

CBPF-NF-039/82

MICROORGANISMES MAGNETOTACTIQUES DE LA
REGION DE RIO DE JANEIRO

D.M.S.Esquivel¹, H.G.P.Lins de Barros¹
M.Farina², P.H.A.Aragão³, J.Danon¹

¹Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas - CBPF/CNPq
Rua Xavier Sigaud, 150
22290 - Rio de Janeiro, RJ - Brasil

²Instituto de Biofísica da UFRJ
Cidade Universitária
21910 - Rio de Janeiro, RJ - Brasil

³Universidade Estadual de Londrina
Departamento de Física - Campus Universitário
86100 - Londrina, PR - Brasil

MICROORGANISMES MAGNETOTACTIQUES DE LA REGION DE
RIO DE JANEIRO

D.M.S. Esquivel⁽¹⁾

H.G.P. Lins de Barros⁽¹⁾

M. Farina⁽²⁾

P.H.A. Aragão⁽³⁾

J. Danon⁽¹⁾

(1) Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas
Rua Dr. Xavier Sigaud, 150
22290 Rio de Janeiro, Brasil

(2) Instituto de Biofísica da UFRJ
Cidade Universitária
21910 Rio de Janeiro, Brasil.

(3) Universidade Estadual de Londrina
Depto. de Física - Campus Universitário
86100 Londrina, Paraná, Brasil.

MICROORGANISMES MAGNETOTACTIQUES DE LA REGION DE RIO DE JANEIRO

Introduction

L'observation des effets d'un champ magnétique sur les êtres vivants a commencé il y a plus d'un siècle, mais n'a réellement été considérée comme un sujet d'étude scientifique qu'il y a environ vingt ans, à propos du système d'orientation des pigeons⁽¹⁾ et des effets sur le comportement de certains microorganismes⁽²⁾.

Ainsi actuellement le champ géomagnétique est utilisé pour obtenir des informations sur les capacités d'orientation d'une grande variété d'êtres vivants, des bactéries aux vertébrés^(1,3). Chez ces derniers, tout indique que l'animal possède des senseurs magnétiques qui transmettent des informations sur ce champ au système nerveux. L'étude des bactéries sensibles aux champs magnétiques, découvertes par R. Blackmore en 1975⁽³⁾ a montré que ces organismes biominéralisent des cristaux de magnétite à l'intérieur du cytoplasme⁽⁴⁾. La réponse au champ magnétique de ces microorganismes témoigne d'un tactisme (magnétotactisme), qui résulte d'une interaction entre les cristaux de magnétite avec le champ magnétique terrestre^(3,4,5), et l'orientation a lieu même quand la cellule se trouve fixée.

Du point de vue de l'orientation magnétique, deux groupes de microorganismes ont été observés: ceux qui se trouvent principalement dans l'Hémisphère Nord, et que se déplacent

vers le Nord et ceux que se trouvent predominantement dans l'Hémisphère Sud et que se déplacent dans la direction Sud (Photo n° 1). Ainsi, elles se mouvement vers le fonds, grace a la composant verticale du champ magnétique terrestre⁽⁷⁾.

Dans ces travail nous présentons les résultats d'observations en microscopie optique et électronique des microorganismes magnétotactiques rencontrés dans les eaux de la région de Rio de Janeiro. Toutes les analyses ont été faites avec des organismes prélevés directement dans le milieu naturel, sans aucun enrichissement. Rio de Janeiro est situé dans la région de l'anomalie magnétique de l'Atlantique Sud et présente des valeurs d'intensité du champ terrestre très basses, c'est à dire de l'ordre de 0.24G avec une inclinaison d'environ 28°. Nous décrivons le comportement de plusieurs types morphologiques de bactéries magnétotactiques et nous présentons quelques données sur les caractéristiques magnétiques de ces microorganismes. Nous décrivons aussi le comportement d'autres microorganismes, parmi lesquels se situe une algue verte du genre *Chlamydomona*, qui présentent des caractéristiques semblables de mouvement dans le champ magnétique⁽⁵⁾ et qui constitue la première évidence de magnétotactisme dans un organisme eucaryote.

- Description des microorganismes magnétotactiques

Les premières observations de la présence de bactéries magnétotactiques dans la région de Rio de Janeiro ont été rapportés par R. Frankel, D.M.S. Esquivel et J. Danon.

Par la suite, des bactéries qui présentent une réponse

directe dans le champ magnétique ont été observées dans les eaux des lagunes de Rodrigo de Freitas et Marapendi, et dans la baie de Guanabara. Les deux lagunes sont côtières avec des eaux saumâtres; la lagune Rodrigo de Freitas est située à l'intérieur de la ville de Rio de Janeiro et son eau est très polluée en matériaux organiques.

Les observations ont été faites avec un microscope Ortholux (G 100 en transmission). Elles ont montré que ces bactéries sont des *coccus* et des batonnets, tout deux flagelés, qui répondent au champ magnétique de façon semblable à celle des bactéries décrites dans des travaux antérieurs^(3,4,6,7). La concentration des cellules magnétotactiques peut atteindre environ 10 000 bactéries par cm³ et ces bactéries s'orientent spontanément dans le champ terrestre et se déplacent dans la direction du pôle Sud. Quand elles atteignent l'extrémité de la goutte d'eau, elles s'arrêtent quelques secondes et exécutent ensuite un mouvement brusque sur place.

