

Collana Materiali e documenti 33

Copyright © 2018

**Sapienza Università Editrice**

Piazzale Aldo Moro 5 – 00185 Roma

[www.editricesapienza.it](http://www.editricesapienza.it)

[editrice.sapienza@uniroma1.it](mailto:editrice.sapienza@uniroma1.it)

ISBN 978-88-9377-069-9

Iscrizione Registro Operatori Comunicazione n. 11420

La traduzione, l'adattamento totale o parziale, la riproduzione con qualsiasi mezzo (compresi microfilm, film, fotocopie), nonché la memorizzazione elettronica, sono riservati per tutti i Paesi. L'editore è a disposizione degli aventi diritto con i quali non è stato possibile comunicare, per eventuali involontarie omissioni o inesattezze nella citazione delle fonti e/o delle foto.

All Rights Reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopy, recording or any other information storage and retrieval system, without prior permission in writing from the publisher. All eligible parties, if not previously approached, can ask directly the publisher in case of unintentional omissions or incorrect quotes of sources and/or photos.

In copertina: particolare di copertina del Financial Times, *Annual review of british industry*, 1957.

# L'evoluzione dell'energia nucleare da fissione nel XX secolo

*Luciano Sani*



SAPIENZA  
UNIVERSITÀ EDITRICE

2018



*Alla mia amata moglie Annetta*



# INDICE

Presentazione	xi
Introduzione	1
Cap. I - Lo sviluppo scientifico che portò alla scoperta della fissione nucleare	3
Cap. II - La prima reazione a catena	13
1. Il momento storico	15
2. La pila di Fermi e l'esperienza del 2 dicembre 1942	18
3. Reazioni a catena avvenute spontaneamente sulla Terra	24
Cap. III - Stato delle conoscenze sulla fissione nucleare e sulla reazione a catena all'epoca della pila di Fermi	25
1. Premessa	27
2. Il processo di fissione	27
3. Condizioni necessarie per realizzare un processo di fissione autosostenentesi	29
4. Il controllo della reazione a catena	30
Cap. IV - Brevi richiami sui reattori nucleari a fissione	33
Cap. V - Sviluppo dei vari tipi di reattori nei paesi impegnati nelle applicazioni dell'energia nucleare	39
1. Premessa	41
2. Stati Uniti d' America	41
3. Canada	57
4. Regno Unito	58
5. Unione Sovietica	63
6. Francia	68
7. Italia	69
8. Organismi internazionali	76

Cap. VI - I principali tipi di reattori nucleari per la produzione di energia elettrica	81
1. Premessa	83
2. Reattori ad acqua in pressione	83
3. Reattori ad acqua bollente	88
4. Reattori ad acqua pesante	98
5. Reattori a uranio naturale, moderati a grafite e raffreddati ad anidride carbonica	101
6. Reattori a uranio arricchito, moderati a grafite e raffreddati ad anidride carbonica	106
7. Reattori ad alta temperatura moderati a grafite e raffreddati a elio	108
8. Reattori a uranio arricchito, moderati a grafite e raffreddati ad acqua bollente e vapore surriscaldato	112
9. Reattori superconvertitori veloci al sodio	114
10. Il contributo dei reattori nucleari alla produzione di energia elettrica	118
Cap. VII - La sicurezza nucleare e la radioprotezione	123
1. Premessa	125
2. La sicurezza nucleare	125
a) Il controllo della reazione a catena	125
b) La difesa in profondità	126
c) La normativa americana e il massimo incidente credibile	127
d) L'approccio probabilistico e il rapporto Rasmussen	129
e) L'incidente alla centrale di Three Mile Island	130
f) Ulteriori sviluppi della sicurezza nucleare dopo l'incidente di Three Mile Island	131
g) L'incidente alla centrale di Chernobyl	132
h) Sistemi di autorizzazione e controllo vigenti in Italia	133
i) La ricerca e gli organismi internazionali	134
3. La radioprotezione	135
1) Le radiazioni ionizzanti e l'evoluzione delle norme internazionali sui limiti di esposizione	135
2) Lo sviluppo dei principi generali della radioprotezione	138
4. Sorgenti naturali di radioattività	141

Cap. VIII - L'impiego dell'energia nucleare nella propulsione navale	143
Cap. IX - Il combustibile nucleare	151
1. Il ciclo del combustibile nucleare	153
2. Il minerale di uranio	154
3. L'arricchimento dell'uranio	159
4. Gli elementi di combustibile	163
5. Movimentazione di carico e scarico degli elementi di combustibile	169
6. Il ritrattamento chimico del combustibile nucleare esaurito	169
7. Stoccaggio dei rifiuti ad alta attività	173
Cap. X - Applicazioni dei radioisotopi e delle radiazioni	175
1. Generalità	177
2. Applicazioni in agricoltura	178
3. Applicazioni in medicina	179
4. Applicazioni industriali	180
5. Generatori di energia elettrica di bassa potenza e lunga durata	182
Appendice	185
1. Memoria del Prof. A.M. Angelini	187
Bibliografia	213
Ringraziamenti	215
Aneddoto dell'Ing. Antonino Buono	216
Note dell'autore	217
Curriculum Vitae prof. Luciano Sani	221



## PRESENTAZIONE

Questo libro costituisce un unicum con gli altri testi didattici scritti dall'autore per il corso di Impianti nucleari II.

