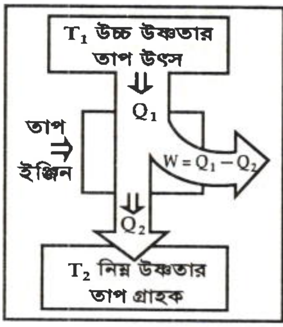
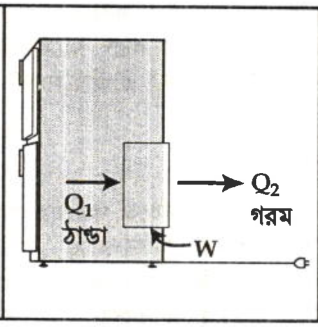
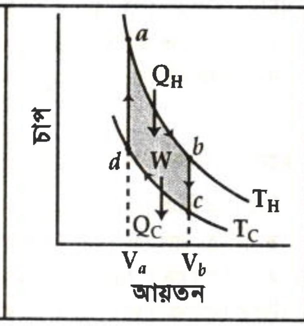
# ১ তাপগতিবিদ্যা

# THERMODYNAMICS

**প্রধান শব্দ (Key Words) :** তাপীয় সমতা, তাপমাত্রা, তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্র, তাপীয় সিস্টেম, অভ্যন্তরীণ শক্তি, তাপগতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্র, প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া, অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া, কার্নো-চক্র, তাপ ইঞ্জিন, রেফ্রি-জারেটর বা হিমায়ক, কার্যকৃত সহগ, ইঞ্জিনের দক্ষতা, এনট্রপি।





## সূচনা
## Introduction

তাপ ও তাপমাত্রা পদার্থবিজ্ঞানের একটি অতি প্রয়োজনীয় বিষয়। পদার্থের ভৌতিক অবস্থা প্রকাশে তাপমাত্রার ভূমিকা বিশেষ গুরুত্বপূর্ণ। আমরা জানি যেকোনো পদার্থ অসংখ্য অণুর সমন্বয়ে গঠিত হয়। এই অণুগুলোর গতিশক্তি রয়েছে। তাপমাত্রা বৃদ্ধি করলে গতিশক্তি বৃদ্ধি পায় এবং কমালে গতিশক্তি হ্রাস পায়। তাপমাত্রা একটি পরিমাপযোগ্য রাশি। এই অধ্যায়ে আমরা তাপমাত্রা, তাপমাত্রা পরিমাপের নীতি, তাপীয় সমতা, তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্র, তাপীয় সিস্টেম, অভ্যন্তরীণ শক্তি, তাপগতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্র, প্রত্যাবর্তী ও অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া, কার্নোর চক্র, তাপ ইঞ্জিন, রেফ্রিজারেটর আলোচনা করব।

**এ অধ্যায় পাঠ শেষে শিক্ষার্থীরা—**

- তাপমাত্রা পরিমাপের নীতি ব্যবহার করে তাপীয় সমতা এবং তাপমাত্রার ধারণা ব্যাখ্যা করতে পারবে।
- তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্র, তাপীয় সিস্টেমের ধারণা এবং অভ্যন্তরীণ শক্তির ব্যাখ্যা করতে পারবে।
- কোনো সিস্টেমের তাপ, তার অভ্যন্তরীণ শক্তি এবং সম্পন্ন কাজের মধ্যে সম্পর্ক বিশ্লেষণ করতে পারবে।
- তাপগতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্র এবং প্রত্যাবর্তী ও অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ার পার্থক্য ব্যাখ্যা করতে পারবে।
- কার্নো চক্রের মূলনীতি ব্যাখ্যা করতে পারবে।
- তাপ ইঞ্জিনের মূলনীতি এবং রেফ্রিজারেটরের কার্যক্রমের মূলনীতি ব্যাখ্যা করতে পারবে।
- ইঞ্জিনের দক্ষতা ব্যাখ্যা করতে পারবে।
- এনট্রপি এবং বিশৃঙ্খলা ব্যাখ্যা করতে পারবে।

## ১.১ তাপমাত্রা পরিমাপের নীতি
### Principle of measurement of temperature

মনে কর তোমার পড়ার ঘরে একটি কাঠের তৈরি ক্রিকেট বল এবং একটি লোহার বল রাখা আছে। তুমি যদি দুটি বল একই সময়ে স্পর্শ কর তাহলে তোমার নিকট মনে হবে লোহার বলটি বেশি ঠান্ডা। যদিও বাস্তবে দুটি বলের তাপমাত্রা এক। তাই কেবল স্পর্শ দ্বারা তাপমাত্রা বা উষ্ণতা সম্পর্কে সঠিক ধারণা এবং পরিমাণ নির্ণয় করা যায় না। তাপমাত্রা বা উষ্ণতা হলো বস্তুর তাপীয় অবস্থা যা তাপ নির্ধারণ করে এবং বস্তুটিকে অন্য বস্তুর তাপীয় সংস্পর্শে রাখলে তাপ দেবে, না তাপ নেবে তাও নির্ধারণ করে। তাই তাপমাত্রা পরিমাপের জন্য পদার্থের একটি বিশেষ ধর্মের প্রতি লক্ষ রাখা হয় এবং যেসব পদার্থের এসব ধর্ম আছে তা তাপমাত্রা পরিমাপক যন্ত্রে ব্যবহার করা হয়। বস্তুত এই মূলনীতিই তাপমাত্রা পরিমাপে ব্যবহার করা হয়। নিম্নে এ সম্পর্কে বিস্তারিত বর্ণনা করা হলো।

আমরা জানি, কোনো বস্তু কত গরম অথবা কত ঠান্ডা তা স্পর্শ করে সরাসরি বুঝা যায় না, অনুভব করা যায় মাত্র। এই কারণে তাপমাত্রার তারতম্যভেদে পদার্থের যে বিশেষ কোনো ধর্ম নিয়মিতভাবে পরিবর্তিত হয় এবং যে ধর্মের

পরিবর্তন লক্ষ করে সহজ ও সূক্ষ্মভাবে তাপমাত্রা নিরূপণ করা যায় সেই পদার্থ বস্তুর তাপমাত্রা পরিমাপে ব্যবহৃত হয়। সুতরাং বলা যায়, **যে যন্ত্র দ্বারা বস্তুর তাপমাত্রা নির্ভুলভাবে পরিমাপ করা যায় তাকে তাপমান-যন্ত্র বা থার্মোমিটার (Thermometer) বলে।**

**তাপমাত্রার পরিবর্তনে পদার্থের যে বিশেষ বিশেষ ধর্ম নিয়মিতভাবে পরিবর্তিত হয় এবং যে ধর্মের পরিবর্তন লক্ষ করে সহজ ও সঠিকভাবে তাপমাত্রা নির্ণয় করা যায় তাকে উষ্ণতামিতি ধর্ম (Thermometric properties) বলে এবং যেসব পদার্থের উষ্ণতামিতি ধর্ম ব্যবহার করে থার্মোমিটার তৈরি করা হয় তাদেরকে উষ্ণতামিতি পদার্থ (Thermometric substances) বলে।** সাধারণত উষ্ণতামিতি পদার্থের বা তার ধর্মের নাম অনুসারে থার্মোমিটারের নামকরণ করা হয়। যেমন পারদ থার্মোমিটার, রোধ থার্মোমিটার ইত্যাদি। থার্মোমিটার প্রস্তুতকালে এই উষ্ণতামিতি ধর্ম এবং উষ্ণতামিতি পদার্থের ওপর নির্ভর করে তাপমাত্রা পরিমাপ করা হয়। যেমন পারদ থার্মোমিটারে পারদের প্রসারণ হলো উষ্ণতামিতি ধর্ম এবং পারদ হলো উষ্ণতামিতি পদার্থ। এই নীতি ব্যবহার করে তাপীয় সমতা ও তাপমাত্রার ধারণা ব্যাখ্যা করা হলো।

**উষ্ণতামিতি পদার্থ হিসেবে পারদ ব্যবহারের সুবিধা :**

পারদ একটি উত্তম উষ্ণতামিতিক পদার্থ। পারদ থার্মোমিটার তৈরিতে পারদের প্রসারণকে উষ্ণতামিতিক বর্ণ হিসেবে ব্যবহার করা হয়। তাপমাত্রা বাড়লে পারদের প্রসারণ ঘটে যা আয়তন বাড়ে। তাপমাত্রা কমলে পারদ সংকুচিত হয়। তাপমাত্রা পরিবর্তনের সাথে পারদের আয়তন সুষমভাবে পরিবর্তিত হয়। এছাড়া পারদ স্বচ্ছ কাচের নলের গায়ে লেগে থাকে না। এই জন্য উষ্ণতামিতিক পদার্থ হিসেবে পারদ ব্যবহার সুবিধাজনক।

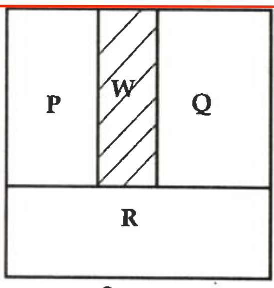
## ১.১.১ তাপীয় সমতা
### Thermal equilibrium

একটি উত্তপ্ত লোহার বলকে কক্ষ তাপমাত্রার একটি স্থানে রেখে দাও। কী দেখতে পাবে ? দেখা যাবে যে, উত্তপ্ত বস্তু তাপ হারাতে থাকবে এবং যতক্ষণ পর্যন্ত উত্তপ্ত বস্তুর তাপমাত্রা কক্ষ তাপমাত্রা তথা পরিপার্শ্বের তাপমাত্রার সমান না হবে ততক্ষণ পর্যন্ত তাপ হারানো প্রক্রিয়া চলতে থাকবে। একইরূপ ঘটনা লক্ষ করা যায় যদি দুটি ভিন্ন তাপমাত্রার বস্তুর মধ্যে পারস্পরিক তাপীয় সংযোগ করা হয়। এক্ষেত্রে উচ্চ তাপমাত্রার বস্তু হতে নিম্ন তাপমাত্রার বস্তুতে তাপ প্রবাহিত হয় এবং এক সময় উভয় বস্তুই একই তাপমাত্রায় উপনীত হয়। তখন বলা হয় বস্তু দুটি **তাপীয় সমতায়** আছে।

R.H. ফাওলার

অর্থাৎ **একাধিক বস্তু যদি তাপীয়ভাবে সংযুক্ত থাকে এবং তাদের মধ্যে তাপের কোনো আদান প্রদান না ঘটলে বস্তুগুলো তাপীয় সমতায় আছে ধরা হয়।** এ সংক্রান্ত তাপগতিবিদ্যার সূত্রটি হলো 'শূন্যতম সূত্র' বা Zeroth Law।

**তাপগতিবিদ্যার শূন্যতম সূত্র (Zeroth law of thermodynamics) : দুটি বস্তু যদি তৃতীয় কোনো বস্তুর সাথে তাপীয় সাম্যাবস্থায় থাকে তবে প্রথমোক্ত বস্তু দুটি পরস্পরের সাথে তাপীয় সাম্যাবস্থায় থাকবে। একে তাপগতিবিদ্যার শূন্যতম সূত্র বলা হয়।**



চিত্র ১.১

**ব্যাখ্যা :** দুটি বস্তু সাম্যাবস্থায় আছে, তা নির্ধারণের জন্য তৃতীয় একটি বস্তু ব্যবহার করা হয়। ধরা যাক P ও Q দুটি বস্তু একটি কুপরিবাহী দেওয়াল দিয়ে পৃথক করা অবস্থায় তৃতীয় একটি বস্তু R-এর সংস্পর্শে রাখা হলো [চিত্র ১.১]। কিছুক্ষণ পরে দেখা যাবে P ও Q উভয়ই তৃতীয় বস্তু R-এর সাথে তাপীয় সাম্যাবস্থায় পৌঁছবে। এখন কুপরিবাহী দেওয়াল W সরিয়ে নিলেও P ও Q-এর তাপমাত্রায় কোনো পরিবর্তন হবে না। এ থেকে বুঝা যাচ্ছে যে দেওয়াল W সরানোর আগেই P ও Q পরস্পর তাপীয় সাম্যাবস্থায় পৌঁছেছে। এই উদাহরণ থেকেই ওপরের সূত্র প্রমাণিত হয়। তাপগতিবিদ্যার শূন্যতম সূত্র থেকে সরাসরি সিদ্ধান্ত গ্রহণ করা যায় যে, **প্রতিটি বস্তুর এমন একটি ধর্ম আছে যা অন্য একটি বস্তুর সঙ্গে সমান হলে বস্তু দুটি পরস্পর তাপীয় সাম্যে থাকবে। এই ধর্মটিই হলো তাপমাত্রা।** এই সূত্রের ওপর ভিত্তি করেই থার্মোমিটার তৈরি করা হয়েছে।

MAT(21-22)

## ১.১.২ তাপমাত্রার ধারণা
### Concept of temperature

গরম বা ঠাণ্ডার অনুভূতি আমাদের সকলেরই রয়েছে। সুতরাং কোনো একটি বস্তু কী পরিমাণ গরম বা ঠান্ডা তার পরিমাপকে ওই বস্তুর আপাত **তাপমাত্রা** বলে। অর্থাৎ আপাতভাবে বলা যায় **তাপমাত্রা বলতে বস্তুর উত্তাপের পরিমাণ**

(degree of heat) বুঝায়। মনে কর দুটি বস্তু রয়েছে। একটি বস্তু A এবং অপরটি B। যদি স্পর্শ করলে A বস্তু B বস্তু অপেক্ষা বেশি গরম অনুভূত হয়, তবে আমরা বলতে পারি বস্তু A-এর তাপমাত্রা বেশি এবং বস্তু B-এর তাপমাত্রা কম। নিখুঁতভাবে তাপমাত্রার নিম্নলিখিত সংজ্ঞা দেয়া যেতে পারে :

**সংজ্ঞা : তাপমাত্রা হলো বস্তুর একটি তাপীয় অবস্থা যা ওই বস্তু হতে অন্য বস্তুতে তাপের প্রবাহ নিয়ন্ত্রণ করে এবং তাপ প্রবাহের অভিমুখ নির্ধারণ করে।**

উষ্ণতা তথা তাপমাত্রা পরিমাপের যন্ত্র নির্মাণে আমাদের এমন পদার্থের প্রয়োজন হয় তাপমাত্রা পরিবর্তনে যার কোনো না কোনো ধর্মের ব্যাপক পরিবর্তন ঘটে। উদাহরণস্বরূপ বলা যায়, প্লাটিনাম রোধ থার্মোমিটারে প্লাটিনামের রোধ ব্যবহার করে এবং তড়িৎ রোধের উষ্ণতামিতি ধর্মের প্রতি লক্ষ রেখে তাপমাত্রা পরিমাপ করা হয়। আবার থার্মোকাপল নামক থার্মোমিটারে দুটি ধাতব পদার্থের যুগল ব্যবহার করে তাপীয় তড়িচ্চালক শক্তির ধর্ম কাজে লাগিয়ে তাপমাত্রা পরিমাপ করা হয়। আবার বিকিরণ পাইরোমিটারে উত্তপ্ত বস্তুর বিকিরণ ধর্ম কাজে লাগিয়ে 500°C এর ঊর্ধ্বের তাপমাত্রা পরিমাপ করা হয়। এমনকি সূর্যের তাপমাত্রাও পাইরোমিটারের সাহায্যে নির্ণয় করা যায়। MAT(21-22)

## ১.১.৩ তাপমাত্রা পরিমাপের বিভিন্ন স্কেলের মধ্যে সম্পর্ক
**Relation among different scales of temperature measurement**

তাপমাত্রার স্কেল নির্ধারণের সময় পদার্থের উষ্ণতামিতি ধর্ম কাজে লাগানো হয়। যদি বরফ বিন্দু ও স্টিম বিন্দুর তাপমাত্রা যথাক্রমে $\theta_{ice}$ এবং $\theta_{steam}$ এবং এই দুই তাপমাত্রায় উপরোক্ত কোনো একটি ধর্মের মান যথাক্রমে $X_{ice}$ এবং $X_{steam}$ এবং অন্য কোনো তাপমাত্রায় $\theta$-তে ওই ধর্মের মান যদি $X_\theta$ হয় এবং মৌলিক ব্যবধানকে N টি সমান ভাগে বিভক্ত করা হয়, তাহলে ওই তাপমাত্রায় $\theta$ এর মান হবে,

$$\frac{\theta - \theta_{ice}}{\theta_{steam} - \theta_{ice}} = \frac{X_\theta - X_{ice}}{X_{steam} - X_{ice}} = \frac{\text{তাপমাত্রা — নিম্ন স্থির বিন্দু}}{\text{ঊর্ধ্ব স্থির বিন্দু — নিম্ন স্থির বিন্দু}}$$

$$= \frac{S - M}{B - M} = \text{ধ্রুবক} \ [\because \text{ যেকোনো থার্মোমিটারের ক্ষেত্রে এই অনুপাতি সমান}]$$

বা, $$\frac{\theta - \theta_{ice}}{N} = \frac{X_\theta - X_{ice}}{X_{steam} - X_{ice}} \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad (1.1)$$

তাপমাত্রা পরিমাপের জন্য বিভিন্ন তাপমান যন্ত্রে বিভিন্ন স্কেল ব্যবহার করা হতো। বিভিন্ন স্কেলে প্রতি ডিগ্রি তাপমাত্রার মান সমান নয়। একটি স্কেলের সাথে অন্যটির পুরাপুরি মিল নেই। এই অসুবিধা দূর করার জন্য আন্তর্জাতিক ওজন ও পরিমাপ কমিটি 1927 সালে তাপমাত্রার একটি ব্যবহারিক স্কেল অনুমোদন করেন। এর নাম আন্তর্জাতিক তাপমাত্রা স্কেল। তাপমাত্রার বিভিন্ন স্কেল হলো **সেলসিয়াস** (Celsius), **ফারেনহাইট** (Fahrenheit) এবং **কেলভিন** (Kelvin) **স্কেল**। এদের মধ্যে পারস্পরিক সম্পর্ক নিম্নরূপ :

$$\boxed{\frac{C}{5} = \frac{F - 32}{9} = \frac{K - 273}{5}}$$ MAT(19-20)

ত্রুটিপূর্ণ থার্মোমিটারের ক্ষেত্রে বরফ বিন্দু M, স্টিম বিন্দু B, তাপমাত্রা S। আবার সেলসিয়াস, ফারেনহাইট এবং কেলভিন স্কেলের প্রকৃত তাপমাত্রা যথাক্রমে C, F এবং K হলে নিম্নের সমীকরণ এসব রাশির মধ্যে পারস্পরিক সম্পর্ক স্থাপন করে।

$$\frac{C}{100} = \frac{K - 273{\cdot}15}{100} = \frac{F - 32}{180} = \frac{S - M}{B - M}$$

**সেলসিয়াস স্কেলে তাপমাত্রা :** যে স্কেলে বরফ বিন্দুকে 0° এবং স্টিম বিন্দুকে 100° ধরে মধ্যবর্তী মৌলিক ব্যবধানকে 100 ভাগে ভাগ করা হয় সেই স্কেলকে সেলসিয়াস স্কেল বলে। এক্ষেত্রে প্রতি 1 ঘরের মান 1°C হয়।

সেলসিয়াস স্কেলে $\theta_{ice} = 0°C$, $\theta_{steam} = 100°C$ এবং $N = \theta_{steam} - \theta_{ice} = 100°C$, সেক্ষেত্রে উপরোক্ত সমীকরণ অনুযায়ী,

$$\frac{\theta - 0°C}{100°C} = \frac{X_\theta - X_{ice}}{X_{steam} - X_{ice}}$$

বা, $$\theta = \frac{X_\theta - X_{ice}}{X_{steam} - X_{ice}} \times 100°C$$

**রোধ থার্মোমিটার :** রোধ থার্মোমিটারের ক্ষেত্রে উষ্ণতামিতিক ধর্ম হলো পরিবাহীর রোধ। $\theta°C$, $0°C$, $100°C$ তাপমাত্রায় পরিবাহীর রোধ যথাক্রমে $R_\theta$, $R_0$, $R_{100}$ হলে তাপমাত্রা,

$$\theta = \frac{R_\theta - R_0}{R_{100} - R_0} \times 100$$

অনুরূপভাবে, **ফারেনহাইট স্কেলে তাপমাত্রা :** এই স্কেলে বরফ বিন্দু $32°$ এবং স্টিম বিন্দু $212°$ ধরে মৌলিক ব্যবধান 180 ভাগে ভাগ করা হয়। প্রতি 1 ঘরের মান $1°F$ হয়।

ফারেনহাইট স্কেলে তাপমাত্রা নির্ণয়ের জন্য সমীকরণ (1.1) ব্যবহার করে পাই,

$$\frac{\theta - 32°F}{180°F} = \frac{X_\theta - X_{ice}}{X_{steam} - X_{ice}}$$

এখানে $X_{ice} = 32°F$ এবং $X_{steam} = 212°F$

সুতরাং $X_{steam} - X_{ice} = 212°F - 32°F = 180°F$

বা, $$\theta = \frac{X_\theta - X_{ice}}{X_{steam} - X_{ice}} \times 180°F + 32°F$$

ফারেনহাইট থার্মোমিটার দ্বারা মানব দেহের তাপমাত্রা বা জ্বর পরিমাপ করা হয়। এই থার্মোমিটারে 95°F থেকে 110°F পর্যন্ত তাপমাত্রা পরিমাপ করা হয়। একে ডাক্তারি বা ক্লিনিক্যাল থার্মোমিটার বলে। এই থার্মোমিটার দ্বারা মানব দেহের সর্বোচ্চ তাপমাত্রা পরিমাপ করা যায় বলে একে চরম থার্মোমিটার বলে।

### ১.১.৪ স্থির বিন্দু ব্যবহার করে স্কেল নির্ধারণ সংক্রান্ত কয়েকটি রাশি
**A few terms regarding determination of scale by using fixed point**

ধরা যাক কোনো থার্মোমিটারে ব্যবহৃত উষ্ণতামিতি পদার্থের উষ্ণতামিতি ধর্মের মান X যার মান তাপমাত্রা T এর সাথে সুষমভাবে পরিবর্তিত হয়। তাহলে তাপীয় সাম্যাবস্থায়,

$$T \propto X$$

বা, $T = aX$, এখানে $a$ একটি ধ্রুবক।

কোনো থার্মোমিটারে একটি স্থির বিন্দুর তাপমাত্রা $T_p$-তে কোনো উষ্ণতামিতি পদার্থের উষ্ণতামিতি ধর্মের মান $X_p$ হলে উপরোক্ত সমীকরণে $a = \frac{T_p}{X_p}$ হয়।

সেক্ষেত্রে, $$T = aX = \frac{T_p}{X_p} X = T_p \frac{X}{X_p}$$

**ত্রৈধবিন্দু (Triple point) : একটি নির্দিষ্ট চাপে যে তাপমাত্রায় কোনো পদার্থ কঠিন, তরল ও বায়বীয় রূপে সাম্যাবস্থায় থাকে তাকে ওই পদার্থের ত্রৈধবিন্দু বলে।**

**পানির ত্রৈধবিন্দু (Triple point of water) : 4·58 mm পারদ স্তম্ভ চাপে যে তাপমাত্রায় বিশুদ্ধ বরফ, পানি ও জলীয় বাষ্প একটি তাপীয় সাম্যাবস্থায় থাকে তাকে পানির ত্রৈধ বিন্দু বলে।** পানির ত্রৈধ বিন্দু $T_{tr} = 273{\cdot}16$ K। DAT(20-21)

**কেলভিন (Kelvin) : তাপমাত্রা বা তাপমাত্রা পরিবর্তনের এস. আই. একক হচ্ছে কেলভিন। পানির ত্রৈধবিন্দুর তাপমাত্রার $\frac{1}{273{\cdot}16}$ অংশকে এক কেলভিন (1 K) বলে।** সেলসিয়াস স্কেলের তাপমাত্রা Q কে কেলভিনে প্রকাশ করতে সেলসিয়াসের সাথে 273 যোগ করতে হয়। আদর্শ $T = \theta + 273$.

**তাপমাত্রার তাপগতীয় স্কেল বা পরম স্কেল** (Thermodynamic scale or Absolute scale of temperature) : **পানির ত্রৈধবিন্দুর তাপমাত্রাকে 273·16 K এবং ওই তাপমাত্রার $\frac{1}{273{\cdot}16}$ অংশকে এক কেলভিন ধরে তাপমাত্রার যে স্কেল গণনা করা হয় তাকে তাপগতীয় স্কেল বলে।** এই স্কেল পদার্থের প্রকৃতি বা ধর্মের ওপর নির্ভরশীল নয়, কেবল তাপমাত্রার ওপর নির্ভরশীল, তাই একে তাপমাত্রার পরম স্কেলও বলে। আদর্শ গ্যাস স্কেল এবং তাপগতীয় স্কেলে তাপমাত্রা T নির্ণয়ের সমীকরণ হলো, $T = \frac{P_T}{P_{tr}} \times 273{\cdot}16$ K, এখানে $P_T$ = T কেলভিন তাপমাত্রায় আদর্শ গ্যাসের চাপ, $P_{tr}$ = পানির ত্রৈধ বিন্দুতে সমআয়তন আদর্শ গ্যাসের চাপ।

**তাপমাত্রার আন্তর্জাতিক স্কেল** (International scale of temperature) : **পানির ত্রৈধ বিন্দুর তাপমাত্রাকে 273·16 K এবং ওই তাপমাত্রার $\frac{1}{273{\cdot}16}$ অংশকে এক কেলভিন ধরে এবং আরও কতগুলো সহজলভ্য স্থির বিন্দু নির্ধারণ করে আন্তর্জাতিক ওজন ও পরিমাপ সংস্থা তাপমাত্রা পরিমাপের যে ব্যবহারিক স্কেল অনুমোদন করেছেন তাকে তাপমাত্রার আন্তর্জাতিক স্কেল বলে।**

**কয়েকটি পদার্থের তাপমাত্রার আন্তর্জাতিক স্কেলের জন্য নির্ধারিত স্থির বিন্দু**

| পদার্থ | অবস্থা | তাপমাত্রা (K) |
|---|---|---|
| নিয়ন | ত্রৈধবিন্দু | 24·5561 |
| অক্সিজেন | ত্রৈধবিন্দু | 54·3584 |
| আর্গন | ত্রৈধবিন্দু | 83·8058 |
| পারদ | ত্রৈধবিন্দু | 234·3156 |
| পানি | ত্রৈধবিন্দু | 273·16 |
| তামা | হিমাঙ্ক | 1357·77 |
| সোনা | হিমাঙ্ক | 1337·33 |
| রূপা | হিমাঙ্ক | 1234·93 |
| অ্যালুমিনিয়াম | হিমাঙ্ক | 933·473 |
| দস্তা | হিমাঙ্ক | 692·677 |
| টিন | হিমাঙ্ক | 505·078 |

## গাণিতিক উদাহরণ ১.১

১। **এমন একটি তাপমাত্রা বের কর যার মান সেলসিয়াস এবং ফারেনহাইট স্কেলে একই হয়।** MAT(23-24)

[ Admission Test : BUET 2013-14 (মান ভিন্ন); RUET 2009-10; KUET 2006-07; DU (প্রযুক্তি) 2021-22; BRU 2019-20]

মনে করি নির্ণেয় তাপমাত্রা $= x$

$\therefore$ আমরা পাই, $\frac{C}{5} = \frac{F-32}{9}$ ... ... ... (i)

এখানে, $C = F = x$

$\therefore$ সমীকরণ (i) হতে আমরা পাই, $\frac{x}{5} = \frac{x-32}{9}$

বা, $9x = 5x - 160$

বা, $9x - 5x = -160$

বা, $4x = -160$

$\therefore$ $x = \frac{-160}{4} = -40°$

উঃ $-40°C$ এবং $-40°F$

২। **কোন তাপমাত্রা সেলসিয়াস ও ফারেনহাইট স্কেলে 40° পার্থক্য হয় ?**

[RUET Admission Test, 2011-12 (মান ভিন্ন)]

মনে করি, সেলসিয়াস স্কেলে পাঠ $= x$

$\therefore$ ফারেনহাইট স্কেলে পাঠ $= x \pm 40$

আমরা জানি, $\frac{C}{5} = \frac{F-32}{9}$ ... ... ... (i)

$\therefore$ $\frac{x}{5} = \frac{x \pm 40 - 32}{9}$

বা, $9x = 5x \pm 200 - 160$

বা, $4x = \pm 200 - 160$

বা, $4x = 200 - 160$

বা, $4x = 40$

বা, $x = \frac{40}{4} = 10°C$

বা, $4x = -200 - 160° = -360°$

$\therefore$ $x = -\frac{360}{4} = -90°C$

কিন্তু যখন $C = x = 10°$, তখন সমীকরণ (i) অনুসারে,

$$\frac{10}{5} = \frac{F - 32}{9}$$

$$\therefore \quad F = 9 \times \frac{10}{5} + 32 = 50°$$

এবং যখন $x = C = -90°$, তখন $-\frac{90}{5} = \frac{F-32}{9}$

$$\therefore \quad F = -\frac{90}{5} \times 9 + 32 = -130°$$

অর্থাৎ, 10° তাপমাত্রায় সেলসিয়াস ও ফারেনহাইট স্কেলে 40° পার্থক্য হয়।

**৩। একজন রোগীর দেহের তাপমাত্রা একটি ত্রুটিপূর্ণ থার্মোমিটারের সাহায্যে মেপে 45°C পাওয়া গেল। যদি ওই থার্মোমিটারের বরফ বিন্দু এবং বাষ্প বিন্দু যথাক্রমে 3°C এবং 107°C পাওয়া যায়, তবে রোগীর দেহে প্রকৃত তাপমাত্রা ফারেনহাইট স্কেলে বের কর।** [CKRUET Admission Test, 2021—22]

আমরা জানি,

$$\frac{F - 32}{180} = \frac{X_\theta - X_{ice}}{X_{steam} - X_{ice}}$$

বা, $\frac{F-32}{180} = \frac{45-3}{107-3}$

বা, $(F - 32) \times (104) = 180 \times 42$

বা, $F = \frac{180 \times 42}{104} + 32 = \frac{7560}{104} + 32$

$= 72{\cdot}69 + 32 = 104{\cdot}69°F$

**৪। একটি প্লাটিনাম রোধ থার্মোমিটার 0°C তাপমাত্রায় 2·57 ও'ম এবং 100°C তাপমাত্রায় 3·53 ও'ম পাঠ দেয়। 33·3°C তাপমাত্রায় যন্ত্রটি কত পাঠ দিবে ?**

আমরা জানি,

$$\theta = \frac{R_t - R_0}{R_{100} - R_0} \times 100 \quad \dots \quad \dots \quad (i)$$

বা, $33{\cdot}3 = \frac{R_t - 2{\cdot}57}{3{\cdot}53 - 2{\cdot}57} \times 100$

বা, $R_t = 2{\cdot}889$ ও'ম

এখানে,
$\theta = 33{\cdot}3°C$
$R_0 = 2{\cdot}57$ ও'ম
$R_{100} = 3{\cdot}53$ ও'ম

**৫। 0°C ও 100°C তাপমাত্রায় একটি রোধ থার্মোমিটারের রোধ যথাক্রমে 9Ω ও 22Ω। থার্মোমিটারটি একটি চুলায় তরলের স্ফুটনাঙ্কে রাখলে রোধ পাওয়া যায় 36Ω। তরলের স্ফুটনাঙ্ক নির্ণয় কর।**

[ Admision Test : JU-H 2021-22 (মান ভিন্ন); RU 2019-20 (মান ভিন্ন)]

আমরা জানি,

$$\theta = \frac{R_\theta - R_0}{R_{100} - R_0} \times 100°C$$

$$\therefore \quad \theta = \frac{36 - 9}{22 - 9} \times 100°C$$

$= 207{\cdot}7°C$

এখানে,
0°C তাপমাত্রার রোধ, $R_0 = 9\Omega$
100°C তাপমাত্রার রোধ, $R_{100} = 22\Omega$
θ°C তাপমাত্রার রোধ, $R_\theta = 36\Omega$
নির্ণেয় তাপমাত্রা, $\theta = ?$

**৬। সুষম ছিদ্রবিশিষ্ট একটি থার্মোমিটারে সমান ডিগ্রিতে দাগ কাটা আছে। থর্মোমিটারটি গলন্ত বরফে 20°C এবং 80°C তাপমাত্রায় 100°C পাঠ দেয়। 120°F তাপমাত্রায় উক্ত থার্মোমিটার কত পাঠ দিবে?**

আমরা জানি,

$$\frac{C}{100} = \frac{S - M}{B - M}$$

বা, $\frac{80}{100} = \frac{100 - 20}{B - 20}$

বা, $B - 20 = \frac{80 \times 10}{8}$

$\therefore \quad B = 100 + 20 = 120°$

এখানে,
নিম্ন স্থির বিন্দু, $M = 20°C$
অজ্ঞাত তাপমাত্রা, $C = 20°C$
থার্মোমিটারের পাঠ, $S = 100°C$
উর্ধ্ব স্থির বিন্দু, $B = ?$

আবার,

$$\frac{F-32}{180}=\frac{S-M}{B-M}$$

বা, $\frac{120-32}{180}=\frac{S-20}{120-20}$

বা, $\frac{88}{180}=\frac{S-20}{80}$

$\therefore\ S-20=\frac{88}{180}\times 80$

$\therefore\ S=39{\cdot}11+20°=59{\cdot}11°$

এখানে,
ফারেনহাইট স্কেলে তাপমাত্রা, $F=120°F$
অজ্ঞাত থার্মোমিটারের পাঠ, $S=?$

## ১·২ তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্র
**First law of thermodynamics**

### ১.২.১ ধারণা
**Concept**

তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্র আলোচনা করার আগে আমাদের জানা দরকার **তাপগতিবিদ্যা কী ?** আমরা জানি কাজ করার সামর্থ্যকে শক্তি বলে। বিভিন্ন প্রকার শক্তির সাথে আমরা পরিচিত। যেমন **যান্ত্রিক শক্তি, তাপশক্তি, শব্দ শক্তি** ইত্যাদি। এসব শক্তির মধ্যে পারস্পরিক রূপান্তর ঘটে। সব রূপান্তরের মধ্যেই দেখা যায় যে, সব রকম শক্তি অতি সহজেই তাপশক্তিতে রূপান্তরিত হয়। বিজ্ঞানী **কাউন্ট রামফোর্ড, হ্যামফ্রে ডেভি** এবং **জেমস্ প্রেসকট জুল** পরীক্ষা-নিরীক্ষার সাহায্যে প্রমাণ করেন যে, কাজ তথা যান্ত্রিক শক্তি হতে তাপ উৎপন্ন হয় এবং তাপ গতিরই একটি রূপ। তাদের এই মতবাদ হতেই বস্তুত তাপগতিবিদ্যার সূত্রপাত। **পদার্থবিজ্ঞানের যে শাখা তাপ ও যান্ত্রিক শক্তির পরস্পর রূপান্তর ও সম্পর্ক নিয়ে আলোচনা করে তাকে তাপগতিবিদ্যা (Thermodynamics) বলে।**

তাপগতিবিদ্যার সূত্রাবলি আলোচনার পূর্বে তাপগতি সম্পর্কীয় কয়েকটি রাশির সংজ্ঞা আমাদের জানা প্রয়োজন।

**(ক) তাপগতীয় ব্যবস্থা বা সিস্টেম (Thermodynamic system) : তাপগতীয় ব্যবস্থা বা সিস্টেম বলতে তল বা বেষ্টনী দ্বারা সীমাবদ্ধ কোনো নির্দিষ্ট পরিমাণ বস্তুকে বুঝায় যেখানে তাপগতীয় চলরাশি (চাপ, আয়তন, তাপমাত্রা) পরিমাপ করা যায়।** যেমন একটি পিস্টনযুক্ত সিলিন্ডারে অথবা একটি বেলুনে আবদ্ধ গ্যাসকে আমরা তাপগতীয় ব্যবস্থা বা সিস্টেম বলে থাকি। কিন্তু ঢাকনাবিহীন হাঁড়িতে পানি ফোটানো হলে তাকে সিস্টেম বলা হয় ~~না~~। Open System

**(খ) পরিপার্শ্ব (Surroundings) : একটি ব্যবস্থার আশেপাশের সব কিছুকে বলা হয় পরিপার্শ্ব।** যেমন পিস্টন ও সিলিন্ডারের আশেপাশের বায়ু হলো এর পরিপার্শ্ব। অন্যভাবে বলা যায়, **কোনো নির্দিষ্ট ব্যবস্থার সাথে শক্তি বিনিময়ে সক্ষম যেকোনো ব্যবস্থাকে ওই ব্যবস্থার পরিপার্শ্ব বলে।**

**(গ) তাপগতীয় স্থানাঙ্ক (Thermodynamic co-ordinates) : যেসব রাশির মান কোনো ব্যবস্থার অবস্থা নির্ধারণ করে সেগুলোকে ব্যবস্থার তাপগতীয় স্থানাঙ্ক বলে।**

যেমন সিলিন্ডারে আবদ্ধ গ্যাস হলো ব্যবস্থা এবং গ্যাসের অবস্থার বৈশিষ্ট্য নির্দেশ করে এর চাপ, আয়তন ও পরম তাপমাত্রা। তাই চাপ, আয়তন ও পরম তাপমাত্রাকে তাপগতীয় স্থানাঙ্ক বলে।

**(ঘ) সাম্যাবস্থা (Equilibrium) : কোনো বিচ্ছিন্ন ব্যবস্থার চূড়ান্ত অবিচল (steady) অবস্থাকে তাপগতীয় সাম্যাবস্থা বলে।** সাম্যাবস্থায় ব্যবস্থার সকল বিন্দুতে তাপগতীয় স্থানাঙ্ক অর্থাৎ চাপ, আয়তন, তাপমাত্রার মান সমান।

**(ঙ) তাপগতীয় প্রক্রিয়া (Therodynamic process) : কোনো ব্যবস্থার তাপগতীয় স্থানাঙ্কসমূহের যেকোনো পরিবর্তনকে তাপগতীয় প্রক্রিয়া বলা হয়।**

**(চ) অভ্যন্তরীণ বা অন্তস্থ শক্তি (Internal energy) : কোনো সিস্টেমের মধ্যে যে শক্তি অন্তর্নিহিত বা সুপ্ত অবস্থায় থাকে যা পরিবেশ পরিস্থিতিতে বহিঃপ্রকাশ ঘটায় তাকে অভ্যন্তরীণ বা অন্তস্থ শক্তি বলে।** সিস্টেমে তাপ প্রয়োগ করলে অভ্যন্তরীণ শক্তি বৃদ্ধি পায়। আর তাপ প্রয়োগ না করলে অভ্যন্তরীণ শক্তি ধ্রুব (constant) থাকে। কোনো বস্তুর অভ্যন্তরীণ শক্তি নির্ভর করে চাপ, আয়তন এবং তাপমাত্রার সাথে কিছু ভৌত ধর্ম; যেমন আপেক্ষিক তাপ, প্রসারণ সহগ ইত্যাদির ওপর। MAT(22-23)

বিজ্ঞানী জুল সর্বপ্রথম কাজ ও তাপের মধ্যে সম্পর্ক স্থাপন করেন এবং সম্পর্কটি সূত্রাকারে প্রকাশ করেন। তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্র ব্যবহার করে সিস্টেমে সম্পাদিত কাজ, অভ্যন্তরীণ শক্তি নির্ণয় করা যায়। একে **জুলের মতবাদ** বলে। বিজ্ঞানী জুল নিম্নলিখিত উপায়ে তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্র বিবৃত করেন।

**সূত্র : যখন কাজ সম্পূর্ণভাবে তাপে বা তাপ সম্পূর্ণভাবে কাজে রূপান্তরিত হয় তখন কাজ ও তাপ পরস্পরের সমানুপাতিক হয়।**

RMDAC

**ব্যাখ্যা :** যদি W পরিমাণ কাজ সম্পূর্ণরূপে তাপে পরিণত হওয়ায় Q পরিমাণ তাপ উৎপন্ন হয়, তবে তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্রানুসারে, $W \propto Q$

বা, $W = JQ$ ... ... ... (1.2)

এখানে J একটি সমানুপাতিক ধ্রুবক। একে **তাপের যান্ত্রিক সমতা** (mechanical equivalent of heat) বা **জুল তুল্যাঙ্ক** (Joule's equivalent) বলে।

**J-এর সংজ্ঞা :** $Q = 1$ হলে $W = J$। সুতরাং J-এর নিম্নোক্ত সংজ্ঞা দেওয়া যায়।

**একক তাপ উৎপন্ন করতে যে পরিমাণ কাজ করতে হয় তাকেই তাপের যান্ত্রিক তুল্যাঙ্ক বা সমতা বলে।**

**J-এর মান :** তাপের যান্ত্রিক তুল্যাঙ্কের মান তাপ ও কাজের এককের ওপর নির্ভর করে। C.G.S. পদ্ধতিতে $J = 4{\cdot}2 \times 10^7$ erg/cal এবং S.I. পদ্ধতিতে $J = 4{\cdot}2$ J/cal। ক্যালরির সঙ্গে আর্গ ও জুলের সম্পর্ক হলো 1 ক্যালরি = $4{\cdot}2 \times 10^7$ আর্গ $= 4{\cdot}2$ জুল।

MAT(24-25)

**তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্র শক্তির নিত্যতা সূত্রের একটি বিশেষ রূপ।** বিজ্ঞানী ক্লসিয়াস (Clausius) এই সূত্রকে সাধারণভাবে প্রকাশ করেন। তাঁর মতে তাপশক্তি অন্য কোনো শক্তিতে রূপান্তরিত হলে কিংবা অন্য কোনো শক্তি তাপশক্তিতে রূপান্তরিত হলে সিস্টেমের মোট শক্তির পরিমাণ একই থাকে। একে **ক্লসিয়াসের মতবাদ** বলে। বিজ্ঞানী **ক্লসিয়াস** নিম্নলিখিত উপায়ে তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্রকে বিবৃত করেন।

**সূত্র : যখন কোনো ব্যবস্থায় (system) তাপ সরবরাহ করা হয় বা ব্যবস্থা কর্তৃক তাপ গৃহীত হয়, তখন এর কিছু অংশ অভ্যন্তরীণ শক্তি বৃদ্ধি করতে অর্থাৎ তাপমাত্রা বৃদ্ধি করতে এবং অবশিষ্ট অংশ বাহ্যিক কাজ সম্পাদনে ব্যয় হয়।** অর্থাৎ, প্রদত্ত তাপ = অভ্যন্তরীণ শক্তি বৃদ্ধি + বাহ্যিক কাজ বা $dQ = dU + dW$।

**অনুসন্ধানমূলক কাজ :** জলপ্রপাতের পানি ওপর হতে নিচে পড়লে নিচের পানির উষ্ণতা ওপরের পানির তুলনায় সামান্য বেশি হয়—ব্যাখ্যা কর।

ওপরের পানির স্থিতিশক্তি নিচে থাকা পানির তুলনায় বেশি। ওপর হতে পানি নিচে পড়ার সময় পানির এই স্থিতিশক্তি গতিশক্তিতে রূপান্তরিত হতে থাকে। ভূপৃষ্ঠ স্পর্শ করার মুহূর্তে পানির গতিশক্তি কিছুটা তাপশক্তি ও শব্দশক্তিতে রূপান্তরিত হয়। এই তাপশক্তি অর্জনের জন্যই নিচের পানির উষ্ণতা সামান্য বৃদ্ধি পায়।

**কাজ :** 10 kg ভরের একটি বস্তু 400 m ওপর থেকে ভূমিতে পড়ল। সমস্ত শক্তি তাপে রূপান্তরিত হলে কত ক্যালরি তাপ উৎপন্ন হবে ?

বস্তুর প্রাথমিক স্থিতিশক্তি ভূমি স্পর্শ করার মুহূর্তের গতিশক্তির সমান। বস্তুটি ভূমি আঘাত করার পর এর গতিশক্তি তাপে পরিণত হয়।

সুতরাং উৎপন্ন তাপ, $Q = \dfrac{W}{J} = \dfrac{mgh}{J}$

$$\therefore \quad Q = \frac{10 \times 9{\cdot}8 \times 400}{4{\cdot}2} = 9333{\cdot}3 \text{ cal}$$

## ১.২.২ তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্রের তাৎপর্য
**Significance of the first law of thermodynamics**

তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্রের নিম্নলিখিত তাৎপর্য রয়েছে :

(১) এটি তাপ ও কাজের মধ্যে সম্পর্ক স্থাপন করে। DAT(16-17)

(২) এই সূত্র অনুযায়ী নির্দিষ্ট পরিমাণ কাজ পেতে হলে নির্দিষ্ট পরিমাণ তাপের প্রয়োজন অথবা নির্দিষ্ট পরিমাণ তাপ পেতে হলে নির্দিষ্ট পরিমাণ কাজ সম্পাদন করা প্রয়োজন।

(৩) কোনো কিছু ব্যয় না করে কাজ বা শক্তি পাওয়া অসম্ভব।

(৪) কাজ ও তাপ একে অপরের সমতুল্য।

(৫) এটি শক্তির সংরক্ষণ সূত্র ছাড়া আর কিছুই নয়। যেকোনো ব্যবস্থায় সম্পন্ন কাজ ও অভ্যন্তরীণ শক্তির পরিবর্তনের সমষ্টি সর্বদা প্রযুক্ত তাপের সমান।

(৬) এমন কোনো যন্ত্রের উদ্ভাবন হয়নি যা জ্বালানি বা শক্তি ব্যতিরেকে কাজ করতে সক্ষম অর্থাৎ অনন্ত গতিযুক্ত যন্ত্র (perpetual motion machine) উদ্ভাবন সম্ভব নয় বা শক্তি ব্যয় না করে কোনো কাজ পাওয়া সম্ভব নয়।

(৭) প্রথম সূত্র আমরা তাপ প্রবাহের দিক সম্পর্কে কিছুই জানতে পারি না। এটা সূত্রের সীমাবদ্ধতা।

### ১.২.৩ তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্রের ব্যাখ্যা : তাপ, অভ্যন্তরীণ শক্তি ও কাজের মধ্যে সম্পর্ক

**Explanation of the first law of thermodynamics : Relation among heat, internal energy and work**

তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্র ব্যবহার করে তাপ, অভ্যন্তরীণ শক্তি এবং কাজের মধ্যে সম্পর্ক স্থাপন করা যায়। এছাড়া বিভিন্ন তাপীয় পদ্ধতিতে কাজের পরিমাণ জানা যায়। সিস্টেমটি তাপ গ্রহণ করছে না তাপ হারাচ্ছে এ সম্পর্কেও ধারণা পাওয়া যায়। নিম্নের ব্যাখ্যাগুলো লক্ষ কর :

কোনো সংস্থা $dQ$ তাপ শোষণ করার জন্য এর অন্তর্নিহিত শক্তির পরিবর্তন $dU$ এবং কৃত কাজ $dW$ হলে ব্যবকলনীয় সমীকরণের সাহায্যে তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্রকে লেখা যায়—

$$\boxed{dQ = dU + dW} \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad (1.3)$$

বা, $dU = dQ - dW$

(1.3) নং সমীকরণটি শক্তির নিত্যতা সূত্রেরই একটি বিশেষ রূপ। সমীকরণ (1.3) হলো তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্রের গাণিতিক রূপ। এটি সকল বস্তুর ক্ষেত্রেই প্রযোজ্য।

সমীকরণ (1.3)-এ $dQ$, $dU$ এবং $dW$ রাশিগুলি নিম্নের শর্ত সাপেক্ষে ধনাত্মক এবং ঋণাত্মক হতে পারে।

* শর্তসমূহ :

(i) $dQ$ ধনাত্মক হবে যদি সিস্টেমে তাপ সরবরাহ করা হয় বা সিস্টেম তাপ গ্রহণ করে এবং ঋণাত্মক হবে যদি সিস্টেম তাপ হারায় বা সিস্টেম হতে তাপ পরিপার্শ্বে গমন করে।

(ii) সিস্টেমের অভ্যন্তরীণ শক্তি বৃদ্ধি পেলে $dU$ ধনাত্মক এবং শক্তি হ্রাস পেলে $dU$ ঋণাত্মক হবে।

(iii) সিস্টেমের দ্বারা পরিপার্শ্বের ওপর কাজ সম্পাদিত হলে $dW$ ধনাত্মক এবং পরিপার্শ্ব সিস্টেমের ওপর কাজ করলে $dW$ ঋণাত্মক হবে।

### তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্র শক্তির নিত্যতা সূত্রের একটি বিশেষ রূপ

**First law of thermodynamics is a special form of the principle of energy conservation**

বিজ্ঞানী ক্লসিয়াসের মতে, কোনো সিস্টেমে তাপশক্তি অন্য কোনো শক্তিতে রূপান্তরিত হলে বা অন্য কোনো শক্তি তাপশক্তিতে রূপান্তরিত হলে সিস্টেমের মোট শক্তির পরিমাণ একই হবে। অর্থাৎ, তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্রটি শক্তির নিত্যতা সূত্রের একটি বিশেষ রূপ।

যখন কোনো সিস্টেমে তাপ প্রয়োগ করা হয়, তখন তার কিছু অংশ বস্তুর অভ্যন্তরীণ শক্তি বৃদ্ধি করে এবং বাকি অংশ পরিবেশের ওপর বাহ্যিক কার্য সম্পাদন করে। অর্থাৎ, শক্তির কোনো অপচয় হয় না। এক্ষেত্রে $\Delta Q = \Delta U + \Delta W$ হয়।

### তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্রের সীমাবদ্ধতা Reading

**Limitations of the first law of thermodynamics**

তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্রের নিম্নোক্ত সীমাবদ্ধতা রয়েছে :

১। উষ্ণ বস্তু হতে তাপ শীতল বস্তুতে প্রবাহিত হলেও শীতল বস্তু হতে তাপ কখনই উষ্ণ বস্তুতে যেতে পারে না। যদিও শীতল বস্তু হতে উষ্ণ বস্তুতে তাপ যাওয়ার বিষয়টি তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্র বা শক্তির সংরক্ষণ সূত্র মেনে চলে। কিন্তু বাস্তবে এই ঘটনা কখনই ঘটে না।

২। কোনো সিস্টেমে প্রযুক্ত তাপের কিছু অংশ কাজে পরিণত হয়; কিন্তু পুরোটাই কাজে পরিণত হবে কি না বা হতে পারে কি না তা প্রথম সূত্র থেকে জানা যায় না।

৩। এই সূত্র অনুসারে তাপ প্রবাহের দিক সম্পর্কে কোনো ধারণা পাওয়া যায় না।

তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্রের এই সীমাবদ্ধতার জন্য তাপগতিবিদ্যার আরও একটি সূত্রের প্রয়োজন হয়। সেটিই হলো তাপগতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্র।

### ১.২.৪ তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্রের ব্যবহার

**Applications of the first law of thermodynamics**

১. **সমোষ্ণ প্রক্রিয়ার ক্ষেত্রে তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্রের ব্যবহার**

**Use of the first law of thermodynamics in isothermal process**

যে প্রক্রিয়ায় কোনো সিস্টেমের তাপমাত্রা স্থির থাকে; কিন্তু চাপ ও আয়তন পরিবর্তিত হয় তাকে সমোষ্ণ প্রক্রিয়া বলে। এই প্রক্রিয়ায় সিস্টেমের অন্তস্থ শক্তির কোনো পরিবর্তন হয় না।

তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্রকে গাণিতিকভাবে লেখা যায়,

$dQ = dU + dW$

সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় তাপমাত্রা স্থির থাকে, ফলে অন্তর্নিহিত বা অন্তস্থ শক্তি অপরিবর্তিত থাকে।

সুতরাং $dU = 0$

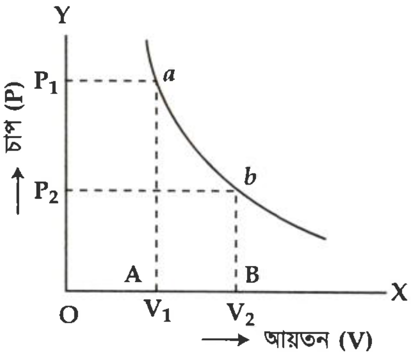
অতএব, সমীকরণ (1.3)-কে লেখা যায়,

$$dQ = 0 + dW = dW \qquad \ldots \qquad \ldots \qquad \ldots \qquad (1.4)$$

অর্থাৎ, **সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় সিস্টেম বা ব্যবস্থা কর্তৃক সম্পাদিত কাজ সিস্টেমে সরবরাহকৃত বা গৃহীত তাপশক্তির সমান। সমীকরণ (1.4) সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্রের গাণিতিক রূপ।**

সমোষ্ণ প্রক্রিয়ার ক্ষেত্রে, $n$ মোল গ্যাসের জন্য, $PV = nRT$

বা, $P = \dfrac{nRT}{V}$



চিত্র ১·২

কোনো গ্যাসের আয়তন $V_1$ থেকে $V_2$-তে পরিবর্তনের জন্য কৃত কাজ,

$$W = \int_{V_1}^{V_2} PdV = \int_{V_1}^{V_2} \frac{nRTdV}{V} = nRT \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V}$$

$$= nRT \left[ \ln V \right]_{V_1}^{V_2} = nRT \ln \left( \frac{V_2}{V_1} \right)$$

যেহেতু সমোষ্ণ পরিবর্তনের ক্ষেত্রে অভ্যন্তরীণ শক্তির পরিবর্তন $\Delta U = 0$, কাজেই $dW = dQ$ বা $W = Q$

$$\text{বা,} \quad W = Q = nRT \ln \left( \frac{V_2}{V_1} \right) \qquad \ldots \qquad \ldots \qquad (1.5)$$

এই কাজ নির্দেশক চিত্র ১·২-এ $aABb$ ক্ষেত্রের ক্ষেত্রফলের সমান।

সুতরাং নির্দেশক চিত্রের ক্ষেত্রফল হতে নির্ণেয় কাজ, $W = \int_{V_1}^{V_2} PdV = aABb$ ক্ষেত্রের ক্ষেত্রফলের সমান।

**কাজ:** কোনো ব্যবস্থা ধ্রুব আয়তনে 500 J তাপ বর্জন করে। ব্যবস্থাটির অন্তস্থ শক্তির পরিবর্তন নির্ণয় কর। ফলাফল ব্যাখ্যা কর।

$$dQ = dU + dW = dU + PdV$$

$$\text{বা,} \quad dU = dQ - PdV$$

$\therefore \quad dU = -500\text{ J} + 0 \quad [\because dQ = -500\text{ J}$ এবং $dV = 0]$

$= -500\text{ J}$ [অন্তস্থ শক্তি ঋণাত্মক হওয়ার অর্থ সিস্টেমের অন্তস্থ শক্তি হ্রাস পায়]

## ২. রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ার ক্ষেত্রে তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্রের ব্যবহার
### Use of the first law of thermodynamics in adiabatic process

**যে প্রক্রিয়ায় কোনো সিস্টেমের তাপ ধ্রুব থাকে; কিন্তু চাপ ও আয়তন পরিবর্তিত হয় তাকে রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়া বলে।** রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায় তাপের আদান-প্রদান হয় না। তাই কোনো গ্যাসের রুদ্ধতাপীয় প্রসারণের ক্ষেত্রে, $dQ = 0$। সুতরাং

সমীকরণ (1.3) হতে পাই,

$$dQ = 0 = dU + dW$$

$$\text{বা,} \quad dU = -dW \qquad \ldots \qquad \ldots \qquad \ldots \qquad (1.6)$$

$$\text{বা,} \quad dW = -dU$$

MAT(22-23)

রুদ্ধতাপীয় প্রসারণের সময় সিস্টেম কর্তৃক সম্পাদিত কাজ সিস্টেমের অভ্যন্তরীণ শক্তি দ্বারা সম্পাদিত হয় বলে সিস্টেমের অভ্যন্তরীণ শক্তি তথা তাপমাত্রা হ্রাস পায় অর্থাৎ সিস্টেম শীতল হয়। পক্ষান্তরে **রুদ্ধতাপীয় সংকোচনে সিস্টেম উষ্ণ হয়। এক্ষেত্রে বাইরে থেকে শক্তি সরবরাহ করে কাজ সম্পন্ন করতে হয়।**

কোনো গ্যাসের প্রাথমিক অন্তর্নিহিত শক্তি $U_1$ এবং চূড়ান্ত অন্তর্নিহিত শক্তি $U_2$ হলে, সমীকরণ (1.6)-কে লেখা যায়,

$$dU = U_2 - U_1 = -dW \qquad \ldots \qquad \ldots \qquad \ldots \qquad (1.7)$$

$\therefore \quad U_2 < U_1$

অর্থাৎ **রুদ্ধতাপীয় প্রসারণের সময় বাহ্যিক কাজ করার জন্য অন্তর্নিহিত শক্তি হ্রাস পায়, ফলে তাপমাত্রাও হ্রাস পায়।**

অনুরূপভাবে, রুদ্ধতাপীয় সংকোচন বা সংরক্ষণের ক্ষেত্রেও $dQ = 0$ হয়। সংকোচনের ক্ষেত্রে সিস্টেমের ওপর কাজ করা হয় বলে W ঋণাত্মক। সুতরাং সমীকরণ (1.6) হতে পাই,

$$dU = -(-dW) = dW \qquad \ldots \qquad \ldots \qquad \ldots \qquad (1.8)$$

বা, $U_2 - U_1 = dW$, এখানে $U_1$ ও $U_2$ যথাক্রমে সিস্টেমের প্রাথমিক ও চূড়ান্ত অন্তর্নিহিত শক্তি।

$\therefore \quad U_2 > U_1$

**অর্থাৎ রুদ্ধতাপীয় সংকোচনের সময় গ্যাসের অভ্যন্তরীণ শক্তি বৃদ্ধি পায়, ফলে গ্যাসের তাপমাত্রা বৃদ্ধি পায়। সমীকরণ (1.6) ও (1.8) রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায় তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্রের গাণিতিক রূপ।**

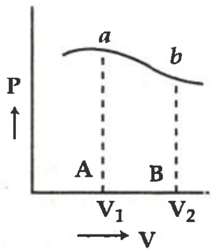
যেহেতু রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায় সিস্টেমে তাপের কোনো আদান প্রদান হয় না, তাই $dQ = 0$। অতএব তাপগতি-বিদ্যার প্রথম সূত্র থেকে পাই,

$$0 = dU + dW$$

$$\therefore \quad dW = -dU$$

প্রারম্ভিক অবস্থায় যদি কোনো গ্যাসের চাপ, আয়তন ও তাপমাত্রা যথাক্রমে $P_1, V_1$ ও $T_1$ এবং চূড়ান্ত অবস্থায় এদের মান $P_2, V_2$ ও $T_2$ হয় তাহলে প্রারম্ভিক থেকে চূড়ান্ত অবস্থায় যেতে কৃত কাজ,

$$W = \int_{V_1}^{V_2} PdV$$



চিত্র ১·৩

রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তনের ক্ষেত্রে $PV^\gamma =$ ধ্রুবক

$$\therefore \quad P = \frac{\text{ধ্রুবক}}{V^\gamma} = \frac{K}{V^\gamma}$$

$$\text{সুতরাং } W = \int_{V_1}^{V_2} \frac{K}{V^\gamma} dV = K \int_{V_1}^{V_2} V^{-\gamma} dV = K \left[\frac{V^{-\gamma+1}}{-\gamma+1}\right]_{V_1}^{V_2}$$

$$= K\left[\frac{V^{1-\gamma}}{1-\gamma}\right]_{V_1}^{V_2} = \frac{K}{1-\gamma}\left[V_2^{1-\gamma} - V_1^{1-\gamma}\right] = \frac{1}{1-\gamma}\left[KV_2^{1-\gamma} - KV_1^{1-\gamma}\right]$$

$$= \frac{1}{1-\gamma}\left[P_2V_2^\gamma V_2^{1-\gamma} - P_1V_1^\gamma V_1^{1-\gamma}\right] \qquad [\because P_1V_1^\gamma = P_2V_2^\gamma = K]$$

$$= \frac{1}{1-\gamma}\left[P_2V_2 - P_1V_1\right] = \frac{1}{\gamma-1}\left[P_1V_1 - P_2V_2\right]$$

$$= \frac{1}{\gamma-1}\left[RT_1 - RT_2\right] \qquad [\because PV = RT]$$

$$W = \frac{R}{\gamma-1}\left[T_1 - T_2\right]$$

এই কাজ নির্দেশক চিত্র ১·৩-এর $aABb$ ক্ষেত্রের ক্ষেত্রফলের সমান।

**কাজ 1:** রুদ্ধতাপীয় প্রসারণের সময় সিস্টেমের অন্তস্থ শক্তি হ্রাস পায়। কিন্তু রুদ্ধতাপীয় সংকোচনের সময় সিস্টেমের উষ্ণতা বৃদ্ধি পায় কেন ?

তাপগতীবিদ্যার ১ম সূত্র অনুযায়ী $\Delta Q = dU + dW$

রূদ্ধতাীয় প্রক্রিয়ায় $dQ = 0$

সুতরাং $dU + dW = 0$ বা $dU = -dW$

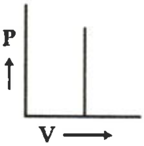
সিস্টেম সংকুচিত হওয়ার জন্য $dW$ ঋণাত্মক এবং $dU$ ধনাত্মক হয়।

রুদ্ধতাপীয় প্রসারণের সময় সিস্টেম কর্তৃক সম্পাদিত কাজ সিস্টেমের অন্তস্থ শক্তি দ্বারা সম্পাদিত হয় বলে সিস্টেমের অন্তস্থ শক্তি হ্রাস পায়। অর্থাৎ সিস্টেম শীতল হয়। পক্ষান্তরে রুদ্ধতাপীয় সংকোচনের সময় বাইরে থেকে শক্তি সরবরাহ করে সিস্টেমের ওপর কাজ সম্পাদিত হয় বলে সিস্টেমের অন্তস্থ শক্তি বৃদ্ধি পায়, অভ্যন্তরীণ বা অন্তস্থ শক্তি তাপমাত্রার উপর নির্ভলশীল। ফলে সিস্টেমের তাপমাত্রাও বৃদ্ধি পায়।

**কাজ II:** গাড়ির টায়ার বিস্ফোরণের সময় কী ধরনের তাপগতীয় প্রক্রিয়া সংঘটিত হয়? ব্যাখ্যা কর।

গাড়ির টায়ার বিস্ফোরণের সময় বায়ুর গতি অনেক বেশি থাকে এবং বিস্ফোরণটি অনেক দ্রুত সময়ে সংগটিত হয়। বিস্পোরণটি এত দ্রুত সংঘটিত হয় যে এর মধ্যে তাপের কোনো আদানপ্রদান হয় না। কাজেই টায়ার বিস্পোরণ একটি রূদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়া।

### ৩. সমআয়তন বা ধ্রুব আয়তন প্রক্রিয়ার ক্ষেত্রে তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্রের ব্যবহার
### Use of the first law of thermodynamics in isochoric system



চিত্র ১·৪

**যে প্রক্রিয়ায় কোনো সিস্টেমের আয়তন ধ্রুব থাকে তাকে ধ্রুব আয়তন প্রক্রিয়া বলে।** এই প্রক্রিয়ায় তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্র অনুযায়ী, $dV = 0$; অতএব কাজের পরিমাণ, $dW = PdV = 0$ অর্থাৎ সমআয়তন প্রক্রিয়ায় তাপগতির প্রথম সূত্রে অর্থাৎ $dQ = dU + PdV$ সমীকরণে $PdV = 0$ বসিয়ে পাই, $dQ = dU$। $P - V$ লেখচিত্র ১·৪ সমআয়তন প্রক্রিয়া নির্দেশ করে। **সমআয়তন প্রক্রিয়ায় কৃত কাজ শূন্য।**

কাজেই **সমআয়তন প্রক্রিয়ায় সিস্টেম প্রদত্ত তাপ সম্পূর্ণটাই অভ্যন্তরীণ শক্তি বৃদ্ধি কাজে ব্যয় হয়।**

অর্থাৎ **এই প্রক্রিয়ায় অন্তস্থ শক্তির বৃদ্ধি সরবরাহকৃত তাপশক্তির সমান।** অন্যভাবে বলা যায় **সমআয়তন প্রক্রিয়ায় সিস্টেমে প্রদত্ত তাপ পুরোটাই অভ্যন্তরীণ শক্তি বৃদ্ধির কাজে ব্যবহৃত হয়।**

**কাজ :** সমআয়তন প্রক্রিয়ায় সিস্টেম প্রদত্ত তাপ সম্পূর্ণটাই অভ্যন্তরীণ শক্তি বৃদ্ধির কাজে ব্যবহৃত হয়। ব্যাখ্যা কর।

সিস্টেমে প্রদত্ত তাপ $\Delta Q$ সিস্টেম দ্বারা কৃত কাজ $\Delta W$ এবং অভ্যন্তরীণ শক্তি বৃদ্ধি $\Delta U$ হলে,

$\Delta Q = \Delta U + \Delta W = \Delta U + PdV$

সমআয়তন প্রক্রিয়ায় আয়তনের কোনো পরিবর্তন হয় না। অর্থাৎ $dV = 0$ হয়।

কাজেই $\Delta Q = \Delta U$

তাই বলা যায় সিস্টেমের প্রদত্ত তাপ সম্পূর্ণটাই অভ্যন্তরীণ শক্তি বৃদ্ধিতে ব্যবহৃত হয়।

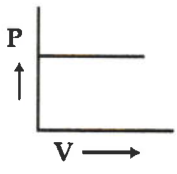
### ৪. সমচাপ প্রক্রিয়ার ক্ষেত্রে তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্রের ব্যবহার
### Use of the first law of thermodynamics in isobaric system

**যে প্রক্রিয়ায় কোনো সিস্টেমের চাপ ধ্রুব থাকে তাকে ধ্রুব চাপ প্রক্রিয়া বলে।** সমচাপ বা স্থির চাপে গ্যাসের আয়তন $V_1$ থেকে $V_2$ তে পরিবর্তিত হলে গ্যাস কর্তৃক মোট কৃত কাজ,

$$W = \int dW = \int_{V_1}^{V_2} PdV$$

$$= P\int_{V_1}^{V_2} dV = P[V_2 - V_1]$$

$$= P\Delta V$$



চিত্র ১·৫

অর্থাৎ কৃত কাজ = চাপ × আয়তনের পরিবর্তন। সমচাপ প্রক্রিয়ায় $P - V$ লেখচিত্র ১·৫। ইহা X-অক্ষের বা V এর সমান্তরাল একটি সরল রেখা।

**জানার বিষয় :**

I. সমচাপ প্রক্রিয়ায় কৃত কাজ $dW = PdV$ অর্থাৎ চাপ এবং আয়তনের পরিবর্তনের গুণফলের সমান।

II. সমআয়তন প্রক্রিয়ায় আয়তনের পরিবর্তন শূন্য হওয়ায় কৃত কাজ $dW = 0$ অর্থাৎ কৃত কাজ শূন্য।

III. সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় কৃত কাজ সরবরাহকৃত তাপশক্তির সমান। অর্থাৎ $dW = dQ$ বা $W = Q$।

IV. রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায় $dW = -dU$। অর্থাৎ কৃত কাজ অভ্যন্তরীণ শক্তি হ্রাস বা বৃদ্ধির সমান।

## গাণিতিক উদাহরণ ১.২

১। কোনো সংস্থা পরিবেশ থেকে 800 J তাপশক্তি শোষণ করায় এর অন্তস্থ শক্তি 500 J বৃদ্ধি পেল। সংস্থা কর্তৃক পরিবেশের ওপর সম্পাদিত কাজের পরিমাণ নির্ণয় কর। [কু. বো. ২০২২ (মান ভিন্ন), ২০০৫; Admission Test : KU 2011-12; JU 2018-19]

আমরা জানি,

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta W$$
$$\therefore \Delta W = \Delta Q - \Delta U$$
$$= 800\text{ J} - 500\text{ J} = 300\text{ J}$$

এখানে,

$\Delta U = 500$ J
$\Delta Q = 800$ J
$\Delta W = ?$

২। পিস্টনযুক্ত একটি সিলিন্ডারে কিছু গ্যাস আবদ্ধ আছে। গ্যাসের চাপ 400 Pa-এ স্থির রেখে সিস্টেমে ধীরে ধীরে 800 J তাপশক্তি সরবরাহ করায় 1200 J কাজ সম্পাদিত হয়। গ্যাসের আয়তন এবং অন্তস্থ শক্তির পরিবর্তন নির্ণয় কর। [সি. বো. ২০২৩; কু. বো. ২০০৯; চ. বো. ২০০১; JU Admission Test, 2014-15 (মান ভিন্ন)]

আমরা পাই, $\Delta W = P(V_2 - V_1)$

$$\therefore 1200 = 400\,(V_2 - V_1)$$
$$\therefore (V_2 - V_1) = \frac{1200}{400} = 3\text{ m}^3$$

আবার, $\Delta Q = \Delta U + \Delta W$

$$\therefore 800 = \Delta U + 1200$$
$$\therefore \Delta U = 800 - 1200 = -400\text{ J}$$

এখানে,

$P = 400$ Pa
$\Delta W = 1200$ J
$\Delta Q = 800$ J
$\Delta V = (V_2 - V_1) = ?$
$\Delta U = ?$

৩। $1 \times 10^{-6}$ m³ আয়তনের পানিকে 1 বায়ুমণ্ডলীয় চাপে বাষ্পে পরিণত করলে আয়তন $1671 \times 10^{-6}$ m³ হয়। এর ফলে কৃত কাজ ও অভ্যন্তরীণ শক্তি বৃদ্ধি নির্ণয় কর। (পানির বাষ্পীভবনের সুপ্ততাপ = $2.268 \times 10^6$ Jkg⁻¹ এবং 1 বায়ুমণ্ডলীয় চাপ = $1.013 \times 10^5$ Nm⁻²)

এখানে, আয়তন বৃদ্ধি,

$$\Delta V = V_2 - V_1 = (1671 - 1) \times 10^{-6}\text{ m}^3$$
$$= 1670 \times 10^{-6}\text{ m}^3$$

কৃত কাজ,

$$\Delta W = P\Delta V = 1.013 \times 10^5 \times 1670 \times 10^{-6}$$
$$= 169.17\text{ J}$$

অভ্যন্তরীণ শক্তি বৃদ্ধি,

$$\Delta V = \Delta Q - \Delta W = mL_V - \Delta W$$
$$= 1 \times 10^{-3} \times 2.268 \times 10^6 - 169.17$$
$$= 2.268 \times 10^3 - 169.17 = 2098.8\text{ J}$$

এখানে,

$V_1 = 1 \times 10^{-6}$ m³
$V_2 = 1671 \times 10^{-6}$ m³
$L_V = 2.268 \times 10^6$ Jkg⁻¹
$P = 1.013 \times 10^5$ Nm⁻²
$m = 1 \times 10^{-6} \times 10^3 = 1 \times 10^{-3}$ kg

৪। 1 kg পানিকে 1 atm চাপে বাষ্পে পরিণত করতে অন্তস্থ শক্তির পরিবর্তন নির্ণয় কর। (জলীয় বাষ্পের আয়তন = 1.67 m³, বরফ গলনের সুপ্ততাপ = $2.26 \times 10^6$ Jkg⁻¹)

আমরা জানি,

$$dQ = dU + dW$$
বা, $$dU = dQ - dW = dQ - PdV$$
$$= 2.26 \times 10^6 - 1.013 \times 10^5 \times (1.67 - 0.001)$$
$$= 2.0911 \times 10^6\text{ J}$$

এখানে,

$m = 1$ kg
পানির আয়তন = $\frac{m}{\rho} = \frac{1}{10^3} = 1 \times 10^{-3}$ m³
জলীয় বাষ্পের আয়তন = 1.67 m³
চাপ, 1 atm = $1.013 \times 10^5$ Nm⁻²
$l_v = 2.26 \times 10^6$ Jkg⁻¹

৫। 25°C তাপমাত্রা ও $1 \times 10^5$ Nm⁻² চাপে একটি আদর্শ গ্যাসের আয়তন 0.05m³। স্থির চাপে গ্যাসটি উত্তপ্ত করায় এর আয়তন 0.06m³ হলো। (ক) বাহ্যিক সম্পাদিত কাজ ও (খ) গ্যাসের নতুন তাপমাত্রা নির্ণয় কর। [ঢা. বো. ২০২২ (মান ভিন্ন)]

(ক) আমরা জানি,

বাহ্যিক সম্পাদিত কাজ, $W = P\Delta V$

বা, $W = 1 \times 10^5 \times 0.01$
$= 1000$ J

এখানে,

চাপ, $P = 1 \times 10^5$ Nm⁻²
আয়তন পরিবর্তন, $\Delta V = (0.06 - 0.05)$ m³
$= 0.01$ m³

(খ) আমরা জানি,

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

বা, $T_2 = \frac{V_2 T_1}{V_1}$

$\therefore T_2 = \frac{0{\cdot}06 \times 298}{0{\cdot}05}$

$= 357{\cdot}6 \text{ K} = 357{\cdot}6 - 273$

$= 84{\cdot}6°C$

এখানে,
আদি আয়তন, $V_1 = 0{\cdot}05 \text{ m}^3$
চূড়ান্ত আয়তন, $V_2 = 0{\cdot}06 \text{ m}^3$
আদি তাপমাত্রা, $T_1 = 25°C = (273 + 25) \text{ K} = 298 \text{ K}$
নতুন তাপমাত্রা, $T_2 = ?$

**৬। একটি সিসার গুলি কত বেগে একটি অনমনীয় লক্ষ্যবস্তুকে আঘাত করলে গুলির তাপমাত্রা $1{\cdot}12°C$ বৃদ্ধি পাবে ? ধরে নও যে, আঘাতে উৎপন্ন তাপ শুধু গুলি দ্বারা শোষিত হয়েছে। [ সিসার আপেক্ষিক তাপ = $30 \text{ cal kg}^{-1} °C^{-1}$ এবং $J = 4{\cdot}2 \text{ J cal}^{-1}$]**

মনে করি, গুলির ভর $= m$ kg এবং নির্ণেয় বেগ $= v \text{ ms}^{-1}$

কৃত কাজ, $W = \frac{1}{2} mv^2$ এবং উৎপন্ন তাপ, $H = mst = m \times 30 \times 1{\cdot}12$ cal

আমরা জানি, $W = JH$

$\frac{1}{2} mv^2 = 4{\cdot}2 \times m \times 30 \times 1{\cdot}12$

$\therefore \quad v = \sqrt{2 \times 4{\cdot}2 \times 30 \times 1{\cdot}12} = 16{\cdot}8 \text{ ms}^{-1}$

**৭। একটি ধীর নিউট্রনের গতিশক্তি $0{\cdot}06\ eV$। এর বেগ কত? কত তাপমাত্রায় একটি গ্যাস অণুর গড় গতিশক্তি এই নিউট্রনের গতিশক্তির সমান হবে? ($m_n = 1{\cdot}675 \times 10^{-27}$ kg, $K = 1{\cdot}38 \times 10^{-23} \text{ Jk}^{-1}$)**

নিউট্রনের গতিশক্তি,

$E_k = \frac{1}{2} mv^2$

বা, $v = \sqrt{\frac{2E_k}{m}}$

$\therefore \quad v = \sqrt{\frac{2 \times 0{\cdot}06 \times 1{\cdot}6 \times 10^{-19}}{1{\cdot}67 \times 10^{-27}}}$

$= 3390 \text{ ms}^{-1}$

এখানে,
$E_k = 0{\cdot}06\ eV = 0{\cdot}06 \times 1{\cdot}6 \times 10^{-19}$ J
$m_n = 1{\cdot}675 \times 10^{-27}$ kg
$K = 1{\cdot}38 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$
$v = ?$

আবার, একটি গ্যাস অণুর গতিশক্তি $= \frac{3}{2} kT$

প্রশ্নানুসারে, $\frac{3}{2} kT = 0{\cdot}06\ eV = 0{\cdot}06 \times 1{\cdot}6 \times 10^{-19}$ J

বা, $T = \frac{0{\cdot}06 \times 1{\cdot}6 \times 10^{-19} \times 2}{3 \times 1{\cdot}38 \times 10^{-23}} = 4{\cdot}64$ K

**৮। 1·2 kg ভরের একটি বস্তু 1 km উচ্চতা হতে ভূমিতে পড়ে। যদি সম্পূর্ণ শক্তি তাপে রূপান্তরিত হয়, তবে উৎপন্ন তাপের পরিমাণ নির্ণয় কর। ($J = 4{\cdot}2 \text{ Jcal}^{-1}$)**

আমরা জানি কৃত কাজ,

$W = mgh = 1{\cdot}2 \times 9{\cdot}8 \times 10^3$

$= 11{\cdot}76 \times 10^3$ J

$\therefore$ উৎপন্ন তাপ, $H = \frac{W}{J}$

$\therefore \quad H = \frac{11{\cdot}76 \times 10^3}{4{\cdot}2} = 2{\cdot}8 \times 10^3$ cal

এখানে,
$m = 1{\cdot}2$ kg
$g = 9{\cdot}8 \text{ ms}^{-2}$
$h = 1 \text{ km} = 1000 \text{ m} = 10^3 \text{ m}$

**৯। 40 kg ভরের একটি জ্যোতিষ্কের বেগ পৃথিবীর বায়ুমণ্ডলের মধ্য দিয়ে অতিক্রমের সময় 25 km min$^{-1}$ থেকে 5 km min$^{-1}$-এ হ্রাস পায়। উৎপন্ন তাপ কেলরিতে বের কর।**

আমরা জানি কৃত কাজ,

$$W = \text{গতিশক্তির পরিবর্তন}$$
$$= \frac{1}{2}mu^2 - \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m(u^2 - v^2)$$
$$= \frac{1}{2} \times 40 \times \left(\frac{1000}{60}\right)^2 \times (25^2 - 5^2)$$
$$= \frac{20 \times 10^6 \times (625 - 25)}{36 \times (10)^2}$$
$$= \frac{20 \times 600 \times 10^6}{36 \times 10^2} = 3.3 \times 10^6 \text{ J}$$

এখানে,

$m = 40$ kg

প্রাথমিক বেগ, $u = 25 \text{ km min}^{-1} = \frac{25 \times 1000}{60} \text{ ms}^{-1}$

চূড়ান্ত বেগ, $v = 5 \text{ km min}^{-1} = \frac{5 \times 1000}{60} \text{ ms}^{-1}$

সুতরাং, উৎপন্ন তাপ, $H = \frac{W}{J} = \frac{3.3 \times 10^6}{4.2} \text{ cal} = 7.9 \times 10^5 \text{ cal}$

**১০। একটি 1500 W নিমজ্জিত হিটার 20 L পানিপূর্ণ পাত্রের তাপমাত্রা 20°C থেকে 40°C তাপমাত্রায় উত্তপ্ত করতে কত সময় লাগবে?**

আমরা জানি,

$W = JH$

বা, $Pt = JmS\theta$ [$\because H = mS\theta$; $W = Pt$]

$\therefore t = \frac{JmS\theta}{P}$

$= \frac{4.2 \times 20 \times 1000 \times 20}{1500}$

$= 1120 \text{ s} = 18.67 \text{ min}$

এখানে,

20 L পানির ভর, $m = 20$ kg

পানির আপেক্ষিক তাপ, $S = 1000 \text{ cal kg}^{-1}\text{K}^{-1}$

$\theta$ = তাপমাত্রা বৃদ্ধি = (40 — 20)°C = 20°C

হিটারের ক্ষমতা, P = 1500 watt

নির্ণেয় সময়, $t$ = ?

**১১। এক খণ্ড বরফ ওপর থেকে ভূমিতে পতিত হলো। এতে পতন শক্তির 50% তাপে রূপান্তরিত হওয়ায় বরফ খণ্ডটির এক চতুর্থাংশ গলে গেল। বরফ খণ্ডটি কত উচ্চতা হতে পতিত হয়েছিল নির্ণয় কর।**

**[বরফ গলনের সুপ্ত তাপ = 80000 cal kg$^{-1}$ এবং তাপের যান্ত্রিক সমতা = 4.2 J cal$^{-1}$]**

[ঢা. বো. ২০২২ (মান ভিন্ন); CKRUET Admission Test, 2020-21 (মান ভিন্ন)]

ধরি, বরফ খণ্ডটির ভর = $m$ kg এবং নির্ণেয় উচ্চতা = $h$ m

তা হলে পতনে কৃত কাজ = $mgh$

তাপ উৎপন্নে ব্যয়িত পতন শক্তি, $W = \frac{1}{2}mgh$ [$\because 50\% = \frac{1}{2}$]

উৎপন্ন তাপ, $H = \frac{W}{J} = \frac{mgh}{2J}$

আবার বরফ খণ্ডটির এক-চতুর্থাংশ গলতে প্রয়োজনীয় তাপ = $H = \frac{m}{4} \times L$

কিন্তু উৎপন্ন তাপেই বরফ খণ্ডটি গলেছে

$\therefore \frac{mgh}{2J} = \frac{m}{4} \times L$

বা, $h = \frac{JL}{2g} = \frac{4.2 \times 80000}{2 \times 9.80} \text{ m} = 17.14 \text{ km}$

**১২। 10 g ওজনের একটি লোহার পেরেককে কিছুক্ষণ একটি বার্ণারের শিখায় উত্তপ্ত করা হলো। উত্তপ্ত পেরেকটিকে 10°C তাপমাত্রার 100 g পানিতে ডুবানো হলো। এতে পানির তাপমাত্রা বৃদ্ধি পেয়ে 20°C হলো। পানিতে ডুবানোর পূর্বে পেরেকের তাপমাত্রা নির্ণয় কর। লোহার আপেক্ষিক তাপ 0.11 Kcal/kg°C।**

[BUET Admission Test, 2016–17]

আমরা জানি, গৃহীত তাপ,

$H = m_w S_w \Delta\theta = 0.1 \times 1 \times 10 = 1$ Kcal

পেরেক কর্তৃক বর্জিত তাপ,

$H = m_p S_p (\theta - 20)$

$= 0.01 \times 0.11 \times (\theta - 20)$

$\therefore 1 = 0.01 \times 0.11 \times (\theta - 20)$

$\therefore \theta = 929.09$°C

এখানে,

$m_w = 100 \text{ g} = 0.1$ kg

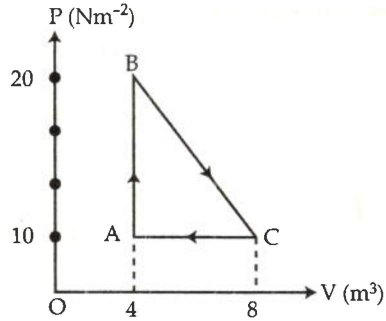
$m_p = 10 \text{ g} = 0.01$ kg

$S_p = 0.11$ Kcal/kg °C

$S_w = 1$ cal/kg °C

$\Delta\theta = (20 - 10)$ °C = 10°C

১৩।




**উপরের লেখচিত্রে $n = 1$ mole গ্যাসের জন্য P—V মোলের চক্রীয় প্রক্রিয়া দেখানো হয়েছে। B বিন্দুতে উৎস হতে 200 J তাপ গৃহীত হয়। (ক) CA এবং AB পথে মোট কৃত কাজ কত? (খ) BC পথে ও AB পথে অভ্যন্তরীণ শক্তির পরিবর্তন করা সম্ভব হবে কি? গাণিতিকভাবে যাচাই কর।**

(ক) CA পথে কৃত কাজ,

$W_{CA} = P\Delta V = P(V_2 - V_1)$
$= 10 \times (4 - 8) = 40$ J

AB পথে কৃত কাজ,

$W_{AB} = P\Delta V_{AB} = P \times 0 = 0$

∴ CA ও AB পথে মোট কাজ,

$W = W_{CA} + W_{AB}$
$= -40 + 0 = -40$J

এখানে, CA পথে
$V_1 = 8\,m^3$
$V_2 = 4\,m^3$
$P = 10\,Wm^{-2}$
AB পথে
$\Delta V_{AB} = 0$

(খ) চিত্রানুযায়ী B থেকে C-তে আসতে কৃত কাজ হবে BC দ্বারা আবদ্ধ ট্রপিজিয়ামের ক্ষেত্রফল। এর উচ্চতা, $h = V_C - V_A = 8 - 4 = 4m^3$

সমান্তরাল বাহুদ্বয়ের দৈর্ঘ্য যথাক্রমে 10 $Nm^{-2}$ ও 20 $Nm^{-2}$

∴ কৃত কাজ $dW = \frac{1}{2}(10 + 20) \times 4 = 60$ J

আবার, $dQ = dU + dW$ বা $dU = dQ - dW = 200 - 60 = 140$ J

## ১৩ তাপীয় সিস্টেম
### Thermal system

মনে কর, তাপ প্রয়োগে একটি গ্যাস ভর্তি সিলিন্ডারের সাথে যুক্ত একটি পিস্টনকে গতিশীল করা হলো। এক্ষেত্রে সিলিন্ডারযুক্ত পিস্টন একটি তাপীয় সিস্টেম। আর এর আশপাশের অন্য সকল বস্তু পরিবেশ বলে বিবেচিত হয়। দেখা যায় যে, তাপগতীয় ঘটনা বা সিস্টেমকে বর্ণনার জন্য তাপগতীয় স্থানাঙ্ক (thermodynamic co-ordinate) বা কয়েকটি গুরুত্বপূর্ণ রাশি যেমন চাপ (P), আয়তন (V) এবং তাপমাত্রা (T) এর প্রয়োজন হয়। **কোনো আবেষ্টনী দ্বারা আবদ্ধ কোনো নির্দিষ্ট পরিমাণ বস্তুকে তাপীয় ব্যবস্থা বা সিস্টেম হিসেবে ধরা হয়।** অন্যভাবে বলা যায়, **পরীক্ষা-নিরীক্ষার সময় আমরা জড় জগতের যে নির্দিষ্ট তাপীয় অংশ বিবেচনা করি তাকে তাপীয় সিস্টেম বলে।**

প্রত্যেক তাপীয় সিস্টেমের একটা নির্দিষ্ট আয়তন, ভর ও অন্তস্থ শক্তি থাকবে। তাপীয় সিস্টেম বিভিন্ন ধরনের হয়। যেমন—(১) উন্মুক্ত সিস্টেম (২) বন্ধ সিস্টেম (৩) বিচ্ছিন্ন সিস্টেম।

**উন্মুক্ত সিস্টেম** পরিবেশের সাথে ভর ও শক্তি উভয়ই বিনিময় করতে পারে।

**বন্ধ সিস্টেম** পরিবেশের সাথে শুধু শক্তি বিনিময় করতে পারে কিন্তু ভর বিনিময় করতে পারে না।

**বিচ্ছিন্ন সিস্টেম** পরিবেশ দ্বারা মোটেও প্রভাবিত হয় না। অর্থাৎ এক্ষেত্রে ভর ও শক্তি কিছুই বিনিময় করে না।

## তাপীয় সিস্টেমে বিভিন্ন প্রকার তাপগতীয় পরিবর্তন
### Different thermodynamical changes in thermal system

তাপগতিবিদ্যায় বিভিন্ন প্রকারের পরিবর্তন ঘটে। এই পরিবর্তন মোট চার প্রকারের; যথা—

(১) **সমোষ্ণ পরিবর্তন** (Isothermal change)
(২) **রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তন** (Adiabatic change)
(৩) **সমআয়তন পরিবর্তন** (Isochoric change) এবং
(৪) **সমচাপ পরিবর্তন** (Isobaric change)

এখানে আমরা সমোষ্ণ পরিবর্তন এবং রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তন আলোচনা করবো।

## ১.৩.১ সমোষ্ণ পরিবর্তন
### Isothermal change

এটি একটি পরীক্ষিত ঘটনা যে, কোনো গ্যাসে চাপ প্রয়োগ করে হঠাৎ সংকুচিত করলে কিছু তাপ উৎপন্ন হয়। ফলে গ্যাসের তাপমাত্রা বৃদ্ধি পায়। কিন্তু উৎপন্ন তাপকে তৎক্ষণাৎ অপসারণ করে ধীরে ধীরে চাপ বৃদ্ধি করলে তাপমাত্রার কোনো পরিবর্তন ঘটবে না।

আবার গ্যাসকে হঠাৎ প্রসারিত করলে তা বাহ্যিক চাপের বিরুদ্ধে কাজ করার সময় কিছু পরিমাণ তাপ হারাবে। ফলে এর তাপমাত্রা হ্রাস পাবে। কিন্তু গ্যাসকে যদি ধীরে ধীরে প্রসারিত করা হয় এবং বাইরে থেকে প্রয়োজনীয় তাপ সরবরাহ করা হয়, তবে গ্যাসের তাপমাত্রা স্থির থাকবে। এরূপ পরিবর্তনকে **সমোষ্ণ পরিবর্তন** বলা হয়। তাহলে দেখা যাচ্ছে যে, সমোষ্ণ পরিবর্তনে গ্যাসে কখনো তাপ সরবরাহ করে আবার কখনো গ্যাস হতে তাপ অপসারণ করে এর তাপমাত্রা সর্বদা স্থির রাখা যায়।

MAT(22-23)

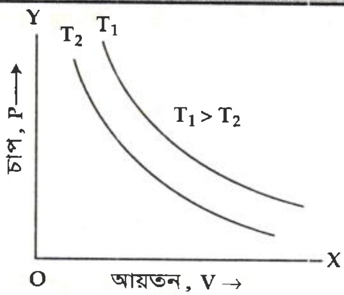
অর্থাৎ **যে পরিবর্তনে কোনো গ্যাসের চাপের ও আয়তনের পরিবর্তন হয়, কিন্তু তাপমাত্রা স্থির থাকে সেই পরিবর্তনকে সমোষ্ণ পরিবর্তন (isothermal change) বলে** এবং যে পদ্ধতিতে এই পরিবর্তন সংঘটিত হয় তাকে **সমোষ্ণ প্রক্রিয়া (isothermal process)** বলে।

সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় গ্যাসের চাপ ও আয়তনের সম্পর্ক বয়েলের সূত্র মেনে চলে। অর্থাৎ $P \propto \frac{1}{V}$

বা $PV =$ ধ্রুবক, এখানে $P$ ও $V$ যথাক্রমে চাপ ও আয়তন।

**পরিকল্পিত কাজ I :** সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় গ্যাসের চাপ ও আয়তনের সম্পর্ক বয়েলের সূত্র মেনে চলে। অর্থাৎ $P \propto \frac{1}{V}$ লেখচিত্রে সম্পর্কটি দেখাও এবং ব্যাখ্যা কর।

স্থির তাপমাত্রায় কোনো আদর্শ গ্যাসের আয়তন V-কে X-অক্ষ বরাবর এবং চাপ P-কে Y-অক্ষ বরাবর স্থাপন করে লেখচিত্র অঙ্কন করলে লেখটি আয়তাকার পরাবৃত্ত হবে [চিত্র ১.৬]। ভিন্ন তাপমাত্রায় একই আকৃতির ভিন্ন লেখ পাওয়া যায়। এই লেখগুলোকে সমোষ্ণ (Isothermal) লেখ বলা হয়।



চিত্র ১.৬

**কাজ II :** সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় অভ্যন্তরীণ শক্তির পরিবর্তন শূন্য কেন—ব্যাখ্যা কর।

সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় কোনো গ্যাসের তাপমাত্রা স্থির থাকে। আমরা জানি, কোনো গ্যাসের অন্তঃস্থ শক্তি তার তাপমাত্রার সমানুপাতিক। তাই গ্যাসের তাপমাত্রার পরিবর্তন না হওয়ায় সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় গ্যাসের অভ্যন্তরীণ শক্তির পরিবর্তন শূন্য হয়।

### সমোষ্ণ পরিবর্তনের শর্তসমূহ ***
### Conditions for isothermal change

(১) গ্যাসকে একটি সুপরিবাহী পাত্রে রাখতে হবে।
(২) পাত্রের চতুষ্পার্শ্বস্থ মাধ্যমের তাপগ্রাহিতা বা তাপধারণ ক্ষমতা উচ্চ হতে হবে।
(৩) চাপের পরিবর্তন ধীরে ধীরে সংঘটিত করতে হবে।
(৪) প্রয়োজনীয় তাপ গ্রহণ বা বর্জনের দ্বারা তাপমাত্রা স্থির থাকবে।

### সমোষ্ণ পরিবর্তনের বৈশিষ্ট্য Reading
### Characteristics of isothermal change

(১) তাপমাত্রা স্থির রেখে কোনো গ্যাসের চাপ ও আয়তনের পরিবর্তনকে সমোষ্ণ পরিবর্তন বলে।
(২) এই পরিবর্তনে প্রয়োজনমতো তাপ সরবরাহ অথবা গ্রহণ করতে হয়।
(৩) এটি একটি ধীর প্রক্রিয়া।
(৪) এই পরিবর্তনে পাত্রটি তাপের সুপরিবাহী হওয়া প্রয়োজন।
(৫) এই পরিবর্তনে পাত্রের চতুষ্পার্শ্বস্থ মাধ্যমের তাপগ্রাহিতা উচ্চ হতে হয়।
(৬) সমোষ্ণ পরিবর্তন বয়েল-এর সূত্র মেনে চলে অর্থাৎ $\boxed{PV = \text{ধ্রুবক}}$।
(৭) সমোষ্ণ লেখ অপেক্ষাকৃত কম খাড়া।

**কাজ I : গ্যাস প্রসারণে সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় কৃত কাজ সমচাপ প্রক্রিয়ায় কৃত কাজ অপেক্ষা বৃহত্তর—ব্যাখ্যা কর।**

কোনো সিস্টেমে গ্যাসের ক্ষুদ্র প্রসারণ $dV$ এবং স্থির চাপ P হলে সমচাপ প্রক্রিয়ায় গ্যাস কর্তৃক কৃত মোট কাজ $dW = PdV$ = চাপ × আয়তনের পরিবর্তন। তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্র হতে আমরা জানি, $dQ = dU + dW$, অর্থাৎ সমচাপ প্রক্রিয়ায় সরবরাহকৃত তাপশক্তি সিস্টেমের অন্তস্থ শক্তি পরিবর্তনে এবং বহিস্থ কাজ সম্পাদনে ব্যয় হয়। কিন্তু সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় সিস্টেমের তাপমাত্রা স্থির থাকে বলে অন্তস্থ শক্তির কোনো পরিবর্তন হয় না।

অতএব সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় $dU = 0$; সুতরাং তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্রানুযায়ী $dQ = 0 + dW = dW$। অর্থাৎ সরবরাহকৃত তাপশক্তি সম্পূর্ণরূপে কাজ সম্পাদনে ব্যয় হয়। তাই সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় কৃত কাজ সমচাপ প্রক্রিয়ায় কৃত কাজ অপেক্ষা বেশি।

**কাজ II : সমোষ্ণ প্রক্রিয়া দীর প্রক্রিয়া কেন? ব্যাখ্যা কর।**

যে তাপগতীয় প্রক্রিয়ায় সিস্টেমের তাপমাত্রা স্থির থাকে তাকে সমোষ্ণ প্রক্রিয়া বলে। সমোষ্ণ প্রক্রিয়া একটি ধীর প্রক্রিয়া। সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় $\Delta T = 0$, ফলে পারিপার্শ্বিকের সাথে তাপ বিনিময় অব্যাহতভাবে ঘটতে হয়। যদি প্রক্রিয়াটি দ্রুত ঘটে, তাহলে তাপমাত্রা নিয়ন্ত্রণের জন্য সময় পাওয়া যাবে না এবং তাপমাত্রা নিয়ন্ত্রণও কঠিন হয়ে যাবে। তাই সমোষ্ণ প্রক্রিয়া হতে হলে এটি ধীরে সম্পন্ন হতে হবে যাতে তাপ প্রবাহ সঠিকভাবে ঘটে এবং সিস্টেমের তাপমাত্রা অপরিবর্তিত থাকে। তাই বলা হয় সমোষ্ণ প্রক্রিয়া একটি ধীর প্রক্রিয়া।

## গাণিতিক উদাহরণ ১.৩

**১। একটি সিলিন্ডারে 300 K তাপমাত্রায় এবং 4 বায়ুমণ্ডলীয় চাপে 10 লিটার গ্যাস আবদ্ধ আছে। সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় চাপ দ্বিগুণ করা হলে সিলিন্ডারে গ্যাসের আয়তন কত হবে ?**

আমরা জানি,

$$P_1V_1 = P_2V_2$$

$$\therefore \quad V_2 = \frac{P_1V_1}{P_2} = \frac{4 \times 10}{8} = 5\text{ L}$$

এখানে ,

প্রাথমিক চাপ, $P_1 = 4$ atm

প্রাথমিক আয়তন, $V_1 = 10$ L

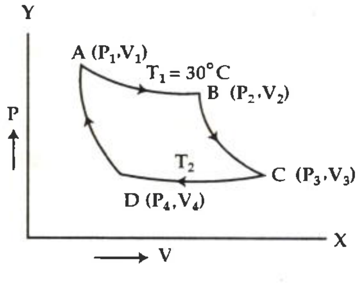
পরিবর্তিত চাপ, $P_2 = 2 \times 4 = 8$ atm

$V_2 = ?$

**২। কার্নো ইঞ্জিনের প্রতি স্তরে সংকোচন ও প্রসারণের অনুপাত 1 : 2। এতে কার্যনির্বাহক বস্তু হিসেবে 3 mol দ্বিপারমাণবিক গ্যাস ব্যবহার করা হলো। ($\gamma = 1{\cdot}41$)**

**চক্রটির লেখ অনুযায়ী A হতে B বিন্দুতে আনতে কৃত কাজ হিসাব কর।**

কার্নো চক্রের P—V লেখটিতে A হতে B বিন্দুতে গ্যাসটি সমোষ্ণ-ভাবে প্রসারিত হয়। এক্ষেত্রে A বিন্দুতে গ্যাসটির চাপ ও আয়তন যথাক্রমে $P_1, V_1$ এবং B বিন্দুতে গ্যাসটির চাপ ও আয়তন যথাক্রমে $P_2, V_2$। এক্ষেত্রে গ্যাস $T_1$ তাপমাত্রায় উৎস হতে তাপ শোষণ করে এবং তাপ সবটুকু কাজে পরিণত করে। প্রশ্নমতে $V_1 = V$ হলে $V_2 = 2V$।




আমরা জানি, $PV = nRT$

$$P = \frac{nRT}{V}$$

$$\therefore \text{ কৃত কাজ, } W = \int PdV$$

$$\text{বা, } W = \int_{V_1}^{V_2} \frac{nRT_1}{V}\, dV$$

$$= nRT_1 \left[\ln V\right]_{V_1}^{V_2} = nRT_1 \ln (V_2 - V_1) = nRT_1 \ln\frac{V_2}{V_1}$$

$$= 3 \times 8{\cdot}31 \times (30 + 273) \ln \frac{2V}{V} = 3 \times 8{\cdot}31 \times 303 \times \ln 2$$

$$= 7553{\cdot}8 \ln 2 = 5236 \text{ J}$$

**৩। একটি সিলিন্ডারের মধ্যে 2 atm চাপে এবং 27°C তাপমাত্রায় 6 litre অক্সিজেন আছে। (ক) চাপ যদি হঠাৎ তিনগুণ করা হয় তা হলে অক্সিজেনের আয়তন ও তাপমাত্রা কত হবে? (খ) চাপ খুব ধীরে ধীরে তিনগুণ বৃদ্ধি করা হলে অক্সিজেনের আয়তন ও তাপমাত্রা কত হবে?**

(ক) চাপ হঠাৎ বৃদ্ধি করলে তা রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তন হবে।

এখানে,

$P_1 = 2\ \text{atm}$

$T_1 = 27°C = 273 + 27 = 300\ K$

$P_2 = 3P_1 = 3 \times 2 = 6\ \text{atm}$

$\gamma = 1{\cdot}4$

$V_1 = 6\ \text{litres}$

আমরা জানি, রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তনের ক্ষেত্রে,

$$P_1V_1^\gamma = P_2V_2^\gamma$$

বা, $V_2^\gamma = \frac{P_1}{P_2} \times V_1^\gamma$

বা, $\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^\gamma = \left(\frac{P_1}{P_2}\right) = \frac{2}{6} = \frac{1}{3}$

বা, $\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = \left(\frac{1}{3}\right)^{\frac{1}{\gamma}} = \left(\frac{1}{3}\right)^{\frac{1}{1\cdot4}}$

বা, $V_2 = \left(\frac{1}{3}\right)^{\frac{1}{1\cdot4}} \times 6 = 0{\cdot}456 \times 6 = 2{\cdot}74$ litre

আবার,

$$T_1P_1^{\left(\frac{1}{\gamma}-1\right)} = T_2P_2^{\left(\frac{1}{\gamma}-1\right)}$$

বা, $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\left(\frac{1}{\gamma}-1\right)} \quad \left(\frac{1}{3}\right)^{\left(\frac{1}{1\cdot4}-1\right)}$

বা, $T_2 = \left(\frac{1}{3}\right)^{\left(\frac{1}{1\cdot4}-1\right)} \times T_1$

$= \left(\frac{1}{3}\right)^{\left(\frac{1}{1\cdot4}-1\right)} \times 300 = 397{\cdot}9\ K$

(খ) চাপ খুব ধীরে ধীরে তিনগুণ বৃদ্ধি করলে তা সমোষ্ণ পরিবর্তন হবে।

আমরা জানি, সমোষ্ণ পরিবর্তনের ক্ষেত্রে—

$$P_1V_1 = P_1V_1 \text{ বা, } V_2 = \left(\frac{P_1}{P_2}\right) \times V_1 = \frac{1}{3} \times 6 = 2 \text{ litre}$$

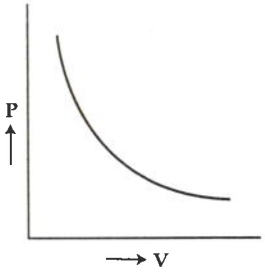
অর্থাৎ, সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় তাপমাত্রার কোনো পরিবর্তন হবে না।

## ১.৩.২ রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তন
### Adiabatic change

কোনো গ্যাসকে হঠাৎ চাপ দিয়ে সঙ্কুচিত করলে কিছু পরিমাণ তাপ উৎপন্ন হয়। যদি এই উৎপন্ন তাপ অপসারণ করা না হয়, তবে গ্যাসের তাপমাত্রা বৃদ্ধি পাবে। আবার কোনো গ্যাসকে হঠাৎ প্রসারিত হতে দিলে গ্যাসটি কিছু পরিমাণ তাপ হারাবে এবং বাইরে থেকে যদি সমপরিমাণ তাপ সরবরাহ করা না হয়, তবে গ্যাসের তাপমাত্রা হ্রাস পাবে। সুতরাং এই পরিবর্তনে তাপমাত্রা কখনো স্থির থাকে না। আরও উল্লেখ থাকে যে, এই ক্ষেত্রে গ্যাস তাপ গ্রহণ বা বর্জন করে না বটে, তবে গ্যাসের **অন্তর্নিহিত শক্তি** স্থির থাকে না— অন্তর্নিহিত শক্তির হ্রাস-বৃদ্ধি ঘটে। এরূপ পরিবর্তনকে **রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তন** বলা হয়। 'a' অর্থ 'না', 'dia' অর্থ 'বরাবর' এবং 'bates' অর্থ 'তাপ'। এক কথায় 'adiabatic'— অর্থ 'heat not passing through' অর্থাৎ তাপ সিস্টেমে প্রবেশ করে না বা সিস্টেম তাপ ত্যাগ করে না। রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তনের ক্ষেত্রে $PV^\gamma$ = ধ্রুবক সমীকরণ এবং $TV^{\gamma-1}$ = ধ্রুবক সমীকরণ প্রযোজ্য।

RMDAC

যে প্রক্রিয়ায় সিস্টেম তাপ গ্রহণ করে না কিংবা তাপ বর্জন করে না তাকে রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়া বলে। যে পরিবর্তনে কোনো তাপ বাহির হতে সরবরাহ করা হয় না বা গ্যাস হতে অপসারণ করা হয় না অথচ গ্যাসের চাপ এবং আয়তনের পরিবর্তন ঘটে তাকে রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তন বলা হয়।




চিত্র ১.৭

অথবা, যে প্রক্রিয়ায় গ্যাসের চাপ ও আয়তন পরিবর্তনকালে তাপের পরিমাণ পরিবর্তন হয় না অর্থাৎ সিস্টেম (প্রক্রিয়াধীন গ্যাস) তাপ গ্রহণ বা বর্জন করে না, কিন্তু তাপমাত্রার পরিবর্তন ঘটে তাকে রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়া বলে। এ পরিবর্তনকে রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তন বলে।

গ্যাসের রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তনের ক্ষেত্রে বয়েলের সূত্র প্রযোজ্য নয়। এক্ষেত্রে গ্যাসের চাপ ও আয়তনের মধ্যে সম্পর্ক হচ্ছে, $PV^{\gamma}$ = ধ্রুবক এবং তাপমাত্রা ও আয়তনের সম্পর্ক হলো $TV^{\gamma-1}$ ধ্রুবক। রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তনের ক্ষেত্রে P এবং V-এর লেখকে রুদ্ধতাপীয় লেখ (adiabatic curve) বলে। চিত্র ১.৭-এ একটি রুদ্ধতাপীয় লেখ দেখানো হয়েছে। রুদ্ধতাপীয় লেখ সমোষ্ণ লেখ-এর তুলনায় বেশি খাড়া হয় [চিত্র ১.৯]।

## রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তনের শর্তসমূহ
## Conditions for adiabatic change

MAT(10-11,11-12)

রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তনের জন্য নিম্নলিখিত শর্তসমূহ প্রয়োজন :

(ক) গ্যাসকে একটি কুপরিবাহী পাত্রে রাখতে হবে।
(খ) পাত্রের চতুষ্পার্শ্বস্থ মাধ্যমের তাপগ্রাহিতা কম হতে হবে।
(গ) চাপ পরিবর্তন খুব দ্রুত সংঘটিত করতে হবে যাতে বাইরের সাথে তাপ আদান-প্রদানের কোনো সুযোগ না থাকে।

## রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তনের বৈশিষ্ট্য
## Characteristics of adiabatic change

Reading

(১) মোট তাপের পরিমাণ স্থির রেখে কোনো গ্যাসের চাপ ও আয়তনের পরিবর্তনকে রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তন বলে।
(২) এই পরিবর্তনে তাপমাত্রার পরিবর্তন ঘটে।
(৩) এটি একটি অতি দ্রুত প্রক্রিয়া।
(৪) এই পরিবর্তনে পাত্রটি তাপ কুপরিবাহী হওয়া প্রয়োজন।
(৫) এই পরিবর্তনে পাত্রের চতুষ্পার্শ্বস্থ মাধ্যমের তাপগ্রাহিতা নিম্ন হতে হয়।
(৬) আদর্শ গ্যাসের রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তনের সমীকরণ হলো $\boxed{PV^{\gamma} = \text{ধ্রুবক}}$
(৭) রুদ্ধতাপীয় লেখ সমোষ্ণ লেখ হতে অধিক খাড়া।

**কাজ I : একটি আদর্শ গ্যাসের রুদ্ধতাপীয় প্রসারণে তাপমাত্রা হ্রাস পায়—ব্যাখ্যা কর।**

রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায় $Q = 0$, গ্যাসের প্রসারণের জন্য W ধনাত্মক।

সুতরাং,

$$Q = \Delta U + W$$

বা, $0 = U_f - U_i + W$

বা, $U_f - U_i = -W$

সুতরাং, $U_f < U_i$ অর্থাৎ অভ্যন্তরীণ শক্তি হ্রাস পায়। যেহেতু অভ্যন্তরীণ শক্তি শুধুমাত্র তাপমাত্রার ওপর নির্ভর করে অতএব তাপমাত্রা হ্রাস পায়।

**কাজ II : রুদ্ধতাপীয় সংকোচনে চাপের পরিবর্তন অধিকতর কেন? ব্যাখ্যা কর।**

রুদ্ধতাপীয় সংকোচনের ক্ষেত্রে আদি ও চূড়ান্ত আয়তনের অনুপাত $\frac{V_1}{V_2} > 1$। আদি চাপ $P_1$ ও চূড়ান্ত চাপ $P_2$ হলে

$P_1V_1^{\gamma} = P_2V_2^{\gamma}$ বা, $P_2 = P_1\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma}$ হয়।

এখানে γ-এর মান 1.33, 1.4, 1.67 ইত্যাদি হয়। অর্থাৎ, $\gamma > 1$ হয়। তাই $\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma} > \frac{V_1}{V_2}$, তাই (1) সমীকরণ অনুযায়ী চাপের পরিবর্তন অধিকতর হয়।

**গাণিতিক উদাহরণ ১.৪**

**১। একটি নাড়ানি 2L পানির মধ্যে 6 cm ব্যাসার্ধের বৃত্তাকার পথে 350 rpm এ 0·2 N মন্দন বলের বিপরীতে ঘুরছে। বিকিরণ দ্বারা তাপক্ষয় উপেক্ষা করে তাপমাত্রা বৃদ্ধি নির্ণয় কর।**

এখানে, বৃত্তের পরিধি $= 2\pi r$

$\therefore$ নাড়ানির সরণ,

$d$ = 1 min সময়ে ঘূর্ণন সংখ্যা $\times$ পরিধি

$= 350 \times 60 \times 2\pi r$

এখন, $W = JH = JmS\theta \quad [\because H = ms\theta]$

$\therefore \; Fd = JmS\theta$

বা, $\theta = \dfrac{Fd}{JmS} = \dfrac{0{\cdot}2 \times 350 \times 60 \times 2 \times 3{\cdot}14 \times 0{\cdot}06}{4{\cdot}2 \times 2 \times 1000}$

$= 0{\cdot}1884°C$

এখানে,

$m = 2\,L = 2\,kg$

$F = 0{\cdot}2\,N$

$t = 1min = 60\,s$

ঘূর্ণন সংখ্যা $= 350$ rpm

$\therefore$ 1 min-এ ঘূর্ণন সংখ্যা $= 350 \times 60$

বৃত্তের ব্যাসার্ধ, $r = 6\,cm = 0{\cdot}06\,m$

$S = 1000\ cal\ kg^{-1}\,K^{-1}$

$\theta$ = তাপমাত্রা বৃদ্ধি = ?

