

Les 6

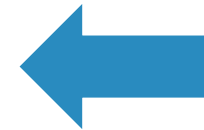
Atmosfeerfysica en -chemie

Inleiding tot de wetenschappen van de atmosfeer

Auteur: Erik de Schrijver

Inhoud

- Geschiedenis van het onderzoek
- Lagen van de atmosfeer
- Druk-, temperatuur- en dichtheidsgradiënten
- Chemische samenstelling
- Stralingseffecten
- Meteorieten en terugkerende ruimteschepen
- Electromagnetisme
- Planetaire atmosferen



Les 6: Meteorieten en terugkerende ruimteschepen

Wanneer een object vanuit de ruimte de aardse atmosfeer binnendringt wordt het afgeremd: het verliest kinetische energie die wordt omgezet in warmte. In tegenstelling tot wat veel mensen denken ontstaat het grootste deel van deze warmte niet tgv. contactwrijving met de lucht, maar wel tgv. de adiabatische compressie van gas in de schokgolf die het object voorafgaat. De kunst om een terugkerend ruimteschip veilig door de atmosfeer te loodsen bestaat er dan ook in te zorgen dat die schokgolf zo ver mogelijk van het ruimteschip blijft. Een stompe vorm is daartoe veel meer aangewezen dan een scherpe.



Meteoroïde of meteoride: een stofdeeltje, stukje steen of een stukje ijs dat door de ruimte zweeft. Het kan van een komeet afgebroken zijn of gewoon een overblijfsel van het ontstaan van het zonnestelsel.

Meteoor of vallende ster: kortstondig lichtspoor aan de hemel dat men ziet wanneer een meteoroïde op ca. 100 km hoogte met een enorme snelheid (tot tientallen kilometers per seconde) in de atmosfeer van de Aarde terechtkomt.

Meteoriet: deel van een meteoroïde of planetoïde dat op de aarde inslaat na vanuit de ruimte door de atmosfeer te zijn gevallen. (Opm: kleine meteoroiden branden helemaal op, er is dan geen meteoriet over)



Men kan drie grote categoriën meteorieten onderscheiden:

1.) Steenmeteorieten (+/-95% van alle meteorieten op Aarde) bestaan voor >75% uit silicaten (pyroxeen, plagioklazen, olivijn), en bevatten kleine hoeveelheden Ni en Fe. Een subcategorie, de koolstofhoudende chondrieten, bevatten organische verbindingen en H_2O (hydraten).



2.) Ijzersteenmeteorieten (<2% van alle meteorieten op Aarde) bestaan uit +/- gelijke delen silicaten en Ni-Fe legeringen. Hun grote variatie in textuur en chemische samenstelling maakt ze moeilijk te interpreteren.



3.) Ijzermeteorieten (<5% van alle meteorieten op Aarde) bestaan bijna uitsluitend uit Ni en Fe. Ze zijn waarschijnlijk ontstaan in de kern van grote asteroïden (>100km) waarvan de kern differentiatie onderging (het proces waarbij in het vloeibare gesteente de zwaardere bestanddelen naar de kern zinken).

Doe-het-zelf projectje



Wie de kans heeft om in de bergen (waar de lucht droger is en zuiverder dan op zeeniveau) de dakgoot van een chalet uit te kuisen kan best de vuilbak even aan de kant laten en een magneet ter hand nemen.

Doe-het-zelf projectje

Vele meteorieten zijn
<2 à 3 mm, en de
ijzermeteorieten worden
door een magneet
aangetrokken.

Sleep je magneet door
het vuil uit de dakgoot:
een gemakkelijke
manier om een
ruimtestof te geraken!



Terugkerende ruimteschepen

Verschillende factoren moeten tegen elkaar worden afgewogen:

1. 'Deceleration'
2. 'Heating'
3. 'Landing accuracy'
4. 'Entry corridor'



1. 'Deceleration' of vertraging van het ruimteschip bij de terugkeer.

Als de vertraging (negatieve versnelling) groot genoeg is zal zelfs aluminium of staal verfrompelen.

Mensen kunnen 12g ($1g = 1 \times 9.81 \text{ m/s}^2$) aan, maar slechts gedurende enkele minuten. De maximale vertraging die een ruimteschip mag ondergaan hangt dus af van de lading (bemand/onbemand, delicate apparatuur of bodemstalen).

Maar minder vertraging is niet noodzakelijk beter: als een terugkerend ruimteschip niet genoeg afremt, kan het op de atmosfeer afketsen zoals een platte steen op water.

2. 'Heating'

De hitte die geproduceerd wordt bij de terugkeer door de atmosfeer kan heel erg oplopen: de terugkeer-module van een Sojoez-ruimteschip heeft een massa van ongeveer 2,9ton en vertraagt van 8km/s tot stilstand. De af te voeren kinetische energie bedraagt:

$$E = mv^2/2 = 92.8 \text{ GigaJoule!}$$

Dat is genoeg energie om 130ton ijzer te doen smelten! (En dan is er nog de potentiële energie)

Soyuz TMA-12

Orbital module

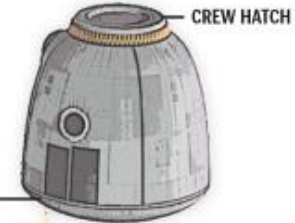
Holds equipment and supplies. Separates and burns up in the atmosphere.



Descent module

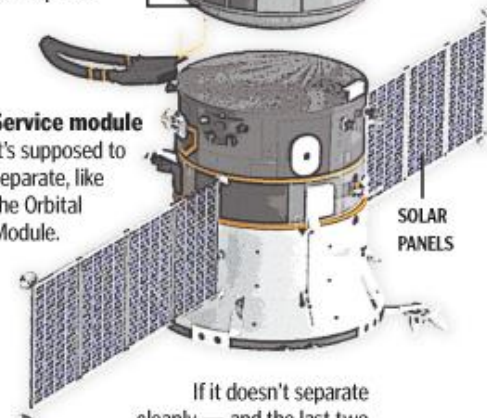
The crew rides this part back to Earth.

The heat shield needs to point forward as the module hits atmosphere.



Service module

It's supposed to separate, like the Orbital Module.



If it doesn't separate cleanly — and the last two times, it hasn't — the descent module may hit the atmosphere **hatch first**. It won't last long if it does.

THE PLAIN DEALER

3. 'Landing accuracy'

Om de landingsplaats te kunnen kiezen als het ruimteschip de atmosfeer induikt is sturen noodzakelijk en stuurraketjes zijn onbruikbaar in de dampkring. Vleugels zijn zwaar en tijdens de ruimtevlucht zelf nutteloos.

Maar als het ruimteschip tijdens de afdaling lift kan creëren is enige sturing mogelijk: daarom zijn de Russische Soyoes capsules anders van vorm dan de oudere bolvormige Vostok. Ook de capsules Orion en Crew Dragon uit de VS worden zo 'bestuurd'.



4. De 'Entry corridor'

De hoek α wordt 'angle of attack' genoemd en hij bepaalt twee dingen: de wrijving en de lift.

De wrijving remt de snelheid af, de lift duwt het toestel omhoog. Als $\alpha \uparrow$ neemt de wrijving toe waardoor het toestel steiler daalt en de vertraging toeneemt.



De Ballistische Coëfficiënt

De wrijvingskracht is een vector die de snelheid tegenwerkt, lift is een vector die $\perp$ staat op de snelheid. Men kan lift en wrijving in eerste benadering behandelen mbv het begrip 'dynamic pressure':

$$Q = \rho \cdot v^2 / 2 \quad (\rho = \text{dichtheid } v/d \text{ lucht in } kg/m^3 \text{ en } v = \text{snelheid in } m/s)$$

Dan is de wrijvingskracht

$$F_w = \rho \cdot v^2 \cdot C_d \cdot \frac{A}{2} = Q \cdot C_d \cdot A$$

En de lift

$$F_l = \rho \cdot v^2 \cdot C_l \cdot \frac{A}{2} = Q \cdot C_l \cdot A$$

Waarin C_d en C_l resp. de wrijvings- en liftcoëfficiënt voorstellen (dimensieloos) en A het geprojecteerd doorsnee-oppervlak (m^2).

