(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle
Bureau international

(43) Date de la publication internationale
6 février 2014 (06.02.2014)

WIPO | PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2014/019929 A1

(51) Classification internationale des brevets : *G21B 3/00* (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale : PCT/EP2013/065703

(22) Date de dépôt international : 25 juillet 2013 (25.07.2013)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
1257615 3 août 2012 (03.08.2012) FR

(71) Déposants : **UNIVERSITÉ LYON 1 CLAUDE BERNARD** [FR/FR]; 43, Boulevard du Onze Novembre 1918, F-69100 Villeurbanne (FR). **CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE** [FR/FR]; 3 rue Michel Ange, F-75016 Paris (FR). **ECOLE SUP CHIMIE PHYS ELECTRONIQ LYON (CPE LYON)** [FR/FR]; 43 Boulevard du Onze Novembre 1918, F-69100 Villeurbanne (FR). **COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE ET AUX ÉNERGIES ALTERNATIVES** [FR/FR]; Bâtiment le Ponant D, 25 rue Leblanc, F-75015 Paris (FR). **UNIVERSITÉ DE BORDEAUX 1** [FR/FR]; 351 Cours de la Libération, F-33400 Talence (FR).

(72) Inventeurs : **BAYARD, François**; 18 rue des Geltines, F-69390 Millery (FR). **DUCRET, Jean-Eric**; Résidence la Verrerie, Bâtiment C, Appartement 79, 35 rue Sarrette, F-33800 Bordeaux (FR).

(74) Mandataires : **COLOMBO, Michel** et al.; BREVINNOV, 310 avenue Berthelot, F-69008 Lyon (FR).

(81) États désignés *(sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible)* : AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés *(sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible)* : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM,

[Suite sur la page suivante]

(54) Title : REACTOR AND METHOD FOR IMPLEMENTING A NUCLEAR FUSION REACTION

(54) Titre : REACTEUR ET PROCEDE POUR LA MISE EN OEUVRE D'UNE REACTION DE FUSION NUCLEAIRE

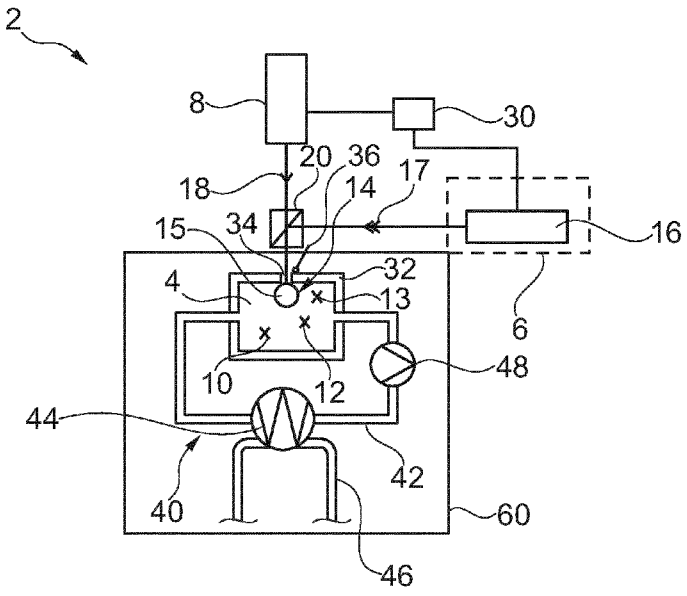


Fig. 1

(57) Abstract : The invention concerns a reactor (2) for implementing a nuclear fusion reaction, comprising: -a heat transfer liquid containing (4) first (10) and second (12) atomic elements in solution; - a bubble generator (6) capable of creating a bubble (14) in the heat transfer liquid, said bubble enclosing a gaseous medium (15) containing at least the first atomic element; - a laser source (8) designed to apply a femtosecond laser pulse (18) to the heat transfer liquid, directed at the bubble and having a duration of less than 100fs and an intensity greater than 10^{14} W.cm-2, to trigger a coulomb explosion in the gaseous medium, said explosion accelerating atomic nucleii of said first atomic elements to trigger a nuclear fusion reaction between atomic nucleii of the first and second atomic elements.

(57) Abrégé : L'invention concerne un réacteur (2) pour la mise en œuvre d'une réaction de fusion nucléaire, comportant : -un liquide caloporteur contenant (4) des premier (10) et second (12) éléments atomiques en solution; -un générateur (6) de bulle apte à créer une bulle (14) dans le liquide caloporteur, cette bulle renfermant un milieu gazeux (15) contenant au moins le premier élément atomique; -une source laser (8) apte

[Suite sur la page suivante]

WO 2014/019929 A1

TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée :

— *avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))*

— *avant l'expiration du délai prévu pour la modification des revendications, sera republiée si des modifications sont reçues (règle 48.2.h))*

à appliquer sur le liquide caloporteur une impulsion laser femtoseconde (18), dirigée sur la bulle et présentant une durée inférieure à 100fs et une intensité supérieure à 10^{14} $W.cm^{-2}$, pour déclencher une explosion coulombienne dans le milieu gazeux, cette explosion accélérant des noyaux atomiques desdits premiers éléments atomiques pour déclencher une réaction de fusion nucléaire entre des noyaux atomiques des premier et second éléments atomiques.

RÉACTEUR ET PROCÉDÉ POUR LA MISE EN ŒUVRE D'UNE RÉACTION DE FUSION NUCLÉAIRE

[001] L'invention concerne un réacteur et un procédé pour la mise en œuvre d'une réaction de fusion nucléaire.

[002] La mise en œuvre de réactions de fusion nucléaire contrôlées est un objectif scientifique et industriel majeur. De façon connue, il est possible de mettre en œuvre, sous l'effet d'une impulsion laser, une réaction de fusion nucléaire entre des premier et second éléments atomiques.

[003] On connaît des techniques dites de fusion par confinement inertiel, dans lesquelles des réactions de fusion nucléaire sont, par exemple, déclenchées par irradiation laser et chauffage d'une cible de dimension millimétrique comprenant un mélange des premier et second éléments atomiques. De telles techniques font l'objet de recherches dans des installations dédiées, telles que le Laser Mégajoule en France ou le « National Ignition Facility » au « Lawrence Livermore National Laboratory » (USA). Ces recherches visent à atteindre une phase dans laquelle la chaleur dégagée par les réactions de fusion nucléaire est suffisante pour auto-entretenir ces réactions (critère de Lawson).

[004] Des travaux plus récents ont mis en œuvre, à plus petite échelle, des réactions de fusion nucléaire par laser, basées sur une technique différente. Cette technique fait appel à des phénomènes physiques tels que l'explosion coulombienne (« Coulomb explosion » en langue anglaise). Ce phénomène d'explosion coulombienne est étudié depuis une quinzaine d'années et fait l'objet d'une importante bibliographie scientifique. Il est décrit, par exemple, dans l'article de revue de Gérard Mourou et *al.*, « Optics in the relativistic regime », Review of Modern Physics, vol. 78, n°2, p. 309-371, 2006.

[005] Avec cette technique, une réaction de fusion nucléaire est typiquement déclenchée en appliquant une impulsion laser femtoseconde sur des agrégats, comprenant les premier et second éléments atomiques. Cette impulsion laser permet de chasser les électrons des atomes des premier et/ou second éléments atomiques de ce milieu gazeux, de sorte à former un plasma. Les noyaux atomiques de ces atomes ionisés sont alors mutuellement soumis à des forces de répulsion coulombiennes. Ces forces de répulsion sont suffisamment élevées pour accélérer ces noyaux atomiques en les éloignant les uns des autres : c'est l'explosion coulombienne. Une réaction de fusion nucléaire se produit alors, si des noyaux atomiques des premier et second éléments atomiques entrent en collision avec une énergie suffisamment élevée.

[006] Cette technique situe la réaction nucléaire au niveau de sites bien définis, comme le font les catalyseurs pour les réactions chimiques. Elle permet ainsi d'envisager un réacteur de fusion nucléaire de conception simplifiée (« table-top

nuclear fusion » en langue anglaise), destiné à des expériences de laboratoire ou à de la production d'énergie.

