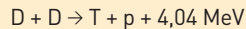
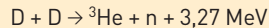
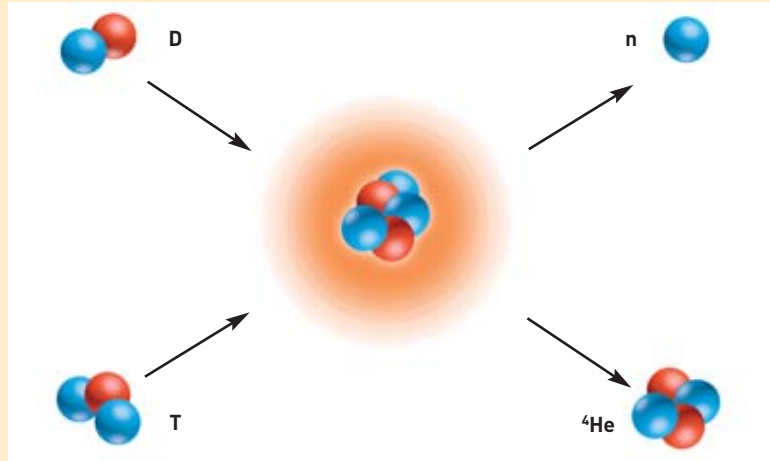


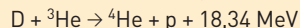
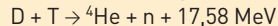
# D Les réactions de fusion nucléaire

Pour obtenir la **fusion** de deux **noyaux** atomiques légers, il faut les rapprocher tout près l'un de l'autre alors qu'ils se repoussent naturellement, portant tous deux une charge électrique positive. Si l'on veut récupérer l'énergie libérée par cette fusion, il faut donc d'abord fournir celle nécessaire pour franchir cette barrière et permettre à chaque noyau d'arriver dans la zone, très proche de l'autre, où se manifestent les forces nucléaires capables de vaincre cette répulsion électrostatique ou **barrière coulombienne**. Une fois ce résultat obtenu, les réactions les plus énergétiques sont celles qui aboutissent au noyau fusionné dont l'énergie de liaison est la plus élevée. C'est en l'occurrence le cas de l'**isotope**  $^4\text{He}$  de l'hélium, qui possède quatre **nucléons** (deux **protons** p et deux **neutrons** n).

Parmi les réactions de fusion qui produisent de l'énergie en même temps qu'elles génèrent, d'une part, un nouveau noyau, noyau d'**hélium** (He) ou de **tritium** (T), et d'autre part un **nucléon**, quatre sont *a priori* particulièrement intéressantes\*. Les deux premières sont séduisantes parce qu'elles n'impliquent que du **deutérium** (D); l'isotope de l'**hydrogène** le plus abondant sur Terre. Leur maîtrise peut constituer le but ultime de la fusion contrôlée, mais elles sont, de loin, les plus difficiles à réaliser.

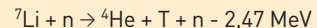
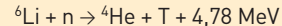


Les deux suivantes, formant le noyau très stable de l'hélium 4, sont particulièrement énergétiques :



La réaction de fusion la plus facile à réaliser, car présentant la **section efficace** la plus élevée, est celle impliquant un noyau de deutérium (D) et un noyau de tritium (T), fusion qui donne un noyau d'hélium et un neutron dont l'énergie est respectivement de 3,5 **MeV** et de 14,1 MeV. C'est donc sur elle, appelée D-T, que se concentrent les recherches sur la fusion contrôlée, aussi bien pour la **fusion à confinement inertiel** que

pour la **fusion à confinement magnétique**. La production du tritium nécessaire est assurée par une cinquième réaction mettant en jeu le **lithium** et... les neutrons de la réaction D-T.



Les combustibles primaires, c'est-à-dire les véritables matières premières d'un réacteur, sont donc le deutérium et le lithium (Li).

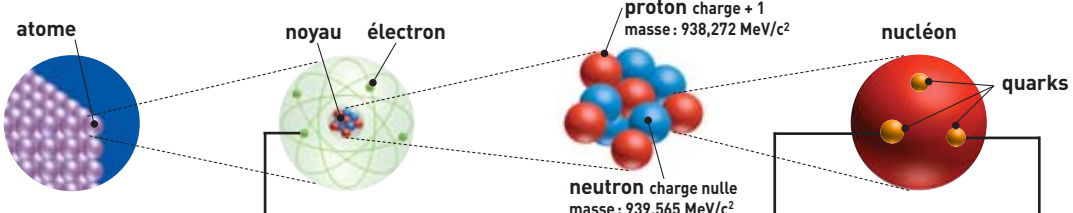
\*Ces réactions sont dites *thermonucléaires* parce que seule une température de l'ordre d'une centaine de millions de degrés, en même temps que d'autres conditions de densité et de temps de confinement (cf. texte principal), permet de les obtenir. Voir en p. 8 le tableau des principales réactions nucléaires qui ont lieu dans le Soleil.

