

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Scuola di Scienze
Dipartimento di Fisica e Astronomia
Corso di Laurea in Fisica

Critica della fusione fredda:
risultati, fenomenologia e modelli

Relatore:
Prof. Loris Ferrari

Gabriele Malagoli

Anno Accademico 2018/2019

Indice

Introduzione	3
Capitolo 1 - Dalle origini fino al 1989	4
Capitolo 2 - La fusione fredda nel mondo e in Italia	24
2.1 NASA	24
2.2 US Navy	26
2.3 Ohmori e Mizuno	32
2.4 Italia	36
2.5 Google	45
Capitolo 3 - Modelli teorici	48
3.1 Tabet e Tenenbaum: onda d'urto	48
3.2 Widom e Larsen: cattura elettronica	52
3.3 Preparata: abbassamento della barriera di Coulomb	54
Conclusioni	56
Bibliografia	57

Introduzione

Lo scopo della seguente tesi è ricostruire e analizzare gli eventi riguardanti la “fusione fredda” a partire dal 1989, anno in cui i chimici Fleischmann e Pons ne annunciano quella che si può definire la nascita.

Questo argomento è stato oggetto di un lungo, articolato e acceso dibattito; si sono subito create due fazioni, passate alla storia come scettici e credenti. Il fulcro della discussione è la natura nucleare del fenomeno preso in esame, la sua riproducibilità, la mancanza di un modello matematico: questi aspetti sono ambigui, aleatori e carenti. Come verrà mostrato nel corso del lavoro, sono tanti gli esperimenti che riportano risultati supportanti l’idea di una fazione quanti quelli opposti.

L’unica certezza riguarda il modo con cui la ricerca si è posta nei confronti della fusione fredda: poco scientifico e molto passionale. L’annuncio del 1989 dei padri fondatori della fusione fredda è stato affrettato e impetuoso, le risposte sono state immediate e al limite dell’ingiurioso.

Per i motivi appena descritti, questa tesi vuole riassumere e analizzare i principali lavori riguardanti l’argomento, mettendosi al servizio di chi, con maggiori conoscenze ed esperienza, vorrà sfruttarla come punto di partenza per uno studio ulteriormente approfondito.

Nel primo capitolo verranno prese in esame le basi della fusione, a partire dalla seconda metà del XIX secolo con il lavoro di Thomas Graham fino all’annuncio di Fleischmann e Pons con le relative conseguenze e le ricerche più importanti di quegli anni.

Il secondo capitolo esaminerà lo sviluppo della ricerca dagli anni successivi fino ai giorni nostri, mettendo in evidenza le diverse caratteristiche che hanno descritto lo studio nei vari Paesi, tra cui l’Italia gioca un ruolo chiave.

L’ultimo capitolo analizzerà le ipotesi avanzate per descrivere formalmente i processi fisici che hanno portato ai risultati presi in esame.

Capitolo 1 - Dalle origini fino al 1989

La base della fusione fredda è la permeabilità del palladio all'idrogeno. Il primo studio a riguardo viene effettuato da Thomas Graham, quando, nel 1866, osserva l'assorbimento, in quantità significative, di idrogeno da parte del metallo. Graham utilizza un foglio di palladio pesante 1,58 g e con volume di $0,133 \text{ cm}^3$, la cui superficie è di $0,009202 \text{ m}^2$. Durante lo studio misura un assorbimento di 526 volumi di idrogeno da parte di uno di palladio, a temperature tra i 90 e i 245 °C.

Va sottolineato che Graham afferma che il palladio non risenta di queste prove: asserisce infatti di vederlo senza alterazione specifiche se non quelle dovute al maneggiamento di un foglio sottile per lungo tempo. La rilevanza di questo fatto è notevole poiché permette un utilizzo continuato, entro ovvi limiti, di un metallo costoso.

Negli anni '60, Martin Fleischmann inizia a studiare i processi elettrochimici riguardati quella che verrà chiamata, nel 1986, "fusione fredda". Il 23 Marzo del 1989, i chimici Fleischmann e Pons indicano una conferenza stampa in cui annunciano i risultati del loro articolo, che verrà pubblicato soltanto il 10 Aprile dello stesso anno: essi affermano di aver misurato produzione di calore, emissione di raggi γ e di neutroni all'esterno di una matrice di palladio dopo averla caricata di deuterio, il tutto all'interno di una cella elettrolitica. Anticipando la descrizione dell'esperimento, si riporta la frase saliente dell'articolo: *"Enthalpy generation can exceed 10 W cm^{-3} of electrode; this is maintained for experiment times in excess of 120 h, during which typically heat excess of 4 MJcm^{-3} of electrode volume was liberated. It is inconceivable that this could be due to anything but nuclear process."*

I due chimici affermano, in sintesi, che la produzione di energia non possa che essere dovuta a reazioni di tipo nucleare, poiché a livello elettrochimico non sono possibili emissioni di calore così elevate.

La base del loro esperimento consiste, oltre che nella misura del calore prodotto dalla cella, nella verifica delle reazioni



considerate da loro l'eventuale prova dell'avvenuta fusione nucleare. All'interno del palladio caricato di deuterio dovrebbe avvenire la fusione tra due atomi di quest'ultimo, generando così un

atomo di ${}^3\text{He}$ e un neutrone a circa $2,5 \text{ MeV}$. La rivelazione di neutroni dovrebbe essere prova della fusione.

Il loro apparato sperimentale consiste in una cella elettrolitica con un catodo di palladio e un anodo di platino, immersi in una soluzione di acqua pesante, D_2O , al 95 % e acqua al 5%, dentro la quale è dispersa $0,1 \text{ mol}$ di $LiOD$, ovvero idrossido di litio. La cella elettrolitica serve per poter immettere il deuterio all'interno del palladio.

Sono utilizzati diversi volumi e forme per realizzare il catodo di palladio: barre, fogli, cubi. La densità di corrente attraversante la cella elettrolitica varia tra i $0,8$ e 512 mA/cm^3 , in modo tale da verificare il comportamento in funzione delle possibili combinazioni tra forma e volume del catodo e densità di corrente.

Per misurare i raggi γ emessi durante l'esperimento utilizzano uno scintillatore, ovvero uno strumento basato su un materiale la cui ionizzazione o eccitazione degli atomi di cui è costituito induce l'emissione di radiazione elettromagnetica nello spettro visibile. La misura viene effettuata appena al di sopra del livello del bagno in cui sono immersi anodo e catodo. Va sottolineato che la misura effettuata viene corretta sottraendo il fondo misurato nella stanza. Per rivelare l'emissione di neutroni viene utilizzato un Harwell Neutron Dose Equivalent Rate Monitor tipo 95/0949-5, la cui efficienza di conteggio per neutroni a circa $2,5 \text{ MeV}$ è stimata in $2,4 \times 10^{-4}$. Anche in questo è stato misurato un conteggio di fondo della stanza da sottrarre alle misure.

La durata totale dell'esperimento è di 120 ore , durante le quali la cella elettrolitica rimane in funzione e vengono effettuate le misure. L'unica ulteriore azione compiuta dai due ricercatori è il rabbocco della cella con altra soluzione, poiché è necessario evitare che quest'ultima si esaurisca. Durante una di queste prove si verifica un fatto che Fleischmann e Pons pensano di mettere in risalto nel loro articolo: una porzione di catodo viene trovata fusa e un'altra vaporizzata insieme a una buona parte della struttura che li conteneva. Si ricorda che le temperature di fusione ed ebollizione del palladio sono, rispettivamente, 1544 e $2936 \text{ }^\circ\text{C}$.

La seguente tabella mostra i risultati calorimetrici ottenuti dai due ricercatori.

Elettrodo	Densità di corrente (mA/cm ²)	Potenza in eccesso (W)
Barra	8	0,0075
	64	0,079
	512	0,0654
	8	0,036
	64	0,493
	512	3,02
	8	0,153
	64	1,751
	512	26,8
Foglio	8	0
	64	0,027
	512	0,049

Tabella 1: calore in eccesso misurato; questi sono divisi in base al tipo di elettrodo, alla sua dimensione e alla densità di corrente utilizzata.

Di seguito si mostra lo spettro di raggi γ misurato. Secondo i due scienziati, l'emissione di raggi γ è dovuta alla reazione $p + n \rightarrow D + \gamma$ (2,5 MeV).

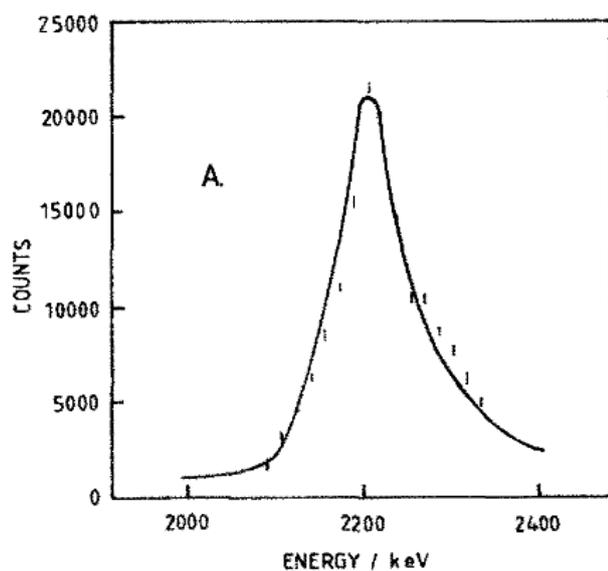
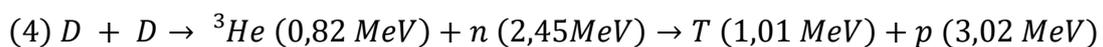
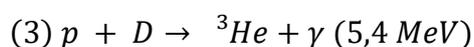


Figura 1: spettro di raggi γ misurato nelle vicinanze del bagno termico.

Le conclusioni di Fleischmann e Pons possono essere riassunte nel modo seguente: sono misurati alti livelli di calore, produzione di neutroni e raggi γ , eventi che indicano reazione di tipo necessariamente nucleare. Questo esperimento deve essere la base di altri studi volti a capire il meccanismo esatto delle reazioni studiate per poterne trarre beneficio attraverso il controllo.

L'articolo viene inviato alla rivista Nature il 23 Marzo. Il giorno seguente il governatore dello Utah convoca l'amministrazione statale per proporre loro la creazione di un vero e proprio istituto di ricerca per la fusione fredda. Contemporaneamente viene inviato a Nature un articolo dal titolo "Observation of cold nuclear fusion in condensed matter", il cui esponente di riferimento è il fisico Steven Earl Jones, che sarà pubblicato il ventisette aprile dello stesso anno. Jones e il suo gruppo affermano che quando viene fatta passare corrente attraverso un elettrodo di palladio o titanio immersi in un elettrolita e "diversi sali metallici" viene rilevato un flusso di neutroni; ipotizzano che la spiegazione di questo flusso sia la fusione di deuterio nel metallo.

Secondo i loro calcoli, la frequenza di fusione tra due molecole di deuterio, D_2 , all'interno del palladio, è di circa 10^{-74} fusioni al secondo per molecola presente: un valore chiaramente basso, che deve essere significativamente incrementato per ottenere un processo sfruttabile. Il gruppo si concentra sulle due seguenti reazioni:



La base sperimentale è analoga a quella di Fleischmann e Pons: una cella elettrolitica con elettrodi di palladio o titanio immersi in soluzione e attraversati da corrente elettrica. I catodi sono formati da circa 1 g di titanio con forma sferica, fogli di palladio pesanti 0,05 e 5 g e palladio senza forma precisa. Essi affermano che la "reazione (4) è apparentemente catalizzata dal deposito di D^+ e ioni metallici nell'elettrodo negativo. Neutroni con energia di circa 2,5 MeV sono chiaramente rivelati con uno spettrometro".

Quest'ultimo viene calibrato usando neutroni con energia tra i 2,9 e i 5,2 MeV generati tramite un acceleratore di Van de Graaff. "Lo spettro osservato mostra una struttura generale la quale implica che neutroni a 2,45 MeV dovrebbero apparire nell'analizzatore di spettro multichannel tra i canali 45 e 150". In precedenza, era stato misurato il background di neutroni. È stato confrontato lo spettro dato dalla misura di raggi γ e di neutroni; questo confronto porta il gruppo a pensare che circa un evento su quattro sia causato dalla coincidenza accidentale tra γ e neutroni e per tre quarti da

neutroni nell'ambiente, la cui sorgente è attribuita ai raggi cosmici. Nella figura seguente viene mostrato lo spettro energetico misurato. Come previsto la misura del foreground, ovvero la misura durante il funzionamento della cella, è significativamente più piccato tra i canali 50 e 150.

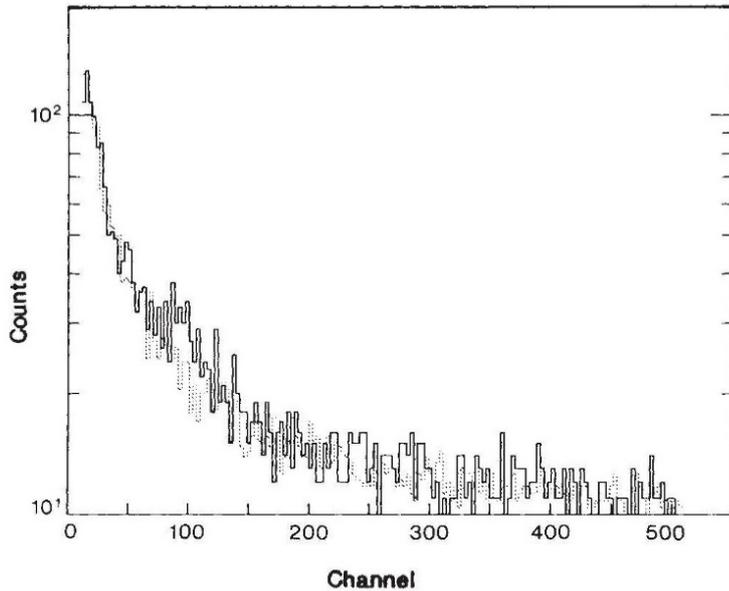


Figura 2: in linea tratteggiata si legge il background, in linea continua il foreground. Ogni tre canali sono stati aggiunti 10 conteggi per rendere più chiara l'immagine.

Il gruppo sostiene che "il fatto che un segnale significativo appare oltre il background con una energia corretta [...] fornisce una forte evidenza che la fusione nucleare a temperatura ambiente avvenga". Nel prossimo grafico è riportato il rapporto tra foreground e background nella regione di energia 2,5 MeV.

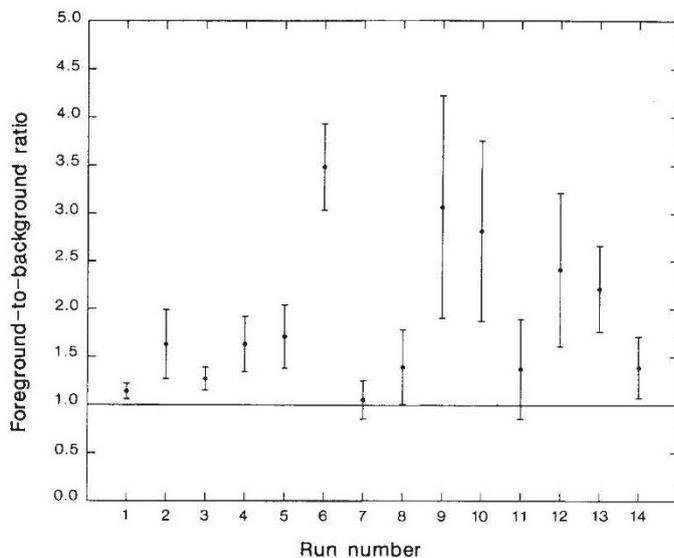


FIG. 4 Ratio of foreground rate to background rate for each run, in the 2.5-MeV energy region of the pulse-height spectrum. Statistical errors ($\pm 1\sigma$) are shown.

Figura 3: didascalia originale.

La stima del numero di fusioni per coppia di deuterio per secondo, per il run sei, è di circa 10^{-23} . Questo valore è ottenuto dall'equazione

$$(5) \text{ fusioni per coppia di deuterio per secondo} = \frac{R/\varepsilon}{M \times d/2M}$$

Dove R rappresenta il rate di rivelazioni di neutroni, $(4.1 \pm 0.8) \times 10^{-3} s^{-1}$, basato sulla differenza tra foreground e background nei run 45-150, $\varepsilon = (1.0 \pm 0.3)\%$ è l'efficienza del rivelatore, $M \cong 4 \times 10^{22}$ rappresenta il numero di atomi di titanio, nella massa di 3g, e $D/2M \cong 1$ è il rapporto tra atomi coppie di deuterio, D , e ioni di metallo all'interno di quest'ultimo.

Pochi mesi dopo, un gruppo di ricerca dell'INFN, l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, composto da A. Bertin, M. Bruschi, M. Capponi, S. De Castro, U. Marconi, C. Moroni, M. Piccinini, N.

Semprini-Cesari, A. Trombini, A. Vitale e A. Zoccoli, decide di verificare i risultati di Jones. Il loro obiettivo è ripetere le misure sotto condizioni migliori e tramite strumenti e tecniche più precise; l'esperimento si svolge ai laboratori del Gran Sasso, i quali, come affermato dal gruppo italiano, sono un luogo ideale per questo tipo di misure, poiché molto meglio isolati dalla radiazione cosmica. Essendo un centro ricerca per la fisica nucleare anche gli strumenti e le tecniche a loro disposizione sono più sofisticati e precisi: riescono infatti a discernere in modo netto i "falsi neutroni" causati dalla coincidenza neutrone - γ , problema che Jones non era riuscito a evitare.

Le loro misure si rivelano in accordo con quelle effettuate dal team di Jones e li porta a concludere che "questi risultati confermano l'emissione di neutroni a 2,5 MeV a causa dell'infusione di deuterio negli elettrodi di titanio. Allo stato presenta della conoscenza, l'unica spiegazione ragionevole per questo fatto è che la reazione (4) sia catalizzata quando del deuterio si diffonde negli elettrodi di titanio. Noi consideriamo i presenti risultati come un'ulteriore evidenza dell'avvenimento della fusione nucleare fredda nei metalli".

Pochissimi giorni dopo, il 26 Marzo, Pons ammette che "altre reazioni oltre a quelle nucleari potrebbero essere responsabili del calore misurato". Entro una settimana dalla conferenza stampa, un articolo di Nature cerca di placare di gli animi che tanto si erano accesi dopo l'annuncio. In questo articolo è ben espresso lo scetticismo della rivista riguardo non tanto la natura dell'esperimento, ma al modo con cui è stato esposto al mondo. Più volte viene ribadita la necessità di un'attenta e meticolosa procedura di revisione paritaria prima che qualsiasi risultato sia esposto tramite un qualunque mezzo. Fleischmann e Pons avevano affermato che il loro lavoro sarebbe stato pubblicato su Nature a maggio di quell'anno. Questa informazione è stata appresa

dalla redazione di Nature dal Wall Street Journal; è chiaro come questo fatto sia indice di avventatezza negli autori, aspetto che li porterà a subire un comprensibile scetticismo da parte della comunità scientifica.

Nell'arco di un paio di settimane sono innumerevoli i laboratori che dimostrano interesse riguardo alla possibilità di fusione di deuterio all'interno del palladio. Tra questi si trovano i Los Alamos national Laboratories, l'IMB di Yorktown Heights e i Bell Laboratories nel New Jersey.

Si ricorda che negli stessi anni la ricerca riguardo alla fusione nucleare "calda" è uno degli ambiti di maggior interesse, di conseguenza di maggior costo e rilevanza. Proprio in questo periodo, nel secondo trimestre dell'89, sia gli USA che l'URSS sono in procinto di lanciare un programma decennale dal costo di circa un miliardo di dollari per la fusione calda usando un confinamento laser a raggi X. Questa parentesi storica è necessaria per comprendere "il fragile equilibrio che divide lo scienziato dal venture capitalist", termini propri dell'articolo precedentemente descritto di Nature in cui gli autori si soffermano "sull'attenzione che bisogna utilizzare quando si parla di progressi scientifici critici come nuove fonti energetiche, cure per l'AIDS o superconduttori, poiché attraggono venture capitalist e avvocati specializzati in brevetti che ostacolano l'obiettività delle verifiche scientifiche".

