

Fusione nucleare a confinamento inerziale acustico

Una nuova via verso la fusione nucleare

*di Massimo Mastrangeli**

A proposito di fusione nucleare

A differenza delle reazioni di *fissione* nucleare, in cui tipicamente per bombardamento neutronico si induce la scissione di elementi chimici con elevato numero atomico (come l'uranio (U), il plutonio (Pu) o il torio (Th)) in sottoprodotti più stabili con numero atomico minore, nella *fusione* nucleare si tenta l'operazione inversa [1]. Con riferimento ad un esempio comune (illustrato in figura 1), la fusione di due nuclei di deuterio (D, l'isotopo dell'idrogeno il cui nucleo contiene un neutrone in aggiunta al semplice protone) può produrre con probabilità apprezzabile e confrontabile due eventi principali: la formazione di un nucleo di elio-3 (l'isotopo dell'elio (He) con il nucleo composto da due protoni ed un neutrone) con liberazione di un neutrone, oppure la creazione di un nucleo di trizio (T, l'altro isotopo dell'idrogeno nel cui nucleo il protone è accompagnato da due neutroni) con liberazione di un protone¹. Un'altra semplice reazione produce elio e un neutrone a partire da trizio e deuterio. Secondo l'equivalenza tra massa ed energia, poiché la massa finale dei prodotti è inferiore a quella dei reagenti (*difetto di massa*) tali reazioni liberano energia (radiante, sotto forma di fotoni, e soprattutto cinetica, come velocità delle particelle emesse).

L'intimo congiungimento dei nuclei delle specie atomiche necessario per ottenerne la fusione richiede, in primo luogo, il superamento della repulsione elettrostatica tra le cariche elettriche dei rispettivi protoni (barriera coulombiana). Nell'approccio classico², iniziato intorno alla metà del secolo scorso, si intende raggiungere questo scopo cercando di riprodurre artificialmente estreme condizioni di temperatura (necessaria a fornire l'energia cinetica alle particelle interagenti) e di pressione (necessaria per 'confinare' i nucleoni e permettere al processo di compiersi)³. Secondo la teoria più affermata, risalente al fisico H. Bethe, nel nucleo delle stelle si verificherebbe tra le altre una reazione di fusione tra due protoni e due neutroni che produrrebbe elio, due positroni, due neutrini e un fotone: in questo caso, il calore e la pressione sarebbero entrambi effetto della forza gravitazionale esercitata dalla massa degli stessi astri.

Sulla Terra si imitano le stelle essenzialmente in due maniere. La prima, detta *fusione a confinamento magnetico* (MCF), impiega campi magnetici di grande intensità per confinare il plasma di idrogeno in enormi strutture toroidali (come i tokamak); i neutroni prodotti dalla reazione sono catturati e la loro energia è convertita in calore e quindi vapore per alimentare turbine [2]. Nella seconda, la *fusione a confinamento inerziale* (ICF), laser ad alta energia sono focalizzati su microsferine contenenti miscele di deuterio e trizio in modo da generare, tramite il riscaldamento superficiale, onde di compressione che generino, nel nucleo delle sferule, le opportune condizioni di densità e calore; per il confinamento della reazione si sfrutta l'inerzia dello stesso combustibile [3]. La fusione nucleare promette da decenni di diventare la fonte definitiva di energia pulita, economica e praticamente illimitata a sostegno della civiltà umana. Tuttavia, nonostante gli

¹ Un terzo evento associato a questa modalità di fusione è la formazione di un atomo di elio con produzione di energia in forma di fotoni. Secondo la teoria più largamente accettata, in condizioni normali la probabilità di questo terzo esito risulta del tutto trascurabile rispetto agli altri.

² Accenniamo per completezza anche all'approccio alternativo costituito dalle reazioni nucleari *a bassa energia* (LENR), una branca della fisica relativamente recente e assai promettente capace negli ultimi anni di enormi progressi sperimentali e teorici che stanno attirando l'attenzione di un crescente numero di scienziati, istituti di ricerca e società. Per approfondimenti, si consulti il database online www.lenr-canr.org.