I citati volumi 'Centrali Eletttronucleari' si definiscono come manuali per l'impiantistica delle centrali termoelettriche con specifico e minuzioso dettaglio per quelle nucleari da fissione. Questo volume racchiude le informazioni in un'ottica evolutiva, partendo da accenni sui primi studi sulla radioattività fino all'incatenamento dell'atomo ed il suo pacifico uso per la produzione di energia elettrica, tramite il susseguirsi dell'evoluzione dei reattori nel mondo, non trascurando gli aspetti di protezione e sicurezza.

Con questo volume si è voluto ricordare la Tecnologia nucleare, nel periodo storico successivo alla prima conferenza di Ginevra (organizzata dall'ONU nel 1955), che in Italia ha consentito di soddisfare la crescente richiesta di energia Elettrica da parte di industrie, impegnate nel 'boom' economico e dagli utenti domestici, che vedevano per la prima volta entrare nelle proprie abitazioni l'automazione.

L'Italia, con alle spalle una tradizione di nomi scientifici di risonanza mondiale, ha affrontato la sfida di questa nuova tecnologia a fianco delle principali potenze mondiali, uscendo da questo ambito con il referendum del 1987 e riconvertendo non solo, dove possibile, le progettazioni nucleari avviate, ma anche chi ha dedicato una vita a questa tecnologia o aveva appena completato il percorso di studi.

La conoscenza di argomenti complessi inerenti alla progettazione, realizzazione ed esercizio degli impianti nucleari trattati nel corso universitario tenuto dal prof. Sani, che rivestendo il doppio ruolo di docente e di vice direttore centrale della direzione delle costruzioni presso l'ENEL ha saputo travasare ai suoi studenti, non è andata persa ed è stata sapientemente sfruttata dai suoi studenti come di seguito testimoniato dall'ing. Bruno Versini (Chief Operating Officer, e-GEOS an ASI / Telespazio Company) e dai suoi colleghi di corso ing. Marcello Tarantini (Project Director per un impianto di produzione di idrogeno in India, Techip Italy) e ing. Massimo Trani (VP Technology Licensing, ENI).



Carissimo Prof. Sani,

come a volte accade con quell'aleatorietà che la vita ci riserva, destando nello stesso tempo meraviglia e curiosità, è stato davvero interessante incontrarsi di nuovo tramite la comune amica Cecilia Sciarretta. La bozza del libro che mi ha gentilmente donato lo scorso Natale sull'evoluzione dell'Energia Nucleare nel corso del ventesimo secolo mi ha infatti dato l'opportunità di ritornare ad una fase della mia vita, quella universitaria presso la Facoltà di Ingegneria della Sapienza, dove ho sempre percepito il manifestarsi e l'incontro di due grandi passioni: quella degli insegnanti nel trasferire le loro competenze ed esperienze professionali e di vita e quella degli studenti a volte intimiditi ma aperti e disponibili ad acquisire gli elementi di una futura vita professionale.

Per questo motivo, insieme a due miei compagni di corso e carissimi amici, abbiamo volentieri attinto ad i nostri comuni ricordi per rappresentarle, oltre alla nostra stima e gratitudine, un punto di vista sulle sue lezioni.

Ciò che ci colpì subito fu qualcosa che perceivamo come l'integrazione tra tante discipline che avevamo studiato ed appreso sino ad allora separatamente e che si andavano a riunire come in un mosaico. Ci riferiamo alle valutazioni economiche che sottintendono all'avvio di un progetto realizzativo, la scelta del sito ed i relativi problemi ambientali che nel periodo in cui frequentammo l'università andavo ampliandosi, gli aspetti di frontiera per tante tecnologie e soluzioni che dovevano garantire le prestazioni di progetto in ambienti non semplici per condizioni fisiche complessive, per i flussi neutronici e di radiazioni presenti e sempre nel totale rispetto delle condizioni di sicurezza.

Per noi studenti che avevamo appreso separatamente discipline come la fisica atomica, nucleare e del reattore, la termodinamica, la fluidodinamica, la termotecnica, la meccanica, la scienza e la tecnica della costruzioni, l'elettrotecnica ed i controlli automatici, le sue lezioni rappresentavano davvero un mirabile momento di sintesi che lei integrava sempre con esempi, oggi si direbbe "lesson learned", che provenivano dalla sua esperienza progettuale e realizzativa.