Il cinque maggio dell'89, viene pubblicato su Nuovo Cimento un articolo dal titolo "Emission of Neutrons as a Consequence of Titanium-Deuterium Interaction", i cui autori sono De Ninno, Frattolillo, Lollobattista, Martins, Martone, Mori, Podda e Scaramuzzi. Questo gruppo lavora all'ENEA. Il loro procedimento differisce da quello di Fleischmann e Pons poiché utilizzano titanio in luogo del palladio e l'assorbimento del deuterio da parte del metallo viene favorito attraverso processi termodinamici e non elettrochimici.

Come chiarito dal team di Jones precedentemente, sono le condizioni di non equilibrio a incentivare questo processo, ottenibili quindi attraverso diversi metodi. Il gruppo italiano fa variare pressione e temperatura del sistema. In figura quattro si trova lo schema del loro apparato.

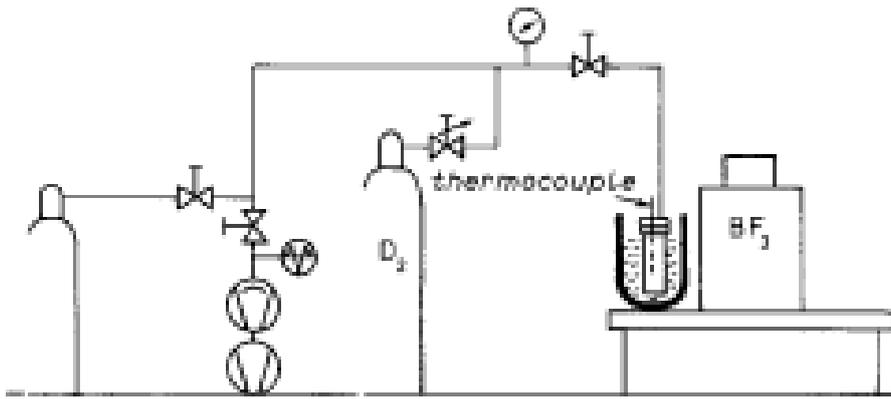


Figura 4: schema dell'apparato strumentale costruito dal gruppo di Scaramuzzi.

Circa cento grammi di titanio vengono posizionati in una cella a sua volta immessa in un vaso di Dewar per mantenere la temperatura. Il deuterio è contenuto in un recipiente collegato alla cella con una valvola per controllarne il flusso; per misurare la temperatura viene utilizzata una termocoppia. La rivelazione dei neutroni è effettuata attraverso un contatore di neutroni BF₃, posizionato a circa venti centimetri dal centro della cella. Il titanio viene prima degassificato, successivamente il deuterio viene lasciato libero di entrare nella cella. La cella raggiunge così una pressione intorno ai 50 *bar*; dopo aver raggiunto questa pressione, la temperatura viene portata a 77 K immergendo la cella in vaso di Dewar piena di azoto. Da questo momento lasciano il sistema a riposo e iniziano ad analizzare il conteggio nei neutroni nel tempo.

La figura cinque mostra i conteggi ottenuti durante sessanta ore di esperimento. I valori riportati sono il numero conteggi ottenuti in dieci minuti. Le frecce in alto e in basso indicano gli istanti in cui il livello di azoto viene, rispettivamente, diminuito e aumentato, in modo tale da studiare la dipendenza dell'emissione di neutroni dalla temperatura. L'efficienza del contatore è di 5×10^{-5} *conteggi/s*; data questa efficienza, il gruppo afferma che il sistema abbia emesso fino a 400 *neutroni/s*.

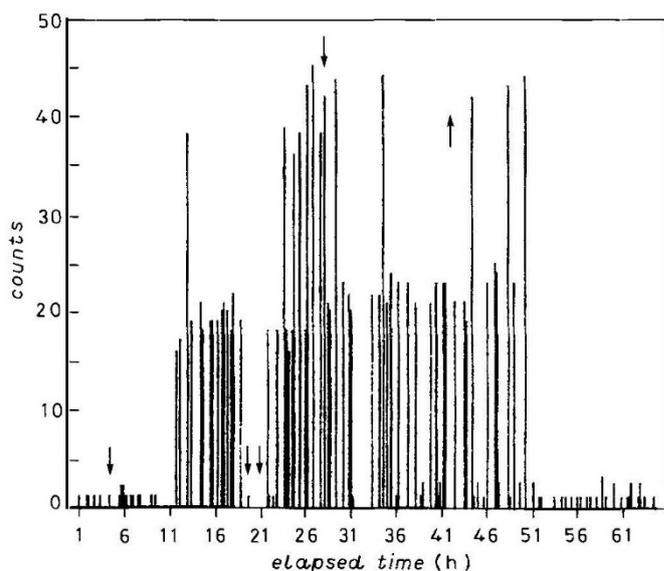


Figura 5: grafico dell'evoluzione temporale dell'emissione di neutroni. I valori indicati sono la somma dei conteggi su dieci minuti.

Le conclusioni tratte sono le seguenti:

“È possibile produrre neutroni in un processo che potrebbe essere dovuto alla fusione di due nuclei di deuterio, senza l'utilizzo di elettrolisi e [...] siamo d'accordo con il suggerimento fatto da Jones, cioè che una condizione necessaria per l'emissione di neutroni è che il sistema sia in condizioni di non equilibrio”.

Tra il 23 e il 25 maggio si tiene, ai Los Alamos National Laboratories, una conferenza riguardo la fusione fredda. I risultati esposti sono vari e vaghi, permettendo di comprendere la scarsa riproducibilità del fenomeno. È bene osservare che, come riporta un articolo del primo giugno di Nature, le varie misure sono state effettuate da gruppi diversi su diversi apparati cercando di misurare, principalmente, caratteristiche differenti: calore prodotto, emissioni di elio e neutroni, depositi di trizio, ecc. Nessuna cella è stata coinvolta in più analisi da persone e strumenti diversi. Sarebbe opportuno osservare un protocollo, in modo tale da poter riprodurre al meglio almeno la configurazione dell'esperimento; ovviamente tutto ciò non deve fermare l'ipotetica intuizione o la diversificazione, ma incrementare le possibilità di accuratezza e la sistematicità sia della misura sia dell'apparato. L'università del Texas porta due contributi a opera di Kevin Wolf e John Appleby: il primo afferma di aver trovato una “sostanziale quantità di trizio in alcune celle” mentre il secondo di aver osservato una produzione anomala di calore. Dagli stessi laboratori in cui si tiene la conferenza, Howard Menlove riporta un debole flusso di neutroni. Quest'ultimo intervento è

rilevante poiché il contatore di neutroni utilizzato da Menlove è circa cento volte più efficiente rispetto a quello di Jones: questo significa che ogni volta che Menlove avesse rivelato cento particelle, Jones ne avrebbe rivelata una. Infine, si trova un gruppo dell'Università di Yale e uno del Brookhaven National Laboratory affermanti la mancanza totale di rivelazione di neutroni nonostante anche in questa situazione sia stato utilizzato un contatore "considerabilmente migliore di quello di Jones".

Circa tre mesi dopo l'annuncio di Fleischmann e Pons, un gruppo di ricercatori dell'università di Yale e del Brookhaven National Laboratory pubblica, su Nature in data 06/07/1989, un articolo dal titolo "Upper Limits on Neutron and γ Ray Emission from Cold Fusion". Il loro scopo è riprodurre e verificare sia l'esperimento madre nello Utah sia quello di Jones et al. L'efficienza del loro apparato di misura è di $1,0 \pm 0,2$ % conteggi/ora, analoga a quella dichiarata da Jones et al, misurata attraverso l'utilizzo del californio-252, il quale è noto emettitore di neutroni con stima di questa molto precisa. Essi prendono in esame le emissioni dovute alla fusione deuterio-deuterio e deuterio-protone; usano quattro celle elettrolitiche composte da catodi sia di palladio che di titanio, puri al 99,95 % che contengono come elettrolita sia *LiOD*, come fecero Fleischmann e Pons, sia una "complessa miscela di sali con pH acido". La corrente attraversante le celle elettrolitiche è di 300 mA eccetto che per la quarta cella, sottoposta a una corrente di 500 mA. La tensione applicata varia tra i tre e quindici Volt. Il rapporto tra idrogeno e deuterio nella soluzione di *LiOD*, misurato attraverso tecniche di risonanza magnetica nucleare, è di circa 2,5%, dopo una settimana di funzionamento. La figura 6 mostra la frequenza di conteggio, a cui è stato sottratto il background precedentemente misurato, dopo tre settimane di presa dati.

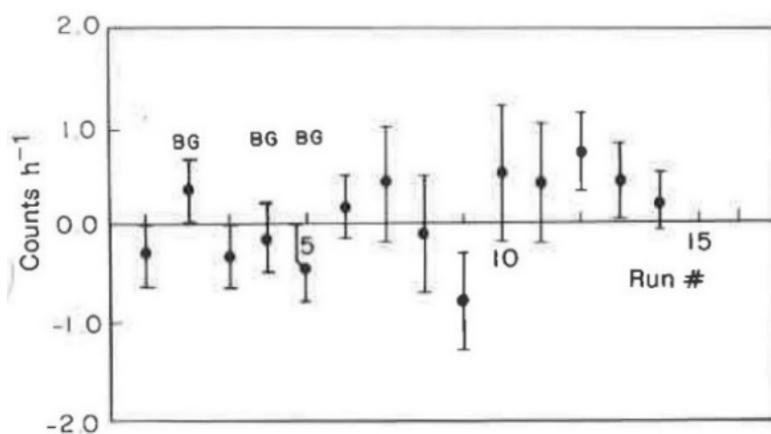


Figura 6: frequenza di conteggio neutroni oltre la media; la frequenza media è $0,1 \pm 0,2$ conteggi/ora.

Sono poche e concise le affermazioni del gruppo di ricercatori: “questi dati posso essere usati per porre un limite superiore alla fusione deuterio-deuterio”. Per l’elettrodo in palladio affermano che il numero di fusioni per coppia di atomi è minore di 10^{-24} , mentre per il titanio è minore di 6×10^{-25} . Sommando i run 1, 3, 6 e 7, si ottiene una misura di neutroni pari a $1,3 \pm 0,1$ conteggi/ora, da cui pongono un limite superiore per la frequenza di fusione di 2×10^{-25} fusioni di coppie di atomi per secondo, circa cinquanta volte minore rispetto a quello riportato da Jones et al. Per spiegare i risultati di Jones suppongono che questi siano dovuti a neutroni provenienti dai raggi cosmici.

Nel novembre del 1989 il United States Department of Energy, abbreviato DOE, espone l’esito del suo studio riguardo l’argomento. Il rapporto si pone l’obiettivo di studiare le diverse pubblicazioni in merito all’argomento per verificarne l’attendibilità e la veridicità. Poiché alla base di tutti gli esperimento c’è l’idrogeno o uno dei suoi isotopi, si prendono in esame le reazioni nucleari riguardanti questi, attribuendo a questo insieme il calore misurato e le particelle rivelate.

Reazione	Energia rilasciata (MeV)	Reazioni al secondo per 1 W in uscita
$D + D \rightarrow {}^3\text{He} + n$	3,27	$1,90 \times 10^{12}$
$D + D \rightarrow T + p$	4,03	$1,54 \times 10^{12}$
$D + D \rightarrow {}^4\text{He} + \gamma$	23,85	$2,61 \times 10^{11}$
$D + T \rightarrow {}^4\text{He} + n$	17,59	$3,53 \times 10^{11}$
$p + D \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$	5,49	$1,13 \times 10^{12}$
$p + T \rightarrow {}^4\text{He} + \gamma$	19,81	$3,14 \times 10^{11}$

Tabella 2: reazioni principali di fusione nucleare.

Come si vede nella tabella, ognuna di queste reazioni è esoergonica, infatti, in generale, la fusione dei nuclei leggeri, fino al ferro, è vantaggiosa energeticamente. Inoltre, è stato calcolato il numero di reazioni necessarie, al secondo, per avere un guadagno energetico di un watt. È sufficiente notare che l’ordine di grandezza dell’energia rilasciata è circa 1– 10 MeV e il numero di reazioni necessarie in un secondo per avere un output di un watt è della undicesima o dodicesima potenza di dieci.

La relazione fornisce diversi motivi per i quali bisogna essere scettici riguardo alla conclamata fusione fredda. Innanzitutto, la misura del calore in eccesso è basata su misure di calorimetria, notoriamente molto difficoltose; molti laboratori non hanno nemmeno misurato calore in eccesso rispetto a quello emanato dalla normale elettrolisi. In secondo luogo, la mancanza di coerenza tra calore misurato e prodotti di reazione è indice di problemi nelle misure: ognuna di queste reazioni ha delle caratteristiche, quelle descritte poco sopra, ben definite; se si misura una data quantità di calore in un certo tempo, allora si dovrà necessariamente misurare una quantità definita di prodotti di reazione che sia compatibile con il primo dato. A questo proposito, il primo esperimento che viene preso in esame è quello di Fleischmann e Pons: il report afferma che il numero di neutroni osservati è un miliardo volte minore rispetto a quello necessario per spiegare la misura di calore che essi affermano di aver effettuato. Un altro esempio riguardo i prodotti della presunta fusione, è la misura della presenza di elio: questo fa parte dei prodotti di metà delle reazioni nella tabella sopra, ma fino a quel momento nessun ne ha mai riportato la rivelazione.

L'ultima ragione per lo scetticismo, è che "la fusione fredda non dovrebbe essere possibile basandosi sulla note e comunemente accettate teorie". Questa affermazione ha sicuramente un fondo di verità: avendo i nuclei carica netta positiva la repulsione coulombiana impedisce loro di avvicinarsi. Solo a ben più alte temperature la velocità relativa tra gli atomi è sufficiente per portare i due nuclei a distanze dell'ordine del fermi, a cui l'interazione forte tra i nuclei prende il sopravvento. Non è affatto chiaro come la presenza di una matrice metallica possa modificare questa conclusione negativa, dal momento che gli atomi del metallo distano al minimo qualche angstrom, cioè una distanza 10^5 volte più grande del fermi. In altri termini, per quanto riguarda le dimensioni nucleari, gli impatti $D-D$ avvengono in condizioni molto vicine a quelle che si avrebbero nel vuoto, salvo possibili fenomeni collettivi, su cui si sono concentrati gli sforzi dei teorici, nel tentativo di fornire una possibile spiegazione alla fusione fredda.

La seconda parte della ricerca riguarda la calorimetria e il calore in eccesso. I vari esperimenti presi in esame si distinguono per l'uso di due tipi di celle: chiuse e aperte; nelle prime il deuterio molecolare e l'ossigeno molecolare sono liberi di uscire dalle celle mentre nelle chiuse no. Il calore in eccesso per celle aperte è dato dalla quantità di potenza, sottoforma di calore, maggiore della potenza elettrica immessa a cui va sottratta la potenza equivalente all'entalpia di formazione di D_2O (1,527 V per la corrente della cella). Nelle celle chiuse, con totale ricombinazione dei due gas, la

potenza elettrica immessa e quella totale emessa, normalmente, si bilanciano. Si hanno quindi le seguenti relazioni per valutare l'esito delle procedure:

cella aperta: calore in eccesso = calore misurato + $1,53 \times I$ – potenza immessa. (I è la corrente che attraversa la cella).

cella chiusa: calore in eccesso = calore misurato – potenza immessa.

Si riportano ora alcuni risultati presi in esame dal DOE e una breve lista di lavori:

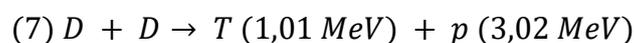
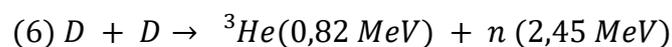
Esperimenti con osservazione di calore in eccesso:

Gruppo	Calore in eccesso (in percentuale)
Univ. of Utah Fleischmann, Pons et al.	5 - 111
Texas A&M Univ. Appleby, Srinivasan et al.	6 - 30
Stanford Univ. Huggins, Gur et al.	10 - 30
Texas A&M Univ. Bockris et al.	5 - 25
U. Minnesota, Oriani et al.	2 - 21

Esperimenti senza misurazione di calore in eccesso:

U. British Columbia, Hayden et al., M.I.T., Wrighton et al., Cal Tech, Lewis et al., Naval Weapons Ctr. Miles et al., AT&T Bell Labs, Fleming, Law et al., Free U. Berlin, Kreysa et al., Harwell Lab. Williams et al., Chalk River Nuclear Labs, D.R. McCracken et al.

Il punto forse più cruciale è il terzo capitolo della relazione, riguardante i prodotti di fusione. Si prendono in esame le tre reazioni principali tra nuclei di deuterio, le cui reazioni sono



Va sottolineato che l'ultima reazione ha una sezione d'urto circa 10^7 volte minore delle altre due.

Le sezioni d'urto dipendono fortemente dall'energia dei reagenti, a causa della barriera di Coulomb, come descritto brevemente nel precedente paragrafo; ciononostante, per i presenti scopi, si possono considerare costanti per energie inferiori ai 100 keV . Per quanto riguarda le prime due reazioni ci si pone l'obiettivo di misurare il neutrone e il protone per diretto conteggio poiché è la

misura più semplice da effettuare. Per la terza reazione è possibile sfruttare sia la misurazione del raggio γ sia dell' 4He , quest'ultimo attraverso la spettroscopia di massa.

Risulta necessaria una precisazione: le frequenze relative delle reazioni (6), (7) e (8) sono dette rapporti di ramificazioni. Fissata l'energia dei reagenti, questi sono costanti, misurati attraverso gli esperimenti usando acceleratori di particelle. Una modifica significativa di questi durante i processi nella materia necessita di un modello che la supporti, a oggi mancante. Un esempio può essere fornito attraverso lo studio della reazione (8) la quale è altamente più improbabile rispetto alle altre due ma è spesso invocata per spiegare la mancanza di neutroni nelle misure. Sfruttare questa ipotesi significa aumentare la sua probabilità di un fattore 10^{13} , senza però poterlo spiegare. Inoltre, si dovrebbe osservare una grande quantità di radiazione elettromagnetica altamente energetica, di cui non c'è traccia.

Una caratteristica comune a tutte le reazioni di fusione prese in esame è la produzione di trizio o elio. Oltre alla diretta misura di questi, i vari ricercatori si soffermano sulla possibilità che il loro accumulo nel palladio possa contribuire al calore in eccesso. In un volume qualsiasi d'acqua, il rapporto tra molecole trizio e idrogeno è circa 10^{-18} ma in caso di acqua pesante questo aumenta. È necessario conoscere questo valore per sapere la concentrazione di trizio iniziale. Solamente quattro gruppi riportano una relazione tra il trizio e la produzione di calore. In questi la massima quantità prodotta è di circa 10^4 atomi di trizio per secondo; se questo fosse prodotto dalla reazione $D + D$, la massima potenza in eccesso dovrebbe essere 10 mW . Uno dei quattro studi riporta 35 W per 90 minuti, ovvero 187000 J .

Un ulteriore indizio riguardo alla natura del processo in esame è la presenza di elio come prodotto. Si può ottenere 3He o 4He , insieme a, rispettivamente, un neutrone e un raggio γ , anche se quest'ultimo caso è più raro. Vari esperimenti hanno espresso risultati negativi; l'elio dovrebbe rimanere intrappolato nel palladio dopo il processo di elettrolisi. Un esempio è dato dalla ricerca al Lawrence Livermore National Laboratory, condotta dal gruppo di Texas A&M, con l'obiettivo principale di studiare il ruolo e le quantità di elio nella presunta fusione. In questo caso sono stati usati due catodi di palladio di peso $0,017$ e $0,018\text{ g}$. La misura calorimetrica ha rilevato una potenza in eccesso, sottoforma di calore, di 40 mW per 100 ore di funzionamento. Il livello di atomi di 3He e 4He è di, rispettivamente, 3×10^5 e $5 \times 10^8\text{ atomi}$, diversi ordini di grandezza in meno rispetto al valore necessario per essere coerenti con l'emissione di potenza affermata.

