



Problema I - soluție

Necăjiți că-și pierd partenerii de joacă, cei doi copii ai crescătorului de iepuri se hotărăsc să readucă în țarcul lor iepurii, pe care tatăl lor i-a încărcat în cuști într-un camion, care urmează să plece din fermă. Pe când camionul cu cuști stă la poarta fermei, unul dintre frați eliberează din zece în zece secunde iepuri, care încep imediat să fugă către țarcul lor, la intrarea căruia îi așteaptă celălalt frate. Consideră că țarcul, poarta fermei și camionul se află pe o linie dreaptă și că iepurii aleargă cu viteza constantă $v_i = 15 \text{ ms}^{-1}$ de-a lungul acestei linii.

1. Determină intervalul de timp dintre momentele succesive la care iepurii ajung la intrarea țarcului, plecând din camionul care staționează.

2. Camionul începe să se depărteze de fermă cu viteza $v_m = 5 \text{ ms}^{-1}$. Fratele din camion continuă să elibereze iepuri care fug spre țarc pe drumul drept. Determină intervalul de timp dintre momentele succesive la care iepurii ajung la intrarea țarcului, în timp ce camionul se depărtează.

3. După câteva minute, realizând că pierde iepuri, fermierul merge cu mașina cu spatele spre fermă cu viteza $v_m = 5 \text{ ms}^{-1}$. Fratele din camion continuă să elibereze iepuri care fug spre țarc pe drumul drept. Determină intervalul de timp dintre momentele succesive la care iepurii ajung la intrarea țarcului, în timp ce camionul se apropie de fermă.

Ești la malul unui lac liniștit și observi cum ajung la mal periodic valurile. Intervalul de timp dintre momentele la care ajung două valuri succesive se numește perioadă. Inversul perioadei poartă denumirea de frecvență. Oscilațiile sonore sunt caracterizate prin frecvență. În aer, viteza sunetului este $v_s = 340 \text{ ms}^{-1}$.

4. Copilul aflat în camionul care staționează la poarta fermei suflă într-un fluier care emite sunete cu frecvența $f = 500 \text{ Hz}$. Determină frecvența sunetelor pe care le aude copilul aflat la poarta țarcului iepurilor.

5. Determină frecvența sunetelor pe care le aude copilul aflat la poarta țarcului, dacă mașina în care se află fratele său care suflă în fluier se depărtează de fermă cu viteza $v_M = 20 \text{ ms}^{-1}$.

6. Determină frecvența sunetelor pe care le aude copilul aflat la poarta țarcului, dacă mașina în care se află fratele său care fluiera se apropie de fermă cu viteza $v_M = 20 \text{ ms}^{-1}$.

Efectul Doppler ? Nimic mai simplu! – soluție

1. Mișcarea iepurilor poate fi urmărită într-un sistem de referință cu o singură axă având originea la intrarea țarcului și orientat spre poartă. Soluția se simplifică dacă se consideră ca moment inițial al studiului momentul în care pleacă primul iepure.

Legea de mișcare pentru un iepure care pleacă la momentul considerat inițial din camionul care stă este

$$x(t) = D - v_i \cdot t; t \geq 0 \quad (0.1)$$

Intervalul de timp δt_1^a necesar primului iepure pentru a ajunge la țarc are expresia

$$\delta t_1^a = (D/v_i) \quad (0.2)$$

Momentul t_1^a la care primul iepure ajunge la țarc este

$$t_1^a = \delta t_1^a = D/v_i \quad (0.3)$$

Analog, pentru al doilea iepure - care pleacă la momentul T din camionul care stă, intervalul de timp care îi este necesar pentru a ajunge la țarc este

$$\delta t_2^a = (D/v_i) \quad (0.4)$$

Momentul t_2^a la care al doilea iepure ajunge la țarc este

$$t_2^s = \delta t_2^s + T = (D/v_i) + T \quad (0.5)$$

Pentru cei doi iepuri eliberați succesiv, intervalul de timp dintre momentele plecării este

$$T = 10 \text{ s} \quad (0.6)$$

Intervalul de timp dintre momentele sosirii iepurilor, T_s^0 are expresia

$$T_s^0 = t_2^s - t_1^s = ((D/v_i) + T) - (D/v_i) = T \quad (0.7)$$

„Cadența” cu care sosesc iepurii este identică aceleia cu care aceștia sunt eliberați.

