Zeitschrift: Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
Herausgeber: Schweizerische Astronomische Gesellschaft
Band: 44 (1986)
Heft: 216

Artikel: L'origine de la lune : un gigantesque impact?
Autor: Benz, Willy
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-899155

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

L'origine de la Lune: un gigantesque impact?

WILLY BENZ

1. Introduction

Aussi paradoxal que cela puisse paraître, l'origine de la lune reste une énigme. Malgré un déploiement sans précédent de moyens -un des buts principaux des missions Apollo était de trancher la question une fois pour toutes- il n'existe pas à l'heure actuelle de consensus général en faveur d'une théorie particulière. Au contraire, au fur et à mesure de l'analyse des échantillons les théories existantes semblent avoir de plus en plus de difficultés à rendre compte des résultats.

En 1976 déjà, cette situation était suffisamment claire au yeux de deux groupes de chercheurs (CAMERON et WARD d'une part, HARTMANN et DAVID d'autre part) pour qu'ils proposent simultanément une nouvelle théorie qui devait réconcilier tous les faits: c'est la théorie dite de l'impact. Une gigantesque collision entre la terre et une autre planète il y a quelques 4.5 milliards d'années aurait donné naissance à la lune. On se rend tout de suite compte que l'établissement d'un modèle permettant de vérifier ce scénario est extrêmement complexe, ce qui explique que cette théorie n'a remporté à l'époque qu'un succès relatif. Ces dernières années, l'avènement des super-ordinateurs a permis la modélisation de cette collision, suscitant du même coup un regain considérable d'attention sur le sujet. Avant de présenter les résultats des simulations numériques réalisées en collaboration avec W.L SLATTERY (Los Alamos National Laboratory) et A.G.W. CAMERON (Harvard University) sur les super-ordinateurs CRAY-XMP du Los Alamos National Laboratory, je passerai brièvement en revue les autres théories mettant en évidence leurs points faibles.

Avant cela pour bien situer le problème, il est nécessaire de faire une parenthèse. Tout d'abord la plupart des théories (si ce n'est toutes) cherchent à former un disque de matière autour de la terre plutot que directement la lune. L'évolution ultérieure de ce disque, c'est-à-dire le transport de moment cinètique dû à des processus dissipatifs, va permettre à une partie de la matière de s'éloigner de la terre suffisamment pour sortir de la limite de ROCHE. Une fois cette limite franchie, plus rien ne s'oppose à la formation de la lune par accrétion de cette matière (WARD et CAMERON 1978, THOMPSON et STEVENSON 1983). Une des caractéristiques essentielles de cette phase disque est de permettre l'évaporation des éléments volatiles qui subsisteraient dans les roches. Cette perte est capitale car l'analyse des roches lunaires a montré que notre satellite était extrêmement pauvre en éléments volatiles. La parenthèse étant close, je peux présenter brièvement les différentes théories.

2. Théories

Bien qu'il existe en fait de nombreuses théories, la plupart ne sont que l'extension de la précédente, de manière à incorporer une nouvelle observation ou contrainte théorique. Si l'on y regarde de près, on constate que seules trois idées réellement différentes constituent la charpente de l'édifice. Ces trois idées sont: (1) fission, (2)capture et (3) formation simultanée.

Voici en quelques mots de quoi il s'agit.

2.1. Fission

La plus ancienne des théories. Elle a été proposée en 1879 déjà, par GEORGES DARWIN (le fils de CHARLES) lorsque, intégrant l'orbite de la lune en «arrière» il trouva que cette dernière était ramenée très près de la terre. Il proposa donc que la lune n'était rien d'autre qu'une partie du manteau terrestre. A cette époque, DARWIN connaissait déjà les différents équilibres possibles d'un corps auto-gravitant en rotation. Ils savait donc que si un corps tourne plus vite qu'une certaine valeur critique, il n'existe pas de solution stable et que le corps sera sujet à une instabilité applée fission.

Le développement des ordinateurs a permis d'étudier en grand détail ces instabilités. Il est tout d'abord apparu que l'objet en proie à cette instabilité ne se partage pas en deux «morceaux», mais que petit à petit il se déforme, se transformant en une sorte de barre. Subséquemment, cette barre en rotation donne naissance à une stucture spirale, la situation finale étant un objet central entouré d'un disque de matiére (DURISEN et GINGOLD, 1985).

