

RICERCA IN FISICA DELLE ALTE ENERGIE: RICADUTE SULLA SOCIETA' CIVILE ¹ di Ugo Amaldi

¹ Rielaborazione di un contributo presentato alla "International Europhysics Conference on High Energy Physics" 15-21 luglio 1999, Tampere, Finlandia

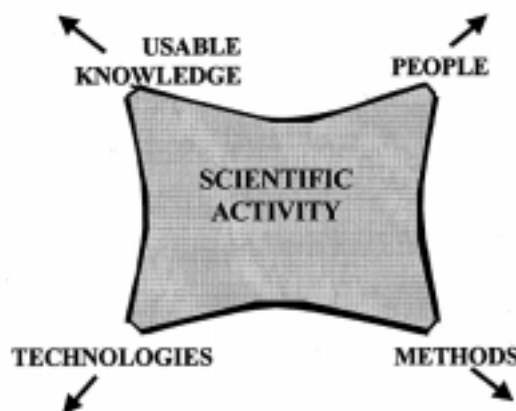
Si chiede sempre più frequentemente agli scienziati di indicare quali sono gli sviluppi della ricerca di base che possono avere una ricaduta sulla società civile. Perché la risposta sia efficace è importante organizzare in uno schema coerente i molteplici aspetti del trasferimento tecnologico delle conoscenze scientifiche. In questo articolo le ricadute della ricerca in fisica delle particelle elementari verso altre discipline scientifiche e verso l'industria sono raggruppate in quattro filoni: conoscenza direttamente utilizzabile, risorse umane, metodi e tecnologie. Dopo aver trattato questi aspetti, con esempi e suggerimenti sui possibili modi per migliorare la qualità e la quantità delle ricadute, si discutono i percorsi attraverso i quali gli sviluppi e le tecniche della ricerca di base giungono alla società.

INTRODUZIONE

Nessuno scienziato, che si occupa di ricerca fondamentale, dubita del fatto che la ricerca in generale, e la fisica delle alte

energie (High Energy Physics, HEP, o fisica delle particelle) in particolare, debba essere perseguita al solo fine di conoscere e godere intellettualmente il mondo nel quale viviamo.

Figura 1. Ogni attività scientifica è caratterizzata da quattro flussi di ricadute. Il loro impatto e la loro importanza variano con il tipo di ricerca scientifica e con il tempo.



Tuttavia da circa vent'anni, con il cambiare della società, sia i politici che la pubblica opinione hanno cominciato a chiedere con sempre maggiore insistenza a noi ricercatori di

- descrivere meglio ciò che facciamo e impariamo,

- spiegare i vantaggi che derivano, e che ci si può aspettare derivino in futuro, dai finanziamenti stanziati per la ricerca in fisica fondamentale,
- organizzare la ricerca fondamentale in modo da massimizzarne i benefici per la società.

U.Amaldi: Ricadute della ricerca di base 1

Quest'articolo prende in esame la seconda e terza domanda, che insieme possono essere facilmente sintetizzate con una sola parola: *ricadute*.

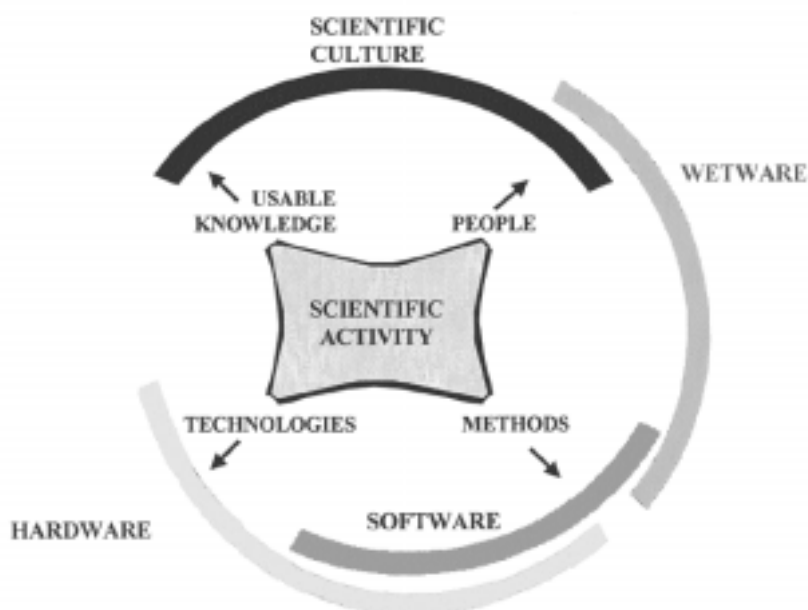
Mi propongo di presentare una visione generale e sistematica dell'impatto pratico che la fisica delle particelle ha in altri campi delle scienze e dell'industria, di dare esempi, descrivendo le tendenze attuali, e di indicare alcune linee guida ai responsabili delle istituzioni, che si occupano di fisica delle alte energie, per migliorare la situazione.

La figura n. 1 schematizza i quattro flussi di ricadute che nascono da qualsiasi attività scientifica. Le quattro espressioni

"conoscenza direttamente utilizzabile", "risorse umane", "metodi" e "tecnologie" sono anche i titoli dei prossimi quattro capitoli.

Come rappresentato nella successiva figura 2, questi quattro aspetti sono collegabili a quattro attività del genere umano: la costruzione della nostra "cultura scientifica", il miglioramento delle capacità intellettuali dell'uomo (del suo "wetware"), lo sviluppo di tecniche "software" e l'introduzione di nuovo "hardware".

Figura 2. Le quattro ricadute di ogni attività scientifica sono connesse con quattro attività del genere umano: la costruzione di una cultura scientifica unica, lo sviluppo delle capacità intellettuali ("wetware") e la crescita del patrimonio mondiale di tecnologie *software* e *hardware*.



1. CONOSCENZA DIRETTAMENTE UTILIZZABILE

La storia offre un'ampia gamma di bellissimi esempi di utilizzazione quasi

immediata del sapere scientifico in applicazioni pratiche. La tabella 1 elenca alcuni casi di ricaduta di quel campo della ricerca scientifica che oggi è chiamato "*fisica delle alte energie*". I primi due casi sono ben

U.Amaldi: Ricadute della ricerca di base 2

conosciuti. Il terzo è più problematico, in quanto possibili applicazioni pratiche della scoperta degli antiprotoni, in particolare

degli antiprotoni "intrappolati", sono state ripetutamente proposte nel corso degli anni.

Tabella 1. Esempi di ricadute dirette della conoscenza scientifica e indicazione del periodo di tempo intercorso tra la scoperta scientifica e la sua applicazione pratica.

Esempio	Uso	Tempo intercorso prima dell'applicazione
Raggi X	Immagini per diagnostica medica	0,2 anni
Fissione nucleare	Produzione di energia	3 anni
Scoperta dell'antiprotone	Immagazzinamento di energia	>50 anni
Fissione indotta da muoni	Produzione di energia	infinito

Tuttavia non se ne conosceva un'applicazione concreta fino al maggio 1999, quando il Centro di volo Spaziale Marshall della NASA di Huntsville annunciò alla stampa che "è in corso di sperimentazione la propulsione laser e l'antimateria come soluzioni pratiche utilizzabili per i viaggi spaziali"².

Nel 1956 è stata scoperta la possibilità di creare ³He attraverso la fusione di un protone e di un deutone³; Louis Alvarez raccontò in seguito: "vivemmo per qualche giorno un'esperienza eccitante quando pensammo di aver risolto per sempre i problemi energetici dell'umanità"⁴. Sfortunatamente è stato in seguito mostrato che, anche nella reazione energeticamente più favorevole $d+^3\text{H}\rightarrow^4\text{He}+n$, la probabilità che un muone rimanga agganciato al nucleo di elio così prodotto è piuttosto elevata⁵. Quindi anche se la massa del muone fosse più piccola di 106 Mev, la sua vita media corrispondentemente più lunga aiuterebbe ma non risolverebbe i problemi energetici dell'umanità a causa di questa elevata probabilità di agganciamento al nucleo.

Al momento i fisici delle particelle stanno dando gli ultimi ritocchi al *Modello Standard* delle particelle e delle forze, ma è difficile per ora definire quanto di direttamente

utilizzabile esso contiene. La chimica moderna è basata sulla comprensione quantistica della struttura degli atomi e la fissione non potè essere utilizzata per produrre energia senza una comprensione chiara della struttura intima del nucleo. Recentemente, i dati sulla diffusione di elettroni raccolti presso DESY con il collisore elettrone-protone HERA hanno mostrato che, a quantità di moto frazionali $x < 10^{-5}$, un protone veloce contiene decine di quarks e antiquarks; nessuno sa però cosa fare in pratica di questa affascinante scoperta.

