

PUBBLICAZIONI
DELL'ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA

N. 221

CAMILLA FESTA

Sulla abbondanza originaria del K^{40}

ROMA

Estratto da *Annali di Geofisica*

Vol. III, n. 4, 1950

STAMPATO DALL'ISTITUTO GRAFICO TIBERINO (ROMA, VIA GAETA 14)

SULLA ABBONDANZA ORIGINARIA DEL K^{40}

CAMILLA FESTA

L'importanza dell'isotopo attivo, ${}_{19}K^{40}$, del potassio in geofisica, che è già stata segnalata più volte ⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾, ha indotto numerosi ricercatori ad indagare le principali caratteristiche di questo nucleo ⁽⁶⁾⁻⁽¹⁹⁾.

Particolarmente evidente è l'interesse presentato dalla conoscenza — sia pure come ordine di grandezza — della sua abbondanza originaria, in relazione a numerosi problemi di carattere geologico e geofisico, primo fra tutti quello del calore terrestre. È chiaro che una valutazione abbastanza precisa della abbondanza originaria del ${}_{19}K^{40}$ non può andare disgiunta dalla soluzione di due problemi con i quali essa è strettamente connessa: la costante di decadimento totale, λ , del ${}_{19}K^{40}$ ed il tempo t di formazione degli elementi. Il primo di questi due problemi è stato oggetto di una precedente nota ⁽¹⁶⁾, e, per quel che riguarda il secondo, i risultati di numerose ricerche, compiute in base a criteri molto differenti, sembrano indicare che il tempo di formazione degli elementi è compreso fra 2 e 5.10^9 an ⁽²⁰⁾⁻⁽²³⁾.

L'esame della distribuzione delle abbondanze di nuclei nell'universo ha rivelato l'esistenza di legami, più o meno complessi, fra tali abbondanze e le principali caratteristiche nucleari (n. atomico, n. massico, eccesso neutronico ecc.), i quali hanno trovato la loro espressione in una serie di regole empiriche ⁽²⁴⁾. È probabile che da queste regole si possano ricavare alcuni dati orientativi riguardo all'abbondanza originaria del potassio, indipendentemente dalla conoscenza di λ e di t . Un simile procedimento, già seguito da Suess ⁽²⁵⁾ e da Brown ⁽²⁶⁾, è stato adottato in un lavoro precedente ⁽²⁷⁾ per ottenere una valutazione preliminare della abbondanza originaria del ${}_{20}Ca^{40}$, la quale ha ricevuto poi conferma da una determinazione più precisa, conseguita per una via completamente diversa.

La presente nota si propone appunto di ricercare la possibilità di dedurre dalle regole di abbondanza cosmica l'ordine di grandezza della abbondanza originaria del potassio.

Gli elementi, che, come il potassio, hanno numero atomico dispari sono, di regola, meno abbondanti di quelli di numero atomico

pari ⁽²⁸⁾-⁽²⁹⁾. Se si prescinde dalle singole fluttuazioni, il rapporto fra l'abbondanza degli elementi con Z pari e l'abbondanza degli elementi contigui con Z dispari va diminuendo al crescere di Z : nel caso degli elementi leggeri esso non si abbassa mai al di sotto di dieci ⁽³⁰⁾.

