

**Zeitschrift:** Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft  
**Herausgeber:** Schweizerische Astronomische Gesellschaft  
**Band:** 45 (1987)  
**Heft:** 221

**Artikel:** Évolution stellaire et supernovae  
**Autor:** Meynet, Georges  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-898845>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 08.02.2025

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

# Evolution stellaire et supernovae

GEORGES MEYNET

Dans ce qui va suivre nous allons passer en revue quelques principes fondamentaux de l'évolution stellaire, ceci afin de replacer dans le contexte plus large de l'histoire évolutive des étoiles, le phénomène de Supernova. Précisons encore que nous ne parlerons ici que des Supernovae de type II, c'est-à-dire du type de celle observée dans le Grand Nuage de Magellan le 24 février dernier.

## La stabilité des étoiles

Avant d'aborder les raisons pour lesquelles une étoile explose, essayons de comprendre ce qui la fait briller. Partons d'une constatation à la fois simple et compliquée, simple dans son énoncé mais complexe par la nature des observations et des raisonnements qui nous ont permis de l'établir: *la plupart des étoiles sont stables*. Par là nous entendons que leurs caractéristiques physiques moyennes telles que leur rayon, leur luminosité restent constantes pendant de très longues périodes de temps. Nous en avons la preuve notamment grâce à la découverte d'algues fossiles âgées de plus de trois milliards d'années. Pour que de tels végétaux aient pu croître, les conditions climatiques à la surface de la Terre, à cette époque, devaient être très semblables à celles que nous connaissons aujourd'hui. Nous déduisons donc que notre astre du jour a gardé les mêmes caractéristiques durant au moins trois milliards d'années. Martin Schwarzschild dans son livre remarquable «Structure and Evolution of the Stars» présente un autre argument en faveur de la stabilité stellaire en lien avec l'observation de certaines étoiles variables du type Céphéide. La période de pulsation de ces astres peut être mesurée avec une précision très grande. Durant les cinquante dernières années ces périodes se sont modifiées à un taux si lent qu'il faudrait un temps de l'ordre du million d'années pour qu'il y ait un changement notable. Il s'ensuit donc que la structure interne de ces astres, qui détermine la période, reste stable au moins pendant un million d'années.

## Conséquence de la stabilité des étoiles

La stabilité des étoiles va nous permettre de comprendre pourquoi les étoiles brillent. Rappelons qu'une étoile peut être considérée comme une sphère de gaz. Le gaz est un état de la matière où les particules interagissent très peu entre elles et sont animées de mouvements plus ou moins importants selon la quantité d'énergie contenue dans le milieu. Ainsi un gaz, laissé à lui-même, a tendance à occuper tout le volume mis à sa disposition. Pourquoi les étoiles restent-elles alors confinées dans les limites d'une sphère? Depuis Newton nous savons que les masses s'attirent en raison inverse du carré de leur distance et ceci est vrai quelle que soit la nature des masses en présence, cela peut être des planètes aussi bien que des molécules d'un gaz. Dans le cas des molécules, ces forces sont bien sûr extrêmement faibles et c'est pourquoi, dans un gaz, ces forces peuvent être négligées. Cependant lorsque de très grandes quantités de gaz sont réunies, comme c'est le cas dans une étoile, ces forces gravifiques deviennent très importantes et ce sont elles qui confinent la matière des étoiles dans un volume relativement bien défini.

Si la force gravifique était la seule à agir la sphère stellaire subirait une contraction. Or, nous venons de le voir, les étoiles sont stables, donc il existe une autre force s'opposant à la gravité et maintenant l'étoile en équilibre.

Quelle est cette force? Il s'agit d'une force de type «dynamique», c'est-à-dire liée aux mouvements des particules de matière et de lumière constituant le milieu stellaire. Considérons une boîte séparée en deux volumes égaux par une paroi coulissante (voir figure 1a). Introduisons un gaz A dans le compartiment de gauche et un gaz B dans celui de droite. Les particules constituant ces deux gaz sont animées de mouvements aléatoires et vont frapper les parois du récipient, exerçant ainsi sur eux une force de pression. Si les deux gaz A et B

