



Gli acceleratori e l'atomica

Le implicazioni della tecnologia impiegata negli acceleratori di particelle sulla proliferazione nucleare sono tali da imporre una riflessione attenta su quanto sia «pura» la ricerca nella fisica delle alte energie.

di A. Gsponer

L'energia proveniente dai processi nucleari oggi può essere essenzialmente prodotta in due modi: attraverso la *fissione* di nuclei molto pesanti, o attraverso la *fusione* di nuclei molto leggeri. Gli *acceleratori* di particelle (di elettroni, protoni o ioni) sono importanti per questi processi perché con essi, nel primo caso, si potrebbero produrre materiali fissili e, nel secondo, si potrebbe innescare la fusione usando fasci di particelle ad alta energia.

Dall'inizio dell'era nucleare un notevole progresso è stato ottenuto nelle tecnologie degli acceleratori: se esse saranno usate per lo sviluppo di nuove armi nucleari, studiando la fisica e gli effetti delle armi nucleari in laboratorio, il progresso delle tecnologie dell'acceleratore e di quelle di fusione potrà contribuire a una proliferazione nucleare verticale. Tali studi, comunque, possono rendere meno necessari gli esperimenti nucleari sotterranei.

Inoltre gli acceleratori e gli ibridi di fusione, insieme ai reattori di fissione usati per la ricerca o la produzione di energia, potranno presto essere utilizzati per generare materiali fissili e creare, in questo modo, una possibile nuova strada anche per la proliferazione orizzontale delle armi nucleari.

Sono già state analizzate in molti articoli le implicazioni, per quanto riguarda la proliferazione, dei recenti progressi nei reattori di fissione e nelle tecnologie di arricchimento del materiale radioattivo. Sono già state esaminate anche le implicazioni derivanti dai reattori di fusione, ma queste dovranno essere notevolmente ampliate nel prossimo futuro. Qui prendiamo in esame gli aspetti della proliferazione della fusione e quelli in cui sono coinvolti gli acceleratori di particelle.

Metodi di generazione di neutroni

Tutti i metodi di produzione di materiale fissile artificiale (plutonio-239, uranio-233) da materiale fertile (uranio-238, torio-232) richiedono un'intensa sorgente di neutroni: il trizio, materiale di fusione utilizzato nei reattori di fusione, nelle bombe all'idrogeno e nelle bombe N, è prodotto irradiando litio con neutroni. Per esempio, per produrre 1 kg. di plutonio o di uranio-233 o 13 g di trizio per anno, è necessaria una fonte di almeno 8×10 neutroni al secondo.

Intensità di flussi di tale livello si manifestano già nel nucleo dei normali reattori a fissione; in essi sono infatti prodotte notevoli quantità di plutonio

proprio come risultato della cattura, da parte dell'uranio-238, di neutroni generati dalla fissione di uranio-235. Ma il tasso di conversione (numero dei nuclei di plutonio prodotti per ciascuna fissione) è inferiore a 1. Per questa ragione, con i reattori convenzionali, meno dell'1% dell'uranio-238 disponibile può essere convertito in plutonio, mentre, almeno in teoria, i reattori autofertilizzanti veloci possono trasformare il 70% dell'uranio-238 in plutonio. Si potrebbero raggiungere risultati simili usando come emettitori di neutroni la fusione termonucleare o gli acceleratori di particelle, in cui contrariamente ai reattori convenzionali o agli autofertilizzanti veloci, i neutroni sono generati fuori dal contenitore del materiale fertile nel quale l'uranio-238 viene trasformato in plutonio. Questa fondamentale differenza nel luogo di produzione dei neutroni semplifica i problemi di sicurezza e facilita il ritrattamento dell'uranio irradiato dal momento che esso verrebbe a contenere relativamente pochi prodotti di fissione. Inoltre l'ottimizzazione di tali sistemi potrebbe tendere a minimizzare l'irradiazione del materiale fertile così che il plutonio potrebbe essere direttamente utilizzabile per fabbricare armi nucleari. Nella tabella 1 sono confrontate le principali caratteristiche dei vari metodi di produzione di neutroni. Le fonti di neutroni sono elencate secondo la quantità di energia per neutrone utile prodotto.