All'epoca eravamo colpiti da come il progetto complessivo di una centrale nucleare si fosse mirabilmente ricomposto ma non avevamo compreso appieno come alcuni elementi di quella integrazione sarebbero divenuti preziosi nella nostra vita professionale successiva. Facciamo riferimento a quella "visione di sistema" che è centrale in tante attività complesse e che può consentire ad alcuni ingegneri di poter interagire con gli esperti delle singole discipline la cui integrazione è richiesta in progetti di grande dimensione nelle fasi che includono la definizione dei concet-

ti operativi e dei requisiti, l'individuazione di un' architettura della soluzione, la decomposizione in sottosistemi e la relativa allocazione dei requisiti funzionali e di prestazione, il loro sviluppo ed l'integrazione finale. Facciamo riferimento alla progettazione secondo criteri di sicurezza ed affidabilità che possono includere la sicurezza verso le persone, verso l'ambiente, o l'affidabilità di un progetto che deve continuare ad operare in ambienti dove la manutenzione attraverso la sostituzione di componenti non è più possibile come nelle missioni spaziali.

Sinceramente, noi eravamo molto concentrati sulle centrali nucleari e non avevamo percepito appieno che stavamo inserendo nella nostra "cassetta degli attrezzi" approcci, metodi, procedure che potevano facilmente essere estesi a campi completamente diversi rispetto a quello nucleare e che ci avrebbero portato, nella nostra vita professionale, a risolvere problemi che non avevamo mai affrontato prima.

Come è intuibile, l'esito del referendum del 1987 non favorì noi studenti appena laureati nella scelta di un percorso professionale in ambito nucleare. Ma grazie alla formazione ricevuta presso la Facoltà di Ingegneria della Sapienza e grazie in particolare alle sue lezioni ed alla dimensione e complessità dei temi affrontati, abbiamo avuto un percorso professionale di successo in ambiti totalmente diversi come il settore spazio, l'ingegneria impiantistica petrolifera, ed il settore energetico.

Avremmo davvero voluto che questo breve ricordo fosse stato firmato anche da un nostro carissimo amico, compagno di corso, e suo studente, Carlo Ficini. Siamo certi che ne avrebbe condiviso i contenuti ed altrettanto certi che lo avrebbe arricchito con i suoi contributi, i suoi punti di vista laterali e soprattutto lo avrebbe arricchito con la sua ironia. Cogliamo questa occasione per ricordarlo con affetto e gioia e soprattutto per sentirlo vicino a noi.

Professore, un ringraziamento finale per quello che ci ha trasferito. Pensiamo di aver seguito, con modestia ma determinazione, delle strade parallele rispetto a quella che ci aveva indicato.

Con affetto e stima,

*Bruno Versini, Marcello Tarantini, Massimo Trani*



# THE FINANCIAL TIMES

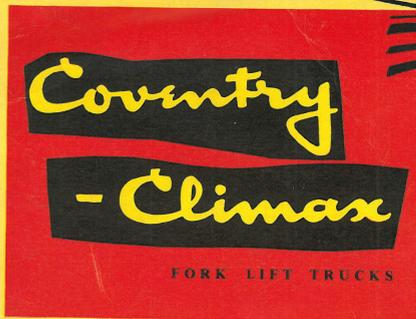
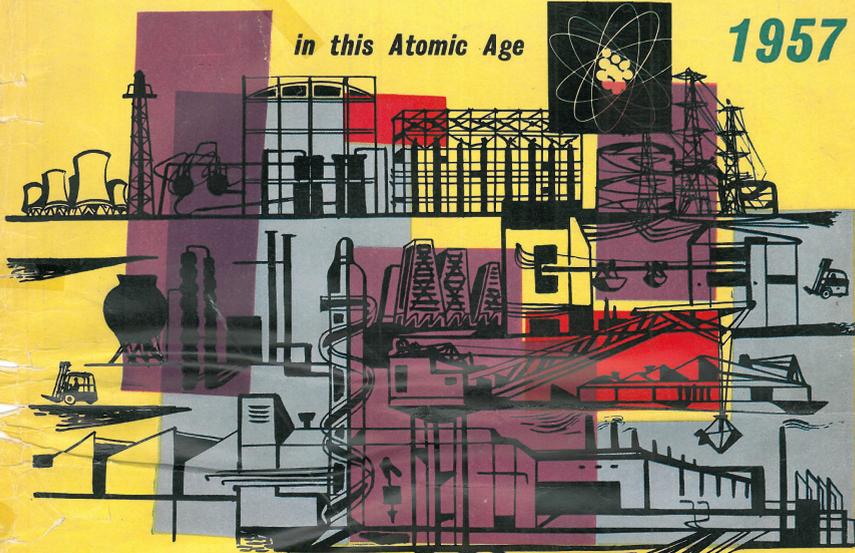
ANNUAL REVIEW OF

## BRITISH INDUSTRY

*in this Atomic Age*



1957



*The universal  
handling machine  
of modern industry*



COVENTRY-CLIMAX ENGINES LTD. (Dept. FD) COVENTRY

## INTRODUZIONE

Nel corso della mia attività accademica e lavorativa ho sempre approfondito e ricercato dati ed eventi riguardanti l'energia nucleare ai fini della produzione di energia elettrica. Tale desiderio di conoscenza era finalizzato al raggiungimento di una competenza tecnica completa riguardo la produzione dell'energia nucleare da fissione che mi consentisse di affrontare preparato ogni incontro di lavoro e ogni stesura di relazione da presentare nel corso di conferenze tenute a livello nazionale ed internazionale in rappresentanza anche del Governo.