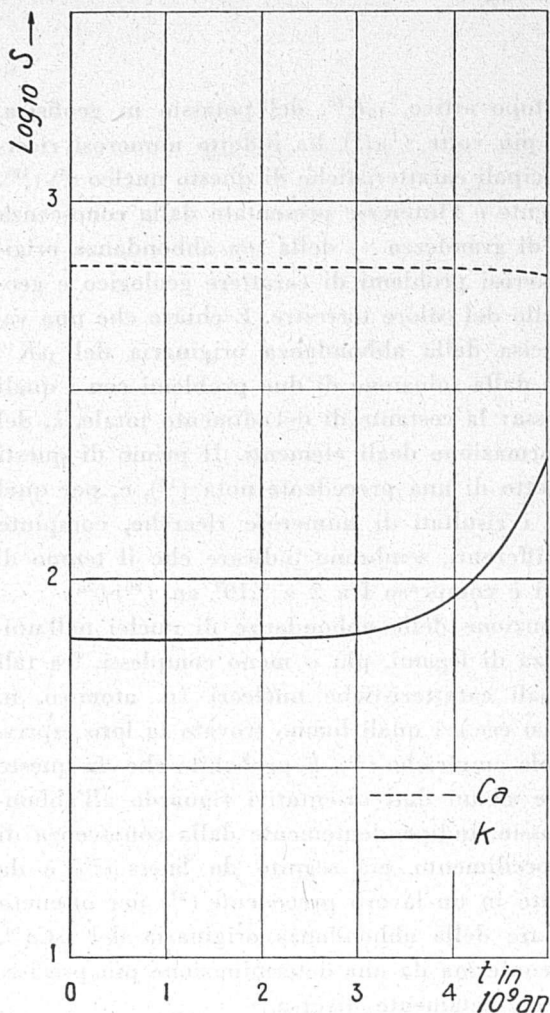


Fig. 1

Gli elementi con Z pari, contigui al potassio sono il calcio e l'argo: le abbondanze cosmiche di questi tre elementi sono riportate nella tabella I.

Tralasciando ogni considerazione riguardo a quest'ultimo, a causa delle scarse nozioni sulla sua abbondanza, attualmente in nostro possesso, limitiamoci a considerare il rapporto fra le abbondanze cosmiche del calcio e del potassio, il quale è circa 9,7, ossia è già leggermente al di sotto del limite imposto dalla regola poc'anzi enunciata. Di conseguenza sembra improbabile che all'origine l'abbondanza cosmica del potassio abbia superato sensibilmente il valore attuale, perché, nel caso contrario, il rapporto Ca/K avrebbe assunto

un valore eccezionalmente piccolo in confronto a quello degli analoghi rapporti fra gli elementi con $Z \leq 28$.

Il principale responsabile della variazione della abbondanza cosmica del potassio rispetto a quella originaria è — naturalmente —

il ${}_{19}K^{40}$, il quale ha una importanza fondamentale nel problema del calore terrestre e nelle questioni affini. La sua abbondanza cosmica attuale ⁽³¹⁾ è di 0,0076 atomi per 10^4 atomi di Si. Ovviamente questo valore è inferiore all'originario, il quale, però, non doveva superare i 3 o 4 atomi per 10^4 atomi di Si, se, in base alle considerazioni precedenti, si ammette che l'abbondanza cosmica originaria del potassio non era molto più grande dell'attuale.

TABELLA I

Elemento	Z	Abbondanza cosmica (per 10^4 at. di Si) ⁽³¹⁾
A	18	130-2200
K	19	69,3
Ca	20	670

Il suddetto ordine di grandezza della abbondanza cosmica originaria del ${}_{19}K^{40}$ trova conferma in altre due considerazioni.

1°) Il ${}_{19}K^{40}$ è un nucleo di massa pari ad eccesso neutronico uguale a due.

La dipendenza dalla massa della abbondanza cosmica dei due nuclei con A pari e $\Delta N = 2$, secondo una nota regola generale ⁽²⁵⁾, risulta evidente dalla tabella II. Le sole eccezioni rilevanti sono co-

TABELLA II

Elemento	Z	A	Abbondanza cosmica ⁽²⁴⁾ (riferita a 10^4 atomi di Si)
O	8	18	450
Ne	10	22	4300
Mg	12	26	1000
Si	14	30	305
S	16	34	150
A	18	38	87
K	19	40	0,0076
Ca	20	42	4,29
Ti	22	46	2,07
Cr	24	50	4,3
Fe	26	54	1100
Ni	28	58	910

stituite dai nuclei ${}_8\text{O}^{18}$, ${}_{19}\text{K}^{40}$, ${}_{28}\text{Fe}^{54}$ e ${}_{28}\text{Ni}^{58}$. Ma riguardo al nucleo ${}_8\text{O}^{18}$, si può osservare che, probabilmente, i rapporti delle abbondanze isotopiche dei nuclei leggeri hanno subito delle variazioni, conseguenti ai processi nucleari tuttora in atto nelle stelle. La particolare deficienza del ${}_{19}\text{K}^{40}$ deve, a sua volta, essere attribuita al decadimento radioattivo di questo nucleo. A proposito degli altri due nuclei ${}_{26}\text{Fe}^{54}$ e ${}_{28}\text{Ni}^{58}$, nulla si può dire, se non che la loro eccezionale abbondanza ha indotto Suess ⁽²⁵⁾ ed altri ricercatori ⁽³²⁾ ad annoverare il 28 fra i numeri magici, ossia fra quei numeri cui compete una stabilità nucleare particolarmente elevata.