Vi è comunque un aspetto del *Modello Standard* che potrebbe trovare applicazione in un futuro lontano. Nel 1983 quattro prestigiosi studiosi (A. de Rújula, S.L. Glashow, R.R. Wilson e G. Charpak) pubblicarono un corposo numero di *Physics Reports*⁶. Il contenuto di tale rapporto risulta chiaro una volta spiegati gli acronimi usati. GEOTRON è un protosincrotrone da 10 TeV, eventualmente immerso in acque profonde, che può dirigere un fascio di neutrini di energia dell'ordine di un TeV attraverso la terra verso un luogo specifico. GENIUS è la sigla di "*Geological Explorations by Neutrino-Induced Underground Sounds*" (esplorazione geologica tramite onde sonore sotterranee indotte da fasci di neutrini), mentre GEMINI significa "*Geological Exploration by Muons Induced by Neutrino Interactions*" (esplorazione geologica per

² Holden, C., *Nature*, 284, 145 (1999).

³ Alvarez, L., *Phys.Rev.* 105, 1127 (1957).

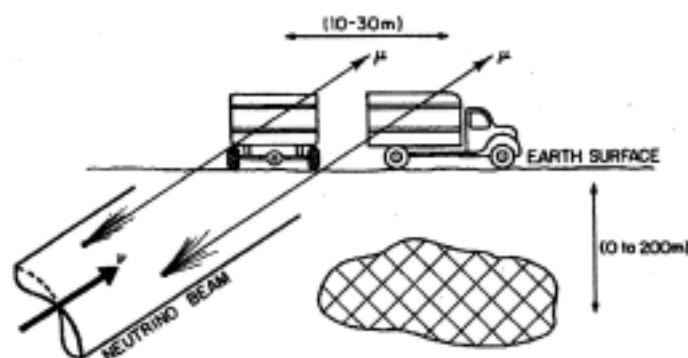
⁴ Alvarez, L., *Evolution of Particle Physics*, New York and London: Academic Press, 1970, pp.1-49.

⁵ *Proceedings of the Workshop on Low Energy Muon Science - LEMS 93*, M. Leon ed., New Mexico: Los Alamos, 1994.

⁶ De Rújula, A., Glashow, S.L., Wilson, R.R., Charpak, G., *Phys. Reports* 99(6), 341-396 (1983).

mezzo di muoni prodotti da interazioni di neutrini). In figura 3 è mostrato come sia possibile utilizzare tale schema per trovare riserve di petrolio sotterranee. Tale schema potrebbe inoltre trovare un'applicazione

Figura 3. Il progetto GEMINI impiegherebbe grandi rilevatori di muoni, montati su camion, per studiare gli strati superiori della terra.



scientifica con GEOSCAN, la sonda a neutrini da utilizzare per misurare il profilo di densità del pianeta terra.

E' possibile che una qualche conoscenza direttamente utilizzabile venga da scoperte che provino l'esistenza di nuova fisica al di là del *modello standard*? Tutte le proposte pubblicate riguardano la produzione di energia. Per esempio, se esistessero veramente i monopoli magnetici, questi potrebbero catalizzare il decadimento dei protoni; nel 1984 tale processo è stato riesaminato da Curtis Callan⁷. In generale molti tipi di particelle cariche a lunga vita media potrebbero catalizzare la fusione, come proposto per la prima volta da Frank e Sakarov negli anni quaranta. Soluzioni non stabili della cromo-dinamica quantistica chiamate 'Q-balls' avrebbero un numero barionico globale⁸ e potrebbero produrre energia quando alimentate con nucleoni.

Considerando il quadro di insieme non è certamente escluso che nuove scoperte possano allargare il contesto attualmente piuttosto ristretto del *Modello Standard*,

⁷ Callan, C., "Catalysis of Baryon Decay", Princeton University Report (1983).

⁸ Kusenko, A., and Shaposhnikov, M., *Phys. Lett.* B418, 46 (1998).

portando a dei ritorni pratici di grande rilievo. Anche se la maggior parte degli scienziati coinvolti nella fisica delle alte energie dubitano che tale sogno possa realizzarsi, la risposta finale resta affidata ai futuri esperimenti.

2. RISORSE UMANE

Gli altri campi della ricerca scientifica e molte industrie sono interessati ad assumere fisici e ingegneri che abbiano lavorato in progetti di fisica delle alte energie. Sono state fatte delle indagini più o meno formali per capire la ragione di tale interesse ed è stato rilevato⁹ che queste persone sono ricercate per vari motivi:

1. il pensiero analitico e l'approccio sistematico ai nuovi problemi,
2. l'esperienza nel progettare e portare a termine progetti complessi,
3. l'abitudine a documentare e a presentare

⁹ "Basic Science and Technology Transfer, Means and Methods in the CERN Environment", F. Bourgeois ed., CERN/BLIT/98-101, Febbraio 1998.

- il lavoro svolto,
4. l'esperienza in gruppi di lavoro internazionali che operano ai limiti della conoscenza,
 5. le conoscenze specifiche scientifiche e tecnologiche.

È interessante notare come la conoscenza di fisica delle alte energie non sia la ragione principale di interesse. Nel campo della ricerca stessa tale conoscenza è assolutamente necessaria, ma se si vuole contribuire alla ricaduta della ricerca di base sulla società, devono essere coltivate le altre quattro qualità.

Vi sono tre categorie di persone coinvolte: *i giovani ricercatori o borsisti, i ricercatori e gli ingegneri maturi, il personale dirigente.*

Gli studenti europei e quelli americani hanno atteggiamenti completamente diversi per ciò che riguarda la creazione di una propria società. Uno studio ha mostrato che il 92% dei borsisti di ingegneria e di facoltà scientifiche dell'Università di San Diego è propensa a costituire una propria società, mentre soltanto l'8% dei borsisti svizzeri farebbe altrettanto¹⁰.

Tale atteggiamento è considerato un handicap per l'Europa e si è dato vita a varie iniziative per cercare di modificare la situazione. Tra queste, la decisione presa dal CERN nel marzo 1999 è molto interessante: incoraggiare il formarsi di società di giovani

ricercatori, che lasciano il CERN alla fine del loro primo impiego, fornendo loro una formazione sui diritti di proprietà intellettuale e sulla libera impresa.

Tutto ciò è utile non soltanto ai borsisti ma anche al personale più giovane (in maggioranza ricercatori e ingegneri provenienti dagli Istituti europei) in quanto in buona parte di essi lascia (o deve lasciare) la ricerca in fisica delle particelle dopo 5-6 anni. Essi hanno così avuto il tempo di assorbire i vari aspetti tecnologici e comportamentali della ricerca in fisica delle particelle e sono pronti ad applicare nuove metodologie negli istituti e imprese dove lavoreranno. Uno di loro, diventato il direttore di produzione della Philips, ha detto: "*dopo aver lavorato al CERN per alcuni anni, la parola impossibile non fa più parte del tuo vocabolario*"¹¹.

Per quel che riguarda gli studenti va sottolineato che ogni anno sono presentate circa 300 tesi sperimentali di dottorato basate su dati raccolti al CERN. Le collaborazioni sperimentali DELPHI ed OPAL, che comprendono circa 500 fisici ognuna e lavorano al collisore LEP, hanno analizzato il numero degli studenti in funzione del tempo, della nazionalità e della loro prima occupazione. La tabella 2 mostra i dati raccolti da Tiziano Camporesi della collaborazione DELPHI.

¹¹ Ref. 9, p. 15.

¹⁰ Ref. 9, p. 22.

Tabella 2. Probabilità di prima occupazione di studenti della Collaborazione DELPHI¹².

Occupazione	Percentuale
Ricerca	52.5
Insegnamento	4.5
Servizio militare	1
Alta tecnologia	21.5
Informatica	11
Affari	2.5
Imprenditoria	2.5
Sconosciuta	6.5

¹² Camporesi, T., non pubblicato

La tabella mostra che, mentre il 50% degli studenti in fisica delle alte energie rimane nel campo della ricerca, circa il 40% trova il primo impiego in campi applicativi. Sulla base dei dati esposti, si può calcolare che in Europa circa 200 studenti l'anno, avendo svolto una tesi in fisica delle alte energie, sono impiegati in società e industrie di alta tecnologia: non bisogna sottovalutare il significato di tale ricaduta sulla società.

A questo punto desidero proporre un'iniziativa che potrebbe facilitare lo sviluppo di questo secondo flusso di ricadute. *Le direzioni delle istituzioni di fisica delle alte energie dovrebbero incoraggiare i "cercatori di cervelli" (i cosiddetti "head hunters") a porre maggiore attenzione ai giovani che lavorano nei nostri laboratori, così da facilitare il processo di mobilità verso le imprese e di sfruttare al massimo le potenzialità umane che la fisica delle particelle è capace di attrarre.* Facendo ciò accadrebbe di perdere alcuni scienziati potenzialmente validi, ma si troverebbe un'occupazione adeguata per molti (che comunque non potrebbero rimanere nel campo) e si avrebbero buoni argomenti per sostenere che la nostra scienza, attraverso l'impiego di persone ben preparate, ha un impatto positivo sulla società.

