

6. **Diffusione: investimenti e adozione** di Cristiano Antonelli

1. Introduzione

Gli approcci convenzionali all'analisi dei fattori che determinano la diffusione di innovazioni tecnologiche incorporate in nuovi beni capitali, sono esclusivamente elaborati in un contesto microeconomico. L'indagine sulle relazioni esistenti tra la diffusione di innovazioni di processo, l'adozione di beni capitali innovativi e le decisioni relative agli investimenti è quasi completamente assente. Più precisamente gli approcci microeconomici standard all'analisi della diffusione, quello epidemico e quello di equilibrio, assumono entrambi che il processo sia guidato:

A) da un fattore esogeno, la profittabilità del bene capitale innovato, determinata questa dal suo prezzo di mercato, dai suoi costi di produzione, e dalle sue prestazioni tecnologiche;

B) da un processo decisionale, o una routine, degli agenti economici – processi basati su assunzioni di razionalità limitata, nell'approccio epidemico, e su ipotesi di iper-razionalità nell'approccio di equilibrio –.

In parallelo rispetto alla tradizione microeconomica, si è sviluppato un approccio macroeconomico all'analisi del ritardo che caratterizza l'adozione di beni capitali tecnologicamente nuovi; inoltre, più ampiamente, l'analisi macroeconomica si sofferma sulla relazione tra cambiamento tecnologico e crescita economica. Tale approccio assume che la capacità dei paesi e dei sistemi economici di adottare innovazioni tecnologiche risieda nel processo di accumulazione e di investimento. Le sue caratteristiche analitiche sono dunque:

A) l'endogeneità del tasso di diffusione;

B) il contesto macroeconomico dell'analisi.

Questi due blocchi di analisi economica convergono raramente. Ciò nonostante sembra, in modo sempre più evidente, che un livello di analisi integrato micro-macro, sia indispensabile al fine di combinare in un modello unificato i diversi e contrastanti approcci all'analisi economica della diffusione.

Questo lavoro si propone di mostrare che un approccio micro-macro all'analisi della diffusione, rende possibile l'elaborazione di una sintesi dei

- a) modelli macroeconomici;
- b) modelli (neo)epidemici;
- c) modelli di equilibrio.

Nel modello micro-macro vengono mantenuti gli aspetti soddisfacenti di ognuno degli approcci sopra elencati, sebbene si superino buona parte dei limiti peculiari a ciascuno di essi.

In una prospettiva di analisi di crescita comparata, l'utilizzo dell'approccio micro-macro nella modellizzazione della diffusione di innovazioni di processo, consente anche di riconoscere il cambiamento tecnologico come processo endogeno, risultante dagli sforzi di differenti gruppi di agenti economici [Cornwall 1977].

Secondo il nostro approccio, il cambiamento tecnologico non si diffonde all'interno del sistema economico solamente perché i nuovi beni capitali innovativi offrono chiari vantaggi tecnologici – come viene sostenuto dagli approcci microeconomici standard – ma piuttosto, la diffusione del cambiamento è il risultato dell'interazione di un insieme di fattori assai più complessi come: 1) le decisioni di investimento; 2) la profittabilità connessa all'adozione dell'innovazione; 3) il costo relativo dei fattori; 4) la conoscenza limitata dei managers e degli imprenditori.

2. I modelli di equilibrio

Con l'intento di superare i limiti dei modelli epidemici, che adottavano nell'analisi una prospettiva orientata alla domanda, sono stati elaborati, in questi ultimi anni, numerosi modelli che tentano di inserire le problematiche della diffusione in un ambito di analisi dal lato dell'offerta.

L'approccio di equilibrio è fondato esclusivamente su basi microeconomiche; al suo interno si sostiene che il ritardo che si manifesta tra le imprese nell'adottare e nell'utilizzare le nuove tecnologie, possa essere considerato il risultato dell'interazione sul mercato tra coloro che offrono le nuove tecnologie ed il comportamento microeconomico completamente razionale dei potenziali adottori [David 1975].

Nei modelli di equilibrio una popolazione eterogenea di adottatori potenziali fronteggia un ambiente dinamico dove i costi dei fattori e le caratteristiche tecnologiche dei beni capitali innovati si modificano nel tempo. Ogni adottatore potenziale rimanda razionalmente l'adozione per tutto il tempo in cui le condizioni di costo legate all'utilizzo della vecchia tecnica si manifestino per lui migliori di quelle conseguenti alla scelta di utilizzo della nuova tecnica. L'adozione avviene gradualmente nel tempo, mano a mano che i costi operativi delle imprese che utilizzano i beni capitali esistenti sono – diventano – superiori ai costi di produzione del bene capitale tecnologicamente nuovo.

Per spiegare un simile processo si è fatto appello a numerose plausibili ragioni:

a) Le grandi imprese sono solite pagare salari più elevati rispetto alle imprese più piccole, e sono quindi indotte ad adottare più rapidamente l'innovazione. Le piccole imprese, comunque, adotteranno anch'esse quando i salari da queste pagati raggiungeranno i livelli di quelli delle imprese più grandi [Davies 1979]. Questa è l'argomentazione tradizionale – e probabilmente la più forte – dell'approccio di equilibrio che conduce a due ipotesi standard: 1) I livelli di diffusione dovrebbero essere maggiori all'interno di popolazioni caratterizzate da imprese più grandi e salari più elevati; 2) I tassi di diffusione sono più rapidi quando le imprese ed i salari crescono più celermente [David 1975].

b) L'introduzione di cambiamenti tecnologici incrementali, rende il nuovo bene capitale ancor più interessante. Livelli di profittabilità superiori convincono all'adozione anche imprese caratterizzate da bassi salari [Stoneman 1983].

