3. ক্যানিয়ার দ্য লা তুরের সাইরেনের গঠন ও কার্যপদ্ধতির বিবরণ দিন। এই যন্ত্রটি কম্পাঙ্কের পরিমাপ ছাড়া আর কী-কী কাজে লাগতে পারে বলে আপনার মনে হয়?

4. হেলম্‌হোলৎস্ অনুনাদকের ব্যাখ্যা করুন। প্রমাণ করুন যে, এর অনুনাদী কম্পাঙ্ক আয়তনের বর্গমূলের ব্যস্তানুপাতী।

5. ক্যাথোড রে অসিলোস্কোপের সাহায্যে কী করে একটি বিশুদ্ধ সুরের কম্পাঙ্ক নির্ণয় করা যায় তা বর্ণনা করুন।

6. ডিজিটাল ফ্রিকোয়েন্সিমিটারের কার্যপদ্ধতি ব্যাখ্যা করুন।

10.8 উত্তরমালা

অনুশীলনী :

1. (a) মধ্যরাত্রিতে শব্দের তীব্রতা স্তর 10 log 3200 বা 45 ডেসিবেল কম, অর্থাৎ 80 – 45= 35dB।

   (b) বাড়ে, চারগুণ, Wm^{-2}, প্রবলতার অনুভূতি।

2. (a) ব্যবস্থাগুলি হল (i) চাকতিটি শব্দতরঙ্গের গতিবেগের সঙ্গে 45° কোণে ঝোলানো হয়; (ii) চাকতিটিকে নলের স্থাণুতরঙ্গের সুস্পন্দ বিন্দুতে রাখা হয়।

   (b) শব্দতরঙ্গ যে বায়ুপ্রবাহ উৎপন্ন করে তা তাপ পরিচলন দ্বারা তপ্ত তারটির উষ্ণতা কমিয়ে দেয়। এর ফলে ধাতব তারের রোধ কমে যায়।

   (c) বায়ুর চাপ, ঘনত্ব এবং প্রতিসরাঙ্কের পরিবর্তন শব্দের কম্পাঙ্কে ঘটে। সুতরাং, ব্যতিচার পটির আন্দোলনও একই কম্পাঙ্কে ঘটে। কিন্তু আমাদের চোখে যে কোনও দৃশ্য প্রায় $\frac{1}{10}$ সেকেন্ড স্থায়ী হয়। যার ফলে দ্রুত আন্দোলিত পটি আমাদের চোখে স্পষ্টভাবে ধরা পড়ে না।

3. সুরশলাকার কম্পাঙ্ক ।

   চক্রটি মিনিটে 45 বার ঘুরলে একটি রেখাছিদ্রের জায়গায় পরেরটি আসতে যে সময় লাগত, অর্থাৎ $\frac{60}{80\times45}=\frac{1}{60}$ সেকেন্ডে সুরশলাকার দুটি কম্পন সম্পূর্ণ হত। সুতরাং, এক্ষেত্রেও সুরশলাকাটি স্থির বলে মনে হতো।

সর্বশেষ প্রশ্নাবলী :

1. 10.4.1 অংশে এবিষয়ে আলোচনা করা হয়েছে।
2. 10.4.4 অংশে ধ্বনি-রেডিওমিটারের মূল নীতি বর্ণিত হয়েছে। এটি দেখে নিন।
3. প্রথম অংশের উত্তর 10.5.3 অংশে আলোচিত হয়েছে। পরিবর্তনযোগ্য কম্পাঙ্কের শব্দ উৎপাদন ছাড়াও এই সাইরেন বিপদসূচক সংকেত, কারখানার বাঁশি, আম্বুল্যান্স প্রভৃতি গাড়ির হুটার হিসাবে ব্যববার করা যায়।
4. 10.5.4 অংশে হেলম্‌হোলৎস্‌ অনুনাদকের সম্বন্ধে আলোচনা করা হয়েছে।
5. 10.5.6 অংশে এ সম্বন্ধে আলোচনা করা হয়েছে।
6. 10.5.5 অংশে এই কার্যপদ্ধতি ব্যাখ্যা করা হয়েছে।

একক 11 : প্রেক্ষাগৃহের শব্দব্যবস্থা (Auditorium Acoustics)

গঠন

11.1 প্রস্তাবনা
উদ্দেশ্য
11.2 অনুরণন (Reverberation)
11.3 শব্দের তীব্রতা বৃদ্ধি
11.4 শব্দের তীব্রতা হ্রাস ও সেবিনের সূত্র
11.5 নিষ্প্রাণ কক্ষে অনুরণন ও আইরিং (Eyring)-এর সূত্র
11.6 শব্দশোষণ গুণাঙ্কের পরিমাপ
11.7 প্রেক্ষাগৃহের শব্দবিজ্ঞানসম্মত নকশা (Acoustic design of auditorium)
11.8 সারাংশ
11.9 সর্বশেষ প্রশ্নাবলী
11.10 উত্তরমালা

11.1 প্রস্তাবনা

আপনি নিশ্চয়ই সিনেমা - থিয়েটার দেখতে বা বক্তৃতা, গান বাজনা শুনতে বিভিন্ন প্রেক্ষাগৃহে গিয়েছেন। আপনি হয়ত লক্ষ্য করেছেন, কোনও কোনও প্রেক্ষাগৃহে শব্দ স্পষ্টভাবে শোনা যায় এবং প্রেক্ষাগৃহের সব অংশেই শব্দ সমানভাবে পৌঁছয়। আবার আমরা এও লক্ষ্য করি যে, কোনও কোনও হলে স্পিকারের সাহায্য ছাড়া সব জায়গা থেকে শব্দ শোনা যায় না বা বেশি গম্‌গম্‌ করায় স্পষ্ট বোঝা যায় না। প্রেক্ষাগৃহের এই বৈশিষ্ট্যগুলি তার গঠনের উপর নির্ভর করে।

সভা-বক্তৃতা অথবা সাংস্কৃতিক অনুষ্ঠানের উপযুক্ত কোনও বড় প্রেক্ষাগৃহ বা হলঘর এমন হওয়া উচিত, যাতে তার প্রতিটি অংশে উপবিষ্ট শ্রোতার কাছে শব্দ স্পষ্টভাবে পৌঁছয়। সে কারণে শব্দবিজ্ঞানের কিছু মূল নিয়ম মেনে এর গঠন বিশেষ ধরনে করা হয়ে থাকে। আবার বিপরীত দিকটাও ভাবুন। শব্দ রেকর্ডিং-এর স্টুডিও, টেলিফোন বুথ কিংবা হাসপাতালের অপারেশন কক্ষ হওয়া উচিত শব্দরোধী (sound proof), যাতে বাইরের গোলমাল না আসতে পারে। সে জন্য তার গঠন প্রণালীও পৃথক হওয়া দরকার। এর জন্য পদার্থবিজ্ঞানের কিছু মূল নিয়ম মানতে হয়। শব্দতরঙ্গ সঞ্চালনের সেই মিয়ম সমষ্টিকে বলা হয় প্রেক্ষাগৃহের শব্দব্যবস্থা।

সাধারণ বসবাসের ঘরের সঙ্গে প্রেক্ষাগৃহের মূল পার্থক্য সেটির বৃহৎ আকার এবং শব্দবিন্যাসের ব্যবস্থা। একটি ভাল প্রেক্ষাগৃহের কী কী গুণ থাকা প্রয়োজন বলে আপনার মনে হয়? আপনি নিশ্চয়ই নিম্নলিখিত বৈশিষ্ট্যগুলির উপর জোর দেবেন :

(i) প্রেক্ষাগৃহের সমস্ত অংশে যে প্রতিটি শব্দাংশ শ্রুতিগোচর হওয়ার মত যথেষ্ট জোরালো শব্দ শোনা যায়।

(ii) একটি শব্দাংশের প্রতিধ্বনি যেন পরবর্তী শব্দাংশেকে ঢাকা না দেয়, যাতে বক্তার উচ্চারিত শব্দাংশগুলি পৃথকভাবে স্পষ্ট বোঝা যায়। অবশ্য কিছুটা প্রতিধ্বনি থাকা বাঞ্ছনীয় কেননা তা শব্দের তীব্রতা বাড়ায় এবং সেটিকে শ্রুতিসুখকর করে।

(iii) মূল শব্দ যেন বিকৃত হয়ে না যায়, অর্থাৎ মূল শব্দে মূলসুর ও উপসুরগুলি যে অনুপাতে থাকে, শ্রোতার কর্ণে যেন সেই অনুপাতেই পৌঁছায়।

এই বেশিষ্ট্যগুলি বজায় রাখার জন্য যে বিষয়টি বিবেচনা করা সবচেয়ে গুরুত্বপূর্ণ, তা হল অনুরণন। তা ছাড়াও কয়েককিটি বিচার্য বিষয় আছে যা পরে উল্লেখ করা হয়েছে। প্রেক্ষাগৃহের বাস্তুবিদ্যাগত নির্মাণ কৌশল শব্দবিজ্ঞানের যে সব নিয়ম ও সূত্রের উপর আধারিত, এই এককে সেগুলি আলোচনা করা হয়েছে।

উদ্দেশ্য :

এই এককটি পড়লে আপনি

- কোনও কোনও হলে শব্দ কেন ভাল সোনা যায় না তা ব্যাখ্যা করতে পারবেন।
- বোঝাতে পারবেন অনুরণন কাকে বলে এবং জীবিত ও মৃত কক্ষ কী।
- বদ্ধ প্রেক্ষাগৃহে শব্দের তীব্রতা বৃদ্ধি ও হ্রাসের গাণিতিক বিশ্লেষণ করতে পারবেন।
- একটি উৎকৃষ্ট প্রেক্ষাগৃহ নির্মাণের জন্য কী কী বিষয় বিবেচনা করা প্রয়োজন সে বিষয়ে পরামর্শ দিতে পারবেন।

11.2 অনুরণন (Reverberation)

সাধারণ অভিজ্ঞতা থেকে আমরা জানি যে, কোনও বদ্ধ ঘরে বক্তৃতা, সঙ্গীত বা বাদ্যের ধ্বনি থেমে গেলেও কিছুক্ষণ তার রেশ থেকে যায়। শ্রোতার কানে শব্দ গুঞ্জরিত হতে হতে মিলিয়েই যায়। কোনও ক্ষণস্থায়ী শব্দ উৎপাদিত হওয়ার পর কক্ষের চারিদিকের দেওয়াল, ছাদ ও অন্যান্য তল থেকে বারবার প্রতিফলিত হয়ে শ্রোতার কানে পৌঁছায়। যে কোনও ক্ষণস্থায়ী শব্দ আমাদের কানে যে শব্দানুভূতি-সৃষ্টি করে তা $0.1s$ স্থায়ী হয়। ঐ সময়ের মধ্যে অন্য কোন শব্দ কানে এলেও আমরা সেটি আলাদা করে বুঝতে পারি না। এর ফলে মূলশব্দ ও প্রতিধ্বনিগুলি মিলে একটি প্রলম্বিত শব্দানুভূতি সৃষ্টি করে, যার তীব্রতা ক্রমশ হ্রাস পায় ও অবশেষে মিলিয়ে যায়।

ধ্বনির এই প্রলম্বিত হওয়াকে অনুরণন বলা হয়। দীর্ঘস্থায়ী অনুরণন কোনও কোনও ক্ষেত্রে শুনতে ভাল লাগলেও বক্তৃতা, নাটক প্রভৃতি যে সব ক্ষেত্রে উচ্চারিত শব্দগুলি স্পষ্টভাবে শোনার প্রয়োজন হয়, সেখানে অনুরণন একটি বাক্যাংশ আর একটিকে ঢেকে দেওয়ার ফলে শ্রবণে অসুবিধার সৃষ্টি করে। আবার যদি অনুরণন একেবারেই না থাকে, সঙ্গীত-বাদ্য শ্রোতার কানে সুখকর হবে না। সে জন্য প্রেক্ষাগৃহ অনুরণনের সময় হওয়া উচিত খুব বেশিও নয়, একেবারে কম নয়, দুইয়ের মাঝামাঝি। এই প্রসঙ্গে কয়েকটি সংজ্ঞা জেনে নেওয়া যাক।

(i) অনুরণন কাল (Re-verberation time) : শব্দ উৎসাহিত হয়ে থেমে যাওয়ার পরে প্রতিধ্বনিত হতে হতে যতটা সময় ধরে প্রতিধ্বনিত শব্দের তীব্রতা শ্রবণসীমার উপরে থাকে, সাধারণভাবে তাকে অনুরণন কাল বলে। তবে এই সংজ্ঞা থেকে পরিমাণগতভাবে অনুরণন কাল নির্ণয় করা যায় না। আমেরিকার বিজ্ঞানী সেবিনের গৃহীত সংজ্ঞা অনুযায়ী, যে সময়ে প্রতিধ্বনিত শব্দের তীব্রতা মূল শব্দের 10^{-6} গুণ হয়ে ন্যূনতম শ্রাব্যসীমায় পৌঁছে যায়, তাকেই অনুরণন কাল বলা হয় অর্থাৎ যখন মূল শব্দের তীব্রতা ন্যূনতম শ্রাব্যসীমার 10^{6} গুণ অর্থাৎ, তীব্রতা স্তর 60db ছিল, সেই মুহূর্ত থেকে তীব্রতা স্তর 0db এ নামার জন্য যতটা সময় লাগে সেটিই হল অনুরণন কাল।