Le conclusioni del rapporto del DOE sono le seguenti: in generale, le misure sui prodotti di reazioni risultano di diversi ordini di grandezza inferiori ai valori attesi dall'emissione di calore misurata e in diversi casi non si sono proprio avute rilevazioni di prodotti di fusione. "In particolare, la produzione di trizio non è accompagnata dall'emissione di neutroni a $2,45 \text{ MeV}$ ".

Alcuni esperimenti riportano scariche di neutroni, ma queste non si sono misurate né in altro tipo di esperienze né in riproduzioni dello stesso, portando a una mancanza pressoché totale di riproducibilità.

Sono molti i gruppi di ricerca che misurano bassissime quantità di neutroni; i seguenti riportano una frequenza di produzione di neutroni tra 0,1 e 1×10^{-24} volte inferiore a quella coerente con la misura di calore riportata: Jones et al., Mizuno et al., Williams et al., Alber et al., Broer et al., Lewis et al., Schreiber et al., Kashy et al.

Infine, il rapporto afferma che

"Se ci fosse un processo di fusione a temperatura ambiente allora questo necessiterebbe di:

- a) un maggior perfezionamento della penetrazione quantomeccanica della barriera;
- b) una drastica modifica dei rapporti di ramificazione nelle reazioni deuterio – deuterio".

Il rapporto si conclude con tre affermazioni che sanciscono la falsità della fusion fredda. Per completezza e trasparenza vengono riportate integralmente:

"Basandosi sull'esame degli articoli pubblicati, ristampe e numerose comunicazioni, si conclude che i risultati sperimentali sul calore in eccesso da celle calorimetriche non presentano evidenze convincenti che fonti energetiche utili possano risultare da fenomeni attribuiti alla fusione fredda."

"L'odierna comprensione della molto estesa letteratura riguardo risultati teorici e sperimentali sull'idrogeno nei solidi non fornisce supporto per l'avvenimento della fusione fredda in questi. Nello specifico, nessuna evidenza teorica o sperimentale suggerisce l'esistenza di una distanza deuterio – deuterio più corta rispetto a quella in una molecola di D_2 o il raggiungimento di una pressione di confinamento."

"La fusione a temperatura ambiente, del tipo discusso in questo report, sarebbe contraria a tutta la comprensione guadagnata riguardo alle reazioni nucleari nello scorso mezzo secolo; necessiterebbe dell'invenzione di un completamente nuovo processo nucleare"

Un lavoro cruciale riguardante la fusione fredda è quello di Douglas Morrison, fisico del CERN di Ginevra, dal titolo "Review of Cold Fusion", datato 27 settembre 1990. Dall'abstract di questo articolo si evince immediatamente la posizione di Morrison poiché egli afferma che non esiste produzione di calore e i dati sono fortemente in opposizione alla natura nucleare del processo in esame; il suo giudizio è ancora più estremo poiché colloca questo argomento tra gli esempi di "scienza patologica".

Morrison si sofferma sull'aspetto mediatico e culturale della fusione fredda: afferma che "tutti volevamo crederci" poiché la possibilità di estrarre energia senza scorie da un processo tanto semplice quanto economico ha spinto molte persone a volerci credere. Con l'obiettivo di riordinare la grande quantità di materiale a disposizione, categorizza l'insieme degli esperimenti presi in esame in base alle loro caratteristiche. Tra i dieci risultati esponenti produzione stabile di calore due sono stati ritrattati, quelli di Fleischmann e Pons e del Georgia Tech. Analizzando quelli che espongono le misure di background del livello di neutroni, tutti misurano una frequenza di produzione variante tra 0,04 e 40000 *neutroni/s*, ben lontana dal necessario 10^{12} per spiegare un solo watt di potenza emessa. Alcuni esperimenti decretano l'innescò della fusione tramite effetti dinamici dovuti al non equilibrio del sistema, come l'italiano Scaramuzzi. Altri tre gruppi osservano questo fenomeno, ma nessuno di questi riesce a ripetere l'esperimento.

Alcuni gruppi, tra cui Howard Mellove a Los Alamos e Steve Jones, affermano di avere rivelato "bursts of neutrons", letteralmente esplosioni di neutroni, ovvero picchi di emissione di questi molto violenti. Altri quattro gruppi non osservano questo fenomeno.

Per quanto riguarda i raggi γ , l'unico esperimento positivo è il primo di Fleischmann e Pons.

Il palladio, se eccitato, emette raggi X a 21 *keV*. Dal momento che i presunti processi nucleari avvengono all'interno di questo, dovrebbe esserci eccitazione del metallo con conseguente emissione di raggi X a 21 *keV*. Quattro gruppi non li rivelano.

Un'altra prova dell'avvenuta fusione è la presenza di trizio. L'esperimento condotto al Texas A&M riporta una copiosa produzione di questo relativa a un a potenza emessa tra i 10^{-3} e 10^{-8} *W*. Le prove condotte a Los Alamos mostrano risultati incerti: alcune celle mostrano la presenza di trizio altre no. Se le misure del Texas fossero corrette si avrebbero dovuto misurare anche una massiva produzione di neutroni dal momento che le sezioni d'urto della reazione (6) e (7) sono uguali.

Si passa ora alle misure calorimetriche, le più complesse da effettuare.

Morrison scrive che “la stima del calore in eccesso dipenda dalla calibrazione, dove la cella è scaldata, e dal suo tasso di raffreddamento. È stato mostrato che i risultati dipendano criticamente dalla calibrazione [...]. Una tecnica più sicura consiste nell’usare un bagno termico a temperatura costante, dove la cella e il suo ambiente circostante sono scaldate fino a una temperatura leggermente maggiore di quella ambiente, ogni calore in eccesso è misurato dalla riduzione del calore necessario per riportare la cella alla temperatura precedente”. Degli otto laboratori riportanti calore in eccesso, tutti hanno usato celle aperte e non mantenute a temperatura costante. Dei quattordici laboratori non riportanti calore in eccesso, sette hanno usato celle aperte e posto il limite superiore di calore in eccesso tra il 0,2 e il 2%. Cinque gruppi utilizzano celle chiuse e nessuna ha riportato calore in eccesso.

Tra i 97 articoli sperimentali e 91 teorici il bilanciamento è ambiguo: tra gli esperimenti si trovano 33 positivi, 63 negativi e uno indeciso; tra i teorici si trovano 53 positivi, 24 negativi e 14 senza conclusioni certe.

Sotto viene riportata la tabella che riassume i risultati presi in esame da Morrison.

Oggetto di misura	Risultati positivi	Risultati negativi
Calore in eccesso	6	21
Neutroni	27	47
Trizio	5	8
Raggi γ	6	12
Particelle cariche	1	3
Elio	2	5
Raggi X	1	5

Tabella 3: sintesi dei risultati tra gli esperimenti presi in esame.

Morrison inserisce tre esperimenti cardine riguardanti l’argomento: quello condotto da David Williams et al. a Harwell, dalla General Electric e un ultimo condotto da Michael Salamon nel laboratorio di Pons. Viene preso in esame il primo di questi, considerato da Morrison come “il più grande e completo esperimento nel mondo [riguardo la fusione fredda]”. L’articolo a firma di Williams et al. è datato 23/11/1989.

Innanzitutto, il gruppo mette in discussione la frequenza di fusione espressa da dal gruppo di Jones (circa $10^{-23} D-D \text{ fusioni}/s$), poiché a distanza di circa $0,75 \text{ \AA}$ questa è di circa 3×10^{-64} .

Per quanto riguarda la calorimetria sono stati utilizzati tre diversi tipi di calorimetri, di cui uno analogo a quello utilizzato da Fleischmann e Pons durante il loro primo esperimento. Per analizzare una più vasta casistica sono stati impiegati sedici celle contenenti catodi di palladio di misure varianti tra 1– 6 mm (diametro del cilindro di palladio) e diversi elettroliti: $LiOD$, $LiOH$, $NaOD$, $NaOH$, tutti in concentrazione di 0,1 M. Vengono riportati di seguito i risultati delle misure calorimetriche. Lo stesso tipo di catodo è stato inoltre testato sia in acqua pesante che in acqua.

Calorimetro Fleischmann e Pons

Superficie catodo (cm^2)	Potenza in eccesso H_2O (mW)	Potenza in eccesso D_2O (mW)
3,9	- 45±50	57±44
3,5	-19±28	-11±49
3,1	40±53	36±40
2,8	-46±64	-4±35

Altro calorimetro

Superficie catodo (cm^2)	Densità di corrente (mA/ cm^2)	Potenza in eccesso D_2O (mW)
3,1	156	27±48
14	62	-120±86
1,3	159	-10±12
5	200	-10±12

Tabella 4: risultati calorimetrici riportati dal gruppo Williams.

Per quanto riguarda il rivelamento dei neutroni a 2,45 MeV è stato usato un detector a BF3 con efficienza del 44%. Tutte le misure si trovano in un intervallo di circa un neutrone ogni 10– 1000 s, nettamente minore del tasso di 10^4 neutroni/s riportato da Fleischmann e Pons. Di seguito sono riportati i risultati della misura di neutroni e raggi γ .

Massa del catodo (g)	Superficie (cm ²)	Rilevazione (neutroni/s)
0,075	1,0	0,00±0,08
0,063	8,0	0,110±0.082
3,0	2	0,007±0,042
0,038	1,0	0,22±0,12
2,7	14,3	0,031±0,044
0,60	8	0,007±0,042
0,45	0,92	0,068±0,058
0,74	9,5	-0,011±0,004
3,1	2,3	0,008±0,011
2,2	32	0,012±0,007
0,089	2,0	-0,022±0,011

Tabella 5: conteggi di neutroni e γ relativi all'esperimento di Williams et al.

Un ruolo fondamentale all'interno della storia viene giocato dal MIT, più precisamente dal Plasma Fusion Center del MIT ed Eugene Mallove, ingegnere aeronautico e aerospaziale laureatosi al MIT ed ex capo redattore del MIT News Office dal 1989 al 1991.

Mallove pubblica un suo scritto dal titolo "MIT and Cold Fusion: a Special Report" in cui denuncia la pubblicazione di dati falsificati dal Plasma Fusion Center del MIT nel 1989, a pochi mesi di distanza dall'annuncio di Fleischmann e Pons.

Durante un esperimento dal nome "PFC Phase - II" due grafici ottenuti sembrerebbero favorire, o per lo meno non negare, le idee di Fleischmann e Pons, poiché riporterebbero una quantità di calore in eccesso, dopo circa 60 e 100 ore di svolgimento, molto elevata, rispettivamente per una cella di acqua pesante e acqua.

Nell'articolo pubblicato dal MIT il grafico è però diverso da quello ritrovato da Mallove; in quest'ultimo sembra essere tagliata proprio la parte di grafico in cui la misura calorimetrica schizza verso valori a sostegno della fusione. Di seguito vengono riportati questi grafici.

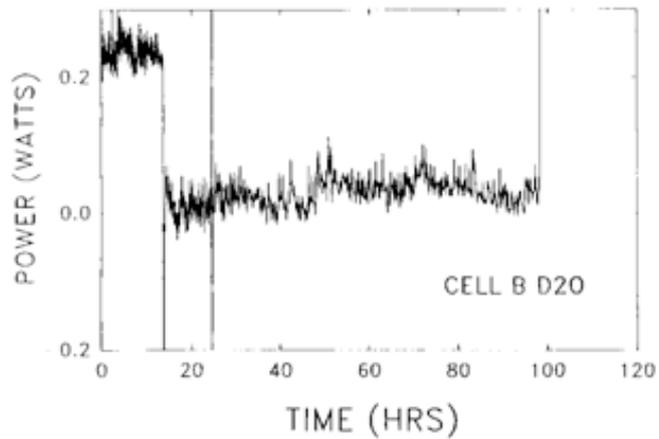
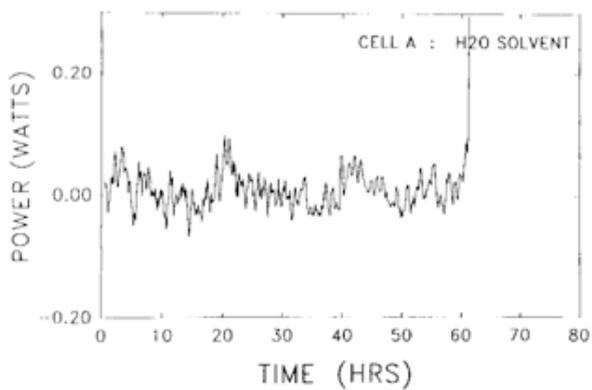


Figura 7 A e B: grafici del 10 luglio 1989, non pubblicati. Si nota come nella parte finale dei grafici la misura della potenza emessa aumenti drasticamente.

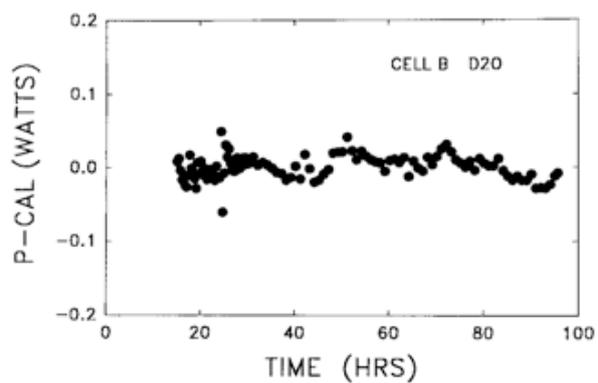
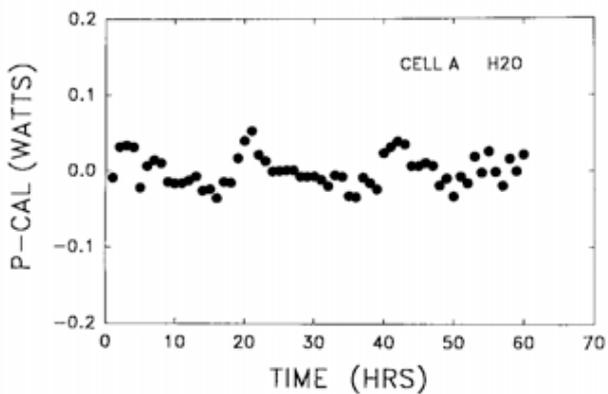


Figura 8 A e B: dati pubblicati; in questi il calore in eccesso oscilla sempre intorno allo zero senza mai discostarsi significativamente.

Capitolo 2 – La fusione fredda nel mondo e in Italia

2.1 NASA

Nel febbraio del 1996 la NASA pubblica uno studio dal titolo “Replication of the Apparent Excess Heat Effect in a Light Water – Potassium Carbonate – Nickel Electrolytic Cell”. Lo studio è stato condotto da scienziati del NASA Lewis Research Center, a Cleveland, in Ohio. Nell’abstract vengono mostrati i dati principali che subito risultano interessanti: la cella elettrolitica utilizzata ha prodotto un calore in eccesso di 11 W con 60 W immessi nella cella. Il guadagno di potenza è variato da 1,06 a 1,68. Una seconda affermazione che potrebbe essere di grande rilevanza riguarda il rapporto D/Pd : essendo il problema fondamentale di questo argomento la riproducibilità, è necessario trovare condizioni rispettate le quali l’esito della prova risulti il medesimo; una di queste è, secondo il gruppo NASA, il rapporto di caricamento D/Pd , il quale deve essere maggiore o uguale a 0,95. Affermano che tutte le celle rispettanti questa condizione mostrano calore in eccesso, mentre quelle in cui il rapporto è minore di 0,90 non mostrano mai un guadagno di potenza. Questa affermazione è frutto del lavoro di Michael McKubre et al., i quali hanno esposto i loro esperimenti sul rapporto D/Pd alla quarta ICCF nel 1993, ovvero la conferenza internazionale sulla fusione fredda.

Anche la NASA afferma che dati gli ordini di grandezza delle potenze specifiche del sistema “questi dati escludono chiaramente una spiegazione basata sulla chimica ordinaria e forzano a considerare canali nucleari o chimica quantistica esotica o l’ancora più esotica possibilità che in qualche modo l’energia dello spazio, come gli effetti delle fluttuazioni elettromagnetiche di punto zero, sia coinvolta”.

Per la cella presa in esame, al contrario della maggior parte dei passati esperimenti, non viene utilizzata acqua pesante e il composto disciolto è K_2CO_3 , invece del maggiormente diffuso $LiOD$. Il gruppo afferma che raramente una cella con questo composto non ha mostrato calore in eccesso. L’anodo consiste in dieci strisce di titanio platinizzate e cinque tubi di titanio platinizzati, mentre il catodo è formato da un filo di nichel.

Oltre alla cella principale è stata usata una seconda, identica, senza anodo, per avere un riferimento rispetto alla temperatura ambiente, in modo da mediare gli effetti a breve termine delle fluttuazioni di temperatura dell’aria. Per la misurazione della temperatura è stata usata una termocoppia tipo T con una risoluzione di 0,1 K . La grandezza di principale interesse del gruppo NASA è il valore della conducibilità termica κ della cella vuota e di quella attiva, durante i processi.

Per poter verificare l'esistenza di un reale guadagno energetico si prendono in considerazione la potenza immessa e quella estratta; la prima è data dalla somma di vari termini. Innanzitutto, si trova la potenza elettrica necessaria al funzionamento della cella, valutabile semplicemente come $P_c = V_c I_c$, dove il pedice "c" sta per cella, mentre V e I sono, rispettivamente, la tensione applicata e la corrente attraversante il dispositivo; in secondo luogo si ha la potenza di riscaldamento, indicata con P_h , la quale tiene conto dell'energia spesa per scaldare la cella. Bisogna inoltre considerare la potenza dissipata P_{tc} per effetto Peliter, che si verifica nelle giunzioni della termocoppia.

Per quanto riguarda quelle che possono essere considerate le potenze in uscita, si devono valutare le variazioni di temperatura dovute a convezione, vaporizzazione dell'acqua, e vari processi di conduzioni, i quali sono presi in considerazione dal termine P_{th} , dove $P_{th} = k\Delta T$, se il processo è lineare nell'intervallo di variazioni di temperature considerato. Rimane da prendere in esame l'energia assorbita dalla formazione di molecole di O_2 e H_2 , la cui potenza associata è di $4,75 \times 10^{-19} J/molecola$ di H_2O equivalente. Per comodità si rielabora questo dato in funzione di I_c ottenendo ηI_c , con $\eta = 1,48$. La potenza in eccesso sarà quindi la differenza tra le ultime due e le prime tre. Sono mostrati di seguito i risultati ottenuti dal gruppo.

I_c (A)	V_c (V)	$P_{exc, apparent}$ (W)	Apparent Power Gain ⁽³⁾
5.0	2.12	7.20	1.68
10.0	2.55	8.57	1.34
20.0	2.98	11.4	1.19
40.0	3.36	8.41	1.06
31.0	1.72	2.66	1.31

Figura 9: Potenza in eccesso e guadagno energetico in funzione della corrente e della tensione applicata.

L'articolo si conclude affermando che "la cella mostra chiaramente il fenomeno del calore in eccesso", qui rappresentato in termini di potenza in eccesso

2.2 US Navy

Nel 2002 viene pubblicato dalla US Navy un volume dal titolo “Thermal and Nuclear Aspects of the Pd/D_2O System”, descrivente esperimenti e test condotti dai laboratori di ricerca della Marina nel decennio precedente. Il volume si sviluppa nel riassunto di una significativa quantità di articoli e lavori, opera di un vasto numero di scienziati, condotti nel corso degli anni.

Una rilevante novità riguarda la preparazione, e quindi la struttura, degli elettrodi utilizzati; sono stati presi in considerazione anodi e catodi sviluppati con la tecnica della codeposizione. Questo metodo consiste nel depositare contemporaneamente palladio e deuterio su un substrato metallico non capace di assorbire idrogeno, come rame o oro. Il processo avviene sempre per elettrolisi, necessitando quindi una soluzione contenente palladio, il quale, una volta applicata la sufficiente differenza di potenziale, viene portato sull'elettrodo. Le caratteristiche che, secondo i ricercatori, rendono interessante e migliore questa tecnica sono le seguenti:

- 1) saturazione, ovvero raggiungimento del rapporto D/Pd circa 1, quasi istantanea del lattice di palladio;
- 2) alto rapporto superficie/volume;
- 3) struttura del campione riproducibile.

