

Energia solare e tetti fotovoltaici

Giorgio Giacomelli, Gianni Mandrioli, Daniele Matteuzzi

Dipartimento di Fisica dell'Università di Bologna e INFN, Sezione di Bologna

Sommario

Dopo un'introduzione sull'energia solare, sono descritte le caratteristiche e le prestazioni del sistema fotovoltaico sperimentale installato sul tetto del Dipartimento di Fisica dell'Università di Bologna, nell'ambito del programma 10000 tetti fotovoltaici dell'ENEA. Il sistema, che ha un'efficienza globale dell'11%, ha funzionato con regolarità dall'inizio del 2001, producendo una quantità di energia sufficiente per una piccola famiglia.

1 Introduzione

L'energia elettrica è una forma intermedia di energia. Viene prodotta in centrali termoelettriche (dove si brucia olio combustibile, gas o carbone), in centrali idroelettriche ed elettronucleari; quantità più piccole sono prodotte dal vento e da pannelli solari fotovoltaici; in Italia vi sono anche le centrali geotermiche di Larderello.

L'energia elettrica non inquina ed è facile da trasportare attraverso reti elettriche integrate. Dopo il trasporto l'energia elettrica viene trasformata per l'utilizzazione come energia meccanica, termica, luminosa, chimica, ecc. L'energia elettrica gioca un ruolo centrale: si pensi al suo uso capillare in tutti i settori, nelle case, e alla versatilità di utilizzazione. Durante i black-out negli USA e in Italia sembrava che fosse sparita la vita civile: buio totale, caos nel traffico senza semafori, metropolitane bloccate, ascensori fermi, frigoriferi spenti, ecc.

Per i prossimi decenni si prevede che la domanda di energia elettrica nel mondo avrà il più alto tasso di crescita: il suo consumo dovrebbe raddoppiare nei prossimi 10 – 20 anni.

Occorre produrre energia elettrica al momento della domanda: c'è quindi il problema di far fronte all'aumento complessivo della richiesta; ma occorre inoltre soddisfare la richiesta nelle ore di punta, richiesta che aumenta in modo più elevato del consumo complessivo. Le ore di punta in Italia vanno dalle 9 alla 11 e dalle 16 alle 18. Durante l'estate la richiesta aumenta verso le ore 14, quando vengono accesi i condizionatori, il cui uso è in forte aumento. Durante queste ore vengono messe in funzione quasi tutte le centrali elettriche a disposizione.

L'Italia produce energia elettrica principalmente tramite combustibili fossili (con il metano in aumento) ed è la Nazione europea che importa più energia elettrica, in

particolare dalla Francia e dalla Svizzera. Per evitare le possibilità di black-out è urgente migliorare la rete di distribuzione e aumentare la capacità di produzione di energia elettrica. D'altra parte l'Italia deve progressivamente ridurre le emissioni in atmosfera dei gas serra, essenzialmente CO₂, secondo gli impegni presi con il protocollo di Kyoto. Questo richiede un oculato risparmio energetico e un maggiore uso delle fonti di energia non inquinanti.

L'energia solare arriva dovunque, non costa, è rinnovabile ed ha un impatto ambientale molto limitato rispetto ai combustibili fossili. È però molto diluita nello spazio, è discontinua perché varia con l'alternanza del giorno e della notte, delle stagioni e con le condizioni meteorologiche; per raccoglierla in quantità elevate occorrono vaste superfici. Globalmente l'energia solare non è ancora economicamente conveniente, salvo casi particolari, quali per esempio le piccole utenze isolate [1].

L'utilizzo energetico più semplice e più promettente della radiazione solare è fatto tramite pannelli solari, sia per il riscaldamento che per la produzione diretta di energia elettrica. Sono moltissime le applicazioni con piccoli generatori fotovoltaici: sono usati per calcolatori e orologi da polso; pannelli più grandi servono per fornire elettricità per uso domestico, per pompare acqua dal terreno, per dare potenza a equipaggiamenti per telecomunicazione, per sistemi di emergenza, ecc.

È poi da notare che la produzione di energia elettrica fotovoltaica è massima nella parte centrale della giornata, quando la richiesta di energia elettrica è massima. La produzione di calore da pannelli solari termici è invece massima nei giorni caldi quando la richiesta di acqua calda è minore ed è minima nei giorni invernali quando la richiesta è massima. Anche qui vanno poi considerate situazioni particolari, quali per esempio l'essiccazione delle foglie di tabacco in estate.