Da ultimo, e questo è un argomento non meno importante, bisogna considerare gli ingegneri e noti scienziati senior che hanno lasciato la fisica delle alte energie per dirigere istituzioni di prestigio. Gli esempi nel campo della scienza e dell'educazione sono troppo numerosi per essere elencati, ma può essere utile nominarne qualcuno che è passato a dirigere progetti di ricerca applicata: John Adams (che ha diretto negli anni sessanta il progetto britannico sulla fusione), Hans Otto Wurst (Joint European Torus, Culham), Paolo Zanella (Istituto Europeo di Biologia, Cambridge) e recentemente Carlo Rubbia (ENEA, Roma). A proposito del suo nuovo lavoro Zanella ha detto *"Il CERN è un ambiente veramente particolare, nel quale si impara a gestire situazioni difficili. Quando si raggiunge una*

certa età ciò aiuta a risolvere problemi complessi, e questo ho portato nella direzione dell'EBF". Tali persone sono i migliori ambasciatori della fisica delle alte energie e delle sue ricadute sulla società.

3. METODI

Le tecnologie e i metodi della fisica delle particelle diventano sempre più sofisticati in quanto, se da una parte le energie della collisione debbono crescere nel tempo per aprire nuove finestre alla nostra curiosità, dall'altra le sezioni d'urto dei processi interessanti diminuiscono con il quadrato dell'energia disponibile nel centro di massa. Tale conseguenza del principio di indeterminazione di Heisenberg è ulteriormente complicata dalla determinazione dei politici che tendono a ridurre i fondi destinati a tale tipo di ricerca. Il risultato è che, per esempio, il volume di dati da acquisire e analizzare aumenta di più di un fattore 10 ogni dieci anni, mentre il numero di Euro che possono essere spesi diminuisce. La soluzione del puzzle deve essere trovata nel miglioramento delle tecnologie e dei metodi.

Come già sottolineato nella figura 2, vi è un'ampia sovrapposizione tra quelli che vengono chiamati "i nuovi metodi" e lo sviluppo di nuovi strumenti di *software*. Riservando il resto dell'articolo alle tecnologie (che sono essenzialmente le componenti *hardware* del processo di innovazione), il primo metodo da citare può essere condensato in una parola nota al CERN, dove è stata introdotta, e ora conosciuta a livello mondiale: il *Web*¹³. Ma questo non è l'unico caso. In fisica delle alte energie sono utilizzati sofisticati programmi di simulazione, brevemente detti programmi "*di Montecarlo*", per progettare

¹³ Per un interessante descrizione sulla nascita e il primo sviluppo della comunicazione mondiale tramite Internet e la World Wide Web vedere: Hameri, A.-P. and Nordberg, M., *J. Prod. Innov. Manag.* 15, 322-334 (1998).

gli apparati sperimentali e interpretare i dati. Questi "Montecarlo" hanno trovato applicazioni pratiche, nella progettazione dei futuri (futuristici?) reattori basati sulla fusione inerziale e delle sorgenti di spallazione necessarie per l'incenerimento dei rifiuti radioattivi.

Recentemente sono stati utilizzati anche per pianificare i trattamenti con raggi X di pazienti affetti da tumore e, addirittura, per simulare il comportamento delle borse valori. Tali applicazioni sono diventate possibili grazie al basso costo e alle dimensioni ridotte dei calcolatori molto veloci.

La fisica delle alte energie ha anche dato un grande slancio allo sviluppo dei calcolatori paralleli come risposta alla richiesta di potenza di calcolo necessaria ai calcoli della cromo-dinamica quantistica. I metodi, e talvolta anche gli strumenti, per maneggiare quantità enormi di dati e affrontare sofisticate analisi statistiche sono stati usati anche in altri campi della scienza (come la biologia e la meteorologia in particolare), in medicina e nell'industria.

4. TECNOLOGIE

La lista delle tecnologie utilizzate nella fisica delle alte energie è molto lunga¹⁴: ingegneria meccanica, ingegneria elettromeccanica, scienza dei materiali, tecniche di radiofrequenza e ingegneria delle microonde, geodesia, superconduttività, tecnologie criogeniche, tecniche di ultravuoto, rivelatori di radiazione, elettronica, sistemi di calcolatori e reti di calcolatori. Talvolta la ricaduta consiste nell'utilizzare l'innovazione di una di queste tecnologie in un altro campo di ricerca, altre volte il prodotto commerciale è un sistema completamente integrato. Questi due casi sono trattati separatamente nei prossimi due paragrafi.

¹⁴ Barbalat, O., "Technology Transfer from Particle Physics, The CERN Experience 1974-1997", CERN/BLIT/97-1, July 1997.

4.1 Applicazione di una tecnologia particolare

Per quel che riguarda la geodesia è interessante rilevare come alcune delle tecniche sviluppate per il controllo della costruzione dei tunnel sotterranei del CERN sono state poi utilizzate nella realizzazione del tunnel sotto la Manica (Chunnel). Nessuno dubita, inoltre, che le esigenze della HEP siano state di stimolo allo sviluppo di ampi e sofisticati sistemi basati sull'alta conduttività a basse temperature. Tra queste è possibile ricordare l'uso routinario di solenoidi superconduttori per la generazione di immagini con la risonanza magnetica ospedaliera e i primi modelli a scala reale di Maglevs, i treni a levitazione magnetica. Cavi superconduttori a bassa temperatura sono stati anche utilizzati per linee di potenza sotterranea da usare in ambiente urbano, ma probabilmente verranno soppiantati da superconduttori ad alta temperatura, che non sono stati sviluppati nell'ambito della HEP.

La lunga serie di applicazioni delle tecniche di ultravuoto sembra molto significativa. Nel 1998 l'*Interdivisional Group on Accelerators* (IGA) della *European Physical Society* ha premiato Cristoforo Benvenuti per l'invenzione di un nuovo rivestimento, basato su una lega di zirconio, vanadio e titanio, che agisce come una pompa distribuita¹⁵. Tale invenzione apre la strada alla produzione di schermi per computers e televisioni che sono economici e di lunga durata.

Gli sviluppi dei nuovi rivelatori di radiazioni sono numerosi. Le discipline scientifiche che ne hanno maggiormente beneficiato sono la biologia e la medicina. Basti ricordare i tomografi a emissione di positroni basati sui cristalli di BGO, che si è diffuso come rivelatore di raggi gamma in seguito al loro uso nell'esperimento L3 al LEP. Nell'industria le applicazioni più spettacolari sono probabilmente i sistemi

¹⁵ Benvenuti, C. et al., *J. Vac. Sci. Technol. A* 16(1), 148-154 (1998).

venduti da EUROPSCAN (una società creata da Schumberger e Rheinmetall) e installati sia nel porto di Le Havre che nell'aeroporto di Parigi Charles de Gaulle. In questo caso i camion e containers sono ispezionati ai raggi X in pochi minuti con camere proporzionali a fili di molti metri quadrati di superficie.

Molti progetti sono in via di sviluppo come il moltiplicatore a gas di elettroni (GEM detector)¹⁶ per la microradiologia e i rivelatori a stato solido della collaborazione MEDIPIX per la radiografia mammaria e dei denti¹⁷. Per quel che riguarda la auto-radiografia, bisogna considerare che Packard ha venduto più di 500 sistemi MWPC (camere multifili proporzionali). Tali sistemi sono il risultato dell'iniziativa HIDAC, inizialmente introdotta da Alan Jeavons del CERN per il sistema PET dell'Ospedale di Ginevra. Successivamente Jeavons ha creato una Società (*Oxford Positron Systems*) e ha prodotto un sistema di auto-radiografia per Packard. Questa tecnologia sta per essere ora soppiantata da quella basata su rivelatori allo stato solido, mentre i sistemi MWPC sono utilizzati per

radiografare piccoli animali¹⁸.

4.2 Sviluppi di sistemi integrati

Bisogna sottolineare che quando si parla di "sistemi" sia le "tecnologie" che i "metodi" sono coinvolti nel trasferimento di conoscenza alla pratica. I sistemi in questione sono essenzialmente acceleratori di particelle usati in altri campi della ricerca scientifica, della medicina e dell'industria. La lista è lunga: sorgenti di luce di sincrotrone, laser a elettroni liberi (FEL), sorgenti di neutroni di spallazione, impianti di fusione inerziale basati sul bombardamento di sfere di deuterio e trizio con fasci di ioni, acceleratori per l'incenerimento di rifiuti, produzione di isotopi medici e adroterapia.