Il punto forse più importante è il considerevole aumento di riproducibilità del calore in eccesso rispetto all'utilizzo di elettrodi interamente costituiti da palladio o titanio. Si trovano infatti le affermazioni di due ricercatori, Hodko e Bockris, le quali risultano di grande rilevanza; nella loro pubblicazione del 1993 “Possible Excess Tritium Production on Pd Codeposited with Deuterium”, asseriscono che “è stato dimostrato che due approcci hanno portato a un aumento di riproducibilità, [... uno di questi è] la deposizione elettrolitica simultanea di Pd da $PdCl_2$ e deuterio”. Queste affermazioni sono basate, stando alla loro bibliografia, su un articolo di Szpak e Mosier-Moss, inventori di questa tecnica, e su una comunicazione personale di Szpak. L'articolo di Szpak e Mosier-Boss in cui per prima volta si trova l'idea della codeposizione, non riporta dati utili allo studio della riproducibilità. Essi affermano soltanto che “questo approccio assicura l'esistenza delle condizioni non stazionarie”, ovvero quell'insieme di disequilibri che, come suggerito da Scaramuzzi, è necessario per innescare la reazione.

Lo studio del calore in eccesso occupa un capitolo corposo all'interno del volume ed è stato condotto in due luoghi differenti: al Naval Air Warfare Center a China Lake e al New Hydrogen Energy Laboratory (NHE).

I primi studi a China Lake non avevano mostrato risultati soddisfacenti e se ne imputava la causa alle sconosciute caratteristiche del filo di palladio utilizzato. Gli studi sono stati ripetuti con una barra di palladio, usandone due per due celle, cella A e cella B. Il valore graficato in figura 10 è il rapporto tra calore in uscita ed energia in ingresso, il quale può essere espresso matematicamente come

$$(9) X = \frac{k\Delta T}{(V - V_H^\circ)I}$$

dove k è la costante calorimetrica, V è la tensione applicata alla cella, V_H° è il potenziale termico neutro per la reazione, ΔT la variazione di temperatura misurata e I la corrente attraversante il sistema, la cui densità era di 100 mA/cm^2 .

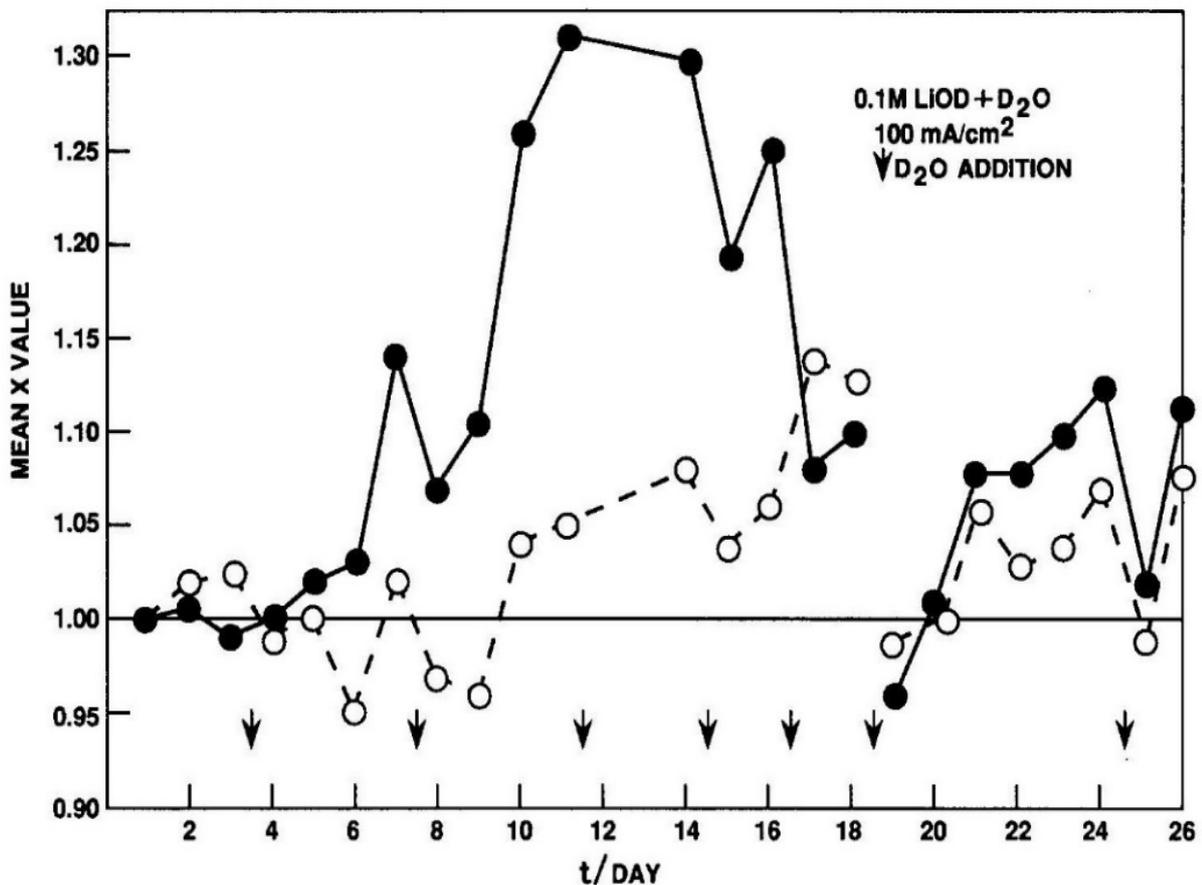


Figura 10: andamento del valor medio di X nel corso dei giorni.

L'andamento del grafico mostra un chiaro guadagno energetico, che, nei giorni centrali dell'esperimento arriva a toccare valori importanti. I valori minori di 1 tra il 19° e 21° giorno sono dovuti alla pausa effettuata, poiché, come mostra anche l'inizio del grafico, durante i primi giorni di elettrolisi non si ha guadagno. Il grafico precedente riguarda un insieme di test descritti nell'articolo "Electrochemical Calorimetric Studies of the Cold Fusion Effect" a opera di M.H. Miles, K.H. Park, and D.E. Stilwell, pubblicato nel 1996 per la conferenza annuale sulla fusione fredda tenutasi a Salt Lake City.

Il secondo programma della marina, partito nel 1992, si basa sui lavori di Imam, il quale ha per primo utilizzato elettrodi di palladio con una percentuale di boro del 25%, 50% o 75%. I dati riguardanti questo insieme di test mostrano una potenza in eccesso sempre maggiore di zero eccetto che per pochi picchi negativi, come si evince dalla figura sottostante.

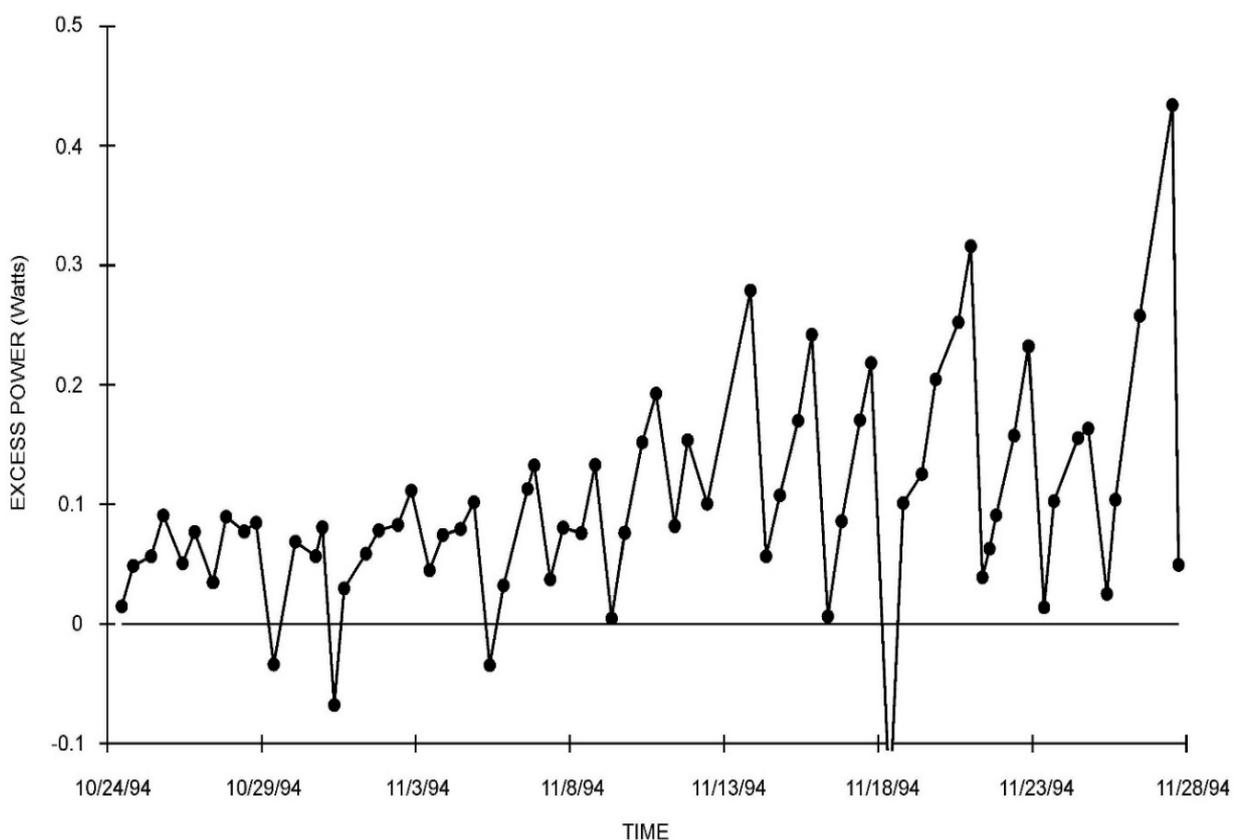


Figura 11: evoluzione del valore di potenza in eccesso nel corso delle sette prove. Il grafico mostra un guadagno complessivo nettamente positivo.

Sono stati effettuati otto test con differenti concentrazioni di boro e variando le caratteristiche dell'elettrodo di palladio. Di questi otto soltanto uno non ha mostrato calore in eccesso, mentre gli

altri sette sono risultati positivi. Si riporta, per brevità e chiarezza, soltanto uno tra i risultati positivi, in figura 11, poiché gli altri sei grafici sono estremamente simili. Di seguito, in figura 12, si trova il grafico della cella il cui guadagno energetico è risultato circa nullo.

La spiegazione da attribuire al maggiormente regolare comportamento delle celle con elettrodi $Pd-B$ viene supposta essere la capacità del boro di ritardare il momento in cui il deuterio esce dal palladio e l'aumento di durezza del metallo di base; il più importante effetto riguarda però il comportamento del boro insieme all'ossigeno: legandosi a questo per formare B_2O_3 , ne minimizza l'attività all'interno del palladio, attività che può inficiare i processi in esame in modo svantaggioso. La presenza dell'ossigeno è considerata un parametro cruciale per la riproducibilità dell'esperimento: il gruppo afferma che, oltre alla rimozione di ossigeno tramite l'utilizzo del boro, anche l'utilizzo della metodo di codeposizione sviluppata da Szpak e Mosier-Boss produca palladio relativamente libero da ossigeno, ottenendo elettrodi caratterizzati da una maggiore riproducibilità, aspetto fondamentale, poiché questa è una caratteristica assolutamente necessaria di qualsiasi processo scientifico ed esperimento.

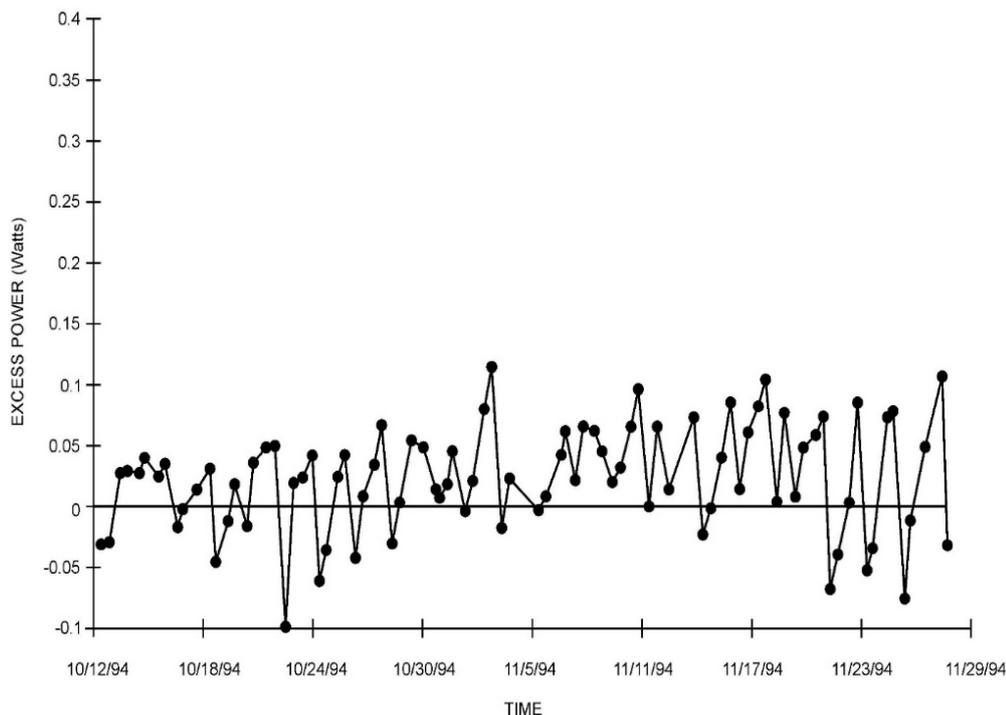


Figura 12: ulteriore prova, ma con esito negativo rispetto alle altre sette; è chiaro, anche solo qualitativamente, che la media totale della potenza in eccesso sia circa zero.

Questi dati sono estrapolati dall'insieme di esperimenti condotti da Miles e collaboratori, descritti nella pubblicazione "Anomalous Effect in Deuterated Systems", del 1996. In ultima analisi, si può

affermare che la riproducibilità rimane una caratteristica non rispettata anche da queste prove, nonostante un deciso miglioramento; infatti, l'ultima cella, pur trovandosi nelle medesime condizioni delle altre sette, non ha dato gli stessi risultati.

La ricerca di prodotti di eventuali reazioni nucleari ha riguardato raggi X, ${}^4\text{He}$ e neutroni; i dati principali a questo proposito si trovano nel lavoro condotto da Miles e R.A. Hollins, supportati per le analisi dal dipartimento di Chimica dell'università del Texas, per mano di B.F. Bush e J.J. Lagowski, estrapolati dall'articolo "Correlation of Excess Power and Helium production During D_2O and H_2O Electrolysis Using Palladium Cathodes".

Per raccogliere dati sull' ${}^4\text{He}$ sono stati condotte dieci prove utilizzando acqua pesante, le quali hanno mostrato una potenza in eccesso tra 0,07 e 0,52 W, a cui è associata la rivelazione di una quantità di ${}^4\text{He}$ compresa tra 10^{12} e 10^{14} molecole. In due casi il valore misurato è stato inferiore a 10^{12} molecole; la correlazione tra ${}^4\text{He}$ e calore in eccesso rimane vaga, poiché un alto valore del primo non corrisponde sempre a un picco del secondo, e viceversa.

Nell'articolo non è riportato alcun valore in modo specifico: la tabella esaminata mostra solamente una descrizione della misura del prodotto di fusione e viene affermato che corrisponde alle misure da loro effettuate; questo è un risultato qualitativo, utile ai fini di un'indagine preliminare, ma che risulta inefficiente nello studio specifico della natura dei fenomeni analizzati.

Per quanto riguarda la ricerca di neutroni, il gruppo della marina afferma di aver effettuato misure soltanto per "scopi di sicurezza", e non per indagare sulla natura nucleare dei fenomeni in gioco. Questa scelta è discutibile perché la misura di eventuali neutroni è importante tanto quanto la riproducibilità.

I risultati finali degli esperimenti di China Lake sono i seguenti: su trentatré esperienze, diciotto hanno mostrato calore in eccesso insieme a produzione di ${}^4\text{He}$; due si sono rivelate positive alla produzione di calore in eccesso ma non di ${}^4\text{He}$, la cui causa viene attribuita all'intrappolamento di questo nella lega metallica. Le dodici esperienze senza evidenza di calore in eccesso non mostrano nemmeno ${}^4\text{He}$.

Con questi ultimi dati si conclude la parte di esperimenti relativi ai laboratori di China Lake.

Il secondo insieme di prove si è tenuto al laboratorio NHE, New Hydrogen Energy Laboratory. In questo caso sono state utilizzate le stesse celle, gli stessi elettrodi e lo stesso calorimetro utilizzati

nella precedente sessione di esperimenti; la modifica principale è stata effettuata sulle strutture contenenti le celle; questo cambio ha permesso un aumento di sensibilità sulle misure di potenze, portando la risoluzione a 5 mW contro i 20 mW precedenti. Sono state costruite tre celle, in cui sono stati disciolti PdCl_2 , ND_4Cl e ND_4OD . La pubblicazione della US Navy espone questi risultati in modo molto sintetico. L'unico dato chiaro è il seguente grafico che esprime l'evoluzione del calore in eccesso prodotto in funzione del tempo.

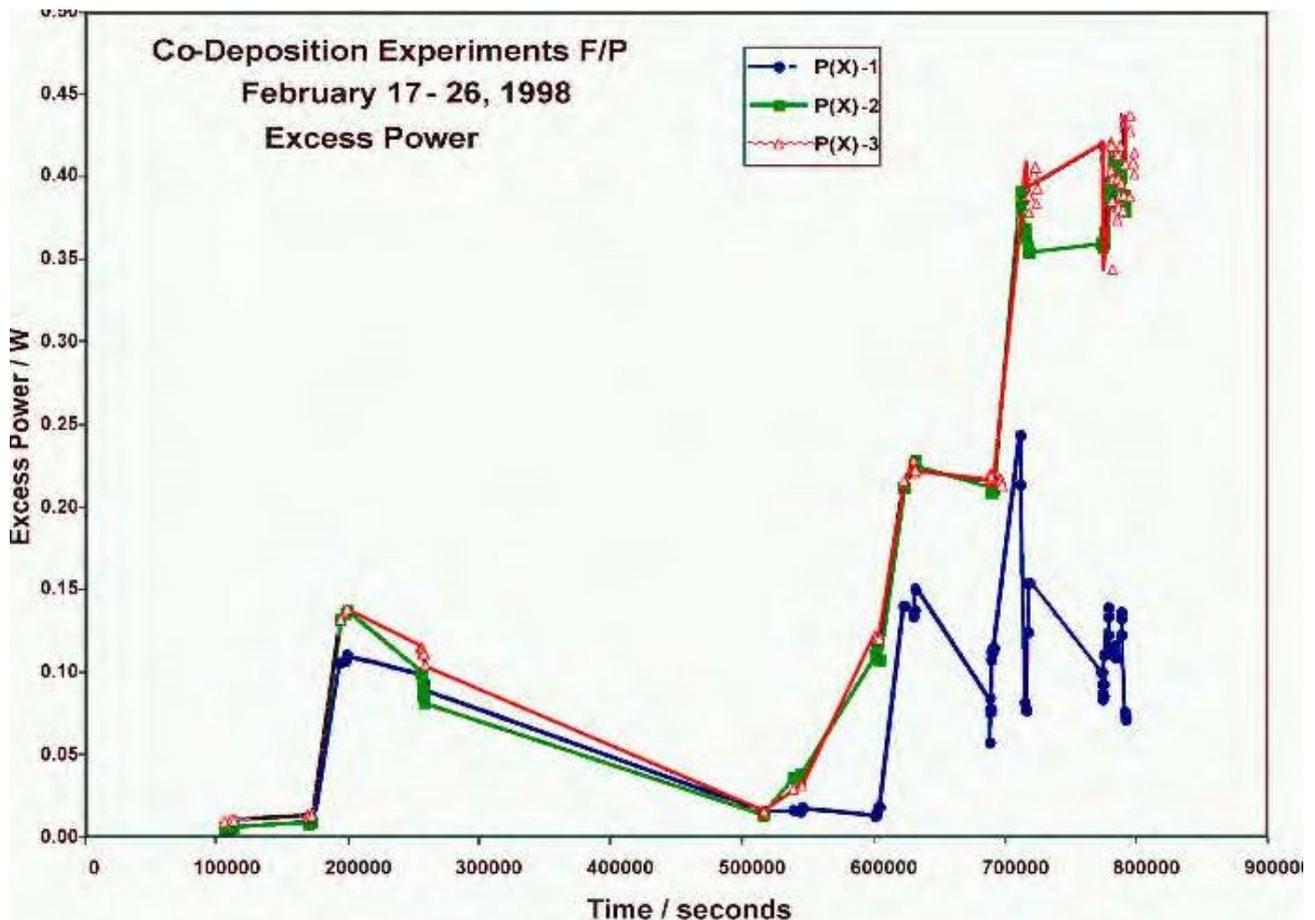


Figura 13: Andamento della potenza in eccesso durante gli esperimenti basati sulla codeposizione.

