

Časopis pro pěstování matematiky a fysiky

František Link

Exploration météorique de la haute atmosphère

Časopis pro pěstování matematiky a fysiky, Vol. 71 (1946), No. 1-4, 79--90

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/121086>

Terms of use:

© Union of Czech Mathematicians and Physicists, 1946

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

Exploration météorique de la haute atmosphère.

F. Link, Praha.

(Reçu le 18 mars 1945.)

Sommaire. L'application d'une méthode basée sur la théorie météorique d'Öpik permet de confirmer les résultats des sondages crépusculaires de la haute atmosphère en ce qui concerne le faible gradient de densité. Sa variation saisonnière a pu être mise en évidence. En outre cette méthode permet d'étudier les différentes catégories des météorites, dont une fut inconnue jusqu'à présent. Les essaims météoriques (Perséides et Léonides) ne se distinguent pas essentiellement de météores sporadiques.

1. Introduction. L'exploration de la haute atmosphère à l'aide des phénomènes météoriques a été inaugurée par le travail bien connu de Lindemann et Dobson en 1923 [1]. Quoique la théorie exposée dans ce travail s'est montrée incorrecte, elle fut le point de départ d'une série de travaux concernant ce domaine intéressant de géophysique. Sans vouloir entrer ici dans les détails des récentes théories nous en exposerons néanmoins quelques points saillants.

Pendant son trajet dans les couches raréfiées de la haute atmosphère, le météorite rencontre les molécules d'air. Ces choques individuels font perdre progressivement l'énergie cinétique très importante du météorite. Elle se consomme en partie à l'évaporation du météorite et le reste est utilisé à l'accélération des molécules d'air rencontrées. Le rapport de ces deux énergies dépend du degré de l'élasticité des choques peu connu jusqu'à présent. Quant à la lumière visible du météore, elle est due principalement à la recombinaison des molécules ionisées par choques, mais une très faible fraction de l'énergie totale du météore est utilisée à cet effet. Là-dessus règne encore une très grande incertitude,

Nous avons montré il y a une dizaine d'années [2] que les mesures de la brillance du ciel crépusculaire au zénit peuvent servir de sondages optiques de la haute atmosphère. L'application de notre méthode conduit notamment au faible gradient de densité et son diminution avec l'altitude entre 50 et 150 km, ce qui fut en accord avec les résultats de Lindemann et Dobson. Comme leur théorie s'est montrée inexacte, il nous a paru nécessaire de voir, si

l'accord persiste aussi avec les nouvelles théories météoriques. Pour la comparaison nous avons choisi la théorie d'Öpik, qui malgré les maigres dates d'observations est susceptible d'une interprétation pratique, non seulement du point de vue que nous poursuivons, mais aussi en ce qui concerne l'astronomie météorique proprement dite.

2. Bases de la méthode. Dans l'élaboration de notre méthode de l'exploration de la haute atmosphère nous avons été guidés par les considérations suivantes:

1°. Le problème météorique de la haute atmosphère contient trop d'inconnues. T chons alors d'en éliminer la plus importante qui est la densité de l'air.

2°. Les dates d'observation sont en général maigres et peu précises. Parmi elles les altitudes d'apparition et de disparition sont les plus dignes de confiance et les plus nombreuses.

3°. L'éclat du météore est une quantité généralement mal déterminée. Son introduction dans la méthode implique en même temps la connaissance de la vitesse, qui elle aussi est mal déterminée. En plus le mécanisme de la production de la lumière est peu connu.

Ces considérations nous ont conduit à la méthode basée sur la théorie d'Öpik [3]. Les limites de son application sont discutées en détail dans le travail cité. Contentons nous de dire ici qu'elle est applicable aux météores faibles, dont la limite nous avons fixé à $m \geq 1$. Ceci n'a rien d'absolu, mais l'expérience a montré que cette magnitude sépare deux groupes de météores, qui se comportent d'une manière nettement différente (voir No 6).

Notre méthode ne demande que les altitudes d'apparition h_a et de disparition h_d sans parler de la magnitude nécessaire pour le classement seulement. Nous la prenons telle qu'elle est donnée par les observations sans aucune réduction au zénit. Le rapport des masses d'air traversées par le météore depuis l'entrée dans l'atmosphère terrestre jusqu'à l'apparition et jusqu'à la disparition est d'après Öpik égal à

$$\frac{M_d}{M_a} = \frac{q + h}{q} = k, \quad (1)$$

ou q est la quantité de la chaleur nécessaire pour porter un gramme de la matière météorique à la température d'évaporation et h la chaleur nécessaire pour l'évaporation qui suit. Ce rapport est alors uniquement une fonction de la composition du météorite. Pour les sidérite en pur fer Öpik donne pour $k = 4,1$, tandisque pour les météores pierreux on estime $k = 2,9$ approximativement.