³ Per intuire l'ordine di grandezza delle potenze richieste, si tenga presente che nelle bombe H la reazione di fusione viene innescata dagli effetti della detonazione di una bomba atomica a fissione nucleare.

ingentissimi investimenti nel campo, essa ha raccolto risultati sperimentali finora assai modesti, ed è molto diffusa l'opinione che sia ancora ben lontana dal conseguire l'agognato fine. In questo contesto si deve registrare la recente realizzazione del consorzio internazionale ITER per la costruzione di un reattore a confinamento magnetico con potenza di 500 megawatt [4]. Mentre è stato mobilitato un magnifico budget (circa 5 miliardi di euro) la messa in funzione dell'impianto non è prevista prima del 2015, facendo quantomeno allontanare ulteriormente l'epoca in cui ipotetiche versioni commercialmente convenienti potranno essere disponibili.

Esistono alternative per la fusione nucleare? Una risposta positiva all'interrogativo sembrerebbe levarsi dalle decennali ricerche condotte indipendentemente da diversi istituti in una branca della fisica in apparenza non direttamente collegata alle reazioni nucleari. Per comprenderne le basi, cerchiamo di capire come il suono possa trasformarsi in luce.

Dalla sonoluminescenza alla AICF

Il fenomeno della *sonoluminescenza* (SL) [5] fu scoperto negli anni '30 durante dei lavori sul sonar [6]. Particolare interesse attrae la *sonoluminescenza a singola bolla* (SBSL), scoperta nel 1989 da F. Gaitan e L. Crum [7]. All'interno di un liquido, immerso in un campo di vibrazione (generato, per esempio, da un comune altoparlante), una singola bolla viene individuata e fatta lievitare grazie all'equilibrio tra la forza di gravità e la pressione generata dal campo acustico. Se nel contenitore del fluido si innescano onde acustiche stazionarie, la bolla rimane fissa nella posizione dell'antinodo. Il campo induce delle oscillazioni radiali nella bolla (cicli successivi di espansione e rapido collasso della stessa), ed in condizioni particolari di frequenza ed ampiezza delle onde acustiche la bolla emette bagliori di luce. La scarica luminosa non è continua, bensì composta da impulsi sincroni assai stabili della durata di decine di picosecondi, un milionesimo della durata dei cicli del campo [8].

Sebbene numerose teorie siano state proposte per spiegare la SBSL, il fenomeno sfida tuttora in sostanza la fisica moderna. In effetti lo spettro elettromagnetico della SBSL non coincide con quello della radiazione di corpo nero, ovvero la luce emessa dipende dal materiale impiegato, e contiene informazione sulle dinamiche in atto nella bolla. Secondo un semplice modello formulato a dieci anni dalla scoperta [9], la SL poteva essere spiegata sulla base dell'idrodinamica e della fisica dei plasmi. Il modello giustificava temperature in eccesso di 20-30 mila gradi, sufficienti a trasformare il gas interno alla bolla in una miscela di particelle ionizzate (plasma); quindi spiegava la radiazione emessa come conseguenza del rallentamento reciproco tra cariche dello stesso segno (radiazione di frenamento, o *bremstrahlung*) e/o della ricombinazione di cariche opposte. In precedenza, il gruppo italiano di G. Preparata e E. Del Giudice aveva dimostrato come l'elettrodinamica quantistica coerente potesse fornire un plausibile scenario in cui inquadrare naturalmente la SBSL [10]. Recenti lavori sembrano smentire le spiegazioni che invocano l'energia associata alle radiazioni quantistiche del vuoto [11, 12].