Ce scénario est correct pour autant que la terre puisse être considérée comme étant complétement liquide. De sérieux doutes ont été émis récemment par A.P. BOSS et H. MIZUNO (1985) à ce sujet. Supposant que la terre n'était que partiellement liquide, ils ont developpé un modèle fortement dissipatif. Le principal résultat de cette étude fut de montrer que, pour une terre fortement visqueuse l'instabilité de fission disparaît et est remplacée par l'éjection de matière de l'équateur avant même que l'objet n'atteigne la vitesse critique caractéristique de l'instabilité. Le résultat final étant le même que précédement: un objet central entouré d'un disque.

Ces deux versions d'une même théorie ont cependant le même problème. La quantité de moment cinétique correspondant est environ quatre fois supérieure à celle observée actuellement dans le système terre-lune. le moment cinétique est une grandeur conservée dans un système isolé. Par conséquent, pour expliquer ce défaut, il est nécessaire d'invoquer un mécanisme éliminant du moment cinétique. Le seul processus raisonnable envisageable est que le système perde de la masse, cette masse entraînant avec elle une partie du moment cinétique. Malheureusement, le résultat des simulations montre que seul environ 30% du moment cinétique peut être perdu par ce moyen. On est toujours loin du compte.

Un autre problème majeur consiste à savoir d'où la terre aurait pu obtenir un moment cinétique si élevé pour permettre la fission. En effet, si les planètes croissent au gré de collisions aléatoires -comme les récentes théories s'accordent à le croire (WETHERHILL, 1985)- le moment cinétique résultant devrait être pratiquement nul.

En résumé, cette théorie est confrontée tout d'abord à la difficulté d'expliquer comment la terre a pu se former avec autant de moment cinétique, puis comment a-t-elle pu s'en débarasser!

Il existe encore d'autres difficultés liées aux différences chimiques existantes entre la terre et la lune (la déficience d'éléments sidérophiles de celle-ci par rapport au manteau terrestre par exemple). Si la lune n'est qu'une partie de la terre, pourquoi existe-t-il des différences de composition chimique?

2.2. Capture

La lune est capturée lors d'une rencontre proche avec la terre. Cette théorie rend compte des différences de composition chimique de manière naturelle puisque l'objet capturé peut avoir n'importe quelle composition. Cependant, le moment cinétique reste un problème puisque la capture de la lune, à une distance de trois rayons terrestres, ne correspond qu'à un sixième du moment cinétique du système. Une capture à une distance plus éloignée est pratiquement exclue car la dissipation d'énergie cinétique orbitale en chaleur par effet de marée devient pratiquement nulle durant le bref instant que dure une rencontre. Or, cette dissipation est indispensable si l'on veux que la lune passe d'une orbite héliocentrique à une orbite géocentrique.

La dissipation d'énergie cinétique en chaleur est donc au centre du problème. Pour permettre la capture il faut lui permettre d'agir suffisamment si l'on veut obtenir un ralentissement suffisant de l'objet que l'on veut capturer. Or, encore une fois, une rencontre ne dure que quelques heures et ce temps est beaucoup trop court pour permettre une dissipation importante. Par conséquent, seule une lune sur une orbite très voisine de la terre, ayant une vitesse relative très faible, peut être capturée. Cependant on ne voit pas comment la lune pouvait se trouver sur une telle orbite sans avoir ou bien percuté la terre ou bien été deviée bien avant sur une orbite d'excentricité plus grande.

Un remède à la relative inefficacité des effets de marée à dissiper de l'énergie cinétique a été proposé: la lune aurait passé à l'intérieur de la limite de ROCHE et aurait été réduite en miettes, une partie de cette matière se mettant en orbite et formant un disque. Il se trouve que, vraisemblablement, ce n'est pas ainsi que la nature a prévu les choses. Des simulations numériques récentes, effectuées par MIZUNO et BOSS (1985), montrent au contraire que la planète n'est pas détruite mais seulement déformée, retrouvant sa forme sitôt qu'elle s'est éloignée suffisamment de la terre.