Quelques bactéries en bâton, présentent un comportement différent. En présence d'un champ, elles se déplacent comme une bactérie du type sud vers le bord de la goutte; quand le champ est inversé, elles tournent et commencent un mouvement dans la direction opposée. Cependant, après quelques dixièmes de seconde, elles commencent des mouvements brusques qui les ramènent vers le bord de la goutte. Tout indique que dans ces organismes il y a une compétition entre magnétotactisme et un chimiotactisme positif pour l'oxygène; quand ils commencent leur mouvement vers le centre de la goutte, le chimiotactisme entre en compétition avec le magnétotactisme et le mouvement devient

discontinu. Ces bactéries présentent une orientation passive c'est-à-dire qu'elles se retournent sans déplacement net, même quand mortes.

Les populations observées de tous ces microorganismes magnétiques sont fondamentalement du type sud. Cependant nous trouvons toujours un pourcentage faible (1 %) de bactéries du type nord dans chaque échantillon d'eau prélevé. La présence de cette dernière population indique que la magnétotactie n'est pas le seul mécanisme d'orientation utilisé par ces bactéries. D'autres mécanismes, tels que le chimiotactisme peuvent être présents et être aussi importants que le magnétotactisme quand les cellules se trouvent dans leur ambiance naturelle.

Ce matériel prélevé dans les eaux de Rio a été observé avec un microscope électronique JEOL 100 cx. Les cellules magnétotactiques vivantes ont été concentrées à l'aide du champ produit par un aimant, puis fixées dans les vapeurs d'une solution à 1% d'acide osmique et observées en coloration négative avec PTA à 2%. Les principaux résultats de microscopie électronique en transmission à 100 kV discutés dans ce travail se réfèrent exclusivement aux bactéries *coccus*. Dans toutes les photographies de cellules magnétotactiques ont été trouvés des chaînes de régions de haute densité qui ont le même aspect que les cristaux de magnétite des bactéries analysées antérieurement (4,8).

Baie de Guanabara - La microscopie électronique en transmission des bactéries *coccus* de la baie de Guanabara montre l'existence d'une chaîne linéaire d'environ dix régions obscures de

forme cubique, de dimension typique de $0.07 \mu\text{m}$ (Photo n° 2,3). Pour que l'orientation de ces microorganismes continue à être effective après la division cellulaire, on doit s'attendre à ce que chaque cellule-fille ait aproximativement la moitié du nombre de particules magnétiques de la cellule mère. La photographie n° 3 montre une bactérie qui semble être au début du processus de division cellulaire. La photo montre aussi, à l'intérieur du cytoplasme, deux régions sphériques semblables à celles trouvées dans d'autres bactéries *coccus* et identifiées comme un polybutirate contenant du phosphore⁽⁸⁾. Les extrémités de la chaîne de cristaux sont apparemment fixées à ces globules. Comme il y a une énergie d'interaction magnétique entre ces particules magnétiques, une certaine dépense d'énergie est nécessaire pour casser la chaîne. Nous supposons que cette rupture peut avoir lieu à l'aide de ces globules servant d'appui à la brisure de la chaîne de magnétosomes.

Lagune Rodrigo de Freitas - L'analyse microscopique des microorganismes magnétotactiques collectés dans la lagune Rodrigo de Freitas montre une grande variété de ces microorganismes avec une large prédominance de bactéries type *coccus* de $2 \mu\text{m}$ de diamètre. La microscopie électronique en transmission montre l'existence de chaînes d'environ 10 particules magnétiques avec formes prismatiques de base hexagonale et de dimensions typiques $0.1 \mu\text{m}$ de hauteur et $0.04 \mu\text{m}$ de côté.

La moitié environ des photos obtenues montrent des cellules pour lesquelles les chaînes de particules magnétiques sont linéaires, pendant que les autres bactéries présentent des chaînes doubles ou en forme de L (Photo n° 4,5,6).

L'étude des eaux de la lagune Rodrigo de Freitas a démontré l'existence d'un grand nombre de microorganismes magnétotactiques de forme approximativement sphériques, d'un diamètre d'environ 6 μm . Le comportement de ces microorganismes est relativement semblable à celui des bactéries décrites antérieurement avec cependant quelques différences: sous l'action d'un champ magnétique constant celles-ci se déplacent selon une trajectoire dont l'axe coïncide avec la direction du champ; mais, au bord de la goutte, elles se mettent à effectuer un mouvement de rotation.

Bien que les caractéristiques de mouvement de ces microorganismes soient typiques de celles de cellules flagellées, aucun flagelle n'a pu être révélé par observation microscopie optique. Quand la goutte commence à sécher, les cellules éclatent en amas granuleux. Ces cellules présentent une coloration verte qui peuvent indiquer l'existence de chloroplastes. Postérieurement R. Blackmore et R. Frankel (communication privée, 1982) ont observé des cellules semblables dans les eaux de la lagune de Woods Hole (Photo n° 7,8). En novembre 1981 le Prof. L.P.H. Oliveira a reconnu dans populations riche de ces cellules la présence d'algues magnétotactiques chlorophyllées du genre *Chlamydomona* (5).

La détermination du moment magnétique de ces cellules a été faite par analyse de leur comportement lors de l'inversion d'un champ magnétique.