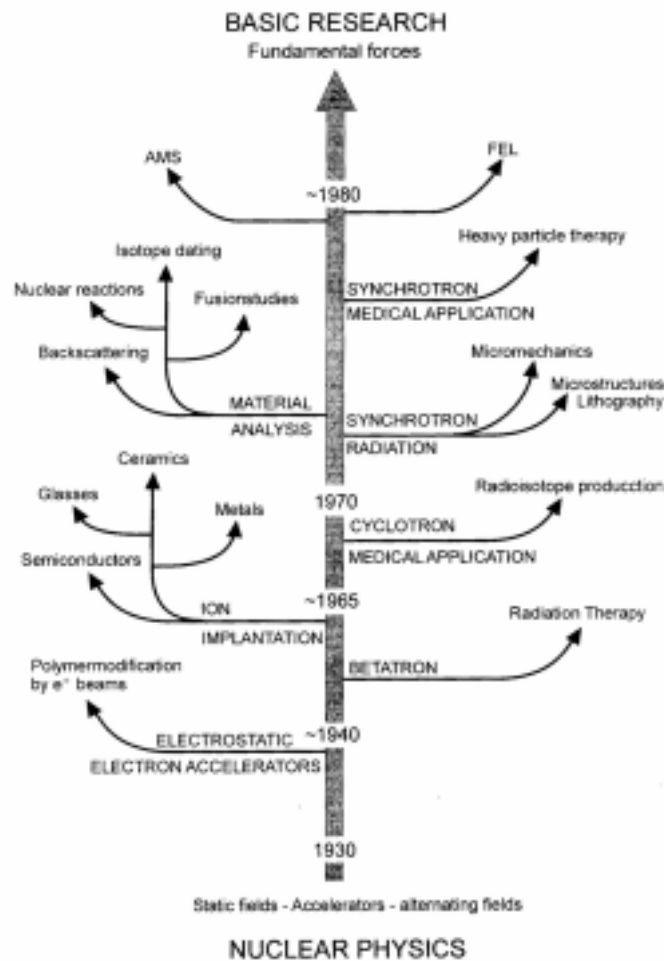
A questo punto, per essere imparziali, bisogna distinguere le ricadute dovute alla fisica nucleare da quelle della fisica delle particelle. Un criterio ragionevole può essere quello di classificare come sviluppati in ambiente di fisica delle alte energie i sistemi che usano acceleratori lineari, sincrotroni e ciclotroni di energia maggiore di qualche centinaio di MeV, come per esempio quello usato al PSI (Villigen, Svizzera)

¹⁶ Bressan A., et al., *Nucl. Inst. Methods* A425, 254-261 (1999). Sauli F., and Sharma A., "Micro-pattern gaseous detectors", *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* 49, 100 (1999).

¹⁷ Amendolia, S.R., et al., *Nucl. Inst. Methods* A434, 14-17 (1999). Mikulec, B., et al., "Characterisation of a Single Photon Counting Pixel System for Imaging of Low-Contrast Objects", CERN preprint CERN-EP/99-167, *Nucl. Inst. Methods*, in stampa.

¹⁸ Jeavons, A., Chandler, R., and Dettmar, C., "A 3D HIDAC-PET Camera with sub-mm resolution for imaging small animals", *IEEE Trans. Nucl. Sci.* NS-46, 1067-1072 (1999).

FIGURA 4. Le applicazioni degli acceleratori di particelle sono mostrate nella figura preparata da K. Bethge per *Nuclear Physics News* 9(1) 20-26 (1999).



D'altra parte i ciclotroni per la produzione di isotopi usati in medicina sono solitamente acceleratori a bassa energia e sono quindi ricadute della fisica nucleare. In questo campo l'Europa è ben piazzata grazie alla ditta *Ion Beam Application* (IBA) che è uno sviluppo del gruppo di fisica nucleare dell'Università di Lovanio. IBA è cresciuta così tanto da acquisire Scanditronix ed altre due società nel campo della sterilizzazione alimentare.

I raggi X prodotti con i "Free Electron Laser" (FEL) apriranno la strada alla generazione di immagini di strutture biologiche di dimensioni molto ridotte. Nel lungo periodo avranno un impatto sulla biologia uguale, se non maggiore, di quello dovuto alle attuali sorgenti di luce di sincrotrone.

Al momento sono allo studio due

progetti basati su acceleratori lineari ad alta intensità: uno è nato dalla collaborazione tra UCLA e l'Università di Stanford e l'altro è frutto della collaborazione tra DESY (Amburgo) e altri laboratori (come quello di Frascati dell'INFN) che studia TESLA, il collisionatore lineare superconduttore di positroni ed elettroni.

Per quel che riguarda le sorgenti di neutroni di spallazione, non è un caso che i due capi progetto siano membri affermati del CERN: Herbert Lengeler per il progetto europeo *European Spallation Source* (ESS) e Philip Bryant per il progetto *AUSTRON*.

Per dare più consistenza alle tesi qui esposte nei due prossimi paragrafi due importanti e recenti sviluppi dei principali strumenti della fisica delle particelle saranno esposti in dettaglio; si tratta in entrambi i casi di progetti nel campo delle

applicazioni pratiche di sistemi completi di acceleratori, di cui ho una qualche esperienza diretta.

4.3 L'amplificatore di energia

L'amplificatore di energia è un'apparato sub-critico a neutroni veloci che utilizza torio naturale come combustibile e piombo come bersaglio di neutroni di spallazione, come moderatore, come scambiatore di calore e come mezzo di confinamento dei neutroni. Il disegno è stato ottimizzato per eliminare, attraverso la fissione, la principale componente dei rifiuti radioattivi, gli elementi transuranici (TRU), producendo contemporaneamente anche energia. La potenza standard di un amplificatore di energia è di 1500 MW mentre la potenza di fascio necessaria è tra 10 e 20 MW.

L'esperimento FEAT¹⁹ ha mostrato che il guadagno di energia ottimale si ottiene con protoni di energia superiore a 0.9 GeV. In un sistema di questo tipo, che distrugge elementi transuranici, la radiotossicità a lunga vita media (superiore a 500 anni) dei rifiuti radioattivi è dominata da frammenti di fissione a lunga vita media (LLFF), che possono essere distrutti solo da un decadimento nucleare a seguito di una cattura neutronica.

È stato proposto uno schema, detto *Adiabatic Resonance Crossing* (ARC)²⁰, per massimizzare l'efficienza di trasformare LLFF in elementi stabili attraverso la trasmutazione indotta da neutroni. Il tasso

di cattura di neutroni, R_{capt} , può essere aumentato massimizzando ognuno dei fattori rilevanti di $R_{\text{capt}} \equiv \int \Phi(E,t) \sigma(E) dE$, cioè

- il flusso di neutroni $[\Phi(E,t)]$ attraverso la scelta di un mezzo pesante (il piombo), 'contenitore di neutroni', con alto numero di massa, grande sezione d'urto elastica per neutroni (cammino libero medio ~ 3 cm) e alta trasparenza ai neutroni stessi;
- la sezione d'urto di cattura $[\sigma(E)]$ dell'elemento da trasmutare per mezzo di un uso efficiente delle risonanze. Questo è reso possibile dalle piccolissime e numerosissime perdite di energia subite dal neutrone nel corso del processo di rallentamento nel piombo.

Il principio di funzionamento ARC è stato controllato con successo al CERN dall'esperimento PS211 (TARC)²¹. Campioni di ⁹⁹Tc e ¹²⁹I (i due elementi che rappresentano il 95% del problema dovuto ai LLFF) sono stati trasmutati con la frequenza aspettata al fascio del PS del CERN.

