



HUKUM GRAVITASI EINSTEIN & GERAK PARTIKEL BEBAS

TEORI RELATIVITAS

Dosen pengampu: Hervin Maulina, S.Pd., M.Sc.

PROGRAM STUDI S1 PENDIDIKAN FISIKA UNIVERSITAS LAMPUNG

OUTLINE PERKULIAHAN

- 1. Gravitasi Menurut Newton**
- 2. Gravitasi Menurut Einstein (Relativitas Umum)**
- 3. Hubungan Matematis antara Einstein dan Newton**
- 4. Analogi Fisis**
- 5. Perbandingan Inti Konseptual**
- 6. Contoh Perhitungan Batas Newton**
- 7. Contoh Nyata dalam Kehidupan**

Tujuan Pembelajaran

1. Menjelaskan bagaimana teori gravitasi Newton muncul sebagai **pendekatan batas (limit)** dari relativitas umum.
2. Mengidentifikasi perbedaan utama antara pandangan **Newton (gaya tarik)** dan **Einstein (kelengkungan ruang-waktu)**.
3. Menunjukkan contoh fenomena di mana hukum Newton gagal dan teori Einstein diperlukan.

1. Gravitasi Menurut Newton

Dalam mekanika klasik gravitasi dianggap sebagai gaya tarik-menarik antara dua massa.

$$F = \frac{GMm}{r^2}$$

Dengan:

F = Gaya gravitasi (gaya tarik) (N)

G = Tetapan universal gravitasi,
 $6.67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$

M = massa benda pertama

m = massa benda kedua

r = jarak pusat massa kedua benda (m)

Ciri utamanya:

- Gaya bekerja instan (tanpa penundaan waktu).
- Ruang dan waktu dianggap terpisah dan absolut.
- Medan gravitasi adalah vektor gaya yang tergantung pada jarak.

Namun, teori ini gagal menjelaskan beberapa fenomena:

- Pergeseran orbit Merkurius (precession).
yang dikenal sebagai presesi perihelion, adalah fenomena di mana titik terdekat Merkurius dengan Matahari (perihelion) bergeser sedikit pada setiap orbitnya.
- Pembelokan cahaya oleh gravitasi.
fenomena di mana cahaya dibelokkan saat melewati objek bermassa besar, seperti bintang atau galaksi.
- Perbedaan waktu di medan gravitasi kuat (gravitational time dilation), terjadi karena gravitasi yang lebih kuat memperlambat waktu.

2. Gravitasi Menurut Einstein (Relativitas Umum)

Einstein mengganti konsep gaya dengan geometri ruang-waktu.

Massa dan energi tidak menarik benda lain, tetapi **melengkungkan ruang-waktu** di sekitarnya.

Benda bergerak mengikuti lintasan geodesik, yaitu jalur terpendek dalam ruang-waktu yang melengkung yang memenuhi persamaan:

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

$G_{\mu\nu}$: kelengkungan ruang-waktu

$T_{\mu\nu}$: distribusi energi-momentum

Hubungan ini menggantikan $F = ma$ dalam skala kosmik

3. Hubungan Matematis antara Einstein dan Newton

Dalam kondisi medan lemah dan kecepatan rendah ($v \ll c$):

$$g_{00} \approx 1 + \frac{2\phi}{c^2}$$

dengan ϕ adalah **potensial gravitasi Newton**. Jika kita substitusi ke dalam persamaan Einstein, hasilnya:

$$\nabla^2 \phi = 4\pi G \rho$$

Jadi, gravitasi Newton muncul sebagai batas klasik dari relativitas umum.

Jadi, gravitasi Newton muncul sebagai batas klasik dari relativitas umum.

Asumsi

Akibat

Medan gravitasi lemah

ruang hampir datar

Kecepatan benda kecil

efek relativistik diabaikan

Waktu mengalir hampir seragam

mendekati hukum Newton

4. Analogi Fisis

Bayangkan dua situasi:

❑ **Pandangan Newton:**

Bumi menarik apel ke bawah melalui gaya

$$F = \frac{GMm}{r^2}$$

❑ **Pandangan Einstein:**

Bumi melengkungkan ruang-waktu di sekitarnya; apel hanya mengikuti “jalur lurus” (geodesik) dalam ruang yang melengkung.

