

Heisenberg e gli sviluppi della fisica nucleare

Francesco Guerra

Dipartimento di Fisica, Università di Roma "La Sapienza"

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Roma

Centro Studi e Ricerche Enrico Fermi, Roma

.

Nadia Robotti

Dipartimento di Fisica, Università di Genova

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Genova

Centro Studi e Ricerche Enrico Fermi, Roma

Udine 16 ottobre, 2017
Copenhagen: Fisica del Novecento in una
società in guerra



Le forze germaniche del Terzo Reich attaccano di sorpresa la Danimarca, attraverso i suoi confini meridionali, il 9 aprile 1940, alle ore 5.25 del mattino, nell'ambito dell'operazione *Weserübung* (Esercitazione Weser), il cui obiettivo principale è l'occupazione della Norvegia, di grande rilevanza strategica per la guerra contro Francia e Inghilterra. Contemporaneamente truppe aviotrasportate occupano la principale base dell'aviazione danese ad Aalborg, e altre forze, via mare, invadono il territorio da cinque diversi punti di sbarco, tra cui Copenhagen.

Data la grande sproporzione di forze, il governo danese ordina la resa alle 7.20 dello stesso giorno. L'invasione è quindi completata in meno di due ore.

Tocca poi, in rapida sequenza, alla Norvegia, all'Olanda, al Belgio, al Lussemburgo, alla Francia.

L'occupazione tedesca della Danimarca nei primi anni si svolge con sostanziale mitezza. La Danimarca conserva il suo governo, il Re,

l'amministrazione. Addirittura nel 1943 si svolgono le previste elezioni.

La famosa visita di Werner Heisenberg a Niels Bohr a Copenhagen si svolge nell'autunno del 1941.

Nell'intervento precedente di Nadia Robotti è stato spiegato esaurientemente chi sono questi due grandi personaggi, e quali contributi hanno dato all'investigazione della struttura dell'atomo, e alla formulazione della moderna meccanica quantistica.

Mi limito a ricordare le motivazioni per i Premi Nobel del 1922 e del 1932, rispettivamente.

Niels Bohr (7 ottobre 1885 - 18 novembre 1962) riceve il Premio Nobel per la Fisica 1922 “for his services in the investigation of the structure of atoms and of the radiation emanating from them” .

Werner Heisenberg (5 dicembre 1901 - 1 febbraio 1976) riceve il Premio Nobel per la Fisica 1932 (annunziato nel 1933) “for the creation of quantum mechanics, the application

of which has, inter alia, led to the discovery of the allotropic forms of hydrogen” .



L'incontro del 1941, realmente avvenuto, ha fornito l'ispirazione a Michael Frayn per la sua famosissima pièce *Kopenhagen*, in cui si mescolano aspetti storici, e richiami alle strutture della meccanica quantistica, in un contesto di grande valore drammaturgico.

In questa opera teatrale un ruolo molto importante è svolto dalla moglie di Bohr, Margrethe Nørlund (1890-1984), che qui rivediamo con il marito:



A proposito dei rapporti tra Bohr e Heisenberg possiamo individuare tre “Copenhagen”.

La prima è quando Heisenberg, giovanissimo, ma ormai brillante fisico teorico, assistente di Max Born a Göttingen, si reca, come abbiamo visto, a Copenhagen per sette mesi da metà settembre del 1924 agli inizi di aprile 1925, con il supporto di una borsa di studio Rockefeller (International Education Board). Heisenberg è ormai profondamente critico verso la formulazione data da Bohr alla (vecchia) meccanica quantistica, con le

sue orbite non osservabili e le regole di quantizzazione arbitrarie. Ma Bohr è comunque un grande Maestro. Dirà Heisenberg in seguito: “Bei Sommerfeld hab’ich den Optimismus gelernt, bei den Göttingern die Mathematik und bei Bohr die Physik”. Bohr è e resterà per sempre “il Papa” della fisica moderna.