2.3. Formation simultanée

La lune et la terre se forment de manière simultanée à partir du même nuage de gaz et de poussières. Durant la formation de la terre, il se forme autour d'elle un disque de matière en orbite. Cette matière provient du même nuage que celle formant la terre. Par conséquent, elle est chimiquement identique. Néanmoins, la terre possède un noyau de fer constituant environ un tiers de sa masse, alors que la valeur maximale de la taille du noyau de fer lunaire est de quelques pourcents seulement. La question est donc: comment se fait-il que tout le fer se soit déposé sur la terre et qu'une infime partie soit restée en orbite? Pour obtenir cette séparation, il est nécessaire d'imaginer un filtre opérant le tri en orbite.
Si la matière en orbite n'est pas constituée de grosses roches mais de fines particules, alors un tel filtre peut être envisagé. Par contre, sitôt que ces poussières s'aglomèrent pour former des objets de plus en plus gros, le filtre cesse d'être efficace. Par conséquent, il faudra former la lune extrêmement rapidement pour éviter la déposition de fer supplémentaire.

Le problème principal cependant est, encore une fois, celui du moment cinétique. Comment peut-on obtenir un moment cinétique aussi important que celui du système terre-lune à partir de l'accrétion aléatoire d'une grande quantité de petits objets?

Finalement, cette théorie ne supposant aucune circonstance particulière, pourquoi les autres planètes comparables à la terre (Venus, Mars) n'ont-elle pas de lune d'une taille comparable à la nôtre?

3. L'impact

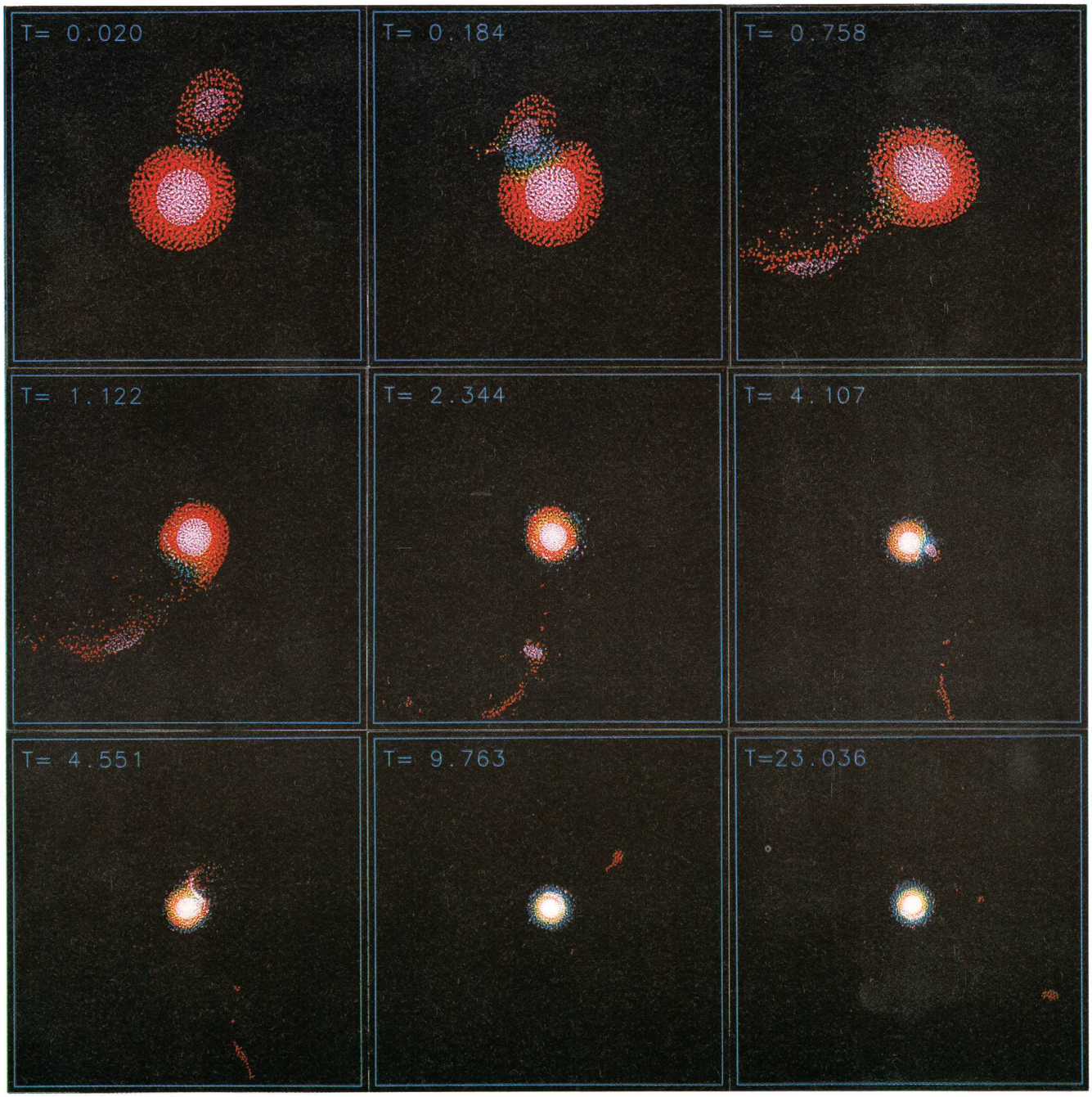
Une des principales caractéristiques de la science est d'aimer les choses simples. Or, devant tant de difficultés et la nécessité d'invoquer des mécanismes aussi peu plausibles, il était normal qu'une nouvelle théorie vît le jour: celle de l'impact. La formation de la lune à la suite de la collision de deux planètes a l'avantage de paillier d'un seul coup à toutes les difficultés esquissées ci-dessus: le moment cinétique est déterminé par les paramètres de l'impact, il n'y a pas d'excès. Le noyau de fer de l'impactant est séparé du manteau au moment de la collision et finit par être absorbé par la terre. La chaleur dégagée lors de la collision est telle que pratiquement tous les éléments volatiles sont perdus, rendant ainsi compte de leur presque totale absence sur la lune. De plus, cette théorie a l'avantage de s'inscrire parfaitement dans le cadre plus général des théories actuelles de la formation du système solaire (WETHERHILL, 1985). Ces théories prédisent en effet que les planètes croissent à la suite de collisions successives avec des plus petits objets généralement formés dans un voisinage plus ou moins proche de la planète principale. Par exemple, plus de 70% de la masse de la terre proviendrait de ces objets. Des simulations numériques ont montré que, dans le cas de la terre, plusieurs collisions avec des planètes de la taille de Mars ou plus sont parfaitement possibles. Certaines vont même jusqu'à retourner l'argument et prétendent que l'existence de notre lune est en quelque sorte une preuve de la relative abondance de collisions importantes au début du système solaire et que, par conséquent, notre idée de la formation des planètes est proche de la vérité!