$$T_s^0 = T = 10 \text{ s} \quad (0.8)$$

2.În cazul în care camionul cu iepuri se depărtează de fermă, dacă un iepure este eliberat atunci când distanța dintre mașină și țarc este Δ_1 și dacă se consideră momentul acestei eliberări ca fiind moment inițial al studiului, intervalul de timp δt_1^- în care primul iepure ajunge la țarc are expresia

$$\delta t_1^- = \Delta_1/v_i \quad (0.9)$$

Momentul la care acest iepure ajunge la țarc este

$$t_1^- = \delta t_1^- \quad (0.10)$$

Următorul iepure va fi eliberat la momentul T atunci când distanța dintre mașină și țarc, Δ_2 , este mai mare (datorită deplasării mașinii în timpul scurs între cele două „eliberări”)

$$\Delta_2 = \Delta_1 + T \cdot v_m \quad (0.11)$$

Intervalul de timp în care cel de-al doilea iepure ajunge la țarc este

$$\delta t_2^- = \Delta_2/v_i = (\Delta_1 + T \cdot v_m)/v_i = t_1^- + T \cdot (v_m/v_i) \quad (0.12)$$

Corespunzător, t_2^- momentul la care cel de-al doilea iepure ajunge la țarc este

$$t_2^- = \delta t_2^- + T = t_1^- + T[1 + (v_m/v_i)] \quad (0.13)$$

Intervalul de timp dintre momentele sosirii iepurilor, T_s^- are expresia

$$T_s^- = t_2^- - t_1^- = T[1 + (v_m/v_i)] \quad (0.14)$$

Cadența sosirii iepurilor se rărește – dacă mașina din care iepurii sunt eliberați se depărtează de țarc.

Valoarea numerică a acestei cadențe „rărite” este

$$T_s^- = 10[1 + (5/15)] \text{ s} = (40/3) \text{ s} \quad (0.15)$$

3.În cazul în care camionul cu iepuri se apropie de fermă, dacă un iepure este eliberat atunci când distanța dintre mașină și țarc este Δ'_1 și dacă se consideră momentul acestei eliberări ca fiind moment inițial al studiului, intervalul de timp δt_1^- în care primul iepure ajunge la țarc are expresia

$$\delta t_1^- = \Delta'_1/v_i \quad (0.16)$$

Momentul la care acest iepure ajunge la țarc este

$$t_1^- = \delta t_1^- \quad (0.17)$$

Următorul iepure va fi eliberat la momentul T atunci când distanța dintre mașină și țarc, Δ'_2 , este mai mică (datorită apropierii de țarc a mașinii în timpul scurs între cele două „eliberări”)

$$\Delta'_2 = \Delta'_1 - T \cdot v_m \quad (0.18)$$

Intervalul de timp în care cel de-al doilea iepure ajunge la țarc este

$$\delta t_2^- = \Delta'_2/v_i = (\Delta'_1 - T \cdot v_m)/v_i = t_1^- - T \cdot (v_m/v_i) \quad (0.19)$$

Corespunzător, t_2^- momentul la care cel de-al doilea iepure ajunge la țarc este

$$t_2^- = \delta t_2^- + T = t_1^- + T[1 - (v_m/v_i)] \quad (0.20)$$

Intervalul de timp dintre momentele sosirii iepurilor, T_s^- are expresia

$$T_s^- = t_2^- - t_1^- = T[1 - (v_m/v_i)] \quad (0.21)$$

Cadența sosirii iepurilor se îndesește – dacă mașina din care iepurii sunt eliberați se apropie de țarc.