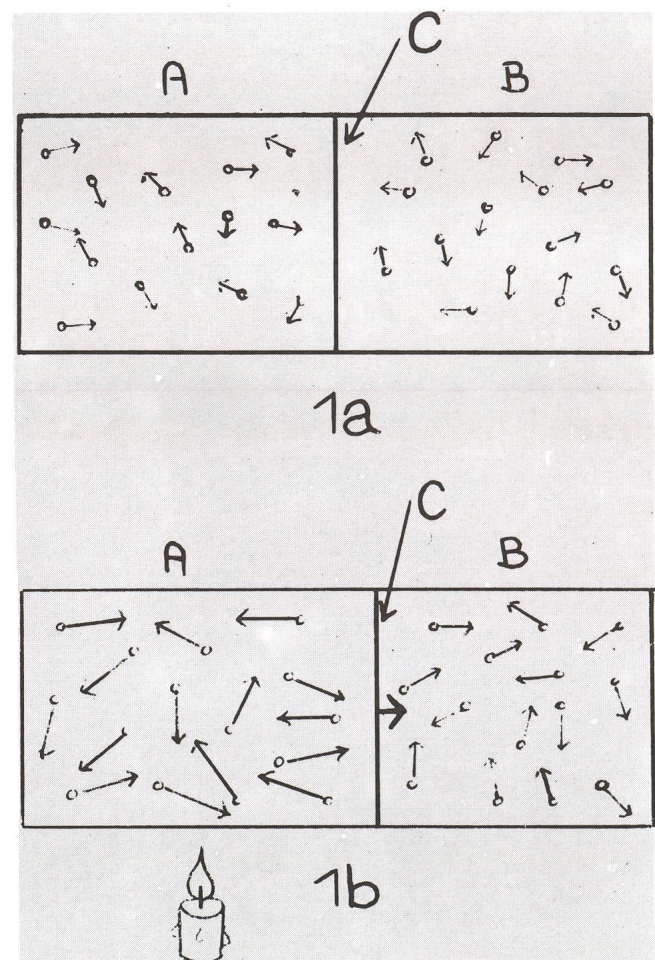


Figure 1: Un gaz remplit les deux compartiments A et B de la boîte. Ces deux compartiments sont séparés par une paroi coulissante C. Les petites flèches associées aux particules symbolisent leur vitesse. En a), les deux gaz ont la même température et sont à la même densité. En b), le gaz dans le compartiment A est chauffé. La paroi C est alors poussée vers la droite.



sont identiques et sont aux mêmes conditions de température et de densité, la paroi coulissante subit une pression sur son côté droit égale à celle qui s'exerce sur son côté gauche et donc sa position reste inchangée. Maintenant si nous donnons de l'énergie au gaz A, autrement dit si nous le chauffons, le degré d'agitation des particules de ce gaz va augmenter et les chocs sur le côté gauche de la paroi C vont devenir plus fréquents et plus violents que ceux qui s'exercent sur son côté droit. Cette différence de pression entre les deux compartiments va déplacer la paroi coulissante vers la droite jusqu'à ce qu'une nouvelle situation d'équilibre soit atteinte (voir figure 1b). Cette petite expérience, où nous nous sommes placés dans une situation où les forces gravitationnelles sont négligeables afin de ne pas mélanger les effets gravifiques à ceux de la pression, nous montre qu'un gaz dans des conditions qui ne sont pas trop exotiques, exerce une pression d'autant plus forte que sa température est élevée.

Revenons maintenant aux étoiles et isolons par la pensée une petite région du milieu stellaire (voir figure 2). Sur cette petite portion  $\Delta m$  de masse stellaire s'exerce la force de gravitation qui est dirigée vers le centre et une force de sens opposé permettant de rendre compte de la stabilité des étoiles. Cette seconde force est due à une différence de pression entre la base et le sommet de  $\Delta m$ . Pour qu'elle ait le sens indiqué sur la figure 2 il faut bien sûr que la pression au niveau  $r_1$  soit plus grande que la pression au niveau  $r_2$  ou, en référence à l'expérience décrite plus haut que la température en  $r_1$  soit plus élevée que la température en  $r_2$ .

