

# Acceleratori di particelle nei futuri scenari energetici

G. Turchetti<sup>1</sup>

Dipartimento di Fisica Università di Bologna, INFN sezione di Bologna

16 February 2005

**Abstract.** Il problema energetico va considerato scala planetaria perché le scelte sulle fonti primarie condizionano l'intero ecosistema. Il risparmio e l'uso più esteso di fonti rinnovabili possono ridurre la dipendenza dalla importazione di combustibili fossili migliorando l'ambiente nel futuro prossimo. Difficilmente le grandi centrali termoelettriche potranno essere interamente sostituite con impianti a bassa concentrazione di energia tipici delle fonti rinnovabili. Il nucleare terrestre rappresenta una alternativa importante: oltre a reattori di terza e quarta generazione sono allo studio reattori sottocritici sostenuti da neutroni prodotti per spallazione da un fascio prodotto da un acceleratore (ADS). Uno scenario più remoto è quello della fusione magnetica od inerziale. Nella seconda ipotesi oltre a fasci lasers, possono essere utilizzati fasci di ioni pesanti. Molta ricerca è ancora necessaria ed il controllo delle instabilità nei fasci intensi dovute a fenomeni non lineari rappresenta un punto focale, su cui il gruppo di Fisica dei Sistemi Complessi della Università Bologna si è impegnato nell'ambito di collaborazioni con diversi laboratori europei.

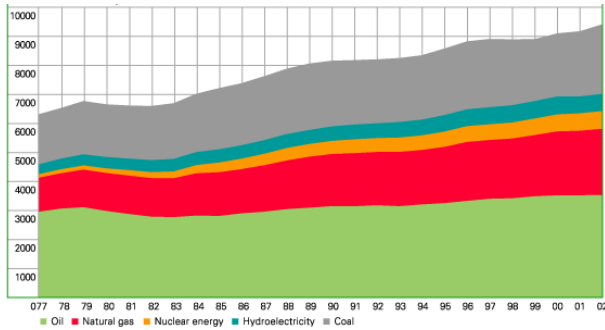
**PACS.** XX.XX.XX No PACS code given

## 1 Introduzione: energia e sviluppo

Le risorse energetiche hanno determinato e condizionato lo sviluppo della società umana, la cui storia può essere riletta attraverso l'avvicendamento delle diverse fonti. Il passaggio dal nomadismo dell'uomo raccoglitore agli insediamenti fissi delle prime società agricole è accompagnato da un notevole incremento della energia disponibile pro capite, dalle 2000 Kcal corrispondenti al minimo necessario per la sussistenza a valori due o tre volte maggiori che comprendono una migliore e più stabile alimentazione, mezzi di trasporto a trazione animale e l'uso di combustibili vegetali. L'aumento del consumo energetico pro capite è una misura del miglioramento delle condizioni di vita e consente di ritagliare margini dedicati al lavoro creativo anziché produttivo e mirato alla pura sussistenza. Negli ultimi due secoli si assiste ad un progressivo aumento del consumo medio pro capite. Il consumo attuale è fortemente disomogeneo perché oltre la metà è da ascrivere ai paesi sviluppati del gruppo OCED, che hanno meno del 20% della popolazione mondiale. Una frazione consistente di questa è rimasta quindi ai consumi delle primitive società agricole. Usando il Tep (tonnellata di petrolio equivalente che vale  $\sim 10^7 KJ \sim$  oppure  $\sim 2.4 \times 10^6$  Kcal circa 3 volte il consumo alimentare annuo individuale) come unità di misura si trova che il consumo annuo globale è attualmente dell'ordine di  $10^{10}$  Gtep a fronte di una popolazione che supera i 6 miliardi di individui. Il consumo pro capite è sotto il Tep annuo in quasi tutti i paesi dell'emisfero meridionale mentre supera i 10 Tep negli USA e Canada.

La popolazione mondiale che ammontava a 2.5 miliardi nel 1950 è raddoppiata in 40 anni. Si stima che il successivo raddoppio avvenga entro la metà di questo secolo per stabilizzarsi attorno agli 11  $\sim$  12 miliardi alla fine. Le proiezioni sugli aumenti dei consumi hanno un grosso margine di incertezza e vanno da 15 – 25 Gtep a 20 – 45 Gtep a meta e a fine secolo rispettivamente [1]. Lo scenario che vede il maggior aumento prevede che i nuovi consumi siano concentrati nei paesi in via di sviluppo che potrebbero avvicinarsi a quelli attuali in Europa ove anche grazie al risparmio non dovrebbero verificarsi variazioni significative. I consumi italiani è verosimile che si mantengano allineati con quelli europei mentre ci si può domandare se la notevole disparità nelle fonti (significativa presenza delle fonti idro-termo ed assenza del nucleare) sia destinata a permanere o a ridursi. Nelle scelte di lungo periodo entrano in gioco il fattore economico e la compatibilità ambientale. La energia attualmente consumata deriva in buona parte dai combustibili fossili che rappresentano circa il 63% nella produzione di energia elettrica insieme al 11% del nucleare. I rinnovabili contribuiscono al rimanente: idrico 24%, biomasse ed eolico 2% [2].