Valoarea numerică a intervalului de timp dintre două sosiri în cursul acestei cadențe „îndesite” este

$$T_s^- = 10[1 - (5/15)]s = (20/3)s \quad (0.22)$$

4. Momentele la care oscilația are amplitudine maximă se repetă periodic la intervale de timp egale cu inversul frecvenței.

Privind atingerea amplitudinii maxime la sursă prin analogie cu eliberarea iepurilor, rezultă că pentru cazul în care camionul în care se află copilul staționează, perioada sunetului auzit de copilul de lângă țarc este egală cu perioada sunetului emis. Dacă perioada sunetului emis este τ

$$\tau = 1/f \quad (0.23)$$

$$\tau = 2ms \quad (0.24)$$

Perioada sunetului τ^0 auzit în acest de copilul de lângă țarc este

$$\tau^0 = \tau = 2ms \quad (0.25)$$

Corespunzător, frecvența f^0 a sunetului auzit este

$$f^0 = f = 500Hz \quad (0.26)$$

5. Privind din nou atingerea amplitudinii maxime la sursă prin analogie cu eliberarea iepurilor, rezultă că pentru cazul în care camionul în care se află copilul se depărtează de țarc, perioada τ^- a sunetului auzit de copilul de lângă țarc crește prin comparație cu perioada τ a sunetului emis – ca în relația (1.14) iar relația dintre cele două perioade se scrie

$$\tau^- = \tau[1 + (v_M/v_s)] \quad (0.27)$$

Corespunzător, relația dintre frecvența sunetului emis f și frecvența f^- a sunetului auzit de copilul de lângă țarc este

$$f^- = f/[1 + (v_M/v_s)] \quad (0.28)$$

Relația de mai sus arată că pentru camionul care se depărtează de ascultător, frecvența sunetului auzit scade față de frecvența sunetului emis. Sunetul auzit este „mai grav”. Valoarea numerică a frecvenței auzite este

$$f^- = 500/[1 + (20/340)]Hz = 500/(18/17) \cong 472Hz \quad (0.29)$$

6. Pentru cazul în care camionul în care se află copilul se apropie de țarc, perioada τ^+ a sunetului auzit de copilul de lângă țarc scade prin comparație cu perioada τ a sunetului emis – ca în relația (1.21) iar relația dintre cele două perioade se scrie

$$\tau^+ = \tau[1 - (v_M/v_s)] \quad (0.30)$$

Corespunzător, relația dintre frecvența sunetului emis f de fluierul din camionul care se apropie și frecvența f^+ a sunetului auzit de copilul de lângă țarc este

$$f^+ = f/[1 - (v_M/v_s)] \quad (0.31)$$

Relația de mai sus arată că pentru camionul care se apropie de ascultător, frecvența sunetului auzit crește față de frecvența sunetului emis. Sunetul auzit este „mai ascuțit”. Valoarea numerică a frecvenței auzite este

$$f^+ = 500/[1 - (20/340)]Hz = 500/(16/17) \cong 531Hz \quad (0.32)$$

Pentru sursele de unde, variația frecvenței percepute de un observator – dacă sursa de unde este în mișcare – se numește efect Doppler. Dacă sursa se îndepărtează de observator frecvența percepută este mai mică decât frecvența „la emisie” iar dacă sursa se apropie de observator frecvența percepută este mai mare decât frecvența „la emisie”.



Problema a II-a

A. Vedere din submarin (6 puncte)

Un submarin turistic are ca ferestre plăci plane verticale transparente cu grosimea $d = 9\text{ cm}$ construite din sticlă cu indicele de refracție $n' = \sqrt{3}$. Indicele de refracție al apei este $n = \sqrt{\frac{3}{2}}$.

Submarinul staționează sub apă.

1. Un copil observă fasciculul foarte îngust (asimilabil unei raze de lumină) provenit de la un pointer laser cu care se joacă și pe care îl îndreaptă pe o direcție perpendiculară pe fereastră. Realizează un desen în care să evidențiezi raza incidentă pe fereastra submarinului și raza emergentă.