c) L'erosione delle quasi-rendite monopolistiche all'interno del mercato dei nuovi beni capitali e la maggiore competizione che si manifesta tra gli offerenti in seguito all'imitazione, causano il declino del prezzo di mercato dei beni capitali che incorporano la nuova tecnologia. A tutto ciò consegue un aumento nella profittabilità dell'adozione per l'adottatore marginale, ed il processo diffusivo si estende così a nuovi gruppi di utilizzatori potenziali [Antonelli e Ghezzi 1987].

d) L'aumento delle adozioni rende possibile il conseguimento di economie di scala nella produzione; queste portano ad una riduzione nei costi e di conseguenza nei prezzi di mercato del bene capitale innovato; seguono ulteriori adozioni che possibilmente attivano dei processi di diffusione cumulativa, alimentata dalle interazioni tra domanda ed offerta, lungo la curva di costo di lungo periodo della produzione del nuovo bene capitale, e dalla selezione delle imprese ritardatarie [Antonelli e Tahar 1990].

e) Gli effetti dell'apprendimento rendono possibile nel tempo la realizzazione di riduzioni nei costi di produzione, e quindi nei prezzi di mercato del bene capitale innovato; si generano in tal modo ulteriori adozioni e quindi maggiore diffusione [Antonelli e Gottardi 1988].

Formalmente, all'interno dell'approccio di equilibrio, l'adozione si verificherà quando:

$$[1] \quad W (L_0 - L_n) > P_n - P_0$$

dove W = salario unitario; L_0 = quantità di lavoro necessaria per produrre una unità di prodotto con la vecchia tecnologia; L_n = quantità di lavoro necessaria per produrre una unità di prodotto con

la nuova tecnologia; P_n = costo capitale della nuova tecnologia; P_o = costo capitale della vecchia tecnologia.

A questo punto risulta chiaro che, nel tempo, le adozioni Y cresceranno all'aumentare di W , di $(L_o - L_n)$ e di $(P_n - P_o)$:

$$[2] \quad Y = f [W, (L_o - L_n), (P_n - P_o)].$$

L'approccio di equilibrio sembra essere soggetto a due rilevanti limiti. Innanzitutto all'interno di tale approccio vengono esclusi tutti gli effetti che le asimmetrie informative e la conoscenza limitata manifestano nei processi decisionali dei potenziali adottatori, fattori questi che giocano un ruolo determinante nei modelli epidemici. I modelli di diffusione che si fondano solo sull'apprendimento epidemico, per contro, danno eccessivo rilievo al ruolo della razionalità limitata. I modelli di equilibrio assumono comunque che le decisioni vengano prese in un contesto di iper-razionalità e di individualismo; in tal modo, all'interno di questi modelli, non c'è spazio per esternalità di tipo cognitivo che sembra difficile escludere da un contesto dinamico dove gli agenti sono obbligati a prendere le loro decisioni senza poter disporre di un insieme di scelta noto e completo.

In secondo luogo, e ancor più rilevante in questo contesto, l'approccio di equilibrio sembra non tenere in alcun conto che la decisione di adottare un bene capitale innovato implica anche una decisione di investimento. È invero probabile che i fattori che determinano le decisioni di investimento interagiranno fortemente con le decisioni di adozione.

3. I modelli (neo)epidemici

Le critiche sollevate dalla scuola dell'equilibrio all'approccio epidemico tradizionale, hanno reso possibile una migliore valutazione dei limiti di quest'ultimo come anche dei suoi punti di forza.

Com'è ormai ben noto, il modello epidemico standard assume che i tassi di diffusione siano univocamente determinati dal contagio epidemico che i vecchi adottatori diffondono tra gli adottatori potenziali [Griliches 1957].

Formalmente, il modello epidemico assume che:

$$[3] \quad \dot{Y} = b_1 \frac{Y (N - Y)}{N} - \frac{1}{t}$$

dove: Y = livelli di adozione; N = numero massimo degli adottatori potenziali; t = tempo
cioè il tasso di variazione delle adozioni è funzione del prodotto del numero dei membri non infetti di una data popolazione, e del numero di individui già infetti della stessa popolazione.

Elaborando l'originale interpretazione di Mansfield il tasso di contagio, o di imitazione, può essere considerato come una funzione della profittabilità di adozione, all'interno di una popolazione caratterizzata da razionalità limitata e da elevati costi di transazione. L'imitazione può così essere considerata come il risultato di un apprendimento collettivo o come conseguenza delle esternalità cognitive; la conoscenza limitata, disponibile inizialmente solo ai primi adottatori, si diffonde gradualmente a tutti gli adottatori potenziali, ed i costi di transazione si riducono al crescere dello stock di utilizzatori.

Nel contesto di una rivalutazione del modello epidemico, nei termini sopra esposti, non vi è ragione di escludere gli effetti complementari sull'adozione e sulla diffusione di altri fattori determinanti, come variazioni nella profittabilità di adozione, conseguenti ad aumenti salariali, o all'introduzione di innovazioni incrementali, o al declino dei prezzi dei beni capitali innovati [Antonelli 1989a; 1989b].