Per non mandare perdute tutte queste conoscenze relative all'evoluzione ed ai miglioramenti apportati ai vari tipi di reattori nucleari, acquisite sia tramite documentazione sia dall'esperienza lavorativa diretta con i vari costruttori di reattori nucleari nel mondo, verso la fine del secolo scorso ho iniziato ad ordinarle da un punto di vista cronologico prendendo ispirazione dal numero del Financial Times del 1957 (a fianco) dedicato all'energia nucleare acquistato alla stazione ferroviaria di Londra il giorno in cui arrivai da Roma per partecipare all'inaugurazione dell'entrata in esercizio della centrale nucleare di Calder Hall.

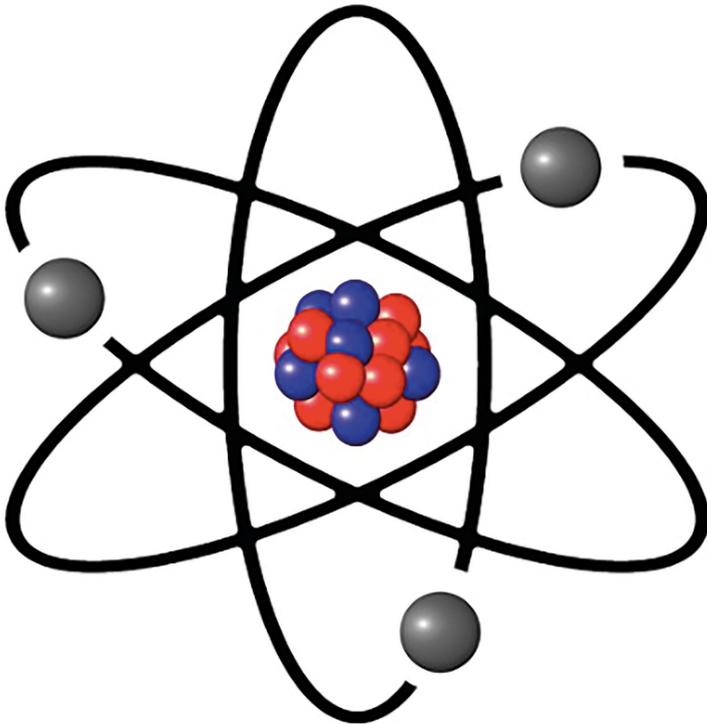
Voglio ringraziare il prof. Arnaldo Maria Angelini, in quanto è lui che mi ha introdotto nel mondo del Nucleare ed è lui che mi ha chiamato a ricoprire ruoli presso l'ENEL che mi hanno visto protagonista dello sviluppo della produzione di Energia Nucleare nel nostro paese. A tal fine desidero ricordarlo in appendice ricalcando le parole che hanno costituito la memoria che io stesso presentai nella sala Igea dell'Istituto dell'Enciclopedia Italiana nella giornata commemorativa a lui dedicata il 17 Aprile 2002.

Non posso ancora non ricordare il prof. Felice Ippolito, che fin dall'inizio ha ricoperto gli incarichi di Segretario Generale del Comitato Nazionale per la Ricerca Nucleare (CNRN) e poi del Comitato Nazionale per l'Energia Nucleare (CNEN), enti modellati sulla sua persona e nei quali ha lasciato un segno evidente. Lo ricordo per la sua dote, che mi ha sempre colpito, di rapidità nel prendere le decisioni, tipico di persone dotate di idee chiare, qualità spesso ricordate anche da mia moglie Annetta che ha lungamente collaborato con lui.



*Cap. I*

**Lo sviluppo scientifico che portò  
alla scoperta della fissione nucleare**





## LO SVILUPPO SCIENTIFICO CHE PORTÒ ALLA SCOPERTA DELLA FISSIONE NUCLEARE

Si può far risalire l'alba dell'era nucleare al 1896, quando il francese Henri Becquerel (1852-1908) scoprì che un sale di uranio fosforescente emetteva non solo luce, ma anche una radiazione più penetrante della luce stessa. Infatti, tale radiazione era in grado, come i raggi X scoperti un anno prima dal tedesco Wilhelm Conrad Rontgen (1845-1923), di attraversare un foglio di carta nera e impressionare una lastra fotografica.

Gli anni successivi alla scoperta di Becquerel furono fondamentali per la comprensione del fenomeno della radioattività, principalmente grazie ai lavori di Marie Sklodowska Curie (1867-1934) e Pierre Curie (1859-1906) a Parigi e di Ernest Rutherford (1871-1937) e Frederick Soddy (1877-1956) a Montreal.