Sous l'action d'un champ magnétique constant, elles présentent des trajectoires approximativement décrites par des droites parallèles à la ligne du champ. Quand le champ est subitement

inversé, les microorganismes sont soumis à un couple et inversent le sens de leur mouvement selon une trajectoire en U (Photo n° 9). Le temps nécessaire pour effectuer cette inversion dépend du moment magnétique⁽⁹⁾. Le diamètre de l'U fournit des informations analogues et nous pouvons donc estimer le moment magnétique comme suit:

Si est L le diamètre de la trajectoire en U et

$$m = \frac{8 \pi^2 R^3 \bar{v}}{B_0 L}$$

où η est la viscosité du milieu

v est la vitesse de l'organisme, R le rayon, et B_0 le champ magnétique appliqué. Pour ces cellules dans l'eau nous avons $\eta = 10^{-2}$ poise, $R = 3 \mu\text{m}$, $v = 50 \mu\text{m/s}$ et $B_0 = 5\text{G}$ et $L = 45\mu\text{m}$.

Les temps nécessaire à l'inversion est donné par:

$$t = \frac{8 \pi \eta R^3}{m B_0} \ln (2 m B_0 / kT)$$

où k est la constante de Boltzmann et T la température (300K).

Des mesures réalisées par un procédé cinématographique nous ont fourni les valeurs de L et v, ce qui donne la valeur de $m = 4,7 \cdot 10^{-12}$ emu et $t = 2$ sec.

Ce moment magnétique est supérieur à celui de bactéries trouvées par Frankel et al.⁽¹⁰⁾ ce qui indique que ces cellules doivent biominéraliser au moins 10 fois plus de magnétite. Le temps nécessaire à l'inversion de ces microorganismes est pratiquement le même que celui des bactéries, et doit être en rapport avec une caractéristique de comportement biologique de ces organismes.

L'application d'un champ magnétique fort oscillant, au moyen d'un petit dégaussmètre, pour démagnétiser ces cellules, montre que, après la suppression de ce champ oscillant, on trouve un nombre significatif de microorganismes de type nord tandis que les autres restent toutes de type sud. Ceci permet de conclure que chaque cellule possède des dipôles magnétiques permanents qui sont essentiellement constitués par des monodomaines magnétiques et qu'elles ne peuvent pas être démagnétisées mais seulement avoir leur polarité inversée.

Discussion

L'estimation du moment magnétique de bactéries peut être faite à l'aide des résultats de microscopie électronique en admettant que les régions denses sont constituées de magnétite. Le moment magnétique par unité de volume de la magnétite est $M = 480 \text{ emu/cm}^3$ et par conséquent le moment magnétique total de la bactérie est donné par

$$m = \text{nombre de cristaux} \times \text{volume d'un cristal} \times M_v = 2.5 \times 10^{-12} \text{ emu.}$$

Cette valeur de m est approximativement le double de la valeur trouvée par Frankel et al⁽¹⁰⁾ pour des bactéries collectées à Boston. Nous pensons cependant que le sens physique doit se rapporter au produit $(m.B)$ où B est le champ local. Ce produit représente l'énergie d'interaction magnétique; pour avoir une orientation magnétique effective, cette énergie doit être suffisamment plus grande que l'énergie d'agitation thermique $kT = 4,10^{-14}$ ergs. En prenant un champ géomagnétique à Rio de 0.24G, le rapport entre énergies magnétique et thermique est

égal à 15. Cette même valeur avait été trouvée par Frankel pour les bactéries observées à Boston aux Etats-Unis, où le champ géomagnétique possède une valeur double. Ce même rapport est aussi vérifié avec des bactéries *coccus* collectés à Indiana⁽¹¹⁾. Ce résultat peut fournir un moyen d'estimer le champ magnétique local en fonction des caractéristiques magnétiques des bactéries magnétotactiques.

REMERCIEMENTS

Nous remercions le Professeur Lejeune P.H. de Oliveira et Richard B. Frankel pour des nombreuses discussions et Wanderley de Souza pour l'assistance dans les mesures de microscopie électronique.

REFERENCES

- (1) J.L. Gould. American Scientist 68 (1980) p. 256.
- (2) Charles C. Couley. Effects of Near-Zero Magnetic Fields upon Biological Systems in Biological Effects of Magnetic Fields. Vol. 2. Ed. Madeleine F. Barbothy, 1969. Plenum Press, N.Y.
- (3) R.P. Blakemore, Science 190 (1975) p. 377.
- (4) R.B. Frankel, R.P. Blakemore, R.S. Wolfe. Science 203 (1979) p. 1355.
- (5) Henrique G.P. Lins de Barros, Darci Motta S. Esquivel, J. Danon and L.P.H. Oliveira. An. Acad. Bras. Cienc. 54 (1982) p. 258. Notas de Física CBPF. NF. 048/81.
- (6) R.P. Blakemore, R.B. Frankel, Scientific American Vol. 245 (1981) p. 58.
- (7) R.B. Frankel, R.P. Blakemore, F.F. Torres de Araujo , Darci Motta S. Esquivel and J. Danon. Science 212 (1981) p. 1269.
- (8) K.M. Towe and T.T. Moench. Earth and Planetary Science Letters, 52 (1981) 213.
- (9) C.P. Bean, communication privée. Le mouvement de ces microorganismes dans l'eau est typiquement non-inertiale, et seulement les forces de viscosité sont importantes.
- (10) R.B. Frankel and R.P. Blakemore, Journ. Mag. Mat. 15-18 (1980) p. 1562.
- (11) Moment magnétique estimé à partir des observations effectués par K. Towe et T.T. Moench en la reference 8.