La tecnologia fotovoltaica (FV) consente di trasformare direttamente l'energia della radiazione solare in energia elettrica, con un'efficienza globale di circa 10%. Questa tecnologia sfrutta l'*effetto fotovoltaico* che è basato sulle proprietà di alcuni materiali semiconduttori che, opportunamente trattati ed interfacciati, sono in grado di convertire l'energia della radiazione solare in energia elettrica, senza parti meccaniche in movimento e senza l'uso di alcun combustibile. Il *silicio* in forma cristallina è il materiale maggiormente utilizzato per la fabbricazione di celle fotovoltaiche. Queste vengono assemblate in modo da ottenere *pannelli fotovoltaici* di circa mezzo metro quadrato di superficie. I sistemi fotovoltaici sono costituiti da molti pannelli FV e grazie a questa modularità presentano una grande flessibilità di utilizzo. Un sistema fotovoltaico può essere un sistema isolato (*stand alone*) oppure connesso alla rete elettrica (*grid connected*). In questo caso occorre trasformare la corrente elettrica continua fornita dalle celle in corrente alternata tramite l'utilizzo di un *inverter*.

In molte Nazioni sono stati approvati numerosi programmi e incentivi per l'utilizzo diretto dell'energia solare su piccola scala tramite pannelli fotovoltaici piani: in Germania vi è il programma dei 100000 tetti solari; per l'Italia l'ENEA sta gestendo il piano dei 10000 tetti fotovoltaici; gli Stati Uniti hanno un piano per un milione di tetti solari, in parte solari termici e il Giappone ha un programma analogo; anche la Comunità Europea ha un programma analogo che prevede contributi a paesi in via di sviluppo.

Questi progetti contribuiscono alla standardizzazione di tutti i componenti, a ridurre i costi e a fornire energia elettrica in momenti di punta del consumo elettrico, che per esempio in California coincide con il primo pomeriggio dei giorni più caldi, quando vengono accesi in ogni casa i condizionatori. Una tale situazione si è presentata quest'anno anche in Italia ed è molto probabile che possa verificarsi anche

negli anni futuri. L'uso di piccoli sistemi decentrati, quali i tetti fotovoltaici, collegati direttamente alla rete elettrica riduce anche le perdite di trasporto dell'energia elettrica.

Sono in funzione un certo numero di centrali fotovoltaiche di dimensioni medio/grandi, con pannelli piani che coprono alcuni ettari di superficie. Sono state costruite anche alcune centrali con molti piccoli specchi che foceggiano la luce solare su un boiler posto in cima a una torre. Qui si raggiungono temperature elevate che fanno bollire un liquido posto in un recipiente a pressione. Il vapore prodotto aziona turbine per generare energia elettrica. Con questo metodo si possono ottenere efficienze anche del 40%, ma ogni specchio deve avere meccanismi elettrici e meccanici per seguire il moto apparente del sole.

Nel seguito viene descritto il tetto fotovoltaico sperimentale installato sul tetto del Dipartimento di Fisica dell'Università di Bologna [2]. Questo tetto fotovoltaico fornisce energia elettrica da circa due anni, in parallelo alla rete di distribuzione dell'Enel. Sono monitorate con continuità l'insolazione, l'energia elettrica prodotta e il rendimento del sistema, con lo scopo principale di stabilire le prestazioni e l'efficienza globale su tempi relativamente lunghi.

2 Il sistema fotovoltaico utilizzato

La Figura 1 mostra il sistema fotovoltaico usato: si compone di sei unità, costituite da moduli fotovoltaici e strutture di sostegno. Il radiometro (il sensore per la misura della radiazione) e i termometri sono fissati sulla struttura n°6. Notare che i pannelli solari sono orientati verso sud ed inclinati di 30° rispetto all'orizzontale; ciò ottimizza l'insolazione dei pannelli alla latitudine di Bologna.



Figura 1: Tetto solare sul Dipartimento di Fisica dell'Università di Bologna. Notare l'inclinazione di 30° dei 22 pannelli solari piani.