Notre méthode consiste principalement à déterminer ce rapport en partant des masses d'air connues par une autre méthode (crépusculaire dans notre cas) et à traiter statistiquement ces rapports

obtenus pour un grand nombre de météores. Si d'une part tous les météorites appartenait à ces deux catégories et si d'autre part les masses d'air étaient connues pour toutes les trajectoires observées, on ne devrait rencontrer dans nos statistiques que les deux rapports cités. En réalité nous trouverons une certaine dispersion et même les décalages dus à l'imprécision des dates d'observation et de la théorie. La discussion de ces circonstances basée sur un nombre suffisant d'observations permettra alors de jeter quelques lumières sur la structure peu connue de la haute atmosphère.

3. Calcul des masses d'air. Tant que l'inclinaison de la trajectoire sur la verticale n'est pas trop grande ($i < 75$) on peut remplacer le rapport des masses d'air traversées par le météore par le rapport des masses d'air comptées suivant la verticale aux points d'apparition et de disparition.

Nous avons donc

$$\frac{M_d}{M_a} = \frac{m_d}{m_a} = k \quad (2)$$

Le calcul des masses verticales m_a et m_d suppose connue la structure de la haute atmosphère en fonction de l'altitude, c'est à dire la densité de l'air ρ en fonction de l'altitude h . La fonction $\rho = f(h)$ étant connue soit sous sa forme analytique ou numérique, on peut évaluer les intégrales

$$m_d = \int_{h_d}^{\infty} \rho \, dh \quad \text{et} \quad m_a = \int_{h_a}^{\infty} \rho \, dh \quad (3)$$

Dans l'atmosphère exponentielle où la densité de l'air varie suivant la loi

$$\rho = \rho_0 e^{-\beta h} \quad (4)$$

on a simplement la formule

$$\log k = \log \frac{m_d}{m_a} = \beta (h_a - h_d), \quad (5)$$

qui nous servira au début de nos discussions.

Dans la discussion approfondie nous avons utilisé les masses d'air calculées par l'intégration numérique à partir des densités crépusculaires [4]. Les dates nécessaires sont résumés dans le tableau I.

4. Le matériel d'observation résulte de différentes collections de trajectoires réelles dont voici l'énumération succincte (Tableau II).

De ce nombre total on a dû éliminer un certain nombre de trajectoires de météores trop brillants discutés séparément et puis toutes les trajectoires trop basses ($h_a < 45$ km), trop élevées ($h_a > 200$ km) et trop inclinées ($i > 75$). Naturellement on a aussi éliminé les trajectoires incomplètes. Des trajectoires qui sont

Tableau I.
Densités et masses d'air d'après les observations crépusculaires [4].

Altitudes h km	$-\log \rho$	$-\log m$
30	1,90	1,05
40	2,55	1,61
50	3,04	2,13
60	3,60	2,63
70	4,17	3,02
80	4,54	3,29
90	4,80	3,53
100	5,04	3,75
120	5,51	4,19
140	5,95	4,59
160	6,36	4,94
180	6,71	5,27
200	7,04	5,58

Tableau II.
Trajectoires réelles des météores.

No.	Auteur	Publication	Genre de météores	Nombre de trajectoires
1.	W. F. Denning	M. N. 57, 72, 76	Toutes sortes	788
2.	P. Sawicky	A. N. 228	Perséides 1907—25	386
3.	Ph. Broch	A. N. 190	Perséides 19. siècle	118
4.	D. M. Wills	Pop. Astr. 42, 43	Léonides 1933—34	346
5.	Ch. P. Olivier	Publ. Flower Obs.	Léonides 1932	97
6.	Teichgräber	A. N.	Toutes sortes	30

restées, on a formé une cartothèque contenant en tout 881 trajectoires, qui vont nous servir dans la discussion suivante.