Tout ceci nous amène à formuler le principe suivant: *la stabilité des étoiles implique l'existence dans leur intérieur d'un gradient (d'une différence) de température, le milieu stellaire étant plus chaud au centre que dans les régions périphériques.*

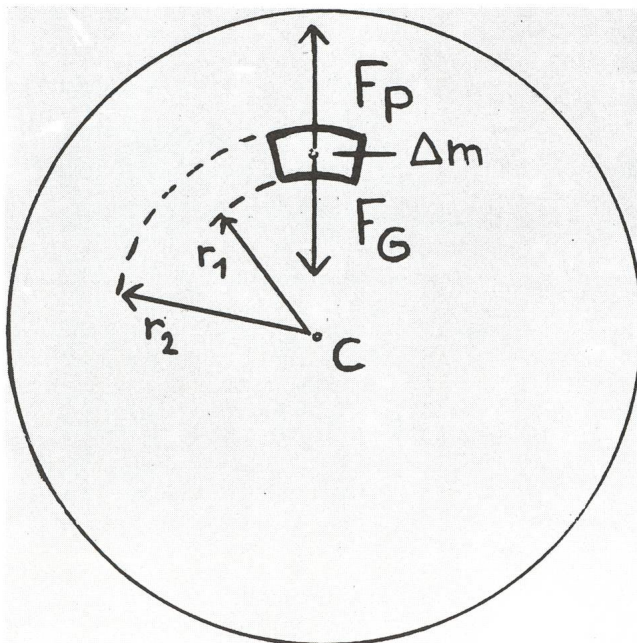


Figure 2: Un élément de masse  $\Delta m$  est isolé dans la sphère stellaire. Cet élément est soumis à la force de gravitation  $F_G$ , qui l'attire vers le centre C et à une force de pression  $F_p$  dirigée vers l'extérieur.

### Pourquoi les étoiles brillent-elles?

Pour l'instant nous n'avons fait que tirer les conséquences de la stabilité des étoiles à *un instant donné*. Allons plus loin et demandons-nous quelles nouvelles déductions nous pouvons tirer du fait que cet équilibre est maintenu sur de longues périodes.

Nous savons qu'un corps à une température donnée émet de l'énergie sous la forme de rayonnement électromagnétique et il en émet d'autant plus que sa température est élevée. L'énoncé formulé à la fin du paragraphe précédent implique que les régions proches du centre émettent par unité de masse plus d'énergie que les régions du bord. Par gramme de matière, le centre du Soleil est 30 milliards de fois plus lumineux que la surface. Ceci donne naissance à un flux d'énergie dirigé vers l'extérieur. Les photons vont se propager à travers l'étoile du centre vers le bord où finalement ils sont émis dans l'espace. Ainsi *la luminosité des étoiles est une conséquence directe de leur stabilité.*

L'étoile perd donc de l'énergie et si aucune source ne parvient à combler ces pertes, la matière se refroidira et l'équilibre avec les forces de gravité ne pourra plus être assuré. Ceci nous amène à formuler la propriété suivante: *pour que la stabilité soit maintenue sur de longues périodes, l'étoile doit fabriquer de l'énergie.* Comment y parvient-elle?

### Les sources d'énergie des étoiles

Avant de présenter les moyens qu'utilise l'étoile pour produire de l'énergie, énonçons une loi générale: lorsqu'un système devient plus lié, il y a émission d'énergie. Expliquons brièvement cet énoncé. Par système, nous entendons aussi bien une étoile qu'un noyau d'atome, mais que signifie le qualificatif «plus lié»? Pour le comprendre demandons-nous quelle quantité d'énergie nous devons fournir pour détruire un système. Si cette énergie est grande, cela signifie que le système présente une forte cohésion interne, dans le cas contraire, cela montre que le système est lâche, peu lié. Ainsi un système sera d'autant plus lié qu'il faudra fournir une plus grande quantité d'énergie pour le détruire. Mais en physique comme en chimie, rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme et l'énergie qu'il faut fournir pour détruire un système correspond aussi à l'énergie fournie par le système lorsqu'il s'est formé. La question posée à la fin du paragraphe précédent peut alors être formulée ainsi, comment l'étoile produit-elle des systèmes liés.

Deux mécanismes sont possibles et interviennent au cours de la vie d'une étoile. L'étoile peut produire de l'énergie en se contractant. Nous parlerons alors d'énergie gravitationnelle car c'est sous l'effet de la gravitation que la contraction se produit. De l'énergie peut aussi être produite par de multiples contractions microscopiques de noyaux d'atome. Nous parlerons alors d'énergie nucléaire, plus précisément d'énergie produite par des réactions de fusion thermonucléaire.