2. Copilul vede apoi raza pointerului laser care se propagă în submarin într-un plan vertical perpendicular pe planul ferestrei și la un unghi $\alpha = 60^\circ$ față de normala în punctul în care raza atinge fereastră. Realizează un desen în care să evidențiezi raza incidentă pe fereastra submarinului și raza emergentă.

3. Imaginea unui mic animal marin luminos exterior submarinului este observată astfel încât atât obiectul cât și imaginea sa sunt coplanare într-un plan vertical perpendicular pe fereastră. Găsește poziția imaginii față de poziția obiectului în funcție de unghiul sub care călătorul din submarin privește spre imaginea obiectului. Folosește un sistem de coordonate xOy , conținut în planul de incidență, cu axa Ox orientată pe direcția perpendiculară de la obiect la placă și cu axa Oy conținută în planul feței de intrare a luminii în placă.

4. Un obiect cade în apă, pe lângă fereastra submarinului, pe verticală. Precizează dacă traiectoria observată din submarin este sau nu o linie verticală și justifică răspunsul.



A. Vedere din submarin - soluție

Propagarea razelor de lumină care traversează placa este prezentată în figura 3.1.

Datele geometrice de intrare ale problemei sunt

$$\begin{cases} OS = x \\ OF = d \end{cases} \quad (0.1)$$

În cazul incidenței normale raza de lumină rămâne normală pe placă la ambele refracții și iese din placă spre apă de asemenea normală pe placă

$$\alpha(\alpha'' = 0) = 0 \quad (0.2)^*$$

Din legea refracției

$$\begin{cases} n \cdot \sin \alpha = n' \cdot \sin \alpha' = 1 \cdot \sin \alpha'' \\ \sqrt{\frac{3}{2}} \sin \alpha = \sqrt{3} \cdot \sin \alpha' = \frac{\sqrt{3}}{2} \end{cases} \quad (0.3)$$

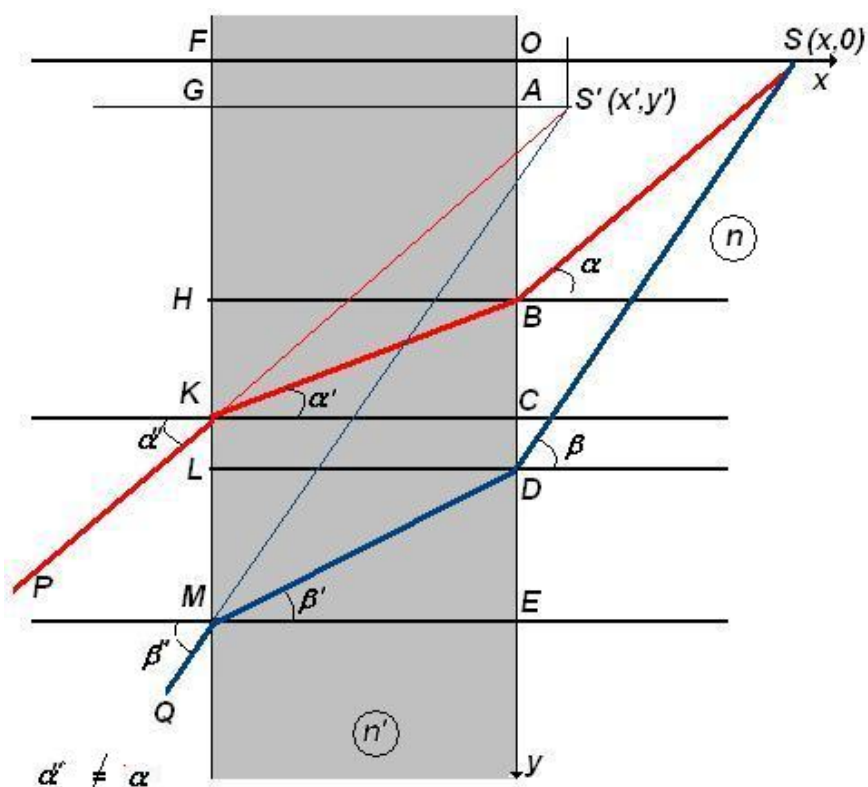


Figura 0.1

rezultă că unghiurile (față de normală) sub care raza de lumină intră din placă sunt

$$\begin{cases} \alpha' = 30^\circ \\ \alpha = 45^\circ \end{cases} \quad (0.4)^*$$