4. Le modèle

Nous avons developpé un modèle numérique permettant une collision de deux planètes. En fait, il s'agit d'un programme d'hydrodynamique à 3 dimensions originellement developpé à l'Observatoire de Genève (BENZ, 1984) et modifié par la suite au Los Alamos National Laboratory. Etant donné la complexité de la simulation, un certain nombre d'hypothèses sont nécessaires. La liste suivante donne ce qui est inclu dans le modèle et ce qui ne l'est pas.

Inclus dans le modèle:
- traitement complet de la gravité
- une équation d'état réaliste (TILLOTSON, 1962) developpée par l'US Air Force pour simuler des impacts à hypervitesse. En fait, cette équation d'état est une forme analytique contenant 10 paramètres libres déterminés par ajustement de l'équation à des résultats expérimentaux. Elle permet de traiter aussi bien la phase gazeuse que solide des diverses roches ou métaux simulés.
- la dissipation d'énergie cinétique dans les chocs par la méthode dite de la viscosité artificielle.
- chaque planète est représentée par un noyau de fer constituant 32% de sa masse (valeur terrestre) entouré d'un manteau de granite.

Non inclu dans le modèle:
- les cisaillements ou bien équivalent: le tenseur des tensions est diagonal. Cette Hypothèse est très commune lors de la simulation d'impact à très haute vitesse, où l'énergie cinétique dépasse de très loin l'énergie de cohésion du solide. Dans le cas de planètes liquides, cette approximation n'a aucun effet.



