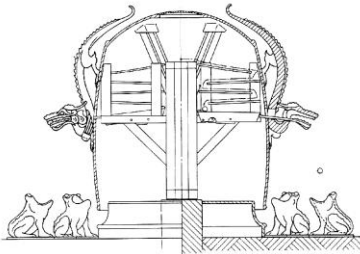


**Aardbevingen**

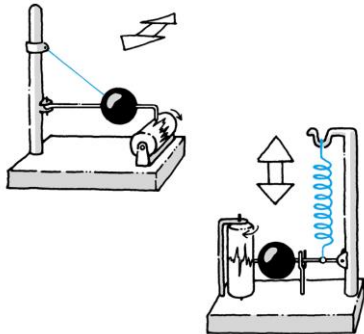
Bij een aardbeving ontstaan zowel longitudinale als transversale golven. De longitudinale kunnen zich niet alleen door water en steen voortplanten – zoals transversale golven – maar ook door lucht. Het zijn geluidsgolven. Daarom kun je een aardbeving niet alleen voelen maar even later ook horen, als je tenminste dicht bij de bron zit. Bij ondergrondse kernexplosies is alle energie naar buiten gericht; daarom zijn ze van aardbevingen te onderscheiden, want die ontstaan als lagen langs elkaar schuiven.

**Seismografen**

Om aardbevingen te registreren, maakte Tsang Heng in 132 een seismoscoop: een bronzen vat met een diameter van bijna 2 m. De centrale zuil ontgrendelde bij een aardbeving een bronzen bal in een van de acht drakenkoppen. Die bal werd door een kikker opgevangen en het geluid daarbij diende als waarschuwing.

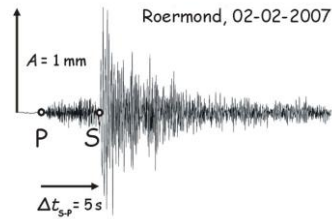


Een seismograaf maakt gebruik van traagheid, bijvoorbeeld van een magneet in een spoel die daarin een stroompje opwekt als de magneet beweegt. Vroeger was dat een zware bol. Om horizontale trillingen te registreren, hangt zo'n bol aan een draad. De draaiende papierrol beweegt mee met de aarde, maar de bol blijft door zijn traagheid praktisch stilhangen. Op de rol wordt zo een  $u(t)$ -grafiek geschreven. Verticale trillingen registreert men door een bol aan een veer op te hangen.



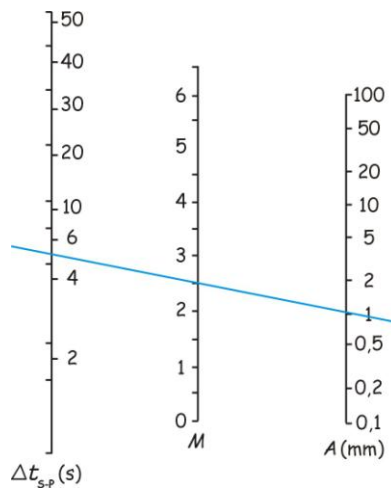
Als eerste komen de longitudinale golven aan (primaire of P-golven). Met een snelheid van ongeveer 6 km/s duurt het 20 minuten voor de geluidsgolven van een beving worden geregistreerd op een station aan de andere kant van de aarde.

De S-golven (secundaire golven) zijn transversaal en planten zich met 3,5 km/s voort. Hun amplitude is groter; deze golven zijn de oorzaak van verwoesting van gebouwen.



**De schaal van Richter**

Door de amplitude  $A$  te meten (hier 1 mm) en het tijdsverschil  $\Delta t_{S-P}$  te bepalen tussen aankomst van de P-en S-golven (hier 5 s), kun je de sterkte en de plaats van de beving vinden. Dat eerste gebeurt in het volgende diagram. Links is het tijdsverschil tussen de twee soorten golven uitgezet en rechts de amplitude. Door de 5 s links te verbinden met de 1 mm rechts, vind je op de middelste schaal van Richter een *magnitude*  $M$  (sterkte) van 2,5; zie *Binas*.



**Tsunami's**

Verticale bewegingen van de zeebodem in diep water kunnen leiden tot een vloedgolf of 'tsunami', het Japanse woord voor 'lange golf in een haven'. De golven lopen als rimpels over de oceaan met een snelheid van 800 km/h en een golflengte van 200 km; de passage van één golflengte duurt dus een kwartier. De amplitude is enkele decimeters maar bij de nadering van een kust neemt deze sterk toe doordat de snelheid sterk afneemt door de geringere diepte, net als bij een branding.