Due celle su tre, quelle identificate con le linee rossa e verde, hanno un andamento molto simile, eccezione fatta per gli ultimi momenti di elettrolisi; la terza cella mostra un comportamento nettamente diverso già da metà dell'esperimento; questo è un ulteriore esempio di come la riproducibilità non sia rispettata.

2.3 Ohmori e Mizuno

L'interesse per la fusione fredda è stato particolarmente notevole in Giappone, dove i ricercatori T. Mizuno e T. Ohmori hanno condotto una lunga serie di esperimenti a partire dal 1996. Il primo articolo, dal titolo "Anomalous γ Peak Evolution from SrCe Solid State Electrolyte Charged in D₂ Gas" descrive i primi fenomeni da loro osservati.

Il loro approccio alle misure è radicalmente diverso rispetto a quello utilizzato in passato: oltre alla rivelazione di neutroni e raggi X o γ , gli autori effettuano un'analisi spettroscopica degli elettrodi al termine dell'elettrolisi, risalendo così alle reazioni intermedie e riuscendo, in linea teorica, a comprendere la natura dei processi. Gli elettrodi in gioco sono una lega di stronzio, cerio, niobio e ittrio. In questo primo esperimento sono costituiti da un disco. Gli elettrodi sono stati ricoperti da uno strato di platino e posizionati all'interno di una struttura isolante chiamata "cilindro reattore", dal quale viene estratta l'aria fino a ottenere una pressione di circa 2×10^{-5} torr. La temperatura del campione viene portata fino a 400 – 700 °C e viene introdotto il gas di deuterio molecolare. Infine, viene applicata una differenza di potenziale alternata. Il seguente grafico mostra lo spettro dei raggi γ , prima e dopo l'elettrolisi.

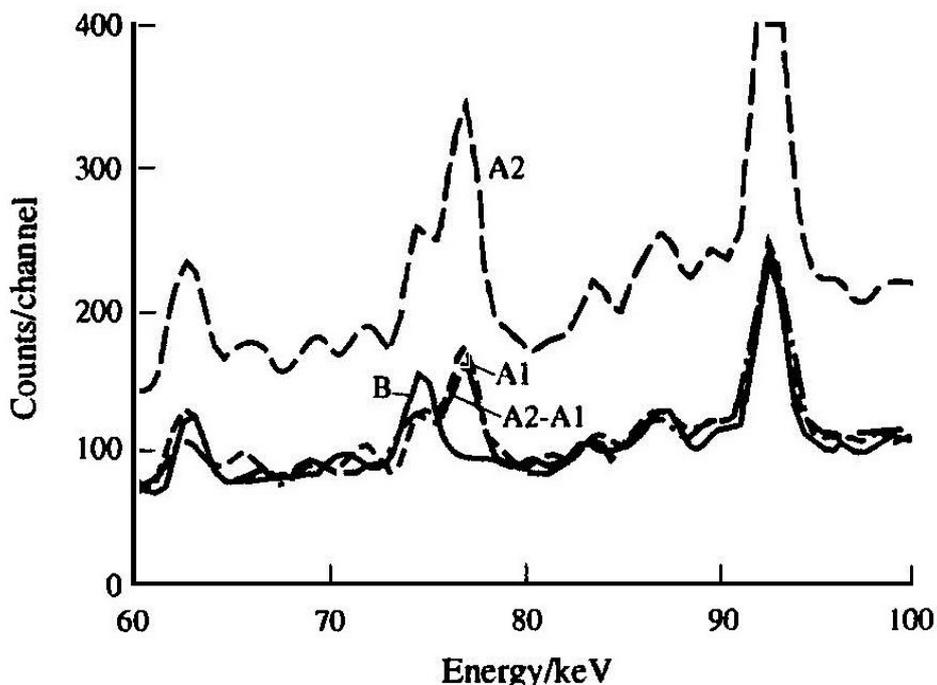
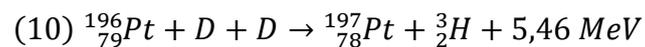


Figura 14: Conteggio di raggi γ misurati da Ohmori e Mizuno. La linea B rappresenta il background, le linee A1 e A2 le prime e le seconde ventiquattro ore dopo l'elettrolisi.

Il primo picco, centrato sui 77 keV , viene attribuito all'emissione di raggi γ con energia $77,35\text{ keV}$ dovuta all'isotopo del platino ^{197}Pt . Questo dato viene confermato da altri quattro test, i quali mostrano una riproducibilità del 100%, poiché sono stati ottenuti gli stessi valori. Ci si domanda dunque quale sia l'origine dell'elemento ^{197}Pt : non esistendo in natura, se ne attribuisce la creazione all'acquisizione di un neutrone durante il processo di elettrolisi dal momento che la seguente reazione può spiegare sia la creazione ^{197}Pt sia l'emissione di una significativa quantità di energia.



Esisterebbero altre reazioni possibili dati i reagenti disponibili, ma l'assenza di rivelazione di neutroni fa propendere il gruppo per questa.

Il lavoro principale della coppia Ohmori e Mizuno viene esposto alla settimana ICCF, nel 1998, tenutasi a Vancouver. Poiché era supposto che una trasmutazione nucleare avvenisse durante i processi riguardanti la fusione fredda, i due studiosi hanno pensato di utilizzare metalli con elevato numero di massa, in modo tale da favorire questi avvenimenti a causa della minore energia di legame per nucleone; come materiale con cui costruire gli elettrodi è stato scelto il tungsteno; la configurazione prevedeva anche un elettrodo di riferimento di platino. L'elettrolita scelto è stato Na_2SO_4 in concentrazione $0,5\text{ M}$, per un volume totale di soluzione di 120 ml . La temperatura dell'ambiente è stata mantenuta costante a un valore di $20 \pm 1\text{ }^\circ\text{C}$, mentre la temperatura della cella è stata misurata da una termocoppia alomel-chromel e da un ergometro ad alcol. Per la rivelazione di neutroni è stato utilizzato un contatore REM posto a 30 cm dalla cella elettrolitica; infine, sono state eseguite misure X tramite uno spettrometro di massa per indagare sui prodotti di reazione. Durante il processo si è mantenuta una corrente costante di $0,7 \pm 0,1\text{ A}$ e una differenza di potenziale di 160 V . È stato osservato, sotto queste condizioni, un forte bagliore alla base dell'elettrodo di tungsteno, costante nel tempo. Un evento ipoteticamente marginale ma di notevole fascino è stato il rumore, acustico, che si generava durante il lavoro. I ricercatori affermano che si sprigionava un suono intollerabile, decrescente se si aumentava la distanza tra la termocoppia e l'elettrodo; come per gli altri esperimenti si è costruita la curva di calibrazione per ottenere poi la stima del calore in eccesso: si tracciava una curva a cella spenta, scaldandola con un dispositivo, e una curva a cella attiva, così da avere un riferimento.

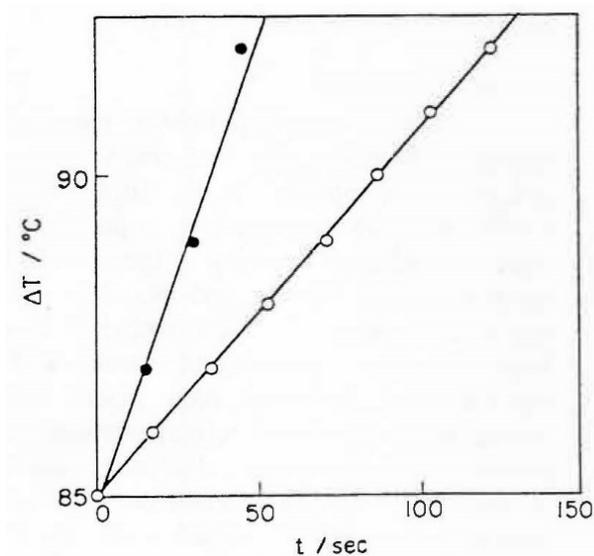


Figura 15: curve di calibrazione della cella. I punti neri indicano la calibrazione effettuata durante l'esperimento vero e proprio; quelli bianchi rappresentano la calibrazione sperimentale da utilizzare come confronto.

La velocità di aumento della temperatura a cella spenta è di $0,057\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ mentre a cella attiva di $0,15\text{ }^{\circ}\text{C/s}$. La potenza immessa si può calcolare come la potenza nominale elettrica, ovvero 112 W , per il rapporto tra i due valori di incremento temperatura, il cui risultato è 295 W , il quale porta a un valore di potenza in eccesso di 183 W .

Di seguito troviamo i grafici indicanti l'intensità delle emissioni dall'elettrodo e l'analisi spettroscopica della superficie di questi prima e dopo l'elettrolisi.

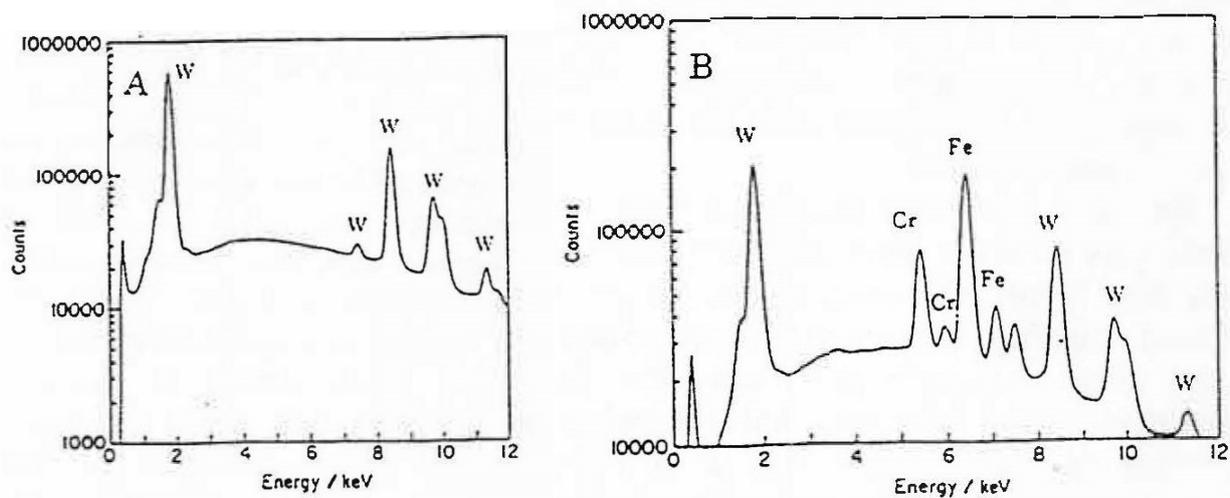
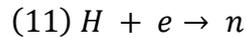
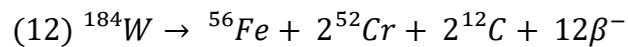


Figura 16: spettro ottenuto dall'EDX dell'analisi dell'elettrodo di tungsteno, prima (sinistra) e dopo il processo (destra).

Si nota come la quantità di ferro e cromo passi da trascurabile, prima, a importante, dopo. Questo risultato mostra che il tungsteno ha subito una trasmutazione in questi elementi. Il gruppo fornisce anche una spiegazione alla formazione di ferro e cromo. “Sotto un forte campo elettromagnetico è possibile che sulla superficie tra elettrodo e soluzione avvenga la reazione



ovvero che un protone catturi un elettrone per formare un neutrone”; questi verrebbero catturati dal tungsteno creando un isotopo di tungsteno più un certo numero di neutroni. Supponendo di ottenere ^{184}W a partire da ^{182}W , questo decadrebbe secondo la reazione



La precedente spiegazione risulta fallace: ^{184}W è stabile; lo stesso discorso vale per il ^{186}W mentre il ^{185}W decade in ^{185}Re che è stabile a sua volta; va quindi esclusa l’ipotesi di decadimento per spiegare la formazione di ferro e cromo.

2.4 Italia

In Italia spiccano i lavori condotti all'ENEA, i quali hanno come personalità di riferimento, principalmente, Antonella De Ninno, Emilio Del Giudice e Giuliano Preparata.

L'interesse per l'argomento era molto forte nel nostro Paese, così fu avviato un programma di ricerca presso l'ENEA, il cui direttore era Carlo Rubbia. La pubblicazione avviene, non senza problemi, nel 2002 con il titolo "Experimental Evidence of ^4He Production in a Cold Fusion Experiment".

L'approccio del gruppo è tanto semplice quanto le misure che effettuano. Basandosi sui lavori di Preparata, fisico teorico, per ottenere una fusione è necessario raggiungere una concentrazione di deuterio all'interno del palladio superiore al 100%, ovvero ottenere

$$(13) x = \frac{[D]}{[Pd]} > 1;$$

superata questa soglia si vedranno i fenomeni attesi. Le misure da loro condotte sono essenzialmente due: la prima riguardante la temperatura della cella e la seconda con lo scopo di rivelare ^4He . La misura fondamentale è la seconda, poiché la prima serve soltanto come confronto; infatti dal numero di atomi di ^4He conteggiati si risale all'energia emessa semplicemente sapendo che ogni coppia di deuteri che si fonde per ottenere questo prodotto rilascia $23,8 \text{ MeV}$.

Nel volume pubblicato dal gruppo dell'ENEA viene allegata una spiegazione teorica dei processi presi in esame, opera di Preparata, che verrà trattata nel prossimo capitolo.

Il gruppo si pone l'obiettivo di dimostrare che:

- 1) una tensione applicata al catodo è capace di caricare la matrice di palladio con deuterio;
- 2) quando x supera il valore unitario si ha la produzione di calore in eccesso;
- 3) simultaneamente, viene prodotto ^4He , la cui quantità è in relazione con il calore in eccesso.

L'anodo è formato da un foglio di platino, mentre il catodo è formato da una striscia di Pd , con resistenza intrinseca $R_0 = 3 \text{ k}\Omega$. La cella è stata riempita con $5,5 \text{ ml}$ di soluzione acquosa in cui è disciolto LiOD in concentrazione 10^{-4} M . La produzione del catodo è descritta come un processo particolarmente difficoltoso: durante l'assorbimento di deuterio, questo si allunga del 10% provocando un notevole stress sulla struttura; non è però chiaro come si sia ovviato al problema,

dal momento che viene soltanto scritto che è stata necessaria “un’opportuna scelta del substrato per ottenere un catodo robusto capace di sopravvivere a cicli di caricamento e svuotamento”.

Il valore di x viene stimato tramite il rapporto R/R_0 . Essendo R la resistenza del sistema, il suo andamento permette lo studio della potenza sviluppata da questo in funzione della temperatura, nello stesso modo con cui gli altri gruppi studiavano la conducibilità termica. Il catodo è tenuto in contatto ohmico con un elemento di Peltier, atto alla misura della temperatura; tramite la calibrazione si ottiene la relazione tra la potenza dissipata nella cella e la tensione applicata; questa risulta lineare con un fattore $17,3 \pm 0,3 \text{ W/V}$.

Per valutare la quantità di ^4He si esegue la spettroscopia dei gas prodotti ma per lo spettroscopio risulta difficoltoso discernere tra questo e D_2 ; l'accorgimento utilizzato consiste nel separare la miscela gassosa in gas inerti e non, in modo tale da eliminare l'ossigeno e il deuterio molecolare per ottenere un gas di soltanto ^4He , del quale si effettua una valutazione quantitativa attraverso la spettroscopia di massa. Questo processo è possibile attraverso l'utilizzo di un NEG, ovvero una pompa “non evaporabile getter”. L'analisi viene eseguita tramite un QMA, “quadrupole mass analyzer”, precedentemente calibrato con gas puri di N_2 , Ar , ^4He e D_2 .

La cella viene infine posta in un vaso UHV. Durante lo svolgimento, il gas che si sviluppa viene immagazzinato in un volume a pressione costante e il 6,29% di questo viene periodicamente inviato prima alla pompa NEG poi allo spettrometro. Poiché la quantità di gas analizzata per volta è costante, risulta semplice, alla fine dell'analisi, ottenere il dato totale, dal momento che è sufficiente tenere in considerazione l'incremento di quantità di ^4He e il tempo tra due invii per calcolare la potenza in eccesso.

L'esperimento può essere diviso in quattro fasi: precaricamento, caricamento, supercritica e di controllo:

A) fase di precaricamento: in queste condizioni la potenza in entrata e in uscita si eguagliano, decretando la natura stazionaria del processo senza guadagno energetico e produzione di ^4He ;

B) fase di caricamento: si nota un aumento della potenza in eccesso, sia tramite misure calorimetrica sia riguardante ^4He ;

C) fase supercritica: la potenza rimane più o meno costante;

D) fase di controllo: viene tolta l'alimentazione al sistema, il quale dopo alcune ore si spegne in modo completo.

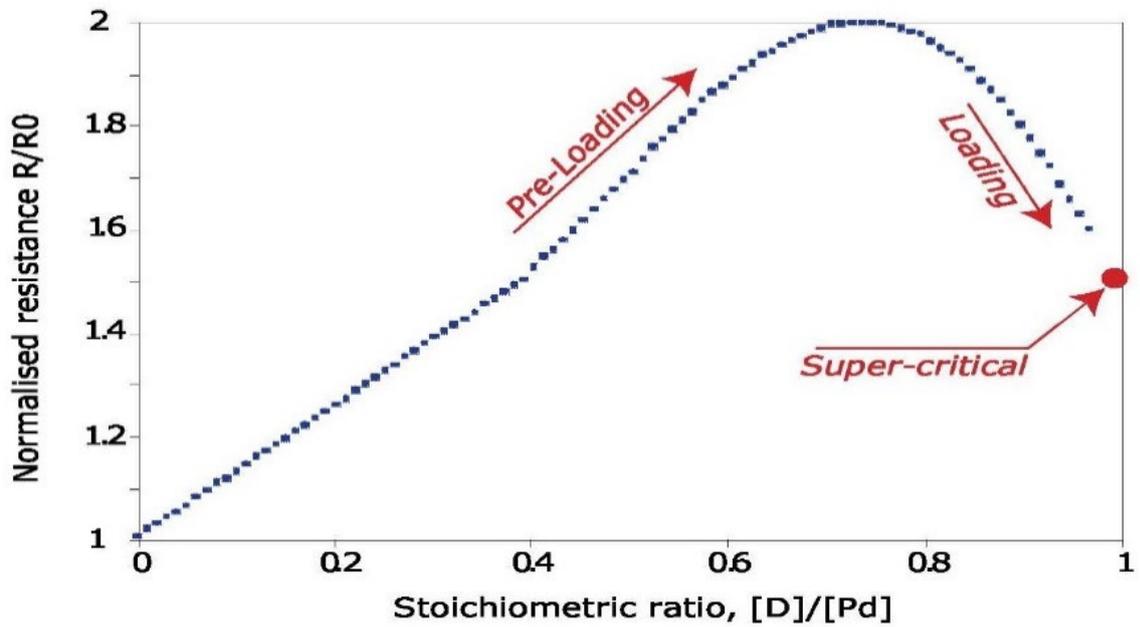


Figura 17: Andamento di R/R_0 del catodo in funzione del rapporto di caricamento $[D]/[Pd]$, grazie a questo si può ricavare il valore di x .