5: Statistique des différences d'altitudes. Nous avons d'abord effectué le classement statistique des différences d'altitudes d'apparition et de disparition $\Delta h = h_a - h_d$ en vue d'une information préalable sur les conditions dans la haute atmosphère. Le classement était effectué pour trois intervalles d'altitudes moyennes $h_0 = \frac{1}{2}(h_a + h_d)$, c'est à dire pour $h_0 = 50-79$ km, $h_0 = 80-109$ km et $h_0 = 110-150$ km. Les résultats sont contenus dans le tableau III et représentés sur la fig. 1. On y voit quatre maxima de fréquences désignés successivement par A, B, C et D que l'on retrouve surtout dans les deux intervalles extrêmes.

Dans l'atmosphère exponentielle les maxima de fréquences correspondraient d'après la formule (5)

$$k = \beta (h_a - h_d) = \beta \Delta h \quad (5)$$

aux différentes catégories de météorites. Mais, indépendamment de cette question, le décalage des courbes vers la droite peut s'inter-

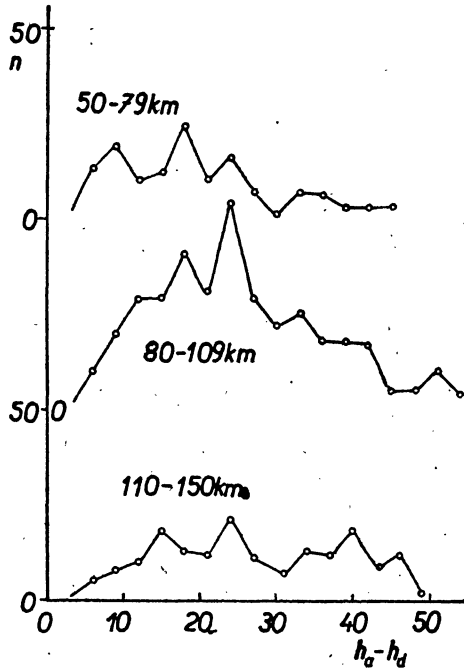


Fig. 1. Statistique des différences $h_a - h_d$.

préter comme une diminution du gradient de densité avec l'altitude croissante. Entre 50—79 km et 110—150 km le rapport des gradients peut être estimé d'après la formule dérivée de la formule (5)

$$\beta_1/\beta_2 = \Delta_2 h / \Delta_1 h. \quad (6)$$

Celle-ci donne pour les différents maxima

	A	B	C	D
β_1/β_2	$15/9 = 1,67$	$24/18 = 1,33$	$39/24 = 1,63$	$45/33 = 1,36$

soit 1,5 en moyenne. Ce rapport correspond à peu près aux conditions de la table I calculée d'après les densités crépusculaires. Cette variation notable du gradient de densité fait alors nécessaire de passer aux rapports des masses d'air.

Tableau III.

Statistique des différences $h_a - h_d$ en fonction de $\frac{1}{2}(h_a + h_d)$ (voir la fig. 1).

$h_a - h_d$ km	Nombre de cas pour $\frac{1}{2}(h_a + h_d)$		
	50 — 79 km	80—109 km	110—150 km
5—7	13	10	5
8—10	19	20	8
11—13	10	29	10
14—16	11	29	18
17—19	24	41	13
20—22	10	31	12
23—25	16	54	21
26—28	7	29	11
29—31	1	22	7
32—34	7	25	13
35—37	6	18	12
38—40	3	18	18
41—43	3	17	9
44—46	3	5	12
47—49	—	5	2
50—52	10	10	—
52—54	—	4	—
	138	367	171

6. Statistique des rapports des masses d'air. Dans la discussion qui va suivre nous avons dressé une statistique des rapports des masses d'air prises dans la colonne 3 du tableau I. Les premiers essais faits sur le nombre total d'observations ont donné des résultats fort complexes. C'est pourquoi nous avons dû traiter séparément la période d'été avril-septembre et celle d'hiver octobre-mars. Les résultats obtenus après cette division sont excellents (voir le tableau IV et la fig. 2). En outre on a séparé le groupe de Léonides et de Perséides. Ce dernier est malheureusement peu homogène du fait que nous avons dû éliminer nombreuses trajectoires faute de magnitudes ou à cause des chiffres parfois trop fantaisistes rencontrés dans le matériel d'observations.