Hierbij dient opgemerkt dat zowel C_d en C_l als A zullen veranderen wanneer een object zijn profiel tov. de luchtstroom wijzigt, wat men 'attitude control' noemt.

$F_w = \rho \cdot v^2 \cdot C_d \cdot A/2$ en dus $a = Q \cdot C_d \cdot A/m$ omdat in de afremfase zowel lift als zwaartekracht verwaarloosbaar zijn tov. de wrijvingskracht.

De term $(C_d \cdot A/m)$ bepaalt maw. hoe de dynamische druk zich vertaalt in een afremming.

De uitdrukking wordt meestal omgekeerd en staat bekend als de 'ballistische coëfficiënt:

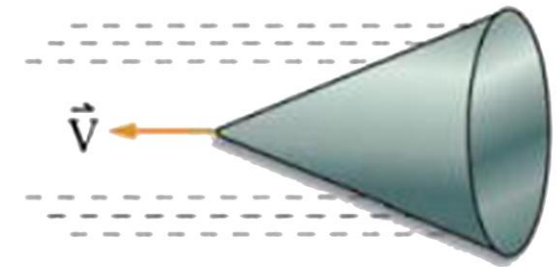
$$BC = m/C_d \cdot A \quad \text{in kg/m}^2$$

$$BC = m/C_d \cdot A$$

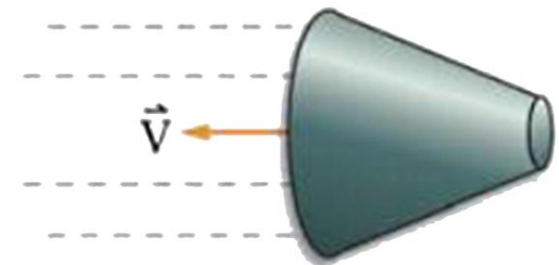
We laten nu eenzelfde object in twee tegengestelde richtingen bewegen: m en A zijn dus gelijk.

In het eerste geval is er weinig wrijving, dus C_d is klein en BC is groot.

In het tweede geval is er veel meer wrijving: C_d is groot, BC is klein.



streamlined vehicle
(high ballistic coefficient)



blunt vehicle
(low ballistic coefficient)

Maximale vertraging en de hoogte waarop deze optreedt

De afleiding van de formules is relatief lang, maar de resultaten zijn:

$$a_{max} = v_{entry}^2 \cdot \beta \cdot \sin \gamma / 2e \text{ en} \quad h(a_{max}) = \ln[\rho_0 / (BC \cdot \beta \cdot \sin \gamma)] / \beta$$

Met:

a_{max} = maximale vertraging (m/s²)

e = getal v. Euler = 2.7182

v_{entry} = beginsnelheid (m/s)

BC = Ballistische coëfficiënt (kg/m²)

γ = entry flight path angle (rad)

ρ_0 = dichtheid v/d lucht op

β = schaalhoogte v/d atmosfeer

zeeniveau = 1.225 kg/m³

(maat voor het dichtheidsprofiel)

$$= 1.39 \cdot 10^{-4} m^{-1}$$

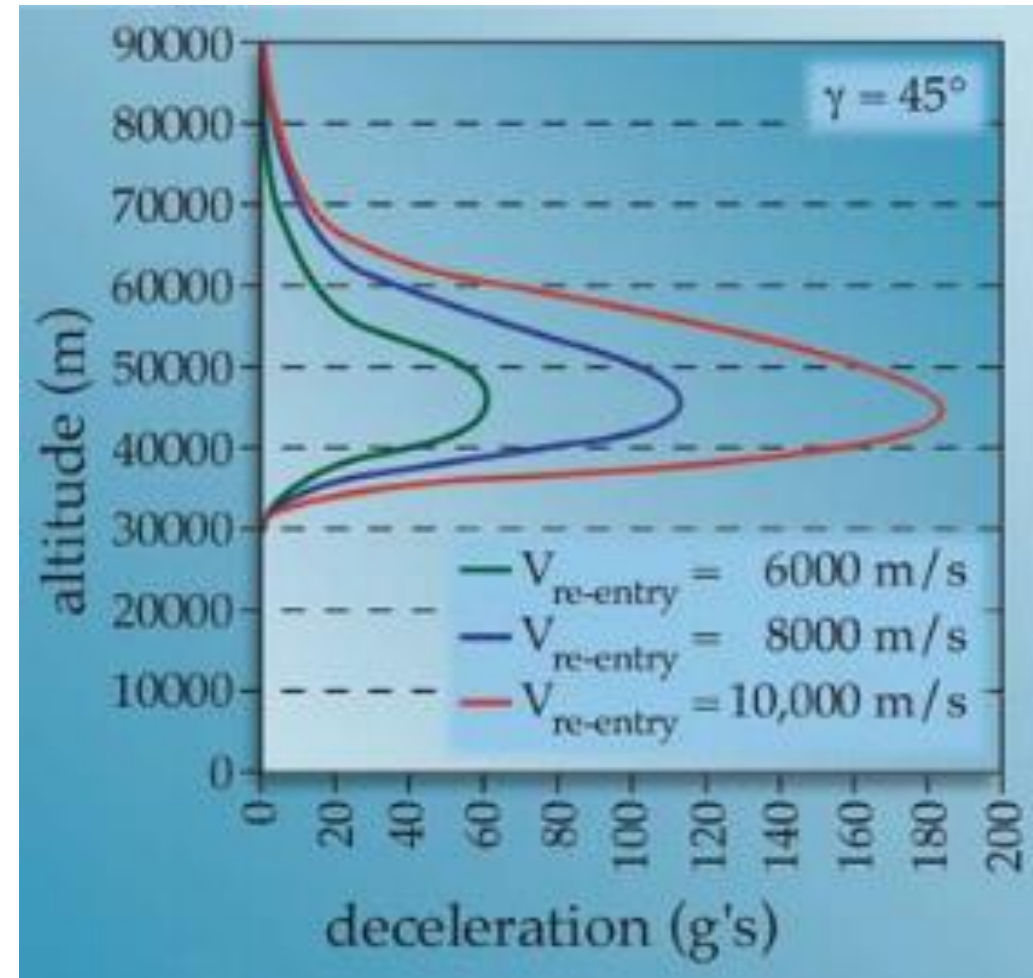
Merk op dat a_{max} onafhankelijk is van de BC en $h(a_{max})$ onafhankelijk van v_{entry} .

De maximale vertraging en hoogte ervan ifv. de beginsnelheid.

Oefening 1

Een lege rakettrap (=cilinder) heeft cirkelvormige basis met $r=4,00\text{m}$ en $m=1000\text{kg}$ en $C_d=1,0$. Hij duikt lengtegewijs de atmosfeer in met $v = 10,000\text{m/s}$. $\gamma = 45^\circ$.

Bereken de BC, a_{max} en $h(a_{max})$



De maximale vertraging en hoogte ervan ifv. de beginsnelheid.