LÉGENDE DES FIGURES

- Photo 1 - Schema d'orientation des microorganismes magneto - tactiques selon les directions relatives du vecteur du champ magnétique B e du vecteur moment magnéti - que de la cellule, m. La cellule (a) se mouvement vers le Sud magnétique (type Sud) et la cellule (b) vers le Nord magnétique (type Nord).
- Photo 2 - Microscopie électronique en transmission d'une bactérie *coccus* collectée dans la baie de Guanaba ra, d'environ 2 μ m de diamètre.
- Photo 3 - Microscopie électronique en transmission d'une bac térie *coccus* collectée dans la baie de Guanabara , probablement en cours de division cellulaire (dia - mètre 2 μ m).
- Photo 4 - Microscopie électronique en transmission d'une bac térie *coccus* collectée dans la lagune Rodrigo de Freitas. On observe l'existence d'une chaîne linéaire de cristaux de grande densité.
- Photo 5 - Chaîne de cristaux en L. Microscopie électronique chaque particule a une largeur de 70 μ m.
- Photo 6 - Détail agrandi de la chaîne de cristaux en L.
- Photo 7 - Microorganismes magnétotactiques d'environ 6 μ m de la lagune Rodrigo de Freitas. Les microorganismes sont concentrée au bord de la goutte, sous l'action d'un champ magnétique externe.
- Photo 8 - Microscopie optique à fort grossissement des micro organismes magnétotactiques d'environ 6 μ m.
- Photo 9 - Trajectoire en U décrite par un microorganisme mag - netotactique d'environ 6 μ m à la suite d'une inver - sion du champ magnétique (5G). L'intervalle de temps entre 2 positions est 0.5 secondes. La distance des trajectoires avant et après l'inversion est 45 μ m.