[007] Un exemple de cette technique est décrit dans l'article de T. Ditmire et *al.*, « Nuclear fusion from explosions of femtosecond laser-heated deuterium clusters », Nature, vol. 398, p. 489-492, avril 1999. Dans cet exemple, les premier et second éléments atomiques sont tous deux du deutérium, sous forme d'agrégats atomiques dans un jet de gaz. Ces agrégats sont irradiés par une impulsion laser femtoseconde, afin de déclencher des réactions de fusion nucléaire entre noyaux atomiques de deutérium. Le résultat de ces réactions est un dégagement d'énergie et l'émission d'un flux de neutrons.

[008] De l'état de la technique est également connu des documents suivants :

- Isidore Last et *al.*, « Overrun effects in nuclear fusion within a single Coulomb exploding nanodroplet », European Physical Journal D, vol. 57, p. 327-334, avril 2010 ;
- Kurilova et *al.*, « Peculiarities of femtosecond laser irradiation with liquid metal targets », Proceedings of the SPIE, vol. 6726, p. 67261L-1-67261L-6, 2007 ;
- Zhang et *al.*, « Spatial distribution of high-energy electron emission from water plasmas produced by femtosecond laser pulses », Physical Review Letters, vol. 90, p. 165002, avril 2003 ;
- Ter-Avetisyan et *al.*, « Generation of a quasi-monoenergetic proton beam from laser-irradiated sub-micron droplets », Physics of Plasmas, vol. 19, p. 073112, juillet 2012.

[009] D'autres exemples concernent des réactions de fusion nucléaire sans produire de neutrons. En effet, l'émission d'un flux de neutrons peut poser de nombreux problèmes pratiques (risques biologiques encourus par des utilisateurs humains, endommagement de matériaux du réacteur, plus grande difficulté technique à récupérer sous forme de chaleur l'énergie cinétique des neutrons émis dans les réactions). Il peut donc être préférable de travailler avec des réactions de fusion nucléaires dites aneutroniques, dans lesquelles peu, voire pas de neutrons sont produits. Un tel exemple de réaction aneutronique est la réaction nucléaire $p + {}^{11}B \rightarrow 3\ {}^{4}He + 8{,}7$ MeV, connue et étudiée en physique nucléaire depuis longtemps et dont la mise en œuvre dans le mécanisme de l'explosion coulombienne est décrite, par exemple, dans l'article de Isidore Last et *al.*, « Aneutronic H + ${}^{11}B$ nuclear fusion driven by Coulomb explosion of hydrogen nanodroplets », Physical Review A, vol. 83, p. 043202, avril 2011. Une impulsion laser femtoseconde est appliquée sur un nuage de gouttelettes en suspension comprenant des atomes d'hydrogène. Cette impulsion laser déclenche une explosion coulombienne, qui conduit à l'accélération de noyaux d'atomes d'hydrogène. Ces noyaux entrent en collision avec des atomes de bore, avec une énergie suffisamment élevée pour déclencher une réaction de fusion nucléaire entre les noyaux de bore et d'hydrogène.

[0010] Cependant, cette technique présente de nombreux inconvénients. Notamment, le principe même du réacteur nécessite que la réaction de fusion soit réalisée dans un vide poussé. L'obtention d'un vide poussé nécessite de travailler avec des enceintes extrêmement étanches et requiert l'utilisation de pompes à vide spécifiques, ce qui est contraignant à mettre en œuvre.

[0011] L'invention vise à résoudre cet inconvénient. L'invention porte ainsi sur un réacteur conforme à la revendication 1.

[0012] En plaçant les premier et second éléments atomiques servant de réactifs à l'intérieur du liquide caloporteur, il est possible d'obtenir une concentration de réactifs plus élevée que dans un milieu gazeux. Cela permet donc d'obtenir une densité suffisante pour mettre en œuvre des réactions de fusion. La bulle permet de former, au sein de ce liquide, un milieu peu dense dans lequel une explosion coulombienne peut être déclenchée. Il n'est donc plus nécessaire d'avoir recours à une enceinte extrêmement étanche pour confiner les premiers éléments. En outre, il est plus facile de collecter, sous forme de chaleur, l'énergie dégagée par la réaction de fusion nucléaire. En effet, le liquide permet également d'évacuer simplement, hors du réacteur, la chaleur créée.

[0013] Les modes de réalisation de l'invention peuvent comporter une ou plusieurs des caractéristiques des revendications dépendantes 2 à 12.

[0014] Ces modes de réalisation présentent en outre les avantages suivants :

-l'utilisation d'une seule et même source laser pour générer la bulle et pour déclencher l'explosion coulombienne permet de simplifier la conception du réacteur ;

-la réaction de fusion entre l'hydrogène et le bore présente une mise en œuvre simplifiée et un rendement accru ;

-l'ajout d'acide borique dans le liquide permet d'accroître le rendement de la réaction de fusion ;

-les liaisons covalentes permettent de limiter la désagrégation des nanoparticules dans le milieu gazeux lors de la formation de la bulle en réponse à la première irradiation, ce qui permet de maintenir dans le milieu gazeux une concentration en premier et second éléments suffisamment élevée pour ensuite permettre le déclenchement de l'explosion coulombienne.

[0015] L'invention porte également sur un procédé conforme à la revendication 13.

[0016] Les modes de réalisation de l'invention peuvent comporter les caractéristiques des revendications dépendantes 14 et 15.

[0017] D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront clairement de la description qui en est faite ci-après, à titre indicatif et nullement limitatif, en référence aux dessins annexés, dans lesquels :

-la figure 1 illustre schématiquement un réacteur pour la mise en œuvre d'une réaction de fusion nucléaire ;

-la figure 2 illustre schématiquement une nanoparticule contenue dans le liquide caloporteur de la figure 1 ;

-la figure 3 illustre schématiquement une bulle créée dans le liquide caloporteur par le générateur de bulle de la figure 1 ;

-la figure 4 illustre schématiquement un autre mode de réalisation du réacteur de la figure 1 ;

-la figure 5 illustre schématiquement une partie d'un autre mode de réalisation du réacteur de la figure 1 ;

-la figure 6 est un organigramme d'un procédé pour la mise en œuvre d'une réaction de fusion nucléaire avec le réacteur de la figure 1.

[0018] Dans ces figures, les mêmes références sont utilisées pour désigner les mêmes éléments.

[0019] Dans la suite de cette description, les caractéristiques et fonctions bien connues de l'homme du métier ne sont pas décrites en détails.

[0020] La figure 1 représente schématiquement un réacteur 2 pour la mise en œuvre d'une réaction de fusion nucléaire. Ce réacteur 2 comprend :

-un liquide caloporteur 4,

-un générateur de bulle 6,

-une source laser 8 apte à appliquer sur le liquide une impulsion laser femtoseconde.

[0021] Le liquide 4 contient des premier 10 et second 12 éléments atomiques, destinés à servir de réactifs pour la réaction de fusion nucléaire. Ces éléments 10 et 12 sont présents dans le liquide 4.

[0022] Les éléments 10 et 12 sont préférentiellement des éléments permettant la mise en œuvre d'une réaction de fusion nucléaire aneutronique. Par « aneutronique », on entend par exemple que la fraction d'énergie dégagée sous forme de neutrons par la réaction de fusion et par des sous-réactions de fusion en découlant est inférieure à 1% de l'énergie totale dégagée par ces réactions.

[0023] A cet effet, l'élément 10 est avantageusement un isotope de l'hydrogène. L'élément 12 est, par exemple, un élément choisi dans le groupe composé des isotopes du bore, des isotopes du lithium et des isotopes de l'hydrogène.

[0024] Dans cet exemple, les éléments 10 et 12 sont choisis afin de mettre en œuvre la réaction de fusion suivante : $H + {}^{11}B \rightarrow 3\ {}^{4}He + 8{,}7$ MeV. Ainsi, l'élément 10 est l'hydrogène et l'élément 12 est l'isotope ${}^{11}B$ du bore.

[0025] Ici, les éléments 10 et 12 sont combinés à l'intérieur de nanoparticules 13 présentes en solution dans le liquide 4.

[0026] Dans cette description, on définit les nanoparticules comme étant des particules qui présentent chacune :

- une masse supérieure à 10^6 et, de préférence, au moins 10^7 fois supérieure à la masse d'une molécule d'eau ;
- un diamètre supérieur à 8nm.