I primi riuscirono a isolare nel 1898 un elemento chimico che emanava luce, calore e una radiazione così forte da poterla rivelare anche al di là di una lastra di piombo dello spessore di 10 cm e che essi chiamarono "radium". Era stata scoperta una sorgente di energia completamente nuova, derivante dalla disintegrazione degli atomi. Proprio il radio sarebbe stato successivamente assunto dall'International Radium Standard Commission come riferimento per la misura dell'attività delle sostanze radioattive; più precisamente nel 1930 venne fissata come unità di misura, chiamata *curie* (Ci), il numero di disintegrazioni al secondo ( $3,7 \cdot 10^{10} \text{s}^{-1}$ ) che subisce 1 g di radio.

Dal canto loro Rutherford e Soddy all'inizio del XX secolo, mostrarono che, a seguito dell'emissione spontanea di radiazioni da certi elementi pesanti, questi cambiavano la loro identità chimica: si aveva cioè una trasmutazione degli elementi. Ad es., l'uranio contenuto nella pechblenda emettendo radiazioni, in seguito individuate come raggi alfa ( $\alpha$ ), beta ( $\beta$ ) e gamma ( $\gamma$ ), si convertiva via via in atomi più leggeri, fino a raggiungere lo stato di un elemento stabile, il piombo.

Rutherford arrivò alla conclusione che le trasmutazioni radioattive si possono spiegare soltanto se si ammette la scissione dell'atomo con emissione di energia e avanzò le prime ipotesi sulla struttura dell'atomo, da non considerarsi più "indivisibile".

Nel 1905 il tedesco Albert Einstein (1879-1955) pubblicando una memoria sull'effetto fotoelettrico, affacciò l'idea dell'equivalenza tra massa ed energia: quan-

do un corpo emette energia perde anche parte della sua massa. Il rapporto di trasformazione è dato dalla famosa equazione  $E=mc^2$ : ciò significa che l'energia (E) ottenibile da una data quantità di materia è uguale alla massa di questa (m) moltiplicata per il quadrato della velocità della luce (c). Il fenomeno della radioattività era un esempio di graduale trasformazione della materia in energia. L'enunciazione di Einstein diede agli scienziati un notevole stimolo a ricercare la sorgente delle tremende forze racchiuse all'interno degli atomi.

Ancora una volta i risultati sperimentali ottenuti da Rutherford utilizzando raggi  $\alpha$  di alta energia come proiettili per esplorare la natura e la struttura dell'atomo, con il contributo teorico del danese Niels Bohr (1885-1962), portarono nel 1913 a definire un modello di atomo simile a un sistema solare in miniatura in cui cariche elettriche negative, chiamate elettroni, girano come pianeti attorno a un nucleo centrale carico di elettricità positiva.

Sulla base di questo modello dell'atomo, anche le leggi della radioattività diventavano comprensibili, nel senso che i raggi  $\alpha$  non sono altro che nuclei di elio, i raggi  $\beta$  sono elettroni, i raggi  $\gamma$  sono radiazioni simili ai raggi X ma molto più penetranti di questi ultimi (Fig. 1).

L'energia associata a queste particelle è molto piccola: fu introdotto perciò come unità di misura l'elettronvolt (eV), che corrisponde all'energia cinetica che acquista un elettrone sotto la differenza di potenziale di 1 V, con i suoi multipli: il keV= $10^3$ eV e il MeV= $10^6$ eV. Con tale unità di misura si poté stabilire che una par-

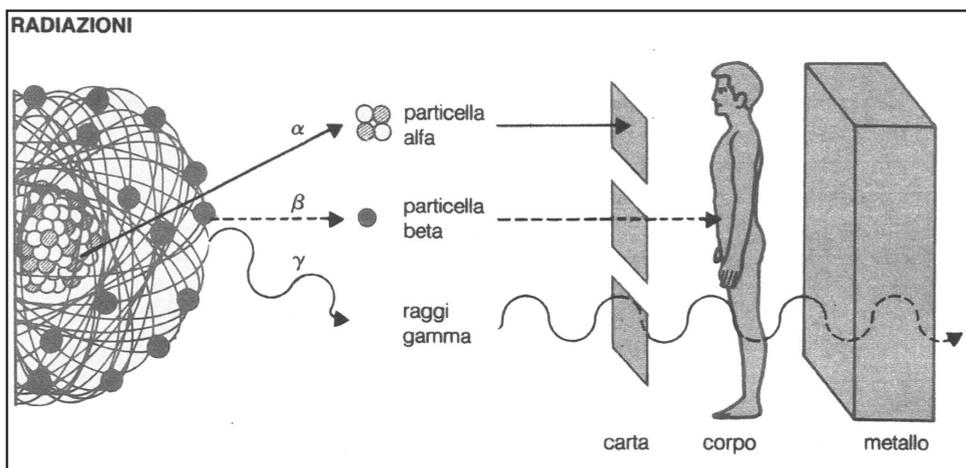


Fig. 1 - I tre tipi di radiazioni ed il loro potere di penetrazione.

ticella  $\alpha$  emessa dal radio aveva un'energia di circa 5 MeV, l'energia delle particelle  $\beta$  arrivava fino a 3 MeV, mentre i raggi  $\gamma$  avevano un'energia dell'ordine di 1 MeV.