Come si può vedere, molti dei metodi classici usati nella ricerca e nelle applicazioni mediche (reazione di «stripping» del deutone, reazione deuterio-trizio su bersaglio gassoso o solido, produzione di fotoneutroni da radiazione di rallentamento di elettroni) non possono essere usati per produrre plutonio su scala industriale: la quantità di neutroni è troppo piccola mentre il dispendio di energia è troppo grande. Tra i reattori a fissione, i più efficienti per la produzione di plutonio sono i reattori moderati ad acqua pesante o a grafite. Di fatti, i moderatori di questi reattori, il deuterio, l'ossigeno e il carbonio (così come l'elio usato nei reattori raffreddati a gas), sono tra le sostanze che hanno la più bassa probabilità di catturare neutroni. La maggior parte dei neutroni non usati per alimentare la reazione a catena in questi reattori vengono assorbiti, dall'uranio-238. È proprio per questa ragione, e perché possono essere alimentati con uranio naturale, che i rischi di proliferazione con questi tipi di reattori sono particolarmente alti. In confronto, per un dato impianto termoelettrico, la quantità netta di plutonio prodotto è inferiore a quella prodotta in un reattore normale. Tuttavia il plutonio prodotto nel mantello è utilizzabile per gli armamenti. D'altra parte, i nuovi metodi che usano acceleratori ad alta energia (da 500 a 1500 MeV) o reattori a fusione, pro-

durrebbero materiale fissile 10 o 20 volte di più dei reattori a fissione di uguale potenza termica. Tuttavia ancora non esistono sistemi atti a questi scopi e, per il momento, le tecnologie necessarie non sono ancora molto diffuse. È interessante notare che, mentre in uno Stato che aderisce al Trattato di non-proliferazione tutte le dotazioni nucleari sono sottoposte a uno stretto controllo internazionale, gli acceleratori non sono soggetti ad alcuno di tali controlli né vi è alcun dibattito sugli effetti che questa tecnologia può avere sulla proliferazione delle armi nucleari.

Acceleratori per la produzione di materiale fissile

Il plutonio-239 venne prodotto per la prima volta a Berkeley nel 1941, irradiando uranio-238 con neutroni ottenuti attraverso il bombardamento di un bersaglio di berillio con deutoni accelerati in un ciclotrone. Da allora fino all'autunno del 1943, gli acceleratori circolari furono la sola fonte di plutonio e, durante questo periodo, vennero prodotti appena poco più di 2 milligrammi di plutonio. Il primo tentativo di usare un acceleratore per produrre materiali fissili fu fatto da un gruppo di Berkeley nei primi anni 50 con un progetto chiamato MTA (Acceleratore per il collaudo dei materiali). Lo scopo era quello di pro-

Tab. 1 *Caratteristiche dei metodi di produzione di neutroni per la fertilizzazione di materiali fissili*

Processi	Tecnologia	Esempio	Neutroni prodotti	Energia impiegata (MeV/n)	Potere termico Complessivo	Produzione netta di plutonio (kg. Pu/anno)
«Stripping» di deutoni	Acceleratore di deutoni	Deutoni da 35 MeV su litio o berillio	$2,5 \times 10^{-3}$ n/d	14.000		
Radiazione deuterio-trizio su bersaglio	Acceleratore di deutoni	Deutoni da 0,4 MeV su trizio in titanio	4×10^{-5} n/d	10.000		
Produzione di fotoneutroni	Acceleratore di neutroni	Elettroni da 100 MeV su bersaglio di Uranio-238	5×10^{-2} n/e	2.000		
Fusione termonucleare	Focalizzazione a plasma denso	Focalizzazione a plasma denso con mantello di Uranio	5×10^{18} n/s	1.600	1.000	50
Fissione veloce	Fertilizzante veloce	Fertilizzante veloce del plutonio	0,14 n/fissione	1.300	3.333	200
Fissione lenta	Reattore termico	Reattore ad acqua leggera	0,21 n/fissione	900	3.333	300
Fissione lenta	Reattore termico	Reattore ad acqua pesante	0,35 n/fissione	500	3.333	500
«Spallazione»	Acceleratore di protoni	Protoni da 1.000 MeV su bersaglio di uranio naturale	100 n/protone	130	4.000	3.000
Fusione termonucleare	Reattore ibrido di fusione	Ibrido di fusione-fissione con mantello standard	1,3 n/fusione	100	4.000	3.000
Fusione termonucleare	Reattore ibrido di fusione	Ibrido con mantello «a fissione soppressa»	1,3 n/fusione	30	4.000	9.000

Tab. 2 *Caratteristiche di alcune intense fonti di neutroni di spallazione per la ricerca*