Nella analisi delle fonti, in una prospettiva di lungo periodo, gli effetti della CO<sub>2</sub> emessa in tutti i processi in cui intervengono i combustibili fossili sono quelli più rilevanti. Attualmente la concentrazione di CO<sub>2</sub> è di circa il 30% superiore a quella della meta del XIX secolo (270 ppm). Per non superare un fattore 2 di incremento entro il 2050 si stima che l'incremento nei consumi energetici dovrebbe essere raggiunto con fonti libere da emissioni di CO<sub>2</sub>. Indipendentemente dalle risorse disponibili di fossili



**Fig. 1.** Grid for a 2D charge distribution, with a polygonal approximation to the boundary (left). Conjugate lattice (dashed lines) for the computation of the density at the grid points (right)

un utilizzo superiore al livello attuale pone un serissimo problema di compatibilità ambientale. Infatti l'aumento di temperatura dovuto all'effetto serra derivante da un raddoppio della concentrazione di CO<sub>2</sub> rispetto a quello dell'inizio dell'era industriale viene stimato tra 1.5 e 4 gradi con conseguenze climatiche decisamente importanti. Considerando le riserve note e sfruttabili ai costi attuali la disponibilità dei fossili è stimabile in un secolo, il nucleare (uranio+torio) quasi un millennio completando il ciclo con reattori veloci o sistemi ADS. Tra la seconda metà del secolo presente e l'inizio del successivo si può prevedere la realizzazione di reattori a fusione termonucleare, impianti fotovoltaici di grande estensione nello spazio e la produzione di idrogeno tramite biosistemi ingenerizzati. Al momento attuale i rinnovabili presentano ancora problemi di di compatibilità ambientale nel caso di grandi impianti.

## 2 Nucleare: solare e terrestre

L'alternativa ai combustibili fossili viene dal nucleare remoto ossia dall'energia solare, abbondante ma poco concentrata e dal nucleare terrestre. La costante solare cioè il flusso di energia solare sulla terra è di 1 kW/m<sup>2</sup>. Per quanto riguarda invece l'energia nucleare la sua forte concentrazione rispetto a quella chimica deriva dal rapporto tra l'energia di legame chimico che è dell'ordine dell'eV e quella nucleare che dell'ordine del MeV e quindi esiste un rapporto 10<sup>6</sup>. Così mentre per alimentare una centrale termica da 1 GW occorrono circa 100 Kg di carbone per una nucleare occorrono circa 5 g di Uranio che scenderebbero a 0.1 in un reattore veloce (in un reattore a fusione esploderebbero 10 microcapsule al secondo di pochi mg di DT). La compattezza, una volta che tecnologie più avanzate consentissero di ridurre le dimensioni del reattore rappresenta un un vatangio importante per la compatibilità ambientale. Una centrale solare da 1 Gw occuperebbe molte decine di Km<sup>2</sup>, vedi ad esempio la centrale Solar Two in California [3], che produce