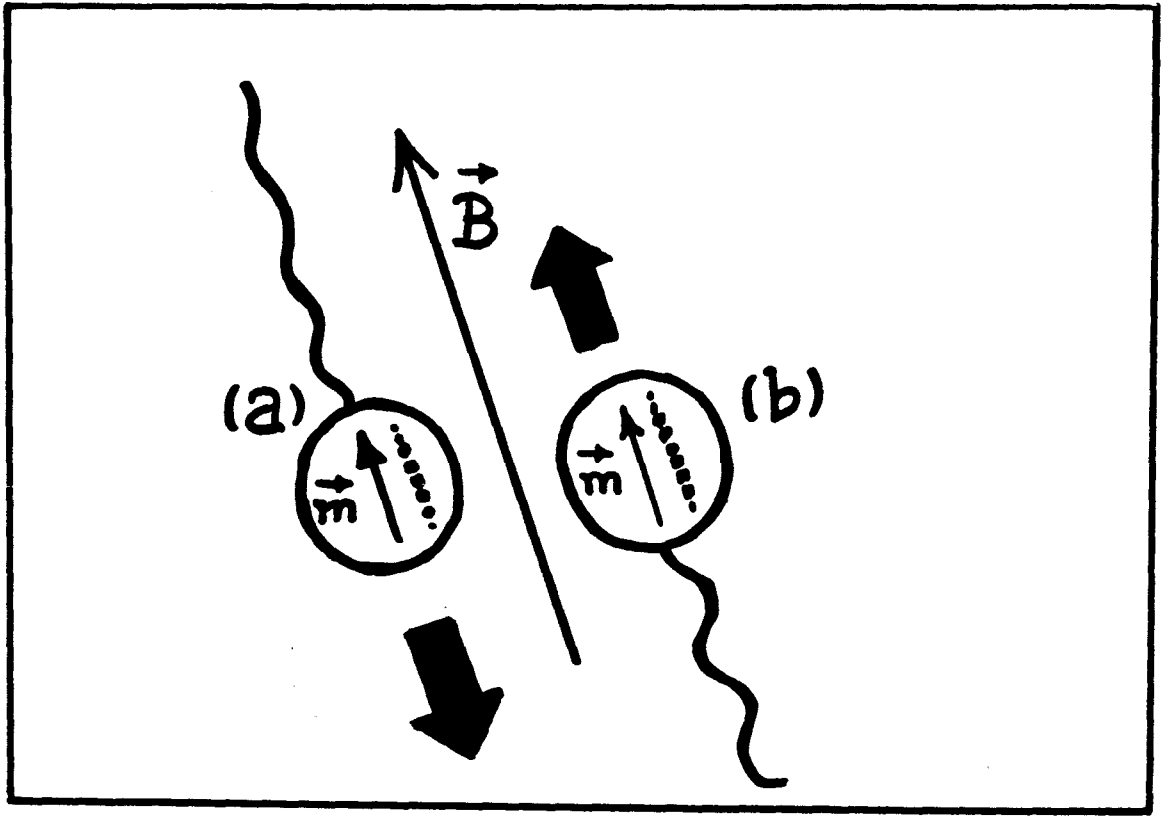


PHOTO N° 1

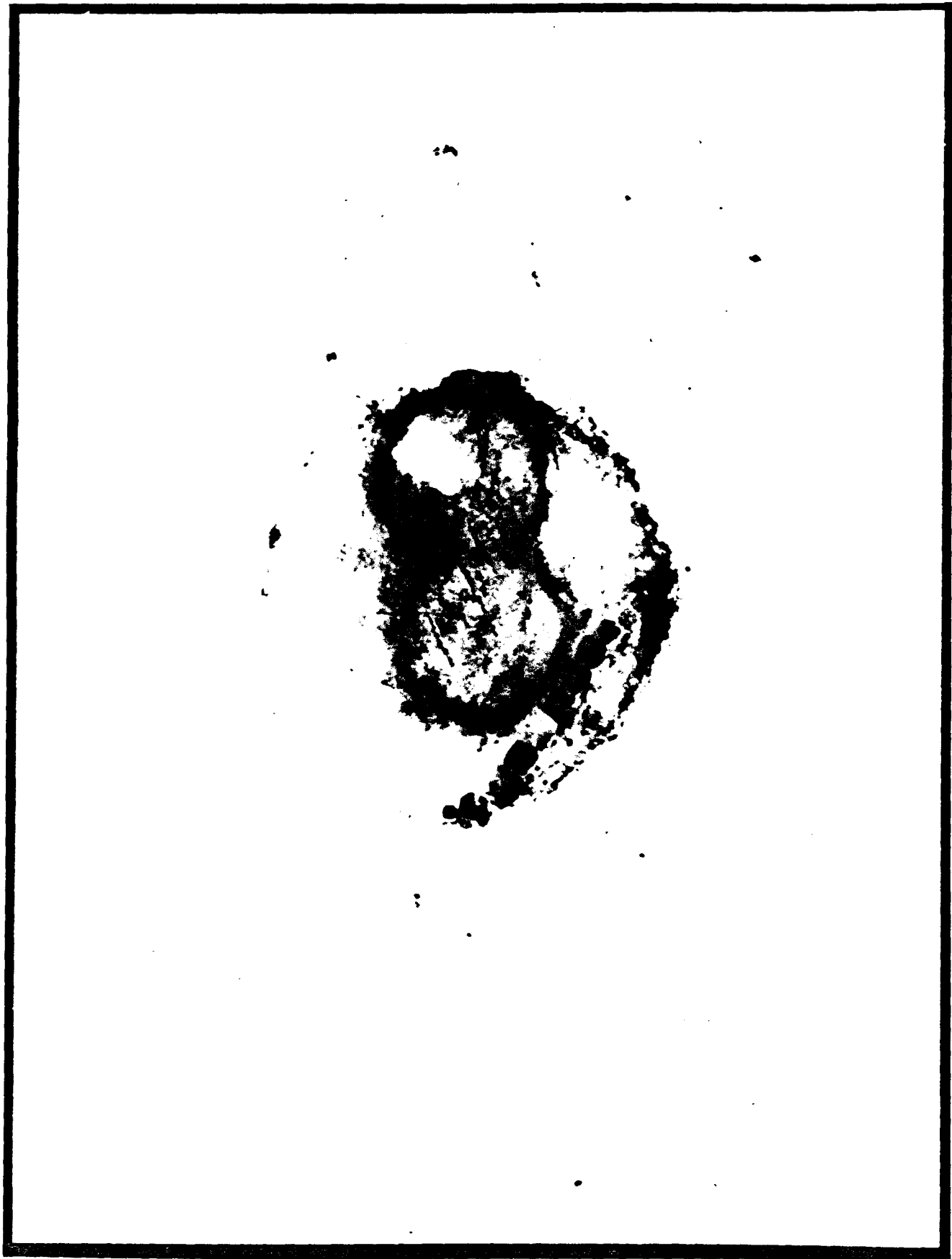
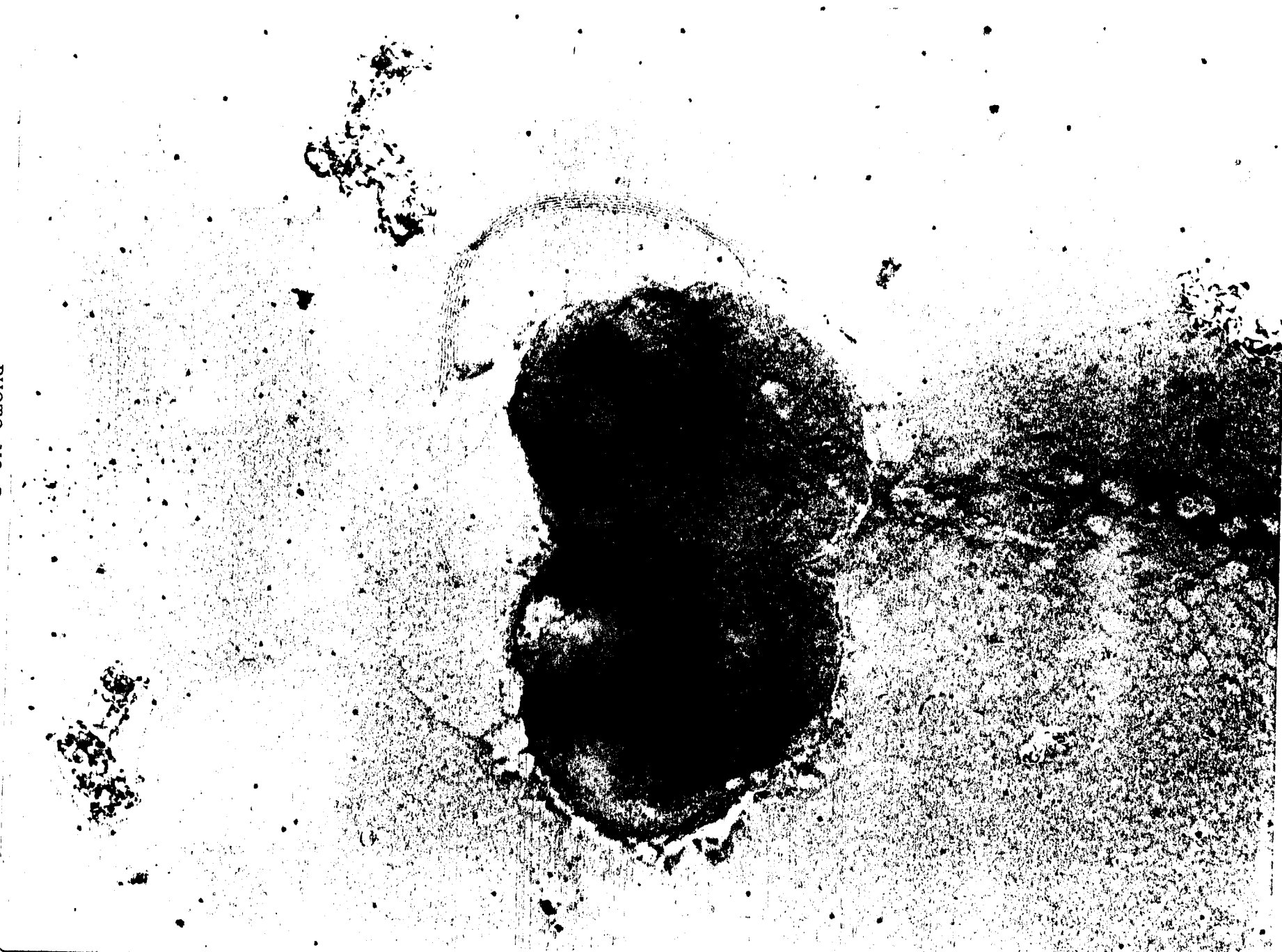