Risorse	Paese	Energia dei protoni (MeV)	Bersaglio	Durata dell'impulso (μ s)	Corrente media (μ A)	Frequenza di ripetizione dell'impulso (Hz)	Neutroni prodotti (n/s)	Stato
Zing - P ¹	Usa	800	W	0,2	45	30	2×10^{14}	in funzione
Ipns - I	Usa	500	U-238	0,2	24	30	2×10^{15}	in costruzione
Ipns - II	Usa	800	U-238	0,2	480	60	9×10^{16}	proposto
Wnr	Usa	800	W	10	6	120	1×10^{15}	in funzione
Wnr	Usa	800	U-235	10	6	120	2×10^{16}	in funzione
Wnr-Ring	Usa	800	W	0,27	100	12	1×10^{16}	in costruzione
Wnr-Ring	Usa	800	U-235	0,27	100	12	2×10^{17}	in costruzione
Snc	Inghilterra	800	U-238	0,2	200	53	4×10^{16}	in costruzione
Triumpf	Canada	500	Pb	—	100	—	5×10^{15}	in funzione
Kens	Giappone	500	U-238	0,07	—	15	3×10^{14}	in funzione
Snq	Germania Fed.	1100	U-238	1000	5000	100	3×10^{16}	proposto
Snq-Ring	Germania Fed.	1100	U-238	1	5000	1000	3×10^{16}	proposto
Sin	Svizzera	600	Pb-Bi	—	1000	—	7×10^{16}	proposto

durre plutonio per scopi militari, dall'uranio impoverito accumulatosi nell'impianto di arricchimento a diffusione di Oak Ridge. A quel tempo l'uranio per l'impianto di arricchimento era comprato soprattutto nel Congo Belga e in Sud Africa. Se tutto l'uranio impoverito risultante avesse potuto essere trasformato in plutonio, gli Stati Uniti si sarebbero liberati dalla dipendenza da fonti di uranio esterne. Tuttavia il progetto MTA fu abbandonato quando vennero scoperti negli Stati Uniti occidentali nuovi giacimenti di uranio. Un prototipo di acceleratore aveva comunque operato con successo ed era già iniziata la costruzione dell'acceleratore definitivo quando, nel 1954, il progetto MTA fu interrotto.

Dal 1950 la tecnologia degli acceleratori si è sviluppata notevolmente. Quanto prima saranno disponibili sia le conoscenze che le tecnologie per costruire acceleratori lineari e circolari atti alla produzione di consistenti quantità di plutonio, costruzione che — come si sostiene da qualche tempo — potrebbe anche risultare economicamente vantaggiosa. È stato infatti calcolato che un fascio di protoni (con intensità di 300 mA, 10000 MeV) potrebbe produrre in un anno sufficiente uranio-233 per alimentare una dozzina di reattori uranio-torio del tipo CANDU da 10000 MW(e) ciascuno.

Il processo fisico usato nelle sorgenti di neutroni che utilizzano acceleratori ad alta energia è chiamato «spallazione». Quando una particella ad alta energia colpisce un nucleo complesso, i nucleoni vengono letteralmente strappati via dal nucleo quasi ricevessero una «spallata». Se l'energia dei prodotti di spallazione è sufficiente a indurre una spallazione ulteriore, questo meccani-

Tab. 3 *Principali acceleratori ad alta energia, iniettori e anelli di comunicazione*

Paese	Acceleratori	Anelli di accumulazione	Totale
Usa	13	4	17
Urss	9	3	12
Cern *	5	3	8
Giappone	5	—	5
Francia	3	1	4
Germania Federale	2	2	4
Cina	3	—	3
Svizzera	1	—	1
Canada	1	—	1
Italia	—	1	1

* Cern: Organizzazione Europea per le Ricerche Nucleari (Ginevra)

Tab. 4 *Principali acceleratori (ciclotroni) in funzione o in costruzione nel Terzo Mondo*

Paese	Località	Energia (MeV)	Corrente interna (μ A)	Inizio attività
Argentina	Buenos Aires	28	25	1954
Brasile	Rio de Janeiro	14	150	1974
Brasile	Sao Paulo	14	100	1979
Cile	Santiago	6	10	1967
India	Calcutta	130	1000	1977
India	Chandigahr	5	15	1971
Sud Africa	Pretoria	17	700	1958
Sud Africa	Stellenbosch	200	10	(1983)
Sud Africa	Stellenbosch	8	100	(1984)
Arabia Saudita	Riyadh	24	—	1979

smo genera un processo nucleare a cascata in cui vengono prodotti molti neutroni. Per un bersaglio di uranio naturale il numero dei neutroni prodotti in questo modo in una cascata piena è dell'ordine di 100 per ogni protone da 1000 MeV.

