

C. FESTA - M. SANTANGELO

Un metodo per la determinazione dell'età
della Terra

ROMA

Estratto da *Annali di Geofisica*

Vol. III, n. 2, 1950

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

UN METODO PER LA DETERMINAZIONE DELL'ETA' DELLA TERRA

C. FESTA - M. SANTANGELO

La determinazione dell'età della Terra costituisce uno dei problemi, che oggi interessano maggiormente la Geofisica e numerose altre scienze: esso è connesso con quello relativo all'origine del sistema solare (¹⁻⁴) e con le altre questioni di carattere ancor più generale, riguardanti l'età dell'universo (⁵⁻⁶), la distribuzione degli elementi nel cosmo (⁷⁻¹⁰) ed il processo di formazione delle specie nucleari (¹¹⁻¹⁴). Tra i vari metodi escogitati per la determinazione dell'età della Terra (¹⁵), quello basato sul fenomeno della radioattività naturale (¹⁶) è certamente il più adatto a fornire risultati quantitativi attendibili, in quanto si può assumere con sufficiente correttezza che le costanti di decadimento degli elementi radioattivi siano rimaste invariate (¹⁷) dall'epoca della solidificazione della crosta terrestre: e, generalmente, per *età della Terra* si intende appunto il tempo trascorso dalla solidificazione della crosta.

Però dalle misure del contenuto degli elementi radioattivi nei singoli campioni si ricava l'età dei minerali (¹⁸): il valore più elevato, ottenuto finora con queste misure, è quello di $2,1 \times 10^9$ an, relativo ad alcuni campioni del tardo pre-Cambriano, originari del Canada (¹⁹). Questo valore può essere considerato come un limite inferiore dell'età della Terra. Holmes (²⁰) (²²), elaborando i risultati delle analisi isotopiche di 25 campioni di minerale di piombo, eseguite da Nier e coll. (²¹), ha ottenuto per l'età della terra il valore $3,35 \times 10^9$ an. La sua determinazione ha il vantaggio di basarsi su misure eseguite con lo spettrografo di massa e quindi molto precise: essa risente però indubbiamente dei criteri statistici con cui vengono elaborati questi dati e principalmente della estrapolazione a tutta la terra di valori limitati ad alcuni campioni.

Per evitare questi inconvenienti ci è sembrato opportuno studiare un metodo, che consenta una valutazione della età della terra, fondata su dati relativi all'intera crosta, anziché a singoli minerali. Evidentemente questa valutazione è possibile solo nel caso in cui si

disponga di analisi molto accurate e riferite ad un grande numero di campioni provenienti da differenti zone della terra, in maniera da conoscere con buona approssimazione il contenuto medio dell'elemento radioattivo considerato e dei suoi prodotti di decadimento stabili nell'intera crosta. Questa condizione è soddisfatta dal potassio, mentre non lo è dai tre capostipiti delle famiglie radioattive (${}_{92}\text{U}^{238}$, ${}_{92}\text{U}^{235}$ e ${}_{90}\text{Th}^{232}$) né dagli altri elementi radioattivi naturali (${}_{37}\text{Rb}^{87}$, ${}_{71}\text{Lu}^{176}$, ${}_{75}\text{Re}^{187}$, ${}_{62}\text{Sa}^{148}$).

È noto infatti che uno dei principali costituenti della crosta terrestre è il calcio e che il più abbondante fra i suoi isotopi è il ${}_{20}\text{Ca}^{40}$ (96,9%), il quale compare fra i prodotti di disintegrazione del ${}_{19}\text{K}^{40}$, isotopo radioattivo del potassio, altro elemento molto diffuso sulla terra. Il metodo esposto in questa nota sfrutta appunto la disintegrazione del ${}_{19}\text{K}^{40}$ in ${}_{20}\text{Ca}^{40}$, in quanto questi due elementi sono abbastanza diffusi sulla crosta terrestre da consentire una valutazione del loro contenuto medio con una approssimazione sufficiente alla applicazione del metodo stesso.

* * *

Il processo di disintegrazione del ${}_{19}\text{K}^{40}$ è stato studiato da vari autori (²³⁻²⁸): il doppio decadimento è ormai confermato sperimentalmente (²⁹⁻³⁵). Le più recenti determinazioni della costante di decadimento per emissione β^- , λ_β , e della costante di decadimento totale λ , forniscono (³⁶):

$$\lambda_\beta = 0,5 \times 10^{-9} \text{ an}^{-1}$$

$$\lambda = 1,97 \times 10^{-9} \text{ an}^{-1}$$

Il numero N_{ca} di atomi di ${}_{20}\text{Ca}^{40}$, formati in un tempo t in conseguenza del decadimento del ${}_{19}\text{K}^{40}$, è dato dalla nota equazione:

$$N_{\text{ca}} = N_{\text{k}} \frac{\lambda_\beta}{\lambda} (e^{\lambda t} - 1) \quad [1]$$

dove N_{k} è il numero di atomi di ${}_{19}\text{K}^{40}$ rimasti. Dalla [1] si può ricavare l'età di formazione della crosta terrestre, purché si ammetta che tutto l'isotopo di massa 40 del calcio sia di origine radioattiva — ipotesi che, come vedremo tra poco, è assolutamente inaccettabile — e si conosca il contenuto in calcio e potassio della crosta terrestre insieme con la composizione isotopica dei due elementi. Questi dati si ricavano dalle analisi di Clarke e Washington (³⁷) e dalle tabelle di Seaborg e Perlmann (³⁸). Con essi si ottiene per t un valore di $5,4 \times 10^9$ an, che può essere assunto come un limite massimo della età della Terra.