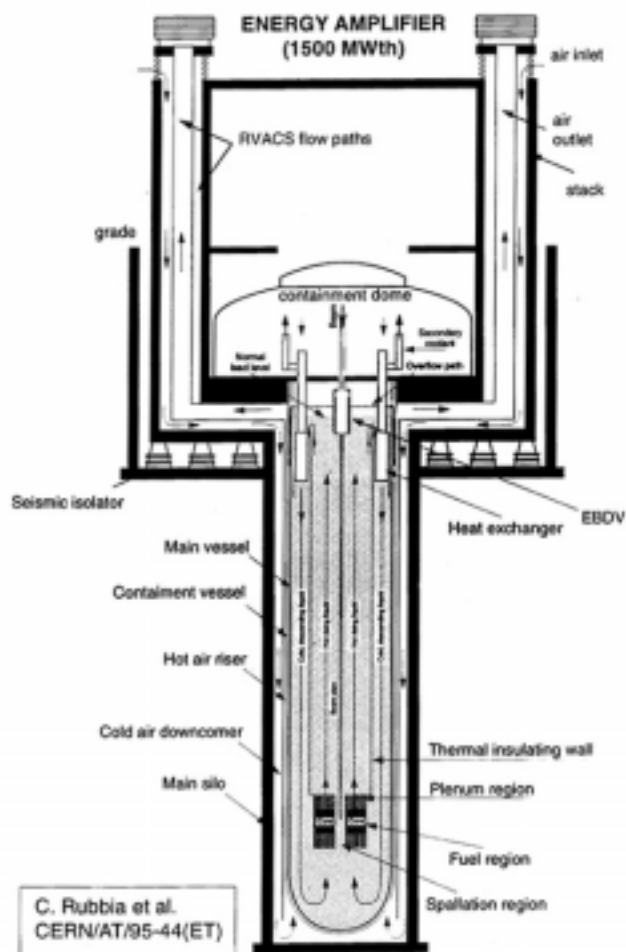
Il metodo funziona per ogni sorgente di neutroni e richiede soltanto che il meccanismo di rallentamento del neutrone sia quello tipico di elementi presenti

¹⁹ Rubbia, C. et al., "Conceptual Design of a Fast Neutron Operated High Power Energy Amplifier", CERN/AT/95-44(ET), Sept.29, 1995; vedere anche Rubbia, C., "A High Gain Energy Amplifier Operated with fast Neutrons", AIP Conference Proc. 346, Int. Conf. On ADT Technologies and Applications, Las Vegas, 1994.

²⁰ Andriamonje, S. et al., *Phys. Lett.* B348, 697-709 (1995)

²¹ Rubbia, C., "Resonance Enhanced Neutron captures for Element Activation and Waste Transmutation". CERN/LHC/97-04 (EET), June 22, 1997. Arnould, H. et al., "Experimental Verification of Neutron Phenomenology in Lead and Transmutation by Adiabatic Resonance Crossing in Accelerator Driven Systems", *Phys.Lett.*, B458, 167-180 (1999)

FIGURA 5. Schema di un amplificatore di energia



quali il piombo. È stato mostrato che queste condizioni sono soddisfatte nell'amplificatore di energia anche al di fuori del nocciolo. La simulazione sviluppata dal gruppo EET e confermata dai risultati sperimentali degli esperimenti FEAT e TARC hanno mostrato la possibilità di incenerire ^{99}Tc e ^{129}I in queste zone a un ritmo doppio rispetto a quello con cui questi elementi sono prodotti nel nocciolo. Ciò rende possibile la riduzione dell'accumulo di LLFF in maniera parassitaria e minimizza il costo del processo.

Nel campo della medicina, gli elementi radioattivi sono sempre più usati in diagnostica, radioterapia e terapia del

dolore. Questi elementi possono essere prodotti attraverso la cattura di neutroni su elementi stabili ricorrendo alla stessa tecnica ARC usata nella distruzione di LLFF, ma applicandola al procedimento inverso. Questa strada rappresenta un'alternativa alla produzione presso i reattori nucleari. Il CERN ha ottenuto un brevetto per questo procedimento di produzione di isotopi radioattivi a scopi medici.

Il disegno di un prototipo di amplificatore di energia di potenza moderata (da 80 a 100 MW) sta procedendo. Tre anni fa è stato creato un comitato di esperti e un comitato tecnico a livello europeo nei quali sono coinvolti undici

paesi. Recentemente lo STOA del parlamento europeo ha ordinato uno studio indipendente. Lo studio, accolto con unanimità di giudizio dalla comunità scientifica internazionale, raccomanda la realizzazione di un prototipo di amplificatore di energia allo scopo di eliminare scorie radioattive. Così questa ricaduta della fisica delle alte energie muove i primi passi verso la realizzazione.

4.4 Radioterapia con ioni di carbonio

Un altro sviluppo recente è legato all'adroterapia, la moderna tecnica di radioterapia oncologica che usa fasci di adroni al posto di raggi gamma convenzionali (prodotti in una targhetta pesante e spessa da elettroni di energia tra 5 e 20 MeV accelerati con un linac a 3 GHz). Le curve dose-in-profondità di fasci di protoni e ioni sono completamente diverse da quelle dei fotoni, in quanto queste particelle cariche subiscono poca dispersione quando penetrano nella materia e rilasciano la maggiore densità di dose alla fine del proprio percorso, nel ben noto picco di *Bragg*. Variando l'energia delle particelle durante l'irradiazione, molte curve di *Bragg* strette possono essere sovrapposte fino a formare un picco di *Bragg* allargato (*Spread-Out Bragg Peak*, SOBP) che può coprire un tumore di spessore qualsiasi. Per raggiungere tumori sviluppati in profondità, fasci di protoni e di ioni carbonio devono avere un'energia non inferiore rispettivamente a 200 MeV e 4500 MeV (375 MeV/u) rispettivamente. Tali energie implicano che si possano usare ciclotroni per la terapia con protoni, mentre per accelerare ioni a una energia sufficiente sono necessari sincrotroni.

E' interessante osservare che la prima proposta è stata pubblicata nel 1946 in una rivista di radiologia ("*Radiology*") da Bob Wilson, che successivamente fu il costruttore e il primo direttore di Fermilab. La situazione attuale è stata presentata in un recente articolo di rivista²². Sinora circa 25.000 pazienti sono stati trattati in tutto il mondo con fasci di protoni e in una dozzina di tipi di tumore la terapia con protoni è una modalità radioterapeutica riconosciuta basata su protocolli ben definiti. Alcune imprese, quali la belga IBA, vendono sistemi chiavi in mano pronti all'uso.

Il primo centro a base ospedaliera divenuto operativo è il Centro Medico dell'Università Loma Linda (costo totale circa 80 milioni di dollari USA), basato su un sincrotrone di 7 metri di diametro progettato presso il Fermilab; nel 1999 ha raggiunto la fase operativa trattando circa 1000 pazienti in un anno (in media ogni paziente va al centro per 20 trattamenti distribuiti su 4 settimane). Tre sale sono state equipaggiate con supporti mobili per sistemi magnetici rotanti di circa 10 metri di diametro e 100 tonnellate di peso detti "testate isocentriche". Negli Stati Uniti e in Giappone sono attivi o si stanno costruendo altri centri, di modo che la situazione generale dovrebbe essere in un paio di anni quella descritta nelle figure 6 e 7.

Bisogna sottolineare che negli Stati Uniti si sono scelti solo centri per la terapia con i protoni, mentre in Giappone viene usata la terapia con gli ioni carbonio (sia a HIMAC, vicino Tokio, che presso il centro Hyogo, attualmente in costruzione vicino Kobe), come si può rilevare dalla figura 7.

²² Amaldi, U., *Nucl. Phys.*, A654, 375c-399c (1999).

FIGURA 6. Distribuzione dei centri di adroterapia nel nord America prevista per l'anno 2003.

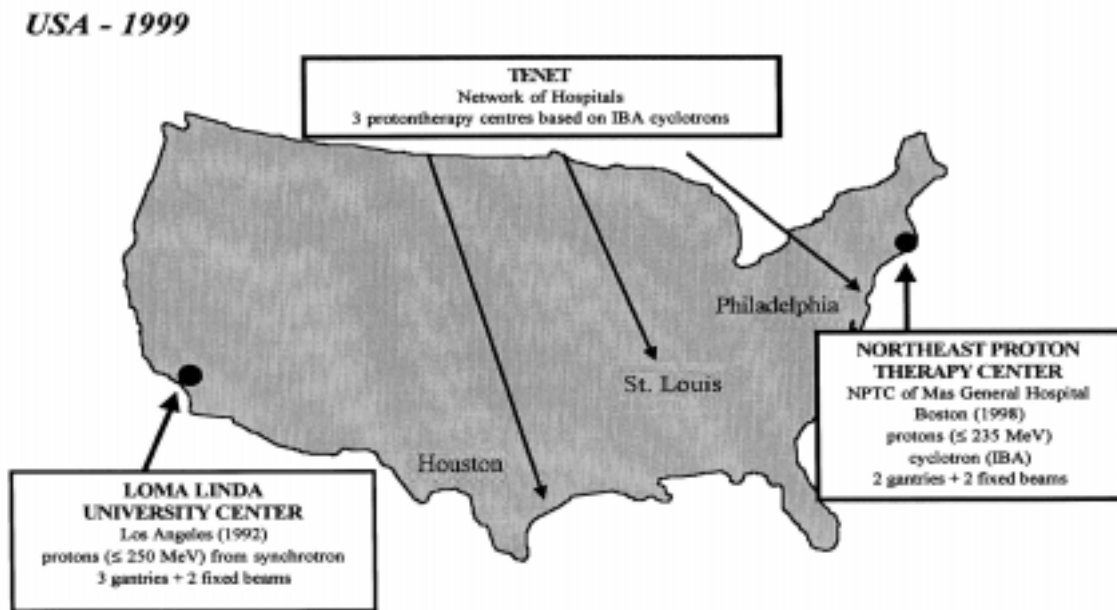
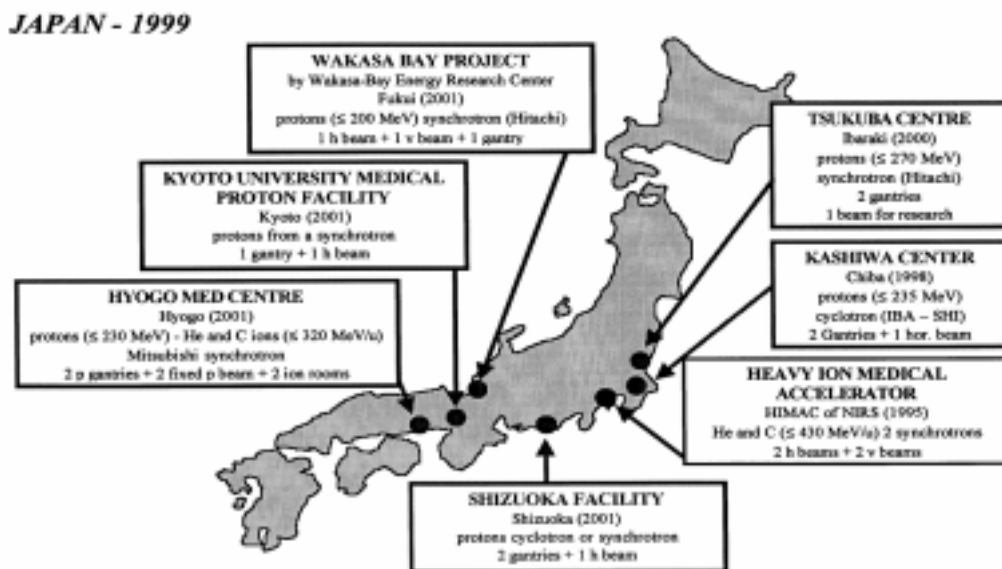


