

Introduction

Une « météoroïde » est une petite particule (de taille typiquement inférieure à 1 m) provenant d'une comète ou d'un astéroïde. Une « météoroïde » qui s'écrase au sol s'appelle une météorite.

Dans la nuit du 17 janvier 2009, de nombreuses personnes près de la mer Baltique ont vu la traînée lumineuse ou boule de feu d'une météoroïde traversant l'atmosphère de la Terre. En Suède, une caméra de surveillance a enregistré une vidéo de l'événement (voir Fig. 1.1(a)). A partir de ces images et de témoignages, il fut possible d'affiner la zone d'impact, et six semaines plus tard une météorite d'une masse de 0,025 kg fut trouvée dans les environs de la ville de Maribo dans le sud du Danemark. Les mesures sur la météorite, désormais nommée Maribo, et son orbite dans le ciel ont montré des résultats intéressants. Sa vitesse d'entrée dans l'atmosphère était exceptionnellement élevée. Son âge, _____ ans, montre qu'elle a été formée peu de temps après la naissance du système solaire. La météorite Maribo provient peut-être de la comète Encke.

La vitesse de Maribo

La boule de feu se déplaçait vers l'ouest, cap 285° par rapport au nord, vers le lieu où la météorite a été trouvée par la suite, comme indiqué sur la figure 1.1. La météorite a été trouvée à une distance de 195 km de la caméra de surveillance, dans une direction faisant un angle de 230° par rapport au nord.

1.1	Utiliser ces informations et les données de la figure 1.1 pour calculer la vitesse moyenne de Maribo durant l'intervalle de temps entre les images 155 et 161. On négligera la courbure de la Terre et la force gravitationnelle s'exerçant sur la météorite.	1.3
-----	---	-----

A travers l'atmosphère, la fusion ?

La friction de l'air sur une météoroïde se déplaçant dans la haute atmosphère dépend d'une manière complexe de la forme et de la vitesse de la météorite, ainsi que de la température et de la densité de l'atmosphère. Une approximation raisonnable de la force de frottement dans la haute atmosphère est donnée par l'expression _____, où _____ est une constante, _____ la masse volumique de l'atmosphère, _____ la surface projetée de la météorite dans le plan perpendiculaire à sa vitesse, et _____ sa vitesse.

Les hypothèses simplificatrices suivantes sont faites pour analyser le météoroïde: l'objet entrant dans l'atmosphère était une sphère de masse _____, de rayon _____, de température _____, et de vitesse _____. La densité de l'atmosphère est constante et prise égale à sa valeur à 40 km au-dessus de la surface de la Terre, soit _____, et le coefficient de frottement vaut _____.

1.2a	Estimer le temps nécessaire pour que la vitesse de la météorite diminue de 10 %, de _____ à _____, une fois entrée dans l'atmosphère. On négligera la force gravitationnelle agissant sur le météoroïde, et on supposera que la masse et la forme du météoroïde ne varient pas.	0.7
1.2b	Calculez le rapport entre l'énergie cinétique _____ de la météorite entrant dans l'atmosphère et l'énergie _____ nécessaire pour la faire fondre complètement.	0.3