De aardbeving die de tsunami op tweede kerstdag 2004 veroorzaakte had een sterkte van 9,3 op de schaal van Richter. Alleen al in Sumatra vielen er meer dan 200 000 doden.

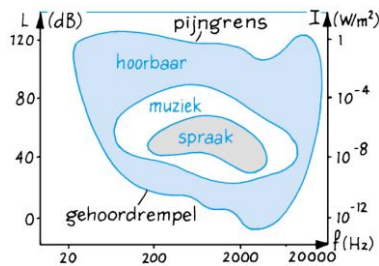
### Ons gehoor

Om bij 1000 Hz geluid te horen heb je een geluidsintensiteit  $I$  nodig van minstens  $10^{-12} \text{ W/m}^2$ . Deze waarde heet de *gehoordrempel*  $I_0$ . Andere intensiteiten vergelijken we hiermee via het *geluidssdrukkniveau*  $L$ :

$$L = 10 \cdot \log\left(\frac{I}{10^{-12}}\right) \text{ (dB)}$$

Bij meting blijkt de gehoordrempel een grillig verloop te hebben, zie tabel 27 C.

In deze  $L(f)$ -grafiek zijn ook de gebieden aangegeven voor spraak en muziek.



Het verschil tussen het minimale en maximale geluidsniveau wordt bij muziek de *dynamiek* genoemd; cd's halen een dynamiek van 96 dB. Je ziet dat je veel meer hoort dan je zelf aan geluid kunt produceren en dat is maar goed ook, want dan ontvang je ook niet-menselijke informatie. Voor een telefoongesprek blijkt een frequentieband van 300-3400 Hz al voldoende voor stemherkenning en begrip; besparing op deze 'bandbreedte' maakt extra gesprekken mogelijk.

Het menselijk oor slaat overigens geen slecht figuur als je het vergelijkt met dat van dieren. Als de gehoordrempel bij  $10^{-13} \text{ W/m}^2$  zou liggen in plaats van bij  $10^{-12} \text{ W/m}^2$ , dan zou je de botsing van een molecuul uit de lucht tegen je trommelvlies kunnen horen.

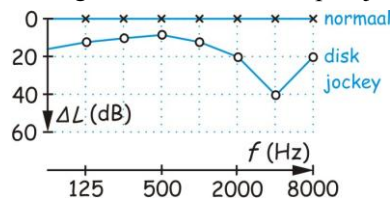
### Isofonen

De kromme lijnen in tabel 27C heten *isofonen*. Zij verbinden punten met gelijke luidheid. Je ziet dat je een toon van 4000 Hz met 10 dB moet verzwakken voor hij even luid klinkt als een toon van 1000 Hz. Bij lage frequenties moet  $L$  relatief hoog zijn om te worden waargenomen omdat ons oor ongevoelig is voor laag, zacht geluid. Een toon van 100 Hz hoor je pas als de sterkte 20 dB meer is dan die van een net hoorbare toon van 1000 Hz.

### Preventie van gehoorbeschadiging

Bij gehooronderzoek wordt gemeten bij welk geluidsniveau een toon nog net wordt waargenomen. Het verschil (in dB) met de gehoordrempel van een jonge volwassene wordt het *gehoorverlies*  $\Delta L$  genoemd. Het gehoorverlies wordt bij 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 en 8000 Hz bepaald. De grafiek die je zo krijgt, heet een *audiogram*. De meting gaat als volgt: één van deze frequenties wordt ten gehore gebracht en vervolgens in stappen afgezwakt. Het andere oor wordt 'gemaskeerd', dat wil zeggen dat dezelfde toon wordt aangeboden maar dan samen met ruis. Het laagst waargenomen niveau wordt genoteerd. Als de meetpunten voor  $\Delta L$  ongeveer op een horizontale lijn door 0 dB liggen, heb je een normaal gehoor.

Ook als je geen disc jockey bent, gaat je gehoor op den duur achteruit – vooral bij hoge tonen. In tabel 27D staan de normale audiogrammen voor verschillende leeftijden. Door een geluidsdrukkniveau van meer dan 120 dB kan je trommelvlies scheuren. Bij een rockconcert worden niveaus tussen 95 en 115 dB bereikt; in disco's 80 à 100 dB. Maar ook sommige walkmans kunnen niveaus van 110 dB bereiken. Meer dan 85 dB gedurende een lange periode kan schade opleveren aan je binnenoer. Hoor je dag in dag uit lawaai met een sterkte van 90 dB of meer, dan raak je eraan 'gewend', dat wil zeggen: je bent onherroepelijk doof geworden voor een zeker frequentiegebied, gewoonlijk rond 4000 Hz. Je audiogram vertoont een 'dip' bij die frequentie.