FIGURA 7. Dei sette centri giapponesi di adroterapia, due si basano su sincrotroni che accelerano ioni carbonio: HIMAC and Hyogo.



Perché ioni carbonio? Le caratteristiche che rendono i fasci di ioni leggeri clinicamente interessanti sono la minore diffusione laterale e il maggiore LET (con

LET viene indicato il “*Linear Energy Transfer*”, il potere di frenamento misurato dai fisici in MeV/cm e dai radiobiologi in KeV/micron. Alte LET, e quindi alte densità

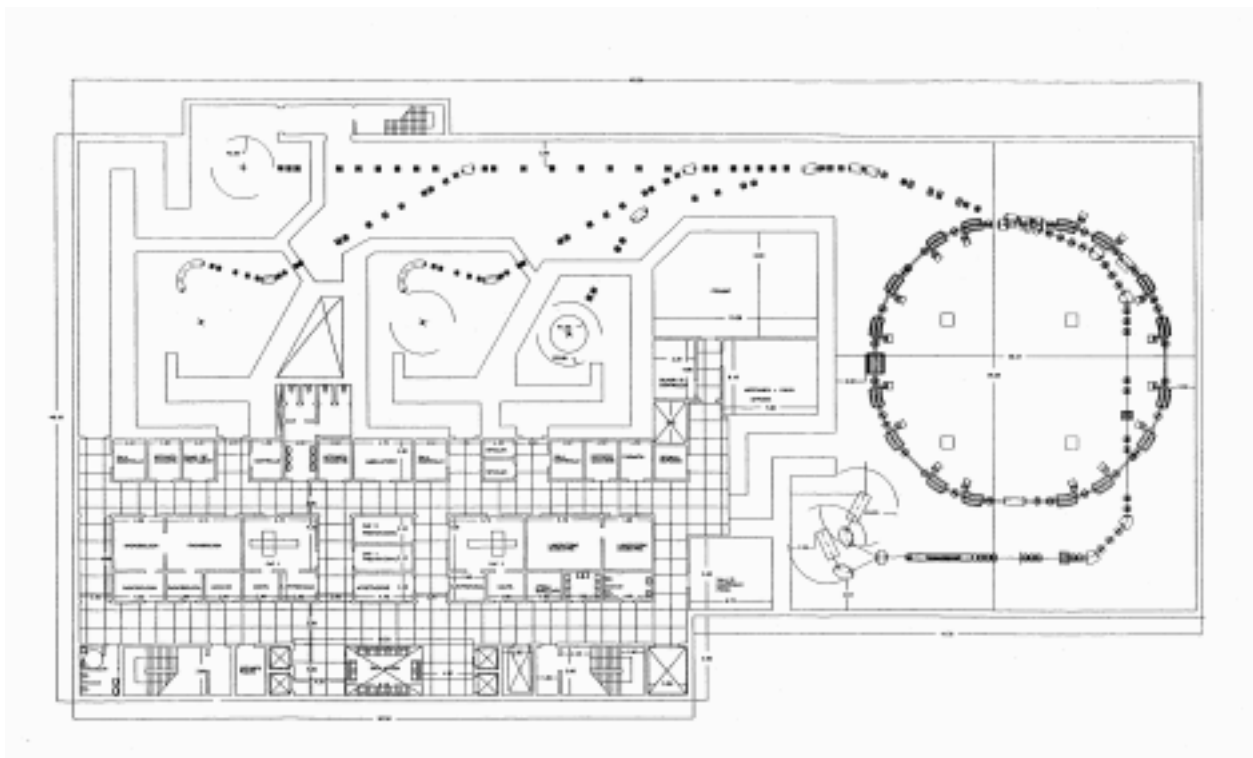
di ionizzazione, possono essere vantaggiose in quanto normalmente implicano una maggiore efficacia biologica relativa (RBE, *Relative Biological Effectiveness*). La tecnica radiobiologia che viene applicata è piuttosto complicata, ma basti dire che quando il LET è maggiore di 100 - 200 MeV/cm, la densa colonna di ionizzazione prodotta lungo la traiettoria della particella ha come conseguenza una rottura multipla della doppia catena del DNA attraversato. L'effetto sulla cellula è quindi *qualitativamente* diverso da quello indotto da tutti gli altri tipi di irradiazione più diffusi, come quelli indotti da protoni e da raggi X, i quali danno origine a rotture di una catena singola del DNA, spesso riparabili. In particolare ioni carbonio, che si può far vedere sono la scelta migliore, sono adatti al trattamento di quelle situazioni cliniche nelle quali la radio-resistenza di cellule tumorali ipossiche rappresenta un problema di difficile soluzione sia con radiazioni convenzionali sia con protoni. All'HIMAC fino alla fine del 1999 circa 700 pazienti

affetti da glioma cerebrale, tumori dell'area cervico-cefalica, polmoni, fegato, prostata e tumori alla cervice uterina sono stati trattati con buoni risultati e senza effetti secondari rilevanti.

In Italia dal 1993 la Fondazione TERA ha promosso la costruzione di un centro di adroterapia (CNAO) basato su un sincrotrone capace di accelerare sia i protoni che gli ioni carboni²³. Alla fine del 1995 TERA ha suscitato l'interesse del CERN nel progetto di un sincrotrone ottimale e uno studio è stato quindi iniziato al CERN sotto la direzione di P. Bryant. PIMMS (*Proton Ion Medical Machine Study*) è una collaborazione tra CERN, GSI (Germania), Med-AUSTRON (Austria), Oncology 2000 (Repubblica Ceca) e TERA. Lo studio è stato completato alla fine del 1999 ed è stato utilizzato da TERA per presentare nel 1997 un progetto da realizzare in Italia (figura 8).

²³ "The TERA Project and the Centre for Oncological Hadrontherapy", U. Amaldi and M. Silari eds., Frascati: INFN, 1995.

FIGURA 8. Il progetto TERA per il CNAO (Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica) si basa sul disegno del sincrotrone progettato da PIMMS. Saranno installate due testate isocentriche per protoni e la sala di trattamento con gli ioni verrà sistemata alla fine del corridoio di trasporto del fascio, il quale sarà prolungato in un secondo tempo in modo da consentire l'installazione in un edificio adiacente di una testata isocentrica per ioni.



In Europa l'adroterapia è molto meno sviluppata che negli Stati Uniti o nel Giappone. Nonostante IBA sia una Società belga, la terapia in profondità con i protoni è utilizzata solo a Orsay e Uppsala e tali centri non dispongono di sistemi magnetici rotanti. L'unica struttura con testate rotanti è quella del PSI (Villigen) dove è stato messo in opera un nuovo metodo di scansione per la distribuzione del fascio.

All'inizio del 1999 il gruppo AUSTRON ha presentato alle autorità austriache una proposta per costruire un centro per il trattamento con protoni e ioni basato sul

progetto PIMMS. La decisione se costruire o no Med-AUSTRON dovrebbe essere presa entro l'anno 2000²⁴.