Altri ricercatori avevano diffuso un'ardita speculazione. Così come la temperatura superficiale del Sole (meno di 6000° C) nasconderebbe temperature molto superiori probabilmente presenti nel suo nucleo (stimate in un decine di milioni di gradi), si poteva pensare che le temperature previste per le bolle della SL ne caratterizzassero solo un guscio periferico: nel loro nucleo si sarebbero potute registrare temperature sufficienti a promuovere, in presenza delle giuste specie chimiche, processi di fusione nucleare. Simulazioni computerizzate sembravano confermare la previsione, sostenendo l'idea di una fusione nucleare a confinamento inerziale indotta da vibrazioni meccaniche (da cui il nome di *confinamento inerziale acustico*, AICF). Il nome di 'sonofusione' immediatamente evocato fu ufficialmente osteggiato, in quanto già adoperato per descrivere alcuni metodi acustici per la catalisi delle LENR.

Mentre l'interesse per la questione si alimentava della disputa tra sostenitori delle opposte fazioni [13], nel 2002 la comunità scientifica veniva shockata dalla pubblicazione di un articolo sulla rivista

Science [14] in cui un gruppo di ricerca del Oak Ridge National Laboratory (Tennessee) guidato dall'ingegnere nucleare R. Taleyarkan riportava prove di reazioni termonucleari avvenute in un sistema del tipo SBLS, opportunamente modificato (descritto nel prossimo paragrafo). La redazione di Science ha ricevuto pressioni da varie parti per eliminare o almeno ritardare e sminuire la portata del lavoro⁴ [15, 16]. Un attacco incisivo venne dallo stesso centro di Oak Ridge da parte di M. J. Saltmarsh e D. Shapira [17-19]. Le critiche indussero il gruppo di Taleyarkan, trasferitosi all'università di Purdue e forte di nuovi fondi e migliori strumentazioni, ad approfondire le indagini e ad allargare il numero di esperti coinvolti nel processo di verifica e validazione della ricerca. In un articolo di due anni dopo [20] il gruppo di ricerca aggiornava le precedenti scoperte, dimostrando risultati statisticamente assai più significativi. Infine, gli stessi fenomeni sono stati recentemente riprodotti dal gruppo fisici Y. Xu e A. Butt, indipendente sebbene appartenente anch'esso alla Purdue University, utilizzando inoltre un apparato più semplice di quello usato da Taleyarkan [21]. Tali evidenze non convincono certamente tutti gli scettici sul fenomeno (tra cui uno dei più noti ricercatori della AICF, il professor S. Putterman); cautela e prudenza sono senz'altro salutari. Nondimeno, nelle parole del professor G. Lohnert (redattore principale di "Nuclear Engineering and Design", e revisore del lavoro di Xu e Butt) "per la prima volta, direi, nella storia dell'umanità un semplice meccanismo meccanico ha mostrato di essere capace di produrre temperature in eccesso di milioni di gradi!". Vediamo con quale sistema sia stato possibile raggiungere questo risultato entusiasmante.

Apparato sperimentale, procedura ed evidenze della fusione

Assai complessa è la fenomenologia associata alla AICF, comprendendo allo stesso tempo fluidodinamica, fisica del plasma, acustica, reazioni chimiche e nucleari. Il suo studio deve essere accompagnato da imponenti ed esose simulazioni.

Gli esperimenti del gruppo di Taleyarkan e colleghi iniziarono nel 1996 attorno ad una versione modificata della SBSL. Si accorsero che per aumentare le dimensioni delle bolle prima delle implosioni (e dunque la pressione massima raggiungibile durante il collasso) era necessario rimuovere dal liquido tutte quelle naturali; per generare appositamente le proprie bolle avrebbero impiegato lo stesso principio della 'camera a bolle', per l'appunto. L'apparato sperimentale definitivo, schematizzato in figura 2, si compone di un cilindro in vetro Pyrex di 65 millimetri di diametro per 100 in altezza, circondato esternamente da un anello in ceramica PZT. L'applicazione di una tensione alternata all'anello ne induce la vibrazione per effetto piezoelettrico, producendo onde acustiche nel liquido contenuto nel fiasco. Il gruppo di Taleyarkan (come quello di Xu e Butt) impiega acetone arricchito di deuterio, in cui il 99.92% degli atomi di idrogeno sono sostituiti con il suo primo isotopo (ottenendo C₃D₆O piuttosto che C₃H₆O), al fine di facilitare la reazione di fusione e disporre di un liquido che sostiene elevate pressioni (stress tensili) senza formare dannose bolle; inoltre è piuttosto economico e poco pericoloso. Il liquido è accuratamente privato di gas e vapori interni, e mantenuto a temperatura di 0° C.