L'examen de nos courbes concernant les météores sporadiques*) fait ressortir l'existence des trois maxima de fréquence A, B, C. Les autres maxima B₁ et D sont plus ou moins hypothétiques. Suivant toute probabilité le sommet B correspond aux météorites pierreux et le sommet C aux fers météoriques. Leurs positions moyennes

*) C'est ainsi que nous appellerons les météores autres que les Léonides et les Perséides. Le gros de ces météores est constitué par les météores réellement sporadiques et une faible fraction appartient aux essais.

$\frac{1}{2}(B + B') = 0,47 = \log k_B$ et $\frac{1}{2}(C + C') = 0,70 = \log k_C$ sont en bon accord avec les valeurs théoriques 0,47 et 0,62. De cet accord on peut encore conclure à l'exactitude essentielle de nos densités crépusculaires. Quant au premier maximum A il rend probable l'existence d'une troisième catégorie de météorites inconnue jusqu'à

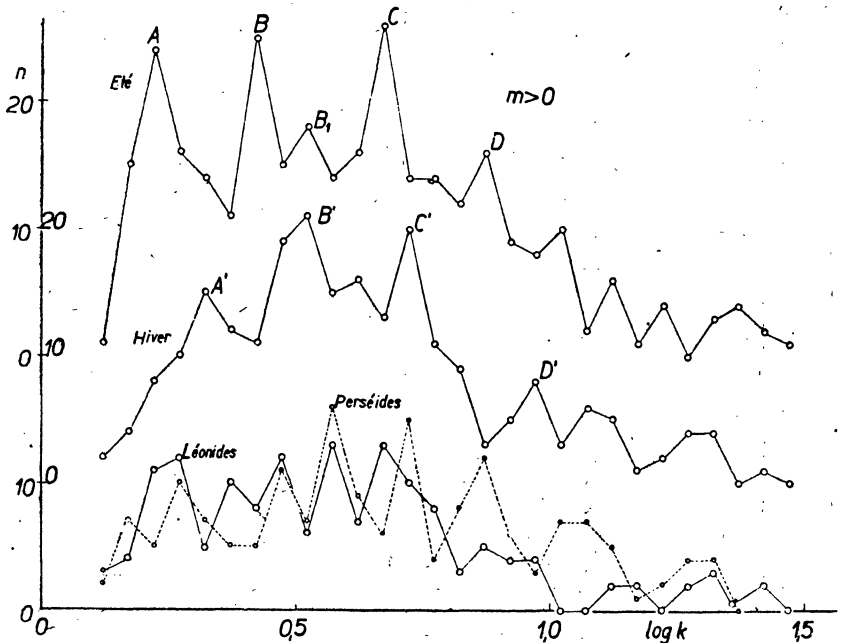


Fig. 2. Statistique des rapports des masses d'air.

présent. La détermination expérimentale du rapport k pour les différentes matières pourrait peut être donner une indication sur la composition chimique de cette nouvelle catégorie, si ce ne sont pas tout simplement les conditions toutes différentes de celles que suppose la théorie, qui seraient responsables du premier maximum (A) de fréquences.

Les essais météoriques de Léonides et de Perséides ont été discutés à part. Leurs courbes de fréquences (voir la fig. 2) montrent plusieurs maxima de fréquences dont le premier peut être identifié à coup sûr avec le maximum A des météores sporadiques. Sa position est intermédiaire entre la courbe d'été et celle d'hiver. Quant aux autres maxima, les identifications ne sont que plus ou moins probables d'autant plus que les dates concernant les Perséides ne sont pas toujours de toute première qualité. En tous cas il ne se

Tableau IV.

Statistique des rapports des masses d'air = $\log k$ (voir la fig. 2).

log k	Nombre de cas			
	Eté		Hiver	
	Sporadiques	Perséides	Sporadiques	Léonides
0,10—14	1	2	2	3
15—19	15	7	4	4
20—24	24 A	5	8	11
25—29	16	10 A	10	12
0,30—34	14	7	15 A'	5
35—39	11	5	12	10
40—44	25 B	5	11	8
45—49	15	11 B	19	12 B'
0,50—54	18	7	21 B'	6
55—59	14	16 B ₁ ?	15	13 B ₁ '?
60—64	16	9	16	7
65—69	26 C	6	13	13 C'?
70—74	14	15 C?	20 C'	10
0,75—79	14	4	11	8
80—84	12	8	9	3
85—89	16 D?	12 D?	3	5
90—94	9	6	5	4
95—99	8	3	8 D'?	4
1,00—04	10	7	3	—
05—09	2	7	6	—
10—14	6	10	5	2
15—19	1	6	1	2
20—24	4	7	2	0
1,25—29	—	5	4	2
30—34	3	5	4	3
35—39	4	3	—	1
40—44	2	7	1	2
45—49	1	9	—	—
	301	202	228	150

Nombre total: 881

manifeste dans nos courbes aucune différence notable entre les météores des essaims et les météores sporadiques.