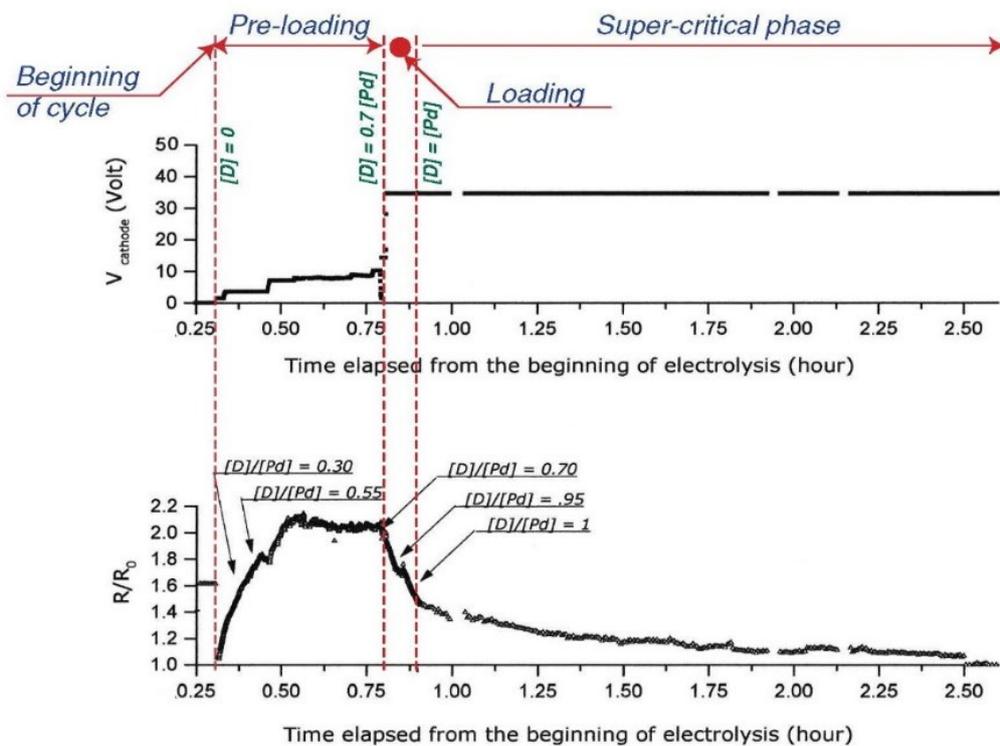


Figura 18: I due grafici mostrano, in funzione del tempo, l'evolversi della tensione e di R/R_0 .

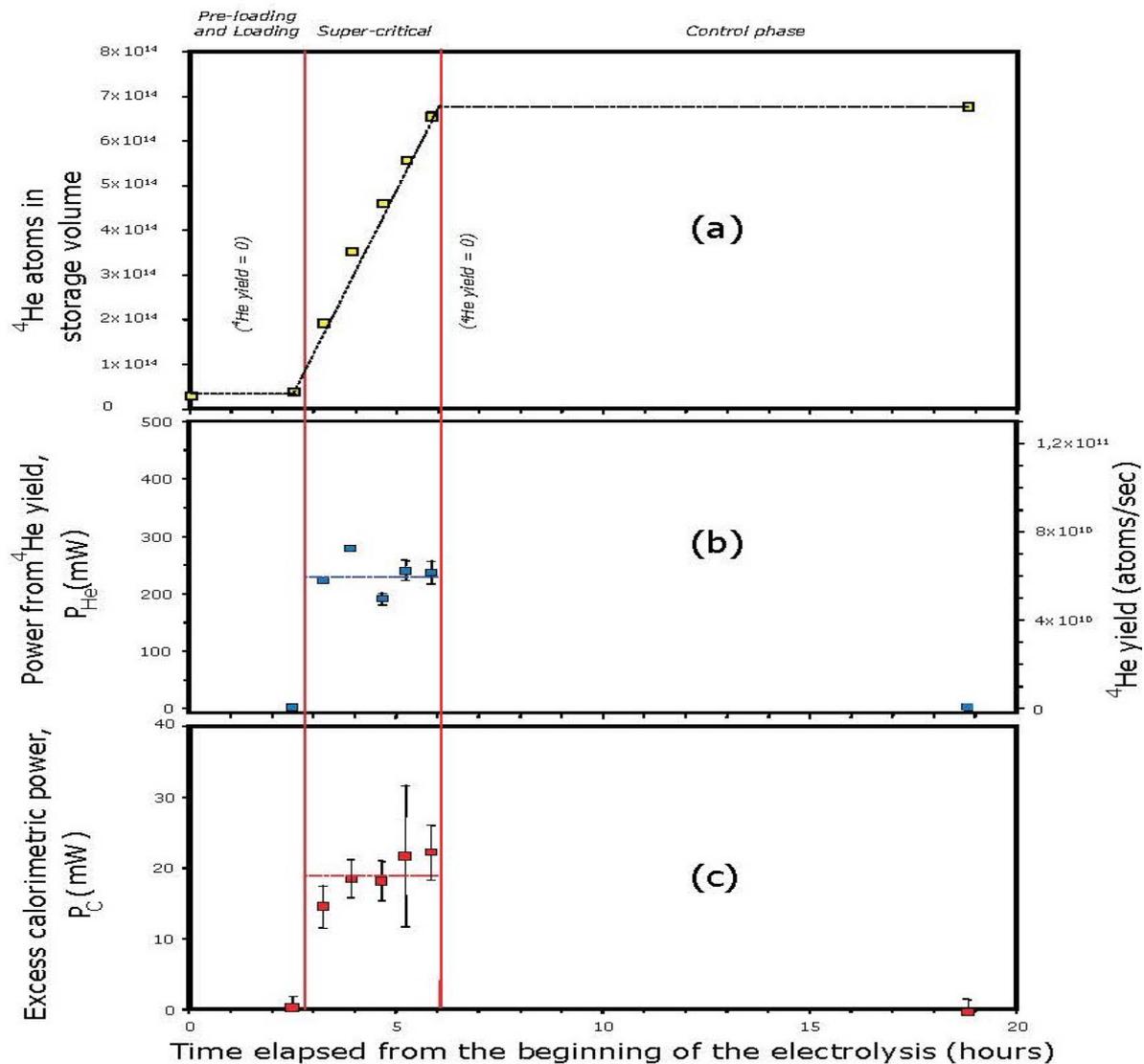


Figura 19: I tre grafici mostrano, in ordine, i valori di: ${}^4\text{He}$ accumulato, potenza in eccesso ricavata attraverso la misura dell' ${}^4\text{He}$ e la stessa ottenuta dalla misura calorimetrica.

La quantità di ${}^4\text{He}$ aumenta in corrispondenza della fase di caricamento e supercritica come atteso, comportamento tenuto anche dalla temperatura. La potenza stimata tramite l' ${}^4\text{He}$ supera quella calcolata in base all'andamento della temperatura: è circa 12 volte superiore. Questi dati si riferiscono alla prima di tre prove condotte e sono in completo disaccordo con le altre due, dal momento che durante la seconda prova non si è raggiunto il valore di x necessario, ottenendo una potenza di eccesso inferiore alla decina di milliwatt; la terza è forse quella più appariscente: il catodo è stato trovato fuso per circa il 5% della sua massa. La temperatura deve, necessariamente, aver superato 1828 K. L'energia necessaria per fondere il 5% del catodo corrisponde a una potenza

liberata di 3,15 W , chiaramente superiore alla potenza elettrica massima utilizzata durante l'esperimento, la quale è di 1,2 W .

In conclusione, non è stato possibile riprodurre il fenomeno.

Le affermazioni finali del gruppo sono ritenute positive rispetto alle intenzioni iniziali. Essi affermano infatti che l'"effetto Preparata", il quale sarà trattato nel prossimo capitolo, consistente nella descrizione del comportamento della cella in funzione del valore di x , ovvero dello studio del valore necessario perché questa esibisca i fenomeni studiati, è confermato. Energia in eccesso e 4He sono prodotti quando x oscilla intorno al valore unitario, come previsto dalla teoria; infine, la presenza di 4He dimostra la natura nucleare del processo in gioco ed è stato dimostrato che "si ha ottenuto una reazione nucleare con procedure puramente chimiche".

Parallelamente agli studi dell'ENEA, vengono condotti diversi esperimenti lungo l'asse Bologna-Siena, i cui principali studiosi sono Focardi e Piantelli. La loro cooperazione inizia intorno al 1994 con la pubblicazione dell'articolo "Anomalous Heat Production in Ni-H systems"; i risultati raccolti durante circa un decennio di ricerche vengono riassunti nella pubblicazione "Overview of Ni-H systems: Old Experiment and New Setup", datato 2004.

Questi articoli sono basati su una struttura sperimentale completamente diversa: non viene utilizzata una cella elettrolitica ma una vera e propria camera di reazione, in cui si trova un metallo capace di assorbire idrogeno, principalmente Nichel, e in luogo del deuterio si utilizza idrogeno.

La prima camera è composta da acciaio inossidabile al cui interno è situato un dispositivo per controllarne la temperatura. Dentro la camera è posto un cilindro di nichel, cuore dell'esperimento.

Nella camera viene fatto il vuoto e, successivamente, viene immessa una miscela di idrogeno e deuterio, in modo graduale, acquisendo costantemente i valori di pressione, tramite un piezomanometro, e di temperatura, tramite una termocoppia.

L'analisi dei cicli di caricamento di gas subiti dal metallo mostrano che il riempimento massimo avviene a 173 °C e a pressione al di sotto di quella atmosferica; i ricercatori hanno notato che, dopo diversi cicli di caricamento, avviene un deciso aumento di temperatura della barra. I dati mostrano che questo aumento di temperatura necessiterebbe di circa 20 W in più rispetto a quelli forniti; la spiegazione supposta è l'esistenza di una fonte interna di calore; questi esperimenti sono stati

ripetuti e si è misurato uno sbilanciamento di potenza fino a 50 W. Il seguente grafico mostra il comportamento del campione in differenti stati di sbilanciamento.

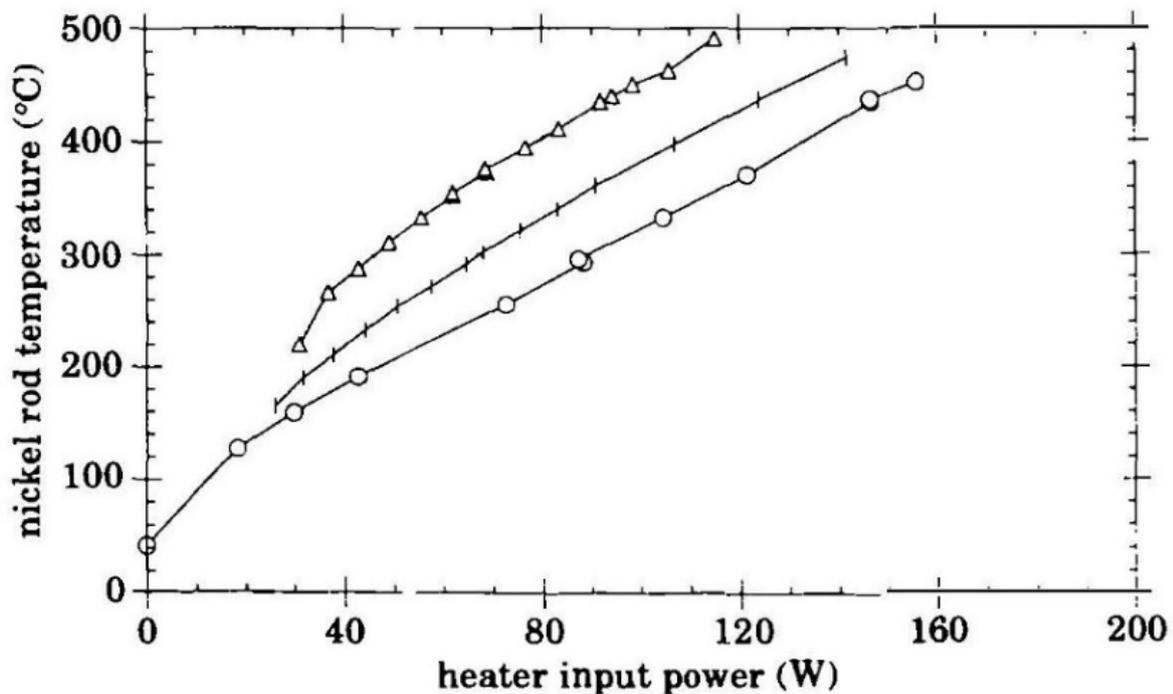


Figura 20: tre andamenti della temperatura in funzione della potenza immessa. I triangoli, le linee e i cerchi indicano, rispettivamente, le curve con uno sbilanciamento di 0, 20 e 50 W.

Le affermazioni finali del gruppo sono le seguenti:

- 1) il sistema è controllabile e riproducibile;
- 2) il sistema è stato mantenuto in uno sbilanciamento di potenza medio di 44 W per ventiquattro giorni, corrispondenti a circa 90 MJ; questa quantità di energia è oltre le possibilità di qualunque reazione chimica conosciuta;
- 3) la potenza richiesta per mantenere a una fissata temperatura una barra di nichel senza gas immagazzinato è circa il doppio di quella necessaria per lo stesso stato per il nichel carico. Questo sbilanciamento è considerevole guadagno del sistema;
- 4) non sono state rilevate emissioni di neutroni o γ oltre al valore di background durante gli esperimenti.

Lo studio delle celle Ni - H ha impegnato la coppia Focardi - Piantelli, insieme ad altri ricercatori, per circa dieci anni. Nel 2004 viene pubblicato un lavoro riassuntivo, che inizia con una veloce scorsa dei risultati, a livello qualitativo, fino a quel momento ottenuti:

- produzione di energia per un lungo periodo;
- emissione di neutroni, raggi γ e particelle cariche;
- rilevamento di altri materiali sulla superficie del nichel al termine degli esperimenti.

Durante gli anni, è stato usato principalmente nichel, puro o in lega, strutturato secondo varie forme e dimensioni, posto in una cella come quella sopra descritta, e caricato con idrogeno a pressione tra 100 e 1000 *mbar*, mantenendolo a temperature nell'intervallo 420 – 720 *K*. La seguente tabella riassume i risultati dei lavori principali.

AUTHORS	LAB	START	SAMPLE	H LOADIN G	Δt_{\max} [d]	ΔP_{\max} [TW]	TOTAL HEAT EXCESS [MJ]	NUCLEAR ASHES
F. Piantelli	Siena	January 92	Ni cylindrical	high	36	12	not valued	no γ -ray or neutrons measures altered metal surface
S. Focardi, R. Habel, F. Piantelli	Siena	October 93	nickel-plated Ni alloy cylindrical	high	55	44	> 90	no γ -ray or neutrons measures altered metal surface
S. Focardi, V. Gabbani, V. Montalbano, F. Piantelli, S. Veronesi	Siena	September 94	nickel-plated Ni alloy cylindrical	very high	278	72	~ 900	γ -ray neutrons altered metal surface
S. Focardi, V. Gabbani, V. Montalbano, F. Piantelli, S. Veronesi	Siena	November 94	nickel-plated Ni alloy cylindrical	high	319	18	~ 600	γ -ray no neutrons measures no measures on metal surface
S. Focardi, V. Gabbani, V. Montalbano, F. Piantelli, S. Veronesi	Siena	March 96	Ni plane	medium	22	27	38	γ -ray no neutrons altered metal surface
S. Focardi, V. Gabbani, V. Montalbano, F. Piantelli, S. Veronesi	Siena	July 96	Ni plane	very low	0	0	0	γ -ray no neutrons altered metal surface
E. Campari, S. Focardi, V. Gabbani, V. Montalbano, F. Piantelli, S. Veronesi	Bologna	June 96	Ni alloy cylindrical	high	not valued	no γ -ray or neutrons measures altered metal surface
S. Focardi, V. Gabbani, V. Montalbano, F. Piantelli, E. Porcù, E. Tosti, S. Veronesi	Colleferro	September 97	Ni alloy cylindrical	medium	147	8	~100	no γ -ray or neutrons no measures on metal surface
S. Focardi, V. Gabbani, V. Montalbano, F. Piantelli, S. Veronesi	Siena	November 97	Ni plane	low	0	0	0	γ -ray no neutrons no altered metal surface

Figura 21: tabella riassuntiva dei lavori condotti o a cui ha partecipato la coppia Focardi – Piantelli.

I dati sembrano protendere verso un processo energeticamente vantaggioso, ma significativamente aleatorio. Il guadagno energetico, l'emissione di fotoni e neutroni, l'assorbimento di idrogeno e la struttura del campione non sono relazionabili; per esempio, un guadagno energetico maggiore non implica maggiori emissioni di neutroni.

Per rivelare i neutroni sono stati utilizzati diversi strumenti: scintillatore, detector al germanio, pellicole, camera a nebbia e metodo ad attivazione, consistente in uno strumento contenente oro, il quale, se colpito da un neutrone, si trasforma da ^{197}Au in ^{198}Au , a cui segue il suo decadimento con l'emissione di un fotone con energia $411,8\text{ keV}$. Il seguente grafico mostra un chiaro picco sui 411 keV , corrispondente a un'emissione di 600 neutroni/s .

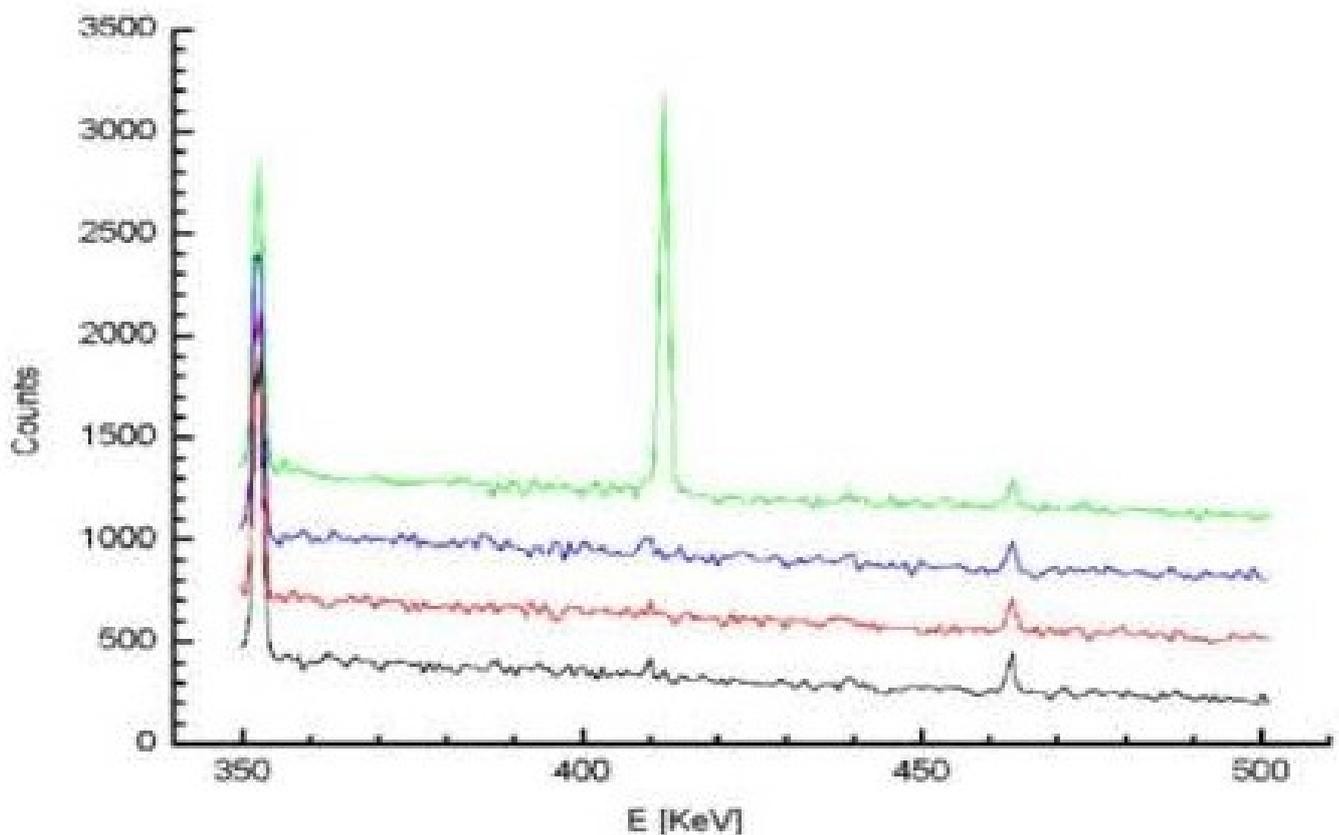


Figura 22: La linea verde rappresenta lo spettro dei raggi γ misurati. Notevole il picco a circa 411 keV come atteso. Le altre linee mostrano il background (blu), il foglio d'oro non irradiato (rossa) e lo stesso dopo dodici giorni di esposizione a dieci metri dalla cella (nera).