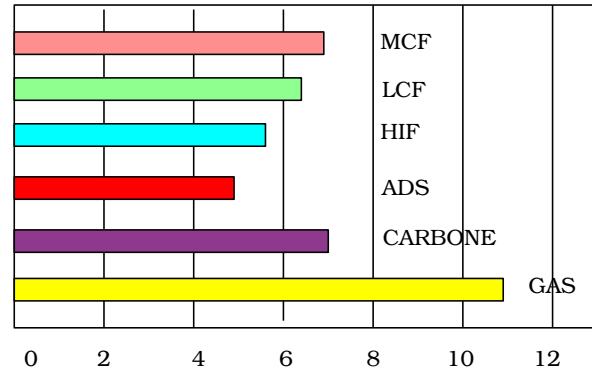
10 MW e si estende su un'area di quasi 1 Km<sup>2</sup>. Questo significa che per coprire il fabbisogno mondiale la superficie occupata sarebbe pari a quella dell'Italia ossia circa un decimo delle aree desertiche del pianeta. Considerando un aumento di un fattore 4 del fabbisogno energetico a fine secolo sopperire all'intero fabbisogno con centrali solari vorrebbe dire coprire con centrali termiche quasi la metà di queste aree con un impatto ambientale enorme per non parlare della scarsa realizzabilità tecnologica. Non intendo soffermarmi sulle tecnologie legate alle fonti rinnovabili che sicuramente possono dare contributi significativi attraverso installazioni e centrali di piccole potenza, né sul risparmio energetico, che in settori come l'edilizia e i trasporti, può dare risultati importanti a breve termine e nel nostro paese in particolare. Intendo invece discutere alcuni scenari che riguardano il lungo periodo e che sono legati alla ricerca scientifica con prospettive di implementazione industriale nella seconda metà del secolo. La produzione di idrogeno tramite batterie è all'orizzonte [4,5], anche se molti sono i problemi aperti, dalla produzione associata di CO<sub>2</sub> all'ingombro degli impianti, almeno fino a quando nuovi progressi nelle biotecnologie non consentiranno di ridurre l'impatto Il solare fotovoltaico nello spazio richiederà lo sviluppo di semiconduttori in film sottili e progressi significativi delle infrastrutture e capacità operative nello spazio. Tralasciando questi prospettive per le fonti rinnovabili a basso impatto ambientale, prenderò in esame le prospettive del nucleare avanzato e sicuro. Per quanto riguarda la fissione oltre ai diversi progetti di reattori intrinsecamente sicuri (vedi progetto MARS di reattore ad acqua leggera sviluppato dalla Università di Roma [6]) vogliamo segnalare una nuova linea che prevede l'utilizzo di una sorgente esterna di neutroni per mantenere i processi di fissione.

## 3 Nucleare sicuro da fissione e fusione

Questi progetti sono stati inizialmente sviluppati a Los Alamos e prevedono l'utilizzo di un acceleratore lineare per produrre un fascio intenso di protoni da cui ottenere un per spallazione un fascio secondario di neutroni da utilizzarsi per trasmutazione di scorie radioattive (plutonio e attinidi) con produzione di energia. Al CERN sono stati condotti esperimenti per verificare il guadagno energetico ottenuto dalla fissione del Torio [7,8] (Energy Amplifier). Altri gruppi negli USA, (Los Alamos, Brookhaven), UE, Giappone e Russia lavorano su progetti di trasmutazione di scorie (ADS) e di produzione di energia da fissione di uranio, torio, plutonio indotta da macchine acceleratrici. In Italia è stato sviluppato un progetto congiunto ENEA-IFN per la costruzione di un Linac destinato alla trasmutazione di scorie. Questo progetto, denominato TRASCO [9], rientra nella classe ADS [10] ed ha condotto al disegno della macchina acceleratrice, alla costruzione della sua prima sezione ed alla definizione delle caratteristiche del reattore. Gli studi di dinamica per il linac sono stati sviluppati dal gruppo di LNL in collaborazione con il

gruppo di Bologna, come specificato nel paragrafo successivo. Progetti ADS sono attualmente sviluppati nell'ambito di reti europee. L'altro fronte in cui gli acceleratori potranno essere utilizzati è la fusione inerziale indotta da fasci di ioni pesanti HIF (heavy ion fusion). Diversi laboratori sono impegnati in questi studi iniziati alla fine degli anni 50 e sviluppatisi a partire dagli anni 70 con la proposta di usare i lasers per provocare l'implosione di capsule di deuterio trizio [11]. Gli studi sulla ignizione di una capsula di deuterio trizio, inizialmente coperti da segreto militare, sono ora sviluppati nell'ambito di due grandi progetti NIF (National Ignition Facility) a Livermore [12] e Laser Megajoule [13] a Bordeaux, che dovrebbero condurre a determinare l'equazione di stato per la fase di compressione ed la fisica del processo di ignizione. In questi impianti 192 e 240 fasci laser rispettivamente concentrano una energia di 1.8 MJ con impulso delle durata di qualche nanosecondo. I dati che saranno ottenuti in questi esperimenti sono di primaria importanza per determinare le caratteristiche sia dei lasers sia del fascio di ioni pesanti, da utilizzarsi per un futuro impianto destinato alla produzione di energia [14]. Al momento attuale gli studi relativi ad una reattore per fusione inerziale sono piuttosto avanzati e le tecniche di usate per la realizzazione capsule DT consentono già la progettazione di impianti della dimensione richiesta da una centrale ove il costo unitario sia economicamente accettabile. I lasers non hanno ancora le caratteristiche idonee per un impianto industriale soprattutto perché la frequenza con cui l'impulso può essere ripetuto è molto bassa ( $10^{-3}$  Hz a fronte dei 10 Hz richiesti da una centrale ove l'energia prodotta dalla implosione di una microcapsula è equivalente a quella prodotta da circa 10 Kg di combustibile fossile in una centrale termoelettrica da 1 Gw). Recentemente sono stati realizzati nuovi lasers con impulsi di frequenza decisamente più elevata aprendo prospettive concrete per la realizzazione di un impianto ICF. Tuttavia al momento attuale solo gli acceleratori di particelle sono in grado di raggiungere frequenze di 10 Hz o maggiori come quelle previste per una centrale ICF. Il problema principale è quello di realizzare un acceleratore che produca un fascio di alcuni MJ che possa essere concentrato in modo isotropo su una bersaglio di pochi mm in un intervallo temporale di qualche ns. I requisiti sono di gran lunga più severi rispetto a quelli richiesti dagli acceleratori per processi di fissione (ADS) e richiedono un fase di sviluppo molto più lunga vale a dire almeno un paio di generazioni di prototipi prima di passare ad un dimostrativo [15]. Gli schemi proposti si basano su linacs ad induzione (USA) e su lincs + anelli di accumulazione (schema concettuale europeo HIDIH) [16], mentre l'illuminazione del bersaglio è indiretta, vale a dire la capsula di deuterio trizio si trova entro un contenitore ad alto numero atomico, che converte l'energia del fascio di ioni incidenti in radiazione elettromagnetica (raggi x) aumentando l'isotropia di deposizione. Per una illustrazione schematica vedi [17].

