja pada benda bermassa m yang terletak pada suatu titik di luar Bumi diberikan oleh persamaan $F = -G \frac{Mm}{r^2}$. Tanda negatif menunjukkan bahwa gaya F mengarah ke pusat Bumi. Usaha yang dihasilkan oleh gaya gravitasi jika benda bergerak langsung dari atau menuju pusat Bumi dari $r = r_1$ ke $r = r_2$ diberikan oleh

$$W_{\text{grav}} = \int_{r_1}^{r_2} F_r dr = \int_{r_1}^{r_2} \left(-G \frac{Mm}{r^2}\right) dr = G \frac{Mm}{r_2} - G \frac{Mm}{r_1}$$

Dengan membandingkan persamaan $W_{\text{grav}} = G \frac{Mm}{r_2} - G \frac{Mm}{r_1} = EP_1 - EP_2$ maka definisi yang tepat untuk energi potensial gravitasi adalah

$$EP = -G \frac{Mm}{r} \quad (2-11)$$

Tanda negatif menyatakan bahwa untuk membawa benda bermassa m ke tempat jauh tak terhingga dibutuhkan usaha atau energi sebesar $G \frac{Mm}{r}$.

Contoh 2.9

Dua benda bermassa m dan $3m$ dipisahkan oleh suatu jarak a . Tentukan Energi potensial gravitasi sistem.

Jawab

Diketahui: $m = m$, $M = 3m$, $r = a$

Energi potensial gravitasi

$$EP = -G \frac{Mm}{r} = -G \frac{(3m)(m)}{a} = -3G \frac{m^2}{a}$$

6. Kecepatan Lepas dari Bumi

Apakah mungkin sebuah benda yang digerakkan atau ditembakkan vertikal ke atas tidak kembali ke Bumi? Jika mungkin terjadi, berapa kecepatan minimum benda tersebut saat di tembakkan agar terlepas dari pengaruh gravitasi Bumi? Untuk menjawab pertanyaan tersebut, perhatikanlah gambar sebuah roket yang sedang lepas landas pada **Gambar 2.11** berikut.

Jika resultan gaya luar yang bekerja pada benda sama dengan nol, energi mekanik benda kekal. Secara matematis, Hukum Kekekalan Energi Mekanik dirumuskan

$$EP_1 + EK_1 = EP_2 + EK_2$$

$$-G \frac{Mm}{r_1} + \frac{1}{2}mv_1^2 = -G \frac{Mm}{r_2} + \frac{1}{2}mv_2^2 \quad (2-12)$$

Agar roket lepas dari pengaruh gravitasi Bumi maka $EP_2 = 0$, sedangkan kecepatan minimum roket diperoleh jika $EK_2 = 0$. Dengan demikian, akan dihasilkan persamaan:

$$-G \frac{Mm}{r_1} + \frac{1}{2}mv_1^2 = 0$$

$$-G \frac{Mm}{R} + \frac{1}{2}mv^2 = 0$$

$$\frac{1}{2}mv^2 = G \frac{Mm}{R}$$

$$v_{\min} = \sqrt{2G \frac{M}{R}}$$

Oleh karena $g = 2 \frac{M}{R^2}$ maka diperoleh persamaan kecepatan minimum roket agar dapat lepas dari gravitasi Bumi sebagai berikut

$$v_{\min} = \sqrt{2gR} \quad (2-13)$$

dengan r_1 = jarak titik 1 ke pusat massa M , r_2 = jarak titik 2 ke pusat massa M , v_1 = kecepatan benda di titik 1, dan v_2 = kecepatan benda di titik (2). Diasumsikan jarak titik 1 ke pusat massa sama dengan jari-jari Bumi ($r_1 = R$).

Contoh 2.10

Sebuah roket bermassa m ditembakkan vertikal dari permukaan Bumi. Tentukan kecepatan minimum roket ketika ditembakkan agar mencapai ketinggian maksimum R dari permukaan Bumi jika massa Bumi M dan jari-jari Bumi R .