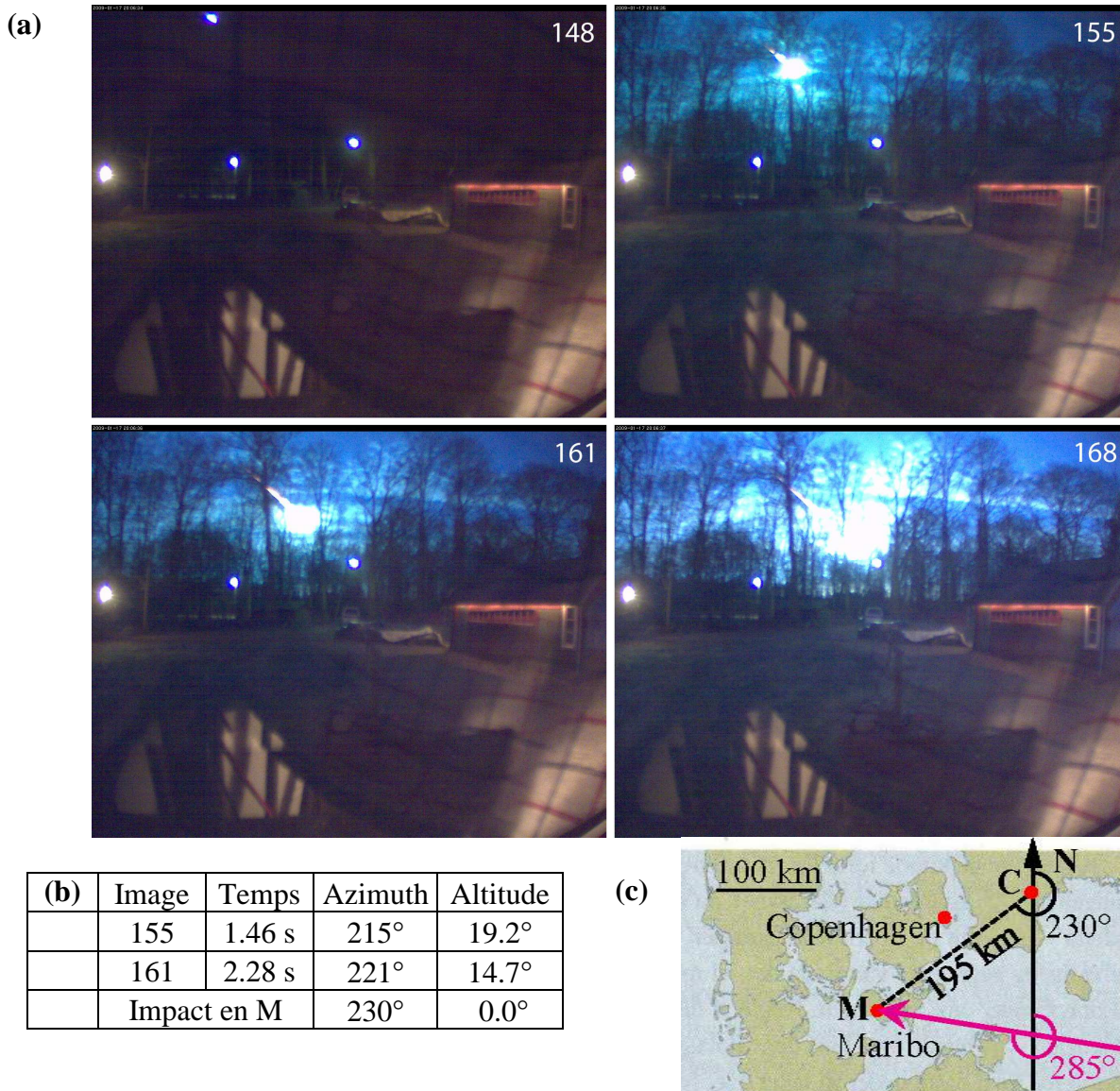


Figure 1.1 (a) Une série d'images enregistrées par la caméra de surveillance en Suède, montrant le mouvement de Maribo, boule de feu traversant l'atmosphère. (b) Les données provenant de deux images indiquant l'heure, la direction (azimut) en degrés, et la hauteur au-dessus de l'horizon (altitude) en degrés. L'azimut est l'angle (mesuré dans le sens horaire) entre le nord et une direction dans le plan horizontal, et l'"altitude" est l'angle entre l'horizon et la direction d'observation. (c) Schéma des directions de la trajectoire (flèche magenta) de Maribo par rapport au nord (N) et du site d'atterrissage (M) au Danemark vu par la caméra (C) en Suède.

Elévation de température de Maribo lors de sa chute dans l'atmosphère

Lorsque la météorite pierreuse Maribo entra dans l'atmosphère à une vitesse supersonique, elle ressemblait à une boule de feu parce que l'air environnant était lumineux. Néanmoins, seule la couche la plus externe de Maribo fut chauffée. Supposons que Maribo est une sphère homogène, de masse volumique , de capacité thermique , et de conductivité thermique (pour les valeurs, voir la fiche technique). De plus, à son entrée dans l'atmosphère, elle avait une température . Lors de sa chute dans l'atmosphère, sa température de surface est constante en raison de la friction de l'air ; l'intérieur de la météorite s'échauffe ainsi progressivement.