Poiché il nucleo di un atomo radioattivo quando emette una particella  $\alpha$  perde sia massa sia carica elettrica, mentre quando emette una particella  $\beta$  la sua carica positiva aumenta e la massa rimane praticamente invariata, Soddy poté dedurre le masse e le cariche del nucleo di molti prodotti della radioattività. In alcuni casi questi prodotti avevano la stessa carica del nucleo e quindi le stesse proprietà chimiche ma differente massa: ad essi Soddy (1913) diede il nome di *isotopi*, in quanto occupavano lo stesso posto nella scala periodica degli elementi.

Nel 1919 Rutherford, utilizzando sempre particelle  $\alpha$  come proiettili, riuscì a cambiare atomi di azoto in atomi di ossigeno e a scoprire particelle, mai osservate in precedenza, di massa pari a quella dell'atomo di idrogeno e di carica positiva: i *protoni*. Non era avvenuta nessuna scissione del nucleo dell'atomo, bensì una trasmutazione di un elemento in un altro in quanto le particelle  $\alpha$ , penetrando nell'atomo di azoto, formavano un atomo di ossigeno a spese di energia fornita.

Gli scienziati continuarono il tentativo di disintegrare il nucleo dell'atomo, per liberare l'energia in esso contenuta, utilizzando come proiettili sia particelle  $\alpha$  emesse dalle sostanze radioattive naturali sia protoni accelerati artificialmente. In particolare, gli inglesi John Cockcroft (1897-1967) e Ernest Thomas Sinton Walton (1903-1995) nel 1932, con il loro acceleratore di protoni, ottennero la trasmutazione dell'elio in litio. Si trattava però sempre di una trasmutazione e non di una vera disintegrazione del nucleo dell'atomo e anche le trasmutazioni avvenivano sempre con nuclei di atomi leggeri: ciò perché i proiettili, essendo carichi positivamente, anche se dotati di altissima energia cinetica, erano in grado di vincere il campo elettrico creato dalle cariche positive del nucleo solo se questo non era troppo grande, com'è appunto il caso degli atomi di elementi leggeri.

Con la scoperta del neutrone nel 1932 da parte dell'inglese James Chadwick (1891-1974) si offriva la possibilità di utilizzare una nuova particella, di massa simile a quella del protone ma priva di carica elettrica, al posto delle particelle  $\alpha$  e dei protoni. Il neutrone veniva ottenuto quando particelle  $\alpha$  colpivano un metallo leggero, il berillio.

La scoperta del neutrone indicò anche che ogni nucleo era costituito, oltre che di protoni carichi positivamente, anche di particelle neutre: il che spiegava la differenza tra il numero atomico di un elemento chimico, che corrisponde al numero dei protoni, e il suo numero di massa, che indica la somma dei protoni e dei neutroni presenti nel nucleo. Sembrava logico ritenere che la massa del nucleo, chiamata peso

atomico, fosse pari alla somma delle masse individuali delle singole particelle che lo compongono, ma con lo spettrografo di massa si trovò che essa era leggermente inferiore. La differenza, secondo l'equazione di Einstein, è massa convertitasi in energia per formare il nucleo quando le particelle elementari si sono aggregate.

Mentre agli inizi del 1934 i coniugi Frédéric Joliot (1900-1958) e Irène Curie (1897-1956) davano comunicazione al mondo scientifico di aver ottenuto fosforo radioattivo colpendo con particelle  $\alpha$  un foglio di alluminio, e scoprendo in tal modo la radioattività artificiale, nello stesso anno Enrico Fermi (1901-1954) presso l'Istituto di Fisica dell'Università di Roma assieme a Edoardo Amaldi (1908-1989), Oscar D'Agostino (1901-1975), Franco Rasetti (1901-2001) ed Emilio Segrè (1905-1989), si servì di una sorgente di neutroni da radio-berillio per bombardare oltre 60 elementi, dei quali 47 diventarono artificialmente radioattivi Fermi e i suoi collaboratori scoprirono che l'efficacia dei neutroni nei confronti dei nuclei-bersaglio aumentava notevolmente se essi venivano rallentati; a tal fine nei loro esperimenti utilizzarono la paraffina quale mezzo di rallentamento dei neutroni.

Poiché fra le sostanze sperimentate vi era l'Uranio, l'elemento più pesante esistente in natura, Fermi dai risultati ritenne che si fosse ottenuto un elemento artificiale ancora più pesante, un transuranico.