Jawab

Pada saat roket mencapai ketinggian maksimum R , kecepatan roket $v_2 = 0$. Dengan menggunakan persamaan Hukum Kekekalan Energi dan memasukkan harga $v_1 = v$, $v_2 = 0$, $r_1 = R$ dan $r_2 = R + R = 2R$ maka diperoleh

$$-G \frac{Mm}{r_1} + \frac{1}{2}mv_1^2 = -G \frac{Mm}{r_2} + \frac{1}{2}mv_2^2$$

$$-GM \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = \frac{1}{2}(v_2^2 - v_1^2)$$

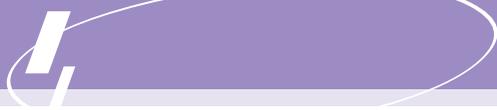
$$-GM \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{2R} \right) = \frac{1}{2}(0 - v^2)$$

$$-GM \left(\frac{1}{2R} \right) = -\frac{1}{2}v^2 \text{ atau}$$

$$v^2 = \frac{GM}{R} \text{ sehingga } v = \sqrt{\frac{GM}{R}} \text{ atau } v = \sqrt{gR}$$

Kata Kunci

- Energi Potensial Gravitasi
- Konstanta Gravitasi Universal



Contoh 2.11

Berapakah kecepatan minimum sebuah roket yang diluncurkan vertikal ke atas agar terlepas dari pengaruh gravitasi Bumi?

Jawab

Diketahui: $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg}\cdot\text{s}^2$, $M = 5,97 \times 10^{24} \text{ kg}$, dan $R = 6,38 \times 10^6 \text{ m}$.

$$v_{\min} = \sqrt{2GM/R}$$

$$= \sqrt{(2)(6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg}\cdot\text{s}^2) \frac{5,97 \times 10^{24} \text{ kg}}{6,38 \times 10^6 \text{ m}}} = 1,12 \times 10^4 \text{ m/s.}$$

Soal Penguasaan Materi 2.2

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

- Tiga benda masing-masing $m_A = 2,5 \text{ kg}$, $m_B = 4 \text{ kg}$, dan $m_C = 6,25 \text{ kg}$ terletak pada satu garis lurus. Jika jarak antara benda A dan C adalah 4 m, berapakah jarak AB dan jarak CD agar besar gaya gravitasi total yang dialami benda B yang terletak di antara benda A dan C sama dengan nol?
- Dua benda yang massanya masing-masing 16 kg dan 36 kg terpisah dengan jarak 50 cm. Titik Z berada pada garis hubung kedua benda. Jika besar medan gravitasi di titik Z tersebut adalah nol, berapakah jarak titik Z tersebut jika diukur dari benda bermassa 36 kg?
- Dua benda angkasa yang bermassa masing-masing m_1 dan m_2 berjarak r satu dengan lainnya sehingga terjadi gaya tarik-menarik sebesar F . Ketika kedua benda tersebut bergerak saling mendekati dan jaraknya berkurang sebesar 25%, hitunglah gaya tarik-menarik antara kedua benda tersebut.

Pembahasan Soal SPMB

Jarak antara Matahari dan Bumi adalah $1,5 \times 10^8 \text{ km}$, sedangkan jarak antara Matahari dan Neptunus adalah $4,5 \times 10^9 \text{ km}$. Periode Neptunus mengelilingi Matahari adalah 165 tahun dan massa Neptunus adalah 18 kali massa Bumi. Jika besar gaya gravitasi pada Bumi oleh Matahari adalah F dan kelajuan Bumi mengelilingi Matahari adalah v , gaya gravitasi pada Neptunus oleh Matahari serta kelajuan Neptunus adalah

- $\frac{F}{10}$ dan $\frac{v}{11}$
- $\frac{F}{50}$ dan $\frac{v}{55}$
- $\frac{F}{50}$ dan $2\frac{v}{11}$
- $3\frac{F}{100}$ dan $3\frac{v}{55}$
- $\frac{F}{100}$ dan $2\frac{v}{55}$

Penyelesaian

Diketahui: $r_B = 1,5 \times 10^8 \text{ km}$, $r_N = 4,5 \times 10^9 \text{ km}$, $r_N = 30 r_B$

$T_N = 165$ tahun, dan $m_N = 18 m_B$.