Après un temps de chute t dans l'atmosphère, une enveloppe extérieure de Maribo, d'épaisseur δ , est chauffée à une température sensiblement supérieure à T_0 . Cette épaisseur peut être estimée par une analyse dimensionnelle comme le simple produit de grandeurs thermodynamiques :

1.3a	Déterminer par analyse dimensionnelle (unités) la valeur des quatre paramètres δ , T_0 , ρ et α .	0.6
1.3b	Calculer l'épaisseur δ après un temps de chute t , et déterminer le ratio δ / T_0 .	0.4

L'âge de Maribo

Les propriétés chimiques des isotopes radioactifs peuvent être différentes, de sorte que lors de la cristallisation des minéraux dans une météorite donnée, certains minéraux auront une teneur élevée en un isotope radioactif spécifique et une faible teneur en produits de désintégration et d'autres le contraire. Cet effet peut être utilisé pour déterminer l'âge d'une météorite par la datation radiométrique de ses minéraux radioactifs.

À titre d'exemple, nous étudions l'isotope ^{87}Rb (élément no. 37), qui se désintègre en isotope stable ^{87}Sr stable (élément no. 38) avec un temps de demi-vie $t_{1/2}$ ans. L'isotope ^{86}Sr est stable. Au moment de la cristallisation, le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ était identique pour tous les minéraux, tandis que le rapport $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ était différent. Au cours du temps, la quantité de ^{87}Rb diminue par désintégration, et de ce fait la quantité de ^{87}Sr augmente. En conséquence, le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ sera différent aujourd'hui. Dans la figure 1.2(a), les points de la ligne horizontale se réfèrent au rapport $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ dans différents minéraux à l'instant où ils ont cristallisé.

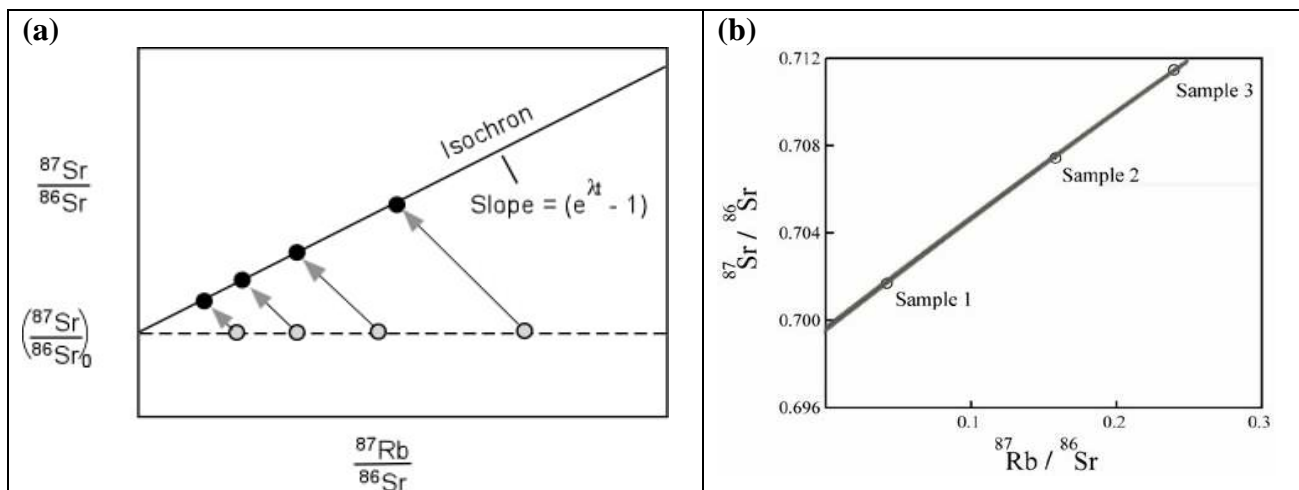


Figure 1.2 (a) Le ratio $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de différents minéraux à l'instant $t = 0$ de cristallisation (cercles ouverts) et à l'instant t (cercles pleins). **(b)** La droite isochrone pour trois échantillons de trois minéraux différents pris d'une météorite à l'instant présent t