[0027] Ce diamètre est ici inférieur à 1µm. De préférence, ce diamètre est compris entre 8nm et 500nm.

[0028] Au moins 50 % des liaisons interatomiques reliant entre eux les atomes formant ces nanoparticules sont ici des liaisons covalentes. De préférence, au moins 60 % ou 70 % ou 80 % ou 90 % de ces liaisons interatomiques sont des liaisons covalentes. Par liaison interatomique, on désigne ici une liaison chimique entre deux atomes.

[0029] Dans cet exemple, les nanoparticules 13 présentent une concentration dans le liquide 4 supérieure ou égale à 10^9 ou à 10^{15} nanoparticules par litre, de préférence, supérieure à 10^{18} nanoparticules par litre.

[0030] Le liquide 4 est également apte à collecter de la chaleur dégagée par la réaction de fusion ainsi que la chaleur transmise par le laser. Cette chaleur collectée est, par exemple, ensuite évacuée hors du réacteur, de manière à maintenir la température du liquide 4 sous une température seuil. Cette chaleur collectée peut également être utilisée pour générer de l'électricité. Avantageusement, le liquide 4 présente une capacité thermique massique supérieure ou égale à 1 $J.g^{-1}.K^{-1}$, à 2 $J.g^{-1}.K^{-1}$ ou à 4 $J.g^{-1}.K^{-1}$, à 25°C et sous une pression égale à 10^5 Pa.

[0031] Dans cet exemple, le liquide 4 est une solution aqueuse, telle que de l'eau.

[0032] Le générateur de bulle 6 est apte à créer une bulle 14 dans le liquide caloporteur, de telle sorte que cette bulle 14 renferme un milieu gazeux 15 contenant au moins l'élément 10. Sur la figure 1, la taille de la bulle a été exagérée pour la rendre visible. Pour simplifier la figure 1, l'élément 10 n'est pas dessiné à l'intérieur de la bulle.

[0033] Cette bulle 14 est préférentiellement créée à la surface du liquide 4. La bulle 14 présente ici une forme d'ellipsoïde ou de globule. La bulle 14 est ici dite être en surface du liquide 4 si moins de 60%, ou moins de 50%, ou moins de 30% de son diamètre s'étend en-dessous de la surface qui sépare le liquide 4 d'un milieu environnant.

[0034] Par exemple, le générateur 6 comporte une source laser 16. Cette source laser 16 est apte à appliquer, sur le liquide 4, une impulsion laser 17 pour créer la bulle 14, en évaporant localement le liquide 4. A cet effet, la source 16 est apte à émettre une impulsion laser 17 présentant une puissance supérieure à 10^8 $W.cm^{-2}$ et, de préférence, supérieure à 10^9 $W.cm^{-2}$. Dans ce mode de réalisation, la puissance de l'impulsion 17 est généralement strictement inférieure à 10^{12} $W.cm^{-2}$ ou à 10^{14} $W.cm^{-2}$ pour que la majorité du milieu à l'intérieur de la bulle créée reste dans un état non ionisé. Cette impulsion 17 présente une énergie supérieure à 50µJ, ou, de préférence, 100µJ. Typiquement, cette énergie est inférieure à 1mJ.

[0035] Un exemple d'une source 16 pour générer des bulles microscopiques dans un liquide est décrit dans l'article de Dhirendra Tiwari et *al.*, « Dynamical observation

of femtosecond-laser-induced bubbles in water using a single laser source for probing and sensing », Applied Physics Express, vol. 3, p. 127101, 2010.

[0036] La bulle 14 présente un diamètre typiquement inférieur ou égal à 1mm ou à 500µm. Ici, la source 16 est apte à émettre un faisceau laser avec un diamètre égal à 40µm, afin de pouvoir générer une bulle 14 qui présente un diamètre inférieur ou égal à 35µm, à 25µm ou 23µm. Ce diamètre de la bulle 14 est ici ajusté en fonction de paramètres de focalisation du faisceau laser émis par la source 8. En particulier, dans cet exemple, le diamètre de la bulle 14 est compris entre 0,8 fois et 1,4 fois la longueur de Rayleigh caractéristique de la focalisation du faisceau laser de la source 8. De préférence, le diamètre de la bulle 14 est compris entre 0,9 fois et 1,1 fois cette longueur de Rayleigh. Dans le cas où la bulle 14 ne présente pas une forme sphérique, le diamètre de la bulle 14 est, par exemple, défini comme étant le diamètre de Féret de la bulle 14.

[0037] Ici, la bulle 14 présente une durée de vie supérieure ou égale à 1µs ou 2µs. Cette durée de vie est ici nettement inférieure à 1 ms.

[0038] La source laser 8 est apte à appliquer une impulsion laser femtoseconde 18 sur la bulle 14, de manière à déclencher une explosion coulombienne dans le milieu 15. Cette explosion coulombienne accélère des noyaux atomiques des éléments 10 pour déclencher la réaction de fusion nucléaire entre les noyaux des éléments 10 et 12.

[0039] À cet effet, la source 8 dirige cette impulsion 18 sur la bulle 14. L'impulsion 18 présente ici une durée comprise entre 10 fs et 100 fs. De préférence, cette durée est inférieure ou égale à 50fs. Cette impulsion 18 présente ici une intensité supérieure ou égale à 10^{14} $W.cm^{-2}$, à 10^{16} $W.cm^{-2}$ et, de préférence, supérieure ou égale à 10^{18} $W.cm^{-2}$.

[0040] Le déclenchement de l'explosion coulombienne est notamment rendu possible par le fait que le générateur 6 permet la formation, au sein du liquide 4, de la bulle 14 contenant le milieu 15, ce milieu 15 étant raréfié en molécules formant le liquide 4 mais pas en nanoparticules 13. Du fait de la raréfaction de ces molécules dans le milieu 15, l'absorption de l'impulsion 18 par des molécules du liquide 4 dans par le milieu 15 est réduite, par rapport à l'absorption d'une même impulsion directement par le liquide 4. Cette diminution permet que cette impulsion 18 soit absorbée par des nanoparticules 13 du milieu 15, pour déclencher l'explosion coulombienne. Cela permet ainsi de manipuler les éléments 10 et 12 en solution liquide, plutôt que sous forme gazeuse ou sous forme d'une suspension de gouttelettes.

[0041] Par exemple, la source laser 8 est un laser Titane-saphir (« Titanium:sapphire » en langue anglaise). Cette source laser 8 utilise par exemple la technique dite de l'amplification laser par compression d'impulsions (« chirped pulse amplification » en langue anglaise), afin de générer des impulsions laser

présentant une durée typiquement de l'ordre de quelques dizaines de femtosecondes.

[0042] Ici, les sources laser 8 et 16 sont configurées de façon à ce que les impulsions laser respectives 18 et 17 de ces sources 8 et 16 soient appliquées exactement sur la même zone du liquide 4.

[0043] A cet effet, dans cet exemple, le réacteur 2 comprend une lame séparatrice 20. Cette lame 20 est apte à combiner et superposer les trajectoires des deux impulsions respectives 18 et 17 pour les appliquer à un même endroit de la surface du liquide 4. Cette lame 20 est ici située en amont de dispositifs d'amplification et de focalisation des faisceaux émis par les sources 8 et/ou 16. Pour faciliter la lecture, la figure 1 ne représente pas ces dispositifs ni d'éventuels autres éléments optiques permettant d'assurer une focalisation optimale des faisceaux laser sur la surface du liquide 4, et qui pourraient être inclus dans le réacteur 2.

[0044] Avantageusement, le réacteur 2 comporte un dispositif de commande 30 programmable. Ce dispositif 30 est notamment apte à commander :

-la génération de bulle du générateur 6, et

-la source laser 8.

[0045] Ici, l'impulsion 18 est appliquée avant la fin de la durée de vie de la bulle 14. A cet effet, le dispositif 30 est programmé pour appliquer un délai inférieur ou égal à 5µs, 3µs ou, préférentiellement, 2µs ou 1µs entre l'instant où le générateur 6 créé la bulle 14 et l'instant où la source 8 applique l'impulsion 18 sur la bulle 14. Ainsi, l'impulsion 18 peut être appliquée avant la fin de la durée de vie de la bulle 14, et notamment avant que les nanoparticules 13 n'aient quitté la bulle 14. En effet, lors de la création de la bulle 14, les molécules d'eau et les nanoparticules 13 sont éjectées vers la périphérie de la bulle 14, voire hors de la bulle 14. Les nanoparticules 13 restent cependant dans le milieu 15 beaucoup plus longtemps que les molécules d'eau, notamment du fait de leur masse nettement plus élevée.