L'ultima figura mostra una tipica conclusione della spettrometria di massa eseguita sul nichel al termine dell'esperimento.

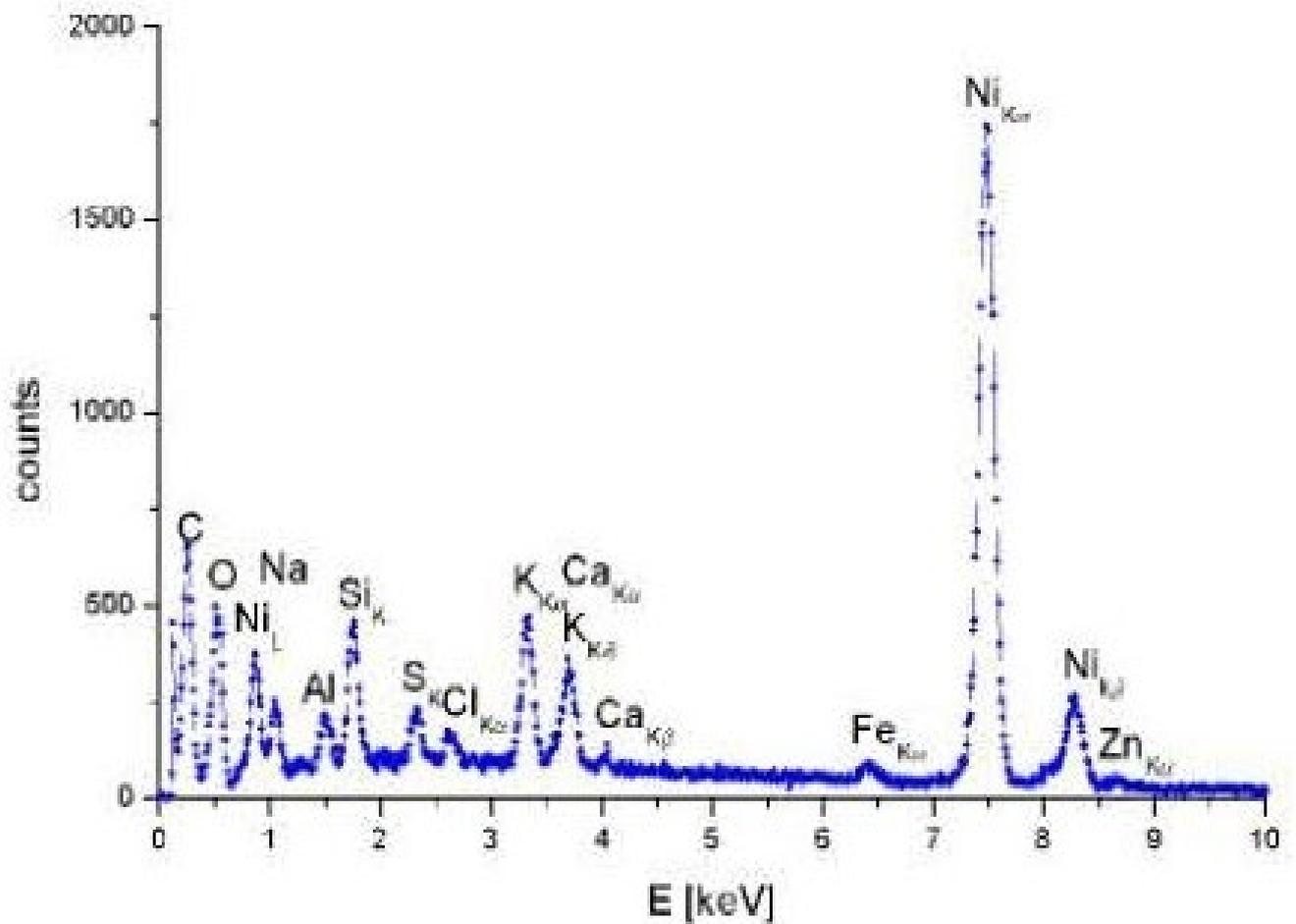


Figura 23: tipico esito della spettrometria di massa eseguita sul nichel al termine dell'esperimento.

Tutti i campioni che avevano assorbito grandi quantità di idrogeno o emesso una considerevole quantità di calore in eccesso, o nel caso si fossero verificati entrambi gli avvenimenti, hanno portato a un grafico analogo; si sottolinea che questi elementi non erano presenti prima delle prove, se non in percentuali minime tali da essere considerate soltanto come trascurabili impurezze.

2.5 Google

Uno dei più recenti studi sull'argomento è stato condotto da Google a partire dal 2015, per pubblicare i risultati a giugno 2019.

Questa serie di esperimenti è una delle più complete e precise ricerche mai svolte, non soltanto per quanto riguarda la precisione delle misure, ma per la meticolosità e la prudenza con cui sono state affrontate le esperienze.

Nell'introduzione si trova già un elemento di novità: la linea guida è stata la trasparenza per quanto riguarda i dati, e, soprattutto, uno stringente protocollo di revisione paritaria interno, prima di qualsiasi affermazione. La seguente breve citazione trasmette chiaramente l'approccio adottato: "Il piano era di condurre due anni di ricerca, iniziate nel 2016, assemblare team di ricerca nei vari laboratori accademici, incoraggiare l'interazione tra i gruppi, mantenere un basso profilo per evitare distrazioni e infine pubblicare i nostri risultati. L'obiettivo chiave del nostro programma era di definire quantitativamente limiti per l'osservazione di ogni anomalia termica o effetto nucleare".

Il gruppo Google si pone tre scopi da raggiungere, che risultano essere il controllo della veridicità delle tre affermazioni cardine nella storia della fusione a temperatura ambiente:

- 1) verificare che metalli intrisi di idrogeno siano precursori necessari per la fusione fredda;
- 2) controllare che questi producano veramente calore in eccesso;
- 3) rivelare firme che possano confermare o smentire la natura nucleare del processo.

Per quanto riguarda il primo punto, la base è data dagli studi di Micheal McKubre, il quale si è occupato per lungo tempo dei metalli altamente carichi di idrogeno. Il nocciolo della questione è il rapporto tra idrogeno, o uno dei suoi isotopi, e metallo, prendendo come esempio specifico il palladio.

McKubre afferma che tra i suoi dodici esperimenti, soltanto quelli in cui il rapporto

$$x = \frac{[H]}{[Pd]} > 0,875$$

emettono calore in eccesso. Il problema diventa perciò raggiungere questa concentrazione. Il metodo più efficace è quello elettrochimico, poiché si necessita di una ragionevole quantità di energia e la pressione dell'ambiente non deve essere necessariamente alta. Infatti, applicando

120 mV si riesce a far assorbire allo stesso campione di metallo una quantità di idrogeno equivalente a sottoporli a 100 atm. Tra i diversi campioni di palladio testati dal gruppo Google, soltanto uno ha raggiunto un valore sopra la soglia necessaria: in quel caso $x = 0,96 \pm 0,02$, mentre negli altri casi è sempre stato misurato $x < 0,875$.

Un obiettivo interessante è stato però raggiunto: il gruppo ha ottenuto una buona riproducibilità su elettrodi per i quali $x = 0,81 \pm 0,02$.

Sono state due le soglie proposte per innescare le ipotetiche reazioni di fusione, $x \cong 1$ e $x > 0,875$, rispettivamente da Preparata e McKubre; gli esperimenti di Google hanno mostrato che in un solo caso la soglia di McKubre è stata superata, mentre per quella di Preparata è stata avvicinata una sola volta, senza comunque raggiungerla, su un totale di 420 prove.

Questi dati dimostrano l'esistenza di una notevole difficoltà a priori, ovvero il caricamento del palladio.

Il secondo capitolo riguarda la calorimetria. Come già evidenziato in più passaggi, le misure calorimetriche sono tra le più difficoltose, dal momento che è necessario tenere in considerazione tutte le molteplici possibilità con cui l'energia può uscire dal sistema, come prodotto o dissipazione, ed entrare, in termini di alimentazione del sistema e di tutti i componenti presenti.

Il problema forse più importante è la precisione delle misure: riguardando i dati esposti, non è raro trovare incertezze molto grandi o addirittura articoli cardine della storia in cui non sono esposti gli errori; il gruppo di Google ha sviluppato diversi calorimetri, in modo tale da utilizzare quello adatto a ogni situazione e a ogni misura; il calorimetro principale ha una risoluzione del 2% e può operare fino a 1200 °C e pressione di 33 atm. L'obiettivo è stato quello di costruire un calorimetro capace di misurare un COP maggiore di 1,09, con una probabilità del 98% di identificare un fenomeno, inteso come un momento in cui il calore in eccesso è positivo, nel caso questo avvenimento accadesse. Richiedendo che ogni esperimento fosse riproducibile almeno quattro volte, sono stati testati 420 campioni e si è definito evento di calore in eccesso una misura di questo superiore al 10%.

L'esito delle misure non è stato favorevole alle tesi del guadagno energetico: la media dei COP misurati è stata unitaria, con un'incertezza associata di 0,0825.

Si passa infine alle analisi delle reazioni che definiscono le caratteristiche del processo. L'esperimento si compone di una camera di acciaio inossidabile contenente il catodo di palladio e un filo, collegato all'anodo, come mostrato nella seguente figura.

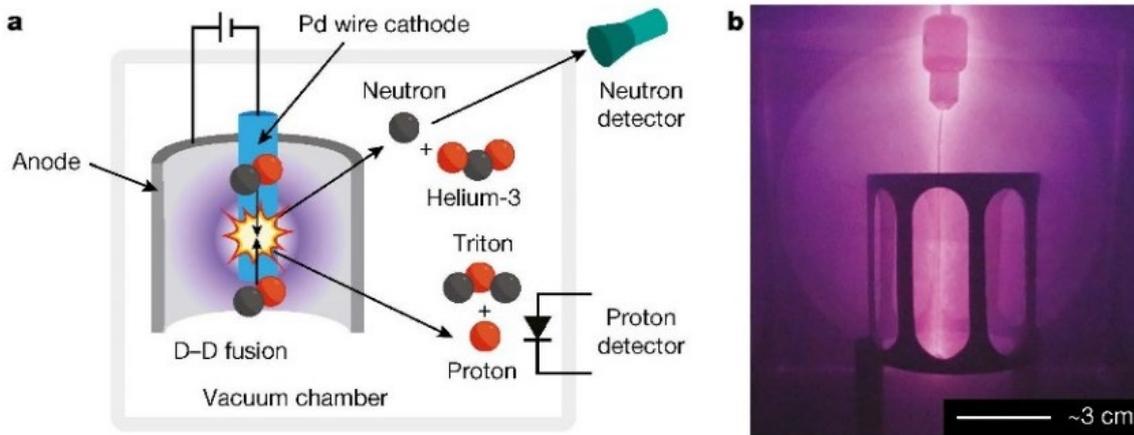


Figura 24: apparato sperimentale per la misura delle particelle. La parte a mostra uno schema della struttura, la parte b è una fotografia del sistema in azione.

La cella è stata riempita con D_2 e attraversata da una corrente di $1 A$, in modo da ionizzare il D_2 in D^+ e condurlo nel palladio. Al di fuori è stato posto un contatore di neutroni e uno di protoni, in modo da tale da misurare, rispettivamente, la quantità di 3He e trizio.

Dopo un intenso caricamento della matrice di palladio, stimato essere $10^{21} D^+ cm^{-2}$, non sono state trovate prove di produzione di trizio.

Capitolo 3 – Modelli teorici

3.1 Tabet e Tenenbaum: onda d'urto

Uno dei problemi caratteristici della fusione fredda è l'assenza di un modello teorico. Risulta complesso condurre un esperimento quando manca una teoria in grado di guidare la pratica. Esistono però diverse idee e ipotesi a riguardo per spiegare i fenomeni osservati.

Una delle prime spiegazioni è basata su un modello dinamico del deuterio all'interno del palladio; dal momento che il primo comporta un'espansione del secondo quando vi si accumula, si ha un aumento di energia elastica, la quale viene rilasciata sotto forma di onda d'urto e causa il collasso di domini del lattice, creando così le condizioni favorevoli a una fusione. Questo modello è stato sviluppato da Eugenio Tabet e Alexander Tenenbaum, presso La Sapienza a Roma, perfezionando le idee di Cassandro, Gallavotti e Jona-Lasinio.

Il deuterio accumulato nella matrice metallica può espanderla fino al 20% in caso di concentrazione 1: 1; questa espansione è accompagnata dall'aumento di energia 0,16 /

di palladio. Il diagramma di fase del sistema $Pd-D$ è diviso in tre sezioni quando siamo sotto la temperatura critica $T_c = 549 K$: queste tre fasi, dette α , β , e $\alpha + \beta$, dipendono dalla concentrazione c_0 del deuterio; la fase α e la fase β , rappresentano, rispettivamente, fasi di bassa e alta concentrazione di deuterio, mentre la fase intermedia $\alpha + \beta$ è caratterizzata da regioni di concentrazione maggiore e minore di c_0 , dette c_+ e c_- ; la struttura cristallina del palladio è cubica a facce centrate (fcc), il cui passo reticolare è denominato a_0 , a_+ , e a_- in base alla regione in cui ci si trova. Durante una transizione del sistema, a concentrazione totale c_0 costante, data da un aumento della pressione, i deuteri migrano dai domini di alta concentrazione a quelli di minore, impiegando un tempo dato da dal velocità di diffusione. Nelle zone in cui la concentrazione passa da c_0 a c_- , si ha un rilascio di energia elastica in modo discontinuo, attraverso il collasso di domini del lattice; assumendo questo dominio di forma sferica, con raggio R , la quantità di energia in gioco è data da

$$(14) E_R = 8\pi u^2 (R/a_0)^3 \varepsilon^2$$

Dove u è la velocità del suono, M la massa atomica del metallo e $\varepsilon = \frac{a_+ - a_0}{a_0}$ è l'espansione relativa del lattice. Si assume che quando $R\varepsilon = a_0$ questa regione diventi instabile e collassi a una densità corrispondente ad a_- , contraendo così il lattice. Il collasso si sviluppa un'"onda di spostamento",

ovvero un'onda d'urto, dall'esterno verso l'interno nella zona interessata, la quale sposta in modo coerente gli atomi dal livello esterno verso il dominio in cui si troveranno in una situazione stabile, come mostrato in figura 25; nel caso all'interno di questo dominio sia presente una coppia deuterio-deuterio l'energia trasmessa dall'onda a questa può dare origine alla loro fusione. Alla fine di questo processo gli atomi della matrice hanno trovato una nuova posizione di equilibrio, corrispondente al valore del parametro $a = a_0$; per raggiungere questa posizione serve un'energia

$$(15) \Delta e = Mu^2\varepsilon/2$$

per atomo.

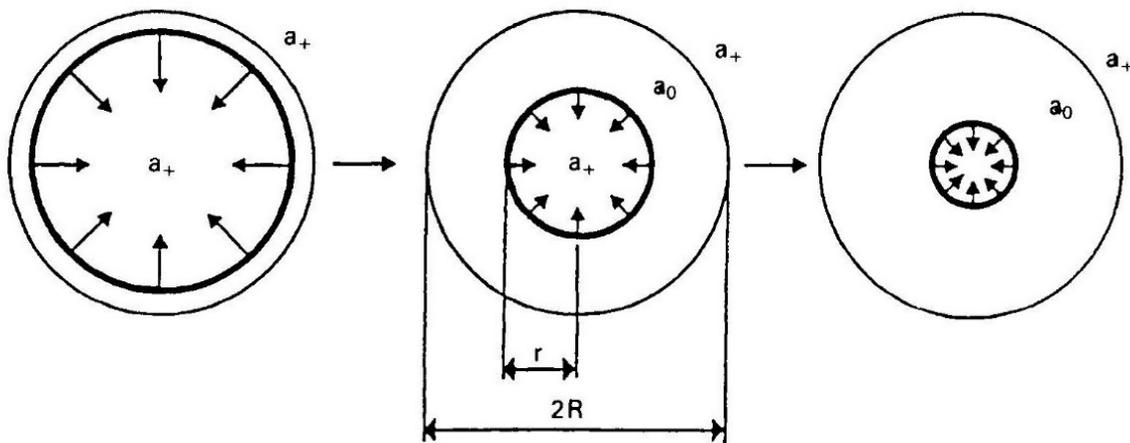


Figura 25: illustrazione schematica del collasso di un dominio.

Se la temperatura è sufficientemente alta, gli atomi possono rilassarsi a causa del moto dovuto all'energia termica; esiste quindi un livello ε_0 minimo per cui il collasso avviene, questo vale

$$(16) \varepsilon_0 = k_B T / Mu^2$$

con k_B costante di Boltzmann e T temperatura del sistema.

La durata del processo è stimata tramite argomentazioni di carattere dimensionale ed è data da

$$(17) \tau = \sqrt{\frac{E_R R^5}{\rho}}$$

dove ρ è la densità del metallo. Dopo aver percorso una distanza r dal centro, l'onda ha un'energia

$$(18) E_r = \frac{\eta_1 8\pi u^2 (R^3 - r^3)}{a_0^3}$$

nella quale il parametro η_1 misura la frazione di energia elastica in eccesso dell'onda, per questo è un parametro di efficienza.

Risulta più semplice dividere i livelli attraversati in superfici sferiche, ognuna di raggio r_i e spessore a_0 , con $r_i = ia_0$ e $i = 1, \dots, s = R/a_0$.

L'onda scalda il metallo e i deuteri in modo crescente andando verso il centro; i deuteri vengono quindi termalizzati decretando un aumento della velocità di diffusione, la quale in un certo livello di indice q diventa paragonabile alla velocità dell'onda. Il livello in cui sta passando l'onda, è sempre in contatto con uno precedente il parametro α ha assunto il valore a_0 , e uno successivo ancora definito da a_+ . In questa situazione gli atomi di deuterio tenderanno al livello successivo poiché qui il lattice ha una densità minore. Questo aspetto può essere formalizzato attraverso lo studio del fattore di anisotropia β , definito come la frazione di deuterio che diffondono verso il centro del dominio. Detti $n(r_k)$ il numero di deuteri nel k -esimo livello prima del collasso e $n^*(r_i)$ il numero di questi nel i -esimo livello, allora

$$(19) n^*(r_i) = \sum_k n(r_k) \beta^{k-i}.$$

Si può dimostrare che per valori di β non troppo superiori a 0,5 gli atomi di deuterio saturano la regione più interna.

Viene assunto che l'energia dell'onda sia trasferita a una coppia di deuteri con efficienza η_2 .

La probabilità che un deuterio si muova in direzione di un altro è $P = 1/12^2$, poiché sono dodici i siti interstiziali del lattice con struttura fcc. Per ottenere una stima del numero di reazioni innescate in un tempo τ , si necessita del valore della velocità relativa tra due deuteri, detta v_r e del tasso di reazioni che avvengono in una sfera di raggio r e spessore a_0 . La velocità è data da

$$(20) v_r = 0,9u \sqrt{\frac{8M}{ma_0} \left(\frac{R^3 - r^3}{r^2} \right) \alpha}$$

dove m è la massa del deuterio e $\alpha = \eta_1 \eta_2$.

Il tasso di fusione è

$$(21) \Gamma(r) = \sigma(v_r) v_r n_1(r) n_2(r) P.$$

nella quale $\sigma(v_r)$ indica la sezione d'urto della reazione deuterio-deuterio; supponendo che per ogni reazione ci sia un deuterio bersaglio e un deuterio proiettile, n_j indica la densità di

quest'ultimi per livello. Il primo è assunto fermo e il secondo in movimento con velocità

$$v(r_i) = v_r.$$

La sezione d'urto $\sigma(v_r)$ è stimata dalla sezione d'urto del processo σ_n per il fattore di tunneling della barriera di Coulomb. Poiché a basse energie il prodotto $\sigma_n(v)v$ è circa costante, si può stimare $\sigma(v_r)v_r$ dai dati sperimentali a energie di circa 10 keV come

$$(22) \sigma(v_r)v_r = \frac{2\pi e^2}{v_r} A_0 e^{-\frac{2\pi e^2}{v_r}}$$

con $A_0 \cong 1,48 \times 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{s}$ per la reazione $d + d \rightarrow {}^3\text{He} + n$.