În consecință, unghiul dintre direcțiile de intrare și de ieșire a razei de lumină este

$$\alpha'' - \alpha = 60^\circ - 45^\circ = 15^\circ \quad (0.5)^*$$

Pentru construcția imaginii prin placa transparentă a unui punct luminos, se urmărește drumul prin placă pentru două raze care pleacă din punctul S dar care, pentru un observator aflat dincolo de placă par să vină din punctul S'.

Astfel,

$$\begin{cases} OB = x \cdot \operatorname{tg} \alpha \\ HK = d \cdot \operatorname{tg} \alpha' \\ OD = x \cdot \operatorname{tg} \beta \\ LM = d \cdot \operatorname{tg} \beta' \end{cases} \quad (0.6)$$

și în consecință

$$\begin{cases} FK = OB + HK = d \cdot \operatorname{tg} \alpha' + x \cdot \operatorname{tg} \alpha \\ FM = FL + LM = x \cdot \operatorname{tg} \beta + d \cdot \operatorname{tg} \beta' \\ KM = FM - FK = x \cdot (\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta) + d \cdot (\operatorname{tg} \alpha' - \operatorname{tg} \beta') \end{cases} \quad (0.7)$$

Pentru observator razele de lumină emergente LP și MQ „par să vină” din punctul S'(x', y').

$$\begin{cases} AS' = x' \\ OA = y' \\ GS' = d + x' \end{cases} \quad (0.8)$$

și

$$\begin{cases} GK = (d + x') \cdot tg\alpha'' \\ GM = (d + x') \cdot tg\beta'' \\ KM = (d + x') \cdot (tg\beta'' - tg\alpha'') \end{cases} \quad (0.9)$$

De asemenea

$$\begin{cases} y' = FK - GK \\ y' = x \cdot tg\alpha + d \cdot tg\alpha' - (d + x') \cdot tg\alpha'' \end{cases} \quad (0.10)$$

Cele două raze care ajung la ochiul observatorului sunt foarte apropiate astfel că se poate scrie că

$$\begin{cases} \beta = \alpha + \Delta\alpha \\ \beta' = \alpha' + \Delta\alpha' \\ \beta'' = \alpha'' + \Delta\alpha'' \end{cases} \quad (0.11)$$

cu $\Delta\alpha, \Delta\alpha', \Delta\alpha''$ suficient de mici pentru a admite că

$$\begin{cases} \sin \Delta\alpha \cong \Delta\alpha \\ \sin \Delta\alpha' \cong \Delta\alpha' \\ \sin \Delta\alpha'' \cong \Delta\alpha'' \\ \cos \Delta\alpha = \cos \Delta\alpha' = \cos \Delta\alpha'' \cong 1 \end{cases} \quad (0.12)$$

Legea refracției se rescrie în aceste condiții pentru a doua rază ca

$$\begin{cases} n \cdot \sin \beta = n' \cdot \sin \beta' = \sin \beta'' \\ n \cdot \Delta\alpha \cdot \cos \alpha = n' \cdot \cos \alpha' \cdot \Delta\alpha' = \Delta\alpha'' \cdot \cos \alpha'' \end{cases} \quad (0.13)$$

de unde

$$\begin{cases} \frac{\Delta\alpha'}{\Delta\alpha} = \frac{n}{n'} \cdot \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha'} \\ \frac{\Delta\alpha''}{\Delta\alpha} = n \cdot \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha''} \end{cases} \quad (0.14)$$