[0046] Avantageusement, le réacteur comporte une enceinte 32 dont des parois sont étanches au liquide 4 pour contenir ce liquide 4. Cette enceinte 32 est représentée en coupe transversale sur la figure 1. Cette enceinte 32 présente ici un volume supérieur ou égal à $10cm^3$, à $20cm^3$ ou à $50cm^3$. Ici, le liquide 4 remplit la totalité de l'enceinte 32. Cette enceinte 32 est ici de forme parallélépipédique. Par exemple, cette enceinte 32 est réalisée en matériau métallique.

[0047] Dans cet exemple, l'enceinte 32 comporte une ouverture 34, pour permettre le passage des impulsions 17 et 18 à travers les parois de l'enceinte 32. Les dimensions de l'ouverture 34 sont notamment choisies en fonction du diamètre des faisceaux laser provenant des sources 8 et 16.

[0048] Ici, l'ouverture 34 est directement ménagée dans une des parois de l'enceinte 32 et ne comprend notamment pas de fenêtre transparente. Cette absence de fenêtre permet d'éviter une absorption de l'énergie contenue dans les impulsions 17 et 18 par

cette fenêtre lors du passage de ces impulsions 17 et 18 au travers de cette fenêtre. En effet, une telle fenêtre présente typiquement un taux d'absorption optique non nul. Ainsi, le diamètre de l'ouverture 34 est également choisi de manière à réduire le risque que du liquide 4 ne s'échappe hors de l'enceinte 32, par capillarité, au travers de l'ouverture 34.

[0049] A cet effet, la plus petite distance entre deux bords opposés de l'ouverture 34 est ici supérieure ou égale à 40µm, ou à 45µm, ou à 50µm. Par exemple, l'ouverture 34 est ménagée dans la paroi supérieure de l'enceinte 32, pour que le liquide 4 soit retenu à l'intérieur de l'enceinte 32 par gravité. Cette ouverture 34 est ici de forme circulaire et présente un rayon supérieur ou égal à 40µm, ou à 45µm, ou à 50µm. Ce rayon est ici inférieur à 1mm ou à 10mm.

[0050] Avantageusement, le réacteur 2 comprend un obturateur 36 placé devant l'ouverture 34. Cet obturateur 36 est déplaçable entre une position fermée, dans laquelle l'ouverture 34 est entièrement obstruée, et une position ouverte, dans laquelle l'ouverture 34 est libre. Dans la position ouverte, l'obturateur 36 permet, notamment, le passage des impulsions 17 et 18 vers le liquide 4 au travers de l'ouverture 34. Au contraire, dans la position fermée, l'obturateur 36 empêche le passage des impulsions 17 et 18 au travers de l'ouverture 34 et empêche tout gaz ou liquide de s'échapper de l'intérieur ou de pénétrer dans l'enceinte. Ainsi, les risques de fuite ou de contamination du liquide 4 sont réduits. Ici, cet obturateur comprend un moteur, commandable par l'unité 30, apte à sélectivement déplacer l'obturateur 36 dans l'une ou l'autre de ses positions. Ainsi, l'ouverture 34 est obstruée lorsqu'aucune impulsion n'est appliquée sur le liquide 4, ce qui réduit le risque de contamination ou de fuite du liquide 4.

[0051] Avantageusement, le réacteur 2 comporte un circuit de refroidissement 40. Ce circuit comprend ici :

-un circuit primaire 42,

-un échangeur thermique 44,

-un circuit secondaire 46.

[0052] Le circuit 42 est relié fluidiquement à l'enceinte 32. Ici, l'enceinte 32 comporte des orifices d'entrée et de sortie du liquide 4. Chacun de ces orifices reçoit une extrémité du circuit 42. Ce circuit 42 est apte à assurer la circulation fluidique du liquide 4. Par exemple, le circuit comprend une pompe 48, apte à entraîner le liquide 4 en circulation dans le circuit 42.

[0053] L'échangeur thermique 44 permet de transférer de la chaleur depuis le circuit 42 vers le circuit 46. Le circuit 46 s'étend par exemple hors du réacteur 2, afin d'évacuer la chaleur transférée en dehors du réacteur 2.

[0054] La figure 2 représente plus en détail un exemple de nanoparticule 13, contenue dans le liquide 4. Cette nanoparticule 13 inclut les éléments 10 et 12.

[0055] Ici, chaque nanoparticule 13 comprend :

-un agrégat atomique 52, contenant l'élément 12, et
-une pluralité de molécules 54 hydrogénées, contenant l'élément 10 et étant chimiquement liées à l'agrégat 52.

[0056] Ici, l'agrégat 52 est un agrégat de bore. Cet agrégat 52 contient le second élément atomique avec une concentration atomique supérieure ou égale à 10 % ou à 85 % ou à 90 %. Cet agrégat 52 présente ici un diamètre supérieur à 30nm et, de préférence, supérieur ou égal à 50nm. Ce diamètre est ici inférieur à 100nm, ou à 90nm. Les agrégats 52 sont, par exemple, les particules de bore commercialisées par la société « Skyspring Nanomaterials, Inc. » sous la référence 0410DX.

[0057] Les molécules 54 sont, par exemple, des molécules d'acide 10-undécylénique (de formule chimique $C_{11}H_{20}O_2$). La quantité de molécules 54 chimiquement liées à chaque agrégat 52 est choisie en fonction du diamètre de l'agrégat 52. Ici, avec un agrégat présentant un diamètre de 70nm, cette quantité de molécules 54 est supérieure ou égale à 10000, ou à 50000 et, de préférence, supérieure ou égale à 100000.

[0058] Ainsi, la nanoparticule 13 présente une concentration élevée en éléments 10 et 12, ce qui augmente la probabilité d'obtenir la réaction de fusion.

[0059] Par exemple, les nanoparticules 13 sont synthétisées selon le procédé décrit dans l'article de Z. Gao et *al.*, « Preparation of dopamine-modified boron nanoparticles », Journal of Materials Chemistry, vol. 22, pp. 877-882, 2012.

[0060] La figure 3 schématise une bulle 14 en surface du liquide 4 et comprenant des nanoparticules 13 incluses dans le milieu 15. Les nanoparticules 13 permettent d'augmenter la probabilité d'occurrence de la réaction de fusion. En effet, des simulations numériques de dynamique moléculaire ont montré que, lors de la création de la bulle 14, une fraction importante des nanoparticules 13 reste dans le milieu 15, du fait de la masse des nanoparticules 13. Au contraire, les molécules d'eau qui, ici, constituent le liquide 4, tendent à être éjectées vers la périphérie de la bulle 14.

[0061] Ainsi, il est possible de maintenir dans le milieu 15 une concentration d'éléments 10 et 12 suffisante pour permettre le déclenchement de l'explosion coulombienne.

[0062] Avantageusement, le liquide 4 comprend de l'acide borique (de formule chimique H_3BO_3) sous forme dissoute, avec une concentration au moins égale à $40g.L^{-1}$, ou à $45g.L^{-1}$ à une température du liquide 4 de 20°C. De préférence, cette concentration est égale à la limite maximale de solubilité de l'acide borique dans l'eau. Par exemple, à une température de 20°C, cette limite maximale est égale à $47,2g.L^{-1}$.

[0063] En ajoutant de l'acide borique dans le liquide 4, les éléments 12 sont présents en solution dans le liquide 4, et pas seulement incorporés dans les nanoparticules 13. En particulier, l'élément 12 peut notamment être présent dans la paroi 56 de la bulle 14, ce qui améliore la probabilité de déclencher la réaction de

fusion. En effet, les noyaux atomiques des éléments 10 accélérés par l'explosion coulombienne sont typiquement accélérés dans toutes les directions depuis la zone où se situe le milieu 15. La probabilité que chacun de ces noyaux rencontre un atome de l'élément 12 est donc accrue si ces éléments 12 sont également présents autour du milieu 15, comme c'est le cas pour les éléments 12 situés dans la paroi 56.