Nel corso di questa visita a Copenhagen le idee di Heisenberg trovano la giusta maturazione. Al suo ritorno, egli perviene, come abbiamo visto, alla “creazione” della moderna

meccanica quantistica, ulteriormente sviluppata dai Tre Uomini di Göttingen: Werner Heisenberg, Max Born, Pascual Jordan.

Successivamente, la formulazione di Göttingen si espande, fino a conglobare la meccanica ondulatoria di Erwin Schrödinger, con tutti i suoi problemi interpretativi.

In questa complessa operazione gioca un ruolo fondamentale proprio Niels Bohr. Abbiamo la seconda Copenhagen, simbolizzata anche da un ulteriore soggiorno di Heisenberg.

La meccanica quantistica si articola in un complesso edificio concettuale che va sotto il nome di interpretazione di Copenhagen, nella quale il carattere probabilistico della funzione d'onda, il principio di indeterminazione di Heisenberg e il principio di complementarità di Bohr costituiscono l'ossatura fondamentale.

L'incontro tra Werner Heisenberg e Niels Bohr a Copenhagen nel 1941, in piena guerra, che allora sembrava decisamente vittoriosa per

le forze germaniche, costituisce in un certo senso la terza Copenhagen.

Per capire la dinamica e le conseguenze dell'incontro del 1941, occorre considerare che insieme ai due protagonisti visibili, Heisenberg e Bohr, ce n'è un terzo. Un invitato di pietra che condiziona di fatto la situazione: Enrico Fermi (1901-1954). Teniamo conto delle età e delle posizioni scientifiche e accademiche dei tre. Fermi e Heisenberg sono coetanei, Bohr è più anziano di circa quindici anni. Tutti e tre sono Premi Nobel, ma il

Nobel di Bohr si riferisce ad una epoca lontanissima, se teniamo conto degli sviluppi rapidissimi della fisica negli ultimi anni. Tutto sommato, Niels Bohr è ancora “il Papa” .

Simbolicamente riprendo il quadretto di prima completandolo nella forma



Per capire le ragioni dell'intrusione, dobbiamo fare un piccolo passo indietro.

Sintetizzo.

Nel dicembre del 1938 Otto Hahn e Fritz Strassmann a Berlino scoprono un nuovo fenomeno nucleare: la fissione. Il nucleo di Uranio, sottoposto al bombardamento di neutroni lenti, si scinde in due nuclei più piccoli, per esempio Bario e Krypton, liberando una "grande" quantità di energia.

Mentre in una tipica reazione chimica, per esempio lo scoppio di un esplosivo convenzionale, l'energia liberata per atomo si può valutare in qualche elettronVolt (unità di misura convenzionale dell'energia), invece nella fissione l'energia liberata per ogni nucleo scisso è circa cento milioni di volte più grande. L'energia di fissione è quindi enormemente più grande per nucleo di quella coinvolta in fenomeni chimici, per atomo. E questo di certo è molto interessante.

Occorre però tener conto del fatto che anche i 200 milioni di elettronVolt convolti nel-

la fissione di un nucleo di Uranio sono una quantità infima di energia rispetto alla scala macroscopica.

Per esempio, per sollevare un granellino di polvere di un milligrammo per un centimetro, opponendosi alla forza di gravità terrestre, sono necessari circa mille miliardi di elettron-Volt. Altro che i 200 milioni disponibili per ogni fissione!.

La fissione pare solo una importante scoperta scientifica, su un fenomeno assolutamente

te nuovo, ma priva di applicazioni pratiche immediate.

Invece le cose stanno in maniera completamente diversa. Immediatamente dopo la scoperta della fissione (forse anche prima) partono le ricerche per vedere se è possibile innescare una reazione a catena.

Il meccanismo della reazione a catena è per esempio quello che permette l'uso pratico

della piccolissima energia (per atomo) liberata in una reazione chimica, in maniera controllata o esplosiva. Una reazione di combustione deve essere innescata in modo che il combustibile bruci nel comburente (ossigeno). Via via che la reazione prosegue, se continuano ad affluire combustibile e comburente, si creano le condizioni perché le nuove molecole continuino a bruciare.