Oefening 1

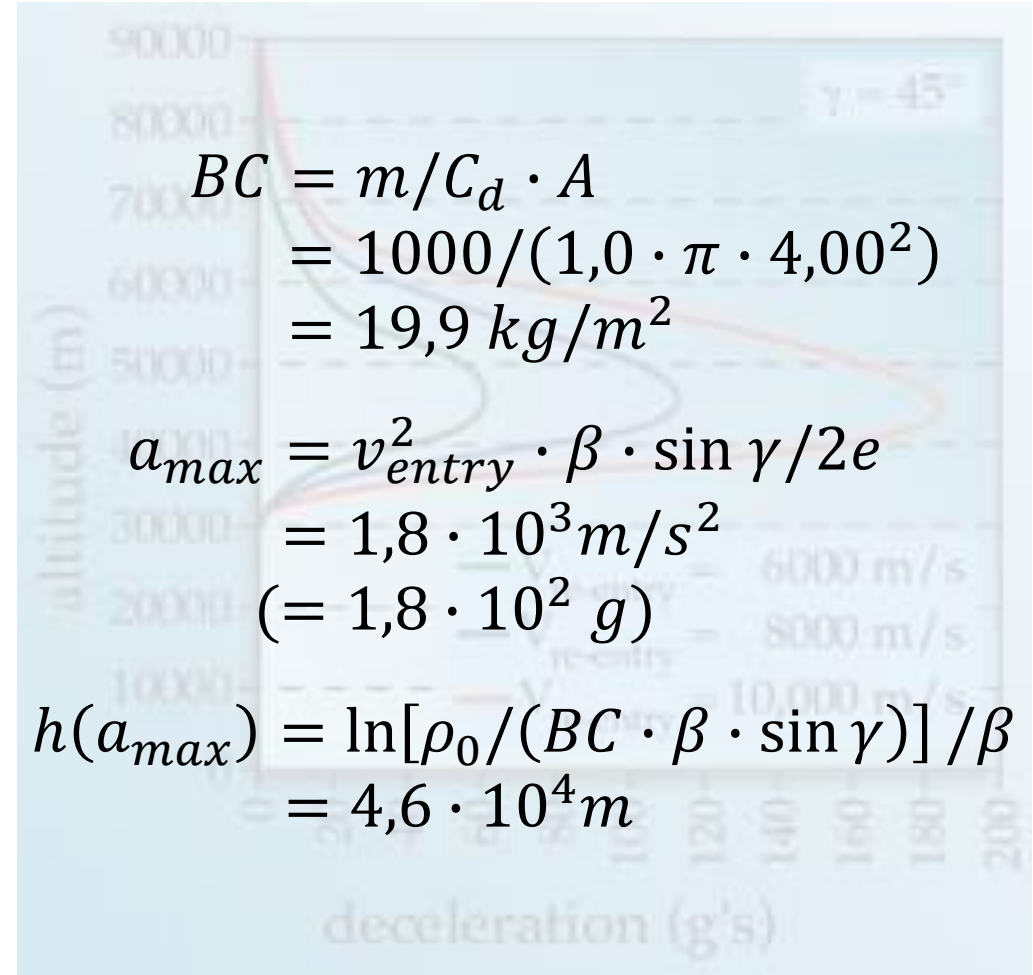
Een lege rakettrap (=cilinder) heeft cirkelvormige basis met $r=4,00\text{m}$ en $m=1000\text{kg}$ en $C_d=1,0$. Hij duikt lengtegewijs de atmosfeer in met $v = 10,000\text{m/s}$. $\gamma = 45^\circ$.

Bereken de BC, a_{max} en $h(a_{max})$

$$\begin{aligned} BC &= m/C_d \cdot A \\ &= 1000/(1,0 \cdot \pi \cdot 4,00^2) \\ &= 19,9 \text{ kg/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_{max} &= v_{entry}^2 \cdot \beta \cdot \sin \gamma / 2e \\ &= 1,8 \cdot 10^3 m/s^2 \\ & (= 1,8 \cdot 10^2 g) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h(a_{max}) &= \ln[\rho_0 / (BC \cdot \beta \cdot \sin \gamma)] / \beta \\ &= 4,6 \cdot 10^4 m \end{aligned}$$

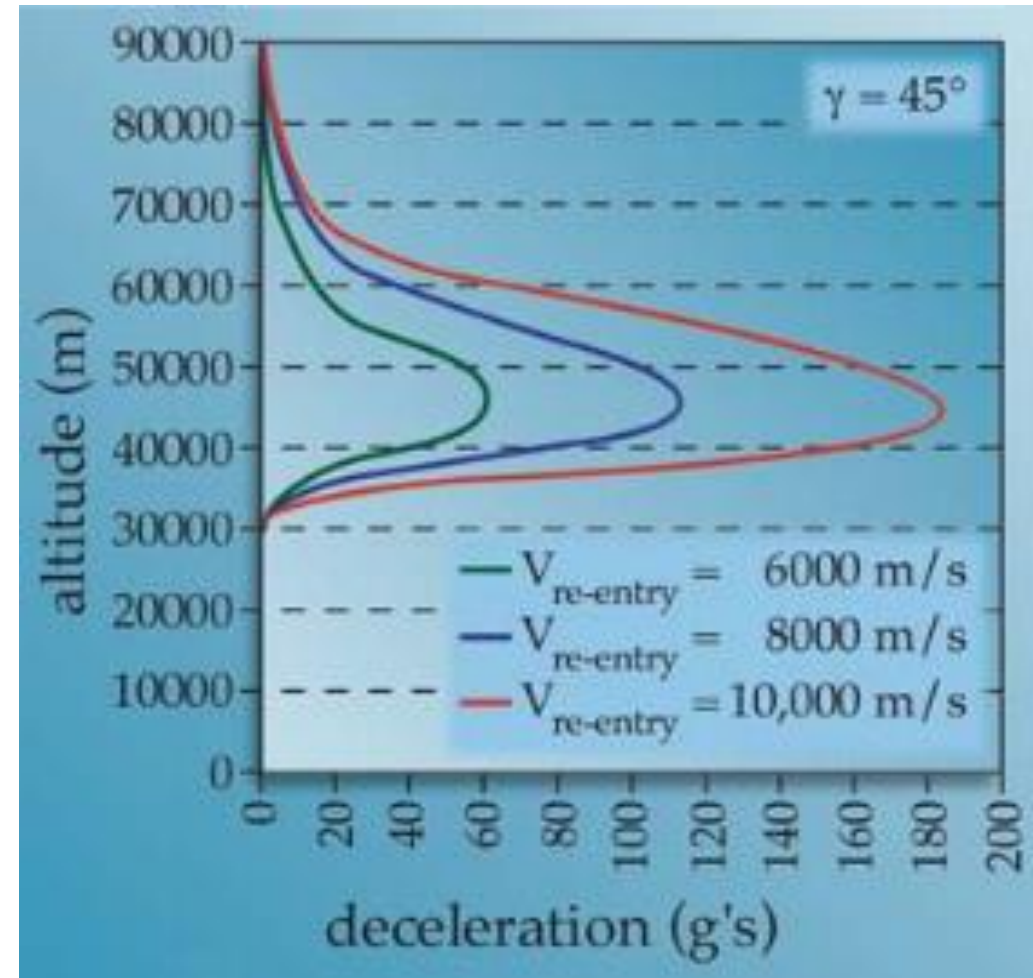


De maximale vertraging en de hoogte ervan vs. 'Entry Flight Path Angle'

Oefening 2

Een rakettrap (BC = $19,9 \text{ kg/m}^2$) duikt de atmosfeer in met een snelheid $v = 8,0 \text{ km/s}$ onder een kleine hoek $\gamma = 15^\circ$.

Bereken a_{max} en $h(a_{max})$.