[0064] La réaction de fusion peut être constatée en détectant des éléments produits par cette réaction. Dans cet exemple, chaque occurrence de la réaction de fusion entre deux éléments 10 et 12 produit 8,7 MeV d'énergie et trois noyaux d'hélium ^{4}He. Cette réaction peut donc être mise en évidence en mesurant l'énergie produite.

[0065] Dans ce cas, pour mesurer la chaleur dégagée par la réaction de fusion, le réacteur 2 comprend un calorimètre 60 (figure 1). Ici, le calorimètre 60 contient notamment l'enceinte 30 et le circuit 40, de sorte à mesurer une augmentation de chaleur comprise dans l'enceinte 30 et le circuit 40. Ce calorimètre 60 est notamment apte à mesurer précisément la part de cette augmentation de chaleur qui est causée par la réaction de fusion.

[0066] En effet, le réacteur 2 peut présenter, lors de son fonctionnement, une augmentation de chaleur qui ne provient pas de la réaction de fusion. Cette augmentation est, par exemple, causée par l'énergie transmise au liquide 4 par les impulsions 17 et 18, et/ou par des réactions chimiques non désirées se déroulant à l'intérieur du liquide 4.

[0067] La figure 4 représente un réacteur 70 apte à être utilisé en lieu et place du réacteur 2. Ce réacteur 70 est sensiblement identique au réacteur 2, sauf que les sources laser 8 et 16 sont remplacées par une source laser commune 72. Cette source 72 est apte à appliquer, successivement, sur le liquide 4 :

-une impulsion laser 73 pour créer la bulle 4, et

-une impulsion laser femtoseconde 74 apte à déclencher l'explosion coulombienne qui provoque la réaction de fusion nucléaire.

[0068] Ces impulsions 73 et 74 ont ici, respectivement, le même rôle que les impulsions 17 et 18.

[0069] Par exemple, la source 72 comprend une source laser femtoseconde 76 sensiblement identique à la source 8. Cette source laser 76 est commandée par un dispositif de commande 77 programmable. Ce dispositif 77 est, par exemple, identique au dispositif 30 et remplit les mêmes fonctions que ce dispositif 30. Dans cet exemple, la source 72 comprend ici également une lame séparatrice 78, apte à séparer en deux composantes distinctes un rayonnement laser émis par la source 76. Chacune de ces composantes distinctes fait l'objet d'un traitement optique sélectif, de manière à générer les impulsions 73 et 74, à partir d'une impulsion laser unique délivrée par la source 76. A cet effet, la source 72 comprend par exemple une ligne à retard variable 80, commandée par le dispositif 77. La source 72 comprend en outre une seconde lame séparatrice 82 apte à combiner et superposer les trajectoires des

deux impulsions respectives 73 et 74 pour les appliquer à un même endroit de la surface du liquide 4. Dans cet exemple, ces lames 78 et 82 sont situées en amont de dispositifs d'amplification et de focalisation des faisceaux émis par la source 76.

[0070] La figure 5 représente un réacteur 90 pouvant être utilisé en lieu et place du réacteur 2. Ce réacteur 90 comprend un matériau 92 solide comprenant l'élément 12. Le liquide 4 est apte à s'écouler le long de parois de ce matériau 92, de manière à ce que la bulle 14 soit créée attenante à l'une des parois du matériau 92.

[0071] Dans cet exemple, le matériau 92 présente une forme de barreau parallélépipédique. Ce matériau 92 est ici orienté :

-de telle sorte qu'une de ses parois 94 est perpendiculaire à la direction 96 de propagation des impulsions 17 et 18, et

-suivant une direction verticale, perpendiculaire à la direction 96, pour que le liquide 4 s'écoule le long de la paroi 94 sous l'effet de la gravité.

[0072] Ainsi, la probabilité d'occurrence d'une réaction de fusion est accrue, grâce à l'augmentation de la concentration de l'élément 12 dans le voisinage immédiat de la bulle 14. Dans cet exemple, le matériau 92 comprend l'élément 12 avec un pourcentage massique supérieur ou égal à 50% et, de préférence, supérieur ou égal à 90% ou à 95%.

[0073] Le procédé de mise en œuvre va maintenant être décrit, en référence à l'organigramme de la figure 6 et à l'aide de la figure 1.

[0074] Lors d'une étape 100, le réacteur 2 est fourni avec le liquide 4.

[0075] Puis, lors d'une étape 102, la bulle 14 est générée dans le liquide 4 par le générateur 6.

[0076] Ici, le dispositif 30 délivre un signal de commande au générateur 6, pour que ce générateur 6 applique l'impulsion 17 sur le liquide 4. L'énergie contenue dans l'impulsion 17 est transmise au liquide 4 et entraîne un changement d'état physique d'une partie du liquide 4. Ce changement d'état se traduit par la vaporisation d'une partie du liquide 4, générant le milieu 15 et la bulle 14. A l'issue de ce changement d'état, au moins 50 %, et de préférence plus de 80 % ou 90 % ou 95 %, des éléments 10 contenus dans la bulle 14 ne sont pas ionisés.

[0077] De préférence, cette bulle 14 est générée en surface du liquide 4, afin de limiter l'absorption d'énergie de l'impulsion 18 par le liquide 4.

[0078] Lors d'une étape 104, l'impulsion 18 est appliquée sur le liquide 4 pour déclencher l'explosion coulombienne.

[0079] Ici, le dispositif 30 délivre un signal de commande à la source 8 pour que la source 8 délivre l'impulsion 18. Avantageusement, l'étape 94 est appliquée au moins de 3µs et, préférentiellement, moins de 1µs après que le générateur 6 ait créé la bulle 14. Cette impulsion 18 est appliquée sur le milieu 15 renfermé dans la bulle 14.

[0080] L'impulsion 18 ionise le milieu 15 et, notamment, ici, les éléments 10 contenus dans ce milieu 15. Cette ionisation rapide des éléments 10 déclenche

l'explosion coulombienne : les noyaux atomiques des éléments 10 ionisés sont soumis à des forces de répulsion coulombiennes, qui sont suffisamment élevées pour accélérer ces noyaux atomiques en les éloignant les uns des autres. Une réaction de fusion nucléaire peut se produire lorsqu'un noyau atomique de l'élément 10 entre en collision avec un noyau atomique de l'élément 12. L'accélération du noyau de l'élément 10 par l'explosion coulombienne permet d'accroître très sensiblement la probabilité de franchissement du potentiel coulombien du noyau de l'élément 12 par effet tunnel quantique. Dans cet exemple, l'accroissement de cette probabilité de franchissement, calculée à l'aide de la formule de Sommerfeld, est, pour le système p + ^{11}B, supérieur ou égal à dix ordres de grandeur pour une énergie cinétique comprise entre 10 et 50 keV et supérieur ou égal à sept ordres de grandeur pour une énergie cinétique comprise entre 50 et 500 keV. L'énergie cinétique du système p + ^{11}B est ici définie par rapport au centre de masse du système p + ^{11}B. À ces énergies, la probabilité de franchissement de la barrière coulombienne est ici supérieure ou égale à 0,05 % ou à 0,1 %.

[0081] L'énergie dégagée par la réaction de fusion est absorbée localement par le liquide 4 et conduit à une augmentation de la température du liquide 4. Par exemple, le libre parcours moyen d'une particule alpha de 3,5 MeV dans l'eau (à température de 25°C et une pression de 100 kPa) est inférieur à 20 µm.

[0082] Dans cet exemple, le dispositif 30 commande, de manière répétée, la création d'une bulle 14 suivie d'une application d'une impulsion 18, afin de déclencher une succession de réactions de fusion se succédant dans le temps.

[0083] Avantageusement, lors d'une étape 106, le dispositif 30 impose un délai d'au moins 5µs, ou 10µs avant de déclencher à nouveau une impulsion 17 suite à l'émission d'une impulsion 18, pour laisser le temps à la bulle 14 précédemment créée de disparaître.

[0084] Ainsi, le liquide 4 peut être renouvelé entre deux réactions de fusion. Ce renouvellement est aussi assuré par la pompe 48, qui met en circulation le liquide 4 dans le circuit 40, ce qui permet d'homogénéiser la concentration des éléments 10 et 12 au sein du liquide 4, y compris dans l'enceinte 32.

[0085] De nombreux autres modes de réalisation sont possibles.