Il sistema è stato progettato su specifiche e supervisione dell'ENEA ed è stato installato in cooperazione col Dipartimento di Fisica [3]. La Figura 2 illustra il layout di un pannello solare di silicio monocristallino [4]. Ogni pannello è composto a sua volta di 36 celle pseudo-quadrate; la superficie totale di un pannello è di 0.63 m², ma solo 0.52 m² sono costituiti di celle fotovoltaiche sensibili.

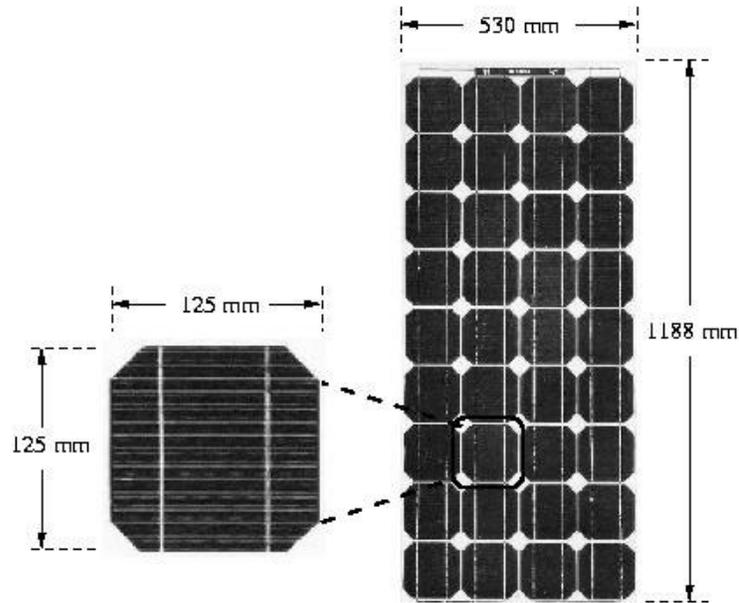


Figura 2: Disposizione di un pannello solare BP585/F (a destra) e particolari di una singola cella fotovoltaica (a sinistra).

L'impianto fotovoltaico è composto di 22 moduli piani che occupano una superficie totale di 13.86 m^2 , di cui 11.56 m^2 costituiscono la superficie fotovoltaica sensibile. La potenza nominale di picco del progetto in corrente continua (c.c.), è di 1.87 kW_p . La tensione è 198 V in c.c. e 230 V in c.a. La potenza massima in c.c. si riferisce alle condizioni di irraggiamento e temperatura standard delle celle (STC = Standard Test Conditions: insolazione di 1000 W/m^2 , temperatura di 25° C) [3].

La corrente continua viene trasformata in corrente alternata tramite un *inverter*, provvisto di un sistema di controllo automatico che ne gestisce le fasi operative.

L'energia elettrica prodotta dal sistema è utilizzata per alimentare in parallelo alla rete Enel un carico, le luci del garage, per una potenza paragonabile a quella di una piccola famiglia.

L'impianto registra ogni dieci minuti i dati di funzionamento del sistema, rendendoli disponibili via modem ad un PC di controllo. Infine un contatore Enel misura e visualizza la quantità di energia prodotta e immessa in rete.

3 Insolazione. Elettricità prodotta

In Figura 3 sono rappresentate l'insolazione e la potenza elettrica prodotta in corrente alternata nel giorno 2 luglio 2003. In questa giornata non vi erano nubi, solo qualche piccola perturbazione per brevi periodi di tempo. Le curve per l'insolazione e per l'energia elettrica prodotta sono tipiche curve a campana, con massimi alle ore 12 solari. Notare che l'insolazione di picco è di poco inferiore ai 1000 W/m^2 nominali della radiazione solare e che la potenza elettrica prodotta segue con regolarità l'andamento della radiazione incidente, ma è ridotta di circa un fattore 10.