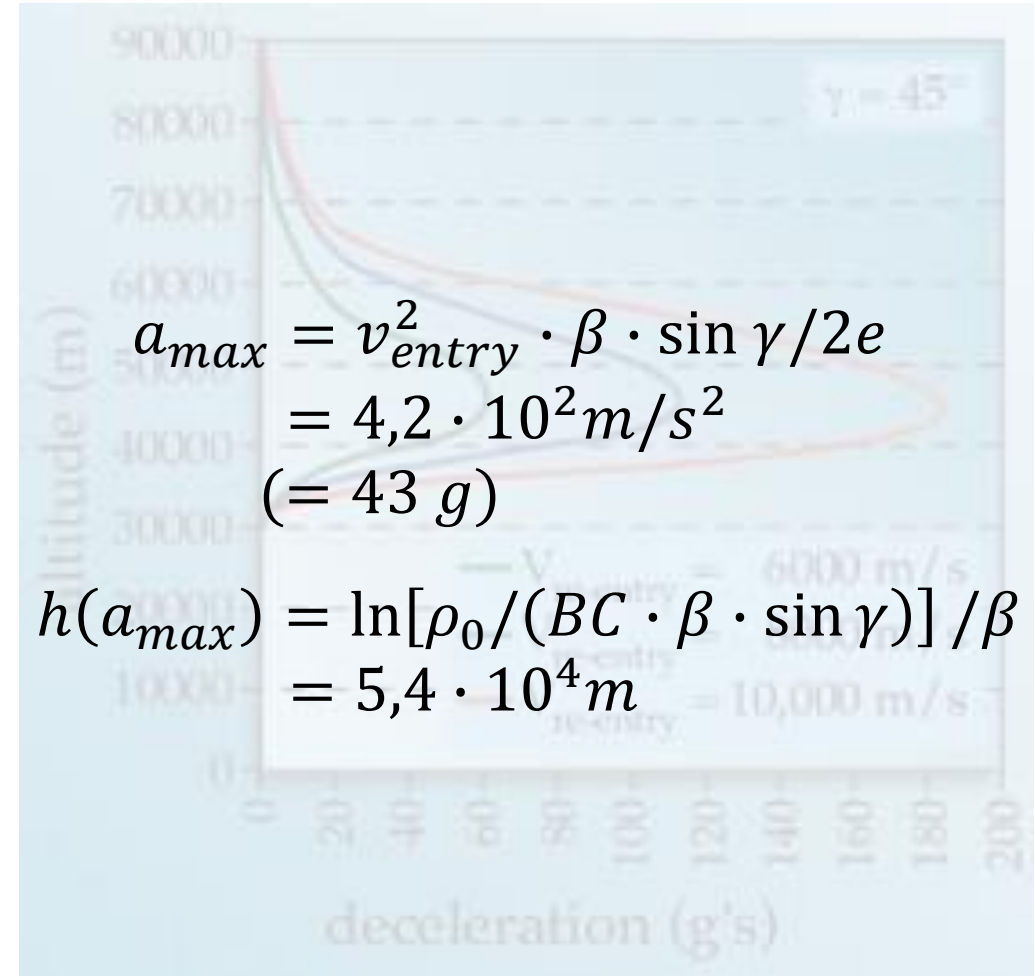


De maximale vertraging en de hoogte ervan vs. 'Entry Flight Path Angle'

Oefening 2

Een rakettrap (BC = 19,9 kg/m²) duikt de atmosfeer in met een snelheid $v = 8,0\text{ km/s}$ onder een kleine hoek $\gamma = 15^\circ$.

Bereken a_{max} en $h(a_{max})$.



Oefening 3

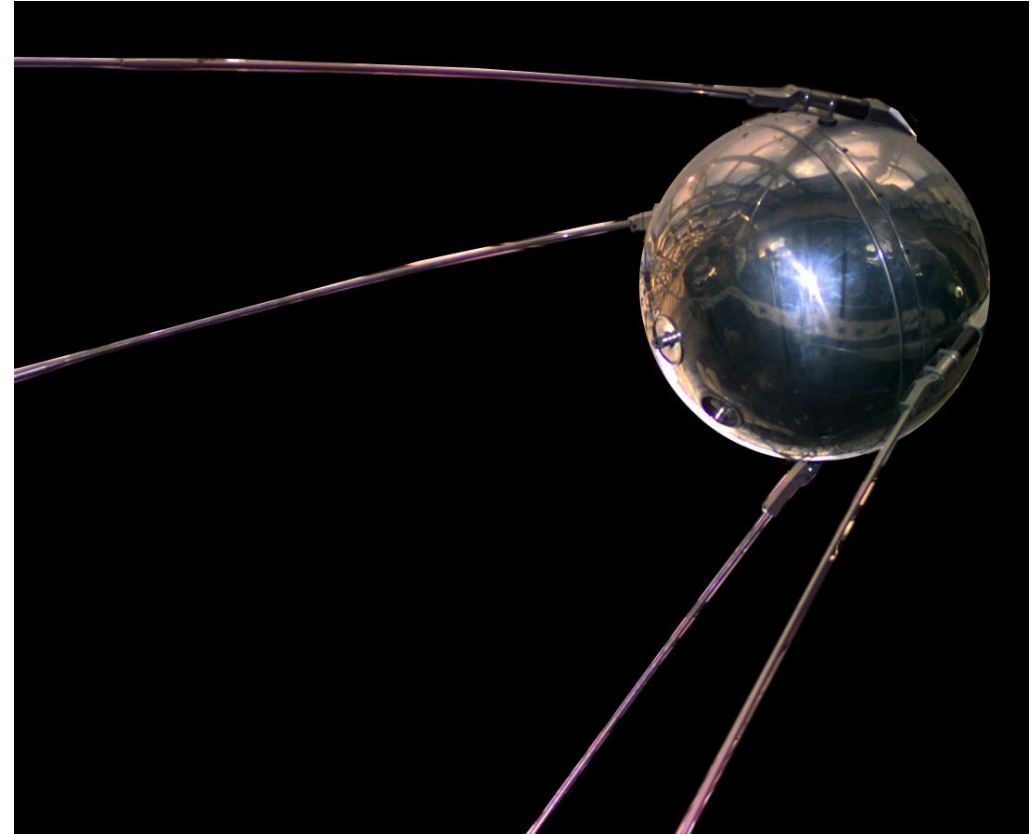
Een bolvormige satelliet zoals Spoetnik 1 draait om de Aarde en duikt de atmosfeer in met

$v = 8,0 \text{ km/s}$ onder een kleine hoek $\gamma = 15^\circ$.

De massa $m = 83 \text{ kg}$, $r = 28,0 \text{ cm}$.

Voor een bol is $C_d = 0,50$.

Bereken de BC, a_{max} en $h(a_{max})$.



Oefening 3

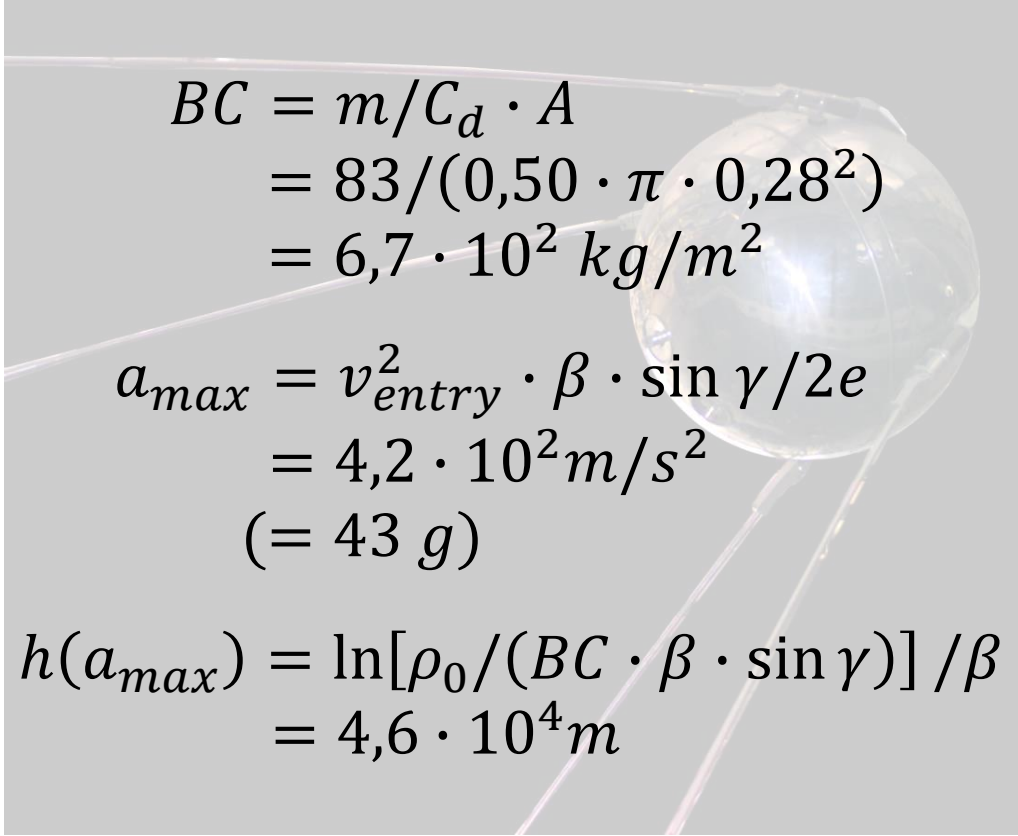
Een bolvormige satelliet zoals Spoetnik 1 draait om de Aarde en duikt de atmosfeer in met

$v = 8,0 \text{ km/s}$ onder een kleine hoek $\gamma = 15^\circ$.

De massa $m = 83 \text{ kg}$, $r = 28,0 \text{ cm}$.