Ciò premesso, in considerazione dell'andamento delle abbondanze cosmiche dei nuclei con A pari e $\Delta N = 2$, sembra assai probabile che il valore dell'abbondanza originaria del ${}_{19}\text{K}^{40}$ sia stato dell'ordine 2-3 atomi per 10^4 atomi di Si .

2°) il nucleo ${}_{19}\text{K}^{40}$ è costituito da un numero dispari di protoni e neutroni.

I nuclei stabili di questo tipo ($d-d$) sono quattro ${}_1\text{H}^2$, ${}_3\text{L}^6$, ${}_5\text{B}^{10}$, ${}_7\text{N}^{14}$; essi hanno una energia di legame inferiore a quella degli altri tipi di nuclei ($p-p$ e $d-p$) e costituiscono una eccezione alla 2^a regola di Mattauch ⁽³³⁾, la quale afferma che i nuclei di massa pari sono costituiti da un numero pari di protoni e di neutroni. La loro esistenza è perciò da considerarsi come una anomalia, imputabile alle forti fluttuazioni individuali, che tuttora si verificano per i nuclei leggeri.

Ai quattro nuclei $d-d$ stabili vanno aggiunti due nuclei radioattivi a vita media lunga: il ${}_{19}\text{K}^{40}$ e il ${}_{71}\text{Lu}^{176}$.

È recente la scoperta di altri due nuclei $d-d$: il ${}_{23}\text{V}^{50}$ e il ${}_{57}\text{La}^{138}$, rispettivamente con una abbondanza isotopica del 0,26% ⁽³⁴⁾-⁽³⁵⁾ e del

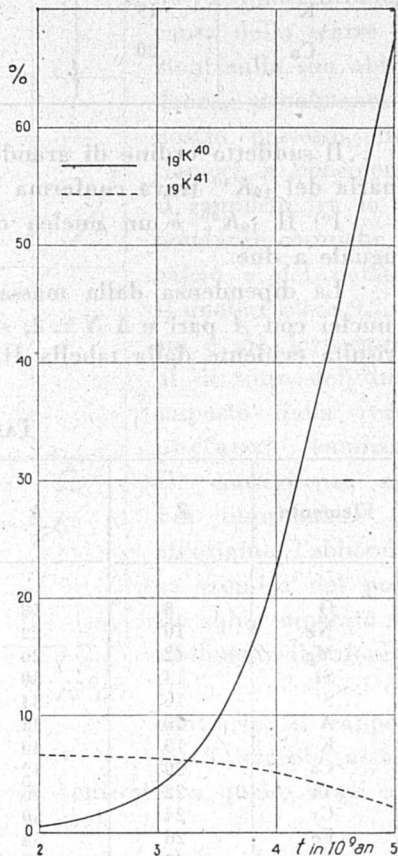


Fig. 2

0,089% (³⁶). Essi presentano una duplice analogia con il ${}_{19}K^{40}$ e il ${}_{71}Lu^{176}$ in quanto, oltre ad essere formati da un numero dispari di protoni e neutroni, posseggono due isobari stabili contigui (rispettivamente: ${}_{22}Ti^{50}$, ${}_{24}Cr^{50}$ e ${}_{56}Ba^{138}$, ${}_{58}Ce^{138}$). Tutto quindi induce a dubitare della loro stabilità, e perché in tal modo la suddetta analogia sarebbe completa, e perché, nel caso contrario, essi costituirebbero una eccezione ad ambedue le regole sugli isobari di Mattauch (³³).