PHOTO N° 2

PHOTO N° 3



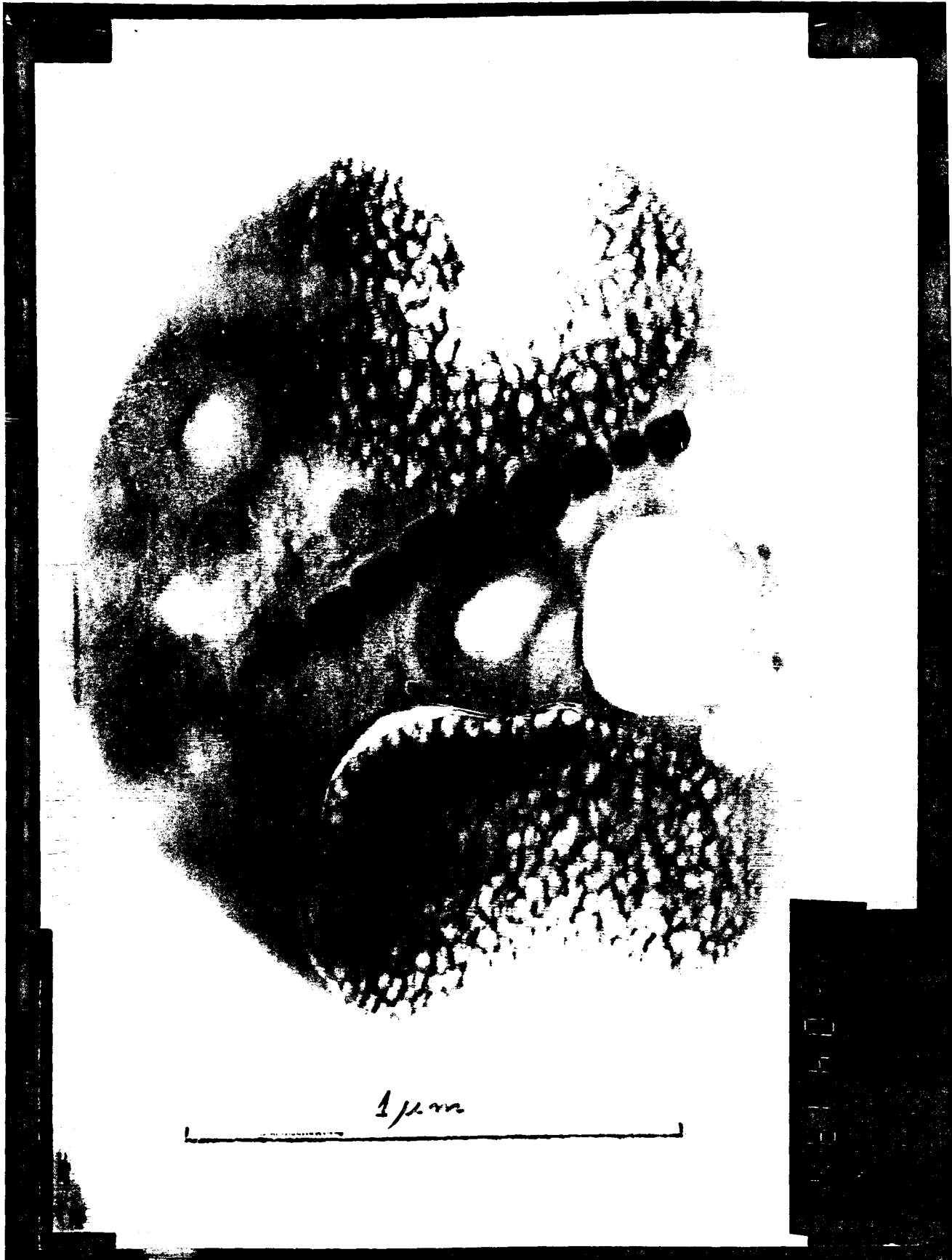


PHOTO N° 4