La fiamma di una candela è un bellissimo esempio di reazione a catena controllata.

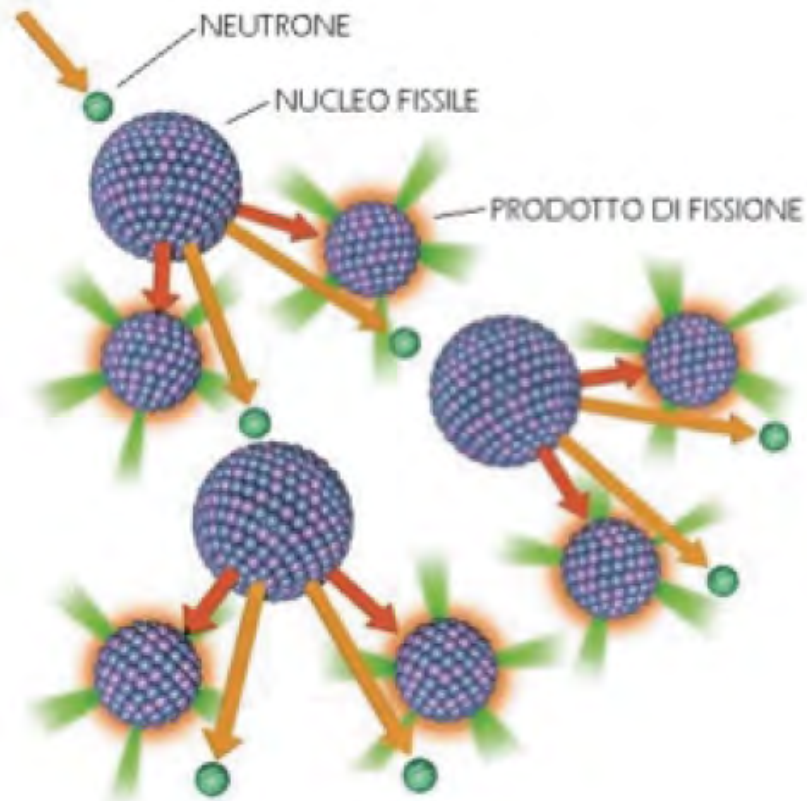


La cera fusa affluisce lentamente sul lucignolo e brucia con regolarità.

In una esplosione invece la reazione a catena si propaga in modo incontrollato sulla massa della sostanza esplosiva.

La possibilità della reazione a catena nucleare riposa sul fatto che in ogni singolo processo di fissione si liberano anche alcuni neutroni che possono produrre ulteriori fissioni, con un effetto moltiplicativo controllato o esplosivo.

La scoperta dei neutroni secondari fu fatta subito nel 1939 a Parigi da Frédéric Joliot-Curie ed immediatamente resa disponibile alla comunità scientifica. Inoltre, Niels Bohr si accorse immediatamente che nell'Uranio naturale solo l'isotopo 235 è facilmente fissionabile, rispetto al 238 che è quello più abbondante in natura (99,3%).



rappresentazione schematica di una reazione a catena

Quindi già nel 1939 diventa chiara la possibilità di sfruttamento dell'energia nucleare. Dati i tempi le ricerche sono volte naturalmente verso gli aspetti militari.

In particolare, Enrico Fermi negli Stati Uniti e Werner Heisenberg in Germania sono subito coinvolti nei rispettivi programmi di ricerca. Essi sono i due principali competitori a livello internazionale.

Questo giustifica l'immagine dei "tre" protagonisti nell'incontro di Copenhagen 1941.

Un “Papa”, e due brillantissimi “giovani” in competizione, lontana ma reale e su un tema di vitale importanza.

Le difficoltà di un programma nucleare sono dovute al fatto che non sono possibili reazioni esplosive nell’Uranio naturale. Anche se nelle reazioni di fissione sul 235 vengono prodotti alcuni neutroni secondari, questi vengono immediatamente assorbiti nel 238, che ne è avido ma non si scinde, e sono perduti agli effetti della reazione a catena.