In modo formale tale modello neo-epidemico sostiene che:

$$[4] \quad \dot{Y} = \frac{b_1}{t} \frac{N(N - Y)}{N} + \frac{b_2}{S} \dot{S} \frac{Y(N - Y)}{N}$$

dove: Y = livelli di adozione; N = massimo numero di adottori potenziali; t = tempo; S = indicatore di alcuni aspetti rilevanti relativi all'offerta (come i prezzi, e/o le prestazioni del nuovo bene capitale), o ai livelli salariali. Si assume cioè che la diffusione sia il risultato di una interazione moltiplicativa del tempo, che esprime il classico processo di imitazione, e degli effetti dei livelli salariali come anche di fattori relativi all'offerta, quali l'introduzione di innovazioni tecnologiche incrementali, ed il declino dei prezzi di mercato dei beni capitali innovativi.

I modelli neo-epidemici aggiungono, ad un'adequata considerazione degli effetti conseguenti ai vincoli imposti dalla razionalità limitata, alcuni aspetti dell'approccio di equilibrio, relativi al ruolo positivo giocato dalle forze dell'offerta come anche dei salari nella determinazione della diffusione. Utilizzando l'approccio sopra descritto però, i modelli neoepidemici si trovano di fronte agli stessi limiti dei modelli di equilibrio: non riescono cioè a tenere conto del ruolo cruciale che le decisioni di investimento hanno nel processo di adozione di un bene capitale tecnologicamente nuovo.

4. Il ruolo degli investimenti

4.1. L'investimento come determinante della diffusione

Le teorie standard della diffusione sono basate sulla quasi-identità delle interpretazioni della diffusione come risultato della scelta di un bene capitale innovativo, per un dato livello di investimenti.

In realtà, un'attenta lettura dei lavori pionieristici di Mansfield rende possibile constatare che, all'interno della tradizione epidemica, il ruolo dell'investimento è stato considerato come possibile fonte di ritardo nelle adozioni, cioè un fattore che in parte spiega una riduzione nel tasso di diffusione. Inoltre Mansfield ha anche tenuto conto che l'adozione di un bene capitale innovativo possa consistere in un atto di investimento di tipo sostitutivo, che spiazzi quindi i beni capitali esistenti. Un simile processo di sostituzione può subire dei ritardi dovuti alla particolare distribuzione per età dello stock di capitale esistente, ai livelli dei «sunk costs» e agli effetti di questi ultimi nelle decisioni di rimpiazzo delle vecchie macchine. Infine Mansfield sembra essere ben cosciente che l'adozione di un bene capitale tecnologicamente nuovo, come qualunque decisione di investimento, possa verificarsi più rapidamente in un contesto in cui gli investimenti netti crescano; in tal modo si rendono meno stringenti i vincoli che caratterizzano gli investimenti di tipo strettamente sostitutivo [Mansfield 1968].

L'approccio epidemico, comunque, nelle elaborazioni degli ultimi lavori dello stesso Mansfield e dei suoi seguaci, non riesce a sviluppare queste pertinenti osservazioni; il ruolo degli investimenti, sia come stimolo che come ostacolo ai processi di diffusione, viene a trovarsi al di fuori dello specifico oggetto di analisi della diffusione.

Per contro, all'interno di una tradizione dell'analisi economica del tutto differente, la relazione tra la diffusione e l'investimento viene attentamente indagata; anche all'interno di questo filone sono però riscontrabili evidenti limiti: il ruolo delle scelte di adozione viene del tutto trascurato e la diffusione viene considerata equivalente al risultato dei processi di investimento e di accumulazione del capitale [Kaldor 1957].

In un ambito di analisi postkeynesiana ci si attende che, per dati livelli di introduzione di innovazioni tecnologiche, e per dati livelli della capacità di adozione degli imprenditori, ogni nuovo investimento generi forti effetti positivi sulla produttività del lavoro. Qui la diffusione diventa il risultato automatico del processo di investimento. Le caratteristiche del processo diffusivo come differente, o quantomeno non completamente identificabile, con il flusso degli investimenti, sono tuttavia, benché confusamente, percepite.

La relazione tra gli investimenti e la produttività del lavoro, nella nota «funzione del cambiamento tecnico» di Kaldor, sembra essere governata dai ritardi che si manifestano nel processo di imitazione; come lo stesso Kaldor dice: «la curva TT' riflette così non soltanto l'inventiva in senso stretto, ma anche, in senso più ampio, il grado di dinamismo tecnico dell'economia – del quale fa parte non solo l'abilità di pensare nuove idee, ma anche la prontezza degli agenti respon-

sabili del processo produttivo, nell'adottare nuovi metodi di produzione» [Kaldor 1957, 596]. Kaldor, inoltre, dà alla funzione del cambiamento tecnico la forma di una logistica troncata, caratterizzata da convessità verso l'alto e dalla tendenza a divenire piatta, a causa di effetti di saturazione. Kaldor non fornisce ulteriori spiegazioni per questa particolare forma, che, in un contesto più tradizionalmente orientato alla diffusione, verrebbe immancabilmente elaborata in termini epidemici.

Salter sviluppa ulteriormente i risultati di Kaldor ed introduce la rilevante distinzione tra tecnologia «best-practice» e tecnologia media; egli sostiene che, per dati livelli di cambiamento tecnologico, il tasso di investimento lordo è esattamente ciò che determina la differenza esistente tra la produttività osservata e la produttività che conseguirebbe all'utilizzo della migliore tecnologia esistente per la produzione di un dato bene [Salter 1960]. Per rendere più comprensibile la sua interpretazione, Salter introduce la distinzione tra investimenti di sostituzione, investimenti netti ed investimenti lordi. L'investimento lordo nella sua totalità, è il mezzo che consente ai beni capitali innovati di venire introdotti nel sistema economico. Le sue componenti (investimento sostitutivo e investimento netto), si differenziano sotto vari ed importanti punti di vista. L'investimento netto è fondamentalmente determinato dalla nuova domanda, questa infatti rende possibile un incremento delle quasi-rendite per la configurazione esistente del capitale. I livelli di investimento sostitutivo sono determinati dal confronto tra la profittabilità dei beni capitali innovati ed i costi operativi (materiali più lavoro) delle configurazioni esistenti del capitale. Quando ci sia cambiamento tecnico – e concorrenza perfetta – il prezzo dei prodotti diminuirà; non appena questo diviene inferiore ai costi operativi degli impianti esistenti, l'impresa rimpiazzerà il vecchio stock di capitale e adotterà i macchinari che incorporano la nuova tecnologia.