(ii) শব্দশোষণ গুণাঙ্ক (Sound absorption coefficient) : শব্দতরঙ্গ যখন দেওয়াল, পর্দা, কাঠের পাটাতন প্রভৃতির উপর আপতিত হয়, তখন তরঙ্গটি সম্পূর্ণ প্রতিফলিত হয় না। প্রতিফলক তল শব্দতরঙ্গের কিছুটা শক্তি শোষণ করে। শব্দতরঙ্গ কোনও তলের উপর লম্বভাবে আপতিত হলে আপতিত শক্তির যে অংশ ঐ তলে শোষিত হয় তাকে ঐ তলের শব্দশোষণ গুণাঙ্ক বলে। আপনি নিশ্চয়ই আন্দাজ করতে পারছেন যে, খোলা জানালা বা দরজা যেহেতু তরঙ্গের কোনও শক্তিই প্রতিফলিত করে না, অতএব সেগুলির শব্দশোষণ গুণাঙ্ক 1.0 হবে। এই গুণাঙ্কের মান এক এক ধরনের তলের ক্ষেত্রে এক এক রকম হয়। আপতিত শব্দের কম্পাঙ্কের উপরেও এই মান নির্ভর করে।

কোনও একটি তলের ক্ষেত্রফলকে শব্দশোষণ গুণাঙ্ক দিয়ে গুণ কর ঐ তলের "শোষণ" পাওয়া যায়।

(iii) প্রাণবন্ত ও নিষ্প্রাণ কক্ষ : কোনও কক্ষের অনুরণন কাল কক্ষটির আয়তন এবং কক্ষের সবগুলি তলের মোট শোষণের উপর নির্ভর করে। আপনি এই এককে পরে দেখবেন যে, অনুরণনের কাল কক্ষের আয়তনের সমানুপাতী এবং মোট শোষণের ব্যাস্তানুপাতী। যে কক্ষের মোট শোষণ আয়তনের তুলনায় কম, সেখানে অনুরণন বেশি হয়, ফলে শব্দের তীব্রতা সোজাসুজি আসা শব্দের তুলনায় বেশি হয়, শব্দের রেশ অনেকক্ষণ থাকে। এ জাতীয় কক্ষকে প্রাণবন্ত কক্ষ বলা হয়। অপরদিকে, যদি আয়তনের তুলনায় শোষণ বেশি হয় তবে শব্দের রেশ দ্রুত মিলিয়ে যায়। শব্দের তীব্রতা ফাঁকা জায়গায় যতটা হত প্রায় ততটাই হয়। এ ধরনের কক্ষকে আমরা নিষ্প্রাণ কক্ষ বলি।

(iv) অনুকূল অনুরণন কাল (Optimum Re-verberation time) : প্রেক্ষাগৃহে উৎপাদিত ধ্বনির শ্রুতিমাধুর্য রক্ষা করা, প্রতিফলনের সময় শোষণের ফলে শব্দশক্তির অতিরিক্ত ক্ষয় রোধ করে শব্দের যথেষ্ট তীব্রতা বজায় রাখা, আবার একই সঙ্গে উচ্চারিত শব্দ, সঙ্গীত প্রভৃতির স্পষ্টতা রক্ষা করার জন্য আমরা চাই অনুরণনের একটি মাঝামাঝি অবস্থা। এই সর্বাধিক অনুরণনের কালটিকেই আমরা অনুকূল অনুরণন কাল বলি। এটির মান কক্ষের আয়তন এবং কক্ষটি কীভাবে ব্যবহার হবে এই দুই-এর উপরই নির্ভর করে। স্টিফেন ও বেট বিভিন্ন ধরনের কক্ষের আদর্শ অনুরণন কাল নির্ণয়ের জন্য যে প্রায়োগিক সূত্র ব্যবহার করেন সেটিকে মেট্রিক এককে লেখা যায়।

$$T = N\,(0.0036 \quad + 0.107) \text{ সেকেন্ড।।} \qquad \ldots 11.1$$

যেখানে $V = m^3$ এককে কক্ষের আয়তন, N রাশির মান বক্তৃতা বা নাটক, যন্ত্রসঙ্গীত ও বৃন্দগান বা অর্কেষ্ট্রার ক্ষেত্রে যথাক্রমে 4, 5 ও 6 । একটি উদাহরণ দেওয়া যাক। ধরুন, $30m \times 20m \times 10m = 600m^3$ আয়তনের একটি কক্ষ অর্কেষ্ট্রার জন্য ব্যবহৃত হবে। 11.1 সূত্র অনুযায়ী এই কক্ষের অনুকূল অনুরণন কাল হবে:

6(0·0036 × + 0·107) = 1·03 সেকেন্ড

আপনি হিসাব করে দেখেতে পারেন যে, এই কক্ষটির অনুরণন কাল 1·3 সেকেন্ড হলে এটি বক্তৃতার জন্য উপযুক্ত হত।

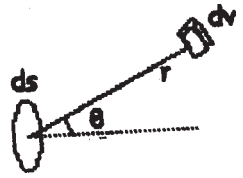
11.3 শব্দের তীব্রতা বৃদ্ধি

নিস্তব্ধ ঘরে যখন কোনও শব্দ আরম্ভ হয় তখন ঘরের মধ্যে শব্দের তীব্রতা সেই মুহূর্তেই কোন স্থায়ী মানে পৌঁছায় না। তীব্রতা শূন্যমান থেকে কীভাবে বৃদ্ধি পায়, এবার আমরা সেটি নির্ধারণ করতে চেষ্টা করব। মনে করা যাক, কোনও ঘরে একটি উৎস থেকে সমহারে শব্দশক্তি উৎপাদিত হচ্ছে। ঘরের দেওয়াল বা অন্য তলে আপতিত শব্দতরঙ্গের কিছু প্রতিফলিত এবং কিছু অবশোষিত হচ্ছে। বারবার প্রতিফলিত হওয়ার ফলে সমস্ত কক্ষ জুড়ে শব্দশক্তির ঘনত্ব সমান এবং শক্তিপ্রবাহও সবদিকে সমানভাবে হচ্ছে বলে ধরে নেওয়া যায়।

দেওয়ালের কোনও এক স্থানে ক্ষুদ্র ক্ষেত্রফলবিশিষ্ট ds এবং তা থেকে r দূরত্বে এক ক্ষুদ্র আয়তন dv কল্পনা করা হল। r এর দিশা এবং ds - এর তলের লম্বদিশার মধ্যে কোণ , যেমন চিত্র 11.1-এ দেখা যাচ্ছে।

যদি ঘরের মধ্যে শব্দ শক্তির ঘনত্ব u হয় তা হলে dv ক্ষুদ্র আয়তনের মধ্যে শক্তির পরিমাণ udv হবে। যেহেতু শক্তি প্রবাহ সমদৈশিক (isotropic), ds ক্ষুদ্র তলের উপর dv আয়তন থেকে এই শক্তির

$dE =$ অংশ আপতিত হবে।



যেখানে d হল ds দ্বারা dv তে সৃষ্ট ঘন কোণ (solid angle)

এখন, $dv = r^2 \sin$ = দিগংশ কোণ) চিত্র : 11.1

এবং, d =

কারণ, r দিশায় ds এর লম্ব প্রক্ষেপ (perpendicular projection) হচ্ছে $ds \cos$ ।

অতএব,

$$dE = \quad r^2 \sin \quad d \quad d \quad dr$$

$$= \quad \sin \quad \cos \quad d \quad d \quad dr \qquad ...11.2$$

উপরের রাশিমালাটি হল dv আয়তন থেকে আসা শক্তির পরিমাপ। যদি সমস্ত কক্ষের আয়তনের হিসাব করতে হয়, তবে কোণে 0 থেকে পর্যন্ত এবং কোণ 0 থেকে 2 পর্যন্ত ব্যাপ্ত বলে ধরতে হবে। ভেবে দেখুন r এর ব্যাপ্তি কী হবে?

r হল দূরত্বের মাপ এবং শব্দের গতি c বলতে বোঝায় একক সময়ে শব্দ দ্বারা অতিক্রান্ত দূরত্ব। তাই r 0 থেকে c পর্যন্ত পরিবর্তন করলে একক সময়ে ds-এ আসা শব্দশক্তির পরিমাণ পাওয়া যাবে।

সুতরাং, 11.2 সমীকরণকে সমাকলন করে একক সময়ে ds ক্ষেত্রফলে কক্ষের মোট আয়তন থেকে আপতিত শব্দশক্তি পাওয়া যাবে :

$$E = \frac{u\,ds}{4\pi}\int_0^{\pi/2} \sin\theta \cos\theta\, d\theta \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{c} dr$$

$$= \frac{u\,ds}{4\pi}\cdot\frac{1}{2}\cdot 2\pi\cdot c$$

$$=$$

একক সময়ে একক ক্ষেত্রফলে আপতিত শক্তি হবে

$$I = \qquad ...11.3$$

সংজ্ঞা অনুযায়ী এটিই শব্দের তীব্রতা।

ধরা যাক, কক্ষে বিভিন্ন উপাদানে নির্মিত তল আছে, যেগুলির শব্দ শোষণ গুণাঙ্ক আলাদা।

যদি i তম তলের শব্দশোষণ গুণাঙ্ক $_i$ এবং ক্ষেত্রফল হয়, তবে ঐ তলে একক সময়ে পরিমাণ শক্তি আপতিত হবে এবং তার মধ্যে পরিমাণ শক্তি শোষিত হবে। সুতরাং, একক সময়ে কক্ষে মোট শোষিত শক্তির পরিমাণ :

$E_a =$ ...11.4

যেখানে কক্ষের সবগুলি তলের মোট শোষণ :

$$a = \sum_i \alpha_i \delta s_i$$

সম্পূর্ণ ঘরটির আয়তন যদি V হয় এবং তার মধ্যে উৎস থেকে প্রতি একক সময়ে উৎপাদিত শক্তি P হয়, তবে শক্তিসংরক্ষণের নিয়ম অনুযায়ী ঘরের মধ্যে শব্দশক্তি বৃদ্ধির হার হবে,

শক্তি উৎপাদনের হার - শক্তি শোষণের হার

অর্থাৎ, ...11.5

বা, $\frac{du}{P - acu/4} = \frac{dt}{V}$

শব্দ আরম্ভ হওয়ার মুহূর্তে, অর্থাৎ যখন $t = 0$, তখন $u = 0$ ছিল। t সময় পরে শব্দশক্তির ঘনত্ব u হল। তাহলে

যদি $P - acu/4 = x$ ধরা হয়, তবে উভয়দিকে সমাকলন করে পাওয়া যায়,

$$\frac{t}{v} = -\frac{4}{ac} \int_0^{P-acu/4} \frac{dx}{x}$$

=

log

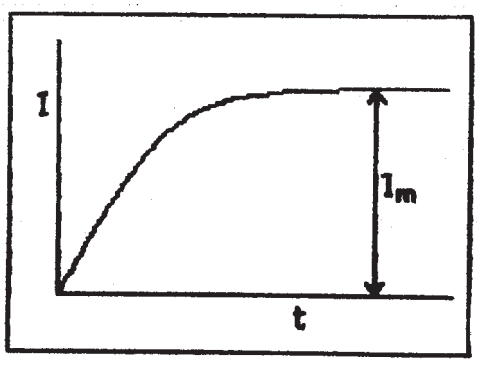
বা, $\frac{P - acu/4}{P} = e^{-act/4V}$

বা, $u = \frac{4P}{ac}\left(1 - e^{-act/4V}\right)$ ...11.6

শক্তি ঘনত্ব বাড়তে বাড়তে একটা উচ্চতম মানে (u_m) পৌঁছবে। সুতরাং, $t = \infty$ হলে $u = u_m =$

$$u = u_m(1- e^{-act/4V}) \quad ...11.7$$

সমীকরণ 11.7 থেকে ঘরে শব্দশক্তির ঘনত্ব বৃদ্ধির প্রকৃতি বোঝা যাচ্ছে। সমীকরণ 11.3 থেকে আমরা পাই, $I =$, অর্থাৎ, শক্তি ঘনত্ব আর তীব্রতা পরস্পর সমানুপাতী। অতএব, সমীকরণ 11.7 থেকে পাওয়া যায়, $I = I_m(1 - e^{-act/4V})$ ...11.8



চিত্র 11.2 সময়ের সঙ্গে শব্দের তীব্রতা বৃদ্ধি

যেখানে $I_m =$ = তীব্রতার সর্বোচ্চ মান।

সমীকরণ 11.8 ঘরে শব্দশক্তির তীব্রতা বৃদ্ধির প্রকৃতি নির্দেশ করছে। সময়ের সঙ্গে শব্দের তীব্রতা কীভাবে বাড়বে, তা চিত্র 11.2 - এ দেখানো হয়েছে। তীব্রতা বাড়তে বাড়তে একটা মানে গিয়ে স্থির হয়ে যায়। এই বৃদ্ধির হার নির্ভর করে ঘরের আয়তন এবং ভেতরকার দেওয়াল ইত্যাদির অবশোষণ ক্ষমতার উপরে।