## ১.৩.৩ রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তনে চাপ ও আয়তনের মধ্যে সম্পর্ক
**Relation between pressure and volume of a gas in adiabatic change**

মনে করি একটি পাত্রে এক মোল আদর্শ গ্যাস আছে। এই গ্যাসে $dQ$ পরিমাণ তাপ প্রয়োগ করি। এতে গ্যাসের তাপমাত্রা বৃদ্ধি পাবে এবং সেই সঙ্গে গ্যাস কিছু কাজ করবে অর্থাৎ প্রদত্ত তাপ দুইভাবে ব্যয়িত হবে।

ধরি আয়তনের পরিবর্তন $dV$ এবং তাপমাত্রার পরিবর্তন $dT$

$\therefore$ তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্র হতে পাই,

$$dQ = C_V dT + PdV \qquad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \qquad (1.9)$$

এখানে, $C_V$ = স্থির আয়তনে গ্যাসের আপেক্ষিক তাপ এবং $PdV$ = নির্দিষ্ট চাপে গ্যাসের প্রসারণের জন্য কৃত কাজের পরিমাণ।

আমরা জানি, রুদ্ধতাপ প্রক্রিয়ায় বাইরের সাথে গ্যাসের তাপের কোনো আদান-প্রদান ঘটে না।

অতএব, $dQ = 0$

$\therefore$ সমীকরণ (1.9) হতে পাই,

$$C_V dT + PdV = 0 \qquad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \qquad (1.10)$$

পুনঃ, আদর্শ গ্যাসের ক্ষেত্রে, $PV = RT$, এখানে R মোলার গ্যাস ধ্রুবক।

উক্ত সমীকরণকে ব্যবকলন করে পাই,

$$PdV + VdP = RdT$$

বা, $dT = \dfrac{PdV + VdP}{R}$

$\therefore$ সমীকরণ (1.10) হতে পাই,

$$C_V\left(\frac{PdV + VdP}{R}\right) + PdV = 0$$

বা, $C_V PdV + C_V VdP + RPdV = 0$

বা, $C_V PdV + C_V VdP + (C_P - C_V)\,PdV = 0 \qquad [\because R = C_P - C_V]$

বা, $C_V PdV + C_V VdP + C_P PdV - C_V PdV = 0$

বা, $C_V VdP + C_P PdV = 0$

বা, $VdP + \dfrac{C_P}{C_V}\,PdV = 0 \qquad$ [$C_V$ দ্বারা ভাগ করে]

বা, $VdP + \gamma PdV = 0 \qquad \left[\because \dfrac{C_P}{C_V} = \gamma\right]$

বা, $\dfrac{dP}{P} + \gamma\dfrac{dV}{V} = 0 \qquad$ [PV দ্বারা ভাগ করে]

এখন সমাকলন করে পাই,

$\log_e P + \gamma \log_e V =$ ধ্রুবক $= \log_e K$, এখানে $K =$ ধ্রুবক।

বা, $\log_e P + \log_e V^\gamma = \log_e K$

বা, $\log_e PV^\gamma = \log_e K$

$\therefore$ $PV^\gamma = K =$ ধ্রুবক ... ... ... ... (1.11)

**এটিই হলো চাপ ও আয়তনের মধ্যে সম্পর্ক।**

যদি আদি চাপ ও আয়তন যথাক্রমে $P_1$ ও $V_1$ এবং চূড়ান্ত চাপ ও আয়তন যথাক্রমে $P_2$ ও $V_2$ হয়, তাহলে

$P_1V_1^\gamma = P_2V_2^\gamma =$ ধ্রুবক ... ... ... ... (1.12)

## ১.৩.৪ রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তনে আয়তন ও তাপমাত্রার মধ্যে সম্পর্ক

**Relation between volume and temperature in adiabatic change**

আমরা জানি, আদর্শ গ্যাসের ক্ষেত্রে, $PV = RT$

$\therefore P = \frac{RT}{V}$

পুনঃ, আমরা পাই, $PV^\gamma =$ ধ্রুবক।

উক্ত সমীকরণে P-এর মান বসিয়ে পাই,

$\frac{RT}{V} \times V^\gamma =$ ধ্রুবক বা, $RTV^{\gamma-1} =$ ধ্রুবক

বা, $T \times V^{\gamma-1} =$ ধ্রুবক [$\because R =$ ধ্রুবক]

এটিই হলো রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায় আয়তন ও তাপমাত্রার মধ্যে সম্পর্ক।

## ১.৩.৫ রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তনে আদর্শ গ্যাসের ক্ষেত্রে চাপ ও তাপমাত্রার মধ্যে সম্পর্ক

**Relation between pressure and temperature in adiabatic process in case of an ideal gas**

আদর্শ গ্যাসের ক্ষেত্রে এক মোল গ্যাসের জন্য আমরা জানি,

$PV = RT$

বা, $V = \frac{RT}{P}$

রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তনের ক্ষেত্রে $PV^\gamma =$ ধ্রুবক।

V-এর মান বসিয়ে পাই,

$P\left(\frac{RT}{P}\right)^\gamma =$ ধ্রুবক

বা, $P \times R^\gamma \times T^\gamma \times P^{-\gamma} =$ ধ্রুবক

বা, $P^{1-\gamma} \times T^\gamma = \frac{\text{ধ্রুবক}}{R^\gamma}$

বা, $T^\gamma P^{1-\gamma} =$ ধ্রুবক

এই সমীকরণের উভয় পাশে $\gamma$ মূল দিয়ে ভাগ করে পাই,

$\therefore TP^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} =$ ধ্রুবক

ইহাই রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায় আদর্শ গ্যাসের ক্ষেত্রে চাপ ও তাপমাত্রার মধ্যে সম্পর্ক।

**হিসাব : রুদ্ধতাপ প্রক্রিয়ায় ($\gamma = 1.4$) দ্বি-পরমাণু গ্যাসের চাপ 0.5% বৃদ্ধি করা হলে গ্যাসের আয়তন কত কমবে ?**
**[কু. বো. ২০২৩ (মান ভিন্ন)]**

$P_1V_1^{\gamma} = PV^{\gamma}$ সম্পর্ক ব্যবহার করে পাই,

$$\left(\frac{V_1}{V}\right)^{\gamma} = \left(\frac{P}{P_1}\right)$$

$$\left(\frac{V_1}{V}\right) = \left(\frac{P}{P_1}\right)^{1/\gamma}$$

বা, $V_1 = V \times \left(\frac{P}{P_1}\right)^{1/\gamma}$

বা, $V_1 = V \times \left(\frac{P}{P + 0.5\% \times P}\right)^{1/\gamma}$

বা, $V_1 = V \times \left(\frac{P}{P(1 + 0.5\%)}\right)^{1/\gamma}$

$\therefore$ $V_1 = V \times 0.9964413 \simeq V \times 0.9964$

$\therefore$ আয়তন কমার পরিমাণ $= \frac{V_1 - V}{V} \times 100\%$

$$= \frac{V \times 0.9964 - V}{V} \times 100\%$$

$$= -0.36\%$$

**কাজ : রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায় গ্যাসকে সংনমিত করলে এর তাপমাত্রা বৃদ্ধি পায়—এর কারণ কী ?**

রূদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায় গ্যাসকে সংনমিত করলে তাপমাত্রা বেড়ে যায় এবং প্রসারিত করলে তাপমাত্রা কমে যায়। অর্থাৎ রূদ্ধতাপীয় গ্যাস কোনো তাপ গ্রহণ বা বর্জন না করলেও গ্যাসের অন্তস্থ শক্তি স্থির থাকে না। যখন গ্যাসকে সংনমিত করা হয় তখন গ্যাসের ওপর কাজ সম্পাদিত হয়। এতে গ্যাসের শক্তি বৃদ্ধি পায়। অর্থাৎ গ্যাসের অন্তস্থ শক্তির বৃদ্ধি ঘটে। কারণ এক্ষেত্রে গ্যাস তাপ বর্জন করতে পারে না। তাই এই রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায় গ্যাসকে সংনমিত করলে এর তাপমাত্রা বৃদ্ধি পায়।

## গাণিতিক উদাহরণ ১.৫

**১। 25°C তাপমাত্রায় ও বায়ুমণ্ডলীয় চাপে আবদ্ধ শুষ্ক বায়ুকে হঠাৎ বা রুদ্ধতাপে সংনমিত করে আয়তন অর্ধেক করা হলো। চূড়ান্ত (ক) তাপমাত্রা (খ) চাপ নির্ণয় কর।** [$\gamma = 1.4$]

[চ. বো. ২০১০; ঢা. বো. ২০০৮; ব. বো. ২০০৪; Admission Test : JUST 2017-18; KUET 2014-15 (মান ভিন্ন), 2009-10 (মান ভিন্ন)]

এখানে ,

$T_1 = 25°C = (25 + 273)\ K = 298\ K$

প্রাথমিক আয়তন $= V_1$

চূড়ান্ত আয়তন, $V_2 = \frac{1}{2} V_1$

$\gamma = 1.4$

প্রাথমিক চাপ, $P_1 = 1$ বায়ুমণ্ডলীয় চাপ

চূড়ান্ত চাপ, $P_2 = ?$

মনে করি, চূড়ান্ত তাপমাত্রা $= T_2K$ ও চাপ $= P_2$

আমরা পাই, $T_1V_1^{\gamma-1} = T_2V_2^{\gamma-1}$ ... (i)

$P_1V_1^{\gamma} = P_2V_2^{\gamma}$ ... (ii)

(ক) সমীকরণ (i) হতে পাই,

$$T_2 = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1} \times T_1 = 2^{1.4-1} \times 298\ K$$

$$= 393.21\ K = (393.21 - 273)°C = 120.21°C$$

(খ) $P_2 = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma} \times P_1$

$= 2^{1.4} \times 1$ বায়ুমণ্ডলীয় চাপ

$= 2.64$ বায়ুমণ্ডলীয় চাপ

**২। 100°C তাপমাত্রার বায়ুকে রূদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায় সংকুচিত করে এর অর্ধেক আয়তনে পরিণত করা হলো। তাপমাত্রার পরিবর্তন নির্ণয় কর।** [KUET Admission Test, 2005–06]

আমরা জানি, রূদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায়,

$$T_1V_1^{\gamma-1} = T_2V_2^{\gamma-1}$$

বা, $T_2 = T_1\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1} = 373\left(\frac{1}{1/2}\right)^{1\cdot4-1}$

$$= 373(2)^{1\cdot4-1} = 492\cdot176 \text{ K}$$

$\therefore$ তাপমাত্রার পরিবর্তন, $\Delta T = 492\cdot176 - 373 = 119\cdot176 \text{ K} = 119\cdot176° \text{ C}$

**৩। বায়ুকে রূদ্ধতাপে প্রসারিত করে এর আয়তন তিনগুণ করা হলো। যদি প্রাথমিক চাপ 1 বায়ুমণ্ডলীয় চাপ হয় তাহলে চূড়ান্ত চাপ কত হবে ? [$\gamma = 1\cdot4$]** [রা. বো. ২০০৯; ব. বো. ২০০৫; ঢা. বো. ২০০৪]

আমরা জানি,

$$P_1V_1^{\gamma} = P_2V_2^{\gamma}$$

$$\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)$$

বা, $\left(\frac{3V_1}{V_1}\right)^{\gamma} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)$

$\therefore$ $(3)^{1\cdot4} = \frac{1\cdot013\times10^5}{P_2}$

বা, $P_2 = \frac{1\cdot013\times10^5}{(3)^{1\cdot4}} = 2\cdot176\times10^4 \text{ Nm}^{-2}$

এখানে,

প্রাথমিক চাপ = 1 বায়ুমণ্ডলীয় চাপ, $P_1 = 0\cdot76$ m পারদ

প্রাথমিক আয়তন $= V_1$

চূড়ান্ত আয়তন, $V_2 = 3V_1$

$\gamma = 1\cdot4$

চূড়ান্ত চাপ, $P_2 = ?$

**৪। 27°C তাপমাত্রায় কিছু পরিমাণ গ্যাসকে হঠাৎ সঙ্কুচিত করে প্রাথমিক চাপের 8 গুণ করা হলো। যদি $\gamma = 1\cdot5$ হয় তবে তাপমাত্রা বৃদ্ধি নির্ণয় কর।** [ IU Admission Test, 2019-20 (মান ভিন্ন)]

যেহেতু গ্যাসটি হঠাৎ সঙ্কুচিত করা হয়েছে, সুতরাং এটি রূদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়া। অতএব,

$$T_1^{\gamma}P_1^{1-\gamma} = T_2^{\gamma}P_2^{1-\gamma}$$

বা, $\left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\gamma} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{1-\gamma}$

$\therefore$ $\left(\frac{300}{T_2}\right)^{1\cdot5} = (8)^{1-1\cdot5}$

বা, $\left(\frac{300}{T_2}\right)^{1\cdot5} = (8)^{-0\cdot5}$

বা, $\left(\frac{300}{T_2}\right)^{\frac{3}{2}} = (8)^{-\frac{1}{2}}$

বা, $\frac{300}{T_2} = (8)^{-\frac{1}{2}\times\frac{2}{3}} = 8^{-\frac{1}{3}}$

বা, $T_2 = \frac{300}{8^{-\frac{1}{3}}} = 600 \text{ K}$

$$= 600 - 273 = 327°\text{C}$$

এখানে,

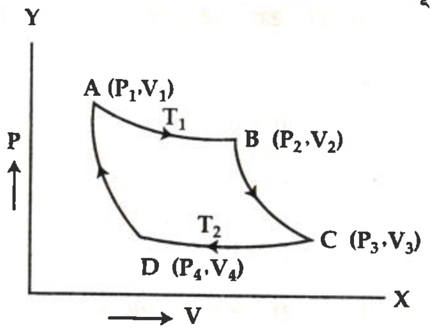
$T_1 = 27°\text{C} = 27 + 273 = 300 \text{ K}$

$\frac{P_2}{P_1} = 8$

$\gamma = 1\cdot5$

$T_2 = ?$

**৫। একটি কার্নো ইঞ্জিনের লেখচিত্র P — V নিম্নরূপ :**




এখানে,
$P_1 = 3$ atm
$T_1 = 600$ K
$V_1 = 2 \times 10^{-3}$ m$^3$
$V_2 = 6 \times 10^{-3}$ m$^3$
$T_2 = 300$ K

**কার্নো চক্রটির B বিন্দুতে চাপ এবং C বিন্দুতে আয়তন কত হবে ?**

আমরা জানি, কার্নো চক্রে A থেকে B তে সমোষ্ণ প্রসারণ এবং B থেকে C তে রুদ্ধতাপীয় প্রসারণ ঘটে।

সমোষ্ণ প্রসারণের ক্ষেত্রে B বিন্দুতে চাপ,

$$P_1V_1 = P_2V_2$$

$$\therefore \quad P_2 = \frac{P_1V_1}{V_2} = \frac{3 \times 2 \times 10^{-3}}{6 \times 10^{-3}} = 1 \text{ atm}$$

রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ার ক্ষেত্রে C বিন্দুতে আয়তন,

$$T_1V_2^{\gamma - 1} = T_2V_3^{\gamma - 1}$$

বা, $600 \times (6 \times 10^{-3})^{1{\cdot}41-1} = 300\ V_3^{\gamma - 1}$

বা, $2 \times (6 \times 10^{-3})^{0{\cdot}41} = V_3^{1{\cdot}41-1}$

বা, $V_3^{0{\cdot}41} = 2 \times (6 \times 10^{-3})^{0{\cdot}41}$

বা, $V_3 = 2^{\frac{1}{0{\cdot}41}} \times (6 \times 10^{-3}) = 0{\cdot}0325$ m$^3$

**৬। একটি সিলিন্ডারে 300 K তাপমাত্রায় ও $10^6$ Pa চাপে $0{\cdot}001$ m$^3$ গ্যাস আছে। গ্যাসটিকে প্রথমে সমোষ্ণ প্রসারণ করা হলো এবং পরে রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায় আবারও প্রসারণ করা হলো, প্রতিক্ষেত্রেই প্রসারণের অনুপাত 1 : 2। প্রসারণে মোট কাজের পরিমাণ নির্ণয় কর।** [সি. বো. ২০২৩ (মান ভিন্ন); রা. বো. ২০২২ (মান ভিন্ন); BUET Admission Test, 2017–18]

সমোষ্ণ প্রসারণের ক্ষেত্রে কৃত কাজ,

$$W_1 = RT \ln\frac{V_2}{V_1}$$

$$= 8{\cdot}31 \times 300 \times \ln\left(\frac{2}{1}\right) = 1728 \text{ J}$$

রুদ্ধতাপীয় প্রসারণের ক্ষেত্রে,

$$T_1V_1^{\gamma-1} = T_2V_2^{\gamma-1}$$

$$T_2 = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1} \times T_1 = \left(\frac{1}{2}\right)^{1{\cdot}4-1} \times 300 = 227{\cdot}36 \text{ K}$$

কৃত কাজ, $W_2 = \left(\frac{nR}{1-\gamma}\right)(T_2 - T_1)$

$$= \left(\frac{8{\cdot}31}{1 - 1{\cdot}4}\right)(227{\cdot}36 - 300) = 1509 \text{ J}$$

$\therefore$ মোট কাজ, $W = W_1 + W_2 = 1728 + 1509$

$$= 3237 \text{ J}$$

এখানে,
$T = 300$ K
প্রসারণের অনুপাত 1 : 2
অর্থাৎ $\frac{V_1}{V_2} = \frac{1}{2}$
$\frac{V_2}{V_1} = \frac{2}{1}$
$R = 8{\cdot}31$

**৭। সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় 20 mole পরিমাণ আদর্শ গ্যাসকে সঙ্কুচিত করে আয়তন 30 L থেকে 20 L এ পরিবর্তিত করা হলো। যদি গ্যাসের তাপমাত্রা ও চাপ যথাক্রমে 0°C এবং 1 atm হয়, তবে এই প্রক্রিয়ায় কৃতকাজ নির্ণয় কর। (দেওয়া আছে, R = 8·31 Jmol⁻¹K⁻¹)**

আমরা জানি, সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় আয়তন পরিবর্তনে কৃত কাজ,

$$W = nRT \ln\frac{V_f}{V_i}$$

$$\therefore \quad W = 10 \times 8{\cdot}31 \times 273 \times \ln\frac{20}{30}$$

$$= 10 \times 8{\cdot}31 \times 273\ (-\ 0{\cdot}4055)$$

$= -\ 9188{\cdot}5$ J (এক্ষেত্রে, সিস্টেমের ওপর কাজ করা হয়েছে, তাই ঋণাত্মক চিহ্ন)

এখানে,
$n = 10$ mole
$V_i = 30$ L
$V_f = 20$ L
$T = 0°C = 273$ K
$R = 8{\cdot}31$ Jmol⁻¹K⁻¹

**৮। 2 মোলের কোনো গ্যাসকে 30°C তাপমাত্রায় সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় আয়তন দ্বিগুণ না হওয়া পর্যন্ত প্রসারিত হতে দেওয়া হয়। তবে রূদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায় একে আবার আগের আয়তনে ফিরিয়ে আনা হলো। মোট কৃত কাজের পরিমাণ নির্ণয় কর। ($\gamma = 1{\cdot}4$, R = 8·31 J mol⁻¹ K⁻¹)**

আমরা জানি, সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় কৃত কাজ,

$$W = R + \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

$$\therefore \quad W_1 = 8{\cdot}31 \times 303 \ln\left(\frac{2V_1}{V_1}\right)$$

$$= 8{\cdot}31 \times 303 \ln(2)$$

$$= 8{\cdot}31 \times 303 \times 0{\cdot}693$$

$$= 1744{\cdot}9 \text{ J}$$

এখানে,
$T = 30°C = 273 + 30 = 303$ K
$n = 2$ মোল
$V_2 = 2V_1$
$\gamma = 1{\cdot}4$
$R = 8{\cdot}31$ J mol⁻¹ K⁻¹

যখন রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়া শুরু হয় তখন তাপমাত্রা, $T_1 = 303$ K এবং আয়তন $V_1 = 2V_2$। ধরি, সংকোচন শেষে তাপমাত্রা $T_2$ এবং আয়তন $V_2$।

আমরা জানি, রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায়,

$$T_1V_1^{\gamma-1} = T_2V_2^{\gamma-1}$$

$$\therefore \quad T_2 = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1} \times T_1 = \left(\frac{2V_2}{V_2}\right)^{1{\cdot}4-1} \times 303 = (2)^{0{\cdot}4} \times 303 = 399{\cdot}82$$

• এখন রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায় কৃত কাজ,

$$W_2 = \left(\frac{nR}{1-\gamma}\right)(T_2 - T_1) = \left(\frac{2 \times 8{\cdot}31}{1 - 1{\cdot}4}\right) \times (399{\cdot}8 - 303)$$

$$= \frac{2 \times 8{\cdot}31 \times 96{\cdot}8}{-\ 0{\cdot}4} = -\ 4022{\cdot}5 \text{ J}$$

সুতরাং মোট কাজ, $W = W_1 + W_2 = 1744{\cdot}9 - 4022{\cdot}5 = -\ 2277{\cdot}6$ J

## ১·৪ মোলার আপেক্ষিক তাপ বা মোলার তাপধারণ ক্ষমতা
### Molar specific heat or molar heat capacity

আমরা জানি, বস্তু অতি ক্ষুদ্র অণু, পরমাণু সমন্বয়ে গঠিত এবং একটি বস্তুর মধ্যে অণু-পরমাণুর সংখ্যা অত্যন্ত বেশি। যেমন মাত্র 12 gm কার্বনের মধ্যে $6{\cdot}02 \times 10^{23}$ টি পরমাণু থাকে। এত বড় সংখ্যাকে ছোট এককে প্রকাশ করা হয়। এই ছোট একককে গ্রাম-মোল (gm-mole) বা সংক্ষেপে মোল (mole) বলে।[১] গ্যাসের ক্ষেত্রে আপেক্ষিক তাপ সংজ্ঞায়িত করার জন্য g বা kg ব্যবহার না করে মোল ব্যবহার করা হয় এবং সংশ্লিষ্ট আপেক্ষিক তাপকে মোলার আপেক্ষিক তাপ বলে।

**সংজ্ঞা : 1 মোল গ্যাসের তাপমাত্রা 1 ডিগ্রি বাড়াতে যে পরিমাণ তাপের প্রয়োজন হয় তাকে ওই গ্যাসের মোলার তাপধারণ ক্ষমতা বা মোলার আপেক্ষিক তাপ বলে।** একে C দ্বারা প্রকাশ করা হয়।

১ কোনো বস্তুর পারমাণবিক বা আণবিক ওজন (atomic weight) কিলোগ্রামে প্রকাশ করলে তাকে 1 মোল বলা হয়।

কোনো গ্যাসের $n$ মোলের তাপমাত্রা $\Delta T$ বৃদ্ধি করতে যদি $\Delta Q$ পরিমাণ তাপের প্রয়োজন হয়, তবে মোলার তাপ ধারণ ক্ষমতা,

$$C = \frac{\Delta Q}{n\Delta T} \qquad \ldots \qquad \ldots \qquad \ldots \qquad (1.13)$$

**একক :** $\Delta Q$ এর একক জুল (joule), $n$-এর একক মোল (mole) এবং $\Delta T$-এর একক কেলভিন (K)। সুতরাং সমীকরণ (1.13) হতে C-এর একক $J(mol)^{-1} K^{-1}$।

গ্যাসের দুটি আপেক্ষিক তাপ রয়েছে। সুতরাং এর দুটি মোলার আপেক্ষিক তাপও রয়েছে। যথা— (i) স্থির চাপে গ্যাসের মোলার আপেক্ষিক তাপ এবং (ii) স্থির আয়তনে গ্যাসের মোলার আপেক্ষিক তাপ।

**(i) স্থির চাপে গ্যাসের মোলার আপেক্ষিক তাপ $C_P$ :**

স্থির চাপে 1 mole গ্যাসের তাপমাত্রা 1K বৃদ্ধি করতে যে তাপের প্রয়োজন তাকে স্থির চাপে মোলার আপেক্ষিক তাপ বলে। একে $C_P$ দ্বারা প্রকাশ করা হয়। চাপ স্থির রেখে $n$ মোল গ্যাসের তাপমাত্রা $\Delta T$ বাড়াতে যদি $\Delta Q$ জুল তাপের প্রয়োজন হয়, তবে সংজ্ঞানুসারে,

$$C_P = \frac{\Delta Q}{n\Delta T} \qquad \ldots \qquad \ldots \qquad \ldots \qquad (1.14)$$

**(ii) স্থির আয়তনে গ্যাসের মোলার আপেক্ষিক তাপ, $C_V$ :**

স্থির আয়তনে 1 mole গ্যাসের তাপমাত্রা 1K বৃদ্ধি করতে যে তাপের প্রয়োজন তাকে স্থির আয়তনে মোলার আপেক্ষিক তাপ বলে। একে $C_V$ দ্বারা প্রকাশ করা হয়।

আয়তন স্থির রেখে $m$ মোল গ্যাসের তাপমাত্রা $\Delta T$ বাড়াতে যদি $\Delta Q$ তাপের প্রয়োজন হয়, তবে সংজ্ঞানুসারে,

$$C_V = \frac{\Delta Q}{n\Delta T} \qquad \ldots \qquad \ldots \qquad \ldots \qquad (1.15)$$

পরীক্ষায় দেখা গেছে $C_P$ এর মান $C_V$ অপেক্ষা বেশি হয়। এর ভৌত কারণ পরবর্তী অনুচ্ছেদে আলোচনা করা হলো।

এখন তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্র থেকে পাই,

$dQ = dU + dW = dU + PdU_1$ স্থির আয়তনে

$dV = 0$

$$\therefore\ dQ = dU = nC_V dT \qquad \ldots \qquad \ldots \qquad \ldots \qquad [1.15(a)]$$

## ১.৪.১ $C_P$ এবং $C_V$-এর পার্থক্যের ভৌত ব্যাখ্যা ($C_P > C_V$-এর কারণ)
## Physical explanation of the difference between $C_P$ and $C_V$

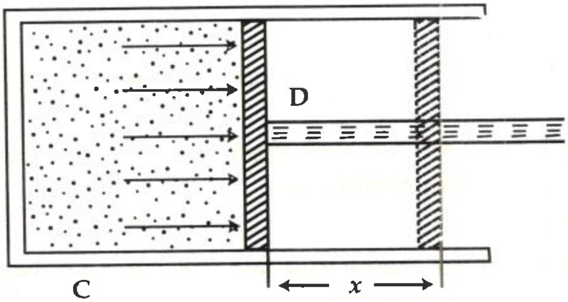
একটি নির্দিষ্ট ভরের কোনো গ্যাসের আয়তন স্থির রেখে তাকে উত্তপ্ত করতে থাকলে তার চাপ ও তাপমাত্রা উভয়ই বৃদ্ধি পায়। কিন্তু আয়তন স্থির থাকায় ওই গ্যাস বাহ্যিক কোনো কাজ করে না। ফলে সম্পূর্ণ তাপ গ্যাসের চাপ ও তাপমাত্রা পরিবর্তনেই ব্যয় হয়। আবার চাপ স্থির রেখে গ্যাসটিকে উত্তপ্ত করতে থাকলে তার আয়তন ও তাপমাত্রা উভয়ই বৃদ্ধি পায়। ফলে প্রযুক্ত তাপ একদিকে গ্যাসের তাপমাত্রা বৃদ্ধি করে এবং অপরদিকে বাহ্যিক চাপের বিরুদ্ধে গ্যাসের আয়তন বৃদ্ধি করে কিছু কাজ সম্পন্ন করে। সুতরাং স্থির অয়তনে 1 মোল গ্যাসের তাপমাত্রা 1K পর্যন্ত বৃদ্ধি করতে যে তাপের প্রয়োজন হবে স্থির চাপে ওই গ্যাসের তাপমাত্রা 1K বৃদ্ধি করতে তা অপেক্ষা কিছু বেশি তাপের প্রয়োজন হবে। কেননা দ্বিতীয় ক্ষেত্রে বাহ্যিক চাপের বিরুদ্ধে কাজ করে আয়তন বৃদ্ধি করতে কিছু অতিরিক্ত তাপ লাগবে। অর্থাৎ $C_P = C_V$ + বাহ্যিক চাপের বিরুদ্ধে কাজের সমতুল তাপ। সুতরাং $C_P > C_V$।

## ১.৪.২ একটি আদর্শ গ্যাসের ক্ষেত্রে $C_P$ ও $C_V$-এর মধ্যে পার্থক্য ($C_P - C_V = R$)
## Difference between $C_P$ and $C_V$ for an ideal gas

আমরা জানি গ্যাসের দুটি আপেক্ষিক তাপ আছে, একটি $C_P$ এবং অপরটি $C_V$। এদের মধ্যে পার্থক্য বের করতে হবে।

একটি আদর্শ গ্যাসের দুই আপেক্ষিক তাপের মধ্যে পার্থক্য করতে গিয়ে তাপ কুপরিবাহী পদার্থের একটি আবদ্ধ চোঙ লই। মনে করি চোঙ C। চোঙের মধ্যে একটি হালকা ঘর্ষণশূন্য ও বায়ুনিরুদ্ধ পিস্টন বিনা বাধায় চলাচল করতে পারে। মনে করি পিস্টনটি D। পিস্টনটিও কুপরিবাহী পদার্থের তৈরি।

এই আবদ্ধ চোঙে 1 মোল পরিমাণ গ্যাস লই। এখন গ্যাসটির আয়তন স্থির রেখে এর তাপমাত্রা $dT$ পরিমাণ বৃদ্ধি করি। যদি স্থির আয়তনে গ্যাসের আপেক্ষিক তাপ $C_V$ হয়, তবে গ্যাস কর্তৃক গৃহীত তাপ




চিত্র ১.৮

= ভর × আপেক্ষিক তাপ × তাপমাত্রার পার্থক্য

$= 1 \times C_V \times dT$

$= C_V\, dT$

গ্যাসের তাপমাত্রা বৃদ্ধির পরিমাণ এক কেলভিন হলে গ্যাস কর্তৃক গৃহীত তাপ

$= C_V \times 1$

$= C_V$ জুল (J)

মনে করি স্থির চাপে গ্যাসের আপেক্ষিক তাপ $C_P$ অর্থাৎ স্থির চাপে 1 মোল গ্যাসের তাপমাত্রা 1 ডিগ্রি বাড়াতে $C_P$ পরিমাণ তাপের প্রয়োজন হবে। গ্যাসে সরবরাহকৃত এই তাপ দুই ভাগে ব্যয়িত হবে। এর একটি অংশ $C_V$ গ্যাসের তাপমাত্রা বাড়াবে এবং অপর অংশ বাহ্যিক চাপ P-এর বিরুদ্ধে গ্যাসের আয়তন বৃদ্ধিতে কাজ করবে। ধরি চাপের বিরুদ্ধে গ্যাসের আয়তন বৃদ্ধির ফলে পিস্টনটি $x$ পরিমাণ দূরত্ব বাইরে সরে গেল। অতএব কাজের পরিমাণ

= বল × সরণ

= চাপ × ক্ষেত্রফল × সরণ [ ∵ বল = চাপ × আয়তন ]

$= P \times A \times x$ ; এখানে A = পিস্টন বা চোঙের প্রস্থচ্ছেদের ক্ষেত্রফল

∴ কাজ $= P.\,dV$ জুল (J); এখানে $dV$ = গ্যাসের প্রসারিত আয়তন $= A\,.\,x$

অতএব,

$C_P = C_V +$ কাজের পরিমাণ

বা, $C_P = C_V + P.\,dV$ ... ... ... (1.16)

আমরা জানি আদর্শ গ্যাসের ক্ষেত্রে

$PV = RT$ ... ... ... (1.17)

যদি চাপ স্থির থাকে, তবে সমীকরণ (1.17)-কে ব্যবকলন করে পাই,

$P\,dV + VdP = RdT + TdR$

$P\,dV + V \times 0 = R\,dT + T \times 0$ [ ∵ স্থির চাপে $dP = 0$ এবং R ধ্রুব রাশি হওয়ায়, $dR = 0$ এবং তাপমাত্রা বৃদ্ধি $dT = 1\text{ K}$ ]

বা, $P\,dV = R\,dT = R$

∴ সমীকরণ (1.15) হতে পাই,

$C_P = C_V + R$

বা, $\boxed{C_P - C_V = R}$ ... ... ... (1.18)

অর্থাৎ **গ্যাসের দুই আপেক্ষিক তাপের পার্থক্য বা অন্তরফল মোলার গ্যাস ধ্রুবক R-এর সমান।**

**যেহেতু R ধনাত্মক, সুতরাং $C_P > C_V$।** অর্থাৎ স্থির চাপে গ্যাসের মোলার আপেক্ষিক তাপ স্থির আয়তনে গ্যাসের মোলার আপেক্ষিক তাপ অপেক্ষা বড়। R-এর মান $8{\cdot}314\text{ J K}^{-1}\text{mol}^{-1}$ বসিয়ে সমীকরণ (1.18) হতে পাওয়া যায়, $C_P - C_V = 8{\cdot}314\text{ J K}^{-1}\text{mol}$

সমীকরণ (1.18) থেকে পাই, $\frac{C_P}{C_V} - 1 = \frac{R}{C_V}$

বা, $\gamma - 1 = \frac{R}{C_V}$ $\left(\because \frac{C_P}{C_V} = \gamma\right)$

বা, $C_V = \frac{R}{\gamma - 1}$ ... ... ... [1.18(a)]

## ১.৪.৩ γ-এর মানের ভিন্নতা ও গুরুত্ব
### Variation in the value of γ and its importance

**γ-এর মানের ভিন্নতা :**

আমরা জানি,

$$\boxed{\gamma = \frac{C_P}{C_V}} = \frac{\text{স্থির চাপে গ্যাসের আপেক্ষিক তাপ}}{\text{স্থির আয়তনে গ্যাসের আপেক্ষিক তাপ}}$$

**এক পারমাণবিক গ্যাসের ক্ষেত্রে**

$$C_V = \frac{3}{2}R \text{ এবং}$$

$$C_P = C_V + R = \frac{3}{2}R + R = \frac{5}{2}R$$

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{\frac{5}{2}R}{\frac{3}{2}R} = 1{\cdot}67,$$ অর্থাৎ **এক পারমাণবিক গ্যাসের** ক্ষেত্রে $\gamma = 1{\cdot}67$

**দ্বিপারমাণবিক গ্যাসের ক্ষেত্রে**

$$C_V = \frac{5}{2}R \text{ এবং}$$

$$C_P = C_V + R = \frac{5}{2}R + R = \frac{7}{2}R$$

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{\frac{7}{2}R}{\frac{5}{2}R} = \frac{7}{5}R = 1{\cdot}40,$$ অর্থাৎ **দ্বিপারমাণবিক গ্যাসের** ক্ষেত্রে $\gamma = 1{\cdot}40$

**বহুপারমাণবিক গ্যাসের ক্ষেত্রে**

$$C_V = 3R \text{ এবং}$$

$$C_P = 3R + R = 4R$$

$$\therefore \quad \gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{4R}{3R} = \frac{4}{3} = 1{\cdot}33$$

নোবেল, অভিজাত, আদর্শ, নিষ্ক্রিয়

পরীক্ষালব্ধ ফলাফল হতে দেখা যায় যে, সকল এক পরমাণুক গ্যাসের ক্ষেত্রে [ যেমন He, Ne, Ar ] $\gamma$-এর মান $1{\cdot}67$। সকল দ্বিপরমাণুক গ্যাসের ক্ষেত্রে [ যেমন $H_2, O_2, N_2, Cl_2$ ] $\gamma$-এর মান $1{\cdot}40$ এবং সকল ত্রিপরমাণুক গ্যাসের ক্ষেত্রে [যেমন $CO_2, C_2H_6, NH_3$] $\gamma$-এর মান $1{\cdot}33$। বহু পরমাণুর গ্যাসের ক্ষেত্রে এর মান $1{\cdot}3$ থেকে $1{\cdot}1$ এর মধ্যে থাকে। অতএব একই প্রকার আণবিক গঠনের জন্য $\gamma$-এর মান নির্দিষ্ট এবং বিভিন্ন গঠনের গ্যাসের জন্য $\gamma$-এর মান ভিন্ন ভিন্ন হয়।

**$\gamma$-এর গুরুত্ব :**

(ক) কোনো গ্যাসের $\gamma$-এর মান জানা থাকলে ওই গ্যাসের আণবিক বিন্যাস জানা যায় অর্থাৎ ওই গ্যাসের প্রতিটি অণুর মধ্যে কয়টি পরমাণু আছে তা জানা যায়।

(খ) গ্যাসীয় মাধ্যমে শব্দের বেগ $\gamma$–এর মানের ওপর নির্ভর করে। তাই শব্দের বেগ নির্ণয়ের জন্য এর প্রয়োজন হয়।

(গ) গ্যাসের রুদ্ধতাপ প্রক্রিয়া পর্যালোচনার জন্য $\gamma$-এর মান জানা দরকার।

**কাজ : গ্যাসে দুই প্রকার আপেক্ষিক তাপ থাকে কেন? ব্যাখ্যা কর।**

গ্যাসের ক্ষেত্রে তাপ প্রয়োগ করা হলে উষ্ণতার সাথে সাথে গ্যাসের চাপ অথবা আয়তন অথবা উভয়ের পরিবর্তন হয়। তাই কোনো নির্দিষ্ট পরিমাণ গ্যাসের তাপমাত্রা একই পরিমাণ বৃদ্ধি করতে বিভিন্ন ক্ষেত্রে প্রয়োজনীয় তাপের পরিমাণও বিভিন্ন হয়। সেজন্য গ্যাসের ক্ষেত্রে দুই ধরনের আপেক্ষিক তাপ থাকে। যথা—১। স্থিরচাপে আপেক্ষিকতাপ ($C_P$) এবং ২। স্থির আয়তনে আপেক্ষিক তাপ ($C_V$)।

## গাণিতিক উদাহরণ ১.৬

১। বহুপারমাণবিক গ্যাসের জন্য স্থির আয়তনে ও স্থির চাপে মোলার আপেক্ষিক তাপ নির্ণয় কর।

[$\gamma = 1{\cdot}33$, $R = 8{\cdot}31 \text{ J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$]

আমরা জানি,

$$C_P - C_V = R \qquad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad (i)$$

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V}$$

$$\therefore \quad C_P = \gamma C_V$$

সমীকরণ (i)-এ $C_P$ এর মান বসিয়ে পাই,

$$C_V(\gamma - 1) = R$$

$$C_V = \frac{R}{\gamma - 1} = \frac{8{\cdot}31}{1{\cdot}33 - 1} = 25{\cdot}18 \text{ J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$$

আবার, $C_P = C_V + R = 25{\cdot}18 + 8{\cdot}31$

$= 33{\cdot}49 \text{ J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$

**২। ওজোন গ্যাসের জন্য স্থিরচাপে মোলার আপেক্ষিক তাপ নির্ণয় কর।**

আমরা জানি,

ওজোন ($O_3$) বহু পারমাণবিক গ্যাস।

এর $\gamma = 1{\cdot}33$ এবং $C_V = \frac{R}{\gamma - 1}$ ... ... ... (i)

আবার, $\gamma = \frac{C_P}{C_V}$

$$\therefore \quad C_P = \gamma C_V = \gamma \times \frac{R}{\gamma - 1}$$

$$= \frac{1{\cdot}33 \times 8{\cdot}314}{1{\cdot}33 - 1} = 33{\cdot}5$$

**৩। (i) স্থির আয়তনে অক্সিজেন গ্যাসের আপেক্ষিক তাপ $0{\cdot}155$ cal $g^{-1}{}^\circ C^{-1}$। স্থির চাপে এর আপেক্ষিক তাপ কত? ($R = 2$ cal.mol$^{-1}{}^\circ C^{-1}$, অক্সিজেনের আণবিক ওজন, $M = 32$)**

**(ii) একটি আদর্শ গ্যাসের চাপ ও তাপমাত্রা রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায় $P \propto T^3$ সম্পর্কিত। দেখাও যে, $\frac{C_P}{C_V}$ এর মান $= 1{\cdot}5$।**

(i) আমরা জানি, স্থির আয়তন ও স্থির চাপে মোলার আপেক্ষিক তাপ যথাক্রমে,

$C_V = MC_V$ এবং $C_P = MC_P$

এখন, $C_P - C_V = R$ বা, $C_P = C_V + R$

বা, $MC_P = MC_V + R$ বা, $C_P = C_V + \frac{R}{M}$

$\therefore \quad C_P = 0{\cdot}155 + \frac{2}{32} = 0{\cdot}2175$ cal $g^{-1}{}^\circ C^{-1}$

এখানে,

$C_V = 0{\cdot}155$ cal $g^{-1}{}^\circ C^{-1}$

$R = 2$ cal mol$^{-1}{}^\circ C^{-1}$

$M = 32$ g mol$^{-1}$

(ii) 1 mole আদর্শ গ্যাসের জন্য,

$PV = RT$ বা, $T = \frac{PV}{R}$

এখন, $P \propto T^3$ বা, $P = KT^3 = K\left(\frac{PV}{R}\right)^3$; এখানে K ধ্রুবক

$\therefore \quad P = \frac{KP^3V^3}{R^3}$ বা, $P^2V^3 = \frac{R^3}{K}$ বা, $PV^{\frac{3}{2}} = \left(\frac{R^3}{K}\right)^{\frac{1}{2}}$

বা, $PV^{\frac{3}{2}} =$ ধ্রুবক

রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ার জন্য আমরা জানি, $PV^\gamma =$ ধ্রুবক

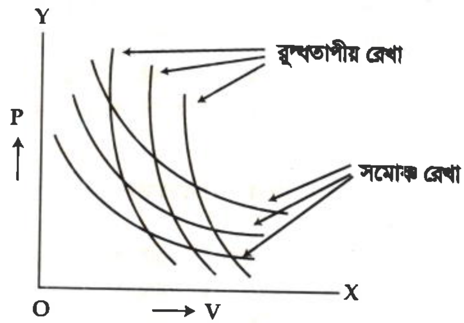
সুতরাং, $\gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{3}{2} = 1{\cdot}5$ (প্রমাণিত)

## ১.৪.৪ রুদ্ধতাপীয় রেখা (লেখ) সমোষ্ণ রেখা (লেখ)-এর চেয়ে অধিকতর খাড়া

**Adiabatic curve is steeper than isothermal curve**

$P - V$ লেখচিত্রের সাহায্যে সমোষ্ণ ও রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়া নির্দেশ করা যায় [চিত্র ১.৯]। লেখচিত্রের কোনো বিন্দুতে স্পর্শক টানলে ওই বিন্দুতে ঢাল বা নতি হবে $\frac{dP}{dV}$। দেখা যায় যে, যেকোনো বিন্দুতে রুদ্ধতাপ রেখার ঢাল সমোষ্ণ রেখার ঢালের $\gamma$ গুণ হয়।

সমোষ্ণ ও রুদ্ধতাপীয় সমীকরণদ্বয়কে ব্যবকলন করে সহজেই প্রমাণ করা যায় যে রুদ্ধতাপীয় রেখা সমোষ্ণ রেখা অপেক্ষা $\gamma$-গুণ খাড়া।



চিত্র ১.৯

সমোষ্ণ পরিবর্তনের ক্ষেত্রে

$PV =$ ধ্রুবক

উভয় পক্ষকে অবকলন করে পাই,

$$PdV + VdP = 0$$

$$\text{বা, } \left(\frac{dP}{dV}\right)_{\text{সমোষ্ণ}} = -\frac{P}{V} \quad \ldots \quad \ldots \quad (1.19)$$

অপরপক্ষে, রুদ্ধতাপ পরিবর্তনের ক্ষেত্রে,

$PV^{\gamma} =$ ধ্রুবক

উভয় পক্ষকে অবকলন করে পাই,

$$\gamma PV^{\gamma-1}dV + V^{\gamma}dP = 0$$

$$\text{বা, } \left(\frac{dP}{dV}\right)_{\text{রুদ্ধতাপ}} = -\frac{\gamma PV^{\gamma-1}}{V^{\gamma}} = -\gamma PV^{\gamma-1}V^{-\gamma}$$

$$= -\gamma PV^{-1} = -\gamma\frac{P}{V} \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad (1.20)$$

সমীকরণ (1.19) ও (1.20) তুলনা করলে দেখা যায় যে,

$$\left(\frac{dP}{dV}\right)_{\text{রুদ্ধতাপ}} = \gamma\left(\frac{dP}{dV}\right)_{\text{সমোষ্ণ}} \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad [1.20(a)]$$

$$\text{বা, } \frac{\left(\frac{dP}{dV}\right)_{\text{রুদ্ধতাপ}}}{\left(\frac{dP}{dV}\right)_{\text{সমোষ্ণ}}} = \gamma$$

1.20(1)নং সমীকরণ অনুযায়ী দেখা যায়,

সুতরাং, যেকোনো বিন্দুতে রুদ্ধতাপ রেখার ঢাল ওই বিন্দুতে সমোষ্ণ রেখার ঢাল অপেক্ষা $\gamma$ গুণ বেশি।

যেহেতু যেকোনো গ্যাসের ক্ষেত্রে $\gamma > 1$, সুতরাং রুদ্ধতাপীয় রেখা সমোষ্ণ রেখার চেয়ে $\gamma$ গুণ খাড়া।

## ১.৫ অভ্যন্তরীণ শক্তি
## Internal energy

একটি গ্যাস ভর্তি বেলুনে হাত দিয়ে চাপ দাও। দেখবে যে, বেলুনটিও ভেতর থেকে তোমার হাতে চাপ দিচ্ছে। বেলুন এই শক্তি পেল কোথা থেকে ? এই শক্তিই অভ্যন্তরীণ শক্তি। উপরোক্ত ধারণা থেকে আমরা বলতে পারি—

**প্রত্যেক ব্যবস্থা (system)-এর মধ্যে এমন একটি নির্দিষ্ট পরিমাণ শক্তি আছে যা কাজ সম্পাদন করে অন্য শক্তিতে রূপান্তরিত হতে পারে। বস্তুর মধ্যস্থ অণু-পরমাণুর গতিশক্তি এবং এদের মধ্যকার আন্তঃআণবিক বলের কারণে সৃষ্ট শক্তিকে অভ্যন্তরীণ শক্তি বলে। সংক্ষেপে বলা যায় কোনো সিস্টেমের বা বস্তুর মধ্যে যে শক্তি লুক্কায়িত বা সুপ্ত অবস্থায় থাকে যা পরিবেশ পরিস্থিতিতে বহিঃপ্রকাশ ঘটায় তাকে অভ্যন্তরীণ শক্তি বলে।**

অভ্যন্তরীণ শক্তি নিম্নোক্ত দুই ধরনের শক্তির যোগফল।

(ক) তাপীয় শক্তি যা এলোমেলোভাবে (randomly) বিচরণশীল অণুগুলোর গতিশক্তি এবং

(খ) আণবিক স্থিতিশক্তি (atomic potential energy)।

অণুর মধ্যে যেসব পরমাণু থাকে তাদের মধ্যে ক্রিয়াশীল বল এবং আন্তঃআণবিক বলের কারণে আণবিক স্থিতিশক্তির উৎপত্তি হয়।

অতএব মোট অভ্যন্তরীণ অন্তস্থ শক্তি, E = গতিশক্তি (K. E.) + স্থিতিশক্তি (P. E.)

তাপ যা গরম বস্তু থেকে শীতল বস্তুতে প্রবাহিত হয় তা গরম বস্তুর অন্তস্থ শক্তির মধ্যে উৎপন্ন হয়। তাপমাত্রার পার্থক্যের কারণে গরম ও শীতল বস্তুর মধ্যে যখন তাপ প্রবাহিত হয় তখন গরম বস্তুর অন্তস্থ শক্তি কমে। পক্ষান্তরে শীতল বস্তুর অন্তস্থ শক্তি বৃদ্ধি পায়। প্রকৃতপক্ষে গরম বস্তু থেকে শীতল বস্তুতে শক্তি গমনকে নির্দেশ করার

জন্য তাপ শব্দটি ব্যবহার করা হয়। এটা বলা সঠিক নয় যে একটি বস্তু তার অভ্যন্তরে তাপ ধারণ করে। বস্তুত একটি বস্তু অভ্যন্তরীণ শক্তি ধারণ করে, তাপ নয়।

কোনো বস্তুর মোট অভ্যন্তরীণ শক্তি কোনোভাবেই পরিমাপ করা সম্ভব নয়। তবে তাপ প্রয়োগে বস্তুর অভ্যন্তরীণ শক্তির পরিবর্তন সঠিকভাবে পরিমাপ করা যায়। স্থির তাপে অভ্যন্তরীণ শক্তির পরিবর্তন শূন্য হয় এবং কাজও শূন্য হয়।

## অভ্যন্তরীণ শক্তির পরিবর্তন

$du = C_V dT$

ধরা যাক, ঘর্ষণবিহীন একটি সিলিন্ডারের মধ্যে $m$ মোল আদর্শ গ্যাস আছে। এই গ্যাসের চাপ, আয়তন, তাপমাত্রা এবং অভ্যন্তরীণ শক্তি যথাক্রমে P, V, T এবং U। এখন এই গ্যাসে $dQ$ পরিমাণ তাপ প্রয়োগ করা হলে অভ্যন্তরীণ শক্তির পরিবর্তন $dU$ এবং বাহ্যিক কাজ $dW$ হলে,

তাপগতির ১ম সূত্র অনুযায়ী,

$$dQ = dU + dW$$

বা, $dQ = dU + PdV$

বা, $dU = dQ - PdV$

আয়তন স্থির থাকলে, $dU = dQ \quad [\because dV = 0]$

$\therefore \quad dU = dQ$

এক্ষেত্রে দেখা যায় যে, **স্থির আয়তনে গ্যাসের অভ্যন্তরীণ শক্তির বৃদ্ধি সরবরাহকৃত তাপের সমান।**

স্থির আয়তনে $m$ মোল গ্যাসের $dQ$ পরিমাণ তাপশক্তি সরবরাহ করায় যদি এর তাপমাত্রা $dT$ পরিমাণ বৃদ্ধি পায় তাহলে ওই গ্যাসের মোলার আপেক্ষিক তাপ,

$$C_V = \frac{dQ}{mdT}$$

বা, $dQ = mC_V dT$, 1 মোল গ্যাসের ক্ষেত্রে $m = 1$

$\therefore \quad dQ = C_V dT$। অর্থাৎ $dT$ তাপমাত্রা বৃদ্ধিতে 1 মোল গ্যাসের অভ্যন্তরীণ শক্তির বৃদ্ধি হলো $C_V$ এবং $dT$ এর গুণফলের সমান। এক্ষেত্রে আয়তন স্থির থাকা আবশ্যক নয়। কারণ অভ্যন্তরীণ শক্তি কেবল তাপমাত্রার ওপর নির্ভরশীল।

## গ্যাসের অভ্যন্তরীণ শক্তির নির্ভরতা

কোনো গ্যাসের অবস্থা তার চাপ, আয়তন ও তাপমাত্রা দ্বারা নির্ধারিত হয়। সুতরাং, মনে করা স্বাভাবিক যে গ্যাসের অভ্যন্তরীণ শক্তি এই তিনটি রাশির ওপর নির্ভর করে। প্রকৃতপক্ষে তা নয়। অনেক পরীক্ষা-নিরীক্ষার পর বিজ্ঞানী **জুল** নিম্নোক্ত সিদ্ধান্তে উপনীত হন— DAT(22-23) MAT(15-16)

**কোনো নির্দিষ্ট পরিমাণ গ্যাসের অভ্যন্তরীণ শক্তি শুধু এর তাপমাত্রার ওপর নির্ভর করে, এর চাপ বা আয়তনের ওপর নির্ভর করে না। একে মেয়ারের প্রকল্প (Mayer's hypothesis) বলা হয়।**

অতএব, তাপমাত্রার পরিবর্তন হতে নির্দিষ্ট পরিমাণ গ্যাসের অভ্যন্তরীণ শক্তির পরিবর্তন পরিমাপ করা যায়। স্পষ্টত চাপ বা আয়তন পরিবর্তিত হলেও তাপমাত্রা যদি স্থির থাকে তবে গ্যাসের অভ্যন্তরীণ শক্তিও অপরিবর্তিত থাকবে। অভ্যন্তরীণ শক্তির পরিবর্তন কোনো ব্যবস্থার প্রাথমিক ও চূড়ান্ত অবস্থার ওপর নির্ভর করে। কোন পথে চূড়ান্ত অবস্থায় পৌঁছল তার ওপর নির্ভর করে না।

**কাজ : কোন প্রক্রিয়ায় অভ্যন্তরীণ শক্তির পরিবর্তন শূন্য হবে ?**

প্রত্যাবর্তী বা আবর্ত প্রক্রিয়ায় যেহেতু বস্তু প্রাথমিক অবস্থায় ফিরে আসে তাই কার্যরত বস্তুর অভ্যন্তরীণ শক্তির পরিবর্তন শূন্য হয়।

**সম্প্রসারিত ক্রিয়াকর্ম : বন্দুকের গুলি লক্ষ্যবস্তুকে আঘাত করলে গুলি ও বস্তু উত্তপ্ত হয় কেন ?**

লক্ষ্যবস্তুকে আঘাত করলে গুলির বেগ প্রতিহত হয় এবং এর গতিশক্তির কিছু অংশ তাপশক্তিতে রূপান্তরিত হয়। তাই গুলি ও বস্তুর উষ্ণতা বেড়ে যায়। ফলে এরা উত্তপ্ত হয়।

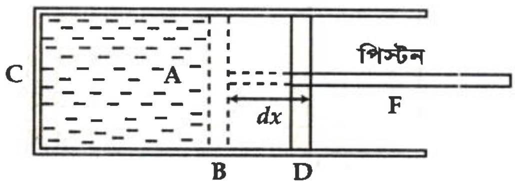
## ১.৬ তাপ, অভ্যন্তরীণ শক্তি ও কাজ
### Heat, internal energy and work

আমরা জানি যখন কোনো গ্যাস প্রসারিত হয়, তখন গ্যাস নিজে কিছু বাহ্যিক কাজ সম্পন্ন করে। গ্যাস যখন সঙ্কুচিত হয়, তখন গ্যাসের ওপর কিছু কাজ সম্পাদিত হয়। এখানে আমরা **গ্যাসের প্রসারণে সম্পাদিত কাজের পরিমাণ নির্ণয় করব।**

মনে করি C কুপরিবাহী পদার্থের তৈরি একটি ধাতব চোঙ [চিত্র ১·১০]। এখন চোঙের মধ্যে কিছু পরিমাণ গ্যাস ভরে এর মুখ হালকা, ঘর্ষণ মুক্ত ও বায়ু নিরুদ্ধ পিস্টন F দ্বারা বন্ধ করি। ফলে পিস্টন বিনা বাধায় চলাচল করতে পারে। উল্লেখ্য, পিস্টনও কুপরিবাহী পদার্থের তৈরি।

যদি আবদ্ধ গ্যাসের চাপ P এবং পিস্টন কিংবা চোঙের প্রস্থচ্ছেদের ক্ষেত্রফল A হয়, তবে পিস্টনের ওপর গ্যাস কর্তৃক প্রযুক্ত বল F = চাপ × ক্ষেত্রফল বা, $F = P \times A$

মনে করি গ্যাস স্থির চাপে প্রসারিত হলো, ফলে পিস্টনটি B স্থান হতে D স্থানে সরে গিয়ে $dx$ দূরত্ব অতিক্রম করল।




চিত্র ১·১০

অতএব সম্পাদিত কাজ

$dW$ = বল × সরণ

বা, $dW = F \times dx = PA\,dx$

বা, $\mathbf{dW = P.dV}$ ... ... ... (1.21)

[ এখানে $A.\,dx = dV$ = গ্যাসের প্রসারণজনিত আয়তন বৃদ্ধি ]

অর্থাৎ কাজ = চাপ × আয়তন পরিবর্তন

এই কাজকে বাহ্যিক কাজ (external work) বলে।

[বি.দ্র. গ্যাসের সম্প্রসারণে কৃত কাজ ধনাত্মক এবং সংকোচনে কৃত কাজ ঋণাত্মক]

যদি গ্যাসের প্রাথমিক আয়তন $V_1$ এবং প্রসারণের পর শেষ আয়তন $V_2$ হয়, তবে গ্যাস কর্তৃক সম্পাদিত কাজ

$dW = P\,(V_2 - V_1)$ ... ... ... (1.22)

যদি গ্যাসের আয়তন প্রসারণের সময় চাপও পরিবর্তিত হয়, তবে

$dW = dP.\,dV = (P_1 - P_2)\,(V_2 - V_1)$ ... ... (1.23)

এখানে, $P_1$ = গ্যাসের আদি চাপ এবং $P_2$ = প্রসারণের পর শেষ চাপ। চাপ $Nm^{-2}$ এবং আয়তন $m^3$ এককে প্রকাশ করা হলে কাজের একক হবে J (জুল)।

তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্র থেকে আমরা জানি কোনো সিস্টেমে $dQ$ পরিমাণ তাপশক্তি সরবরাহ করার ফলে কোনো সিস্টেমের অন্তস্থ শক্তির পরিবর্তন $dU$ এবং বাহ্যিক কৃত কাজ $dW$ হলে

$dQ = dU + dW$

বা, $dQ = dU + PdV$ ... ... ... (1.24)

বা, $dQ = dU + P(V_2 - V_1)$ ... ... ... (1.25)

সমীকরণ (1.24) এবং (1.25) হলো সমচাপীয় প্রক্রিয়ায় তাপ, অভ্যন্তরীণ শক্তি এবং কাজের মধ্যে সম্পর্ক।

## গাণিতিক উদাহরণ ১.৭

**১। একটি আদর্শ গ্যাসকে বদ্ধ, দৃঢ় এবং তাপ নিরোধক পাত্রে রাখা হয়েছে। 100 Ω রোধের একটি কুণ্ডলী যা 2 অ্যাম্পিয়ার তড়িৎ প্রবাহ 6 মিনিটের জন্য সরবরাহ করছে। গ্যাসের অভ্যন্তরীণ শক্তির পরিবর্তন কত হবে?**

যেহেতু পাত্রটি তাপ নিরোধক সুতরাং তাপ আদান-প্রদান, $Q = 0$

এখন, 6 মিনিটে তড়িৎ শক্তি দ্বারা কৃত কাজ,

$W = I^2Rt$

$= (2)^2 \times 100 \times 360$

$= 4 \times 100 \times 360$

$= 14{\cdot}4 \times 10^4$ J

এখানে,

$R = 100\,\Omega$

$t = 6\text{ min} = 6 \times 60 = 360\text{ s}$

I = 2 অ্যাম্পিয়ার

$\Delta U = ?$

এই কাজ বাইরে থেকে গ্যাসে সরবরাহ করা হয় সুতরাং, এটি ঋণাত্মক।

অর্থাৎ $W = -14{\cdot}4 \times 10^4$ J

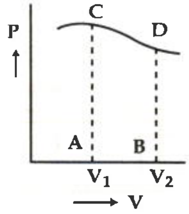
তাপগতিবিদ্যার ১ম সূত্র থেকে পাই,

$Q = \Delta U + W$

বা, $\Delta U = Q - W = 0 - (-14{\cdot}4 \times 60^4)$ $[\because Q = 0]$

$= 14{\cdot}4 \times 10^4$ J

**নিজে কর :** যেকোনো তাপীয় প্রক্রিয়ায় কৃত কাজের পরিমাণ PV লেখচিত্রে প্রদর্শন কর।




চিত্র ১·১১

যেকোনো তাপীয় প্রক্রিয়ায় কৃত কাজের পরিমাণ PV লেখচিত্রের সাহায্যে নির্ণয় করা যায়। এই লেখচিত্রকে **নির্দেশক চিত্র** বলে। যেহেতু গ্যাসের চাপ এর আয়তনের সাথে পরিবর্তিত হয়, তাই নির্দেশক চিত্র উল্লিখিত PV লেখচিত্রের ন্যায় হবে। গ্যাসের এই পরিবর্তনের জন্য কৃত কাজের পরিমাণ নির্দেশক চিত্র ১·১১-এর CABD ক্ষেত্রফলের সমান হবে।

## ১·৭ তাপগতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্র
**Second law of thermodynamics**

### ধারণা
**Concept**

ইতোপূর্বে বিভিন্ন প্রকার শক্তির সঙ্গে আমরা পরিচিত হয়েছি। সকল শক্তিই কাজ করার সামর্থ্য যোগায়। যেমন যান্ত্রিক শক্তি, বিদ্যুৎ শক্তি, রাসায়নিক শক্তি, সৌর শক্তি, তাপশক্তি ইত্যাদি। তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্র থেকে আমরা জেনেছি যে তাপ কাজে এবং কাজ তাপে রূপান্তরিত হতে পারে। তবে কোন দিকে তাপ প্রবাহিত হবে বা কাজ সম্পাদিত হবে তা প্রথম সূত্র থেকে জানা যায় না। এছাড়া নির্দিষ্ট পরিমাণ তাপশক্তিকে সম্পূর্ণরূপে কাজে পরিণত করা যায় না। যান্ত্রিক শক্তিসহ বিভিন্ন ধরনের শক্তি থেকে তাপ শক্তি সহজেই পাওয়া যায়; কিন্তু তাপ ইঞ্জিন ছাড়া তাপ থেকে যান্ত্রিক শক্তি তথা কাজ সম্পাদন সম্ভব নয়। যেমন জলপ্রপাতের পানির পতনে সৃষ্ট তাপশক্তিকে অন্য কোনো যন্ত্রের সাহায্য ছাড়া অন্য শক্তিতে রূপান্তর করা যায় না। তাই ইঞ্জিনের উপর বিভিন্ন গবেষণার ফলাফল থেকে বিখ্যাত প্রকৌশলী সাদি কার্নো (Sadi Carnot) এই সিদ্ধান্তে উপনীত হন যে, তাপশক্তিকে কখনই সম্পূর্ণরূপে কাজে পরিণত করা যায় না। **এই বক্তব্যই তাপগতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্রের ভিত্তি।**

বিজ্ঞানী **ক্লসিয়াস** এবং **কেলভিন** পৃথক পৃথকভাবে কার্নোর উপরোক্ত তথ্যের যে সাধারণ রূপ দেন তাই তাপ-গতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্র নামে পরিচিত। তাপগতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্রটি বিভিন্ন রূপে প্রকাশ করা যায়, তবে প্রত্যেকটি প্রস্তাবনার মূলভাব একই এবং তা হচ্ছে তাপ কখনো স্বতঃস্ফূর্তভাবে নিম্ন তাপমাত্রার বস্তু হতে উচ্চ তাপমাত্রার বস্তুতে যেতে পারে না। এই সূত্রের সংক্ষিপ্ত রূপ—"Efficiency cannot be one" অর্থাৎ **কোনো কিছুর দক্ষতা এক হতে পারে না।** এসব প্রস্তাবনার মধ্যে **ক্লসিয়াসের** প্রস্তাবনাকে নিখুঁত ও উন্নত বলে গণ্য করা হয়েছে।

নিম্নে সূত্রটির বিশেষ কয়েকটি রূপ বর্ণনা করা হলো।

**(ক) ক্লসিয়াসের বিবৃতি** (Clausius's statement) : **"বাইরের কোনো শক্তির সাহায্য ব্যতিরেকে কোনো স্বয়ংক্রিয় যন্ত্রের পক্ষে নিম্ন তাপমাত্রার কোনো বস্তু হতে উচ্চ তাপমাত্রার কোনো বস্তুতে তাপের স্থানান্তর সম্ভব নয়।"**

অন্য কথায়, **"বাইরের কোনো শক্তি কর্তৃক সম্পাদিত কাজ ব্যতিরেকে শীতল বস্তু হতে উষ্ণ বস্তুতে তাপ নিজে প্রবাহিত হতে পারে না।"**

উপরের বিবৃতি হতে এটি পরিষ্কার বোঝা যায় যে, তাপগতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্র পদার্থবিদ্যার অন্যান্য শাখার অন্তর্ভুক্ত বিভিন্ন ঘটনার সাথে সংগতিপূর্ণ। যেমন বাইরে থেকে কোনো বস্তুর ওপর কাজ সম্পন্ন না করলে বস্তু কখনই নিম্ন তল হতে উচ্চ তলে যেতে পারে না। পুনরায়, কাজ না করলে নিম্ন বিভব তল হতে উচ্চ বিভব তলে বিদ্যুৎ প্রবাহিত হতে পারে না, ইত্যাদি। উক্ত সূত্র হতে বোঝা যায় যে, উষ্ণতর বস্তু হতে শীতলতর বস্তুতে তাপ আপনা হতেই প্রবাহিত হতে পারে।

পাহাড়ের ওপর থেকে কোনো বস্তু গড়িয়ে দিলে স্বাভাবিকভাবে বস্তুটি নিচে চলে আসে। কিন্তু বস্তুটিকে নিচে থেকে ওপরে নিতে হলে বাইরের শক্তি ব্যবহার করেই করতে হয়; অর্থাৎ বস্তুর ওপর কাজ করতে হয়। আজ পর্যন্ত এমন কোনো হিমায়ন যন্ত্র (refrigerator) অবিষ্কার করা যায়নি যা শক্তির সরবরাহ ছাড়া কাজ করতে পারে। এই ঘটনা ক্লসিয়াস প্রদত্ত তাপগতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্রের সত্যতা প্রমাণ করে।

**(খ) কেলভিনের বিবৃতি** (Kelvin's statement) : **"কোনো বস্তুকে তার পরিপার্শ্বের শীতলতম অংশ হতে অধিকতর শীতল করে শক্তির অবিরাম সরবরাহ পাওয়া সম্ভব নয়।"**

এই সূত্র হতে বুঝা যায় যে, তাপকে কাজে পরিণত করা যায় ততক্ষণ পর্যন্ত যতক্ষণ পর্যন্ত যে বস্তু হতে তাপ গ্রহণ করা হয় তা তার পরিপার্শ্বের শীতলতম অংশ হতে অধিকতর শীতল হবে না। দুটি বস্তুর তাপমাত্রা সমান হলে ওই বস্তুদ্বয়ের মধ্যে তাপের পরিমাণ যত কম বেশিই হোক না কেন এক বস্তু হতে অন্য বস্তুতে তাপ প্রবাহিত হবে না।

(গ) প্ল্যাংক-এর বিবৃতি (Planck's statement) : "কোনো তাপ উৎস হতে অনবরত তাপ শোষণ করবে এবং তা সম্পূর্ণরূপে কাজে রূপান্তরিত হবে এরূপ একটি তাপ ইঞ্জিন তৈরি করা সম্ভব নয়।"

(ঘ) কার্নোর বিবৃতি (Carnot's statement) : "কোনো নির্দিষ্ট পরিমাণ তাপশক্তি সম্পূর্ণ বা পুরোপুরিভাবে যান্ত্রিক শক্তিতে রূপান্তর করার মতো যন্ত্র তৈরি করা সম্ভব নয়।"

**সম্প্রসারিত ক্রিয়াকর্ম** : তাপগতিবিদ্যার প্রথম ও দ্বিতীয় সূত্রের তুলনামূলক আলোচনা কর।

তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্র ও দ্বিতীয় সূত্রের মূল পার্থক্য বোঝা প্রয়োজন। প্রথম সূত্রটি শক্তির সংরক্ষণ সূত্রেরই বিশেষ রূপ। প্রথম সূত্রের প্রস্তাবনা এই যে, তাপ ও যান্ত্রিক শক্তি উভয়ই শক্তির বিভিন্ন রূপ এবং একরূপ হতে অন্যরূপে পরিবর্তন সম্ভব। এছাড়া রূপান্তরের সময় একে অন্যের সমতুল্য, এটিও প্রথম সূত্রের সাহায্যে জানা যায়। বাস্তবক্ষেত্রে যদিও আমরা একটি নির্দিষ্ট পরিমাণ কার্যকে সম্পূর্ণভাবে তাপে রূপান্তর করতে পারি; কিন্তু একটি নির্দিষ্ট পরিমাণ তাপকে সম্পূর্ণরূপে কার্যে রূপান্তর করার পরিকল্পনা কখনো বাস্তবায়িত করা সম্ভব নয়। কিংবা, তাপের উৎপত্তি কোথায়— কোনো উত্তপ্ত বস্তুতে, না কোনো শীতল বস্তুতে। এসব প্রশ্নের উত্তর আমরা প্রথম সূত্র হতে পাই না। তাপগতিবিদ্যার সাথে সামঞ্জস্যপূর্ণ এসব প্রশ্নের আলোচনাই তাপগতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্রের প্রতিপাদ্য বিষয়।

তাপগতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্র অনুসারে তাপ যখন কাজে রূপান্তরিত হয় তখন তার কিছু অংশ কাজে রূপান্তরিত হয়, সম্পূর্ণ তাপ কাজে রূপান্তরিত হয় না। অধিকন্তু ওই রূপান্তরের জন্য সর্বদা একটি উত্তপ্ত ও একটি শীতল বস্তুর যুগপৎ উপস্থিতি প্রয়োজন। উত্তপ্ত বস্তু হতে শীতল বস্তুতে তাপ গমনকালে কিছু কাজ সম্পন্ন হবে।

### তাপগতিবিদ্যার শূন্যতম, প্রথম ও দ্বিতীয় সূত্রের মূল বক্তব্য

১। তাপগতিবিদ্যার শূন্যতম সূত্রের মূল বক্তব্য হলো—প্রকৃতিতে তাপমাত্রা নামক একটি প্রয়োজনীয় তাপগতীয় চল রাশি রয়েছে।

২। তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্রের মূল বক্তব্য হলো—প্রকৃতিতে অভ্যন্তরীণ শক্তি নামক একটি প্রয়োজনীয় তাপগতীয় চল রাশি রয়েছে এবং

৩। তাপগতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্রের মূল বক্তব্য হলো—প্রকৃতিতে এনট্রপি নামে একটি প্রয়োজনীয় তাপগতীয় চল রাশি রয়েছে।

**হিসাব কর** : একটি গাড়ির চাকাকে পাম্প করে এর চাপ 1 atm হতে বাড়িয়ে 2 atm করার সাথে সাথে হঠাৎ টায়ারটি ফেটে গেল। ওই দিনের তাপমাত্রা 30°C হলে টায়ার ফাটার অব্যবহিত পরে এর তাপমাত্রা কত ছিল ? এর ফলে টায়ারের ভেতরের বায়ু কর্তৃক কৃত কাজের পরিমাণ বের কর।

**সম্প্রসারিত ক্রিয়াকর্ম** : মনে কর, গ্রীষ্মকালে সকল নদ-নদীর, সমুদ্রের পানি বাষ্পায়িত হয়ে শুকিয়ে গেল। আবার শীতকালে তা জমে বরফে পরিণত হলো। যদি এ ধরনের ঘটনা ঘটে, তাহলে তাপগতিবিদ্যার কোন সূত্র ব্যর্থ হবে ?