Bij 80 dB moet een werkgever oorbeschermers aanbieden en bij 90 dB moeten werknemers die ook dragen. De kans op schade hangt af van het product van de geluidsintensiteit en de tijdsduur: 90 dB in 8 h geeft dezelfde schade als 93 dB in 4 h en als 96 dB in 2h. Oorwatten leveren een reductie op van 30 dB en oorkappen zelfs 40 dB; combinatie van beide beschermt nog beter. Natuurlijk is het logischer het lawaai bij de bron te bestrijden. Metalen platen worden met rubber bekleed of men vervangt een tandwielkast door aandrijfriemen. Zware machine's krijgen vaak een fundering met een rubberlaag of ze worden omsloten door geluidsabsorberend materiaal dat zo zwaar mogelijk moet zijn en vooral ook luchtdicht. In tabel 15B vind je de absorptiecoëfficiënten van allerlei materialen.

### Zwaartekrachtgolven

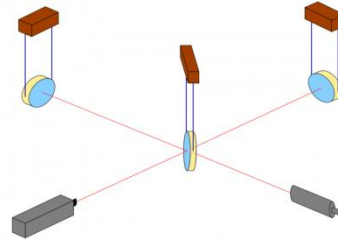
Anderhalf miljard jaar geleden fuseerden twee zwarte gaten, met diameters van zo'n 200 km. De een was 29, de ander 36 keer zo zwaar als de zon. Het bestaan ervan volgde in 1916 volgens Schwarzschild uit de algemene relativiteitstheorie van Einstein. Die verbond in dat jaar ruimte en tijd. Die ruimte-tijd kan uitzetten en inkrimpen en wordt vervormd door een massa, zoals een trampoline door een bowlingbal. Maar, redeneerde Einstein, dan kan die ruimtetijd zelf ook rimpelen.



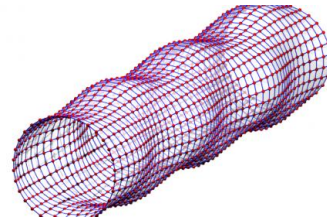
Volgens Einstein zou zo'n botsing zwaartekrachtgolven veroorzaken net als een steen die in een vijver wordt gegooid. De energie die bij de botsing zou vrijkomen zou enorm zijn omdat massa verloren gaat volgens  $E = mc^2$ . In dit geval gingen drie zonnemassa's verloren in de ongeveer 200 ms dat de twee zwarte gaten steeds sneller om elkaar heen draaiden.

De zwaartekrachtgolf – met een frequentie die twee keer zo groot was als de draaifrequentie van het paar – bereikte de aarde en vloog daar met de lichtsnelheid doorheen. Twee detectoren, samen LIGO genaamd, in de VS op een onderlinge afstand van 3000 km, merkten de golf op, 10 ms na elkaar.

De detectoren bestaan ieder uit twee 4 km lange armen, vacuüm gepompt en op het eind voorzien van spiegels, opgehangen als slingers. De middelste spiegel is halfdoorlatend.

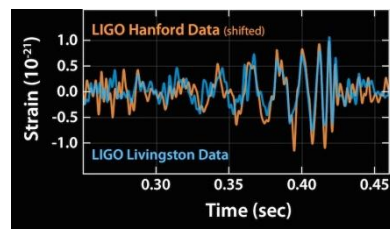


De laserstraal links wordt gesplitst en komt langs twee verschillende wegen aan bij de detector rechts. Als de twee daar in fase aankomen, zullen ze elkaar versterken. Zwaartekrachtgolven trillen transversaal maar dan in de ruimte. Vergelijk dat met een ballon die je samendrukt en die ergens anders uitpuilt. Het volume wil hetzelfde blijven.



Als een golf passeert, zal de ene arm iets inkrimpen en zal de ander tegelijk iets uitzetten, met als gevolg dat de laserbundels niet meer in fase bij de detector aankomen, het interferentiepatroon verschuift. Een verschil in afstand wordt omgezet in een verschil in tijd. Een verschuiving van een duizendste van de diameter van een proton is nog waarneembaar.

De voorspelling van Einstein klopte met de meetresultaten.



Conclusie van de wetenschappers: het 'graviton' – zo is het wisselwerkingsdeeltje van het zwaartekrachtveld alvast genoemd is massaloos, want – net als bij het foton – is de dracht oneindig groot.