11.4 শব্দের তীব্রতা হ্রাস ও সেবিনের সূত্র

যদি শক্তি ঘনত্ব উচ্চতম মানে পৌঁছে যাবার পর উৎসটিকে বন্ধ করে দেওয়া হয়, তখনও কক্ষের বিভিন্ন তলে শব্দ শক্তি শোষিত হতে থাকবে। এর ফলে তখন শক্তি ঘনত্ব কমতে থাকবে। 11.5 অবকল সমীকরণে P = 0 বসালে

$$V$$

বা, $$\frac{du}{acu} = -\frac{dt}{4V}$$

উভয় দিক সমাকলন করলে পাই,

$$\log u = \frac{-act}{4V} + A, \text{ যেখানে } A = \text{সমাকলন ধ্রুবক।}$$

এক্ষেত্রে যখন $t = 0$, $u = u_m$, সুতরাং, $A = \log u_m$

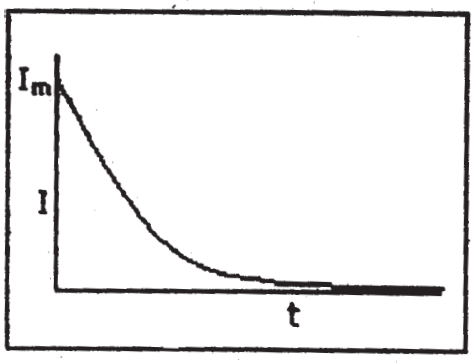
$$\log u = \qquad + \log u_m$$

বা, $u = u_m e^{-act/4V}$ ...11.9

পূর্বের মত, যেহেতু $I = \frac{cu}{4}, I_m =$

$I = I_{me}{}^{-act/4V}$ ...11.10

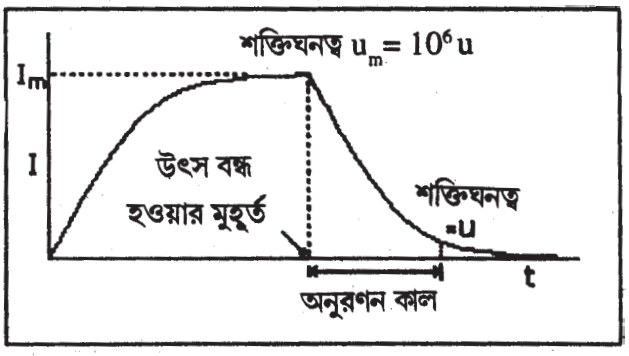
সমীকরণ 11.10 থেকে বোঝা যাচ্ছে যে, কোনও বদ্ধ ঘরে শব্দশক্তি কিছুক্ষণ উৎপাদিত হয়ে থেমে যাওয়ার পর তীব্রতা উচ্চতম মান I_m থেকে সূচক (exponential) হারে কমতে থাকবে। কীভাবে সময়ের সঙ্গে শব্দের তীব্রতা কমবে, তা চিত্র 11.3-এ দেখানো হয়েছে।



চিত্র 11.3

উৎস বন্ধ করে দিলে তৎক্ষণাৎ শব্দের তীব্রতা শূন্য হয়ে যায় না। কত দ্রুত বা ধীরে তা কমবে, তা নির্ভর করে ঘরের আয়তন এবং ভেতরকার দেওয়াল প্রভৃতির শোষণের উপরে।

এবার ধরুন, নিস্তব্ধ কক্ষে শব্দের উৎস চালু হওয়ার কিছুক্ষণ পর যখন শব্দের তীব্রতা বা শক্তি ঘনত্ব সর্বোচ্চ মানে পৌঁছেছে, তখন উৎসটি বন্ধ করে দেওয়া হল। এখন শব্দের তীব্রতার যে পরিবর্তন হবে তা 11.4 চিত্রে দেখানো হয়েছে। তীব্রতার পরিবর্তে শক্তি ঘনত্বের লেখচিত্রে আঁকলে সেটি একইরকম দেখাত।



11.9 সমীকরণ থেকে আমরা অনুরণন কালের একটি রাশিমালা পেতে পারি। ঐ সমীকরণ থেকে $u_m/u = e^{act/4V}$ আপনি আগেই জেনেছেন যে, শক্তি ঘনত্ব 10^6 গুণ পরিমাণে হ্রাস পেয়ে ন্যূনতম শ্রাব্যসীমায় পৌঁছনোর যে সময়, সেটাই অনুরণন কাল T_R।

চিত্র 11.4

$e^{acT_R/4V} = 10^6$

বা, $acT_R/4V = In(10^6) = 6 \times 2{\cdot}303$

বা, $T_R =$

যদি শব্দের গতি $343 ms^{-1}$ ধরা হয় এবং V ও a যথাক্রমে m^3 ও m^2 এককে মাপা হয় তবে

$$T_R = \qquad \ldots 11.11$$

এটিই সেবিনের সূত্র।

শোষণের এফ পি এস এককের নাম সেবিনের নামানুসারে Sabin-ই দেওয়া হয়েছিল। খোলা জানালা বা ওই জাতীয় আদর্শ শোষকের এক বর্গফুট ক্ষেত্রফলের শোষণকে 'এক সেবিন' (Sabin) বলা হয়। তবে আমরা আদর্শ শোষকের এক বর্গমিটার ক্ষেত্রফলের শোষণকেই একক হিসাবে ধরব।

সেবিনের সূত্রটির সাহায্যে কোনও কক্ষের আয়তন এবং সবগুলি তলের ক্ষেত্রফল ও শব্দশোষণ গুণাঙ্ক জানা থাকলে তার থেকে আপনি অনুরণন কাল নির্ণয় করতে পারবেন। এই সূত্রটি কিন্তু ত্রুটিমুক্ত নয়। এটি প্রতিষ্ঠা করতে গিয়ে আমরা কয়েকটি বিষয় ধরে নিয়েছি যা ঠিক নাও হতে পারে। দেখা যাক এগুলি কী কী।

(i) উৎসের শব্দশক্তি উৎপাদনের হার সম্পূর্ণ স্থির এবং কক্ষের তীব্রতার সঙ্গে সম্পর্কহীন।

(ii) কক্ষের সব অংশে শব্দশক্তি সমভাবে বন্টিত এবং শব্দশক্তির প্রবাহ সম্পূর্ণ সমদৈশিক।

(iii) শব্দতরঙ্গের উপরিপাতনের কোন ও প্রভাব থাকবে না।

(iv) শব্দের শোষণ কেবলমাত্র প্রতিফলনের সময়ই ঘটবে, মাধ্যমে অর্থাৎ বায়ুতে কোনও শোষণই ঘটবে না।

(v) তলগুলির শোষণ গুণাঙ্ক শব্দের কম্পাঙ্ক ও তীব্রতার উপর একেবারেই নির্ভরশীল নয়।

বাস্তবে সঙ্গীত, নাটক বা বক্তৃতা কোনওটিতেই শব্দশক্তি সমহারে উৎপন্ন হয় না। সাম্যাবস্থায় শব্দের উপরিপাতন ঘটবে এবং স্থাণুতরঙ্গ তৈরি হবে। যার ফলে শব্দশক্তির সুষম বন্টন ঘটবে না। বায়ুতে শব্দতরঙ্গের শোষণ ঘটে এবং শোষণের মাত্রাশব্দের কম্পাঙ্কের সঙ্গে বৃদ্ধি পায়। বিশেষত, বড় আকারের প্রেক্ষাগৃহের ক্ষেত্রে বায়ুমাধ্যমে শব্দের শোষণ মোটেই উপেক্ষা করা যায় না। এছাড়া যদি কোন কক্ষের প্রতিটি তলের শব্দশোষণ গুণাঙ্ক $= 1$ হয়, তখন a রাশিটি সবগুলি তলের মোট ক্ষেত্রফলের সমান হবে এবং সেক্ষেত্রেও কিছুটা অনুরণন কাল পাওয়া যাবে। কিন্তু বাস্তবে কী হবে তা ভেবে দেখুন। এ অবস্থায় শব্দের কোনও প্রতিফলনই ঘটবে না এবং অনুরণন একেবারেই থাকবে না।

আপনি নিশ্চয়ই বুঝতে পারছেন যে, সেবিনের সূত্রটি সব অবস্থায় খাটবে না। আসলে কক্ষের মাপ শব্দের তরঙ্গদৈর্ঘ্যের তুলনায় অনেক বড় এবং শোষণের পরিমাণ কম হলে ($_i < 0{\cdot}2$), তবেই সেবিনের সূত্র ব্যবহার করা যায়।

এবারে দেখা যাক নিষ্প্রাণ কক্ষে, যেখানে শোষণের মান খুবই বেশি, সেখানে কীভাবে অনুরণন কাল নির্ণয় করা যায়।

11.5 নিষ্প্রাণ কক্ষে অনুরণন ও আইরিং (Eyring)-এর সূত্র

আপনি আগেই জেনেছেন, যে সব কক্ষে শোষণের মান বেশি, সেগুলির ক্ষেত্রে সেবিনের সূত্র ব্যবহার করা যায় না। এ ধরনের কক্ষের জন্য আইরিং কিছুটা বিভিন্ন পদ্ধতিতে অনুরণন কালের সঙ্গে কক্ষের আয়তন, তলগুলির মোট ক্ষেত্রফল এবং সেগুলির গড় শব্দশোষণ গুণাঙ্কের সম্পর্ক নির্ণয় করেন।

নিষ্প্রাণ কক্ষে তীব্রতার হিসাব করতে গেলে বারবার প্রতিফলনে শব্দতরঙ্গের শোষণ বিবেচনা করতে হবে। মনে করা যাক, কক্ষের তলগুলির গড় শব্দশোষণ গুণাঙ্ক । তা হলে প্রতিবার শব্দ আপতিত হওয়ার পর তীব্রতার অংশ শোষিত হবে এবং (1 –) অংশ প্রতিফলিত হবে।

অতএব, প্রারম্ভিক তীব্রতা যদি I_0 হয়, প্রথম, দ্বিতীয়, তৃতীয়.......ইত্যাদি প্রতিফলনের পরে তীব্রতা হবে $I_0\,(1 - \quad)$, $I_0(1 - \quad)^2$, $I_0(1 - \quad)^3$......ইত্যাদি।

বোঝা যাচ্ছে যে, শব্দের উৎস বন্ধ করে দিলে n সংখ্যক প্রতিফলনের পর শব্দের তীব্রতা হবে

$$I = I_0(1 - \quad)^n \qquad ...11.12$$

যদি এটি ন্যূনতম শ্রাব্যসীমা হয়, তবে অনুরণন কালের সংজ্ঞা অনুযায়ী :

$$I/I_0 = 10^{-6}$$

সমীকরণ 11.12 থেকে $(1 - \quad)^{n} = 10^{-6}$

বা, $\quad n\log(l - \quad) = -2{\cdot}303 \times 6$

বা, $\quad n = \qquad ...11.13$

সুবিধার জন্য কেবল চার দেওয়াল থেকে প্রতিফলনই বিবেচনা করা হচ্ছে। দুই প্রতিফলনের মধ্যে শব্দ দ্বারা অতিক্রান্ত গড় দূরত্ব হবে:

$$b = \frac{V}{S/4} \qquad ...11.14$$

যেখানে V = ঘরের আয়তন এবং S = চার দেওয়ালের মোট ক্ষেত্রফল। n সংখ্যক প্রতিফলনে অতিক্রান্ত দূরত্ব = শব্দের গতি X অনুরণন কাল

$$\text{বা, } nb = cT_R \qquad ...11.15$$

কারণ, n সংখ্যক প্রতিফলনের পর শব্দের তীব্রতা ন্যূনতম শ্রাব্যসীমায় পৌঁছাচ্ছে।

সমীকরণ 11.13, 11.14 এবং 11.15 অনুসারে

$$n = cT_R \cdot \frac{S}{4V} = \frac{-2{\cdot}303\times 6}{\log\left(1-\bar{\alpha}\right)}$$

শব্দের গতি $343 ms^{-1}$ ধরলে $T_R = \dfrac{0{\cdot}161\mathrm{V}}{S\left[-\log\left(1-\bar{\alpha}\right)\right]}$ ...11.16

সমীকরণ 11.26 কে আইরিং-এর সূত্র বলে। এটি নিষ্প্রাণ কক্ষে অনুরণন কালের গণনা করতে সাহায্য করে। দুটি অবস্থা কল্পনা করা যাক।

(i) যখন শোষণ খুব বেশি অর্থাৎ এর মান 1-এর কাছাকাছি, তখন : –log(1 –) বা log

খুব বড়, ফলে T_R খুব ছোট। সে ক্ষেত্রে অনুরণন নগণ্য বা কক্ষটি নিষ্প্রাণ।

(ii) যখন শোষণ খুব কম :

log(1 –) = –

≃ – (- এর উচ্চতর ঘাতগুলি নগণ্য ধরে)

সে ক্ষেত্রে T_R=

S = মোট অবশোষণ, সুতরাং উপরের সূত্রটি সেবিনের সূত্রের অনুরূপ। এই অবস্থায় কক্ষটি প্রাণবন্ত বলে বিবেচিত হবে।

সুতরাং, আমরা দেখলাম আইরিং এর সূত্র থেকে প্রাণবন্ত ও নিষ্প্রাণ কক্ষ — দুই-এরই অনুরণন কাল নির্ধারণ করা যায়।

মিলিংটন আইরিং - এর সূত্রের সংশোধন করে যে সূত্রটির প্রস্তাব করেছেন সেটি হল :

T_R =

এখানে S_i ও $_i$ হল i-তম তলের ক্ষেত্রফল ও শব্দশোষণ গুণাঙ্ক।

যখন সব $_i$ ক্ষুদ্র মানের, তখন এই সূত্রটি সেবিনের সূত্রে পরিণত হয়। কিন্তু যখন $_i$- এর মানগুলি বড় হয়, তখন এই সূত্রটির সঙ্গে পরীক্ষালব্ধ মানের ভাল সঙ্গতি দেখা যায়।

এবার একটি অনুশীলনীর মাধ্যমে অনুরণন কাল সম্বন্ধে যা পড়লেন তা একবার ঝালিয়ে নিতে পারেন।

অনুশীলনী - 1 :

(i) সঠিক শব্দ বেছে নিয়ে শূন্যস্থান পূর্ণ করুন :

(a) প্রেক্ষাগৃহের শব্দব্যবস্থায় সবচেয়ে গুরুত্বপূর্ণ বিষয় হল————। (কম্পাঙ্ক/ অনুরণন/তীব্রতা)