Altri scienziati ripeterono negli anni successivi l'esperimento di Fermi, ma non furono in grado di dare una corretta interpretazione dei risultati ottenuti con l'uranio.

Bisognava aspettare il 1938, quando due scienziati tedeschi Otto Hahn (1879-1968) e Fritz Strassmann (1902-1980), ripetendo a Berlino l'esperimento di Fermi, scoprirono la presenza di un isotopo radioattivo del bario tra i prodotti del bombardamento dell'uranio con neutroni lenti. Si trattava di un elemento di numero atomico 56, molto più leggero dell'uranio.

I risultati di tale esperimento furono pubblicati con poco rilievo in un articolo del gennaio 1939 della rivista "Naturwissenschaften". Hahn informava però per lettera l'austriaca Lise Meitner (1878-1968), che era stata in precedenza sua collaboratrice per molti anni. La Meitner incontrandosi con il nipote Otto R. Frisch (1904-1979) che lavorava in quel tempo con Niels Bohr in Danimarca, ne discusse con lui i risultati, arrivando alla conclusione che il bario era uno dei due frammenti in cui si era spaccato il nucleo di uranio e che doveva essersi liberata per ogni atomo di uranio una quantità enorme di energia, valutabile a circa 100 milioni di volte superiore a quella che si libera nella combustione di un atomo di idrogeno in presenza di ossigeno. Una comunicazione di Meitner e Frisch apparve sulla rivista scientifica inglese "Nature" del febbraio 1939 sul nuovo tipo di reazione nucleare, da essi chiamata *fissione*.

Fermi, che si era trasferito negli Stati Uniti ai primi di gennaio del 1939 per evitare possibili persecuzioni razziali per la moglie, di origine ebraica, aveva appena iniziato a lavorare presso la Columbia University di New York quando apprese le conclusioni a cui erano pervenuti la Meitner e Frisch in merito alla reazione del nucleo di uranio con il neutrone. Fermi e John Ray Dunning (1907-1975), alla testa di un gruppo di giovani della Columbia University, si misero immediatamente al lavoro per rivelare il forte impulso ionizzante dovuto ai frammenti di fissione e la conseguente energia emessa. I risultati ottenuti, assieme a quelli conseguiti presso altri laboratori degli Stati Uniti, confermavano la validità di quanto ottenuto in Europa. Infatti, sul supplemento del febbraio 1939 della rivista "Nature", una relazione di Frisch illustrava l'esperimento condotto in gennaio a Copenaghen che dimostrava con una prova fisica la fissione dell'uranio da parte dei neutroni, così come era stata una prova chimica della fissione la scoperta del bario da parte di Hahn e Strassmann.

Ancora sulla rivista "Nature" apparve, nell'aprile dello stesso anno, una memoria sulle esperienze eseguite in Francia da Frederic Joliot e altri collaboratori, dalle quali risultava che da ogni nucleo dell'atomo di uranio che subisce fissione si ha in media l'emissione di 3 neutroni. Conseguenza di quest'ultima scoperta era che un solo neutrone è in grado di produrre la fissione di un nucleo di uranio e di provocare al tempo stesso la produzione di altri neutroni che permettono di continuare il processo di fissione, cioè di realizzare una *reazione a catena*.

Contemporaneamente anche Walter Henry Zinn (1906-2000) e Leo Szilard (1898-1964) della Columbia University e Fermi effettuavano una serie di esperimenti per accertare la quantità di neutroni emessi dalla fissione e le loro conclusioni, in cui si accennava anche alla possibilità di ottenere una reazione a catena, vennero pubblicate, sempre in aprile, sulla rivista "Physical Review".

In un articolo estremamente ricco di contenuti, pubblicato da Bohr e John Archibald Wheeler (1911-2008) sulla rivista "Physical Review" del 1 settembre 1939, il giorno stesso dello scoppio della seconda guerra mondiale, dal titolo *The mechanism of nuclear fission*, veniva dimostrato tra l'altro che, dei due isotopi di cui è costituito l'uranio naturale, uno di peso atomico 235 e l'altro di peso atomico 238 in proporzione 140 volte superiore, il primo ha una maggiore probabilità di subire la fissione e che tale probabilità aumenta notevolmente se i neutroni vengono rallentati dall'alta velocità con cui vengono emessi dalla fissione.

"Sebbene meno di un anno sia passato dalla scoperta di Hahn e Strassmann che la cattura di neutroni da parte dei nuclei di uranio può portare alla loro distruzione per formare nuclei più leggeri, quasi un centinaio di pubblicazioni sono già

apparso su tale argomento ... A molte domande bisogna ancora rispondere e molto lavoro è ancora in corso. Ciononostante si ritiene che le principali caratteristiche del fenomeno siano chiare sia sperimentalmente che teoricamente". In tal modo inizia l'articolo *Nuclear Fission* di Louis A. Turner della Princeton University del New Jersey apparso sul numero di gennaio 1940 della rivista "Reviews of Modern Physics", nel quale sono raccolti tutti i risultati sperimentali e teorici conseguiti sulla fissione nucleare dall'esperienza di Fermi dal 1934 ad allora (Fig. 2).