Les bolides, c'est-à-dire les météores plus brillants que 1^m, se comportent d'une manière différente. Nous avons pu dresser une statistique des rapports k pour 238 exemplaires exclus à cause de leurs éclat de la première statistique (tableau IV). La courbe de fréquence montre aux faibles valeurs de k quelque ressemblance avec celle des météores faibles (voir la fig. 3). Plus loin au lieu de

descendre brusquement, comme le font les faibles météores, la courbe continue à se maintenir aux valeurs élevées. Comme d'autre part l'application de la théorie d'Öpik n'est plus permise dans ce cas, nous ne l'avons pas discuté plus en détail.

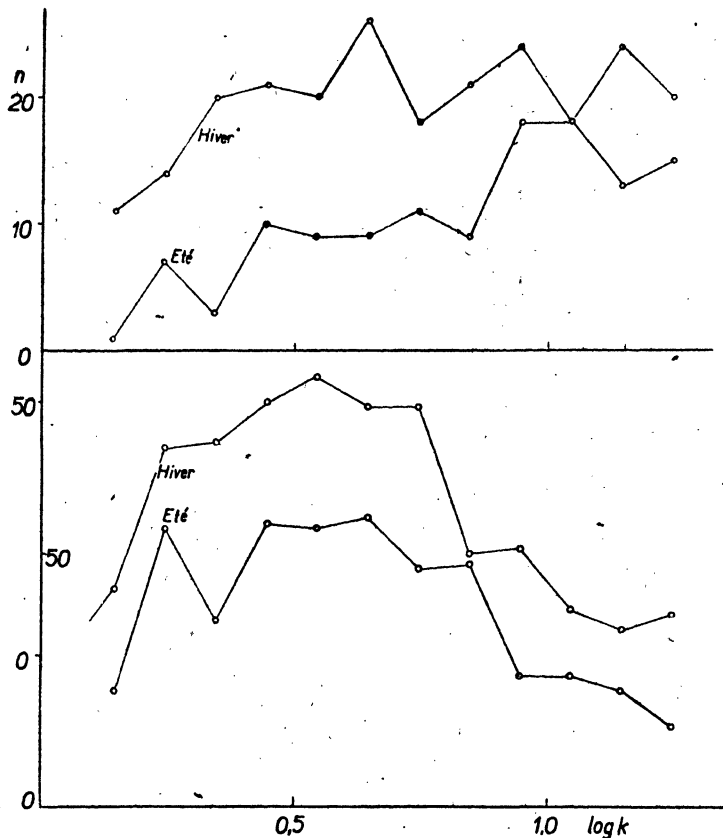


Fig. 3. Statistique des rapports k pour les météores brillants (en haut) et les météores faibles (en bas). L'intervalle de $\log k$ est le double de celui de la fig. 2.

La confirmation des résultats crépusculaires par la méthode météorique concerne naturellement le faible gradient de densité et ne dit rien des valeurs absolues de la densité. Ni l'une ni l'autre méthode ne peuvent fournir les valeurs absolues de la densité, comme il ressort de leur principe, qui consiste à comparer les rapports des masses d'air parcourues par les rayons ou par les météores. De ce principe résulte aussi l'impossibilité d'étudier la structure détaillée de la haute atmosphère, puisque dans le calcul des masses d'air par

L'intégration des densités s'efface plus ou moins toutes les particularités de la fonction $\rho = f(h)$. C'est de ce point de vue que nous devons juger les résultats acquis.

7. Influences diverses. Nos statistiques des rapports des masses d'air permettent d'étudier l'influence de différents facteurs sur la structure de la haute atmosphère.

a) *Variation annuelle* est visible à première vue sur nos courbes de fréquences. Le décalage des maxima de fréquence peut être interprété comme une variation du gradient de densité. Le sens de cette variation est tel que le gradient est plus fort en été qu'en hiver. Si cette variation était uniquement due aux variations de la température et non à celle du poids moléculaire, l'ionosphère vers 100 km d'altitude serait plus froide en été qu'en hiver. Cela est valable pour les conditions nocturnes. Un phénomène semblable se rencontre dans les sondages par le son des régions entre 30 et 50 km d'altitude [5].