Al momento attuale si stanno studiando i drivers per HIF tramite simulazioni nel Virtual National Laboratory ed attraverso esperimenti di piccola scala, che precedono un esperimento integrato (IRE), ultimo passo prima di una



**Fig. 2.** Confronto tra il costo stimato del KWh in centesimi di dollaro per ipotetici impianti a fusione magnetica MCF a fusione inerziale con lasers LCF con ioni pesanti HIF con impianti avanzati a fissione ADS, con centrali termoelettriche a carbone ed a gas.

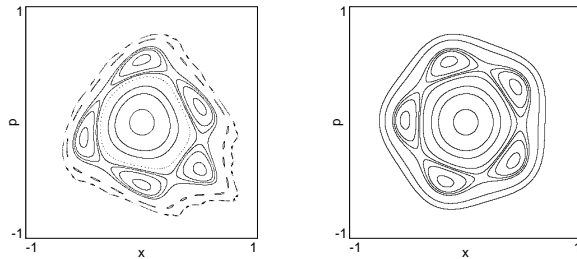
realizzazione che dimostrati la fattibilità di un impianto commerciale. Le difficoltà che si incontrano nel progettare un linac per ADS ed un driver per HIF sono della stessa natura e legate alla qualità del fascio in presenza di errori multipolari nei dipoli degli anelli di accumulazione e di forte carica spaziale. Nel caso della HIF si ha anche una componente molto critica che è la collimazione finale del fascio sul bersaglio che pone problemi mai affrontate in precedenza. Alcune di queste problematiche si incontrano e vengono affrontate nell'ambito di progetti di acceleratori ad alta intensità come quelli esistenti ed in fase di progetto (SIS 100 e SIS 300) al GSI (Darmstadt). Nel prossimo paragrafo si illustrano alcune delle tematiche di dinamica non lineare che sono state sviluppate da gruppo di Bologna, in collaborazione CERN ed il GSI nell'ambito di reti europee. I progetti attuali riguardano SIS100, un anello di altissima intensità, destinato allo studio della materia in condizioni di altissima densità di energia, ma consentirà lo sviluppo di nuove conoscenze e alla realizzazione di nuovo hardware, entrambi necessari per lo sviluppo della HIF. Nella figura 2 mostriamo un confronto del tutto speculativo tra i costi presunti del Kilovattora prodotto da centrali termoelettriche e nucleari nelle diverse articolazioni. Naturalmente questi dati, ottenuti facendo una media dei valori presunti per progetti diversi (fonte LLNL) sono condizionati alla alla soluzione di molti problemi tecnici e scientifici. Non è valutato il costo dei relativi impatti ambientali. Tenendo conto però che le scorie di impianti IFE sono a basso livello di radioattività tanto da poter essere sepolte in loco dopo dismissione mentre il costo ambientale da immissione di CO<sub>2</sub> è certamente molto alto, la competitività dal punto di vista economico è anche più elevata rispetto ai valori indicati nel grafico di figura [2] ottenuto mediando i dati indicati in [17].