Da quanto detto sopra, risulta chiaro che quella di Salter è una teoria della diffusione, ma applicabile ad un contesto assai limitato: un bene capitale innovato verrà adottato qualora gli investimenti di sostituzione non vengano bloccati da un elevato livello dei sunk costs, tale cioè che i costi operativi della parte più vecchia dello stock di capitale esistente siano meno elevati dei prezzi del prodotto, e questi, a loro volta, risultino più alti del costo totale unitario ottenuto con il nuovo processo produttivo.

Una innovazione di processo non verrà adottata contemporaneamente da tutti gli adottatori potenziali a meno che:

a) tutti gli adottatori potenziali abbiano lo stesso livello di *sunk costs*, ovvero la stessa struttura per età e capacità dello stock esistente di capitale;

b) i prezzi del bene prodotto con i nuovi macchinari scendano al di sotto dei costi operativi di tutti gli impianti preesistenti, oppure i costi operativi sorpassino i prezzi dei prodotti per qualunque categoria di impianti esistenti.

In sintesi, i passi analitici contenuti nella modellizzazione di Salter del ritardo nell'utilizzo di una nuova tecnologia, sono i seguenti:

a) i beni capitali che incorporano la nuova tecnologia, possono aggiungersi a quelli esistenti in modo da comporre una struttura del capitale ordinabile per «annata». Tale struttura può così risultare differenziabile rispetto all'età di ogni macchinario, ai livelli di produttività del lavoro ed alla forma materiale;

b) l'introduzione di innovazioni di processo consente di espandere la produzione dell'industria;

c) l'introduzione, di una innovazione di processo nel sistema, genera una caduta nel prezzo dei prodotti, fino al livello dei costi totali degli impianti che incorporano la nuova tecnologia;

d) la caduta nel prezzo dei prodotti spinge le imprese a rimpiazzare i mezzi di produzione più datati fintanto che i costi operativi di questi ultimi risultino più elevati dei costi totali dei nuovi impianti;

e) l'introduzione di innovazioni di processo, tramite una riduzione nei costi totali ed una riduzione nei prezzi dei prodotti, genera un'ondata di investimenti sostitutivi aggiuntivi.

Osservando più da vicino, la modellizzazione del ritardo nell'utilizzo delle nuove tecnologie proposta da Salter sembra essere composta da due blocchi costitutivi:

a) il cambiamento tecnologico comporta un flusso di investimenti sostitutivi che è funzione *i)* del declino del prezzo dei prodotti; *ii)* dell'aumento della domanda; *iii)* dei livelli dei costi operativi delle generazioni precedenti dello stock di capitale;

b) l'investimento di tipo sostitutivo introduce automaticamente nel sistema la tecnologia «best-practice» incorporata nei beni capitali innovati.

Se si ipotizzano condizioni di concorrenza perfetta, sembra possibile formalizzare il modello di Salter con un sistema di due equazioni:

$$[5] \quad Y = f(\dot{I}r)$$

dove Y = diffusione, Ir = investimenti di sostituzione, e

$$[6] \quad Ir = f(\bar{L}_n, \dot{L}_o, \bar{P}_n, \dot{P}_o, \dot{W})$$

dove L_n = quantità di lavoro richiesta dalla nuova tecnologia per unità di prodotto;

Lo = quantità di lavoro richiesta dalla vecchia tecnologia per unità di prodotto;

Pn = costo capitale della nuova tecnologia per unità di prodotto;

Po = costo capitale della vecchia tecnologia per unità di prodotto;

W = salario ed altri costi operativi.

Si vede in modo chiaro che la diffusione è il risultato delle decisioni di investimento, e che queste, a loro volta, dipendono dalla profittabilità dell'adozione dei mezzi di produzione innovativi, misurata in base al contenuto di costo dei nuovi macchinari (costi operativi e costo di acquisto), scontati dei costi operativi del vecchio processo produttivo.

Il modello di Salter sta chiaramente dietro al modello di equilibrio; è infatti evidente che l'equazione [7], ottenuta sostituendo la [6], nella [5], è molto simile all'equazione [2]:

$$[7] \quad Y = f(\bar{L}n, \bar{L}o, \bar{P}n, \bar{P}o, \bar{W}).$$

Il problema, sia con l'approccio di equilibrio che con il modello di Salter, sembra sorgere esattamente a questo punto. L'equazione [7] assume che gli investimenti siano determinati solo da due fattori:

A) le opportunità offerte dal cambiamento tecnologico, misurate da $(Ln - Lo)$ e da $(Pn - Po)$;

B) un processo di sostituzione indiretta alimentato dai prezzi dei fattori sintetizzati da W .