La cronologia dei principali eventi che portarono alla scoperta della fissione è riportata nella Tab. 1.

REVIEWS OF MODERN PHYSICS	
VOLUME 12	JANUARY, 1940
NUMBER 1	
<b>Nuclear Fission</b>	
LOUIS A. TURNER <i>Princeton University, Princeton, New Jersey</i>	
TABLE OF CONTENTS	
INTRODUCTION . . . . .	1
<b>PART I.</b>	
1. The apparent discovery of transuranic elements. . . . .	2
2. Early experiments with thorium . . . . .	3
3. Further work on the apparent transuranic elements . . . . .	4
4. The rare-earth-like substance of 3.5-hour half-life . . . . .	5
5. Apparent beta-active radium from uranium and thorium . . . . .	5
6. Attempts to find alpha-particles . . . . .	6
7. Barium from uranium. The discovery of fission. . . . .	6
8. High energy of the products of fission . . . . .	7
9. Fission products identified by x-rays and chemical properties . . . . .	10
10. Neutrons produced in fission . . . . .	11
11. Delayed emission of neutrons . . . . .	13
12. The instantaneous occurrence of fission . . . . .	13
13. Attempts to produce fission by photo-excitation . . . . .	13
14. Excitation functions and nuclear cross sections. . . . .	14
15. The theory of fission . . . . .	17
16. Chain reactions. Uranium as a source of nuclear energy . . . . .	20
<b>PART II.</b>	
1. Energies and ranges of fission products . . . . .	21
2. Chemically identified fission products and chains of successive disintegrations . . . . .	23
3. Unidentified half-lives . . . . .	24
4. Fission of elements other than U and Th . . . . .	25
5. Secondary neutrons . . . . .	25
6. Miscellaneous experimental results . . . . .	26
<i>a.</i> Differences between distributions of fission products produced in different ways . . . . .	26
<i>b.</i> Energies of beta-particles . . . . .	26
<i>c.</i> Gamma-rays . . . . .	26
<i>d.</i> Alpha-particles and fission products . . . . .	27
<i>e.</i> Absence of extremely short half-lives . . . . .	27
<i>f.</i> Fission tracks in the photographic emulsion . . . . .	27
<i>g.</i> Concentration of 23-minute U . . . . .	27
<i>h.</i> Attempts to detect element 93 . . . . .	27
<i>i.</i> Detonation of explosives by fission fragments . . . . .	27
<i>j.</i> Fission produced by deuteron bombardment . . . . .	27

<p style="text-align: center;">INTRODUCTION</p> <p><b>A</b>LTHOUGH less than a year has passed since the discovery by Hahn and Strassmann that the capture of neutrons by uranium nuclei may lead to their disruption to form lighter nuclei, nearly one hundred papers on this subject have already appeared. This number does not include the many older papers written before</p>	<p>the true nature of the process was understood. Many questions about it are still to be answered and extensive work is still in progress. Nevertheless, it now seems that its principal features are clear, both experimentally and theoretically, and that the questions yet to be answered can at least be formulated with reasonable assurance. Because of the large number of papers and the</p>
--	--

Fig. 2 - Articolo sullo stato delle scoperte sulla fissione nucleare al gennaio 1940.

Anno	Autore	Anno	Autore	Anno	Autore
1896	H.A. Becquerel	1934	E. Fermi	1934	Scoperta di 47 elementi radioattivi ottenuti bombardando con neutroni 62 elementi, compreso l'uranio. Idea di rallentare i neutroni per aumentare la probabilità di cattura da parte dei nuclei bersaglio.
1898	P. e M. Curie				
1902-1903	E. Rutherford e F. Soddy				
1904	E. Rutherford	1935	A.J. Dempster		Scoperta dell'uranio 235 mediante lo spettrografo di massa.
1905	A. Einstein				
1909	E. Rutherford	1938	O. Hahn e F. Strassmann		Scoperta del bario fra i prodotti del bombardamento di uranio con neutroni.
1913	N. Bohr e E. Rutherford	1938	L. Meitner e O.R. Frisch		Interpretazione dell'esperienza di Fermi del 1934 sull'uranio come una nuova reazione nucleare: la fissione.
1913	F. Soddy				Prova fisica della fissione dell'uranio.
1919	E. Rutherford	1939	O.R. Frisch		Scoperta del rilascio di neutroni dal processo di fissione e prime ipotesi sulla possibilità di una reazione a catena.
1929	E.O. Lawrence	1939	F. Joliot, L. Kowarski e H. Von Halban		Spiegazione del processo di fissione del nucleo di uranio con un rilascio di energia pari a 200 MeV.
1931	R.J. Van de Graaff				
1932	J. Chadwick				
1934	F. Joliot e I. Curie				

Tab. 1 - Cronologia dei principali eventi che hanno preceduto la scoperta della fissione nucleare.