(b) প্রেক্ষাগৃহের গঠন এমন হওয়া উচিত যাতে অনুরণন কাল অনুকূল অনুরণন কালের ———— —হয়। (কম/বেশি/সমান)

(c) প্রেক্ষাগৃহের মেঝেতে মোটা কার্পেট পাতা হলে অনুরণন কাল————। (বাড়বে/সমান থাকবে/কমবে)

(d) যখন শোষণের মাত্রা খুব কম থাকে, তখন সেবিনের সূত্র ও আইরিং - এর সূত্রের মধ্যে সঠিক সূত্র হল ————। (শুধু প্রথমটি/শুধু দ্বিতীয়টি/উভয়ই)

(e) অন্য বিষয়গুলি অপরিবর্তিত থাকলে অনুরণন কাল প্রেক্ষাগৃহের আয়তনের———— হয়। (সমানুপাতী/ব্যাস্তানুপাতী/বর্গের সমানুপাতী)

(ii) একটি হলঘরের আয়তন $10000m^3$ এবং তার সবগুলি তলের মোট শোষণ 300 একক (একক = Im^2 পূর্ণ শোষণকারী তল)। ঐ ঘরের অনুরণন কাল কত হবে? এখন ঐ ঘরে কত জন দর্শক প্রবেশ করলে অনুরণন কাল অর্ধেক হবে? প্রত্যেক দর্শকের শোষণ গড়ে 0·4 একক ধরে নিন।

11.6 শব্দশোষণ গুণাঙ্কের পরিমাপ

অনুরণন কালকে প্রেক্ষাগৃহের আয়তন এবং তার সম্ভাব্য ব্যবহার অনুযায়ী সবচেয়ে উপযোগী মানে রাখার প্রয়োজনীয়তা আপনি নিশ্চয়ই উপলব্ধি করেছেন। অনুরণনকে যথোপযুক্ত অবস্থান রাখার জন্য ছাদ ও দেওয়ালের তলগুলির শব্দশোষণ গুণাঙ্ক নির্ধারণ করার প্রয়োজন হয়। বিভিন্ন পদ্ধতিতে তা করা যেতে পারে। একটি প্রচলিত পদ্ধতি হল একটি কক্ষে দুটি উৎস থেকে উৎপাদিত শব্দের অনুরণন কালের তুলনা।

মনে করা যাক, P_1 ও P_2 দুটি শব্দ উৎসের ক্ষমতা এবং এদের অনুপাত জানা আছে। প্রথমটি থেকে কোনও অনুরণন কক্ষে শব্দ উৎপাদন করা হল। বেশ কিছুক্ষণ করে, যখন শব্দ শক্তির ঘনত্ব নিশ্চিত ভাবে উচ্চতম মানে পৌঁছে গেছে, তখন উৎস বন্ধ করা হল এবং শব্দ ন্যূনতম শ্রাব্যসীমায় পৌঁছনোর সময় T_1 মাপা হল। 11.7 সমীকরণ অনুযায়ী উচ্চতম শক্তি ঘনত্ব $4P_1/ac$ যেখানে a অভ্যন্তরীণ ছাদ ও দেওয়ালের

মোট শোষণ এবং c শব্দের বেগ। একই পরীক্ষা দ্বিতীয় উৎসটি নিয়েও করা হল এবং সময় T_2 মাপা হল। এখন 11.7 সমীকরণ অনুসারে,

কারণ T_1 সময় বাদে প্রথমটি এবং T_2 সময় বাদে দ্বিতীয়টি ন্যূনতম শ্রাব্যসীমায় পৌঁছেছে। উভয়ের ক্ষেত্রেই তখন তীব্রতা সমান। উভয়ের ক্ষেত্রেই কক্ষটি একই, যার আয়তন V।

$\therefore$

বা, $$In\left(\frac{P_1}{P}\right)=\frac{ac}{4V}(T_1-T_2)$$

$\therefore\ a =$ ...11.17

উপরের সমীকরণ থেকে কক্ষের মোট শোষণক্ষমতা করা যায়। কিন্তু কক্ষের অভ্যন্তরীণ দেওয়াল বা ছাদের উপাদানের শোষণ গুণাঙ্ক বার করা যাবে না। তার জন্য 11.4 সমীকরণের সাহায্য নিতে হবে। গড় শোষণ গুণাঙ্ক :

$$\bar{\alpha}=\frac{\sum \alpha_i ds_i}{\sum ds_i}=\frac{a}{S}$$

বা, $a = \bar{\alpha} S$ ...11.18

যেখানে S মোট অভ্যন্তরীণ তলগুলির ক্ষেত্রফল। সমীকরণ 11.17 ও 11.18 থেকে পাই,

...11.19

সমীকরণ 11.19 থেকে গড় শোষণ গুণাঙ্ক বার করা যাবে। সারণি 11.2-এ কয়েকটি উপাদানের শব্দশোষণ গুণাঙ্ক দেওয়া হয়েছে।

সারণি 11.2 বিভিন্ন উপাদানের শব্দশোষণ গুণাঙ্ক

তলের উপাদান	শোষণ গুণাঙ্ক (500 Hz কম্পাঙ্কে)
খোলা দরজা/জানালা	1.00
ঘন দর্শক সমষ্টি	0.96
ভারী পর্দা	0.50
কার্পেট (পাতলা থেকে ভারী)	0.1 - 0.4
সাধারণ ইটের দেওয়াল	0.03
পাইন কাঠের প্যানেল	0.10
বিশেষ মসৃণ প্লাস্টার	0.2 - 0.4
জানালার কাচ	0.05
কংক্রিট/মোজাইক মেঝে	0.02
শব্দশোষণ বিশেষ প্যানেল	0.50

ঘরের দেওয়াল, মেঝে ও ছাদ থেকে শব্দের প্রতিফলন কমাতে প্রায়ই ভারী পর্দা, কার্পেট, সছিদ্র প্লাইউডের প্যানেল প্রভৃতির ব্যবহার হয়। এর কারণ আপনি 11.2 সারণীটি লক্ষ্য করলেই বুঝতে পারবেন।

11.7 প্রেক্ষাগৃহের শব্দবিজ্ঞানসম্মত নকশা (Acoustic design of auditorium)

প্রেক্ষাগৃহের গঠন পরিকল্পনায় সবচেয়ে বেশি প্রাধান্য পায় অনুরণন। এ পর্যন্ত তার বিস্তারিত বিবরণ দেওয়া হল। তবে অনুরণন ছাড়াও আরও কয়েকটি বিষয় বিবেচনা করতে হয়। এবার দেখা যাক সেগুলি কী।

(i) সুষম তীব্রতা (uniform intensity) : শব্দ যাতে প্রেক্ষাগৃহের সব জায়গাতে সমান জোরালো হয়, সে জন্য বিদ্যুৎচালিত লাউডস্পিকার রাখা হয়। সাধারণত এগুলি শ্রোতা বা বক্তার মাথার চেয়ে বেশি উচ্চতায় রাখা হয়। কৃত্রিম ছাদের (false ceiling) সাহায্যে ঘরের উচ্চতা কম করে দিলেও শ্রাব্যতা ভাল হয়। দেওয়াল বা ছাদে গোল অথবা বেলনাকার অংশ অবনতভাবে থাকলে তা থেকে শব্দ প্রতিফলিত হয়ে অসমানভাবে ফোকাসিত হয়ে যাওয়ার সম্ভাবনা থাকে। তাতে বিভিন্ন জায়গায় শব্দের তীব্রতা কম বেশি হয়ে যাবে। তা ছাড়া স্পিকারের পিছনের অংশ থেকে প্রতিফলনও বাধা সৃষ্টি করে। তা দূর করার জন্য সে অংশে কার্পেট জাতীয় অবশোষক পদার্থের আস্তরণ থাকা ভাল।

(ii) অনুনাদ (Resonance) অপসারণ : যদি উৎপাদিত ধ্বনিসমষ্টির কোনও বিশেষ কম্পাঙ্কের জন্য অনুনাদ সৃষ্টি হয়, সেই কম্পাঙ্কযুক্ত শব্দের তীব্রতা অন্যগুলির চেয়ে বেশি হয়ে এক কোলাহল সৃষ্টি করবে। অনুনাদী কম্পাঙ্ক প্রায়শই হলের আয়তনের বর্গমূলের ব্যাস্তনুপাতী হয়। তাই হলের আয়তন খুব বড় হলে অনুনাদী কম্পাঙ্ক শ্রাব্যসীমার নিচে থাকে এবং অনুনাদের প্রভাব এড়ানো যায়।

(iii) কোলাহল (Noise) থেকে মুক্তি : প্রেক্ষাগৃহের বাইরের থেকে আসা গোলমাল এবং ভেতরে তৈরি হওয়া গোলমাল, (যেমন শ্রোতাদের পদধ্বনি, বৈদ্যুতিক পাখার শব্দ) দুই-ই কোলাহল সৃষ্টি করতে পারে।

বাইরে থেকে আসা শব্দ বাড়ির কাঠামোর মধ্য দিয়ে, দরজা-জানালা, দেওয়াল ভেদ করে এবং বায়ুবাহিত হয়ে আসতে পারে। বাড়ির মেঝে বা ছাদের মধ্য দিয়ে আসা শব্দ রোধ করতে হলে কাঠামো থেকে বিচ্ছিন্ন কাঠ বা শব্দ অন্তরক বোর্ডের বাড়তি মেঝে বা ছাদ গঠন করতে হয়। দরজার কিনারার ফাঁক রবার বা ফেল্ট নির্মিত মোটা আস্তরণ দিয়ে বন্ধ রাখতে হয়। পরপর দুটি দরজা বসালে সেটি শব্দ অন্তরক হিসাবে ভাল কাজ করে। বায়ুর মধ্যে রাখা দেওয়াল বা কোনও পাটাতন ভেদ করার সময়ে লম্বভাবে আপতিত শব্দের $20\log\frac{\pi\sigma n}{\rho c}db$ ক্ষয় হয়। এখানে = kgm^{-2} এককে বাধার তল ঘনত্ব, n = শব্দের কম্পাঙ্ক, = বায়ুর ঘনত্ব ও c = বায়ুতে শব্দের বেগ। এর থেকে বোঝা যায় যে, অধিক ঘনত্বের পুরু দেওয়াল শব্দ আটকাতে বেশি কার্যকরী এবং অধিক কম্পাঙ্কের শব্দ রোধ করা অপেক্ষাকৃত সহজ।

প্রেক্ষাগৃহের মেঝের কার্পেট, অফিস ঘরে টাইপরাইটারের তলায় রবার বা ফেস্ট-এর প্যাড কক্ষের অভ্যন্তরে উৎপন্ন শব্দ কমাতে সাহায্য করে। তবে বৈদ্যুতিক পাখা, শীততাপ নিয়ন্ত্রণ যন্ত্র, কুলার, লাউডস্পিকার সমূহ ত্রুটিমুক্ত হওয়া প্রয়োজন যাতে এগুলি অবাঞ্ছিত শব্দের উৎস না হয়।

(v) সোপান প্রভাব (Echelon effect) : যদি হলঘরে সিঁড়ি, রেলিং প্রভৃতি দীর্ঘাকৃতি নির্দিষ্ট আকার থাকে, তাতে শব্দ বারেবারে প্রতিফলিত হয়ে তার কাছাকাঠি অংশে এক ধরনের গমগমে আওয়াজ শোনা যায়। একে সোপান প্রভাব বলা হয়। একে এড়ানোর জন্য সিঁড়ির ধাপে কার্পেট ইত্যাদি অবশোষক পদার্থ রাখা যায়। অথবা সিঁড়ির কাঠামো একটানা না করে মাঝে মাঝে আকৃতির একটি পরিবর্তন করে দেওয়া যায়।

(vi) শ্রোতাদের উপস্থিতি-অনুপস্থিতি : সারণি 11.2 থেকে বোঝা যাচ্ছে যে, স্বয়ং শ্রোতা বা দর্শক হিসাবে উপস্থিত ব্যক্তি শব্দশোষক হতে পারেন। গদিযুক্ত চেয়ারও মনুষ্যদেহের মতোই শব্দশোষক উপাদান হিসাবে কাজ করে। তাই ফাঁকা হলঘরে খালি আসনগুলি কিছুটা শব্দ শোষণ করে। অবশ্য এতেও দর্শকে পরিপূর্ণ অবস্থার সঙ্গে কিছুটা পার্থক্য থেকে যায়। প্রেক্ষাগৃহের শব্দ পরিকল্পনা এমনভাবে করা হয় যেন প্রত্যাশিত সংখ্যক দর্শক উপস্থিত থাকলে অনুরণন কাল আদর্শ অনুরণন কালের সমান হয়।

এবার শোষণ গুণাঙ্কের পরিমাপ সম্বন্ধীয় একটি অনুশীলনীর উত্তর দিন।

অনুশীলনী - 2 ঃ একটি ঘরের আয়তন $1500m^3$ এবং সব তলের মোট ক্ষেত্রফল $1200m^2$। 0.5W ক্ষমতার শব্দ উৎস ব্যবহার করে দেখা গেল উৎসটিকে থামানোর $2s$ পরে ঘরের শব্দ শ্রাব্যসীমায় পৌঁছয়। $100w$ ক্ষমতার উৎস ব্যবহার করলে ঐ সময়টি $3s$ হয়। ঘরের মোট শোষণ কত? ঘরের সব তলের গড় শোষণ গুণাঙ্ক কত?