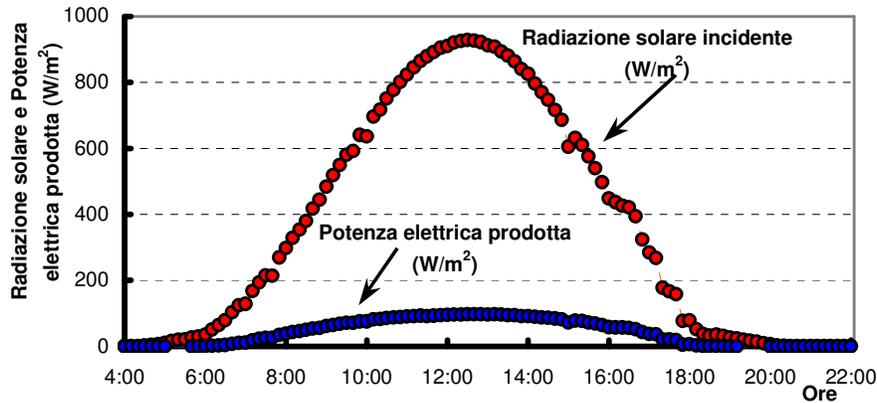


Figura 3: Insolazione e potenza elettrica prodotta in funzione dell'ora solare del giorno 2 luglio 2003, una giornata lunga, soleggiata e senza nuvole. La serie di misure in alto rappresenta l'insolazione; la serie in basso è la potenza elettrica in c.a. ottenuta.

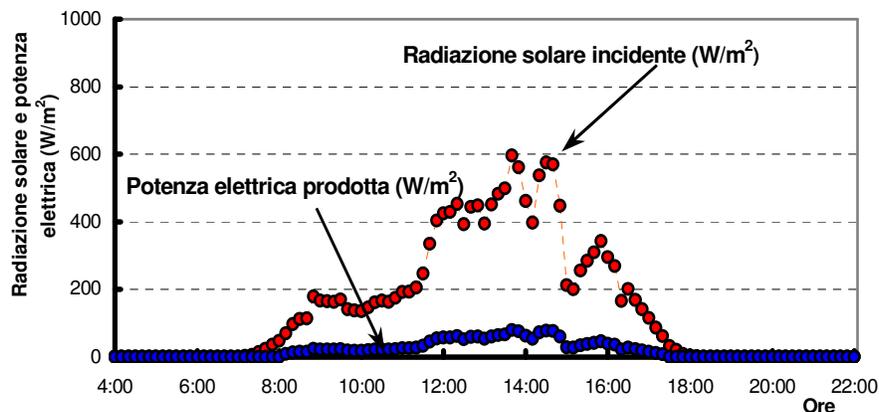


Figura 4: Insolazione e potenza elettrica prodotta in funzione dell'ora solare nel giorno 23 febbraio 2003, una giornata "breve" e con nubi. La serie di misure in alto rappresenta l'insolazione; la serie in basso è la potenza elettrica in c.a. ottenuta.

La Figura 4 mostra l'insolazione e la potenza elettrica ottenute in una giornata invernale. Notare la più breve durata della giornata e la presenza di minimi dovuti a nubi.

In Figura 5 è mostrata l'insolazione giornaliera nel 2001, mentre in Figura 6 è riportata l'energia elettrica in corrente alternata prodotta giornalmente nello stesso anno. Si noti di nuovo che la produzione di energia elettrica segue con regolarità l'insolazione e che i valori massimi di insolazione e di energia elettrica sono ottenuti nei giorni caratterizzati da bassa nuvolosità.

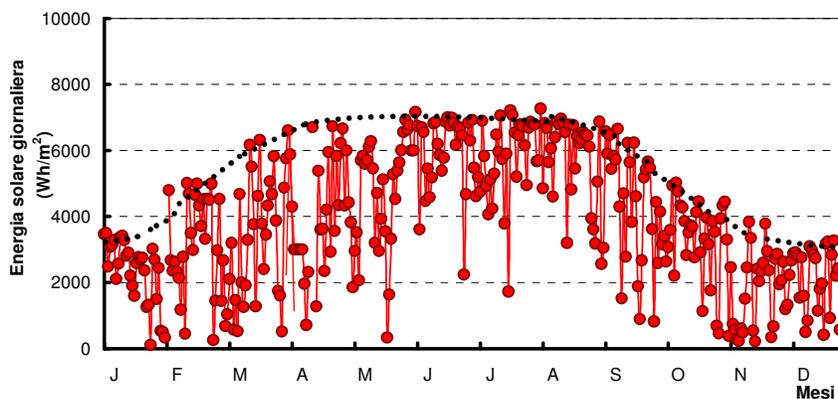


Figura 5: Insolazione giornaliera espressa in Wh/m^2 misurata sull'impianto nel 2001. La linea tratteggiata è approssimativamente indicativa dell'insolazione giornaliera in assenza di nubi.