Gaya gravitasi pada planet oleh Matahari:

$$F = G \frac{Mm}{R^2} \text{ atau } F \sim \frac{m}{r^2}$$

Perbandingan gaya gravitasi Neptunus dengan Bumi.

$$\frac{F_N}{F} = \frac{m_N R_B^2}{m_B R_N^2} = \frac{18 m_B R_B^2}{m_B (30 R_B)^2} = \frac{18}{900} = \frac{1}{50}$$

$$F_N = \frac{F}{50}$$

Kecepatan orbit planet:

$$v = \frac{2\pi r}{T} \rightarrow v \sim \frac{r}{T}$$

Perbandingan kecepatan orbit Bumi dengan Neptunus:

$$\frac{v_N}{v} = \frac{r_N T_B}{r_B T_N} = \frac{(30 r_B)(1)}{(r_B)(165)} = \frac{30}{165} = \frac{2}{11}$$

$$v_N = \frac{2}{11} v$$

Jawab: b

UMPTN 2001 - Rayon A

Rangkuman

- Hukum Kepler** menjelaskan tentang mekanika gerak planet-planet
 - Hukum I Kepler**
Setiap planet bergerak pada lintasan elips dengan Matahari berada pada salah satu titik fokusnya.
 - Hukum II Kepler**
Garis yang menghubungkan Matahari dengan planet dalam selang waktu yang sama menghasilkan luas juring yang sama.
 - Hukum III Kepler**
Kuadrat waktu edar planet (periode) berbanding lurus dengan pangkat tiga jarak planet itu dari Matahari.

$$T^2 \approx r^3 \rightarrow \frac{T_2^2}{T_1^2} = \frac{r_2^3}{r_1^3}$$

- Hukum Gravitasi Newton** dinyatakan sebagai

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \mathbf{r}$$

- Kuat medan gravitasi** atau percepatan gravitasi

$$g = G \frac{m}{r^2} \mathbf{r}$$

- Kecepatan satelit mengelilingi Bumi** dinyatakan sebagai

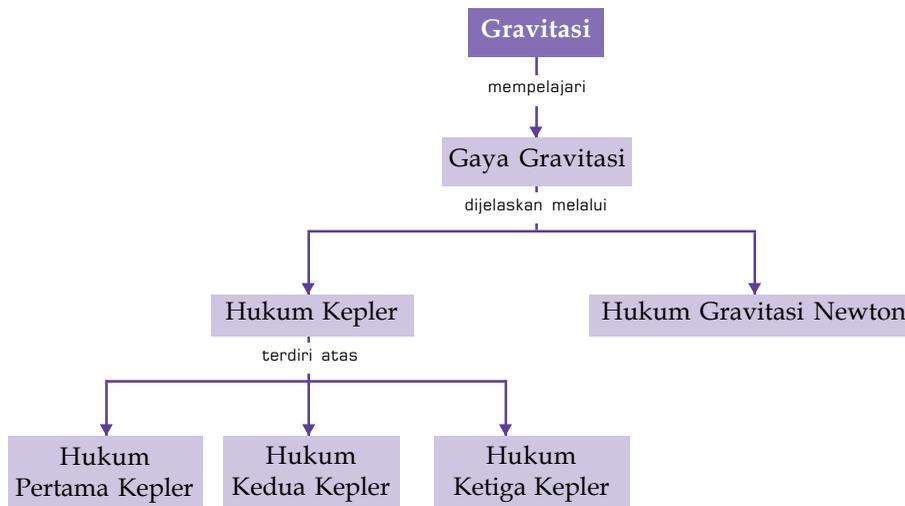
$$v = \frac{1}{(R+h)R} \sqrt{GM(R+h)}$$

- Pengukuran **konstanta gravitasi universal (G)** dilakukan dengan menggunakan neraca Cavendish. Nilai $G = 6,673 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg s}^2$
- Energi potensial gravitasi** dinyatakan dengan persamaan

$$EP = -G \frac{Mm}{r}$$

- Roket yang bergerak meninggalkan Bumi harus memiliki **kecepatan minimum** $v_{\min} = \sqrt{2gR}$ agar dapat lepas dari medan gravitasi Bumi.

Peta Konsep



Kaji Diri

Setelah mempelajari bab Gravitasi, Anda dapat menganalisis keteraturan gerak planet dalam tata surya berdasarkan Hukum-Hukum Newton. Jika Anda belum mampu menganalisis keteraturan gerak planet dalam tata surya berdasarkan Hukum-Hukum Newton, Anda belum menguasai materi bab

Gaya dengan baik. Rumuskan materi yang belum Anda pahami, lalu cobalah Anda tuliskan kata-kata kunci tanpa melihat kata kunci yang telah ada dan tuliskan pula rangkuman serta peta konsep berdasarkan versi Anda. Jika perlu, diskusikan dengan teman-teman atau guru Fisika Anda.