Finora, però, è stata messa in evidenza (³⁷) solamente una attività γ del ${}_{57}La^{138}$ corrispondente ad un periodo di dimezzamento di $1,2 \cdot 10^{11}$ an, la quale pare associabile ad un processo di cattura elettronica, che trasforma il ${}_{57}La^{138}$ nel ${}_{56}Ba^{138}$. È probabile che anche il ${}_{23}V^{50}$ si disintegri con un processo analogo, non ancora osservato a causa delle difficoltà presentate dalla rivelazione delle trasformazioni per cattura K , soprattutto nel caso di vite medie molto lunghe.

In definitiva i nuclei $d-d$, la cui esistenza in natura è attualmente assodata, sono otto. Nella tabella III sono riportati gli elementi a cui essi appartengono, insieme con le abbondanze percentuali dei rispettivi isotopi allo scopo di mettere in evidenza come, per ciascuno di essi, ad eccezione dell'azoto, l'abbondanza percentuale del nucleo $d-d$ si mantiene sempre inferiore a quella del nucleo $d-p$.

Poiché non c'è nessuna ragione di ritenere che il ${}_{19}K^{40}$ abbia costituito originariamente una eccezione a questa regola, è probabile che la sua abbondanza percentuale originaria non superasse quella del meno abbondante dei suoi isotopi $d-p$, il ${}_{19}K^{41}$. In tal modo si ottiene un limite superiore per l'abbondanza percentuale originaria del ${}_{19}K^{40}$ dell'ordine del 4-5%, corrispondente ad una abbondanza cosmica di 2-3 atomi per 10^4 atomi di Si , in completo accordo con quanto si era ottenuto precedentemente per altra via.

La abbondanza originaria del ${}_{19}K^{40}$ potrebbe calcolarsi facilmente mediante le note equazioni, che regolano il decadimento radioattivo (³⁹), se si conoscesse il tempo t di formazione degli elementi. Abbiamo già avuto occasione di ricordare come finora non si sia potuto stabilire altro che un ampio intervallo entro il quale è compreso il valore di t .

Inversamente si può tentare se non sia possibile restringere tale intervallo per mezzo del limite superiore dell'abbondanza originaria del potassio: in altre parole, se, partendo dalla abbondanza attuale del potassio, si calcola il valore assunto da tale abbondanza a diverse epoche, comprese fra 2 e $5 \cdot 10^9$ an, si possono escludere tutti quei va-

TABELLA III

Elemento	Z	N	Abbondanza isotopica ⁽⁸⁸⁾ (%)		Attività
			nuclei d-p	nuclei d-d	
H	1	0	99,98	0,02	—
		1			
Li	3	3	92,6	7,35	—
		4			
B	5	5	81,2	18,8	—
		6			
N	7	7	0,38	99,6	—
		8			
K	19	20	93,2	0,011	β K, γ (T=3,5.10 ⁸ an) ⁽¹⁶⁾
		21			
		22			
V	23	27	99,74	0,26	—
		28			
La	57	81	99,92	0,089	γ , (K?) (T \leq 1,2.10 ¹¹ an) ⁽¹⁸⁾
		82			
Lu	71	104	97,4	2,6	—
		105			
					β , (K?) (T=7,3.10 ¹⁰ an) ⁽¹⁷⁾

lori di t per i quali l'abbondanza è in contrasto con le regole precedentemente enunciate. In questo modo si potrebbe ottenere un nuovo valore del limite superiore di t .

Dalla fig. 1, nella quale si possono confrontare le abbondanze cosmiche del potassio e del calcio corrispondenti a differenti valori dell'epoca di formazione degli elementi, si desume come la riduzione del rapporto Ca/K , esclusa dalla prima delle suddette regole di abbondanza, comincia a diventare sensibile verso 3,5.10⁹ an. Tra 2,8 a 3,2.10⁹ an si verifica pure la inversione della abbondanza percentuale del $^{19}K^{41}$ rispetto al $^{19}K^{40}$ (v. fig. 2), che è in contrasto con la terza delle regole stesse.