Per avviare il processo, si applica una tensione a frequenza ultrasonica (20 KHz) tale da mandare in risonanza acustica la struttura e instaurare delle onde concentriche stazionarie, che accumulano energia potenziale meccanica. Il liquido è così sottoposto a fasi alternate di compressione ed espansione; nel centro la pressione raggiunge un'intensità massima di 1500 KPa. Nell'istante in cui la pressione interna è minima vengono sparati dei neutroni con energia di 14.1 MeV attraverso un generatore impulsato di neutroni (PNG; Xu e Butt lo sostituirono con una sorgente continua composta da plutonio e berillio). L'impulso dura 6 microsecondi ed è isotropo. Alcuni neutroni

⁴ Si tenga anche presente che tredici anni prima la comunità scientifica era stata scossa dallo 'scandalo' della cosiddetta 'fusione fredda'. Science aveva avuto un ruolo decisivo nella controversia (particolarmente nel diffondere un giudizio nefasto sulle esperienze di Fleischmann e Pons), ed era considerato interesse comune non dare adito a repliche di manifestazioni del genere.

collideranno con i nuclei del fluido, trasferendo alle sue molecole parte della loro energia cinetica. Tale scambio genera calore in una regione di pochi nanometri, determinando la formazione di minuscole bolle; Taleyarkan stima che per ogni impulso se ne formino un migliaio. Il fenomeno per cui il liquido si frattura ed in esso si formano interstizi riempiti di gas e/o vapore prende il nome di *cavitazione* [22]. Poiché il fluido si trova nella fase di minima pressione, le bolle si espandono quasi istantaneamente di ben 100000 volte rispetto alla dimensione iniziale (nella SBSL il rapporto ammonta soltanto a 10), raggiungendo dimensioni millimetriche, visibili a occhio nudo. Nel semiperiodo successivo esse sono quindi soggette a compressione, per cui implodono con enorme violenza, convertendo la loro energia potenziale in cinetica. Si producono onde d'urto concentriche che viaggiano verso l'interno e aumentano d'ampiezza mentre raggiungono il centro del cilindro: qui si stima che la pressione possa raggiungere i 10^{13} KPa (la pressione atmosferica è di circa 100 KPa), la temperatura decine di milioni di gradi. In queste condizioni i nuclei di deuterio collidono superando la repulsione elettrostatica, dando luogo alla loro fusione. L'efficienza con cui le bolle addensano energia in questa fase critica è massima se esse riescono a mantenere fino al termine del collasso una forma perfettamente sferica, sebbene la probabilità che ciò si verifichi è molto bassa. La reazione nucleare è accompagnata da emissione di fotoni, rilevati con fotomoltiplicatori, e da distinguibili 'pop' dovuti alle onde d'urto che 20 microsecondi dopo la reazione urtano le pareti del cilindro. Si noti che le condizioni di temperatura e pressioni estreme interessano sempre volumi trascurabili del liquido, e per intervalli irrisori: questo spiega la mancata distruzione dell'intero apparato.