তাপগতিবিদ্যার ২য় সূত্র অনুযায়ী, যেহেতু দক্ষতা কখনই এক বা 100% পাওয়া সম্ভব নয় তাই এ ক্ষেত্রে তাপ-গতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্র ব্যর্থ বা অকার্যকর হবে।

## ১.৮ প্রত্যাবর্তী এবং অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া
## Reversible and irreversible processes

কোনো সংস্থা বা সিস্টেম (system) যখন এক অবস্থা হতে অন্য অবস্থায় যায়, তখন অবস্থার এই পরিবর্তন দুই প্রক্রিয়ায় সংঘটিত হয়, যথা—

(১) প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া এবং (২) অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া। এখন দুটি প্রক্রিয়া বিশদভাবে আলোচনা করা হলো।

### ১.৮.১ প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া
### Reversible process

মনে কর, তোমার হাতে এক টুকরা বরফ আছে, এই বরফকে পাত্রে রেখে নির্দিষ্ট পরিমাণ তাপ প্রয়োগ কর। দেখা যাবে যে, তা তাপ শোষণ করে 0°C তাপমাত্রায় বরফ টুকরা পানিতে পরিণত হয়েছে। এবার ওই একই পরিমাণ তাপ বের করে নিলে দেখবে ওই পানি পুনরায় বরফে পরিণত হয়েছে। এটি একটি প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া। তবে পরিপূর্ণ প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া পাওয়া যাবে না, কেননা খুব সামান্য হলেও কিছু পরিমাণ তাপ প্রকৃতিতে ক্ষয় হয়। অতএব বলা যায় প্রকৃতিতে প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ার কোনো অস্তিত্ব নেই।

সংজ্ঞা : **যে প্রক্রিয়া বিপরীতমুখী হয়ে প্রত্যাবর্তন করে এবং সম্মুখবর্তী ও বিপরীতমুখী প্রক্রিয়ার প্রতি স্তরে তাপ ও কাজের ফলাফল সমান ও বিপরীত হয় সেই প্রক্রিয়াকে প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া বলে। একে প্রত্যাগামী প্রক্রিয়াও বলা হয়।**

সাধারণ চাপে ও 273K তাপমাত্রায় কিছু পরিমাণ বরফ পানিতে পরিণত হতে যে পরিমাণ তাপ শোষণ করে ওই পরিমাণ পানি বরফে পরিণত হতে একই পরিমাণ তাপ বর্জন করে। কাজেই এটি একটি প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া।

### প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ার বৈশিষ্ট্য
### Characteristics of reversible process

প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ায় সংস্থার পরিবর্তন ঘটে খুবই ধীরে এবং অতি ক্ষুদ্র পরিমাণে যে পর্যন্ত না সমগ্র পরিবর্তন সংঘটিত হয়। এই প্রক্রিয়া এত ধীরে সংঘটিত হয় যে, প্রতিটি ক্ষুদ্র ক্ষুদ্র ধাপে সংস্থা কার্যত তাপগতীয় সাম্যাবস্থা (Thermodynamical equilibrium) বজায় রাখে। উপরন্তু এই প্রক্রিয়ায় অস্থিতিস্থাপকতা, সান্দ্রতা, ঘর্ষণ, বৈদ্যুতিক রোধ, চুম্বকীয় হিস্‌টেরিসিস প্রভৃতির ন্যায় অবক্ষয়ী ফলাফলগুলো (dissipative effects) থাকবে না। মোট কথা এটি মূলত স্থৈতিক (quasi-static) এবং অনবক্ষয়ী (non-dissipative) হবে। এই প্রক্রিয়া এমনভাবে সংঘটিত করতে হবে যাতে প্রক্রিয়ার শেষে সংস্থা (system) ও পরিপার্শ্বের কোনোরূপ নিট পরিবর্তন ব্যতিরেকে উভয়েই প্রাথমিক অবস্থায় ফিরে যেতে পারে। এটি একটি ধীর প্রক্রিয়া এবং সংস্থা তাপগতির সাম্যাবস্থা বজায় রাখে।

**প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ার শর্ত :** প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ার শর্তগুলো হলো—

(ক) প্রক্রিয়াটি অবশ্যই খুব ধীরে সংঘটিত হতে হবে এবং

(খ) কোনো প্রক্রিয়া প্রত্যাবর্তী হবে যদি প্রক্রিয়াটি চলাকালীন কোনো অপচয়ী শক্তির সৃষ্টি না হয়।

ঘর্ষণ, সান্দ্রতা, রোধ ইত্যাদি হলো অপচয়ী শক্তির উৎস। সুতরাং ঘর্ষণ, সান্দ্রতা, রোধ ইত্যাদির বিরুদ্ধে ঘটা কোনো প্রক্রিয়া প্রত্যাবর্তী হবে না।

Reading

**উদাহরণ (Examples ) :** বাস্তব ক্ষেত্রে সম্পূর্ণ প্রত্যাগামী প্রক্রিয়ার উদাহরণ দেয়া সম্ভবপর নয়। তবে কিছু কিছু প্রক্রিয়া আছে যাদেরকে আপাতভাবে প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া বলা যেতে পারে। এমন কতগুলো প্রক্রিয়া নিম্নে উল্লেখ করা হলো।

(i) খুব ধীরে সংঘটিত করলে সমোষ্ণ এবং রুদ্ধতাপ পরিবর্তন প্রত্যাবর্তী হবে। কারণ এক্ষেত্রে ঘর্ষণের ন্যায় অবক্ষয়ী বল না থাকায় এবং প্রক্রিয়াটি খুব ধীরে সংঘটিত হওয়ায় পরিবহণ, পরিচলন ও বিকিরণের দরুন তাপ বা শক্তি ক্ষয় হয় না।

(ii) প্রতি গ্রামে 80 ক্যালরি (cal) বা 336 J তাপশক্তি শোষণ করে স্বাভাবিক চাপের 0°C তাপমাত্রায় বরফ পানিতে পরিণত হয়। আবার স্বাভাবিক চাপে 0°C তাপমাত্রার পানি হতে প্রতি গ্রামে 80 ক্যালরি তাপ বা 336 J তাপশক্তি অপসারণ করলে পুনরায় বরফ পাওয়া যায়। সুতরাং প্রক্রিয়াটি প্রত্যাবর্তী।

(iii) কিছুটা ওপর হতে একটি স্থিতিস্থাপক বলকে একটি স্থিতিস্থাপক ইস্পাত পাতের ওপর ফেলা হলে শক্তির কোনো অপচয় না হওয়ায় বলটি আবার তার প্রাথমিক উচ্চতা পর্যন্ত ওপরে উঠবে। সুতরাং প্রক্রিয়াটি প্রত্যাবর্তী।

(iv) স্থিতিস্থাপক সীমার মধ্যে খুব ধীরে কোনো স্প্রিংকে সম্প্রসারণ করলে প্রতি ধাপে প্রসারণের সময় স্প্রিং-এর ওপর যে পরিমাণ কাজ করা হবে সঙ্কোচনের সময় স্প্রিং সেই পরিমাণ কাজ সম্পন্ন করবে। সুতরাং প্রক্রিয়াটি প্রত্যাবর্তী।

### ১.৮.২ অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া
### Irreversible process

ধরা যাক, পানি ভর্তি একটি কাচের গ্লাস হাতে নিয়ে একজন দাঁড়িয়ে আছে। হঠাৎ করে মেঝের ওপর গ্লাসটি পড়ে গিয়ে ভেঙ্গে গেল, ফলে পানি মেঝের ওপর ছড়িয়ে পড়ল। এখন এই পানি এবং ভাঙ্গা গ্লাসকে একত্রিত করা কখনই সম্ভব নয়। এক্ষেত্রে কার্যনির্বাহক বস্তুকে অর্থাৎ পানিকে পুনরুদ্ধার করা সম্ভব নয়। আবার ঘটনাটি খুব দ্রুত সংঘটিত হয়েছে। এটি একটি অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া।

আবার, ধরা যাক দুটি আবদ্ধ পাত্র রয়েছে যার মধ্যে একটি পাত্র গ্যাসপূর্ণ এবং অন্যটি খালি। এখন একটি নল দ্বারা পাত্র দুটি যুক্ত করে দিলে দেখা যাবে যে গ্যাসপূর্ণ পাত্রটি হতে গ্যাস শূন্য পাত্রে গমন করছে। এক সময় দেখা যাবে উভয় পাত্রের গ্যাসের চাপ সমান হয়েছে। এই প্রক্রিয়াটিতে গ্যাস কোনো বাহ্যিক কাজ করে না। এখন বহু চেষ্টা করলেও গ্যাসটি নিজে থেকে আর আগের অবস্থায় ফিরে যেতে পারে না। শুধুমাত্র বাহ্যিক কাজ করলেই তা সম্ভব। সুতরাং এই প্রক্রিয়াটি অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া।

**সংজ্ঞা :** যে প্রক্রিয়া সম্মুখগামী হওয়ার পর বিপরীতমুখী হয়ে প্রত্যাবর্তন করতে পারে না, তাকে অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া বলে। একে অপ্রত্যাগামী প্রক্রিয়া বা অনপনেয় প্রক্রিয়াও বলা হয়।

অথবা, যে প্রক্রিয়ায় সম্ভাব্য সব প্রাকৃতিক উপায় সত্ত্বেও সমগ্র সংস্থাকে পুরোপুরি প্রাথমিক অবস্থায় ফিরিয়ে আনা যায় না বা যে প্রক্রিয়া বিপরীতমুখী হয়ে প্রত্যাবর্তন করতে পারে না তাকে অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া বলে।

### অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ার বৈশিষ্ট্য
### Characteristics of irreversible process

MAT(18-19) , DAT(10,11)

(১) অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া হঠাৎ এবং স্বতঃস্ফূর্তভাবে (spontaneously) সংঘটিত হয়।
(২) প্রকৃতিতে সব প্রক্রিয়া স্বতঃস্ফূর্তভাবে ঘটে থাকে। সুতরাং প্রাকৃতিক প্রক্রিয়া মাত্রই অপ্রত্যাবর্তী।
(৩) এই প্রক্রিয়ায় সংস্থা কখনই তার প্রাথমিক অবস্থায় ফিরে যাবার প্রবণতা দেখায় না।
(৪) এটি একটি দ্রুত প্রক্রিয়া এবং এটি তাপগতীয় সাম্যাবস্থা বজায় রাখে না।

Reading

**উদাহরণ (Examples) :** নিম্নে অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ার কয়েকটি উদাহরণ দেওয়া হলো।

(i) বৈদ্যুতিক রোধের মধ্য দিয়ে বিদ্যুৎ প্রবাহিত হলে তাপ সৃষ্টি হয়। এটি একটি অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া।

(ii) দুটি বস্তুর ঘর্ষণের দরুন যে তাপ সৃষ্টি হয় তা একটি অপ্রত্যাগামী প্রক্রিয়া। কারণ ঘর্ষণের বিরুদ্ধে যে কাজ করা হয় তাই তাপে রূপান্তরিত হয় এবং ওই তাপ কোনো প্রকারেই কাজে পরিণত করা যায় না।

(iii) ভিন্ন তাপমাত্রার দুটি বস্তুকে পরস্পরের সংস্পর্শে স্থাপন করলে তাপ অধিক তাপমাত্রার বস্তু হতে কম তাপমাত্রার বস্তুতে প্রবাহিত হবে। কিন্তু কম তাপমাত্রার বস্তু হতে অধিক তাপমাত্রার বস্তুতে তাপ প্রবাহের কোনো প্রবণতা নেই। সুতরাং এটি একটি অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া।

(iv) বন্দুক হতে গুলি ছুড়লে বারুদের বিস্ফোরণ ঘটে। এই বিস্ফোরণ অতি দ্রুত সংঘটিত হয়। এই প্রক্রিয়া অপ্রত্যাবর্তী।

### প্রত্যাবর্তী ও অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ার মধ্যে তুলনা

(১) প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া একটি অতি ধীর প্রক্রিয়া। অপরদিকে অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া একটি দ্রুত প্রক্রিয়া।

(২) প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া স্বতঃস্ফূর্ত প্রক্রিয়া নয়। পক্ষান্তরে অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া একটি স্বতঃস্ফূর্ত ও একমুখী প্রক্রিয়া।

(৩) প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ায় কার্যনির্বাহক বস্তু প্রাথমিক অবস্থায় ফিরে আসে। পক্ষান্তরে অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ায় কার্য-নির্বাহক বস্তু প্রাথমিক অবস্থায় ফিরে আসে না।

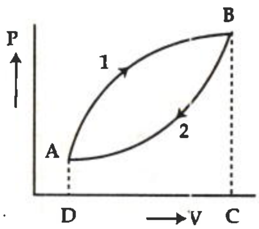
(৪) প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ায় সিস্টেমের তাপগতীয় সাম্যাবস্থা বজায় থাকে। পক্ষান্তরে অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ায় সিস্টেমের তাপগতীয় অবস্থা বজায় থাকে না।

### ১.৮.৩ আবর্ত প্রক্রিয়া বা চক্র
### Cyclic process or cycle

এক বা একাধিক প্রক্রিয়া বা পদ্ধতির শেষে যদি কোনো বস্তু তার প্রাথমিক অবস্থায় ফিরে আসে তবে ওই প্রক্রিয়াকে আবর্ত প্রক্রিয়া বা চক্র বলে। চিত্র ১.১২-এ A1B2 একটি আবর্ত প্রক্রিয়া। এটি A1B ও B2A প্রক্রিয়া দুটির সমন্বয়ে গঠিত।

এখন, A1B প্রক্রিয়ায় কৃত কাজ = ক্ষেত্রফল A1BCD এবং B2A প্রক্রিয়ায় কৃত কাজ = ক্ষেত্রফল A2BCD

অতএব, সম্পূর্ণ চক্রে কৃত কাজ = ক্ষেত্রফল A1BCD − ক্ষেত্রফল A2BCD
= ক্ষেত্রফল A1B2A
= আবর্তের ক্ষেত্রফল



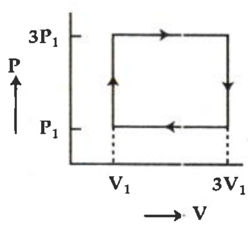
চিত্র ১.১২

দক্ষিণাবর্তী চক্রের ক্ষেত্রে চক্রের ক্ষেত্রফল ধনাত্মক। অতএব কৃত কাজও ধনাত্মক হয়। বামাবর্তী চক্রের ক্ষেত্রে চক্রের ক্ষেত্রফল ঋণাত্মক, ফলে কৃত কাজও ঋণাত্মক হয়।

অভ্যন্তরীণ শক্তি বস্তুর অবস্থার ওপর নির্ভর করে। এখন যেহেতু একটি চক্রে প্রাথমিক ও চূড়ান্ত অবস্থা একই; সুতরাং, অভ্যন্তরীণ শক্তির পরিবর্তন $= U_A - U_A = 0$। অর্থাৎ আবর্ত প্রক্রিয়ায় একটি চক্রের অভ্যন্তরীণ শক্তির পরিবর্তন শূন্য হয়।

### গাণিতিক উদাহরণ ১.৮

**১। বর্ণিত চিত্রে প্রদত্ত আবর্ত প্রক্রিয়ায় কৃত কাজের মান নির্ণয় কর।**




A বিন্দু হতে B বিন্দুতে যেতে কৃত কাজ,

$$W_{AB} = 3P_1(3V_1 - V_1) = 3P_1 \times 2V_1 = 6P_1V_1$$

B বিন্দু হতে C বিন্দুতে যেতে কৃত কাজ, $W_{BC} = 0\ [\because\ \Delta V = 0]$

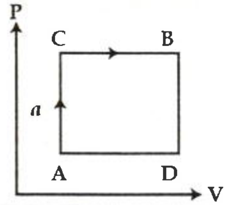
C বিন্দু হতে D বিন্দুতে যেতে কৃত কাজ,

$$W_{CD} = P_1(V_1 - 3V_1) = P_1 \times 2V_1 = 2P_1V_1$$

D বিন্দু হতে A বিন্দুতে যেতে কৃত কাজ, $W_{DA} = 0\ [\because\ \Delta V = 0]$

অতএব, সমগ্র আবর্ত প্রক্রিয়ায় কৃত কাজ $= 6P_1V_1 - 2P_1V_1 = 4P_1V_1$

**২। একটি কার্যরত বস্তুকে প্রাথমিক অবস্থান A থেকে B অবস্থানে ACB পথে আনা হলো [চিত্র দ্রষ্টব্য]। শোষিত তাপ Q = 640 J এবং কৃত কাজ, W = 364 J। বস্তুটিকে ADB পথে A থেকে B-তে নিলে কৃত কাজ কত? এক্ষেত্রে শোষিত তাপ 340 J।**

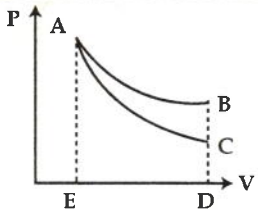



ACB পথের ক্ষেত্রে, $Q_1 = W_1 + (U_B - U_A)$

$\therefore \quad U_B - U_A = Q_1 - W_1 = 640 - 364 = 276$ J

অতএব, ADB পথে কৃত কাজ, $W_2 = Q_2 - (U_B - U_A) = 340 - 276 = 64$ J

**কাজ : একটি গ্যাসের আয়তন প্রথমে দ্রুতগতিতে এবং পরে খুব ধীরে ধীরে দ্বিগুণ করা হলো। কোন ক্ষেত্রে গ্যাস বেশি কার্য সম্পাদন করবে?**




P — V লেখচিত্রে সমোষ্ণ প্রসারণ AB রেখা দ্বারা এবং রুদ্ধতাপীয় প্রসারণ AC রেখা দ্বারা নির্দেশ করা হয়েছে।

এখানে,

সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় গ্যাস দ্বারা কৃত কাজ = ক্ষেত্রফল ABDE

এবং রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায় গ্যাস দ্বারা কৃত কাজ = ক্ষেত্রফল ACDE

স্পষ্টতই ক্ষেত্রফল ABDE > ক্ষেত্রফল ACDE

অর্থাৎ সমোষ্ণ প্রক্রিয়াতে গ্যাস বেশি কার্য সম্পাদন করবে।

## ১·৯ কার্নোর চক্র
### Carnot's cycle

কার্নো চক্র আলোচনা করার পূর্বে কার্নো ইঞ্জিন সম্বন্ধে কিছুটা ধারণা থাকা দরকার। ফরাসি বিজ্ঞানী সাদি কার্নো (1832) সকল দোষ-ত্রুটি মুক্ত একটি ইঞ্জিনের পরিকল্পনা করেন। এটি একটি আদর্শ ইঞ্জিন যার কর্মদক্ষতা 100%। এমন একটি ইঞ্জিনের বাস্তব রূপ দেওয়া কখনই সম্ভব নয়। এটি একটি কাল্পনিক ইঞ্জিন মাত্র। কার্নো ইঞ্জিন চারটি স্তরে কাজ সম্পন্ন করে।

### কার্নো চক্রের মূলনীতি

কার্নো চক্রে প্রত্যাগামী প্রক্রিয়ার মাধ্যমে কার্যনির্বাহক বস্তু উৎস থেকে তাপ গ্রহণ করে একটি নির্দিষ্ট চাপ, আয়তন ও তাপমাত্রা হতে আরম্ভ করে একটি সমোষ্ণ প্রসারণ ও একটি রুদ্ধতাপীয় প্রসারণ এবং একটি সমোষ্ণ সংকোচন ও একটি রুদ্ধতাপীয় সংকোচনের মাধ্যমে তাপের কিছু অংশ কাজে রূপান্তরিত করে এবং বাকি অংশ তাপ গ্রাহকে বর্জন করে আদি অবস্থায় ফিরে আসে।

**ইঞ্জিনের বর্ণনা** (Description of the engine)

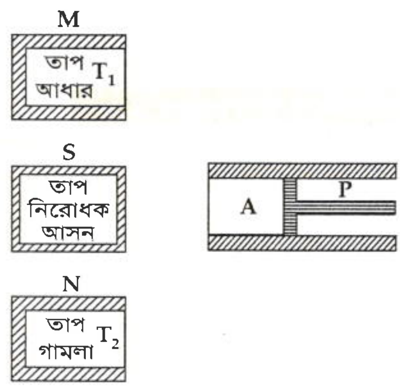
এই ইঞ্জিনে নিম্নলিখিত অংশগুলো আছে :

(i) **চোঙ বা সিলিন্ডার** (Cylinder), A [ চিত্র ১.১৩] : এর তিনদিকের দেয়াল সম্পূর্ণ **তাপ অন্তরক পদার্থের** তৈরি; কিন্তু তলদেশ সম্পূর্ণ **তাপ পরিবাহী পদার্থ** দ্বারা তৈরি। চোঙের অভ্যন্তরে কার্যকরী পদার্থ (working substance) আবদ্ধ থাকে। চোঙটির অভ্যন্তরে তাপ অন্তরক পদার্থের তৈরি একটি পিস্টন P ঘর্ষণহীনভাবে চলাচল করতে পারে। ইঞ্জিনে কার্যকরী পদার্থ হিসেবে কোনো আদর্শ গ্যাস ব্যবহার করা হয়।

(ii) **তাপ আধার বা তাপ উৎস** (Heat source), M : $T_1$ পরম তাপমাত্রায় রাখা অতি উচ্চ তাপগ্রাহিতাযুক্ত একটি উত্তপ্ত বস্তু। এটি তাপ আধার বা উৎস হিসেবে কাজ করে। এর তাপমাত্রা সর্বদা স্থির থাকে।

(iii) **তাপ গামলা বা তাপ গ্রাহক** (Heat sink), N : $T_2$ পরম তাপমাত্রায় রাখা অনুরূপ একটি শীতল বস্তু বা সিংক যা তাপ গ্রাহক হিসেবে কাজ করে। এর তাপগ্রাহিতা অতি উচ্চ। এর তাপমাত্রাও সর্বদা স্থির থাকে। $T_2 << T_1$

(iv) **আসন**, S : S সম্পূর্ণ তাপ নিরোধক বা অন্তরক একটি পাটাতন বা আসন। এর ওপর চোঙকে বসানো যায়। তাপ আধার এবং তাপ গ্রাহক উভয়ই উচ্চ তাপগ্রাহিতাযুক্ত হওয়ায় তাদের সাথে চোঙে তাপ আদান-প্রদান হলে তাদের তাপমাত্রা অপরিবর্তিত থাকে। চোঙ, তাপ আধার, তাপ গামলা তাপ অন্তরক আসনের ওপর বসানো যেতে পারে এবং ঘর্ষণবিহীনভাবে সরানো যেতে পারে।




চিত্র ১.১৩

## কার্নো চক্র একটি প্রত্যাগামী চক্র

**Carnot cycle is a reversible cycle**

কোনো চক্র প্রত্যাগামী হতে হলে যে সমস্ত বৈশিষ্ট্য থাকা প্রয়োজন কার্নোর আদর্শ ইঞ্জিনে সেগুলো রয়েছে। যেমন—

(১) পিস্টন ও চোঙ বা সিলিন্ডারের মধ্যে কোনো ঘর্ষণ নেই।

(২) কার্যকরী পদার্থ (গ্যাস)-এর ওপর প্রযুক্ত প্রক্রিয়াগুলো খুব ধীরে সংঘটিত হয়।

(৩) পিস্টন ও সিলিন্ডার নির্মাণে আদর্শ তাপ নিরোধক বা অন্তরক ও আদর্শ তাপ পরিবাহী ব্যবহার করা হয় এবং তাপ উৎস ও তাপ গ্রাহকের উপাদান এমন অতি উচ্চ তাপগ্রাহিতাযুক্ত করা হয় যে সমোষ্ণ প্রক্রিয়াগুলি স্থির তাপমাত্রায় সংঘটিত হয়।

**যে চক্রে কোনো একটি আদর্শ গ্যাস কার্যকরী পদার্থ হিসেবে একটি নির্দিষ্ট আয়তন, চাপ ও তাপমাত্রা হতে আরম্ভ করে একটি সমোষ্ণ প্রসারণ ও একটি রুদ্ধতাপ প্রসারণ এবং একটি সমোষ্ণ সংকোচন ও একটি রুদ্ধতাপ সংকোচনের পর পূর্বাবস্থায় ফিরে আসে, তাকে কার্নো চক্র বলে।** কার্নো চক্রের ক্রিয়া ও সম্পাদিত কাজকে চিত্রের সাহায্যে প্রকাশ করা হয়। একে সূচক বা নির্দেশক চিত্র বলে। নিম্নে সূচক বা নির্দেশক চিত্রে কার্নো চক্রের মূলনীতি ব্যবহার করে বিভিন্ন ক্রিয়ার ব্যাখ্যা ও সম্পাদিত কাজের হিসাব করা হলো।

**প্রথম ধাপ :** এই ধাপে সিলিন্ডারকে তাপ উৎসের ওপর বসানো হয়। খুবই অল্প সময়ের মধ্যে সিলিন্ডারের কার্যকরী পদার্থের (গ্যাস) তাপমাত্রা উৎসের তাপমাত্রা $T_1$-এর সমান হয়। নির্দেশক চিত্রে A বিন্দু এই অবস্থা নির্দেশ করে [চিত্র ১.১৪]। ধরা যাক, এই অবস্থায় গ্যাসের চাপ $P_1$ এবং আয়তন $V_1$। এরপর গ্যাসকে সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় প্রসারিত হতে দেয়া হয়। প্রসারণের সময় ইহা উৎস হতে $Q_1$ পরিমাণ তাপ গ্রহণ করে। সমোষ্ণ প্রসারণ শেষে গ্যাসের চাপ ও আয়তন যথাক্রমে $P_2$ ও $V_2$। চিত্রে B বিন্দু দ্বারা এ অবস্থা নির্দেশ করা হয়েছে। এক্ষেত্রে সম্পন্ন বা কৃত কাজ, DAT(16-17)

$$W_1 = \int_{V_1}^{V_2} PdV = ABba \text{ ক্ষেত্রের ক্ষেত্রফল।}$$

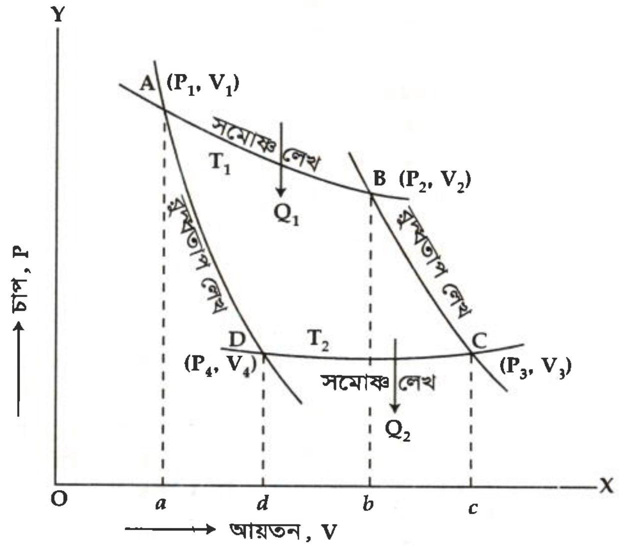
সুতরাং নির্দেশক চিত্রে AB সমোষ্ণ প্রসারণের জন্য কৃত কাজ, $W_1 = ABba$ ক্ষেত্রের ক্ষেত্রফল।

**দ্বিতীয় ধাপ :** এই ধাপে সিলিন্ডারকে তাপ নিরোধক বা অন্তরক আসনের ওপরে বসানো হয় এবং আবদ্ধ গ্যাসকে রুদ্ধতাপ প্রক্রিয়ায় প্রসারিত হতে দেয়া হয়। রুদ্ধতাপ প্রক্রিয়ায় গ্যাসের তাপমাত্রা কমে তাপগ্রাহকের তাপমাত্রা $T_2$-এর সমান হয়। প্রক্রিয়া শেষে গ্যাসের চাপ ও আয়তন যথাক্রমে $P_3$ ও $V_3$ হয় যা চিত্রে C বিন্দু দ্বারা নির্দেশ করা হয়েছে। এই প্রসারণের জন্য কৃত কাজ,

$$W_2 = \int_{V_2}^{V_3} PdV$$

$$= BCcb \text{ ক্ষেত্রের ক্ষেত্রফল।}$$

সুতরাং নির্দেশক চিত্রে BC রুদ্ধতাপ প্রসারণ বুঝায় এবং এই প্রসারণে কৃত কাজ, $W_2 = BCcb$ ক্ষেত্রের ক্ষেত্রফল।




চিত্র ১.১৪

**তৃতীয় ধাপ :** এবার সিলিন্ডারকে তাপগ্রাহকের ওপর বসানো হয় এবং গ্যাসকে সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় পিস্টন দ্বারা সংকুচিত বা সংনমিত করা হয়; ফলে গ্যাসের চাপ বৃদ্ধি পায়। এই ধাপে পিস্টন দ্বারা গ্যাসে কাজ সম্পাদিত হয়। সংকোচন বা সংনমনের সময় গ্যাস $T_2$ তাপমাত্রার তাপগ্রাহকে $Q_2$ তাপ বর্জন করে। এই অবস্থায় গ্যাসের চাপ ও আয়তন যথাক্রমে $P_4$ ও $V_4$ হয় যা চিত্রের D বিন্দু নির্দেশ করে। এক্ষেত্রে সমোষ্ণ সংকোচনে কৃত কাজ,

$$W_3 = \int_{V_3}^{V_4} PdV = CDdc \text{ ক্ষেত্রের ক্ষেত্রফল।}$$

সুতরাং নির্দেশক চিত্রের CD সমোষ্ণ লেখ $T_2$ তাপমাত্রায় গ্যাসের সংকোচন বুঝায় এবং এই প্রক্রিয়ায় কৃত কাজ, $W_3 = CDdc$ ক্ষেত্রের ক্ষেত্রফল।

DAT(22-23) **চতুর্থ ধাপ :** এই ধাপে সিলিন্ডারকে তাপ নিরোধক বা অন্তরক আসনের ওপর বসানো হয় এবং আবদ্ধ গ্যাসকে রুদ্ধতাপ প্রক্রিয়ায় সংকুচিত বা সংনমিত করা হয়। এই আবদ্ধ গ্যাসের ওপর কাজ সম্পাদিত হওয়ায় এর তাপমাত্রা বেড়ে উৎসের তাপমাত্রার সমান হয়। এই প্রক্রিয়ায় গ্যাসের চাপ ও আয়তন যথাক্রমে $P_1$ ও $V_1$ হয়। অর্থাৎ চক্র আদি অবস্থায় ফিরে যায়। চিত্রে A বিন্দু এই অবস্থা নির্দেশ করে। এক্ষেত্রে রুদ্ধতাপীয় সংকোচনে কৃত কাজ,

$$W_4 = \int_{V_4}^{V_1} PdV = DAad \text{ ক্ষেত্রের ক্ষেত্রফল।}$$

সুতরাং নির্দেশক চিত্রের DA লেখ রুদ্ধতাপীয় সংকোচন বুঝায় এবং এই পর্যায়ে কৃত কাজ,

$W_4 = DAad$ ক্ষেত্রের ক্ষেত্রফল।

প্রচলিত প্রথা অনুসারে আবদ্ধ গ্যাস দ্বারা কৃত কাজ ধনাত্মক এবং গ্যাসের ওপর কৃত কাজ ঋণাত্মক হয়। সুতরাং, $W_1$ ও $W_2$ ধনাত্মক এবং $W_3$ ও $W_4$ ঋণাত্মক হয়।

অতএব, আবদ্ধ গ্যাস দ্বারা মোট কৃত কাজ,

$W = W_1 + W_2 - W_3 - W_4 = ABCD$ ক্ষেত্রের ক্ষেত্রফল।

ওপরের বর্ণনা থেকে দেখা যাচ্ছে যে কার্নো চক্রে কার্যকরী পদার্থ (গ্যাস) কর্তৃক কৃত কাজ নির্দেশক চিত্রে দুটি সমোষ্ণ ও দুটি রুদ্ধতাপীয় রেখা দ্বারা আবদ্ধ ক্ষেত্রফলের সমান। এভাবে চারটি ধাপে কার্নো চক্রের মূলনীতি ব্যাখ্যা করা যায়।

**জানা বিষয় :**

১। কর্নো চক্রের ১ম ধাপে সিলিন্ডারকে তাপ উৎসের ওপর বসানো হয়। এই সময় গ্যাসে সমোষ্ণ প্রসারণ ঘটে এবং গ্যাসের তাপমাত্রা উৎসের তাপমাত্রার সমান হয়।

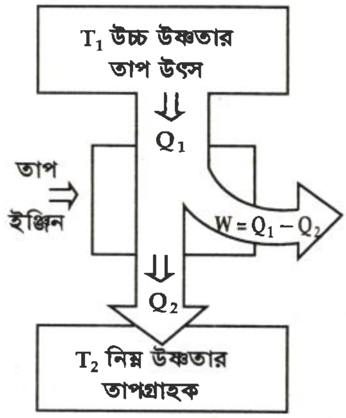
২। ২য় ধাপে সিলিন্ডারকে তাপ অন্তরক আসনের ওপর বসানো হয়। এই সময় গ্যাসে রুদ্ধতাপীয় প্রসারণ ঘটে এবং তাপমাত্রা হ্রাস পায়।

৩। ৩য় ধাপে বিলিন্ডারকে তাপগ্রাহকের ওপর বসানো হয়। এক্ষেত্রে সমোষ্ণ সংকোচন হয় এবং চাপ বৃদ্ধি পায়।

৪। এই ধাপ সিলিন্ডারকে তাপ অন্তরক আসনের ওপর বসানো হয়। এক্ষেত্রে রূদ্ধতাপীয় সংকোচন ঘটে এবং তাপমাত্রা বেড়ে উৎসের তাপমাত্রার সমান হয়।

## ১·১০ তাপ ইঞ্জিন (সিস্টেম দ্বারা কাজ সম্পাদিত হয়, কাজের প্রকৃতি ধনাত্মক)
### Heat Engine

তাপশক্তিকে কাজে লাগানোর জন্য একটি যান্ত্রিক ব্যবস্থার প্রয়োজন হয়। এই যান্ত্রিক ব্যবস্থাকে তাপ ইঞ্জিন বলে। তাপ ইঞ্জিনে তাপ উৎস এবং তাপগ্রাহক থাকে। ইঞ্জিন কোনো উৎস থেকে তাপ গ্রহণ করে তার খানিকটা কাজে রূপান্তরিত করে। তাপের যেটুকু কাজে রূপান্তরিত হয় না তা পরিবেশে মিশে যায় এবং উৎসের তাপমাত্রা যে পরিবেশে তাপ গ্রহণ করে তা ইঞ্জিনের তাপমাত্রার চেয়ে বেশি হতে হবে। অর্থাৎ ইঞ্জিন উচ্চতর তাপমাত্রার তাপ উৎস থেকে তাপ গ্রহণ করে তার খানিকটা কাজে রূপান্তরিত করে এবং বাকি অংশ তাপগ্রাহকে ছেড়ে দিয়ে আদি অবস্থায় ফিরে আসে। এভাবে ইঞ্জিন চক্র সম্পন্ন করে। একটি তাপ ইঞ্জিনের ব্লক চিত্র দেখান হলো [চিত্র ১·১৫]।




চিত্র ১·১৫

**সংজ্ঞা : যে ইঞ্জিন দ্বারা তাপশক্তিকে যান্ত্রিক শক্তিতে রূপান্তর করা যায় তাকে তাপ ইঞ্জিন বলে।** যেমন বাষ্পীয় ইঞ্জিন, পেট্রোল ইঞ্জিন, ডিজেল ইঞ্জিন ইত্যাদি।

**তাপ ইঞ্জিনের মূলনীতি :** প্রত্যেক ইঞ্জিনেই একটি কার্যরত পদার্থ (working substance) থাকে। যেমন বাষ্পীয় ইঞ্জিনে বাষ্প কার্যরত বস্তু আবার পেট্রোল ইঞ্জিনে পেট্রোল কার্যরত বস্তু। কার্যরত পদার্থ উচ্চ তাপমাত্রার কোনো উৎস হতে তাপ গ্রহণ করে ওই তাপের কিছু অংশ কার্যে পরিণত করে এবং বাকি অংশ নিম্ন তাপমাত্রার তাপগ্রাহকে বর্জন করে। এভাবে কার্যরত বস্তুর ক্রমাগত তাপ গ্রহণ ও বর্জনে প্রত্যেকবার কিছু তাপ কাজে পরিণত হয়। **এটিই তাপ ইঞ্জিনের মূলনীতি।**

যে উৎস থেকে ইঞ্জিন তাপ গ্রহণ করে তার তাপমাত্রা তাপগ্রাহকের তাপমাত্রার চেয়ে বেশি হতে হবে। অর্থাৎ ইঞ্জিনটি উচ্চ তাপমাত্রার কোনো উৎস থেকে তাপ গ্রহণ করে ওই তাপের খানিকটা কাজে পরিণত করে অবশিষ্ট তাপ নিম্ন তাপমাত্রার তাপগ্রাহকে বর্জন করে আদি অবস্থায় ফিরে আসে এবং পরবর্তী পর্যায়ের জন্য প্রস্তুত হয়। এগুলোকে এক একটি চক্র বলে। ইঞ্জিন থেকে অবিরাম কাজ পাওয়ার জন্য এভাবে চক্র (cycle) পরিবর্তন করা প্রয়োজন।

চিত্র ১.১৪ অনুযায়ী কার্যরত পদার্থ $T_1$ তাপমাত্রার উৎস হতে $Q_1$ পরিমাণ তাপ শোষণ করে। এই ইঞ্জিন দ্বারা কাজ তাপশক্তিকে যান্ত্রিক শক্তিতে রূপান্তরিত করার জন্য উৎস হতে শোষিত তাপের কিছু অংশ তাপগ্রাহকে বর্জন করে শীতল হতে হবে যাতে পুনরায় উৎস থেকে তাপ গ্রহণ করতে পারে। $T_2$ তাপমাত্রায় তাপগ্রাহকে বর্জিত তাপের পরিমাণ $Q_2$ হলে ইঞ্জিন দ্বারা কাজে রূপান্তরিত তাপশক্তির পরিমাণ, $W = Q_1 - Q_2$। যে ইঞ্জিন গৃহীত তাপের যত বেশি অংশ কাজে পরিণত করতে পারে সে ইঞ্জিনের দক্ষতা তত বেশি হয়। বাষ্পীয় ইঞ্জিনের তুলনায় পেট্রোল ইঞ্জিনের দক্ষতা বেশি।

## ১.১০.১ তাপ ইঞ্জিনের দক্ষতা
### Efficiency of heat engine

তাপ ইঞ্জিনের দক্ষতা আলোচনার আগে তাপ ইঞ্জিন কী এবং এর মূলনীতি জানা দরকার। **যে ইঞ্জিন দ্বারা তাপ শক্তিকে যান্ত্রিক শক্তিতে রূপান্তর করা যায় তাকে তাপ ইঞ্জিন বলে।** যেমন বাষ্পীয় ইঞ্জিন, পেট্রোল ইঞ্জিন, ডিজেল ইঞ্জিন ইত্যাদি। কোনো ইঞ্জিন কত বেশি কর্মক্ষম তা ওই ইঞ্জিনের দক্ষতা থেকে জানা যায়। শোষিত তাপ ও কাজে রূপান্তরিত তাপশক্তি দ্বারা ইঞ্জিনের দক্ষতা পরিমাপ করা হয়।

অর্থাৎ **কোনো তাপ ইঞ্জিন দ্বারা কাজের রূপান্তরিত তাপশক্তির পরিমাণ ইঞ্জিন দ্বারা শোষিত তাপশক্তির পরিমাণের অনুপাতকে ইঞ্জিনের দক্ষতা বা কর্মদক্ষতা বলে।**

অর্থাৎ ইঞ্জিনের দক্ষতা, $\eta = \dfrac{\text{ইঞ্জিন দ্বারা কাজে রূপান্তরিত তাপশক্তি}}{\text{ইঞ্জিন দ্বারা শোষিত তাপশক্তি}} = \boxed{\dfrac{Q_1 - Q_2}{Q_1}}$

**দক্ষতার হিসাব :** ধরা যাক তাপ ইঞ্জিনে কার্যরত পদার্থ $T_1$ তাপমাত্রার উৎস হতে $Q_1$ পরিমাণ তাপ গ্রহণ করে $W$ পরিমাণ কাজ সম্পাদন করে এবং অবশিষ্ট তাপ $Q_2$, $T_2$ তাপমাত্রার তাপগ্রাহকে বর্জন করে। তাহলে কার্যে পরিণত তাপের পরিমাণ, $W = Q_1 - Q_2$

$$\therefore \text{ ইঞ্জিনের তাপীয় দক্ষতা, } \eta = \frac{\text{কার্যে পরিণত তাপ}}{\text{উৎস হতে গৃহীত তাপ}} = \frac{W}{Q_1}$$

$$= \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \qquad \ldots \qquad \ldots \qquad (1.26)$$

সমীকরণ (1.26) হতে দেখা যায় যে, $Q_2$-এর মান যত কম হবে দক্ষতা $\eta$ তত বেশি হবে।

ইঞ্জিনের দক্ষতা সাধারণত শতকরা হিসেবে প্রকাশ করা হয়।

$$\therefore \text{ ইঞ্জিনের তাপীয় দক্ষতা, } \eta = \left(1 - \frac{Q_2}{Q_1}\right) \times 100\%$$

তাপ ইঞ্জিন কখনোই সম্পূর্ণ তাপকে কাজে বা যান্ত্রিক শক্তিতে পরিণত করতে পারে না। সাধারণত একটি তাপ ইঞ্জিনের দক্ষতা 30%। কোনো ইঞ্জিন যদি তাপ বর্জন না করে তাহলে গৃহীত তাপ সম্পূর্ণরূপে কাজে রূপান্তরিত হয়। সেক্ষেত্রে $Q_2 = 0$ হলে $W = Q$ হবে। তখন (1.26) সমীকরণ অনুযায়ী দক্ষতা $\eta = 1$ বা 100% হবে যা বাস্তবে সম্ভব নয়।

আদর্শ ইঞ্জিনের ক্ষেত্রে দেখানো যায় যে, ইঞ্জিন দ্বারা শোষিত বা বর্জিত তাপ $Q$ ইঞ্জিনের সংস্পর্শে থাকা তাপ উৎস বা তাপাধারের তাপমাত্রা $T$-এর সমানুপাতিক অর্থাৎ $\frac{Q}{T}$ = ধ্রুব সংখ্যা। সেক্ষেত্রে তাপীয় ইঞ্জিনের প্রতি চক্রের জন্য আমরা পাই,

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}$$

$$\text{বা, } \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

$$\therefore \eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

$$\text{শতকরা হিসেবে, } \eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \times 100\% \qquad \ldots \qquad \ldots \qquad (1.27)$$

এক্ষেত্রে কার্যরত বস্তু $T_1K$ তাপমাত্রায় তাপ গ্রহণ করে এবং $T_2K$ তাপমাত্রায় তাপ বর্জন করে। সমীকরণ (1.27) অনুযায়ী $T_1 > (T_1 - T_2)$; কাজেই দক্ষতা 100% হতে পারে না। তাপ উৎস এবং তাপগ্রাহকের মধ্যবর্তী তাপমাত্রার পার্থক্য যত বেশি হবে দক্ষতা তত বৃদ্ধি পাবে। বাস্তবে দক্ষতা 20%—50% হয়।

RMDAC

**সম্প্রসারিত কর্মকাণ্ড : কার্নো ইঞ্জিনের দক্ষতা কখনোই 100% হতে পারে না—ব্যাখ্যা কর।** [ঢা. বো. ২০২২]

কার্নো ইঞ্জিনের দক্ষতা, $\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$। এই সমীকরণে $T_1 > (T_1 - T_2)$ থেকে দেখা যায় কার্নো ইঞ্জিনের দক্ষতা শুধুমাত্র উৎস ও তাপগ্রাহকের তাপমাত্রার ওপর নির্ভর করে। উৎস ও তাপগ্রাহকের মধ্যে তাপমাত্রার পার্থক্য যত বেশি হবে দক্ষতাও তত বৃদ্ধি পাবে। এখন $\eta = 100\%$ হতে পারে যদি $T_2 = 0$ হয়। অর্থাৎ পরম শূন্য তাপমাত্রায় এটি সম্ভব। কিন্তু কোনো বস্তুর তাপমাত্রাকে কখনোই 0 K-এ নামানো যায় না। ফলে কার্নো ইঞ্জিনও 100% দক্ষ হতে পারে না।

**কাজ : তাপগ্রাহকের তাপমাত্রা হ্রাস পেলে কার্নো ইঞ্জিনের দক্ষতা বৃদ্ধি পায়—ব্যাখ্যা কর।**

কার্নো ইঞ্জিন দ্বারা কাজে রূপান্তরিত তাপশক্তি ও ইঞ্জিন দ্বারা শোষিত তাপশক্তির অনুপাতকে কার্নো ইঞ্জিনের দক্ষতা বলে। কার্নো ইঞ্জিনের দক্ষতা, $\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \times 100\%$ সমীকরণে, $T_1$ হলো উৎসের তাপমাত্রা এবং $T_2$ তাপগ্রাহকের তাপমাত্রা। উক্ত সমীকরণ অনুসারে $T_2$ এর মান যত হ্রাস পাবে $(T_1 - T_2)$ এর মান তত বৃদ্ধি পাবে। $(T_1 - T_2)$ এর মান যত বাড়বে কার্নো ইঞ্জিনের দক্ষতা তত বাড়বে। এ কারণে তাপগ্রাহকের তাপমাত্রা হ্রাস পেলে কার্নো ইঞ্জিনের দক্ষতা বৃদ্ধি পায়।

## ১.১০.২ কার্নোর ইঞ্জিনের দক্ষতা
### Efficiency of Carnot's engine

কার্নোর ইঞ্জিনকে আদর্শ ইঞ্জিন বলা হয়। এই ইঞ্জিন একটি চক্রে যে পরিমাণ তাপকে কাজে পরিণত করে এবং তাপ উৎস হতে যে পরিমাণ তাপ শোষণ করে, এদের অনুপাতকে ইঞ্জিনের দক্ষতা বলে। ব্যবহারিক যেকোনো ইঞ্জিনের চেয়ে এর দক্ষতা বেশি।

মনে করি কার্নো ইঞ্জিনের কার্যকরী পদার্থ (গ্যাস) কর্তৃক গৃহীত তাপ $Q_1$ এবং বর্জিত তাপ $Q_2$। তাহলে কার্যে পরিণত তাপের পরিমাণ $= Q_1 - Q_2$

$$\therefore \text{ইঞ্জিনের দক্ষতা, } \eta = \frac{\text{কার্যে পরিণত তাপ}}{\text{উৎস হতে গৃহীত তাপ}}$$

$$= \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \qquad \ldots \qquad \ldots \qquad (1.28)$$

কার্নোর চক্রের দক্ষতাকে তাপমাত্রার সাপেক্ষে প্রকাশ করা যায়। সেক্ষেত্রে দেখানো যায়, $\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$। অতএব ইঞ্জিনের দক্ষতা, $\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$

দক্ষতাকে শতকরা হিসাবে প্রকাশ করলে, $\eta = \left(\frac{T_1 - T_2}{T_1}\right) \times 100\% \qquad \ldots \qquad \ldots \qquad (1.29)$

এখানে, $T_1$ = উৎসের তাপমাত্রা, $T_2$ = তাপগ্রাহকের তাপমাত্রা

সমীকরণ (1.29) হতে দেখা যায় যে, ইঞ্জিনের কর্ম দক্ষতা কেবল তাপ উৎস এবং তাপগ্রাহকের তাপমাত্রা $T_1$ ও $T_2$ এর পার্থক্যের ওপর নির্ভর করে এবং সমানুপাতিক হয়। কার্যনির্বাহী বস্তুর প্রকৃতির ওপর নির্ভর করে না। $T_1$ ও $T_2$ এর পার্থক্য বেড়ে গেলে দক্ষতাও বেশি হবে। আর পার্থক্য কমে গেলে ইঞ্জিনের দক্ষতাও কমে যাবে। তাই বলা যায় তাপগ্রাহক ও তাপ উৎসের তাপমাত্রার মধ্যে পার্থক্য কমে গেলে ইঞ্জিনের দক্ষতা কমে যায় এবং বেড়ে গেলে দক্ষতা বেড়ে যায়। এই সমীকরণ থেকে আরো দেখা যায় যে, যেকোনো দুটি নির্দিষ্ট তাপমাত্রার মধ্যে কার্যরত সকল প্রত্যাবর্তী ইঞ্জিনের দক্ষতা সমান হবে। ইঞ্জিন থেকে তাপ বর্জন শূন্য হলে অর্থাৎ গৃহীত তাপ সম্পূর্ণরূপে কাজে রূপান্তরিত হলে $Q_2 = 0$ হবে এবং কাজ $W = Q$ হবে। সেক্ষেত্রে সমীকরণ (1.27) অনুযায়ী $\eta = \frac{Q_1 - 0}{Q_1} = 1$ বা 100% হবে। কর্নো চক্রে মোট এনট্রপির পরিবর্তন শূন্য। MAT(16-17)

**অনুধাবনমূলক কাজ : ইঞ্জিনের কর্মদক্ষতা হতে ইঞ্জিন সম্পর্কে কী কী ধারণা করতে পার ?**

- ইঞ্জিনের দক্ষতার হিসাব থেকে লক্ষ করা যায় যে, ইহা কেবল তাপ উৎস ও তাপগ্রাহকের তাপমাত্রা $T_1$, $T_2$ এর ওপর নির্ভর করে—কার্যনির্বাহক বস্তুর প্রকৃতির ওপর নির্ভর করে না।
- যেকোনো দুটি নির্দিষ্ট তাপমাত্রার মধ্যে কার্যরত সকল প্রত্যাগামী ইঞ্জিনের কর্মদক্ষতা সমান হয়।
- যেহেতু $T_1 > (T_1 - T_2)$, কাজেই ইঞ্জিনের দক্ষতা কখনোই 100% হতে পারে না।
- তাপ উৎস ও তাপগ্রাহকের মধ্যবর্তী তাপমাত্রার মধ্যে পার্থক্য যত বেশি হবে ইঞ্জিনের দক্ষতাও তত বেশি হবে।

**গাণিতিক উদাহরণ ১.৯**

**১। একটি তাপীয় ইঞ্জিনের কার্যকর বস্তু প্রতিবার উৎস হতে যে পরিমাণ তাপ গ্রহণ করে, কাজ সম্পন্ন করার পর তার 70% তাপ বর্জন করে। ইঞ্জিনটির কর্মদক্ষতা নির্ণয় কর।** [ম. বো. ২০২২ (মান ভিন্ন); কু. বো. ২০২১ (মান ভিন্ন)]

ধরা যাক, গৃহীত তাপ, $Q_1$

প্রশ্নানুসারে, বর্জিত তাপ, $Q_2 = \frac{70}{100} Q_1 = 0{\cdot}7Q_1$

আমরা জানি, দক্ষতা, $\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \times 100\%$

$\therefore \quad \eta = \frac{Q_1 - 0{\cdot}7Q_1}{Q_1} \times 100\% = \frac{0{\cdot}3\,Q_1}{Q} \times 100\% = 30\%$

উত্তর : $\eta = 30\%$

**২। একটি তাপ ইঞ্জিনের কার্যকর বস্তু 400K তাপমাত্রার উৎস হতে 840 J তাপ গ্রহণ করে শীতল আধারে 630 J তাপ বর্জন করে। ইঞ্জিনের দক্ষতা ও শীতল আধারের তাপমাত্রা নির্ণয় কর।** [ম. বো. ২০২২ (মান ভিন্ন); দি. বো. ২০২১ (মান ভিন্ন)]

এখানে,
উৎসের তাপমাত্রা, $T_1 = 400$ K
গৃহীত তাপ, $Q_1 = 840$ J
বর্জিত তাপ, $Q_2 = 630$ J
দক্ষতা, $\eta = ?$
শীতল আধারের তাপমাত্রা, $T_2 = ?$

আমরা জানি ইঞ্জিনের দক্ষতা,

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \times 100\%$$
$$= \frac{840 - 630}{840} \times 100\%$$
$$\therefore \quad \eta = \frac{210}{840} \times 100\% = 25\%$$

আমরা আরো জানি,

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

বা, $\frac{25}{100} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{400 - T_2}{400}$

বা, $0{\cdot}25 = \frac{400 - T_2}{400}$

বা, $400 - T_2 = 400 \times 0{\cdot}25 = 100$

বা, $-T_2 = 100 - 400 = -300$

$\therefore \quad T_2 = 300$ K

**৩। একটি কার্নো ইঞ্জিন যখন 27°C তাপমাত্রায় তাপগ্রাহকে থাকে তখন এর কর্মদক্ষতা 50%। একে 60% দক্ষ করতে হলে এর উৎসের তাপমাত্রা কত বাড়াতে হবে ?**

[দি. বো. ২০২২ (মান ভিন্ন); ম. বো. ২০২২; ঢা. বো. ২০২১ (মান ভিন্ন), ২০১০; রা. বো. ২০১০; ব. বো. ২০০৬; কু. বো. ২০০৫; Admission Test : CKRUET 2021-22; BAU 2021-22 (মান ভিন্ন)]

এখানে,
$T_2 = (27 + 273)\text{K} = 300\text{K}$
$\eta_1 = 50\% = \frac{50}{100}$
$T_1 = ?$

আমরা পাই,

$$\eta_1 = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

বা, $\frac{50}{100} = 1 - \frac{300}{T_1}$

বা, $\frac{300}{T_1} = 1 - \frac{50}{100} = \frac{50}{100}$

বা, $T_1 = \frac{300 \times 100}{50} = 600\text{K}$

আবার,

এখানে,
$T_2 = 300\text{K}$
$\eta_2 = 60\% = \frac{60}{100}$
$T_1 = ?$

$$\eta_2 = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

বা, $\frac{60}{100} = 1 - \frac{300}{T_1}$

বা, $\frac{300}{T_1} = 1 - \frac{60}{100} = \frac{40}{100}$

বা, $T_1 = \frac{300 \times 100}{40} = 750$ K

$\therefore$ উৎসের তাপমাত্রা বাড়াতে হবে $= (750 - 600)$ K $= 150$ K

**৪। 27°C এবং 160°C তাপমাত্রাদ্বয়ের মধ্যে কার্যরত একটি কার্নো ইঞ্জিনে $8.4 \times 10^4$ J তাপশক্তি সরবরাহ করা হলো। ইঞ্জিনটির দক্ষতা নির্ণয় কর। ইঞ্জিনটি কতটুকু তাপশক্তিকে কাজে রূপান্তরিত করতে পারবে ?**

আমরা জানি,

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \times 100\%$$
$$= \frac{433 - 300}{433} \times 100\%$$
$$= \frac{133}{433} \times 100\%$$
$$= 0.307 \times 100\% = 30.7\%$$

এখানে,

$T_1 = 160°C = (160 + 273)$ K $= 433$ K

$T_2 = 27°C = (27 + 273)$ K $= 300$ K

$Q_1 = 8.4 \times 10^4$ J

$\eta = ?$

আবার, $\eta = \dfrac{W}{Q_1}$

বা, $W = \eta Q_1 = 0.307 \times 8.4 \times 10^4 \text{ J} = 25788 \text{ J}$

**৫। একটি প্রত্যাবর্তী ইঞ্জিন তাপের $\frac{1}{6}$ অংশকে কাজে রূপান্তরিত করে। যখন উৎসের তাপমাত্রা ঠিক রেখে গ্রাহকের তাপমাত্রা 62°C কমানো হয়, তখন ইঞ্জিনের দক্ষতা দ্বিগুণ হয়। গ্রাহকের তাপমাত্রা নির্ণয় কর।**

[ঢা. বো. ২০২৩ (মান ভিন্ন); BUET Admission Test, 2019-20; 2015-16 (মান ভিন্ন)]

ধরা যাক, গ্রাহকের তাপমাত্রা $T_1$ এবং উৎসের তাপমাত্রা $T_2$

আমরা জানি, প্রত্যাবর্তী ইঞ্জিনের দক্ষতা,

$$\eta_1 = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$
$$\therefore \frac{1}{6} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

এখানে,

$\eta_1 = \frac{1}{6}$

$\eta_2 = \frac{2}{6}$

$T_1' = T_1 - 62$ K

আবার,

$$\eta_2 = 1 - \frac{T_1'}{T_2}$$
$$\therefore \frac{2}{6} = 1 - \frac{T_1 - 62}{T_2} = 1 - \frac{T_1}{T_2} + \frac{62}{T_2} = \frac{1}{6} + \frac{62}{T_2}$$

বা, $\frac{2}{6} - \frac{1}{6} = \frac{62}{T_2}$

বা, $\frac{1}{6} = \frac{62}{T_2}$

$\therefore T_2 = 62 \times 6 = 372 \text{ K} = 372 - 273 = 99°C$

$1 - \frac{T_1}{T_2} = \frac{1}{6}$ বা, $\frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{6} = \frac{5}{6}$

বা, $\frac{T_1}{372} = \frac{5}{6}$ বা, $T_1 = \frac{5 \times 372}{6} = 310 \text{ K} = 310 - 273 = 37°C$

$\therefore$ গ্রাহকের তাপমাত্রা $= 37°C$

**৬। সঞ্চালনশীল পিস্টনযুক্ত একটি সিলিন্ডার এক মোল আদর্শ গ্যাস দ্বারা আবদ্ধ। গ্যাসটির কার্যক্রম A বিন্দু হতে শুরু হয় যেখানে T = 27°C। সিস্টেমটির $B \rightarrow C$ একটি সমোষ্ণ প্রক্রিয়া [চিত্র দ্রষ্টব্য]।**

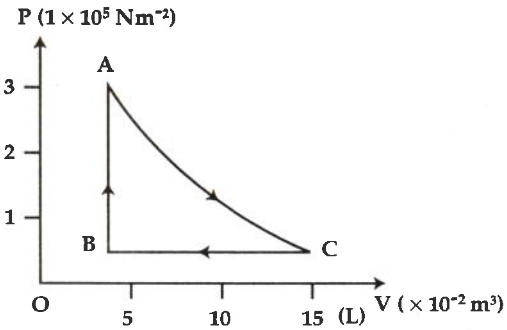
(ক) গ্যাসটির মৌল সংখ্যা এবং B বিন্দুতে তাপমাত্রা নির্ণয় কর।

(খ) সিস্টেমটির সমআয়তনিক প্রক্রিয়ার $(A \rightarrow B)$ ক্ষেত্রে অভ্যন্তরীণ শক্তির পরিবর্তন $\Delta U$, উৎপন্ন তাপ Q এবং সম্পন্ন কাজ W নির্ণয় কর।

(গ) সমোষ্ণ প্রক্রিয়ার $(B \rightarrow C)$ ক্ষেত্রে পুনরায় রাশিগুলোর $(\Delta U, W, Q)$ মান নির্ণয় কর।

(ঘ) সমচাপীয় প্রক্রিয়ার $(A \rightarrow B)$ ক্ষেত্রে পুনরায় রাশিগুলোর মান নির্ণয় কর।

(ঙ) পূর্ণচক্রের জন্য নিট অভ্যন্তরীণ শক্তির পরিবর্তন নির্ণয় কর।



**(চ) সিস্টেমটিতে স্থানান্তরিত তাপশক্তি $Q_h$ নির্ণয় কর; যেখানে নির্গত তাপের পরিমাণ $Q_C$। ইঞ্জিনটির তাপীয় দক্ষতা এবং নিট কাজ পরিবেশ দ্বারা নিয়ন্ত্রিত।**

(ক) আমরা জানি, আদর্শ গ্যাস সমীকরণ,

$$PV = nRT$$

বা, $n = \frac{PV}{RT} = \frac{1 \times 10^5 \times 5 \times 10^{-2}}{8{\cdot}31 \times 300} = 2$

এখানে,
$P = 1 \times 10^5\ Nm^{-2}$
$V = 5 \times 10^{-2}\ m^3$
$R = 8{\cdot}31\ JK^{-1}mol^{-1}$
$T = 27°C = 27 + 273 = 300\ K$

B বিন্দুতে তাপমাত্রা,

$$T_B = \frac{P_B V_B}{n} = \frac{3 \times 10^5 \times 5 \times 10^{-2}}{2 \times 8{\cdot}31} = 601{\cdot}7\ K$$

(খ) এখানে, $\Delta U_{AB}$, $Q_{AB}$ এবং $W_{AB}$ স্থির আয়তন প্রক্রিয়ায় $A \to B$-এর জন্য,

$$\Delta U_{AB} = nC_V\Delta T = 2 \times \frac{3}{2} R \times (601{\cdot}7 — 300) \quad [\because \text{ একমাত্রিক গ্যাসের জন্য } C_V = \frac{3}{2}R]$$

$$= 3 \times 8{\cdot}31 \times 301{\cdot}7 = 7521{\cdot}4\ J$$

এখানে, $\Delta V = 0$, $\therefore$ কৃত কাজ, $W_{AB} = 0$

এখন, তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্র হতে, $\Delta Q = \Delta U + \Delta W$

$\therefore \quad \Delta Q_{AB} = \Delta U_{AB} = 7521{\cdot}7\ J$

(গ) এখানে, $\Delta U_{BC}$, $\Delta Q_{BC}$ and $W_{BC}$ সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় $B \to C$-এর জন্য,

$$\Delta U_{BC} = nC_V\Delta T = 0 \qquad (\because \Delta T = 0)$$

সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় সিস্টেমে কৃত কাজ,

$$W_{BC} = nRT \ln\left(\frac{V_C}{V_B}\right) = 2 \times 8{\cdot}31 \times 601{\cdot}7 \ln\left(\frac{15 \times 10^{-2}}{5 \times 10^{-2}}\right)$$

$$= 10986{\cdot}4\ J$$

তাপগতিবিদ্যার ১ম সূত্র থেকে আমরা পাই,

$$\Delta Q_{BC} = \Delta U_{BC} + W_{BC}$$

বা, $\Delta Q_{BC} = W_{BC} = 10986{\cdot}4\ J$

(ঘ) এখানে, $\Delta U_{CA}$, $Q_{CA}$ এবং $W_{CA}$ সমচাপ প্রক্রিয়ার জন্য,

$$W_{CA} = — PdV = 1 \times 10^5 (15 — 5) \times 10^{-2} = —10,000\ J$$

এখানে, $\Delta U_{CA} = nC_V\Delta T = n \times \frac{3}{2} R \times (300 — 601{\cdot}7)$

$$= 2 \times \frac{3}{2} \times 8{\cdot}31 \times (—301{\cdot}7)$$

$$= — 3 \times 8{\cdot}31 \times 301{\cdot}7 = — 7521{\cdot}4\ J$$

এখন, $Q_{CA} = \Delta U_{CA} + W_{CA} = — 7521{\cdot}4 + 10000 = 2478{\cdot}6\ J$

(ঙ) এখানে, চক্রের অভ্যন্তরীণ শক্তির নিট পরিবর্তন,

$$\Delta U_{net} = \Delta V_{AB} + \Delta U_{BC} + \Delta V_{CA} = 7521{\cdot}4 + 0 — 7521{\cdot}4 = 0$$

(চ) তাপশক্তি সিস্টেমে স্থানান্তর অর্থাৎ সিস্টেম কর্তৃক গৃহীত তাপ = Q-এর ধনাত্মক contribution

$\therefore \quad Q_h = Q_{AB} + Q_{BC} = 7521{\cdot}4 + 10986{\cdot}4 = 18507{\cdot}8\ J$

এবং সিস্টেম কর্তৃক বর্জিত তাপ = QC = Q-এর ঋণাত্মক contribution

$\therefore \quad QC = 2478{\cdot}6$

অতএব, ইঞ্জিনের কার্য দক্ষতা,

$$\eta = \left(1 — \frac{2478{\cdot}6}{18507{\cdot}8}\right) \times 10\%$$

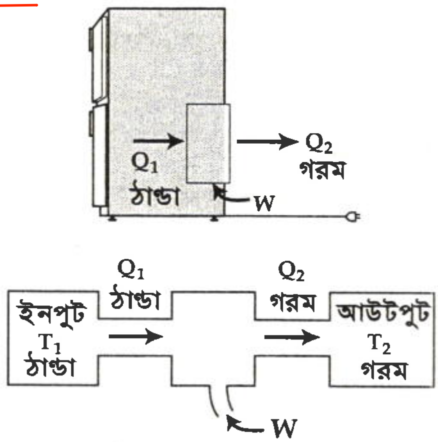
$$= 1 — \frac{17521{\cdot}4}{18507{\cdot}8} = \frac{986{\cdot}4}{18507{\cdot}8}$$

$$= 0{\cdot}0533 = 5{\cdot}33\%$$

(সিস্টেমের ওপরে কাজ সম্পাদিত হয় এবং কাজের প্রকৃতি ঋণাত্মক (-))

## ১.১১ রেফ্রিজারেটর বা হিমায়ক Refrigerator

হিমায়ন হচ্ছে এমন একটি প্রক্রিয়া যা কোনো আবদ্ধ স্থান বা বস্তু বা সিস্টেমের তাপ অপসারণ করে তার তাপমাত্রা পরিপার্শ্বের তাপমাত্রা অপেক্ষা কম রাখে। আমরা প্রতিদিন মাছ, মাংস, খাবার পানি, আইসক্রিম ইত্যাদি সংরক্ষণ করা এবং ঠান্ডা রাখার জন্য প্রায় সব বাড়িতেই রেফ্রিজারেটর ব্যবহার করি। অর্থাৎ **যে যন্ত্রের সাহায্যে পরিবেশ অপেক্ষা কম তাপমাত্রা সৃষ্টি করা যায় এবং এই তাপমাত্রা সর্বদা স্থির অবস্থায় রাখা যায় তাকে রেফ্রিজারেটর বা হিমায়ক বলা হয়।** কীভাবে খাদ্যদ্রব্য সংরক্ষণ করা এবং ঠান্ডা রাখা হয় তা মূলনীতি থেকে ব্যাখ্যা করা যায়।




চিত্র ১·১৬

**মূলনীতি :** রেফ্রিজারেটরকে একটি তাপ ইঞ্জিনের বিপরীত যন্ত্র হিসেবে বিবেচনা করা যায়। তাপ ইঞ্জিন উচ্চ তাপমাত্রার উৎস হতে তাপ গ্রহণ করে কার্য সম্পাদন করে এবং অব্যবহৃত তাপ নিম্ন তাপমাত্রার তাপগ্রাহকে বর্জন করে। পক্ষান্তরে রেফ্রিজারেটর নিম্ন তাপমাত্রার উৎস হতে তাপ গ্রহণ বা অপসারণ করে ও উচ্চ তাপমাত্রার আধারে বর্জন করে। নিম্ন তাপমাত্রার উৎস হতে তাপ অপসারণের জন্য যান্ত্রিক কাজ করতে হয়। রেফ্রিজারেটরে একটি কম্প্রেসর (compressor) যান্ত্রিক কাজ করে। এক্ষেত্রে অপসারিত তাপ $Q_1$ ও কাজ W এর যোগফল বর্জিত তাপ $Q_2$ এর সমান। চিত্র ১·১৬ এ একটি রেফ্রিজারেটরের প্রবাহ চিত্র (Flow Diagram) দেখানো হলো। বাড়িতে ব্যবহৃত রেফ্রিজারেটরে $Q_1$ রেফ্রিজারেটর হতে বাষ্পীভবন কুণ্ডলী দ্বারা অপসারিত তাপ, W কম্প্রেসরের মোটর কর্তৃক সম্পাদিত কাজ এবং $Q_2$ রেফ্রিজারেটরের বায়ুতে বর্জিত তাপ বুঝায়। **তাপ ইঞ্জিন ও রেফ্রিজারেটরের প্রধান পার্থক্য হলো তাপ ইঞ্জিনে সিস্টেম দ্বারা কাজ সম্পাদিত হয়। অন্যদিকে রেফ্রিজারেটরে সিস্টেমের ওপর কাজ সম্পাদিত হয়।**

**কার্যকৃত সহগ (Co-efficient of performance) :** রেফ্রিজারেটর হতে অপসারিত তাপ ও কম্প্রেসর কর্তৃক সরবরাহকৃত যান্ত্রিক কাজের অনুপাতকে কার্যকৃত সহগ বলে। একে K দ্বারা প্রকাশ করা হয়।

এখন, রেফ্রিজারেটরের বাষ্পীভবন কুণ্ডলী হতে অপসারিত তাপ $Q_1$, কম্প্রেসর কর্তৃক সরবরাহকৃত কাজ W এবং ঘনীভবন কুণ্ডলীতে বর্জিত তাপ $Q_2$ হলে, শক্তির নিত্যতা সূত্র অনুসারে পাওয়া যায় [চিত্র ১·১৬],

$$Q_2 = Q_1 + W$$

$$\therefore \quad W = Q_2 - Q_1$$

সুতরাং সূত্রানুসারে কার্যকৃত সহগ, $K = \dfrac{\text{অপসারিত তাপ}}{\text{সরবরাহকৃত কাজ}} = \dfrac{Q_1}{W} = \dfrac{Q_1}{Q_2 - Q_1}$

অর্থাৎ **রেফ্রিজারেটরের দক্ষতা বা কর্মসম্পাদন সহগ বা কার্যকৃত সহগ হচ্ছে নিম্ন তাপমাত্রার তাপাধার হতে অপসারিত তাপ ও বহিস্থ সংস্থা বা কম্প্রেসর কর্তৃক সম্পাদিত কাজের অনুপাত।**

কার্যকৃত সহগ যত বেশি হবে, তত কম যান্ত্রিক কাজ ব্যয় করে রেফ্রিজারেটর হতে বেশি তাপ গ্রহণ বা অপসারণ করা যাবে। রেফ্রিজারেটরে সাধারণত কার্যকৃত সহগ K-এর মান 2 থেকে 6 এর মধ্যে হয়।

রেফ্রিজারেটরের দক্ষতা বা কর্মদক্ষতা যথা,

$$\eta = \frac{Q_1}{W} \leq \frac{T_1}{T_2 - T_1}$$

এখানে, $T_1$ = অপসারিত তাপমাত্রা এবং $T_2$ = বর্জিত তাপমাত্রা

**তাপ ইঞ্জিন ও রেফ্রিজারেটরের মূলনীতির মধ্যে পার্থক্য :**

- তাপ ইঞ্জিন উচ্চ তাপমাত্রার উৎস হতে তাপ গ্রহণ করে কার্য সম্পাদন করে এবং অব্যবহৃত তাপ নিম্ন তাপমাত্রার তাপগ্রাহকে বর্জন করে।
- পক্ষান্তরে রেফ্রিজারেটর নিম্ন তাপমাত্রার উৎস থেকে তাপ গ্রহণ বা অপসারণ করে ও উচ্চ তাপমাত্রার আধারে বর্জন করে। এর জন্য বাইরে থেকে শক্তি সরবরাহ করতে হয়।

**অনুসন্ধানমূলক কাজ :** রান্নাঘর ঠান্ডা করার জন্য রেফ্রিজারেটরের দরজা খোলা রেখে চেষ্টা করা উচিৎ নয়—ব্যাখ্যা কর।

রেফ্রিজারেটর এর মধ্যে রক্ষিত খাদ্যদ্রব্য থেকে তাপ শোষণ করে বর্জন করে। যদি রেফ্রিজারেটরের দরজা খোলা রাখা হয়, তবে রেফ্রিজারেটর কক্ষ থেকে তাপ শোষণ করে কক্ষের মধ্যে বর্জন করে। এতে কক্ষের ভেতরের তাপমাত্রার কোনো পরিবর্তন হবে না। পক্ষান্তরে, যেহেতু রেফ্রিজারেটরের কম্প্রেসর কিছু তড়িৎশক্তি তাপশক্তিতে রূপান্তরিত করে ফলে কক্ষের তাপমাত্রা বরং বৃদ্ধি করবে।

**গাণিতিক উদাহরণ ১.১০**

**১। একটি রেফ্রিজারেটরের কার্যকৃত সহগ $K = 4{\cdot}6$। এটি ঠাণ্ডা প্রকোষ্ঠ হতে প্রতি চক্রে 250 J তাপ অপসারণ করলে (i) প্রতি চক্রে রেফ্রিজারেটর চালনার জন্য কী পরিমাণ কাজ সরবরাহ করতে হবে ? (ii) কী পরিমাণ তাপ প্রতি চক্রে বর্জন করবে ?**

আমরা জানি,

(i) কার্যকৃত সহগ, $K = \frac{Q_1}{W}$

বা, $W = \frac{Q_1}{K}$

$\therefore$ $W = \frac{250}{4{\cdot}6}\,J = 54\,J$

(ii) আবার, $W = Q_2 - Q_1$

বা, $Q_2 = W + Q_1$ $\therefore$ $Q_2 = 250\,J + 54\,J = 304\,J$

উত্তর : $W = 54\,J$ এবং $Q_2 = 304\,J$

এখানে,
$K = 4{\cdot}6$
অপসারিত তাপ, $Q_1 = 250\,J$
সরবরাহকৃত কাজ, $W = ?$
বর্জিত তাপ, $Q_2 = ?$

**২। একটি রেফ্রিজারেটর $-70°C$ তাপমাত্রার তাপাধার হতে 3500 J তাপ গ্রহণ করে এবং উচ্চতর তাপমাত্রার তাপাধারে 5200 J তাপ বর্জন করে। রেফ্রিজারেটরের কার্যকৃত সহগ নির্ণয় কর। তাপাধারের উচ্চতর তাপমাত্রা কত হবে ?**
[BUET Admission Test, 2021-22 (মান ভিন্ন)]

আমরা জানি,

$$K = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

$$\therefore\ K = \frac{3500}{5200 - 3500} = \frac{3500}{1700} = 2{\cdot}0588$$

এখানে,
$Q_1 = 5200\,J$
$Q_2 = 3500\,J$
$K = ?$
$T_1 = ?$
$T_2 = -70 + 273 = 203\,K$

আবার,

$$K = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

বা, $2{\cdot}0588 = \frac{203}{T_1 - 203}$

বা, $2{\cdot}0588 \times T_1 = 203 + 2{\cdot}0588 \times 203 = 620{\cdot}94$

বা, $T_1 = \frac{620{\cdot}94}{2{\cdot}0588} = 301{\cdot}60\,K$

$\therefore$ $T_1 = 301{\cdot}60 - 273 = 28{\cdot}60°C$

**উত্তর** : রেফ্রিজারেটরের কার্যকৃত সহগ $2{\cdot}0588$ এবং তাপাধারের উচ্চতর তাপমাত্রা $28{\cdot}60°C$

**৩। রেফ্রিজারেটরে বরফ–বাক্সের তাপমাত্রা $-6°C$ এবং কক্ষ তাপমাত্রা $27°C$। বরফ–বাক্সের তাপমাত্রা ঠিক রাখার জন্য রেফ্রিজারেটরে প্রতি মিনিটে 20,000 cal তাপ বর্জন করে। যদি রেফ্রিজারেটরকে কার্নো ইঞ্জিন বিবেচনা করা হয় তবে এর শক্তি ব্যয় কত?**

যেহেতু রেফ্রিজারেটর কার্নো ইঞ্জিনের অনুরূপ কাজ করে সুতরাং এর কার্যকৃত সহগ,

$$K = \frac{T_2}{T_1 - T_2} = \frac{267}{300 - 267} = \frac{267}{33} = 8{\cdot}09$$

পুনরায়,

$$K = \frac{Q_2}{W}$$

$$\therefore\ W = \frac{Q_2}{K} = \frac{20{,}000 \times 4{\cdot}2}{60 \times 8{\cdot}09} = 173\,Js^{-1}$$

এখানে,
কক্ষ বা পরিবেশের তাপমাত্রা,
$T_1 = 27°C = 27 + 273 = 300\,K$
বরফ–বাক্সের তাপমাত্রা,
$T_2 = -6°C = -6 + 273 = 267\,K$
তাপ বর্জন,
$Q_2 = 20{,}000\,cal\,min^{-1}$
$= \frac{20{,}000 \times 4{\cdot}2}{60}\,Js^{-1}$

**৪। একটি রেফ্রিজারেটরে 0°C তাপমাত্রার 3 kg পানি রাখা আছে। একে বরফে পরিণত করতে চাইলে কী পরিমাণ তাপ কক্ষে বর্জিত হবে। এজন্য সম্পাদিত কাজের পরিমাণ এবং রেফ্রিজারেটরের কার্যকৃত সহগ নির্ণয় কর। এখানে কক্ষ তাপমাত্রা 30°C। ($L_f = 3{\cdot}36 \times 10^5$ Jkg$^{-1}$)**

0°C তাপমাত্রার পানি হতে 0°C তাপমাত্রায় বরফে পরিণত হতে গৃহীত তাপ,

$$Q_2 = ml_f$$

$$\therefore Q_2 = 3 \times 3{\cdot}36 \times 10^5$$

$$= 10{\cdot}08 \times 10^5 \text{ J}$$

এখানে,
উচ্চ তাপমাত্রা, $T_1 = 30°C = 273 + 30 = 303$ K
নিম্ন তাপমাত্রা, $T_2 = 0°C = 273$ K
$m = 3$ kg
$l_f = 3{\cdot}36 \times 10^5$ Jkg$^{-1}$

আমরা জানি,

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

এখানে,
$Q_1$ = কক্ষে বর্জিত তাপ
$Q_2$ = বরফে পরিণত হতে গৃহীত তাপ

$$\therefore Q_1 = \frac{T_1}{T_2} \times Q_2 = \frac{303 \times 10{\cdot}08 \times 10^5}{273} = 11{\cdot}19 \times 10^5 \text{ J}$$

সম্পাদিত কাজ, $W = Q_1 - Q_2 = (11{\cdot}19 - 10{\cdot}08) \times 10^5 = 1{\cdot}11 \times 10^5$ J

কার্যকৃত সহগ, $K = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{10{\cdot}08 \times 10^5}{1{\cdot}11 \times 10^5} = 9{\cdot}08$

## ১·১২ এনট্রপি ও বিশৃঙ্খলা
### Entropy and disorderliness

মনে কর তোমরা শ্রেণিকক্ষে ক্লাস করছ। তোমার পাশে বসা এক বন্ধু ক্লাস অনুসরণ না করে পাশের ছেলেটিকে বিভিন্নভাবে বিরক্ত করছে। আবার অন্য একজন বইখাতা ক্লাসে না এনে নানা রকম খেলনা সাথে করে এনে খেলা শুরু করে দিল। এই ঘটনা চলতে থাকলে শ্রেণিকক্ষে লেখাপড়া বিঘ্নিত হবে এবং শিক্ষকও ক্লাসে মনোযোগ হারিয়ে ফেলবেন। ফলে শ্রেণিকক্ষে বিশৃঙ্খলার সৃষ্টি হবে। একইভাবে প্রকৃতিতে বেঁচে থাকার জন্য যতটুকু অক্সিজেন দরকার তার তুলনায় কম বা বেশি থাকলেও আমাদের শ্বাস-প্রশ্বাস নিতে কষ্ট হবে। তখন প্রকৃতিতে বিশৃঙ্খলা বৃদ্ধি পায়। উপরোক্ত দুই ক্ষেত্রেই বিশৃঙ্খলা বা এনট্রপি বৃদ্ধি পাচ্ছে। কোনো সিস্টেমের বিশৃঙ্খলার সূচক পরিমাপকে এনট্রপি বলে। ইংরেজিতে বলা হয় **"Entropy is a measure of disorderliness".**

আবার কোনো গ্যাসকে রুদ্ধতাপ প্রক্রিয়ায় সঙ্কুচিত করার সময় কিছু কাজ করা হয়। ফলে গ্যাসের তাপশক্তি এবং সেই সঙ্গে তাপমাত্রা বৃদ্ধি পায়। পুনরায় গ্যাসকে রুদ্ধতাপ প্রক্রিয়ায় প্রসারিত হতে দিলে গ্যাসকে কিছু কাজ করতে হয়। অন্তর্নিহিত শক্তির বিনিময়ে গ্যাস এই কাজ করে থাকে। ফলে গ্যাসের তাপশক্তি ও তাপমাত্রা এই দুটির একটিও স্থির থাকে না। উভয়ই একই সঙ্গে বৃদ্ধি পায় বা হ্রাস পায়।

বিজ্ঞানী **ক্লসিয়াস** তাপগতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্র প্রয়োগ করতে গিয়ে উপলব্ধি করেন যে, সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় যেমন বস্তুর তাপমাত্রা স্থির থাকে, তেমন রুদ্ধতাপ প্রক্রিয়ায় বস্তুর **'কোনো কিছু'** স্থির থাকে। রুদ্ধতাপ প্রক্রিয়ায় বস্তুর সঙ্গে যখন পরিপার্শ্বের কোনো তাপ আদানপ্রদান হয় না, তখন বস্তুর যে তাপীয় ধর্ম অপরিবর্তিত থাকে ক্লসিয়াস তার নাম দেন **এনট্রপি**। অতএব এনট্রপির নিম্নলিখিত সংজ্ঞা দেওয়া যেতে পারে :

**রুদ্ধতাপ প্রক্রিয়ায় বস্তুর যে তাপীয় ধর্ম স্থির থাকে, তাকে এনট্রপি বলে।** অন্যভাবে বলা হয়, **এনট্রপি হলো বস্তুর এমন একটি ভৌত ধর্ম যা রুদ্ধতাপ প্রক্রিয়ায় স্থির থাকে।**

এনট্রপি বস্তুর একটি ভৌত ধর্ম। তাপগতিবিজ্ঞানে এর গুরুত্ব অপরিসীম। এটি তাপগতীয় রাশিসমূহের এমন একটি অপেক্ষক যা তাপ প্রবাহের দিক বা তাপ সঞ্চালনের দিক নির্দেশ করে এবং তাপগতীয় অবস্থা নির্ধারণে সহায়তা করে। ইহা বস্তুর একটা ভৌত গুণ। একে তাপীয় জড়তা (thermal inertia) বলে। এনট্রপির পরম মান নির্ণয় করা যায় না, তবে কোনো সিস্টেমের এনট্রপি কত পরিবর্তন হলো তা নির্ণয় করা যায়।

**তাপমাত্রা, আয়তন ও চাপের ন্যায় বস্তুর এনট্রপিও একটি প্রাকৃতিক রাশি।** এর মান বস্তুর বর্তমান অবস্থার ওপর নির্ভর করে। তবে কোন পথে বস্তু ওই অবস্থায় পৌছল তার ওপর নির্ভর করে না অর্থাৎ কোনো নির্দিষ্ট অবস্থায় বস্তুর এনট্রপি বস্তুর পূর্ব ইতিহাসের ওপর নির্ভর করে না। **তাপ গ্রহণে বা বর্জনে বস্তুর এনট্রপি পরিবর্তিত হয়।**

**কোনো একটি সংস্থা বা চক্রের তাপমাত্রা সাপেক্ষে গৃহীত বা বর্জিত তাপের পরিবর্তনের হার দ্বারা এন্ট্রপি পরিমাপ করা হয়।**

মনে করি কোনো একটি ব্যবস্থা বা সিস্টেম T পরম তাপমাত্রায় $dQ$ পরিমাণ তাপ গ্রহণ বা বর্জন করে। অতএব এনট্রপি

$$\boxed{dS = \frac{dQ}{T}} \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad (1.30)$$

**একক :** T-এর একক কেলভিন এবং $dQ$ এর একক জুল।

অতএব এনট্রপির এস. আই. একক জুল/কেলভিন ($JK^{-1}$)।

**নিজে কর : রুদ্ধতাপীয় প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ায় এনট্রপির পরিবর্তন শূন্য হয় কেন ?** [য. বো. ২০১৯]

প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ায় দুটি রুদ্ধতাপ ও দুটি সমোষ্ণ প্রক্রিয়া থাকে। রুদ্ধতাপ প্রক্রিয়া দুটির সময় কোনো তাপ শোষিত বা বর্জিত হয় না বলে এনট্রপিরও কোনো পরিবর্তন হয় না।

### ১.১২.১ এনট্রপির তাৎপর্য

**Significance of entropy**

তাপগতিবিদ্যায় এনট্রপির গুরুত্ব অপরিসীম। এর নিম্নলিখিত তাৎপর্য রয়েছে :

১। এনট্রপি একটি প্রাকৃতিক রাশি যার মান তাপ ও পরম তাপমাত্রার অনুপাতের সমান।

২। এটি বস্তুর একটি তাপীয় ধর্ম যা তাপ সঞ্চালনের দিক নির্দেশ করে।

৩। এটি বস্তুর তাপগতীয় অবস্থা নির্ধারণে সহায়তা করে।

৪। এটি তাপমাত্রা, চাপ, আয়তন, অন্তর্নিহিত শক্তি, চুম্বকীয় অবস্থার ন্যায় কোনো বস্তুর অবস্থা প্রকাশ করে।

৫। এনট্রপি বৃদ্ধি পেলে বস্তু শৃঙ্খল অবস্থা (ordered state) হতে বিশৃঙ্খল অবস্থায় (disordered state) পরিণত হয়।

৬। তাপমাত্রা ও চাপের ন্যায় একে অনুভব করা যায় না।

**হিসাব কর : যখন 10g পানিকে 0°C থেকে 40°C তাপমাত্রায় উত্তপ্ত করা হয় তখন এনট্রপির পরিবর্তন কত হবে ?**

### ১.১২.২ এনট্রপির মাধ্যমে তাপগতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্রের প্রকাশ

**Formulation of the second law of thermodynamics in terms of entropy**

ক্লসিয়াসের মতে তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্র নিম্নরূপ :

বিশ্বের মোট শক্তি স্থির। একে শক্তির নিত্যতার সূত্রও বলা যায়।

ক্লসিয়াসের মতে তাপগতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্র নিম্নরূপ :

বিশ্বের এনট্রপি ক্রমাগত বৃদ্ধি পাচ্ছে। একে এনট্রপি বৃদ্ধির সূত্রও বলা যায়। আমরা স্বাভাবিকভাবে এনট্রপির মাধ্যমে তাপগতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্রের সংজ্ঞা নিম্নলিখিতভাবে দিতে পারি।

**সংজ্ঞা : প্রকৃতির সকল ভৌত অথবা রাসায়নিক ক্রিয়া এমনভাবে সংঘটিত হয় যার ফলে সার্বিক ব্যবস্থার এনট্রপি বৃদ্ধি পায়।** সীমায়িত ক্ষেত্রে একটি প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ার এনট্রপি অপরিবর্তিত থাকে।

তাপগতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্রকে গাণিতিকভাবে সংজ্ঞায়িত করার জন্য ধরা যাক একটি ব্যবস্থার প্রাথমিক ও চূড়ান্ত অবস্থা A ও B-তে এনট্রপির মান যথাক্রমে $S_A$ এবং $S_B$। সুতরাং ব্যবস্থাটির এনট্রপির পরিবর্তন,

$$S_B - S_A = \int_A^B \frac{dQ}{T} \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad (1.31)$$

যদি A ও B অবস্থা দুটি পরস্পর খুবই কাছাকাছি হয়, তবে লেখা যায়, $dS = \frac{dQ}{T}$

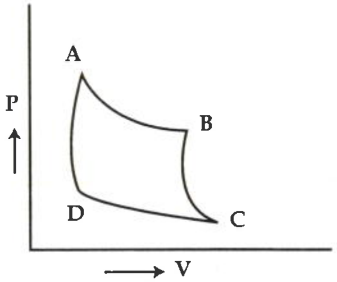
$$\therefore \; dQ = T\,dS \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad (1.32)$$

**এটিই তাপগতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্রের গাণিতিক সংজ্ঞা।**

আমরা জানি অপ্রত্যাগামী প্রক্রিয়ায় এনট্রপি বৃদ্ধি পায় এবং প্রত্যাগামী প্রক্রিয়ায় এনট্রপি স্থির থাকে। বিশ্ব জগতের অধিকাংশ প্রক্রিয়াই অপ্রত্যাগামী প্রক্রিয়া। সুতরাং বলা যায় বিশ্বজগতের এনট্রপি ক্রমাগত বৃদ্ধি পাচ্ছে।

**কাজ : প্রত্যাগামী প্রক্রিয়ায় এনট্রপি স্থির থাকে কেন—ব্যাখ্যা কর।**

কার্নো চক্র একটি প্রত্যাগামী বা প্রত্যাবর্তী চক্র। কার্নো চক্র থেকে দেখা যায় যে, AB ও CD যথাক্রমে দুটি সমোষ্ণ সম্প্রসারণ ও সংকোচন রেখা [চিত্র দ্রষ্টব্য। অন্যদিকে BC ও DA যথাক্রমে দুটি রুদ্ধতাপীয় সম্প্রসারণ ও সংকোচন রেখা বলে তাপের কোনো পরিবর্তন হয় না, ফলে কার্যনির্বাহী বস্তুর এনট্রপির কোনো পরিবর্তন হয় না।




AB সমোষ্ণ রেখা বরাবর এনট্রপির পরিবর্তন $= \dfrac{Q_1}{T_1}$

CD সমোষ্ণ রেখা বরাবর এনট্রপির পরিবর্তন $= \dfrac{Q_2}{T_2}$

$\therefore$ কার্যনির্বাহক বস্তুর মোট এনট্রপির পরিবর্তন $= \dfrac{Q_1}{T_1} - \dfrac{Q_2}{T_2}$

কিন্তু কার্নো চক্রে $= \dfrac{Q_1}{T_1} = \dfrac{Q_2}{T_2}$

$\therefore$ মোট এনট্রপির পরিবর্তন $dS = \dfrac{Q_1}{T_1} - \dfrac{Q_2}{T_2} = 0$

তাই প্রত্যাগামী বা প্রত্যাবর্তী চক্রে এনট্রপি স্থির থাকে।

DAT(09-10)

**যাচাই কর : অপ্রত্যাবর্তী বা অপ্রত্যাগামী প্রক্রিয়ায় এনট্রপি বৃদ্ধি পায় কেন—ব্যাখ্যা কর।**

মনে করি, তাপ উৎসের তাপমাত্রা $T_1$K এবং তাপ গামলার তাপমাত্রা $T_2$K। একটি অপ্রত্যাবর্তক ইঞ্জিন $T_1$ তাপমাত্রায় $Q_1$ পরিমাণ তাপ শোষণ করে এবং $T_2$ তাপমাত্রায় $Q_2$ পরিমাণ তাপ বর্জন করে। তখন ওই ইঞ্জিনের কর্মক্ষমতা,

$$\eta' = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$$

কিন্তু $T_1$ এবং $T_2$ তাপমাত্রার মধ্যে কার্যত প্রত্যাবর্তক ইঞ্জিনের কর্মদক্ষতা,

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

কার্নোর উপপাদ্য থেকে আমরা জানি, $\eta > \eta'$

অর্থাৎ $\dfrac{T_1 - T_2}{T_1} > \dfrac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$

$$1 - \frac{T_2}{T_1} > 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

বা, $\dfrac{T_2}{T_1} < \dfrac{Q_2}{Q_1}$

বা, $\dfrac{Q_2}{T_2} > \dfrac{Q_1}{T_1}$

বা, $\dfrac{Q_2}{T_2} - \dfrac{Q_1}{T_1} > 0$

অর্থাৎ অপ্রত্যাবর্তী বা অপ্রত্যাগামী প্রক্রিয়ায় এনট্রপি বৃদ্ধি পায়।

### ১.১২.৩ পৃথিবীর তাপীয় মৃত্যু
**Heat death of the earth**

আমরা জানি সকল স্বতঃস্ফূর্ত পরিবর্তন সর্বদা সাম্যাবস্থার দিকে ধাবিত হয়। অর্থাৎ সকল স্বতঃস্ফূর্ত পরিবর্তনে এনট্রপি বৃদ্ধি পায়। আমাদের চারপাশে যা কিছু আছে অর্থাৎ প্রকৃতির সকল বস্তুই সাম্যাবস্থা পেতে চায়। সিস্টেম সাম্যাবস্থায় পৌছালে কোনো কাজ সম্পন্ন হবে না। সিস্টেমের এই শক্তির রূপান্তরের অক্ষমতা বা অসম্ভাব্যতাই হচ্ছে এনট্রপি। এজন্য আমরা বলতে পারি **পৃথিবীর এনট্রপি বাড়ছে এবং অসীমের দিকে ধাবিত হচ্ছে।** এনট্রপির বৃদ্ধি যখন সর্বোচ্চ মানে পৌছাবে তখন সবকিছুর তাপমাত্রা এক হয়ে যাবে ফলে তাপশক্তি আর যান্ত্রিকশক্তিতে রূপান্তরিত হবে না। এই অবস্থাকে পৃথিবীর তাপীয় মৃত্যু বলে। এক কথায় বলা যায় এনট্রপি হচ্ছে তাপীয় মৃত্যুর সম্ভাবনার পরিমাণ।

**গাণিতিক উদাহরণ ১.১১**

**১। 10°C তাপমাত্রার 5 kg পানিকে 100°C তাপমাত্রায় উত্তীর্ণ করতে এনট্রপির পরিবর্তন নির্ণয় কর। [ পানির আপেক্ষিক তাপ = $4.2 \times 10^3$ J kg$^{-1}$ K$^{-1}$ ]** [ম. বো. ২০২১ (মান ভিন্ন); কু. বো. ২০১৯; রা. বো. ২০১৬; BUET Adimission Test, 2010-11]

এখানে,

$T_1 = (10 + 273)$ K = 283 K

$T_2 = (100 + 273)$ K = 373 K

$s = 4.2 \times 10^3$ Jkg$^{-1}$ K$^{-1}$

$m$ = 5 kg

$dS$ = ?

আমরা জানি,

$$dS = \int_{T_1}^{T_2} \frac{dQ}{T}$$

এখানে, $dQ = ms\,dT$

$$\therefore \quad dS = \int_{283}^{373} ms \frac{dT}{T} = ms\,[\log_e T]_{283}^{373}$$

$$= 5 \times 4.2 \times 10^3 \times [\log_e 373 - \log_e 283]$$

$$= 21000 \times \log_e \frac{373}{283}$$

$$= 21000 \times 0.2761 = 5.799 \times 10^3$$

$$\therefore \quad dS = 5.799 \times 10^3 \text{ J K}^{-1}$$

**২। 100°C তাপমাত্রার 4 kg পানিকে 100°C তাপমাত্রার বাষ্পে পরিণত করলে এনট্রপির বৃদ্ধি কত হবে নির্ণয় কর। [পানির বাষ্পীভবনের সুপ্ত তাপ = $2.26 \times 10^6$ Jkg$^{-1}$]।** [রা. বো. ২০২১]

এখানে $m$ = 4 kg

L = $2.26 \times 10^6$ J kg$^{-1}$

T = 100 + 273 = 373 K

মনে করি, এনট্রপির বৃদ্ধি = $dS$

আমরা জানি,

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

আবার $dQ = mL = 4 \times 2.26 \times 10^6$ J

$$\therefore \; dS = \frac{4 \times 2.26 \times 10^6 \text{J}}{373 \text{ K}} = 2.42 \times 10^4 \text{JK}^{-1}$$

**৩। – 8°C তাপমাত্রার 8 kg বরফকে 0°C তাপমাত্রার পানিতে পরিণত করতে এনট্রপির পরিবর্তন কত হবে? (বরফ গলনের আপেক্ষিক সুপ্ত তাপ, $l_f = 3.36 \times 10^5$ Jkg$^{-1}$; বরফের আপেক্ষিক তাপ, $s_1 = 0.5$ Jkg$^{-1}$K$^{-1}$ এবং পানির আপেক্ষিক তাপ $s_2 = 4200$ Jkg$^{-1}$K$^{-1}$)** [CKRUET Admission Test, 2020-21 (মান ভিন্ন)]

এখানে সিস্টেমে দুইভাবে এনট্রপির পরিবর্তন ঘটে। (i) – 6°C তাপমাত্রার 8 kg বরফকে 0°C তাপমাত্রার বরফে পরিণত করতে এনট্রপির পরিবর্তন এবং (ii) 0°C তাপমাত্রার 8 kg বরফকে 0°C তাপমাত্রার পানিতে রূপান্তরে এনট্রপির পরিবর্তন। সুতরাং,

এখানে,

$m$ = 8 kg

$T_1$ = – 8°C = – 8 + 273 = 265 K

$T_2$ = 0°C = 273 K

$s_1$ = 0.5 Jkg$^{-1}$K$^{-1}$

$$ds = ds_1 + ds_2 = ms_1 \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} + \frac{mL_f}{T_2}$$

বা, $$ds = 8 \times 0.5\,(\ln 273 - \ln 265) + \frac{8 \times 3.36 \times 10^5}{273}$$

$$= 8 \times 0.5 \times 0.0297 + 0.09846 \times 10^5$$

$$= 0.1188 + 98.46 \times 10^2 = 9846.12 \text{ J}$$

**৪। 0.01 kg পানিকে 0°C হতে 10°C তাপমাত্রায় উত্তপ্ত করা হলো। এনট্রপির পরিবর্তন নির্ণয় কর।** [চ. বো. ২০২১ (মান ভিন্ন; ম. বো. ২০২১ (মান ভিন্ন); BUET Admission Test, 2020-21 (মান ভিন্ন)]

এখানে,

$m$ = 0.01 kg

$T_1$ = 0°C = 273 K

$T_2$ = 10°C = (10 + 273) K = 283 K

$s$ = 4200 Jkg$^{-1}$K$^{-1}$

মনে করি, এনট্রপির পরিবর্তন = $dS$

আমরা পাই,

$$dS = \int_{T_1}^{T_2} \frac{dQ}{T} = \int_{T_1}^{T_2} ms \frac{dT}{T} \qquad [\because dQ = ms\,dT]$$

$$= ms \log_e \left(\frac{T_2}{T_1}\right)$$

বা, $$dS = 0.01 \text{ kg} \times 4200 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1} \times \log_e \frac{283}{273}$$

$$= 0.01 \times 4200 \times 0.0359 = 1.5078 \text{ JK}^{-1}$$

**৫। — 4°C তাপমাত্রায় 8 kg বরফকে 100°C তাপমাত্রার বাষ্পে পরিণত করতে প্রয়োজনীয় তাপ ও এনট্রপির পরিবর্তন নির্ণয় কর। (বরফের আপেক্ষিক তাপ $s_1 = 2100\ \text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$, পানির আপেক্ষিক তাপ, $s_2 = 4200\ \text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$, বরফ গলনের আপেক্ষিক সুপ্ততাপ $L_f = 3{\cdot}36 \times 10^5\ \text{Jkg}^{-1}$, পানির বাষ্পীভবনের আপেক্ষিক সুপ্ততাপ, $L_V = 2{\cdot}268 \times 10^6\ \text{Jkg}^{-1}$)**

**এখানে সিস্টেম চারভাগে তাপ গ্রহণ করে। যথা : (i) — 4°C তাপমাত্রার বরফ 0°C তাপমাত্রার বরফে পরিণত হতে, (ii) 0°C তাপমাত্রায় বরফ 0°C তাপমাত্রায় পানিতে পরিণত হতে, (iii) 0°C তাপমাত্রার পানি 100°C তাপমাত্রায় পানিতে পরিণত হতে এবং (iv) 100°C তাপমাত্রার পানি 100°C তাপমাত্রার বাষ্পে পরিণত হতে।**

(i) — 4°C তাপমাত্রার বরফ 0°C তাপমাত্রার বরফে পরিণত হতে গৃহীত তাপ,

$$H_1 = ms\Delta T = 8 \times 2100 \times 4 = 67200\ \text{J}$$

এখানে,

$$m = 8\ \text{kg}$$
$$T_1 = -4°\text{C} = 273 - 4 = 269\ \text{K}$$
$$s_1 = 2100\ \text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$$
$$T_2 = 0°\text{C} = 273\ \text{K}$$
$$\therefore \Delta T = T_2 - T_1 = 273 - 269 = 4\ \text{K}$$

(ii) 0°C তাপমাত্রায় বরফ 0°C তাপমাত্রায় পানিতে পরিণত হতে গৃহীত তাপ,

$$H_2 = mL_f = 8 \times 3{\cdot}36 \times 10^5 = 2{\cdot}688 \times 10^6\ \text{J}$$

এখানে,

$$m = 8\ \text{kg}$$
$$T = 273$$
$$L_f = 3{\cdot}36 \times 10^5\ \text{Jkg}^{-1}$$

(iii) 0°C তাপমাত্রার পানিকে 100°C তাপমাত্রায় উন্নীত করতে গৃহীত তাপ,

$$H_3 = ms_2\Delta T = 8 \times 4200 \times 100 = 8 \times 4{\cdot}2 \times 10^5 = 3{\cdot}36 \times 10^6\ \text{J}$$

এখানে,

$$m = 8\ \text{kg}$$
$$s_2 = 4200\ \text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$$
$$\Delta T = 100°\ \text{K}$$

(iv) 100°C তাপমাত্রার পানিকে 100°C তাপমাত্রার বাষ্পে পরিণত করতে গৃহীত তাপ,

$$H_4 = mL_V = 8 \times 2{\cdot}268 \times 10^5 = 1{\cdot}844 \times 10^6\ \text{J}$$

এখানে,

$$T_3 = 100°\text{C} = 273 + 100 = 373°\ \text{K}$$
$$L_V = 2{\cdot}268 \times 10^6\ \text{Jkg}^{-1}$$

∴ মোট প্রয়োজনতীয় তাপ,

$$H = H_1 + H_2 + H_3 + H_4 = 67200 + 2{\cdot}688 \times 10^6 + 3{\cdot}36 \times 10^6 + 1{\cdot}8144 \times 10^6 = 7{\cdot}93 \times 10^6\ \text{J}$$

আবার, সিস্টেমের এনট্রপির পরিবর্তন,

$$ds = ds_1 + ds_2 + ds_3 + ds_4$$
$$= \int_{T_1}^{T_2} \frac{dQ}{T} + \frac{mL_f}{T_2} + \int_{T_2}^{T_3} \frac{dQ}{T_3} + \frac{mL_V}{T_3}$$
$$= ms_1 \int_{268}^{273} \frac{dT}{T} + \frac{mL_f}{273} + ms_2 \int_{278}^{373} \frac{dT}{T} + \frac{mL_V}{373}$$
$$= 4 \times 2100 \ln\left(\frac{273}{268}\right) + \frac{2{\cdot}688 \times 10^6}{273} + 8 \times 4200 \ln\left(\frac{373}{273}\right) + \frac{1{\cdot}8144 \times 10^6}{373}$$
$$= 5822{\cdot}4\ \text{J} + 9846{\cdot}2 + 10486{\cdot}8\ \text{J} + 4864{\cdot}3$$
$$= 33019{\cdot}7\ \text{JK}^{-1}$$

**৬। 0°C তাপমাত্রায় 1 kg বরফকে 100°C তাপমাত্রার পানিতে পরিণত করতে এনট্রপি বৃদ্ধি নির্ণয় কর। (বরফ গলনের সুপ্ততাপ = $3·36 \times 10^5$ $Jkg^{-1}K^{-1}$ এবং পানির আপেক্ষিক তাপ = $4·2 \times 10^3$ $Jkg^{-1}K^{-1}$)**

[BUET Admission Test, 2013—14]

0°C তাপমাত্রায় বরফকে 0°C তাপমাত্রার পানিতে পরিণত করতে এনট্রপির পরিবর্তন,

$$ds_1 = \frac{mL_f}{T_1}$$

$$= \frac{1 \times 3·36 \times 10^5}{273}$$

$$= 1230·77 \text{ Jk}^{-1}$$

এখানে,

$m = 1$ kg

$T_1 = 0°C = 273$ K

$T_2 = 100°C = 100 + 273 = 373$ K

$L_f = 3·36 \times 10^5$ $Jkg^{-1}$

$s = 4·2 \times 10^3$ $Jkg^{-1}K^{-1}$

0°C তাপমাত্রার পানিকে 100°C তাপমাত্রার পানিতে নিতে এনট্রপির পরিবর্তন,

$$ds_2 = \int_{T_1}^{T_2} \frac{dQ}{T} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{msdT}{T} \qquad [\because \; dQ = msdT]$$

$$= ms \int_{273}^{323} \frac{dT}{T} = ms\,[\ln T]_{273}^{373}$$

$$= 1 \times 4200 \times \ln\frac{373}{273} = 1310·85 \text{ Jk}^{-1}$$

এনট্রপির মোট পরিবর্তন, $ds = ds_1 + ds_2 = 1230·77 + 1310·85 = 2541·62$ $Jkg^{-1}$

## সার-সংক্ষেপ

| | | |
|---|---|---|
| **থার্মোমিটার** | : | যে যন্ত্র দ্বারা বস্তুর তাপমাত্রা নির্ভুলভাবে পরিমাপ করা যায় তাকে থার্মোমিটার বলে। |
| **উষ্ণতামিতিক ধর্ম** | : | তাপমাত্রার পরিবর্তনে পদার্থের যে বিশেষ ধর্ম নিয়মিতভাবে পরিবর্তিত হয় এবং যে ধর্মের পরিবর্তন লক্ষ করে সহজ ও সঠিকভাবে তাপমাত্রা নির্ণয় করা যায় তাকে উষ্ণতামিতি ধর্ম বলে। |
| **উষ্ণতামিতিক পদার্থ** | : | যেসব পদার্থের উষ্ণতামিতি ধর্ম ব্যবহার করে থার্মোমিটার তৈরি করা হয় তাদেরকে উষ্ণতামিতিক পদার্থ বলে। |
| **তাপীয় সমতা** | : | একাধিক বস্তু যদি তাপীয়ভাবে সংযুক্ত থাকে এবং তাদের মধ্যে তাপের কোনো আদান প্রদান না ঘটলে বস্তুগুলো তাপীয় সমতায় আছে ধরা হয়। |
| **তাপমাত্রা** | : | প্রতিটি বস্তুর এমন একটি ধর্ম আছে যা অন্য একটি বস্তুর সাথে সমান হলে বস্তু দুটি পরস্পর তাপীয় সাম্যে থাকবে। এই ধর্মটিই হলো তাপমাত্রা। তাপমাত্রা হলো বস্তুর একটি তাপীয় অবস্থা যা ওই বস্তু হতে অন্য বস্তুতে তাপের প্রবাহ নিয়ন্ত্রণ করে এবং তাপ প্রবাহের অভিমুখ নির্ধারণ করে। |
| **ত্রৈধবিন্দু** | : | একটি নির্দিষ্ট চাপে যে তাপমাত্রায় কোনো পদার্থ কঠিন, তরল ও বায়বীয় রূপে সাম্যাবস্থায় থাকে তাকে ওই পদার্থের ত্রৈধবিন্দু বলে। |
| **কেলভিন** | : | পানির ত্রৈধবিন্দুর তাপমাত্রার $\frac{1}{273·16}$ অংশকে এক কেলভিন (1 K) বলে। |
| **তাপগতীয় স্কেল বা পরম স্কেল** | : | পানির ত্রৈধবিন্দুর তাপমাত্রাকে 273·16 K এবং ওই তাপমাত্রার $\frac{1}{273·16}$ অংশকে এক কেলভিন ধরে তাপমাত্রার যে স্কেল গণনা করা হয় তাকে তাপগতীয় স্কেল বা পরম স্কেল বলে। |
| **পরিপার্শ্ব** | : | একটি ব্যবস্থার আশেপাশের সবকিছুকে বলা হয় পরিপার্শ্ব। যেমন— পিস্টন ও সিলিন্ডারের আশেপাশের বায়ু হলো এর পরিপার্শ্ব। |
| **তাপগতীয় স্থানাঙ্ক** | : | কোনো ব্যবস্থার তাপগতীয় স্থানাঙ্কসমূহের যেকোনো পরিবর্তনকে তাপগতীয় প্রক্রিয়া বলে। |

| | | |
|---|---|---|
| **তাপের যান্ত্রিক তুল্যাঙ্ক বা সমতা** | : | একক তাপ উৎপন্ন করতে যে পরিমাণ কাজ করতে হয় তাকেই তাপের যান্ত্রিক তুল্যাঙ্ক বা সমতা বলে। |
| **সমোষ্ণ প্রক্রিয়া** | : | যে প্রক্রিয়ায় কোনো সিস্টেমের তাপমাত্রা স্থির থাকে কিন্তু চাপ ও আয়তন পরিবর্তিত হয় তাকে সমোষ্ণ প্রক্রিয়া বলে। |
| **রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়া** | : | যে প্রক্রিয়ায় কোনো সিস্টেমের তাপ ধ্রুব থাকে কিন্তু চাপ ও আয়তন পরিবর্তিত হয় তাকে রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়া বলে। |
| **ধ্রুব আয়তন প্রক্রিয়া** | : | যে প্রক্রিয়ায় কোনো সিস্টেমের আয়তন ধ্রুব থাকে তাকে ধ্রুব আয়তন প্রক্রিয়া বলে। |
| **সমচাপ প্রক্রিয়া** | : | যে প্রক্রিয়ায় কোনো সিস্টেমের চাপ ধ্রুব থাকে তাকে ধ্রুব চাপ প্রক্রিয়া বলে। |
| **তাপীয় সিস্টেম** | : | পরীক্ষানিরীক্ষার সময় জড় জগতের যে নির্দিষ্ট তাপীয় অংশ বিবেচনা করা হয় তাকে তাপীয় সিস্টেম বলে। |
| **উন্মুক্ত সিস্টেম** | : | যে সিস্টেম পরিবেশের সাথে ভর ও শক্তি উভয়ই বিনিময় করতে পারে তাকে উন্মুক্ত সিস্টেম বলে। |
| **বন্ধ সিস্টেম** | : | যে সিস্টেম পরিবেশের সাথে শুধু শক্তি বিনিময় করতে পারে কিন্তু ভর বিনিময় করতে পারে না তাকে বন্ধ সিস্টেম বলে। |
| **বিচ্ছিন্ন সিস্টেম** | : | যে সিস্টেম পরিবেশ দ্বারা মোটেও প্রভাবিত হয় না অর্থাৎ এক্ষেত্রে ভর ও শক্তি কিছুই বিনিময় করে না তাকে বিচ্ছিন্ন সিস্টেম বলে। |
| **সমোষ্ণ পরিবর্তন** | : | যে পরিবর্তনে কোনো গ্যাসের চাপের ও আয়তনের পরিবর্তন হয় কিন্তু তাপমাত্রা স্থির থাকে সেই পরিবর্তনকে সমোষ্ণ পরিবর্তন বলে। |
| **রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তন** | : | যে প্রক্রিয়ায় সিস্টেম তাপ গ্রহণ করে না কিংবা তাপ বর্জন করে না তাকে রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়া বলে। |
| **মোলার আপেক্ষিক তাপ** | : | 1 মোল গ্যাসের তাপমাত্রা 1 ডিগ্রি বাড়াতে যে পরিমাণ তাপের প্রয়োজন হয় তাকে ওই গ্যাসের মোলার তাপ ধারণ ক্ষমতা বা মোলার আপেক্ষিক তাপ বলে। |
| **স্থির চাপে মোলার আপেক্ষিক তাপ** | : | স্থির চাপে 1 মোল গ্যাসের তাপমাত্রা 1 K বৃদ্ধি করতে যে তাপের প্রয়োজন হয় তাকে স্থির চাপে মোলার আপেক্ষিক তাপ বলে। |
| **$C_P$ এবং $C_V$-এর পার্থক্য** | : | গ্যাসের দুই আপেক্ষিক তাপের পার্থক্য বা অন্তর ফল গ্যাস ধ্রুবক R-এর সমান। |
| **মেয়ারের প্রকল্প** | : | কোনো নির্দিষ্ট পরিমাণ গ্যাসের অভ্যন্তরীণ শক্তি শুধু এর তাপমাত্রার ওপর নির্ভর করে, এর চাপ বা আয়তনের ওপর নির্ভর করে না। একে মেয়ারের প্রকল্প বলে। |
| **তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্র** | : | যখনই কাজ সম্পূর্ণভাবে তাপে বা তাপ সম্পূর্ণরূপে কাজে রূপান্তরিত হয়, তখন কাজ ও তাপ পরস্পরের সমানুপাতিক হবে। |
| **তাপগতীয় ব্যবস্থা বা সিস্টেম** | : | তল বা বেষ্টনী দ্বারা সীমাবদ্ধ কোনো নির্দিষ্ট পরিমাণ বস্তুকে তাপগতীয় ব্যবস্থা বা সিস্টেম বলে, যেখানে তাপগতীয় চলরাশি পরিমাপ করা যায়। |
| **অভ্যন্তরীণ শক্তি** | : | প্রত্যেকে সংস্থার মধ্যে এমন একটি নির্দিষ্ট পরিমাণ শক্তি সুপ্ত অবস্থায় বর্তমান থাকে যার ফলে সংস্থাটি পরিবেশ ও পরিস্থিতি অনুযায়ী বিভিন্ন প্রকার শক্তি উৎপন্ন করতে সক্ষম হয়। সংস্থার এই শক্তিকে অভ্যন্তরীণ বা অন্তর্নিহিত শক্তি বলে। |
| **তাপগতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্র** | : | বাইরের কোনো শক্তি কর্তৃক সম্পাদিত কাজ ব্যতিরেকে শীতল বস্তু হতে উষ্ণ বস্তুতে তাপ নিজে প্রবাহিত হতে পারে না। |
| **প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া** | : | তাপগতিবিদ্যার দৃষ্টিকোণ হতে আমরা সেই প্রক্রিয়াকে প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া বলব যা সম্মুখ পরিবর্তনের পর বিপরীতমুখী হয়ে প্রত্যাবর্তন করতে পারে এবং সম্মুখ ও বিপরীতমুখী পরিবর্তনের প্রতি স্তরে তাপ ও কার্যের ফলাফল সমান ও বিপরীতমুখী হয়। |
| **অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া** | : | যে প্রক্রিয়ায় সম্ভাব্য সব প্রাকৃতিক উপায় সত্ত্বেও সমগ্র সংস্থাকে পুরোপুরি প্রাথমিক অবস্থায় ফিরিয়ে আনা যায় না বা যে প্রক্রিয়া বিপরীতমুখী হয়ে প্রত্যাবর্তন করতে পারে না তাকে অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া বলে। |

RMDAC



**কার্নো চক্র** : যে চক্রে কোনো একটি আদর্শ গ্যাস কার্যকরী পদার্থ হিসেবে একটি নির্দিষ্ট আয়তন, চাপ ও তাপমাত্রা হতে আরম্ভ করে একটি সমোষ্ণ প্রসারণ ও একটি রুদ্ধতাপ প্রসারণ এবং একটি সমোষ্ণ সংকোচন ও একটি রুদ্ধতাপ সংকোচনের পর পূর্বাবস্থায় ফিরে আসে, তাকে কার্নো চক্র বলে।

**তাপীয় ইঞ্জিন** : যে যন্ত্র তাপশক্তিকে যান্ত্রিক শক্তিতে রূপান্তরিত করে, তাকে তাপীয় ইঞ্জিন বলে।

**হিমায়ন** : কৃত্রিম উপায়ে কোনো আবদ্ধ স্থানকে পারিপার্শ্বিক অবস্থা হতে নিম্ন তাপমাত্রায় রাখার পদ্ধতিকে হিমায়ন বলে। DAT(18-19) (নিম্ন থেকে উচ্চ)

**হিমায়ক** : নিম্ন স্ফুটনাঙ্কের কোনো তরল পরিপার্শ্ব হতে লীনতাপ বা সুপ্ততাপ গ্রহণ করে পরিপার্শ্বকে শীতল করে তাকে হিমায়ক বলে।

**রেফ্রিজারেটর** : যে যন্ত্র যান্ত্রিক কাজ সম্পন্ন করে নিম্ন তাপমাত্রার উৎস হতে তাপ অপসারণ করে উচ্চ তাপমাত্রার আধারে বর্জন করে তাকে রেফ্রিজারেটর বলে।

**কার্যকৃত সহগ** : রেফ্রিজারেটর হতে অপসারিত তাপ ও কম্প্রেসর কর্তৃক সরবরাহকৃত যান্ত্রিক কাজের অনুপাতকে কার্যকৃত সহগ বলে।

**ইঞ্জিনের দক্ষতা** : ইঞ্জিন একটি চক্রে যে পরিমাণ তাপকে কাজে পরিণত করে এবং তাপ উৎস হতে যে পরিমাণ তাপ শোষণ করে এদের অনুপাতকে ইঞ্জিনের দক্ষতা বলে।

**এনট্রপি** : রুদ্ধতাপ প্রক্রিয়ায় বস্তুর যে তাপীয় ধর্ম স্থির থাকে, তাকে এনট্রপি বলে।

## প্রয়োজনীয় গাণিতিক সূত্রাবলি

$$\frac{C}{5} = \frac{F-32}{9} = \frac{K-273}{5} \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad (1)$$

$$\theta = \frac{X_\theta - X_{icee}}{X_{steam} - X_{ice}} \times 100°C \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad (2)$$

$$\theta = \frac{R_\theta - R_0}{R_{100} - R_0} \times 100 \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad (3)$$

$$\theta = \frac{X_\theta - X_{icee}}{X_{steam} - X_{ice}} \times 100°F + 32°F \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad (4)$$

$$W = JH \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad (5)$$

$$\Delta Q = \Delta u + \Delta W \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad (6)$$

$$dW = PdV \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad (7)$$

$$dQ = du + PdV \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad (8)$$

$$W = nRT \ln \left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad (9)$$

$$W = \frac{R}{\gamma - 1}[T_1 - T_2] \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad (10)$$

$$C_p - C_v = R \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad (11)$$

$$PV^\gamma = \text{ধ্রুবক} \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad (12)$$

$$TV^{\gamma-1} = \text{ধ্রুবক} \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad (13)$$

$$TP^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = \text{ধ্রুবক} \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad (14)$$

$$W = \left(\frac{nR}{\gamma - 1}\right)(T_1 - T_2) \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad (15)$$

$$C_P = \frac{\Delta Q}{n\Delta T} \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad (16)$$

$$C_V = \frac{\Delta Q}{n\Delta T} \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad (17)$$

$$C_V = \frac{R}{\gamma - 1} \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad (18)$$

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V} \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad (19)$$

$$\eta = \frac{W}{Q_1} \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad (20)$$

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad (21)$$

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2} \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad (22)$$

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad (23)$$

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \times 100\% \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad (24)$$

$$K = \frac{Q}{W} \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad (25)$$

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad (26)$$

$$dS = \int_{T_1}^{T_2} \frac{dQ}{T} \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad (27)$$

## বিশ্লেষণাত্মক ও মূল্যায়নধর্মী গাণিতিক সমস্যাবলির সমাধান

**১। জাহেদ ও শাহেদ সহপাঠী। জাহেদ পদার্থবিজ্ঞান ল্যাবে একটি রোধ থার্মোমিটার নিল যার বরফ বিন্দু ও বাষ্প বিন্দুতে রোধ 12Ω এবং 24Ω। অপরদিকে, শাহেদ 5 atm চাপবিশিষ্ট একটি পাত্রে আবদ্ধ গ্যাসে 2400J তাপশক্তি সরবরাহ করে। এতে গ্যাসের আয়তন 1600 $cm^3$ থেকে 3200 $cm^3$ হয় এবং অন্তস্থঃ শক্তির পরিবর্তন হয় 1589·4 J।**

**(ক) 250°C তাপমাত্রায় জাহেদের থার্মোমিটারের রোধ কত?**

**(খ) উদ্দীপকে শাহেদের পরীক্ষণটি তাপগতিবিদ্যার ১ম সূত্রকে সমর্থন করে কী? গাণিতিক বিশ্লেষণ কর।**

[ম. বোর্ড ২০২১]

(ক) আমরা জানি,

$$\theta = \frac{R_t - R_0}{R_{100} - R_0} \times 100$$

বা, $250 = \dfrac{R_t - 12}{24 - 12} \times 100$

বা, $250 \times 12 = 100R_t - 12 \times 100$

বা, $100\ R_t = 250 \times 12 + 12 \times 100$

$\therefore\ R_t = \dfrac{3000 + 1200}{100} = \dfrac{4200}{100} = 42\Omega$

এখানে,
0°C তাপমাত্রায় রোধ = 12Ω
100°C তাপমাত্রায় রোধ = 24Ω
θ = 250°C
রোধ, $R_t$ = ?