La tabella 2 elenca le più intense fonti di neutroni di spallazione esistenti o proposte nel mondo. Di solito queste

fonti sono costruite per la ricerca nucleare, fondamentale o applicata. Questi impianti permettono però di realizzare anche il lavoro fondamentale di sviluppo dei sistemi di produzione dei materiali fissili. Tali sistemi sono spesso chiamati «autofertilizzanti ad acceleratore» o anche «autofertilizzanti elettrici» perché possono considerarsi come convertitori dell'elettricità che alimenta

Tab. 5 Alcuni acceleratori di elettroni ad alta intensità sovietici e americani

Acceleratori	Corrente (MA)	Voltaggio (MV)	Durata impulsi (ns)	Potenza (TW)
USA				
Aurora	1,6	14	120	22
Proto I	0,8	3	24	2,4
Blackjack	1,1	1,3	50	1,4
Owl	0,75	1,5	110	1,2
Gamble II	1	1	50	1
Hydra	1	1	100	1
Hermes II	0,1	10	80	1
URSS				
Angara - 1	1	2	100	2
Lebedev	0,06	30	100	1,8
Tonus	0,06	2	50	0,12
Rius - 5	0,03	4	40	0,12
Vodyanoy	0,12	0,5	40	0,06
Neptun	0,03	1	40	0,03

l'acceleratore in plutonio con un rendimento teorico dell'ordine di 12.

P. Grand, in «Nature», 278 (*The use of highenergy accelerators in the nuclear fuel cycle*) dà alcuni dettagli su progetti di acceleratori autofertilizzanti in Canada e in USA e su altri possibili usi degli acceleratori ad alta energia in un ciclo di combustibile. Il suo autore suggerisce che gli autofertilizzanti ad acceleratore potrebbero essere costruiti e messi in funzione a un costo ragionevole entro un periodo di circa 10 anni e che potrebbero essere usati commercialmente entro i prossimi 20 anni. Tali sistemi possono attrarre anche tutti quei paesi interessati alla produzione di materiali fissili con strumenti diversi dai reattori. È il caso, per esempio, dei paesi poveri di uranio o relativamente ricchi di torio. È interessante notare però che anche paesi come la Repubblica Federale Tedesca e la Svizzera sono interessati a questi sistemi. Molti acceleratori a bassa o ad alta energia sono in attività o in costruzione nel mondo. La tabella 2 mostra la distribuzione per paese dei più potenti acceleratori ad alta energia.

La tabella 3 classifica gli acceleratori circolari in funzione o in costruzione nel Terzo Mondo. Di recente la Cina si è impegnata in un vastissimo programma di fisica delle alte energie e di costruzione di acceleratori. Inoltre, dopo una conferenza nazionale tenuta a Bombay nell'ottobre 1979, è probabile che anche l'India sviluppi la tecnologia degli acceleratori con particolare interesse verso la costruzione di un'intensa fonte di neutroni di spallazione.

Applicazione degli acceleratori alle armi nucleari

Un'altra importante conseguenza del notevole sviluppo della tecnologia degli acceleratori di particelle è la possibilità che essi forniscono di studiare in laboratorio gli effetti della radiazione delle armi nucleari. Questi effetti includono quelli del cosiddetto impulso elettromagnetico, dei raggi X e gamma, e quello dei neutroni emessi durante l'esplosione.

Per simulare in laboratorio l'intenso impulso di radiazioni elettromagnetiche (raggi X e gamma) prodotte da un'esplosione nucleare, sono stati costruiti enormi acceleratori di elettroni che generano bassa energia (da 1 a 14 MeV), ma brevi impulsi (da 25 a 100 ns) di elettroni ad altissima intensità (da 0,1 a 1,6 MA). La tabella 5 dà alcuni esempi di questi acceleratori in funzione o in costruzione negli USA e nell'URSS.

Il metodo classico per generare impulsi brevi e intensi di neutroni è fornito dai cosiddetti «reattori impulsati» (o «reattori a fascio»). Questi reattori sono costituiti da assiemi supercritici, irradiati a intermittenza da acceleratori di elettroni, che producono per brevi istanti altissimi flussi di neutroni. Attualmente potrebbero essere prodotti impulsi più brevi e più intensi attraverso acceleratori ad alta energia accoppiati ad anelli di accumulazione. Questi anelli di accumulazione rendono possibile accumulare un gran numero di protoni e lanciarli poi in un unico breve impulso contro un bersaglio di spallazione. Un anello di accumulazione di

questo tipo è in costruzione a Los Alamos negli USA nell'impianto destinato agli studi sui neutroni per scopi bellici (WNR). La costruzione di un anello di accumulazione di questo stesso tipo è stata proposta come fonte di neutroni di spallazione in un progetto messo a punto nella Repubblica Federale Tedesca.

Le sorgenti impulsate di neutroni che usano acceleratori sono particolarmente interessanti perché lo spettro dei neutroni di spallazione è molto simile a quello prodotto dall'esplosione di una bomba atomica; questi impianti forniscono un tale spettro con un livello relativamente basso di raggi gamma. Al contrario gli acceleratori di elettroni forniscono raggi X e gamma assai intensi con un trascurabile sfondo di neutroni.