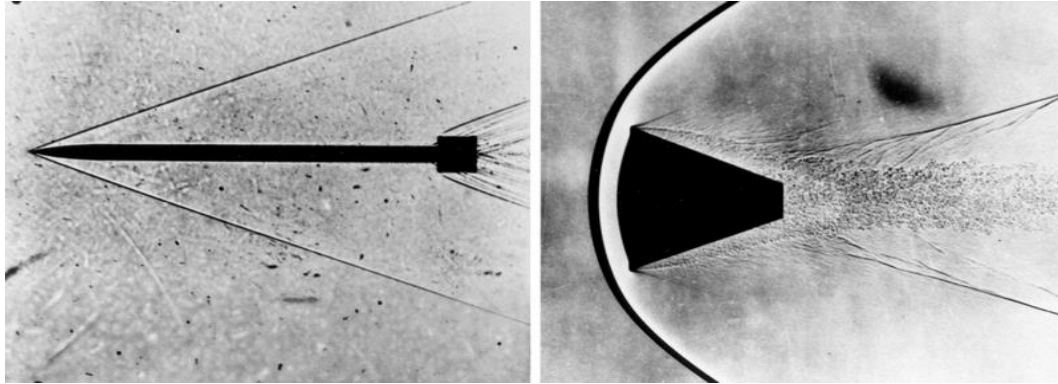
Voor een bol is $C_d = 0,50$.

Bereken de BC , a_{max} en $h(a_{max})$.


$$\begin{aligned} BC &= m/C_d \cdot A \\ &= 83/(0,50 \cdot \pi \cdot 0,28^2) \\ &= 6,7 \cdot 10^2 \text{ kg/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_{max} &= v_{entry}^2 \cdot \beta \cdot \sin \gamma / 2e \\ &= 4,2 \cdot 10^2 \text{ m/s}^2 \\ & (= 43 \text{ g}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h(a_{max}) &= \ln[\rho_0/(BC \cdot \beta \cdot \sin \gamma)] / \beta \\ &= 4,6 \cdot 10^4 \text{ m} \end{aligned}$$



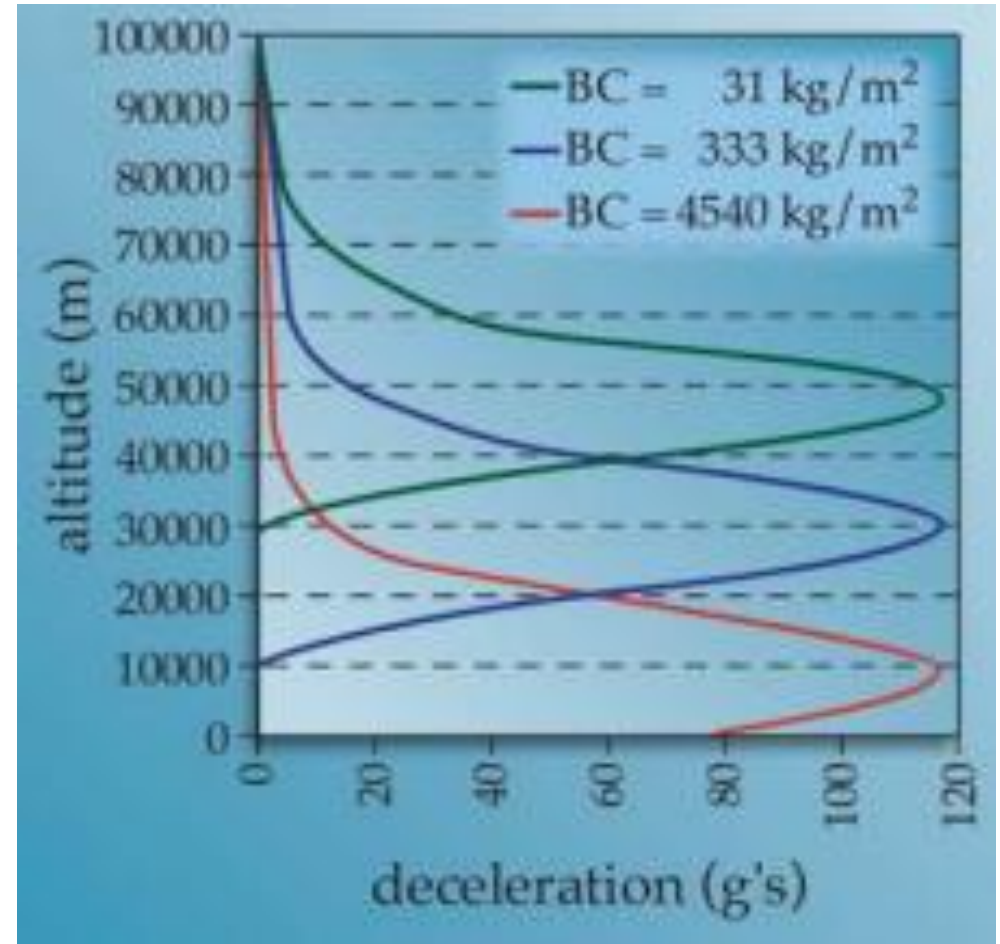
Oefening 4

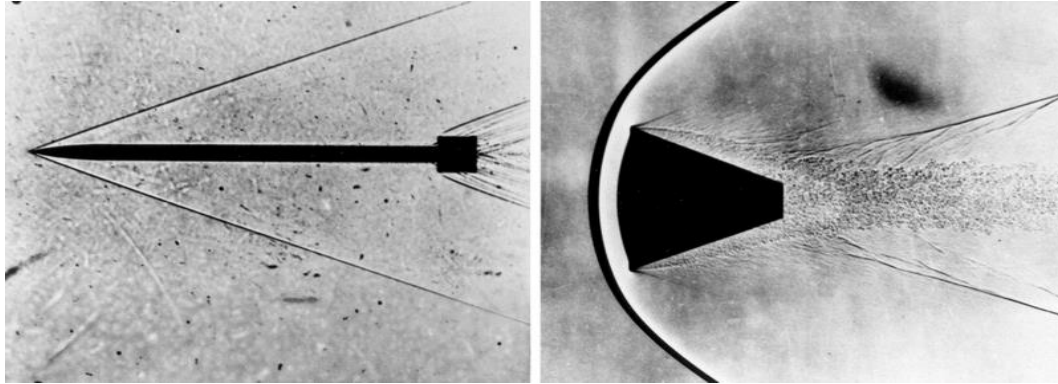
Een onbemande capsule dringt binnen in de atmosfeer met:

een snelheid $v = 8000 \text{ m/s}$ en onder een hoek $\gamma = 45,0^\circ$.

De ballistische coëfficiënt $BC = 333 \text{ kg/m}^2$.

Bereken de a_{max} en $h(a_{max})$.