[0086] Le générateur 6 peut ne pas contenir de source laser. Par exemple, le générateur 6 peut créer la bulle 14 par cavitation, ou en générant des ondes vibratoires dans le liquide 4. Par exemple, le générateur 6 comprend le dispositif décrit dans la demande de brevet WO2008043122 pour créer la bulle 14 en surface du liquide 4.

[0087] Les molécules 54 peuvent présenter une composition chimique différente. Par exemple, les molécules 54 sont des molécules de polyéthylène.

[0088] Les éléments 10 et 12 ne sont pas forcément incorporés tous les deux dans la même nanoparticule 13. Par exemple, les éléments 10 et 12 peuvent être

incorporés, respectivement, dans des première et deuxième nanoparticules distinctes.

[0089] En variante, seul l'un ou l'autre des éléments 10 et 12 est incorporé à l'intérieur de nanoparticules. L'autre de ces éléments 10 et 12 n'est pas présent à l'intérieur de nanoparticules mais est présent dans le liquide 4.

[0090] De préférence, au moins 50 % ou 60 % ou 70 % ou 80 % ou 90 % des liaisons interatomiques reliant entre eux les éléments 10 et 12 incorporés dans chaque nanoparticule 13 sont des liaisons covalentes. Par « reliés entre eux », on entend que chacun des éléments 10 et 12 est relié soit indirectement à tous les autres éléments 10 et 12, soit directement à un élément, respectivement, 10 ou 12. En variante, lorsque seul l'un ou l'autre des éléments 10 ou 12 est incorporé dans une nanoparticule, alors, de préférence, au moins 50 % ou 60 % ou 70 % ou 80 % ou 90 % des liaisons interatomiques reliant entre eux, à l'intérieur de chaque nanoparticule, les exemplaires de celui des éléments 10 ou 12 qui est incorporé à l'intérieur cette nanoparticule, sont des liaisons covalentes.

[0091] L'acide borique et/ou les nanoparticules 13 peuvent être remplacées par des molécules comportant du bore dissoutes dans le liquide 4, telles que des molécules appartenant à la famille des boranes (de formule chimique générale B_xH_y) ou des borates.

[0092] L'élément 10 peut être incorporé dans les nanoparticules 13 autrement que sous forme de molécules 54 liées chimiquement à l'agrégat 52.

[0093] En variante, l'agrégat 52 est remplacé par un agrégat contenant du borax (de formule chimique $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$). Dans ce cas, plus de 50 % des liaisons interatomiques ne sont pas des liaisons covalentes.

[0094] En variante, le réacteur 2 est apte à mettre en œuvre d'autres réactions de fusion nucléaire que celle décrite. Par exemple, le réacteur 2 est apte à mettre en œuvre la réaction de fusion nucléaire aneutronique suivante : $p + {}^{7}Li \rightarrow 2\ {}^{4}He + 17{,}2$ MeV. Dans ce cas, l'élément 12 est l'isotope ^{7}Li du lithium.

[0095] Dans un autre exemple, le réacteur 2 est apte à mettre en œuvre la réaction de fusion nucléaire aneutronique suivante : $D + {}^{6}Li \rightarrow 2\ {}^{4}He + 22{,}4$ MeV. Dans ce cas, l'élément 10 est le deutérium et l'élément 12 est l'isotope ^{6}Li du lithium.

[0096] Dans chacun de ces deux exemples, les concentrations des premier et second éléments sont différentes de celles indiquées pour le bore ^{11}B et l'hydrogène. Les proportions stœchiométriques des premier et second élément sont de préférence égales, pour correspondre à la stœchiométrie de ces réactions de fusion. Pour chacun de ces deux exemples, la taille des nanoparticules peut être utilisée comme moyen de contrôler et/ou maximiser les taux des réactions nucléaires de fusion.

[0097] L'enceinte 32 peut être un tuyau de forme cylindrique s'étendant dans le prolongement du circuit 42.

[0098] En variante, les impulsions 73 et 74 sont identiques, respectivement, aux impulsions 17 et 18. Dans ce cas, la ligne 80 peut inclure un dispositif de conditionnement du rayonnement laser, commandé par le dispositif 77 et apte à modifier des paramètres physiques de l'impulsion 73, tels que la longueur d'onde ou la durée de l'impulsion 73. Ce dispositif contient, par exemple, un oscillateur paramétrique optique.

[0099] En variante, le liquide 4 peut ne pas contenir d'eau. Par exemple, le liquide 4 peut, à la place, comprendre un solvant organique. Dans ce cas, des paramètres de l'impulsion 17, tels que la puissance et/ou l'énergie de l'impulsion 17 peuvent être différents.

[00100] Avantageusement, le réacteur 2 comprend un circuit de collecte pour collecter des électrons émis lors de l'explosion coulombienne.

[00101] En variante, l'ouverture 34 comporte un dispositif pour établir une surpression entre l'extérieur et l'intérieur de l'enceinte 32, pour éviter que le liquide 4 ne s'écoule hors de l'enceinte 32.

[00102] En variante, la lame 20 peut être omise. Les sources laser 8 et 16 peuvent alors, par exemple, être disposées de telle sorte que leurs faisceaux respectifs soient dirigés de manière à viser l'ouverture 34. L'angle entre ces faisceaux, mesuré sur l'ouverture 34, est, par exemple, inférieur à 10°, ou à 5°.

[00103] L'étape 106 peut être omise. Dans un cas, une seule de chacune des impulsions 17 et 18 est appliquée au liquide 4. Dans une autre variante, des impulsions 17 et 18 peuvent être appliquées en succession rapide, ce qui évite de limiter le nombre de réactions pouvant se produire sur une durée donnée.

[00104] En variante, les parois de l'enceinte 32 sont réalisées en verre pyrex.

[00105] Le matériau 92 peut présenter une forme différente. Par exemple, le matériau 92 présente une forme cylindrique de section circulaire.

[00106] La bulle 14 peut présenter une forme différente. Par exemple, la bulle 14 présente une forme d'ellipsoïde non régulier ou une forme de sphère.

REVENDICATIONS

1. Réacteur (2) pour la mise en œuvre d'une réaction de fusion nucléaire, caractérisé en ce qu'il comporte :
-un liquide caloporteur (4) contenant des premier (10) et second (12) éléments atomiques en solution ;
-un générateur (6) de bulle apte à créer une bulle (14) dans le liquide caloporteur, cette bulle renfermant un milieu gazeux (15) contenant au moins le premier élément atomique ;
-une source laser (8) apte à appliquer sur le liquide caloporteur une impulsion laser femtoseconde (18), cette impulsion laser femtoseconde étant dirigée sur la bulle créée par le générateur de bulle et présentant une durée inférieure à 100fs et une intensité supérieure à 10^{14} $W.cm^{-2}$, de manière à déclencher une explosion coulombienne dans le milieu gazeux renfermé à l'intérieur de la bulle, cette explosion accélérant des noyaux atomiques desdits premiers éléments atomiques de sorte à déclencher à son tour une réaction de fusion nucléaire entre des noyaux atomiques des premier et second éléments atomiques.

2. Réacteur selon la revendication 1, dans lequel le générateur (6) de bulle comporte une source laser (16) apte à appliquer sur le liquide caloporteur une impulsion laser (17) pour créer une bulle dans le liquide caloporteur, cette impulsion laser présentant une intensité supérieure à 10^{7} $W.cm^{-2}$, et préférentiellement supérieure à 10^{9} $W.cm^{-2}$ et strictement inférieure à 10^{14} $W.cm^{-2}$.

3. Réacteur selon la revendication 2, dans lequel la source laser du générateur de bulle et la source laser apte à appliquer l'impulsion laser femtoseconde ne sont qu'une seule et même source laser commune (72), cette source laser commune étant apte à appliquer, successivement, sur le liquide caloporteur :
-l'impulsion laser (73) pour créer la bulle, et
-l'impulsion laser femtoseconde (74) apte à déclencher l'explosion coulombienne.

4. Réacteur selon les revendications 2 ou 3, dans lequel l'impulsion laser (17, 73) créant la bulle présente une énergie supérieure à 100µJ.

5. Réacteur selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel :
   - le premier élément (10) atomique est un isotope de l'hydrogène ;
   - le second élément (12) atomique est un élément choisi dans le groupe composé des isotopes du bore, des isotopes du lithium et des isotopes de l'hydrogène.