Le prove dirette dell'avvenuta reazione termonucleare sono di due tipi. La prima è la produzione di neutroni, nel caso che la reazione produca elio-3. I neutroni sono rivelati con scintillatori, strumenti in cui le particelle interagiscono con un liquido che produce fotoni, che vengono poi misurati. Negli esperimenti, gli scintillatori rivelano distintamente, come atteso, due gruppi di neutroni: quelli a 14.1 MeV dovuti alla sorgente impulsata e quelli a 2.45 MeV tipici della reazione deuterio-deuterio; i secondi compaiono 30 microsecondi dopo i primi accompagnati da raggi gamma che sono registrati quasi contemporaneamente agli stessi neutroni (coincidenza temporale di pochi nanosecondi). La seconda prova consiste nell'aumento della concentrazione di trizio nella soluzione, associata alla reazione che produce in aggiunta protoni; questi ultimi sono troppo difficili da misurare perché facilmente assorbibili dall'acetone e dal vetro.

Entrambi i gruppi di ricerca hanno eseguito controesperimenti di verifica. La procedura è stata ripetuta modificando il reagente (utilizzando cioè acetone non arricchito in deuterio, per eliminare la possibilità che i neutroni rivelati derivassero da semplici anomalie), la temperatura e la fase del ciclo in cui sparare neutroni, ed impiegando separatamente cavitazione e onde acustiche: in nessuna delle combinazioni operative diverse da quella descritta in precedenza essi sono stati in grado di riscontrare evidenze statisticamente significative di avvenute reazioni termonucleari.

Problemi aperti e possibili applicazioni

Supponendo di disporre del metodo per innescare la reazione nucleare, come si potrebbe sfruttare? Non si tratta di una questione di facile soluzione. Proprio perché la reazione dura pochissimo ed è assai ben spazialmente confinata, nel complesso essa produce finora poca energia. Occorre innanzitutto trovare un modo per aumentare le dimensioni dell'apparato, in modo che arrivi a produrre più energia di quella che consuma. Inoltre, bisogna rendere la reazione capace di autosostenersi: un problema comune alle altre forme di fusione nucleare [23].

Per rendere la reazione rigenerativa è stato proposto di porre due dispositivi uno accanto all'altro ed in opposizione di fase, così che quando uno si trovasse ad emettere neutroni, nell'altro il liquido attraverserebbe proprio la fase di minima pressione adatta alla cavitazione, che sarebbe innescata dai neutroni forniti dal primo. Nel semiciclo successivo le funzioni si invertirebbero, rendendo il procedimento, una volta avviato, del tutto autonomo.

I neutroni contengono la maggior parte dell'energia liberata nel processo. Secondo il gruppo di Taleyarkan, il numero dei neutroni emessi in ciascun ciclo della reazione può essere aumentato agendo su alcuni parametri liberi del processo (dimensioni del cilindro, pressione interna, dimensioni delle bolle...). Oltretutto, in presenza di trizio si dovrebbero verificare anche reazioni trizio-deuterio, le quali rilasciano neutroni a energia superiore e con probabilità mille volte maggiore di quella delle reazioni deuterio-deuterio. Disponendo di apparati di dimensioni ragionevoli, per raccogliere le particelle e produrne energia elettrica si potrebbe adottare una tecnica simile a quella usata nei tokamak. Altrimenti, disponendo di un liquido in grado di trattenere efficacemente l'energia liberata dalle reazioni, esso stesso potrebbe essere usato per trasferire energia ad un altro fluido, come il vapore acqueo. A questo scopo si pensa di impiegare composti del carbonio e del silicio che lavorano a temperature elevate; idealmente il fluido dovrebbe lavorare alla temperatura dell'acqua pressurizzata, già impiegata nei reattori a fissione, così da poterne adattare la tecnologia già disponibile per lo scambio di calore.

Possibili applicazioni a breve termine della AICF vanno dallo studio delle reazioni di fusione termonucleare stesse, alla realizzazione di una sorgente di neutroni economica, utilizzabile per attivare farmaci anticancro, in dispositivi di sicurezza o che analizzano la struttura molecolare dei materiali; dalla sintesi di nuovi materiali (tra cui la conversione di carbonio in diamanti) alla produzione di trizio usato per imaging medico, allo studio di fenomeni cosmologici come le stelle a neutroni. Nondimeno, la meta finale rimane lo sviluppo di una fonte energetica ecologica, economica ed illimitata. La fusione nucleare non produce gas serra né scorie radioattive con alto tempo di decadimento, ed il reagente è praticamente inesauribile.