Il est difficile de calculer exactement l'amplitude de température nécessaire pour produire l'effet observé d'autant plus que l'amplitude ne doit pas être nécessairement la même aux différentes altitudes. La supposition de l'atmosphère exponentielle ne peut servir ici qu'en première approximation, mais comme ordre de grandeur l'élevation de la température de 25% environ peut rendre compte des faits observés.

b) *Variation nocturne* n'a pu être bien étudiée étant donné que la plupart des observations se placent dans la première partie de la nuit et nous disposons d'un nombre très restreint d'observations matinales.

c) *Influence de l'activité solaire* a été examinée sommairement. On a formé deux groupes d'observations. Dans le premier sont classées les observations effectuées dans les années, dont le nombre relatif moyen de taches dépasse 20, et ce groupe d'observations embrasse alors le maximum d'activité solaire. Dans le second groupe sont les autres observations, qui se rapportent au minimum. On n'a pu trouver de différences notables sauf peut-être le fait, que les courbes trouvées pendant le minimum d'activité solaire paraissent moins troublées et les maxima des fréquences γ sont plus prononcés, que pendant les maxima d'activité.

8. Conclusions. La théorie d'Öpik appliquée aux météores faibles ($> 1^m$) permet, en partant des altitudes d'apparition et de disparition seulement, d'arriver aux conclusions suivantes:

1°. La statistique des différences d'altitudes entre le point d'apparition et de disparition indique une diminution du gradient de densité avec l'altitude.

2°. La statistique correspondante des masses d'air révèle des maxima de fréquence, qui d'après la théorie indiquent l'existence des trois catégories de météorites, dont deux (B et C) correspondent aux types pierreux et métalliques et la première constitue probablement une nouvelle classe de météorites.

3°. Les masses d'air nécessaires ont été calculées d'après les densités de l'air trouvée par notre méthode crépusculaire. De la coïncidence approchée des deux maxima de fréquence (B et C) avec leurs positions théoriques résulte aussi une confirmation de la méthode crépusculaire.

4°. Les courbes de fréquences d'été et d'hiver montrent un décalage des maxima, qui peut s'interpréter comme une diminution de la température de l'ionosphère en été.

5°. Les résultats concernant les essaims de Perséides et de Léonides ne permettent de tirer aucune conclusion nette, qui les différencierait d'autres météores. Le décalage des maxima de fréquence est sans doute d'origine saisonnière.

6°. Le présent travail montre l'importance des bonnes déterminations d'altitudes des météores. Les observations doivent être poursuivies systématiquement pendant toute l'année et prolongées aussi dans les heures matinales négligées jusqu'à présent. Dans ce domaine le travail organisé des amateurs est d'une grande utilité.

7°. Seuls météores faibles (audessous de 1^m) peuvent rendre des services dans l'exploration de la haute atmosphère au moins d'après la théorie d'Öpik. Les bolides nécessiteraient alors d'autres bases théoriques.

Bibliographie.

- [1] F. A. Lindemann-B. M. B. Dobson: Proc. Roy. Soc. London (A), **102** (1923), 411.
- [2] F. Link; Journ. des Obs., **17** (1934), 161.
- [3] E. Öpik; Publ. Obs. Tartu, **29** (1937), No. 5.
- [4] F. Link; Met. Zeit., **61** (1944), 87.
- [5] P. Duckert; Erg. d. Kosm. Phys. I.

*

Meteorický výzkum vysoké atmosféry.

(Obsah předešlého článku.)

Sloučením Öpikovy teorie svícení meteorů a autorovy teorie soumrakových zjevů podařilo se:

a) ověřiti výsledky týkající se hustot vzduchu v ionosféře a jejího malého gradientu,

b) ukázati, že gradient hustoty vzduchu je v létě větší než v zimě, což by se dalo interpretovati nižší teplotou v létě než v zimě,

c) vedle existence železných a kamenných meteoritů byla nalezena též nová dosud neznámá kategorie lišící se buď tepelnými vlastnostmi nebo odlišným mechanismem svícení, než jaký předpokládá Öpik.

K těmto poznatkům lze dospěti jen ze stanovení výšek zažehnutí a zhasnutí meteorů, což ukazuje na důležitost amatérských pozorování toho druhu pěstovaných ve větším měřítku dosud jen ve Spojených státech a v Anglii.