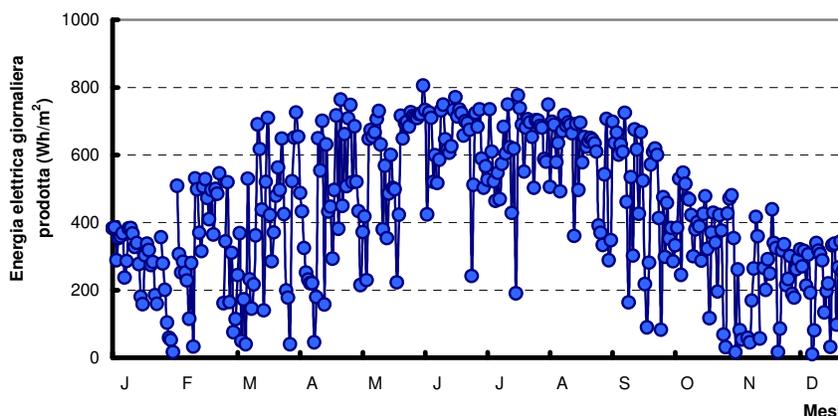


Figura 6: Energia elettrica alternata giornaliera espressa in Wh/m^2 prodotta dall'impianto nel 2001.

Integrando sull'intero anno 2001 si è avuta un'insolazione di $1440 \text{ kWh}/m^2$. L'energia elettrica totale in corrente alternata prodotta nello stesso periodo è stata di 2180 kWh , corrispondente a $157 \text{ kWh}/m^2$; si ottiene quindi un rendimento globale dell'impianto di circa 11% .

È da notare che l'efficienza di una singola cella in silicio monocristallino è circa 17% ; l'efficienza dell'*inverter* è circa 92% ; il montaggio delle celle su pannelli piani, l'installazione e le condizioni di lavoro riducono l'efficienza effettiva a circa 79% . Moltiplicando le efficienze indipendenti si ottiene l'efficienza globale dell' 11% . Tenendo conto anche della nuvolosità nel bolognese si ha un rendimento globale di circa $8-9\%$ relativo all'irradiazione senza nubi.

4 Conclusioni

Globalmente il sistema di pannelli solari installato sul tetto del Dipartimento di Fisica ha funzionato con regolarità dal 2001, con una sola interruzione. La quantità di energia elettrica alternata prodotta nel 2001 è stata di circa 2180 kWh, una quantità sufficiente per una piccola famiglia. L'efficienza globale è circa 11%. L'effetto nubi riduce il rendimento a un valore di circa 9% riferito all'insolazione al di sopra dell'atmosfera.

Il progetto 10000 tetti fotovoltaici dell'ENEA, e una sua estensione a un numero molto più grande, prevede l'installazione di tetti su edifici pubblici e su abitazioni private utilizzando sovvenzioni statali, regionali, locali e fondi della Comunità Europea. Questa iniziativa è certamente molto positiva per incoraggiare uno sfruttamento più diffuso dell'energia solare. Va sottolineata l'importanza di una regolare manutenzione di questi piccoli sistemi: senza di essa si corre il rischio di una forte riduzione di elettricità prodotta e di un invecchiamento precoce del sistema.

Va sottolineato che le attuali pratiche burocratiche necessarie per ottenere un finanziamento e per installare un sistema di pannelli solari sono piuttosto complicate. È anche auspicabile che le procedure di allacciamento alla rete pubblica e le tecniche di inserimento architettonico negli edifici diventino più semplici ed economiche.

Non vanno poi dimenticate le norme di sicurezza per installare impianti sui tetti: per esempio l'Università di Bologna ha richiesto la costruzione di una ringhiera protettiva attorno all'impianto.

Il costo complessivo di un sistema fotovoltaico a pannelli piani connesso alla rete elettrica è dovuto a: costo dell'impianto (investimento), circa 8000 euro/kW_p (circa 15000 euro per il nostro impianto); costi di eventuali protezioni, come ringhiere, ecc, costi di esercizio per manutenzioni, personale, ricambi dell'*inverter* (circa 4000 – 5000 euro in 20 anni); altri costi (assicurazioni e tasse); per il momento nessuno parla del costo di dismissione degli impianti dopo 20 – 30 anni di utilizzo.