La funzione degli investimenti così specificata appare fortemente insufficiente se inserita in un contesto neokeynesiano. Una interpretazione più attenta del libro di Salter suggerisce che l'equazione [6] si riferisce solo al caso degli investimenti di tipo sostitutivo mentre non viene affatto considerato l'investimento netto. Con maggiore precisione, si desume che l'equazione [6] è riferita i) a quella parte degli investimenti netti indotti dalla crescita della domanda, conseguente alle riduzioni nei prezzi dei prodotti dovute all'uso dell'innovazione; e ii) all'investimento sostitutivo, anticipato in seguito all'introduzione delle nuove tecnologie ed alle modificazioni nei prezzi del lavoro e dei prodotti; ma non iii) all'investimento netto generato dalla dinamica del sistema economico. Secondo questa interpretazione, il modello di Salter non è consistente con l'approccio neokeynesiano. In tale ambito la funzione dell'investimento deriva la sua forma dal ruolo della domanda effettiva, questa risulta esserne il fattore determinante, come viene mostrato dai noti modelli dell'acceleratore e dell'acceleratore flessibile.

In conclusione, da questa lunga discussione sembra emergere chiaramente che l'analisi di Salter ci porta a sottolineare due punti fondamentali:

A) Adozione ed investimento implicano decisioni interconnesse,

che non è possibile analizzare separatamente. L'equazione [5] è un importante contributo in tal senso.

B) Gli investimenti necessari all'adozione di una innovazione tecnologica sono influenzati – sebbene non in modo esclusivo – dalle opportunità offerte dal cambiamento tecnologico scontate dai costi relativi dei fattori.

4.2. Cambiamento tecnologico ed investimenti

Con riferimento alla discussione precedente, sembra importante focalizzare la nostra attenzione sugli effetti che il cambiamento tecnologico ha sul livello degli investimenti, tramite la modificazione delle condizioni di profittabilità, consentite dalle innovazioni di processo che comportano riduzioni nei costi. L'approccio standard all'analisi dell'investimento, difficilmente include il cambiamento tecnologico tra i fattori determinanti; è però possibile trovare qualche eccezione a questo atteggiamento.

Feldstein e Foot [1971] analizzando la relazione tra investimenti di rimpiazzo e modernizzazione, notano che variazioni nel tasso del cambiamento tecnologico probabilmente influenzano la vita ottimale delle macchine che compongono lo stock di capitale esistente e, conseguentemente, i livelli degli investimenti di sostituzione. Koizumi [1969], nell'ambito di un approccio che modella gli investimenti in base all'ipotesi di acceleratore flessibile, fa notare che il cambiamento tecnologico sortisce effetti rilevanti sui livelli degli investimenti, modificando il livello di efficienza relativa della capacità esistente, e cambiando, di conseguenza, i livelli di capacità desiderata. Koizumi non riesce però ad indicare quali siano i possibili effetti dell'introduzione del cambiamento tecnologico, e se questo riduca o incrementi il flusso degli investimenti.

Mansfield [1968] fornisce un supporto sostanziale all'ipotesi che il cambiamento tecnologico spinga gli investimenti. Egli elabora un modello di acceleratore flessibile della capacità, nel quale introduce una variabile che misura gli effetti della collocazione temporale dell'innovazione sullo stock della capacità esistente. Così facendo, Mansfield può tenere conto degli effetti che il cambiamento tecnologico manifesta sull'efficienza relativa dello stock esistente, e di conseguenza, attraverso la sostituzione anticipata, sui livelli dell'investimento lordo.

All'interno di un approccio di tipo acceleratore flessibile, Mansfield suppone che le imprese decidano, all'inizio di ogni anno, quanta capacità produttiva costituiranno durante quell'anno:

$$[8] \quad D_t = [O_{t-i} - (1 - y) K_{t-1}]$$

dove

D_t = capacità totale costruita nell'anno t

O_{t-1} = prodotto totale dell'industria nell'anno $(t-1)$

K_{t-1} = capacità totale dell'industria all'inizio dell'anno $t-1$

y = quota di capacità produttiva utilizzata nell'anno.

Inoltre se $P_{(t)}$ indica il costo di costruzione di una piccola frazione di capacità, si può facilmente determinare il livello di investimento:

$$[9] \quad I_t = P_t [O_{t-1} - (1 - Y) K_{t-1}].$$

Mansfield introduce così il cambiamento tecnologico, solo in qualità di fattore che determina gli investimenti di sostituzione.

Per completare il modello Mansfield formula la seguente equazione:

$$[10] \quad E'_t = \bar{W}_t X^{-1} K_{t-1} \quad (S) \quad \begin{matrix} S = t-1 \\ S = t-X-1 \end{matrix}$$

nella quale:

E'_t = spese effettuate nell'anno t relative all'introduzione di innovazioni nei vecchi impianti

$\bar{W}_t$ = valore medio delle innovazioni per unità di capacità

(S) = numero delle innovazioni comparse per la prima volta nell'anno S

X = anni necessari affinché «la vecchia capacità della intera industria venga dotata di una data innovazione» [Mansfield 1968, 120].

Sommando le equazioni [9] e [10] egli giunge infine all'equazione [11], secondo la quale:

$$[11] \quad I = P_t [O_{t-1} - (1 - y) K_{t-1}] + \bar{W}_t x^{-1} k_{t-1} \quad (S) \\ \begin{matrix} S = t-1 \\ S = t-X-1. \end{matrix}$$

L'equazione degli investimenti formulata da Mansfield può quindi essere definita come acceleratore flessibile; in tale contesto il cambiamento tecnologico sortisce i suoi effetti sugli investimenti di sostituzione, ma non su quelli netti. I risultati dell'analisi empirica di Mansfield, relativa all'industria dell'acciaio statunitense, sono soddisfacenti dal punto di vista statistico e sembrano particolarmente rilevanti per due ragioni:

a) confermano empiricamente che il flusso di innovazioni cumulative è importante nella determinazione del livello degli investimenti sostitutivi;

b) l'effetto del cambiamento tecnologico sugli investimenti è soggetto a *ritardi specifici* e ad una struttura di intervalli temporali ben definita, che tuttavia rimane da spiegare.