- le transport d'énergie par radiation ainsi que le refroidissement par radiation. Ceci est justifié par un argument d'échelle de temps: le temps réel couvert par nos simulations est inférieur à 24h. Durant ce temps, le transport (ou la perte) d'énergie par radiation est négligeable pour les masses concernées.

5. Résultats

Nous avons effectué toute une série de simulations en changeant les conditions initiales couvrant à peu près toutes les possibilités (étant donné qu'une simulation nécessite de nombreuses heures de calculs, seul un nombre limite de cas peut être calculé). Nous avons varié le rapport des masses entre l'impacteur et la terre entre 0.1 et 0.42 (cela représente un objet dont la masse se situe entre une et quatre fois la masse de la planète Mars qui percute la terre!), la vitesse relative au moment de l'impact (entre 11 et 20 km/s) ainsi que la quantité d'énergie interne initiale rendant les planètes soit solides soit liquides. Parmi tous ces cas la plupart n'ont pas donné lieu à la formation d'une lune. On peut résumer les résultats obtenus de toutes ces simulations en donnant une liste de critères que la collision doit satisfaire si l'on veut qu'elle résulte dans la formation soit d'un disque soit directement d'une lune. Cette recette, en quelque sorte, est la suivante:

- la vitesse relative au moment de l'impact doit être petite (plus petite que 14 km/s environ).
- le rapport de masse entre l'impacteur et la terre doit se situer dans la fourchette:

$$0.12 \leq \frac{M_{impacteur}}{M_{terre}} \leq 0.16.$$

Si ce rapport est plus grand, pratiquement tout l'impactant est accrété par la terre avec une faible fraction s'échappant du système. La quantité de matière mise en orbite n'est que d'environ une demi-masse lunaire. A l'opposé, si l'impactant est trop petit, son noyau de fer finit en orbite autour de la terre. Le disque ainsi formé est par conséquent beaucoup trop riche en fer pour permettre la formation d'une lune pauvre en fer.

La séquence d'images présentée ci-dessus illustre le cas où l'impactant a une masse de 14% de la masse terrestre et percute celle-ci à 11 km/s. Le temps est donné dans le coin supérieur gauche en heures, l'origine étant le premier contact. Le manteau de granite des deux planètes est initialement rouge. Par la suite, sa couleur change en fonction de l'énergie interne (température) passant par le jaune, bleu et blanc pour les régions les plus chaudes. Cette façon de procéder permet de visualiser l'onde de choc initiale se propageant au travers de la terre. Les noyaux de fer sont représentés en violet et leur couleur ne change pas au cours du temps. Le changement de dimension de la terre est dû au changement d'échelle de la zone dessinée. Sa couleur blanche vers la fin de la simulation provient partiellement d'un effet de saturation des couleurs dû à la petitesse de l'échelle, ainsi que d'une augmentation de température.

Le déroulement des évènements est le suivant: au moment de la collision l'impactant est déformé à cause du champ gravitationnel terrestre. Après 0.184 heures (11 min.), on assiste à la formation d'un jet dirigé vers l'avant et consitué principalement de roches vaporisées s'évadant du système à très haute vitesse. A partir de ce moment, l'impactant est détruit et dispersé dans l'espace environnant. Après 1.122 heures (67 min.), on commence à deviner la séparation du noyau de fer du manteau de granite. Cette séparation est totale après 2.344 heures (140 min.). Les propriétés intrinsèques du fer expliquent que le noyau n'est jamais complètement détruit comme le manteau de granite, assurant ainsi la séparation entre noyau et manteau. A partir de ce moment, le noyau de fer se rapproche de la terre et finit par entrer en collision avec celle-ci au temps 4.107 (246 min.). Auparavant, le système formé par la terre et le noyau de fer de l'impactant en rotation autour d'elle transfert aux roches en orbites suffisamment de moment cinétique pour assurer leur mise en orbite sur une trajectoire ne percutant plus la terre. A la fin des premières 24 heures, une lune primitive est formée sans aucune trace de fer (en fait la résolution du modèle donne une borne supérieure qui est de 3% de la masse lunaire). Si l'on y regarde de près, on constate également la présence d'un disque d'une masse égale à une demi-masse lunaire. L'évolution ultérieure de cette lune primitive va dépendre de son interaction avec ce disque. Si elle est suffisamment freinée, elle va se rapprocher de la terre pénétrant la limite de ROCHE. A ce moment, elle sera détruite et répartie sous forme d'un disque en orbite. Au contraire, si la terre en rotation transfère rapidement assez de moment cinétique au satellite, alors celui-ci va s'éloigner, formant ainsi notre lune. Il faut mentionner que le premier scénario est nettement le plus probable. Malheureusement, la résolution du modèle ne permet pas de poursuivre les calculs afin de trancher la question. De plus, de toutes les simulations effectuées avec un rapport des masses compris entre 0.12-0.16, seule celle où ce rapport des masses était égal à 0.14 forme une lune, toutes les autres forment un disque en orbite. Par conséquent, pour des raisons de probabilité, la formation de la lune à partir d'un disque semble le plus raisonnable.