Donnons quelques brèves informations à propos de ces réactions. Dans le qualificatif thermonucléaire nous trouvons la racine thermo, ce qui signifie que la température joue un rôle important dans ce processus. Pourquoi? Nous savons que les noyaux réagissant sont tous chargés positivement et par conséquent se repoussent mutuellement selon la loi de Coulomb. Pour vaincre cette répulsion, il faut des chocs à grandes vitesses relatives. Dans une étoile, les vitesses relatives résultent de l'agitation thermique des particules. Pour que les noyaux entrent en réaction il faut donc que la température soit suffisamment élevée pour que les barrières coulombiennes soient dépassées. Cependant la température ne doit pas être trop grande sinon les noyaux, une fois le mur de potentiel élec-



Tableau 1:  
Stades évolutifs pour une étoile de  $25 M_{\odot}$

Combustible	échelle de temps
Hydrogène	$7 \cdot 10^6$ années
Hélium	$5 \cdot 10^5$ années
Carbone	$6 \cdot 10^2$ années
Néon	1 année
Oxygène	6 mois
Silicium	1 jour

trique traversé, ne restent pas suffisamment longtemps en présence l'un de l'autre pour que l'interaction nucléaire ait le temps d'agir ou, pour employer un langage imagé, pour que la «colle» nucléaire ait le temps de prendre. Ainsi pour des réactants donnés, la fusion thermonucléaire ne peut s'amorcer que dans un intervalle de température bien défini. Voyons maintenant comment se déroule la vie d'une étoile.

### L'Evolution hydrostatique

Pendant les plus longues périodes de sa vie l'étoile produit de l'énergie par l'intermédiaire des réactions thermonucléaires qui se produisent dans ses régions centrales plus denses et plus chaudes. Lorsqu'un combustible est épuisé, l'énergie gravitationnelle prend le relais de l'énergie nucléaire, jusqu'à ce que la contraction amène les régions centrales à des températures suffisamment élevées pour que de nouvelles réactions nucléaires s'amorcent. Remarquons au passage le caractère paradoxal du comportement des étoiles. Sur Terre lorsqu'un corps perd de l'énergie, il se refroidit. Dans le cas d'une étoile la situation inverse se produit, plus l'étoile perd de l'énergie, plus elle se réchauffe! C'est ce qui arrive lorsque, dans le coeur de l'étoile, le combustible est épuisé, bien que la source d'énergie nucléaire soit éteinte la matière chaude du coeur continue à émettre de l'énergie. A ces pertes d'énergie le coeur réagit en se contractant, c'est-à-dire en se réchauffant.

Ainsi la vie d'une étoile peut se comprendre comme une succession de phases de contraction et de phases de combustion nucléaire stable. Ces dernières sont bien plus longues que les premières (en fait cela n'est vrai que pour les deux premières phases de combustion nucléaires, c'est-à-dire la phase de combustion de l'hydrogène et la phase de combustion de l'hélium, mais ces deux phases représentent à elles seules environ 99% de la durée de vie totale de l'étoile). En effet l'énergie totale émise par les réactions nucléaires durant toute la phase de fusion est beaucoup plus importante que l'énergie produite par la contraction gravitationnelle et le taux d'émission de cette énergie (la luminosité stellaire) ne varie pas beaucoup entre deux phases successives.

Ces stades successifs de combustion nucléaire et de contraction lente constituent la partie «calme» de la vie d'une étoile, nous qualifions cette évolution d'hydrostatique car elle se déroule en satisfaisant les contraintes imposées par l'équilibre des forces de pression et des forces gravifiques. Remarquons encore, avant de clore ce paragraphe, que, même lors des phases de contraction qui ont lieu entre deux phases de combustion nucléaire, l'équilibre n'est pas rompu, car la contraction est suffisamment lente pour que nous puissions considérer l'étoile comme passant à travers différents états d'équilibre.

Dans ce qui va suivre nous allons quitter le cadre général de l'évolution stellaire pour nous concentrer spécifiquement sur

le cas des étoiles massives, c'est-à-dire ayant une masse initiale supérieure à environ 9 masses solaires. Ce sont ces étoiles qui donnent naissances aux Supernovae de type II.