Hahn e Strassmann hanno scoperto la fissione, senza distruggere il loro laboratorio.

Per avere una reazione a catena esplosiva è necessario “arricchire” l’Uranio naturale facendo aumentare la percentuale di 235, in modo che il 238 non interferisca. Si tratta di un procedimento penosissimo. Il 235 e il 238 sono elementi identici dal punto di vista chimico, che risente solo del numero atomico (carica elettrica del nucleo). In entrambi i nuclei vi sono 92 protoni. Il 235

ha tre neutroni in meno, e quindi una massa leggermente diversa, con una differenza inferiore all'1%.

Furono subito escogitati vari metodi per produrre l'arricchimento, tra cui l'uso di ultracentrifughe, di grande risonanza mediatica attuale. Gli Stati Uniti riuscirono a produrre una quantità consistente di Uranio altamente arricchito solo nel corso di alcuni lunghissimi anni, tanto da poter produrre un paio di bombe solo nell'estate del 1945, quando la

guerra con la Germania era ormai terminata. È noto che una di queste bombe fu fatta esplodere sulla città giapponese di Hiroshima il 6 agosto del 1945.



impianto S-50 (OakRidge) per la separazione termica a diffusione liquida dell'uranio 235

Dai documenti ufficialmente noti risulta che la Germania, pur possedendo una sofisticatissima conoscenza sulle ultracentrifughe, e sugli altri metodi di separazione isotopica, non riuscì a creare quantità apprezzabili del 235 , nel corso della guerra.

Ma esiste, dal punto di vista fisico, una strada completamente diversa verso la bomba. È il reattore nucleare, dove si realizza una reazione a catena controllata autosostenuta nell'Uranio naturale. Ne risulta la possibile produzione di energia, ma anche un'altra

sconcertante possibilità. In un reattore funzionante c'è un continuo flusso di neutroni. Questi, come abbiamo detto, sono assorbiti nel ^{238}U , senza fissione. Viene però prodotto un nuclide instabile, che attraverso una serie di decadimenti radioattivi si trasforma nell'elemento transuranico con $Z = 94$, non esistente in natura, ma altamente fissile, come il ^{235}U . Il 94, chiamato Plutonio in America, è il presunto Esperio, che Fermi aveva creduto di produrre fin dalla primavera del 1934.

Il Plutonio ($Z = 94$) e l'Uranio ($Z = 92$) sono elementi chimicamente diversi, quindi è possibile separare il Plutonio, ottenendo con relativa facilità una sostanza altamente fissile.

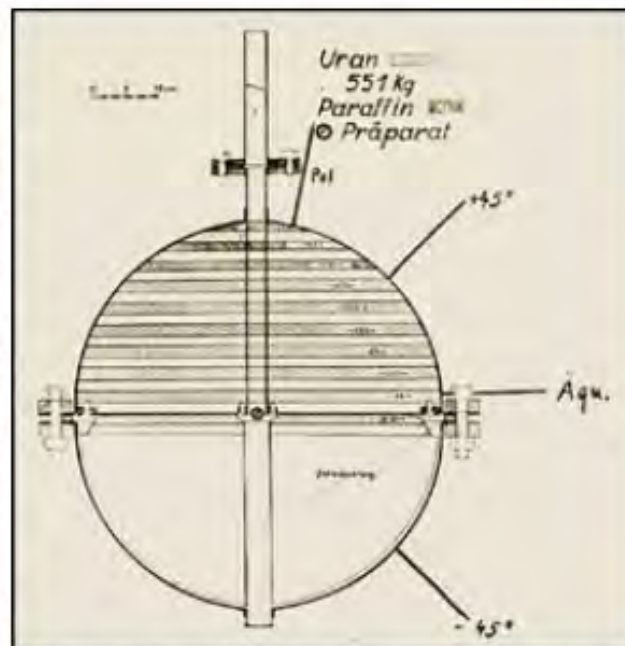
Il problema si riduce allora a realizzare una reazione di fissione nucleare controllata e autosostenuta in un reattore con Uranio naturale. Sia Fermi che Heisenberg sono immediatamente coinvolti in queste ricerche, fin dal 1940-1941. In realtà Heisenberg ha sempre affermato che il suo obiettivo era la pro-

duzione di energia, da usare per esempio per la propulsione di sommergibili.