11.8 সারাংশ

একটি কক্ষে উৎপাদিত শব্দ দেওয়াল প্রভৃতি থেকে কিছুটা প্রতিফলিত হয়, আবার দেওয়াল, আসবাব ইত্যাদি দ্বারা কিছুটা শোষিত হয়। এই প্রতিফলন ও শোষণের মাত্রা কক্ষের মধ্যকার বস্তু সমষ্টির উপাদান ও ঘরের মাপের উপর নির্ভর করে। এ বিষয়ে শব্দবিজ্ঞানের নিয়ম ও সূত্রগুলির দ্বারা নির্ধারিত হয় কক্ষের মধ্যে কতটা অনুরণন হবে এবং ঘরের সর্বত্র শব্দ জোরালো ও স্পষ্ট শোনা যাবে কিনা। বসবাসের সাধারণ আকারের ঘরের তুলনায় বৃহৎ আকারের প্রেক্ষাগৃহের ক্ষেত্রেই এগুলি গুরুত্বপূর্ণ হয়ে দাঁড়ায়। সে কারণে নাটক, বক্তৃতা, সিনেমা প্রভৃতির জন্য প্রেক্ষাগৃহের নির্মাণকার্যে ওই নিয়মগুলি অনুসরণ করা হয়। শব্দবিজ্ঞানের সেই নিয়মগুলি ও সেগুলির পরিপ্রেক্ষিতে প্রেক্ষাগৃহ গঠনের সূত্রসমূহ — এই সব মিলেই প্রেক্ষাগৃহের শব্দ ব্যবস্থার আলোচনা।

অনুরণন, অর্থাৎ বারেবারে প্রতিফলনের ফলে শব্দের দীর্ঘস্থায়ী গুঞ্জরণ উচ্চারিত শব্দের স্পষ্টতাকে সবচেয়ে বেশি প্রভাবিত করে। কোনও কক্ষে একটি উৎস থেকে ক্রমাগত শব্দ উৎপাদিত হলে প্রতিফলন এবং শোষণের মধ্য দিয়ে শব্দের তীব্রতা বাড়তে বাড়তে একটা মানে গিয়ে স্থির হয়ে যায়। সেই অবস্থায় যদি উৎসটি বন্ধ করে দেওয়া যায়, শব্দের তীব্রতা তৎক্ষণাৎ শূন্য হয়ে যায় না। ধীরে ধীরে কমতে কমতে ন্যূনতম শ্রাব্যসীমার নিচে চলে যায়। এই সময়কালকে বলা হয় **অনুরণন কাল**। অনুরণন কালের সংজ্ঞা ছাড়াও একটি কক্ষের অনুরণন কাল কত হবে সেটি কীভাবে হিসাব করা যায় এবং পরীক্ষা দ্বারা কীভাবে অনুরণন কাল নির্ণয়ের দ্বারা কক্ষের শোষণের পরিমাণ নির্ণয় করা যায়, সেগুলি আপনি জানতে পেরেছেন। আদর্শ অনুরণন কাল বলতে কী বোঝায় এবং একটি কক্ষে কীভাবে অনুরণন কাল কমানো বাড়ানো যায়, তাও এই এককে আলোচিত হয়েছে। সবশেষে প্রেক্ষাগৃহের শব্দব্যবস্থার কয়েকটি দিকের উপর আলোকপাত করা হয়েছে, যেগুলি হয়ত আপনার কাছে কৌতুহলোদ্দীপক বলে মনে হবে।

11.9 সর্বশেষ প্রশ্নাবলী

1. একটি ঘরের দৈর্ঘ্য 10m, প্রস্থ 6m ও উচ্চতা 5m । ছাদ ও কার্পেটে ঢাকা মেঝের শব্দশোষণ গুণাঙ্ক যথাক্রমে 0·05 ও 0·2। দেওয়ালগুলির 10 শতাংশ খোলা দরজা-জানালা এবং বাকি অংশের শব্দশোষণ গুণাঙ্ক 0·02। ঐ ঘরের অনুরণন কাল কত হবে?

2. একটি বদ্ধ ঘরের মাপ দৈর্ঘ্য 8m × প্রস্থ 8m × উচ্চতা 4m। এটির দেওয়াল ও ছাদে শব্দশোষক প্যানেল লাগানো আছে যার শোষণ গুণাঙ্ক 0·5 । মেঝের অর্ধেক অংশে মোটা কার্পেটে ঢাকা, যার শোষণ গুণাঙ্ক 0·4 । মেঝের বাকি অংশে 40টি গদিমোড়া আসন আছে, যেগুলির প্রতিটির তল $1{\cdot}25m^2$ এবং শোষণ গুণাঙ্ক 0·6। সেবিন ও আইরিং-এর সূত্রের সাহায্যে কক্ষটির অনুরণন কাল নির্ণয় করুন।

3. একটি কক্ষে একটি শব্দের উৎস নির্দিষ্ট ক্ষমতায় শব্দ উৎপাদন করতে শুরু করল। কক্ষে তীব্রতা কীভাবে বৃদ্ধি পাবে তার গাণিতিক সূত্র নির্ণয় করুন। ঐ তীব্রতা কত সময়ে সর্বাধিক তীব্রতার অর্ধেক মানে পৌঁছাবে?

4. একটি প্রেক্ষাগৃহে শব্দের তীব্রতা স্থায়ী মানে পৌঁছবার পর শব্দের উৎসগুলি একসঙ্গে বন্ধ করে দেওয়া হল। এখন শব্দের তীব্রতা হ্রাসের গাণিতিক সূত্রটির প্রতিপাদন করুন। এই সূত্রের সাহায্যে অনুরণন কালের সেবিনের রাশিমালাটি নির্ণয় করুন।

5. 'প্রাণবন্ত' কক্ষ ও 'নিষ্প্রাণ' কক্ষ কাকে বলে? নিষ্প্রাণ কক্ষের অনুরণন কাল নির্ণয়ের জন্য উপযুক্ত একটি রাশিমালা প্রতিষ্ঠা করুন।

6. 'শব্দশোষণ গুণাঙ্ক' কাকে বলে? একটি কক্ষের তলগুলির গড় শব্দশোষণ গুণাঙ্ক কীভাবে নির্ণয় করা যায়?

7. প্রেক্ষাগৃহের শব্দ পরিকল্পনায় উপযুক্ত অনুরণন ছাড়াও আর কোন্ কোন্ বিষয়ে নজর রাখা প্রয়োজন? এগুলির সম্বন্ধে কোন্ কোন্ পদক্ষেপ নেওয়া জরুরী বলে আপনি মনে করেন?

11.10 উত্তরমালা

অনুশীলনী - 1

(i) (a) অনুরণন (b) সমান (c) কমবে (d) উভয়ই (e) সমানুপাতী

(ii) সেবিনের সূত্র অনুয়ায়ী $T_R =$ $= 5{\cdot}4s$

অনুরণন কাল অর্ধেক হতে হলে শোষণ দ্বিগুণ হবে। যদি নির্ণেয় দর্শকের সংখ্যা n হয় তবে

$300 + (n \times 0{\cdot}4) = 300 \times 2$

অর্থাৎ $n = \frac{300}{0{\cdot}4} = 750$

অনুশীলনী - 2

11.19 সমীকরণ থেকে গড়শোষণ গুণাঙ্ক

এখানে $V = 1500\text{m}^3$, $P_1 = 100\text{w}$, $P_2 = 0{\cdot}5\text{w}$, $S = 1200\text{m}^2$

$T_1 = 3s$, $T_2 = 2s$। ধরা যাক $c = 340\text{ms}^{-1}$

$\therefore$ $= {\cdot}0147 \text{ In } 200$

$= {\cdot}0147 \times 2{\cdot}303 \times 2{\cdot}3010 = 0{\cdot}078$।

সর্বশেষ প্রশ্নাবলী

1. ঘরের আয়তন $V = 10 \times 6 \times 5 = 300m^3$

   ছাদের ক্ষেত্রফল $10 \times 6 = 60m^2$ $\therefore$ শোষণ $60 \times 0{\cdot}05 = 3m^2$

   মেঝের ক্ষেত্রফল $10 \times 6 = 60m^2$ শোষণ $60 \times 0{\cdot}2 = 12m^2$

   দেওয়ালের ক্ষেত্রফল $(10 + 10 + 6 + 6) \times 5 = 160m^2$

   দরজা - জানালার ক্ষেত্রফল $= 160 \times$ $= 16m^2$ শোষণ $= 16 \times 1 = 16m^2$

   বাকি দেওয়ালের ক্ষেত্রফল $160 - 16 = 144m^2$ শোষণ $144 \times {\cdot}02 = 2{\cdot}88m^2$

   মোট শোষণ $a = 3 + 12 + 16 + 2{\cdot}88m^2$

   অনুরণন কাল $T_R =$ $= 1{\cdot}42s$।

2. ঘরের আয়তন $V = 8 \times 8 \times 4 = 256m^3$

   দেওয়াল, মেঝের ও ছাদের মোট ক্ষেত্রফল s

   $= 2(8 \times 8 + 8 \times 4 + 8 \times 4) = 256m^2$

   ছাদের শোষণ $= 8 \times 8 \times 0{\cdot}5 = 32m^2$

   মেঝের শোষণ $= (8 \times 8) \times 0{\cdot}4 = 12{\cdot}8m^2$

আসনগুলির শোষণ $= 40 \times 1{\cdot}25 \times 0{\cdot}6 = 30m^2$

মোট শোষণ $a = 74{\cdot}8m^2$

গড় শোষণ গুণাঙ্ক $= 0{\cdot}292$

সেবিনের সূত্র অনুযায়ী $T_R = \frac{0{\cdot}161V}{a} = \frac{0{\cdot}161\times 256}{74{\cdot}8} = 0{\cdot}55s$

আইরিং-এর সূত্র অনুযায়ী $T_R = \frac{0{\cdot}161V}{-5\text{In}\left(1-\bar{\alpha}\right)} = \frac{0{\cdot}161\times 256}{-256lm\left(1-{\cdot}292\right)} = 0{\cdot}47s$

3. প্রথম অংশের উত্তর 11.3 অনুচ্ছেদে আলোচিত হয়েছে।

11.3 অনুচ্ছেদের 11.8 সমীকরণ অনুযায়ী $I = I_m\left(1-e^{-\frac{act}{4V}}\right)$

যখন $I = I_m/2$, তখন $\text{I} - e^{-act/4v} =$, অর্থাৎ

$t =$ $\text{In2} = 0{\cdot}00815$ যেখানে

$c = 340ms^{-1}$ ধরা হয়েছে।

4. প্রশ্নটির উত্তর 11.4 অনুচ্ছেদে আলোচনা করা হয়েছে।
5. প্রশ্নের প্রথম অংশের উত্তর 11.2 অনুচ্ছেদে এবং দ্বিতীয় অংশের উত্তর 11.5 অনুচ্ছেদে পাওয়া যাবে।
6. প্রশ্নের প্রথম অংশের উত্তর 11.2 অনুচ্ছেদে এবং পরের অংশের উত্তর 11.6 অনুচ্ছেদে পাওয়া যাবে।
7. 11.7 অনুচ্ছেদে প্রশ্নটির উত্তর পাওযা যাবে। আপনি নিজস্ব অভিজ্ঞতা থেকেও কিছু লিখতে পারেন।

একক 12 : অতিশব্দ (Ultrasonics)

গঠন

12.1 প্রস্তাবনা
উদ্দেশ্য
12.2 অতিশব্দের উৎপাদন
12.2.1 চৌম্বকততি নির্ভর উৎপাদক (Magnetostrictive generator)
12.2.2 চাপ—বৈদ্যুতিক উৎপাদক (Piezoelectric generator)
12.3 বিভিন্ন মাধ্যমে অতিশব্দের গতিবেগ নির্ণয়
12.3.1 আলোক ব্যবর্তন (Optical diffraction) পদ্ধতি
12.3.2 শাব্দিক ব্যতিচার (Acoustic interference) পদ্ধতি
12.4 অতিশব্দের প্রয়োগ ও ব্যবহার
12.5 সারাংশ
12.6 সর্বশেষ প্রশ্নাবলী
12.7 উত্তরমালা

12.1 প্রস্তাবনা

আপনি নিশ্চয়ই পড়েছেন যে, আমরা যে শব্দ শুনতে পাই তার কম্পাঙ্কের ঊর্ধ্বসীমা প্রায় 20kHz। অনেকের ক্ষেত্রে এই সীমা আরও নিচেও হতে পারে। এর ফলে আমাদের পারিপার্শ্বিকের অনেক শব্দই হয়ত আমাদের কাছে অশ্রুত থেকে যায়। যে সব শব্দের কম্পাঙ্ক 20kHz এর বেশি, সেগুলিকে আমরা অতিশব্দ (Ultrasound) বলি। এ জাতীয় তরঙ্গের কম্পাঙ্ক শ্রাব্য কম্পাঙ্কের ঊর্ধ্বসীমা থেকে আরম্ভ করে কয়েক মোগাহার্ৎস, এমন কি গিগাহার্ৎসও (10^9Hz) হতে পারে। মানুষ বা অন্য স্তন্যপায়ী প্রাণীরা অতিশব্দ শুনতে না পেলেও নিশাচর বাদুড় কম বেশি 100kHz কম্পাঙ্কের অতিশব্দ উৎপন্ন করে এবং প্রতিধ্বনি শুনে বাধা এড়িয়ে উড়ে বেড়ায় ও শিকারের সন্ধান করে।