## 4 Acceleratori e la dinamica non lineare

Gli acceleratori sono stati costruiti per lo studio della struttura dei costituenti elementari della materia ed anche oggi è questo lo scopo primario. Il potere risolutivo cresce con l'energia della particelle accelerate. Gli acceleratori di altissima energia come LHC del CERN sono costruiti con magneti superconduttori, che hanno delle nonlinearità di campo ineliminabili (errori multipolari) e richiedono una analisi accurata e metodi di compensazione per evitare che il fascio si perda raggiungendo una zona instabile nello spazio delle fasi. Ad energia molto elevata le particelle praticamente non interagiscono perché la repulsione Coulombiana è quasi interamente compensata dalla attrazione magnetica. Pertanto se abbiamo un fascio di particelle che si muovono nella direzione  $z$  con velocità  $v$  se  $Q$  è la carica per unità di lunghezza, la forza che il fascio esercita su una singola particella è la repulsione coulombiana più la forza di Lorenz di un filo percorso da corrente. Se  $x, y$  sono le coordinate della carica nel piano ortogonale ove l'origine è individuata dalla intersezione con l'asse del fascio e se immaginiamo il fascio costituito da  $N$  fili paralleli di carica  $q = Q/N$  per unità di lunghezza, la forza che si esercita su uno di questi è

$$\mathbf{F} = qQ \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) \nabla V(x, y) \quad (1)$$

dove  $V$  è il potenziale Coulombiano generato dalla distribuzione di carica normalizzata (nota che  $Q$  è fattorizzato). Ad altissima energia il contributo è trascurabile poiché  $1 - v^2/c^2 \sim (mc^2/E)^2$ . Quindi ciascuna carica si muove in modo indipendente dalle altre. Uno dei problemi più rilevanti è la stabilità del fascio che deve compiere nell'anello oltre  $10^8$  giri. Questo richiede una analisi accurata di tutti gli effetti non lineari. Una carica resta in prossimità dell'orbita di riferimento sotto l'azione di lenti magnetiche quadrupolari, che esercitano forze lineari alternativamente attrattive e repulsive, lungo gli assi  $x, y$ . L'azione combinata su un giro è focalizzante. Scegliendo l'ascissa curvilinea  $s \simeq z = vt$  come variabile indipendente i momenti corrispondenti  $p_x, p_y$  rappresentano le deflessioni angolari. Le traiettorie descritte nei piani di fase  $x, p_x$  e  $y, p_y$  ad ogni passaggio attraverso una sezione di riferimento  $s = 0$  sono ellissi e gli avanzamenti di fase  $\omega_x, \omega_y$  sono costanti del moto invarianti per tutte le orbite. Mediante un cambiamento di canonico coordinate le orbite diventano circolari e le aree divise per  $\pi$ , dette emittanze  $\epsilon_x, \epsilon_y$ , non cambiano e sono una specifica della qualità del fascio. Nel caso di forze non lineari le orbite diventano instabili al di fuori di un intorno dell'origine, ove l'avanzamento di fase cambia e nuove strutture si manifestano. Tutti questi aspetti sono colti da un modello che abbiamo proposto e che descrive l'effetto di una nonlinearità concentrata, (sestupolo sottile) in un determinata sezione  $s = 0$  dell'anello. Per semplicità consideriamo le particelle sull'asse orizzontale (il cui moto è disaccoppiato da quello verticale). Alle coordinate  $(x, p_x)$  nel piano di



**Fig. 3.** Ritratto di fase della mappa di Hénon per  $\nu = 0.21$  (sinistra) ed orbite ottenute dall'integrale primo della forma normale risonante rispetto alla risonanza  $1/5$  (destra). Si noti il ripristino della simmetria esatta.

fase corrispondono, dopo un giro,  $(x', p'_x)$  ottenute applicando alle prime una trasformazione lineare  $L$  data da una matrice unimodulare con  $|\text{Tr } L| < 2$ , che risulta coniugata ad una rotazione  $L = WR(\omega_x)W^{-1}$ . La presenza del termine nonlineare dà luogo ad una applicazione  $M$ , che, dopo un cambiamento di coordinate definito da  $W^{-1}$  e da un riscalamento, diventa la mappa quadratica di Hénon

$$M = L \left( p_x + \frac{x}{2} K_2 x^2 \right) \longrightarrow \begin{pmatrix} x' \\ p'_x \end{pmatrix} = R(\omega) \begin{pmatrix} x \\ p_x + x^2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Questa mappa e la sua versione 4D per il moto di una particella con condizioni iniziali generiche consentono di analizzare il bordo del bacino di stabilità (apertura dinamica) che è di basilare importanza per definire delle condizioni di lavoro che evitino le perdite su lunghi intervalli di tempo. Un altro contributo significativo è stata l'estensione della teoria lineare, introdotta da Courant e Sneider, al caso non lineare. Il gruppo di Bologna ha proposto di usare la teoria delle forme normali di Birkhoff per le mappe simpletiche che definiscono l'applicazione su un giro per il moto trasverso (detto betatronico) di una particella [18]. Si tratta cioè di realizzare per via perturbativa una trasformazione non lineare  $\Phi$  che conduce ad un nuovo sistema di coordinate ove la mappa assume la forma integrabile  $U$ . Possiamo scrivere  $M = \Phi \circ U \circ \Phi^{-1}$ , dove  $U$  ha integrali primi espliciti. Dette  $(X, P_x)$  le coordinate normali, nel caso in cui  $\omega$  sia non risonante, ossia  $\nu = \omega/(2\pi)$  irrazionale, l'integrale primo è  $X^2 + P_x^2$  e quindi le traiettorie sono cerchi come accadeva nel caso lineare.