Il problema della reazione controllata è formidabile. Sono i neutroni lenti a produrre principalmente la scissione nel ^{235}U . Ma i neutroni secondari prodotti sono veloci, per cui occorre rallentarli, tramite l'uso di una sostanza "moderatrice", evitando un eccessivo assorbimento, da parte del ^{238}U e del moderatore. I moderatori possibili sono sostanzialmente l'acqua pesante (deuterio al

posto dell'idrogeno), e la grafite purissima. L'acqua normale assorbe troppo i neutroni.

I due progetti, negli USA e in Germania, si svolgono in maniera parallela e competitiva in condizioni completamente diverse. Fino all'inizio del 1942 pare che Heisenberg sia più avanti di Fermi: i suoi reattori sperimentali, moderati con acqua pesante, producono una maggiore moltiplicazione di neutroni.



Uno dei primi reattori sperimentali di Heisenberg a Lipsia, dove l'uranio è presente in lastre immerse nell'acqua pesante

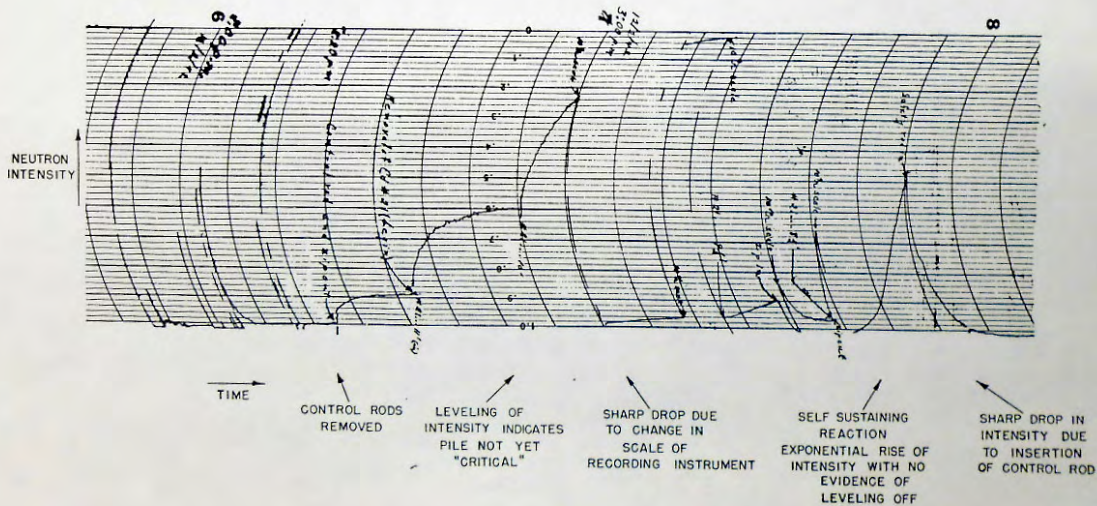
È noto che Fermi, dopo alcuni tentativi preliminari, realizza la reazione di fissione nucleare sostenuta e controllata in un reattore a Uranio naturale moderato con grafite purissima a Chicago nel dicembre del 1942. “Il navigatore Italiano è sbarcato nel Nuovo Mondo”. Il suo reattore è un prototipo. Ad Hanford sono realizzati reattori di potenza che subito iniziano la produzione di Plutonio. Nel 1945 gli Stati Uniti hanno abbastanza Plutonio per tre o quattro bombe. Una viene fatta esplodere in via sperimentale ad Alamogordo (Trinity) nel luglio 1945,

un'altra purtroppo su Nagasaki il 9 agosto, poco dopo Hiroshima. Il Giappone finalmente si arrende, e la seconda guerra mondiale ha termine.