Un settore particolare in cui le fonti di neutroni di spallazione ad alta intensità possono avere un maggior impatto è lo studio dei materiali per scopi militari. Diverranno realizzabili molti esperimenti condotti solo su piccoli campioni (per esempio per difficoltà di reperire i materiali) e che richiedono alti flussi. Per esempio sarà possibile studiare materiali ceramici a base di ossidi o di nitrucci a pressione superiore a 100.000 bar usando tecniche di diffrazione di neutroni. Un altro esempio è lo studio delle proprietà e del comportamento dei materiali sotto gli effetti di un irraggiamento impulsato esterno, per esempio eccitazione laser, tensione elettrica, campi magnetici o elettrici. La diffusione anelastica fornirà un metodo unico per lo studio delle caratteristiche delle leghe dei metalli di transizione e dei processi dinamici che sopravvengono all'interno di una materia condensata su scala microscopica. Infine le sorgenti di neutroni di spallazione saranno utili specialmente per gli studi sugli effetti delle radiazioni dei neutroni a causa del loro basso fondo di raggi gamma e della possibilità di variare lo spettro di energia dei neutroni emessi cambiando il materiale che serve da bersaglio. L'implicazione della tecnologia degli acceleratori sulla proliferazione verticale e l'eventuale necessità di un nuovo Trattato di non proliferazione allargato (CTBT) sono espresse chiaramente da R.R. Fullwood in riferimento agli impianti del WNR. «Il futuro sviluppo di armi nucleari sofisticate richiederà una migliore conoscenza dei neutroni e dell'idrodinamica. A proposito degli effetti delle armi sarà necessaria la conoscenza dell'operatività del sistema in ambiente con intense radiazioni, ma sarà necessaria anche la comprensione dettagliata dei fenomeni coinvolti per

poter eseguire i calcoli. Questi fatti, associati a possibili restrizioni sulle esplosioni nucleari sperimentali, puntano a ricerche di laboratorio basate sugli acceleratori.

Fusione termonucleare e reattori ibridi

Due importanti progetti sono in via di sviluppo per la costruzione di reattori per la fusione termonucleare controllata. Il primo è costituito dai sistemi «di fusione a confinamento magnetico», in cui una miscela ionizzata (cioè un plasma) di trizio-deuterio è confinata da campi magnetici e portata ad altissime temperature per innescare la reazione termonucleare. Il secondo è costituito dai sistemi «di fusione a confinamento inerziale» in cui i nuclei di trizio e deuterio (bombe al micro-idrogeno) sono compressi e scaldati da fasci laser o da fasci di particelle accelerate (elettroni, protoni o ioni) per innescare la reazione di fusione. Quest'ultima tecnica è spesso chiamata «fusione di micro-esplosione».

Una delle caratteristiche della fusione del deuterio-trizio è che la maggior parte dell'energia di reazione è portata via dai neutroni prodotti nella reazione. Se il serbatoio del reattore di fusione è circondato da un mantello di uranio, l'energia dei neutroni di fusione (14 MeV) è sufficiente a indurre una fissione veloce nell'uranio. Questa fissione aumenterà in modo considerevole l'energia totale prodotta e moltiplicherà nello stesso tempo il numero dei neutroni. Questo principio è usato nei cosiddetti reattori ibridi di «fusione-fissione». Questi ibridi combinano le reazioni di fusione ad arricchimento di neutroni con le reazioni di fissione ad arricchimento di energia. Un reattore ibrido con minima energia termica e una produzione massima di neutroni per trasformare i materiali fertili in materiali fissili, potrebbe essere costruito coprendo la parete interna del reattore con uno strato di berillio in cui i neutroni sono moltiplicati dalla reazione (n,2n). Un tale sistema è conosciuto come «mantello a fissione soppressa». Usando questo principio, gli ibridi sono tra i sistemi più efficienti per la produzione di materiale fissile (come sostiene J.D. Lee, in *Tandem mirror fusion-fission hybrid studies*, relazione presentata alla II Conferenza «Emerging Nuclear Energy Systems», Losanna 1980).

I sistemi considerati sopra sono estremamente sofisticati dal punto di vista tecnologico ed è probabile che il loro uso, per un certo periodo di tempo,

sarà limitato ai paesi tecnologicamente più avanzati. Ci sono tuttavia altri metodi che richiedono una tecnologia meno sofisticata. Per esempio, di recente per produrre plutonio è stata suggerita la tecnica della «focalizzazione a plasma denso».