Nel tempo τ , l'onda attraversa s livelli, dando origine a N_r reazioni, quantità valutabile come

$$(23) N_r = \sum_i \Gamma(r_i) a_0/v(r_i) \quad i = 1, \dots, s$$

In conclusione, si arriva al numero totale di reazioni per 1 g di metallo

$$(24) N_n = N_d \sum_i \sigma(v(r_i)) n_1(r) n_2(r) a_0$$

Nella quale N_d rappresenta il numero totale di domini che collassano per 1 g di lattice.

3.2 Widom e Larsen: cattura elettronica

La teoria Widom-Larsen si basa sulla cattura elettronica da parte di un protone con la conseguente produzione di un neutrone e un neutrino elettronico; è noto che un protone possa catturare un leptone realizzando il seguente processo

$$(25) l^- + p^+ \rightarrow n + \nu_l$$

dove l^- indica un leptone tra elettrone e muone. Perché questo sia possibile è necessario rispettare la condizione

$$(26) M_l > M_n - M_p \cong 2,531 M_e$$

la quale è rispettata dal muone ma non dall'elettrone. L'idea di Widom e Larsen è quella di incrementare la massa dell'elettrone di un fattore necessario tramite "fluttuazioni locali del campo elettromagnetico" date da un "moto collettivo dei protoni sulla superficie del metallo". Viene definito un fattore β che rappresenta l'incremento necessario per innescare la reazione all'interno dell'elettrodo come

$$(27) \beta = \frac{\tilde{m}}{m} = \sqrt{1 + \left(\frac{e}{m}\right)^2 A^\mu A_\mu} = \sqrt{1 + \frac{|\mathbf{E}|^2}{\varepsilon^2}} > 2,531$$

dove \tilde{m} rappresenta la massa dell'elettrone incrementata, A^μ è il quadripotenziale, \mathbf{E} il vettore campo elettrico e $\varepsilon = m\tilde{\Omega}/e$, con $\tilde{\Omega}$ una scala di oscillazione.

L'equazione (24) diventa ora

$$(28) E + e^- + p^+ \rightarrow n + \nu_e$$

dove E rappresenta l'energia aggiuntiva che rende possibile la reazione. Questa viene fornita attraverso l'applicazione di una differenza di potenziale in modo tale che una corrente sufficiente attraversi la superficie del catodo. Dette J e P la densità di corrente e la potenza per unità di superficie, V la tensione in esame, avremo che $P = JV = eV\Phi$, dove Φ è il flusso per unità di superficie di elettroni che attraversa il catodo. Il lavoro di Widom e Larsen si concentra sul calcolo della frequenza della reazione (28).

Per un dato elettrone "pesante", ovvero che ha cambiato la sua massa da m a $\tilde{m} = \beta m$, la frequenza di transizione è

$$(29) \Gamma_{e^{-}+p^{+} \rightarrow n+\nu_e} \sim (G_F m^2)^2 m^2 (\beta - \beta_0)^2 \sim 7 \times 10^{-4} (\beta - \beta_0)^2 \text{ Hz}$$

dove G_F è la costante di Fermi. Se ci sono

$$(30) n_2 \sim 10^{16} \text{ coppie } (\tilde{e}^{-}, p) / \text{cm}^2$$

allora il numero di neutroni creati al secondo per unità di superficie sarà il prodotto tra la (29) e la (30), ovvero

$$(31) \omega_2 \sim 10^{13} (\beta - \beta_0)^2 \text{ Hz/cm}^2.$$

Il valore richiesto di β implica un aumento di energia di $0,78 \text{ MeV}$ per elettrone. La scala di oscillazioni risulta essere $\tilde{\Omega} = 8,2 \times 10^{13} \text{ Hz}$ con un valore del campo elettrico $\varepsilon = 1,4 \times 10^{11} \text{ V/m}$. Questi dati comportano uno spostamento medio dei protoni di $2,2 \times 10^{-10} \text{ m}$, oscillanti secondo l'equazione

$$(32) \mathbf{E}(u(t)) = -\frac{M_p \tilde{\Omega}^2 \mathbf{u}(t)}{e}.$$

Nel 2013 Einar Tennfors esamina la teoria di Widom e Larsen, mettendo in mostra diversi errori; un'altra critica viene mossa da Luciano Maiani nel 2005.

Tennfors mostra che usando la densità di elettroni $\tilde{n} = 1/\pi a$, con a raggio di Bohr, supposta dai due autori, il coefficiente β risulta circa 1,005, mentre questi lo suppongo di circa 20.

Note le caratteristiche del palladio, ovvero numero atomico, struttura cristallina e passo reticolare, la densità di elettroni di elettroni è circa $3,1 \times 10^{30} \text{ m}^{-3}$, aumentando di due ordini di grandezza il valore di $\tilde{\Omega}$.

L'analisi del gruppo di Maiani porta allo stesso valore di β proposto da Tennfors. Il gruppo afferma inoltre che secondo loro "un simile valore di β , ovvero 20, non sia raggiungibile".

3.3 Preparata: abbassamento della barriera di Coulomb

Un ulteriore modello per spiegare il comportamento del deuterio all'interno della matrice metallica viene esposto da Preparata, Bressani e Del Giudice pochi mesi dopo l'annuncio di Fleischmann e Pons. Questi si interrogano sul motivo per cui nel caso di Fleischmann e Pons si sia misurato un notevole calore in eccesso ma pochi prodotti di fusione mentre altri abbiano rivelato un notevole numero di prodotti di fusione. Il loro obiettivo è comprendere come il lattice di palladio o titanio catalizzi un processo nucleare e per quale motivo questo avvenga in modo differente dallo stesso nel vuoto. La base della teoria è il modo di pensare le particelle cariche nel lattice, ovvero elettroni, deuterio assorbito, ecc.; queste vengono viste come appartenenti a un plasma e oscillanti intorno alla loro posizione di equilibrio con una frequenza

$$(33) \omega_p = e \sqrt{\frac{N}{mV}}$$

nella quale e è la carica e m la massa della particella, $\frac{N}{V}$ la densità di queste.

Queste particelle cariche danno luogo a oscillazioni coerenti intorno ai nuclei del metallo, creando così una super radianza, in cui la potenza emessa risulta proporzionale non al numero di oscillatori ma a questo valore al quadrato. Detta d_0 la distanza minima tra due di questi, la frequenza di oscillazione del plasma sarà

$$(34) \omega_{ep} = \frac{e}{\sqrt{m_e}} \left(\frac{1}{d_0}\right)^{3/2} \sqrt{Z} \cong 4.3 \times 10^5 \sqrt{Z} \text{ cm}^{-1}$$

L'ampiezza di oscillazione del plasma è data dall'equazione

$$(35) \delta = \frac{1}{\sqrt{2m_e\omega_{ep}}} \cong 6.7 \times 10^{-9} Z^{-1/4} \text{ cm}$$

Secondo il gruppo di Preparata l'insieme di elettroni, in numero Z , nella palla di raggio δ , correggerà il potenziale coulombiano $V = \alpha/r$ sentito da due deuteri portandolo a essere

$$(36) V'(r) = \frac{\alpha}{r} \left(1 - \frac{Zr^3}{2\delta^3}\right).$$

La possibilità di fusione è data da un vero e proprio abbassamento della barriera di potenziale, dovuta al termine di schermatura.

Da questi dati si può calcolare il coefficiente di penetrazione della barriera di Coulomb tra un certo R e r_N , espresso come

$$(37) D = \exp \left\{ - \int_{r_N}^{R_o} dx \sqrt{2\mu[V(r) - E]} \right\} \sim \exp \left\{ -2\sqrt{2\mu\alpha R_o} \int_{r_N}^{R_o} dx \sqrt{\frac{1-x^3}{x}} \right\}$$

dove $R_o = \delta \left(\frac{2}{Z}\right)^{1/3}$, $r_N \cong 5 \text{ fm}$ rappresenta la distanza a cui devono trovarsi due deuteri perché l'attrazione nucleare inneschi la fusione, μ la massa ridotta del sistema deuterio – deuterio.

Utilizzando Z per palladio e titanio, rispettivamente 56 e 22, si ottiene $D_{Pd} \sim 10^{-40}$ e $D_{Ti} \sim 10^{-49}$, valori nettamente maggiori di $D_{d_2} \sim 10^{-94}$, con $Z = 2$.

I deuteri all'interno del lattice sono soggetti all'oscillazione collettiva del plasma con frequenza

$$(38) \omega_d = e \sqrt{\frac{N}{Vm_d}} \sqrt{f} \cong 0,7 \times 10^4 \sqrt{f} \text{ cm}^{-1}$$

dove f è il numero di deuteri per atomo di metallo. Una volta che due deuteri si sono fusi, si crea un atomo di ${}^4\text{He}$ eccitato, indicato tramite ${}^4\text{He}^*$, il quale decade nello stato fondamentale dando luogo a un campo elettrico oscillante E . L'ampiezza di transizione dallo stato fondamentale del plasma indotto dal campo elettrico è data da

$$(39) A(t) \sim \frac{\sin(\omega t/2)}{\omega^2/2} \frac{ve^2}{\sqrt{2m_e\omega_{ep}}} \left(\frac{N}{V}\right) f\sqrt{D}N_e$$

$$N_e$$

Dove ω rappresenta la differenza di energia tra lo stato di ${}^4\text{He}^*$ e ${}^4\text{He}$ e N_e è il fattore di superradianza, dovuto all'interazione elettromagnetica coerente.

La quantità di potenza emessa per cm^3 è espressa da

$$(40) P = \Gamma_{em}\omega \left(\frac{N}{V}\right) \cong 3 \times 10^{40} \text{ W/cm}^3$$

Il coefficiente Γ_{em} è valutabile attraverso

$$(41) \Gamma_{em} = \left| A\left(\frac{\pi}{\omega}\right) \right|^2 \frac{\omega}{\pi} \cong 2.35 \times 10^{29} f \text{ D/s}$$

ed è detto frequenza di transizione elettromagnetica.

Conclusioni

Sono tre gli aspetti chiave presi in esame rispetto ai quali è possibile trarre una conclusione: riproducibilità, misure e modelli.

La riproducibilità è sicuramente la caratteristica più assente nel sistema. A parte Ohmori e Mizuno, nessuno ha ottenuto lo stesso esito dalle medesime configurazioni iniziali. Come suggerito dal DOE, sarebbe opportuno redigere e seguire un protocollo sperimentale definito; in questo modo risulterebbe possibile studiare in sistematicamente i comportamenti esibiti dai metalli caricati di idrogeno.

Le misure effettuate nella storia non permettono affermazioni certe; molti gruppi hanno ottenuto conferme ma altrettanti esperimenti negano qualsiasi risultato positivo. Rimane una certezza l'evento anomalo, verificatosi sia durante l'esperienza di Fleischmann e Pons sia all'ENEA, riguardante la fusione del catodo: in questi casi è chiaro che c'è stato uno sviluppo di potenza non imputabile all'alimentazione della cella ma a ciò che avviene all'interno dell'elettrodo; questi due fatti non sono la prova definitiva di qualche fenomeno, ma dovrebbero essere stimolo per ulteriori indagini.

I modelli teorici presi in esame risultano ambigui: riguardo la teoria Widom-Larsen è facile trovare numerosi articoli in cui vengono messi in evidenza le sue lacune.

L'idea di Tabet e Tenenbaum sembra essere l'ipotesi più verosimile, la quale necessita però di ulteriori sviluppi.

Per concludere, è bene ricordare come passioni non scientifiche siano entrate in gioco e abbiano nuociuto alla ricerca; non è intenzione di questo lavoro giudicare o insegnare, ma riflettere sulla storia potrà aiutare nuovi gruppi interessati a condurre indagini con il giusto atteggiamento, come dichiarato dal gruppo Google.

Bibliografia

T. Graham, *On the Absorption and Dialytic Separation of Gases by Colloid Septa*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London 156, 399-439 (1866).

M. Fleischmann, S. Pons, *Electrochemically induced nuclear fusion of deuterium*. Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry 261, 301-308 (1989).

Cold (con)fusion. Nature 338, 361 (1989).

Cold Fusion Causes Frenzy but Lacks Confirmation. Nature 338, 447 (1989).

S.E. Jones, E.P. Palmer, J.B. Czirr, D.L. Decker, G.L. Jensen, J M. Thorne, S.F. Taylor & J. Rafelski, *Observation of Cold Nuclear Fusion in Condensed Matter*. Nature 338, 737-740 (1989).

A. Bertin, M. Bruschi, M. Capponi, S. De Castro, U. Marconi, C. Moroni, M. Piccinini, N. Semprini-Cesari, A. Trombini, A. Vitale e A. Zoccoli, *Experimental Evidence of Cold Nuclear Fusion in a Measurement under the Gran Sasso Massif*. Il Nuovo Cimento A 101 (1989).

S. Dickman, *1920s Discovery, Retraction*. Nature 338, 629 (1989).

A. De Ninno, A. Frattolillo, G. Lollobattista, L. Martinis, M. Martone, L. Mori, S. Podda, F. Scaramuzzi, *Emission of Neutrons as a Consequence of Tritanium-Deuterium Interaction*. Il Nuovo Cimento A 101 (1989).

A.J. Appleby, Y.J. Kim, O.J. Murphy, S. Srinivasan, *Anomalous Calorimetric Results During Long-term Evolution of Deuterium on Palladium from Alkaline Deuterioxide Electrolyte*. Proc. ICCF 1 (1990).

D. Lindley, *Cold Fusion Gathering Is Incentive to Collaboration*. Nature 339, 325 (1989).

S.E. Koonin, M. Nauenberg, *Calculated Fusion Rates in Isotopic Hydrogen Molecules*. Nature 339, 690-691 (1989).

M. Gai, S.L. Rugari, R.H. France, B.J. Lund, Z. Zhao, A.J. Davenport, H.S. Isaacs, K.G. Lynn, *Upper Limits on Neutron Emission and γ -Ray Emission from Cold Fusion*. Nature 340, 29-34 (1989).

US DOE Panel, *A Report of the Energy Research Advisory Board to the United States Department of Energy*. 1989.

D.E. Williams, D.J.S. Findlay, D.H. Craston, M.R. Sené, M. Bailey, S. Croft, B.W. Hooton, C.P. Jones, A.R.J. Kucernak, J.A. Mason, R.I. Taylor, *Upper Bounds on Cold Fusion in Electrolytic Cells*. Nature 342, 375-384 (1989).

D.R.O. Morrison, *Review of Cold Fusion*. (1990).

E.F. Mallove, *MIT and Cold Fusion: a Special Report*. (1991).

J.M. Niedra, I.T. Myers, G.C. Fralick, R.S. Baldwin, *NASA Technical memorandum 107167 – Replication of the Apparent Excess Heat Effect in a Light Water-Potassium Carbonate-Nickel Electrolytic Cell*. (1996).

S. Szpak, P.A. Mosier-Boss, *Thermal and Nuclear Aspects of the Pd/D₂O System – Vol. 1: a Decade of Research at Navy Laboratories*. 2002.

S. Szpak, P.A. Mosier-Boss, J.J. Smith, *On the Behavior of Pd Deposited in the Presence of Deuterium*. Journal of Electroanalytical Chemistry 302, 255-260 (1991).

S. Szpak, P.A. Mosier-Boss, J.J. Smith, *On the Behavior of the Cathodically Polarized Pd/DSsystem: Search for Emanating Radiation*. Physics Letters A 210, 382-390 (1996).

S. Szpak, P.A. Mosier-Boss, S.R. Schrarber, *Charging of the Pd/ ³H System: Role of the Interphase*. Journal of Electroanalytical Chemistry 337, 147-163 (1992).

D. Hodko, J. O'M. Bockris, *Possible Excess Tritium Production on Pd Codeposited with Deuterium*. Journal of Electroanalytical Chemistry 353, 33-41 (1993).

M.H. Miles, K.H. Park, D.E. Stilwell, *Electrochemical Calorimetric Studies of the Cold Fusion Effect*. Proc. ICCF 1 (1990).

M.H Miles, R.A. Rollins, B.F. Bush, J.J. Lagowski, R.E. Miles, *Correlation of Excess Power and Helium Production During D₂O and H₂O Electrolysis Using Palladium Cathodes*. Journal of Electroanalytical Chemistry 346, 99 (1993).

M.H. Miles, B.F Bush, K.B. Johnson, *Anomalous Effects in Deuterated Systems*. Defense Technical Information Center (1996).

B.F. Bush, J.J. Lagowski, M.H. Miles, G.S. Ostrom, *Helium Production During the Electrolysis of D₂O in Cold Fusion Experiments*, Journal of Electroanalytical Chemistry. 304, 271-278 (1991).

- S. Szpak, P.A. Mosier-Boss, M.H. Miles, *Calorimetry of the Pd + D Codeposition*. Fusion Technology 36, 234-241 (1999).
- T. Mizuno, K. Inoda, T. Akimoto, K. Azumi, M. Kitaichi, K. Kurokawa, T. Ohmori, M. Enyo, *Anomalous γ Peak Evolution from CrCe Solid State Electrolyte Charged in D₂ Gas*. International Journal Hydrogen Energy 22, 23-25. (1997).
- T. Ohmori, T. Mizuno, *Strong Excess Energy Evolution, New Element Production, and Electromagnetic Wave and/or Neutron Emission in the Light Water Electrolysis with a Tungsten Cathode*. Proc. ICCF 7 (1998).
- R. Capote, A. Trkov, I. Kodeli, E. Soukhovitskii, L.C. Leal, M. Herman, D.W. Muir, *Evaluation of Tungsten Isotopes in the Fast Neutron Range Including Cross Section Covariance Estimation*. International Conference on Nuclear Data for Science and Technology (2007).
- A. De Ninno, A. Frattolillo, A. Rizzo, E. Del Giudice, G. Preparata, *Experimental Evidence of ⁴He Production in a Cold Fusion Experiment*. ENEA Rapporto 41 (2002).
- S. Focardi, R. Habel, F. Piantelli, *Anomalous Heat Production in Ni-H Systems*. Il Nuovo Cimento A 107, 163-167 (1994).
- E. Campari, S. Focardi, V. Gabbani, V. Montalbano, F. Piantelli, S. Veronesi, *Overview of Ni-H Systems: Old Experiments and New Setup*. (2004).
- C.P. Berliquette, Y. Chiang, J.N. Munday, T. Schenkel, D.K. Fork, R. Koningstein, M.D. Trevithick, *Revisiting the Cold Case of Cold Fusion*. Nature 570, 45-51 (2019).
- M. Cassandro, G. Gallavotti, G. Jona-Lasinio, *Energy Concentration Induced by Phase Transition in Hydrogenated Metals*. (1989).
- E. Tabet, A. Tenenbaum, *Nuclear Reactions from Lattice Collapse in a Cold Fusion Model*. Physics Letters A 144, 301-305 (1990).
- E. Tabet, A. Tenenbaum, *A Dynamical Model for Cold Fusion in Deuterated Palladium*. Fusion Technology 18, 143-146 (1990).
- A. Widom, L. Larsen, *Ultra Low Momentum Neutron Catalyzed Nuclear Reactions on Metallic Hydride Surfaces*. The European Physical Journal C – Particles and Fields 46, 107-111 (2005).

A. Widom, L. Larsen, *Theoretical Standard Model Rates of Proton to Neutron Conversions Near Metallic Hydride Surfaces*. (2007).

Y.N. Srivastava, A. Widom, L. Larsen, *A Primer for Electro-Weak Induced Low Energy Nuclear Reactions*. *Pramana* 75, 617-637 (2010).

T. Bressani, E. Del Giudice, G. Preparata, *First Steps Toward an Understanding of Cold Nuclear Fusion*. *Il Nuovo Cimento A* 101, 845-849 (1989).

G. Preparata, *Some Theories of Cold Nuclear Fusion: A Review*. *Fusion Technology* 20, 82-91 (1991).