Sembrirebbe quindi che l'epoca di formazione degli elementi non sia superiore a $3 \cdot 10^9$ an. Tale supposizione è confortata dal grafico di fig. 3, che rappresenta l'andamento, in funzione della massa, del logaritmo dell'abbondanza cosmica degli elementi con A pari e $\Delta N = 2$: in essa il punto contrassegnato da un cerchietto sta ad indicare il va-

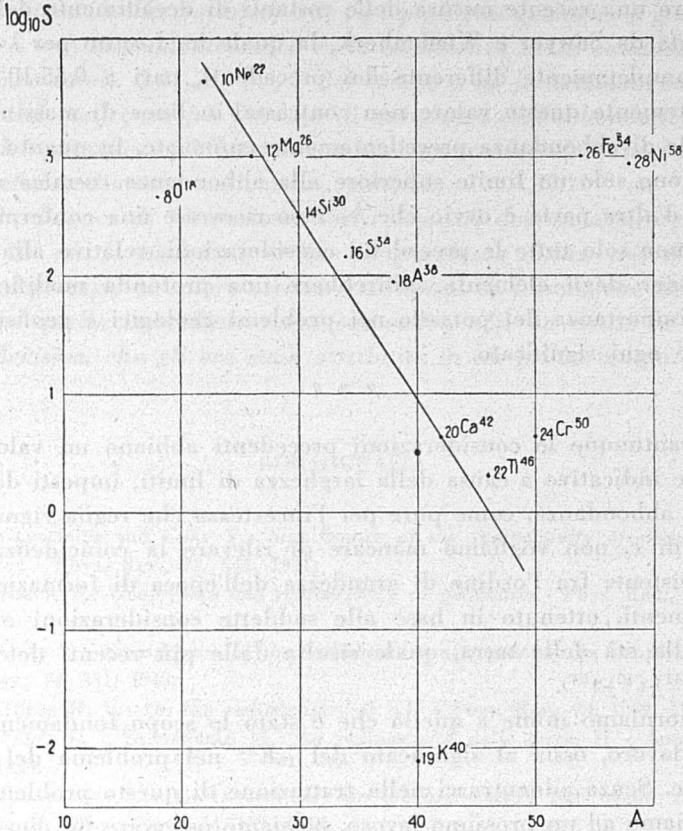


Fig. 3

lore dell'abbondanza cosmica del $^{19}\text{K}^{40}$ ad un tempo $t = 3 \cdot 10^9$ an, calcolato in base alle leggi del decadimento radioattivo, partendo dalla abbondanza cosmica attuale. La concordanza di questo valore con quelli corrispondenti agli altri nuclei con A pari e $\Delta N = 2$, tanto più evidente se si considera di quanto scarta rispetto agli altri nuclei la abbondanza cosmica attuale del $^{19}\text{K}^{40}$, sta ad indicare che, se gli elementi si sono formati $3 \cdot 10^9$ an fa, l'abbondanza cosmica del potassio

soddisfaceva la seconda delle regole enunciate nel paragrafo precedente.

Le curve sono state calcolate attribuendo alla costante di decadimento totale del ${}_{19}\text{K}^{40}$ il valore: $\lambda = 1,97 \cdot 10^{-9} \text{ an}^{-1}$, già adottato in un lavoro precedente ⁽²⁷⁾, e che corrisponde a quello fornito dalle più recenti tabelle di isotopi ⁽³⁸⁾-⁽⁴⁰⁾. A questo proposito è bene però segnalare una recente misura delle costanti di decadimento del ${}_{19}\text{K}^{40}$, effettuata da Sawyer e Wiedenbeck, la quale ha fornito per λ un valore, completamente differente dai precedenti, pari a $0,55 \cdot 10^{-9} \text{ an}^{-1}$. Evidentemente questo valore non contrasta, in linea di massima, con le regole di abbondanza precedentemente enunciate, in quanto queste impongono solo un limite superiore alla abbondanza cosmica del potassio: d'altra parte è ovvio che, se esso ricevesse una conferma definitiva, non solo tutte le precedenti considerazioni, relative alla età di formazione degli elementi, subirebbero una profonda modificazione, ma la importanza del potassio nei problemi geologici e geofisici perderebbe ogni significato.