6. Réacteur selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel au moins l'un ou l'autre des premier et second éléments est présent à l'intérieur de nanoparticules (13) présentes en solution dans le liquide caloporteur, chaque nanoparticule présentant un diamètre supérieur ou égal à 8nm.

7. Réacteur selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel des premier et second éléments sont combinés à l'intérieur de nanoparticules (13) présentes en solution dans le liquide caloporteur, chaque nanoparticule présentant un diamètre supérieur ou égal à 8nm.

8. Réacteur selon la revendication 6 ou 7, dans lequel le liquide caloporteur contient les nanoparticules avec une concentration supérieure ou égale à 10^9 particules par cm^3, chaque nanoparticule (13) comportant :
   - un agrégat (52) contenant le second élément atomique avec une concentration atomique au moins égale à 10%, ledit agrégat présentant un diamètre compris entre 8nm et 1000nm ;
   - une pluralité de molécules hydrogénées (54), ces molécules comportant chacune une pluralité d'atomes du premier élément atomique

9. Réacteur selon la revendication 8, dans lequel le liquide caloporteur (4) comprend en outre de l'acide borique sous forme dissoute, avec une concentration au moins égale à $40g.L^{-1}$ à 20°C et, préférentiellement, avec une concentration égale à la limite maximale de solubilité de l'acide borique dans le liquide caloporteur.

10. Réacteur selon l'une quelconque des revendications 6 à 9, dans lequel au moins 50 % des liaisons interatomiques reliant entre eux les atomes formant ces nanoparticules (13) sont des liaisons covalentes.

11. Réacteur selon l'une quelconque des revendications dépendantes, dans lequel l'impulsion laser femtoseconde (18, 74) présente une intensité supérieure à 10^{16} $W.cm^{-2}$.

12. Réacteur selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le générateur est configuré pour que au moins 50 % des premiers éléments atomiques (10) contenus dans le milieu gazeux (15) à l'intérieur de la bulle soient dans un état non ionisé avant l'application de l'impulsion laser femtoseconde.

13. Procédé pour la mise en œuvre d'une réaction de fusion nucléaire, caractérisé en ce que ce procédé comprend :

-la fourniture (100) d'un réacteur comportant un liquide caloporteur contenant des premier et second éléments atomiques en solution ;
-la génération (102) d'une bulle dans le liquide caloporteur, par un générateur de bulle, cette bulle renfermant un milieu gazeux contenant au moins le premier élément atomique ;
-l'application (104) sur le liquide caloporteur d'une impulsion laser femtoseconde, cette impulsion laser étant dirigée sur la bulle générée et présentant une durée inférieure à 100fs et une intensité supérieure à 10^{14} $W.cm^{-2}$, de manière à déclencher une explosion coulombienne dans le milieu gazeux renfermé à l'intérieur de la bulle, cette explosion accélérant des noyaux atomiques desdits premiers éléments atomiques de sorte à déclencher à son tour une réaction de fusion nucléaire entre des noyaux atomiques des premier et second éléments atomiques.

14. Procédé selon la revendication 13, dans lequel le procédé comprend un délai (106) séparant la génération de la bulle de l'impulsion laser, ce délai étant inférieur ou égal à 1 ms.

15. Procédé selon les revendications 13 ou 14, dans lequel au moins 50% des premiers éléments atomiques contenus dans le milieu gazeux renfermé dans la bulle générée sont dans un état non ionisé préalablement à l'application (104) de l'impulsion laser femtoseconde.