# C Particules élémentaires et interactions fondamentales

Les **neutrinos** sont les plus furtives des particules du **modèle standard de la physique des particules**, cadre théorique qui décrit toutes les **particules élémentaires** connues et les **interactions fondamentales** auxquelles elles participent (tableau).

Les constituants élémentaires de la matière, les **fermions**, se partagent en deux grandes catégories, les **leptons** qui ne répondent pas à l'**interaction forte**, et les **quarks** qui subissent toutes les interactions. Les six quarks forment trois paires (bas/haut, étrange/charmé et beauté/top). Dans la catégorie des leptons, les **leptons chargés** (électron  $e^-$ , muon  $\mu$ , tau  $\tau$ ) participent à l'**interaction électromagnétique** et à l'**interaction faible** et les **leptons neutres** (**neutrino électronique**  $\nu_e$ , **neutrino muonique**  $\nu_\mu$ , **neutrino tauique**  $\nu_\tau$ ) ne

participent à l'**interaction électromagnétique** et à l'**interaction faible** et les **leptons neutres** (**neutrino électronique**  $\nu_e$ , **neutrino muonique**  $\nu_\mu$ , **neutrino tauique**  $\nu_\tau$ ) ne




		leptons peuvent se déplacer librement		quarks prisonniers de particules plus grandes, ils ne sont pas observés individuellement	
<b>Fermions</b> La matière ordinaire est composée de particules de ce groupe.  Pour la plupart, ces particules étaient présentes juste après le big bang. Aujourd'hui, on ne les trouve que dans les rayons cosmiques et auprès des accélérateurs.	première famille	<b>électron</b> responsable de l'électricité et des réactions chimiques sa charge est -1 masse : 0,511 MeV/c <sup>2</sup>	<b>neutrino électronique</b> sans charge électrique et interagissant très rarement avec le milieu environnant	<b>bas</b> sa charge électrique est -1/3 le proton en contient un, le neutron deux masse : 5 – 8,5 MeV/c <sup>2</sup>	<b>haut</b> sa charge électrique est +2/3 le proton en contient deux, le neutron un masse : 1,5 – 4,5 MeV/c <sup>2</sup>
	deuxième famille	<b>muon</b> un compagnon plus massif de l'électron masse : 105,658 MeV/c <sup>2</sup>	<b>neutrino muonique</b> propriétés similaires à celles du neutrino électronique	<b>étrange</b> un compagnon plus lourd du "bas" masse : 80 – 155 MeV/c <sup>2</sup>	<b>charmé</b> un compagnon plus lourd du "haut" masse : 1 000 – 1 400 MeV/c <sup>2</sup>
	troisième famille	<b>tau</b> encore plus lourd masse : 1 777 MeV/c <sup>2</sup>	<b>neutrino tauique</b> propriétés similaires à celles du neutrino électronique	<b>beauté</b> encore plus lourd masse : 4 000 – 4 500 MeV/c <sup>2</sup>	<b>top</b> le plus lourd de la famille (observé en 1995) masse : 174 300 ± 5 100 MeV/c <sup>2</sup>
<b>Bosons vecteurs</b> Particules fondamentales qui assurent la transmission des forces de la nature.	<b>photon</b> grain élémentaire de la lumière, porteur de la force électromagnétique		<b>gluon</b> porteur de la force forte entre quarks		<b>W<sup>±</sup>, Z<sup>0</sup></b> porteurs de la force faible, responsables de certaines formes de désintégration radioactive
<b>Boson de Higgs ?</b>		 responsable de la "brisure de symétrie électrofaible"			

Tableau. Constituants élémentaires.

sont assujettis qu'à l'interaction faible. Au sein du modèle standard, les neutrinos sont de masse nulle mais des expériences ont prouvé qu'ils en possèdent une, très faible, dont la valeur exacte reste inconnue à ce jour. La participation des constituants élémentaires aux interactions fondamentales est conditionnée par leurs nombres quantiques, ou charges d'interaction (charge électrique, charge de couleur<sup>(1)</sup>...). À chaque constituant de la matière est associée son **antiparticule**, particule de même masse et de charges opposées. La **force gravitationnelle**, qui n'est pas incluse dans le modèle standard, s'exerce sur tous les fermions proportionnellement à leur masse. Le tableau des constituants élémentaires de la matière montre une autre classification, indépendante de leur participation aux interactions fondamentales, en trois générations ou familles. D'une famille à l'autre, les quarks et les leptons chargés de mêmes charges ne diffèrent que par leurs masses. L'électron, le quark haut et le quark bas, qui appartiennent à la première famille, sont les particules massives les plus légères. Stables, elles sont les constituants de la matière ordinaire. Par exemple, le **proton** contient deux quarks haut et un quark bas ; le **neutron** deux quarks bas et un quark haut. Les particules des deux autres familles sont instables et se désintègrent rapidement en particules stables de première génération. C'est la raison pour laquelle toute la matière stable de l'Univers est faite des constituants de la première famille. D'après la mécanique quantique, pour qu'il y ait interaction, il faut qu'au moins une particule élémentaire, un