পরীক্ষাগারে অতিশব্দ উৎপাদনের জন্য নানা ধরনের যন্ত্রপাতি উদ্ভাবিত হয়েছে। শব্দবিজ্ঞান চর্চার প্রথম দিকে যান্ত্রিক হুইস্‌লের সাহায্যে বা কার্বন আর্কে তড়িৎ মোক্ষণ ঘটিয়ে নিয়ন্ত্রিত কম্পাঙ্কের অতিশব্দ উৎপাদন করা হয়েছে। কিন্তু এই পদ্ধতিগুলির ঐতিহাসিক গুরুত্ব থাকলেও বর্তমানে অতিশব্দ উৎপাদনের জন্য প্রধাতন যে ভৌত ঘটনাগুলি ব্যবহার করা হয় সেগুলি হল, চৌম্বক ততি (magnetostriction) ও চাপ-বিদ্যুৎ (piezoelectricity)। এখানে আপনি অতিশব্দ উৎপাদনের এ জাতীয় আধুনিক পদ্ধতির সঙ্গে পরিচিত হবেন।

বিভিন্ন মাধ্যমে অতিশব্দের তরঙ্গদৈর্ঘ্য ও বেগ পরিমাপ করার জন্য কয়েকটি নির্ভরযোগ্য পদ্ধতি চালু আছে। এখানে আমরা এ ধরনের কয়েকটি পদ্ধতির আলোচনা করব। কম্পাঙ্ক অধিক হওয়ায় অতিশব্দের তরঙ্গদৈর্ঘ্য

স্বাভাবিকভাবেই কম এবং এজন্য অতিশব্দ তরঙ্গের রশ্মি নির্দিষ্ট দিকে চালনা করা যায়। এই রশ্মির প্রতিফলন লক্ষ্য করে যেমন প্রতিফলক বাধার অবস্থান ও চরিত্র নির্ধারণ করা যায়, তেমনই অতিশব্দের রশ্মির মাধ্যমে অনেকটা ক্ষমতা নির্দিষ্ট লক্ষ্যবস্তু অভিমুখে পাঠানো যায়। অতিশব্দের এই ধর্মগুলি এই শব্দ তরঙ্গের বিভিন্ন ব্যবহারিক প্রয়োগে কাজে লাগানো হয়। এই এককে আমরা অতিশব্দের কয়েকটি ব্যবহারিক প্রয়োগ নিয়েও আলোচনা করব।

উদ্দেশ্য :

এই এককটি পড়লে আপনি—

- অতিশব্দ কাকে বলে তা ব্যাখ্যা করতে পারবেন।
- অতিশব্দ কীভাবে উৎপাদন করা যায়, তার বিভিন্ন পদ্ধতি বর্ণনা করতে পারবেন।
- বিভিন্ন মাধ্যমে অতিশব্দের বেগ নির্ণয় কীভাবে করা হয়, তা বর্ণনা করতে পারবেন।
- অতিশব্দ কতরকম কাজে লাগে, বিশেষ করে আলট্রাসোনোগ্রাফি কী, এসব সাধারণ উৎসাহী মানুষকে বুঝিয়ে দিতে পারবেন।

12.2 অতিশব্দের উৎপাদন

আপনি আগেই জেনেছেন যে, শব্দতরঙ্গ আসলে স্থিতিস্থাপক মাধ্যমে অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গ। শব্দতরঙ্গ তৈরি করতে মাধ্যমের মধ্যে কম্পনশীল একটি উৎসের প্রয়োজন। সাধারণ শব্দের মতো অতিশব্দও উৎসের কম্পনের ফলে উৎপন্ন হয়। তবে এই উৎসের কম্পাঙ্ক যে কম্পাঙ্কের অতিশব্দ উৎপাদন করতে হবে, তার সমান হতে হবে। অনেক সময় উৎপন্ন অতিশব্দকে তরলের মধ্য দিয়ে সঞ্চারিত করতে হয়। আপনি এই পর্যায়ের অষ্টম এককে পড়েছেন যে, তরলের শব্দ রোধ বায়ুমাধ্যমের তুনলায় অনেক বেশি। এই শব্দ রোধের সঙ্গে সামঞ্জস্য রক্ষা করে তরলে অতিশব্দের তরঙ্গ চালিত করতে উৎসটিকে অল্প সরণে প্রচুর বল প্রয়োগে সক্ষম হতে হয়। বর্তমানে অতিশব্দ উৎপাদনে, যে পদ্ধতিগুলি সচরাচর ব্যবহৃত হয়, এখানে আমরা সেগুলি আলোচনা করব।

এই প্রসঙ্গে উল্লেখ করা যেতে পারে যে, সাধারণ শব্দের উৎপাদনে ব্যবহৃত যন্ত্রগুলির মত অতিশব্দের উৎসগুলিও তড়িৎশক্তিকেই শব্দশক্তিতে রূপান্তিরিত করে। এজন্য এগুলিকে ট্রান্সডিউসার (transducer) বা রূপান্তরক বলা হয়।

12.2.1 চৌম্বকততি-নির্ভর উৎপাদক (Magnetostrictive generator)

কোন অয়শ্চৌম্বক (ferromagnetic) পদার্থকে যখন চুম্বকিত করা হয় তখন চুম্বকনের দিক বরাবর সেটির সামান্য দৈর্ঘ্য পরিবর্তন ঘটে। পদার্থটির মধ্যে চুম্বকন-তীব্রতা বাড়ায় সঙ্গে সঙ্গে সেটির অভ্যন্তরীণ গঠনে যে পরিবর্তন ঘটে সেটিই এই দৈর্ঘ্য পরিবর্তনের কারণ। অয়শ্চৌম্বক পদার্থটির চুম্বকন যখন চুম্বকনের সংপৃক্তির

(saturation) বেশ কিছুটা নিচে থাকে, তখন সেটির ততির পরিমাণ আরোপিত চৌম্বক আবেশের বর্গের সমানুপাতী হয়। অর্থাৎ, চুম্বকনের দিক বরাবর প্রাথমিক দৈর্ঘ্য , দৈর্ঘ্যের পরিবর্তন এবং চৌম্বক আবেশ

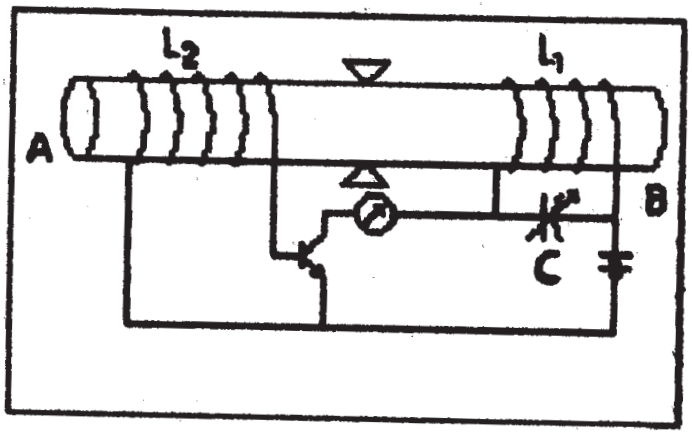
B হলে লেখা যায়, চৌম্বক ততি, $=KB^2$

...12.1

যেখানে K একটি ধ্রুবক, যার মান পজিটিভ বা নেগেটিভ হতে পারে। নিকেল এবং ইনভার, পারমেনডুর প্রভৃতি কয়েকটি সংকরের (alloy) ক্ষেত্রে চৌম্বক ততির মান বেশি হতে দেখা যায়। নিকেলের ক্ষেত্রে B-এর মান $0{\cdot}5\text{Wbm}^{-2}$ (ওয়েবার/বর্গমিটার) এর চেয়ে কম হলে K ধ্রুবকটির মান হয় $-1{\cdot}0 \times 10^{-4}\text{m}^4\text{Wb}^{-2}$। বিয়োগ চিহ্নটির অর্থ এই যে, চৌম্বক আবেশের প্রভাবে নিকেলের দৈর্ঘ্য সঙ্কোচন ঘটে।

আয়শ্চৌম্বক বস্তুতে নির্মিত কোনও দণ্ডের উপর একটি তারের কুণ্ডলী জড়িয়ে ঐ কুণ্ডলীতে যদি পরিবর্তী তড়িৎপ্রবাহ পাঠানো যায়, তবে তড়িৎপ্রবাহের প্রতি পর্যায়ে চৌম্বক ততি দুবার সর্বোচ্চ মান লাভ করবে। কেননা চৌম্বক আবেশের বিস্তার যদি B_m হয় তবে B এর মান $+B_m$ ও $-B_m$, উভয় ক্ষেত্রেই চৌম্বক ততি KB_m^2 হবে। এতে দণ্ডটির যান্ত্রিক কম্পনের কম্পাঙ্ক প্রবাহের কম্পাঙ্কের দ্বিগুণ হবে। অবশ্য দণ্ডের উপর জড়ানো দ্বিতীয় একটি কুণ্ডলীর মধ্যে দিষ্ট তড়িৎপ্রবাহ পাঠিয়ে যদি একটি স্থির চৌম্বক আবেশ B_0 তৈরি করা যায় যার মান B_m এর চেয়ে বড়, তবে মোট চৌম্বক আবেশ পরিবর্তী প্রবাহের এক পর্যায়ে $B_0 - B_m$ থেকে $B_0 + B_m$ এর মধ্যে একবার কম্পিত হবে এবং দণ্ডের যান্ত্রিক কম্পনের কম্পাঙ্ক তড়িৎপ্রবাহের কম্পাঙ্কের সমান হবে। স্থির চৌম্বক আবেশটি অবশ্য কয়েকটি স্থায়ী চুম্বকের সাহায্যেও তৈরি করা যায়। উষ্ণতা বৃদ্ধির সঙ্গে চৌম্বক ততি কমতে থাকে এবং শেষ পর্যন্ত কুরী উষ্ণতায় এসে চৌম্বক ততির মান শূন্য হয়ে যায়।

এবার দেখা যাক চৌম্বক ততিকে কিভাবে অতিশব্দ উৎপাদনের কাজে লাগানো যায়। এই কাজের উপযুক্ত একটি ট্রানজিস্টার বর্তনী 12.1 চিত্রে দেখানো হয়েছে।



চিত্র 12.1 চৌম্বক নিয়ন্ত্রিত অতিশব্দ উৎপাদক বর্তনী।

AB একটি নিকেল রড, ঠিক মাঝখানে দৃঢ়ভাবে ক্ল্যাম্প দিয়ে আটকে রাখা হয় যাতে দুটি প্রান্ত মুক্ত থাকে। রডের উপর ক্ল্যাম্পের দুই দিকে দুটি কুণ্ডলী L_1 এবং L_2 জড়ানো থাকে। L_1 এবং তার সমান্তরাল ও একটি পরিবর্তনযোগ্য ধারক C, উভয়ে একটি অনুনাদ বর্তনী তৈরী করে একটি ট্রানজিস্টার স্পন্দক বর্তনীতে (oscillator circuit) কালেক্টরের সঙ্গে যুক্ত থাকে। L_2 কুণ্ডলী ট্রানটিস্টারের বেস এবং এমিটারের মধ্যে যুক্ত থাকে।

প্রথমে নিকেল রডটিকে চুম্বক অথবা নির্দিষ্ট মাত্রার দিষ্ট তড়িৎপ্রবাহের সাহায্যে চুম্বকিত করে রাখা হয়। ধারক C-কে পরিবর্তন করে এমন অবস্থায় আনা হয়, যাতে রডের অনুদৈর্ঘ্য কম্পনের স্বাভাবিক কম্পাঙ্ক আর স্পন্দক বর্তনীর কম্পাঙ্ক সমান হয়। তা হলেই অনুনাদ হবে। উভয় কুণ্ডলীর মধ্যে যুগ্মনের ফলে বর্তনীর স্পন্দন বজায় থাকে। কালেক্টরে প্রবাহের ফলে তার সঙ্গে জড়িত কুণ্ডলী L_1 - এর চৌম্বক ক্ষেত্রের তীব্রতার পরিবর্তন এবং রডের দৈর্ঘ্য পরিবর্তন হয়। তখন অপর কুণ্ডলী L_2 এর ফ্লাক্স পরিবর্তন হয়, যার ফলে তার মধ্যে একটি আবিষ্ট বিভব (induced e.m.f.) সৃষ্ট হয়। যেহেতু এই কুণ্ডলী ট্রানজিস্টারের বেসের সঙ্গে যুক্ত, এই বিভব আবার বিবর্ধিত হয়, এতে কালেক্টর প্রবাহ পরিবর্তিত হয়, তা আবার L_1 এবং L_2 এর চৌম্বক ক্ষেত্রকে প্রভাবিত করে। এইভাবে স্পন্দন চলতেই থাকে। এই স্পন্দনের কম্পাঙ্ক রডের দৈর্ঘ্যের হ্রাস বৃদ্ধির কম্পাঙ্কের সমান হওয়ায় অনুনাদ অবস্থার সৃষ্টি হয় এবং অনুনাদী কম্পাঙ্কের শব্দ রডের প্রান্ত থেকে উৎপাদিত হয়।

বর্তনীতে ট্রানজিস্টার ব্যবহারের সুবিধা এই যে, কম শক্তির বিভব উৎস ব্যবহার করে শব্দ উৎপাদন করা যায়। স্পন্দক বর্তনীর কম্পাঙ্ক

f = ...12.2

এবং অনুনাদী অবস্থায় এই কম্পাঙ্ক রডের স্বাভাবিক কম্পনের কম্পাঙ্কের সমান। দেখানো চায়, চৌম্বক ততির ফলে রডের উপাদানের ইয়ং গুণাঙ্কের কার্যকরী মান দাঁড়ায় $Y' = Y - 4\,\mu_i\mu_0\, Y^2K^2B_0^2$, যেখানে B_0=

রডের প্রাথমিক চৌম্বক আবেশ $_i$ $_o$ = রডের প্রাথমিক চৌম্বক আবেশের অবস্থায় এর মান,