un disegno rappresentativo dell'avvenimento

DEC. 2 1942 START-UP
 OF
 FIRST SELF-SUSTAINING CHAIN REACTION
 NEUTRON INTENSITY IN THE PILE AS RECORDED BY A GALVANOMETER





il fiasco di Chianti, con le firme di alcuni dei presenti



veduta dell'impianto di Hanford per la produzione del Plutonio

il Trinity test



È noto che Heisenberg non riuscirà mai a raggiungere la criticità nei suoi reattori sperimentali. I suoi tentativi si estendono fino alla primavera del 1945, quando finalmente le forze Alleate si impadroniscono dell'ultimo reattore in Heigerloch, nella Germania sud-occidentale. Niente motore per i sommergibili, ma soprattutto niente bomba.



modello dell'ultimo reattore sperimentale di Heisenberg (Haigerloch Marzo 1945)
con i cubetti di uranio prima di essere immersi in acqua pesante

Le ragioni del fallimento tedesco sono state dibattute in varie sedi, in monografie e articoli scientifici. Certamente vi sono ragioni “logistiche”. La Germania aveva una produzione insufficiente di Uranio, in fabbriche continuamente bombardate, e cosa ancora più grave un accesso difficoltoso all’acqua pesante, il moderatore scelto da Heisenberg, allora prodotto solo in Norvegia, nello stabilimento di Rjukan soggetto a bombardamenti e ad azioni di sabotaggio da parte della Resistenza.



Una veduta dell'impianto della Norsk Hydro a Rjukan

Hanno giocato certamente anche ragioni politiche. Nel 1941-1942 la Germania appariva vincente, e la bomba poteva sembrare superflua. Nel 1942-1943, dopo Stalingrado ed El Alamein, era chiaro a tutti che la Germania aveva perso la guerra, e la bomba non poteva capovolgere la situazione, ma solo produrre violente rappresaglie.

È interessante notare che l'intera teoria del reattore nucleare è contenuta completamente in un articolo del 1936 di Enrico Fermi

pubblicato sulla Ricerca Scientifica, la rivista del Consiglio Nazionale delle Ricerche, dedicato alla diffusione, rallentamento e assorbimento dei neutroni nelle sostanze idrogenate. L'articolo è in italiano. Data la sua importanza Edoardo Amaldi ne aveva suggerito la traduzione in una delle lingue scientifiche più rappresentative, inglese o tedesco. Ma Fermi aveva detto che le persone interessate avrebbero comunque letto l'articolo, anche se scritto in italiano.

Infatti, l'articolo è ripetutamente citato nei rapporti "geheim" (segreti) di Heisenberg,

che come esperto di musica e letteratura non aveva difficoltà a leggere l'italiano.

Quindi nell'autunno del 1941, anno della visita a Copenhagen, Heisenberg era ben avviato nelle ricerche sulla fattibilità del reattore nucleare, anche se in un contesto di grandi difficoltà logistiche e politiche.

Mi piace pensare che egli si sia rivolto a Niels Bohr come al "Papa", nella speranza che la saggezza del grande personaggio

potesse essere di aiuto ancora una volta, come lo era stata nella prima e nella seconda Copenaghen.

Certamente non si sono capiti. Ma di fatto lo sviluppo della situazione, con tutti i ritardi avutisi in Germania, ma anche negli Stati Uniti, ha reso impossibile che la Germania usasse la bomba contro l'Inghilterra o contro l'Armata Rossa, con tutte le conseguenze di possibili atroci rappresaglie, e di converso che gli Alleati usassero la bomba

contro la Germania, con tutte le facilmente prevedibili conseguenze sui futuri assetti europei.

Osserviamo la tetra immagine dello scoppio di una bomba dell'epoca (Joe-1)



la prima esplosione nucleare sovietica

e immaginiamo che l'obiettivo sia Berlino,
(Roma), Heidelberg, Londra, Parigi.