Sebbene il traguardo possa ancora sembrare lontano, almeno due compagnie stanno attualmente scommettendo sulle applicazioni della AICF. La canadese General Fusion Inc. sta sviluppando un approccio che coniuga confinamento acustico e laser, allo scopo di indurre elevate pressioni all'interno di camere contenenti litio liquido [24]. La californiana Impulse Devices, fondata dallo stesso Gaitan, impiega invece sfere in acciaio inossidabile, adatto a resistere ad elevatissime pressioni, dotate perifericamente di cristalli piezoelettrici in grado di indurre cavitazione nel liquido contenuto all'interno [25]. Infine, Gaitan, Taleyarkan, Crum ed altri ricercatori hanno dato vita al consorzio AFTEC [26] dedicato alla promozione ed allo sviluppo della fusione a confinamento acustico. Esso prevede la partecipazione di molte istituzioni accademiche e commerciali: un'interazione cruciale per l'eventuale successo di questa tecnologia potenzialmente rivoluzionaria.

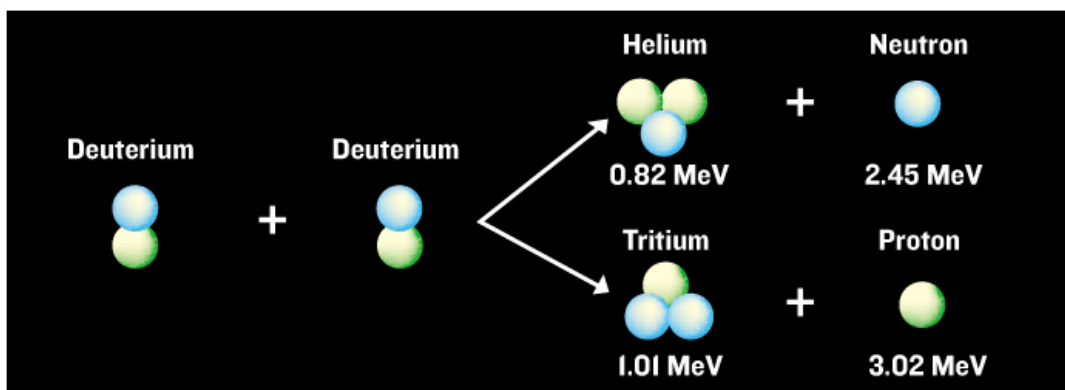


Figura 1: reazione di fusione tra nuclei di deuterio (tratto da [23]).