1.4a	Ecrire l'équation de la réaction de désintégration de ^{87}Rb en ^{87}Sr .	0.3
1.4b	Montrer que le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ tracé en fonction du rapport $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ à l'instant présent dans différents échantillons minéraux d'une même météorite forme une ligne droite, appelée droite isochrone, de pente $(e^{\lambda t} - 1)$. Ici t est le temps depuis la	0.7

	formation des minéraux, tandis que λ est la constante de désintégration, inversement proportionnelle au temps de demi-vie $T_{1/2}$.	
1.4c	Déterminer l'âge t de la météorite en utilisant la droite isochrone de la figure 1.2(b).	0.4

La comète Encke, d'où Maribo peut provenir

Au cours de son orbite autour du soleil, les distances maximale et minimale entre la comète Encke et le soleil sont respectivement r_{\max} et r_{\min} .

1.5	Calculer la période orbitale P de la comète Encke.	0.6
-----	--	-----

Conséquences de l'impact d'un astéroïde sur la Terre

Il y a 65 millions d'années, la Terre a été frappée par un énorme astéroïde de masse volumique ρ , de rayon R , avec une vitesse finale de v .

Cet impact a provoqué l'extinction de la plupart des formes de vie sur Terre et la formation de l'énorme cratère de Chicxulub. Supposons qu'un astéroïde identique frappe la Terre aujourd'hui dans une collision complètement inélastique. On utilisera le fait que le moment d'inertie de la Terre est 0.83 fois celui d'une sphère homogène de même masse et de même rayon (le moment d'inertie d'une sphère homogène de masse M et de rayon R est $\frac{2}{5}MR^2$). On négligera tout changement dans l'orbite de la Terre.

1.6a	En supposant que l'astéroïde frappe le Pôle Nord, trouver l'angle maximal dont a tourné l'axe de la Terre après l'impact.	0.7
1.6b	En supposant que l'astéroïde frappe l'équateur selon une direction radiale, trouver la variation maximale ΔP de la période de révolution de la Terre après l'impact.	0.7
1.6c	En supposant que l'astéroïde frappe l'équateur selon une direction tangente à la Terre et située dans le plan équatorial, trouver la variation maximale ΔP de la période de révolution de la Terre après l'impact.	0.7

Vitesse d'impact maximale

Considérons un corps céleste, lié gravitationnellement au système solaire, qui percute la surface de la Terre avec une vitesse v . On négligera l'effet initial du champ gravitationnel de la Terre sur ce corps. On ne tiendra pas compte de la friction dans l'atmosphère, de l'effet des autres corps célestes et de la rotation de la Terre.

1.7	Calculer la plus grande valeur possible v_{\max} de v .	1.6
-----	---	-----

Introduction

A meteoroid is a small particle (typically smaller than 1 m) from a comet or an asteroid. A meteoroid that impacts the ground is called a meteorite.

On the night of 17 January 2009 many people near the Baltic Sea saw the glowing trail or fireball of a meteoroid falling through the atmosphere of the Earth. In Sweden a surveillance camera recorded a video of the event, see Fig. 1.1(a). From these pictures and eyewitness accounts it was possible to narrow down the impact area, and six weeks later a meteorite with the mass 0.025 kg was found in the vicinity of the town Maribo in southern Denmark. Measurements on the meteorite, now named Maribo, and its orbit in the sky showed interesting results. Its speed when entering the atmosphere had been exceptionally high. Its age, year, shows that it had been formed shortly after the birth of the solar system. The Maribo meteorite is possibly a part of Comet Encke.

The speed of Maribo

The fireball was moving in westerly direction, heading 285° relative to north, toward the location where the meteorite was subsequently found, as sketched in Fig. 1.1. The meteorite was found at a distance 195 km from the surveillance camera in the direction 230° relative to north.