### La fin de la vie des étoiles massives

Le tableau 1 donne les différents stades de fusion nucléaires et les durées typiques de chacune des phases pour une étoile de 25 masses solaires. Nous pouvons constater une précipitation de l'évolution aux phases avancées. Pourquoi en est-il ainsi? La durée d'une phase de combustion nucléaire dépend de l'énergie émise par les réactions, de la quantité de combustible disponible et du taux d'émission de cette énergie, c'est-à-dire de la luminosité de l'étoile. Dans les phases avancées le réservoir d'énergie nucléaire diminue et les pertes d'énergie deviennent très importantes. Plus haut nous avons parlé des sources d'énergie, il serait bon ici de donner quelques précisions au sujet des mécanismes de perte de l'énergie.

De même qu'il existe deux sources principales d'énergie, la source gravifique et la source nucléaire, il y a essentiellement deux processus de perte d'énergie. Le premier est la perte d'énergie par le rayonnement électromagnétique. Des «particules de lumières» sont créées par les réactions nucléaires qui ont lieu dans les régions centrales de l'étoile, ces photons traversent ensuite toute la matière stellaire avant de continuer leur chemin dans l'espace. Le voyage des photons à travers l'étoile peut être très long car ces derniers interagissent fréquemment avec les particules constituant le milieu stellaire. Ils mettent un temps de l'ordre du million d'années pour traverser une étoile telle que le Soleil. Le second processus d'émission d'énergie met en jeu des particules qui, au contraire des photons, interagissent très peu avec la matière. Il s'agit des neutrinos. Ces derniers, une fois émis au centre de l'étoile, atteignent le mileu interstellaire à une vitesse égale à celle de la lumière. Ils emportent avec eux de l'énergie qui est ainsi directement soustraite du coeur de l'étoile. Pendant les phases de combustion de l'hydrogène et de l'hélium, l'étoile perd de l'énergie essentiellement par émission de photons. A partir de la fusion du carbone, la luminosité due aux neutrinos devient plus importante que celle associée au rayonnement électromagnétique et l'étoile se vide de son énergie accélérant ainsi son évolution.

Nous le voyons sur le tableau 1, le dernier stade de combustion nucléaire est la fusion du silicium qui donne naissance à un coeur de fer. Pourquoi le fer ne se transforme-t-il pas en éléments plus lourds, comme l'ont fait les produits nucléosynthétiques qui l'ont précédé? Ceci est dû au fait que le fer est l'élément le plus lié. A partir du fer aucun élément plus léger ou plus lourd ne peut se former par des réactions nucléaires exothermiques, c'est-à-dire qui produisent de l'énergie. Au contraire, pour casser un atome de fer afin de donner naissance à des éléments plus légers ou pour construire à partir du fer des éléments plus lourds, il faut fournir de l'énergie.

Arrivé au stade du noyau de fer, l'étoile a épuisé tout le combustible nucléaire contenu dans le coeur. L'énergie gravitationnelle prend le relais de l'énergie nucléaire. La compression du coeur élève sa température, ce qui devrait augmenter la pression et donc ralentir l'effondrement, or c'est le phénomène inverse qui va se produire, la contraction va aller en s'accélégrant. Plusieurs causes sont à l'origine de ce comportement. La première est directement en liaison avec le fait mentionné plus haut et concerne la grande cohésion du noyau de fer. Il s'agit du phénomène de photodésintégration du fer, des photons très énergétiques entrent en collision avec les noyaux de fer et les dissocient en particules alpha (noyaux d'hélium) et en neu-



trons. Ce processus prélève de grandes quantités d'énergie au milieu, diminue donc la pression et ainsi accélère l'effondrement. La neutronisation, c'est-à-dire la transformation d'un proton en un neutron par capture d'un électron, contribue également à accélérer le «collapse», d'une part en soustrayant au milieu des électrons, or ce sont eux qui constituent la source de pression la plus importante et d'autre part en donnant naissance à des neutrinos qui s'échappent de l'étoile en emportant de l'énergie.

Cet effondrement gravitationnel du coeur de l'étoile est le mécanisme initiateur de la Supernova. L'implosion que nous venons de décrire succinctement est accompagnée d'une émission très forte de neutrinos. Ce sont eux qui emportent l'énergie libérée par l'effondrement gravitationnel et qui vraisemblablement sont à l'origine des détections de neutrinos liées à la Supernova 1987A. Nous pourrions aller plus loin maintenant et essayer de comprendre comment cette implosion provoque l'éjection de l'enveloppe, mais nous allons nous arrêter ici en ce qui concerne cet article.