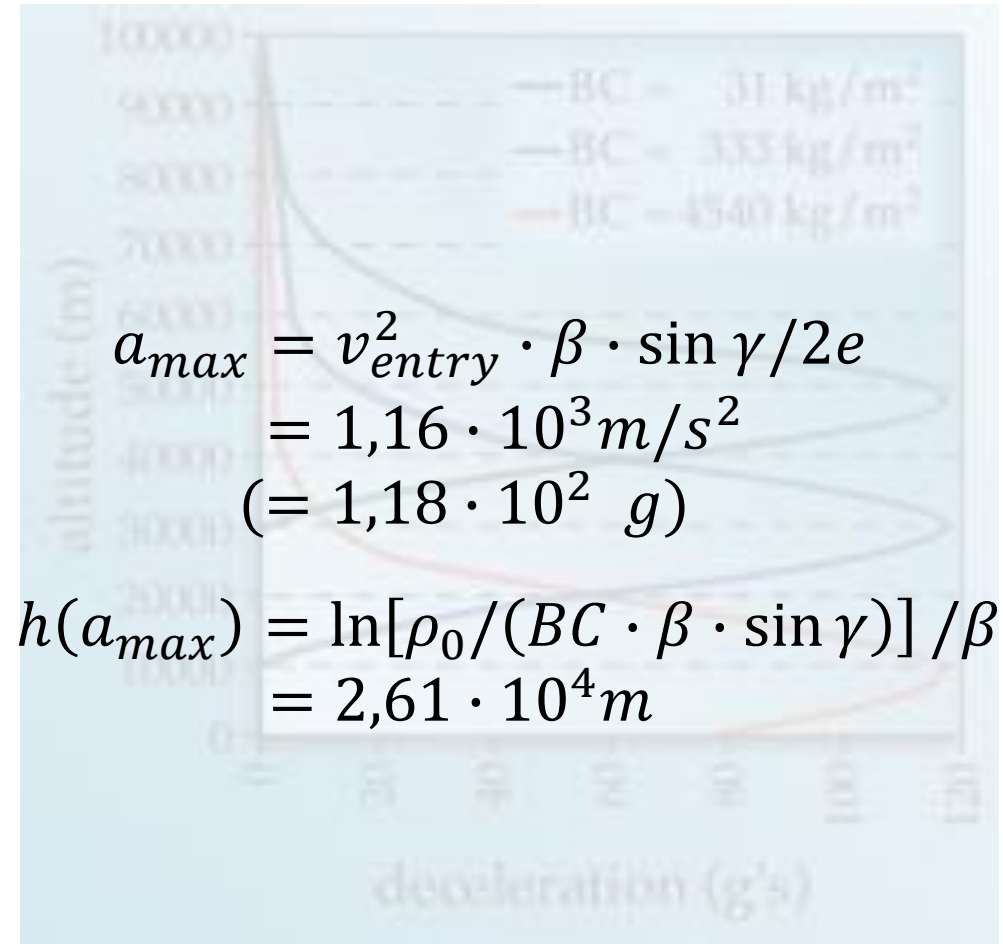
Oefening 4

Een onbemande capsule dringt binnen in de atmosfeer met:

een snelheid $v = 8000 \text{ m/s}$ en onder een hoek $\gamma = 45,0^\circ$.

De ballistische coëfficiënt $BC = 333 \text{ kg/m}^2$.

Bereken de a_{max} en $h(a_{max})$.



Warmteproductie

De potentiële en kinetische energie die wordt omgezet in warmte wanneer een object uit de ruimte de atmosfeer in duikt kan gemakkelijk berekend worden. De fractie daarvan die het object zelf absorbeert (op elk moment) is veel moeilijker te bepalen (en hangt af van vele parameters).

Een empirische formule is:

$$q = 1,83 \cdot 10^{-4} \cdot v^3 \cdot \sqrt{\rho / r_{neus}}$$

Waarin q = warmteproductie (W/m²) v = snelheid (m/s)

ρ = luchtdichtheid (kg/m³)

r_{neus} = kromtestraal van het voorste opp (neus) (m)

Deze empirische formule geeft de warmteproductie als functie van de snelheid van het object en de dichtheid van de lucht. Beide variëren echter met de hoogte. Als we onderzoeken bij welke snelheid de warmteproductie maximaal is vinden we als snelheid:

$$v(q_{max}) \approx 0,846 \cdot v(\text{begin})$$

En met deze snelheid in de vorige formule vinden we q_{max} .

De hoogte waarop de warmteproductie maximaal is verschilt van de hoogte van maximale vertraging:

$$h(q_{max}) = \ln[\rho_0 / (3 \cdot BC \cdot \beta \cdot \sin \gamma)] / \beta$$

Met:

BC = Ballistische coëfficiënt

γ = entry flight path angle (rad)

β = schaalhoogte v/d atmosfeer

(maat voor het dichtheidsprofiel)

$$= 1.39 \cdot 10^{-4} m^{-1}$$

ρ_0 = dichtheid v/d lucht op

zeeniveau = 1.225 kg/m^3

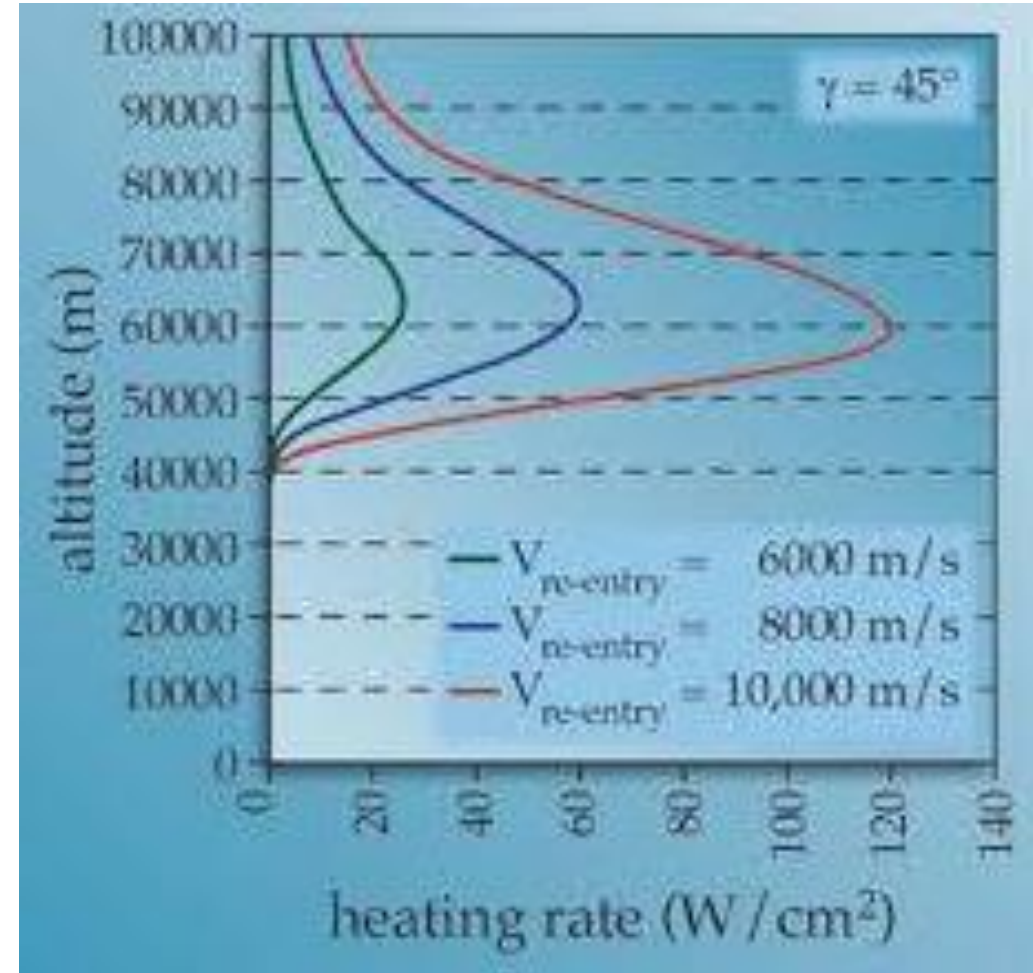
Merk op dat deze hoogte niet afhangt van de beginsnelheid!

De maximale warmteproductie en hoogte ervan ifv. de beginsnelheid.

Oefening 5

Een object ($BC = 0,80 \text{ kg/m}^2$) duikt de atmosfeer in met een snelheid $v = 10000 \text{ m/s}$ onder een hoek $\gamma = 45^\circ$ en $r_{neus} = 2 \text{ m}$.

Bereken $h(q_{max})$ en q_{max} .



De maximale warmteproductie en hoogte ervan ifv. de beginsnelheid.

Oefening 5

Een object ($BC = 0,80 \text{ kg/m}^2$) duikt de atmosfeer in met een snelheid $v = 10000 \text{ m/s}$ onder een hoek $\gamma = 45^\circ$ en $r_{neus} = 2 \text{ m}$.