(খ) আবার, তাপগতিবিদ্যার ১ম সূত্র অনুসারে,

$$dQ = dU + PdV$$

এখন, $dU + PdV$

$= 1589{\cdot}4 + 5 \times 1{\cdot}013 \times 10^5 \times (V_2 - V_1)$

$= 1589{\cdot}4 + 5 \times 1{\cdot}013 \times 10^5\ (3200 - 1600) \times 10^{-6}$

$= 1589{\cdot}4 + 5 \times 1{\cdot}013 \times 10^5 \times 1600 \times 10^{-6}$

$= 2399{\cdot}8 \approx 2400\ J = dQ$

এখানে,
$dU = 1589{\cdot}4J$
$V_1 = 1600\ cm^3 = 1600 \times 10^{-6}\ m^3$
$V_2 = 3200\ cm^3 = 3200 \times 10^{-6}\ m^3$
$dQ = 2400J$
$P = 5\ atm$
$= 5 \times 1{\cdot}013 \times 10^5\ Nm^{-2}$

সুতরাং শাহেদের পরীক্ষণটি তাপগতিবিদ্যার ১ম সূত্রকে সমর্থন করে।

**২। সিয়াম 1 kg বরফকে – 10°C তাপমাত্রা হতে 30°C তাপমাত্রার পানিতে পরিণত করে। সামির 30°C তাপমাত্রার 1 kg পানিকে 100°C তাপমাত্রার বাষ্পে পরিণত করে। সিয়াম দাবি করল তার প্রক্রিয়াটি বেশি শৃঙ্খল।**

**[$S_w = 4200\ Jkg^{-1}K^{-1}$, $L_f = 3{\cdot}36 \times 10^5\ Jkg^{-1}$, $S_{ice} = 2100\ Jkg^{-1}K^{-1}$ এবং $L_v = 2{\cdot}26 \times 10^6\ Jkg^{-1}$]**

**(ক) সামিরের প্রক্রিয়ায় মোট প্রয়োজনীয় তাপ নির্ণয় কর।**

**(খ) সিয়ামের দাবি সঠিক কি না—গাণিতিক বিশ্লেষণের মাধ্যমে যাচাই কর।** [য. বো. ২০২২]

(ক) 30°C তাপমাত্রার পানিকে 100°C তাপমাত্রায় উন্নীত করতে প্রয়োজনীয় তাপ,

$$H_1 = ms\,\Delta T = 1 \times 4200 \times (373 - 303)$$
$$= 4200 \times 70 = 2{\cdot}94 \times 10^5\ J$$

100°C তাপমাত্রার পানিকে 100°C তাপমাত্রার বাষ্পে পরিণত করতে প্রয়োজনীয় তাপ,

$$H_2 = mL_v = 1 \times 2{\cdot}26 \times 10^6 = 2{\cdot}26 \times 10^6\ J$$

এখানে,
$T_1 = 30°C = 273 + 30 = 303\ K$
$T_2 = 100°C = 273 + 100 = 373\ K$
$s = 4200\ Jkg^{-1}K^{-1}$
$L_v = 2{\cdot}26 \times 10^6\ Jkg^{-1}$

মোট তাপ, $H = H_1 + H_2 = 2{\cdot}94 \times 10^5 + 2{\cdot}26 \times 10^6 = 2{\cdot}554 \times 10^6\ J$

(খ) সিয়াম 1 kg বরফকে – 10°C তাপমাত্রা থেকে 30°C তাপমাত্রার পানিতে পরিণত করে।

1 kg বরফকে – 10°C তাপমাত্রা থেকে 0°C তাপমাত্রার বরফে পরিণত করতে এনট্রপির পরিবর্তন,

$$dS_1 = \int_{T_1}^{T_2} \frac{dQ}{T} = ms\int_{263}^{273} \frac{dT}{T}$$

এখানে,
$T_1 = -10°C = 273 - 10 = 263\ K$
$T_2 = 0°C = 273\ K$
$L_f = 3{\cdot}36 \times 10^5\ Jkg^{-1}$

বা, $ds_1 = 1 \times 4200 \times (\ln 273 - \ln 263) = 4200 \times (5{\cdot}61 - 5{\cdot}57) = 4200 \times 0{\cdot}04 = 168\ JK^{-1}$

0°C তাপমাত্রার 1 kg বরফকে 0°C তাপমাত্রার পানিতে পরিণত করতে এনট্রপির পরিবর্তন,

$$dS_2 = \frac{mL_f}{T} = \frac{1 \times 3{\cdot}36 \times 10^5}{273} = \frac{3{\cdot}36 \times 10^5}{273} = 1{\cdot}23 \times 10^3\ JK^{-1}$$

0°C তাপমাত্রার পানিকে 30°C তাপমাত্রার পানিতে পরিণত করতে এনট্রপির পরিবর্তন,

$$dS_3 = \int_{273}^{303} ms\frac{dT}{T} = 1 \times 4200 \times (\ln 303 - \ln 273)$$
$$= 4200 \times (5{\cdot}71 - 5{\cdot}61) = 4200 \times 0{\cdot}01$$
$$= 420\ JK^{-1}$$

এখানে,
$T_1 = 0°C = 273\ K$
$T_2 = 30°C = 273 + 30 = 303\ K$
$s = 4200\ Jkg^{-1}$

এনপ্রপির মোট পরিবর্তন,

$$dS = dS_1 + dS_2 + dS_3 = 168 + 1{\cdot}23 \times 10^3 + 420$$
$$= 1818\ JK^{-1}$$

সামির 30°C তাপমাত্রার 1 kg পানিকে 100°C তাপমাত্রার বাষ্পে পরিবণত করে।

এখন, 30°C তাপমাত্রার 1 kg পানিকে 100°C তাপমাত্রার পানিতে পরিণত করতে এনট্রপির পরিবর্তন,

$$dS_1 = ms\int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} = ms\int_{303}^{373} \frac{dT}{T}$$
$$= 1 \times 4200 \times (\ln 373 - \ln 303)$$
$$= 4200 \times 2{\cdot}1 = 882\ JK^{-1}$$

এখানে,
$T_1 = 30°C = 30 + 273 = 303\ K$
$T_2 = 100°C = 100 + 273 = 373\ K$

$$dQ = mL_v = 1 \times 2{\cdot}26 \times 10^6 = 2{\cdot}26 \times 10^6\ J$$

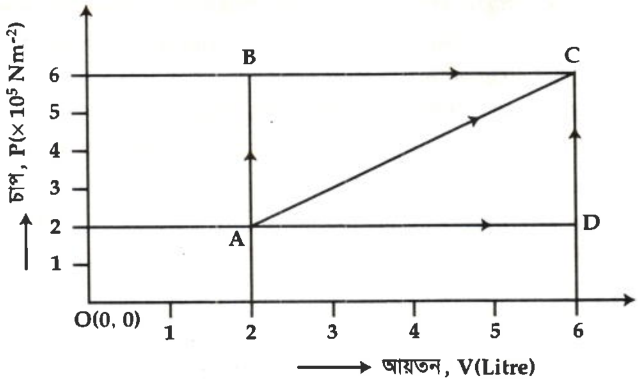
100°C তাপমাত্রার পানিকে 100°C তামপাত্রার বাষ্পে পরিণত করতে এনট্রপির পরিবর্তন,

$$dS_2 = \frac{dQ}{T} = \frac{2{\cdot}26 \times 10^6}{373} = 6{\cdot}06 \times 10^3\ Jk^{-1}$$

সুতরাং, এনট্রপির মোট পরিবর্তন, $dS = 882 + 6060 = 6942\ JK^{-1}$

যেহেতু সামিরের এনট্রপির পরিবর্তন সিয়ামের এনট্রপির পরিবর্তন অপেক্ষা কম, সুতরাং সিয়ামের প্রক্রিয়াটি সুশৃঙ্খল। অতএব সিয়ামের দাবি সঠিক।

৩।




**চিত্রে কোনো তাপগতীয় ব্যবস্থাকে ABC, AC ও ADC পথে A থেকে C বিন্দুতে নেয়া হলো। A ও C বিন্দুতে ব্যবস্থাটির অন্তঃস্থ শক্তি যথাক্রমে 100 J ও 600 J।**

**(ক) AC পথে সম্পাদিত কাজের পরিমাণ নির্ণয় কর।**

**(খ) কোন পথে সিস্টেম কর্তৃক গৃহীত তাপের পরিমাণ বেশি—গাণিতিক বিশ্লেষণপূর্বক মতামত দাও।**

[কু. বো. ২০২১]

(ক) আমরা জানি, কৃত কাজ, $dW = pdV$

AC পথে কৃত কাজ = AD পথে কৃত কাজ + DC পথে কৃত কাজ $= 2 \times 10^5 \times (6 - 2) \times 10^{-3} + 0$

$= 2 \times 4 \times 10^2 = 800J$

(খ) ADC পথে গৃহীত তাপ,

$dQ_D = dU + dW$

$= 500 + PdV = 500 + 800 = 1300$ J

এখানে,

$dU = 600 - 100 = 500$ J

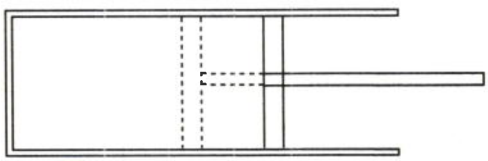
ABC পথে গৃহীত তাপ,

$dQ_B = dU + PdV = 500 + 6 \times 10^5 \times (6 - 2) \times 10^{-3}$

$= 500 + 6 \times 4 \times 10^2 = 500 + 2400 = 2900J$

সুতরাং, ABC পথে সিস্টেম কর্তৃক গৃহীত তাপ বেশি।

**৪। নিচের উদ্দীপকটি লক্ষ কর এবং প্রশ্নগুলোর উত্তর দাও।**



**চিত্রের সিলিন্ডারে কিছু গ্যাস আবদ্ধ আছে। গ্যাসের চাপ 400 Pa এ স্থির রেখে সিস্টেমে ধীরে ধীরে 800 J তাপশক্তি সরবরাহ করায় 1200 J কাজ সম্পাদিত হয়।**

**(ক) গ্যাসটির আয়তন ও অন্তস্থ শক্তির পরিবর্তন নির্ণয় কর।**

**(খ) "সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় কোনো ব্যবস্থা কর্তৃক সম্পাদিত কাজ সরবরাহকৃত তাপশক্তির সমান।"—উদ্দীপকের আলোকে উক্তিটির যথার্থতা নিরূপণ কর।**

[ঢা. বো. ২০১৯]

(ক) আমরা জানি,

$dQ = dU + dW$

বা, $800 = dU + 1200$

$\therefore$ $dU = -400$ J

আবার, $dQ = dU + PdV$

বা, $800 = -400 + 400\,dV$

বা, $400\,dV = 1200$

$\therefore$ $dV = 3\ m^3$

এখানে,

তাপ, $dQ = 800$ J

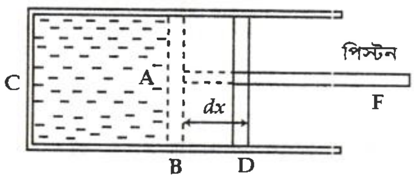
কাজ, $dW = 1200$ J

চাপ, $P = 400$ Pa

অন্তস্থ শক্তি, $du = ?$

আয়তন, $V = ?$

(খ) সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় কোনো ব্যবস্থা কর্তৃক সম্পাদিত কাজ সরবরাহকৃত তাপশক্তির সমান। চিত্রের সিলিন্ডারটিতে কিছু গ্যাস আবন্ধ আছে। সিলিন্ডারের মধ্যে একটি ঘর্ষণহীন পিস্টন যুক্ত করা আছে। অর্থাৎ পিস্টনটি সিলিন্ডারের মধ্যে বিনা বাধায় চলাচল করতে পারে। উদ্দীপকের গাণিতিক সমস্যা হতে এটি স্পষ্ট যে, সিলিন্ডারের দেওয়ালের মধ্য দিয়ে শক্তি ব্যবস্থায় প্রবেশ করতে পারে। অথবা ব্যবস্থা থেকে বেরিয়ে যেতে পারে। যদি ব্যবস্থায় খুব ধীরে ধীরে তাপশক্তি সরবরাহ করা হয় তাহলে গ্যাসের চাপ ও আয়তনের পরিবর্তন হবে। উষ্ণতার পরিবর্তন হবে না।




উষ্ণতার পরিবর্তন না হলে ব্যবস্থার অন্তস্থ শক্তির পরিবর্তন $dU = 0$। সুতরাং চিত্রের সমোষ্ণ প্রক্রিয়াটিতে তাপমাত্রা স্থির থাকছে বিধায় এর অন্তস্থ শক্তি অপরিবর্তিত থাকবে। এখন, তাপগতিবিদ্যার ১ম সূত্র হতে পাই,

$$dQ = dU + dW \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad (i)$$

যেহেতু উপরোক্ত প্রক্রিয়া $du$ অপরিবর্তিত থাকবে, তাই (i) নং সমীকরণে $du = 0$ বসিয়ে পাই,

$$dQ = 0 + dW$$

$$dQ = dW$$

অর্থাৎ সরবরাহকৃত তাপশক্তি = ব্যবস্থা কর্তৃক সম্পাদিত কাজ

সুতরাং সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় কোনো ব্যবস্থা কর্তৃক সম্পদিত কাজ সরবরাহকৃত তাপশক্তির সমান।

**৫। একটি তাপ ইঞ্জিন গৃহীত তাপের এক-তৃতীয়াংশ বর্জন করে। উৎসের তাপমাত্রা 200 K বৃদ্ধি করলে দক্ষতা 80% হয়। ইঞ্জিনটি তাপ উৎস থেকে 1500 J তাপ গ্রহণ করে।**

**(ক) উদ্দীপকের ডাটা ব্যবহার করে প্রথম পর্যায়ে ইঞ্জিনের দক্ষতা নির্ণয় কর।**

**(খ) উৎসের তাপমাত্রা স্থির রেখে উদ্দীপকে উল্লেখিত যন্ত্রটিকে কীভাবে প্রত্যাবর্তী ইঞ্জিনে রূপান্তর করা যায়—গাণিতিক বিশ্লেষণের মাধ্যমে ব্যাখ্যা কর।** [য. বো. ২০২১]

(ক) প্রশ্নানুসারে, তাপ গ্রাহকে বর্জিত তাপ, $Q_2 = \frac{Q_1}{3} = \frac{1500}{3} = 500\ \text{J}$

আমরা জানি,

$$\eta = \left(1 - \frac{Q_2}{Q_1}\right) \times 100\%$$

$$= \left(1 - \frac{500}{1500}\right) \times 100\%$$

$$= \frac{1000}{1500} \times 100\% = 66{\cdot}67\%$$

(খ) আবার, $\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$

১ম ক্ষেত্রে, $\frac{66{\cdot}67}{100} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$

বা, $66{\cdot}67\ T_1 = 100\ T_1 - 100\ T_2$

বা, $100\ T_2 = 100\ T_1 - 66{\cdot}67\ T_1 = 33{\cdot}33\ T_1 \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad (1)$

২য় ক্ষেত্রে, $\frac{80}{100} = \frac{(T_1 + 200) - T_2}{T_1 + 200}$

বা, $80\ T_1 + 80 \times 200 = 100\ T_1 + 200 \times 100 - 100\ T_2$

$100\ T_2 = 100\ T_1 - 80\ T_1 + 20000 - 16000 = 20\ T_1 + 4000 \quad \ldots \quad \ldots \quad (2)$

সমীকরণ (1) কে (2) থেকে বিয়োগ করে পাই,

$0 = 20\ T_1 - 33{\cdot}33\ T_1 + 4000$

বা, $13{\cdot}33\ T_1 = 4000$

$\therefore \quad T_1 = 300\ \text{K}$

প্রত্যাবর্তী ইঞ্জিন হলে এর দক্ষতা এবং তাপ ইঞ্জিনের দক্ষতা একই হবে।

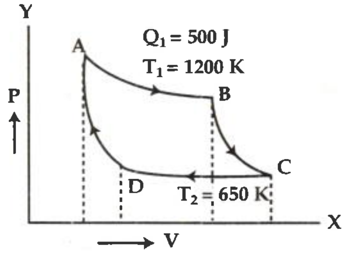
$\therefore \quad \frac{66.67}{100} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$

বা, $\frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{66.67}{100} = \frac{33.33}{100}$

$\therefore \quad T_2 = \frac{33.33 \times T_1}{100} = \frac{33.33 \times 300}{100} = 100\text{ K}$

তাপগ্রাহকের তাপমাত্রা 100 K হলে ইঞ্জিনটি প্রত্যাবর্তী হবে।

**৬। একটি কার্নো চক্রের চারটি ধারা P—V লেখচিত্রের মাধ্যমে প্রদর্শন করা হলো।**




**(ক) উল্লেখিত কার্নো ইঞ্জিনের দক্ষতা কত ?**

**(খ) চক্রটির প্রতি ধাপে এবং মোট চক্রে এনট্রপির পরিবর্তন নির্ণয় কর।** [চ. বো. ২০২১ (মান ভিন্ন)]

(ক) আমরা জানি, $\eta = \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \times 100\%$

$= \left(1 - \frac{650}{1200}\right) \times 100\% = 45.83\%$

এখানে,
$T_1 = 1200$ K
$T_2 = 650$ K
$\eta = ?$

$\therefore$ ইঞ্জিনের দক্ষতা 45.83%

(খ) আমরা জানি,

$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}$

বা, $Q_2 = \frac{Q_1}{T_1} \times T_2$

বা, $Q_2 = \frac{500 \times 650}{1200} = 270.83$ J

এখানে,
$Q_1 = 500$ J
$T_1 = 1200$ K
$T_2 = 650$ K

১ম ক্ষেত্রে এনট্রপি বৃদ্ধি $= \frac{+Q_1}{T_1} = \frac{500}{1200}\text{ JK}^{-1} = 0.42\text{ JK}^{-1}$

২য় ক্ষেত্রে এনট্রপি হ্রাস $= \frac{-Q_2}{T_2} = -\frac{270.83}{650}\text{ JK}^{-1} = -0.42\text{ JK}^{-1}$

দেখা যায় যে, সম্মুখ প্রক্রিয়ায় এনট্রপি যে পরিমাণ বৃদ্ধি পায় বিপরীত প্রক্রিয়ায় সেই পরিমাণ এনট্রপি হ্রাস পায়। অর্থাৎ সম্পূর্ণ চক্রে এনট্রপির পরিবর্তন $= 0.42 + (-0.42) = 0.42 - 0.42 = 0$

সুতরাং, চক্রটি প্রত্যাগামী চক্র, তাই এনট্রপি ধ্রুব থাকে, মোট চক্রে এনট্রপির কোনো পরিবর্তন হয় না।

**৭। 0°C তাপমাত্রার 0.07 kg বরফকে একটি নির্দিষ্ট উচ্চতা থেকে ফেলে দেওয়া হলো। এতে বিভবশক্তির 55% তাপে রূপান্তরিত হলো এবং এই তাপ সমস্ত বরফকে গলিয়ে দিলো। কিছু সময় পর বরফগলা পানির তাপমাত্রা 5°C এ উন্নীত হলো। দেওয়া আছে, বরফ গলনের আপেক্ষিক সুপ্ততাপ $3.36 \times 10^5$ Jkg$^{-1}$ এবং পানির আপেক্ষিক তাপ 4200 Jkg$^{-1}$K$^{-1}$।**

**(ক) বরফ খণ্ডটি কত উচ্চতা থেকে ফেলা হয়েছিল?**

**(খ) বরফ গলন এবং বরফগলা পানির তাপমাত্রা বৃদ্ধি কোন ক্ষেত্রে পরিবেশের উপর অধিক প্রভাব পড়বে? এনট্রপির আলোকে ব্যাখ্যা কর।** [ঢা. বো. ২০২২]

(ক) ধরি বরফের খণ্ডটি $h$ উচ্চতা থেকে ফেলা হয়েছিল।

$\therefore$ বরফ খণ্ডটির বিভবশক্তি, $E_p = mgh$

এক্ষেত্রে বরফ গলার জন্য প্রয়োজনীয় তাপ, $Q = m \times L_f$

প্রশ্নানুসারে,

$$Q = E_p \times 55\%$$

বা, $Q = E_P \times \frac{55}{100} = E_P \times 0.55$

বা, $mL_f = E_P \times 0.55$

$mL_f = mgh \times 0.55$

$$\therefore h = \frac{L_f}{g \times 0.55} = \frac{3.36 \times 10^5}{9.8 \times 0.55}$$

$= 62337.66 \text{ m} = 62.33766 \text{ km}$

এখানে,

বরফের ভর, $m = 0.07$ kg

বরফ গলনের আপেক্ষিক সুপ্ততাপ,

$L_f = 3.36 \times 105 \text{ Jkg}^{-1}$

অভিকর্ষজ ত্বরণ, $g = 9.8 \text{ ms}^{-2}$

(খ) বরফ গলন এবং বরফ গলে পানিতে পরিণত হয়ে তাপমাত্রা বৃদ্ধি প্রক্রিয়া, এই দুটির মধ্যে যেটির এনট্রপি বেশি, সেটির বিশৃঙ্খলার মাত্রা বেশি হবে এবং তা পরিবেশের ওপর অধিক প্রভাব বিস্তার করবে।

0°C তাপমাত্রার বরফ 0°C তাপমাত্রার পানিতে পরিণত হতে এনট্রপির পরিবর্তন,

$$dS_1 = \frac{dQ}{T} = \frac{mL_f}{T}$$

$$= \frac{0.07 \times 3.36 \times 10^5}{273} \quad [\because T = 0 + 273 = 273 \text{ এবং } L_f = 3.36 \times 10^5 \text{ Jkg}^{-1}]$$

$\therefore dS_1 = 86.154 \text{ Jkg}^{-1}$

বরফগলা পানির তাপমাত্রা 0°C হতে 5°C এ উন্নীত হতে এনট্রপির পরিবর্তন $ds_2$ হলে,

$$dS_2 = \int_{T_1}^{T_2} \frac{dQ}{T} = \int_{T_1}^{T_2} ms \frac{dT}{T} = ms\ln\frac{T_2}{T_1}$$

$$\therefore dS_2 = 0.07 \times 4200 \times \ln\frac{278}{273} = 5.336 \text{ JK}-1$$

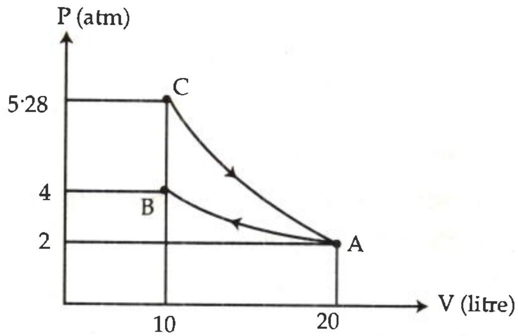
এখানে,

$T_2 = 5 + 273 = 278$ K

$s = 4200 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$

দেখা যাচ্ছে, $dS_1 > dS_2$। সুতরাং বরফ গলনের ক্ষেত্রে এনট্রপির পরিবর্তন বেশি হওয়ায় পরিবেশের ওপর এর অধিক প্রভাব পড়বে।

৮।




**চিত্রে P – V লেখচিত্র দ্বারা একটি চক্রীয় প্রক্রিয়া দেখানো হয়েছে।**

**এখানে, A বিন্দুতে তাপমাত্রা = 300K**

**স্থির আয়তনে মোলার আপেক্ষিক তাপ = $20.78 \text{ Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$**

**মোল সংখ্যা = 1.6, $\gamma = 1.4$ এবং $1 \text{ atm} = 10^5 \text{ Nm}^{-1}$**

**(ক) AB পথে কৃত কাজের মান নির্ণয় কর।**

**(খ) উদ্দীপকের চক্রীয় প্রক্রিয়ায় এনট্রপির পরিবর্তন শূন্য হবে কি না—গাণিতিক বিশ্লেষণের সাহায্যে মতামত দাও।** [দি. বো. ২০২২]

(ক) উদ্দীপকের চিত্রে প্রকাশিত P—V লেখচিত্রে A হতে B বিন্দুতে গ্যাসটি সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় সংকুচিত হয়। এক্ষেত্রে A বিন্দুতে গ্যাসটির চাপ ও আয়তন যথাক্রমে 2 atm ও 20 litre এবং B বিন্দুতে গ্যাসটির চাপ ও আয়তন যথাক্রমে 4 atm ও 10 litre।

সমোষ্ণ প্রক্রিয়ার ক্ষেত্রে,

$$W = nRT_1 \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

$$= 1·6 \times 8·31 \times 300 \times \ln\left(\frac{10}{20}\right)$$

$$= — 2764·82 \text{ J}$$

(খ) চিত্রে প্রদর্শিত লেখচিত্রে $A \rightarrow B$ সমোষ্ণ সংকোচন প্রক্রিয়া, $B \rightarrow C$ সমআয়তন প্রক্রিয়া এবং $C \rightarrow A$ রূদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়া।

$A \rightarrow B$-এর ক্ষেত্রে,

$dU = 0 \quad \therefore\ dQ = dW$ (তাপগতির প্রথম সূত্র অনুসারে)

ক অনুযায়ী AB পথে কৃত কাজ $dW = — 2764·42$ J

এখন AB পথে এনট্রপির পরিবর্তন,

$$dS_1 = \frac{dQ}{T} = \frac{—2764·82}{300} = — 9·216 \text{ JK}^{-1}$$

$B \rightarrow C$ সমআয়তন প্রক্রিয়ার ক্ষেত্রে,

$dW = 0 \quad \therefore\ dQ = dU$, C বিন্দুর তাপমাত্রা $T_2$ হলে,

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$$

বা, $\frac{4}{300} = \frac{5·28}{T_2}$

$$\therefore\ T_2 = \frac{5·28 \times 300}{4} = 396 \text{ K}$$

আবার $dU = nC_V dT$

$\therefore$ BC পথে $dQ = nC_V dT$

এখন BC পথে এনট্রপির পরিবর্তন

$$dS_2 = \frac{dQ}{T} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{nC_V dT}{T} = nC_V \ln\frac{T_2}{T_1}$$

$$\therefore\ dS_2 = nC_V \ln\frac{T_2}{T_1}$$

$$= 1·6 \times 20·78 \times \ln\frac{396}{300} = 9·23 \text{ JK}^{-1}$$

$C \rightarrow A$ রূদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ার ক্ষেত্রে আমরা জানি $dQ = 0$। তাই এক্ষেত্রে এনট্রপির পরিবর্তন $dS_3 = 0$

$\therefore$ $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$ চক্রটির মোট এনট্রপির পরিবর্তন,

$$dS = dS_1 + dS_2 + dS_3 = (— 9·216 + 9·23 + 0) \text{ JK}^{-1}$$

$$= 0·014 \text{ JK}^{-1}$$

সুতরাং চক্রটিতে এনট্রপির পরিবর্তন শূন্য হবে না।

**৯। পদার্থবিজ্ঞানের একজন গবেষক সকল দোষ-ত্রুটিমুক্ত একটি তাপ ইঞ্জিন তৈরি করলেন, যা কার্নো ইঞ্জিনের সাথে তুলনীয়। ইঞ্জিনটি 200° C তাপমাত্রায় তাপ উৎস থেকে 600 J তাপ গ্রহণ করে এবং তাপগ্রাহকে 400 J তাপ বর্জন করে। তিনি বললেন, "উৎসের তাপমাত্রা পরিবর্তন না করেও যন্ত্রের দক্ষতা 70% করা সম্ভব।"**

**(ক) তাপগ্রাহকের তাপমাত্রা নির্ণয় কর।**

**(খ) গবেষকের উক্তিটি যথার্থ কি না—গাণিতিক বিশ্লেষণ করে দেখাও।**

[য. বো. ২০২২ (মান ভিন্ন); দি. বো. ২০২১ (মান ভিন্ন); কু. বো. ২০১৭]

(ক) ধরি, তাপগ্রাহকের তাপমাত্রা = $T_2$

উদ্দীপক হতে তাপ উৎসের তাপমাত্রা, $T_1 = 200° \text{ C} = (200 + 273) \text{ K} = 473 \text{ K}$

তাপ উৎস থেকে গৃহীত তাপ, $Q_1 = 600$ J

তাপগ্রাহকে বর্জিত তাপ, $Q_2 = 400$ J

আমরা জানি,

$$\frac{Q_1}{T_1}=\frac{Q_2}{T_2}$$

বা, $T_2 = \frac{T_1Q_2}{Q_1} = \frac{473 \times 400}{600} = 315\cdot3 \text{ K}$

সুতরাং, তাপগ্রাহকের তাপমাত্রা $315\cdot3$ K

এই তাপ ইঞ্জিনের দক্ষতা,

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \times 100\%$$

$$= \frac{473 - 315\cdot3}{473} \times 100\% = 33\cdot34\%$$

(খ) উদ্দীপক অনুযায়ী,

যন্ত্রের দক্ষতা, $\eta = 70\%$, তাপ উৎসের তাপমাত্রা, $T_1 = 200° \text{ C} = (200 + 273) \text{ K} = 473 \text{ K}$

তাপগ্রাহকের তাপমাত্রা, $T_2 = 315\cdot3$ K

এখন তাপ ইঞ্জিনের দক্ষতা 70% করতে হলে $T_1$ এর মান কমাতে হবে অথবা $(T_1 - T_2)$ এর মান বৃদ্ধি করতে হবে। এখন যেহেতু $T_1$ স্থির থাকবে, অতএব $(T_1 - T_2)$ এর মান বাড়াতে হবে, অর্থাৎ $T_2$ এর মান হ্রাস করতে হবে।

ধরি, তাপগ্রাহকের পরিবর্তিত তাপমাত্রা $= T_2'$

আমরা জানি,

$$\eta = \left(1 - \frac{T_2'}{T_1}\right) \times 100\%$$

বা, $70\% = \left(1 - \frac{T_2'}{473}\right) \times 100\%$

বা, $\frac{70}{100} = 1 - \frac{T_2'}{473}$

বা, $\frac{T_2'}{473} = 1 - \frac{70}{100}$

বা, $\frac{T_2'}{473} = \frac{3}{10}$

বা, $T_2' = \frac{3 \times 473}{10} = 141\cdot9 \text{ K}$

সুতরাং তাপ উৎসের তাপমাত্রা স্থির রেখে তাপগ্রাহকের তাপমাত্রা $(315\cdot33 - 141\cdot9) \text{ K} = 173\cdot43 \text{ K}$ হ্রাস করলে ইঞ্জিনের দক্ষতা 70% পাওয়া সম্ভব। অর্থাৎ গবেষকের উক্তিটি যথার্থ।

**১০। একটি কার্নো ইঞ্জিনের তাপ উৎস ও তাপগ্রাহকের তাপমাত্রা যথাক্রমে 1200°C ও 600°C। এতে চারটি ধাপে সম্পাদিত কাজের পরিমাণ যথাক্রমে 1100 J, 1150 J, 600 J ও 300 J।**

**(ক) উদ্দীপকে কার্নো ইঞ্জিন কর্তৃক কৃত কাজের পরিমাণ নির্ণয় কর।**

**(খ) ইঞ্জিনটির দক্ষতা বৃদ্ধি কল্পে তুমি এর উৎসের তাপমাত্রা বাড়াবে না-কি এর গ্রাহকের তাপমাত্রা সমপরিমাণ কমাবে ? তুলনামূলক বিশ্লেষণসহ মতামত দাও।** [কু. বো. ২০২১ (মান ভিন্ন); দি. বো. ২০১৯ (মান ভিন্ন); চ. বো. ২০১৫]

(ক) মনে করি, কার্নো ইঞ্জিন কর্তৃক কৃত কাজ, W

আমরা জানি,

$$W = W_1 + W_2 - W_3 - W_4$$

$$= (1100 + 1150 - 600 - 300) \text{ J}$$

$$= 1350 \text{ J}$$

এখানে,

সমোষ্ণ প্রসারণে সম্পাদিত কাজ, $W_1 = 1100$ J

রুদ্ধতাপ প্রসারণে সম্পাদিত কাজ, $W_2 = 1150$ J

সমোষ্ণ সংকোচনে সম্পাদিত কাজ, $W_3 = 600$ J

রুদ্ধতাপ সংকোচনে সম্পাদিত কাজ, $W_4 = 300$ J

(খ) আবার, আমরা জানি,

ইঞ্জিনের দক্ষতা, $\eta = \left(\frac{T_1 - T_2}{T_1}\right) \times 100\%$

$\therefore \quad \eta = \left(\frac{1473 - 873}{1473}\right) \times 100\%$

$= 40{\cdot}73\%$

এখানে,
উৎসের তাপমাত্রা, $T_1 = 1200°C = 1200 + 273 = 1473\ K$
তাপগ্রাহকের তাপমাত্রা, $T_2 = 600°C = 600 + 273 = 873\ K$

ধরা যাক ইঞ্জিনের দক্ষতা বৃদ্ধির জন্য উৎসের তাপমাত্রা $x$ পরিমাণ বৃদ্ধি করা হলো।

$$\therefore \text{ দক্ষতা, } \eta_1 = \left(1 - \frac{T_2}{T_1 + x}\right) \times 100\%$$
$$= \left(1 - \frac{873}{1473 + x}\right) \times 100\%$$
$$= \left(\frac{1473 + x - 873}{1473 + x}\right) \times 100\%$$
$$= \left(\frac{600 + x}{1473 + x}\right) \times 100\% \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad \text{(i)}$$

আবার, ইঞ্জিনের দক্ষতা বৃদ্ধির জন্য তাপগ্রাহকের তাপমাত্রা $x$ পরিমাণ কমানো হলো।

$$\text{অতএব, দক্ষতা, } \eta_2 = \left(1 - \frac{T_2 - x}{T_1}\right) \times 100\%$$
$$= \left(\frac{T_1 - T_2 + x}{T_1}\right) \times 100\%$$
$$= \left(\frac{1473 - 873 + x}{1473}\right) \times 100\%$$
$$= \left(\frac{600 + x}{1473}\right) \times 100\% \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad \text{(ii)}$$

$\therefore$ সমীকরণ (ii) কে (i) দ্বারা ভাগ করে পাই,

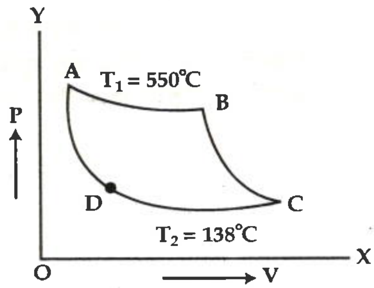
$$\frac{\eta_2}{\eta_1} = \frac{1473 + x}{1473} = 1 + \frac{x}{1473}$$

বা, $\eta_2 = \eta_1 \left(1 + \frac{x}{1473}\right)$

অর্থাৎ $\eta_2 > \eta_1$। সুতরাং, দেখা যাচ্ছে যে তাপগ্রাহকের তাপমাত্রা হ্রাসের ফলে দক্ষতা তাপ উৎসের সম পরিমাণ তাপমাত্রা বৃদ্ধির চেয়ে বেশি হয়।

অতএব, দক্ষতা বাড়ানোর জন্য তাপগ্রাহকের তাপমাত্রা কমানোই শ্রেয়।

**১১। একটি প্রত্যাবর্তী তাপ ইঞ্জিনের তাপ উৎস এবং তাপগ্রাহকের তাপমাত্রা যথাক্রমে 550°C এবং 138°C। সমোষ্ণ প্রসারণে গৃহীত তাপের পরিমাণ 750 J।**




**(ক) উদ্দীপকের তাপ ইঞ্জিনের তৃতীয় ধাপে এনট্রপির পরিবর্তন নির্ণয় কর।**

**(খ) উদ্দীপকের তাপ ইঞ্জিনটির দক্ষতা দ্বিগুণ বৃদ্ধি করতে কী ব্যবস্থা গ্রহণ করা যেতে পারে ? গাণিতিকভাবে বিশ্লেষণ কর।**

[চ. বো. ২০২১ (মান ভিন্ন); য. বো. ২০১৭]

(ক) আমরা জানি,

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}$$

বা, $Q_2 = \frac{T_2}{T_1} \times Q_1$

$\therefore \quad Q_2 = \frac{411}{823} \times 750$

$= 374.5 \text{ J}$

আবার, আমরা জানি, তৃতীয় ধাপে এনট্রপির পরিবর্তন,

$$dS = \frac{Q_2}{T_2} = \frac{374.5}{411} = 0.91 \text{ JK}^{-1}$$

সুতরাং তৃতীয় ধাপে এনট্রপির পরিবর্তন $= 0.91 \text{ JK}^{-1}$

এখানে,

উৎসের তাপমাত্রা,

$T_1 = 550°C = 550 + 273 = 823 \text{ K}$

তাপগ্রাহকের তাপমাত্রা,

$T_2 = 138°C = 138 + 273$

$= 411 \text{ K}$

উৎস হতে গৃহীত তাপ, $Q_1 = 750 \text{ J}$

তাপ গ্রাহকে বর্জিত তাপ, $Q_2 = ?$

তৃতীয় ধাপে এন্ট্রপির পরিবর্তন, $dS = ?$

(খ) আমরা জানি, তাপ ইঞ্জিনের দক্ষতা,

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \times 100\%$$

$$= \frac{823 - 411}{823} \times 100\% = 50.06\%$$

এখানে,

$T_1 = 823 \text{ K}$

$T_2 = 411 \text{ K}$

উদ্দীপকের ইঞ্জিনটির দক্ষতা 50.06%। তাপ উৎসের তাপমাত্রা হ্রাস করে এবং তাপ উৎসের ও গ্রাহকের তাপমাত্রার পার্থক্য বৃদ্ধি করে তাপ ইঞ্জিনের দক্ষতা বৃদ্ধি করা সম্ভব। কিন্তু দক্ষতা দ্বিগুণ বৃদ্ধি করলে উদ্দীপকের ইঞ্জিনের দক্ষতা হবে 100.12% যা কোনোভাবেই সম্ভব নয়। কেননা কোনো কার্নো ইঞ্জিনই 100% দক্ষ হতে পারে না। অতএব, তাপ ইঞ্জিনটির দক্ষতা দ্বিগুণ বৃদ্ধি করা সম্ভব নয়।

**১২। 27°C তাপমাত্রায় একটি গ্যাস চেম্বারে 1 বায়ুমণ্ডলীয় চাপে 100 $\text{kgm}^{-3}$ ঘনত্বের $CO_2$ গ্যাস আছে। চেম্বারটিতে গ্যাসের চাপ 2 বায়ুমণ্ডলীয় করা হলে চেম্বারটি হঠাৎ ফেটে যায়। [$\gamma = 1.33$]**

**(ক) ফেটে যাওয়ার মুহূর্তে চেম্বারটির চূড়ান্ত তাপমাত্রা কত ছিল ?**

**(খ) চেম্বারটির চূড়ান্ত তাপমাত্রায় গ্যাসের ঘনত্বের কেমন পরিবর্তন হবে গাণিতিকভাবে বিশ্লেষণ কর।**

[সি. বো. ২০১৭; ব. বো. ২০১৬]

(ক) আমরা জানি,

$$T_1 P_1^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = T_2 P_2^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}$$

বা, $T_2 = T_1 \times \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}$

$\therefore \quad T_2 = 300 \times \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{1-1.33}{1.33}}$

$= 300 \times (0.5)^{\frac{-0.33}{1.33}}$

$= 356.3 \text{ K} = 83.3°C$

এখানে,

প্রাথমিক তাপমাত্রা, $T_1 = 27°C$
$= (27 + 273) \text{ K}$
$= 300 \text{ K}$

প্রাথমিক চাপ, $P_1 = 1 \text{ atm}$

চূড়ান্ত চাপ, $P_2 = 2 \text{ atm}$

$\gamma = 1.33$

চূড়ান্ত তাপমাত্রা, $T_2 = ?$

(খ) আমরা জানি,

$$\frac{\rho_1 T_1}{P_1} = \frac{\rho_2 T_2}{P_2}$$

বা, $\rho_2 = \frac{\rho_1 T_1 P_2}{P_1 T_2}$

$\therefore \quad \rho_2 = \frac{100 \times 300 \times 2}{1 \times 356.3} = 168.4 \text{ kgm}^{-3}$

এখানে,

প্রাথমিক ঘনত্ব, $\rho_1 = 100 \text{ kgm}^{-3}$

প্রাথমিক তাপমাত্রা, $T_1 = 300 \text{ K}$

চূড়ান্ত তাপমাত্রা, $T_2 = 356.3 \text{ K}$

চূড়ান্ত ঘনত্ব, $\rho_2 = ?$

ঘনত্বের পরিবর্তন, $\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1 = ?$

অতএব, $\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1 = 168.4 \text{ kgm}^{-3} - 100 \text{ kgm}^{-3} = 68.4 \text{ kgm}^{-3}$

অর্থাৎ গ্যাসের চূড়ান্ত ঘনত্ব 68.4 $\text{kgm}^{-3}$ বৃদ্ধি পাবে।

**১৩। একটি তাপ ইঞ্জিনের কার্যকর পদার্থ 600 K তাপমাত্রার উৎস থেকে 1200 J তাপ গ্রহণ করে এবং 300 K তাপমাত্রার গ্রাহকে 600 J তাপ বর্জন করে।**

**(ক) তাপ ইঞ্জিনের দক্ষতা নির্ণয় কর।**

**(খ) তাপ ইঞ্জিনটি প্রত্যাগামী না অপ্রত্যাগামী—গাণিতিক যুক্তিসহ সিদ্ধান্ত দাও।**

[চ. বো. ২০২১ (মান ভিন্ন); দি. বো. ২০১৭; কু. বো. ২০১৬ (মান ভিন্ন)]

(ক) আমরা জানি, তাপ ইঞ্জিনের দক্ষতা,

$$\eta = \left(1 - \frac{Q_2}{Q_1}\right) \times 100\%$$

$$\therefore \quad \eta = \left(1 - \frac{600}{1200}\right) \times 100\%$$

$$= 0{\cdot}5 \times 100\% = 50\%$$

এখানে,

$Q_1 = 1200$ J

$Q_2 = 600$ J

$\eta = ?$

সুতরাং তাপ ইঞ্জিনের দক্ষতা 50%

(খ) আমরা জানি, প্রত্যাগামী ইঞ্জিনের দক্ষতা,

$$\eta_1 = \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \times 100\%$$

$$\therefore \quad \eta_1 = \left(1 - \frac{300}{600}\right) \times 100\%$$

$$= 0{\cdot}5 \times 100\% = 50\%$$

এখানে,

$T_1 = 600$ K

$T_2 = 300$ K

$\eta_1 = ?$

এখন, যেহেতু তাপ ইঞ্জিনটির দক্ষতা একটি প্রত্যাগামী ইঞ্জিনের দক্ষতার সমান সুতরাং ইঞ্জিনটি প্রত্যাগামী।

**১৪। A ও B দুটি ইঞ্জিন। A ইঞ্জিনটি — 60°C তাপমাত্রায় নিম্ন আধার থেকে 2400J তাপ গ্রহণ করে এবং উচ্চ তাপাধারে 3600J তাপ বর্জন করে। অপরদিকে B ইঞ্জিন ১ম ধাপে 0°C তাপমাত্রায় 5 kg বরফকে 0°C তাপমাত্রার পানিতে পরিণত করে এবং ২য় ধাপে 0°C তাপমাত্রার 5 kg পানিকে 100°C তাপমাত্রার পানিতে পরিণত করে। বরফ গলনের আপেক্ষিক সুপ্ততাপ 336000Jkg$^{-1}$ এবং পানির আপেক্ষিক তাপ 4200 Jkg$^{1}$K$^{-1}$।**

**(ক) A ইঞ্জিনের উচ্চ তাপাধারের তাপমাত্রা নির্ণয় কর।**

**(খ) উদ্দীপকের B ইঞ্জিনের ১ম ও ২য় ধাপে এনট্রপির পরিবর্তন সমান হবে কী? গাণিতিক মতামত উপস্থাপন কর।** [ম. বোর্ড ২০২১]

(ক) আমরা জানি, কার্যকৃত সহগ,

$$K = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{2400}{3600 - 2400}$$

$$= \frac{2400}{1200} = 2$$

এখানে,

A ইঞ্জিনে নিম্ন আধারের তাপমাত্রা,

$T_2 = -60°\,C = 273 - 60° = 213K$

$Q_2 = 2400J$

$Q_1 = 3600J$

আবার, $K = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$

বা, $2 = \frac{213}{T_1 - 213}$

বা, $2T_1 - 426 = 213$

বা, $2T_1 = 213 + 426$

$\therefore \quad T_1 = \frac{639}{2} = 319{\cdot}5K = 319{\cdot}5 - 273 = 46{\cdot}5°C$

(খ) ১ম ধাপে এনট্রপির পরিবর্তন, $dS = \frac{dQ}{T_1}$ এবং $dQ = mL = 5 \times 336000 = 1{\cdot}680 \times 10^6$

$$\therefore \quad dS = \frac{1{\cdot}680 \times 10^6}{273} = 6{\cdot}154 \times 10^3\ JK^{-1}$$

B ইঞ্জিনের ২য় ধাপে এনট্রপির পরিবর্তন,

$$dS = \int_{T_1}^{T_2} \frac{dQ}{T} = \int_{T_1}^{T_2} ms\frac{dT}{T} \quad [\because dQ = msdT]$$

$$= ms \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)$$

$$= 5 \times 4200 \ln\left(\frac{373}{273}\right)$$

$$= 6.554 \times 10^3 \text{ JK}^{-1}$$

এখানে,
$m = 5 \text{ kg}$
$s = 4200 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$
$L = 336000 \text{ Jkg}^{-1}$
$T_1 = 0°C = 273 \text{ K}$
$T_2 = 100°C = 273 + 100 = 373 \text{ K}$

১ম ও ২য় ধাপের এনট্রপির পরিবর্তন সমান হবে না।

**১৫। একটি মোটর গাড়ি তৈরির কোম্পানি তাদের গাড়ির জন্য 40% দক্ষতাসম্পন্ন একটি ইঞ্জিন তৈরি করল। ইঞ্জিনটি 600K তাপমাত্রার উৎস থেকে তাপ গ্রহণ করে।**

**(ক) উদ্দীপকের ইঞ্জিনটির তাপগ্রাহকের তাপমাত্রা কত?**

**(খ) কোম্পানিটি তাদের ইঞ্জিনের দক্ষতা 10% বাড়ানোর ক্ষেত্রে উৎসের তাপমাত্রা বৃদ্ধি অথবা গ্রাহকের তাপমাত্রা হ্রাস কোনটি সুবিধাজনক? গাণিতিকভাবে বিশ্লেষণ কর।** [সি. বো. ২০২১]

(ক) আমরা জানি, ইঞ্জিনের দক্ষতা,

$$\eta = \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \times 100\%$$

এখানে,
$T_1 = 600K$
$\eta = 40\% = \frac{40}{100}$

প্রশ্নানুসারে,

$$\frac{40}{100} = 1 - \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

বা, $40T_1 = 100T_1 - 100T_2$

বা, $60T_1 = 100T_2$

বা, $60 \times 600 = 100 \times T_2$

বা, $T_2 = \frac{60 \times 600}{100} = 360K$

(খ) দক্ষতা 10% বৃদ্ধি করলে ইঞ্জিনের দক্ষতা হবে 50%।

দক্ষতা 50% হলে আমরা পাই,

$$\frac{50}{100} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

$T_1$ স্থির রেখে $T_2$ পরিবর্তন করলে আমরা পাই,

$$\frac{50}{100} = \frac{600 - T_2}{600}$$

বা, $100T_2 = 600 \times 100 - 600 \times 50 = 100(600 - 300)$

বা, $T_2 = 600 - 300 = 300K = 300 - 273 = 27°C$

আবার, $T_2$ স্থির রেখে $T_1$ পরিবর্তন করলে পাই,

$$\frac{50}{100} = \frac{T_1 - 360}{T_1}$$

বা, $50T_1 = 100T_1 - 360 \times 100$

বা, $50T_1 = 360 \times 100$

$\therefore T_1 = \frac{360 \times 100}{50} = 720K = 720 - 273 = 447°C$

উৎসের তাপমাত্রা (720 − 600) = 120K বৃদ্ধি করতে হবে অথবা তাপগ্রাহকের তাপমাত্রা, (360K − 300K) = 60K হ্রাস করতে হবে। এক্ষেত্রে তাপগ্রাহকের তাপমাত্রা কম পরিবর্তন করতে হবে বিধায় এটিই সুবিধাজনক। অর্থাৎ তাপগ্রাহকের তাপমাত্রা কমাতে হবে।

**১৬। A প্রক্রিয়ায় 2 kg পানিকে 0°C তাপমাত্রা থেকে বাষ্পে পরিণত করা হলো। অন্যদিকে B প্রক্রিয়ায় 10°C তাপমাত্রার 5 kg পানিকে 100°C তাপমাত্রার পানিতে পরিণত করা হলো।**

**(পানির আপেক্ষিক তাপ 4200 $Jkg^{-1}K^{-1}$ এবং পানির বাষ্পীভবনের আপেক্ষিক সুপ্ততাপ $2.26 \times 10^6$ $Jkg^{-1}K^{-1}$)**

**(ক) উদ্দীপকে A প্রক্রিয়ায় মোট প্রয়োজনীয় তাপ নির্ণয় কর।**

**(খ) উদ্দীপকে কোন প্রক্রিয়ায় বিশৃঙ্খলার মাত্রা বেশি? গাণিতিকভাবে বিশ্লেষণ কর।** [য. বো. ২০১৯]

(ক) A প্রক্রিয়া দুইভাবে তাপ গ্রহণ করে। প্রথমত 0°C তাপমাত্রা থেকে 100°C তাপমাত্রায় উন্নীত করার জন্য তাপ গ্রহণ এবং 100°C তাপমাত্রার পানি 100°C তাপমাত্রার বাষ্পে পরিণত হওয়ার জন্য তাপ গ্রহণ।

0°C তাপমাত্রা থেকে 100°C তাপমাত্রার পানিতে পরিণত হওয়ার জন্য তাপ, $H_1 = ms\,\Delta T$

$$\therefore \quad H_1 = 2 \times 4.2 \times 10^3 \times 100$$
$$= 8.4 \times 10^5\ J$$

এখানে,
$s = 4200\ Jkg^{-1}K^{-1} = 4.2 \times 10^3\ Jkg^{-1}K^{-1}$
$\Delta T = 100 - 0 = 100°C = 100\ K$
$m = 2\ kg$

আবার, 100°C তাপমাত্রার পানিকে 100°C তাপমাত্রার বাষ্পে পরিণত করতে তাপ গ্রহণ,

$$H_2 = mL$$
$$= 2 \times 2.26 \times 10^6$$
$$= 4.52 \times 10^6 = 45.2 \times 10^5\ J$$

এখানে,
$L = 2.26 \times 10^6\ Jkg^{-1}K^{-1}$

সুতরাং মোট প্রয়োজনীয় তাপ, $H = H_1 + H_2 = 8.4 \times 10^5 + 45.2 \times 10^5 = 53.6 \times 10^5\ J$

(খ) A ও B প্রক্রিয়ার মধ্যে যেটির এনট্রপি বেশি, সেটির বিশৃঙ্খলার মাত্রা বেশি হবে।

এখন, A প্রক্রিয়ায় এনট্রপি দুইভাবে বৃদ্ধি পায়। প্রথমত 0°C থেকে 100°C পানির জন্য এবং দ্বিতীয়ত 100°C পানিকে বাষ্পে পরিণত করার জন্য। 0°C থেকে 100°C পানিতে পরিণত করতে এনট্রপির পরিবর্তন,

$$dS_1 = \int_{T_1}^{T_2} \frac{dQ}{T} \quad \text{আবার, } dQ = msdT$$

$$\therefore \quad dS_1 = \int_{T_1}^{T_2} \frac{msdT}{T} = ms\int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} = ms\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)$$

$$= 2 \times 4.2 \times 10^3 \times \ln\frac{373}{273} = 8.4 \times 0.312 \times 10^3$$

$$= 2.62 \times 10^3\ Jkg^{-1}$$

এবং 100°C পানিকে বাষ্পে পরিণত করতে এনট্রপির পরিবর্তন,

$$dS_2 = \frac{dQ}{T} = \frac{mL}{T} = \frac{2 \times 2.26 \times 10^6}{373} = 12 \times 10^3\ Jkg^{-1}$$

সুতরাং, A প্রক্রিয়ায় মোট এনট্রপি পরিবর্তন, $dS_A = dS_1 + dS_2 = 2.62 \times 10^3 + 12 \times 10^3 = 14.62 \times 10^3\ Jkg^{-1}$

এখন, 5 kg পানিকে 10°C তাপমাত্রা থেকে 100°C তাপমাত্রার পানিতে পরিণত করতে এনট্রপির পরিবর্তন,

$$dS_B = \int_{T_1}^{T_2} \frac{dQ}{T} = \int_{T_1}^{T_2} ms\frac{dT}{T}$$

$$= ms\int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T}$$

$$\therefore \quad dS_B = 5 \times 4.2 \times 10^3 \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)$$

$$= 5 \times 4.2 \times 10^3 \times \ln\left(\frac{373}{283}\right)$$

$$= 5 \times 4.2 \times 10^3 \times 0.276$$

$$= 5.8 \times 10^3\ Jkg^{-1}$$

এখানে,
$T_1 = 10 + 273 = 283\ K$
$T_2 = 100 + 273 = 373\ K$
$m = 5\ kg$
$S = 4.2 \times 10^3\ Jkg^{-1}K^{-1}$

যেহেতু, $dS_A > dS_B$। সুতরাং A প্রক্রিয়ায় বিশৃঙ্খলায় মাত্রা বেশি হবে।

**১৭। দ্বাদশ শ্রেণির বিজ্ঞান বিভাগের দুজন শিক্ষার্থী, সুজন ও শৈলী, একটি আদর্শ গ্যাসকে 27°C তাপমাত্রা ও 300 cm পারদ চাপে যথাক্রমে সমোষ্ণ ও রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায় গ্যাসের আয়তন অর্ধেক করলো। গ্যাসটি দ্বিপরমাণুক।**

**(ক) শৈলী কর্তৃক সংঘটিত তাপগতীয় পরিবর্তনে গ্যাসটির তাপমাত্রা কত হবে ?**

**(খ) উদ্দীপকের আলোকে সুজন ও শৈলীর মধ্যে কে বেশি কাজ সম্পাদন করবে ? গাণিতিক বিশ্লেষণের মাধ্যমে ব্যাখ্যা কর।**

[ব. বো. ২০২১ (মান ভিন্ন); রা. বো. ২০১৯]

(ক) শৈলী রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায় গ্যাসটি সঙ্কুচিত করেছে। রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায় আমরা জানি,

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1}$$

বা, $$T_2 = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1} \times T_1 = \left(\frac{V}{\frac{V}{2}}\right)^{1.4-1} \times 300$$

$$= (2)^{0.4} \times 300 = 395.8 \text{ K}$$

$$= 395.8 - 273 = 122.8°C$$

এখানে,

$T_1 = 27°C = 273 + 27 = 300$ K

$P = 300 \text{ cm Hg} = \frac{1.013 \times 10^5 \times 300}{76}$

$= 4 \times 10^5 \text{ Nm}^{-2}$

$R = 8.31 \text{ Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$

$V_1 = V$

$V_2 = \frac{V}{2}$

$\gamma = 1.4$

$T_2 = ?$

(খ) আমরা জানি,

$$PV = RT$$

বা, $$V = \frac{RT}{P} = \frac{8.31 \times 300}{4 \times 10^5}$$

$$= 6.23 \times 10^{-3} \text{m}^3$$

এখন, সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় কৃত কাজ, $W = PdV = P(V_2 - V_1)$

$$\therefore \quad W = 4 \times 10^5 \left(\frac{V}{2} - V\right) = -4 \times 10^5 \times \frac{V}{2}$$

$$= \frac{-4 \times 10^5 \times 6.23 \times 10^{-3}}{2} = -1246 \text{ J}$$

আবার, রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায় কৃত কাজ,

$$W = \frac{R}{\gamma - 1}(T_1 - T_2)$$

$$= \frac{8.31}{(1.4 - 1)} \times (300 - 395.8)$$

$$= -\frac{8.31}{0.4} \times 95.8 = -1990 \text{ J}$$

সুতরাং, শৈলী বেশি কাজ সম্পাদন করবে।

**১৮। একটি প্রত্যাগামী ইঞ্জিন গৃহীত তাপের $\frac{1}{6}$ অংশ কাজে পরিণত করে। এর তাপ গ্রাহকের তাপমাত্রা 54 K কমালে দক্ষতা দ্বিগুণ হয়। উৎসে ব্যবহৃত পদার্থের ভর $m$ একক ও আপেক্ষিক তাপ $s$ একক।**

**(ক) এর তাপ উৎসের তাপমাত্রা নির্ণয় কর।**

**(খ) ইঞ্জিনের দক্ষতা দ্বিগুণ করা হলে উৎসে ব্যবহৃত পদার্থের এনট্রপি বাড়বে না কমবে—গাণিতিকভাবে ব্যাখ্যা দাও।**

[ঢা. বো. ২০১৮; রা. বো. ২০১৮; য. বো. ২০১৮; চ. বো. ২০১৮; ব. বো. ২০১৮]

(ক) ধরা যাক, তাপ উৎস ও তাপ গ্রাহকের তাপমাত্রা যথাক্রমে $T_1$ ও $T_2$ এবং উৎস হতে গৃহীত তাপ $Q_1$ এবং গ্রাহকে বর্জিত তাপ $Q_2$।

উদ্দীপক অনুসারে, $W = \frac{1}{6}Q_1$

সুতরাং, $Q_1 - Q_2 = \frac{1}{6}Q_1$

বা, $Q_2 = Q_1 - \frac{1}{6}Q_1 = \frac{5}{6}Q_1$

বা, $\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{5}{6}$ ... ... (i)

যেহেতু ইঞ্জিনটি প্রত্যাগামী, সুতরাং আমরা পাই,

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

অর্থাৎ $\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1} = \frac{5}{6}$ ... ... (ii)

এখন উদ্দীপক অনুসারে,

$$1 - \frac{T_2 - 54}{T_1} = 2\left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right)$$

বা, $1 - \frac{T_2}{T_1} + \frac{54}{T_1} = 2 - \frac{2T_2}{T_1}$

সমীকরণ (ii) ব্যবহার করে পাই,

$$1 - \frac{5}{6} + \frac{54}{T_1} = 2 - \frac{2\times 5}{6} = 2 - \frac{10}{6}$$

বা, $\frac{54}{T_1} = 2 - \frac{10}{6} - 1 + \frac{5}{6} = \frac{12 - 10 - 6 + 5}{6} = \frac{1}{6}$

বা, $T_1 = 6 \times 54 = 324$ K

আবার, $\frac{T_2}{T_1} = \frac{5}{6}$ বা, $\frac{T_2}{324} = \frac{5}{6}$

বা, $T_2 = \frac{5 \times 324}{6} = 270$ K

(খ) প্রশ্নানুসারে, দক্ষতা দ্বিগুণ করা হলে তাপ গ্রাহকের তাপমাত্রা হয়,

$$T_2' = T_2 - 54 = 270 - 54 = 216 \text{ K}$$

আমরা জানি, এনট্রপির পরিবর্তন, $dS = \frac{dQ}{T}$ বা, $\int dS = \int \frac{dQ}{T}$

বা, $S = \int \frac{msdT}{T} = ms \int_{216}^{324} \frac{1}{T} dT$ $[\because dQ = msdT]$

$\therefore$ $S = ms \ln\frac{324}{216} = 0{\cdot}405$ ms

এখানে যেহেতু $m$, $s$ ধনাত্মক, সুতরাং S ধনাত্মক হবে, অর্থাৎ এনট্রপি বাড়বে।

**১৯।**

| ইঞ্জিন | তাপ উৎসের তাপমাত্রা | তাপ গ্রাহকের তাপমাত্রা | কার্যকর বস্তুর ভর | জ্বালানির আপেক্ষিক তাপ |
|---|---|---|---|---|
| A | 327°C | − 13°C | 0·8 kg | 1980 $Jkg^{-1}K^{-1}$ |
| B | 627°C | 127°C | 1·2 kg | 1230 $Jkg^{-1}K^{-1}$ |

(ক) B ইঞ্জিনের দক্ষতা নির্ণয় কর।

(খ) উদ্দীপকের আলোকে কোন ইঞ্জিনটি বেশি পরিবেশ বান্ধব হবে—গাণিতিকভাবে বিশ্লেষণ করে মতামত দাও। [য. বো. ২০২১]

(ক) আমরা জানি,

$$\eta = \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \times 100\%$$
$$= \left(1 - \frac{400}{900}\right) \times 100\%$$
$$= \left(\frac{900 - 400}{900}\right) \times 100\%$$
$$= \frac{5}{9} \times 100\% = 55{\cdot}56\%$$

এখানে,

$T_1 = 627°C = 627 + 273 = 900$ K

$T_2 = 127°C = 127 + 273 = 400$ K

(খ) A ইঞ্জিন কর্তৃক উৎপন্ন তাপ,

$$Q_A = m_A s_A \Delta t_1$$
$$= m_A s_A(T_1 - T_2) = 0.8 \times 1980 \times (600 - 260)$$
$$= 0.8 \times 1980 \times 340 = 538560 \text{ J}$$

B ইঞ্জিন কর্তৃক উৎপন্ন তাপ,

$$Q_B = m_B s_B \Delta t_2 = 1.2 \times 1230\ (900 - 400)$$
$$= 1.2 \times 1230 \times 500 = 738000 \text{ J}$$

এখানে,

$T_1 = 327 + 273 = 600$ K

$T_2 = -13°C = 273 - 13 = 260$ K

$m_A = 0.8$ kg

$m_B = 1.2$ kg

$s_A = 1980$ Jkg$^{-1}$K$^{-1}$

$s_B = 1230$ Jkg$^{-1}$K$^{-1}$

যেহেতু ১ম ইঞ্জিন অপেক্ষা দ্বতীয় ইঞ্জিন বেশি পরিমাণ তাপ পরিবেশে উৎপন্ন করবে ফলে এটি কম পরিবেশ বান্ধব হবে। অর্থাৎ দ্বিতীয় ইঞ্জিন বেশি পরিবেশ বান্ধব।

**২০। STP-তে 64 gm হিলিয়াম গ্যাসকে সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় এবং রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায় আলাদা আলাদাভ্যাবে প্রতি ধাপে আয়তন তিনগুণ প্রসারিত করা হলো। ফলে চাপ ও আয়তনের পরিবর্তন হয় এবং কাজ সম্পন্ন হয়।**

**[$R = 8.31$ JK$^{-1}$ mol$^{-1}$, $\gamma = 1.40$]**

**(ক) রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায় আয়তন পরিবর্তনে চূড়ান্ত চাপ নির্ণয় কর।**

**(খ) উভয় ক্ষেত্রে কৃত কাজ অভিন্ন হবে কী? গাণিতিক বিশ্লেষণ দাও।** [ব. বো. ২০২১]

(ক) আমরা জানি, রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায়,

$$P_1V_1^{\gamma} = P_2V_2^{\gamma}$$

$\therefore\ 1.013 \times 10^5 \times V_1^{1.4} = P_2 \times 3V_1^{1.4}$

বা, $P_2 = \dfrac{1.013}{3} \times 10^5 = 3.376 \times 10^4$ Nm$^{-2}$

এখানে,

$P_1 = 1.013 \times 10^5$ Nm$^{-2}$

$V_2 = 3V_1$

$P_2 = ?$

$\gamma = 1.4$

$R = 8.31$ J mol$^{-1}$K$^{-1}$

(খ) আবার, সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় কৃত কাজ,

$$W = nRT ln \frac{V_2}{V_1}$$

$\therefore\ W_1 = 16 \times 8.31 \times 273\ ln \dfrac{3V_1}{V_1}$

$= 16 \times 8.31 \times 273\ ln\ 3$

$= 39{,}877.5$ J

এখানে,

$m = 64$ gm

$M = 4$ gm

$n = \dfrac{m}{M} = \dfrac{64}{4} = 16$

T = 273K

এবং রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায় কৃত কাজ,

$$W_2 = \frac{nR}{1-\gamma}\ (T_2 - T_1)$$

আবার,

$$T_1P_1^{1-\gamma/\gamma} = T_2P_2^{1-\gamma/\gamma}$$

বা, $\dfrac{T_2}{T_1} = \left(\dfrac{P_1}{P_2}\right)^{1-\gamma/\gamma} = \left(\dfrac{1.013 \times 10^5}{0.3376 \times 10^5}\right)^{\frac{1-1.4}{1.4}}$

$= \left(\dfrac{1.013}{0.3376}\right)^{\frac{-0.4}{1.4}} = 0.73$

এখানে,

$T_1 = 273$K

$P_1 = 1.013 \times 10^5$ Nm$^{-2}$

$P_2 = 3.376 \times 10^4$ Nm$^{-2}$

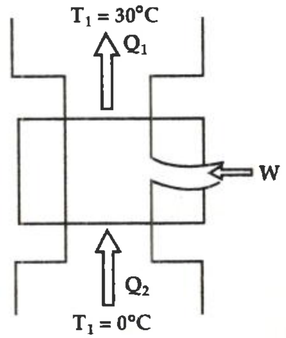
$\therefore\ T_2 = 0.73 \times 273 = 199.46$

$\therefore\ W_2 = \dfrac{16 \times 8.31}{(1 - 1.4)}\ (199.46 - 273)$

$= \dfrac{16 \times 8.31 \times 73.54}{0.4} = 24{,}444.7$ J

এখানে, $W_1 > W_2$ অর্থাৎ সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় কৃত কাজ বেশি।

২১। $0°C$ তাপমাত্রার $1g$ পানিকে বরফে পরিণত করতে রেফ্রিজারেটরটি ন্যূনতম কাজ সম্পাদন করে $Q_2$ তাপ অপসারণ করে এবং $Q_1$ তাপ পরিবেশে বর্জন করে। পরবর্তীতে রেফ্রিজারেটরের পরিবর্তে এমন একটি তাপ ইঞ্জিন প্রতিস্থাপন করা হলো যেন এটি রেফ্রিজারেটরের ঠিক বিপরীত আচরণ করে। (পানির আপেক্ষিক তাপ $4200\ Jkg^{-1}K^{-1}$ এবং বরফ গলনের আপেক্ষিক সুপ্ততাপ $336000\ Jkg^{-1}$)।




(ক) রেফ্রিজারেটরটির কার্য সম্পাদনের সহগ নির্ণয় কর।

(খ) তাপ ইঞ্জিনটি প্রত্যাগামী হবে কি না? এনট্রপির সাহায্যে গাণিতিক বিশ্লেষণপূর্বক মন্তব্য কর।

[রা. বো. ২০২১]

(ক) আমরা জানি,

$Q_2 = mL$

$\therefore \quad Q_2 = 1 \times 10^{-3} \times 336000 = 336\ J$

এখানে,

$m = 1g = 1 \times 10^{-3}\ kg$

$L = 336000\ Jkg^{-1}$

$T_1 = 30°C = 30° + 273 = 303K$

$T_2 = 0°C = 273K$

আবার,

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}$$

$$\therefore \quad Q_1 = \frac{Q_2}{T_2} \times T_1 = \frac{336 \times 303}{273} = 372{\cdot}9J$$

সুতরাং রেফ্রিজারেটরের কার্য সম্পাদন সহগ,

$$K = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{336}{372{\cdot}9 - 336} = \frac{336}{36{\cdot}9} = 9{\cdot}1$$

(খ) বর্জিত তাপের জন্য এনট্রপি

$$dS_1 = \frac{dQ}{T} = \frac{Q_2}{T_2} = \frac{336}{273} = 1{\cdot}23$$

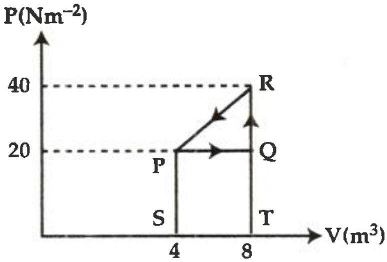
এবং গৃহীত তাপের জন্য এনট্রপি,

$$dS_2 = \frac{Q_1}{T_1} = \frac{372{\cdot}9}{303} = 1{\cdot}23$$

সুতরাং, এনট্রপির পরিবর্তন $dS_1 - dsS_2 = 0$

অতএব, এটি প্রত্যাগামী হবে।

২২। নিচের উদ্দীপকটি লক্ষ কর :




চিত্রে গ্যাসের চাপ ও তাপমাত্রার পরিবর্তন দেখানো হয়েছে। এখানে Q থেকে R-এ যেতে তাপগতীয় ব্যবস্থায় 80 J তাপশক্তি সরবরাহ করা হয়েছে।

**(ক) উদ্দীপক অনুসারে R অবস্থানে আসতে তাপগতীয় ব্যবস্থাটিতে অন্তঃস্থ শক্তির পরিবর্তন কত?**
**(খ) উদ্দীপক অনুসারে, PQRP চক্রের প্রতিটি ধাপে কাজের তুলনা কর।** [ঢা. বো. ২০২৩]

(ক) আমরা জানি,

$$dQ = dU + dW \quad \ldots \quad \ldots \quad (i)$$

P থেকে Q অবস্থানে আসতে কাজের পরিমাণ,

$$dW = PdV = 20 \times (8 - 4) = 20 \times 4 = 80 \text{ J}$$

এখানে যেহেতু বাইরে থেকে কোনো তাপ সরবরাহ করা হয় নাই, তাই

$$dQ = 0$$

সুতরাং, সমীকরণ (i) হতে পাই,

$$0 = dU + 80 \quad \text{বা, } dU_1 = -80 \text{ J}$$

Q থেকে R অবস্থান আসতে কৃত কাজ, $dW = PdV = P \times 0 = 0$

আবার, Q যেতে R-এ থেকে তাপগতীয় ব্যবস্থা 80 J তাপশক্তি সরবরাহ করা হয়েছে। সুতরাং, $dQ = 80$ J

$\therefore$ সমীকরণ (i) হতে পাই,

$$80 = dU + 0 \quad \text{বা, } dU_2 = 80 \text{ J}$$

অতএব, R অবস্থানে আসতে তাপগতীয় অন্তঃস্থ শক্তির পরিবর্তন,

$$dU_1 + dU_2 = -80 \text{ J} + 80 \text{ J} = 0 \text{ J}$$

(খ) PQ পথে কৃত কাজ, $W_{QP} = PdV = 20 \times (8 - 4) = 80\text{J}$

QR পথে কৃত কাজ $W_{RP} = PdV = P \times 0 = 0$

RP পথে কৃত কাজ, $W_{RP}$ = PR রেখার আয়তনের অক্ষের সাথে গঠিত ক্ষেত্রফল

$$= \frac{1}{2}(40 \times 20) \times (8 - 4) = \frac{1}{2} \times 60 \times 4 = 120 \text{ J}$$

এখন PQ পথে আয়তন বৃদ্ধির কারণে কৃত কাজ ধনাত্মক হবে।

QR পথে আয়তন ধ্রুব থাকায় কৃত কাজ শূন্য। RP পথে আয়তন হ্রাসের কারণে কৃত কাজ ঋণাত্মক হবে। এখন যেহেতু RP পথে কৃত কাজ PQ পথে কৃত কাজের চেয়ে বেশি সুতরাং, PQRP চক্রে কৃত কাজ ঋণাত্মক হবে।

**২৩। 56 g নাইট্রোজেন গ্যাসকে একটি ইঞ্জিনের সাহায্যে প্রথমে সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় ও পরে রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায় আয়তন তিন গুণ করা হলো। ইঞ্জিনটি 127°C এবং 27°C তাপমাত্রায় কার্যকর আছে।**
**[নাইট্রোজেনের আণবিক ভর 28 g]**
**(ক) ইঞ্জিনটির কর্মদক্ষতা নির্ণয় কর।**
**(খ) উদ্দীপকের কোন প্রক্রিয়ায় কৃত কাজ বেশি হবে?—গাণিতিক বিশ্লেষণের মাধ্যমে মতামত দাও।**
[ঢা. বো. ২০২৩]

(ক) আমরা জানি, ইঞ্জিনের দক্ষতা,

$$\eta = \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \times 100\%$$

$$= \left(1 - \frac{300}{400}\right) \times 100\%$$

$$\therefore \eta = \frac{100}{400} \times 100\% = 25\%$$

এখানে,

$T_1 = 127°C = 127 + 273 = 400$ K

$T_2 = 27°C = 27 + 273 = 300$ K

(খ)

সমোষ্ণ প্রসারণের ক্ষেত্রে কৃত কাজ,

$$W_1 = nRT \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

$$\therefore W_1 = 2 \times 8.31 \times 400 \ln\left(\frac{3}{1}\right)$$

$$= 7303.6 \text{ J}$$

এখানে,

$V_1 = V$

$V_2 = 3$ V

$T = 400$ K

$R = 8.31 \text{ JK}^{-1}\text{ mol}^{-1}$

$n = \frac{m}{M} = \frac{56}{28} = 2$

$T_1 = 400$ K

রুদ্ধতাপীয় প্রসারণের ক্ষেত্রে,

$$T_1V_1^{\gamma-1} = T_2V_2^{\gamma-1}$$

বা, $$T_2 = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1} \times T_1 = \left(\frac{V}{3V}\right)^{1.4-1} \times 400$$

$$= \left(\frac{1}{3}\right)^{0.4} \times 400 = 257.8 \text{ K}$$

এখন, কৃত কাজ,

$$W_2 = \left(\frac{nR}{1-\gamma}\right)(T_2 - T_1)$$

$$= \left(\frac{2 \times 8.31}{1 - 1.4}\right)(257.8 - 400)$$

$$= \frac{2 \times 8.31}{-0.4} \times (-142.2) = 5908.4 \text{ J}$$

এখানে, $W_1 > W_2$ ; সুতরাং সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় কৃত কাজ বেশি হবে।

**২৪। একটি তাপগতীয় ব্যবস্থায় 14 g নাইট্রোজেন গ্যাস 30°C তাপমাত্রায় ও 1 বায়ুমণ্ডলীয় চাপে রক্ষিত আছে। স্থির চাপে এতে তাপশক্তি সরবরাহ করা হলে তাপমাত্রা 35°C হয়। পরবর্তীতে উপরোক্ত প্রক্রিয়াটি সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় একটি আদি অবস্থান হতে একই আয়তনের পরিবর্তন করে কৃত কাজের পরিমাপ করা হলো।**

**($R = 8.31\ Jmol^{-1}K^{-1}$, $C_V = 20.8\ Jmol^{-1}K^{-1}$)**

**(ক) উদ্দীপকে স্থির চাপের ক্ষেত্রে অভ্যন্তরীণ শক্তির পরিবর্তন নির্ণয় কর।**

**(খ) স্থির চাপ প্রক্রিয়া এবং সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় উদ্দীপকে নির্ণেয় কৃত কাজের মান সমান হবে কি? গাণিতিকভাবে বিশ্লেষণ কর।** [রা. বো. ২০২৩]

(ক) আমরা জানি,

$$PV = nRT$$

30°C তাপমাত্রায় আয়তন $V_1$,

$$V_1 = \frac{nRT_1}{P} = \frac{0.5 \times 8.31 \times 303}{10^5} = 0.01259 \text{ m}^3$$

এবং 35°C তাপমাত্রায় আয়তন $V_2$,

$$V_2 = \frac{nRT_2}{P} = \frac{0.5 \times 8.31 \times 308}{10^5} = 0.01280 \text{ m}^3$$

এখানে,

$P = 10^5$ Pa
$T_1 = 30°C = 30 + 273 = 303$ K
$T_2 = 35°C = 35 + 273 = 308$ K
$m = 14$ g
$M = 28$ g
$\therefore n = \frac{m}{M} = \frac{14}{28} = 0.5$
$R = 8.31\ J\ mol^{-1}K^{-1}$
$C_V = 20.8\ J\ mol^{-1}K^{-1}$

$$\therefore dV = V_2 - V_1 = 0.01280 - 0.01259 = 2.1 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

স্থির চাপের ক্ষেত্রে,

$$C_P = \frac{dQ}{ndT} \quad \text{বা, } dQ = nC_PdT$$

আবার, $C_P - C_V = R$

$$C_P = R + C_V$$

$$\therefore dQ = n(C_V + R)\,dT = 0.5 \times (20.8 + 8.31) \times 5$$

$$= 0.5 \times 29.11 \times 5 = 72.8 \text{ J}$$

আবার, $dQ = dU + PdV$

$$\therefore dU = dQ - PdV = 72.8 - 10^5 \times 2.1 \times 10^{-4}$$

$$= 72.8 - 21 = 51.8 \text{ J}$$

(খ) স্থির চাপ প্রক্রিয়ায় কৃত কাজ, $dQ = 72.8$ J

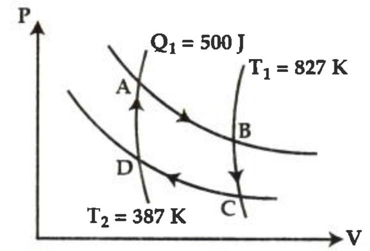
এবং সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় কৃত কাজ,

$$W = nRT \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = 0.5 \times 8.31 \times 303 \ln\left(\frac{0.01280}{0.01253}\right)$$

$$= 0.5 \times 8.31 \times 303 \times 0.165 = 20.834 \text{ J}$$

সুতরাং, স্থির চাপ প্রক্রিয়ায় এবং সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় কৃত কাজের মান সমান হবে না।

২৫।




**চিত্রে একটি কার্নো ইঞ্জিনের P—V লেখচিত্র দেখানো হলো।**

**(ক) ইঞ্জিন কর্তৃক কৃত কাজের পরিমাণ নির্ণয় কর।**

**(খ) উদ্দীপকের কার্নো ইঞ্জিনের তাপগ্রাহকের তাপমাত্রা দ্বিগুণ করলে দক্ষতা অর্ধেক হবে কি না—গাণিতিকভাবে বিশ্লেষণ কর।** [কু. বো. ২০২৩]

(ক) আমরা জানি,

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}$$

বা, $Q_2 = \frac{Q_1 T_2}{T_1} = \frac{500 \times 387}{827}$

$= 234$ J

আবার, $W = Q_1 — Q_2 = 500 — 234 = 266$J

এখানে,
$Q_1 = 500$ J
$T_1 = 827$ K
$T_2 = 387$ K

(খ) আমরা জানি দক্ষতা,

$$\eta = \left(1 — \frac{T_1}{T_2}\right) \times 100\%$$

$$\eta = \left(1 — \frac{387}{827}\right) \times 100\% = 53\%$$

আবার, $T_2' = 774$ K

$$\therefore \quad \eta' = \left(1 — \frac{774}{827}\right) \times 100\% = (1 — 0{\cdot}936) \times 100\% = 6{\cdot}4\%$$

এখানে,
$T_2' = 387 \times 2 = 774$ K

∴ তাপগ্রাহকের তাপমাত্রা দ্বিগুণ করলে দক্ষতা অর্ধেক হবে না।

**২৬। দ্বি-পারমাণবিক গ্যাস সম্বলিত একটি কার্নো ইঞ্জিন 500 K তাপমাত্রার উৎস হতে তাপ গ্রহণ করে। প্রতি প্রসারণে এর আয়তন তিন গুণ হয়।**

**(ক) উদ্দীপকের ইঞ্জিনটির প্রাথমিক দক্ষতা নির্ণয় কর।**

**(খ) ইঞ্জিনের দক্ষতা 60% করতে হলে কী ব্যবস্থা নিতে হবে? গাণিতিকভাবে বিশ্লেষণ কর।** [য. বো. ২০২৩]

(ক) আমরা জানি রুদ্ধতাপীয় প্রসারণের ক্ষেত্রে,

$$T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_1^{\gamma-1}$$

বা, $T_2 = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1} \times T_1 = \left(\frac{1}{3}\right)^{1{\cdot}4-1} \times 500$

$= 322$ K

এখানে,
$V_1 = V$
$V_2 = 3V$
$T_1 = 500$ K
$T_2 = ?$
$\gamma = 1{\cdot}40$

সুতরাং ইঞ্জিনের দক্ষতা, $\eta = \left(1 — \frac{T_1}{T_2}\right) \times 100\%$

$= \left(1 — \frac{322}{500}\right) \times 100\%$

$= 35{\cdot}6\%$

(খ) প্রশ্নানুসারে, ইঞ্জিনের দক্ষতা 60%

$\therefore \quad \frac{60}{100} = \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right)$

বা, $\quad 0.6 = \left(1 - \frac{T_1}{500}\right)$

বা, $\quad 500 \times 0.6 = (500 - T_1)$

বা, $\quad T_1 = 500 - 300 = 200\ K$

সুতরাং, তাপ উৎসের তাপমাত্রা স্থির রেখে তাপগ্রাহকের তাপমাত্রা 200K করলে দক্ষতা 60% হবে।

অথবা, $0.6 = \left(1 - \frac{322}{T_2}\right)$

বা, $\quad 0.6 \times T_2 = (T_2 - 322)$

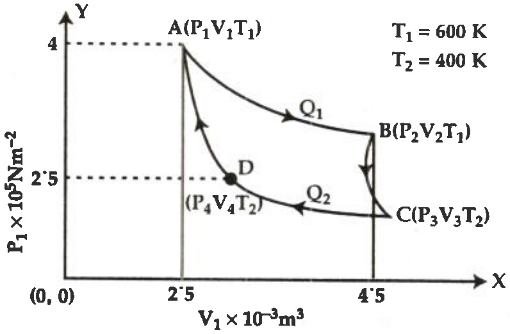
বা, $\quad T_2 - 0.6\, T_2 = 322$

বা, $\quad 0.4\, T_2 = 322$

$\therefore \quad T_2 = \frac{322}{0.4} = 805K$

তাপগ্রাহকের তাপমাত্রা স্থির রেখে তাপ উৎসের তাপমাত্রা 805K করলে দক্ষতা 60% করা সম্ভব।

**২৭। ক্লসিয়াস পিস্টনযুক্ত সিলিন্ডারে এক মোল হাইড্রোজেন গ্যাস নিয়ে P—V-এর লেখচিত্র নিম্নে প্রদর্শিত চক্রটির অনুরূপ একটি চক্র পেলেন। ক্লসিয়াসের মতে এটি একটি প্রত্যাবর্তী চক্র।**




**(ক) উদ্দীপক অনুসারে হাইড্রোজেন গ্যাসকে B হতে C-তে আনতে কৃত কাজের পরিমাণ নির্ণয় কর।**

**(খ) ক্লসিয়াসের দাবিটি যৌক্তিক কি না—ব্যাখ্যা কর।** [চ. বো. ২০২৩]

(ক) P—V চিত্রে B হতে C একটি রূদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়া। রূদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায় কৃত কাজ,

$$W = \frac{nR}{1-\gamma}(T_2 - T_1)$$

$$\therefore \quad W = \frac{1 \times 8.31 \times (400 - 600)}{1 - 1.4}$$

$$= \frac{-8.31}{0.4} \times (-200)$$

$$= 4155\ J$$

এখানে,
$T_1 = 600\ K$
$T_2 = 400\ K$
$\gamma = 1.4$
$n = 1$
$R = 8.31\ J\ molK^{-1}$

(খ) আমরা জানি, প্রত্যাবর্তী বা আবর্ত প্রক্রিয়ায় যেহেতু বস্তু প্রাথমিক অবস্থায় ফিরে আসে তাই কর্মরত বস্তুর অভ্যন্তরীণ শক্তির পরিবর্তন শূন্য হয়।

এখন, P—V লেখচিত্রে AB ও CD সমোষ্ণ প্রক্রিয়া এবং BC ও DA রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়া। সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় যেহেতু তাপমাত্রা স্থির থাকে ফলে অভ্যন্তরীণ শক্তির পরিবর্তন শূন্য হয়। সুতরাং চিত্রে AB ও CD অংশে অভ্যন্তরীণ শক্তির পরিবর্তনত শূন্য।

উপরের 'ক' অংশ থেকে B হতে C রূদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায় প্রাপ্ত কৃত কাজ, $W_2 = 4155\ J$