Il costo del kWh prodotto da un sistema fotovoltaico è stimato in circa 0.40 euro se l'impianto resta in funzione per 20 anni, circa 0.3 euro per 30 anni. Tale costo va confrontato con il costo Enel di 0.1 – 0.2 euro per kWh.

Gli incentivi pubblici forniscono di norma il 75% del costo dell'impianto e una riduzione delle tasse. Per un utente privato il costo del kWh si riduce quindi a circa un quarto dei valori sopracitati; alcune ditte che usufruiscono di questo contributo parlano di un ritorno positivo dopo 10 – 12 anni di utilizzo. Ma il costo per la comunità è certamente molto più alto.

Per produrre 1 kWh di energia elettrica con una centrale a combustibili fossili occorrerebbero 0.64 kg di petrolio se l'efficienza della centrale fosse del 100%; le centrali hanno efficienze di circa 80% se si utilizza anche il calore prodotto, circa del 40% se non si usa tale calore: quindi per produrre 1 kWh di energia elettrica occorrono 0.8 – 1.5 kg di petrolio a seconda dell'efficienza della centrale. Per ogni kWh di energia elettrica fotovoltaica si evita l'emissione in atmosfera di circa 0.53 kg di CO₂ che sarebbe prodotta in una centrale a petrolio con efficienza del 100%. In pratica si evitano 0.64 – 1.2 kg di CO₂ per kWh elettrico. Quindi utilizzando il tetto solare nel 2001 si sarebbe eliminato il consumo di circa 1.7 – 3 t di petrolio e ridotta di 1.3 – 2.6 t l'emissione di CO₂.

Si tratta di considerevoli quantità di CO₂, ma occorre ricordare che è molto alta la quantità di materiali necessari per costruire i pannelli e le strutture di supporto (circa 3 – 8 volte il valore dei materiali richiesti per centrali a combustibili fossili con capacità di produzione della stessa quantità di energia). Anche se l'energia fotovoltaica sembra molto "pulita", non si può dire che lo sia completamente, perché occorre tener conto dell'energia necessaria per produrre una così grande quantità di materiale. Inoltre dobbiamo considerare il *costo in energia* per realizzare una centrale fotovoltaica: il costo è tale che i primi 3 – 5 anni di utilizzo forniscono energia per compensare quella che è stata necessaria per produrre l'impianto.

È interessante anche osservare che la percezione intuitiva che abbiamo del rischio e dell'impatto ambientale delle varie fonti energetiche è molto ottimistica per certe fonti e pessimistica per altre [5]. Non si deve dimenticare che non esistono fonti energetiche completamente pulite e senza rischi.

Per incentivare ulteriormente la produzione di energia elettrica fotovoltaica e l'utilizzo di un sistema fotovoltaico per tempi lunghi, diciamo maggiori di 20 anni, lo Stato Italiano prevede per il 2004 un aiuto in "conto energia": l'energia elettrica prodotta e inviata in rete verrà pagata a una tariffa incentivante di circa 0.5 euro/kWh.

Ringraziamo i colleghi dell'ENEA, il personale della ditta S.E.I. e del Dipartimento di Fisica e dell'INFN di Bologna.

Bibliografia

- [1] D. Bonacorsi et al. «Energia, ambiente e salute», Presentazione all'Accademia delle Scienze di Bologna, DFUB 2003/05 (2003).
- [2] L. Degli Esposti et al., DFUB 07/02.
- [3] S.E.I., Sistemi Energetici Integrati, Pistoia: progetto P902100B: «Realizzazione di un impianto fotovoltaico da 1.8 kW_p presso il Dipartimento di Fisica dell'Università degli studi di Bologna » (2000).
- [4] Moduli solari BP585F prodotti dalla ditta BPSOLAR, data sheet + sito web <http://www.bpsolar.com> (2002).
- [5] «L'uomo e l'ambiente, rischi e limiti di accettabilità ». L. Bruzzi, F. Casali, G. Giacomelli, A. Lanza Editori, Pitagora Editrice, Bologna. ISBN 88-371-0692-0 (1988).

Giorgio Giacomelli è Professore Ordinario di Fisica Generale all'Università di Bologna.

Gianni Mandrioli è Primo Ricercatore della Sezione INFN di Bologna.

Daniele Matteuzzi è borsista all'Università di Bologna.