* * *

Quantunque le considerazioni precedenti abbiano un valore puramente indicativo a causa della larghezza di limiti, imposti dalle regole di abbondanza, come pure per l'incertezza che regna riguardo al valore di λ , non vogliamo mancare di rilevare la coincidenza notevole, esistente fra l'ordine di grandezza dell'epoca di formazione degli elementi, ottenuto in base alle suddette considerazioni e il valore della età della terra, quale risulta dalle più recenti determinazioni ⁽⁴¹⁾-⁽⁴²⁾-⁽²⁷⁾.

Ritorniamo infine a quello che è stato lo scopo fondamentale di questo lavoro, ossia al significato del ${}_{19}\text{K}^{40}$ nel problema del calore terrestre. Senza addentrarci nella trattazione di questo problema, che rimandiamo ad un prossimo lavoro, possiamo osservare fin d'ora come il limite superiore della abbondanza originaria del potassio dedotto dalle regole di abbondanza sta a dimostrare che, all'epoca della solidificazione della crosta terrestre e in quelle immediatamente successive, il ${}_{19}\text{K}^{40}$ non doveva essere tanto abbondante da giustificare la importanza attribuitagli in un primo tempo da vari ricercatori ⁽¹⁾-⁽⁶⁾.

Roma — Istituto Nazionale di Geofisica — Settembre 1950.

RIASSUNTO

Le regole, che stabiliscono i legami fra la abbondanza dei nuclei nell'universo e le principali caratteristiche nucleari, possono fornire un orientamento riguardo alla abbondanza originaria del potassio — la cui importanza nella trattazione di vari problemi geologici e geofisici è ben nota — indipendentemente dalla conoscenza della costante di decadimento totale del ${}_{19}K^{40}$, λ , e del tempo t di formazione degli elementi. Dal confronto fra l'ordine di grandezza dell'abbondanza originaria del potassio, così ottenuta, con il valore calcolato in base alle leggi del decadimento radioattivo, ponendo $\lambda = 1,97 \cdot 10^{-9} \text{ an}^{-1}$, si deduce che l'epoca di formazione degli elementi doveva aggirarsi intorno a $3 \cdot 10^9 \text{ an}$. Il medesimo ordine di grandezza indica che il contributo del potassio al calore terrestre all'epoca di formazione della crosta e in quelle immediatamente successive non ha avuto la importanza decisiva, che gli era stata attribuita in un primo tempo.

BIBLIOGRAFIA

- (1) GLEDITSCH and GRÁF T.: *Significance of the radioactivity of potassium in geophysics* - Phys. Rev., 72, 641, 1947.
- (2) BIRCH F.: *Geophysics and radioactivity of potassium* - Phys. Rev., 72, 1128, 1947.
- (3) GRÁF T.: *Significance of the radioactivity of potassium in geophysics. II* - Phys. Rev., 74, 831, 1948.
- (4) SUSS H. E.: *On the radioactivity of K^{40}* - Phys. Rev., 74, 1209, 1948.
- (5) FESTA C. e SANTANGELO M.: *La radioattività della terra. II* - Ann. Geofis. 2, 503, 1949.
- (6) FRANCHETTI S. e GIOVANOZZI M.: *On the high-energy part of the K^{40} beta-ray spectrum* - Phys. Rev., 74, 102, 1948.
- (7) AHRENS L. H. and EVANS R. D.: *The radioactive decay constants of K^{40} as determined from accumulation of Ca^{40} in ancient minerals* - Phys. Rev., 74, 279, 1948.
- (8) GRÁF T.: *On the half-life of K^{40}* - Phys. Rev., 74, 831, 1948.
- (9) BORST L. B. and FLOYD J. J.: *The radioactive decay of K^{40}* - Phys. Rev., 74, 989, 1948.
- (10) GRÁF T.: *On the total half-life period of K^{40}* - Phys. Rev., 74, 1199, 1948.
- (11) HIRZEL O. and WAFFLER H.: *On the radioactivity of K^{40}* - Phys. Rev., 74, 1553, 1948.
- (12) STOUT R. W.: *Radioactivity of K^{40}* - Phys. Rev., 75, 1107, 1949.
- (13) FIREMAN E. L.: *On the decay of K^{40}* - Phys. Rev., 75, 1447, 1949.