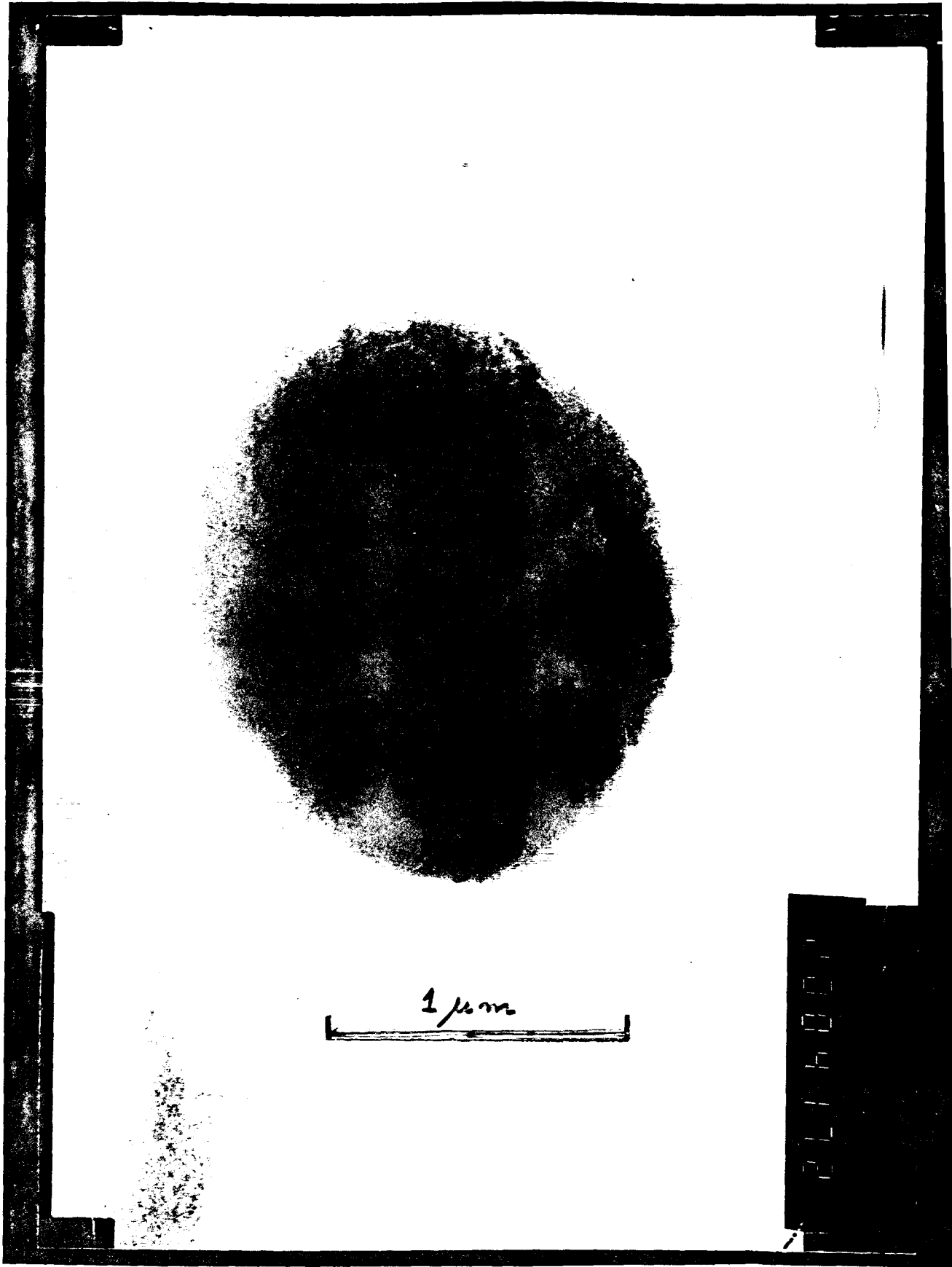
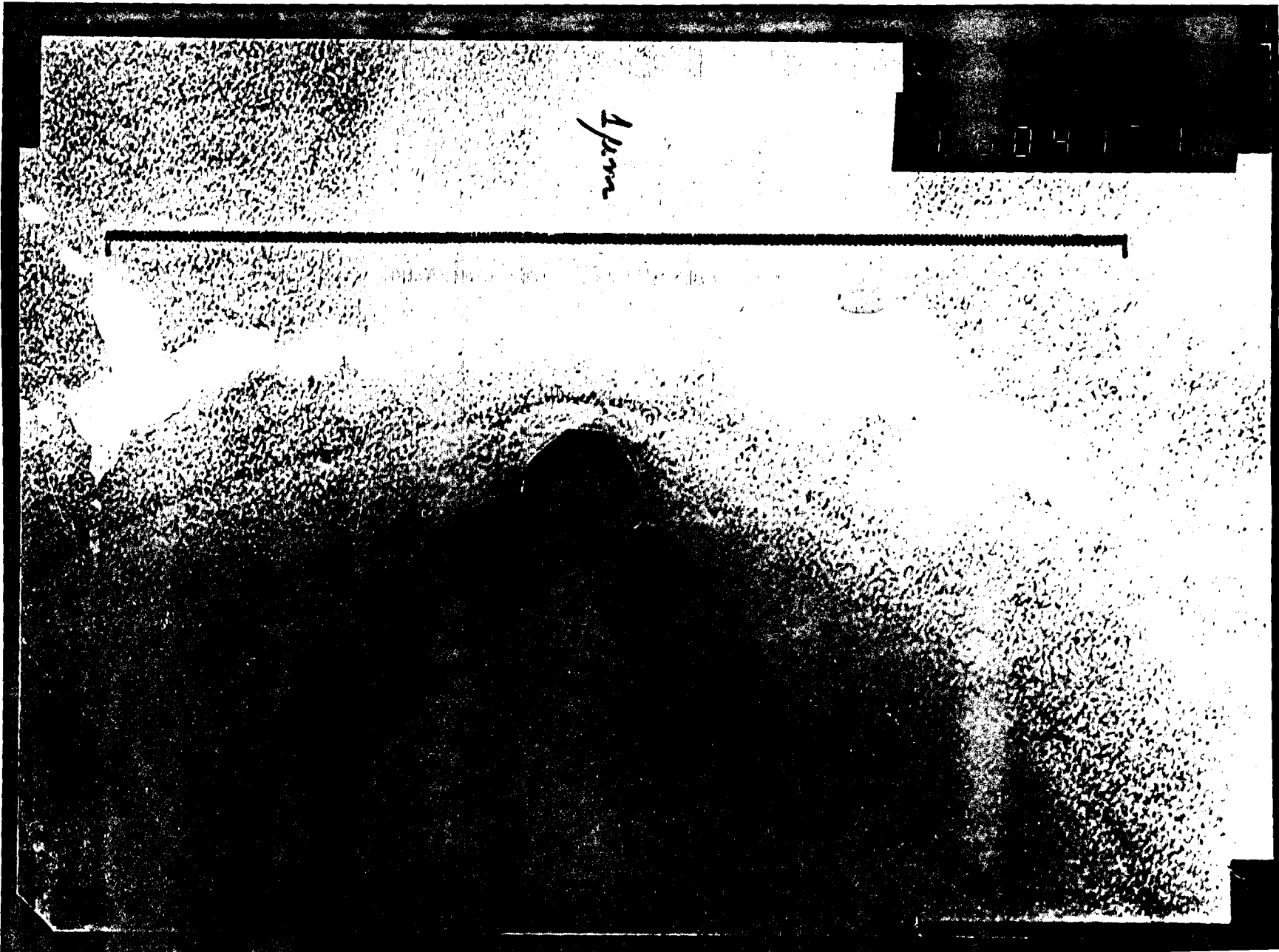