Y = ইয়ং গুণাঙ্কের স্বাভাবিক মান। মূলসুরে কম্পিত হলে রডের কম্পাঙ্ক

$$f = \frac{1}{2l}\sqrt{\frac{Y'}{\rho}} \qquad ...12.3$$

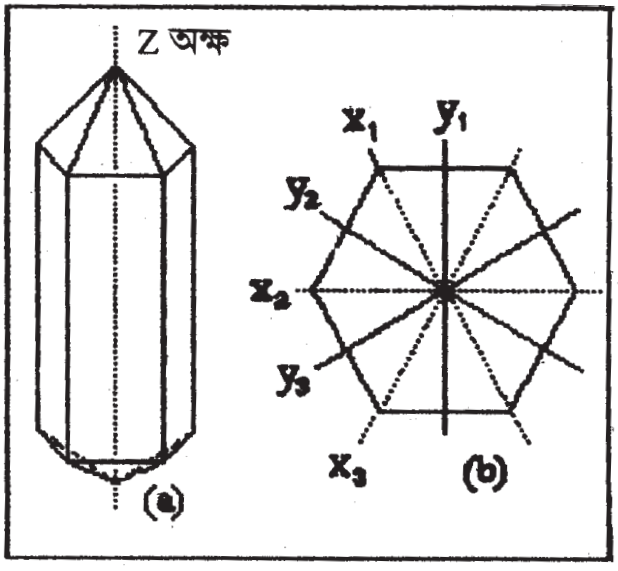
যেখানে রডের দৈর্ঘ্য l, রডের উপাদানের ঘনত্ব এবং ইয়ং গুনাঙ্ক (Young's modulus) Y'। রডের দৈর্ঘ্য এবং ধারকের ধারকত্ব পরিবর্তন করে বিভিন্ন কম্পাঙ্কের, প্রায় 5 থেকে 60KHz অবধি শব্দ উৎপাদন করা যায়।

12.2.2 চাপ-বৈদ্যুতিক উৎপাদক (Piezoelectric generator)

এই ধরনের যন্ত্রই সবচেয়ে আধুনিক অতিশব্দ উৎপাদক। এর ক্রিয়াপদ্ধতি বুঝতে হলে আগে জানতে হবে চাপ-বিদ্যুৎ ক্রিয়া (Piezoelectric effect) কাকে বলে।

কোয়ার্টজ, টুরম্যালিন প্রভৃতি কয়েক ধরনের কেলাসের বৈশিষ্ট্য এই যে, কেলাসের উপরে নির্দিষ্ট দিকে পীড়ন প্রয়োগ করলে নির্দিষ্ট পার্শ্বে আধান সৃষ্ট হয় এবং তার ফলে কেলাসের দুই বিপরীত তলের মধ্যে বিভব প্রভেদ উৎপন্ন হয়। বিভব প্রভেদের পরিমাণ পীড়নের সমানুপাতী হয় এবং তার দিশাও পীড়নের দিশার উপরে নির্ভর করে। এই বিপরীত ঘটনাও লক্ষ্য করা যায়। কেলাসের উপর তড়িৎ ক্ষেত্র প্রয়োগ করলে নির্দিষ্ট দিকে সংকোচন - প্রসারণ হয়। এই পরিবর্তন প্রযুক্ত তড়িৎ ক্ষেত্রের সমানুপাতী হয়। পীড়নের ফলে বিভব প্রভেদ সৃষ্টি এবং বিভব প্রভেদের ফলে পীড়ন উৎপাদনের এই ঘটনাকে চাপ-বৈদ্যুতিক প্রভাব বলে। এখানে 'নির্দিষ্ট দিক' বলতে কী বোঝানো হয়েছে, তা জানা দরকার। কোয়ার্টজ কেলাসের ব্যবহার সবচেয়ে বেশি হয় বলে কোয়ার্টজের উদাহরণ দিয়েই আলোচনা করা যাক।

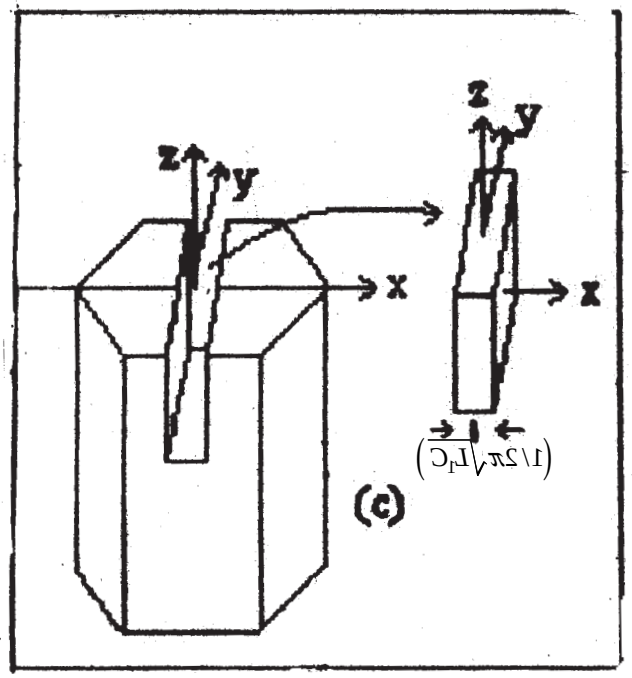
এক জাতীয় কেলাসের মধ্য দিয়ে আলোক রশ্মি প্রেরিত হলে সাধারণত তা দু'ভাগে ভাগ হয়ে যায়। কিন্তু এক বা একাধিক বিশেষ দিশায় রশ্মি প্রেরিত হলে তা বিভক্ত হয় না। সেই দিশাকে আলোকীয় অক্ষ



চিত্র 12.2 কোয়ার্টজ কেলাসের x, y এবং z অক্ষসমূহ।

(optic axis) বা z-অক্ষ বলা হয়। কোয়ার্টজের ষড়ভুজাকৃতি কেলাসের দুই শীর্ষ সংযোগকারী রেখা বরাবর z-অক্ষ হয়, যেমন চিত্র 12.2(a)-এ দেখানো হয়েছে। এই অক্ষের লম্বরেখা বরাবর কেলাসটিকে কাটলে

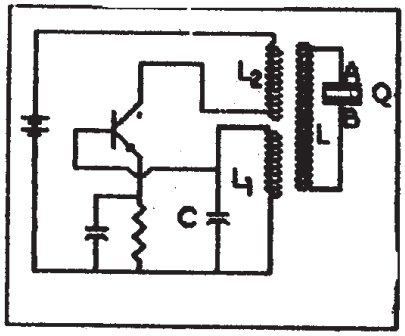
প্রস্থচ্ছেদটি চিত্র 12.2(b)-এর মতো ষড়ভুজাকৃতি হবে। এর দুটি বিপরীত কৌণিক বিন্দুর সংযোগকারী রেকাকে x অক্ষ বলা হয়। চিত্রে x_1, x_2 এবং x_3 তিনটি অক্ষ দেখানো হয়েছে। আর বিপরীত দুটি পার্শ্বের মধ্যবিন্দুর সংযোগকারী রেখাকে y অক্ষ বলা হয়। চিত্রে y_1, y_2 এবং y_3 অক্ষ তিনটিও দেখানো হয়েছে। x অক্ষকে তড়িৎ অক্ষ (electrical axis) এবং y অক্ষকে যান্ত্রিক অক্ষ (mechanical axis) বলা হয়। কোনো x অক্ষের লম্বতলে কাটা কেলাসকে x ছেদ (x – *cut*) কেলাস বলে (চিত্র 12.2c)।



চিত্র 12.2 (c) কোয়ার্টজ কেলাসের x ছেদ।

একটি x ছেদ কেলাসের যান্ত্রিক অক্ষ অভিমুখে পীড়ন প্রয়োগ করলে তড়িৎ অক্ষ অভিমুখে বিভব উৎপন্ন হয়। এর বিপরীতটিও হয়ে থাকে। কেলাসের জ্যামিতিক আকারের উপর নির্ভরশীল স্বাভাবিক কম্পাঙ্ক আর প্রযুক্ত প্রত্যাবর্তী বিভবের কম্পাঙ্ক সমান হলে যান্ত্রিক অনুনাদ হয় এবং কম্পনের বিস্তার সর্বাধিক হয়। এরকম একটি কেলাসের তড়িৎ অক্ষের অভিমুখে তড়িৎ ক্ষেত্র প্রয়োগ করলে কোয়ার্টজে সংকোচন-প্রসারণের ফলে কম্পনের সৃষ্টি হবে। কোয়ার্টজ ঘড়িতে যান্ত্রিক গতি উৎপাদন এই পদ্ধতিতেই করা হয়ে থাকে। এখন দেখা যাক, অতিশব্দ উৎপাদনের কাজে কোয়ার্টজের এই চাপ-বৈদ্যুতিক ক্রিয়া কিভাবে ব্যবহৃত হয়।

চিত্র 12.3 দেখুন। একটি কোয়ার্টজ (Q) এমনভাবে কাটা হল, যাতে x অক্ষ এর বিপরীত পার্শ্বদুটির লম্ব অভিমুখী হয়। কেলাসটিকে দুটি ধাতব পাত A ও B এর মধ্যে রাখা হল। পাত দুটির সঙ্গে একটি কুণ্ডলী (L) যুক্ত আছে। স্পন্দক বর্তনীর এমিটার অংশে কুণ্ডলী L_1 এবং পরিবর্তনশীল ধারক C মিলে একটি অনুনাদী বর্তনী নির্মাণ করেছে, যা স্পন্দন বজায় রাখতে সাহায্য করবে। অপর কুণ্ডলী L_2 কালেক্টর বর্তনীতে যুক্ত আছে। ধারককে এমন মানে স্থির রাখা হয়, যাতে L_1 ও C দ্বারা নির্ধারিত কম্পাঙ্ক কেলাসের



চিত্র 12.3 চাপ-বৈদ্যুতিক অতিশব্দ উৎপাদক।

স্বাভাবিক কম্পাঙ্কের সমান হয়। স্পন্দক বর্তনীর প্রভাব L_1 ও L_2 কুণ্ডলীর সঙ্গে পারস্পরিক আবেশের ফলে L কুণ্ডলীতে সঞ্চারিত হয় এবং কোয়ার্টজ কেলাসে প্রত্যাবর্তী তড়িৎ ক্ষেত্র আরোপিত হয়। তখন চাপ-বৈদ্যুতিক ক্রিয়ার ফলে কেলাসে কম্পন হয় এবং তা থেকে একই কম্পাঙ্কের শব্দ নির্গত হতে থাকে। কোয়ার্টজ কেলাসটি যখন মূলসুরে কম্পিত হয় তখন তার অক্ষের সঙ্গে লম্বতল দুটি সুস্পন্দ এবং মধ্যতলটি নিস্পন্দ থাকে। কেলাসের বেঁধ যদি l হয় এবং x অক্ষ বরাবর শব্দের বেগ যদি v হয় তবে ঐ কেলাসে উৎপন্ন স্থাণুতরঙ্গের তরঙ্গদৈর্ঘ্য হবে ত $\lambda = 2l$, অর্থাৎ, মূলসুরের কম্পাঙ্ক হবে

$n_1 =$

কেলাসটি অবশ্য তৃতীয়, পঞ্চম প্রভৃতি অযুগ্ম উপসুরেও কম্পিত হতে পারবে। এই কম্পনগুলির ক্ষেত্রেও কেলাসের বাইরের দুটি তল সুস্পন্দ এবং মধ্যতলটি নিস্পন্দ থাকবে। এগুলির কম্পাঙ্ক মূলসুরের কম্পাঙ্কের তিনগুণ, পাঁচগুণ প্রভৃতি হবে অর্থাৎ, এগুলির রাশিমালা হবে যথাক্রমে $n_3 = 3n_1 =$, $n_5 = 5n_1 =$ ইত্যাদি। তবে কেলাসটি দ্বিতীয়, চতুর্থ প্রভৃতি যুগ্ম উপসুরে কম্পিত হতে পারবে না, কেন না এগুলির ক্ষেত্রে কেলাসের মধ্যতলে সুস্পন্দ বিন্দু থাকবে এবং কেলাসটির ভরকেন্দ্র কম্পিত হতে থাকবে। যেহেতু কেলাসের উপর কোনও লব্ধি বল ক্রিয়া করে না, অতএব এ ধরনের কম্পন ঘটা সম্ভব নয়।

কেলাসের কম্পাঙ্কের একটি আন্দাজ আমরা সহজেই পেতে পারি। x ছেদ কোয়ার্টজে শব্দের বেগ $5720 ms^{-1}$। ধরুন, কেলাসের বেধ 1mm। সেক্ষেত্রে মূলসুরের কম্পাঙ্ক $n_1 =$ বা, $2{\cdot}86 \times 10^6$Hz। $(2n+1)$-তম উপসুরের কম্পাঙ্ক (n = পূর্ণসংখ্যা) এর $2n + 1$ গুণ হবে। অর্থাৎ, তৃতীয় উপসুরের কম্পাঙ্ক হবে $n_3 = 3 \times 2{\cdot}86 \times 10^6$ Hz বা, 8·6 MHz, পঞ্চম উপসুরের কম্পাঙ্ক হবে $n_5 = 5 \times 2{\cdot}86 \times 10^6$Hz বা 14·3MHz ইত্যাদি। কেলাসের বেধ আরও বেশি হলে স্বল্পতর কম্পাঙ্কের এবং বেধ আরও কম হলে

উচ্চতম কম্পাঙ্কের মূলসুর পাওয়া যাবে। তবে কেলাসটির বেধ কমিয়ে 50MHz অপেক্ষা অধিক কম্পাঙ্ক পাওয়া যায় না কেননা কেলাসটি তখন অত্যন্ত দুর্বল ও ভঙ্গুর হয়ে পড়ে।

অতিশব্দের উৎপাদন পদ্ধতি সম্বন্ধে পড়লেন। এবার একটি অনুশীলনীর উত্তর দিন।

অনুশীলনী - 1 :

(a) কোন কম্পাঙ্কের শব্দকে অতিশব্দ বলা হয়?