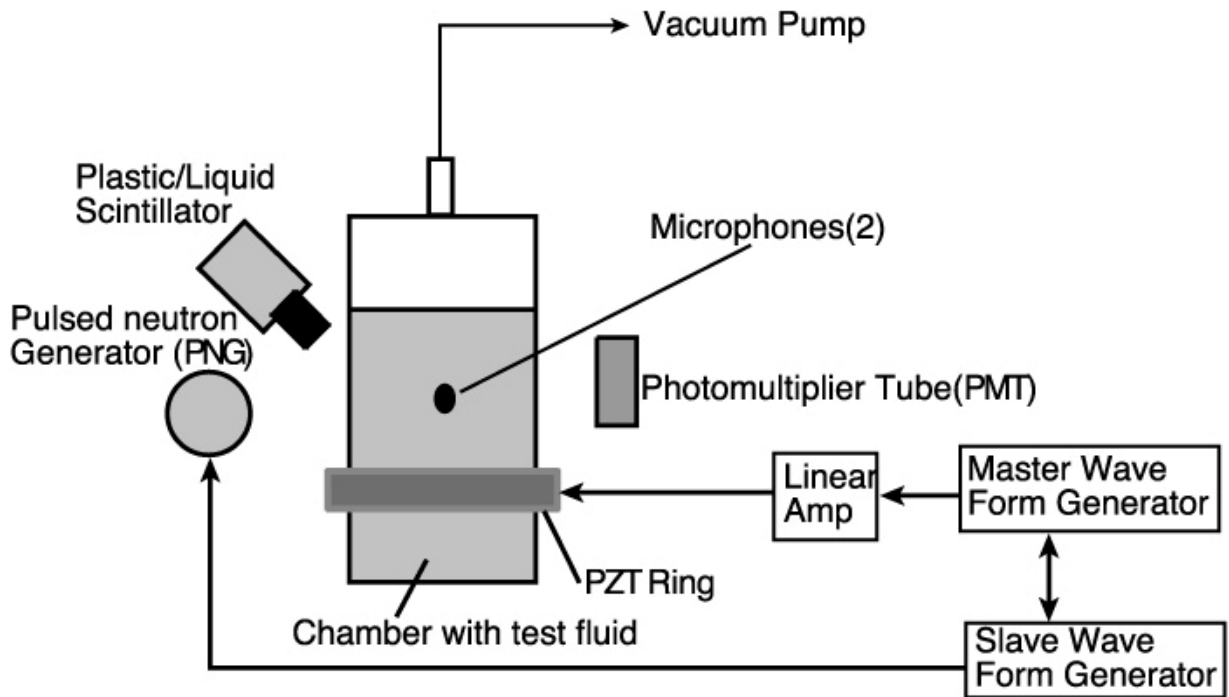


Figura 2: schema dell'apparato sperimentale usato dal gruppo di Taleyarkan (tratto da [14]).

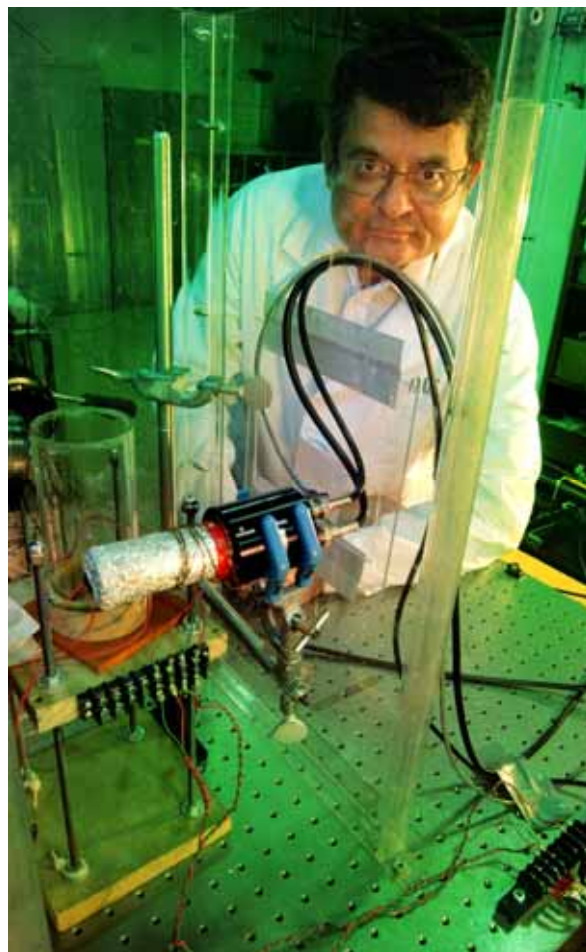


Figura 3: il professor Taleyarkan con il suo sistema per la AICF (fonte: Oak Ridge National Laboratory).