আবার, $dQ = dU + dW$

রূদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায়, $dQ = 0$

$\therefore \quad dU = -dW = -4155$ J

D হতে A রূদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায় কৃত কাজ,

$$W_2 = \frac{nR}{1-\gamma}(T_1 - T_2) = \frac{1 \times 8{\cdot}31}{1 - 1{\cdot}4}(600 - 400)$$

$$= -\frac{8{\cdot}31}{0{\cdot}4} \times 200 = -4155 \text{ J}$$

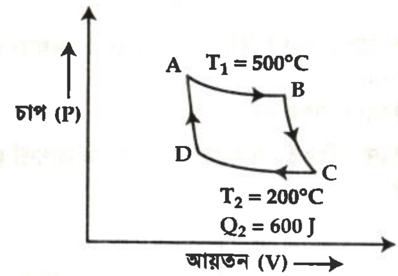
এখন, $dQ = dW_2 + dW_4$

বা, $dU_2 = -dW = +4155$ J

সুতরাং, BC ও DA রূদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায় অভ্যন্তরীণ শক্তির পরিবর্তন = $-4155 + 4155 = 0$

অতএব লেখচিত্রে প্রদর্শিত চক্রে মোট অভ্যন্তরীণ শক্তির পরিবর্তন শূন্য, তাই ক্লসিয়াসের দাবিটি যৌক্তিক।

**২৮।**




**উপরের P—V চিত্রটি একটি প্রত্যাবর্তী তাপ ইঞ্জিনের।**

**(ক) উদ্দীপকের তাপ ইঞ্জিনে সমোষ্ণ প্রসারণে এনট্রপির পরিবর্তন নির্ণয় কর।**

**(খ) উৎসের তাপমাত্রা স্থির রেখে ইঞ্জিনটির দক্ষতা 1·5 গুণ করা সম্ভব কি না—গাণিতিকভাবে বিশ্লেষণ কর।**

[ব. বো. ২০২৩]

(ক) আমরা জানি,

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}$$

বা, $Q_1 = \frac{Q_2}{T_2} \times T_1 = \frac{600 \times 473}{773}$ 980·5 J

এখানে,

$T_1 = 500°C = 500 + 273 = 773$ K

$T_2 = 200°C = 200 + 273 = 473$ K

$Q_2 = 600$ J

$Q_1 = ?$

এখন সমোষ্ণ প্রসারণে এনট্রফির পরিবর্তন, $ds = \frac{dQ}{T} = \frac{980{\cdot}5}{T_1} = \frac{980{\cdot}5}{773} = 1{\cdot}268 \text{ JK}^{-1}$

(খ) উদ্দীপকের ইঞ্জিনটির দক্ষতা,

$$\eta = \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right) \times 100\% = \left(1 - \frac{473}{773}\right) \times 100\% = 38{\cdot}8\%$$

ইঞ্জিনটির দক্ষতা 1·5 গুণ হলে দক্ষতা হবে = $38{\cdot}8 \times 1{\cdot}5 = 58{\cdot}2\%$

সুতরাং, উৎসের তাপমাত্রা স্থির থাকলে তাপগ্রাহকের তাপমাত্রা পরিবর্তন করতে হবে। সুতরাং প্রশ্নানুসারে,

$$\frac{58{\cdot}2}{100} = \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right)$$

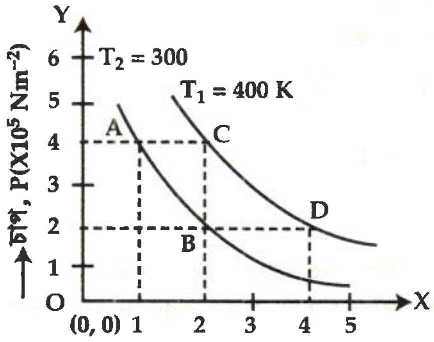
বা, $\left(1 - \frac{T_2}{773}\right) = 0{\cdot}582$

বা, $\frac{T_2}{773} = 1 - 0{\cdot}582 = 0{\cdot}418$

বা, $T_2 = 0{\cdot}418 \times 773 = 323$ K

$\therefore$ তাপগ্রাহকের তাপমাত্রা 323 K করলে ইঞ্জিনটির দক্ষতা 1·5 গুণ বৃদ্ধি পাবে।

২৯।




**চিত্রে 1 mole পরিমাণ কোনো গ্যাসের ক্ষেত্রে দুটি সমোষ্ণ লেখ দেখানো হয়েছে। গ্যাসটির স্থির আয়তনে মোলার আপেক্ষিক তাপ 25·18 Jmol$^{-1}$K$^{-1}$।**

**(ক) CD অংশে কৃত কাজের পরিমাণ নির্ণয় কর।**

**(খ) A হতে C-তে নিতে তাপশক্তির পরিবর্তন B হতে D-তে নিতে তাপশক্তির পরিবর্তনের সমান হবে কি না— গাণিতিকভাবে বিশ্লেষণ কর।** [সি. বো. ২০২৩]

(ক) আমরা জানি,

$$C_P - C_V = R$$

এবং $\frac{C_P}{C_V} = V$

$\therefore \quad C_P = R + C_V = 8·31 + 25·18 = 33·49$

এখন, $\gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{33·49}{25·18} = 1·33$

এখানে,

$C_V = 25·18$ Jmol$^{-1}$K$^{-1}$

$T_2 = 300$ K

$T_1 = 400$ K

$R = 8·31$ Jmol$^{-1}$K$^{-1}$

$n = 1$

আবার, CD অংশে রূদ্ধতাপীয় প্রসারণ ঘটে। সুতরাং কৃত কাজ,

$$W = \left(\frac{nR}{1-\gamma}\right)(T_2 - T_1)$$

$$= \left(\frac{1 \times 8·31}{1 - 1·33}\right) \times (300 - 400)$$

$$= \frac{8·31}{0·33} \times 100 = 2518 \text{ J}$$

(খ) A হতে C-তে নিতে তাপশক্তির পরিবর্তন,

$dQ = dU + PdV = PdV$

[A হতে C অংশ সমোষ্ণ অংশ]

এখানে,

A বিন্দুতে, $P = 4 \times 10^6$ Nm$^{-2}$

$dV = (2 - 1) = 1$

$\therefore \quad dQ = 4 \times 10^4 \times 1 = 4 \times 10^4$ J

এবং A হতে D-তে নিতে তাপশক্তির পরিবর্তন,

$dQ = PdV$ [$\because$ B হতে D অংশ সমোষ্ণ অংশ ]

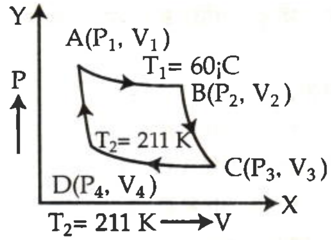
$= 2 \times 10^4 \times (4 - 2)$

$= 4 \times 10^4$ J

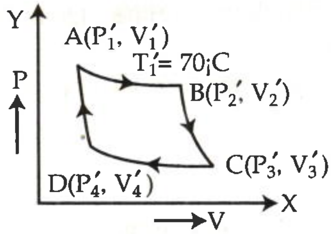
সুতরাং, A হতে C-তে নিতে এবং B হতে D-তে নিতে তাপশক্তির পরিবর্তন সমান হবে।

**৩০। উদ্দীপকে চিত্রের উভয় কার্নো চক্রে কার্যনির্বাহ বস্তু হিসেবে 1 মোল দ্বিপারমাণবিক গ্যাস ব্যবহৃত হয়েছে। চক্র দুটির প্রতি চক্রে সংকোচন ও প্রসারণের অনুপাত যথাক্রমে 1 : 3 এবং 1 : 4। ($R = 8^{\cdot}31\ Jmol^{-1}K^{-1}$)**

প্রথম কার্নো চক্র




দ্বিতীয় কার্নো চক্র




**(ক) উদ্দীপকের প্রথম কার্নো চক্রের, কার্যনির্বাহক বস্তুকে B থেকে C-তে নিতে মোট কৃত কাজ নির্ণয় কর।**

**(খ) উদ্দীপক অনুসারে, কোন কার্নো চক্রটি বেশি কার্যকর? গাণিতিক বিশ্লেষণ করে মতামত দাও।**

[ম. বো. ২০২৩]

(ক) B থেকে C নিতে কার্যনির্বাহক বস্তু রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায় প্রসারিত হবে।

আমরা জানি রুদ্ধতাপীয় প্রসারণের ক্ষেত্রে কৃত কাজ,

$$W = \left(\frac{nR}{1-\gamma}\right)(T_2 - T_1)$$

$$= \frac{8^{\cdot}31}{\gamma - 1}(-122) = 2534^{\cdot}6\ J$$

এখানে,
$n = 1$
$\gamma = 1^{\cdot}4$
$T_1 = 60°C = 60 + 273 = 333\ K$
$V_1 = V$
$V_2 = 4V$
$R = 8^{\cdot}31\ Jmol^{-1}K^{-1}$

এবং $T_2 = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1} \times T \times T_1$

$$= \left(\frac{V_1}{4V_1}\right)^{1^{\cdot}4-1} \times 333$$

$$= (0^{\cdot}25)^{0^{\cdot}4} \times 333 = 191\ K$$

$$\therefore\quad W = \left(\frac{1 \times 8^{\cdot}31}{1 - 1^{\cdot}4}\right) \times (191 - 333)$$

$$= -\frac{8^{\cdot}31}{0^{\cdot}4} \times (-142) = 2950\ J$$

(খ) প্রথম ইঞ্জিনে, $\eta_1 = \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \times 100\%$

$$= \left(1 - \frac{211}{333}\right) \times 100\% = 36^{\cdot}6\%$$

দ্বিতীয় ইঞ্জিনের ক্ষেত্রে রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায় প্রসারণে আয়তন 4 গুণ হবে।

$$\therefore\quad \frac{V_1}{V_2} = \frac{1}{4}$$

এখন, $T_2 = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1} \times T_1 = (0^{\cdot}25)^{0^{\cdot}4} \times 343 = 197\ K$

$\therefore$ ২য় ইঞ্জিনের দক্ষতা, $\eta_2 = \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \times 100\%$

$$= \left(1 - \frac{197}{343}\right) \times 100\% = 42^{\cdot}6\%$$

সুতরাং, ২য় চক্রটি বেশি কার্যকর।

**৩১। একটি কার্নো ইঞ্জিনের উৎসের তাপমাত্রা 340K। এই তাপমাত্রায় ইঞ্জিনটি উৎস হতে 2200 J তাপ শোষণ করে এবং তাপ গ্রাহকে 240K তাপমাত্রায় 1200 J তাপ বর্জন করে।**

**(ক) উদ্দীপকের আলোকে এনট্রপির পরিবর্তন নির্ণয় কর।**

**(খ) ইঞ্জিনটির উৎসের তাপমাত্রা 120 K বাড়ালে দক্ষতার কীরূপ পরিবর্তন হবে? গাণিতিকভাবে উপস্থাপন কর।**

[রা. বো. ২০২৪]

(ক) আমরা জানি, অ্যানট্রপির পরিবর্তন,

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

এখানে,

$T = T_1 =$ উৎসের তাপমাত্রা

$$dS = \frac{dQ}{T_1} = \frac{1000}{340}\ \text{Jk}^{-1}$$

$$= 2{\cdot}94\ \text{Jk}^{-1}$$

এখানে,

উৎসের তাপমাত্রা, $T_1 = 340$ K

তাপগ্রাহকের তাপমাত্রা, $T_2 = 240$ K

শোষিত তাপমাত্রা, $T = 340 - 240 = 100$ K

শোষিত তাপ, $Q_1 = 2200$ J

বর্জিত তাপ, $Q_2 = 1200$ J

অ্যানট্রপির পরিবর্তন, $dS = ?$

$dQ = Q_1 - Q_2 = 2200 - 1200 = 1000$ J

(খ) ইঞ্জিনটির উৎসের তাপমাত্রা 120 K বাড়ালে,

$T_1 = 340 + 120 = 460$ K

$T_2 = 240$ K

পূর্বের শর্তানুযায়ী কর্মদক্ষতা,

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \times 100\%$$

$$= \frac{340 - 240}{340} \times 100\%$$

$$= \frac{100}{340} \times 100\%$$

$$= 294{\cdot}11 \times 100\%$$

$$= 29{\cdot}4\%$$

তাপমাত্রা বৃদ্ধির পর কর্মদক্ষতা,

$$\eta' = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \times 100\%$$

$$= \frac{460 - 240}{460} \times 100\%$$

$$= 47{\cdot}82\%$$

$\therefore$ দক্ষতার পরিবর্তন $= (47{\cdot}82 - 29{\cdot}4)\% = 18{\cdot}43\%$

এখানে,

উৎসের তাপমাত্রা 120 K বৃদ্ধি করায়,

$T_1' = (340 + 120)$ K $= 460$ K

$T_2 = 240$ K

$\eta' = ?$

**৩২। পিস্টনযুক্ত একই ধরনের দুটি ভিন্ন সিলিন্ডারে 10°C তাপমাত্রায় 8 gm করে হাইড্রোজেন গ্যাস আছে। প্রথম সিলিন্ডারে আয়তন স্থির রেখে 410 J তাপ প্রদান করায় গ্যাসের তাপমাত্রা 15°C-এ উন্নীত হলো। অপরপক্ষে দ্বিতীয় সিলিন্ডারে চাপ স্থির রেখে 410 J তাপ প্রদান করা হলো। [মোলার গ্যাস ধ্রুবক $R = 8{\cdot}31\ \text{Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$]**

**(ক) স্থির আয়তনে মোলার তাপ ধারণক্ষমতা ($C_V$) নির্ণয় কর।**

**(খ) দ্বিতীয় সিলিন্ডারে গ্যাসের তাপমাত্রা 15°C-এ উন্নীত হবে কি না—গাণিতিক বিশ্লেষণসহ যাচাই কর।**

[কু. বো. ২০২৪]

(ক) হাইড্রোজেন দ্বি-পরমাণুক গ্যাস। তাই 1 মোলে 2 gm হাইড্রোজেন থাকে।

সুতরাং 8 gm হাইড্রোজেনে মৌল সংখ্যা = 4

স্থির আয়তনে গ্যাসের মোলার তাপ ধারণ ক্ষমতা,

$$C_V = \frac{Q}{m\Delta T} = \frac{410\ \text{J}}{4 \times 5\ \text{K}}$$

$$= 20{\cdot}5\ \text{Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$$

এখানে,

$Q$ = সিস্টেমে প্রদেয় তাপ = 410 J

$m$ = মোল সংখ্যা = 4

$\Delta T$ = তাপমাত্রার পরিবর্তন

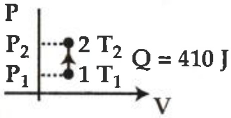
= 15°C — 10°C = 5°C

= 5 K (পার্থক্যের ক্ষেত্রে °C ও K সমান)

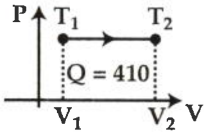
(খ) আমরা জানি,

$$C_P - C_V = R$$
$$C_P = R + C_V$$
$$= (8{\cdot}31 + 20{\cdot}5)\ \text{Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$$
$$= 28{\cdot}81\ \text{Jmol}^{-1}\text{K}^{-1} \qquad [\because C_V = 20{\cdot}5\ \text{Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}]$$

১ম ক্ষেত্রে :




২য় ক্ষেত্রে :




আবার,

$$Q = C_P m \Delta T$$
$$\Delta T = \frac{Q}{C_P m}$$

বা, $T_2 - T_1 = \dfrac{Q}{C_P m}$

$\therefore\ T_2 = \dfrac{Q}{C_P m} + T_1$

| | |
|---|---|
| $Q$ | $= 410$ J |
| $T_1$ | $= 10°$C |
| | $= 283$ K |
| $T_2$ | $= ?$ |

$$= \frac{410\ \text{J}}{28{\cdot}81\ \text{Jmol}^{-1}\text{K}^{-1} \times 4\ \text{mol}} + 283\ \text{K}$$
$$= 286{\cdot}558\ \text{K}$$
$$= 13{\cdot}558\ °\text{C}$$

$\therefore$ দ্বিতীয় সিলিন্ডারের গ্যাসের তাপমাত্রা 15°C-এ উন্নীত হবে না

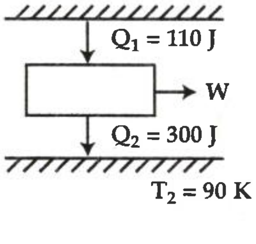
**৩৩। একটি তাপ ইঞ্জিন তাপ উৎস হতে 600 K তাপমাত্রায় 1100 J তাপ গ্রহণ করে 90K তাপমাত্রার তাপগ্রাহকে 300 J তাপ বর্জন করে। তাপ উৎস ও তাপগ্রাহকে তাপমাত্রা বাড়ানো এবং কমানোর ব্যবস্থা আছে।**

**(ক) ইঞ্জিনটির দক্ষতা নির্ণয় কর।**

**(খ) তাপ ইঞ্জিনটিকে প্রত্যাবর্তী করতে কী পদক্ষেপ গ্রহণ করা যেতে পারে? গাণিতিক বিশ্লেষণসহ মতামত দাও।** [য. বো. ২০২৪

(ক) আমরা জানি, ইঞ্জিনের দক্ষতা,

$$\eta = \left(1 - \frac{Q_2}{Q_1}\right) \times 100\%$$
$$= \left(1 - \frac{300}{1100}\right) \times 100\%$$
$$= (1 - 0{\cdot}2727) \times 100\%$$
$$= 72{\cdot}72\%$$




দেওয়া আছে,

$T_1 = 600$ K
$T_2 = 90$ K
$Q_1 = 1100$ J
$Q_2 = 300$ J
$T_1 = 600$ K

(খ) আমরা জানি, প্রত্যাবর্তী ইঞ্জিনের ক্ষেত্রে,

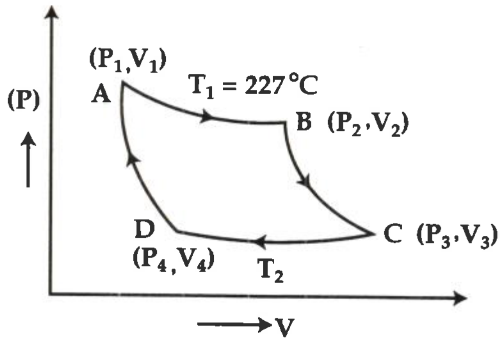
$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}$$

বা, $T_2 = \dfrac{Q_2}{Q_1} \times T_1 = \dfrac{300\ \text{J}}{1100\ \text{J}} \times 600\ \text{K}$

$$= \frac{1800}{11}\ \text{K} = 163{\cdot}6363\ \text{K}$$

ইঞ্জিনটিকে প্রত্যাবর্তী করতে তাপগ্রাহকের তাপমাত্রা $T_2 = 163{\cdot}636$ JK করতে হবে।

৩৪। কার্নো ইঞ্জিনের প্রতি স্তরে সংকোচন বা প্রসারণের অনুপাত 1 : 6, এতে কার্যনির্বাহক বস্তু হিসেবে 3 মোল দ্বি–পরমাণুক গ্যাস ব্যবহার করা হলো। ($\gamma = 1.4$) [চ. বো. ২০২৪]




(ক) কার্যনির্বাহক বস্তুকে A হতে B বিন্দুতে আনতে কৃত কাজ নির্ণয় কর।

(খ) প্রদত্ত ইঞ্জিনের কর্মদক্ষতা 55% অপেক্ষা বেশি হওয়া সম্ভব কি? গাণিতিকভাবে বিশ্লেষণ কর।

[চ. বো. ২০২৪]

(ক) চিত্র অনুযায়ী, AB সমোষ্ণ প্রসারণের জন্য কৃত কাজ,

$$W = \int_{V_1}^{V_2} P dV$$

$$= \int_{V_1}^{V_2} \frac{nRT}{V} dV \quad \left[\because PV = nRT \quad \therefore \quad P = \frac{nRT}{V}\right]$$

$$= nRT [\ln V]_{V_1}^{V_2} = nRT [\ln V_2 - \ln V_1]$$

$$= nRT \ln\frac{V_2}{V_1} = nRT \ln\frac{6V_1}{V_1}$$

$$= 3 \text{ mol} \times 8.31 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1} \times 227 \times \ln 6$$

$$W = 10139.76 \text{ J}$$

এখানে,

সমোষ্ণ প্রসারণের পর আয়তন, $V_2 = 6V_1$

গ্যাসের পরিমাণ, $n = 3$ mol

প্রাথমিক তাপমাত্রা, $T = 227$ K

(খ) আমরা জানি,

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \times 100\%$$

আবার, $T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1}$

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{6V_1}{V_1}\right)^{\gamma-1}$$

$$\therefore \frac{T_1}{T_2} = (6)^{\gamma-1} = (6)^{1.4-1} = 2.048 \text{ K}$$

$$\therefore T_2 = \frac{T_1}{2.048} = \frac{227}{2.048}$$

$$= 110.84 \text{ K}$$

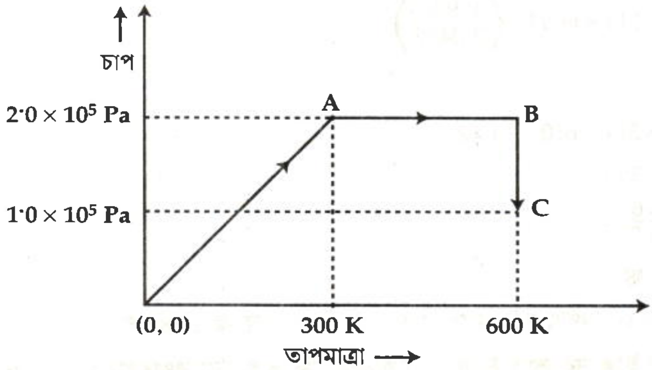
$\therefore$ কর্মদক্ষতা,

$$\eta = \frac{227 - 110.84}{227} \times 100\%$$

$$= 51.178\%$$

সুতরাং উদ্দীপকের ইঞ্জিনের দক্ষতা 51.18%-এর বেশি হওয়া সম্ভব না।

**৩৫। নিচের লেখচিত্রে 2 মোল কোনো গ্যাসের তাপমাত্রার সাথে চাপের পরিবর্তন দেখানো হলো। OA অংশে গ্যাসের আয়তন স্থির থাকে। স্থির আয়তনে গ্যাসের মোলার আপেক্ষিক তাপ $12{\cdot}5\ Jmol^{-1}K^{-1}$।**




**(ক) OA রেখায় অভ্যন্তরীণ শক্তির পরিবর্তন নির্ণয় কর।**

**(খ) লেখচিত্রের AB ও BC অংশের কৃত কাজ গাণিতিক বিশ্লেষণ সহকারে তুলনা কর।** [ব. বো. ২০২৪]

(ক) তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্রানুসারে লেখা যায়,

$dQ = dU + pdV$

বা, $dQ = dU$ [গ্যাসের আয়তন স্থির $\therefore$ $dV = 0$]

বা, $ms\Delta\theta = dU$

বা, $dU = 2 \times 12{\cdot}5\ Jmol^{-1}K^{-1} \times (300)$
$= 7500$ J

এখানে,
ভর, $m = 2$ mol
আপেক্ষিক তাপ, $s = 12{\cdot}5\ Jmol^{-1}K^{-1}$
$\Delta\theta = 300$ K
অভ্যন্তরীণ শক্তির পরিবর্তন, $dU = ?$

(খ) উদ্দীপক অনুসারে AB অংশে কৃত কাজ হবে স্থির চাপের অধীন।

$\therefore$ AB অংশে কৃত কাজ, $dW = PdV$

বা, $W = P\int dV$

বা, $W = P\Delta V$
$= 2 \times 10^5 \times [0{\cdot}04988 - 0{\cdot}0249]$
$= 4996$ J

এখানে,
$P = 2 \times 10^5$ Pa

আমরা জানি,
$PV = nRT$

বা, $V_1 = \dfrac{2m \times 8{\cdot}314\ Jm^{-1}K^{-1}}{2 \times 10^5\ Nm^{-2}} \times 300\ K$
$= 0{\cdot}0249\ m^3$

এখানে, $T_1 = 300$ K, $T_2 = 600$ K

$\dfrac{V_1}{T_1} = \dfrac{V_2}{T_2}$ বা, $V_2 = \dfrac{T_2}{T_1} \times V_1$

$V_2 = 2 \times 0{\cdot}0249\ m^3 = 0{\cdot}04988\ m^3$

$\therefore$ $\Delta V = V_2 - V_1 = (0{\cdot}04988 - 0{\cdot}0249)$
$= 0{\cdot}02498\ m^3$

দ্বিতীয় ক্ষেত্রে : BC অংশে, সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় কৃত কাজ,

$$W_1 = nRT \ln \left| \frac{V_2}{V_1} \right| \quad \ldots \quad \ldots \quad (i)$$

এক্ষেত্রে,

A → B-এর ক্ষেত্রে,

$\dfrac{V_1}{T_1} = \dfrac{V_2}{T_2}$

বা, $V_2 = \dfrac{T_2}{T_1} V_1 = 2V_1 = 0{\cdot}0498\ m^3$

$\therefore$ $V_B = V_2 = 0{\cdot}0498\ m^3$

B → C-এর ক্ষেত্রে,

$P_B V_B = P_C V_C$

$\therefore$ $V_C = \dfrac{P_B V_B}{P_C} = \dfrac{2}{1} \times 0{\cdot}0498$

$\therefore$ $V_2 = V_C = 0{\cdot}0996\ m^3$

(i)নং সমীকরণ অনুযায়ী কৃত কাজ, $W = nRT\ln\frac{V_C}{V_B}$

$$W_1 = 2\times 8.314\times 600\ \ln\left(\frac{0.996}{0.0498}\right)$$

$\therefore$ কৃত কাজ,

$$W_1 = 2\times 8.314\times 600\times \ln\ |2|$$

$$= 6915.39\ \text{J}$$

$$\therefore \frac{W}{W_1} = \frac{4996}{6915.39}$$

$$\therefore W_1 : W = 1.38 : 1$$

বা, $W1 = 1.38\times W$, অর্থাৎ BC অংশে কাজ AB অংশে কাজের 1.38 গুণ।

**৩৬। একটি কার্নো ইঞ্জিনের তাপ উৎস ও তাপ গ্রাহকের তাপমাত্রা যথাক্রমে 727°C ও 227°C। ইঞ্জিনটি তাপ উৎস থেকে 1000 J তাপ গ্রহণ করে। একজন ইঞ্জিনিয়ার উক্ত ইঞ্জিনের দক্ষতা 60% এ উন্নীত করেন।**

**(ক) ইঞ্জিনটির কৃত কাজের মান কত?**

**(খ) তাপগ্রাহকের কী পরিবর্তন করে উদ্দীপকের ইঞ্জিনিয়ার প্রদত্ত দক্ষতায় উন্নীত করতে সক্ষম হয়েছিলেন? গণিতিকভাবে ব্যাখ্যা দাও। [সি. বো. ২০২৪]**

(ক) আমরা জানি, কার্নো ইঞ্জিনের দক্ষতা,

$$\eta = \left(1-\frac{T_2}{T_1}\right)\times 100\%$$

$$= \left(1-\frac{500}{1000}\right)\times 100\%$$

$$= (0.5)\times 100\%$$

$$= 50\%$$

দেওয়া আছে,

$$T_1 = 727°\text{C} = 727 + 273 = 1000\ \text{K}$$

$$T_2 = (227 + 273) = 500\ \text{K}$$

আবার,

$$\eta = \frac{W}{Q_1}$$

এখানে,

$$\eta = \frac{50}{100} = 0.5$$

কৃত কাজ,

$$W = \eta Q_1 = 0.5\times 1000\ \text{J}$$

$$= 500\ \text{J}$$

(খ) আমরা জানি,

$$\eta = 1-\frac{T_2}{T_1}$$

বা, $\frac{T_2}{T_1} = 1-\eta$

$$\therefore T_2 = (1-\eta)\ T_1$$

$$= (1-0.6)\times 1000\ \text{K} = 400\ \text{K}$$

এখানে,

উৎসের তাপমাত্রা $T_1$ অপরিবর্তনীয়,

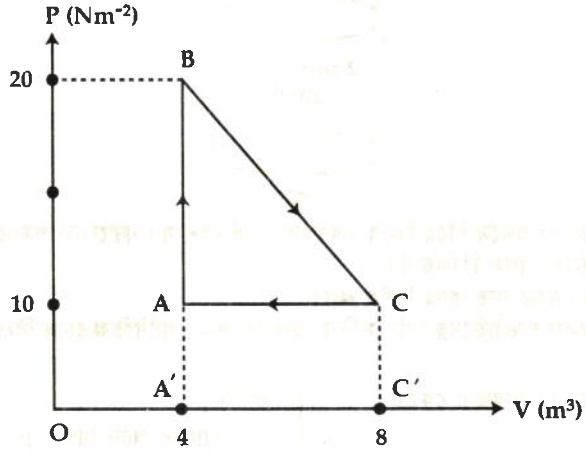
$T_1 = 727 + 273 = 1000$ K

তাপগ্রাহকের তাপমাত্রা, $T_2$ = ?

দক্ষতা, $\eta = 60\% = \frac{60}{100} = 0.6$

ইঞ্জিনটির তাপ গ্রাহকের তাপমাত্রা (400 — 273) °C = 127°C কমিয়ে ইঞ্জিনটির দক্ষতা 60%-এ উন্নীত করতে সক্ষম হয়েছিলেন।

৩৭।




**উপরের লেখচিত্রে $n$ =1 mole গ্যাসের জন্য P—V লেখের চক্রীয় প্রক্রিয়া দেখানো হয়েছে। B বিন্দুতে উৎস হতে 200 J তাপ গৃহীত হয়।**

**(ক) CA ও AB পথে মোট কৃত কাজ কত?**

**(ঘ) BC পথে অভ্যন্তরীণ শক্তির পরিবর্তন নির্ণয় করা সম্ভব হবে কি? গাণিতিকভাবে যাচাই কর।**

[সি. বো. ২০২৪]

(ক) CA পথে কৃত কাজ,

$$W_{CA} = \int_C^A PdV = P(V_A - V_C)$$
$$= 10\,Nm^{-2} \times (4-8)\,m^3$$
$$= -10 \times 4\,Nm$$
$$= -40\,J$$

চিত্র থেকে,
$P = 10\,Nm^{-2}$
$V_A = 4\,m^3$
$V_C = 8\,m^3$

AB পথে মোট কৃত কাজ,

$$W_{AB} = \int_A^B PdV = P(V_B - V_A)$$
$$= P(4-4) = 0$$

চিত্র অনুযায়ী,
$V_B = 4\,m^3$
$V_A = 4\,m^3$

(খ) আমরা জানি,

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta W \quad \ldots \quad \ldots \quad (1)$$
$$\therefore \Delta W = \int PdV$$
$$= nRT_1 \int_B^C \frac{1}{V}dV = RT_1 \ln\left(\frac{V_C}{V_B}\right)$$
$$= T_1\, 8\text{·}31\, JK^{-1} \ln\left(\frac{8}{4}\right) = 11\text{·}50\, T_1\, J.K^{-1}$$

BC পথে সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় গৃহীত তাপ,
$\Delta Q = 200\,J$
$\Delta U$ = অভ্যন্তরীণ শক্তির পরিবর্তন = ?
$\Delta W$ = কৃত কাজ
$n = 1$
$R = 8\text{·}31\,Jmol^{-1}K^{-1}$
চিত্র অনুযায়ী,
$V_C = 8\,m^3$
$V_B = 4\,m^3$

আবার, আমরা জানি,

$$P_1V_1 = nRT_1$$
$$T_1 = \frac{P_1V_1}{nR} = \frac{20 \times 4}{1 \times 8\text{·}31} = 9\text{·}63\,K$$
$$\therefore \Delta W = 11\text{·}50 \times 9\text{·}63 = 110\text{·}745\,J$$

$\therefore$ (1)নং সমীকরণ অনুযায়ী $\Delta U = \Delta Q - \Delta W = 200 - 110\text{·}745 = 89\text{·}255\,J$

৩৮।


পাত্র

**উপরের চিত্রে গ্যাসের চাপ প্রথমে ধীরে দ্বিগুণ এবং পরে দ্রুত তিন গুণ করলে তাপমাত্রা পাওয়া গেল 197·83°C। জাহিন দাবি করল পাত্রের গ্যাস হিলিয়াম।**

**(ক) উদ্দীপকের ১ম ক্ষেত্রে কৃত কাজ নির্ণয় কর।**

**(খ) উদ্দীপকের আলোকে জাহিনের দাবি সঠিক ছিল কি না—গাণিতিকভাবে বিশ্লেষণ করে মতামত দাও।**

[দি. বো. ২০২৪]

(ক) আমরা জানি, সমোষ্ণ প্রক্রিয়ার ক্ষেত্রে,

$$P_1V_1 = P_2V_2$$

$$\therefore \frac{V_2}{V_1} = \frac{P_1}{P_2} = \frac{P_1}{2P_1} = \frac{1}{2}$$

∴ কৃত কাজ,

$$W = nRT \ln \left| \frac{V_2}{V_1} \right|$$

$$= 2 \times 8·31 \times 303 \ln \left| \frac{1}{2} \right|$$

$$= -3490·6 \text{ J}$$

এখানে,

গ্যাসের আদি চাপ $= P_1$

পরিবর্তিত চাপ $= P_2 = 2P_1$

গ্যাসের তাপমাত্রা $= 30°C$

$\therefore T = (30 + 273) \text{ K} = 303 \text{ K}$

মোলার গ্যাস ধ্রুব, $R = 8·31 \text{ Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$

মোল সংখ্যা, $n = 2$

(খ) যেহেতু গ্যাসের চাপ ২য় ক্ষেত্রে দ্রুত বৃদ্ধি করা হয়েছে, কাজেই রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায়,

$$T_1P_1^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = T_2P_2^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}$$

$$\therefore \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}$$

$$\frac{303}{470·83} = \left(\frac{3}{1}\right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}$$

$$0·6436 = 3^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}$$

$$\therefore \gamma = 1·68$$

এখানে,

$T_1 = 30° = 303 \text{ K}$

$T_2 = (197·83 + 273) \text{ K} = 470·83 \text{ K}$

গ্যাসের আদি চাপ $= P_1$

পরিবর্তিত চাপ $= P_2 = 3P_1$

$\gamma = ?$

He-এর ক্ষেত্রে $\gamma = 1·67$, তাই নির্ণেয় $\gamma$-এর মান এক পরমাণু গ্যাসের ক্ষেত্রে; যেমন—He, Ne, Ar ইত্যাদির ক্ষেত্রে প্রযোজ্য। কাজেই জাহিদের দাবি সঠিক ছিল।

৩৯। **দুটি কার্নো–ইঞ্জিনের উৎসের তাপমাত্রা যথাক্রমে 327°C এবং 227°C। ইঞ্জিনদ্বয়ের প্রতি স্তরে সংকোচন ও প্রসারণের অনুপাত যথাক্রমে 1 : 2 এবং 1 : 3। উভয় ইঞ্জিনের কার্যনির্বাহক বস্তু 2 mol দ্বি–পরমাণুক গ্যাস।**

**(ক) উদ্দীপকের প্রথম ইঞ্জিনের ক্ষেত্রে সমোষ্ণ প্রসারণে কৃত কাজ নির্ণয় কর।**

**(ঘ) উদ্দীপকের কার্নো–ইঞ্জিনদ্বয়ের মধ্যে কোনটি বেশি কার্যক্ষম—গাণিতিক বিশ্লেষণের মাধ্যমে যাচাই কর।**

[দি. বো. ২০২৪]

(ক) প্রথম ইঞ্জিনের ক্ষেত্রে,

আমরা জানি, সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় ইঞ্জিন কর্তৃক কৃত কাজ,

$$W = \int_{V_1}^{V_2} P\,dV \quad \ldots \quad \ldots \quad \text{(i)}$$

আমরা জানি,

$$PV = nRT_1$$
$$P = \frac{nRT_1}{V}$$

কৃত কাজ,

$$W_1 = nRT_1\int_{V_1}^{V_2}\frac{1}{V}dV = nRT_1\,[\ln V]_{V_1}^{V_2}$$
$$= nRT_1 \ln(V_2 - V_1)$$
$$= 2\times 8.31\times 600\times \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$
$$= 2\times 8.31\times 600\times \ln 2$$
$$= 6912.06\ J$$
$$\therefore\ W_1 = 6912.06\ J$$

এখানে,
$n = 2$ mole
$R = 8.31\ Jmol^{-1}K^{-1}$
$T_1 = 327°C$
$= (327 + 273)\ K$
$= 600\ K$

এখানে,
$\frac{V_2}{V_1} = \frac{2V_1}{V_1} = 2$
যেহেতু সংকোচন ও প্রসারণ অনুপাত (1 : 2)
$W_1 = ?$

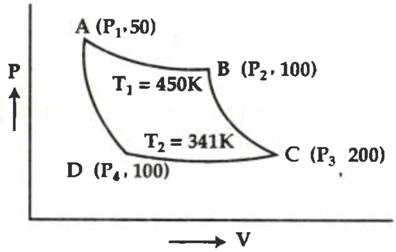
(খ) দ্বিতীয় ইঞ্জিনের ক্ষেত্রে, ইঞ্জিন কর্তৃক কৃত কাজ,

$$W_2 = nRT_2\int_{V_1}^{V_2}\frac{1}{V}dV$$
$$= 2\times 8.31\times 500\,[\ln V]_{V_1}^{V_2}$$
$$= 2\times 8.31\times 500\ \ln(V_2 - V_1)$$
$$= 2\times 8.31\times 500\ \ln\frac{V_2}{V_1}$$
$$= 2\times 8.31\times 500\ \ln(3)$$
$$\therefore\ W_2 = 9120.47\ J$$

এখানে,
$\frac{V_2}{V_1} = \frac{3V_1}{V} = 3$
$n = 2$
$R = 8.31\ Jm^{-1}K^{-1}$
$T_2 = (227 + 273)\ K$
$= 500\ K$
$W_2 = ?$

উদ্দীপক 'গ' থেকে পাই, $W_1 = 6912.66$ J; এখানে $W_2 > W_1$। সুতরাং দ্বিতীয় ইঞ্জিনের কর্মক্ষমতা প্রথম ইঞ্জিন অপেক্ষা বেশি।

৪০।




**$n = 1$ mol, $\gamma = 1.4$**
**$R = 8.31\ J\ mol^{-1}\ K^{-1}$**

**(ক) চিত্র থেকে BC অংশে কাজের পরমাণ নির্ণয় কর।**
**(খ) চিত্রের AB এবং CD অংশে এনট্রপির পরিবর্তন একই হবে কি না— গাণিতিকভাবে বিশ্লেষণ কর।**

[ম. বো. ২০২৪]

(ক) BC পথ রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়া

BC পথে কৃত কাজ,

$$W_B = \frac{nR}{\gamma - 1}(T_1 - T_2)$$
$$= \frac{1\ mol\times 8.31\ Jmol^{-1}K^{-1}}{1.4 - 1}(450 - 341)\ K$$
$$= \frac{8.31\times 109\ J}{0.4} = 2264.475\ J$$

এখানে,
$T_1 = 450$ K
$T_2 = 341$ K
$n = 1$ mol
$R = 8.31\ Jm^{-1}K^{-1}$

(খ) AB অংশে এনট্রপির পরিবর্তন,

$$\Delta S_1 = \frac{Q_1}{T_1}$$

CD অংশে এনট্রপির পরিবর্তন,

$$\Delta S_2 = \frac{Q_2}{T_2}$$

কিন্তু $\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}$

এনট্রপির পরিবর্তন,

$$\therefore \quad \Delta S = \Delta S_2 - \Delta S_1 = \frac{Q_2}{T_2} - \frac{Q_1}{T_1} = 0$$

$\therefore \quad \Delta S_2 = \Delta S_1$ সুতরাং AB এবং CD অংশে এনট্রপির পরিবর্তন একই হবে।

বিকল্প :

AB অংশে এনট্রপির পরিবর্তন,

$$\Delta S_1 = \frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q}{T_1}$$

$$= \frac{Q}{450}\ \mathrm{JK^{-1}}$$

শোষিত তাপ,

$Q_1 = Q$ ধরি

CD অংশে এনট্রপির পরিবর্তন

$$\Delta S_2 = -\frac{Q_2}{T_2}$$

$$= -\frac{341 \times Q}{450 \times 341} = -\frac{Q}{450}\ \mathrm{JK^{-1}}$$

$$Q_2 = \frac{T_2}{T_1} \times Q$$

$$= \frac{341}{450} \times Q$$

$$\therefore \quad \Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_3$$

$$\therefore \quad \Delta S = \frac{Q}{450} - \frac{Q}{450} = 0$$

অর্থাৎ এনট্রপির কোনো পরিবর্তন হবে না।

## বহুনির্বাচনি প্রশ্নের উত্তরের জন্য প্রয়োজনীয় বিষয়াবলির সারসংক্ষেপ

১। তাপমাত্রা পরিমাপে উপযোগী পদার্থের যে সমস্ত ধর্ম নিয়মিতভাবে পরিবর্তিত হয় ওই ধর্মসমূহকে বলা হয় উষ্ণতামিতিক ধর্ম।

২। তাপগতিবিদ্যার শূন্যতম সূত্রকে ভিত্তি করে থার্মোমিটার তৈরি করা হয়।

৩। তাপ এক প্রকার শক্তি যা কোনো বস্তুর ওপর প্রয়োগ করলে—

(১) বস্তুর উষ্ণতা বৃদ্ধি পায়

(২) বস্তুর আয়তন বৃদ্ধি পায়

(৩) অণুর গতিশক্তি বৃদ্ধি পায়।

৪। উন্মুক্ত সিস্টেম পরিবেশের সাথে ভর ও শক্তি উভয়ই বিনিময় করে।

৫। তাপগতিবিদ্যার ১ম সূত্র শক্তির নিত্যতার সূত্র নির্দেশ করে।

৬। 1 cal তাপকে কাজে রূপান্তরিত করতে 4.2 J কাজ করতে হয়।

৭। সমচাপীয় প্রক্রিয়ার ক্ষেত্রে $dW = P(V_2 - V_1)$।

৮। তাপগতিবিদ্যার আলোকে $\Delta u = -W$, রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ার ক্ষেত্রে প্রযোজ্য।

৯। অভ্যন্তরীণ শক্তি নির্ভর করে আয়তন, চাপ এবং তাপমাত্রার ওপর। এই শক্তির পরিমাণ তাপীয় শক্তি + আণবিক স্থিতিশক্তি।

১০। গ্যাসের অভ্যন্তরীণ শক্তি নির্ভর করে তাপমাত্রার ওপর।

১১। বন্ধ সিস্টেমে পরিবেশের সাথে শুধু শক্তি বিনিময় করে।

১২। সমোষ্ণ প্রক্রিয়ার শর্ত হলো—(ক) গ্যাসের সংনমন ও প্রসারণ খুব ধীরে ধীরে সংঘটিত হবে (খ) পাত্রের চারপাশের মাধ্যমের তাপধারণ ক্ষমতা বেশি হতে হবে।

১৩। ঘর্ষণের ফলে তাপ উৎপাদন একটি অপ্রত্যাগামী প্রক্রিয়া। আবার চায়ের কাপে চিনি মেশানো একটি অপ্রত্যাগামী প্রক্রিয়া।

১৪। তাপগতীয় পরিবর্তন সাধারণত চার প্রকার। যথা—সমোষ্ণ পরিবর্তন, রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তন, সমআয়তন পরিবর্তন ও সমচাপ পরিবর্তন।

১৫। বায়ুর মধ্য দিয়ে শব্দ সঞ্চালন একটি রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়া।

১৬। তাপগতীয় বিচ্ছিন্ন সিস্টেমে ভর ও শক্তি কিছুই বিনিময় করতে পারে না।

১৭। একটি গাড়ি চলতে থাকলে তার টায়ারের ভেতর ~~রুদ্ধতাপীয়~~ প্রক্রিয়া চলে। MAT(16-17) সমআয়তন প্রক্রিয়া

১৮। হিটারের মধ্য দিয়ে বিদ্যুৎ প্রবাহিত হলে তাপ উৎপন্ন হয়। ইহা একটি অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া।

১৯। স্থিতিস্থাপক সীমার মধ্যে স্প্রিংকে সংকুচিত ও প্রসারিত করা একটি প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া।

২০। রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়া সংঘটনের জন্য শর্ত হলো—

(ক) গ্যাসের পাত্র কুপরিবাহী হতে হবে।

(খ) চারপাশের মাধ্যমের তাপধারণ ক্ষমতা কম হতে হবে।

(গ) $\Delta Q = 0$; অর্থাৎ বাইরের সাথে গ্যাসের তাপের কোনো আদান-প্রদান ঘটে না।

(ঘ) চাপের পরিবর্তন খুব দ্রুত সংঘটিত হতে হবে।

(ঙ) তাপমাত্রার পরিবর্তন ঘটে।

২১। সকল প্রত্যাগামী প্রক্রিয়াই ~~একমুখী~~। উভয়মুখী

২২। অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ায় সিস্টেমের অণু-পরমাণুগুলোর এলোমেলো গতি বৃদ্ধি পায়।

২৩। গ্যাসে দুইটি আপেক্ষিক তাপ থাকে $C_P$ এবং $C_V$। $n$ মোল গ্যাসের ক্ষেত্রে $C_P = \frac{\Delta Q}{n\Delta T}$ এবং $C_V = \frac{\Delta Q}{n\Delta T}$

২৪। এক-পরমাণবিক গ্যাসের ক্ষেত্রে $C_V = \frac{3R}{2}$। $C_P$ এবং $C_V$ এর পার্থক্য $C_P - C_V = R$.

২৫। এক পারমাণবিক গ্যাসের ক্ষেত্রে, $\gamma = 1{\cdot}67$, দ্বিপারমাণবিক গ্যাসের ক্ষেত্রে, $\gamma = 1{\cdot}40$ এবং বহু পারমাণবিক গ্যাসের ক্ষেত্রে $\gamma = 1{\cdot}33$।

২৬। গ্যাসীয় মাধ্যমে শব্দের বেগ $\gamma$ এর মানের ওপর নির্ভর করে।

২৭। অন্তস্থ শক্তির পরিবর্তন = স্থির আয়তনে গ্যাসের আপেক্ষিক তাপ $\times$ পরম তাপমাত্রা।

২৮। যদি কোনো তাপ ইঞ্জিন থেকে তাপ বর্জিত না হয়, তবে ইঞ্জিনের ক্ষমতা 100% হবে।

২৯। রেফ্রিজারেটরের জন্য প্রযোজ্য—নিম্ন তাপমাত্রার উৎস থেকে তাপ গ্রহণ করে উচ্চ তাপমাত্রার উৎসে তাপ বর্জন করে। পক্ষান্তরে তাপ ইঞ্জিন উচ্চ তাপমাত্রার উৎস হতে তাপ গ্রহণ করে কাজ সম্পাদন করে এবং অব্যবহৃত তাপ নিম্ন তাপমাত্রার তাপ গ্রাহকে বর্জন করে।

৩০। একটি কার্নো চক্রে মোট এনট্রপির পরিবর্তন শূন্য।

৩১। প্লাজমা অবস্থায় এনট্রপি সবচেয়ে ~~কম~~ থাকে। বেশি

৩২। এনট্রপি সংরক্ষণশীলতার সূত্র মেনে চলে না।

৩৩। তাপগতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্রকে কাজে লাগিয়ে তাপীয় ইঞ্জিন ও রেফ্রিজারেটর তৈরি করা হয়। MAT(23-24)

৩৪। এনট্রপি বিশৃঙ্খলা নামক ভৌত ধর্মের পরিমাণ প্রদান করে।

৩৫। প্রত্যাগামী প্রক্রিয়ায় এনট্রপি স্থির থাকে।

৩৬। গ্যাসীয় অবস্থার এনট্রপি কঠিন ও তরলের চেয়ে বেশি। MAT(24-25)

৩৭। ইঞ্জিনের দক্ষতা অর্ধেক করতে হলে উচ্চ তাপমাত্রা হ্রাস করতে হবে এবং নিম্ন তাপমাত্রা বৃদ্ধি করতে হবে।

৩৮। তাপ উৎস ও তাপ গ্রাহকের মধ্যবর্তী তাপমাত্রার মধ্যে পার্থক্য যত বেশি হবে ইঞ্জিনের দক্ষতাও তত বেশি হবে।

৩৯। পানির ত্রৈধবিন্দু $273{\cdot}16$ K। তাপগতীয় স্কেলকে তাপমাত্রার পরম স্কেল বলে।

৪০। — 40°C এবং — 40°F সেলসিয়াস ও ফারেনহাইট স্কেলে একই হয়।

৪১। কোনো সিস্টেমে তাপ প্রয়োগ না করলে অভ্যন্তরীণ শক্তি স্থির থাকে।

৪২। বিচ্ছিন্ন সিস্টেমে ভর বা শক্তি কিছুই বিনিময় হয় না।

৪৩। সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় গ্যাসের চাপ ও আয়তনের সম্পর্ক বয়েলের সূত্র মেনে চলে। রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তনের ক্ষেত্রে বয়েলের সূত্র প্রযোজ্য নয়।
৪৪। রুদ্ধতাপীয় লেখ সমোষ্ণ লেখ হতে অধিক খাড়া।
৪৫। প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ায় অভ্যন্তরীণ শক্তির পরিবর্তন শূন্য।
৪৬। কার্নো চক্র একটি প্রত্যাগামী চক্র।
৪৭। এনট্রপি রুদ্ধতাপ প্রক্রিয়ায় স্থির থাকে। এর একক জুল/কেলভিন ($JK^{-1}$)।
৪৮। এনট্রপি তাপ সঞ্চালনের দিক নির্দেশ করে। অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ায় এনট্রপি বৃদ্ধি পায়।

## অনুশীলনী

### (ক) বহুনির্বাচনি প্রশ্ন

১। একটি স্থির বিন্দু পদ্ধতিতে তাপমাত্রা পরিমাপের মূলনীতি ব্যবহৃত হয় নিম্নের কোন স্কেলে ? [রা. বো. ২০১৬]
ⓚ সেলসিয়াস
ⓚ রোমার
ⓖ কেলভিন
ⓖ ফারেনহাইট

২। তাপগতিবিদ্যার কোন সূত্রকে ভিত্তি করে থার্মো-মিটার তৈরি করা হয় ? [য. বো. ২০২১; ম. বো. ২০২১; চ. বো. ২০১৭; ব. বো. ২০১৭; য. বো. ২০১৫; Admission Test : Com. U. 2019-20; PUST 2017-18]
ⓚ শূন্যতম
ⓚ প্রথম
ⓖ দ্বিতীয়
ⓖ তৃতীয়

৩। কোন তাপমাত্রায় ফারেনহাইট ও কেলভিন স্কেলে একই পাঠ পাওয়া যায় ? [দি. বো. ২০১৫; Admisstion Test : BUTex. 2013-14; RUET, 2009–10; DU (7 Colleges) 2017-18; BRU, 2019-20; DU, 2019-20; JUST, 2015-16; MBSTU, 2015-16; DU 2019-20]
ⓚ – 40°
ⓚ 100°
ⓖ 287·13°
ⓖ 574·25°

৪। 501·85°C তাপমাত্রার সমতুল্য থার্মোডাইনামিক তাপমাত্রা কত? [চ. বো. ২০২১ (মান ভিন্ন); ম. বো. ২০২১ (মান ভিন্ন); BUET Admission Test, 2012–13]
ⓚ 775·91 K
ⓚ 774·85 K
ⓖ 775·00 K
ⓖ 228·85 K

৫। তিনটি সিস্টেম তাপীয় সাম্যাবস্থায় থাকলে তাদের নিচের কোন রাশিটি একই হবে ? [ম. বো. ২০২২; চ. বো. ২০১৫]
ⓚ ভর
ⓚ তাপমাত্রা
ⓖ অন্তঃস্থ শক্তি
ⓖ বিভব শক্তি

৬। তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্র নিচের কোন দুটির মধ্যে সম্পর্ক স্থাপন করে ? [ব. বো. ২০২১; সি. বো. ২০১৫; Admission Test : $RUG_1$ 2016–17; KU 2017-18; SAU 2010-11]
ⓚ বল ও শক্তি
ⓚ কাজ ও ক্ষমতা
ⓖ তাপ ও কাজ
ⓖ তাপ ও বল

৭। কোনো সিস্টেম পরিবেশ থেকে 800 J তাপশক্তি শোষণ করায় এর অন্তস্থ শক্তি 500 J বৃদ্ধি পায়। সিস্টেম কর্তৃক পরিবেশের ওপর কৃত কাজের পরিমাণ কত ? [কু. বো. ২০২২ (মান ভিন্ন); য. বো. ২০২১ (মান ভিন্ন); সি. বো. ২০১৯ (মান ভিন্ন)]
ⓚ 200 J
ⓚ 400 J
ⓖ 1500 J
ⓖ 300 J

৮। নিচের কোনগুলো তাপগতীয় চলক নির্দেশ করে ? [কু. বো. ২০১৬]
ⓚ P, V, T, M
ⓚ P, T, V, U
ⓖ P, V, T, S
ⓖ P, V, T, Q

৯। যদি 2 cal তাপ সম্পূর্ণরূপে কাজে রূপান্তরিত হয় তবে কাজের পরিমাণ কত ? [কু. বো. ২০১৬; CU-A Admission Test, 2020-21]
ⓚ 4·2 J
ⓚ 4·8 J
ⓖ 8·2 J
ⓖ 8·4 J

১০। নিচের কোন শক্তি অন্য শক্তিতে সহজে রূপান্তরিত হতে চায় না ? [চ. বো. ২০১৬]
ⓚ তাপ
ⓚ আলো
ⓖ শব্দ
ⓖ তড়িৎ

১১। তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্র নিচের কোনটির সংরক্ষণশীলতা নির্দেশ করে ? [চ. বো. ২০১৬; Admission Test : RU 2017-18; KU 2014-15; RU-C 2020-21 ]

ⓚ শক্তি
ⓚ চাপ
ⓖ চার্জ
ⓖ ভর

১২। 500 m উঁচু জলপ্রপাতের তলদেশ ও শীর্ষ দেশের পানির তাপমাত্রার পার্থক্য কত হবে? ($g = 10\ ms^{-2}$, পানির আপেক্ষিক তাপ = $4200\ Jkg^{-1}K^{-1}$) [ব. বো. ২০১৬]

ⓚ 0·50°C
ⓚ 1·19°C
ⓖ 5·0°C
ⓖ 50°C

১৩। শোষিত তাপ $\Delta Q = 700$ J এবং সম্পাদিত কাজ $\Delta W = 200$ J হলে কোনো সিস্টেমের অভ্যন্তরীণ শক্তি কত বৃদ্ধি পাবে ? [কু. বো. ২০২২ (মান ভিন্ন); য. বো. ২০২১ (মান ভিন্ন); দি. বো. ২০১৬; Admission Test : BUET 2021-22 (মান ভিন্ন); RU 2011-12 (মন ভিন্ন)]

ⓚ 900 J
ⓚ 700 J
ⓖ 600 J
ⓖ 500 J

১৪। গ্যাসের অভ্যন্তরীণ শক্তি নির্ভর করে কোন রাশির ওপর? [ঢা. বো. ২০২৩; RU Admission Test, 2016-17]

ⓚ চাপ
ⓚ তাপমাত্রা
ⓖ আয়তন
ⓖ এন্ট্রপি

নিচের তথ্য থেকে ১৫ ও ১৬নং প্রশ্নের উত্তর দাও :

একটি মোটর গাড়ির টায়ার 15°C তাপমাত্রায় 2 বায়ুমণ্ডলীয় চাপে পাম্প করার সময় টায়ারটি হঠাৎ ফেটে গেল।

১৫। উদ্দীপকের চূড়ান্ত তাপমাত্রা কত ? [KU Admission Test, 2013-14]

ⓚ – 27°C
ⓚ – 37°C
ⓖ – 42°C
ⓖ – 47°C

১৬। উদ্দীপকে টায়ারটি ফেটে যাওয়ায় তাপমাত্রা কত কমে যাবে ?

ⓚ 32° C
ⓚ 42° C
ⓖ 52° C
ⓖ 62° C

১৭। একটি জলপ্রপাত 900 মিটার উঁচু। যদি ধরা হয় পতিত পানির গতিশক্তির অর্ধেক তাপে পরিণত হয়, তাহলে তাপমাত্রা বৃদ্ধি কত হবে? [KUET Admission Test, 2016-17]

ⓚ 0·1°C
ⓚ 0·53°C
ⓖ 1°C
ⓖ 1·05°C
ⓤ 10·5°C

১৮। একটি ফুটবলের অভ্যন্তরে বায়ুর আয়তন 20 লিটার এবং চাপ 2 atm, বলটি হঠাৎ ফেটে গেল। এর ফলে ফুটবলস্থিত বায়ুর তাপমাত্রা ও আয়তন যথাক্রমে— [JU Admission Test, 2017-18]

ⓚ কমবে এবং বাড়বে
ⓚ বাড়বে এবং কমবে
ⓖ কমবে এবং কমবে
ⓖ বাড়বে এবং বাড়বে

১৯। একটি গাড়ি চলতে থাকলে এর টায়ারের ভেতর একটি তাপগতীয় প্রক্রিয়া চলে। এই প্রক্রিয়াটি হলো— [সি. বো. ২০২৩; Medical Admission Test, 2016-17; Admission Test : DU 2007-08; MBSTU 2017-18; KU 2018-19; Agri 2020-21]

ⓚ সমোষ্ণ প্রক্রিয়া
ⓚ রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়া
ⓖ সমআয়তন প্রক্রিয়া
ⓖ সমচাপ প্রক্রিয়া

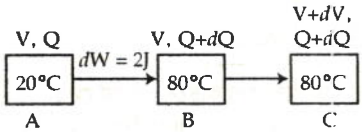
২০। এক কাপ গরম চায়ে একটি ঠান্ডা চামচ ডুবানো হলো কী ঘটে ? [কু. বো. ২০১৬]

ⓚ চামচের অন্তস্থ শক্তি বৃদ্ধি পায়
ⓚ চামচের অন্তস্থ শক্তি একই থাকে
ⓖ চা-এর অন্তস্থ শক্তি বৃদ্ধি পায়
ⓖ চামচের অন্তস্থ শক্তি একই থাকে

২১। কোনো গ্যাসের দুটি মোলার আপেক্ষিক তাপের অনুপাত একটি ধ্রুব রাশি। এই ধ্রুব রাশিকে যে প্রতীক দ্বারা প্রকাশ করা হয় তা হলো— [সকল বোর্ড ২০১৮; KU Admission Test, 2014-15]

ⓚ $\gamma$
ⓚ R
ⓖ $\lambda$
ⓖ K

উদ্দীপকের আলোকে ২২ ও ২৩নং প্রশ্নের উত্তর দাও : [য. বো. ২০১৬]



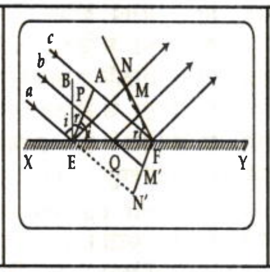

২২। $dQ = 5$ J হলে A থেকে B-তে অন্তস্থ পরিবর্তন কত ?

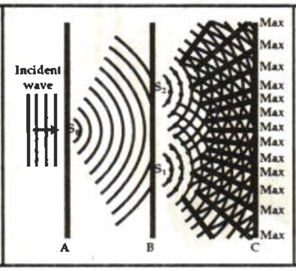
ⓚ – 3 J
ⓚ 0 J
ⓖ 3 J
ⓖ 7 J

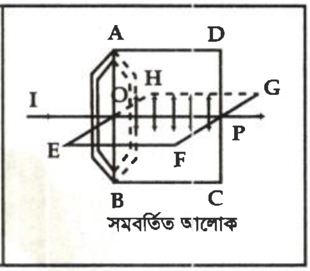
# ৭

# ভৌত আলোকবিজ্ঞান
# PHYSICAL OPTICS

**প্রধান শব্দ (Key Words) :** তড়িৎ চুম্বকীয় তরঙ্গ, পয়েন্টিং ভেক্টর, তড়িৎ চুম্বকীয় স্পেকট্রাম, তরঙ্গমুখ, আলোর ব্যতিচার, ইয়ং-এর দ্বি-চিড় পরীক্ষা, ব্যতিচার ঝালর, অপবর্তন, অপবর্তন গ্রেটিং, আলোর সমবর্তন, কম্পন তল, সরলাক্ষ, সমবর্তন তল।


## সূচনা
## Introduction

আমরা জানি, আলোক এক প্রকার শক্তি যা দর্শনানুভূতি জাগায় এবং তড়িৎ চুম্বকীয় তরঙ্গ আকারে এক স্থান থেকে অন্য স্থানে মাধ্যম ছাড়াও চলাচল করতে পারে। আলোর প্রকৃতি বা আচরণ ব্যাখ্যায় কণাতত্ত্ব, তরঙ্গতত্ত্ব, তড়িৎ চুম্বকীয় তত্ত্ব, কোয়ান্টাম ও দ্বৈত তত্ত্ব উদ্ভাবিত হয়েছে। এই সকল তত্ত্বের সাহায্যে আলোর প্রতিফলন, প্রতিসরণ, ব্যতিচার ও অপবর্তন ঘটনার ব্যাখ্যা দেওয়া সম্ভব হয়েছে। এই অধ্যায়ে আমরা আলোকের তরঙ্গ তত্ত্বের সাহায্যে উল্লিখিত ঘটনাগুলো ব্যাখ্যা করতে সক্ষম হব। হাইগেন, ফারমাট, ইয়ং প্রমুখ বিজ্ঞানীদের বিভিন্ন পরীক্ষালব্ধ ফলাফল দ্বারা আলোকীয় বিভিন্ন ঘটনা ব্যাখ্যা ও প্রমাণ করা যায়।

**এ অধ্যায় পাঠ শেষে শিক্ষার্থীরা—**

- তড়িৎ চুম্বকীয় তরঙ্গের বৈশিষ্ট্য ব্যাখ্যা করতে পারবে।
- আলোক তরঙ্গ তড়িৎ চুম্বকীয় স্পেকট্রামের অংশ ব্যাখ্যা করতে পারবে।
- তরঙ্গমুখের ধারণা ব্যাখ্যা করতে পারবে।
- তরঙ্গমুখ সৃষ্টিতে হাইগেনসের নীতির ব্যবহার করতে পারবে।
- হাইগেনসের নীতি ব্যবহার করে আলোর প্রতিফলন ও প্রতিসরণের সূত্র বিশ্লেষণ করতে পারবে।
- আলোর ব্যতিচার ব্যাখ্যা করতে পারবে।
- ইয়ং এর দ্বি-চিড় পরীক্ষা ব্যাখ্যা করতে পারবে।
- আলোর অপবর্তন ব্যাখ্যা করতে পারবে।
- আলোর সমবর্তন ব্যাখ্যা করতে পারবে।

## ৭·১ তড়িৎ চুম্বকীয় তরঙ্গ
## Electromagnetic wave

আমরা জানি, আলো এক প্রকারের শক্তি। স্বাভাবিকভাবে প্রশ্ন জাগে যে, এক স্থান থেকে অন্য স্থানে আলোর শক্তি কীভাবে স্থানান্তরিত হয় এবং শক্তির বিস্তার কীভাবে ঘটে ? শক্তির স্থানান্তর প্রক্রিয়া সম্পর্কে সপ্তদশ শতাব্দীতে দুটি মতবাদ উপস্থাপন করা হয়। প্রথমটি হলো নিউটনের কণিকা তত্ত্ব এবং দ্বিতীয়টি হাইগেন্‌স-এর তরঙ্গ তত্ত্ব।

তরঙ্গ তত্ত্বের বিভিন্ন অসঙ্গতি লক্ষ করে পরবর্তীকালে ম্যাক্সওয়েল 1860 খ্রিস্টাব্দে তড়িৎ চুম্বকীয় তত্ত্বের প্রবর্তন করেন। তড়িৎ চুম্বকীয় তরঙ্গ আলোচনা করার পূর্বে আমাদের আলোর তরঙ্গ তত্ত্ব সম্পর্কে জানা প্রয়োজন।

### ৭·১·১ আলোর তরঙ্গ তত্ত্ব
### Wave theory of light

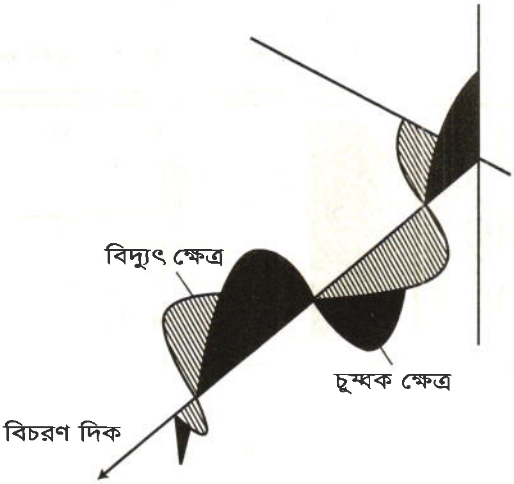
DAT(18-19)

স্যার আইজ্যাক নিউটনের সমসাময়িক ডাচ বিজ্ঞানী হাইগেন্‌স (Huygens) প্রথম 1678 খ্রিস্টাব্দে আলোর তরঙ্গ তত্ত্ব উপস্থাপন করেন। পরে ইয়ং, ফ্রেনেল এবং আরও অনেক বিজ্ঞানী এই তত্ত্বকে সুপ্রতিষ্ঠিত করেন। এই তত্ত্ব অনুসারে আলো ইথার নামক এক অলীক মাধ্যমের মধ্য দিয়ে তরঙ্গ আকারে সঞ্চারিত হয়ে এক জায়গা থেকে অন্য জায়গায় যায় এবং চোখে পৌঁছালে দর্শনানুভূতি সৃষ্টি করে।

এই তত্ত্বের সাহায্যে আলোর প্রতিফলন, প্রতিসরণ, ব্যতিচার, অপবর্তন ব্যাখ্যা করা যায় কিন্তু সমবর্তন, ফটো-তড়িৎ ক্রিয়া ব্যাখা করা যায় না। পরবর্তীকালে মাইকেলসন-মর্লির পরীক্ষায় প্রতিষ্ঠিত হয় যে, প্রকৃতিতে ইথার নামক কোনো বস্তুর অস্তিত্ব নেই।

### ৭·১·২ তড়িৎ চুম্বকীয় তরঙ্গ
**Electromagnetic wave**

1845 খ্রিস্টাব্দে ফ্যারাডে আবিষ্কার করেন যে একটি প্রবল চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রভাবে সমবর্তন তল ঘুরে যায়। এ ঘটনা **ফ্যারাডে ক্রিয়া** নামে পরিচিত। ফ্যারাডে ক্রিয়া আবিষ্কারের পরে বিজ্ঞানীরা সর্বপ্রথম ধারণা করলেন যে আলোকের সঙ্গে চুম্বকত্বের একটা গভীর সম্পর্ক রয়েছে। তড়িৎ চৌম্বক সম্পর্কীয় ফ্যারাডের সূত্রানুসারে, পরিবর্তনশীল চৌম্বক ক্ষেত্র দ্বারা তড়িৎ ক্ষেত্র উৎপন্ন হয়। তাই বলা যায় আলো এক ধরনের তড়িৎ চৌম্বক বিকিরণ। এই বিকিরণের সাথে দুইটি ক্ষেত্র জড়িত। একটি হলো পরিবর্তনশীল তড়িৎ ক্ষেত্র এবং অপরটি পরিবর্তনশীল চৌম্বক ক্ষেত্র। সুতরাং আলোকের সাথে তড়িতের এবং চুম্বকত্বের নিবিড় সম্পর্ক থাকা অস্বাভাবিক নয়। **জেমস ক্লার্ক ম্যাক্সওয়েল** 1864 খ্রিস্টাব্দে পরাবিদ্যুৎ (Dielectric) মাধ্যমে সরণ প্রবাহ (displacement current)-এর ওপর পরীক্ষালব্ধ ফলাফল থেকে প্রস্তাব করেন যে পরিবর্তনশীল তড়িৎ ক্ষেত্র দ্বারাও চৌম্বক ক্ষেত্র উৎপন্ন হয় [চিত্র ৭·১]। সংযুক্ত পরিবর্তনশীল তড়িৎ ক্ষেত্র $(\vec{E})$ ও চৌম্বক ক্ষেত্র $(\vec{B})$ শূন্যস্থানে এক প্রকার আলোড়ন সৃষ্টি করে। এ আলোড়নের তরঙ্গ গুণ রয়েছে। তরঙ্গ গুণসম্পন্ন এ আলোড়নকে তড়িৎ চুম্বকীয় তরঙ্গ বলে। ম্যাক্সওয়েল এ সিদ্ধান্তে উপনীত হন যে, স্পন্দন দ্বারা সৃষ্ট তড়িৎ চুম্বকীয় তরঙ্গের তড়িৎ ক্ষেত্র $(\vec{E})$ এবং চৌম্বক ক্ষেত্র $(\vec{B})$ একই সমতলে পরস্পরের ওপরে লম্ব এবং সমতল ক্ষেত্রের অভিলম্ব বরাবর তরঙ্গের শক্তি সঞ্চালিত হয়। এ তড়িৎ চুম্বকীয় তরঙ্গ শূন্যস্থানের মধ্য দিয়ে,



চিত্র ৭·১

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad (7.1)$$

বেগে চলে। এখানে $\epsilon_0$, শূন্য মাধ্যমের ভেদনযোগ্যতা এবং এর মান,

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \times 9 \times 10^9} \text{coul}^2 \text{N}^{-1}\text{m}^{-2} = 8{\cdot}85 \times 10^{-12} \text{coul}^2/\cancel{\text{N}^{-1}\text{m}^{-2}}$$ Nm²

এবং $\mu_0$ হলো শূন্য মাধ্যমে প্রবেশ্যতার ধ্রুবক এবং এর মান $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ NA$^{-2}$

সমীকরণ (7.1)-এ $\epsilon_0$ ও $\mu_0$-এর মান বসালে $c$-এর মান পাওয়া যায় $3 \times 10^{10}$ ms$^{-1}$। $\epsilon_0\mu_0$ এর একক $\frac{1}{c^2}$ এর একক $= \frac{1}{(\text{Velocity})^2} = \text{m}^{-2}\text{s}^2$

অর্থাৎ তড়িৎ চুম্বকীয় তরঙ্গ শূন্যস্থানে আলোর বেগে চলে। সুতরাং আলোক তরঙ্গ এবং তড়িৎ চুম্বকীয় তরঙ্গ অভিন্ন, পার্থক্য শুধু তরঙ্গদৈর্ঘ্যের। ম্যাক্সওয়েল এও প্রমাণ করেন যে, এ তরঙ্গ অনুপ্রস্থ (Transverse) তরঙ্গ। সংক্ষেপে বলা যায়, **শূন্যস্থান দিয়ে আলোর দ্রুতিতে গতিশীল তড়িৎ ও চৌম্বক আলোড়ন, যাতে তড়িৎ ও চৌম্বক ক্ষেত্র পরস্পর লম্ব এবং এরা উভয়ে তরঙ্গ সঞ্চালনের অভিমুখের সাথে লম্ব বরাবর থাকে তাকে তড়িৎ চুম্বকীয় তরঙ্গ বলে।** চৌম্বক ক্ষেত্র B এবং তড়িৎ ক্ষেত্র E এর তরঙ্গ সমীকরণ,

$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 \sin \frac{2\pi}{\lambda}(vt - x)$ এবং $\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \sin \frac{2\pi}{\lambda}(vt - x)$, এখানে $E_0$ হলো তড়িৎ ক্ষেত্রের বিস্তার বা শীর্ষমান এবং $B_0$ হলো চৌম্বক ক্ষেত্রের বিস্তার বা শীর্ষমান। তড়িৎ ও চৌম্বক ক্ষেত্রের এরকম পরস্পর লম্ব সমবায়কে বলা হয় শূন্য স্থানে তড়িৎ চৌম্বক তরঙ্গ। তড়িৎ ও চৌম্বক ক্ষেত্র সর্বদাই পরস্পর সমকোণে থাকে। এছাড়া এগুলো সঞ্চালনের অভিমুখের সাথেও সমকোণে থাকে। সুতরাং তড়িৎ চৌম্বক তরঙ্গ হলো আড় বা অনুপ্রস্থ তরঙ্গ।

ম্যাক্সওয়েলের তড়িৎ চুম্বকীয় তত্ত্ব অনুসারে তড়িৎ ক্ষেত্র ও চৌম্বক ক্ষেত্রের বিস্তারের মধ্যে নিম্নোক্ত সম্পর্ক রয়েছে, $E_0 = cB_0$ বা, $c = \frac{E_0}{B_0}$; এখানে, $E_0$ = তড়িৎ ক্ষেত্রের বিস্তার, $B_0$ = চৌম্বক ক্ষেত্রের বিস্তার এবং $c$ = আলোর বেগ।

ম্যাক্সওয়েলের তড়িৎ চুম্বকীয় তত্ত্ব অনুসারে বস্তুর গুণবিশিষ্ট কাল্পনিক ইথারের পরিবর্তে বৈদ্যুতিক গুণবিশিষ্ট তড়িৎ চৌম্বক ক্ষেত্রের মাধ্যমে আলোর তরঙ্গ সঞ্চালিত হয়ে থাকে। ম্যাক্সওয়েল দোলায়মান বৈদ্যুতিক কুণ্ডলী থেকে

আলোর গতিবেগের প্রায় সমান গতিবেগবিশিষ্ট তরঙ্গের নির্গমন লক্ষ করেন। ম্যাক্সওয়েলের এ আবিষ্কারের কয়েক বছর পরে জার্মান বিজ্ঞানী **হাইনরিখ হার্জ** ছোট আকারের স্পন্দিত বৈদ্যুতিক কুণ্ডলী হতে আলোক তরঙ্গের গুণাবলিসম্পন্ন ক্ষুদ্র তরঙ্গদৈর্ঘ্যের তরঙ্গ সৃষ্টি করতে সক্ষম হন এবং দেখান যে আলোর সব ধর্মই এই তরঙ্গের রয়েছে। এতে প্রমাণিত হয় যে, আলো তড়িৎ চুম্বকীয় তরঙ্গ ব্যতীত অন্য কিছু নয়। এভাবেই আলোকের তড়িৎ চুম্বকীয় তত্ত্বের উৎপত্তি ঘটে।

**জানা দরকার :** যদি কোনো মাধ্যমের আপেক্ষিক তড়িৎ ভেদ্যতা $\epsilon_r$ এবং আপেক্ষিক চৌম্বক প্রবেশ্যতা $\mu_r$ হয়, তবে ওই মাধ্যমে তরঙ্গের তড়িচ্চুম্বকীয় তরঙ্গের গতিবেগের রাশিমালা, $v = \dfrac{1}{\sqrt{\mu_0\mu_r\epsilon_0\epsilon_r}}$।

## ৭·১·৩ পয়েন্টিং ভেক্টর
**Poynting vector**

তড়িৎ চুম্বকীয় তরঙ্গের একটি প্রধান বৈশিষ্ট্য হলো এই যে এই তরঙ্গ এক স্থান থেকে অন্য স্থানে শক্তি বহন করতে পারে। **কোনো তড়িৎ চুম্বক তরঙ্গের গতিপথে লম্বভাবে স্থাপিত কোনো একক ক্ষেত্রফলের মধ্য দিয়ে যে পরিমাণ শক্তি অতিক্রম করে তাকে পয়েন্টিং ভেক্টর বলে।** একে $(\vec{S})$ দ্বারা চিহ্নিত করা হয়। তড়িৎ ক্ষেত্র $\vec{E}$, চৌম্বক ক্ষেত্র $\vec{B}$ এবং পয়েন্টিং ভেক্টর $\vec{S}$-এর মধ্যে গাণিতিক সম্পর্ক হলো

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0}\vec{E} \times \vec{B} \qquad \ldots \qquad \ldots \qquad \ldots \qquad (7.2)$$

বা, $$S = \frac{EB\sin 90^\circ}{\mu_0}$$

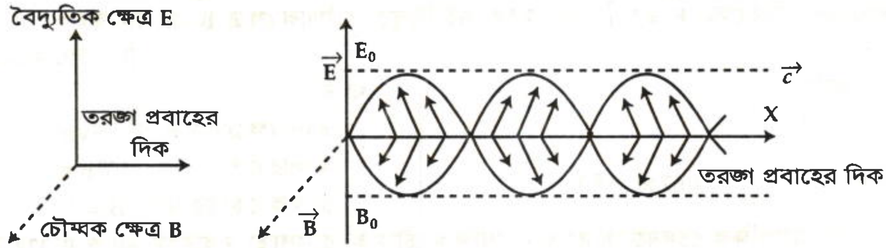
বা, $$S = EH, \qquad \left[\because H = \frac{B}{\mu_0}\right]$$

$$\therefore \boxed{\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}} \qquad \ldots \qquad \ldots \qquad \ldots \qquad (7.3)$$

এবং একক হলো ওয়াট/মিটার$^2$ বা জুল/সেকেন্ড/মিটার$^2$। যেহেতু S একটি ভেক্টর রাশি এর দিক হবে যে দিকে শক্তি স্থানান্তরিত হয় সেদিকে। সমীকরণ (7.2) $\vec{E}$ এবং $\vec{B}$ এর তাৎক্ষণিক মান ও দিক নির্দেশ করে। পয়েন্টিং ভেক্টরের মাত্রা $MT^{-3}$।

ম্যাক্সওয়েলের বিদ্যুৎ চুম্বকীয় তত্ত্বে বলা হয়েছে যে একটি পরিবর্তী চৌম্বক ক্ষেত্রের সাথে একই সঙ্গে সর্বদা সমদশায় কিন্তু সমকোণে একটি পরিবর্তী বিদ্যুৎ ক্ষেত্র স্পন্দনশীল হলে একটি বিদ্যুৎ চুম্বকীয় তরঙ্গ উক্ত ক্ষেত্রের সমকোণে তীব্র বেগে গমন করে।

চিত্র ৭·২-এ ভেক্টর $\vec{E}$ বিদ্যুৎ ক্ষেত্র ও ভেক্টর $\vec{B}$ চৌম্বক ক্ষেত্র নির্দেশ করছে এবং তরঙ্গের বেগ ভেক্টর $\vec{c}$ পরস্পর সমকোণে প্রদর্শিত হয়েছে।




চিত্র ৭·২

**তড়িৎ চুম্বকীয় তত্ত্বের সাহায্যে আলোর সমবর্তন ক্রিয়া ব্যাখ্যা করা যায়। কিন্তু আলোক তড়িৎ ক্রিয়া ব্যাখ্যা করা যায় না।** আলোক তড়িৎ ক্রিয়া, কৃষ্ণ বস্তুর বিকিরণ ইত্যাদি ব্যাখ্যা করার জন্য 1900 খ্রিস্টাব্দে বিখ্যাত জার্মান বিজ্ঞানী **ম্যাক্স প্লাঙ্ক** কোয়ান্টাম তত্ত্ব উপস্থাপন করেন।

**কাজ :** আলোর প্রকৃতি সম্বন্ধে বিভিন্ন তত্ত্বের উল্লেখ কর।

আলোকের প্রকৃতি সম্বন্ধে যেসব তত্ত্ব উদ্ভাবিত হয়েছে সেগুলো হলো— ***

**(i) নিউটনের কণিকা তত্ত্ব :** এই তত্ত্বের সাহায্যে ঋজুগতি প্রতিফলন, প্রতিসরণ এবং আলোক তড়িৎ ক্রিয়া ব্যাখ্যা করা যায়; কিন্তু ব্যতিচার, সমবর্তন, অপবর্তন, বিচ্ছুরণ ব্যাখ্যা করা যায় না।

(ii) হাইগেনের তরঙ্গ তত্ত্ব : এই তত্ত্বের সাহায্যে প্রতিফলন, প্রতিসরণ, ব্যতিচার, অপবর্তন ব্যাখ্যা করা যায়; কিন্তু সমবর্তন ব্যাখ্যা করা যায় না।

(iii) ম্যাক্সওয়েলের তড়িৎ চুম্বকীয় তত্ত্ব : এই তত্ত্বের সাহায্যে আলোর সমবর্তন ব্যাখ্যা করা যায়; কিন্তু ফটো-তড়িৎ ক্রিয়া ব্যাখ্যা করা যায় না।

(iv) আইনস্টাইনের কোয়ান্টাম তত্ত্ব : এই তত্ত্বের সাহায্যে কৃষ্ণবস্তু বিকিরণ, ফটো-তড়িৎ ক্রিয়া ব্যাখ্যা করা যায়; কিন্তু ব্যতিচার, অপবর্তন, সমবর্তন ব্যাখ্যা করা যায় না।

## ৭·১·৪ তড়িৎ চুম্বকীয় তরঙ্গের বৈশিষ্ট্য
**Characteristics of electromagnetic wave**

১। তড়িৎ চুম্বকীয় তরঙ্গ তড়িৎ ক্ষেত্র $\vec{E}$ ও চৌম্বক ক্ষেত্র $\vec{B}$ -এর পর্যায়বৃত্ত পরিবর্তনের ফলে উৎপন্ন হয়।

২। তরঙ্গ সঞ্চালনের অভিমুখ $\vec{E}$ ও $\vec{B}$ উভয়ের ওপর লম্ব। তাই তড়িচ্চুম্বকীয় তরঙ্গ আড় তরঙ্গ।

৩। তড়িৎ চুম্বকীয় তরঙ্গের সঞ্চালনের জন্য কোনো মাধ্যমের প্রয়োজন হয় না।

৪। তড়িচ্চুম্বকীয় বিকিরণের তীব্রতা দূরত্বের বর্গের ব্যস্তানুপাতে হ্রাস পায়। অর্থাৎ

$E \propto \frac{1}{r^2}$, এখানে E হলো তড়িচ্চুম্বকীয় বিকিরণের তীব্রতা এবং $r$ হলো উৎস হতে দূরত্ব। সুতরাং, দূরত্ব দ্বিগুণ বৃদ্ধি পেলে তীব্রতা চারগুণ হ্রাস পাবে।

৫। তড়িচ্চুম্বকীয় সকল বিকিরণের জন্য তরঙ্গের বেগ $c$, তরঙ্গদৈর্ঘ্য $\lambda$ ও কম্পাঙ্ক $\upsilon$-এর মধ্যে নিম্নোক্ত সম্পর্ক প্রযোজ্য :

$$c = \upsilon\lambda$$

৬। শূন্য মাধ্যমে এই তরঙ্গের বেগ $3 \times 10^8\ \text{ms}^{-1}$

## ৭·১·৫ আলোক বর্ষ
**Light year, (ly)**

এক বছরে আলোক রশ্মি যে দূরত্ব অতিক্রম করে তাকে 1 আলোক বর্ষ বলে।

বিভিন্ন নক্ষত্রের অবস্থান এবং দূরত্ব প্রকাশের জন্য এই একক ব্যবহার করা হয়।

1 আলোক বর্ষ = শূন্য মাধ্যমে আলোকের গতি বেগ × 1 বছরের সেকেন্ড সংখ্যা

$= 3 \times 10^8\ \text{ms}^{-1} \times 365 \times 24 \times 60 \times 60\ \text{s}$

$= 9.46 \times 10^{15}\ \text{m} = 9.46 \times 10^{12}\ \text{km}$ MAT(24-25)

এটি দূরত্ব পরিমাপের একক খুবই বড়। নভোমণ্ডলীর পরিমাপে এই একক ব্যবহার করা হয়।

## গাণিতিক উদাহরণ ৭.১

**১। একটি তড়িচ্চুম্বকীয় তরঙ্গ 20 MHz কম্পাঙ্কসহ মুক্ত স্থানে Z অক্ষ বরাবর সঞ্চালিত হচ্ছে। কোনো নির্দিষ্ট বিন্দুতে এর তড়িৎ ক্ষেত্র $\vec{E} = 5\hat{i}\ \text{Vm}^{-1}$ হলে, ওই বিন্দুতে চৌম্বক ক্ষেত্র $\vec{B}$-এর মান কত?**

[ঢা. বো. ২০২১ (মান ভিন্ন)]

আমরা জানি,

$$B = \frac{E}{c}$$

বা, $B = \frac{5}{3 \times 10^8} = 1.67 \times 10^{-8}\ \text{T}$

এখানে,
তড়িৎ ক্ষেত্রের মান, $E = 5\text{Vm}^{-1}$
আলোর বেগ, $c = 3 \times 10^8\ \text{ms}^{-1}$
চৌম্বক ক্ষেত্রের মান, B = ?

**২। পানির আপেক্ষিক ভেদনযোগ্যতা ও আপেক্ষিক চৌম্বক প্রবেশ্যতা যথাক্রমে 80 ও 0.022 হলে পানিতে আলোর দ্রুতি নির্ণয় কর। [শূন্য মাধ্যমে আলোর দ্রুতি = $3 \times 10^8\ \text{ms}^{-1}$]**

আমরা জানি,

$$c_w = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{1}{\sqrt{K_m\mu_0K_e\epsilon_0}} = \frac{1}{\sqrt{K_mK_e}} \times \frac{1}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{K_mK_e}} \times c \quad \left[\because c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}}\right]$$

$$= \frac{1}{\sqrt{0.022 \times 80}} \times 3 \times 10^8 = 2.26 \times 10^8\ \text{ms}^{-1}$$

এখানে,
আপেক্ষিক ভেদনযোগ্যতা, $K_e = 80$
আপেক্ষিক চৌম্বক প্রবেশ্যতা, $K_m = 0.022$
শূন্য মাধ্যমে আলোর দ্রুতি, $c = 3 \times 10^8\ \text{ms}^{-1}$
পানিতে আলোর দ্রুতি, $c_w = ?$

**৩। একটি তড়িচ্চুম্বকীয় তরঙ্গের তড়িৎ ক্ষেত্রের সমীকরণ হলো $E = 10^{-4} \sin(12 \times 10^{13} t - 4 \times 10^5 x)$। তরঙ্গটির কম্পাঙ্ক, বেগ ও তরঙ্গদৈর্ঘ্য নির্ণয় কর। তরঙ্গটির সংশ্লিষ্ট চৌম্বক ক্ষেত্রের সমীকরণটি লিখ। (প্রতিটি রাশি S.I. এককে প্রকাশিত)**

এখানে তড়িৎক্ষেত্রের সমীকরণ,

$$E = 10^{-4} \sin(12 \times 10^{13} t - 4 \times 10^5 x) \quad \ldots \quad \ldots \quad (i)$$

তড়িৎক্ষেত্রের সাধারণ সমীকরণ,

$$E = E_0 \sin(\omega t - kx) \quad \ldots \quad \ldots \quad (ii)$$

সমীকরণ (i) ও (ii) তুলনা করে পাই,

$$\omega = 12 \times 10^{13} \quad \text{বা, } 2\pi n = 12 \times 10^{13}$$

$$\therefore n = \frac{12 \times 10^{13}}{2\pi} = \frac{12 \times 10^{13}}{2 \times 3{\cdot}14} = 1{\cdot}9 \times 10^{13} \text{ Hz}$$

তরঙ্গটির বেগ,

$$c = n\lambda = \frac{2\pi n}{\frac{2\pi}{\lambda}} = \frac{w}{k} = \frac{12 \times 10^{13}}{4 \times 10^5} = 3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1} \quad [\text{এখানে, } k = 4 \times 10^5]$$

এবং তরঙ্গদৈর্ঘ্য, $\lambda = \frac{c}{n} = \frac{3 \times 10^8}{1{\cdot}9 \times 10^{13}} = 1{\cdot}58 \times 10^{-5}$ m

সংশ্লিষ্ট চৌম্বক ক্ষেত্রের সমীকরণ,

$$B = B_0(\omega t - kx) = \frac{E_0}{c} \sin(\omega t - kx) \quad \left[\because \frac{E_0}{B_0} = c\right]$$

$$= \frac{10^{-4}}{3 \times 10^8} \sin(12 \times 10^{13} t - 4 \times 10^5 x) \text{ T}$$

$$= 3{\cdot}33 \times 10^{-13} \sin(12 \times 10^{13} t - 4 \times 10^5 x) \text{ T}$$

### ৭·১·৬ দৃশ্যমান আলোর বর্ণালি MAT(21-22) , DAT(19-20)
**Spectrum of visible light**

সূর্যের সাদা আলো 7টি বর্ণের সমন্বয়ে গঠিত। এগুলো হলো—বেগুনি, নীল, আসমানি, সবুজ, হলুদ, কমলা ও লাল। বর্ণগুলোর নাম ও ক্রম সহজে মনে রাখার জন্য এদের নামের আদ্যক্ষরগুলো নিয়ে বাংলায় বেনীআসহকলা ও ইংরেজিতে VIBGYOR শব্দ গঠন করা হয়েছে। এই বর্ণগুলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সীমা নিচে দেওয়া হলো :

| | |
|---|---|
| বেগুনি | $3{\cdot}80 \times 10^{-7}$ m থেকে $4{\cdot}25 \times 10^{-7}$ m |
| নীল | $4{\cdot}25 \times 10^{-7}$ m থেকে $4{\cdot}45 \times 10^{-7}$ m |
| আসমানি | $4{\cdot}45 \times 10^{-7}$ m থেকে $5{\cdot}00 \times 10^{-7}$ m |
| সবুজ | $5{\cdot}00 \times 10^{-7}$ m থেকে $5{\cdot}75 \times 10^{-7}$ m |
| হলুদ | $5{\cdot}75 \times 10^{-7}$ m থেকে $5{\cdot}85 \times 10^{-7}$ m |
| কমলা | $5{\cdot}85 \times 10^{-7}$ m থেকে $6{\cdot}20 \times 10^{-7}$ m |
| লাল | $6{\cdot}20 \times 10^{-7}$ m থেকে $7{\cdot}80 \times 10^{-7}$ m |

## ৭·২ তড়িৎ চুম্বকীয় স্পেকট্রাম বা বর্ণালি
**Electromagnetic spectrum**

যেকোনো পর্যাবৃত্ত (Periodic) তরঙ্গের কম্পাঙ্ক $\upsilon$ এবং তরঙ্গদৈর্ঘ্য $\lambda$ রয়েছে। পর্যাবৃত্ত তরঙ্গের কম্পাঙ্ক ও তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সঙ্গে তরঙ্গের গতিবেগের সম্পর্ক হলো,

$$v = \lambda\upsilon \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad (7.4)$$

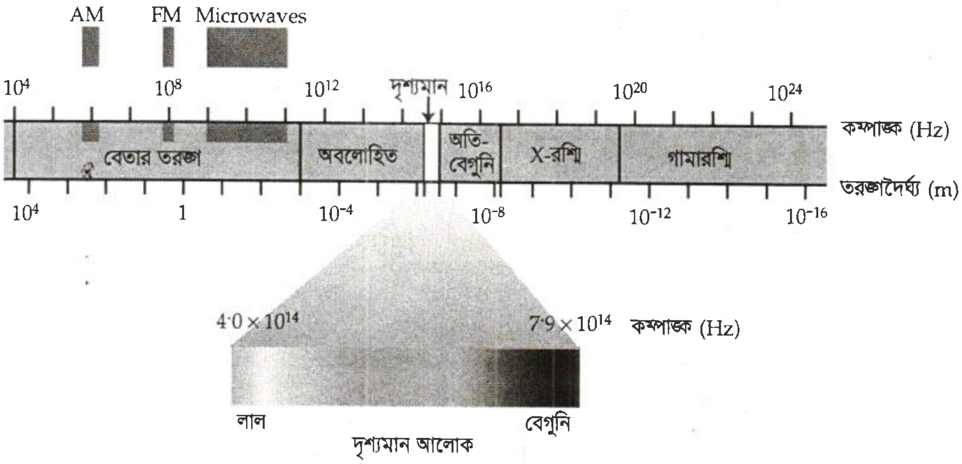
তড়িৎ চুম্বকীয় তরঙ্গের শূন্য বা বায়ু মাধ্যমে সঞ্চালন ক্ষেত্রে তরঙ্গের গতিবেগ আলোর গতিবেগের সমান। অর্থাৎ $v = c$। সুতরাং, $c = \lambda\upsilon \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad (7.5)$

তড়িৎ চুম্বকীয় তরঙ্গের কম্পাঙ্কের প্রসার বা পাল্লা (range) অত্যন্ত বেশি। এর প্রসারতা $10^4$ Hz বা সাইকেল/সেকেন্ড-এর কম মান থেকে শুরু করে $10^{23}$ Hz বা সাইকেল/সেকেন্ড-এর উর্ধ্বে পর্যন্ত বিস্তৃত। এই পরিসরকে তড়িৎ-চুম্বকীয় বর্ণালি (Electromagnetic spectrum) বলে। তড়িৎ চুম্বকীয় তরঙ্গের বিভিন্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্যের পার্থক্য

RMDAC

অনুসারে বহু আগে থেকেই বিভিন্ন নামকরণ প্রচলিত আছে। যেমন— রেডিও তরঙ্গ, অবলোহিত তরঙ্গ, দৃশ্যমান তরঙ্গ, এক্স রশ্মি, গামা রশ্মি ইত্যাদি। অবশ্য এদের মধ্যে সুনির্দিষ্ট সীমারেখা নেই; বরং আংশিক উপরিপাত রয়েছে। নামকরণ এবং তরঙ্গদৈর্ঘ্যের পার্থক্য অনুসারে বিভিন্ন তরঙ্গের পরিসর চিত্র ৭.৩ ও সারণি ১-এ দেয়া হলো।

**দৃশ্যমান আলো :** তড়িৎ চুম্বকীয় বর্ণালির মধ্যে আমাদের সবচেয়ে পরিচিত অংশ হলো দৃশ্যমান আলোক। এর ব্যাপ্তি খুবই সামান্য। মাত্র $7.8 \times 10^{-7}$ m থেকে $3.9 \times 10^{-7}$ m তরঙ্গদৈর্ঘ্যের বা $3.8 \times 10^{14}$ Hz থেকে $7.7 \times 10^{14}$ Hz কম্পাঙ্কের মধ্যে। আমাদের চোখ শুধুমাত্র এটুকু তরঙ্গদৈর্ঘ্যের বা কম্পাঙ্কের তড়িৎ চৌম্বক তরঙ্গের প্রতি সংবেদনশীল। আমাদের চোখ বা মস্তিষ্ক ভিন্ন ভিন্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আলোক রশ্মিকে ভিন্ন ভিন্ন রঙে দেখে থাকে। এটি




চিত্র ৭.৩

বিকিরণের একটি ক্ষুদ্র পট্টি বা ব্যান্ড, যার মধ্যে আছে লাল ও বেগুনি আলো। লাল রঙের আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য প্রায় $7.5 \times 10^{-7}$ m, আবার বেগুনি রঙ-এর আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য প্রায় $3.8 \times 10^{-7}$ m।

**উৎস :** পদার্থের অণু-পরমাণু সব ধরনের বর্ণালির মূল উৎস। যখন কোনো বস্তুর ওপর কোনো নির্দিষ্ট কম্পাঙ্কের আলোক আপতিত হয় তখন এ আলোকের তড়িৎ চৌম্বক ক্ষেত্র এবং আণবিক পরিবর্তন, পরমাণুর ইলেকট্রনের কক্ষীয় অবস্থানের পরিবর্তন বা নিউক্লীয় পরিবর্তন দ্বারা উৎপন্ন তড়িৎ বা চৌম্বক ক্রিয়ার মধ্যে এক ধরনের পারস্পরিক কর্মকাণ্ড সংঘটিত হয়। এরূপ কর্মকাণ্ডের ফলে সৃষ্ট শক্তির স্তরের পরিবর্তন ঘটে এবং বর্ণালি সৃষ্টি হয়। এভাবে বিভিন্ন ধরনের বর্ণালির সৃষ্টি হয়। [ সারণি ১ : তড়িৎ চুম্বকীয় বর্ণালির বৈশিষ্ট্যমূলক ছক দ্রষ্টব্য ]

Upto Infinity

MAT(16-17,21-22)
DAT(20-21,22-23)

**সারণি ১ : তড়িৎ চুম্বকীয় বর্ণালির বৈশিষ্ট্যমূলক ছক**

| তরঙ্গ পট্টি | তরঙ্গদৈর্ঘ্যের পরিসর | নিঃসরণকারী উৎস | নিঃসরণের কারণ | বৈজ্ঞানিক প্রয়োগ / ব্যবহার |
|---|---|---|---|---|
| বেতার তরঙ্গ | $10^{-4}$m থেকে $5 \times 10^4$ m | (i) এ্যান্টেনার মধ্যে দোলায়িত তড়িৎ আধান (ii) স্পন্দিত তড়িৎ বর্তনী (oscillating electric circuit) | (i) উচ্চ কম্পাঙ্কের স্পন্দিত তড়িৎ প্রবাহ (ii) পরমাণুস্থ ইলেকট্রনের খুবই ক্ষুদ্র পরিমাণ শক্তির পরিবর্তনের জন্য | বিভিন্ন ধরনের বেতার যোগাযোগ ব্যবস্থা অর্থাৎ দূরবর্তী স্থানে স্পন্দিত ছবি প্রেরণের জন্য বেতার তরঙ্গ ব্যবহৃত হয়। |
| মাইক্রোওয়েভ তরঙ্গ | $10^{-1}$m থেকে $10^{-3}$ m | (i) ক্লাইস্ট্রন (Klystron) ও ম্যাগনেট্রন (Magnetron) নামে বিশেষ ধরনের বালব। (ii) মেসার (Microwave Amplifications by Stimulated Emission of Radiation এর সংক্ষিপ্ত নাম MASER)। মেসার অর্থ হলো বিকিরণের উদ্দীপিত নিঃসরণ দ্বারা মাইক্রোওয়েভ বিবর্ধন। | স্থায়ী তড়িৎ দ্বিমেরু ভ্রামক-সম্পন্ন দ্বিপরমাণুর ঘূর্ণনের ফলে মাইক্রোওয়েভ বর্ণালির উৎপত্তি হয়। | রাডার যন্ত্রে, নৌ ও বিমান চালনায়, রেডিও যোগাযোগ ব্যবস্থায়, শিল্প কারখানায় এই তরঙ্গ ব্যবহৃত হয়। এই ছাড়া খাবার গরম করা ও রান্নার কাজে মাইক্রোওভেন ব্যবহৃত হয়। |

| তরঙ্গ পট্টি | তরঙ্গদৈর্ঘ্যের পরিসর | নিঃসরণকারী উৎস | নিঃসরণের কারণ | বৈজ্ঞানিক প্রয়োগ / ব্যবহার |
|---|---|---|---|---|
| অবলোহিত রশ্মি | $10^{-3}$m থেকে $4 \times 10^{-7}$m<br>MAT(12-13) | (i) উত্তপ্ত সকল বস্তু হতে কমবেশি অবলোহিত রশ্মি নির্গত হয়।<br>(ii) আই. আর. (IR) ল্যাম্প নামে বিশেষ ধরনের বাতি থেকে পাওয়া যায়।<br>(iii) সূর্যরশ্মি থেকে পাওয়া যায়। | (i) পরমাণুস্থ ইলেকট্রনের ক্ষুদ্র পরিমাণ শক্তির পরিবর্তনের জন্য।<br>(ii) স্থায়ী তড়িৎ দ্বিমেরু ভ্রামকসম্পন্ন ত্রিপরমাণুর কম্পনের ফলে | বিভিন্ন রোগের চিকিৎসায়, জ্যোতির্বিদ্যায়, শিল্প কারখানায় এই রশ্মি ব্যবহৃত হয়। অন্ধকারে দেখার জন্য নাইট গগলস হিসেবে এবং অন্ধকারে ছবি তোলার জন্য এই রশ্মির ক্যামেরা ব্যবহার করা হয়। মাংসপেশীর DAT(21-2 ব্যথা ও টান এর চিকিৎসায় ব্যবহৃত হয়। ঘন কুয়াশার মধ্যে ছবি তুলতে অবলোহিত রশ্মি ব্যবহার করা হয়। এই রশ্মির কম্পাঙ্ক সবচেয়ে কম। |
| দৃশ্যমান আলো<br>বেগুনি..........<br>নীল ...........<br>আসমানি.......<br>সবুজ..........<br>হলুদ .........<br>কমলা.........<br>লাল........... | $7 \times 10^{-7}$m থেকে $4 \times 10^{-7}$m<br>$3{\cdot}8 \times 10^{-7}$m–$4{\cdot}25 \times 10^{-7}$m<br>$4{\cdot}25 \times 10^{-7}$m –$4{\cdot}45 \times 10^{-7}$m<br>$4{\cdot}45 \times 10^{-7}$m– $5 \times 10^{-7}$m<br>$5 \times 10^{-7}$m–$5{\cdot}75 \times 10^{-7}$m<br>$5{\cdot}75 \times 10^{-7}$m– $5{\cdot}85 \times 10^{-7}$m<br>$5{\cdot}85 \times 10^{-7}$m–$6{\cdot}20 \times 10^{-7}$m<br>$6{\cdot}20 \times 10^{-7}$m –$7{\cdot}8 \times 10^{-7}$ m | বিভিন্ন ধরনের বাতি, অগ্নিশিখা, লেজার, ভাস্বর যে কোনো বস্তু, সূর্যরশ্মি ইত্যাদি হতে পাওয়া যায়। | (i) পরমাণুস্থ ইলেকট্রনের উত্তেজিত অবস্থান হতে স্থায়ী অবস্থানে ফিরে আসার সময় নির্গত বিকিরণ হতে দৃশ্যমান আলো পাওয়া যায়। | যেকোনো কিছু দেখার কাজে আমাদের চোখ এই আলো ব্যবহার করে। উদ্ভিদে সালোক সংশ্লেষণ প্রক্রিয়ায় গুরুত্বপূর্ণ ভূমিকা রাখে। ফটোগ্রাফিক ফিল্ম প্রভাবিত করে। |
| অতিবেগুনি রশ্মি | $5 \times 10^{-7}$ m থেকে<br>$5 \times 10^{-9}$m | খুবই উত্তপ্ত বস্তু যেমন তড়িৎ বিচ্ছুরণ (electric arc), কোয়ার্টজ টিউবের ভেতরে পারদ গ্যাসের মধ্য দিয়ে তড়িৎক্ষরণের ফলে এবং সূর্য রশ্মি হতে পাওয়া যায়। | পরমাণুস্থ ইলেকট্রনের বিভিন্ন স্তরের মধ্যে উচ্চ শক্তির পরিবর্তনের জন্য। | আয়নায়ন ঘটানোর কাজে, প্রতিপ্রভ সৃষ্টিতে ব্যবহৃত হয়। রাসায়নিক বিক্রিয়া ঘটানোর কাজে, ফটো-ইলেকট্রিক ক্রিয়া সংঘটনে, ফটোগ্রাফিক ফিল্ম প্রভাবিত করার কাজে, অণুবীক্ষণ যন্ত্রের বিশ্লেষণ ক্ষমতা বৃদ্ধির কাজে এবং শরীরে ভিটামিন D তৈরির কাজে ব্যবহৃত হয়। |
| এক্স-রে<br>(X-ray) | $5 \times 10^{-8}$m থেকে<br>$5 \times 10^{-15}$m | এক্সরে টিউব | (i) এক্সরে টিউবে উচ্চ গতির ইলেকট্রনকে মন্দন সৃষ্টির মাধ্যমে এই রশ্মি তৈরি করা হয়।<br>(ii) ভারী মৌলের পরমাণুকে উচ্চ শক্তির ইলেকট্রন দ্বারা আঘাত করলে পরমাণুর গভীরে অবস্থিত ইলেকট্রনের উত্তেজনার দ্বারা এই রশ্মি সৃষ্টি হয়। | চিকিৎসা ক্ষেত্রে, গবেষণা কাজে, শিল্প কারখানায়, নিরাপত্তার কাজে, চোরা-চালান নিরোধে এক্স-রে ব্যবহৃত হয়। |

| তরঙ্গ পট্টি | তরঙ্গদৈর্ঘ্যের পরিসর | নিঃসরণকারী উৎস | নিঃসরণের কারণ | বৈজ্ঞানিক প্রয়োগ / ব্যবহার |
|---|---|---|---|---|
| গামা রশ্মি | $5 \times 10^{-11}$m থেকে $5 \times 10^{-15}$m বা এর চেয়ে কম। | (i) তেজস্ক্রিয় বস্তু হতে (ii) নিউক্লীয় ফিশন ও ফিউশন বিক্রিয়ায় (iii) মৌলিক কণার মিথস্ক্রিয়ায় এই রশ্মি নির্গত হয়। | (i) পরমাণুর নিউক্লিয়াস উত্তেজিত হয়ে উচ্চ শক্তি স্তর হতে নিম্ন শক্তি স্তরে স্থানান্তরের ফলে এই রশ্মি নির্গত হয়। (ii) তেজস্ক্রিয় পরমাণুর বিশ্লেষণের সময় এই রশ্মি নির্গত হয়। (iii) সূর্যের মধ্যে ফিউশন বিক্রিয়ার কারণে গামা রশ্মি উৎপন্ন হয়। | চিকিৎসা ক্ষেত্রে বিভিন্ন রোগ নির্ণয়ে, বিজ্ঞানাগারে গবেষণার কাজে, ধাতব পদার্থের খুঁত নির্ণয়ে এই রশ্মি ব্যবহৃত হয়। মানব দেহে ক্যান্সার আক্রান্ত সেলকে ধ্বংস করতে এই রশ্মি ব্যবহৃত হয়। |

**কাজ : নিম্নলিখিত বিস্তৃত শ্রেণির তরঙ্গসমূহকে তরঙ্গদৈর্ঘ্যের ক্রম অনুযায়ী সাজাও (বড় থেকে ছোট)। দৃশ্যমান আলোক রশ্মি, অতিবেগুনি রশ্মি, অবলোহিত রশ্মি, টিভি ও রেডিও তরঙ্গ, γ-রশ্মি, X-রশ্মি।**

(i) রেডিও এবং টিভি তরঙ্গ, (ii) অবলোহিত রশ্মি, (iii) দৃশ্যমান আলোক রশ্মি, (iv) অতিবেগুনী রশ্মি, (v) X-রশ্মি এবং (vi) γ-রশ্মি।

**জানার বিষয় :** I. মহাজাগতিক রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য $<10^{-14}$ m

II. $\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$ এর একক $m^{-1}s$

III. তড়িৎ চৌম্বক তরঙ্গ হলো আড় বা অনুপ্রস্থ তরঙ্গ।

IV. $c = \frac{E_0}{B_0}$ ($\bar{V}$) বায়ু শূন্য স্থানে তড়িৎ চুম্বকীয় তরঙ্গের বেগ $\frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}}$.