Quando  $\nu$  è però prossimo ad un razionale si costruisce una forma normale risonante il cui integrale primo  $H$  è quello di un pendolo e le traiettorie presentano delle isole come mostra la figura. Le tecniche qui delineate sono state usate per valutare gli effetti degli errori multipolari e le strategie di correzione in LHC. Al momento attuale vengono utilizzate per un progetto di estrazione risonante del fascio. Si tratta di catturare le particelle all'interno di un'isola variando la frequenza lineare per poi muoverle nuovamente verso l'esterno in modo da permettere il processo di estrazione [19]. L'uso delle forme normali iperboliche era stato proposto per l'analisi del processo di estrazione

classico basato sulla risonanza instabile 1/3 [20]. Sono anche stati sviluppati metodi numerici per determinarne le frequenze e gli invarianti del moto.

L'analisi in frequenza, proposta inizialmente da Laskar si basa su una analisi di Fourier di alta precisione, è stata estesa al calcolo delle azioni invarianti  $J_x = (2\pi)^{-1} \oint_{\Gamma_x} (p_x dx + p_y dy)$  e  $J_y$ , che sono definite sulle orbite non risonanti [21]. Le stime sui resti della serie perturbativa hanno consentito anche di ricavare una stima esponenziale per il tempo di stabilità in ottimo accordo con le simulazioni numeriche. I fasci di alta intensità e di energia medio-bassa come quelli da usarsi nei drivers ADS o HIF presentano tutte le problematiche alla carica spaziale, vale a dire alla interazione Coulombiana tra le particelle che non può più essere trascurata. La energia tipica di un fascio di protoni per ADS è dell'ordine del GeV, mentre le correnti sono dell'ordine delle decine di mA (vedi TRASCO fascio finale 30 mA da 1 GeV, sezione intermedia da 100 MeV). Una delle conseguenze principali della carica spaziale è che il fascio si gonfia ed ai bordi presenta un alone, che può raggiungere le pareti attive. Nel caso dei drivers HIF si aggiungono i problemi di stabilità negli anelli di accumulazione, ove vengono usati dipoli superconduttori. L'azione combinata della carica spaziale e degli errori multipolari è una problematica nuova, attualmente affrontata tramite sviluppi della teoria, simulazioni ed esperimenti dedicati, necessari già per la costruzione di anelli ad alta intensità come SIS100. La dinamica di un fascio intenso può essere affrontata a livello microscopico, tenendo conto delle interazioni tra tutte le particelle oppure attraverso una teoria di campo medio che assume una distribuzione continua della carica, tralasciandone la granularità. Quest'ultima tuttavia determina delle microl collisioni, assimilabili ad un processo stocastico e responsabile della evoluzione verso un equilibrio termodinamico. Questi effetti sono trascurabili nei linacs dove avviene un singolo transito ma possono essere rilevanti negli anelli di accumulazione. A titolo esemplificativo ci riferiamo alla teoria bidimensionale, assumendo una distribuzione continua di carica (coasting beam) e coerenza longitudinale. Le cariche puntiformi sono sostituite da fili di corrente e approssimando la focalizzazione periodica con una focalizzazione uniforme (smooth focusing) con lo stesso avanzamento di fase su un giro le equazioni del moto sono

$$\frac{d^2 x_i}{ds^2} + \omega_0^2 x_i = \frac{\xi}{N} \sum_{j \neq i}^N \frac{x_i - x_j}{r_{ij}^2} \quad \frac{d^2 y_i}{ds^2} + \omega_0^2 y_i = \frac{\xi}{N} \sum_{j \neq i}^N \frac{y_i - y_j}{r_{ij}^2}$$