Riferimenti:

- [1] <http://www.fusione.enea.it>
- [2] <http://fusion.gat.com/icf/concept/>
- [3] <http://www.plasmas.org/fusion-mag.htm>
- [4] www.iter.org
- [5] S. J. Putterman, "Sonoluminescence: Sound into Light," *Scientific American*, Febbraio 1995, pag. 46.
- [6] H. Frenzel and H. Schultes, "Ultrasonic vibration of water", *Z. Phys. Chem.* B27, 421 (1934)
- [7] D. F. Gaitan, L. A. Crum, R. A. Roy, and C. C. Church, *J. Acoust. Soc. Am.* 91, 3166 (1992)
- [8] <http://en.wikipedia.org/wiki/sonoluminescence>
- [9] S. Hilgendorf, S. Grossmann, D. Lohse, "A simple explanation of light emission in sonoluminescence", *Nature*, vol. 398 pag, 402, aprile 1999.
- [10] M. Buzzacchi, E. Del Giudice, and G. Preparata, "Sonoluminescence unveiled?", *Quantum Physics Abstract*, <http://xxx.lanl.gov/abs/quant-ph/9804006>
- [11] S. Liberati, M. Visser, F. Belgiorno, D. Sciama, "Sonoluminescence as a QED vacuum effect. I: the physical scenario", *Quantum Physics Abstract*, <http://arxiv.org/abs/quant-ph/9904013>
- [12] K. A. Milton, "Sonoluminescence and the Dynamical Casimir Effect", *High Energy Physics – Theory Abstract*, <http://arxiv.org/abs/hep-th/9811174>
- [13] L. A. Crum, "Sonoluminescence and acoustic inertial confinement fusion", Fifth International Symposium on Cavitation (cav2003), Osaka, novembre 2003.
- [14] R. P. Taleyarkhan, C. D. West, J. S. Cho, R. T. Lahey, Jr. R. Nigmatulin, and R. C. Block, "Evidence for Nuclear Emissions During Acoustic Cavitation," *Science* 295, 1868 (2002)
- [15] C. Seife, "'Bubble fusion' paper generates tempest in a beaker", *Science* 295, 1808 (2002)
- [16] D. Kennedy, "To publish or not to publish", editoriale, *Science* 295, 1793 (2002)
- [17] D. Shapira, M. J. Saltmarsh, "Comments on the Possible Observation of D-D Fusion in Sonoluminescence" (2002) (<http://www.ornl.gov/slsite>).
- [18] R. P. Taleyarkhan, R. C. Block, C. West, R. T. Lahey Jr., "Comments on the Shapira/Saltmarsh Report" (<http://www.rpi.edu/lahey/SciencePaper.pdf>).
- [19] "Questions Regarding Nuclear Emissions in Cavitation Experiments", *Science* 297, 1603 (2002)

- [20] R. P. Taleyarkhan, J. S. Cho, C. D. West, R. T. Lahey, Jr., R. I. Nigmatulin, R. C. Block, “Additional evidence of nuclear emissions during acoustic cavitation”, *Physical Review E*, 69, 036109 (2004)
- [21] Y. Xu, A. Butt, “Confirmatory experiments for nuclear emissions during acoustic cavitation”, *Nuclear Engineering and Design* 235 (2005), 1317–1324.
- [22] <http://en.wikipedia.org/wiki/Cavitation>
- [23] R. T. Lahey Jr., R. P. Taleyarkan, R. I. Nigmatulin, “Bubble power”, *IEEE Spectrum*, maggio 2005.
- [24] <http://www.generalfusion.com/>
- [25] <http://www.impulsedevices.com/>
- [26] <http://members.nuvox.net/~on.jwclymer/snf/aftec.html>

***Massimo Mastrangeli** è nato nel novembre 1981 a Montefiascone (Viterbo). Ha conseguito la Laurea Specialistica cum laude in Ingegneria Elettronica presso l’Università di Pisa nel luglio 2005. Attualmente è dottorando presso la Facoltà di Ingegneria della Katholieke Universiteit Leuven (Belgio), dove si occupa di sistemi microelettromeccanici (MEMS) e processi per elevata integrazione per la microelettronica. Tra le sue attività di divulgazione scientifica, ha organizzato a Pisa insieme a R. Virgilio la Conferenza sulla Fusione Fredda nell’aprile 2005.