La stretta connessione tra le applicazioni civili e militari della fusione (specialmente della fusione a confinamento inerziale) è ora ben riconosciuta. In questo campo negli USA (come testimonia D. Dickson, *Military in clash over US nuclear fusion research*, in «Nature», 281, 1979) una larga parte della ricerca è finanziata dai programmi militari e la Francia ha recentemente trasferito tutta la sua ricerca di confinamento inerziale sotto l'egida del Ministero della difesa.

Le applicazioni militari della fusione sembrano fornire un'importante giustificazione per l'entità degli investimenti, dal momento che la possibilità di produrre, un giorno, energia direttamente da un reattore di fusione puro attualmente sembra assai remota.

Secondo Edward Teller, «è poco probabile che un reattore di fusione a confinamento magnetico possa essere costruito in questo secolo, così come, allo stesso modo, sono, estremamente remote, le possibilità di un reattore di fusione a confinamento inerziale. D'altra parte, nel giro di 10 anni, potrebbe essere costruito un ibrido a fusione-fissione con confinamento magnetico e potrebbe essere così realizzata una fonte alternativa di energia».

È abbastanza probabile che i reattori ibridi possano porre un problema di proliferazione orizzontale. In particolare, tali congegni potrebbero produrre annualmente da 1.000 a 10.000 kg di

materiali fissili che potrebbero quindi entrare nel mercato commerciale. Inoltre, come gli altri reattori a fusione, gli ibridi produrranno trizio in grande quantità (da 10 a 100 kg all'anno) e più efficacemente dei reattori specializzati comunemente usati. Infine il plutonio prodotto dagli ibridi sarà utilizzabile per gli armamenti, così che, secondo A.W. Maschke, «è virtualmente sicuro che la prima applicazione di un apparecchio a fusione che abbia successo sarà la produzione di materiali per armi nucleari». Inoltre, «data la necessità di mantenere la segretezza sulla produzione di trizio, e tenendo conto del fatto che non possiamo produrre elettricità di 'pura fusione' più a buon mercato di quella ottenuta per fissione nucleare, le opzioni per la fusione sono piuttosto limitate. La prima scelta sicura sarebbe quella di produrre materiali per le armi nucleari».

Fusione a confinamento inerziale e armi nucleari

Come nel caso degli acceleratori, la fusione sarà inizialmente applicata a scopi militari. Anche prima della costruzione di un reattore ibrido, la fusione a confinamento inerziale verrà ampiamente usata per sviluppare nuove armi nucleari e per studiare i loro effetti. Parlando del laser «Nova» che è attualmente in costruzione negli USA per la fusione a confinamento inerziale, Melvin Price (presidente del Comitato per i servizi bellici della Casa Bianca) ha recentemente dichiarato: «Ci sono tutte le ragioni per credere che la Nova fornirà flussi di neutroni che possono essere usati per gli esperimenti su armi nuclea-



Tab. 6 *Caratteristiche di alcuni apparecchi di fusione a confinamento inerziale*

Risorsa	Paese	Tipo e numero del fascio		Energia (kJ)	Durata impulsi (ns)	Potenza (TW)	Inizio attività
Nova	USA	40	Laser-Nd	200	<1	250	(1983)
Antares	USA	72	Laser-CO ₂	100	<1	100	(1983)
Shiva	USA	20	Laser-Nd	10	<1	25	1978
Helios	USA	8	Laser-CO ₂	10	<1	10	1978
Delfin	URSS	216	Laser-Nd	10	<1	10	
Lekko X	Giappone	10	Laser-CO ₂	10	<1	10	
Gekko XII	Giappone	12	Laser-Nd	10	<1	10	
Octal	Francia	8	Laser-Nd	1	<1	2	1978
CLF	Inghilterra	2	Laser-Nd	0,1	<1	0,1	1978
<hr/>							
Proto II	USA	12	Elettroni	100	24	8	1977
EBFA	USA	36	Elettroni	500	40	40	(1983)
Angara - 5	URSS	48	Elettroni	5000	50	100	(1984)
<hr/>							
PBFA I	USA	36	Protoni	1000	30	30	(1981)
PBFA II	USA	72	Protoni	3500	30	100	(1986)
<hr/>							
Hide (LBL)	USA	20	U ⁴⁺ ioni	4000	40	100	

ri in laboratorio. Di più, la «Nova» è il primo candidato a raggiungere una reale combustione termonucleare, il che permetterà di realizzare in laboratorio esperimenti sugli effetti simulati delle armi nucleari».