Abbiamo scalato le lunghezze in modo che la cella focalizzante abbia unitaria ed abbiamo introdotto un parametro adimensionale  $\xi = 2qQ(mv^2)^{-1}$  dove  $q$  ed  $m$  sono la carica e massa di un filo per unità di lunghezza e la carica totale  $Q$  per unità di lunghezza è fissato dalla corrente circolante  $i = Qv$ . Il rapporto  $q/m$  non varia ed è uguale al rapporto  $e/m_p$  tra la massa e la carica dei protoni accelerati. Il numero  $N$  di fili può essere variato: nelle simulazioni  $N = 10^3 \sim 10^4$ , il valore fisico  $N = (Q/e)^{2/3} (\pi R^2)^{1/3}$  è dell'ordine di  $10^6$ , mentre la teoria di campo medio, in cui la distribuzione continua di

carica è continua, si ottiene per  $N \rightarrow \infty$ . Il modello è stato studiato numericamente su di una architettura parallela con algoritmi ottimizzati di complessità  $N \log N$  mostrando che il tempo di rilassamento alla distribuzione di equilibrio di Maxwell-Boltzmann cresce linearmente con  $N$  in accordo con la teoria cinetica di Landau, sviluppata nel caso bidimensionale [22]. La teoria di campo medio è definita dalle equazioni di Vlasov

$$\Delta V = -4\pi\rho_s \quad \rho_s(x, y) = \int \rho(x, p_x, y, p_y) dp_x dp_y$$

dove  $V$  è il potenziale elettrico di una carica unitaria con densità  $\rho_s$ , ottenuta integrando la densità nello spazio delle fasi che soddisfa l'equazione di Liouville

$$\frac{\partial \rho}{\partial s} + [\rho, H] = 0 \quad \int \rho dx dy dp_x dp_y = 1$$

Con  $H$  indichiamo l'hamiltoniana di un singolo filo soggetto al campo elettrico autoconsistente soluzione della equazione di Poisson. Questa equazione ammette soluzioni di equilibrio  $\rho = \rho(H)$  tra cui  $\rho = C\delta(H - E)$  che dà luogo ad una distribuzione uniforme in un cilindro di raggio  $R$  dove  $2E = \omega^2 R = \epsilon\omega$  e  $\omega^2 = \omega_0^2 - \xi R^{-2}$ . Se il raggio è diverso dal valore sopra indicato il fascio compie oscillazioni periodiche. La dinamica è piuttosto complessa per via dei moti collettivi del fascio, le oscillazioni trasverse di frequenza  $\omega$  e per la presenza di eventuali errori multipolari. Per studiarne l'effetto si è proposta una mappa che tiene conto anche della carica spaziale usando una approssimazione perturbativa all'avanzamento di fase  $\Omega$ . Nel caso di un singolo sestupolo per cella la mappa di Henon diventa

$$\begin{pmatrix} x' \\ p_x' \end{pmatrix} = R(\Omega(x^2 + p_x^2)) \begin{pmatrix} x \\ p_x + x^2 \end{pmatrix}$$

dove  $\Omega(0) = \omega$  e cresce in modo monotono fino al valore  $\omega_0$  per  $x^2 + p_x^2 \rightarrow \infty$  ed è valutabile in modo analitico [23]. Questo modello è comodo per calcolare sia l'apertura dinamica sia effetti adiabatici di lenta modulazione. Naturalmente valutazioni accurate sono ottenibili risolvendo numericamente le equazioni di Poisson-Vlasov o le equazioni del moto del modello microscopico. Il primo procedimento è sufficiente per un linac. Nel caso del progetto TRASCO i calcoli sul reticolo realistico sono stati sviluppati con un programma di integrazione numerica completamente tridimensionale [24], mentre con un modello semplificato di campo congelato è stato analizzato l'effetto delle risonanze tra il moto trasverso ed i moti collettivi nella formazione dell'alone [25]. L'apertura dinamica in presenza di carica spaziale e gli effetti collisionali in un anello sono stati analizzati in un contesto HIF mentre il modello semplificato sopra descritto verrà utilizzato nel contesto SIS100 che può essere considerato una tappa importante verso i drivers HIF.

## 5 Conclusioni

Da un confronto tra le varie fonti di energia, emerge che nel lungo periodo i fossili non sono proponibili per ragioni di compatibilità ambientale anche tralasciando ogni considerazione economica legata alla riduzione di disponibilità. Il rinnovabile avrà senz'altro uno sviluppo ma non è pensabile che possa sopprimere per intero alla domanda crescente, se non altro la estensione degli impianti, con cosanguenze ambientali molto rilevanti anche se dovessero essere collocati in aree desertiche. La produzione biotecnologica di idrogeno richiederà tempi lunghi prima di essere economicamente appetibile e ambientalmente accettabile. Il nucleare avrà probabilmente un ruolo rilevante. Nei prossimi decenni potrebbero essere realizzati impianti di terza generazione e forse di quarta per completare il ciclo del combustibile, previsto dai reattori veloci. Le prospettive ADS con reattori sottocritici per trasmutazione di scorie e/o l'utilizzo del torio sono buone, ma richiedono una mole ingente di ricerca e di investimenti. La risposta finale al problema energetiche dovrebbe venire dalla fusione. Resta da sapere come e quando. Certamente lo sfruttamento commerciale è prevedibile solo a fine secolo. La fisica è in buona parte capita anche se bisognerà aspettare un decennio per l'inerziale e fino al 2020 per la fusione magnetica con ITER. Anche se i lasers stanno facendo grandi progressi la ICF con fasci di ioni pesanti resta una prospettiva percorribile. La ricerca sulle macchine acceleratrici di alta intensità in questo scenario è una componente importante, che viene portata avanti in diversi laboratori, ma che si presta anche a sviluppi in ambito accademico, attraverso forme di collaborazione che hanno molti risvolti positivi, non ultimo quello della formazione avanzata. Attraverso queste collaborazioni il gruppo di Bologna ha fornito contributi significativi sul piano scientifico e della formazione.