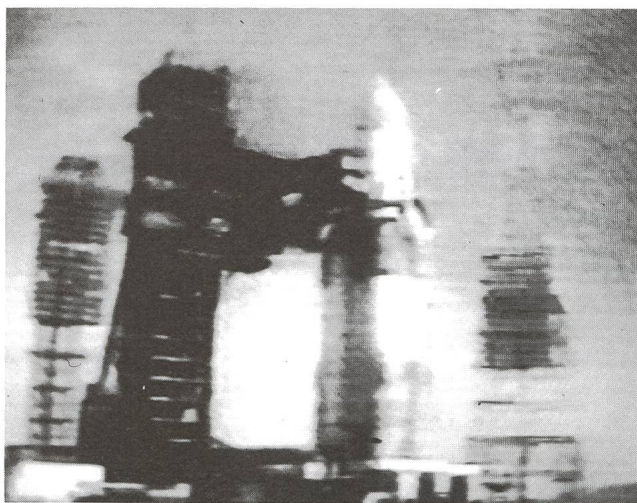
Mentionnons simplement que le problème du passage de l'implosion à l'explosion est un sujet difficile et qu'il n'est possible de l'aborder qu'à travers des modèles hydrodynamiques compliqués. Ajoutons encore pour terminer que le résidu d'une Supernova est un trou noir si la masse du coeur est supérieure à 1,5-2 masses solaires, sinon il s'agit d'une étoile à neutrons.

*Adresse de l'auteur:*

GEORGES MEYNET, Observatoire de Genève, CH-1290 Sauverny

## Superrakete erfolgreich gestartet

MEN J. SCHMIDT



*Bild 1:*  
Die startbereite Trägerrakete Energie auf dem Startplatz von Tyuratam. Um die riesige Zentralstufe sind vier Starthilfe-Raketen angebracht. Die «Huckepacknutzlast» befindet sich auf der anderen Raketensteite.

Am 15. Mai startete die Sowjetunion die stärkste je gebaute Trägerrakete erfolgreich. Ueber 120 Tonnen kann die neue Rakete mit dem Namen «Energija» (Energie) in den erdnahen Raum transportieren. Damit ist die russische Rakete noch stärker als die amerikanische Mondrakete Saturn 5 aus dem Jahre 1969.

Um 21 : 30 Uhr abends Moskauer Zeit hob die 2'000 Tonnen schwere Energie von Raumfahrtzentrum Tyuratam ab und schoss in den Himmel. Der Startschub betrug dabei, nach sowjetischen Angaben, rund 3'000 Tonnen. Zum ersten Mal in der 30jährigen sowjetischen Raumfahrt wurde als Antriebssystem Wasserstoff/Sauerstoff - Triebwerke verwendet. Diese Technologie war bislang den westlichen Raumfahrtsnationen vorbehalten gewesen.

### **Kombinierte Rakete**

Die 60 Meter hohe Trägerrakete besteht aus einer Zentralstufe, ähnlich dem externen Treibstofftank des US-Space Shuttle, die von vier Starthilferaketen umgeben ist. Diese arbeiten mit Flüssigsauerstoff und Kerosin, wie die neue Mittellastrakete SL-16. Laut russischen Angaben weist die ENERGIE eine Startleistung von 170000 PS auf. Die Zentralstufe ist mit vier Triebwerken versehen, die kryogen sind (arbeiten mit / Flüssigwasserstoff / -Sauerstoff). Auf der Zentralstufe, zwischen den beiden Starthilferaketenpaaren befindet sich ein riesiger Nutzlastbehälter. Insgesamt 120 Tonnen schwere Nutzlasten können hier verstaut werden.

Bei der Energie handelt es sich um eine sogenannte Mehrzweckrakete. Für unbemannte Nutzlasten wird der Nutzlastbehälter verwendet, sollen aber bemannte Nutzlasten in den Raum geschossen werden, wird diese durch den russischen Space Shuttle ersetzt. Damit haben die Russen eine kombinierte Trägerrakete konzipiert, welche gegenüber dem US-Shuttle den Vorteil aufweist, dass nicht immer Menschen mit jeder Art von Nutzlast in die den Raum transportiert werden müssen. Der Nachteil dieser Konstellation ist, dass der russische Shuttle Orbiter über keine eigenen Starttriebwerke ver-