Ținând seama că

$$tgb - tga = \frac{\sin(b - a)}{\cos a \cdot \cos b} \quad (0.15)$$

rezultă că

$$tg\beta - tg\alpha = \frac{\sin \Delta\alpha}{\cos \alpha \cdot \cos(\alpha + \Delta\alpha)} = \frac{\Delta\alpha}{\cos^2 \alpha} \quad (0.16)$$

respectiv

$$tg\beta' - tg\alpha' = \frac{\Delta\alpha'}{\cos^2 \alpha'} \quad (0.17)$$

și

$$tg\beta'' - tg\alpha'' = \frac{\Delta\alpha''}{\cos^2 \alpha''}$$

Egalând expresiile lungimii segmentului KM din (3.9) și (3.7) rezultă succesiv

$$\begin{cases} x \cdot (tg\beta - tg\alpha) + d \cdot (tg\beta' - tg\alpha') = (d + x') \cdot (tg\beta'' - tg\alpha'') \\ x + d \frac{(tg\beta' - tg\alpha')}{(tg\beta - tg\alpha)} = (d + x') \frac{(tg\beta'' - tg\alpha'')}{(tg\beta - tg\alpha)} \\ x + d \frac{\Delta\alpha'}{\cos^2 \alpha'} \cdot \frac{\cos^2 \alpha}{\Delta\alpha} = (d + x') \frac{\Delta\alpha''}{\cos^2 \alpha''} \cdot \frac{\cos^2 \alpha}{\Delta\alpha} \end{cases} \quad (0.18)$$

Ceea ce , ținând seama de (3.14) revine la

$$\begin{cases} x + \frac{d \cdot n \cos^3 \alpha}{n' \cos^3 \alpha'} = (d + x') \cdot n \cdot \frac{\cos^3 \alpha}{\cos^3 \alpha''} \\ x' = \frac{x}{n} \cdot \frac{\cos^3 \alpha''}{\cos^3 \alpha} + d \left[\frac{1}{n'} \frac{\cos^3 \alpha''}{\cos^3 \alpha'} - 1 \right] \end{cases} \quad (0.19)$$

Relația care determină valoarea coordonatei x' a imaginii se scrie strict în funcție de datele problemei ținând seama că din relația (3.3) rezultă că

$$\begin{cases} \cos \alpha' = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \alpha''}{n'^2}} \\ \cos \alpha = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \alpha''}{n^2}} \end{cases}$$

Coordonata y' a imaginii este determinată din relația (3.10)

$$y' = x \cdot tg\alpha + d \cdot tg\alpha' - (d + x') \cdot tg\alpha'' \quad (0.20)$$

Pentru incidență la $\alpha = 60^\circ$

$$\begin{cases} x' = \frac{x}{n} \cdot \frac{\cos^3 \alpha''}{\cos^3 \alpha} + d \left[\frac{1}{n'} \frac{\cos^3 \alpha''}{\cos^3 \alpha'} - 1 \right] \\ x' = \frac{x}{\sqrt{3/2}} \cdot \frac{1/8}{1/2\sqrt{2}} + d \left[\frac{1}{\sqrt{3}} \frac{1/8}{3\sqrt{3}/8} - 1 \right] \\ x' = \frac{x}{2\sqrt{3}} - \frac{8}{9} d \end{cases} \quad (0.21)^*$$

Corespunzător, y' are expresia

$$y' = x + \frac{d}{\sqrt{3}} - (d - x')\sqrt{3} \quad (0.22)^*$$

Pentru incidență normală

$$x'(0^\circ) = \frac{x}{\sqrt{3/2}} + d \left(\frac{1}{\sqrt{3}} - 1 \right) \quad (0.23)^*$$

Din relațiile (3.21) și (3.23) care arată că două obiecte cu aceeași abscisă au imagini cu abscise diferite în funcție de unghiul de vedere rezultă că imaginea „nu cade pe verticală” atunci când obiectul cade pe verticală.