**boson**, soit émise, absorbée ou échangée. Le **photon** est le vecteur de l'interaction électromagnétique, les bosons **W<sup>+</sup>**, **W<sup>-</sup>** et **Z<sup>0</sup>** sont les médiateurs de l'interaction faible et les **gluons** les messagers de l'interaction forte. Les quarks et les leptons chargés échangent des photons mais conservent leur charge électrique après l'échange, le photon n'ayant pas de charge électrique. Comme la masse du photon est nulle, la portée de l'interaction électromagnétique est infinie. Dépourvus de charge électrique, les neutrinos sont les seuls fermions élémentaires à ne pas être sensibles à l'interaction électromagnétique. Dans la théorie électrofaible (unification des interactions faible et électromagnétique), l'interaction faible présente deux aspects : l'**interaction faible par courants chargés** où les vecteurs de l'interaction sont **W<sup>+</sup>** et **W<sup>-</sup>**, et l'**interaction faible par courant neutre** où le médiateur de l'interaction est **Z<sup>0</sup>**. Ces deux formes de l'interaction faible agissent entre tous les fermions élémentaires (quarks, leptons chargés et neutrinos). La masse de ces bosons étant très élevée (80 400 MeV/c<sup>2</sup> pour **W<sup>±</sup>** et 91 180 MeV/c<sup>2</sup> pour **Z<sup>0</sup>**), la portée de l'interaction faible est infime, de l'ordre de 10<sup>-18</sup> m. Les bosons **W<sup>±</sup>** possédant une charge électrique non nulle, les fermions qui les échangent

changent de charge électrique et également de nature (**saveur**). Par contre, le boson **Z<sup>0</sup>** étant dépourvu de charge électrique, les fermions ne changent pas de nature. En fait, l'interaction faible par courant neutre est assez similaire à l'échange d'un photon. En règle générale, si deux fermions peuvent échanger un photon, ils sont aussi capables d'échanger un **Z<sup>0</sup>**. De son côté, un neutrino a la faculté d'échanger un **Z<sup>0</sup>** avec une autre particule, mais pas un photon. Seuls les quarks qui possèdent une charge de couleur échangent des gluons, lesquels portent eux-mêmes une charge de couleur. Ainsi, lors d'un échange de gluon entre quarks, ces derniers échangent leurs couleurs respectives. La masse des gluons est nulle, mais étant dotés d'une charge de couleur ils peuvent interagir. La portée de l'interaction forte est donc très courte, de l'ordre de 10<sup>-15</sup> m. Le **graviton**, vecteur de l'interaction gravitationnelle, n'a pas encore été observé. La théorie prédit l'existence d'un autre mécanisme d'interaction fondamentale, responsable de la masse des particules élémentaires, dont le messager est le **boson de Higgs** qui reste à découvrir. Le champ de Higgs permet, selon cette théorie, de donner une masse aux fermions élémentaires interagissant avec lui.

(1) Charge de couleur : nombre quantique qui détermine la participation aux interactions fortes. La charge de couleur peut prendre trois valeurs : "rouge", "verte" ou "bleue", ces couleurs n'ayant rien à voir avec les couleurs visibles. Chaque quark porte l'une des trois charges de couleur et chaque antiquark l'une des trois charges d'anticouleur. Les gluons sont dotés de charges doubles couleur-anticouleur (huit combinaisons possibles).

interaction fondamentale	messager	actions
gravitationnelle	graviton ?	fait s'attirer deux masses entre elles et est responsable de la chute des corps
électromagnétique	photon	est responsable de l'attraction entre électrons et noyaux atomiques, et donc de la cohésion des atomes et des molécules
faible	W <sup>+</sup> , W <sup>-</sup> , Z <sup>0</sup>	à la base de la <b>fusion thermonucléaire</b> dans le Soleil, elle assure sa longévité. La <b>radioactivité</b> β <sup>-</sup> et β <sup>+</sup> et les réactions impliquant le neutrino sont des interactions faibles
forte	gluons	assure la cohésion du noyau atomique

Tableau. Interactions fondamentales.