1.1	Use this and the data in Fig. 1.1 to calculate the average speed of Maribo in the time interval between frames 155 and 161. The curvature of the Earth and the gravitational force on the meteoroid can both be neglected.	1.3
-----	--	-----

Through the atmosphere and melting?

The friction from the air on a meteoroid moving in the higher atmosphere depends in a complicated way on the shape and velocity of the meteoroid, and on the temperature and density of the atmosphere. As a reasonable approximation the friction force in the upper atmosphere is given by the expression $F_f = k \rho A v^2$, where k is a constant, ρ the density of the atmosphere, A the projected cross-section area of the meteorite, and v its speed.

The following simplifying assumptions are made to analyze the meteoroid: The object entering the atmosphere was a sphere of mass m , radius r , temperature T , and speed v . The density of the atmosphere is constant (its value 40 km above the surface of the Earth), ρ , and the friction coefficient is k .

1.2a	Estimate how long time after entering the atmosphere it takes the meteoroid to have its speed reduced by 10 % from v_0 to $0.9v_0$. You can neglect the gravitational force on the meteoroid and assume, that it maintains its mass and shape.	0.7
1.2b	Calculate how many times larger the kinetic energy of the meteoroid entering the atmosphere is than the energy necessary for melting it completely (see data sheet).	0.3