Nell'area della ricerca fisica sulle armi, la fusione a confinamento inerziale può essere usata per studiare equazioni di stato a densità di elevata energia, dinamica delle implosioni, fenomeni di esplosione al di fuori dell'atmosfera. Da questi studi ci si può aspettare una miglior comprensione dell'accensione termonucleare e della fisica delle esplosioni. Infatti oggi l'unico modo possibile per studiare questi meccanismi è fornito dalle esplosioni nucleari sotterranee che forniscono, sotto forma di raggi X, un impulso sufficientemente breve e intenso per comprimere e accendere il materiale di fusione. Una conseguenza possibile della ricerca sul confinamento inerziale potrebbe essere un'ulteriore miniaturizzazione delle bombe H e N. Nell'area della simulazione degli effetti delle armi, la tecnologia e gli impianti a confinamento inerziale hanno applicazioni dirette a breve, medio e lungo termine. A breve termine esistono possibilità di simulare brevi impulsi di raggi X per provare gli effetti su componenti elettronici. A medio termine, si possono studiare esposizioni di componenti a neutroni di alte energie ed esposizioni a raggi X prodotti da radiazioni di frenamento (bremsstrahlung). A lungo termine se si otterranno notevoli guadagni di intensità saranno possibili esposizioni di interi veicoli di

rientro. I sistemi a confinamento inerziale stanno per affiancare gli impianti di accelerazione e gli anelli di accumulazione come fonti di intensi impulsi di neutroni termonucleari. Lo scopo globale della simulazione degli effetti delle armi nucleari è di aumentare il potere delle armi e dei sistemi di comunicazione per sopravvivere alle conseguenze di una guerra nucleare.

La tabella 6 elenca alcuni impianti di fusione a confinamento inerziale in costruzione o in progetto. Tra essi i più perfezionati sono quelli che usano laser o fasci di elettroni. È interessante notare che gli acceleratori di elettroni ad alta intensità ora usati nei sistemi di fusione vennero inizialmente sviluppati per studiare gli effetti delle armi nucleari; ma la giustificazione per costruire acceleratori ad alta intensità e di protoni o di ioni pesanti resta ancora la ricerca fisica di base. Molti paesi, compresa la maggior parte di quelli industrializzati, stanno lavorando attivamente nel settore della fisica dei plasmi e della fusione termonucleare. Questo tipo di ricerche condurrà inevitabilmente a una crescente proliferazione della conoscenza della fisica della bomba all'idrogeno. In particolare, i meccanismi di compressione e di accensione di microbombe all'idrogeno in sistemi a confinamento inerziale sono simili a quelli usati per le bombe all'idrogeno e al neutrone. La possibilità di studiare questi meccanismi in laboratorio offre alle potenze europee l'opportunità di raggiungere un notevole livello di conoscenze in questo campo.

Conclusioni

A causa del notevole progresso tecnologico raggiunto negli ultimi anni, gli acceleratori di particelle e le apparecchiature per la fusione termonucleare stanno per avere un'importanza crescente nella proliferazione delle armi nucleari.

– Probabilmente in un decennio circa, gli impianti che fanno uso di reattori ibridi di fusione o di reattori autofertilizzanti ad acceleratore possono iniziare a produrre materiali fissili (plutonio, uranio-233) o di fusione (trizio) in quantità molto abbondanti.

– In un breve periodo di tempo, la costruzione di nuovi grandi acceleratori e di impianti di fusione a confinamento inerziale faciliteranno lo sviluppo di nuove armi nucleari, rendendo possibile compiere in laboratorio molti esperimenti oggi eseguibili solo con esplosioni nucleari sotterranee.

– Per finire, l'allargarsi della ricerca sulla fusione termonucleare contribuirà sempre di più alla divulgazione della conoscenza della fisica dell'arma termonucleare.

Le implicazioni di queste nuove tecnologie dovrebbero essere attentamente valutate in riferimento al Trattato di non-proliferazione (NPT) e all'eventuale suo allargamento (CTBT).

Il dibattito corrente sui rischi della proliferazione delle armi nucleari è centrato sui problemi della produzione di energia nucleare dai reattori di fissione. Questo dibattito dovrebbe essere ancora esteso alle nuove tecnologie nucleari, comprese quelle che possono non essere ancora economicamente convenienti ma che possono venire usate per rigenerare materiali fissili o per studiare la fisica delle armi nucleari: un'estensione delle misure internazionali di salvaguardia agli acceleratori di particelle e alla tecnologia di fusione dovrebbe dunque essere riconosciuto come un importante argomento di studio.

Traduzione dall'inglese di Luciana Meazza. L'autore desidera ringraziare il Dott. Bhupendra Jasani, ricercatore del SIPRI di Stoccolma, per le molte stimolanti discussioni e per la lettura del manoscritto.