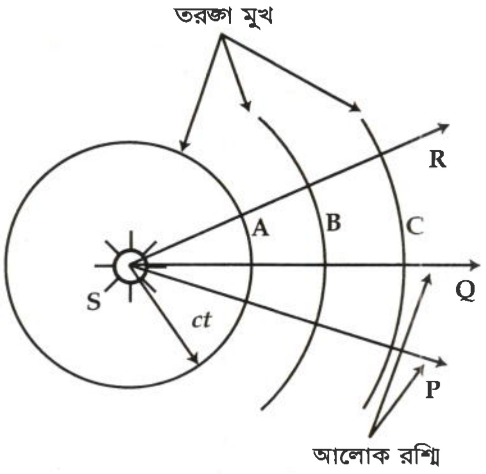
## ৭.৩ তরঙ্গমুখ
### Wave front

আমরা জানি, কোনো একটি মাধ্যমের বিভিন্ন কণার সম্মিলিত কম্পনের ফলে মাধ্যমে একটি আলোড়ন সৃষ্টি হয়। এই আলোড়নকে তরঙ্গ বলে। যেমন পুকুরের স্থির পানিতে ঢিল ছুঁড়লে তরঙ্গ উৎপন্ন হয় যা উৎপন্ন স্থান থেকে চারদিকে ছড়িয়ে পড়ে। তরঙ্গমুখের নিম্নলিখিত যেকোনো একটি সংজ্ঞা দেয়া যেতে পারে—

**(ক) তরঙ্গস্থিত সমদশাসম্পন্ন কণাগুলো যে তলে অবস্থান করে, তাকে সৃষ্ট তরঙ্গের তরঙ্গমুখ বলে।**

**(খ) যেকোনো সময়ে একই দশায় থাকা বিন্দুগুলো যে রেখা বা তলের ওপর অবস্থিত তাকে তরঙ্গমুখ বলে।**

**ব্যাখ্যা :** মনে করি কোনো সমসত্ত্ব (isotropic) মাধ্যমে অবস্থিত S একটি ক্ষুদ্র আলোক উৎস। উৎসের অণুগুলোর কম্পনে উৎপন্ন আড় তরঙ্গ মাধ্যমের চারদিকে ছড়িয়ে পড়বে। আলোকের বেগ $c$ হলে $t$ সেকেন্ড সময়ে আলোর তরঙ্গ S হতে বিভিন্ন দিকে $ct$ পরিমাণ দূরত্ব অতিক্রম করবে। এখন S-কে কেন্দ্র করে $ct$ ব্যাসার্ধ নিয়ে একটি গোলক অঙ্কন করলে ওই গোলকের উপরিতলে অবস্থিত প্রতিটি বিন্দুর দশা একই হবে। গোলকের উপরিতলই সমদশাগ্রস্ত কণাগুলোর অবস্থান নির্দেশ করবে। সুতরাং, ওই মুহূর্তে গোলকের গোলীয় পৃষ্ঠটি আলোর তরঙ্গমুখ। অতএব A হলো তরঙ্গমুখ। সময় অতিবাহিত হওয়ার সাথে সাথে আলো দূরে সরে যাবে এবং তরঙ্গমুখের নতুন নতুন অবস্থান পাওয়া যাবে। চিত্র ৭.৪-এ B ও C যথাক্রমে $t_1$ ও $t_2$ সময়ে তরঙ্গমুখের নতুন অবস্থান। তরঙ্গমুখের উল্লম্ব বরাবর অঙ্কিত SP, SQ, SR প্রভৃতি রেখা বিভিন্ন দিকে আলোর সঞ্চারণের দিক নির্দেশ করে।



চিত্র ৭.৪

**গোলকীয় তরঙ্গমুখ :** আমরা জানি, তরঙ্গস্থিত সমদশাসম্পন্ন কণাগুলোর সঞ্চারপথ হলো তরঙ্গমুখ। উৎস হতে উৎপন্ন আলোর তরঙ্গমুখ উৎসের কাছাকাছি অবস্থানে গোলকীয়। চিত্র ৭.৪-এ A, B, C ইত্যাদি গোলকীয় তরঙ্গমুখ। গোলকীয় তরঙ্গমুখের নিম্নোক্ত সংজ্ঞা দেয়া যায়—

**তরঙ্গস্থিত সমদশাসম্পন্ন কণাগুলোর সঞ্চারপথ গোলকীয় হলে তাকে গোলকীয় তরঙ্গমুখ বলে। গোলকীয় তরঙ্গমুখসম্পন্ন তরঙ্গকে গোলকীয় তরঙ্গ বলে।**

**সমতল তরঙ্গামুখ :** উৎস হতে দূরবর্তী অঞ্চলে তরঙ্গামুখের বক্রতা কমতে থাকে। বহু দূরের উৎস হতে আগত তরঙ্গামুখ সমতল হবে। এজন্য সূর্যের বা অন্য কোনো নক্ষত্রের তরঙ্গামুখকে সমতল বিবেচনা করা হয়। পরবর্তী ৭·৪ অনুচ্ছেদের চিত্র ৭·৫ (ক)-এ AB ও CD সমতল তরঙ্গামুখ। অর্থাৎ **তরঙ্গাস্থিত সমদশাসম্পন্ন কণাগুলোর সঞ্চারপথ সমতল হলে তাকে সমতল তরঙ্গামুখ বলে। সমতল তরঙ্গামুখসম্পন্ন তরঙ্গাকে সমতল তরঙ্গা বলে।**

**নিজে কর :** তরঙ্গামুখের গঠন ও বিস্তার সম্পর্কিত হাইগেনসের নীতি বিবৃত কর।

## ৭·৪ হাইগেনস-এর নীতি এবং এ নীতিতে আলোক তরঙ্গের বিস্তার কৌশল
## Huygens's principle and propagation of light waves on the basis of this principle

### ৭·৪·১ ধারণা
### Concept

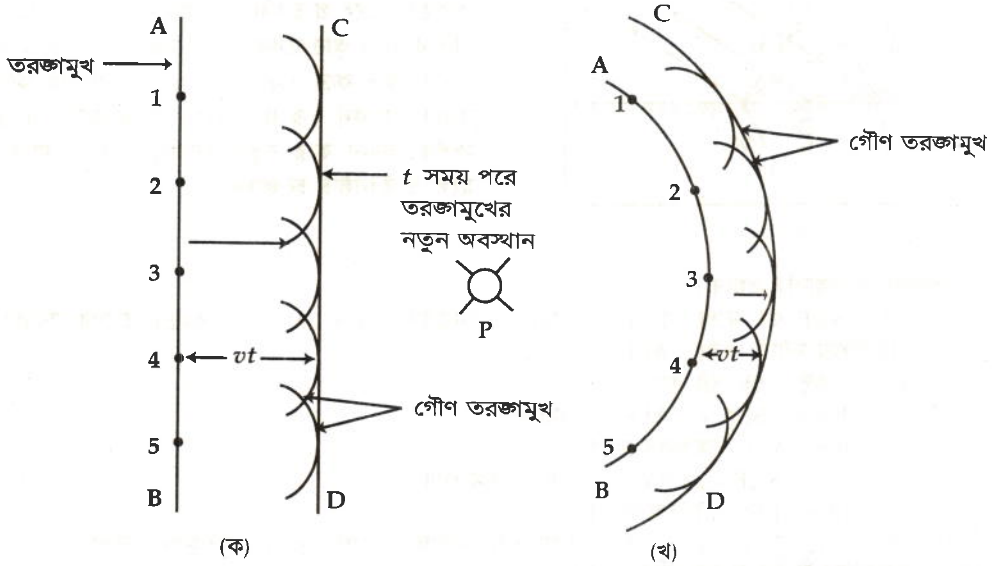
উৎস জানা থাকলে সাধারণ নিয়মে তরঙ্গামুখের যেকোনো সময়ের অবস্থান নির্ণয় করা যায়। উৎস জানা না থাকলেও কোনো এক সময়ের তরঙ্গামুখের অবস্থান ও আকৃতি জানা থাকলে হাইগেনস-এর নীতি অনুসরণ করে অন্য যেকোনো সময়ে তরঙ্গামুখের অবস্থান ও আকৃতি নির্ণয় করা যায়। হাইগেনস-এর নীতি অনুসারে তরঙ্গামুখের প্রতিটি বিন্দুকে গোলকীয় তরঙ্গের উৎস হিসেবে গণ্য করা যায়। এসব তরঙ্গাকে গৌণ তরঙ্গা (secondary waves) বলে। গৌণ তরঙ্গাগুলো মূল তরঙ্গের সমান বেগে সামনের দিকে অগ্রসর হয়। হাইগেনের নীতির সাহায্যে আলোর প্রতিফলন, প্রতিসরণ, ব্যাতিচার এবং অপবর্তন ব্যাখ্যা করা যায় কিন্তু সমবর্তন ব্যাখ্যা করা যায় না। হাইগেনস-এর নীতিকে আমরা নিম্নোক্তভাবে বিবৃত করতে পারি।

**বিবৃতি : কোনো একটি তরঙ্গামুখের ওপর অবস্থিত প্রতিটি বিন্দু এক একটি অণু তরঙ্গের বা গৌণ তরঙ্গের উৎস হিসেবে বিবেচিত হয়। ওই গৌণ উৎসগুলো থেকে সৃষ্ট তরঙ্গামালা মূল তরঙ্গের সমান বেগে সামনের দিকে অগ্রসর হয়। যেকোনো সময়ে ওই সব গৌণ তরঙ্গামালাকে স্পর্শ করে একটি তল অঙ্কন করলে ওই তলই ওই সময়ের তরঙ্গামুখের নতুন অবস্থান নির্দেশ করে।**

### ৭·৪·২ হাইগেনস-এর নীতি অনুসারে তরঙ্গামুখ-এর অবস্থান
### Position of wave front according to Huygens's principle

চিত্র ৭·৫(ক) ও (খ)-এ যথাক্রমে সমতল তরঙ্গের ক্ষেত্রে এবং গোলকীয় তরঙ্গের ক্ষেত্রে গৌণ তরঙ্গামুখ এবং তরঙ্গামুখের নতুন অবস্থান দেখানো হয়েছে।

মনে করি, কোনো সমসত্ত্ব মাধ্যমে P একটি বিন্দু আলোক উৎস [চিত্র ৭·৫(খ)]। P-এর অণুগুলোর কম্পনে উৎপন্ন তরঙ্গা চারদিকে ছড়িয়ে পড়েছে। কোনো এক সময়ে তরঙ্গামুখের অবস্থান AB। হাইগেনস-এর নীতি অনুসারে $t$




চিত্র ৭·৫ : (ক) সমতল তরঙ্গের বেলায় ; (খ) গোলকীয় তরঙ্গের বেলায়।

সময়ে তরঙ্গামুখের অবস্থান বের করতে হবে। তরঙ্গামুখের AB অবস্থানে 5টি বিন্দু 1, 2, 3, 4 ও 5 ধরা হলো। (এরূপ অসংখ্য বিন্দু কল্পনা করা যায়।) হাইগেনস-এর নীতি অনুসারে প্রতিটি বিন্দু নতুন আলোড়নের উৎস হিসেবে ক্রিয়া করে

নতুন তরঙ্গ সৃষ্টি করবে। আলোকের বেগ $v$ হলে $t$ সময়ে তরঙ্গগুলো $vt$ দূরত্ব অতিক্রম করবে। বিন্দুগুলোকে কেন্দ্র ধরে $vt$ ব্যাসার্ধ নিয়ে বৃত্তচাপ আঁকি। চাপগুলোর একটি সাধারণ স্পর্শক CD আঁকি। এখন CD হলো তরঙ্গমুখের নতুন অবস্থান। বিন্দুগুলো হতে অঙ্কিত বৃত্ত বা গোলকীয় চাপই হলো গৌণ উৎস হতে উৎপন্ন তরঙ্গের $t$ সময় পরের অবস্থান। এখানে উল্লেখ্য যে, ত্রিমাত্রিক স্থানে বিন্দুগুলো $vt$ ব্যাসার্ধের গোলকীয় চাপ রচনা করবে। ওই চাপগুলোর একটি সাধারণ স্পর্শক বা মোড়ক (envelope) CD একটি গোলীয় তল হবে।

সময়ের সাথে সাথে আলোক তরঙ্গ দূরে সরে যাবে এবং গোলীয় তলের বক্রতা কমতে থাকবে। বহু দূরে একে সমতল ধরা যায়।

চিত্র ৭.৫ (ক)-এ অসীম দূর হতে আগত তরঙ্গমুখের কোনো এক সময়ের অবস্থান AB দেখানো হয়েছে। এই তরঙ্গমুখের ওপর কয়েকটি বিন্দু নিয়ে ওপরের নিয়মে $vt$ ব্যাসার্ধ নিয়ে বৃত্ত গোলীয় চাপ এঁকে একটি সাধারণ স্পর্শক CD আঁকলে CD হবে তরঙ্গমুখের নতুন অবস্থান। হাইগেনসের নীতি অনুসারে এটি সমতল তরঙ্গমুখ নির্দেশ করে। **হাইগেনের তরঙ্গ তত্ত্ব দ্বারা আলোর সমবর্তন ব্যাখ্যা করা যায় কিন্তু প্রতিফলন, প্রতিসরণ, ব্যাতিচার, অপবর্তন ব্যাখ্যা করা যায় না।**

**সংজ্ঞা : কোনো তরঙ্গের উপর অবস্থিত সমদশাসম্পন্ন কণাগুলোর গতিপথকে তরঙ্গমুখ বলে।**

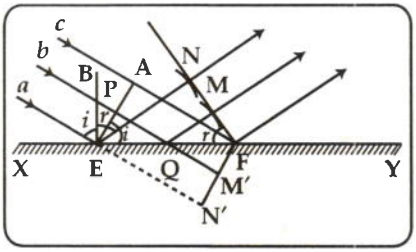
তরঙ্গমুখের ওপর যেকোনো বিন্দুতে অঙ্কিত অভিলম্বকে রশ্মি (ray) বলা হয়। তরঙ্গের শক্তি এই রশ্মি বরাবর শূন্যস্থান বা মাধ্যমের এক অংশ থেকে অন্য অংশে স্থানান্তরিত হয়।

## ৭.৪.৩ হাইগেনসের নীতির ভিত্তিতে আলোর প্রতিফলন ও প্রতিসরণ
**Reflection and refraction of light on the basis of Huygens's principle**

হাইগেনসের নীতি ব্যবহার করে আলোর প্রতিফলন ও প্রতিসরণের সূত্র বিশ্লেষণ করা যায়। নিম্নে তা বর্ণনা করা হলো।

### ৭.৪.৩.১ আলোর প্রতিফলন
**Reflection of light**

মনে করি, XY একটি সমতল প্রতিফলক তল। $a, b, c$ তিনটি সমান্তরাল আলোক রশ্মি। এরা তির্যকভাবে XY তলের ওপর আপতিত হলো [চিত্র ৭.৬]। ধরি, EPA এই সমান্তরাল রশ্মিগুলোর তরঙ্গমুখ। এর প্রত্যেকটি বিন্দু আলোড়ন কেন্দ্র হিসেবে ক্রিয়া করবে এবং ক্ষুদ্র ক্ষুদ্র গৌণ তরঙ্গ উৎপন্ন করবে। এই গৌণ তরঙ্গগুলো চারদিকে ছড়িয়ে পড়বে। মনে করি A বিন্দু হতে একটি আলোক রশ্মি $t$ সময়ে XY পৃষ্ঠের F বিন্দুতে পৌঁছল। ইতিমধ্যে E-এর আলোড়ন N বিন্দুতে এবং Q-এর আলোড়ন M বিন্দুতে পৌঁছবে। ফলে প্রতিফলিত তরঙ্গমুখ FMN পাওয়া যাবে। যদি বাতাসে আলোকের বেগ $v$ হয়, তবে $FA = vt$। এখন E-কে কেন্দ্র করে এবং $FA = vt$-কে ব্যাসার্ধ করে একটি বৃত্তচাপ অঙ্কন করলে FMN পাওয়া যাবে। FMN-এর স্পর্শক অঙ্কন করে নতুন তরঙ্গমুখ পাওয়া যাবে। **এটিই হলো প্রতিফলিত তরঙ্গমুখ।**



চিত্র ৭.৬

**প্রতিফলনের সূত্রাবলি প্রমাণ :**

$\Delta AEF$ ও $\Delta NEF$-এর মধ্যে $\angle EAF = \angle ENF = 1$ সমকোণ, $AF = EN = vt$ এবং EF তাদের সাধারণ বাহু।

$\therefore$ ত্রিভুজদ্বয় সর্বসম এবং $\angle AEF = \angle EFN$ ... ... (7.6)

এখন আপতন বিন্দু E-তে EB লম্ব হলে,

$\angle aEB + \angle BEA = \angle BEA + \angle AEF = 1$ সমকোণ

$\therefore$ $\angle aEB = \angle AEF =$ আপতন কোণ, $\angle i$ ... ... (7.7)

আবার, $\angle NEB + \angle NEF = \angle EFN + \angle NEF = 1$ সমকোণ

$\therefore$ $\angle NEB = \angle EFN =$ প্রতিফলন কোণ, $\angle r$ ... ... (7.8)

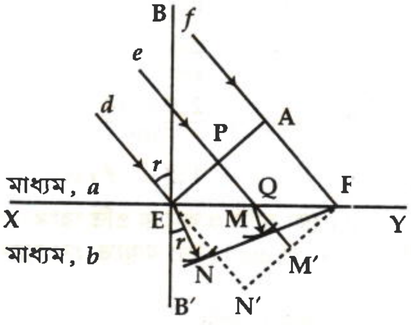
সমীকরণ (7.6), (7.7) ও (7.8) হতে লেখা যায়, আপতন কোণ, $\angle i =$ প্রতিফলন কোণ, $\angle r$ । **এ দ্বারা আলোকের প্রতিফলনের দ্বিতীয় সূত্র প্রমাণিত হলো।**

আবার, আপতিত রশ্মি $a$E, প্রতিফলিত রশ্মি EN এবং আপতন বিন্দুতে অঙ্কিত অভিলম্ব EB কাগজের একই সমতলে অবস্থিত। **এ দ্বারা আলোকের প্রতিফলনের প্রথম সূত্রটি প্রমাণিত হলো।**

অতএব আলোকের তরঙ্গ তত্ত্বকে ভিত্তি করে প্রতিফলনের দুটি সূত্রই প্রমাণিত হলো।

### ৭·৪·৩·২ আলোর প্রতিসরণ
### Refraction of light

মনে করি, '$a$' ও '$b$' দুটি স্বচ্ছ সমসত্ত্ব মাধ্যম। XY এদের বিভেদতল। ধরি '$a$' মাধ্যমে আলোকের বেগ $v_a$ এবং '$b$' মাধ্যমে আলোকের বেগ $v_b$। এখানে $v_a > v_b$। মনে করি $d$, $e$, $f$ তিনটি সমান্তরাল রশ্মি। এরা তির্যকভাবে XY তলে আপতিত হলো [চিত্র ৭·৭]। APE রশ্মিসমূহের তরঙ্গমুখ। মনে করি, EPA তরঙ্গমুখ প্রথমে বিভেদ তলের E বিন্দুতে স্পর্শ করে। হাইগেনস-এর নীতি অনুসারে ওই E বিন্দুতে অবস্থিত এর কণাটি আলোড়িত হয়ে গৌণ তরঙ্গ উৎপন্ন করে এবং '$a$' ও '$b$' মাধ্যমে যথাক্রমে $v_a$ ও $v_b$ বেগে ছড়িয়ে পড়ে। এখন A বিন্দু হতে আলোড়নটির F বিন্দুতে পৌঁছতে যদি $t$ সময় লাগে তা হলে $FA = v_a.t$। উক্ত সময়ে E বিন্দুর আলোক তরঙ্গ '$b$' মাধ্যমে EN দূরত্ব অতিক্রম করবে। অতএব $EN = v_b.t$ হবে।



চিত্র ৭·৭

A-কে কেন্দ্র করে এবং $EN = v_b.t$-কে ব্যাসার্ধ করে একটি বৃত্তচাপ অঙ্কন করি এবং তার ওপর FN স্পর্শক টানলে FMN প্রতিসৃত তরঙ্গমুখ নির্দেশ করবে।

**প্রতিসরণের সূত্রাবলি প্রমাণ :** E বিন্দু দিয়ে XY-এর ওপর লম্ব BEB′ অঙ্কন করি।

এখন, $\angle dEB + \angle BEA = \angle BEA + \angle AEF = 1$ সমকোণ

$\therefore \quad \angle dEB = \angle AEF =$ আপতন কোণ, $\angle i$

আবার, $\angle B'EN + \angle NEF = \angle NEF + \angle EFN = 1$ সমকোণ

$\therefore \quad \angle B'EN = \angle EFN =$ প্রতিসরণ কোণ, $\angle r$

সুতরাং $$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{\sin \angle dEB}{\sin \angle B'EN} = \frac{\sin \angle AEF}{\sin \angle EFN}$$

$$= \frac{AF/EF}{EN/EF} = \frac{AF}{EN} = \frac{v_a t}{v_b t} = \frac{v_a}{v_b} = \text{একটি ধ্রুব সংখ্যা} = {}_a\mu_b \qquad \dots \qquad (7.9)$$

${}_a\mu_b$ হলো $a$ মাধ্যম সাপেক্ষে $b$ মাধ্যমের প্রতিসরাঙ্ক।

**এটি দ্বারা স্নেলের সূত্র বা প্রতিসরণের দ্বিতীয় সূত্রটি প্রমাণিত হলো।**

আবার আপতিত রশ্মি $dE$, প্রতিসৃত রশ্মি EN এবং আপতন বিন্দুতে অঙ্কিত অভিলম্ব BEB′ কাগজের একই সমতলে অবস্থিত। এটি দ্বারা আলোকের **প্রতিসরণের প্রথম সূত্রটি প্রমাণিত হলো।** অতএব **তরঙ্গ তত্ত্বের ভিত্তিতে আলোকের প্রতিসরণের দুটি সূত্র প্রমাণিত হলো।**

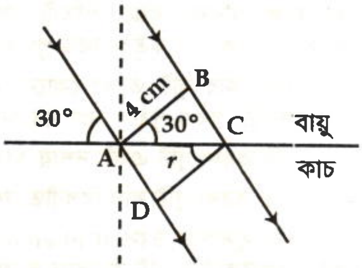
## গাণিতিক উদাহরণ ৭.২

**১। একটি সমান্তরাল আলোক রশ্মিগুচ্ছ বায়ু থেকে কাচে আপতিত হলো। এর বেধ 4 cm এবং আপতন কোণ 30°। প্রতিসৃত হবার পর কাচের মধ্য দিয়ে রশ্মির বেধ কত হবে ? [কাচের প্রতিসরাঙ্ক = 1·5]**

আপতিত আলোক রশ্মিগুচ্ছের বেধ $= 4$ cm

সুতরাং, AB = 4 cm, আপতন কোণ $= 30°$

$$\therefore \quad AC = \frac{AB}{\cos 30°} = \frac{4}{\frac{\sqrt{3}}{2}} = \frac{8}{\sqrt{3}}$$




প্রতিসৃত রশ্মিগুচ্ছের বেধ = CD

প্রতিসরণ কোণ $r$ হলে $\sin 30° = 1·5 \sin r$ $\left[\because \frac{\sin i}{\sin r} = 1·5\right]$

$$\therefore \quad \sin r = \frac{1}{3}$$

$$\therefore \quad \cos r = \sqrt{1 - \frac{1}{9}} = \frac{\sqrt{8}}{3}$$

ACD ত্রিভুজ থেকে,

$$CD = AC \cos r = \frac{8}{\sqrt{3}} \times \frac{\sqrt{8}}{3} = 4·35 \text{ cm}$$

**২। পানি ও হীরকের প্রতিসরাঙ্ক যথাক্রমে 1·33 এবং 2·4 হলে, হীরকে আলোর বেগ নির্ণয় কর। পানিতে আলোর বেগ $2{\cdot}28 \times 10^8$ ms$^{-1}$।** [Admission Test : DU (প্রযুক্তি) 2020-21 (মান ভিন্ন); BUET 2013-14]

আমরা জানি,

$${}_w\mu_d = \frac{v_w}{v_d}$$

$$\therefore \quad v_d = \frac{v_w}{{}_w\mu_d}$$

বা, $$v_d = \frac{2{\cdot}28 \times 10^8}{1{\cdot}805}$$

$$= 1{\cdot}26 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$$

এখানে,

$${}_a\mu_w = 1{\cdot}33$$

$${}_a\mu_d = 2{\cdot}4$$

$${}_w\mu_d = \frac{{}_a\mu_d}{{}_a\mu_w} = \frac{2{\cdot}4}{1{\cdot}33} = 1{\cdot}805$$

$$v_w = 2{\cdot}28 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$$

$$v_d = ?$$

**৩। (ক) পানি ও কাচের প্রতিসরাঙ্ক যথাক্রমে 1·33 এবং 1·5 হলে কাচে আলোর বেগ কত ? পানিতে আলোর বেগ $2{\cdot}28 \times 10^8$ ms$^{-1}$। (খ) বায়ুতে এক আলোক বছর $9{\cdot}6 \times 10^{12}$ km, কাচে এক আলোক বছরের মান বের কর।**

[রা. বো. ২০১০; সি. বো. ২০০৭]

(ক) আমরা জানি,

$${}_w\mu_g = \frac{c_g}{c_w}$$

বা, $$\frac{\mu_w}{\mu_g} = \frac{c_g}{c_w}$$

$$\therefore \quad c_g = \frac{\mu_w}{\mu_g} \times c_w = \frac{1{\cdot}33}{1{\cdot}5} \times 2{\cdot}28 \times 10^8$$

$$= 2{\cdot}02 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$$

(খ) কাচে এক আলোক বছর $= \dfrac{9{\cdot}6 \times 10^{12}}{1{\cdot}5} = 6{\cdot}4 \times 10^{12}$ km

## ৭·৫ আলোকের ব্যতিচার
## Interference of light

### ৭·৫·১ ধারণা
### Concept

আমরা জানি, যখন দুটি সমান বিস্তার ও তরঙ্গদৈর্ঘ্যের শব্দ চলতে চলতে একে অপরের ওপর আপতিত হয় তখন শব্দের প্রাবল্যের পর্যায়ক্রমিক হ্রাস বা বৃদ্ধি ঘটে। এ অধ্যায়ে আমরা লক্ষ করব আলোর ক্ষেত্রেও একই ঘটনা ঘটে। ইহাই আলোর ক্ষেত্রে ব্যতিচার। আলোকের ব্যতিচার আলোচনা করার পূর্বে (ক) **তরঙ্গের উপরিপাতন** এবং (খ) **সুসঙ্গত আলোক উৎস কী**—তাই আলোচনা করব।

**(ক) তরঙ্গের উপরিপাতন (Superposition of waves) :** দুটি তরঙ্গ কোনো মাধ্যমের কোনো একটি কণাকে একই সঙ্গে অতিক্রম করলে প্রতিটি তরঙ্গই কণাটিকে স্থানান্তরিত করবে। ফলে কণাটির একটি লব্ধি সরণ ঘটবে। এই লব্ধি সরণ তরঙ্গ দুটি কর্তৃক পৃথক পৃথক সরণের বীজগাণিতিক যোগফলের সমান হবে। **একে তরঙ্গের উপরিপাতন বলে।**

মনে করি দুটি তরঙ্গ কোনো মাধ্যমের কোনো একটি কণাকে একই সঙ্গে অতিক্রম করল। ধরি, তরঙ্গ দুটি কর্তৃক কণাটির পৃথক পৃথক সরণ যথাক্রমে $y_1$ ও $y_2$।

যদি **তরঙ্গ দুটি একই দশায় আপতিত হয়, তবে কণাটির লব্ধি সরণ** $y = y_1 + y_2$

আর **তরঙ্গ দুটি যদি বিপরীত দশায় আপতিত হয় তবে লব্ধি সরণ** $y = y_1 \sim y_2$

**(খ) সুসঙ্গত উৎস** (Coherent source) : **দুটি উৎস হতে সমদশাসম্পন্ন বা কোনো নির্দিষ্ট দশা পার্থক্যের একই তরঙ্গদৈর্ঘ্যের দুটি আলোক তরঙ্গ নিঃসৃত হলে তাদেরকে সুসঙ্গত উৎস বলে।**

আলোক উৎস দুটি হতে নিঃসৃত তরঙ্গগুলোর দশা পার্থক্য সব সময় একই থাকে এবং একটি তরঙ্গের দশার কোনো পরিবর্তন হলে অপরটিরও সম পরিমাণ দশা পরিবর্তন হতে হবে।

সুসঙ্গত আলোক উৎস তৈরির জন্য সাধারণত একটি উৎস থেকে নির্গত আলোকে দুটি অংশে এমনভাবে বিভক্ত করা হয় যেন প্রতিটি বিভক্ত অংশই একটি স্বতন্ত্র উৎস হয়। এই দুটি বিভক্ত অংশকে দুটি সুসঙ্গত উৎস হিসেবে ধরা হয়। পরীক্ষাগারে সাধারণ আলো হতে এই পদ্ধতিতে সুসঙ্গত আলোক উৎস উৎপন্ন করা হয়।

### ৭.৫.২ ব্যতিচার
**Interference**

DAT(22-23)

দুটি সুসঙ্গত উৎস হতে নিঃসৃত দুটি আলোক তরঙ্গের উপরিপাতনের ফলে কোনো বিন্দুর আলোক তীব্রতা বৃদ্ধি পায় আবার কোনো বিন্দুর আলোক তীব্রতা হ্রাস পায়। এর ফলে কোনো তলে পর্যায়ক্রমে আলোক উজ্জ্বলতা বা অন্ধকার অবস্থার সৃষ্টি হয়। আলোর এই ঘটনাকে ব্যতিচার বলে।

কোনো বিন্দুতে ওই তরঙ্গ দুটি একই দশায় আপতিত হলে অর্থাৎ ওই বিন্দুতে উভয় তরঙ্গের তরঙ্গশীর্ষ বা তরঙ্গপাদ আপতিত হলে ওই বিন্দুতে লব্ধি বিস্তার তরঙ্গ দুটির বিস্তারের সমষ্টির সমান হবে।

যেহেতু প্রাবল্য বিস্তারের বর্গের সমানুপাতিক, সেহেতু বিন্দুটি উজ্জ্বল দেখাবে। আবার, কোনো বিন্দুতে তরঙ্গ দুটি বিপরীত দশায় আপতিত হলে অর্থাৎ ওই বিন্দুতে একটি তরঙ্গের তরঙ্গশীর্ষ অপরটির তরঙ্গপাদ বা প্রথমটির তরঙ্গপাদ দ্বিতীয়টির তরঙ্গশীর্ষের সাথে মিলিত হলে লব্ধি বিস্তার শূন্য হবে। ফলে বিন্দুটি অন্ধকার দেখাবে। এটিই আলোকের ব্যতিচার। আলোকের ব্যতিচার আলোকের তরঙ্গ তত্ত্ব সমর্থন করে। 1801 খ্রিস্টাব্দে **টমাস ইয়ং** (Thomas Young) আলোকের ব্যতিচার আবিষ্কার করেন। ব্যতিচার দুই ধরনের— (১) গঠনমূলক ব্যতিচার ও (২) ধ্বংসাত্মক ব্যতিচার।

**গঠনমূলক ব্যতিচার (Constructive interference)** : দুটি উৎস হতে সমান কম্পাঙ্ক ও বিস্তারের দুটি আলোক তরঙ্গের উপরিপাতনের ফলে উজ্জ্বল বিন্দু পাওয়া গেলে তাকে গঠনমূলক ব্যতিচার বলে। গঠনমূলক ব্যতিচারে তরঙ্গ দুটির উপরিপাতন সমদশায় হয়ে থাকে। তখন উৎসদ্বয়ের দশা পার্থক্য $2\pi$ হয়।

**ধ্বংসাত্মক ব্যতিচার (Destructive interference)** : দুটি উৎস হতে সমান কম্পাঙ্ক ও বিস্তারের দুটি আলোক তরঙ্গের উপরিপাতনের ফলে অন্ধকার বিন্দু পাওয়া গেলে তাকে ধ্বংসাত্মক ব্যতিচার বলে। ধ্বংসাত্মক ব্যতিচারে তরঙ্গ দুটির উপরিপাতন বিপরীত দশায় হয়ে থাকে। তখন উৎসদ্বয়ের মধ্যে দশা পার্থক্য $\frac{\pi}{2}$ হয়।

| |
|---|
| **কাজ : গঠনমূলক ও ধ্বংসাত্মক ব্যতিচারের শর্ত কী ?** |

যেসব বিন্দুতে উপরিপাতিত তরঙ্গদ্বয়ের পথ পার্থক্য $\frac{\lambda}{2}$ এর অযুগ্ম গুণিতক, অর্থাৎ পথ পার্থক্য $= (2n+1)\frac{\lambda}{2}$, যখন $n = 0, \pm 1, \pm 2$ ...... ইত্যাদি সেসব বিন্দুতে ধ্বংসাত্মক ব্যতিচারের সৃষ্টি হবে।

আবার যেসব বিন্দুতে উপরিপাতিত তরঙ্গদ্বয়ের পথ পার্থক্য $\frac{\lambda}{2}$ এর যুগ্ম গুণিতক, অর্থাৎ পথ পার্থক্য $= 2n, \frac{\lambda}{2}$, যখন $n = 0, \pm 1, \pm 2$ ...... ইত্যাদি সেসব বিন্দুতে গঠনমূলক ব্যতিচারের সৃষ্টি হবে।

**ব্যতিচার ঝালর (Interference fringe)** : কোনো তলে বা পর্দায় ব্যতিচার ঘটানো হলে সেখানে অনেকগুলো পরস্পর সমান্তরাল উজ্জ্বল ও অন্ধকার রেখা বা পট্টি পাওয়া যায়। এই উজ্জ্বল ও অন্ধকার রেখা বা ডোরাগুলোকে এক সঙ্গে আলোকের ব্যতিচার ঝালর বলে।

**চিড় বা স্লিট (Slit)** : দৈর্ঘ্যের তুলনায় খুবই ক্ষুদ্র প্রস্থবিশিষ্ট আয়তাকার সরু ছিদ্রকে চিড় বা স্লিট বলে। ব্যতিচারের জন্য চিড়ের প্রস্থ আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্যের ক্রমের হতে হয়।

**জানার বিষয় :** আলো একটি আড় তরঙ্গ। ইহা ব্যতিচারের মাধ্যমে ব্যাখ্যা করা যায়।

### ৭.৫.৩ ব্যতিচারের শর্তাবলি
**Conditions for interference**

ব্যতিচারের জন্য নিম্নলিখিত শর্তাবলির প্রয়োজন—

১। আলোক উৎস দুটি সুসঙ্গত হতে হবে।

২। উৎস দুটি ক্ষুদ্র ও সূক্ষ্ম হতে হবে।

৩। উৎস দুটি পরস্পরের খুব নিকটে হতে হবে।

৪। তরঙ্গ দুটির বিস্তার সমান বা প্রায় সমান হতে হবে।

৫। পর্যায়ক্রমিক উজ্জ্বল ও অন্ধকার বিন্দুর জন্য পথ পার্থক্য যথাক্রমে অর্ধতরঙ্গদৈর্ঘ্যের $(\lambda/2)$ যুগ্ম ও অযুগ্ম গুণিতক হতে হবে।

উপরোক্ত শর্তসমূহ পালিত হলে ব্যতিচার পাওয়া যাবে।

### ৭.৫.৩.১ আলোকের ব্যতিচারের বৈশিষ্ট্য
**Characteristics of interference**

১। দুটি সুসঙ্গত উৎস হতে একই মাধ্যমের কোনো বিন্দুতে আলোক তরঙ্গমালার উপরিপাতনের ফলে ব্যতিচার সৃষ্টি হয়।

২। ব্যতিচার ঝালরে সাধারণত পট্টিগুলোর বেধ সমান হয়।

৩। ব্যতিচারে উজ্জ্বল পট্টি ও অন্ধকার পট্টিগুলোর অন্তর্বর্তী দূরত্বগুলো সমান থাকে।

৪। ব্যতিচারে অন্ধকার পট্টিতে কোনো আলো থাকে না। এরা সম্পূর্ণ অন্ধকার থাকে।

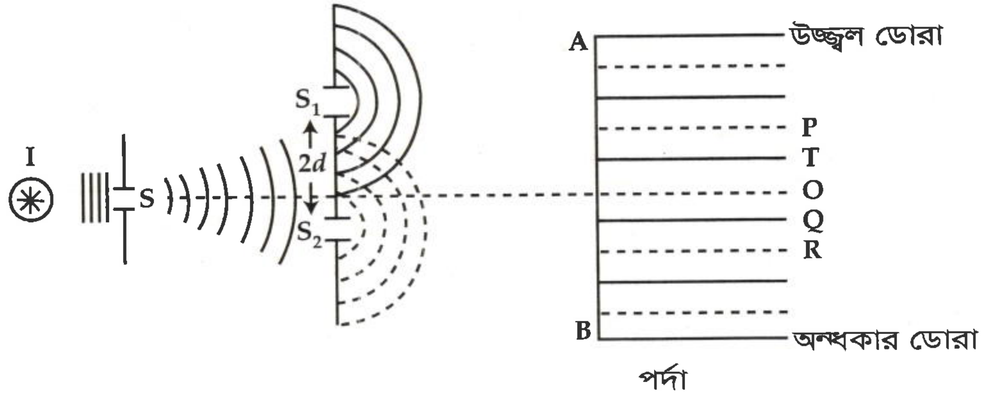
৫। ব্যতিচারে সব উজ্জ্বল পট্টিগুলোর আলোক প্রাবল্য সমান থাকে।

## ৭·৬ আলোকের ব্যতিচারের ক্ষেত্রে ইয়ং-এর দ্বি-চিড় পরীক্ষা
## Young's double slit experiment on interference of light

1807 খ্রিস্টাব্দে বিজ্ঞানী ইয়ং আলোকের ব্যতিচার প্রদর্শনের নিমিত্তে একটি পরীক্ষা সম্পাদন করেন। তাঁর নামানুসারে এই পরীক্ষাকে **ইয়ং-এর পরীক্ষা** বলা হয়। এই পরীক্ষায় বিজ্ঞানী ইয়ং সাদা আলোর উৎস ব্যবহার করেন।

**পরীক্ষা :** মনে করি, S একটি সরুরেখা ছিদ্রপথ। L একটি একবর্ণী আলোক উৎস। S-এর মধ্য দিয়ে একবর্ণী আলোক গমন করছে।

$S_1$ এবং $S_2$ খুবই কাছাকাছি দুটি রেখা ছিদ্র বা রেখা চিড় [চিত্র ৭·৮]। এদেরকে S-এর সামনে সমান্তরালভাবে স্থাপন করা হয়েছে। আলোক S হতে বের হয়ে $S_1$ ও $S_2$ এর ওপর পতিত হবে এবং এর পর সেগুলো এরকম তরঙ্গের আকারে নির্গত হবে। নির্গত তরঙ্গ দুভাবে বিভক্ত হয়ে মাধ্যমের মধ্য দিয়ে গমনকালে ব্যতিচার গঠন করে। বিজ্ঞানী




চিত্র ৭·৮

ইয়ং এরকম পর্দায় রঙিন ব্যতিচার পট্টি দেখতে পান। তরঙ্গ দুটি যদি পর্দার কোনো বিন্দুতে একই দশায় মিলিত হয় তবে সে স্থান উজ্জ্বল দেখাবে। এর নাম **গঠনমূলক ব্যতিচার।** আর তরঙ্গ দুটি যদি পর্দার কোনো বিন্দুতে বিপরীত দশায় মিলিত হয়, তবে সে স্থান অন্ধকার দেখাবে। এর নাম **ধ্বংসাত্মক ব্যতিচার।** চিত্রে AB **পর্দার ড্যাস ড্যাস স্থানে উজ্জ্বল বিন্দু** এবং **নিরবচ্ছিন্ন স্থানে অন্ধকার বিন্দু** সৃষ্টি হবে।

ইয়ং আরও উল্লেখ করেন যে যদি S উৎস সরিয়ে নেয়া হয় কিংবা $S_1$ ও $S_2$-এর দূরত্ব বাড়িয়ে দেয়া হয়, তবে ব্যতিচার ডোরা অর্থাৎ রঙিন পট্টি দেখা যাবে না। সাদা আলোর পরিবর্তে একবর্ণী (monochromatic) আলো নিলে পর্যায়ক্রমিক উজ্জ্বল ও অন্ধকার ডোরা দেখা যায়।

## ৭·৭ দশা পার্থক্য ও পথ পার্থক্যের মধ্যে সম্পর্ক
## Relation between phase difference and path difference

**ক. গাণিতিক পদ্ধতি (Mathematical method)**

মনে করি $\lambda$ তরঙ্গদৈর্ঘ্যের একরঙা আলোর দুটি উৎস $S_1$ ও $S_2$ [ চিত্র ৭·৮ ] হতে একই সঙ্গে নির্গত আলোক তরঙ্গ প্রায় একই দিকে $c$ বেগে সঞ্চালিত হয়ে P বিন্দুতে উপরিপাতিত হয়।

যেকোনো $t$ সময়ে P বিন্দুতে আলোক তরঙ্গের সরণ $S_1$ থেকে আগত তরঙ্গের জন্য $y_1$ এবং $S_2$ থেকে আগত তরঙ্গের জন্য $y_2$ হলে,

$$y_1 = a \sin \frac{2\pi}{\lambda}(ct - x_1) \text{ এবং } y_2 = a \sin \frac{2\pi}{\lambda}(ct - x_2)$$

P বিন্দুতে $S_1$ ও $S_2$ থেকে আগত তরঙ্গের দশা কোণ যথাক্রমে $\frac{2\pi}{\lambda}(ct - x_1)$ এবং $\frac{2\pi}{\lambda}(ct - x_2)$

$\therefore$ P বিন্দুতে তরঙ্গদ্বয়ের দশা পার্থক্য,

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda}(ct - x_1) - \frac{2\pi}{\lambda}(ct - x_2)$$

$$= \frac{2\pi}{\lambda}(x_2 - x_1)$$

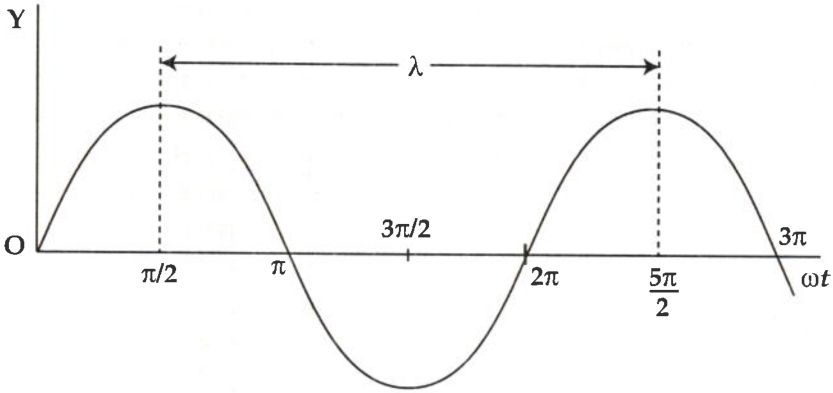
$$\therefore \delta = \frac{2\pi}{\lambda}(S_2P - S_1P) \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad [7.9(a)]$$

কিন্তু $x_2 - x_1 = S_2P - S_1P$ হচ্ছে তরঙ্গ দুটির পথ পার্থক্য।

$\therefore$ $\boxed{\text{দশা পার্থক্য, } \delta = \frac{2\pi}{\lambda} \times \text{পথ পার্থক্য}}$

**খ. লেখচিত্রের মাধ্যমে (By graphical method)**

আমরা জানি, কোনো তরঙ্গের দুটি তরঙ্গশীর্ষ বা তরঙ্গ পাদ-এর দূরত্ব হচ্ছে তরঙ্গদৈর্ঘ্য, $\lambda$ এবং ওই দুটি বিন্দুর মধ্যে দশা পার্থক্য $= 2\pi$ [ চিত্র ৭.৯ ]




চিত্র ৭.৯

অতএব, পথ পার্থক্য $\lambda$-এর জন্য দশা পার্থক্য $= 2\pi$

পথ পার্থক্য 1-এর জন্য দশা পার্থক্য $= \frac{2\pi}{\lambda}$

$\therefore$ পথ পার্থক্য $x$-এর জন্য দশা পার্থক্য $= \frac{2\pi}{\lambda}x = \frac{2\pi}{\lambda} \times$ পথ পার্থক্য

অতএব, $\delta = \frac{2\pi}{\lambda}x \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad (7.10)$

সমীকরণ (7.10) দশা ও পথ পার্থক্যের মধ্যে সম্পর্ক নির্দেশ করে।

## গাণিতিক উদাহরণ ৭.৩

১। একটি তরঙ্গের দুটি বিন্দুর মধ্যে পথ পার্থক্য $\frac{\lambda}{4}$। বিন্দুদ্বয়ের দশা পার্থক্য কত? ***

[ব. বো. ২০২১, ২০১৯; য. বো. ২০১৯; KUET Admission Test, 2013-14]

আমরা জানি,

দশা পার্থক্য, $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \times$ পথ পার্থক্য

$= \frac{2\pi}{\lambda} \times \frac{\lambda}{4} = \frac{\pi}{2}$

এখানে,

পথ পার্থক্য $= \frac{\lambda}{4}$

দশা পার্থক্য $= ?$

**২। $\frac{\pi}{3}$ দশা পার্থক্যের সদৃশ দুটি অস্থায়ী তরঙ্গ একই দিকে ধাবিত হচ্ছে। এদের বিস্তার যথাক্রমে 4 এবং 5 একক হলে লব্ধি তরঙ্গের বিস্তার কত?** [Admission Test : BUET 2015–16; CKRUET 2021-22]

আমরা জানি,

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos\alpha}$$

$$= \sqrt{(4)^2 + (5)^2 + 2 \times 4 \times 5 \cos\frac{\pi}{3}}$$

$= 7{\cdot}81$ একক

এখানে,

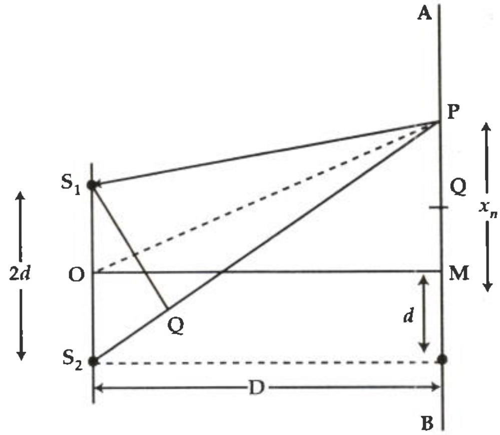
দশা পার্থক্য, $\alpha = \frac{\pi}{3}$

$A_1 = 4$ একক

$A_2 = 5$ একক

## ৭·৮ ইয়ং-এর দ্বি-চিড় পরীক্ষার ব্যাখ্যা
## Explanation of Young's double slit experiment

হাইগেনসের নীতি ব্যবহার করে ইয়ং এর দ্বি-চিড় পরীক্ষায় সৃষ্ট ব্যতিচার ব্যাখ্যা করা যায়। চিড় S গোলীয় তরঙ্গমুখ প্রেরণ করে। $S_1$ ও $S_2$ থেকে S এর দূরত্ব সমান হওয়ায় একই সময়ে একই তরঙ্গমুখ $S_1$ ও $S_2$-তে এসে পৌঁছায়। এই তরঙ্গমুখের ওপর অবস্থিত $S_1$ ও $S_2$ বিন্দু এখন গৌণ তরঙ্গ নিঃসৃত করে যেগুলো পরস্পরের সাথে একই দশায় থাকে। সুতরাং $S_1$ ও $S_2$ চিত্র থেকে নিঃসৃত গৌণ তরঙ্গসমূহ সুসঙ্গত। কেননা তাদের কম্পাঙ্ক ও বিস্তার একই। এখন $S_1$ ও $S_2$ থেকে নিঃসৃত তরঙ্গ দুটি উপরিপাতিত হয়ে ব্যতিচার সৃষ্টি করে। সমদশাসম্পন্ন কণাগুলো উপরিপাতিত হয়ে গঠনমূলক এবং বিপরীত দশাসম্পন্ন কণাগুলোর উপরিপাতনের ফলে ধ্বংসাত্মক ব্যতিচার সৃষ্টি হয়। ৭·১০ চিত্রে হাইফেন ( - ) লাইন দ্বারা গঠনমূলক এবং সলিড লাইন দ্বারা ধ্বংসাত্মক ব্যতিচার বুঝানো হয়েছে।




চিত্র ৭·১০

ধরা যাক, একটি সূক্ষ্ম চিড় S, λ তরঙ্গদৈর্ঘ্যের একবর্ণী আলোক দ্বারা আলোকিত। S হতে নির্গত গোলাকৃতির আলোক তরঙ্গ S-এর কাছাকাছি এবং সমদূরত্বে অবস্থিত দুটি সমান্তরাল চিড় $S_1$ ও $S_2$-কে আলোকিত করে।

ধরা যাক, $S_1$ চিড় হতে P বিন্দুতে [চিত্র ৭·১০] আপতিত আলোক তরঙ্গের সমীকরণ,

$$y_1 = a \sin\frac{2\pi}{\lambda} vt \quad \ldots \quad \ldots \quad (7.11)$$

এখানে, $y_1$ = আলোক তরঙ্গের সরণ, $v$ = তরঙ্গের বেগ, λ = তরঙ্গদৈর্ঘ্য এবং $a$ = তরঙ্গের বিস্তার।

এখন, $S_2$ চিড় হতে P বিন্দুতে আপতিত আলোক তরঙ্গের সরণ $y_2$ এবং $S_1$ ও $S_2$ হতে আগত রশ্মিদ্বয়ের পথ পার্থক্য $x$ হলে, $S_2$ হতে আগত তরঙ্গের সমীকরণ লেখা যায়,

$$y_2 = a \sin\frac{2\pi}{\lambda}(vt + x) \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad (7.12)$$

P বিন্দুতে এই দুটি তরঙ্গের উপরিপাতন ঘটায়, লব্ধি সরণ $y$ হবে—

$$y = y_1 + y_2 = a \sin\frac{2\pi}{\lambda} vt + a \sin\frac{2\pi}{\lambda}(vt + x)$$

$$= 2a \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{x}{2}\right) \sin\frac{2\pi}{\lambda}\left(vt + \frac{x}{2}\right) \quad \left[\because \sin A + \sin B = 2 \sin\left(\frac{A+B}{2}\right) \cos\left(\frac{A-B}{2}\right)\right]$$

এটি সরল ছন্দিত স্পন্দনের সমীকরণ। এর বিস্তার

$$A = 2a \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{x}{2}\right) = 2a \cos\left(\frac{\pi x}{\lambda}\right)$$

আমরা জানি, আলোর তীব্রতা বা প্রাবল্য $I = A^2$। সুতরাং, বিস্তার সর্বনিম্ন বা সর্বোচ্চ হলে প্রাবল্যও যথাক্রমে সর্বনিম্ন বা সর্বোচ্চ হবে।

**দ্বি-চিড় পরীক্ষার ফলাফল :**

(১) দ্বি-চিড় পরীক্ষায় আলোর ব্যতিচার ঘটে।

(২) যেহেতু আলোর তরঙ্গের দরুন ব্যতিচার ঘটে, কাজেই আলো এক প্রকার তরঙ্গ। দ্বি-চিড় পরীক্ষা আলোর তরঙ্গ তত্ত্বকে সমর্থন করে।

## ব্যতিচারের শর্তাবলি :

১. **গঠনমূলক ব্যতিচার বা উজ্জ্বল বিন্দুর শর্ত :** বিস্তার তথা আলোর তীব্রতা সর্বোচ্চ হবে, অর্থাৎ গঠনমূলক ব্যতিচার হবে, যখন—

$$\cos\frac{\pi x}{\lambda} = 1$$

বা, $\frac{\pi x}{\lambda} = 0, \pi, 2\pi \ldots\ldots\ldots n\pi$

বা, $x = n\lambda = 2n\left(\frac{\lambda}{2}\right)$ ... ... ... (7.13)

সুতরাং, আলোর তীব্রতা সর্বোচ্চ অর্থাৎ উজ্জ্বল হওয়ার শর্ত হলো পথ পার্থক্য $\frac{\lambda}{2}$-এর যুগ্ম গুণিতক হতে হবে।

দুটি তরঙ্গ যখন একই দশায় মিলিত হয় তখন লব্ধি তরঙ্গের বিস্তার তথা তীব্রতা সর্বাধিক হয় ফলে উজ্জ্বল ডোরার সৃষ্টি হয় বা গঠনমূলক ব্যতিচার ঘটে। অর্থাৎ গঠনমূলক ব্যতিচার সৃষ্টি হবে যখন,

দশা পার্থক্য, $\delta = 0, 2\pi, 4\pi, 6\pi$ ............ ইত্যাদি $\pi$ এর জোড় গুণিতক

$= 2\pi n$, যেখানে $n = 0, 1, 2, 3$ ......... ইত্যাদি।

$\therefore$ 7.9(a) থেকে পাই, $\frac{2\pi}{\lambda}(S_2P - S_1P) = 2\pi n$

বা, পথ পার্থক্য, $S_2P - S_1P = n\lambda = 2n(\lambda/2)$

এখানে $n = 0, 1, 2, 3$ ......... ইত্যাদি।

সুতরাং আলোর তীব্রতা সর্বোচ্চ বা গঠনমূলক ব্যতিচারের শর্ত হলো পথ পার্থক্য $(\lambda/2)$ এর যুগ্ম গুণিতক হতে হবে। এই ক্ষেত্রে গঠনমূলক ব্যতিচারের জন্য আমরা পাই,

আলোকীয় পথ পার্থক্য $= n\lambda$

বা, $S_2P - S_1P = n\lambda$ ... ... ... [7.13(a)]

আবার দ্বি-চিড়ের অক্ষের ওপর O বিন্দুতে পথ পার্থক্য

$= S_2M - S_1M = 0 \quad (\because S_1M = S_2M)$

$= 0 \times \lambda = 0$

সুতরাং M বিন্দুতে একটি উজ্জ্বল ডোরা সৃষ্টি হয় [চিত্র ৭·১০]। এটিকে অনেক সময় কেন্দ্রীয় চরম বলা হয়। M থেকে প্রথম উজ্জ্বল ডোরাটি পাওয়া যাবে P-তে যেখানে $n = 1$ এবং পথ পার্থক্য $= S_2P - S_1P = 1 \times \lambda$

২. **ধ্বংসাত্মক ব্যতিচার বা অন্ধকার বিন্দুর শর্ত :** বিস্তার তথা প্রাবল্য সর্বনিম্ন হবে অর্থাৎ ধ্বংসাত্মক ব্যতিচার হবে, যখন—

$$\cos\frac{\pi x}{\lambda} = 0$$

বা, $\frac{\pi x}{\lambda} = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2} \ldots\ldots\ldots (2n+1)\frac{\pi}{2}$

বা, $x = (2n+1)\frac{\lambda}{2}$ ... ... ... (7.14)

এখানে $n = 0, 1, 2, 3$ ইত্যাদি

অতএব, আলোর তীব্রতা সর্বনিম্ন অর্থাৎ অন্ধকার হওয়ার শর্ত হলো পথ পার্থক্য $\frac{\lambda}{2}$-এর অযুগ্ম গুণিতক হতে হবে।

যখন ধ্বংসাত্মক ব্যতিচার ঘটে, তখন অন্ধকার ডোরা পাওয়া যায় এবং সাধারণভাবে তা ঘটে যখন তরঙ্গ দুটি বিপরীত দশায় মিলিত হয় অর্থাৎ যখন দশা পার্থক্য $\delta = \pi, 3\pi, \ 5\pi, \ 7\pi$ ........... ইত্যাদি $\pi$ এর বিজোড় গুণিতক $(2n+1)\pi$, যেখানে $n = 0, \ 1, 2, 3$ ......... ইত্যাদি।

অর্থাৎ যখন $\frac{2\pi}{\lambda}\ (S_2P - S_1P) = (2n+1)\pi$

অতএব, পথ পার্থক্য, $S_2P - S_1P = (2n+1)\lambda/2$

সুতরাং আলোর তীব্রতা সর্বনিম্ন বা অন্ধকার হওয়ার শর্ত হলো পথ পার্থক্য $\frac{\lambda}{2}$-এর অযুগ্ম গুণিতক হতে হবে।

অর্থাৎ পথ পার্থক্য $= \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda$ ... ... ... [7.14(a)]

যেখানে, $n = 1, 2, 3$ ইত্যাদি

৭.১০ চিত্রে Q বিন্দুতে একটি অন্ধকার ডোরা সৃষ্টি হয় এবং M থেকে এটিই প্রথম অন্ধকার ডোরা। সুতরাং $n = 1$ এবং পথ পার্থক্য—

$$S_2Q - S_1Q = \left(1 + \frac{1}{2}\right)\lambda = \frac{3\lambda}{2}$$

## ৭.৯ পরপর দুটি উজ্জ্বল বা অন্ধকার ডোরার কেন্দ্রের মধ্যবর্তী দূরত্ব এবং ডোরার প্রস্থ

## Distance between two consecutive centres of the dark or bright bands and width of the bands

### ১. উজ্জ্বল বা অন্ধকার ডোরার দূরত্ব

### Distance of bright or dark bands

চিত্র ৭.১০ হতে আমরা পাই,

$(S_1P)^2 = D^2 + (x_n - d)^2$; $x_n$ = দুটি উজ্জ্বল ও অন্ধকার পট্টির কেন্দ্রের মধ্যবর্তী দূরত্ব

এবং $(S_2P)^2 = D^2 + (x_n + d)^2$

$$\therefore \quad (S_2P)^2 - (S_1P)^2 = \{D^2 + (x_n + d)^2\} - \{D^2 + (x_n - d)^2\}$$
$$= (x_n + d)^2 - (x_n - d)^2$$

বা, $(S_2P + S_1P)(S_2P - S_1P) = 4x_n d$

এখন P বিন্দু M বিন্দুর খুবই সন্নিকটে অবস্থিত বলে

$S_1P \simeq S_2P \simeq D$ ধরা যায়।

অতএব, $(S_2P - S_1P) = \frac{4x_n d}{(S_2P + S_1P)} \simeq \frac{4x_n d}{2D} = \frac{2x_n d}{D}$

এখন $S_1$ হতে $S_2P$ এর ওপর $S_1Q$ লম্ব টানি। সুতরাং এই দুটি তরঙ্গের পথ পার্থক্য,

$$\sigma = S_2Q = (S_2P - S_1P) = \frac{2x_n d}{D} \quad \ldots \quad \ldots \quad (7.15)$$

এখন সমীকরণ (7.15) হতে জানি, $n$-তম উজ্জ্বল ডোরার জন্য পথ পার্থক্য $n\lambda$-এর সমান হতে হবে।

$\therefore \ \frac{2x_n d}{D} = n\lambda$, এখানে $n = 0, 1, 2, 3 \ldots \ldots$

বা, $x_n = \frac{D}{2d}\, n\lambda$

অনুরূপভাবে M বিন্দু হতে $(n+1)$-তম উজ্জ্বল ডোরার দূরত্ব,

$$x_{n+1} = \frac{D}{2d}(n+1)\lambda$$

$\therefore$ পরপর দুটি উজ্জ্বল ডোরার কেন্দ্রের মধ্যবর্তী দূরত্ব বা ব্যবধান

অর্থাৎ $\beta = x_{n+1} - x_n$

$$= \frac{D}{2d}(n+1)\lambda - \frac{D}{2d}n\lambda$$

$$= \frac{D}{2d}\lambda \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad (7.16)$$

সুতরাং যেকোনো দুটি উজ্জ্বল ডোরার ব্যবধান, $\boxed{\beta = \frac{D\lambda}{2d}}$ ।

$\beta$ রাশিমালায় $n$ নেই। সুতরাং ডোরার প্রস্থ ডোরা ক্রমের ওপর নির্ভর করে না। আবার উজ্জ্বল ও অন্ধকার সকল ডোরা প্রস্থ একই।

**উজ্জ্বল ঝালরের বা ডোরার অবস্থান**

| ঝালর বা ডোরা | $n$ | পথ পার্থক্য | কেন্দ্র হতে দূরত্ব, $x$ |
|---|---|---|---|
| কেন্দ্রীয় | 0 | 0 | 0 |
| প্রথম | 1 | $\lambda$ | $\frac{D\lambda}{2d}$ |
| দ্বিতীয় | 2 | $2\lambda$ | $\frac{2D\lambda}{2d}$ |
| ......... | ......... | ......... | ......... |
| $n$-তম | $n$ | $n\lambda$ | $\frac{nD\lambda}{2d}$ |

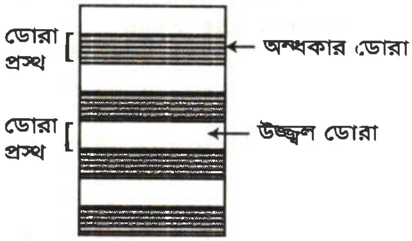
আবার, অন্ধকার ডোরার জন্য পথ পার্থক্য $(2n+1)\frac{\lambda}{2}$-এর সমান হতে হবে [ সমীকরণ (7.14) ]

$$\therefore \frac{2x_n d}{D} = (2n+1)\frac{\lambda}{2}$$

অনুরূপভাবে, M হতে $(n+1)$-তম অন্ধকার ডোরার দূরত্ব

$$x_{n+1} = \frac{D}{2d}[(2(n+1)+1]\frac{\lambda}{2}$$

$$= \frac{D}{2d}(2n+3)\frac{\lambda}{2}$$



চিত্র ৭·১১

$\therefore$ পরপর দুটি অন্ধকার ডোরার কেন্দ্রের মধ্যবর্তী দূরত্ব

অর্থাৎ, $\beta = (x_{n+1}) - x_n$

$$= \frac{D}{2d}(2n+3)\frac{\lambda}{2} - \frac{D}{2d}(2n+1)\frac{\lambda}{2}$$

$$= \frac{D}{2d}\lambda \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad (7.17)$$

**অর্থাৎ, ডোরার প্রস্থ (উজ্জ্বল, অন্ধকার উভয়ের ক্ষেত্রে)** $\beta = \frac{D}{2d}\lambda$

**অন্ধকার ঝালরের বা ডোরার অবস্থান**

| ঝালর বা ডোরা | $n$ | পথ পার্থক্য | কেন্দ্র হতে দূরত্ব, $x$ |
|---|---|---|---|
| কেন্দ্রীয় | 1 | $\frac{1}{2}\lambda$ | $\frac{1}{2}\frac{D\lambda}{2d}$ |
| প্রথম | 2 | $\frac{3}{2}\lambda$ | $\frac{3}{2}\frac{D\lambda}{2d}$ |
| দ্বিতীয় | 3 | $\frac{5}{2}\lambda$ | $\frac{5}{2}\frac{D\lambda}{2d}$ |
| ......... | ......... | ......... | ............... |
| $n$-তম | $m$ | $\left(m+\frac{1}{2}\right)\lambda$ | $\left(\frac{2m+1}{2}\right)\frac{D\lambda}{2d}$ |

## ২. ডোরার প্রস্থ
**Width of bands**

এখন একটি উজ্জ্বল বা অন্ধকার ডোরার প্রস্থ বা বেধ (width) দুটি অন্ধকার ডোরা বা দুটি উজ্জ্বল ডোরার ব্যবধানের অর্ধেক। সুতরাং ডোরার প্রস্থ বা বেধ,

$$\boxed{b = \frac{\lambda D/2d}{2} = \frac{\lambda D}{4d}} \qquad \ldots \qquad \ldots \qquad \ldots \qquad (7.18)$$

সমীকরণ (7.18) হতে দেখা যায় যে—

(i) $b$ এর রাশিমালায় $n$ নেই। সুতরাং, এটি স্পষ্ট যে ব্যতিচার ঝালরের প্রস্থ ঝালর সংখ্যার ওপর নির্ভর করে না। অর্থাৎ সকল ঝালর একই প্রস্থের।

(ii) ঝালর প্রস্থ আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য $\lambda$-এর সমানুপাতিক। তরঙ্গদৈর্ঘ্য বেশি হলে $b$ বেশি হবে অর্থাৎ ঝালরের প্রস্থ বেশি হবে বা মোটা হবে এবং $b$ কম হলে ঝালর সরু হবে। তাই লাল ঝালরের প্রস্থ বেশি, পক্ষান্তরে বেগুনি ঝালরের প্রস্থ কম।

(iii) D-এর মান বেশি হলে এবং $d$ এর মান কম হলে ঝালরের প্রস্থ বেশি হবে।

(iv) পানি বা কোনো তরলে পরীক্ষণ ব্যবস্থাটি ডুবালে তরঙ্গদৈর্ঘ্য হ্রাস পায় $\left(\lambda' = \frac{\lambda}{\mu}\right)$। সুতরাং ঝালরের প্রস্থ কমে।

**সিদ্ধান্ত : ডোরা বা ঝালরের প্রস্থ ($\beta$) তরঙ্গদৈর্ঘ্য ($\lambda$) এর সমানুপাতিক তাই আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য বেড়ে গেলে ডোরার প্রস্থ বেশি হবে আবার তরঙ্গদৈর্ঘ্য ছোট হলে ডোরার প্রস্থ কম হবে। সমীকরণ (7.16) ও (7.17) হতে দেখা যায় যে, (i) ব্যতিচারের ক্ষেত্রে 2টি উজ্জ্বল বা অন্ধকার ডোরার কেন্দ্রের মধ্যবর্তী দূরত্ব বা ঝালরের প্রস্থ সমান [চিত্র ৭·১০] (ii) D এর মান বাড়ালে অর্থাৎ চিড় দুটি এবং পর্দার মধ্যবর্তী ব্যবধান বাড়লে ডোরার প্রস্থ বাড়ে। 2$d$ এর মান কমালে অর্থাৎ চিড় দুটি কাছাকাছি থাকলে ডোরার প্রস্থ বাড়ে।** এই পরীক্ষা সিদ্ধান্ত দুটিকে সমর্থন করে।

## ঝালরের কৌণিক বেধ বা বিস্তার
**Angular width of the fringe**

পর্দায় $n$-তম ঝালর বা ডোরার কৌণিক অবস্থান $\theta_n$ হলে, আমরা পাই

$$\theta_n = \frac{x_n}{D} = \frac{Dn\lambda/2d}{D} = \frac{n\lambda}{2d}$$

এবং $(n+1)$-তম ঝালরের কৌণিক অবস্থান,

$$\theta_{n+1} = \frac{(n+1)\lambda}{2d}$$

সুতরাং, পরপর দুটি ঝালরের মধ্যে কৌণিক অবস্থানের পার্থক্য বা ব্যবধান অর্থাৎ ঝালরের কৌণিক বেধ,

$$\theta = \theta_{n+1} - \theta_n = \frac{(n+1)\lambda}{2d} - \frac{n\lambda}{2d} = \frac{\lambda}{2d} \qquad \ldots \qquad \ldots \qquad \ldots \qquad (i)$$

সমীকরণ (i) হতে দেখা যায় যে—

(ক) এই কৌণিক বেধ পর্দার অবস্থানের ওপর নির্ভর করে না।

(খ) সুসংগত উৎস দুটির মধ্যে দূরত্ব (2$d$) বাড়লে কৌণিক বেধ কমবে এবং দূরত্ব কমলে কৌণিক বেধ বাড়বে।

(গ) কৌণিক বেধ তরঙ্গোদৈর্ঘ্যের ওপর নির্ভর করবে। তরঙ্গদৈর্ঘ্য বাড়লে $\theta$ বাড়বে, আবার $\lambda$ কমলে $\theta$ কমবে। যদি সমগ্র পরীক্ষণ ব্যবস্থাটি $\mu$ প্রতিসরাঙ্কের তরলে নিমজ্জিত করা হয় তবে কৌণিক বেধ কমবে, কেননা $\lambda_{\text{তরল}} < \lambda_{\text{বায়ু}}$।

### গাণিতিক উদাহরণ ৭.৪

**১। 0·4 mm ব্যবধানবিশিষ্ট দুটি চিড় হতে 1m দূরত্বে অবস্থিত পর্দার ওপর ব্যতিচার সজ্জা সৃষ্টি হলো। ব্যবহৃত আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য 5000 Å হলে পরপর দুটি উজ্জ্বল ও অন্ধকার পট্টির কেন্দ্রের মধ্যবর্তী দূরত্ব কত?**

[চ. বো. ২০২১ (মান ভিন্ন), ২০১২; সি. বো. ২০০৬, রা. বো. ২০০৫]

আমরা জানি,

$$x_n = \frac{D\lambda}{2 \times 2d}$$ [পরপর দুটি উজ্জ্বল ও অন্ধকার পট্টির মধ্যবর্তী ব্যবধান বুঝাতে 2 দ্বারা গুণ করা হয়েছে]

$$= \frac{1 \times 5000 \times 10^{-10}}{2 \times 4 \times 10^{-4}} = 0{\cdot}625 \times 10^{-3}\ \text{m}$$

$$= 0{\cdot}625\ \text{mm}$$

এখানে,

$2d = 0{\cdot}4\ \text{mm} = 4 \times 10^{-4}\ \text{m}$

$D = 1\ \text{m}$

$\lambda = 5000\ \text{Å} = 5000 \times 10^{-10}\ \text{m}$

$x_n = ?$

**২। একটি ইয়ং-এর দ্বি-চিড় পরীক্ষায় চিড় দুটির মধ্যবর্তী দূরত্ব 0·4 মিমি। চিড়ের সমান্তরালে 1 মিটার দূরত্বে স্থাপিত পর্দায় ডোরা সৃষ্টি করা হলে দেখা যায় কেন্দ্রীয় উজ্জ্বল ডোরা থেকে 12-তম উজ্জ্বল ডোরার দূরত্ব 9·3 মিমি। ব্যবহৃত আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য কত ?**

আমরা জানি,

$$x_n = \frac{n\lambda D}{2d}$$

বা, $$\lambda = \frac{x_n \times 2d}{nD}$$

$$\therefore \lambda = \frac{9 \cdot 3 \times 10^{-3} \times 0 \cdot 4 \times 10^{-3}}{12 \times 1}$$

$$= 0 \cdot 31 \times 10^{-6}\, m = 3100\, \mathring{A}$$

এখানে,

$n = 12$

$x_n = 9 \cdot 3\, mm = 9 \cdot 3 \times 10^{-3}\, m$

$D = 1\, m$

$2d = 0 \cdot 4\, mm = 0 \cdot 4 \times 10^{-3}\, m$

**৩। বায়ুতে ইয়ং–এর দ্বি–চিড় পরীক্ষায় 6000 $\mathring{A}$ তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আলো ব্যবহার করলে ডোরার ব্যবধান হয় 2·0 mm। যদি সমস্ত পরীক্ষা যন্ত্রটিকে 1·33 প্রতিসরাঙ্কের একটি তরলে ডুবানো হয় তাহলে ডোরার ব্যবধান কত হবে?**

[দি. বো. ২০২২ (মান ভিন্ন); BUET Admission Test, 2013–14]

আমরা জানি,

$$\frac{\lambda_a}{\lambda_l} = \frac{\mu_l}{\mu_a} = \frac{x_a}{x_l}$$

$$\therefore x_l = \frac{\mu_a}{\mu_l} \times x_a$$

$$= \frac{1}{1 \cdot 33} \times 2\, mm$$

$$= 1 \cdot 504\, mm$$

**৪। ইয়ং-এর দ্বি-চিড় পরীক্ষায় আলোর কম্পাঙ্ক $6 \times 10^{14}$ Hz। পার্শ্ববর্তী দুটি ডোরার কেন্দ্রের মধ্যবর্তী দূরত্ব 0·75 mm। পর্দাটি যদি 1·55 m দূরে থাকে তাহলে চিড় দুটির মধ্যবর্তী দূরত্ব কত ?** [রা. বো. ২০২১ (মান ভিন্ন); Admission Test : KUET 2016-17 (মান ভিন্ন); CUET 2015-16 (মান ভিন্ন)]

মনে করি চিড় দুটির মধ্যবর্তী দূরত্ব = $2d$

আমরা জানি,

$$c = \upsilon\lambda$$

$$\therefore \lambda = \frac{c}{\upsilon} = \frac{3 \times 10^8}{6 \times 10^{14}}$$

$$= 5 \times 10^{-7} m$$

আবার, $$2d = \frac{D\lambda}{\beta} = \frac{1 \cdot 55 \times 5 \times 10^{-7}}{0 \cdot 75 \times 10^{-3}}$$

$$= 1 \cdot 03 \times 10^{-3}\, m = 1 \cdot 03\, mm$$

এখানে,

$c = 3 \times 10^8\, ms^{-1}$

$\upsilon = 6 \times 10^{14}$ Hz

$D = 1 \cdot 55\, m$

$\Delta x = \beta = 0 \cdot 75\, mm$

$= 0 \cdot 75 \times 10^{-3} m$

$2d = ?$

**৫। ইয়ং-এর দ্বি-চিড় পরীক্ষায় চিড় দুটির মধ্যবর্তী দূরত্ব 0·18 mm। চিড়গুলো থেকে 90 cm দূরে পর্দায় কোনো একটি একবর্ণী আলোর সাহায্যে ডোরা সৃষ্টি করা হলে, যদি 3rd উজ্জ্বল ডোরাটি কেন্দ্রীয় উজ্জ্বল ডোরা থেকে 8·1 mm দূরত্বে অবস্থিত হয়, তাহলে আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য নির্ণয় কর।**

[সি. বো. ২০২১ (মান ভিন্ন); BUET Admission Test, 2017–18]

আমরা জানি,

$$x_n = \frac{n\lambda D}{2d}$$

$$\therefore \lambda = \frac{x_n 2d}{nD} = \frac{8 \cdot 1 \times 10^{-3} \times 1 \cdot 8 \times 10^{-4}}{3 \times 0 \cdot 9}$$

$$= 5 \cdot 4 \times 10^{-7}\, m$$

এখানে,

$x_n = 8 \cdot 1\, mm = 8 \cdot 1 \times 10^{-3}\, m$

$n = 3$

$2d = 0 \cdot 18\, mm$

$= 1 \cdot 8 \times 10^{-4}\, m$

$D = 90\, m = 0 \cdot 9\, m$

**৬। ইয়ং-এর ব্যতিচারের দ্বি-চিড় পরীক্ষায় $4.69 \times 10^{14}$ Hz কম্পাঙ্কের লাল আলো ব্যবহারের ফলে ডোরার প্রস্থ $2.4 \times 10^{-4}$ m হয়। যদি $7.5 \times 10^{14}$ Hz কম্পাঙ্কের নীল আলো ব্যবহার করা হয় তাহলে ডোরার প্রস্থের পরিবর্তন কত হবে?** [ম. বো. ২০২২ (মান ভিন্ন); BUET Admission Test, 2016–17]

লাল আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য,

$$\lambda_R = \frac{c}{\upsilon_r} = \frac{3 \times 10^8}{4.69 \times 10^{14}}$$

$$= 6.397 \times 10^{-7} \text{ m} = 6.4 \times 10^{-7} \text{ m}$$

নীল আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য,

$$\lambda_B = \frac{c}{\upsilon_b} = \frac{3 \times 10^8}{7.5 \times 10^{14}} = 4 \times 10^{-7} \text{ m}$$

লাল আলোর জন্য ডোরার প্রস্থ,

$$X_{nR} = \frac{nD}{2d} \lambda_R$$

$$\therefore \frac{nD}{2d} = 2.4 \times 10^{-4} \times \frac{1}{6.4 \times 10^{-7}} = 375$$

নীল আলোর জন্য ডোরা প্রস্থ,

$$X_{nB} = \frac{nD}{2d} \lambda_B = 375 \times 4 \times 10^{-7} = 1.5 \times 10^{-4} \text{ m}$$

$$\therefore \Delta x_n = X_{nR} - X_{nB} = 2.4 \times 10^{-4} - 1.5 \times 10^{-4}$$

$$= 0.9 \times 10^{-4} \text{ m} = 9 \times 10^{-5} \text{ m}$$

এখানে,
লাল আলোর কম্পাঙ্ক, $\upsilon_g = 4.69 \times 10^{14}$ Hz
নীল আলোর কম্পাঙ্ক, $\upsilon_b = 7.5 \times 10^{14}$ Hz
ডোরার প্রস্থ $= 2.4 \times 10^{-4}$ m
ডোরার প্রস্থ পরিবর্তন, $\Delta x = ?$

**৭। ইয়ং-এর দ্বি-চিড় পরীক্ষায় দ্বি-চিড় থেকে এক চিড়কে 5 cm দূরে রাখা হলো। 5100 Å তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সবুজ আলো এক চিড় থেকে এসে দ্বিচিড়ে আপতিত হয়। এক চিড় থেকে 205 cm রাখা পর্দায় 10টি ডোরার ব্যবধান 2 cm হলে, দ্বি-চিড়ের মধ্যবর্তী দূরত্ব বের কর।** [BUET Admission Test, 2018-19]

আমরা জানি, ডোরার প্রস্থ,

$$b = \frac{\lambda D}{d}$$

প্রশ্নানুসারে, $10 \times \frac{\lambda D}{d} = 2 \times 10^{-2}$

বা, $$d = \frac{10\lambda D}{2 \times 10^{-2}} = \frac{10 \times 5100 \times 10^{-10} \times 2}{2 \times 10^{-2}}$$

$$= 5.1 \times 10^{-4} \text{ m}$$

এখানে,
$\lambda = 5100 \text{ Å} = 5100 \times 10^{-10}$ m
এক চিড় থেকে দ্বি-চিড়ের দূরত্ব = 5 cm
এক চিড় থেকে পর্দার দূরত্ব = 205 cm
∴ দ্বি-চিড় থেকে পর্দার দূরত্ব,
$D = 205 - 5 = 200$ cm = 2 m
10টি ডোরার ব্যবধান = 2 cm = $2 \times 10^{-2}$ m
$d = ?$

**৮। ইয়ং-এর দ্বি-চিড় রেখা ছিদ্র পরীক্ষায় ব্যবহৃত আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য 5890 Å এবং ছিদ্রদ্বয়ের মধ্যে দূরত্ব, $2d = 1$ mm। ছিদ্রদ্বয় ও পর্দার মধ্যে দূরত্ব D। কৌণিক বিস্তারের মান নির্ণয় কর।**

আমরা জানি, কৌণিক ব্যবধান,

$$\theta = \frac{\lambda}{2d} = \frac{5890 \times 10^{-10}}{1 \times 10^{-3}} \times \frac{180}{\pi}$$

$$= 0.03°$$

এখানে,
$\lambda = 5890 \text{ Å} = 5890 \times 10^{-10}$ m
$2d = 1$ mm $= 1 \times 10^{-3}$ m
$\theta = ?$

**৯। 5200 Å তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সবুজ আলো একটি সূক্ষ্ম চিড় হতে ইয়ং–এর দ্বি–চিড় এ আপতিত হচ্ছে। 200 cm দূরে পর্দার ওপর 10টি পট্টির দূরত্ব 4 cm। চিড়ের দূরত্ব নির্ণয় কর।** [KUET Admission Test, 2003–04]

আমরা জানি,

$$\Delta x = \frac{n\lambda D}{2d}$$

$$\therefore 2d = \frac{n\lambda D}{\Delta x} = \frac{10 \times 5200 \times 10^{-10} \times 2}{0.04}$$

$$= 2.6 \times 10^{-4} \text{ m}$$

এখানে,
$\lambda = 5200 \text{ Å} = 5200 \times 10^{-10}$ m
$D = 200$ cm = 2 m
$\Delta x = 4$ cm = 0.04 m

১০। 1.5 m দূরে অবস্থিত পর্দায় পরস্পর থেকে 0.03 cm দূরত্বে ডোরা তৈরি হলো। কেন্দ্রীয় চরম থেকে 1 cm দূরে চতুর্থ উজ্জ্বল ডোরাটি তৈরি হলো। আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য নির্ণয় কর। [RUC Admission Test, 2021-22]

আমরা জানি,

$$x_n = \frac{nD\lambda}{2d}$$

$$\therefore \quad \lambda = \frac{x_n \times 2d}{nD} = \frac{1 \times 10^{-2} \times 3 \times 10^{-4}}{4 \times 1.5}$$

$$= 5 \times 10^{-7}\ m = 5000\ Å$$

এখানে,

ক্রম সংখ্যা, $n = 4$

চির দুটির মধ্যবর্তী দূরত্ব, $2d = 0.03$ cm

$\therefore \ 2d = 3 \times 10^{-4}$ m

$x_n = 1$ cm $= 1 \times 10^{-2}$ m

$D = 1.5$ m

১১। দুটি সুসঙ্গত আলোক উৎসের প্রাবল্যের অনুপাত 9 : 4। ব্যতিচার পরীক্ষায় এদের ব্যবহার করলে চরম ও অবম বিন্দুর প্রাবল্যের অনুপাত নির্ণয় কর।

আমরা জানি,

তীব্রতা, $I \propto A^2$

$$\therefore \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{A_1^2}{A_2^2} = \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2$$

বা, $\left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2 = \frac{9}{4}$

বা, $\frac{A_1}{A_2} = \sqrt{\frac{9}{4}} = \frac{1}{2}$

বা, $\frac{A_1 + A_2}{A_1 - A_2} = \frac{3+2}{3-2}$

বা, $\frac{I_{max}}{I_{min}} = \left(\frac{5}{1}\right)^2$

$\therefore \quad I_{max} : I_{min} = 25 : 1$

এখানে,

$\frac{I_1}{I_2} = \frac{9}{4}$

**কাজ :** দুটি একই ধরনের আলোক উৎস ব্যতিচার সৃষ্টি করতে পারে না—ব্যাখ্যা কর।

আলোর ব্যতিচার সৃষ্টির শর্ত হলো—(১) ব্যতিচার সৃষ্টিকারী উৎস দুটিকে সুসংগত হতে হবে এবং (২) যে দুটি তরঙ্গের উপরিপাতের ফলে ঝালর তৈরি হবে তাদের দশা পার্থক্য সর্বক্ষণের জন্য অপরিবর্তিত থাকতে হবে। কিন্তু দুটি একই আলোর উৎস ওপরের শর্ত পূরণ করে না, তাই ব্যতিচার সৃষ্টি করতে পারে না।

**সম্প্রসারিত কাজ :** ব্যতিচার সৃষ্টিকারী দুটি তরঙ্গের একটির পথে একটি পাতলা কাচ প্লেট রাখলে ঝালরের কি পরিবর্তন হবে ?

ব্যতিচার সৃষ্টিকারী দুটি তরঙ্গের যেকোনো একটির পথে $t$ বেধের একটি পাতলা কাচ প্লেট রাখলে তরঙ্গদ্বয়ের মধ্যে $(\mu - 1)t$ পরিমাণ অতিরিক্ত পথ পার্থক্যের সৃষ্টি হবে। এখানে $\mu$ = কাচের প্রতিসরাঙ্ক। ফলে সমগ্র ব্যতিচার ঝালর, কাচ প্লেটের যেদিকে রাখা হয়েছে সেদিকে সরে যাবে। কিন্তু ব্যতিচার ঝালরে সরণ ঘটলেও ঝালর প্রস্থের কোনো পরিবর্তন হবে না।

**হিসাব কর :** দুটি একই ধরনের ছিদ্র দ্বারা গঠিত ব্যতিচার ঝালরে কেন্দ্রীয় উজ্জ্বল পট্টির তীব্রতা I। যদি একটি চিড় বন্ধ করে দেওয়া হয় তবে ওই স্থানে তীব্রতা কত হবে ?