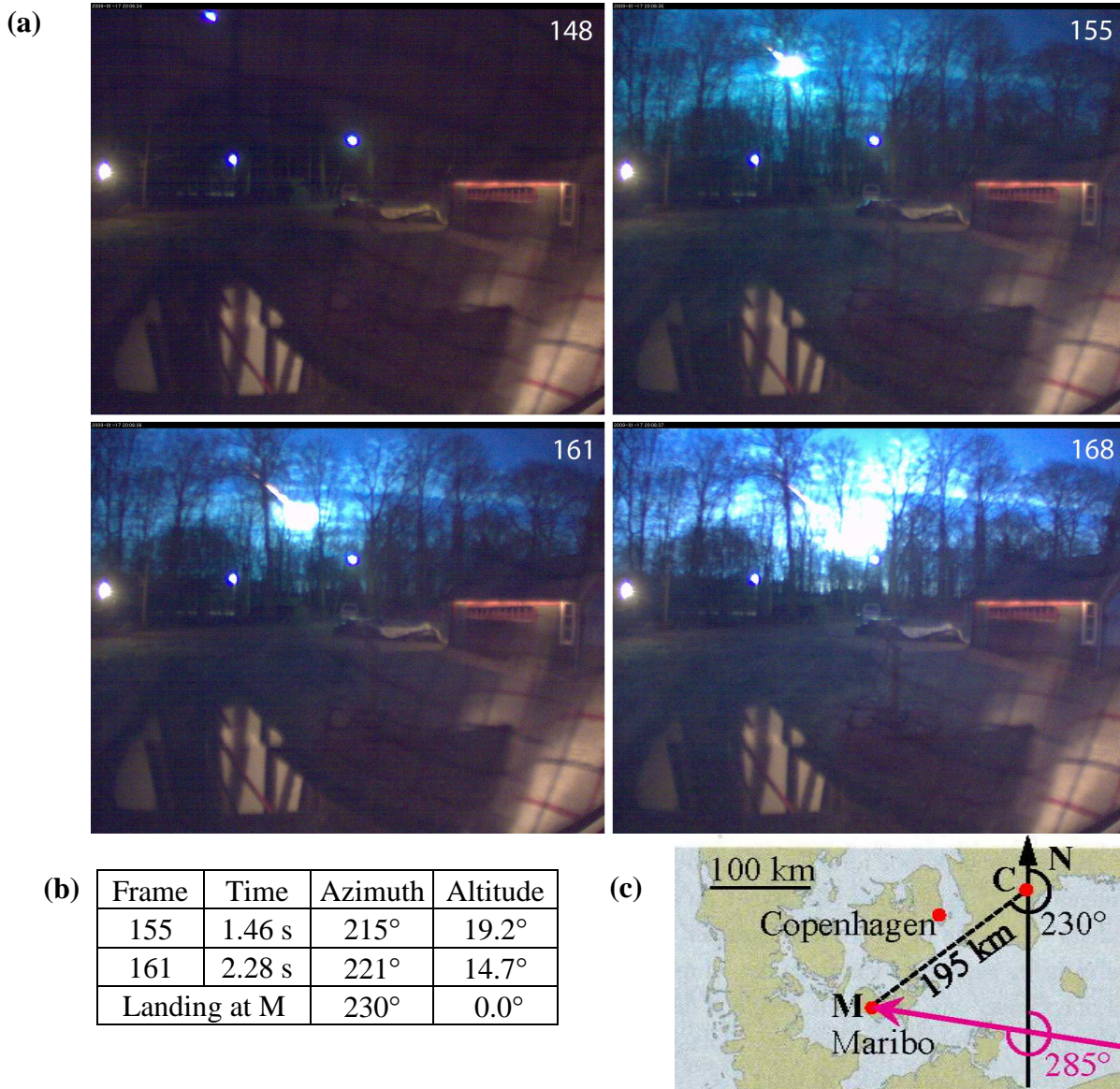


Figure 1.1 (a) Azimuth is the clockwise angular position from north in the horizontal plane, and altitude is the angular position above the horizon. A series of frames recorded by the surveillance camera in Sweden, showing the motion of Maribo as a fireball on its way down through the atmosphere. (b) The data from two frames indicating the time, the direction (azimuth) in degrees, as seen by the camera (C), and the height above the horizon (altitude) in degrees. (c) Sketch of the directions of the path (magenta arrow) of Maribo relative to north (N) and of the landing site (M) in Denmark as seen by the camera (C).

Heating of Maribo during its fall in the atmosphere

When the stony meteoroid Maribo entered the atmosphere at supersonic speed it appeared as a fireball because the surrounding air was glowing. Nevertheless, only the outermost layer of Maribo was heated. Assume that Maribo is a homogenous sphere with density ρ , specific heat capacity c_p , and thermal conductivity k (for values see the data sheet). Furthermore, when entering the atmosphere, it had the temperature T_0 . While falling through the atmosphere its surface temperature was constant T_s due to the air friction, thus gradually heating up the interior.

After falling a time t in the atmosphere, an outer shell of Maribo of thickness δ will have been heated to a temperature significantly larger than T_0 . This thickness can be estimated by dimensional analysis as the simple product of powers of the thermodynamic parameters: $\delta = k \cdot t^a \cdot T_0^b \cdot \rho^c \cdot \kappa^d$.

1.3a	Determine by dimensional (unit) analysis the value of the four powers a , b , c , and d .	0.6
1.3b	Calculate the thickness δ after a fall time t , and determine the ratio δ / t .	0.4

The age of a meteorite

The chemical properties of radioactive elements may be different, so during the crystallization of the minerals in a given meteorite, some minerals will have a high content of a specific radioactive element and others a low content. This difference can be used to determine the age of a meteorite by radiometric dating of its radioactive minerals.

As a specific example, we study the isotope ^{87}Rb (element no. 37), which decays into the stable isotope ^{87}Sr (element no. 38) with a half-life of 4.88×10^{10} year, relative to the stable isotope ^{86}Sr . At the time of crystallization the ratio $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ was identical for all minerals, while the ratio $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ was different. As time passes on, the amount of ^{87}Rb decreases by decay, while consequently the amount of ^{87}Sr increases. As a result, the ratio $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ will be different today. In Fig. 1.2(a), the points on the horizontal line refer to the ratio $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ in different minerals at the time, when they are crystallized.