Da una posizione più radicale Boyer e Petit [1981] modellano una

equazione degli investimenti basata sull'ipotesi di acceleratore semplice, dove, tuttavia, le tendenze di lungo periodo del cambiamento tecnologico risultano essere un fattore determinante sia per gli investimenti netti, che per quelli di sostituzione.

Il modello che Boyer e Petit sottopongono a verifica empirica è:

$$[12] \quad I = a_1 \dot{Q} + a_2 \text{INNO} + a_n \text{COUNTRY DUMMIES}$$

dove $I = I/Q$ intensità degli investimenti (I) rispetto al PIL (Q)

$\dot{Q}$ = tasso di crescita reale del PIL

INNO = spese in ricerca e sviluppo non destinate alla difesa rapportate al PIL ritardato di cinque anni.

I buoni risultati relativi ai sei maggiori paesi europei negli anni Sessanta e Settanta che l'analisi empirica fornisce, confermano il ruolo determinante che le innovazioni passate giocano sui livelli dell'investimento totale e suggeriscono:

A) che può essere valida l'argomentazione più ampia: cioè che il cambiamento tecnologico provoca sia flussi addizionali di investimenti netti, tramite la crescita della domanda, che flussi incrementali di investimenti di sostituzione anticipati;

B) che si dovrebbero elaborare intervalli temporali appropriati al fine di tenere conto del ritardo nell'adozione di beni capitali innovati.

A questo punto sembra possibile concludere che il cambiamento tecnologico, provocando incrementi nella profittabilità, sortisce effetti rilevanti sui livelli dell'investimento lordo. Gli investimenti lordi non sono però determinati solamente dal cambiamento tecnologico e dal costo dei fattori, ma anche, ed in larga misura, dai livelli della domanda e dalle aspettative in merito alla crescita di quest'ultima. L'adozione di innovazioni di processo è anche una decisione di investimento. Tale decisione è essa stessa la conseguenza delle opportunità di accrescere la profittabilità offerte dal cambiamento tecnologico, e di quelle offerte dal contesto macroeconomico. L'adozione dei beni capitali innovati non è però solo influenzata dai processi di apprendimento e dalle esternalità cognitive, ma anche dalla profittabilità in maniera diretta e, indirettamente, attraverso le decisioni di investimento, sulle quali il contesto macroeconomico esercita a sua volta un effetto determinante.

5. Il modello

In base alle precedenti considerazioni, sembra chiaro che la diffusione delle innovazioni tecnologiche, incorporate in beni capitali, debba essere considerata come il risultato di due decisioni distinte, ma che si influenzano reciprocamente:

a) la decisione di adottare;

b) la decisione di investire.

Per dati livelli di profittabilità dei beni capitali innovati, bassi livelli degli investimenti, conseguenti a cupe prospettive di mercato, faranno procedere la diffusione assai lentamente, anche nel caso in cui tutti gli investitori non possano adottare che il nuovo bene capitale. Similmente avviene che bassi livelli di adozione, ostacolata dalla mancanza di informazioni rilevanti e da elevati livelli dei costi di transazione, si accompagnano con elevati tassi di investimenti, stimolati da un alto tasso di incremento della domanda effettiva. Una simile concomitanza renderà il processo di diffusione più lento: gli investitori continueranno ad acquistare i vecchi beni capitali invece dei nuovi.

In modo formale possiamo quindi scrivere:

$$[13] \quad Y_t = f(A_t, I_t)$$

dove

Y_t = rapporto tra lo stock di capitale innovato e la capacità produttiva totale installata al tempo t

A_t = caratteristiche del processo di adozione al tempo t

I_t = flusso degli investimenti al tempo t .

A questo punto ci occuperemo dei fattori che determinano le decisioni di adozione e gli investimenti.

L'adozione. Utilizzando come base della modellizzazione del processo di adozione i caratteri propri dei processi decisionali, come razionalità limitata e conoscenza imperfetta, sembra possibile ricorrere alla tradizione epidemica.

Gli adottatori potenziali non sono istantaneamente a conoscenza di tutte le innovazioni di processo che vengono introdotte nel sistema. I costi di transazione sono maggiori per i beni capitali innovati che per quelli tradizionali, a causa delle asimmetrie di informazione, dei comportamenti opportunistici e del ristretto numero di partecipanti allo scambio.

Per esplicitare un modello degli effetti di queste externalità, possiamo affidarci alla vecchia specificazione epidemica, che però si riferisce più precisamente al contesto dell'adozione, piuttosto che a quello della diffusione. Per cui:

$$[14] \quad A_t = f(Y_{t-1})^\alpha$$

dove

A_t = rapporto tra le adozioni del bene capitale innovato e gli acquisti di vecchi beni capitali per unità di investimento al tempo t

Y_{t-1} = rapporto tra stock di beni capitali innovati, già adottati al tempo $t-1$ e stock totale di beni capitali impiegati nel medesimo processo produttivo

α = parametro del processo di apprendimento.

L'equazione [14] ci dice che le scelte di adozione sono influenzate da esternalità dinamiche di tipo cognitivo (per dati livelli di profittabilità dell'innovazione da adottare), le quali scaturiscono da processi di imitazione e apprendimento nel tempo. L'elementare specificazione dell'equazione [14], sembra poter contenere l'essenza del processo cumulativo di imitazione, generato da quella categoria di modelli di razionalità limitata dove le scelte degli agenti economici sono il risultato dell'esperienza e dell'apprendimento collettivo¹.