Bereken $h(q_{max})$ en q_{max} .

$$v(q_{max}) = 0,846 \cdot 10000 \\ = 8460 \text{ m/s}$$

$$h(q_{max}) = \ln[\rho_0 / (3 \cdot BC \cdot \beta \cdot \sin \gamma)] / \beta \\ = 6,15 \cdot 10^4 \text{ m}$$

Standaard atmosfeer 1976:

Voor $h = 61,5 \text{ km}$ geldt $\rho = 2,38 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^3$

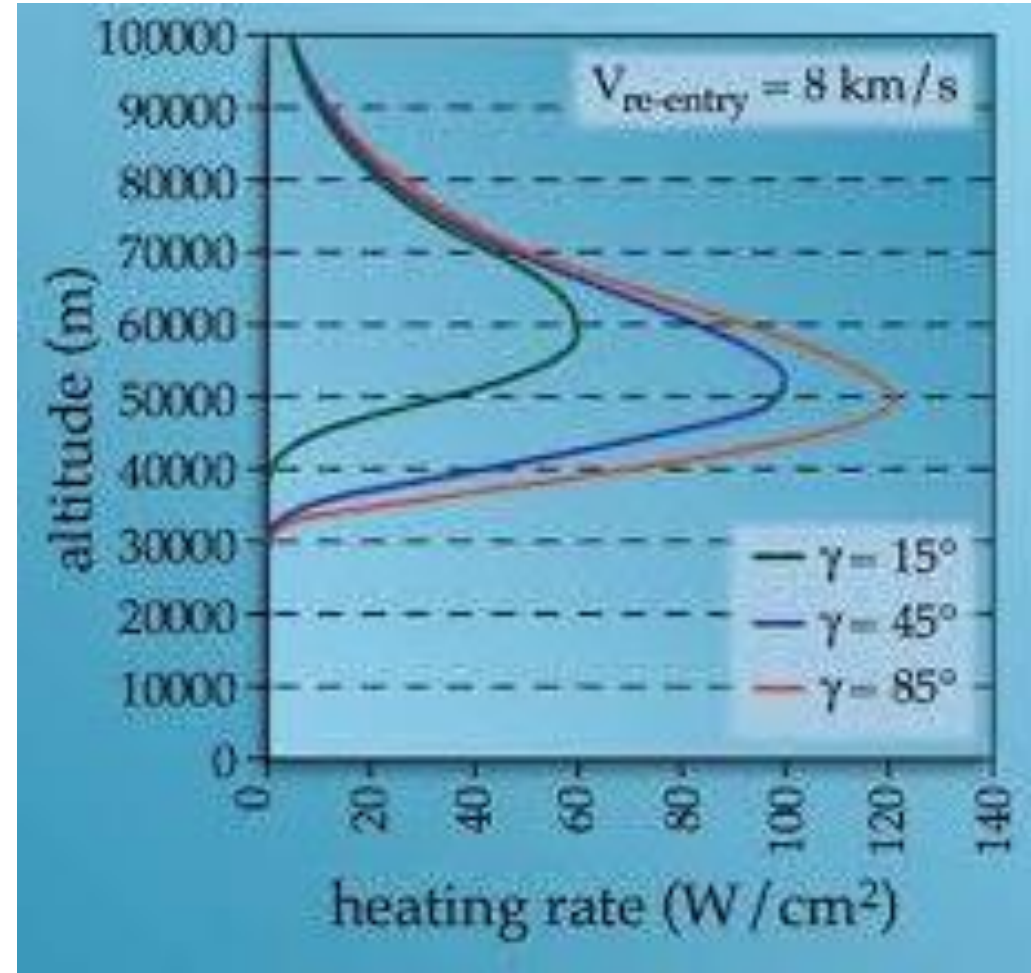
$$q_{max} = 1,83 \cdot 10^{-4} \cdot 8460^3 \cdot \sqrt{2,38 \cdot 10^{-4} / 2} \\ = 1,21 \cdot 10^6 \text{ W/m}^2$$

De maximale warmteproductie en hoogte ervan ifv. de 'Entry Flight Path Angle'.

Oefening 6

Een object ($BC = 2,60 \text{ kg/m}^2$) duikt de atmosfeer in met een snelheid $v = 8000 \text{ m/s}$ onder een hoek $\gamma = 45^\circ$ en $r_{neus} = 2 \text{ m}$.

Bereken $h(q_{max})$ en q_{max} .

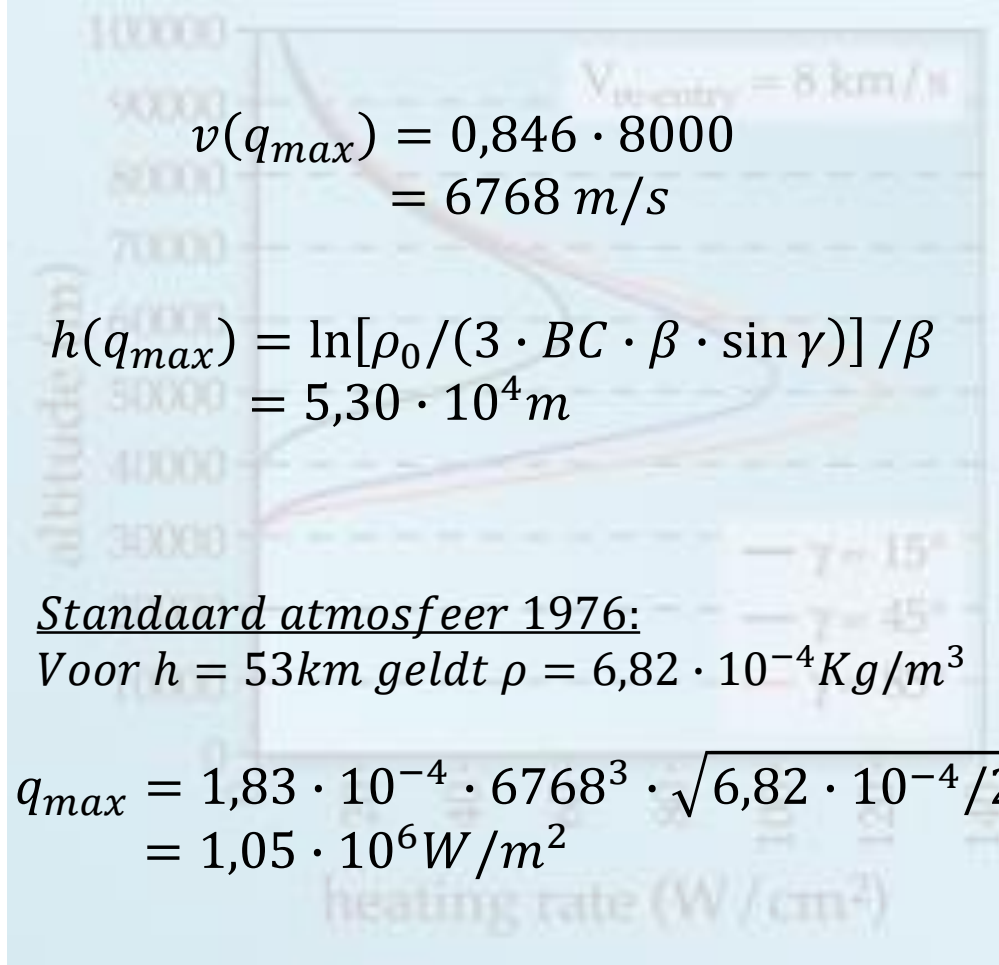


De maximale warmteproductie en hoogte ervan ifv. de 'Entry Flight Path Angle'.

Oefening 6

Een object ($BC = 2,60 \text{ kg/m}^2$) duikt de atmosfeer in met een snelheid $v = 8000 \text{ m/s}$ onder een hoek $\gamma = 45^\circ$ en $r_{neus} = 2 \text{ m}$.

Bereken $h(q_{max})$ en q_{max} .



The background image is a graph with 'altitude (m)' on the y-axis (ranging from 30000 to 100000) and 'heating rate (W/cm²)' on the x-axis. It shows several curves for different entry angles γ . A specific point on one of the curves is highlighted with the calculation for $v(q_{max})$.