ধরা যাক, তরঙ্গ দুটির প্রতিটির বিস্তার, A

$\therefore \quad A_{max} = A + A = 2A$

সুতরাং, $I_{max} = A^2_{max} = (2A)^2 = 4A^2 = 4I_0$ [এখানে, $I_0$ প্রতিটি চিড়ের জন্য তীব্রতা]

এখন, একটি চিড় বন্ধ করে দিলে ওই স্থানে তীব্রতা হবে,

$$I_0 = \frac{I_{max}}{4}$$

অর্থাৎ কেন্দ্রীয় উজ্জ্বল ডোরার তীব্রতা 4 গুণ হ্রাস পাবে।

## ৭.১০ আলোকের অপবর্তন
**Diffraction of light**

আমরা জানি, স্বচ্ছ সমসত্ত্ব মাধ্যমে আলোক সরল পথে গমন করে কিন্তু আলোকের পথে একটি অস্বচ্ছ বস্তু স্থাপন করলে, অস্বচ্ছ বস্তুর পিছনে একটি কালো জায়গা পরিলক্ষিত হয়। এর নাম ছায়া। এই ছায়া সৃষ্টিই আলোকের রৈখিক গতির প্রমাণ। তবে ছায়াকে বিশেষভাবে লক্ষ করলে দেখা যাবে যে, আলোকের রৈখিক গতির নিয়মানুসারে ছায়া যেমন হওয়া উচিত তা হয় না। ছায়ার কিনারা বরাবর কিছু অংশ আলোকিত দেখায়। এটি হতে প্রতীয়মান হয় যে, আলোক বস্তুর কিনারা দিয়ে সরল পথে গমন না করে সামান্য ঘুরে বাঁকা পথে চলে।

MAT(22-23)

**সংজ্ঞা : কোনো প্রতিবন্ধকের কিনারা বা ধার ঘেষে বা সরু চিড়ের মধ্য দিয়ে যাওয়ার সময় জ্যামিতিক ছায়া অঞ্চলের মধ্যে আলোর বেঁকে যাওয়ার ঘটনাকে আলোর অপবর্তন বলে।** তরঙ্গদৈর্ঘ্য বৃদ্ধি পেলে এই ক্ষমতা বৃদ্ধি পায়।

**শব্দ যেহেতু তরঙ্গধর্মী, সুতরাং শব্দেরও অপবর্তন হয় এবং একে শব্দের অপবর্তন বলে।**

**অপবর্তনের শর্ত :** অপবর্তন সৃষ্টির দুটি শর্ত রয়েছে; যথা—

**(১) খাড়া ধারের (straight edge) ক্ষেত্রে :** ধার খুব তীক্ষ্ণ হতে হবে এবং এর প্রস্থ আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য $\lambda$-এর সমান বা কাছাকাছি মানের হতে হবে।

**(২) সরু ছিদ্রের ক্ষেত্রে :** ছিদ্র খুবই সরু হতে হবে যাতে এর ব্যাস তরঙ্গদৈর্ঘ্যের $\lambda$-এর সমান বা কাছাকাছি মানের হতে হয়।

আলোকের অপবর্তন দুই প্রকার; যথা—

(১) ফ্রেনেল শ্রেণি অপবর্তন (Fresnel's class of diffraction) এবং

(২) ফ্রনহফার শ্রেণি অপবর্তন (Fraunhofer's class of diffraction)।

### ৭.১০.১ ফ্রেনেল শ্রেণি অপবর্তন

**প্রতিবন্ধক বা ছিদ্র থেকে আলোক উৎস বা পর্দা অথবা উভয়ই সসীম দূরত্বে থাকলে যেসব অপবর্তনের ঘটনাবলি ঘটে তাদের ফ্রেনেল শ্রেণি অপবর্তন বলে।**

**খাড়া ধারে** (straight edge), **সরু তারে** (narrow wire) এবং **অল্প পরিসর ছিদ্রে** (narrow slit) এই ধরনের অপবর্তন ঘটে। এক্ষেত্রে আপতিত তরঙ্গমুখ গোলীয় বা সিলিন্ডার আকৃতির হয়।

### ৭.১০.২ ফ্রনহফার শ্রেণি অপবর্তন

**প্রতিবন্ধক বা ছিদ্র থেকে আলোক উৎস এবং পর্দা উভয়ই অসীম দূরত্বে থাকলে যেসব অপবর্তন ঘটনাবলি ঘটে তাদের ফ্রনহফার শ্রেণি অপবর্তন বলে।** এই অপবর্তনের ক্ষেত্রে তরঙ্গমুখ সমতল হয়ে থাকে। কোনো উত্তল লেন্সের ফোকাস তলে একটি আলোক উৎস স্থাপন করলে লেন্সে প্রতিসরণের পর সমান্তরাল রশ্মি গুচ্ছ উৎপন্ন হয় সেগুলোকে কোনো প্রতিবন্ধক বা চিড়ের ওপর আপতিত করে এ ধরনের অপবর্তন পাওয়া যায়। **একক রেখা ছিদ্র বা চিড়ের** (Single slit), **যুগ্ম রেখা ছিদ্র** (Double slit) এবং **গ্রেটিং বা ঝাঁঝরি** (Grating) দ্বারা এই অপবর্তন সৃষ্টি করা হয়।

**কাজ :** একক রেখাচিত্রে ফ্রেনেল ও ফ্রনহফার অপবর্তন ঝালরের মধ্যে কোনো পার্থক্য আছে কী ?

একক রেখাচিত্রে ফ্রনহফার ব্যতিচার ঝালরে কেন্দ্রীয় পট্টি সর্বদা উজ্জ্বল। কিন্তু ফ্রেনেল ব্যতিচার ঝালরের কেন্দ্রীয় পট্টি উজ্জ্বল কিংবা অন্ধকার হতে পারে, যা নির্ভর করে একক রেখাচিত্রে তরঙ্গদৈর্ঘ্য অঞ্চলের সংখ্যার ওপর।

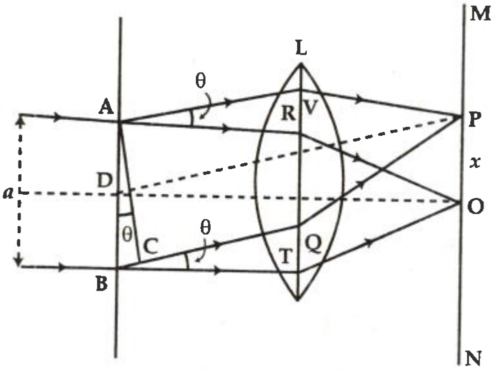
**অনুসন্ধান :** জোরে জোরে কথা বললে পাশের কক্ষ থেকে শোনা যায় অর্থাৎ অপবর্তন সৃষ্টি করে কিন্তু একটি সুচের ছিদ্রের মধ্য দিয়ে আলোর অপবর্তন লক্ষ করা যায় না কেন, ব্যাখ্যা কর।

দৃশ্যমান আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্যের পাল্লা $4 \times 10^{-7}$ m থেকে $7 \times 10^{-7}$ m এবং শ্রুতিগোচর শব্দের তরঙ্গদৈর্ঘ্য যথেষ্ট দীর্ঘ (প্রায় 1.6 cm থেকে 16 m পর্যন্ত) হয়। আমরা জানি, কোনো তরঙ্গের তরঙ্গদৈর্ঘ্য যত বেশি হয় অপবর্তনের মাত্রা অর্থাৎ বেঁকে যাওয়ার পরিমাণ তত বৃদ্ধি পায়। তাই ঘরের দরজা, জানালার ছিদ্র শব্দ তরঙ্গের গতিপথের উল্লেখযোগ্য পরিবর্তন ঘটায়। এই কারণে জোরে জোরে কথা বললে পাশের ঘর থেকে শোনা যায়। কিন্তু সুচের পিছনের ছিদ্রের আকার আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্যের চেয়ে অনেক বড় হওয়ায় আলোর গতিপথের কোনো উল্লেখযোগ্য পরিবর্তন ঘটায় না, তাই এতে আলোর অপবর্তন সহজে দেখা যায় না।

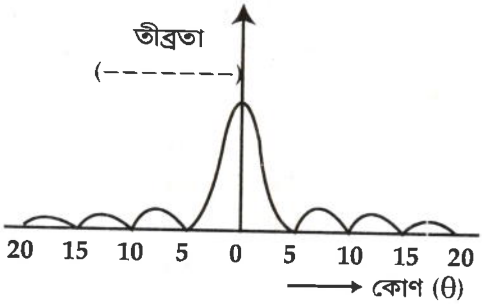
**জানার বিষয় :** আলোর অপবর্তন দ্বারা আলোর তির্যকরূপ ধর্মটি প্রমাণ করা যায়।

### ৭·১০·৩ একক রেখাছিদ্র বা চিড়ের জন্য অপবর্তন
**Diffraction at a single slit**

**একক রেখাছিদ্রে বা চিড়ে ফ্রনহফার অপবর্তন** (Fraunhofer diffraction at a single slit) : মনে করি, AB একটি রেখা চিড় যার বেধ $= a$ [চিত্র ৭·১২]। ধরি $\lambda$ তরঙ্গদৈর্ঘ্যের এক রঙা সমান্তরাল আলোক গুচ্ছ সমতল তরঙ্গামুখে




চিত্র ৭·১২




চিত্র ৭·১৩

AB ছিদ্রের ওপর লম্বভাবে আপতিত হলো। AB-এর মধ্য দিয়ে নির্গত আলোকগুচ্ছকে একটি উত্তল লেন্স L দ্বারা এর ফোকাস তলে MN পর্দার ওপর একত্রীভূত করা হয়। ফলে আপতনের অভিমুখে রেখাছিদ্রের মুখোমুখি একটি উজ্জ্বল কেন্দ্রীয় পট্টি এবং এর দুই পার্শ্বে এর সমান্তরালে একান্তরভাবে সজ্জিত অন্ধকার ও কম উজ্জ্বল কয়েকটি পট্টি সৃষ্টি হয়। কেন্দ্রীয় উজ্জ্বল পট্টির তুলনায় অন্যান্য উজ্জ্বল পট্টির ঔজ্জ্বল্য অনেক কম এবং বাইরের দিকে দ্রুত হ্রাস পায়। শুধু তাই নয়, পট্টিগুলোর বেধ সমান থাকে না [চিত্র ৭·১৩]।

**ব্যাখ্যা :** AB রেখাচিত্রে অবস্থিত সমতল তরঙ্গামুখের প্রতিটি কণা সমদশাসম্পন্ন। ওই সব কণা হতে গৌণ তরঙ্গা উৎপন্ন হয়। যেসব আড় তরঙ্গা ব্যবর্তিত না হয়ে সোজা DO-এর সমান্তরালে গমন করে L লেন্স দ্বারা পর্দার O বিন্দুতে একত্রিত হয় তারা ওই বিন্দুকে খুব উজ্জ্বল বিন্দুতে পরিণত করে, এখানে AB রেখার ঠিক মধ্য বিন্দু D। কারণ O বিন্দুতে পৌঁছতে তরঙ্গাসমূহের কোনো পথ পার্থক্য থাকে না। তারা সমদশায় O বিন্দুতে পৌঁছে গঠনমূলক ব্যতিচার সৃষ্টি করে। এখানে O বিন্দুকে **মুখ্য চরম বিন্দু** (Principal maxima) বলা হয়। এই বিন্দুর ঔজ্জ্বল্য সর্বাধিক।

আবার কিছু সংখ্যক আড় তরঙ্গা $\theta$ কোণে ব্যবর্তিত হয়ে DP অভিমুখের সমান্তরালে চলে L লেন্স দ্বারা P বিন্দুতে একত্রিত হয়। এ ক্ষেত্রে আড় তরঙ্গাসমূহ সমান পথ অতিক্রম করে না বলে P বিন্দুতে ওই সব তরঙ্গের দশা সমান হয় না। এই পথ পার্থক্য নির্ণয়ের জন্য B বিন্দু হতে $\theta$ কোণে ব্যবর্তিত BQ রেখার ওপর AC লম্ব টানি। তা হলে, $\angle PDO = \theta$

$\therefore$ A ও B বিন্দু হতে নির্গত তরঙ্গের মধ্যে পথ পার্থক্য $= BC$

কিন্তু $BC = AB \sin\theta = a \sin\theta$

কাজেই, **উজ্জ্বল বিন্দুর বা চরমের শর্ত :**

$$a \sin\theta = (2n+1)\lambda/2 \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad (7.19)$$

এবং **অন্ধকার বিন্দুর বা অবমের শর্ত :**

$$a \sin\theta = n\lambda \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad (7.20)$$

এখানে $n$ একটি সংখ্যা এবং $n = 1, 2, 3, 4$ ইত্যাদি।

এখন $a \sin\theta = \lambda$ হলে, সব তরঙ্গের দরুন P বিন্দুতে লব্ধি সরণ শূন্য হবে। কারণ A বিন্দু হতে নির্গত তরঙ্গা ও রেখাছিদ্রের মধ্যবিন্দু D হতে নির্গত তরঙ্গের মধ্যে পথ পার্থক্য হবে $\lambda/2$ এবং পরস্পরের প্রভাব নাকচ করে দিবে। এমনিভাবে তরঙ্গামুখের উভয় অর্ধের প্রতি দুটি অনুরূপ বিন্দুর (Corresponding points) মধ্যে পথ পার্থক্য $\lambda/2$ হয়ে ওই সব বিন্দু হতে নির্গত তরঙ্গাগুলো পরস্পরের প্রভাব নাকচ করবে।

$\therefore$ O বিন্দুর উভয় পার্শ্বে প্রথম অবম বিন্দুর ($n = 1$) ক্ষেত্রে অপবর্তন কোণ $\theta$ হলে,

$$a \sin\theta = \lambda$$

বা, $$\sin\theta = \lambda/a$$

তেমনি O বিন্দুর উভয় পার্শ্বে $n$-তম অবম বিন্দুর ক্ষেত্রে অপবর্তন কোণ $\theta_n$ হলে,

$$a \sin\theta_n = n\lambda \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad (7.21)$$

L লেন্স হতে AB রেখাছিদ্র খুব নিকটে থাকলে অথবা L লেন্স হতে পর্দা বেশ দূরে থাকলে $x_n = OP_n =$ মুখ্য চরম বিন্দু O হতে $n$-তম অবম বিন্দুর দূরত্ব এবং লেন্সের ফোকাস দূরত্ব $f$ হলে আমরা পাই,

$$\sin \theta_n = \frac{n\lambda}{a} = \frac{x_n}{f}$$

$$\text{বা, } x_n = \frac{n\lambda f}{a} \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad (7.22)$$

উক্ত সমীকরণের সাহায্যে মুখ্য চরম বিন্দু হতে বিভিন্ন অবম বিন্দুর ($n = 1, 2, 3$ ইত্যাদি) অবস্থান পাওয়া যায়।

$$\text{পুন, } a \sin\theta = \frac{3\lambda}{2}, \frac{5\lambda}{2}, \frac{7\lambda}{2} \ldots\ldots\ldots (2n+1)\lambda/2 \quad \ldots \quad \ldots \quad (7.23)$$

হলে ব্যাখ্যা করা যায় যে তারা O বিন্দুর উভয় পার্শ্বে আরও কতগুলো চরম বিন্দু উৎপন্ন করবে এবং পর্যায়ক্রমে তারা প্রতি দুটি অবম বিন্দুর মধ্যে অবস্থান করবে। এসব চরম বিন্দুকে **গৌণ বা সম্পূরক চরম বিন্দু** (Secondary or Subsidiary maxima) বলে।

$n$-তম গৌণ চরম বিন্দুর ক্ষেত্রে অপবর্তন কোণ $\theta'_n$ এবং O হতে ওই বিন্দুর দূরত্ব $x'_n$ হলে,

$$a \sin\theta'_n = (2n+1)\lambda/2 = \frac{a.x'_n}{f} \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad (7.24)$$

সুতরাং দেখা যাচ্ছে যে মুখ্য চরম বিন্দুর উভয় পার্শ্বে অপবর্তনের দরুন পর্যায়ক্রমে অন্যান্য অবম ও চরম বিন্দু গঠিত হচ্ছে। গৌণ চরম বিন্দুগুলোর উজ্জ্বলতা বা দীপন মাত্রা ক্রমশ হ্রাস পায়।

**হিসাব : একটি ফ্রনহফার শ্রেণির একক চিড়ের অপবর্তন পরীক্ষায় 5890 Å তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আলো ব্যবহার করা হলো। চিড়টির বেধ 0·2 mm হলে প্রথম অবমের জন্য অপবর্তন কোণ নির্ণয় কর।**

Hints : অবমের শর্তানুসারে $a \sin\theta = n\lambda$

$$\therefore \quad \sin\theta = \frac{n\lambda}{a} = \left(\frac{1 \times 5890 \times 10^{-10}}{2 \times 10^{-4}}\right)$$

$$= 2945 \times 10^{-6}$$

$\therefore$ $\theta = 0{\cdot}17^\circ$ প্রায়, অবমের জন্য অপবর্তন কোণ $0{\cdot}17^\circ$

**কাজ : একক রেখাছিদ্র দ্বারা সৃষ্ট ফ্রনহফার অপবর্তন ঝালরের চরম ও অবম বিন্দুর শর্ত কী ?**

একক রেখাছিদ্র দ্বারা সৃষ্ট ফ্রনহফার অপবর্তন ঝালরে চরম ও অবম বিন্দুর শর্ত হলো—

কেন্দ্রীয় উজ্জ্বল পট্টি ($\theta = 0$) এর উভয় দিকে গৌণ চরম বিন্দুগুলির ক্ষেত্রে পথ পার্থক্য $a \sin\theta = (2n+1)\frac{\lambda}{2}$, যখন রেখাছিদ্রের বেধ $= a$, আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য $= \lambda$, অপবর্তন কোণ $\theta$ এবং $n = 1, 2, 3, \ldots\ldots$। সঠিক হিসাব অনুযায়ী $a \sin\theta = \pm 1{\cdot}43\lambda, \pm 2{\cdot}46\lambda, \ldots\ldots$ ইত্যাদি। অর্থাৎ গৌণ চরম বিন্দুগুলির মধ্যে দূরত্ব সমান নয়।

আবার অবম বিন্দুগুলোর ক্ষেত্রে পথ পার্থক্য $a \sin\theta = \pm n\lambda$, অর্থাৎ অবম বিন্দুগুলো পরস্পর সমদূরবর্তী, যখন $n = 1, 2, 3 \ldots\ldots$ ইত্যাদি।

## ৭·১০·৪ আলোকের অপবর্তনের বৈশিষ্ট্য Reading

১। একটি তরঙ্গমুখের বিভিন্ন অংশ হতে নির্গত গৌণ তরঙ্গসমূহের ব্যতিচারের ফলে অপবর্তন সৃষ্টি হয়।

২। অপবর্তন ঝালরে পট্টিগুলোর বেধ কখনো সমান হয় না।

৩। অপবর্তনের ক্ষেত্রে উজ্জ্বল পট্টি ও অন্ধকার পট্টিগুলোর অন্তর্বর্তী দূরত্বগুলো ক্রমাগত কমতে থাকে।

৪। অপবর্তনে অন্ধকার পট্টিগুলো সম্পূর্ণ অন্ধকার থাকে না। এতে সর্বদা কিছু আলো থেকে যায়।

৫। অপবর্তনে উজ্জ্বল পট্টিগুলোর প্রত্যেকটিতে আলোক প্রাবল্য কখনই সমান থাকে না। এই প্রাবল্যের মান কেন্দ্রীয় পট্টিতে সর্বাধিক হয় এবং উভয় পার্শ্বস্থ পট্টিগুলোতে এই প্রাবল্য ক্রমশ হ্রাস পায়।

### ৭·১০·৫ আলোর অপবর্তন এবং ব্যতিচারের মধ্যে পার্থক্য
**Distinction between diffraction and interference of light**

Reading

| ব্যতিচার | অপবর্তন |
|---|---|
| ১। একই উৎস হতে নির্গত দুটি সুসজ্ঞাত তরঙ্গামুখ থেকে প্রাপ্ত তরঙ্গের উপরিপাতনের ফলে ব্যতিচার সৃষ্টি হয়। উৎস দুটি ক্ষুদ্র ও সূক্ষ্ম হতে হবে। | ১। একই তরঙ্গামুখের বিভিন্ন অংশ থেকে নির্গত গৌণ তরঙ্গসমূহের উপরিপাতনের ফলে অপবর্তনের সৃষ্টি হয়। |
| ২। ব্যতিচারে সৃষ্ট অন্ধকার ডোরাগুলোতে কোনো আলো থাকে না। | ২। অপবর্তনে সৃষ্ট অন্ধকার ডোরাগুলো কখনো সম্পূর্ণ অন্ধকার হয় না। এতে সব সময় কিছু আলো থাকে। |
| ৩। ব্যতিচারে সৃষ্ট ডোরাগুলোর প্রস্থ সমান হতেও পারে, নাও পারে। | ৩। অপবর্তনে সৃষ্ট ডোরাগুলোর প্রস্থ সমান হয় না। |
| ৪। ব্যতিচারে সৃষ্ট সকল উজ্জ্বল ডোরার তীব্রতা তথা উজ্জ্বলতা সমান হয়। | ৪। অপবর্তনে সৃষ্ট সকল উজ্জ্বল ডোরার তীব্রতা সমান হয় না। |

### ৭·১০·৬ অপবর্তন গ্রেটিং
**Diffraction grating**

অপবর্তন সৃষ্টি করার জন্য একটি বিশেষ ব্যবস্থার নাম গ্রেটিং বা ঝাঁঝরি। অনেকগুলো সমপ্রস্থের রেখাছিদ্র পাশাপাশি স্থাপন করে গ্রেটিং বা ঝাঁঝরি গঠন করা হয়। গ্রেটিং প্রধানত দুই প্রকার, যথা—

১। **নিঃসরণ বা নির্গমন গ্রেটিং** (Transmission grating) এবং

২। **প্রতিফলন গ্রেটিং** (Reflection grating)।

এখানে আমরা নিঃসরণ গ্রেটিং বিশদভাবে আলোচনা করব।

#### নিঃসরণ গ্রেটিং
**Transmission grating**

আলোক উৎসকে বিশ্লেষণের একটি অতি প্রয়োজনীয় যন্ত্রাংশ হলো অপবর্তন গ্রেটিং। একটি সূচালো অগ্রভাগ-বিশিষ্ট হীরার টুকরা দিয়ে একটি স্বচ্ছ সমতল কাচ পাতে দাগ কেটে গ্রেটিং তৈরি করা হয়। গ্রেটিং-এ প্রতি সেন্টিমিটারে প্রায় 10,000টি দাগ কাটা থাকে। এক একটি চিড়ের প্রস্থ প্রায় $10^{-4}$ cm।

**সংজ্ঞা : পাশাপাশি স্থাপিত অনেকগুলো সমপ্রস্থের সূক্ষ্ম চিড়সম্পন্ন পাতকে নিঃসরণ গ্রেটিং বলে।**

সাধারণ কাজের জন্য পরীক্ষাগারে আর এক প্রকারের নিঃসরণ গ্রেটিং ব্যবহার করা হয়। প্রকৃত রেখাঙ্কিত গ্রেটিং হতে সেলুলয়েড ফিল্মের ওপর ঢালাই পদ্ধতিতে এই গ্রেটিং প্রস্তুত করা হয়। এর নাম **প্রতিলিপি গ্রেটিং** (Replica grating)।

### ৭·১০·৭ গ্রেটিং ধ্রুবক
**Grating constant**

**যেকোনো একটি চিড়ের শুরু থেকে পরবর্তী চিড়ের শুরু পর্যন্ত দূরত্বকে গ্রেটিং ধ্রুবক বলা হয়। অন্যভাবে বলা যায় যে কোনো চিড়ের শেষ প্রান্ত থেকে পরবর্তী চিড়ের শেষ প্রান্তের দূরত্বকে গ্রেটিং ধ্রুবক বলে।**

ব্যাখ্যা : মনে করি, একটি গ্রেটিং-এর প্রতিটি চিড়ের বেধ বা প্রস্থ $= a$

এবং প্রতিটি রেখার বেধ বা প্রস্থ $= b$

সংজ্ঞানুসারে, গ্রেটিং ধ্রুবক, $d = a + b$

$d$-কে অনেক সময় গ্রেটিং উপাদান (Grating element) বলা হয়।

গ্রেটিং-এর '$d$' দৈর্ঘ্যে রেখার সংখ্যা $= 1$টি

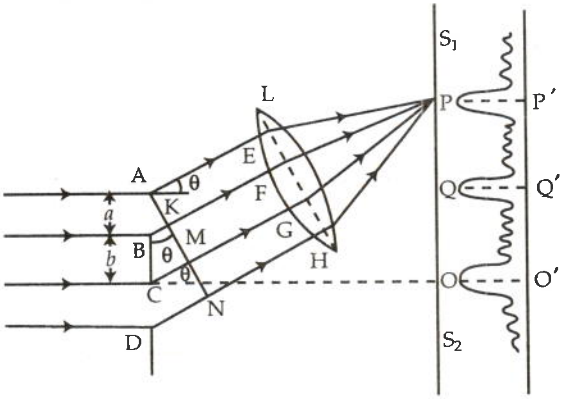
অতএব, একক দৈর্ঘ্যে রেখার সংখ্যা, $\mathrm{N} = \dfrac{1}{d} = \dfrac{1}{a+b}$ ... ... (7.25)

গ্রেটিং-এর $(a + b)$ ব্যবধানে অবস্থিত দুটি বিন্দুকে বলা হয় অনুরূপ বিন্দু (corresponding points)।

### ৭·১০·৮ সমতল নিঃসরণ গ্রেটিং কর্তৃক অপবর্তন
**Diffraction by a plane transmission grating**

মনে করি, ABCD কাগজের অভিলম্ব তলে একটি সমতল নিঃসরণ গ্রেটিং [ চিত্র ৭.১৪ ]। ধরি এর প্রতিটি অস্বচ্ছ রেখার বেধ '$b$' ও স্বচ্ছ অংশের বেধ '$a$'. এখানে $(a + b)$ দূরত্বকে বলা হয় **গ্রেটিং উপাদান** (grating element) বা

**গ্রেটিং ধ্রুবক** (grating constant)। গ্রেটিং-এর $(a + b)$ ব্যবধানে অবস্থিত দুইটি বিন্দুকে বলা হয় **অনুরূপ বিন্দু** (Corresponding points)। চিত্রে A ও C অথবা B ও D এক একজোড়া অনুরূপ বিন্দু।




চিত্র ৭.১৪

মনে করি একটি একরঙা সমতল তরঙ্গমুখ অর্থাৎ সমান্তরাল রশ্মিগুচ্ছ গ্রেটিং-এর ওপর অভিলম্ব-ভাবে আপতিত হলো। বেশির ভাগ রশ্মি অপবর্তিত না হয়ে সরাসরি সোজা পথে যাবে এবং L উত্তল লেন্স দ্বারা এর ফোকাস তলে অবস্থিত $S_1S_2$ পর্দার O বিন্দুতে একত্রিত হবে। ফলে O বিন্দুটি খুবই উজ্জ্বল দেখাবে। একে **কেন্দ্রীয় চরম বিন্দু** (Central maxima) বলে। এখানে অন্যান্য আলোক রশ্মি প্রতিটি রেখা বা দাগ অতিক্রম করবার সময় অপবর্তিত হয়ে বিভিন্ন দিকে গমন করবে। এই অপবর্তিত সমান্তরাল রশ্মিসমূহ উত্তল লেন্স দ্বারা প্রতিসৃত হয়ে লেন্সের ফোকাস তলে স্থাপিত পর্দার P বিন্দুতে একত্রিত হবে। ওই বিন্দুতে অপবর্তিত রশ্মিসমূহ যে গঠনমূলক বা ধ্বংসাত্মক ব্যতিচার সৃষ্টি করে তার ওপর ওই বিন্দুর উজ্জ্বলতা নির্ভর করে। এখন A হতে অপবর্তিত রশ্মিসমূহের ওপর AKMN লম্ব টানি।

A ও C হতে রশ্মিদ্বয় θ কোণে অপবর্তিত হলে আলোক রশ্মি দুইটির পথ পার্থক্য,

$CM = AC \sin\theta = (a + b)\sin\theta$

একইভাবে B ও D দুইটি অনুরূপ বিন্দু হতে রশ্মিদ্বয় θ কোণে ব্যবর্তিত হওয়ায় আলোক রশ্মি দুইটির পথ পার্থক্য

$= DN - BK$

$= (a + b + a)\sin\theta - a\sin\theta$

$= (a + b)\sin\theta$

এরূপে দেখানো যায় প্রতিক্ষেত্রেই যেকোনো দুইটি অনুরূপ বিন্দুর মধ্যে পথ পার্থক্য $= (a + b)\sin\theta$

∴ P বিন্দু চরম বা উজ্জ্বল হলে,

$$(a + b)\sin\theta = n\lambda \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad (7.26)$$

এবং অবম বা অন্ধকার হলে,

$$(a + b)\sin\theta = (2n + 1)\,\lambda/2 \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad (7.27)$$

এখানে, $n$ = একটি পূর্ণ সংখ্যা, এর মান 0, 1, 2, 3 ইত্যাদি অথবা – 1, – 2, – 3 ইত্যাদি হতে পারে ও $\lambda$ = আলোকের তরঙ্গদৈর্ঘ্য।

$n = 0$ হলে কেন্দ্রীয় চরম বিন্দু পাওয়া যাবে। এই বিন্দুকে **মুখ্য চরম বিন্দু** (Principal maxima) বলে।

$n = 1$ বা – 1 বসালে মুখ্য চরম বিন্দুর দুই পার্শ্বে **প্রথম উজ্জ্বল রেখা** (first order maxima) দেখা যাবে। পুন $n = 2$, বা – 2 হলে, মুখ্য চরম বিন্দুর দুই পার্শ্বে **দ্বিতীয় উজ্জ্বল রেখা** (second order maxima) দেখা যাবে ইত্যাদি।

অনুরূপভাবে অবম বিন্দুর শর্তে $n$ = 0, 1, 2, 3 ইত্যাদি বসালে তাদের অবস্থান পাওয়া যাবে। উল্লেখ্য প্রতি দুইটি চরম বিন্দুর মধ্যে একটি অবম বিন্দু থাকে। মুখ্য চরম বা মুখ্য অবম বিন্দু ব্যতীত যেসব চরম বা অবম বিন্দু পাওয়া যায় তাদেরকে যথাক্রমে **গৌণ চরম বা গৌণ অবম বিন্দু** বলে।

গ্রেটিং-এর প্রতি একক দৈর্ঘ্যে N সংখ্যক রেখা থাকলে,

$N(a + b) = 1$

বা, $N = \dfrac{1}{a + b}$

∴ সমীকরণ (7.26) হতে পাই, $\dfrac{1}{N}\sin\theta = n\lambda$

$$\text{বা,}\quad \lambda = \frac{\sin\theta}{N.n} \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad (7.28)$$

এখন, N, $n$ ও θ-এর মান জেনে আলোকের তরঙ্গ দৈর্ঘ্য λ-এর মান বের করা হয়।

### ৭·১০·৯ গ্রেটিং-এর ব্যবহার
**Uses of grating**

গ্রেটিং বিভিন্ন কাজে ব্যবহৃত হয়। নিম্নে এর ব্যবহার উল্লেখ করা হলো—
(১) আলোকের তরঙ্গদৈর্ঘ্য নির্ণয় করা যায়।
(২) একই তরঙ্গদৈর্ঘ্যের দুটি বর্ণালি রেখা পৃথক করা যায়।
(৩) তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সাপেক্ষে অপবর্তন কোণের পরিবর্তনের হার নির্ণয় করা যায়।

**গাণিতিক উদাহরণ ৭.৫**

**১। $22.0 \times 10^{-5}$ cm বেধের একক ছিদ্রের ওপর সমকোণে 5500 Å তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আলো ফেলা হলো। কেন্দ্রীয় চরম বিন্দুর উভয় পার্শ্বে প্রথম দুটি অবম বিন্দুর কৌণিক অবস্থান নির্ণয় কর।**

[KUET Admission Test, 2017-18 (মান ভিন্ন)]

এখানে,
$\lambda = 5500$ Å $= 5500 \times 10^{-8}$ cm
বেধ, $a = 22.0 \times 10^{-5}$ cm

আমরা জানি,
$$a \sin \theta_n = n\lambda$$
$$\therefore \sin \theta_n = \frac{n\lambda}{a}$$
প্রথম অবম বিন্দুর ক্ষেত্রে $n = 1$
$$\therefore \sin \theta_1 = \frac{\lambda}{a} = \frac{5500 \times 10^{-8}}{22.0 \times 10^{-5}} = 0.25$$
$$\therefore \theta_1 = \sin^{-1}(0.25) = 14°29'$$
এবং দ্বিতীয় অবম বিন্দুর ক্ষেত্রে, $n = 2$
$$\therefore \sin \theta_2 = \frac{2\lambda}{a} = \frac{2 \times 5500 \times 10^{-8}}{22.0 \times 10^{-5}} = 0.5$$
$$\therefore \theta_2 = \sin^{-1}(0.5) = 30°$$
অতএব, কেন্দ্রীয় চরম বিন্দুর উভয় পার্শ্বে প্রথম দুটি অবম বিন্দুর কৌণিক অবস্থান,
$\theta_1 = 14°29'$ এবং $\theta_2 = 30°$

**২। 0.4 mm বেধের একটি ছিদ্রকে 589 nm তরঙ্গোদৈর্ঘ্যের আলো দ্বারা আলোকিত করলে যে অপবর্তন নকশা উৎপন্ন করে তা 30 cm ফোকাস দৈর্ঘ্যের লেন্সের সাহায্যে দেখা হচ্ছে। অক্ষ হতে প্রথম অবম ও পরবর্তী উজ্জ্বল পট্টির মধ্যে দূরত্ব নির্ণয় কর।**

এখানে,
$\lambda = 589$ nm $= 589 \times 10^{-9}$ m
$a = 0.4$ mm $= 0.4 \times 10^{-3}$ m
$f = 30$ cm $= 0.3$ m

আমরা জানি, অবমের শর্তানুযায়ী,
$$a \sin \theta_n = n\lambda$$
বা, $$\sin \theta_n = \frac{n\lambda}{a}$$
প্রথম অবমের জন্য $n = 1$
$$\sin \theta_1 = \frac{\lambda}{a} \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad (i)$$
$$\therefore \theta_1 = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{a}\right)$$
আবার, $$\sin \theta_1 = \frac{x_1}{f} \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad (ii)$$
সমীকরণ (i) ও (ii) হতে পাই,
$$\frac{x_1}{f} = \frac{\lambda}{a}$$
$$\therefore x_1 = \frac{\lambda \times f}{a} = \frac{589 \times 10^{-9} \times 0.3}{0.4 \times 10^{-3}}$$
$$= 4.42 \times 10^{-4} \text{ m}$$

এখন, গৌণ উজ্জ্বল পট্টির ক্ষেত্রে,

$$a \sin \theta_n = \frac{(2n+1)\lambda}{2}$$

$\therefore$ গৌণ প্রথম উজ্জ্বল পট্টির জন্য $n = 1$ এবং

$$\sin \theta_2 = \frac{x_2}{f}$$

$$\therefore \quad \frac{x_2}{f} = \frac{3\lambda}{2a}$$

বা, $x_2 = \frac{3\lambda \times f}{2a} = \frac{3}{2} x_1 = 1.5 \times 4.42 \times 10^{-4}$

$= 6.63 \times 10^{-4}$ m

সুতরাং, প্রথম অন্ধকার এবং পরবর্তী উজ্জ্বল পট্টির মধ্যে দূরত্ব,

$\Delta x = x_2 - x_1 = 6.63 \times 10^{-4} - 4.42 \times 10^{-4}$

$= 2.21 \times 10^{-4}$ m

**৩। একটি ফ্রনহফার শ্রেণির একক চিড়ের দরুন অপবর্তন পরীক্ষায় 5600 Å তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আলো ব্যবহার করা হলো। প্রথম ক্রমের অন্ধকার (অবম) পট্টির জন্য অপবর্তন কোণ নির্ণয় কর। [চিড়ের বিস্তার 0·22 mm]**

আমরা জানি,

অবমের শর্ত অনুসারে,

$$a \sin \theta = n\lambda \quad \therefore \quad \sin \theta = \frac{n\lambda}{a}$$

বা, $\theta = \sin^{-1}\left(\frac{1 \times 5600 \times 10^{-10}}{2.2 \times 10^{-4}}\right)$

$= 0.145°$ (প্রায়)

এখানে,

$a = 0.22$ mm $= 2.2 \times 10^{-4}$m

$n = 1$

$\lambda = 5600$ Å $= 5600 \times 10^{-10}$m

$\theta = ?$

**৪। কোনো অপবর্তন গ্রেটিং-এ প্রতি সেন্টিমিটারে 4200 রেখা রয়েছে। এর উপর সোডিয়াম আলোর সমান্তরাল রশ্মিগুচ্ছ অভিলম্বভাবে আপতিত হলে বর্ণালি রেখার দ্বিতীয় ক্রম 30° অপবর্তন কোণ উৎপন্ন করে। সোডিয়াম আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য নির্ণয় কর।**

আমরা জানি,

$(a+b) \sin \theta_n = n\lambda$

বা, $\frac{1}{N} \sin \theta_n = n\lambda$

বা, $\frac{1 \times 10^{-2} \times 10^{-4}}{0.42} \sin 30° = 2 \times \lambda$

$\therefore \lambda = \frac{1 \times 10^{-6} \times 0.5}{0.42 \times 2}$

$= 5952 \times 10^{-10}$ m $= 5952$ Å

এখানে,

$a + b = \frac{1}{N} = \frac{1 \text{ cm}}{4200} = \frac{1 \times 10^{-2}}{4200}$m

$= \frac{1 \times 10^{-2} \times 10^{-4}}{0.42}$

$n = 2$

$\theta_n = 30°$

$\lambda = ?$

**৫। প্রতি মিটারে $6 \times 10^5$ সংখ্যক রেখাসম্পন্ন কোনো অপবর্তন গ্রেটিং এর মধ্য দিয়ে 450 nm তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আলো কোনো ফিল্টারের সাহায্যে লম্বভাবে আপতিত হলো।**

**(ক) 450 nm তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আলোর প্রথম ক্রমের অপবর্তন কোণ কত ?**

**(খ) প্রশ্নমতে আলোকে চতুর্থ ক্রমের অপবর্তন সম্ভব কি না ?**

(ক) আমরা জানি,

$d \sin \theta = n\lambda$

$\therefore \sin \theta = \frac{n\lambda}{d}$

$= 1 \times 450 \times 10^{-9}$ m $\times 6 \times 10^5$ m$^{-1}$ $= 0.27$

$\therefore \theta = \sin^{-1}(0.27) = 15.66°$

এখানে,

$\lambda = 450$ nm $= 450 \times 10^{-9}$ m

$d = \frac{1}{N} = \frac{1}{6 \times 10^5}$ m$^{-1}$

$n = 1$

(খ) চতুর্থ ক্রমের অপবর্তনের জন্য $n = 4$; এক্ষেত্রে $\sin\theta$ এর গ্রহণযোগ্য মান পাওয়া গেলে এই সিদ্ধান্তে উপনীত হওয়া যাবে যে, চতুর্থ ক্রমের অপবর্তন সম্ভব।

পুনরায়, $d \sin\theta = n\lambda$

$$\sin\theta = \frac{n\lambda}{d} = 4 \times 450 \times 10^{-9} \times 6 \times 10^5$$

বা, $\sin\theta = 1{\cdot}08$

কিন্তু $\sin\theta$ এর সর্বোচ্চ মান 1 হতে পারে। সুতরাং প্রাপ্ত মান গ্রহণযোগ্য নয়। সুতরাং চতুর্থ ক্রমের অপবর্তন সম্ভব নয়।

**৬। একটি গ্রেটিং-এর প্রতি সে.মি. দৈর্ঘ্যে 500টি রেখা রয়েছে। দ্বিতীয় পর্যায়ের বর্ণালি রেখার ব্যবর্তন কোণ 4° হলে আলোকের তরঙ্গদৈর্ঘ্য নির্ণয় কর।**

আমরা জানি,

$$(a+b)\sin\theta_n = n\lambda$$

বা, $\dfrac{\sin\theta_n}{N} = n\lambda$

বা, $\lambda = \dfrac{\sin\theta_n}{Nn}$

$\therefore \lambda = \dfrac{\sin 4°}{500 \times 2} = \dfrac{0{\cdot}0698}{1000}$

$= 6980 \times 10^{-8}$ cm $= 6980$ Å

এখানে,

N = 500/সেমি.

$\theta_n = 4°$

$\lambda = ?$

**৭। নীল LED হতে নিঃসৃত আলো একটি অপবর্তন গ্রেটিং-এর ওপর লম্বভাবে আপতিত হয়। এ অপবর্তন গ্রেটিং-এ 25·4 mm প্রস্থে সমব্যবধানে $1{\cdot}26 \times 10^4$টি রেখা টানা আছে। কেন্দ্রীয় অক্ষ হতে কত ডিগ্রি কোণে দ্বিতীয় চরম উৎপন্ন হবে? নীল আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য $\lambda = 450 \times 10^{-9}$ m।** [BUET Admission Test, 2014–15]

আমরা জানি,

1 m-এ রেখার সংখ্যা,

$$N = \frac{1{\cdot}26 \times 10^4 \times 1}{25{\cdot}4 \times 10^{-3}}$$

$= 4{\cdot}96 \times 10^5$ টি

$\therefore \quad d = \dfrac{1}{N} = 2{\cdot}0159 \times 10^{-6}$ m

$d \sin\theta = n\lambda$

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{n\lambda}{d}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{2 \times 450 \times 10^{-9}}{2{\cdot}0159 \times 10^{-6}}\right)$$

$= 26{\cdot}52°$

**৮। একটি অপবর্তন গ্রেটিং-এর প্রতি সেন্টিমিটারে 6000 রেখা আছে, যার মাধ্যমে সোডিয়াম আলোর দ্বিতীয় চরমের বর্ণাঢল পাওয়া যায়। 2টি সোডিয়াম আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য 5890 Å এবং 5896 Å হলে এদের মধ্যে কৌণিক দূরত্ব কত ?** [KUET Admission Test, 2019-20; RUET Admission Test, 2018-19 (মান ভিন্ন)]

আমরা জানি,

$$d\sin\theta = n\lambda$$

বা, $\dfrac{1}{N}\sin\theta = n\lambda$

বা, $\sin\theta = Nn\lambda$

$\therefore \quad \theta = \sin^{-1}(Nn\lambda)$

এখানে,

N = 6000 cm

$\lambda_1 = 5890$ Å $= 5890 \times 10^{-8}$ cm

$\lambda_2 = 5896$ Å $= 5896 \times 10^{-8}$ cm

$n = 2$

$\lambda_1$ এর জন্য,

$$\theta_1 = \sin^{-1}(Nn\lambda_1) = \sin^{-1}(6000 \times 2 \times 5890 \times 10^{-8})$$
$$= 44{\cdot}975^\circ$$

এবং $\lambda_2$ এর জন্য,

$$\theta_2 = \sin^{-1}(Nn\lambda_2) = \sin^{-1}(6000 \times 2 \times 5896 \times 10^{-8})$$
$$= 45{\cdot}033^\circ$$

$\therefore$ কৌণিক দূরত্ব, $\theta_2 - \theta_1 = 45{\cdot}033^\circ - 44{\cdot}975^\circ = 0{\cdot}058^\circ$

**৯। একটি সমতল অপবর্তন গ্রেটিং-এর চিড়ের ও দাগের বেধ যথাক্রমে 0·0006 mm এবং 0·001 mm। 5000 Å তরঙ্গদৈর্ঘ্যে একবর্ণী আলোক তরঙ্গ লম্বভাবে গ্রেটিং তলের ওপর আপতিত হচ্ছে। প্রথম ক্রমের উজ্জ্বল রেখার জন্য অপবর্তন কোণ নির্ণয় কর।** [য. বো. ২০১২]

আমরা জানি,

$$d \sin\theta = n\lambda$$

$$\therefore \sin\theta = \frac{n\lambda}{d}$$

$$= \frac{1 \times 5000 \times 10^{-10}\ \text{m}}{1{\cdot}6 \times 10^{-6}\ \text{m}} = 0{\cdot}3125$$

এখানে, গ্রেটিং ধ্রুবক,

$d$ = চিড়ের প্রস্থ (a) + দাগের প্রস্থ (b)

$= 0{\cdot}0006 + 0{\cdot}001 = 1{\cdot}6 \times 10^{-3}$ mm

$= 1{\cdot}6 \times 10^{-6}$ m

$\lambda = 5000\ \text{Å} = 5000 \times 10^{-10}$ m

ক্রম সংখ্যা, $n = 1$

$\theta = ?$

$$\therefore \theta = \sin^{-1}(0{\cdot}3125) = 18{\cdot}2^\circ$$

**১০। কোনো অপবর্তন গ্রেটিংয়ের প্রতি সেন্টিমিটারে 6000 বা প্রতি মিলিমিটারে 600 রেখা রয়েছে। এর ভেতর দিয়ে 5896 Å তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আলো ফেললে দ্বিতীয় চরমের জন্য অপবর্তন কোণ বের কর।** [ঢা. বো. ২০১২; Admission Test : CKRUET 2021-22; KUET 2012-13]

আমরা জানি,

$$d \sin\theta = n\lambda$$

$$\therefore \sin\theta = \frac{n\lambda}{d}$$

$$= \frac{2 \times 5896 \times 10^{-10} \times 6000}{1 \times 10^{-2}}$$

$$= 0{\cdot}7075$$

$$\therefore \theta = \sin^{-1}(0{\cdot}7075) = 45{\cdot}03^\circ$$

এখানে,

ক্রম সংখ্যা, $n = 2$

তরঙ্গদৈর্ঘ্য, $\lambda = 5896\ \text{Å}$

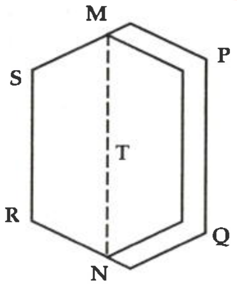
$= 5896 \times 10^{-10}$ m

গ্রেটিং ধ্রুবক, $d = \frac{1}{6000}\ \text{cm} = \frac{1 \times 10^{-2}}{6000}\ \text{m}$

বা, $\frac{1}{d} = \frac{6000}{1 \times 10^{-2}}$

## ৭·১১ আলোকের সমবর্তন
### Polarisation of light

আমরা জানি, আলোক এক প্রকার শক্তি যা দৃষ্টির অনুভূতি জন্মায়। আলোকের প্রকৃতি নির্ণয়ের জন্য পাঁচটি তত্ত্ব আছে। এদের মধ্যে আলোকের তরঙ্গ তত্ত্ব অন্যতম। বিজ্ঞানী হাইগেনস 1678 খ্রিস্টাব্দে এই তত্ত্ব আবিষ্কার করেন। তাঁর মতে আলোক তরঙ্গের আকারে এক স্থান হতে অন্য স্থানে গমন করে। এ তত্ত্বের সাহায্যে আলোকের প্রতিফলন, প্রতিসরণ, ব্যতিচার, অপবর্তন প্রভৃতি ঘটনাবলি ব্যাখ্যা করা যায়। কিন্তু আলোক কী ধরনের তরঙ্গ—আড় তরঙ্গ না লম্বিক তরঙ্গ তা উপরোক্ত আলোকীয় ঘটনাবলি হতে জানা যায় না। তবে পরবর্তীকালে আলোক সংক্রান্ত এমন কতকগুলো ফলাফল পাওয়া গেছে যা বিশ্লেষণ করলে দেখা যায় যে, আলোক তরঙ্গ কখনই অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গ নহে, এটি আড় তরঙ্গ। এক জোড়া টুর্ম্যালিন কেলাসের পরীক্ষা এই ব্যাপারে বিশেষ গুরুত্বপূর্ণ। এই পরীক্ষা হতে নিঃসন্দেহে প্রমাণিত হয় যে, আলোক আড় তরঙ্গ। আলোকের সমবর্তন আড় তরঙ্গের একটি প্রকৃষ্ট প্রমাণ। এখন আলোচনা করা যাক আলোকের সমবর্তন কী ?



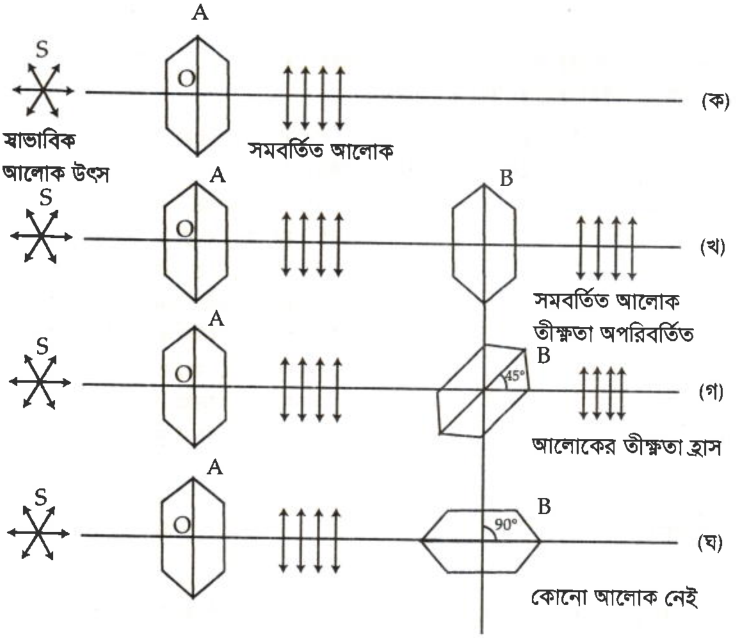
চিত্র ৭·১৫

টুর্ম্যালিন কেলাসের পরীক্ষা আলোচনা করার পূর্বে টুর্ম্যালিন কেলাস কী তা জানা যাক। **টুর্ম্যালিন হচ্ছে কয়েকটি ধাতুর অক্সাইডের রাসায়নিক সংমিশ্রণে তৈরি ষড়ভুজ আকৃতির স্বচ্ছ এবং হালকা সবুজ বর্ণের কেলাস।** ছয় বাহুবিশিষ্ট হালকা সবুজ রঙের এই কেলাস PQRS-কে দেখান হলো [চিত্র ৭.১৫]। এর সর্বাপেক্ষা বড় (MN) কর্ণটির নাম **সরলাক্ষ** (Optic axis)। নিম্নের টুর্ম্যালিন কেলাস পরীক্ষার দ্বারা আলোর সমবর্তন ব্যাখ্যা করা হলো। **টুর্ম্যালিন, নিকল প্রিজম এবং পোলারয়েড ইত্যাদি সমবর্তক ও বিশ্লেষক হিসেবে ব্যবহৃত হয়।** টুর্ম্যালিন হচ্ছে কয়েকটি ধাতুর অক্সাইডের রাসায়নিক সংমিশ্রণে তৈরি স্বচ্ছ ষড়ভুজ আকৃতির হালকা ও সবুজ বর্ণের কেলাস এবং পোলারয়েড হচ্ছে নাইট্রোসেলুলোজের পাতে দৃঢ়ভাবে প্রোথিত কুইনাইল আয়ডোসালফেট কেলাস।

## টুর্ম্যালিন কেলাস পরীক্ষা এবং আলোকের সমবর্তন
## Tourmaline crystal experiment and polarisation of light

মনে করি, S একটি আলোক উৎস। S হতে নির্গত আলোক তরঙ্গসমূহ এদের গতিপথের অভিলম্ব তলে চারদিকে সমান বিস্তারে কম্পিত হবে। A একটি টুর্ম্যালিন কেলাস যা আলোক তরঙ্গের গতিপথে স্থাপন করা হয়েছে। S হতে আলোক তরঙ্গ কেলাসের যেকোনো একটি সমতল পৃষ্ঠে আপতিত হবে [ চিত্র ৭.১৬ (ক)]।

কেলাসের অপর দিকে নজর করলে একই প্রাবল্যের বা তীক্ষ্ণতার আলোক দেখা যাবে। কেলাস হতে নির্গত আলোক কেলাসের প্রকৃতির ওপর নির্ভর করবে এবং যৎসামান্য রঙিন দেখাবে। এ অবস্থায় A কেলাসটিকে O বিন্দুর সাপেক্ষে ঘুরাতে থাকলে একই প্রাবল্যের আলোক দেখা যাবে। এখন A কেলাসের সমান্তরাল আলোকের গতিপথে আর




চিত্র ৭.১৬

একটি টুর্ম্যালিন কেলাস B এমনভাবে স্থাপন করি যাতে এর সরলাক্ষ আলোকের গতিপথের সাথে লম্বভাবে অবস্থান করে [চিত্র ৭.১৬ (খ)]। এমতাবস্থায় B কেলাসের অপর পার্শ্ব হতে তাকালে একই প্রাবল্যের আলোক দেখা যাবে।

এখন A কেলাসটিকে স্থির রেখে B কেলাসটিকে O বিন্দু বরাবর ধীরে ধীরে ঘুরাতে থাকলে দেখা যাবে যে, B কেলাস হতে নির্গত আলোকের প্রাবল্য ধীরে ধীরে কমছে [চিত্র ৭.১৬ (গ)]। যখন B কেলাসটি A কেলাসের সাথে সমকোণে স্থাপন করা হবে তখন B কেলাস হতে কোনো আলোক নির্গত হবে না [চিত্র ৭.১৬(ঘ)]। B কেলাসটিকে 90°-এর বেশি কোণে ঘুরাতে থাকলে পুনরায় B হতে আলোক নির্গত হবে এবং এর প্রাবল্য ধীরে ধীরে বৃদ্ধি পেতে থাকবে। B কেলাস-এর সরলাক্ষ পুনরায় A কেলাসের সরলাক্ষের সমান্তরাল হলে B হতে নির্গত আলোকের প্রাবল্য সর্বাপেক্ষা বেশি হবে অর্থাৎ প্রাবল্য পূর্বের অবস্থানে ফিরে আসবে। DAT(23-24)

**এই পরীক্ষা হতে নিশ্চিতভাবে প্রমাণিত হলো যে, আলোক তরঙ্গ লম্বিক বা অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গ নয়, আলোক তরঙ্গ আড় তরঙ্গ বা তির্যক তরঙ্গ।** কেননা, A কেলাস হতে নির্গত হবার পর আলোক তরঙ্গ কেবল একটি নির্দিষ্ট তলে কম্পিত হচ্ছে। সেজন্য A হতে নির্গত আলোককে **সমবর্তিত আলোক** (polarised light) বলে।

**সংজ্ঞা :** যে প্রক্রিয়ায় বিভিন্ন তলে কম্পমান আলোক তরঙ্গাকে একটি নির্দিষ্ট তল বরাবর কম্পনক্ষম করা যায় তাকে আলোকের সমবর্তন বা পোলারায়ন বলে।

S হতে নির্গত আলোক তরঙ্গ চারদিকে কম্পিত হচ্ছে। S হতে A পর্যন্ত আলোক তরঙ্গের এই অবস্থাই চলবে। অতএব S ও A-এর মধ্যবর্তী স্থানে আলোক **অসমবর্তিত** বা **অপোলারায়িত** (unpolarised)। কিন্তু A হতে B পর্যন্ত স্থানে আলোক তরঙ্গাকে একটি নির্দিষ্ট তল বরাবর আনয়ন করা হয়েছে। সুতরাং এই স্থানের আলোক **সমবর্তিত** বা **পোলারায়িত** (polarised)। যখন A ও B কেলাস-এর সরলাক্ষ পরস্পরের সমান্তরালে থাকে তখন B-এর পরের অংশের আলোক সমবর্তিত হয়। এখানে A-কে সমবর্তক (polariser) ও B-কে বিশ্লেষক (analyser) বলে। 1690 খ্রিস্টাব্দে বিজ্ঞানী হাইগেনস আলোকের সমবর্তন আবিষ্কার করেন। আলো একটি অনুপ্রস্থ তরঙ্গ তা সমবর্তন বৈশিষ্ট্যের দ্বারা জানা যায়।

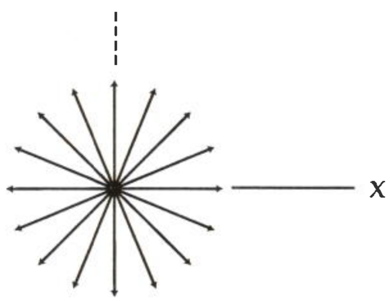
উপরে বর্ণিত সমবর্তনে আলোক তরঙ্গের কম্পন একটি নির্দিষ্ট সমতলে সীমাবদ্ধ করা হয়েছে। এজন্য একে **সমতল** (plane) বা **রৈখিক** (linear) **সমবর্তন** বলা হয়।

**পরীক্ষা :** কোনো আলো সমবর্তিত না অসমবর্তিত কীভাবে তুমি পরীক্ষা দ্বারা প্রমাণ করবে ? ব্যাখ্যা কর।

আলোক রশ্মির গতিপথে একটি টুর্ম্যালিন কেলাস স্থাপন করে কেলাসের পিছন থেকে তাকালে কেলাস থেকে নির্গত আলো দেখা যাবে। এবার কেলাসটি ধীরে ধীরে ঘুরানো হলে যদি কেলাস থেকে নির্গত আলোর উজ্জ্বলতার কোনো পরিবর্তন না হয় বুঝতে হবে যে আলোক রশ্মিটি অসমবর্তিত। কিন্তু নির্গত আলোর উজ্জ্বলতা যদি পর্যায়ক্রমে পরিবর্তিত হয় এবং কেলাসটির একটি পূর্ণ আবর্তনে যদি উজ্জ্বলতা দুবার কমে শূন্য হয় তবে বোঝা যাবে যে আলোক রশ্মিটি সমবর্তিত।

## ৭·১২ সমবর্তন বিষয়ক কতগুলো রাশি
## Some terms relating polarisation

**(ক) অসমবর্তিত আলোক (Unpolarised light) : সাধারণ আলোক যার কম্পন গতিপথের লম্ব অভিমুখে চারদিকে সমান বিস্তারে কম্পিত হয় তাকে অসমবর্তিত আলোক বলে** [চিত্র ৭·১৭ ]।



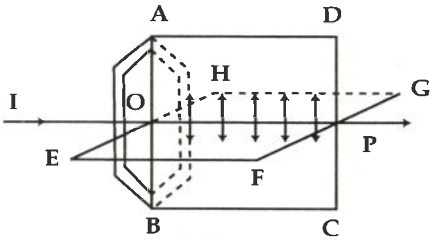
অসমবর্তিত আলোক

চিত্র ৭·১৭

**(খ) সমবর্তিত আলোক (Polarised light) : একটি তলে বা এর সমান্তরাল তলে কম্পমান আড় তরঙ্গাবিশিষ্ট আলোককে সমবর্তিত আলোক বলে। অর্থাৎ যদি আলোর তরঙ্গের তরঙ্গজনিত কম্পন যেকোনো একটি তলে সীমাবদ্ধ থাকে তবে সে আলোককে সমবর্তিত আলাক বলে।**

**(গ) সমতল সমবর্তিত আলোক (Plane polarised light) : কোনো আলোক তরঙ্গের কণাগুলোর কম্পন কেবলমাত্র একটি তলে সীমাবদ্ধ থাকলে একে সমতল সমবর্তিত আলোক বলে।**

**(ঘ) কম্পন তল (Plane of vibration) : আলোক তরঙ্গের কণাসমূহ যে সমতলে কম্পিত হয় তাকে কম্পন তল বলে।** চিত্র ৭·১৮-এ ABCD কম্পন তল।



সমবর্তিত আলোক

চিত্র ৭·১৮

**(ঙ) সমবর্তন কোণ (Polarising angle) : কোনো প্রতিফলক মাধ্যমে আপতন কোণ ধীরে ধীরে পরিবর্তন করলে এমন একটি কোণ পাওয়া যাবে যার জন্য সমবর্তন সর্বাধিক হবে, সেই কোণটিকে সমবর্তন কোণ বলে।**

**(চ) সমবর্তন তল (Plane of polarisation) : কম্পন তলের সাথে যে তলটি লম্বভাবে অবস্থান করে তাকে সমবর্তন তল বলে।** চিত্র ৭·১৮-এ EFGH সমবর্তন তল। সমবর্তনে আলোর কোনো বম্পন থাকে না।

**(ছ) দ্বৈত প্রতিসরণ (Double refraction) : এমন কতগুলো কেলাস আছে যাদের মধ্য দিয়ে আলোক রশ্মি গমন করলে তা দুটি প্রতিসৃত রশ্মিতে বিভক্ত হয়। এই পদ্ধতিকে দ্বৈত প্রতিসরণ বলে এবং এসব কেলাসকে দ্বৈত প্রতিসারক কেলাস বলে।** কোয়ার্টজ ও ক্যালসাইট দ্বৈত প্রতিসারক কেলাস।

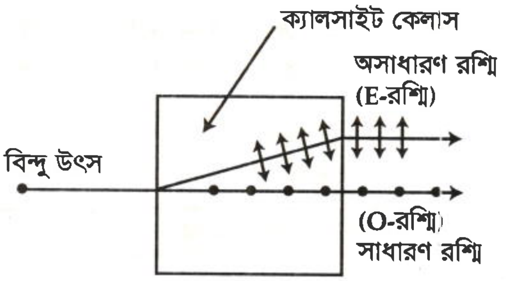
**(জ) ব্রুস্টারের সূত্র (Brewster's angle) : সমবর্তন কোণের ট্যানজেন্ট প্রতিফলক মাধ্যমের প্রতিসরাঙ্কের সমান।**

## ৭·১২·১ দ্বৈত প্রতিসরণ বা দ্বি-প্রতিসরণ
**Double or dual refraction**

এমন অনেক কেলাস আছে যাদের মধ্য দিয়ে আলোক রশ্মি গমন করলে তা দুটি প্রতিসৃত রশ্মিতে বিভক্ত হয়। এই ঘটনাকে দ্বৈত প্রতিসরণ বলে এবং ঐ সকল কেলাসকে দ্বৈত প্রতিসারক কেলাস বলে। কোয়ার্টজ, ক্যালসাইট বা আইসল্যান্ড স্পার ইত্যাদি দ্বৈত প্রতিসারক কেলাস।

দ্বৈত প্রতিসরণ পর্যবেক্ষণের জন্য একটি সহজ পরীক্ষা বর্ণনা করা হলো :

এক টুকরা কাগজে কালির ফোঁটা দিয়ে ওপরে একটা ক্যালসাইট কেলাস রাখলে কালির ফোঁটার দুটি প্রতিবিম্ব দেখা যাবে। এখন ক্যালসাইট কেলাসটিকে ধীরে ধীরে ঘুরাতে হবে। কেলাসের ওপর খাড়াভাবে চোখ রাখলে দেখা যাবে যে, একটি প্রতিবিম্ব স্থির অবস্থায় আছে এবং অন্য প্রতিবিম্বটি কেলাসের ঘূর্ণনের সাথে ঘুরছে। এখানে স্থির বিম্বটি হলো সাধারণ বিন্দু এবং ঘূর্ণায়মান বিন্দুটি হচ্ছে অসাধারণ বিন্দু [চিত্র ৭·১৯]।



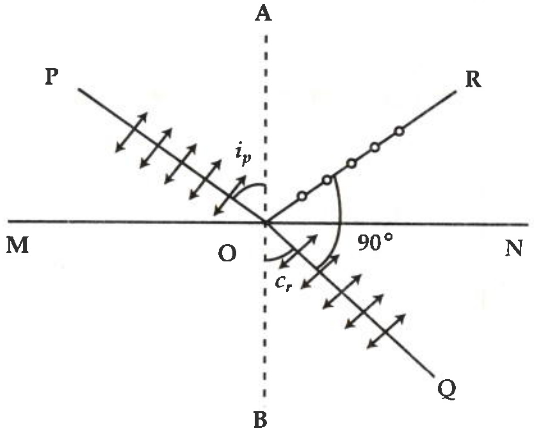
চিত্র ৭·১৯

O-রশ্মির কম্পন কেলাসের প্রধান ছেদের লম্ব তলের সাথে লম্ব বরাবর অন্য দিকে E রশ্মির কম্পন কেলাসের প্রধান ছেদের তল বরাবর হবে। এদের কম্পন তল পরস্পর লম্ব এবং দুটি রশ্মিই সমতল সমবর্তিত।

**ম্যালাসের সূত্র :** সমবর্তিত আলোক বিশ্লেষণের মধ্য দিয়ে যাওয়ার ফলে এর তীব্রতা সমবর্তক ও বিশ্লেষকের (টুরমালিন, পোলারয়েড ইত্যাদি) সমবর্তন অক্ষদ্বয়ের মধ্যবর্তী কোণের বর্গের সমানুপাতিক; যদি নিঃসৃত আলোর তীব্রতা I এবং সমবর্তন অক্ষদ্বয়ের মধ্যবর্তী কোণ θ হয় তাহলে, এই সূত্রানুযায়ী $I \propto (\cos\theta)^2$।

## ৭·১৩ প্রতিফলনের দ্বারা সমবর্তন
**Polarisation by reflection**

1808 খ্রিস্টাব্দে বিখ্যাত বিজ্ঞানী **ম্যালাস** (Malus) প্রতিফলনের দ্বারা সমতল সমবর্তিত আলো উৎপন্ন করেন। তিনি পরীক্ষালব্ধ ফলাফল থেকে দেখান যে সাধারণ আলো অর্থাৎ অসমবর্তিত আলো কোনো স্বচ্ছ মাধ্যমে (যেমন পানি, কাচ ইত্যাদি) দ্বারা প্রতিফলিত হলে প্রতিফলিত রশ্মি আংশিক সমবর্তিত হয়। রশ্মির সমবর্তনের পরিমাণ আপতন কোণের ওপর নির্ভর করে। যে বিশেষ আপতন কোণের জন্য প্রতিফলনের দ্বারা সমবর্তনের পরিমাণ সর্বাধিক হয়, ওই কোণকে সমবর্তন কোণ বলে। একে $i_p$ দ্বারা সূচিত করা হয়। কাচের ক্ষেত্রে এই সমবর্তন কোণের মান 56° এবং বিশুদ্ধ পানির ক্ষেত্রে সমবর্তন কোণ 53°। এই কোণের মান প্রতিফলক তল এবং আপতিত আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্যের ওপর নির্ভর করে।



চিত্র ৭·২০

**ব্রুস্টারের সূত্র (Brewster's law) :** বিজ্ঞানী **স্যার ডেভিড ব্রুস্টার** বিভিন্ন পরীক্ষালব্ধ ফলাফল থেকে দেখান যে, **সমবর্তন কোণের ট্যানজেন্টের মান প্রতিসারক মাধ্যমের আপেক্ষিক প্রতিসরাঙ্কের সমান। একেই ব্রুস্টারের সূত্র বলে।**

ব্যাখ্যা : ধরা যাক, অসমবর্তিত আলোক রশ্মি PO তির্যকভাবে μ প্রতিসরাঙ্কবিশিষ্ট কোনো স্বচ্ছ মাধ্যমের MN তলে আপতিত হলো [চিত্র ৭·২০]।

চিত্রানুযায়ী $\angle POA = i_p$, সমবর্তিত কোণ

এবং $i_r = \angle QOB$, প্রতিসারক কোণ।

এখন, $i_p + i_r = 90°$

বা, $i_r = 90° - i_p$

এখন স্নেলের সূত্রানুযায়ী আমরা পাই,

$\frac{\sin i_p}{\sin i_r} = \mu$, এখানে $\mu$ = মাধ্যমের প্রতিসরাঙ্ক

বা, $\frac{\sin i_p}{\sin (90° - i_p)} = \mu$

বা, $\frac{\sin i_p}{\cos i_p} = \mu$ $[\because \sin (90° - i_p) = \cos i_p]$

বা, $\mu = \tan i_p$

**সূত্র : সমবর্তন কোণের ট্যানজেন্টের মান প্রতিসারক মাধ্যমের আপেক্ষিক প্রতিসরাঙ্কের সমান।**

**বি. দ্র.** যেহেতু মাধ্যমের প্রতিসরাঙ্ক আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্যের ওপর নির্ভর করে, তাই সমবর্তন কোণও তরঙ্গদৈর্ঘ্যের ওপর নির্ভর করে।

আবার, $\angle ROQ = 180° - (i_p + i_r) = 180° - 90° = 90°$

সুতরাং, প্রতিফলিত রশ্মি (OR) এবং প্রতিসৃত রশ্মি (OQ) পরস্পরের সমকোণে অবস্থিত।

**কাজ : সমবর্তন কোণ ও সংকট কোণের মধ্যে সম্পর্ক প্রতিষ্ঠা কর।**

ব্রুস্টারের সূত্রানুসারে,

$\mu = \tan i_p$

আবার, স্নেলের সূত্রানুসারে,

$\mu = \frac{1}{\sin \theta_c}$

বা, $\tan i_p = \frac{1}{\sin \theta_c} = \text{cosec}\ \theta_c$

বা, $i_p = \tan^{-1} (\text{cosec}\ \theta_c)$

এটিই নির্ণেয় সম্পর্ক।

এখানে,
$i_p$ = সমবর্তন কোণ
$\mu$ = মাধ্যমের প্রতিসরাঙ্ক
$\theta_c$ = সংকট কোণ

## গাণিতিক উদাহরণ ৭.৬

**১। 1·53 প্রতিসরাঙ্কবিশিষ্ট একটি কাচের প্লেটের ওপর সমবর্তন কোণে একটি আলোকরশ্মি আপতিত হলো। প্রতিসারক কোণের মান কত ?** [দি. বো. ২০২২ (মান ভিন্ন)]

আমরা জানি,

$\mu = \tan i_p = 1·53$

$\therefore i_p = \tan^{-1} (1·53) = 56°50'$

এবং $i_r = 90° - 56°50' = 33°10'$

এখানে,
$\mu = 1·53$

**২। কাচে কোনো একটি নির্দিষ্ট বর্ণের আলোর জন্য সংকট কোণ 40°। সমবর্তন কোণ ও প্রতিসারক কোণের মান নির্ণয় কর।**

আমরা জানি,

$\mu = \frac{1}{\sin \theta_c}$

$\therefore \mu = \frac{1}{\sin 40°} = \frac{1}{0·6428} = 1·56$

এখানে,
$\theta_c = 40°$

$i_p$ সমবর্তন কোণ হলে আমরা পাই,

$\tan i_p = \mu = 1·56$

$\therefore i_p = \tan^{-1} (1·56) = 57°3'$

অতএব, প্রতিসারক কোণ, $i_r = 90° - 57°3' = 32°57'$

**৩। হীরকের পৃষ্ঠ তলে একটি আলোক রশ্মি 60° কোণে আপতিত হলো এবং 12° কোণে প্রতিসৃত হলো। হীরকের সমবর্তন কোণ নির্ণয় কর।** [CUET Admission Test, 2015-16]

আমরা জানি,

$$\mu = \frac{\sin i}{\sin r}$$

$$\therefore \quad \mu = \frac{\sin 60°}{\sin 12°} = \frac{0.866}{0.2} = 4.33$$

আবার ব্রুস্টারের সূত্রানুযায়ী আমরা জানি,

$$\tan i_p = \mu$$

$$\therefore \quad i_p = \tan^{-1}(4.33)$$

$$\therefore \quad i_p = 77°$$

এখানে,
$\angle i = 60°$
$\angle r = 12°$

**৪। আলোক রশ্মি 1.33 প্রতিসরাঙ্কের পানি হতে 1.50 প্রতিসরাঙ্কের কাচে গমন করলে আলোর সমবর্তিত কোণ নির্ণয় কর।**

ব্রুস্টারের সূত্র থেকে,

$$_w\mu_g = \tan i_p$$

বা, $$\frac{_w\mu_g}{_a\mu_w} = \tan i_p$$

বা, $$\frac{1.5}{1.33} = \tan i_p$$

বা, $$\tan i_p = 1.13$$

$$\therefore \quad i_p = \tan^{-1}(1.13) = 48.5°$$

এখানে,
$_a\mu_g = 1.5$
$_a\mu_w = 1.33$
সমবর্তিত কোণ, $i_p = ?$

**৫। কাচের প্রতিসরাঙ্ক 1.55। সমবর্তিত কোণ কত ? সমবর্তিত কোণের জন্য প্রতিসারক কোণ নির্ণয় কর।**
[য. বো. ২০২২ (মান ভিন্ন); দি. বো. ২০২২ (মান ভিন্ন)]

যদি বায়ুর সাপেক্ষে কাচের প্রতিসরাঙ্ক $\mu$ এবং সমবর্তিত কোণ $i_p$ হয় তবে ব্রুস্টারের সূত্র থেকে আমরা পাই,

$$\mu = \tan i_p$$

বা, $$\tan i_p = 1.55$$

$$\therefore \quad \mathbf{i_p = \tan^{-1}(1.55) = 57.17°}$$

পুনরায়, সমবর্তিত কোণে আপতনের জন্য

$i_p + r = 90°$; এখানে $r$ = প্রতিসরণ কোণ

বা, $r = 90 - i_p = 90° - 57.17° = 32.83°$

## সার-সংক্ষেপ

**পয়েন্টিং ভেক্টর** : কোনো একক ক্ষেত্রফলের মধ্য দিয়ে যে পরিমাণ শক্তি অতিক্রম করে তাকে পয়েন্টিং ভেক্টর বলে। একে $\vec{S}$ দ্বারা চিহ্নিত করা হয়। $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$ ।

**তড়িৎ চৌম্বকীয় বর্ণালি** : তড়িৎ চৌম্বকীয় তরঙ্গের কম্পাঙ্কের বা তরঙ্গদৈর্ঘ্যের পাল্লা বিস্তৃত। এর প্রসারতা $10^4$ Hz-এর কম থেকে $10^{23}$ Hz-এর বেশি পর্যন্ত বিস্তৃত। বিস্তৃত এ পরিসরকে তড়িৎ চৌম্বকীয় বর্ণালি বলে।

**তরঙ্গমুখ** : তরঙ্গস্থিত সমদশাসম্পন্ন বিন্দুগুলি যে তলে অবস্থান করে তাকে উক্ত তরঙ্গের তরঙ্গমুখ বলে।

**হাইগেনসের নীতি** : কোনো একটি তরঙ্গমুখের ওপর অবস্থিত প্রতিটি বিন্দু কম্পন বা আন্দোলনের এক একটি উৎস হিসেবে বিবেচিত হয়। ওই গৌণ উৎসগুলো হতে সৃষ্ট তরঙ্গমালা মূল তরঙ্গের সমান বেগে সামনের দিকে অগ্রসর হয়। যেকোনো সময়ে ওই সব গৌণ তরঙ্গমালাকে স্পর্শ করে একটি তল অংকন করলে ওই তলই ওই সময়ের তরঙ্গমুখের নতুন অবস্থান নির্দেশ করে।

| | | |
|---|---|---|
| **প্রতিফলনের সূত্র— ১ম সূত্র** | : | আপতিত রশ্মি, আপতন বিন্দুতে অঙ্কিত অভিলম্ব এবং প্রতিফলিত রশ্মি একই সমতলে অবস্থান করে। |
| **২য় সূত্র** | : | আপতন কোণ $\angle i$ = প্রতিফলন কোণ $\angle r$। |
| **প্রতিসরণের সূত্র— ১ম সূত্র** | : | আপতিত রশ্মি, আপতন বিন্দুতে অঙ্কিত অভিলম্ব এবং প্রতিসৃত রশ্মি একই সমতলে অবস্থান করে। |
| **২য় সূত্র** | : | এক জোড়া নির্দিষ্ট মাধ্যম এবং একটি নির্দিষ্ট বর্ণের আলোক রশ্মির জন্য আপতন কোণের সাইন এবং প্রতিসরণ কোণের সাইন-এর অনুপাত একটি ধ্রুব রাশি। একে $\mu$ দ্বারা প্রকাশ করা হয়। এর নাম প্রতিসরাঙ্ক। |
| **তড়িৎ চুম্বকীয় তরঙ্গ** | : | শূন্যস্থান দিয়ে আলোর দ্রুতিতে গতিশীল তড়িৎ ও চৌম্বক আলোড়ন, যাতে তড়িৎ ও চৌম্বক ক্ষেত্র পরস্পর লম্ব এবং এরা উভয়ে তরঙ্গ সঞ্চালনের অভিমুখের সাথে লম্ব বরাবর থাকে তাকে তড়িৎ চুম্বকীয় তরঙ্গ বলে। |
| **তরঙ্গের উপরিপাতন** | : | দুটি তরঙ্গ কোনো মাধ্যমের কোনো একটি কণাকে একই সঙ্গে অতিক্রম করলে প্রতিটি তরঙ্গই কণাটিকে স্থানান্তরিত করবে। ফলে কণাটির একটি লব্ধি সরণ ঘটবে। এই লব্ধি সরণ তরঙ্গ দুটি কর্তৃক পৃথক পৃথক সরণের বীজগাণিতিক যোগফলের সমান হবে। একে তরঙ্গের উপরিপাতন বলে।<br>তরঙ্গ দুটি একই দশায় আপতিত হলে লব্ধি সরণ, $y = y_1 + y_2$<br>তরঙ্গ দুটি বিপরীত দশায় আপতিত হলে লব্ধি সরণ, $y = y_1 - y_2$ |
| **সুসংগত উৎস** | : | দুটি উৎস হতে সমদশাসম্পন্ন বা কোনো নির্দিষ্ট দশা পার্থক্যের একই তরঙ্গদৈর্ঘ্যের দুটি আলোক তরঙ্গ নিঃসৃত হলে তাদেরকে সুসংগত উৎস বলে। |
| **গঠনমূলক ব্যতিচার** | : | দুটি উৎস হতে সমান কম্পাঙ্ক ও বিস্তারের দুটি আলোক তরঙ্গের উপরিপাতনের ফলে উজ্জ্বল বিন্দু পাওয়া গেলে তাকে গঠনমূলক ব্যতিচার বলে। |
| **ধ্বংসাত্মক ব্যতিচার** | : | দুটি উৎস হতে সমান কম্পাঙ্ক ও বিস্তারের দুটি আলোক তরঙ্গের উপরিপাতনের ফলে অন্ধকার বিন্দু পাওয়া গেলে তাকে ধ্বংসাত্মক ব্যতিচার বলে। |
| **গ্রেটিং ধ্রুবক** | : | যেকোনো একটি চিড়ের শুরু থেকে পরবর্তী চিড়ের শুরু পর্যন্ত দূরত্বকে গ্রেটিং ধ্রুবক বলে। অথবা যেকোনো চিড়ের শেষ প্রান্ত থেকে পরবর্তী চিড়ের শেষ প্রান্তের দূরত্বকে গ্রেটিং ধ্রুবক বলে। |
| **সমতল বা রৈখিক সমবর্তন** | : | যে সমবর্তনে আলোক তরঙ্গের কম্পন একটি নির্দিষ্ট সমতলে সীমাবদ্ধ থাকে তাকে সমতল বা রৈখিক সমবর্তন বলে। |
| **ব্রুস্টারের সূত্র** | : | বিজ্ঞানী স্যার ডেভিড ব্রুস্টার বিভিন্ন পরীক্ষালব্ধ ফলাফল থেকে দেখান যে সমতল কোণের ট্যানজেন্টের মান প্রতিসারক মাধ্যমের আপেক্ষিক প্রতিসরাঙ্কের সমান। একেই ব্রুস্টারের সূত্র বলে। |
| **ম্যালানের সূত্র** | : | সমবর্তিত আলোক বিশ্লেষকের মধ্য দিয়ে যাওয়ার ফলে এর তীব্রতা সমবর্তক ও বিশ্লেষকের সমবর্তন অক্ষদ্বয়ের মধ্যবর্তী কোণের কোসাইনের বর্গের সমানুপাতিক হয়। নিঃসৃত আলোর তীব্রতা I এবং সমবর্তন অক্ষদ্বয়ের মধ্যবর্তী কোণ $\theta$ হলে, $I \propto (\cos\theta)^2$। |
| **আলোকের ব্যতিচার** | : | একই রং-এর সমান কম্পাঙ্ক ও বিস্তারের দুটি আলোক তরঙ্গ কোনো মাধ্যমের কোনো একটি বিন্দুর মধ্য দিয়ে একই সঙ্গে গমন করলে তরঙ্গ দুটির উপরিপাতনের ফলে বিন্দুটি কখনো খুব উজ্জ্বল ও কখনো কখনো অন্ধকার দেখায়। এই ঘটনাকে আলোকের ব্যতিচার বলে। |
| **ব্যতিচার ঝালর** | : | সমান কম্পাঙ্ক ও বিস্তারের দুটি আলোক তরঙ্গের উপরিপাতনের ফলে ব্যতিচার সৃষ্টি হয়। ফলে কোনো তলে বা পর্দায় অনেকগুলো পরস্পর সমান্তরাল উজ্জ্বল ও অন্ধকার রেখা পাওয়া যায়। এই উজ্জ্বল ও অন্ধকার রেখা বা ডোরাগুলোকে আলোকের ব্যতিচার ঝালর বলে। |
| **অপবর্তন** | : | কোনো অস্বচ্ছ ধার বা কিনারা ঘেঁষে বেঁকে আলোকের অগ্রসর হওয়ার ধর্মকে আলোকের অপবর্তন বলে। অপবর্তন দুই প্রকার; যথা— **(ক) ফ্রেনেল শ্রেণি অপবর্তন** ও **(খ) ফ্রনহফার শ্রেণি অপবর্তন।** |
| **অপবর্তন গ্রেটিং** | : | অপবর্তন সৃষ্টির জন্য একটি বিশেষ পন্থা বা উপায়ের নামই অপবর্তন গ্রেটিং। অনেকগুলো সমপ্রস্থ রেখাছিদ্র পাশাপাশি স্থাপন করে অপবর্তন গ্রেটিং গঠন করা হয়। |
| **ফ্রেনেল শ্রেণি অপবর্তন** | : | যখন উৎস এবং পর্দা তাদের মধ্যবর্তী বাধা হতে অল্প দূরত্বের মধ্যে অবস্থান করে তখন ওই বাধার দরুন পর্দায় আলোকের যে অপবর্তন পরিলক্ষিত হবে তাকে ফ্রেনেল শ্রেণি অপবর্তন বলে। |

**ফ্রনহফার শ্রেণি অপবর্তন** : যখন উৎস এবং পর্দা তাদের মধ্যবর্তী বাধা হতে অসীম দূরত্বে অবস্থান করে তখন ওই বাধার দরুন পর্দায় যে অপবর্তন পরিলক্ষিত হবে তাকে ফ্রনহফার শ্রেণি অপবর্তন বলে।

**সমতল নিঃসরণ গ্রেটিং** : সমতল নিঃসরণ গ্রেটিং বলতে একটি কাচ বা অনুরূপ কোনো পদার্থের একটি পাত বুঝায় যার ওপর সুচালো হীরক বিন্দু দ্বারা সমব্যবধানে সমান্তরালভাবে খুবই কাছাকাছি বহু সংখ্যক দাগ কাটা থাকে।

**অপবর্তনের শর্ত** : অপবর্তনের দুটি শর্ত রয়েছে; যথা—

**(ক) খাড়া ধারের ক্ষেত্রে :** ধার খুব তীক্ষ্ণ হতে হবে এবং এর প্রস্থ আলোর তরঙ্গ-দৈর্ঘ্য $\lambda$-এর সমান বা কাছাকাছি মানের হতে হবে।

**(খ) সরু ছিদ্রের ক্ষেত্রে :** ছিদ্র খুবই সরু হতে হবে যাতে এর ব্যাস তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সমান বা কাছাকাছি মানের হয়।

**গ্রেটিং উপাদান বা গ্রেটিং ধ্রুবক** : কোনো সমতল নিঃসরণ গ্রেটিং এর অস্বচ্ছ রেখার বেধ '$b$' এবং স্বচ্ছ অংশের বেধ '$a$' হলে $(a + b)$ দূরত্বকে গ্রেটিং উপাদান বা গ্রেটিং ধ্রুবক বলে।

**আলোকের সমবর্তন বা পোলারায়ন** : যে প্রক্রিয়ায় বিভিন্ন তলে কম্পমান আলোক তরঙ্গকে একটি নির্দিষ্ট তল বরাবর কম্পনক্ষম করা যায় তাকে আলোকের সমবর্তন বা পোলারায়ন বলে।

**সমবর্তিত আলোক** : একটি তলে কিংবা এর সমান্তরাল তলে কম্পমান আড় তরঙ্গবিশিষ্ট আলোককে সমবর্তিত আলোক বলে।

**অসমবর্তিত আলোক** : যে আলোকের কণাগুলোর কম্পন গতিপথের লম্ব অভিমুখে চারদিকে সমান বিস্তারে কম্পিত হয় তাকে অসমবর্তিত বা সাধারণ আলোক বলে।

**কম্পন তল** : কোনো তরঙ্গের কণাসমূহ যে সমতলে কম্পিত হয় তাকে কম্পন তল বলে।

**সমবর্তন কোণ** : কোনো প্রতিফলক মাধ্যমে আপতন কোণের যে সুনির্দিষ্ট মানের জন্য সমবর্তন সর্বাধিক হবে সেই আপতন কোণকে সমবর্তন কোণ বলে।

**সমবর্তন তল** : কম্পন তলের সাথে যে তল লম্বভাবে অবস্থান করে, তাকে সমবর্তন তল বলে।

**দ্বৈত প্রতিসরণ** : এমন কতকগুলো কেলাস আছে যাদের মধ্য দিয়ে আলোক রশ্মি গমন করলে এটি দুটি প্রতিসৃত রশ্মিতে বিভক্ত হয়। এই পদ্ধতিকে দ্বৈত প্রতিসরণ বলে।

**সরলাক্ষ** : সকল দ্বৈত প্রতিসারক কেলাসের এমন একটি নির্দিষ্ট অভিমুখ থাকে যে দ্বৈত প্রতিসরণ দ্বারাই আলোক প্রতিসৃত হয়। কেলাসের এই অভিমুখকে সরলাক্ষ বলে।

**প্রধান তল** : কোনো রশ্মির সাপেক্ষে প্রধান তল বলতে আমরা এমন একটি তলকে বুঝি যা ওই রশ্মি এবং কেলাসের সরলাক্ষের মধ্য দিয়ে গমন করে।

**প্রধান ছেদ** : কোনো কেলাসের সরলাক্ষ বরাবর এবং এর দুই বিপরীত পৃষ্ঠের সমকোণে বিবেচিত তলকে ওই কেলাসের প্রদান ছেদ বলে।

**1 আলোক বর্ষ** : এক বছরে আলোক রশ্মি যে দূরত্ব অতিক্রম করে তাকে 1 আলোক বর্ষ বলে।

## প্রয়োজনীয় গাণিতিক সূত্রাবলি

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad (1)$$

$$_a\mu_b = \frac{c_a}{c_b} \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad (2)$$

$$B = B_0 \sin \frac{2\pi}{\lambda}(vt - x) \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad (3)$$

$$E = E_0 \sin \frac{2\pi}{\lambda}(vt - x) \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad (4)$$

$$c = \frac{E_0}{B_0} \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad (5)$$

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B} \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad (6)$$

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad (7)$$

$$\frac{\sin i}{\sin r} = {}_a\mu_b \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad (8)$$

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} x \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad (9)$$

গঠনমূলক ব্যতিচারের শর্ত, $x = n\lambda = 2n\left(\frac{\lambda}{2}\right)$ ... ... ... (10)

ধ্বংসাত্মক ব্যতিচারের শর্ত, $x = (2n + 1)\frac{\lambda}{2}$ ... ... ... (11)

$$ {}_a\mu_g = \frac{\lambda_a}{\lambda_g} \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad (12)$$

$$\frac{\delta}{\lambda} = \frac{\sigma}{2\pi} \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad (13)$$

$$\Delta x = \lambda \frac{d}{a} \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad (14)$$

$$\beta = \frac{D}{2d}\lambda \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad (15)$$

$$a \sin\theta = n\lambda \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad (16)$$

$$(a + b)\sin\theta = n\lambda \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad (17)$$

$$\frac{1}{N}\sin\theta_n = n\lambda \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad (18)$$

$$a \sin\theta = (2n + 1)\lambda/2 \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad (19)$$

$$\theta = \frac{\lambda}{2d} \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad (20)$$

$$\mu = \tan i_p \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad (21)$$

$$i_p = \tan^{-1}(\mathrm{cosec}\,\theta_c) \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad (22)$$

$$\lambda = \frac{\sin\theta}{nN} \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad (23)$$

## বিশ্লেষণাত্মক ও মূল্যায়নধর্মী গাণিতিক সমস্যাবলির সমাধান

**১। পদার্থবিজ্ঞান ল্যাবে একদল শিক্ষার্থী ইয়ং-এর দ্বি-চিড় পরীক্ষায় পর্দা থেকে 1m দূরত্বে দুটি চিড় স্থাপন করল। চিড়দ্বয়ের মধ্যবর্তী ব্যবধান $4 \times 10^{-4}$ m। তারা লাল আলো ব্যবহার করে পর্দার উপর 40টি ডোরা সৃষ্টি করলো। পরে সবুজ ও নীল আলো ব্যবহার করলো। $\lambda_r = 6200\text{Å}$, $\lambda g = 4950\text{Å}$ থেকে $5700\text{Å}$ পর্যন্ত এবং $\lambda_b = 4500\text{Å}$ থেকে $4950\text{Å}$ পর্যন্ত।**

**(ক) উদ্দীপকে লাল আলোর ক্ষেত্রে ডোরার প্রস্থ নির্ণয় কর।**

**(খ) শিক্ষার্থীরা যদি আরও 20টি ডোরা বেশি পেতে চায় তাহলে কোন বর্ণের আলো ব্যবহার করতে হবে? গাণিতিক ব্যাখ্যা দাও।** [ব. বো. ২০২১]

(ক) আমরা জানি ডোরার প্রস্থ,

$$\beta = \frac{D\lambda}{2d}$$

$$\therefore \beta = \frac{1 \times 6200 \times 10^{-10}}{4 \times 10^{-4}}$$

$$= \frac{6.2 \times 10^{-7} \times 10^{4}}{4}$$

$$= 1.55 \times 10^{-3}\ \text{m} = 1.55\ \text{mm}$$

এখানে,

$D = 1$m

$2d = 4 \times 10^{-4}$ m

$\lambda_r = 6200\text{Å} = 6200 \times 10^{-10}$ m

(খ) আবার, $x_n = \frac{n\lambda D}{2d}$ ... (i)

1 ডোরার প্রস্থ $= 1.55 \times 10^{-3}$ m

∴ 40 " " $= 1.55 \times 40 \times 10^{-3}$ m

$= 62 \times 10^{-3}$ m

এখানে,
$n = 40 + 20 = 60$
$D = 1$m
$2d = 4 \times 10^{-4}$ m
$\lambda = ?$

এই ব্যবধানের মধ্যে 60টি ডোরা পেতে হলে সমীকরণ (i) থেকে পাই,

$$62 \times 10^{-3} = \frac{60 \times \lambda \times 1}{4 \times 10^{-4}}$$

বা, $\lambda = \frac{62 \times 10^{-3} \times 4 \times 10^{-4}}{60}$

$= 4.133 \times 10^{-7} = 4133 \times 10^{-10}$ m

$= 4133 \mathring{A}$

যেহেতু এটি বেগুনি আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য। সুতরাং বেগুনি আলো ব্যবহার করতে হবে।

**২। আলোর ব্যতিচার পরীক্ষণে পরীক্ষার্থীরা প্রথম দুটি সুসংগত উৎস ব্যবহার করলো যেগুলো থেকে সমদশাবিশিষ্ট 5500 $\mathring{A}$ তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আলোক তরঙ্গ নির্গত হয়। পর্দায় মিলিত তরঙ্গদ্বয়ের পথ পার্থক্য 11000 $\mathring{A}$ লক্ষ করলো।**

[মাদরাসা বোর্ড, ২০১৭; চ. বো. ২০১৫]

**(ক) উৎস হতে নির্গত প্রতিটি ফোটনের শক্তি হিসাব কর।**

**(খ) শিক্ষার্থীরা উক্ত পরীক্ষণে কোন ধরনের ব্যতিচার লক্ষ করল ? —গাণিতিকভাবে বিশ্লেষণ কর।**

(ক) উৎস থেকে নির্গত প্রতিটি ফোটনের শক্তি E

আমরা জানি, $E = h\upsilon = \frac{hc}{\lambda}$ $[\because c = \upsilon\lambda]$

$= \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^{8}}{5500 \times 10^{-10}}$

$= 3.62 \times 10^{-19}$ J $= 2.26$ $eV$

এখানে,
$h = 6.63 \times 10^{-34}$ Js
$c = 3 \times 10^{8}$ ms$^{-1}$
পথ পার্থক্য, $\sigma = 1100 \mathring{A} = 1100 \times 10^{-10}$ m
$\lambda = 5500 \mathring{A} = 5500 \times 10^{-10}$ m

(খ) দেওয়া আছে, $\lambda = 5500 \mathring{A} = 5500 \times 10^{-10}$ m

পথ পার্থক্য $= 11000 \mathring{A} = 11000 \times 10^{-10}$ m

আমরা জানি, দশা পার্থক্য $= \frac{2\pi}{\lambda} \times$ পথ পার্থক্য

$$= \frac{2\pi}{5500 \times 10^{-10}} \times 11000 \times 10^{-10} = 4\pi$$

অর্থাৎ $4\pi$ দশা পার্থক্য এবং শূন্য দশা পার্থক্য একই কথা। তরঙ্গদ্বয়ের মধ্যে দশা পার্থক্য শূন্য হলে গঠনমূলক ব্যতিচার হয়। তাই এক্ষেত্রে শিক্ষার্থীরা গঠনমূলক ব্যতিচার পর্যবেক্ষণ করবে।

**৩। ইয়ং এর দ্বি-চিড় পরীক্ষার জন্য রাসেল $5.5 \times 10^{14}$ Hz কম্পাঙ্কবিশিষ্ট আলো ব্যবহার করে চিড় হতে 1.55 m দূরত্বের পর্দায় ব্যতিচার ঝালর সৃষ্টি করল। যার পরপর দুটি উজ্জ্বল ডোরার মধ্যবর্তী দূরত্ব 0.75 mm। অন্যদিকে আরিফের পরীক্ষায় চিড় দুটির মধ্যবর্তী দূরত্ব ছিল 2.0 mm। চিড় হতে 1 m দূরে পরপর দুটি উজ্জ্বল ডোরার ব্যবধান 0.295 mm।**

**(ক) রাসেলের পরীক্ষায় চিড় দুটির মধ্যবর্তী ব্যবধান কত ছিল ?**

**(খ) রাসেল ও আরিফের মধ্যে কে বেশি তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আলো ব্যবহার করেছে, গাণিতিক যুক্তি দাও।**

(ক) $\Delta z = \frac{\lambda D}{a} = \frac{cD}{n \times 2d}$

∴ $a = \frac{cD}{n\Delta z} = \frac{3 \times 10^{8} \times 1.55}{5.5 \times 10^{14} \times 0.75 \times 10^{-3}}$

$= 1.127 \times 10^{-3}$ m
$= 1.127$ mm

এখানে,
$D = 1.55$ m
$\Delta z = 0.75$ mm $= 0.75 \times 10^{-3}$ m
$n = 5.5 \times 10^{-14}$ Hz
ধরি, $c =$ আলোর বেগ
∴ $\lambda = \frac{c}{n}$
$2d = ?$

(খ) রাসেলের ব্যবহৃত আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য, $\lambda = \frac{c}{n}$

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{5{\cdot}5 \times 10^{14}} = 5{\cdot}45 \times 10^{-7}\text{ m}$$

আরিফের পরীক্ষায় চিড়দ্বয়ের মধ্যকার দূরত্ব,

$$2d = 2\text{ mm} = 2 \times 10^{-3}\text{ m}$$

$$D = 1\text{ m}, \Delta z = 0{\cdot}295\text{ mm} = 0{\cdot}295 \times 10^{-3}\text{ m}$$

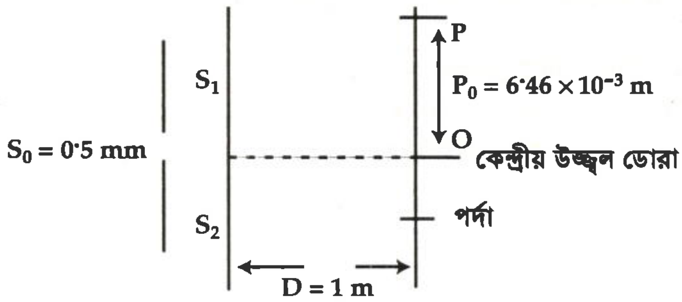
$$\Delta z = \frac{\lambda' D}{2d}$$

$$\therefore \quad \lambda' = \frac{2d \times \Delta z}{D} = \frac{2 \times 10^{-3}\text{ m} \times 0{\cdot}295 \times 10^{-3}\text{ m}}{1\text{m}}$$

$$= 5{\cdot}9 \times 10^{-7}\text{ m}$$

যেহেতু $\lambda' > \lambda$ কাজেই আরিফ রাসেল অপেক্ষা বেশি তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আলো ব্যবহার করেছে।

৪।




উদ্দীপকে 3800 Å তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আলো ব্যবহার করে ইয়ং-এর দ্বি-চিড় পরীক্ষা সম্পন্ন করা হচ্ছে। চিত্রে $S_1S_2 = 0{\cdot}5$ mm, OP $= 6{\cdot}46 \times 10^{-3}$ m, D = 1m

(ক) উদ্দীপকে কেন্দ্রীয় উজ্জ্বল ডোরা হতে পঞ্চম অন্ধকার ডোরার দূরত্ব কত ?