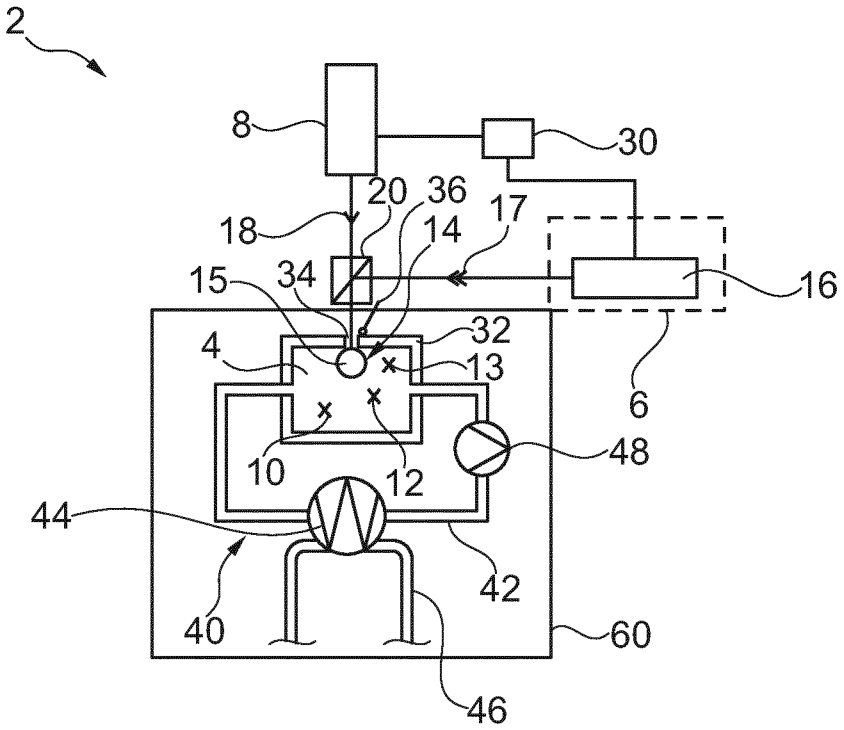


Fig. 1

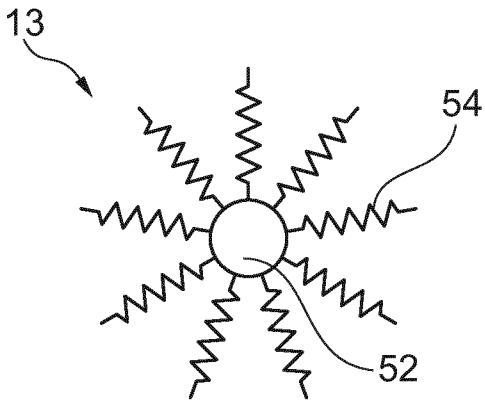


Fig. 2

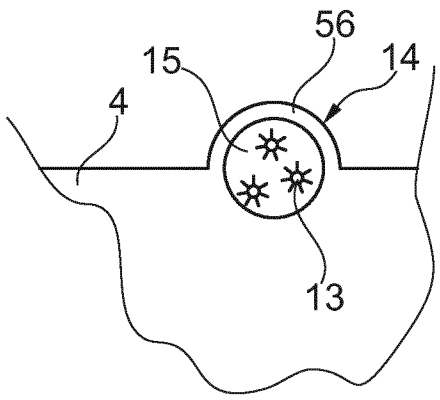


Fig. 3

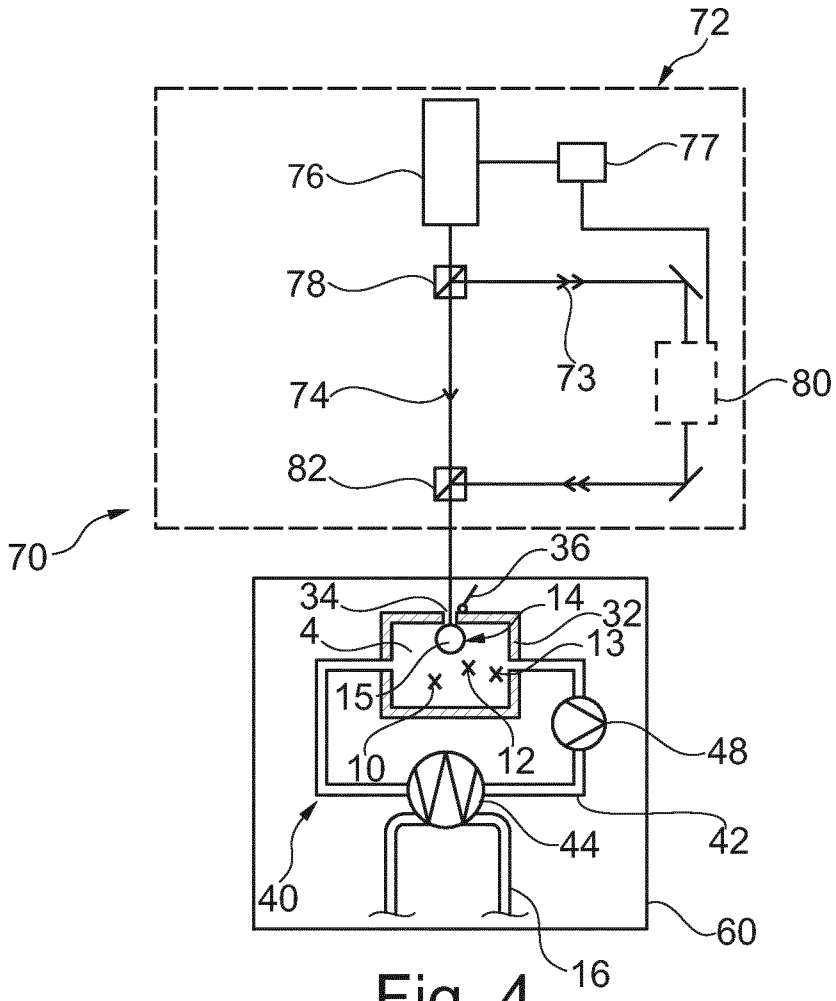


Fig. 4

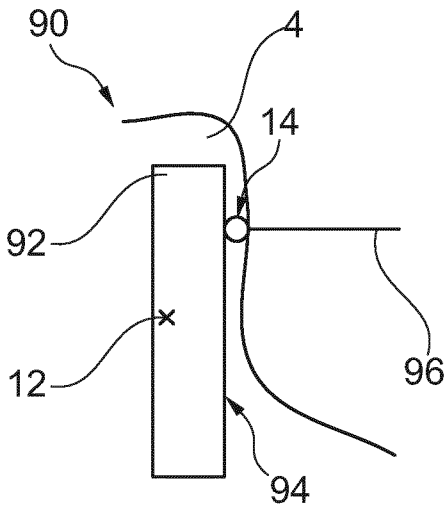


Fig. 5

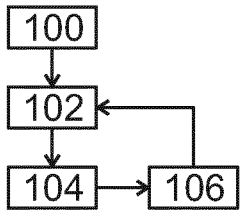


Fig. 6

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2013/065703

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. G21B3/00
ADD.

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
G21B

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)
EPO-Internal, WPI Data, INSPEC

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	LAST ET AL.: "Overrun effects in nuclear fusion within a single Coulomb exploding nanodroplet", EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL D, vol. 57, no. 3, April 2010 (2010-04), pages 327-334, XP002695744, France ISSN: 1434-6060, DOI: 10.1140/epjd/e2010-00038-3 abstract page 331, last paragraph - page 333, last paragraph ----- -/--	1-5, 11-15

[X] Further documents are listed in the continuation of Box C.

[ ] See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
17 December 2013	03/01/2014

Name and mailing address of the ISA/	Authorized officer
European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Capostagno, Eros

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2013/065703

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	KURILOVA ET AL.: "Peculiarities of femtosecond laser radiation interaction with liquid metal targets", PROCEEDINGS OF THE SPIE, vol. 6726, 2007, pages 67261L-1-67261L-6, XP002695745, USA ISSN: 0277-786X, DOI: 10.1117/12.752163 paragraph [0001] - paragraph [0002]	1-5, 11-15
A	ZHANG ET AL.: "Spatial distribution of high-energy electron emission from water plasmas produced by femtosecond laser pulses-", PHYSICAL REVIEW LETTERS, vol. 90, no. 16, 25 April 2003 (2003-04-25), pages 165002-1-165002-4, XP002695747, USA ISSN: 0031-9007, DOI: 10.1103/PhysRevLett.90.165002 page 1, left-hand column page 3, left-hand column figures 1,4	1-4,11, 13,14
A	LAST ET AL.: "Aneutronic H + <11>B nuclear fusion driven by Coulomb explosion of hydrogen nanodroplets", PHYSICAL REVIEW A (ATOMIC, MOLECULAR, AND OPTICAL PHYSICS), vol. 83, no. 4, April 2011 (2011-04), pages 043202-1-043202-9, XP002695746, USA ISSN: 1050-2947, DOI: 10.1103/PhysRevA.83.043202 abstract	1,13
A	TER-AVETISYAN ET AL.: "Generation of a quasi-monoergetic proton beam from laser-irradiated sub-micron dropletsAU", PHYSICS OF PLASMAS, vol. 19, no. 7, July 2012 (2012-07), pages 073112-1-073112-8, XP008161528, USA ISSN: 1070-664X, DOI: 10.1063/1.4731712 the whole document	1,13

-/--

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2013/065703

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	LAST ET AL.: "Energetics at extremes in Coulomb explosion of large finite systems", CHEMICAL PHYSICS, vol. 399, 3 May 2012 (2012-05-03), pages 218-223, XP002695748, Netherlands ISSN: 0301-0104, DOI: 10.1016/j.chemphys.2011.11.026 page 223, left-hand column, last paragraph -----	1,13

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°
PCT/EP2013/065703

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE
INV. G21B3/00
ADD.

Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB

B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE

Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement)
G21B

Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche

Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés)
EPO-Internal, WPI Data, INSPEC

C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
Y	LAST ET AL.: "Overrun effects in nuclear fusion within a single Coulomb exploding nanodroplet", EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL D, vol. 57, no. 3, avril 2010 (2010-04), pages 327-334, XP002695744, France ISSN: 1434-6060, DOI: 10.1140/epjd/e2010-00038-3 abrégé page 331, dernier alinéa - page 333, dernier alinéa	1-5, 11-15

-/--

[X] Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents

[ ] Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe

* Catégories spéciales de documents cités:

"A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent

"E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date

"L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)

"O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens

"P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée

"T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention

"X" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément

"Y" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier

"&" document qui fait partie de la même famille de brevets

Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée	Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale
17 décembre 2013	03/01/2014

Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale	Fonctionnaire autorisé
Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Capostagno, Eros

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°
PCT/EP2013/065703

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
Y	KURILOVA ET AL.: "Peculiarities of femtosecond laser radiation interaction with liquid metal targets", PROCEEDINGS OF THE SPIE, vol. 6726, 2007, pages 67261L-1-67261L-6, XP002695745, USA ISSN: 0277-786X, DOI: 10.1117/12.752163 alinéa [0001] - alinéa [0002]	1-5, 11-15
A	ZHANG ET AL.: "Spatial distribution of high-energy electron emission from water plasmas produced by femtosecond laser pulses-", PHYSICAL REVIEW LETTERS, vol. 90, no. 16, 25 avril 2003 (2003-04-25), pages 165002-1-165002-4, XP002695747, USA ISSN: 0031-9007, DOI: 10.1103/PhysRevLett.90.165002 page 1, colonne de gauche page 3, colonne de gauche figures 1,4	1-4,11, 13,14
A	LAST ET AL.: "Aneutronic H + <11>B nuclear fusion driven by Coulomb explosion of hydrogen nanodroplets", PHYSICAL REVIEW A (ATOMIC, MOLECULAR, AND OPTICAL PHYSICS), vol. 83, no. 4, avril 2011 (2011-04), pages 043202-1-043202-9, XP002695746, USA ISSN: 1050-2947, DOI: 10.1103/PhysRevA.83.043202 abrégé	1,13
A	TER-AVETISYAN ET AL.: "Generation of a quasi-monoergetic proton beam from laser-irradiated sub-micron dropletsAU", PHYSICS OF PLASMAS, vol. 19, no. 7, juillet 2012 (2012-07), pages 073112-1-073112-8, XP008161528, USA ISSN: 1070-664X, DOI: 10.1063/1.4731712 le document en entier	1,13

-/--

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°
PCT/EP2013/065703

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	LAST ET AL.: "Energetics at extremes in Coulomb explosion of large finite systems", CHEMICAL PHYSICS, vol. 399, 3 mai 2012 (2012-05-03), pages 218-223, XP002695748, Netherlands ISSN: 0301-0104, DOI: 10.1016/j.chemphys.2011.11.026 page 223, colonne de gauche, dernier alinéa -----	1,13