- (14) FLOYD J. J. and BORST L. B.: *Energy of β -rays from K^{40}* - Phys. Rev., 75, 1106, 1949.
- (15) SAWYER G. A. and WIDENBECK M. L.: *Gamma rays of K^{40}* - Phys. Rev., 76, 1535, 1949.
- (16) FESTA C. e SANTANGELO M.: *Sul decadimento del K^{40}* - Ann. Geofis. 3, 95, 1950.
- (17) BELL P. R., WEAVER B. and CASSIDY J. M.: *The β rays of K^{40}* . Phys. Rev., 77, 399, 1950.
- (18) BELL P. R. and CASSIDY J. M.: *Gamma rays of K^{40}* - Phys. Rev., 77, 409, 1950.
- (19) SAWYER G. A. and WIDENBECK M. L.: *Decay constants of K^{40}* - Phys. Rev., 79, 490, 1950.
- (20) KIENLE H.: *Der Alter der Sterne und die Expansion der Welt* - Naturw. 31, 149, 1943.
- (21) BROWN H.: *An experimental method for the estimation of the age of the elements* - Phys. Rev., 72, 348, 1947.
- (22) UNSÖLD A.: *Kernphysik und Kosmologie* - Z. Astrophys., 24, 278, 1948.
- (23) TOLMAN R. C.: *The age of the universe* - Rev. Mod. Phys., 21, 374, 1949.
- (24) RANKAMA K. and SAHAMA G. H.: *Geochemistry* - Univ. of Chicago Press, Chicago, 1949, pag. 32.
- (25) SUESS H.: *Über Kosmische Kernhäufigkeiten. I Mitteilung: Einige Häufigkeitsregeln und ihre Anwendung bei der Abschätzung der Häufigkeitswerte für die mittelschweren und schweren Elemente* - Z. Naturf. 2a, 311, 1947.
- (26) BROWN H.: *The atmosphere of the earth and planets* - G. Kuiper ed., Univ. of Chicago, 1948, pag. 260.
- (27) FESTA C. e SANTANGELO M.: *Un metodo per la determinazione della età della terra* - Ann. Geofis. 3, 251, 1950.
- (28) ODDO G.: *Die Molekularstruktur der radioaktiven Atome* - Z. anorg. Chem. 87, 253, 1914.
- (29) HARKINS W. D.: *The evolution of the elements and the stability of complex atoms* - J. Am. Chem. Soc. 39, 856, 1917.
- (30) HARKINS W. D.: *Periodic system of atomic nuclei and the principle of regularity and continuity of series* - Phys. Rev., 38, 1270, 1931.
- (31) BROWN H.: *A table of relative abundances of nuclear species* - Rev. Mod. Phys., 21, 625, 1949.
- (32) MAYER M. G.: *On closed shells in nuclei* - Phys. Rev., 74, 235, 1948.
- (33) FLUEGGE und MATTAUCH J.: *Kernphysikalische Tabellen* - J. Springer Verlag, Berlin, 1942.
- (34) HESS D. C. and INGRAM M. G.: *On the occurrence of vanadium 50 in nature* - Phys. Rev., 76, 1717, 1949.
- (35) LELAND W. T.: *A naturally occurring odd-odd isotope of vanadium* - Phys. Rev., 76, 1722, 1949.
- (36) INGRAM M. G., HAYDEN R. J. and HESS D. C.: *The isotopic composition of lanthanum and cerium* - Phys. Rev., 72, 910, 1947.
- (37) PRINGLE P. W., STOUNDIL S. and ROULSTON K. J.: *The natural activity of lanthanum* - Phys. Rev., 78, 303, 1950.
- (38) *Chart of the nuclides* - Gen. El. Res. Lab., N. York, 1950.

(³⁹) FESTA C. e SANTANGELO M.: *La radioattività della Terra* - Ann. Geofis., 1, 581, 1948.

(⁴⁰) SEABORG G. T. and PERLMANN J.: *Table of isotopes* - Rev. Mod. Phys., 20, 585, 1948.

(⁴¹) HOLMES A.: *An estimate of the age of the earth* - Nature, Lond. 157, 680, 1946.

(⁴²) HOLMES A.: *A revised estimate of the age of the earth* - Nature, Lond., 159, 127, 1949.