PHOTO N° 5



Apna

PHOTO No. 6



PHOTO No 7.

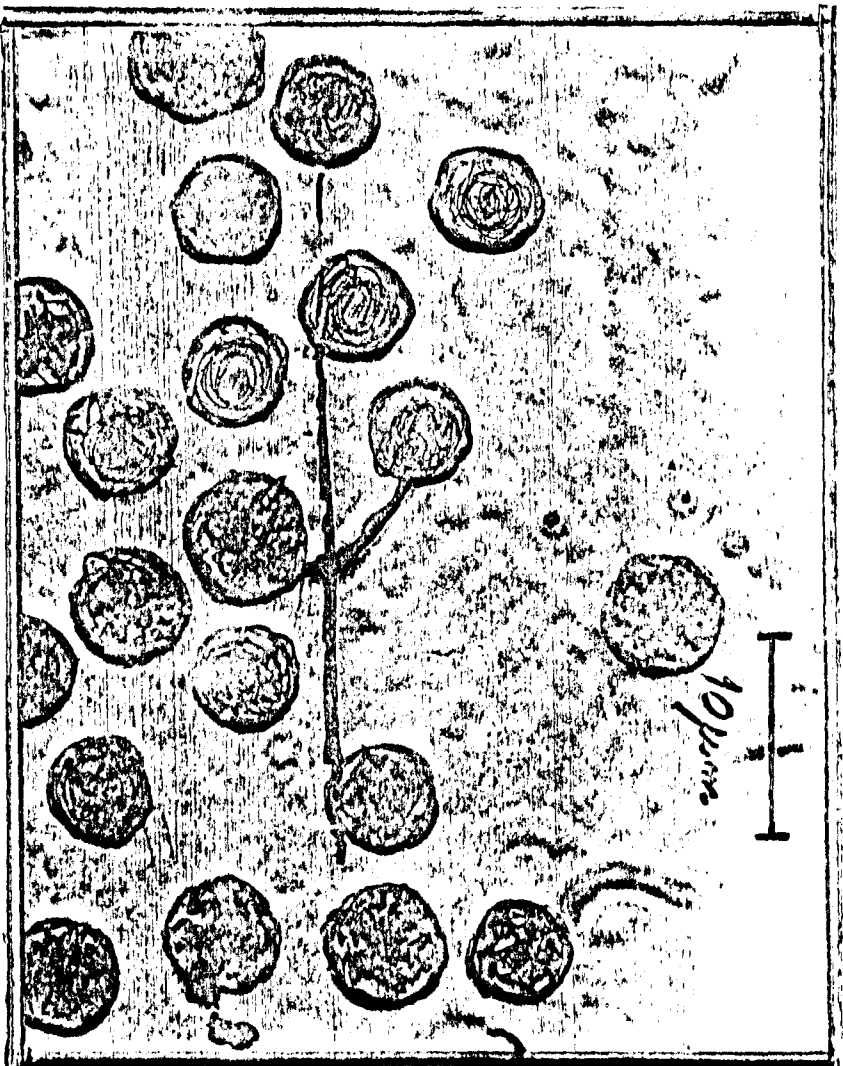


PHOTO No. 8

PHOTO N° 9