## 6 Bibliografia

- [1] J. L. Pekins *The role of inertial fusion energy: the energy marketplace of the 21-th century and beyond* NIM **A45**, 44-60 (1998)
- [2] <http://www.energoclub.it>
- [3] *Solar Thermal Power* Renewable Energy World Jul-Aug 2002 184-192 Il documento può essere scaricato da <http://www.volker-quaschnig.de/downloads/rew2000.pdf>
- [4] Yoshiharu Miura et al *Stably sustained hydrogen production by biophotolysis in natural day/night cycle* Energy Conversion and Management **38**, S533-537 (1977) Reperibile in rete <http://www.sciencedirect.com/>
- [5] *Renewable energy systems by biological solar energy conversion* Ed. by Jun Miyake et al Elsevier 2004
- [6] M. Cumo *Nuovo nucleare: un possibile contributo italiano* Conferenza inaugurale Accademia dei Lincei Anno 1992. Versione aggiornata scaricabile da <http://www.accademiaxl.it/Biblioteca/Virtuale/Cumo.htm>
- [7] F. Carminati et al. *An energy amplifier for cleaner and inexhaustible nuclear energy production driven by a particle beam accelerator* CERN/93-47 (ET) (1993)
- [8] C. Rubbia et al *Conceptual design of a fast neutron operated high power energy amplifier* CERN/95/44 (1995). <http://www.nea.fr/html/trw/docs/saturne8/sat15.pdf>
- [9] <http://trasco.lnl.infn.it/basic.htm>  
<http://www.trade.enea.it>
- [10] <http://www.world-nuclear.org/info/inf35.htm>
- [11] H. Nucholls, L. Woods, A. Thiensen, G. B. Zimmermann *Laser compression of matter at super-high densities : thermonuclear (CTR) applications* Nature **239**, 139 (1972)
- [12] <http://www.llnl.gov/nif/>
- [13] <http://www-lmj.cea.fr/html/cea.htm>
- [14] J. Lindt *inertial confinement fusion* AIP Press, Springer Verlag New York (1998)
- [15] *Heavy Ions Fusion 2004*, Proceedings in stampa su NIM, vedi <http://nonneutral.pppl.gov/HIF04/program.php>
- [16] <http://www-aix.gsi.de/hidif/hifpage.html>
- [17] <http://www.llnl.gov/nif/library/ife.pdf>
- [18] A. Bazzani, E. Todesco, G. Turchetti, G. Servizi *A normal form approach to the theory of nonlinear betatronic motion* CERN Yellow Reports **94-02** (1994).
- [19] R. Capi, M. Giovannozzi *Multi turn extraction and injection by means of adiabatic capture in stable islands of phase space* Phys. Rev. ST Accel. Beams **7** 024001 (2003)
- [20] L. Bongini, A. Bazzani, G. Turchetti, I. Hofmann *Analysis of a model of resonant extraction of intense beams by normal forms and frequency map* Phys. Rev. ST - Accel. Beams **4**, 114201 (2001)
- [21] A. Bazzani, L. Bongini, G. Turchetti *Analysis of resonances in action space for symplectic maps* Phys. Rev. **E** **57**, 1178 (1998)
- [22] C. Benedetti, S. Rambaldi, G. Turchetti *Collisional effects and dynamic aperture in high intensity storage rings* HIF04 Conf. in stampa su Nuc. Instr. and Methods (2004).
- [23] C. Benedetti, G. Turchetti *An analytic map for space charge in a nonlinear lattice* submitted to P.R.L. (2005).
- [24] G. Turchetti, S. Rambaldi, A. Bazzani, M. Communian, A. Pisent *3D solutions of the Poisson-Vlasov equations for a charged plasma and particle core model in a line of FODO cells - European Journal of Physics* **C30**, 279-290 (2003)
- [25] M. Communian, A. Pisent, A. Bazzani, S. Rambaldi, G. Turchetti *Frequency map analysis of 3D particle in core model of a high intensity beam* Phys. Rev. ST - Accel. Beams **4**, 124201 (2001)