Fortunatamente l'Europa non è invece affatto indietro rispetto USA e Giappone nello sviluppo delle nuove tecniche di adroterapia.

²⁴ "Med-AUSTRON, Ein Österreichisches Krebsforschungs und Behandlungszentrum zur Hadrontherapie in Europa", R. Pötter, T. Auberger and M. Regler eds., Wiener Neustadt: Med-Austron, 1998.

FIGURA 9. Il Centro di Heidelberg avrà tre sale per i trattamenti, due delle quali avranno testate isocentriche per gli ioni carbonio, di circa 11 metri di diametro²⁵

²⁵ "Proposal for a Dedicated Ion Beam Facility for Cancer Therapy", K.D. Gross and M. Pavlovic eds., Darmstadt: GSI, 1998.

In effetti, nel 1998 il laboratorio di fisica nucleare GSI di Darmstadt ha reso operativo un sistema di distribuzione attivo dei fasci di ioni carbonio. Nell'ambito di questo "progetto pilota" circa 50 pazienti sono stati trattati fino alla fine del 1999. Nel settembre del 1998 GSI, in collaborazione con la Clinica oncologica DKFZ di Heidelberg, ha presentato alle autorità tedesche il progetto di un nuovo centro medico per il trattamento con ioni carbonio (Fig. 9). I proponenti hanno fiducia in un finanziamento entro la fine del 2000.

Le varie applicazioni dell'amplificatore di energia e lo sviluppo di nuovi centri di radioterapia basati sugli ioni carbonio sono due tipici esempi di recenti ricadute della fisica delle alte energie sotto forma di sistemi completi nei quali metodi e tecnologie sono del tutto integrati.

5. I PERCORSI DEL TRASFERIMENTO TECNOLOGICO

I quattro flussi di ricadute filtrano nella società attraverso diversi percorsi: *conoscenza, metodi e tecnologie* sono trasferiti tramite pubblicazioni tecniche e scientifiche, seminari, conferenze e spesso attraverso contatti personali; le persone che mutano attività portano con sé le proprie conoscenze, i metodi e le tecnologie così come i modelli di azione e il know-how in generale. Tutti questi percorsi generalmente non sono né programmati né programmabili dalle direzioni degli Istituti scientifici coinvolti. In questo contesto può essere quindi più opportuno parlare di "traboccamento" anziché di "trasferimento", sottolineando la natura spesso casuale di tali processi.

Esempi di trasferimento tecnologico possono essere ritrovati nell'applicazione di tecniche a semiconduttori sviluppate da fisici delle particelle. Due di loro traggono origine dagli sviluppi strumentali nel quadro della collaborazione DELPHI al LEP del CERN. All'inizio degli anni '80 T.Buran, dell'Università di Oslo, propose una

collaborazione al suo vecchio collega T.E.Hansen, dell'Istituto norvegese SI, per lo sviluppo di un chip al silicio di silicene necessario per il rivelatore Small Angle Tagger (SAT) dell'esperimento DELPHI. Nel 1985 Hansen si trasferì all'AME (AS), il ramo commerciale di SI responsabile delle produzioni con silicio. Il risultato di tale collaborazione fu che AME si aprì a nuovi mercati quali lo spazio, la difesa e le industrie tecnologiche, realizzando in poco tempo un bilancio di quasi 10 milioni di Euro all'anno.

Un'altra società di punta norvegese che collaborò con DELPHI è IDE (*Integrated Detector and Electronics AS*). Questa società è stata fondata nel 1992 da un gruppo di persone, tra cui E. Nygard, che aveva lavorato come borsista presso il CERN su un chip integrato di lettura per il rivelatore SAT, sviluppando il chip VIKING. Questa piccola società formata da 17 dipendenti oggi vende elettronica *self-triggering* usata in applicazioni per la gestione d'immagini in fisica delle alte energie, nella ricerca spaziale e in biomedicina. L'ultimo prodotto è un "bioscopio" per radiografie automatiche di campioni biologici trattati con traccianti radioattivi.

Come mostrato da questi esempi i meccanismi di ritorno sono tortuosi e difficili da pianificare. E' possibile dare un qualche ordine a questi processi? Il punto di partenza non può che essere *la creazione da parte degli istituti di fisica delle alte energie di una lista aggiornata delle tecnologie nuove e mature di cui dispongono*. Questo "portafoglio tecnologico" deve essere opportunamente pubblicizzato e reso disponibile alle istituzioni scientifiche e alle società industriali. Per mettere in pratica questa proposta, come recentemente fatto dal CERN, il personale tecnico e scientifico deve essere reso cosciente dell'importanza del problema e sentirsene responsabile; contemporaneamente lo stesso personale deve sentirsi impegnato nella ricerca e nella scelta del materiale da inserire nel portafoglio. Altre tre strade sono utilizzate

per il trasferimento tecnologico e la rimanente parte di questo capitolo è dedicata alla loro descrizione.

5.1 Trasferimenti attraverso brevetti

Al di fuori della fisica delle alte energie i brevetti sono il modo naturale attraverso il quale molti campi della ricerca trasferiscono le loro scoperte scientifiche. Questo approccio non è frequente (molti aggiungerebbero "fortunatamente") nella fisica delle alte energie. L'argomento è molto delicato dal momento che la regola europea "brevetta la tua scoperta e dopo parlane e pubblicala" mette in pericolo l'atteggiamento di apertura che caratterizza tutte le collaborazioni di fisica delle particelle.

Comunque è difficile resistere alla pressione dei politici e degli amministratori, che vogliono vedere un ritorno pratico del denaro investito in ricerca di base e considerano il numero di brevetti come l'unico valido indicatore dell'efficienza di un istituto di ricerca. Soltanto alcuni laboratori di fisica delle alte energie hanno adottato da lungo tempo una politica dei brevetti, mentre altri (e il CERN è uno di questi) hanno iniziato recentemente. Ricercatori in fisica delle particelle e direttori di Istituti si stanno ora muovendo in un mondo per loro sconosciuto nel quale fisici della materia condensata e biologi si sentono molto più a loro agio. Per evitare sbagli i nuovi arrivati hanno un'unica possibilità: *debbono essere estremamente selettivi nella scelta delle idee e delle tecnologie da brevettare e dovrebbero evitare di promettere importanti rientri economici.*

5.2 Trasferimento tecnologico attraverso ordini di acquisto

Quelle industrie che ricevono un ordine di acquisto per un prodotto di alta

tecnologia da parte di un laboratorio di ricerca avanzata interagiscono con gente alla frontiera della ricerca e, nel momento stesso in cui producono e consegnano i beni ordinati, acquisiscono nuove conoscenze e nuove tecnologie. Quattro studi molto conosciuti sono stati pubblicati su questo argomento: uno nel 1975 e uno nel 1985 riguardanti il CERN^{26 27}, e due che riguardano l'ESA^{28 29}.

Da questi studi risulta che per un gran numero di imprese la "utilità economica" del processo di approvvigionamento è dell'ordine di tre. (Questo numero è leggermente diverso nei quattro rapporti e corrisponde a 3, 3.0, 2.9 e 3.2, ma gli errori metodologici sono certamente più grandi della dispersione osservata.) Le quattro analisi prese nel loro insieme indicano quindi che per ogni euro speso in contratti di alta tecnologia l'industria riceverà e/o risparmierà circa tre euro sotto forma di aumentata capacità e/o risparmio nei costi. Dal momento che un laboratorio come il CERN investe in media circa un quarto del bilancio in prodotti di alta tecnologia, si può concludere che circa tra quarti del finanziamento pubblico complessivo hanno un ritorno per le industrie che producono tecnologie avanzate.

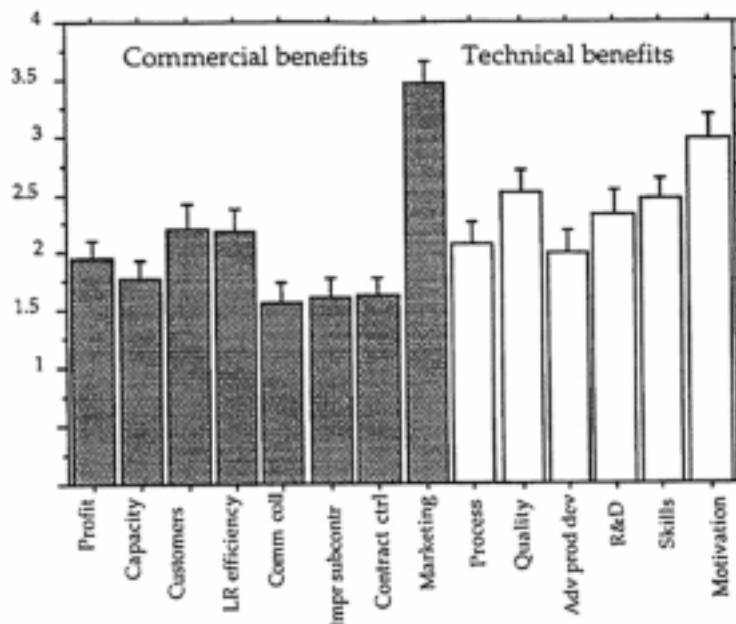
²⁶ Schmied, H., "A Study of Economic Utility Resulting from CERN Contracts", CERN Yellow Report Series, CERN 75-5, 1975.