$$\begin{cases} x'(60^\circ) = x + d \left[\frac{1}{n} \frac{1/8}{(\sqrt{1-3/4n^2})^3} - 1 \right] \\ x'(60^\circ) = x + d \left[\frac{1}{\sqrt{3}} \frac{1/8}{(\sqrt{3/4})^3} - 1 \right] = x - \frac{d}{9} \cong x - 0,11d \end{cases} \quad (0.24)^*$$

Ținând seama de expresia (3.12) a coordonatei verticale a poziției imaginii rezultă

$$\begin{cases} y' = (x - d - x') \cdot \operatorname{tg} \alpha + d \cdot \operatorname{tg} \alpha' \\ y' = d \cdot \left(\operatorname{tg} \alpha' - \frac{1}{n} \frac{\cos^3 \alpha}{(\sqrt{1 - \sin^2 \alpha / n^2})^3} \operatorname{tg} \alpha \right) \end{cases} \quad (0.25)^*$$

Pentru incidența normală

$$\{y'(0) = 0$$

iar pentru incidență la $\alpha = 60^\circ$

$$\begin{cases} y'(60^\circ) = d \cdot \left(\operatorname{tg} 30 - \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{1/8}{3\sqrt{3}/8} \operatorname{tg} 60 \right) \\ y'(60^\circ) = d \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{3}} - \frac{\sqrt{3}}{9} \right) = d \frac{2}{3\sqrt{3}} \end{cases} \quad (0.26)^*$$

B. Timpul lui Planck (4 puncte)

Trei dintre constantele fundamentale în fizică sunt constanta atracției universale $k = 6,7 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ (constanta caracteristică gravitației), viteza luminii în vid $c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (constanta caracteristică relativității) și constanta lui Planck $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (constanta caracteristică fenomenelor cuantice). Determină expresia care conține doar aceste trei constante și a cărei unitate de măsură în SI este secunda. Această expresie este cunoscută sub numele de „timpul lui Planck” și reprezintă vârsta universului înainte de care legile fizicii, așa cum sunt în prezent înțelese nu pot fi aplicate. Calculează valoarea numerică a timpului lui Planck.

B. Timpul lui Planck - soluție

Conform enunțului, „timpul lui Planck” are expresia:

$$t = k^\alpha \cdot c^\beta \cdot h^\gamma$$

Puterile α , β și γ pot fi determinate din analiza dimensională

$$[t] = [k]^\alpha \cdot [c]^\beta \cdot [h]^\gamma$$

Prin urmare

$$T = (L^3 \cdot M^{-1} \cdot T^{-2})^\alpha \cdot (L \cdot T^{-1})^\beta \cdot (L^2 \cdot M \cdot T^{-1})^\gamma$$

$$T = L^{3\alpha + \beta + 2\gamma} \cdot M^{-\alpha + \gamma} \cdot T^{-2\alpha - \beta - \gamma}$$

ceea ce conduce la

$$\begin{cases} 3\alpha + \beta + 2\gamma = 0 \\ -\alpha + \gamma = 0 \\ -2\alpha - \beta - \gamma = 1 \end{cases}$$

Rezolvând sistemul se obține:

$$\begin{cases} \alpha = \frac{1}{2} \\ \beta = -\frac{5}{2} \\ \gamma = \frac{1}{2} \end{cases}$$

Prin concluzie, expresia pentru „timpul lui Planck” este

$$t = \sqrt{\frac{k \cdot h}{c^5}}$$

Introducând valorile numerice se obține:

$$t = 1,3 \cdot 10^{-43} \text{ s}$$

Soluție propusă de:

*Delia DAVIDESCU – Centrul Național pentru Curriculum și Evaluare în Învățământul Preuniversitar – Ministerul Educației
Cercetării și Tineretului*

Conf. univ. dr. Adrian DAFINEI - Facultatea de Fizică – Universitatea București