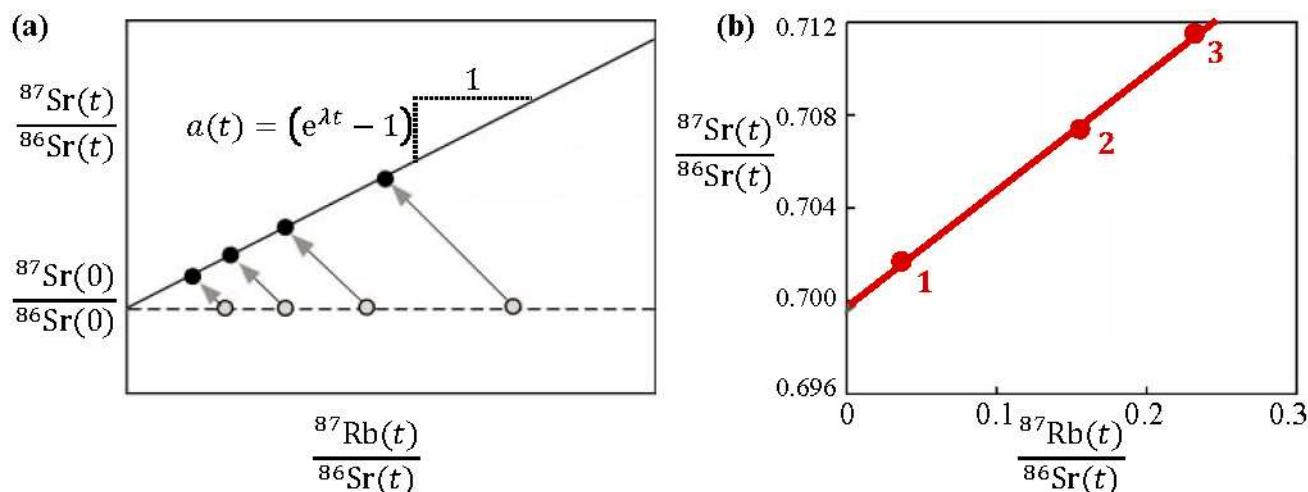


Figure 1.2 (a) The ratio $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in different minerals at the time of crystallization (open circles) and at present time (filled circles). (b) The isochron-line for three different mineral samples taken from a meteorite at present time.

1.4a	Write down the decay scheme for the transformation of ^{87}Rb to ^{87}Sr .	0.3
1.4b	Show that the present-time ratio $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ plotted versus the present-time ratio $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ in different mineral samples from the same meteorite forms a straight line, the so-called isochron-line, with slope λt . Here t is the time since the formation of the minerals, while λ is the decay constant inversely proportional to half-life $T_{1/2}$.	0.7
1.4c	Determine the age t of the meteorite using the isochron-line of Fig. 1.2(b).	0.4

Comet Encke, from which Maribo may originate

In its orbit around the Sun, the minimum and maximum distances between comet Encke and the Sun are _____ and _____, respectively.

1.5	Calculate the orbital period _____ of comet Encke.	0.6
-----	--	-----

Consequences of an asteroid impact on Earth

65 million years ago Earth was hit by a huge asteroid with density _____, radius _____, and final speed of _____. This impact resulted in the extermination of most of the life on Earth and the formation of the enormous Chicxulub Crater. Assume that an identical asteroid would hit Earth today in a completely inelastic collision, and use the fact that the moment of inertia of Earth is 0.83 times that for a homogeneous sphere of the same mass and radius. The moment of inertia of a homogeneous sphere with mass _____ and radius _____ is _____. Neglect any changes in the orbit of the Earth.

1.6a	Let the asteroid hit the North Pole. Find the maximum change in angular orientation of the axis of Earth after the impact.	0.7
1.6b	Let the asteroid hit the Equator in a radial impact. Find the change _____ in the duration of one revolution of Earth after the impact.	0.7
1.6c	Let the asteroid hit the Equator in a tangential impact in the equatorial plane. Find the change _____ in the duration of one revolution of Earth after the impact.	0.7

Maximum impact speed

Consider a celestial body, gravitationally bound in the solar system, which impacts the surface of Earth with a speed _____. Initially the effect of the gravitational field of the Earth on the body can be neglected. Disregard the friction in the atmosphere, the effect of other celestial bodies, and the rotation of the Earth.

1.7	Calculate _____, the largest possible value of _____.	1.6
-----	---	-----