L'investimento. Utilizzando come punto di partenza l'analisi della relazione tra domanda effettiva, costi di fattori e cambiamento tecnologico, nella determinazione del livello degli investimenti lordi, si può proporre una funzione degli investimenti caratterizzata da un acceleratore flessibile. In tale funzione l'acceleratore deve venire incrementato da una variabile di costo dei fattori e da un fattore di cambiamento tecnologico che tenga conto sia del prezzo del bene capitale innovato, che del risparmio, in termini di costi operativi, che questo rende possibile. In questo modello il cambiamento tecnologico ha effetti sia sull'investimento netto che su quello di sostituzione.

$$[15] \quad I_t = f[(O_t, K_{t-1}), TC_t]$$

dove I_t = livelli di investimento al tempo t

O_{t-1} = output totale dell'industria nell'anno $t-1$

K_t = capacità totale dell'industria all'inizio dell'anno t

TC_t = profittabilità dell'adozione al tempo t .

Secondo l'equazione [15] ci si attende che il cambiamento tecnologico, ponderato dal costo dei fattori, influenzi l'efficienza relativa della capacità esistente, anticipando in tal modo gli investimenti di sostituzione.

Combinando le equazioni [14] e [15], otteniamo un modello completo della diffusione; in esso il processo di aggiustamento della distribuzione per età dello stock di capitale è il risultato combinato della diffusione epidemica dell'informazione e i connessi effetti di esternalità cognitive da un lato, e delle decisioni di investimento dall'altro²:

$$[16] \quad Y_t = (Y_{t-1})^\alpha [(O_{t-1}, K_t), TC_t].$$

¹ Si veda Schiller e Pound [1989] per una generalizzazione dell'impiego dei modelli epidemici.

² Una versione più semplice, ma più diretta del nostro modello di base, può essere ottenuta direttamente sostituendo l'equazione [14] nella [13], di modo da ottenere:

$$[17] \quad Y_t = j[(Y_{t-1}), (I_t)].$$

La profittabilità dell'adozione di beni capitali innovati, manifesta effetti positivi sulla diffusione, come previsto dai modelli di equilibrio, solo nella misura in cui altri fattori rilevanti nella determinazione degli investimenti, come le aspettative di domanda, non ostacolano l'impiego a lungo termine delle risorse finanziarie nell'acquisto dell'innovazione.

L'effettiva possibilità che gli imprenditori hanno di adottare i nuovi beni capitali, è nei fatti determinata dall'intensità dei segnali espressi dal mercato, ovvero dalla profittabilità di adozione, sebbene controllata dai livelli dello stock di nuovi beni capitali già adottati. Il ruolo di esternalità cognitive e processi di apprendimento è quello di tenere conto della dinamica della *vischiosità* nelle fasi preliminari di aggiustamento delle scelte di adozione, e degli *effetti cumulativi* causati dalla conoscenza limitata degli agenti e dai conseguenti livelli e tassi di variazione dei costi di transazione associati alla diffusione delle innovazioni.

6. Conclusioni

L'adozione di innovazioni di processo incorporate in beni capitali, richiede che vengano impegnate a lungo termine, in investimenti, rilevanti risorse finanziarie. Le decisioni di adozione sono quindi strettamente collegate alle decisioni di investimento.

I modelli di equilibrio riportano al centro del dibattito l'analisi economica della diffusione, il ruolo determinante della profittabilità di adozione e, di conseguenza, dei fattori che la determinano, come le variazioni nella produttività dei beni capitali innovati ed il processo di sostituzione indiretta dei fattori che ne consegue.

Il progresso reso possibile dai modelli di equilibrio ha però due notevoli inconvenienti. Innanzitutto viene completamente dimenticato il ruolo dell'imitazione come risultato della conoscenza incompleta e della razionalità limitata, e quindi delle esternalità cognitive. In secondo luogo, la focalizzazione rigorosamente microeconomica dell'analisi rende difficile apprezzare gli effetti dei sunk costs sugli investimenti di sostituzione, e della domanda sugli investimenti netti, fattori che, insieme con la profittabilità dell'adozione, spingono le imprese alle decisioni di investimento e quindi a diffondere le innovazioni tecnologiche incorporate nei nuovi beni capitali.

Quando si analizzano i fondamenti economici dell'approccio di equilibrio, questo secondo problema si manifesta in tutta la sua rilevanza.

I modelli di equilibrio possono infatti essere considerati alla stregua di una riduzione alla sola visione microeconomica di un approc-

cio più ampio. Le prime specificazioni del modello di equilibrio sono evidentemente influenzate dai «vintage models», come indica la nostra attenta analisi degli scritti di Salter. Trascurando il ruolo degli investimenti come intermediari necessari nel processo di interazione tra il cambiamento tecnologico e la diffusione, i modelli di equilibrio lasciano fuori della prospettiva di analisi economica gli altri fattori macroeconomici che determinano gli investimenti, e quindi la diffusione.

Il nostro modello micro-macro della diffusione di innovazioni di processo, sembra riservare dei vantaggi che non si manifestano esclusivamente all'interno del processo economico di diffusione; esso riesce probabilmente a mettere in luce anche la relazione tra cambiamento tecnologico, investimenti e crescita della produttività. La crescita della produttività, all'interno del nostro approccio, è infatti determinata non solamente dal livello del cambiamento tecnologico e degli investimenti, ma anche dal tasso di diffusione e, più precisamente, dal livello di esternalità cognitive che aiutano ad «infondere l'innovazione nel sistema economico» [Kaldor 1961, 86].