L'articolo è stato presentato alla *Seconda Conferenza Internazionale sulla proliferazione dei Sistemi di Energia Nucleare*, Losanna, Svizzera, Aprile 1980. Pubblicato su «Atomkernenergie/Kerntechink», 36, 1980.

numero 850
 ottobre 1982
 volume LXXXV
 lire 2.500
 spediz. in abbonamento
 postale gruppo III, 70%

sapere

Nuova serie fondata da Giulio A. Maccacaro

Collettivo di redazione:

Laura Balbo, Maria Beltrami, Luciano Benedetti (redattore), Franco Berrino, Rossella Bertolazzi (redattore), Virginio Bettini, Sergio Bologna, Daniela Bonioli (segreteria), Giampiero Borella, Romano Canosa, Franco Carnevale, Carlo Casti, Francesco Ceratti, Giovanni Cesareo (caporedattore), Marcello Cini, Laura Conti, Angelo Cova, Giuseppe De Luca, Walter Ganapini, Agostino Lepori, Ugo Lucca (redattore), Paola M. Manacorda, Luigi Mara, Gianni Moriani, Giorgio Negri, Massimo Pinchera, Augusto Righi, Benedetto Saraceno, Vladimiro Scatturin, Max Stucchi, Enrico Testa, Gianni Tognoni, Renato Valota, Emanuele Vinassa de Regny, Adelino Zanini.

Inoltre collaborano alla impostazione di questa rivista:

Giovanni Abrami, Mario Agostinelli, Angelo Baracca, Giorgio Bert, Giorgio Bignami, Floriano Calvino, Luigi Cancrini, Francesco Ciafaloni, Cesare Cislighi, Franco D'Andrea, Angelo Dina, Giorgio Duca, Aldo Fabiani, Vittorio Fagone, Enrico Falqui, Guido Fiegna, Marina Frontali, Sancia Gaetani, Massimo Gaglio, Gianfranco Ghiara, Valerio Giardini, Paolo Glorioso, Giovanni Jervis, Felice Laudadio, Giuseppe Lotaccono, Thomas Maldonado, Alberto Martinelli, Bruno Mazza, Raffaello Misiti, Stefano Mistura, Leo Nahon, Franca Ongaro, Franco Ottolenghi, Dario Paccino, Erminio Raiteri, Giovanni Rapelli, Dario Romano, Renato Rozzi, Ezio Tabacco, Benedetto Terracini, Hrayr Terzian, Ettore Tibaldi, Enzo Tiezzi, Renzo Tomatis, Michele Zappella.

Associato all'USPI
 Unione Stampa
 Periodica Italiana



TACCUINO		
Tema del mese	Seveso ultimo atto? (di F. Berrino)	2
	Emarginazione e informazione	3
	Sui predatori della laguna	3
	Risposta alla lettera del prof. Marchi	3
	Alchimia ieri e oggi	4
	Spazio di parola	5
RICERCA SCIENTIFICA E TECNOLOGIE MILITARI		
Angelo Baracca	La bomba: figlia naturale della scienza	5
A. Gsponer	Gli acceleratori e l'atomica	9
CONTRIBUTI		
Paolo Vineis	Due tendenze per la prevenzione	15
Tito Toniatti	Teoremi e tecnoremi	22
Romano Canosa	Le grandi carestie	34
Gioacchino Lavanco	Sicilia: l'economia del deserto	45
ESPERIENZE		
Alberto Donzelli	Un questionario per valutare il rischio di cancro al seno	53
LETTURE		
Franco Carnevale	Manuale di Sanità Pubblica (E. Buiatti, M. Geddes, G. Maiocco)	62
	La salute nei luoghi di lavoro. Manuale di prevenzione (AA.VV.)	62
	Medicina del Lavoro nelle Unità Sanitarie Locali (A. Martignani, S. Tonelli)	62
	Prevenzione nei luoghi di lavoro e potere locale (S. Beccastrini, R. Faillace)	62
	Ambiente di lavoro e riforma sanitaria, una sfida degli anni '80 (AA.VV.)	62

Direzione e Redazione: Galleria Strasburgo 3, telefoni: 795557, 790517, Milano 20122 • Direttore responsabile: Raimondo Coga • Amministrazione, abbonamenti e pubblicità: Edizioni Dedalo spa, cas. post. 362, Bari 70100, telefoni: 371555, 371025, 371008 • Abbonamento annuo 1982 lire 24.000. Estero lire 36.000. Versamenti sul conto corrente n. 11639705 intestato a edizioni Dedalo spa, casella postale 362, Bari 70100 • Registrazione: n. 372 del 3 ottobre 1969 del Tribunale di Bari • Stampa e composizione: Dedalo litostampa spa di Bari. Copyright edizioni Dedalo spa, Bari • Concessionaria per la diffusione nelle edicole: Parrini & C. s.r.l. aderente A.D.N. - Piazza Indipendenza 11/B, tel. 4992 - Roma 00185 / Via Termopili 6/8, tel. 2896471 - Milano.