(b) একটি অয়শ্চৌম্বক পদার্থে নির্মিত দণ্ডের উপর 50KHz কম্পাঙ্কের ও $0{\cdot}2 Wbm^{-2}$ বিস্তারের পরবর্তী চৌম্বক আবেশ প্রয়োগ করা হল। দণ্ডটি যদি প্রাথমিক অবস্থায় বিচুম্বকিত থাকে তবে সেটির কম্পনের কম্পাঙ্ক কত হবে? যদি প্রাথমিক অবস্থায় দণ্ডটির চৌম্বক আবেশ $0{\cdot}5 Wbm^{-2}$ হয় তখনই বা কম্পাঙ্ক কত হবে?

(c) 1 MHz কম্পাঙ্কের শব্দ উৎপাদনের জন্য আপনি কোন বেধের কোয়ার্টজ কেলাস ব্যবহার করবেন?

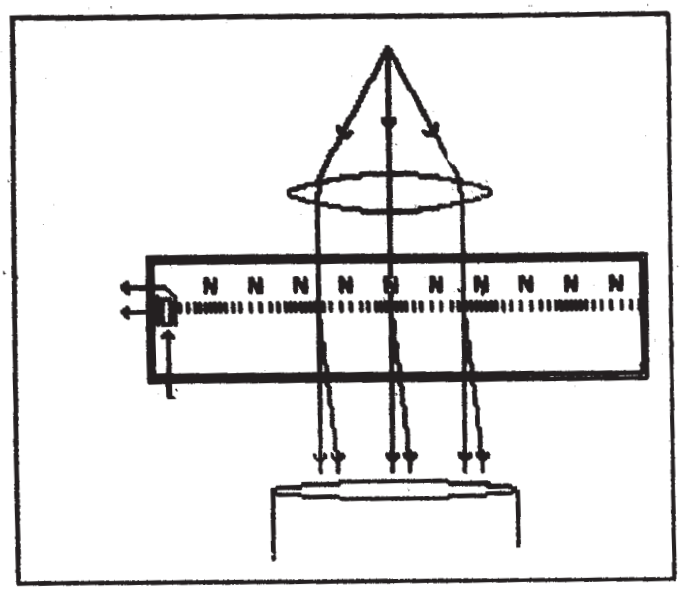
12.3 বিভিন্ন মাধ্যমে অতিশব্দের গতিবেগে নির্ণয় :

আপনি নিশ্চয়ই বুঝতে পেরেছেন, অতিশব্দ ও সাধারণ শব্দের মধ্যে কোনও মৌলিক পার্থক্য না থাকলেও উচ্চ কম্পাঙ্কই অতিশব্দের বৈশিষ্ট্য। কোনও মাধ্যমে অতিশব্দের গতিবেগ সাধারণ শব্দতরঙ্গের গতিবেগের সমান। কম্পাঙ্ক অধিক হওয়ার ফলে অতিশব্দের তরঙ্গদৈর্ঘ্য অনেক কম। উদাহরণ হিসাবে বলা যায়, $1MHz$ কম্পাঙ্গের অতিশব্দের তরঙ্গদৈর্ঘ্য বায়ুতে 0·34mm, জলে প্রায় 1·5 mm($30°c$) এবং স্টিলে প্রায় 6 mm। তরঙ্গদৈর্ঘ্য ছোট হওয়ার ফলে এই শব্দকে অপেক্ষাকৃত ছোট মসৃণ প্রতিফলক দ্বারা প্রতিফলিত করা যায়। আবার আলোক তরঙ্গের মতো এই তরঙ্গের ব্যতিচার (interference) ও ব্যবর্তনও লক্ষ্য করা যায়। এই এককে পরের অনুচ্ছেদে আপনি অতিশব্দের এমন কিছু প্রয়োগের কথা পড়বেন যেখানে অতিশব্দের বেগ জানা প্রয়োজন। এখন আমরা এই বেগ নির্ণয়ের কয়েকটি পদ্ধতি সম্বন্ধে আলোচনা করব।

12.3.1 আলোক ব্যবর্তন (Optical diffraction) পদ্ধতি

তরলের মধ্য দিয়ে অতিশব্দ প্রেরণ করলে তরলের কণাগুলি পর্যায়ক্রমে আন্দোলিত হয়। ফলে তরঙ্গ অভিমুখে মাধ্যমের চাপ ও ঘনত্ব স্থানে স্থানে পর্যায়ক্রমে কম বেশি হয়। ঘনত্বের সঙ্গে মাধ্যমের প্রতিসরাঙ্কও পর্যায়ক্রমে কমে বাড়ে। মাধ্যমের এই কম ও বেশি প্রতিসরাঙ্কের অংশগুলি নির্দিষ্ট দূরত্ব পরে পরে পর্যায়ক্রমে হওয়াতে মাধ্যমটি একটি ব্যবর্তন গ্রেটিং(grating)-এর মতো কাজ করে। বেশিও কম ঘনত্বের অংশগুলি গ্রেটিংয়ের যথাক্রমে অস্বচ্ছ ও স্বচ্ছ অংশের ভূমিকা নেয়। এই অবস্থার মাধ্যমে আলো পড়লে তার ব্যবর্তন হয়। ঘটনাটিকে শব্দালোক প্রভাব (Acousto—optic effect) বলা হয়। ব্যবর্তন বর্ণালী বিশ্লেষণ করে অতিশব্দের গতিবেগ নির্ণয় করা যায়।

আলোক তরঙ্গের ব্যবর্তন প্রত্যক্ষ করার ব্যবস্থাটি আপনি 12.4 চিত্র থেকে বুঝতে পারবেন। এখানে তরল মাধ্যমে স্পন্দক বর্তনীর সঙ্গে যুক্ত কোয়ার্টজ কেলাসটি ডোবানো আছে। কেলাসের কম্পনের ফলে মাধ্যমে অতিশব্দের তরঙ্গ উৎপন্ন হয়। এই তরঙ্গ সাধারণত তরলের পাত্রের দেওয়ালে প্রতিফলিত হয় এবং তরলের মধ্যে স্থাণুতরঙ্গ উৎপন্ন করে। এই তরঙ্গের নিস্পন্দ বিন্দুগুলির (N) ব্যবধান হয় অতিশব্দের তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের অর্ধেক, অর্থাৎ,



। নিস্পন্দ বিন্দুগুলিতে পরপর সর্বোচ্চ ঘনীভবন ও সর্বোচ্চ অনুভবন ঘটে অর্থাৎ দুটি সর্বোচ্চ ঘনীভবন ও উচ্চতম প্রতিসরাঙ্কের তলের মধ্যে ব্যবধান হয় । এই ব্যবধানই তরলের কার্যকরী গ্রেটিং ব্যবধান (grating space)। অবশ্য এখানে উল্লেখ করা যেতে পারে যে, শব্দতরঙ্গ পাত্রের দেওয়ালে প্রতিফলিত না হয়ে শোষিত হলে যে জলতরঙ্গের উৎপত্তি হয়, তাতেও পর পর দুটি সর্বোচ্চ ঘনীভবন বা সর্বোচ্চ অনুভবনের তলের মধ্যে ব্যবধান থাকে এবং একই যুক্তি প্রযোজ্য হয়।

আলোকবিদ্যা সংক্রান্ত পর্যায় থেকে আপনি জানতে পারবেন যে, $_i$ তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের একবর্ণী আলোকরশ্মি যদি এমন একটি গ্রেটিং এর উপর লম্বভাবে আপতিত হয় যার গ্রেটিং ব্যবধান d, তবে যে সমীকরণ থেকে ঐ আলোকরশ্মির ব্যবর্তনের ফলে উৎপন্ন m-ক্রমের বর্ণালি রেখার ব্যবর্তন কোণ $_m$-পাওয়া যাবে, সেটি হল: $d\sin\ _m = m\ _i$ ...12.4

কিন্তু আমরা দেখেছি, এক্ষেত্রে অতিশব্দের তরঙ্গদৈর্ঘ্য ( ) কার্যকরী গ্রেটিং ব্যবধান। সুতরাং, আমরা লিখতে পারি $\sin\ _m = m\ _i$ ...12.5

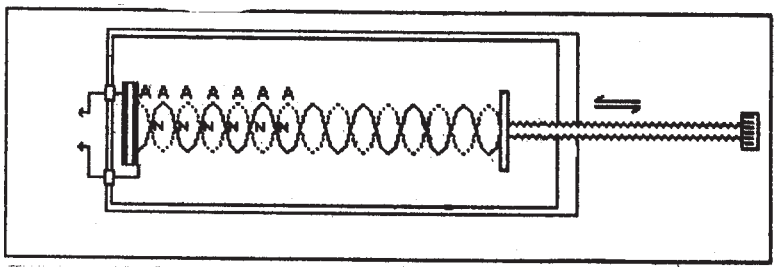
এই সূত্র থেকে $_m$ কোণ মেপে অতিশব্দের তরঙ্গদৈর্ঘ্য জানা যাবে। এখন ধরুন, অতিশব্দের কম্পাঙ্ক n, যার মান কোয়ার্টজ কেলাসের বেধ থেকে জানা যায়। অতএব, অতিশব্দের বেগ :

$v = n\ = mn\ _i/\sin\ _m$ ...12.6

12.6 সূত্র থেকে অতিশব্দের বেগ সরাসরি বার করা যায়।

12.3.2 শাব্দিক ব্যতিচার (Acoustic interference) পদ্ধতি

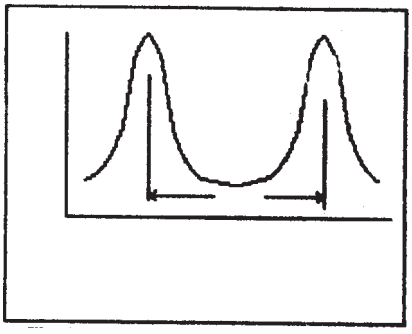
এই পদ্ধতিতে দুই শব্দতরঙ্গের উপরি পাতনের ফলে তাদের যে ব্যতিচার ঘটে, সেটিকে কাজে লাগানো হয়। গ্যাস এবং তরল, দুই ধরনের মাধ্যমেই শব্দের গতিবেগ নির্ণয়ে এই পদ্ধতি ব্যবহার করা যায়।



চিত্র 12.5(a)

12.5(a) চিত্রে একটি ব্যতিচারমাপক যন্ত্রের রূপরেখা দেখানো হয়েছে। 12.4 চিত্রে যে অতিশব্দ উৎপাদক দেখানো হয়েছে, সে জাতীয় একটি কোয়ার্টজ কেলাসযুক্ত স্পন্দক বর্তনী এখানে ব্যবহার করা হয়েছে। কেলাসের সামনে সেটির সঙ্গে সমান্তরাল একটি মসৃণ প্রতিফলক রাখা হয়, যেটিকে স্ক্রুর সাহায্যে সূক্ষ্মভাবে যুগ্মভাবে অগ্র পশ্চাতে সরানো যায়। উৎপাদক কেলাসটির দৈর্ঘ্য ও প্রস্থ শব্দতরঙ্গের তুলনায় বড় হওয়ায় সেটির কম্পনের ফলে সমতল শব্দতরঙ্গ উৎপাদিত হয়। এর সঙ্গে প্রতিফলিত শব্দতরঙ্গের উপরিপাতনের ফলে মাধ্যমে স্থাণুতরঙ্গ সৃষ্টি হয়। আপনি আগে জেনেছেন যে, স্থাণুতরঙ্গে পরপর দুটি সুস্পন্দ বিন্দু বা নিস্পন্দ বিন্দুর মধ্যে ব্যবধান থাকে। কেলাস ও প্রতিফলকের মধ্যে ব্যবধান যখন অর্থাৎ হয়, তখন প্রতিফলকে নিস্পন্দ বিন্দু ও কেলাসের সামনের তলে সুস্পন্দ বিন্দু থাকে এবং এই অবস্থায় কেলাসের স্পন্দক বর্তনীতে তড়িৎপ্রবাহ সর্বোচ্চ মানে পৌঁছয়।

(12.5a) চিত্রে নিস্পন্দ ও সুস্পন্দ বিন্দুগুলির অবস্থান দেখানো হয়েছে। এই অবস্থায় স্পন্দক বর্তনীতে তড়িৎপ্রবাহ সর্বোচ্চ হবে। এখন প্রতিফলকটি সরানো হলে তড়িৎপ্রবাহ প্রথমে কমবে কিন্তু ক্রমশ যখন প্রতিফলকটির সরণ হবে তখন আবার কেলাসে সুস্পন্দ বিন্দু তৈরি হবে ও তড়িৎপ্রবাহ সর্বোচ্চ মানে পৌঁছবে। 12.5 (b) চিত্র থেকে তড়িৎপ্রবাহের ওঠানামার ধারাটি আপনি বুঝতে পারবেন। এই লেখচিত্র থেকে সহজেই এর মান নির্ণয় করা যায় আর তা থেকে অতিশব্দের বেগও জানা যায়।



চিত্র 12.5(b) প্রতিফলকের অবস্থানের সঙ্গে স্পন্দক বর্তনীতে তড়িতের পরিবর্তন।

তরলের ক্ষেত্রে যান্ত্রিক ব্যবস্থাপনা একটু অন্যরকম হয়। একটি