Jadi “jatuh” bukan karena gaya, tapi karena ruang tempat apel bergerak tidak lurus lagi.

5. Perbandingan Inti Konseptual

Aspek	Newton	Einstein
Konsep gravitasi	Gaya tarik antar massa	Kelengkungan ruang-waktu
Ruang & waktu	Terpisah, absolut	Menyatu, dinamis
Medan	Vektor gaya	Tensor metrik $g_{\mu\nu}$
Propagasi	Instan	Terbatas oleh kecepatan cahaya
Hukum	$F = ma$	Persamaan Einstein $G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$

6. Contoh Perhitungan Batas Newton

Misal: medan gravitasi Bumi ($r \gg R_s$)

$$g_{00} = 1 - \frac{2GM}{rc^2}$$

Untuk $GM/(rc^2) \ll 1$:

$$ds^2 \approx (1 + 2\phi/c^2)c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$$

Dengan $\phi = -\frac{GM}{r}$, maka:

$$a = -\nabla\phi = \frac{GM}{r^2}$$

➡ muncul kembali gravitasi Newton.

7. Contoh Nyata dalam Kehidupan

Fenomena	Penjelasan Relativitas Umum
GPS	Satelit mengalami waktu berbeda karena medan gravitasi lebih lemah (gravitational time dilation).
Orbit Merkurius	Pergeseran kecil orbit (43 detik busur/abad) dijelaskan oleh kelengkungan ruang-waktu.
Gravitational lensing	Cahaya dari bintang jauh dibelokkan oleh gravitasi galaksi besar.

KESIMPULAN

1. Relativitas Umum = perluasan teori Newton, bukan penghapusan.
2. Dalam kondisi ekstrem (massa besar, kecepatan tinggi, jarak kosmik), Einstein memberi hasil baru.
3. Dalam kondisi biasa (medan lemah, kecepatan kecil), Einstein “kembali” ke Newton.

SOAL LATIHAN

SOAL 1

Sebuah kawat logam panjang dialiri arus listrik searah. Dalam kerangka laboratorium, kawat tersebut netral secara listrik (jumlah muatan positif dan negatif seimbang), tetapi ternyata menghasilkan medan magnet di sekitarnya.

- a) Jelaskan bagaimana menurut relativitas khusus, kawat yang netral bisa tetap menghasilkan medan magnet.
- b) Mengapa fenomena ini tidak bisa dijelaskan sepenuhnya hanya dengan konsep gaya Coulomb dalam fisika Newton?

SOAL 2

Misal kita berada di dekat permukaan Bumi dengan percepatan gravitasi $\approx 9,8 \text{ m/s}^2$. Dalam relativitas umum, gravitasi dijelaskan sebagai kelengkungan ruang waktu, tetapi dalam praktik kita tetap memakai $F=mg$.

- a) Jelaskan mengapa pada skala laboratorium (misal kabel, rangkaian listrik di kelas), kita boleh menggunakan hukum gravitasi Newton dan tidak perlu menggunakan persamaan medan Einstein
- b) Kaitkan jawabanmu dengan istilah “medan lemah” dan “kecepatan rendah”.

SOAL 3

Diketahui data Bumi:

- $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2/\text{kg}^2$
- $M_{\oplus} = 5,97 \times 10^{24} \text{ kg}$
- $R_{\oplus} = 6,37 \times 10^6 \text{ m}$

1. Hitung **percepatan gravitasi Newton** di permukaan Bumi:

$$g = \frac{GM_{\oplus}}{R_{\oplus}^2}$$

2. Hitung **potensial gravitasi Newton** di permukaan Bumi:

$$\phi = -\frac{GM_{\oplus}}{R_{\oplus}}$$

3. Gunakan aproksimasi relativitas umum:

$$g_{00} \approx 1 + \frac{2\phi}{c^2}, \quad c = 3,0 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Hitung nilai g_{00} di permukaan Bumi dan tunjukkan bahwa penyimpangannya dari 1 sangat kecil.