6. Conclusion

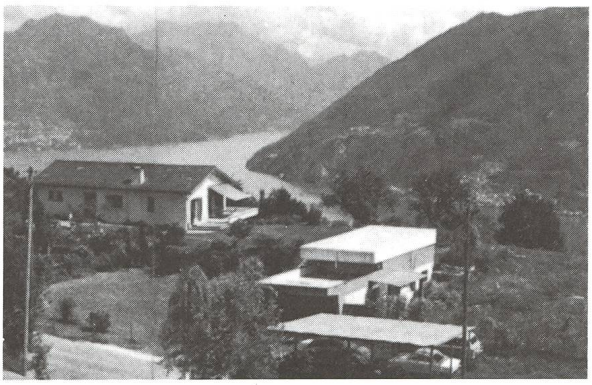
Pour la première fois, il existe une théorie qui non seulement s'inscrit parfaitement dans le contexte des idées actuelles sur la formation du système solaire, mais qui, de plus, ne souffre d'aucune des difficultés majeures rencontrées par les autres théories. ces simulations ont réussi à transformer une idée en un scénario plausible. Néanmoins, il reste à fournir la preuve ultime que ce scénario est non seulement plausible, mais que c'est bien ainsi que cela s'est passé. Cette preuve se trouve vraisemblablement dans la chimie des roches et dans la taille exacte du noyau de fer lunaire. Malgré tout ce que l'on a pu dire, l'homme sur la lune et sa moisson d'échantillons de roches ramenées sur la terre n'a pas été inutile, si tant est que la connaissance de l'origine de notre satellite - et la nôtre - ne l'est pas.

Références

BENZ, W., 1984, Thèse de doctorat num. 2118, Université de Genève
BENZ, W., SLATTERY, W.L., CAMERON, A.G.W., 1986, Icarus, in press
BOSS, A.P., MIZUMO, H., 1985, Icarus, 63, 134
CAMERON, A.G.W., WARD, W.R., 1976, Lunar Sci, VII, 120
DURISEN, R.H., GINGOLD, R.A., 1985, The Origin of the Moon, eds. W.K. Hartmann, R.J.
PHILLIPS, G.J. TAYLOR
HARTMANN, W.K., DAVIS, D.R., 1975, Icarus, 24, 504
MIZUNO, H., BOSS, A.P., 1985, Icarus, 63, 109
TILLOTSON, J.H., 1962, General Atomic Report GA-3216, July 1962
THOMPSON, A.C., STEVENSON, D.J., 1983, Lunar Planet. Sci., XIV, 787
WARD, W.R., CAMERON, A.G.W., 1978, Lunar Planet. Sci., IX, 1205
WETHERHILL, G.W., 1985, Science, 228, 877

Adresse de l'auteur:
WILLY BENZ, Los Alamos National Laboratory, USA

Feriensternwarte CALINA CARONA



Calina verfügt über folgende Beobachtungsinstrumente:

Newton-Teleskop ∅ 30 cm
Schmidt-Kamera ∅ 30 cm
Sonnen-Teleskop

Den Gästen stehen eine Anzahl Einzel- und Doppelzimmer mit Küchenanteil zur Verfügung. Daten der Einführungs-Astrophotokurse und Kolloquium werden frühzeitig bekanntgegeben. Technischer Leiter: Hr. E. Greuter, Herisau.

Neuer Besitzer: **Gemeinde Carona**

Anmeldungen an Frau M. Kofler,
6914 Carona, Postfach 30.