In questa prospettiva sembra che una qualche «infusione» della nuova microeconomia, basata su assunzioni di razionalità limitata e di conoscenza imperfetta, sia indispensabile per afferrare l'essenza dei processi di crescita, prospettati dagli approcci neokeynesiani e kaldoriani in particolare [Targetti 1988]. Questo orientamento sembra essere del tutto appropriato per comprendere i caratteri della relazione tra generazione del cambiamento tecnologico, decisioni di investimento e tasso di crescita del sistema economico. Quando sul mercato compaiono nuove «macchine» generate in modo che il loro utilizzo implichi una certa discontinuità con le tecnologie preesistenti (e di conseguenza la necessità di processi di apprendimento), intervalli temporali nella diffusione, dovuti alla razionalità limitata, e scelte di adozione ritardate, risultano altrettanto determinanti della capacità di generare adeguati livelli di accumulazione del capitale nel definire il livello complessivo di dinamismo di un sistema economico³.

³ L'analisi empirica della diffusione internazionale della nuova tecnologia informatica e delle telecomunicazioni avanzate, tecnologia ad elevata intensità di capitale, ha messo in chiara luce come il contesto macroeconomico dell'adozione dei nuovi beni capitali, abbia un ruolo altrettanto strategico di quello dei fattori microeconomici più rilevanti, quali le esternalità cognitive e la profittabilità dell'adozione. I risultati dell'analisi empirica hanno inoltre mostrato con chiarezza sino a che punto le condizioni macroeconomiche, più specificatamente i fattori che determinano gli investimenti, tramite la diffusione delle più recenti innovazioni tecnologiche, siano una componente strategica del processo cumulativo di crescita. Le possibilità per i paesi in via di sviluppo di trarre vantaggio dai benefici del cambiamento tecnologico, sembrano, nei fatti, radicate nei livelli di accumulazione di capitale che tali paesi sono in grado di sostenere [Antonelli 1990].

Riferimenti bibliografici

- Amendola M. e Gaffard J.L. (1988), *The Innovative Choice: An Economic Analysis of the Dynamics of Technology*, Oxford, Basil Blackwell.
- Antonelli C. (1989a), *The Role of Technological Expectations in a Mixed Model of International Diffusion of Process Innovations. The Case of Open-End Spinning Rotors*, in «Research Policy», n. 5, pp. 273-88.
- (1989b), *Profitability and Imitation in the Diffusion of Process Innovations*, in «Rivista Internazionale di Scienze Economiche e Commerciali».
- (1990), *The International Diffusion of Advanced Telecommunications. Opportunities for Developing Countries*, Paris, OECD.
- Antonelli C. e Ghezzi L. (1987), *Un'analisi teorica dei processi di diffusione tecnologica in regime di monopolio temporaneo*, in «Giornale degli Economisti e Annali di Economia», n. 3, pp. 125-48.
- Antonelli C. e Gottardi B. (1988), *Interazione tra produttori ed utilizzatori nei processi di diffusione tecnologica*, in «L'Industria», n. 4, pp. 599-636.
- Antonelli C., Petit P. e Tahar G., *Technological Investment and Investment Behavior. The Case of Textile Industry*, in «Weltwirtschaftliches Archiv», n. 4, pp. 782-803.
- Antonelli C. e Tahar G. (1990), *The Adoption of Process Innovations and the Competition Selection Mechanism. The Case of the Italian Cotton Weaving Industry 1973-1982*, in «Economic Notes».
- Boyer R. e Petit P. (1981), *Progrès Technique Croissance et Emploi: Un Modèle d'Inspiration Kaldorienne pour Six Industries Européennes*, in «Revue Economique», novembre, pp. 1113-53.
- David P.A. (1975), *Technical Change Innovation and Economic Growth*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Davies S. (1979), *The Diffusion of Process Innovations*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Feldstein M.S. e Foot D.K. (1971), *The Other Half of Gross Investment: Replacement and Modernization Expenditures*, in «Review of Economics and Statistics», febbraio, pp. 49-58.
- Griliches Z. (1957), *Hibrid Corn: An Exploration in the Economics of Technological Change*, in «Econometrica», ottobre, pp. 505-22.
- Kaldor N. (1972), *The Irrelevance of Equilibrium Economics*, in «Economic Journal», dicembre, pp. 1237-55.
- Koizumi S. (1968), *Technical Progress and Investment*, in «International Economic Review», febbraio, pp. 68-81.
- Mansfield E. (1968), *Industrial Research and Technological Innovation*, New York, W.W. Norton.
- Ricottilli M. (1988), *Le decisioni di investimento per la sostituzione di impianti superati dal progresso tecnico: il problema della scelta del tempo*, in «Economia Politica», n. 3, pp. 387-409.
- Salter W.E. (1960), *Productivity and Technical Change*, London, Cambridge University Press.
- Schiller R.J. e Pound J. (1989), *Survey Evidence on Diffusion of Interest and Information among Investors*, in «Journal of Economic Behavior and Organization».
- Simon H.A. (1982), *Models of Bounded Rationality*, Cambridge, MIT Press.

- Stiglitz J.E. (1989), *Markets, Market Failures and Development*, in «American Economic Review», maggio, pp. 197-203.
- Stoneman P. (1983), *The Economic Analysis of Technological Change*, London, Oxford University Press.
- Stoneman P. e Ireland N.J. (1983), *The Role of Supply Factors in the Diffusion of New Process Technology*, in «Economic Journal», marzo, pp. 66-78.
- Targetti F. (1988), *Nicholas Kaldor*, Bologna, Il Mulino.
- Williamson O.E. (1985), *The Economic Institutions of Capitalism*, New York, Free Press.