(খ) উদ্দীপকের P বিন্দুতে গঠনমূলক ব্যতিচার না ধ্বংসাত্মক ব্যতিচার হবে গাণিতিক বিশ্লেষণের মাধ্যমে মতামত দাও। [ঢা. বো. ২০২৩ (মান ভিন্ন); ম. বো. ২০২১ (মান ভিন্ন); কু. বো. ২০১৬]

(ক) ধরি কেন্দ্রীয় উজ্জ্বল ডোরা হতে পঞ্চম অন্ধকার ডোরার দূরত্ব, $x$

উদ্দীপক হতে $\lambda = 3800\text{ Å} = 3800 \times 10^{-10}\text{ m}$

$2d = 0{\cdot}5\text{ mm} = 5 \times 10^{-4}\text{ m}$

$D = 1\text{ m}$

$x = ?$

কেন্দ্রীয় উজ্জ্বল ডোরা হতে পঞ্চম অন্ধকার ডোরার দূরত্ব,

$$x = \frac{D}{2d}(2n+1)\frac{\lambda}{2}$$

$$= \frac{1 \times (2 \times 5 + 1)}{5 \times 10^{-4}} \times \frac{3800 \times 10^{-10}}{2}$$

$$= \frac{11 \times 3{\cdot}8 \times 10^{-7} \times 10^4}{10}$$

$$= 4{\cdot}18 \times 10^{-3}\text{ m} = 4{\cdot}18\text{ mm}$$

(খ) কেন্দ্রীয় উজ্জ্বল ডোরা থেকে P বিন্দুর দূরত্ব, $OP = x_n = 6{\cdot}46 \times 10^{-3}$ m

চিড়দ্বয়ের মধ্যবর্তী দূরত্ব, $2d = 0{\cdot}5\text{ mm} = 5 \times 10^{-4}\text{ m}$

চিড় হতে পর্দার দূরত্ব, D = 1 m

আমরা জানি, পথ পার্থক্য

$$\sigma = \frac{x_n a}{D} = \frac{6.46 \times 10^{-3} \times 5 \times 10^{-4}}{1}$$
$$= 3.23 \times 10^{-6}\ \text{m} = 32300 \times 10^{-10}\ \text{m}$$
$$= 32300\ \text{Å}$$

দশা পার্থক্য $\delta$ হলে,

$$\frac{\delta}{2\pi} = \frac{\sigma}{\lambda}$$

বা, $\dfrac{\delta}{2\pi} = \dfrac{32300}{3800}$

বা, $\dfrac{\delta}{2\pi} = 8.5$

$\therefore \quad \delta = 17\pi = (8 \times 2\pi + \pi) = \pi$

যেহেতু দশা পার্থক্য $\pi$ এর অযুগ্ম গুণিতক সেহেতু P বিন্দুতে ব্যতিচার হবে ধ্বংসাত্মক।

**৫। রায়হান অপটিকস ল্যাবে 600 nm তরঙ্গদৈর্ঘ্যবিশিষ্ট একবর্ণী আলো 2 μm প্রস্থের চিড়বিশিষ্ট একটি অপবর্তন গ্রেটিং-এর ওপর লম্বভাবে আপতিত করল। সে ধারণা করেছিল যে নয়টি চরম বিন্দু দেখতে পারবে।**

**(ক) ১ম ক্রম চরমগুলোর মধ্যবর্তী কৌণিক দূরত্ব কত ?**

**(খ) রায়হানের ধারণা কী সঠিক ছিল ? গাণিতিক বিশ্লেষণের সাহায্যে ব্যাখ্যা কর।** [সি. বো. ২০১৭]

(ক) আমরা জানি,

$$a \sin\theta_n' = (2n+1)\frac{\lambda}{2}$$

বা, $\sin\theta_n' = (2n+1)\dfrac{\lambda}{2a}$

বা, $\sin\theta_n' = (2n+1) \times \dfrac{600 \times 10^{-9}}{2 \times 2 \times 10^{-6}} = 0.45$

$\therefore \quad \theta_n' = \sin^{-1}(0.45) = 26.74°$

$\therefore \quad 2\theta_n' = 2 \times 26.74 = 53.48°$

এখানে,
আলোর তরঙ্গ দৈর্ঘ্য, $\lambda = 600\ \text{nm} = 600 \times 10^{-9}\ \text{m}$
ক্রম সংখ্যা, $n = 1$
চিড়ের বেধ, $a = 2\ \mu\text{m} = 2 \times 10^{-6}\ \text{m}$
১ম ক্রমের চরমগুলির মধ্যবর্তী কৌণিক দূরত্ব, $2\theta_n' = ?$

অতএব, ১ম ক্রম চরমগুলোর মধ্যবর্তী কৌণিক দূরত্ব $53.48°$.

(খ) উদ্দীপক হতে পাই,

আলোর তরঙ্গ দৈর্ঘ্য, $\lambda = 600\ \text{nm} = 600 \times 10^{-9}\ \text{m}$

চিড়ের বেধ, $a = 2\ \mu\text{m} = 2 \times 10^{-6}\ \text{m}$

অপবর্তন কোণ সর্বোচ্চ, $\theta = 90°$ হতে পারে। এক্ষেত্রে যে কোনো একপাশে সর্বোচ্চ ক্রমের চরম বিন্দু সৃষ্টি হলে,

$$a \sin 90° = (2n+1)\frac{\lambda}{2} \qquad \therefore\ n = 0, 1, 2, 3 \ldots\ldots$$

বা, $2n + 1 = \dfrac{2a}{\lambda}$

বা, $2n = \dfrac{2a}{\lambda} - 1$

$\therefore \quad n = \dfrac{a}{\lambda} - \dfrac{1}{2} = \dfrac{2 \times 10^{-6}}{600 \times 10^{-9}} - \dfrac{1}{2} = 2.83 \approx 3$ [$\because$ $n$ এর মান পূর্ণ সংখ্যক]

রায়হান কেন্দ্রীয় চরম ও এর উভয় পাশে তিনটি করে চরম দেখতে পাবে। অর্থাৎ রায়হান মোট 3 + 3 + 1 = 7টি চরম বিন্দু দেখতে পাবে।

অতএব, রায়হানের ধারণা সঠিক ছিল না।

**৬। ইয়ং-এর দ্বি-চিড় পরীক্ষায় দুটি চিড়ের মধ্যবর্তী দূরত্ব 2 mm নেয়া হলো। এই চিড়দ্বয় থেকে 1m দূরত্বে পর্দায় ডোরার ব্যবধান 0·3 mm পাওয়া গেল।**

**(ক) উদ্দীপকে ব্যবহৃত আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য নির্ণয় কর।**

**(খ) উপরোক্ত পরীক্ষায় পর্দার কোনো একটি বিন্দুতে তরঙ্গদ্বয়ের পথ পার্থক্য 12000 Å হলে উক্ত বিন্দুতে কোন ধরনের ব্যতিচার সৃষ্টি হবে? গাণিতিক বিশ্লেষণসহ মতামত দাও।** [সি. বো. ২০২১]

(ক) আমরা জানি,

$$x = \frac{\lambda D}{2d}$$

বা, $\lambda = \frac{2dx}{D}$

$$\therefore \lambda = \frac{2\times10^{-3}\times0{\cdot}3\times10^{-3}}{1}$$

$$= 6\times10^{-7}\ \text{m}$$

এখানে,

$2d = 2\ \text{mm} = 2\times10^{-3}\ \text{m}$

$D = 1\text{m}$

$x = 0{\cdot}3\ \text{mm} = 0{\cdot}3\times10^{-3}\ \text{m}$

$\lambda = ?$

(খ) এখানে পথ পার্থক্য,

$$\sigma = 12000\times10^{-10}\ \text{m}$$

$$= 12\times10^{-7} = 1{\cdot}2\times10^{-6}\ \text{m}$$

এখানে,

$\sigma = 12000\ \text{Å}$

$= 12000\times10^{-10}\ \text{m}$

আমরা জানি,

দশা পার্থক্য, $\delta = \frac{2\pi}{\lambda}\times$ পথ পার্থক্য

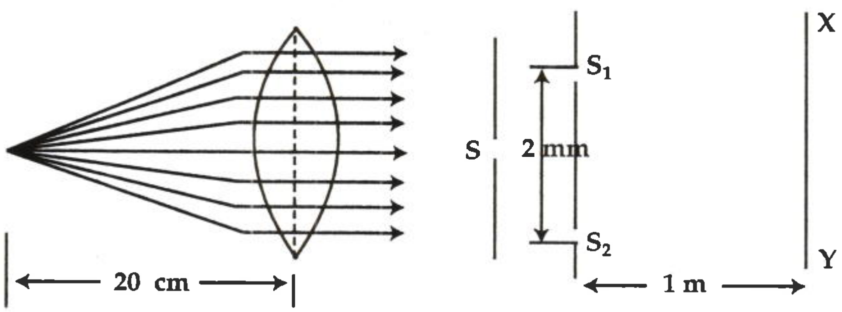
$$= \frac{2\pi}{\lambda}\times\sigma = 2\pi\times\frac{\sigma}{\lambda}$$

$$= 2\pi\times\frac{1{\cdot}2\times10^{-6}}{6\times10^{-7}} = 2\pi\times2$$

$= 2\times2\pi = 4\pi$, অর্থাৎ দশা পার্থক্য $\pi$ এর জোড় গুণিতক যা গঠনমূলক ব্যতিচারের শর্ত।

সুতরাং, এক্ষেত্রে গঠনমূলক ব্যতিচার সৃষ্টি হবে।

**৭। নিচের চিত্রে ইয়ং-এর দ্বি-চিড় পরীক্ষার একটি ব্যবস্থা বোঝানো হয়েছে, যেখানে $S_1$ ও $S_2$ দুটি সুসংগত উৎস। ব্যবহৃত আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য 5800 Å।**




**(ক) উদ্দীপকে ব্যবহৃত লেন্সের ক্ষমতা নির্ণয় কর।**

**(খ) পর্দার দূরত্ব 20 cm বৃদ্ধি করে একই প্রস্থের ডোরা পাওয়া সম্ভব কী? গাণিতিক বিশ্লেষণসহ মতামত দাও।** [ব. বো. ২০১৬]

(ক) আমরা জানি, ক্ষমতা,

$$P = \frac{1}{f}$$

$$\therefore \quad P = \frac{1}{0{\cdot}2} = 5\,D$$

এখানে,
লেন্সের ফোকাস দূরত্ব,
$f = 20\text{ cm} = 0{\cdot}2\text{ m}$
ক্ষমতা, $P = ?$

(খ) আমরা জানি, ডোরার প্রস্থ,

$$x = \frac{\lambda D}{2d} \quad \cdots \quad \cdots \quad \text{(i)}$$

$$\therefore \quad x = \frac{5800 \times 10^{-10} \times 1}{2 \times 10^{-3}}\text{ m}$$

$$= 2{\cdot}9 \times 10^{-4}\text{ m}$$

এখানে,
দুই চিড়ের মধ্যেবর্তী দূরত্ব,
$2d = 2\text{ mm} = 2 \times 10^{-3}\text{ m}$
পর্দার দূরত্ব, $D = 1\text{ m}$
আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য,
$\lambda = 5800\text{ Å} = 5800 \times 10^{-10}\text{ m}$
ডোরার প্রস্থ, $x = ?$

সমীকরণ (i) থেকে দেখা যায় যে ডোরার প্রস্থ তরঙ্গদৈর্ঘ্য $\lambda$, পর্দার দূরত্ব D এবং দুই চিড়ের মধ্যবর্তী দূরত্ব $2d$ এর ওপর নির্ভর করে। কিন্তু চিড় পরিবর্তন না করে মধ্যবর্তী দূরত্ব পরিবর্তন করা সম্ভব নয়। পর্দার দূরত্ব পরিবর্তন করলে একই প্রস্থের ডোরা পেতে হলে তরঙ্গদৈর্ঘ্যের পরিবর্তন করতে হবে অর্থাৎ উৎস পরিবর্তন করতে হবে।

ধরা যাক, নতুন উৎসের তরঙ্গদৈর্ঘ্য $\lambda_1$ এবং
$D_1 = 1\text{ m} + 0{\cdot}2\text{ m} = 1{\cdot}2\text{ m}$

এখন,

$$x' = \frac{\lambda_1 D_1}{2d}$$

$$\text{বা,} \quad \lambda_1 = \frac{2\,dx'}{D_1}$$

$$\therefore \quad \lambda_1 = \frac{2 \times 10^{-3} \times 2{\cdot}9 \times 10^{-4}}{1{\cdot}2} = 4{\cdot}833 \times 10^{-7}\text{ m}$$

$$= 4833 \times 10^{-10}\text{ m} = 4833\text{ Å}$$

এখানে,
$x' = 2{\cdot}9 \times 10^{-4}\text{ m}$
$D_1 = 1{\cdot}2\text{ m}$
$2d = 2 \times 10^{-3}\text{ m}$
$\lambda_1 = ?$

সুতরাং, 4833 Å তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আলো ব্যবহার করে একই প্রস্থের ডোরা পাওয়া সম্ভব।

**৮। ইয়ং-এর দ্বি-চিড় পরীক্ষায় চিড়ের মধ্যবর্তী দূরত্ব 0·3 mm। পর্দা থেকে চিড় দুটির দূরত্ব 1 m। বায়ু মাধ্যমে পরীক্ষায় উৎপন্ন কেন্দ্রীয় উজ্জ্বল ডোরা থেকে ৮ম উজ্জ্বল ডোরার দূরত্ব 6·2 mm। এ ব্যবস্থাটিকে পানির মধ্যে স্থাপন করে পর্যবেক্ষণ করা হলো।** $\left({}_a\mu_w = \frac{4}{3}\right)$

**(ক) পরীক্ষায় ব্যবহৃত আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য বের কর।**
**(খ) উদ্দীপকের ব্যবস্থাটি পানির মধ্যে থাকলে ডোরার বা ঝালরের কী পরিবর্তন হবে ?**

[ঢা. বো. ২০২১ (মান ভিন্ন); ম. বো. ২০২১ (মান ভিন্ন); ব. বো. ২০১৯ (মান ভিন্ন); রা. বো. ২০১৬]

(ক) আমরা জানি,

$$x_n = \frac{n\lambda_a D}{2d}$$

$$\text{বা,} \quad \lambda_a = \frac{x_n \times 2d}{nD}$$

$$\therefore \quad \lambda_a = \frac{6{\cdot}2 \times 10^{-3} \times 3 \times 10^{-4}}{8 \times 1}\text{ m}$$

$$= 2{\cdot}325 \times 10^{-7}\text{ m}$$

$$= 2325 \times 10^{-10}\text{ m} = 2325\text{ Å}$$

এখানে,
চিড়ের মধ্যবর্তী দূরত্ব বা প্রস্থ,
$2d = 0{\cdot}3\text{ mm} = 3 \times 10^{-4}\text{ m}$
পর্দা ও চিড়ের মধ্যবর্তী দূরত্ব, $D = 1\text{ m}$
বায়ু মাধ্যমে কেন্দ্রীয় উজ্জ্বল ডোরা থেকে ৮ম উজ্জ্বল ডোরার দূরত্ব,
$x_n = 6{\cdot}2\text{ mm} = 6{\cdot}2 \times 10^{-3}\text{ m}$
${}_a\mu_w = \frac{4}{3}$
ডোরার ক্রম, $n = 8$
বায়ুতে আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য, $\lambda_a = ?$

(খ) আবার, আমরা জানি,

$${}_a\mu_w = \frac{\lambda_a}{\lambda_w}, \text{ এখানে, } \lambda_w = \text{পানিতে আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য}$$

বা, $\lambda_w = \frac{\lambda_a}{{}_a\mu_w} = \frac{2325 \times 10^{-10}}{\frac{4}{3}}$

$\therefore \lambda_w = \frac{2325 \times 3 \times 10^{-10}}{4}$

$= 1743{\cdot}8 \times 10^{-10}\text{ m} = 1743{\cdot}8\ \text{Å}$

এখন পানিতে ৮ম উজ্জ্বল ডোরার দূরত্ব,

$$x_w = \frac{n\lambda_w D}{2d}$$

$\therefore x_w = \frac{8 \times 1743{\cdot}8 \times 10^{-10} \times 1}{3 \times 10^{-4}}\text{m}$

$= 4650 \times 10^{-6}\text{ m}$

$= 4{\cdot}65 \times 10^{-3}\text{ m} = 4{\cdot}65\text{ mm}$

এখানে, $x_a > x_w$; অর্থাৎ পানিতে ৮ম উজ্জ্বল ডোরা কেন্দ্রীয় ডোরার দিকে $(6{\cdot}2 - 4{\cdot}65)\text{ mm} = 1{\cdot}55\text{ mm}$ সরে আসে। অর্থাৎ ডোরার প্রস্থ কমে যায়।

আমরা জানি, বায়ুতে ডোরার প্রস্থ

$$x_a = \frac{\lambda_a D}{2d} = \frac{2325 \times 10^{-10} \times 1}{3 \times 10^{-4}}\text{ m}$$

$= 775 \times 10^{-6}\text{ m} = 0{\cdot}775\text{ mm}$

এবং পানিতে ডোরার প্রস্থ,

$$x_w = \frac{\lambda_w D}{2d} = \frac{1743{\cdot}8 \times 10^{-10} \times 1}{3 \times 10^{-4}}$$

$= 581 \times 10^{-6}\text{ m} = 0{\cdot}581\text{ mm}$

প্রতিটি ডোরার প্রস্থ হ্রাস পায়,

$x_a - x_w = 0{\cdot}775\text{ mm} - 0{\cdot}581\text{ mm} = 0{\cdot}194\text{ mm}$

অর্থাৎ পানিতে ডোরার প্রস্থ হ্রাস পাবে $= = 0{\cdot}194\text{ mm}$

**৯। বায়ুতে ইয়ং-এর একটি দ্বি-চিড় পরীক্ষায় ব্যবহৃত আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য 5200Å, পর্দার দূরত্ব 90 cm এবং চিড়ের ব্যবধান 0·4 mm। এরপর পরীক্ষণটি গ্লিসারিন ও কেরোসিন মাধ্যমে সম্পন্ন করা হয়। গ্লিসারিন ও কেরোসিনের প্রতিসরাঙ্ক যথাক্রমে 1·47 এবং 1·44।**

**(ক) উদ্দীপকের পরীক্ষণটি হতে 7th অন্ধকার ডোরার দূরত্ব নির্ণয় কর।**

**(খ) গ্লিসারিন ও কেরোসিনে ডোরার প্রস্থ সমান পাওয়া যাবে কী? গাণিতিক মতামত দাও।** [ম. বোর্ড ২০২১]

(ক) আমরা জানি,

$$x_n = \frac{n\lambda D}{2d}$$

$\therefore x_7 = \frac{7 \times 5200 \times 10^{-10} \times 0{\cdot}9}{0{\cdot}4 \times 10^{-3}}$

$= \frac{7 \times 5{\cdot}2 \times 0{\cdot}9 \times 10^{-4}}{0{\cdot}4}$

$= 8{\cdot}19 \times 10^{-3}\text{ m}$

$= 8{\cdot}19\text{ mm}$

এখানে,

$n = 7$

$2d = 0{\cdot}4\text{ mm} = 0{\cdot}4 \times 10^{-3}\text{ m}$

$\lambda = 5200\text{Å} = 5200 \times 10^{-10}\text{ m}$

$D = 90\text{ cm} = 0{\cdot}9\text{m}$

(খ) আবার, $\frac{\lambda_a}{\lambda_g} = \frac{\mu_g}{\mu_a} = \frac{x_a}{x_g}$

$\therefore \quad x_g = \frac{\mu_a x_a}{\mu_g} \quad \left[\because \; x_a = \frac{8.19}{7} = 1.17 \text{ mm} = 1.17 \times 10^{-3} \text{ m}\right]$

$= \frac{1 \times 1.17 \times 10^{-3}}{1.47}$

$= 0.7959 \times 10^{-3} \text{ m} = 0.7959 \text{ mm}$

এবং $x_k = \frac{1 \times 1.17 \times 10^{-3}}{1.44} = 0.8125 \times 10^{-3} \text{ m} = 0.8125 \text{ mm}$

এখানে,
$\mu_a = 1.00$
$\mu_g = 1.47$
$\mu_k = 1.44$

গ্লিসারিন ও কেরোসিনে ডোরার প্রস্থ ভিন্নতর হবে।

**১০। জারা পদার্থবিজ্ঞান গবেষণাগারে ইয়ং-এর দ্বি-চিড় পরীক্ষায় 0.2 cm ব্যবধানে অবস্থিত দুটি চিড়ে আলো ফেলল। চিড় থেকে 100 cm দূরে পর্দায় ডোরার প্রস্থ 0.03 cm পেল। ডোরার প্রস্থ বৃদ্ধি করার জন্য জারা চিড়ের ব্যবধান কমিয়ে 0.15 cm এবং পর্দার দূরত্ব বাড়িয়ে 150 cm করল।**

**(ক) পরীক্ষায় ব্যবহৃত আলোর কম্পাঙ্ক নির্ণয় কর।**

**(খ) ডোরার প্রস্থ বৃদ্ধি করার জন্য জারা যে কাজটি করেছে তা যথার্থ কি না? গাণিতিক বিশ্লেষণপূর্বক মন্তব্য কর।** [রা. বো. ২০২১]

(ক) আমরা জানি,

$x = \frac{\lambda D}{2d}$

বা, $3 \times 10^{-4} = \frac{\lambda \times 1}{2 \times 10^{-3}}$

$\therefore \quad \lambda = 3 \times 2 \times 10^{-7} = 6 \times 10^{-7} \text{ m}$

এখানে,
$2d = 0.2 \text{ cm} = 2 \times 10^{-3} \text{ m}$
$D = 100 \text{ cm} = 1 \text{ m}$
$x = 0.03 \text{ cm} = 3 \times 10^{-4} \text{ m}$
$\upsilon = ?$

আবার, $\upsilon = \frac{c}{\lambda} \quad \therefore \upsilon = \frac{3 \times 10^8}{6 \times 10^{-7}} = 0.5 \times 10^{15} = 5 \times 10^{14} \text{ Hz}$

(খ) এক্ষেত্রে, $2d = 0.15 \text{ cm} = 15 \times 10^{-4} \text{ m}$ এবং $D = 150 \text{ cm} = 1.5 \text{ m}$

$x = \frac{\lambda D}{2d}$

$\therefore \quad x = \frac{6 \times 10^{-7} \times 1.5}{15 \times 10^{-4}} = \frac{9.0 \times 10^{-3}}{15} = 6 \times 10^{-4} \text{ m}$

পূর্বের তুলনায় প্রস্থ দ্বিগুণ হবে। সুতরাং, কাজটি যথার্থ হয়েছে।

**১১। ইয়ং-এর দ্বি-চিড় পরীক্ষায় 5000 Å তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আলো প্রয়োগ করা হলো। চিড়দ্বয়ের মধ্যবর্তী দূরত্ব 0.1 mm এবং চিড় থেকে পর্দার দূরত্ব 2 m।**

**(ক) কেন্দ্রীয় উজ্জ্বল ডোরা হতে দশম উজ্জ্বল ডোরার দূরত্ব কত ?**

**(খ) দশম উজ্জ্বল ডোরা এবং দশম অন্ধকার ডোরার মধ্যকার কৌণিক অবস্থান গাণিতিক বিশ্লেষণসহ তুলনা কর।** [অভিন্ন প্রশ্ন (ক ও খ সেট) ২০১৮]

(ক) আমরা জানি,

$x_n = n\lambda \frac{D}{2d}$

$= \frac{10 \times 5 \times 10^{-7} \times 2}{0.1 \times 10^{-3}} = 0.1 \text{ m}$

এখানে,
$D = 2\text{m}$
$\lambda = 5000 \text{ Å} = 5 \times 10^{-7} \text{ m}$
$2d = 0.1 \text{ mm} = 0.1 \times 10^{-3} \text{ m}$

(খ) উজ্জ্বল ডোরার ক্ষেত্রে আমরা জানি,

$a \sin\theta = n\lambda$

বা, $\sin\theta = \frac{n\lambda}{a}$

$\therefore \quad \theta = \sin^{-1}\frac{n\lambda}{a} = \sin^{-1}\left(\frac{10 \times 5 \times 10^{-7}}{0.1 \times 10^{-3}}\right) = 2.87°$

অন্ধকার ডোরার ক্ষেত্রে,

$$a \sin\theta' = (2n-1)\frac{\lambda}{2}$$

$$\therefore \quad \theta' = \sin^{-1}\left\{(2n-1)\times\frac{\lambda}{2a}\right\}$$

$$= \sin^{-1}\left\{(2\times 10-1)\times\frac{5\times 10^{-7}}{2\times 0{\cdot}1\times 10^{-3}}\right\} = 2{\cdot}72^\circ$$

সুতরাং গাণিতিক বিশ্লেষণ থেকে দেখা যায় দশম উজ্জ্বল ডোরা ও দশম অন্ধকার ডোরার মধ্যবর্তী কৌণিক অবস্থানের পার্থক্য $\Delta\theta = \theta - \theta' = 2{\cdot}87 - 2{\cdot}72 = 0{\cdot}15^\circ$.

**১২। পরীক্ষাগারে ইয়ং-এর দ্বি-চিড় পরীক্ষা সম্পন্ন করতে গ্রুপ বি-এর শিক্ষার্থীরা 5460 Å তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সবুজ আলো দ্বারা একটি পর্দাকে আলোকিত করলো। ফলে স্লিটগুলো হতে 1 m দূরে পর্দার ওপর যে ব্যতিচার পট্টি দেখা গেল তার চারটি উজ্জ্বল ডোরার ব্যবধান 5 mm।**

**(ক) উদ্দীপকে ব্যবহৃত স্লিট দুটোর মধ্যবর্তী দূরত্ব কত ?**

**(খ) উদ্দীপকের পরীক্ষণটি পানিতে রেখে সম্পন্ন করলে ডোরার প্রস্থের কোনোরূপ পরিবর্তন হতো কি না? গাণিতিক বিশ্লেষণের মাধ্যমে তোমার মতামত দাও।** [ব. বো. ২০২৩ (মান ভিন্ন); রা. বো. ২০১৯]

(ক) আমরা জানি,

$$x_n = \frac{n\lambda D}{2d}$$

বা, $$2d = \frac{nD\lambda}{x_n} = \frac{4\times 1\times 5460\times 10^{-10}}{5\times 10^{-3}}$$

$$\therefore \quad 2d = 0{\cdot}437\times 10^{4}\times 10^{-7}\text{ m} = 0{\cdot}437\times 10^{-3}\text{ m}$$
$$= 0{\cdot}437\text{ mm}$$

এখানে,
$\lambda = 5460$ Å $= 5460\times 10^{-10}$ m
$D = 1$ m
$n = 4$
$x_n = 5$ mm $= 5\times 10^{-3}$ m
$2d = ?$

সুতরাং, স্লিট দুটির মধ্যবর্তী দূরত্ব, $2d = 0{\cdot}437$ mm

(খ) আবার, আমরা জানি,

$$_a\mu_w = \frac{\lambda_a}{\lambda_w} \text{ বা, } \lambda_w = \frac{\lambda_a}{_a\mu_w} = \frac{5460\times 10^{-10}}{1{\cdot}5} = 3640\times 10^{-10}\text{ m}$$

এখন পানিতে চারটি ডোরার প্রস্থ,

$$x_w = \frac{n\lambda_w D}{2d} = \frac{4\times 3640\times 10^{-10}}{0{\cdot}437\times 10^{-3}}$$
$$= 3{\cdot}33\times 10^{-3}\text{ m} = 3{\cdot}33\text{ mm}$$

এখানে $x_n > x_w$, অর্থাৎ পানিতে চারটি উজ্জ্বল ডোরা কেন্দ্রের দিকে $(5 - 3{\cdot}33) = 1{\cdot}67$ mm সরে আসবে।

**১৩। ইয়ং-এর দ্বি-চিড় পরীক্ষায় চিড় দুটির ব্যবধান 0·4 mm এবং পর্দার দূরত্ব 1 m। 3100 Å তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আলো চিড়ের ওপর ফেলা হলে পর্দায় কেন্দ্র হতে ডানে বা বায়ে 12টি উজ্জ্বল ডোরা দেখা যায়। চিড়ের মধ্যবর্তী ব্যবধান কমানো হলে পর্দায় দৃশ্যমান ডোরার পরিবর্তন হয়।**

**(ক) পর্দায় 12তম উজ্জ্বল ডোরার কৌণিক সরণ নির্ণয় কর।**

**(খ) চিড় দুটির ব্যবধান অর্ধেক করা হলে পূর্ববর্তী 12টি উজ্জ্বল ডোরার স্থানে পরিবর্তিত ডোরার সংখ্যার কী পরিবর্তন হবে? উদ্দীপকের আলোকে গাণিতিক বিশ্লেষণ দাও।** [রা. বো. ২০২৩ (মান ভিন্ন); য. বো. ২০২৩ (মান ভিন্ন); চ. বো. ২০২৩ (মান ভিন্ন); কু. বো. ২০১৯]

(ক) আমরা জানি, কৌণিক ব্যবধান,

$$\theta = \frac{\lambda}{2d}$$

বা, $$\theta = \frac{3100\times 10^{-10}}{0{\cdot}4\times 10^{-3}}$$

$$\therefore \quad \theta = \frac{3100\times 10^{-10}}{0{\cdot}4\times 10^{-3}}\times\frac{180}{\pi} = 0{\cdot}044^\circ$$

এখানে,
$2d = 0{\cdot}4$ mm $= 0{\cdot}4\times 10^{-3}$ m
$D = 1$ m
$\lambda = 3100$ Å $= 3100\times 10^{-10}$ m
$n = 12$

(খ) আবার, আমরা জানি, 12তম ডোরার দূরত্ব,

$$x_n = \frac{n\lambda D}{2d}$$

$$\therefore \quad x_{12} = \frac{12 \times 3100 \times 10^{-10} \times 1}{0{\cdot}4 \times 10^{-3}} = 9{\cdot}3 \times 10^{-3}\ \text{m}$$

এখন, চিড় দুটির ব্যবধান অর্ধেক করা হলে, অর্থাৎ $2d = \frac{0{\cdot}4\,\text{mm}}{2} = 0{\cdot}2\ \text{mm} = 0{\cdot}2 \times 10^{-3}\ \text{m}$ করলে ওই দূরত্বে ডোরার সংখ্যা পাই,

$$x_n = \frac{n\lambda D}{2d}$$

$$\therefore \quad n = \frac{x_n \times 2d}{\lambda D} = \frac{9{\cdot}3 \times 10^{-3} \times 0{\cdot}2 \times 10^{-3}}{3100 \times 10^{-10} \times 1} = 6$$

এখানে,

$x_n = 9{\cdot}3 \times 10^{-3}\ \text{m}$

$\lambda = 3100 \times 10^{-10}\ \text{m}$

$D = 1\ \text{m}$

$n = ?$

সুতরাং, চিড় দুটির ব্যবধান অর্ধেক করা হলে 6টি ডোরা সৃষ্টি হবে।

১৪। রিয়া এবং রিপা দুটি অপবর্তন গ্রেটিং নিয়ে পরীক্ষা করছিল। রিয়ার গ্রেটিং-এ প্রতি সেন্টিমিটারে দাগসংখ্যা 6000। এর ভেতরে কমলা রঙের আলো ফেলা হলো। অপরদিকে রিপার গ্রেটিং-এর গ্রেটিং ধ্রুবক $1{\cdot}6 \times 10^{-6}$ m। সে সবুজ আলো নিয়ে পরীক্ষা করছিল। রিয়া বললো প্রথম উজ্জ্বল রেখার জন্য অপবর্তন কোণ আমার ক্ষেত্রে বেশি হবে। রিপা বললো, দেখা যাক।

| আলোর বর্ণ | তরঙ্গদৈর্ঘ্য (Å) |
|---|---|
| কমলা | 6000 |
| সবুজ | 5000 |
| বেগুনি | 4000 |

(ক) বেগুনি আলোর ক্ষেত্রে একটি ফোটনের শক্তি নির্ণয় কর।

(খ) রিয়ার উক্তি যথার্থ কি না— হিসাব কর। [ব. বো. ২০২২]

(ক) আমরা জানি,

$$E_V = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6{\cdot}63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{4000 \times 10^{-10}}$$

$$= 4{\cdot}97 \times 10^{-19}\ \text{J}$$

$$= \frac{4{\cdot}97 \times 10^{-19}}{1{\cdot}6 \times 10^{-19}}\ eV$$

$$= 3{\cdot}11\ eV$$

এখানে,

বেগুনি আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য :

$\lambda_V = 4000\text{Å} = 4000 \times 10^{-10}\ \text{m}$

$h = 6{\cdot}63 \times 10^{-34}\ \text{Js}$

$n = 1$

$E_V = ?$

কমলা আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য :

$\lambda_C = 6000\text{Å} = 6000 \times 10^{-10}\ \text{m}$

$N = 6000$

(খ) গ্রেটিং ধ্রুবক,

$$d = \frac{1}{N} = \frac{1\ \text{cm}}{6000} = \frac{1 \times 10^{-2}}{6000}$$

আমরা জানি,

$$d \sin\theta_1 = n\lambda$$

$$\sin\theta_1 = \frac{n\lambda}{d} = \frac{1 \times 6000 \times 10^{-10}}{\frac{1 \times 10^{-2}}{6000}}$$

$$= \frac{1 \times 6000 \times 10^{-10} \times 6000}{1 \times 10^{-2}} = 0{\cdot}36$$

$$\therefore \quad \theta_1 = \sin^{-1} 0{\cdot}36 = 21{\cdot}1°$$

এখানে,

রিয়ার আলোর তরঙ্গ দৈর্ঘ্য,

$\lambda = 6000\text{Å} = 6000 \times 10^{-10}\ \text{m}$

$n = 1$

আবার, $d \sin \theta_2 = n\lambda$

$$\sin \theta_2 = \frac{n\lambda}{d}$$

$$\sin \theta_2 = \frac{1 \times 5000 \times 10^{-10}}{1.6 \times 10^{-6}}$$

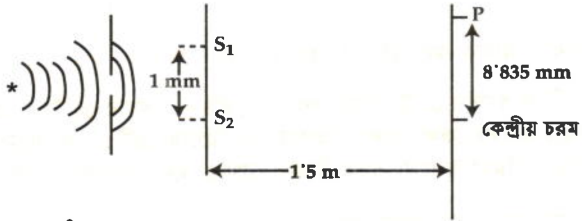
$$\sin \theta_2 = 0.3125$$

$$\theta_2 = \sin^{-1}(0.3125) = 18.21^\circ$$

এখানে,
রিপার আলোর তরঙ্গ দৈর্ঘ্য,
$\lambda = 5000\text{Å} = 5000 \times 10^{-10}$ m
$n = 1$
$d = 1.6 \times 10^{-6}$ m
$\theta_2 = ?$

এখানে $\theta_1 > \theta_2$; অর্থাৎ রিয়ার ক্ষেত্রে অপর্বতন কোণ (21.1°) রিয়ার অপবর্তন কোণ (18.21°) অপেক্ষা বেশি।
∴ রিয়ার উক্তিটি যথার্থ।

**১৫। উদ্দীপকটি লক্ষ কর :**




**দ্বি-চিড় পরীক্ষণটিতে 5890 Å আলোক রশ্মি ব্যবহার করা হলো।**

**(ক) পরপর দুটি উজ্জ্বল ডোরার দূরত্ব নির্ণয় কর।**

**(খ) P বিন্দুটিতে কোন ধরনের ব্যতিচার পাওয়া যাবে—গাণিতিক ব্যাখ্যা কর।** [ঢা. বো. ২০২৩]

(ক) আমরা জানি, পরপর দুটি উজ্জ্বল ডোরার দূরত্ব,

$$b = \frac{D\lambda}{2d} = \frac{1.5 \times 5890 \times 10^{-10}}{1 \times 10^{-3}}$$

$$= 8835 \times 10^{-7} = 0.8835 \text{ mm}$$

এখানে,
$D = 1.5$ m
$2d = 1$ mm $= 1 \times 10^{-3}$ m
$\lambda = 5890\text{Å} = 5890 \times 10^{-10}$ m

(খ) এখানে, কেন্দ্র হতে P বিন্দুর দূরত্ব $x_n = 8.835 \text{ mm} = 8.835 \times 10^{-3}$ m

এখন উজ্জ্বল বা অন্ধকার যে ধরনের ডোরাই সৃষ্টি হোক না কেন $n$ সংখ্যাটি একটি পূর্ণ গুণিতক সংখ্যা হবে। ধরা যাক, উজ্জ্বল ডোরা সৃষ্টি হয়েছে। সুতরাং,

$$x_n = \frac{nD\lambda}{2d} \text{ বা, } n = \frac{x_n \times 2d}{D\lambda}$$

$$= \frac{8.835 \times 10^{-3} \times 1 \times 10^{-3}}{1.5 \times 5890 \times 10^{-10}}$$

$$\therefore n = \frac{8.835 \times 10^4}{8835} = \frac{88350}{8835} = 10$$

যেহেতু, এক্ষেত্রে $n$ পূর্ণ সংখ্যা সুতরাং, P বিন্দুতে গঠনমূলক ব্যতিচার সৃষ্টি হয়েছে।

**১৬। ইয়ংয়ের দ্বিচিড় পরীক্ষণে ব্যবহৃত আলোক উৎসের তরঙ্গদৈর্ঘ্য 5896 Å, চিড়দ্বয়ের মধ্যবর্তী দূরত্ব 2 mm এবং চিড় ও পর্দার লম্ব দূরত্ব 1 m। পরবর্তীতে চিড়দ্বয়ের মধ্যবর্তী দূরত্ব অর্ধেক এবং চিড় ও পর্দার গুরুত্ব দ্বিগুণ করা হলো।**

**(ক) প্রথম ক্ষেত্রে দশম উজ্জ্বল ডোরার কেন্দ্রীয় উজ্জ্বল ডোরা হতে দূরত্ব নির্ণয় কর।**

**(খ) দ্বিতীয় ক্ষেত্রে ডোরার প্রস্থ পরিবর্তন হয়—গাণিতিক ব্যাখ্যা দাও।** [রা. বো. ২০২৩]

(ক) আমরা জানি, $n^{th}$ ডোরার দূরত্ব,

$$x_n = \frac{n\lambda D}{2d}$$

$$\therefore x_{10} = \frac{10 \times 5896 \times 10^{-10} \times 1}{2 \times 10^{-3}}$$

$$= \frac{5.896}{2} \times 10^{-3}$$

$$= 2.948 \times 10^{-3} \text{ m} = 2.948 \text{ mm}$$

এখানে,
$n = 10$
$\lambda = 5896\text{Å} = 5896 \times 10^{-10}$ m
$2d = 2$ mm $= 2 \times 10^{-3}$ m
$D = 1$ m

(খ) ডোরার প্রস্থ,

$$b = \frac{D\lambda}{2d}$$

এখানে,

$D' = 2 \times 1 = 2\,m$

$2d' = \frac{2}{2}\,mm = 1\,mm = 1 \times 10^{-3}\,m$

প্রথম ক্ষেত্রে ডোরার প্রস্থ,

$$b = \frac{1 \times 5896 \times 10^{-10}}{2 \times 10^{-3}} = 2948 \times 10^{-7} = 0^{\cdot}2948\ mm$$

এবং দ্বিতীয় ক্ষেত্রে,

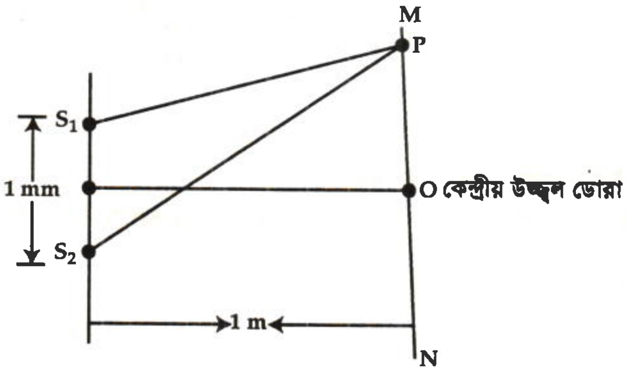
$$b' = \frac{2 \times 5^{\cdot}896 \times 10^{-10}}{1 \times 10^{-3}}$$

$$= 1^{\cdot}179 \times 10^{-3}\ m = 1^{\cdot}179\ mm$$

সুতরাং, $\frac{b'}{b} = \frac{1^{\cdot}179}{0^{\cdot}2948} = 4$

অর্থাৎ ডোরার প্রস্থ 4 গুণ বৃদ্ধি পায়।

১৭।




**বায়ু মাধ্যমে ইয়ংয়ের দ্বিচিড় পরীক্ষায় ব্যবহৃত আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য $\lambda = 3800$ Å**

**এবং $S_2P - S_1P = 6\lambda$**

**(ক) চিত্রে O এবং P বিন্দুর মধ্যকার দূরত্ব নির্ণয় কর।**

**(খ) সমগ্র পরীক্ষাটিকে 1.30 প্রতিসরাঙ্কের কোনো মাধ্যমে সম্পন্ন করা হলে ১২তম অন্ধকার ডোরার কৌণিক অবস্থানের কী পরিবর্তন হবে? গাণিতিকভাবে বিশ্লেষণ কর।** [কু. বো. ২০২৩]

(ক) আমরা জানি,

$$x_n = \frac{n\lambda}{2d} = \frac{6 \times 3800 \times 10^{-10}\ m}{1 \times 10^{-3}}$$

$$= 6 \times 3^{\cdot}8 \times 10^{-4} = 22^{\cdot}8 \times 10^{-4}\ m$$

$$\therefore\ x_n = 2^{\cdot}28 \times 10^{-3}\ m$$

এখানে,

গঠনমূলক ব্যতিচারের ক্ষেত্রে,

$S_2P - S_1P = n\lambda = 6\lambda$

$\therefore\ n = 6$

$2d = 1\ mm = 1 \times 10^{-3}\ m$

$\lambda = 3800\text{Å} = 3800 \times 10^{-10}\ m$

$OP = x_n = ?$

(খ) অন্ধকার ডোরার ক্ষেত্রে,

$$2d \sin\theta = (2n - 1)\frac{\lambda}{2} = (2 \times 11 - 1)\frac{\lambda}{2}$$

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{21 \times 3800 \times 10^{-10}}{2 \times 1 \times 10^{-3}}\right)$$

$$= \left(\frac{21 \times 3^{\cdot}8 \times 10^{-7} \times 10^{3}}{2}\right)$$

$$= \sin^{-1}(39^{\cdot}9 \times 10^{-4})$$

$$= \sin^{-1}(0^{\cdot}00399) = 0^{\cdot}23^{\circ}$$

আবার, $\frac{\lambda_a}{\lambda_g} = \frac{\mu_g}{\mu_a}$

বা, $\lambda_g = \frac{\mu_a \lambda_a}{\mu_g} = \frac{1 \times 3800 \times 10^{-10}}{1.3}$

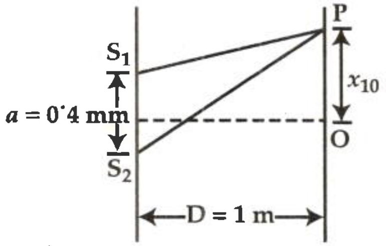
$= \frac{3.8 \times 10^{-7}}{1.3} = 2.923 \times 10^{-7}$

$\theta' = \sin^{-1}\left(\frac{21 \times 2.923 \times 10^{-7} \times 10^3}{2}\right)$

$= \sin^{-1}(0.00307) = 0.17°$

সুতরাং, কৌণিক অবস্থানের পরিবর্তন $= 0.23° - 0.17° = 0.06°$

**১৮। চিত্রে ইয়ংয়ের দ্বিচিড় পরীক্ষার একটি ব্যবস্থা দেখানো হলো। চিড়ে 3100 Å তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আলো ফেলা হলে পর্দার কেন্দ্র হতে উভয় দিকে 10টি ডোরা দেখা গেল।**




**(ক) পর্দায় 10তম উজ্জ্বল ডোরার কৌণিক সরণ কত?**

**(খ) উদ্দীপকে চিড় দুটির ব্যবধান অর্ধেক করা হলে পর্দায় ডোরার সংখ্যার কী পরিবর্তন হবে? গাণিতিকভাবে বিশ্লেষণ কর।** [য. বো. ২০২৩]

(ক) আমরা জানি, $n^{th}$ উজ্জ্বল ডোরার কৌণিক দূরত্ব,

$x_n = \frac{n\lambda D}{a}$

বা, $x_{10} = \frac{10 \times 3100 \times 10^{-10} \times 1}{0.4 \times 10^{-3}}$

$= \frac{3.1 \times 10^{-6} \times 10^3}{0.4} = \frac{3.1 \times 10^{-3}}{0.4}$

$= 7.75 \times 10^{-3}$ m $= 7.75$ mm

এখানে,

$a = 0.4$ mm $= 0.4 \times 10^{-3}$ m

D = 1 m

$\lambda = 3100$ Å $= 3100 \times 10^{-10}$ m

$x_{10} = ?$

(খ) এখানে, $a = \frac{0.4 \text{ mm}}{2} = 0.2$ mm $= 0.2 \times 10^{-3}$ m

এখন, $x_n = \frac{n\lambda D}{0.2}$ বা, $n = \frac{x_n \times 0.2}{\lambda D}$

$= \frac{7.75 \times 10^{-3} \times 0.2}{3100 \times 10^{-10} \times 1} = \frac{7.75 \times 2 \times 10^{-4} \times 10^6}{0.31} = 50$

অর্থাৎ ডোরার সংখ্যা বৃদ্ধি পেয়ে 50টি হবে।

**১৯। ইয়াংয়ের দ্বিচিড় পরীক্ষায় চিড়দ্বয়ের মধ্যবর্তী ব্যবধান 1 mm এর থেকে পর্দার দূরত্ব 1m। ব্যবহৃত আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য 6000 Å।**

**(ক) উদ্দীপকের পর্দায় সৃষ্ট ডোরাগুলোর প্রস্থ কত?**

**(খ) উদ্দীপকের চিড় দুটির মধ্যবর্তী দূরত্ব ব্যবহৃত আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্যের দ্বিগুণ হলে পর্দায় সর্বোচ্চ কয়টি উজ্জ্বল ডোরা পাওয়া সম্ভব? তোমার উত্তর গাণিতিক বিশ্লেষণে দাও।** [চ. বো. ২০২৩]

(ক) আমরা জানি, ডোরার প্রস্থ,

$b = \frac{D\lambda}{2 \times 2d}$

$= \frac{1 \times 6000 \times 10^{-10}}{2 \times 10^{-3}}$

$= 3 \times 10^{-4}$ m $= 0.3$ mm

এখানে,

D = 1 m

$2d = 1$ mm $= 1 \times 10^{-3}$ m

$\lambda = 6000$ Å $= 6000 \times 10^{-10}$ m

(খ) প্রশ্নে কেন্দ্রীয় উজ্জ্বল ডোরা থেকে দূরত্ব উল্লেখ নেই।

আমরা জানি ডোরার প্রস্থ,

$$x_n = \frac{n\lambda D}{2d} = \frac{n \times 6000 \times 10^{-10}}{1 \times 10^{-3}} \times 1$$

$$= 6n \times 10^{-4}$$

এখানে,

$\lambda = 2 \times 6000\ \mathring{A} = 12000\ \mathring{A}$

$= 12000 \times 10^{-10}$ m

$= 12 \times 10^{-7}$ m

$\lambda$ দ্বিগুণ হলে,

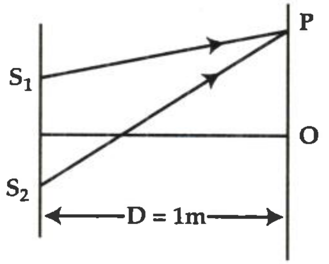
$$x_n = \frac{n'\lambda D}{2d}$$

$$\frac{n\lambda D}{2d} = \frac{n'\lambda D}{2d} = \frac{2n'\lambda D}{2d}$$

$$\frac{n}{n'} = 2$$

অর্থাৎ দ্বিগুণ সংখ্যক ডোরা উৎপন্ন হবে।

২০।




**[P বিন্দুতে দশা পার্থক্য = $6\pi$, আলোর কম্পাঙ্ক = $10^{16}$ Hz, $S_1S_2$ = 1 mm, পানির প্রতিসরাঙ্ক = 1·33।]**
**চিত্রে ইয়ংয়ের দ্বিচিড় পরীক্ষার তথ্য দেওয়া হলো।**

**(ক) O ও P বিন্দুর মধ্যকার দূরত্ব নির্ণয় কর।**

**(ঘ) পরীক্ষাটি পানিতে সম্পন্ন করলে ডোরার প্রস্থের পরিবর্তন গাণিতিকভাবে বিশ্লেষণ কর।** [ব. বো. ২০২৩]

(ক) P বিন্দুতে দশা পার্থক্য $\delta = 6\pi$।

এখানে যেহেতু দশা পার্থক্য $\pi$-এর জোড় গুণিতক সুতরাং P বিন্দুতে গঠনমূলক ব্যতিচার সৃষ্টি হবে।

আমরা জানি, দশা পার্থক্য,

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \times \text{পথ পার্থক্য}$$

বা, $\text{পথ পার্থক্য} = \frac{\lambda \times \delta}{2\pi} = \frac{\lambda \times 6\pi}{2\pi} = 3\lambda = n\lambda$

সুতরাং, $n = 3$

এখানে,

$\upsilon = 10^{16}$ Hz

$\therefore \lambda = \frac{C}{\upsilon} = \frac{3 \times 10^8}{10^{16}} = 3 \times 10^{-8}$ m

O ও P বিন্দুর দূরত্ব, $x = n\lambda = 3 \times 3 \times 10^{-8}$ m $= 9 \times 10^{-8}$ m

(খ) ডোরার প্রস্থ,

$$x = \frac{D\lambda}{2d}$$

$$\therefore b = \frac{1 \times 3 \times 10^{-8}}{1 \times 10^{-3}} = 3 \times 10^{-5} \text{ m}$$

এখানে,

D = 1 m

$\lambda = 3 \times 10^{-8}$

$2d$ = 1 mm = $1 \times 10^{-3}$ m

আমরা জানি,

$$\frac{\lambda_a}{\lambda_l} = \frac{\mu_l}{\mu_a} = \frac{x_a}{x_l}$$

বা, $x_l = \frac{\mu_a}{\mu_l} \times x_a$

$= \frac{1}{1.33} \times 3 \times 10^{-5}$

$= 2.256 \times 10^{-5}$ m

সুতরাং, ডোরার প্রস্থের পরিবর্তন হবে $= 3 \times 10^{-5} - 2.256 \times 10^{-5} = 0.744 \times 10^{-5}$ m

**২১। পদার্থবিজ্ঞান ল্যাবের ইয়ংয়ের দ্বিচিড় পরীক্ষায় একবর্ণী 5890 Å তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আলোক উৎস, চিড়দ্বয় 0.8 mm ব্যবধানে এবং পর্দা চিড়দ্বয় হতে 1m দূরত্বে আছে। রিমা পর্দাকে চিড়দ্বয়ের দিকে 5.2 cm সরিয়ে এবং সীমা পর্দাকে বিপরীত দিকে 5.2 cm দূরে সরিয়ে ব্যতিচার সজ্জা পর্যবেক্ষণ করে। রিমা ডোরার প্রস্থের পরিবর্তন 0.02 mm দেখল।**

**(ক) পর্দার প্রাথমিক অবস্থানে প্রতিটি ডোরার প্রস্থ নির্ণয় কর।**

**(খ) রিমার পরীক্ষায় কেন্দ্রীয় উজ্জ্বল পট্টি হতে তৃতীয় অন্ধকার পট্টির দূরত্ব প্রাথমিক অবস্থান থেকে যতটুকু কমে সীমার পরীক্ষায় ততটুকু বৃদ্ধি পায়— গাণিতিকভাবে যাচাইপূর্বক বিশ্লেষণ কর।** [সি. বো. ২০২৩]

(ক) আমরা জানি, ডোরার প্রস্থ,

$b = \frac{D\lambda}{2d}$

$\therefore b = \frac{1 \times 5890 \times 10^{-10}}{0.8 \times 10^{-3}} = \frac{589 \times 10^{-9}}{0.8}$

$= 7.36 \times 10^{-4}$ m $= 0.376$ mm

এখানে,

$D = 1$ m

$\lambda = 5890$ Å $= 5890 \times 10^{-10}$ m

$2d = 0.8$ mm $= 0.8 \times 10^{-3}$ m

(খ) রিমার পর্দার দূরত্ব $= 100 - 5.22$ cm $= 94.8$ cm

কেন্দ্রীয় উজ্জ্বল পট্টি থেকে তৃতীয় অন্ধকার পট্টির দূরত্ব,

$x_n = (2n+1)\frac{D\lambda}{2d}$

$\therefore x_n = \frac{(2 \times 3 + 1) \times 5890 \times 10^{-10} \times 94.8 \times 10^{-2}}{0.8 \times 10^{-3}}$

$= \frac{7 \times 5890 \times 94.8 \times 10^{-2} \times 10^{-10}}{0.8 \times 10^{-3}}$

$= 4885.8 \times 10^{-9} = 4.8858 \times 10^{-3}$

$= 4.886$ mm

সীমার ক্ষেত্রে,

$D = 1.052$ m

$x_n = \frac{(2 \times 3 + 1) + 5890 \times 10^{-10} \times 105.2 \times 10^{-2}}{0.8 \times 10^{-3}}$

$= \frac{7 \times 5.89 \times 1.052 \times 10^{-4}}{0.8}$

$= 5.42 \times 10^{-3}$ m $= 5.422$ mm

পর্দার প্রাথমিক অবস্থানে কেন্দ্রীয় উজ্জ্বল পট্টি হতে তৃতীয় অন্ধকার পট্টির দূরত্ব,

$x_n = \frac{(2n+1)D\lambda}{2d} = \frac{(2 \times 3 + 1) \times 1 \times 5890 \times 10^{-10}}{0.8 \times 10^{-3}} = 5.154$ mm

রিমার পরীক্ষায় দূরত্ব কমে $= 5.154$ mm $- 4.886$ mm $= 0.268$ mm এবং সীমার পরীক্ষার দূরত্ব বাড়ে $= 5.422 - 5.154 = 0.268$ mm। সুতরাং রিমার পরীক্ষার দূরত্বের হ্রাস এবং সীমার পরীক্ষার দূরত্ব বৃদ্ধি সমান।

**২২। রাইসা আলোক তড়িৎ ক্রিয়া পরীক্ষায় পটাশিয়াম ধাতুর উপর যথাক্রমে 4300 Å ও 5600 Å তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আলো আপতিত করল। পটাশিয়ামের কার্য অপেক্ষক 2.1 $eV$।**

**(ক) পটাশিয়ামের সূচন তরঙ্গদৈর্ঘ্য নির্ণয় কর।**

**(খ) রাইসার পরীক্ষায় আপতিত আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্যের পরিবর্তনের ফলে পটাশিয়ামের নিবৃত্তি বিভবের কীরূপ পরিবর্তন হবে? গাণিতিকভাবে বিশ্লেষণ কর।** [সি. বো. ২০২৩]

(ক) আমরা জানি, কার্যাপেক্ষক,

$$W_0 = h\upsilon_0 = \frac{hc}{\lambda_0}$$

বা, $$\lambda_0 = \frac{hc}{W_0} = \frac{6.63\times10^{-34}\times3\times10^8}{2.1\times1.6\times10^{-19}}$$

$$= \frac{6.63\times3\times10^{-7}}{2.1\times1.6}$$

$$= 5.920\times10^{-7}\text{ m} = 5920\text{Å}$$

এখানে,

$W_0 = 2.1\ eV = 2.1\times1.6\times10^{-19}$ J

$\lambda_1 = 4300\ \text{Å} = 4300\times10^{-10}$ m

$\lambda_2 = 5600\text{Å} = 5600\times10^{-10}$ m

$h = 6.63\times10^{-34}$ Js

$c = 3\times10^8$ ms$^{-1}$

(খ) নিবৃত্তি বিভব,

$$eV_{0_1} = h(\upsilon-\upsilon_0) = hc\left(\frac{1}{\lambda}-\frac{1}{\lambda_0}\right) = hc\left(\frac{\lambda_0-\lambda}{\lambda\lambda_0}\right)$$

এবং $$eV_{0_2} = hc\left(\frac{\lambda_0-\lambda}{\lambda\lambda_0}\right)$$

$$\therefore\quad V_{0_1} = \frac{6.63\times10^{-34}\times3\times10^8(5920\times10^{-10}-4300\times10^{-10})}{4300\times10^{-10}\times5920\times10^{-10}\times1.6\times10^{-19}}$$

$$= \frac{6.63\times3\times1620\times10^{-26}\times10^{-10}\times10^{39}}{4.3\times5.92\times1.6}$$

$$= \frac{6.63\times3\times1620}{4.3\times5.92\times1.6}\times10^3 = 791\times10^3 = 7.91\times10^5\text{ volt}$$

এবং $$V_{0_2} = \frac{6.63\times3\times(5920-5600)\times10^{-34}\times10^8\times10^{-10}}{5.6\times5.92\times1.6\times10^{-20}\times10^{-19}}$$

$$= \frac{6.63\times3\times320\times10^{-36}\times10^{-39}}{5.6\times5.92\times1.6}$$

$$= 120\times10^3 = 1.2\times10^5\text{ volt}$$

$\therefore$ নিবৃত্তি বিভবের পরিবর্তন হবে $= 7.9\times10^5 - 1.2\times10^5 = 6.7\times10^5$ volt

**২৩। ইয়ংয়ের দ্বিচিড় পরীক্ষায় 5890 Å আলো ব্যবহারে চিড়দ্বয় থেকে 1.5m দূরে স্থাপিত পর্দায় ব্যতিচার সজ্জা সৃষ্টি করা হলো। চিড়দ্বয়ের মধ্যবর্তী দূরত্ব 1 mm।**

**(ক) প্রথম উজ্জ্বল ডোরার কৌণিক বিস্তার নির্ণয় কর।**

**(খ) চিড় ও পর্দার অবস্থান অপরিবর্তিত রেখে দশম উজ্জ্বল ডোরার অবস্থানে ১৫তম অন্ধকার ডোরা সৃষ্টি করা যাবে কি? গাণিতিক ব্যাখ্যা দাও।** [দি. বো. ২০২৩]

(ক) প্রথম উজ্জ্বল ডোরার কৌণিক অবস্থান,

$$\theta = \frac{\lambda}{2d} = \frac{5890\times10^{-10}}{1\times10^{-3}}\times\frac{180}{\pi}$$

$$= 5890\times10^{-7}\times\frac{180}{3.14}$$

$$= 5.89\times57.32\times10^{-4} = 0.034°$$

এখানে,

$\lambda = 5890\text{Å} = 5890\times10^{-10}$ m

$2d = 1\text{ mm} = 1\times10^{-3}$ m

$D = 1.5$ m

(খ) ১০ম উজ্জ্বল ডোরার অবস্থান,

$$x_{10} = \frac{10\times\lambda D}{2d}$$

$$= \frac{10\times5890\times10^{-10}\times1.5}{1\times10^{-3}}$$

$$= 8.835\times10^{-3}\text{ m}$$

এবং ১৫তম অন্ধকার ডোবার অবস্থান,

$$x_{15} = \left(\frac{2m+1}{2}\right) \times \frac{D\lambda}{2d}$$
$$= \left(\frac{2 \times 11 + 1}{2}\right) \times \frac{1.5 \times 5890 \times 10^{-10}}{1 \times 10^{-3}}$$
$$= \left(\frac{23}{2}\right) \times 1.5 \times 5.89 \times 10^{-4}$$
$$= 10.1 \times 10^{-3}\ \text{m}$$

সুতরাং, দেখা যাচ্ছে যে, ১০ম উজ্জ্বল ডোরার অবস্থানে ১৫তম অন্ধকার ডোরা সৃষ্টি করা সম্ভব নয়।

**২৪। একজন পরীক্ষার্থী সমতল অপবর্তন গ্রেটিং ব্যবহার করে আলোর অপবর্তন পর্যবেক্ষণ করছিল। অপবর্তন গ্রেটিং এর চিড়ের ও দাগের বেধ যথাক্রমে 0.005 mm এবং 0.001 mm। ব্যবহৃত আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য 4000Å। পর্দার কেন্দ্রীয় চরমের উভয় পাশে গৌণ চরম দেখতে পায়।**

**(ক) প্রথম ক্রমের উজ্জ্বল রেখার জন্য অপবর্তন কোণ নির্ণয় কর।**

**(খ) উদ্দীপক অনুসারে ৬ষ্ঠ অবমের জন্য অপবর্তন সম্ভব কি না—গাণিতিকভাবে ব্যাখ্যা কর।**

[রা. বো. ২০২৪]

(ক) আমরা জানি,

$$d \sin\theta = n\lambda$$
$$\therefore \sin\theta = \frac{n\lambda}{d} = \frac{1 \times 4 \times 10^{-7}}{6 \times 10^{-6}}$$
$$= 0.6 \times 10^{-1} = 0.06$$
$$\therefore \theta = \sin^{-1}(0.06) = 3.43°$$

এখানে,
চিড়ের প্রস্থ, $a = 0.005$ mm
দাগের বেধ, $b = 0.001$ mm
$\therefore d = a + b = 0.005 + 0.001$
$= 0.006$ mm $= 0.006 \times 10^{-3}$ m
$= 6.0 \times 10^{-6}$ m
তরঙ্গদৈর্ঘ্য, $\lambda = 4000\ \text{Å} = 4000 \times 10^{-10}$ m
$= 4 \times 10^{-7}$ m
অপবর্তন কোণ, $\theta = ?$
ক্রম সংখ্যা, $\eta = 1$

(খ) অবমের শর্তানুযায়ী,

$$d \sin\theta_n = (2n + 1)\frac{\lambda}{2}$$
$$d \sin\theta_6 = (2 \times 6 + 1)\frac{\lambda}{2}$$
$$d \sin\theta_6 = \frac{13 \times \lambda}{2}$$
$$\therefore \sin\theta_6 = \frac{13 \times 4 \times 10^{-7}}{2 \times 6 \times 10^{-6}} = 0.43$$

এখানে,
$n = 6$
$d = 6 \times 10^{-6}$ m

যেহেতু $\sin\theta$-এর সর্বোচ্চ মান $= +1$, এখানে $\sin\theta < 1$। এই মান $\sin\theta$ এর জন্য গ্রহণযোগ্য। কাজেই ৬ষ্ঠ অবমের জন্য অপবর্তন সম্ভব।

**২৫। আলোর ব্যতিচার পরীক্ষা করার জন্য ছাত্ররা দুটি সুসংগত উৎস ব্যবহার করল। উৎস হতে নির্গত আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য 4500Å। উৎস হতে পর্দার দূরত্ব 1m এবং ডোরার প্রস্থ 5 mm।**

**(ক) উক্ত উৎস হতে নির্গত ফোটনের শক্তি হিসাব কর।**

**(খ) পর্দার কেন্দ্র হতে 6.38 mm দূরে কোন ধরনের ডোরা সৃষ্টি হবে তার গাণিতিক বিশ্লেষণ কর।**

[কু. বো. ২০২৪]

(ক)
$$E = h\upsilon = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^{8}}{4500 \times 10^{-10}}\ \text{J}$$
$$= 442 \times 10^{-21}\ \text{J}$$
$$= \frac{442 \times 10^{-21}}{1.6 \times 10^{-19}}\ eV$$
$$= 2.76\ eV$$

এখান,
$c = \upsilon\lambda$
$\therefore \upsilon = \frac{C}{\lambda}$
দেওয়া আছে,
$\lambda = 4500\ \text{Å} = 4500 \times 10^{-10}$ m
$c = 3 \times 10^{8}$ m
$h = 6.63 \times 10^{-34}$ Js

(খ) আমরা জানি ডোরার প্রস্থ,

$$\Delta x = \frac{\lambda D}{2d}, \quad 2d = \text{স্লিটের মধ্যবর্তী দূরত্ব}$$

$$2d = \frac{\lambda D}{\Delta x}$$

$$\therefore \quad 2d = \frac{4500 \times 10^{-10}\ \text{m} \times 1\ \text{m}}{5 \times 10^{-3}\ \text{m}}$$

$$= 900 \times 10^{-7}\ \text{m} = 9 \times 10^{-5}\ \text{m}$$

দেওয়া আছে,

$\Delta x = 5\ \text{mm} = 5 \times 10^{-3}\ \text{m}$
$D = 1\ \text{m}$
$\lambda = 4500 \times 10^{-10}\ \text{m}$
$x_n$ = পর্দার কেন্দ্র হতে সৃষ্ট ডোরার দূরত্ব $= 6{\cdot}38\ \text{mm} = 6{\cdot}38 \times 10^{-3}\ \text{m}$
পথপার্থক্য, $\sigma = ?$

আবার পথপার্থক্য,

$$\sigma = \frac{x_n \times 2d}{D} = \frac{6{\cdot}38 \times 10^{-3} \times 9 \times 10^{-5}}{1}$$

$$= 57{\cdot}42 \times 10^{-8}\ \text{m}$$

$$= 5742\ \text{Å}$$

$\therefore$ দশা পার্থক্য $\delta$ হলে,

$$\frac{\delta}{2\pi} = \frac{\sigma}{\lambda}$$

$$\therefore \quad \delta = 2\pi\frac{\sigma}{\lambda} = 2\pi \times \frac{57{\cdot}42 \times 10^{-8}}{4500 \times 10^{-10}}$$

$$= 1{\cdot}276 \times 2\pi = 2{\cdot}55\pi \approx 3\pi$$

যেহেতু দশা পার্থক্য $\pi$-এর অযুগ্ম গুণিতক, সেহেতু পর্দার কেন্দ্র হতে 6·38 mm দূরের কোনো বিন্দুতে অন্ধকার ডোরা সৃষ্টি হবে অর্থাৎ ধ্বংসাত্মক ব্যতিচার সৃষ্টি হবে।

**২৬। একটি সমতলে অপবর্তন গ্রেটিং-এর চিড় এবং দাগের প্রস্থ যথাক্রমে $1 \times 10^{-6}$ m ও $1{\cdot}5 \times 10^{-6}$ m। গ্রেটিংটির উপর 5500 Å তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আলো দ্বারা আলোকিত করা হলো।**

**(ক) একক দৈর্ঘ্যে চিড়ের সংখ্যা নির্ণয় কর।**

**(খ) উদ্দীপকের গ্রেটিং থেকে ৫ম ক্রমের উজ্জ্বল পট্টি পাওয়া যাবে কি না—গাণিতিক বিশ্লেষণসহ যাচাই কর।** [য. বো. ২০২৪]

(ক) আমরা জানি, গ্রেটিংয়ে প্রতি একক দৈর্ঘ্যে N সংখ্যক রেখা থাকলে,

$$N = \frac{1}{(a+b)} = \frac{1}{(1{\cdot}5 + 1) \times 10^{-6}\ \text{m}}$$

$$= \frac{1}{2{\cdot}5} \times 10^{6}\ \text{m}^{-1}$$

$$= 0{\cdot}4 \times 10^{6}\ \text{m}^{-1}$$

$$= 400000\ \text{m}^{-1}$$

এখানে,
$a$ = দাগের প্রস্থ $= 1{\cdot}5 \times 10^{-6}\ \text{m}$
$b$ = চিড়ের প্রস্থ $= 1 \times 10^{-6}\ \text{m}$

অর্থাৎ একক দৈর্ঘ্য চিড়ের সংখ্যা 400000

(খ) অপবর্তন গ্রেটিংয়ের ক্ষেত্রে আমরা জানি, কোনো বিন্দুতে $n$ ক্রমের উজ্জ্বল বিন্দু পাওয়ার শর্ত,

$$d \sin\theta = n\lambda$$

$$\sin\theta = \frac{5 \times 5500 \times 10^{-10}\ \text{m}}{4 \times 10^{-5}\ \text{m}}$$

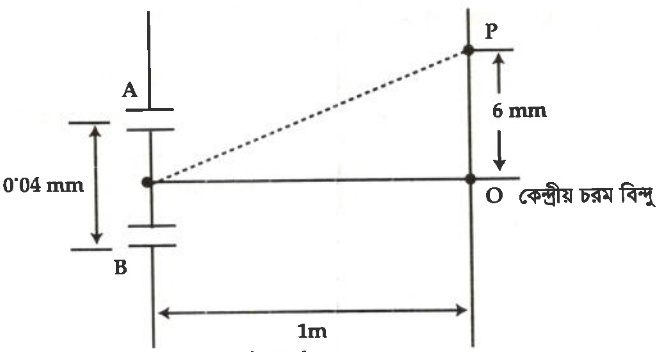
$$= 6875 \times 10^{-5} = 0{\cdot}06875$$

$$\theta = \sin^{-1}(0{\cdot}06875) = 3{\cdot}942^\circ$$

এখানে,
$\lambda = 5500 \times 10^{-10}\ \text{m}$
$d = \frac{1}{N} = 4 \times 10^{-5}\ \text{m}$
$n = 5$

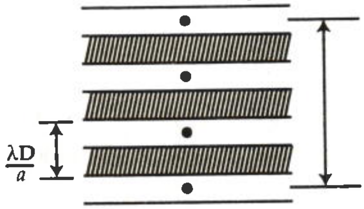
$\sin\theta = 0{\cdot}6875$ অর্থাৎ $\theta = 3{\cdot}942^\circ$, যা একটি গ্রহণযোগ্য মান। তাই এই গ্রেটিং থেকে ৫ম ক্রমের উজ্জ্বল পট্টি পাওয়া যাবে। $\sin\theta$-এর $> 1$ হলে উজ্জ্বল পট্টি পাওয়া যেত না।

**২৭। চিত্রে কেন্দ্রীয় চরম বিন্দু O হতে ৪র্থ চরম বিন্দু P-এর দূরত্ব 6 mm।**




**(ক) উদ্দীপকে ব্যবহৃত আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য নির্ণয় কর।**

**(খ) উদ্দীপকের চিড়দ্বয় হতে পর্দার দূরত্ব অর্ধেক করা হলে, ডোরার ব্যবধান বর্তমান ডোরার প্রস্থের সমান হবে কি না—গাণিতিকভাবে বিশ্লেষণ কর।** [চ. বো. ২০২৪]




(ক) আমরা জানি,

দুটি উজ্জ্বল ডোরার মধ্যবর্তী ব্যবধান $= \frac{\lambda D}{a}$

$\therefore$ কেন্দ্রীয় উজ্জ্বল ডোরা হতে চতুর্থ উজ্জ্বল ডোরার মধ্যবর্তী দূরত্ব,

$x_n = \frac{(n-1)\lambda D}{a} = \frac{3\lambda D}{a}$

বা, $\sigma = \frac{3 \times \lambda \times 10^3}{0{\cdot}04}$

বা, $\lambda = \frac{6 \times 4 \times 10^{-2}}{3 \times 10^3}$

$= 8 \times 10^{-5}$ mm

এখানে,

চিড় দুটির মধ্যবর্তী দূরত্ব, $a = 0{\cdot}04$ mm

কেন্দ্রীয় ডোরা হতে চতুর্থ উজ্জ্বল ডোরার মধ্যবর্তী ব্যবধান,

$x_n$ =6mm

তরঙ্গদৈর্ঘ্য, $\lambda = ?$

ডোরা সংখ্যা, $n = 4$

(খ) আমরা জানি, ডোরার প্রস্থ $= \delta x_1 = \frac{\Delta x}{2} = \frac{\lambda D}{2a}$

যদি দ্বিচিড় হতে পর্দার দূরত্ব দ্বিগুণ করা হয় তাহলে, $\delta x_2 = \frac{\lambda D}{4a}$

$\therefore \quad \frac{\delta x_2}{\delta x_1} = \frac{\lambda D}{4a} \times \frac{2a}{\lambda D} = \frac{1}{2}$

$\therefore \quad \delta x_2 = \frac{1}{2} \times \delta x_1$

অর্থাৎ ডোরার প্রস্থ অর্ধেক হয়ে যাবে।

আবার, বর্তমান ডোরার প্রস্থ, $x = \frac{\lambda D}{a}$ ... (i)

যদি পর্দার দূরত্ব অর্ধেক করা হয় তাহলে, পরিবর্তিত ডোরার ব্যবধান, $x' = \frac{\lambda D}{2a}$ ... (ii)

$\therefore \quad \frac{x'}{x} = \frac{\lambda D}{2a} \times \frac{a}{\lambda D} = \frac{1}{2}$

$\therefore \quad x' = \frac{1}{2} \times x$

$\therefore$ ডোরার ব্যবধান বর্তমান ডোরার প্রস্থের অর্ধেক হয়ে যাবে। অর্থাৎ সমান হবে না।

২৮। বায়ুতে ইয়ং-এর দ্বি-চিড় পরীক্ষায় দুটি চিড়ের মধ্যবর্তী দূরত্ব 0.4 mm এবং চিড় হতে পর্দার দূরত্ব 1 m। কেন্দ্রীয় উজ্জ্বল ডোরা হতে 12 তম উজ্জ্বল ডোরার দূরত্ব 9.3 mm। পরবর্তীতে পরীক্ষাটি পানিতে সম্পন্ন করা হলো। পানির প্রতিসরাঙ্ক $\frac{4}{3}$।

(ক) বায়ুতে ব্যবহৃত আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য নির্ণয় কর।
(খ) পানিতে কেন্দ্রীয় উজ্জ্বল ডোরা হতে 9.3 mm দূরত্বে উজ্জ্বল ডোরার সংখ্যার পরিবর্তন হবে কি না—যাচাই কর। [ব. বো. ২০২৪]

(ক) আমরা জানি,

$$x_n = \frac{(n-1)\lambda D}{a} = 9.3$$

বা, $\frac{11\lambda}{0.4} = 9.3 \times 10^{-3}$

বা, $\lambda = 9.3 \times \frac{0.4}{11} \times 10^{-3}$

$= 0.3318 \times 10^{-3}$

$= 3.318 \times 10^{-7}$ m

$= 331$ nm

এখানে,
দুটি চিড়ের মধ্যবর্তী দূরত্ব, $a = 0.4$ mm
পর্দার দূরত্ব, $D = 1$ m
$x = 0.3$ mm
উজ্জ্বল ডোরার দূরত্ব, $x_n = 9.3$ mm
$n = 12$

(খ) প্রথম ক্ষেত্রে বায়ুতে, $n = 12$
দ্বিতীয় ক্ষেত্রে বায়ুর সাপেক্ষে পানির প্রতিসরণাঙ্ক,

$${}_a\mu_w = \frac{C_a}{C_w} = \frac{\lambda_a}{\lambda_w} = \frac{4}{3}$$

বা, $\lambda_w = \frac{3\lambda_a}{4} = \frac{3}{4}\lambda_a$

সুতরাং,

$$x_n = \frac{(n-1)\lambda_\omega D}{a}$$

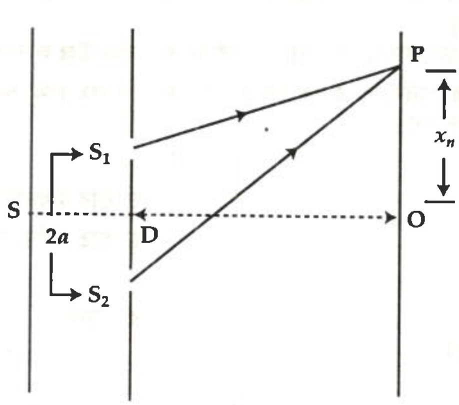
বা, $9.3 = \frac{(n-1)\frac{3}{4}\lambda_a D}{a}$

বা, $(n-1) = 9.3 \times 0.4 \times \frac{4}{3} \times \frac{1}{10^3} \times \frac{1}{0.33 \times 10^{-3}}$

বা, $n - 1 = 15.0303$
বা, $n - 1 \approx 16$
বা, $n \approx 17$

সুতরাং বলা যায়, উজ্জ্বল ডোরার সংখ্যার পরিবর্তন হবে।

২৯।

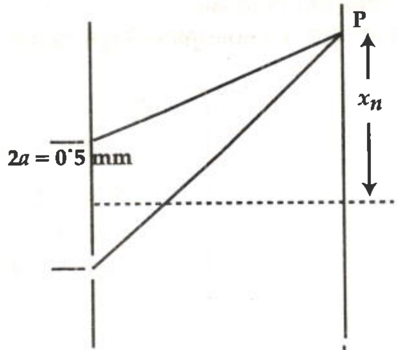



চিত্র অনুযায়ী ইয়ং-এর দ্বি-চিড় পরীক্ষায় দুই চিড়ের মধ্যবর্তী দূরত্ব $2a = 0.5$ mm এবং চিড় থেকে পর্দার দূরত্ব 1.4 m। কেন্দ্রীয় উজ্জ্বল বিন্দু O হতে দ্বিতীয় উজ্জ্বল P বিন্দুর দূরত্ব 6 mm($x_n$)।

(ক) উদ্দীপকে ব্যবহারকৃত আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য বের কর।

(খ) উদ্দীপকে ব্যবহৃত আলো পরিবর্তন না করে ডোরার প্রস্থ দ্বিগুণ করতে হলে পর্দাকে সরাতে হবে—গাণিতিকভাবে উক্তিটি ব্যাখ্যা কর। [সি. বো. ২০২৪]

(ক)




ইয়ংয়ের দ্বিচিড় পরীক্ষার ক্ষেত্রে আমরা জানি,

$$x_n = \frac{n\lambda D}{2a}$$

বা, $$\lambda = \frac{x_n 2a}{nD} = \frac{6\times10^{-3}\text{ m}\times0.5\times10^{-3}\text{ m}}{2\times1.4\text{ m}}$$

$$= 1.071\times10^{-6}\text{ m} = 10710\times10^{-10}\text{ m}$$

$$= 10710\ \text{Å}$$

দেওয়া আছে,

$D = 1.4$ m

$2a = 0.5$ mm $= 0.5\times10^{-3}$ m

$x_n = 6$ mm $= 6\times10^{-3}$ m

$n = 2$

$\lambda = ?$

(খ) আমরা জানি,

$$x_n = \frac{n\lambda D}{2a}$$

বা, $$D = \frac{x_n 2a}{n\lambda}$$

$$= \frac{12\times10^{-3}\text{ m}\times0.5\times10^{-3}\text{ m}}{2\times1.071\times10^{-6}\text{ m}}$$

$$= 2.8\text{ m}$$

এখানে,

$\lambda = 10710$ Å $= 1.071\times10^{-6}$ m

ডোরার প্রস্থ দ্বিগুণ হলে,

$x_n = 2\times6\times10^{-3}$ m $= 12\times10^{-3}$ m

$2a = 0.5\times10^{-3}$ m

$n = 2$

আলোর পরিবর্তন না করে ডোরার প্রস্থ দ্বিগুণ করতে হলে পর্দাটিকে 2.8 m দূরে স্থাপন করতে হবে।

৩০। ইয়ং–এর দ্বি–চিড় পরীক্ষায় চিড়দ্বয়ের মধ্যবর্তী দূরত্ব 0.4 mm এবং চিড় হতে পর্দার দূরত্ব 1.2 m। ব্যবহৃত আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য 3800Å। কেন্দ্রীয় উজ্জ্বল বিন্দুর উভয় পাশে 9.12 mm পর্যন্ত আলোর বিস্তৃতি পাওয়া যায়। [একটি চিড়ের প্রস্থ 0.1 mm]

(ক) কেন্দ্রীয় উজ্জ্বল বিন্দুর যেকোনো এক পাশে সর্বোচ্চ কত ক্রম উজ্জ্বল বিন্দু পাওয়া যাবে? নির্ণয় কর।

(খ) উদ্দীপকের দ্বি–চিড়ের পরিবর্তে একক চিড়ের পরীক্ষণে পঞ্চম ক্রম চরমের ক্ষেত্রে কৌণিক সরণ একই হবে কি না—বিশ্লেষণ কর। [দি. বো. ২০২৪]

(ক) আমরা জানি,

$$x_n = \frac{n\lambda D}{2d}$$

$$\therefore n = \frac{x_n\times 2d}{\lambda D}$$

$$= \frac{9.12\times0.4}{3800\times10^{-7}\times1.2\times10^{3}}$$

$$= 8$$

$\therefore$ ক্রমসংখ্যা $= 8$

এখানে,

চিড়দ্বয়ের মধ্যবর্তী দূরত্ব, $2d = 0.4$ mm

চিড় হতে পর্দার দূরত্ব, $D = 1.2$ m $= 1.2\times10^3$ mm

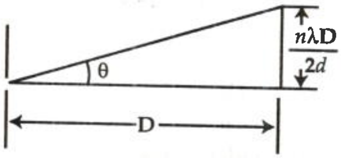
তরঙ্গদৈর্ঘ্য,

$\lambda = 3800$ Å $= 3800\times10^{10}$ m $= 3800\times10^{-7}$ mm

ক্রমসংখ্যা, $n = ?$

$x_n = 9.12$ mm

(খ) দ্বিচিড় পরীক্ষার ক্ষেত্রে,




আমরা জানি, $n$-তম ডোরার ক্ষেত্রে কৌণিক অবস্থান $\theta_n$ হলে,

$$\theta_n = \frac{x_n}{D} = \frac{n\lambda D}{D \times 2d}$$

এক্ষেত্রে $\tan\theta_n = \dfrac{4 \times 3800 \times 10^{-10} \times 1{\cdot}2}{0{\cdot}4 \times 10^{-3} \times 1{\cdot}2}$

$\therefore \quad \theta_n = \tan^{-1}\left\{\dfrac{4 \times 3800 \times 10^{-10}}{0{\cdot}4 \times 10^{-3}}\right\} = 0{\cdot}2177°$

এখানে,
$2d$ = চিড়দ্বয়ের মধ্যবর্তী দূরত্ব
$= 0{\cdot}4\text{ mm} = 0{\cdot}4 \times 10^{-3}\text{ m}$
তরঙ্গদৈর্ঘ্য,
$\lambda = 3800 \times 10^{-10}\text{ m}$
$D = 1{\cdot}2\text{ m}$

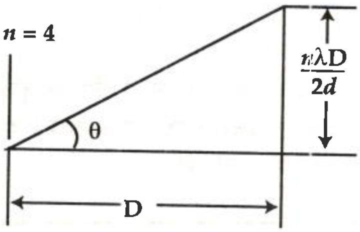
একক চিড় পরীক্ষার ক্ষেত্রে, $n$-তম কেন্দ্রীয় চরম বিন্দুর ক্ষেত্রে,

$$2d \sin\theta_n' = (2n+1)\frac{\lambda}{2}$$

$\therefore \quad \theta_n' = \sin^{-1}\left\{\dfrac{(2n+1)\lambda}{2 \times 2d}\right\}$

$= \sin^{-1}\left(\dfrac{(2 \times 4 + 1) \times 3800 \times 10^{-10}}{2 \times 0{\cdot}4 \times 10^{-3}}\right) = 0{\cdot}299°$

$\therefore \quad \theta_n' = 0{\cdot}299°$




$\therefore \quad \theta_n' \neq \theta_n$, এক্ষেত্রে এক চিড়ের কৌণিক সরণের মান দ্বিচিড়ের কৌণিক সরণের মানের সমান হবে না।

**৩১। নির্দিষ্ট তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আলো দিয়ে $6 \times 10^{-3}$ mm প্রস্থের চিড় আলোকিত করে অপবর্তন সৃষ্টি করা হলো। ফলে কেন্দ্রীয় চরমের উভয় পাশে তৃতীয় ক্রমের অবমগুলোর মধ্যবর্তী কৌণিক দূরত্ব $34{\cdot}26°$ পাওয়া গেল। লেন্স থেকে পর্দার দূরত্ব 150 cm।**

**(ক) উদ্দীপকের আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য বের কর।**

**(খ) উদ্দীপকের চিড়ে 6000Å তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আলো ফেললে কেন্দ্রীয় চরমের উভয় পাশে দ্বিতীয় ক্রমের অবম ও চরমের রৈখিক দূরত্বের পার্থক্য এবং তৃতীয় ক্রমের অবম ও চরমের রৈখিক দূরত্বের পার্থক্য একই হবে কি না—গাণিতিকভাবে বিশ্লেষণ কর।** [ম. বো. ২০২৪]

(ক) অন্ধকার ডোরার ক্ষেত্রে,

$$d \sin\theta_m = (2m+1)\frac{\lambda}{2}$$

বা, $\lambda = \dfrac{2\,d \sin\theta_m}{2\,m+1} = \dfrac{2 \times 6 \times 10^{-6} \sin(34{\cdot}26)}{2 \times 3 + 1}$

$= \dfrac{12 \times 10^{-6} \times 0{\cdot}563}{7} = 0{\cdot}9651 \times 10^{-6}\text{ m}$

$= 9651 \times 10^{-10}\text{ m} = 9651\text{ Å}$

এখানে,
$\theta_m = 34{\cdot}26°$
$m = 3$
$d = 6 \times 10^{-3}\text{ mm}$
$= 6 \times 10^{-6}\text{ m}$
$\lambda = ?$

(খ) গঠনমূলক ব্যতিচারের ক্ষেত্রে,

$$y_m = \frac{mD\lambda}{d}$$

$\therefore \quad y_{m+1} = (m+1)\dfrac{D\lambda}{d}$

$\therefore \quad \Delta y = y_{m+1} - y_m = \dfrac{mD\lambda}{d} + \dfrac{D\lambda}{d} - \dfrac{mD\lambda}{d} = \dfrac{D\lambda}{d}$

$$\Delta y = \frac{D\lambda}{d} \quad \ldots \quad \ldots \quad (1)$$

ধ্বংসাত্মক ব্যতিচারের ক্ষেত্রে,

$$y_m = (2m+1)\frac{D\lambda}{d_2}$$

$$y_{m+1} = \{2(m+1)+1\}\frac{D\lambda}{2d} = (2m+3)\frac{D\lambda}{2d}$$

$$\therefore \quad \Delta y = y_{m+1} - y_m = \frac{mD\lambda}{d} + \frac{3}{2}\frac{D\lambda}{d} - \frac{mD\lambda}{d} - \frac{D\lambda}{2d}$$

$$= \left(\frac{3}{2} - \frac{1}{2}\right)\frac{D\lambda}{d} = \frac{D\lambda}{d} \quad \ldots \quad \ldots \quad (2)$$

সুতরাং সমীকরণ (1) ও (2) থেকে দেখা যাচ্ছে, চরম এবং অবমের প্রস্থ সমান যার মান,

$$\Delta y = \frac{D}{d}\lambda = \frac{1.5\ \text{m} \times 6000 \times 10^{-10}\ \text{m}}{6 \times 10^{-3}\ \text{m}}$$

$$= 1.500 \times 10^{-7}\ \text{m}$$

$$= 1.5 \times 10^{-4}\ \text{m}$$

$$= 0.15 \times 10^{-3}\ \text{m}$$

$$= 0.15\ \text{mm}$$

এখানে,
লেন্স থেকে পর্দার দূরত্ব,
$D = 150\ \text{cm} = 1.5\ \text{m}$
চিড়ের প্রস্থ, $d = 6 \times 10^{-3}\ \text{mm}$
তরঙ্গদৈর্ঘ্য, $\lambda = 6000 \times 10^{-10}\ \text{m}$

সুতরাং দেখা যায় যে, দ্বিতীয় ও তৃতীয় ক্রমের চরম ও অবমের প্রস্থ সমান, যার মান $\Delta y = 0.15\ \text{mm}$। কাজেই কেন্দ্রীয় চরমের উভয় পাশে দ্বিতীয় ক্রমের অবম ও চরমের রৈখিক দূরত্বের পার্থক্য, তৃতীয় ক্রমের অবম ও চরমের রৈখিক দূরত্বের পার্থক্য একই হবে।

## বহুনির্বাচনি প্রশ্নের উত্তরের জন্য প্রয়োজনীয় বিষয়াবলির সার-সংক্ষেপ

১। আলো এক প্রকার তড়িৎচুম্বক তরঙ্গ। তড়িচ্চুম্বকীয় তরঙ্গ লম্বিক তরঙ্গ না অনুপ্রস্থ তরঙ্গ তা সমবর্তন পরীক্ষা থেকে জানা যায়।

২। তড়িৎ চৌম্বক বর্ণালিতে অবলোহিত রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য বেশি।

৩। আলোক হলো বিকিরণ কোয়ান্টা, ফোটন কণা। ফোটনের তরঙ্গদৈর্ঘ্য 3000 Å এবং কম্পাঙ্ক $10^{15}$ Hz।

৪। হাইগেনের তরঙ্গমুখ গঠনের তত্ত্ব দিয়ে বর্ণালির উৎপত্তির ব্যাখ্যা করা যায় না।

৫। দৃশ্যমান বর্ণালির তরঙ্গদৈর্ঘ্যের পরিমাণ $4 \times 10^{-7}\ \text{m} - 7 \times 10^{-7}\ \text{m}$ এবং শক্তি পাল্লা $(2-3)$ eV হয়।

৬। আলোর কম্পন বলতে বোঝায়— (i) $\vec{E}$ এর কম্পন (ii) $\vec{B}$ এর কম্পন (iii) $\vec{E}$ ও $\vec{B}$ এর মধ্যবর্তী কোণ 90°।

৭। তিনটি বর্ণের জন্য $\lambda_R > \lambda > \lambda_v$। [য. বো. ২০১৫]

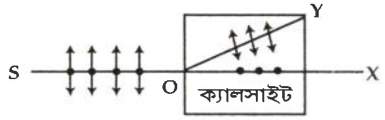
৮। ব্যতিচার এক ধরনের উপরিপাতন। শব্দ তরঙ্গের পোলারণ সম্ভব না।

৯। সমবর্তন নামক আলোকীয় ঘটনা মাধ্যমের পরিবর্তনের কারণে প্রভাবিত হয় না।

১০। সূর্যের আলোর তরঙ্গগুলোর আকৃতি সমতল, সমবর্তন ঘটে আড় তরঙ্গে।

১১। মাইকেলসন-মর্লির পরীক্ষায় ইথারের অস্তিত্ব ভুল প্রমাণিত হয়।

১২।




চিত্রে OY প্রতিসরিত রশ্মি।

১৩। একক চিড়ের দরুন অপবর্তনের ক্ষেত্রে অবমের শর্ত হলো $d \sin\theta = (2n)\lambda/2$। আবার ফ্রনহফার অপবর্তনের জন্য আপতিত আলোক তরঙ্গমুখ হতে হবে সমতল।

১৪। তরঙ্গের উপরিপাতনের ফলে ঘটে ব্যতিচার।

১৫। তরঙ্গমুখে কণাগুলোর দশা পার্থক্য 0°। $\alpha$-কণা তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ নয়।

১৬। পথ পার্থক্য দশা পার্থক্যের $\frac{\lambda}{2\pi}$ গুণ। সম্পর্কটি হলো $\frac{\sigma}{\lambda} = \frac{\delta}{2\pi}$; এখানে $\delta$ = দশা পার্থক্য, $\sigma$ = পথ পার্থক্য।

১৭। গঠনমূলক ব্যতিচারের জন্য পথ পার্থক্য $n\lambda$। আর ধ্বংসাত্মক ব্যতিচারের জন্য পথ পার্থক্য $(2n+1)\lambda/2$।

১৮। $1\,\mathring{A}$ তরঙ্গদৈর্ঘ্যের একবর্ণী X-ray শক্তি $= 2 \times 10^{15}$ J।

১৯। ইয়ং এর দ্বি-চিড় পরীক্ষায় চিড়দ্বয়ের মধ্যবর্তী দূরত্ব ক্রমান্বয়ে বাড়ালে ডোরা প্রস্থ ক্রমান্বয়ে কমবে।

২০। মাইকেলসন-মর্লি পরীক্ষা ইথার তত্ত্বকে বর্জন করে। বেতার তরঙ্গ, দৃশ্যমান আলো, X-রে তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ।

২১। যে স্থানে আলোর তীব্রতা কম সেস্থানে সংঘটিত হয়—ধ্বংসাত্মক ব্যতিচার।

২২। একটি তরঙ্গের দুটি বিন্দুর পথ পার্থক্য $\frac{\lambda}{4}$ হলে, দশা পার্থক্য হবে $\frac{\pi}{2}$। আবার একটি তরঙ্গের দুটি বিন্দুর মধ্যে দশা পার্থক্য $\pi$ হলে বিন্দুদ্বয়ের মধ্যে পথ পার্থক্য $\frac{\lambda}{2}$ এবং একটি তরঙ্গের দুটি বিন্দুর দশা পার্থক্য $\frac{\pi}{2}$ হলে বিন্দুদ্বয়ের পথ পার্থক্য $\frac{\lambda}{4}$। আবার পথ পার্থক্য $\frac{\lambda}{2}$ হলে দশা পার্থক্য $\pi$।

২৩। দুটি চিড়ের ব্যবধান $a$ ও চিড় হতে পর্দার দূরত্ব D হলে ব্যতিচার ঝালরে পরপর দুটি উজ্জ্বল ও অন্ধকার ডোরার ব্যবধান হবে $\beta = \frac{D}{2d}\lambda$।

২৪। আলোর ব্যতিচারের ক্ষেত্রে প্রযোজ্য—(i) একাধিক তরঙ্গমুখ (ii) পথ পার্থক্য (iii) সুসঙ্গত আলোক উৎস।

২৫। দ্বি-চিড় পরীক্ষায় চিড়গুলোর দূরত্ব অর্ধেক এবং চিড় ও পর্দার দূরত্ব দ্বিগুণ করা হলে ডোরার প্রস্থ চারগুণ হবে।

২৬। আলোর তরঙ্গ তত্ত্বের প্রবক্তা হাইগেন, কণা তত্ত্বের প্রবর্তক নিউটন। আলোর কোয়ান্টাম তত্ত্ব আবিষ্কার করেন প্ল্যাঙ্ক।

২৭। ফ্রনহফার শ্রেণির অপবর্তন সৃষ্টির করা যায়—(i) গ্রেটিং দ্বারা (ii) একক চিড় দ্বারা (iii) যুগ্ম চিড় দ্বারা।

২৮। সুসঙ্গত উৎসের ক্ষেত্রে (i) উৎস দুটি ক্ষুদ্র হবে (ii) উৎস হতে সমান তরঙ্গদৈর্ঘ্যের তরঙ্গ নির্গত হবে (iii) তরঙ্গদ্বয় সমদশাসম্পন্ন বা নির্দিষ্ট দশায় থাকবে।

২৯। কাচে অসমবর্তিত আলো $57{\cdot}5^\circ$ কোণে আপতিত হলে প্রতিফলিত রশ্মি সমবর্তিত হয়।

৩০। একই তরঙ্গমুখের বিভিন্ন অংশ হতে নির্গত গৌণ তরঙ্গমুখের উপরিপাতনের ফলে সৃষ্টি হয় অপবর্তন।

৩১। ফ্রনহফার শ্রেণির অপবর্তনে আলোক রশ্মিসমূহ ও তরঙ্গমুখ যথাক্রমে সমান্তরাল ও সমতল হয়।

৩২। গ্রেটিং ব্যবহৃত হয়—(i) আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য নির্ণয়ে (ii) একই তরঙ্গদৈর্ঘ্যের দুটি বর্ণালি রেখা পৃথক করতে (iii) তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সাপেক্ষে অপবর্তন কোণের পরিবর্তনের হার নির্ণয়ে।

৩৩। ব্যতিচারের ক্ষেত্রে অন্ধকার ডোরা সৃষ্টি হবে যখন— (i) দশা পার্থক্য $\pi$ এর অযুগ্ম গুণিতক হয় (ii) প্রাবল্য সর্বনিম্ন হয়।

৩৪। ব্যতিচারের ক্ষেত্রে উজ্জ্বল ডোরা সৃষ্টি হবে যখন—(i) দশা পার্থক্য $\pi$ এর যুগ্ম গুণিতক হয় (ii) তরঙ্গদ্বয়ের প্রাবল্য সর্বোচ্চ হয়।

৩৫। একটি তরঙ্গের দুটি বিন্দুর মধ্যে পথ পার্থক্য $\frac{5\lambda}{4}$। বিন্দুদ্বয়ের মধ্যে দশা পার্থক্য $\frac{\pi}{2}$। একটি আলপিনের প্রতিবিম্ব ফেললে তীক্ষ্ণ শীর্ষের প্রতিবিম্ব পাওয়া না যাবার কারণ অপবর্তন।

## অনুশীলনী

### (ক) বহুনির্বাচনি প্রশ্ন

১। তড়িচ্চুম্বকীয় তরঙ্গের বৈশিষ্ট্য হলো—
(i) এরা আড় তরঙ্গ
(ii) এরা তড়িৎ ক্ষেত্র ও চৌম্বক ক্ষেত্রের লম্ব সমবায়
(iii) তড়িচ্চুম্বকীয় তরঙ্গের সঞ্চালনের জন্য মাধ্যম প্রয়োজন হয়

নিচের কোনটি সঠিক ?
ⓚ i ও ii
ⓛ i ও iii
ⓖ ii ও iii
ⓖ i, ii ও iii

২। কোনটি তড়িচ্চুম্বকীয় তরঙ্গ নয় ?
[ঢা. বো. ২০২২; Admission Test : MBSTU 2019-20; DU, Com.U 2012-13, 2017-18; RUC 2021-22]
ⓚ দৃশ্যমান আলো
ⓛ এক্স-রশ্মি
ⓖ গামা রশ্মি
ⓖ আলফা রশ্মি

৩। তড়িচ্চুম্বকীয় তরঙ্গের ক্ষেত্রে—
(i) মাধ্যমের প্রয়োজন হয় না
(ii) কম্পাঙ্ক ধ্রুব থাকে
(iii) তরঙ্গের বেগ $3 \times 10^8$ ms$^{-1}$