²⁷ Bianchi-Streit, M., et al., "Utilité Économique des Contrats du CERN", CERN Yellow Report Series, CERN 85-05, 1985.

²⁸ Cohendet, P., et al., "Economic Benefits of ESA Contracts", European Space Agency Contract Report, July 1978.

²⁹ Brendle, P., et al., "Les Effets Économiques Induits de l'ESA", European Space Agency Contract Report, Vol. 3, June 1980.

FIGURA 10. Benefici dei fornitori del CERN misurati usando una scala Likert nella quale 1 equivale a "del tutto insignificante" e 5 sta per "molto importante/significativo". Le barre rappresentano gli errori standard.³⁰



³⁰ Nordberg, M.Y., "Transaction Costs and Core Competence Implications of Buyer-Supplier Linkages; the Case of CERN", Thesis, Katholieke Universiteit Brabant, Tilburg, ISBN 92-9083-117-0, 1997.

Il beneficio dei fornitori è stato studiato da M. Nordberg nella sua tesi di dottorato su "Transaction costs and core competence implications of buyer-supplier link: the case of CERN".

Intervistando i direttori di cinquanta industrie ad alta tecnologia, egli ha ottenuto i risultati mostrati in figura 10. I dati mostrano che il beneficio maggiore è legato alle prospettive commerciali. Tra i benefici tecnici quello più importante è dovuto all'aumentata motivazione del personale dell'industria per la gratificante realizzazione di prodotti tecnologici.

5.3 Trasferimenti attraverso lo sviluppo di progetti comuni

Molto spesso un accordo è firmato tra un Istituto di fisica delle alte energie e una o

più imprese incaricate di sviluppare un prodotto, che non esiste ancora sul mercato. Questo tipo di collaborazione consente il trasferimento di metodi e tecnologie a partner industriali.

Recentemente questo aspetto è stato studiato da M. Haehnle nel quadro della sua tesi di dottorato³¹. Intervistando ingegneri del CERN e ingegneri e dirigenti di imprese coinvolte in 21 progetti comuni, egli è arrivato alle seguenti conclusioni: l'apprendimento e l'acquisizione di know-how è la motivazione dominante che spinge le imprese a prender parte a collaborazioni

³¹ Haehnle, M., "R&D Collaborations between CERN and Industrial Companies: Organisational and Spatial Aspects", Wien: Institute for Urban and Regional Studies, Wirtschaftsuniversität, IIR- Discussion 56, 1998.

con il CERN su ricerca e sviluppo (Fig. 11).

Le imprese non si aspettavano di trarre un profitto come conseguenza diretta della collaborazione di ricerca e sviluppo; prevedevano invece di trarre profitto dalle competenze acquisite nello sviluppo del prodotto studiato nel progetto. La ripartizione del costo e del rischio è anche considerato meno importante dell'acquisizione di nuove tecnologie, come già mostrato in studi precedenti^{32 e 33}.

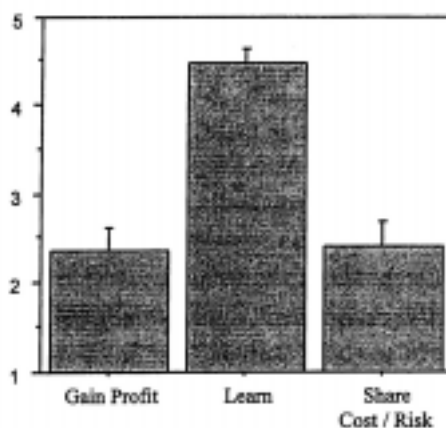
³² Hagedoorn, J., and Schakenraad, J., in *New Exploration in the Economics of Technological Change*, C.

Esaminando più da vicino la motivazione principale si è visto che le imprese con meno di 500 impiegati erano interessate esclusivamente al prodotto come risultato finale del progetto di collaborazione, mentre le imprese più grandi erano motivate dall'apprendimento e dall'acquisizione di conoscenza.

Freeman and L. Soete eds., London and New York: Pinter Publisher, 1990, pp. 3-37.

³³ Kleinknecht, A., and Reijnen, J.O.N., *Research Policy* 21(4), 347-360 (1992).

FIGURA 11. Motivazioni della collaborazione con il CERN, misurata usando la scala Liker a 5 punti usata nella fig. 10.³⁴



³⁴ Ref. Nota 31

Un altro aspetto interessante è che le collaborazioni erano basate su un alto livello di fiducia tra gli ingegneri del CERN e gli ingegneri delle compagnie coinvolte, al punto che l'accordo è di solito firmato soltanto dopo l'inizio della collaborazione.

CONCLUSIONI

Nel tentativo di razionalizzare il complesso panorama delle ricadute tecnologiche della ricerca di base, sono stati identificati quattro flussi (conoscenza direttamente utilizzabile, risorse umane, metodi, tecnologie) e molti percorsi di

trasferimento tecnologico (pubblicazioni, conferenze, seminari, contatti personali, i ricercatori stessi, brevetti, ordini di acquisto e progetti comuni). Tre suggerimenti sono stati fatti ai responsabili della gestione degli Istituti di fisica delle alte energie, che dovrebbero:

1. incoraggiare i "cacciatori di teste" a seguire il lavoro del personale giovane (e meno giovane) che lavora nei loro laboratori;
2. organizzare, mantenere aggiornato e distribuire un *portafoglio tecnologico*;
3. essere molto selettivi nel processo di brevettazione evitando di promettere importanti ritorni economici.

Questi quattro flussi di ricadute sulla società scaturiscono da ogni campo di ricerca, ma la loro importanza relativa è molto diversa. Ad esempio quella indicata come "conoscenza direttamente utilizzabile" è al momento molto abbondante per la ricerca di base in biologia molecolare, mentre langue per la fisica delle alte energie.

Ciò è bene illustrato dalla competizione in corso nella codifica del genoma umano. Recentemente John Craig Venter ha raccolto molti fondi e creato una società privata (Celera Genomics) per completare la decodifica prima che l'iniziativa internazionale, sostanzialmente basata su finanziamenti pubblici e conosciuta con il nome di *Human Genome Project*, raggiunga i suoi scopi³⁵. Naturalmente la motivazione è solo parzialmente scientifica, anche se è stato affermato che tutti i dati saranno resi pubblici. Deve però ancora essere creata un'impresa privata che investa soldi in un laboratorio costruito attorno ad un

acceleratore destinato alla scoperta del bosone di Higgs.

D'altra parte le ricadute della fisica delle alte energie attraverso le persone, i metodi e le tecnologie che risultano utili all'industria e alle altre scienze sono numerose e si può affermare che esse compensano la mancata produzione di conoscenza immediatamente utilizzabile.

La famosa fontana dei Quattro Fiumi di Gian Lorenzo Bernini, a Piazza Navona, può essere vista come una metafora di questa situazione. I flussi dei quattro getti d'acqua sono lungi dall'essere uguali in ogni istante, eppure la fontana è bella e piena di acqua fresca. I fisici delle particelle hanno tutti i mezzi per avere una fontana che competa in bellezza e frescura con tutte quelle che punteggiano Roma, se solo saranno capaci di promuovere le ricadute sfruttando le potenzialità nascoste nel personale che formano e nei metodi e nelle tecnologie sviluppate nel corso delle loro ricerche.

³⁵ Marshall, E., *Nature* 284, 1906-1909 (1999). 4 5

FIGURA 12. La fontana dei Quattro Fiumi di Bernini può essere considerata una metafora dei quattro ineguali flussi di ricadute di qualsiasi attività scientifica sulla società.



RINGRAZIAMENTI

Per quel che riguarda dati, informazioni, commenti e correzioni, sono sinceramente grato a O. Barbatat, C. Benvenuti, F.

Bourgeois, J.W. Chapman, A. de Rújula, H.F. Hoffmann, M. Nordberg, J.-P. Revol, S. Rossi, E. Rosso, H. Wenniger.

UGO AMALDI

Professore di Fisica all'Università di Milano Bicocca e Presidente della Fondazione TERA.

Contatti:

Tel. 0041-22-7677565 Fax 0041-22-7823084 E-mail ugo.amaldi@cern.ch
CERN CH-1211 Geneva 23 TERA Foundation Via Puccini 11 28100 Novara