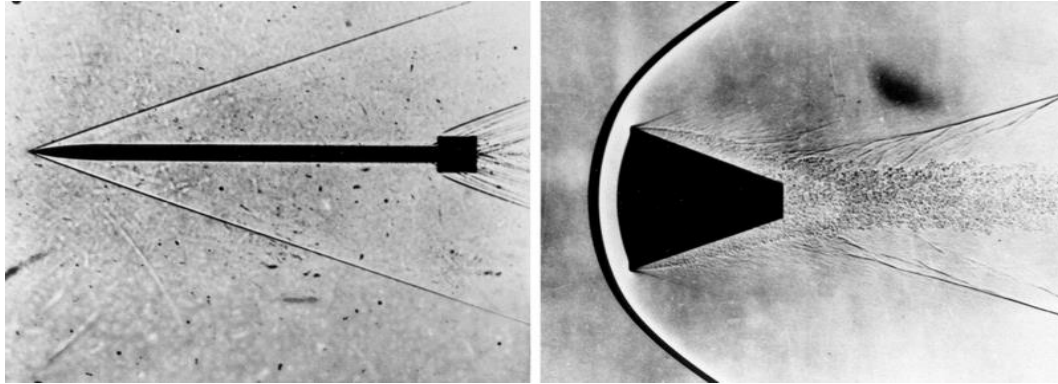
$$v(q_{max}) = 0,846 \cdot 8000 = 6768 \text{ m/s}$$

$$h(q_{max}) = \ln[\rho_0 / (3 \cdot BC \cdot \beta \cdot \sin \gamma)] / \beta = 5,30 \cdot 10^4 \text{ m}$$

Standaard atmosfeer 1976:

Voor $h = 53 \text{ km}$ geldt $\rho = 6,82 \cdot 10^{-4} \text{ Kg/m}^3$

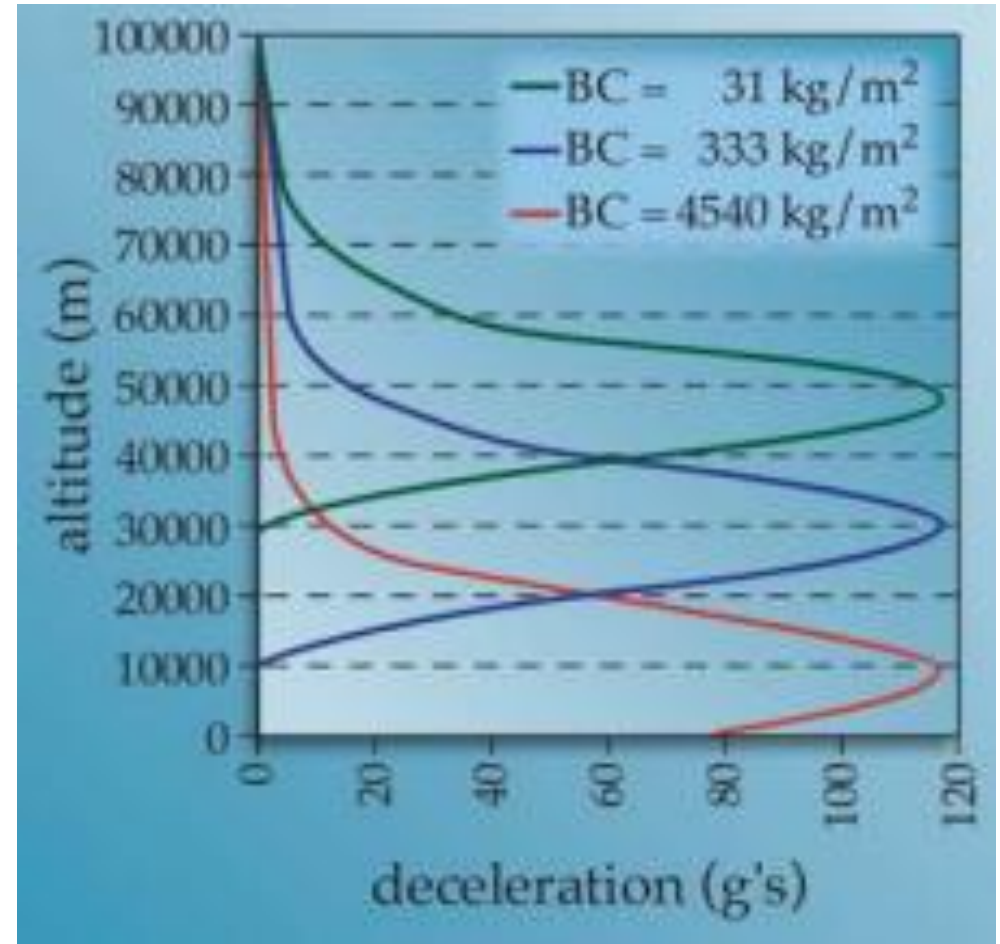
$$q_{max} = 1,83 \cdot 10^{-4} \cdot 6768^3 \cdot \sqrt{6,82 \cdot 10^{-4} / 2} = 1,05 \cdot 10^6 \text{ W/m}^2$$



De ballistische coëfficiënt:

$$BC = m / c_d \cdot A$$

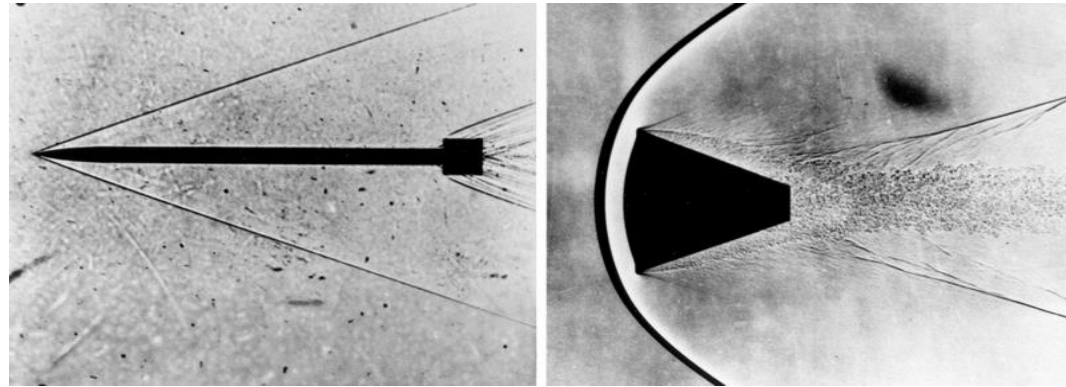
is groot voor zware en compacte objecten. Zij zullen diep i/d atmosfeer doordringen voor ze afremmen en daarbij veel warmte produceren.



Oefening 7

Een object ($\rho = 333 \text{ kg/m}^3$) duikt de atmosfeer in met een snelheid $v = 8000 \text{ m/s}$ onder een hoek $\gamma = 5^\circ$ en $r_{neus} = 2 \text{ m}$.

Bereken $h(q_{max})$ en q_{max} .



Opmerking:

We hebben gezien dat gestroomlijnde objecten dezelfde maximale vertraging ondergaan als stompe, maar op veel lagere hoogte. Daardoor zal ook de maximale warmteproductie veel groter zijn. Bovendien zal bij gestroomlijnde objecten de schokgolf vastzitten a/h object wat de absorptie van warmte vergemakkelijkt.

Oefening 7

Een object ($BC = 333 \text{ kg/m}^2$) duikt de atmosfeer in met een snelheid $v = 8000 \text{ m/s}$ onder een hoek $\gamma = 5^\circ$ en $r_{neus} = 2 \text{ m}$.

Bereken $h(q_{max})$ en q_{max} .

$$\begin{aligned} v(q_{max}) &= 0,846 \cdot 8000 \\ &= 6768 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Standaard atmosfeer 1976:

Voor $h = 33,2 \text{ km}$ geldt $\rho = 1,09 \cdot 10^{-2} \text{ Kg/m}^3$

$$\begin{aligned} h(q_{max}) &= \ln[\rho_0 / (3 \cdot BC \cdot \beta \cdot \sin \gamma)] / \beta \\ &= 33,2 \cdot 10^4 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_{max} &= 1,83 \cdot 10^{-4} \cdot 6768^3 \cdot \sqrt{1,09 \cdot 10^{-2} / 2} \\ &= 4,19 \cdot 10^6 \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

Aanbevolen lectuur

- *Understanding Space, an introduction to Astrobautics. Jerry Jon Sellers. 1994. Mc Graw-Hill. ISBN 0-07-057027-5*

Aanbevolen videomateriaal

https://www.youtube.com/watch?v=c_bkY7-9c8s (stokoud, maar goed!)

https://www.youtube.com/watch?v=uvo_qnFAOis

<https://www.youtube.com/watch?v=dhzO9LWepyY>