In conseguenza di ciò e di quanto è stato detto nell'introduzione, l'età della terra sarebbe compresa fra $2,1$ e $5,4 \times 10^9$ an, ossia fra i limiti che molti autori impongono all'età della terra ($^{39-40}$) e all'età dell'universo (6).

Per ottenere una determinazione più precisa di t è, naturalmente, indispensabile la conoscenza della quantità di $^{20}\text{Ca}^{40}$, presente all'epoca della formazione della crosta.

Anzitutto si può osservare da un punto di vista qualitativo che il nucleo $^{20}\text{Ca}^{40}$ deve essersi formato inizialmente in grande abbondanza, poiché esso è costituito da 20 neutroni e 20 protoni ed il numero 20 è uno di quei numeri magici ai quali compete una stabilità nucleare particolarmente elevata (41). Conseguenza di ciò è appunto la grande abbondanza di questo elemento nel cosmo (10) e il considerevole numero di isotopi stabili che lo compongono. Osserviamo inoltre che il nucleo $^{20}\text{Ca}^{40}$ appartiene a quella ristretta categoria di nuclei con eccesso neutronico zero e numero massico multiplo di quattro, che sono generalmente molto abbondanti nel cosmo e sono contenuti in alta percentuale nell'elemento a cui appartengono.

TABELLA I

Elemento	Z	A	Abbondanza isotopica (38) %	Abbondanza cosmica (10) riferita a 10^4 atomi di Si
O	8	16	99,7	220 000
Ne	10	20	90,5	42 000
Mg	12	24	78,6	6.970
Si	14	28	92,3	9.228
S	16	32	95,1	3.300
A	18	36	0,31	450
Ca	20	40	96,9	650

Tali specie nucleari sono riportate nella tabella I: in essa mancano i nuclei leggeri, $^2\text{He}^4$ e $^{12}\text{C}^{12}$, i cui rapporti di abbondanza isotopica possono essere variati rispetto a quelli originari (8), in conseguenza di processi termonucleari tuttora in atto nelle stelle (42).

La sola eccezione della tabella I è costituita dall' $^{18}\text{A}^{36}$. Riguardo a questo nucleo si può osservare, però, che, siccome è impossibile ri-

trovare nelle meteoriti quantità minime di sostanze volatili, quali i gas rari, mentre d'altro canto i dati stellari ad essi relativi sono insufficienti, le loro abbondanze cosmiche sono ancora praticamente sconosciute ⁽¹⁰⁾; nel caso particolare dell' ${}_{18}A^{36}$ bisogna inoltre notare che la sua abbondanza isotopica non è quella originaria in quanto l'isotopo più abbondante, ${}_{18}A^{40}$, è generato ⁽⁴³⁻⁴⁶⁾ sulla terra dal ${}_{19}K^{40}$.

In base a quanto abbiamo detto sopra possiamo concludere che è da scartare in maniera definitiva l'ipotesi, temporaneamente ammessa, secondo la quale tutto il ${}_{20}Ca^{40}$ si è formato in conseguenza del decadimento del ${}_{19}K^{40}$; si deve anzi ritenere con una certa sicurezza che nel processo generale di formazione delle specie nucleari, il nucleo ${}_{20}Ca^{40}$ deve essere stato generato in abbondanza così come gli altri nuclei elencati nella tabella I.

* * *

Sorge quindi il problema della determinazione della quantità originaria di ${}_{20}Ca^{40}$ dalla quale si possa partire per valutare il rapporto fra ${}_{20}Ca^{40}$ radiogenico e ${}_{19}K^{40}$, che risulta funzione del tempo t da calcolare. Osserviamo a questo proposito che esistono numerose analisi di meteoriti dalle quali si può ricavare con discreta precisione ⁽⁴⁷⁾ il contenuto percentuale di calcio e potassio: con opportune ipotesi, la validità delle quali sarà discussa in seguito, si può scrivere un sistema di equazioni dalle quali si ricava il tempo t e le percentuali di ${}_{20}Ca^{40}$, contenute originariamente delle meteoriti e nella crosta terrestre.

Indichiamo con b l'attuale contenuto percentuale in peso di ${}_{20}Ca^{40}$ nella crosta terrestre, con x il ${}_{20}Ca^{40}$ presente nella crosta al tempo della sua formazione e con ξ quello formatosi per decadimento del ${}_{19}K^{40}$ durante il tempo t . Evidentemente si ha:

$$b = x + \xi \quad [2]$$

D'altra parte se con α si indica l'abbondanza isotopica percentuale del ${}_{20}Ca^{40}$ nel calcio totale al tempo di formazione della crosta, si ha:

$$x = \alpha X \quad [3]$$

dove X è la quantità di calcio totale presente nella crosta terrestre al tempo t .

Ma se con a si indica la quantità di calcio totale presente attualmente nella crosta terrestre, si può scrivere:

$$X = a - \xi \quad [4]$$

dimodoché, introducendo la [4] nella [3] si ha:

$$x = \alpha(a - \xi). \quad [5]$$

Se con le stesse lettere contrassegnate da un apice si indicano le corrispondenti quantità per le meteoriti, si ottengono parallelamente alla [2] e alla [5] le due equazioni:

$$b' = x' + \xi' \quad [2']$$

$$x' = \alpha'(a' - \xi') \quad [5']$$

Se ammettiamo — 1^a ipotesi — che sia:

$$\alpha = \alpha'$$

dividendo membro a membro le due equazioni [5] e [5'] si ha:

$$\frac{x}{x'} = \frac{a - \xi}{a' - \xi'}; \quad [6]$$

si ottiene così in definitiva il sistema di equazioni

$$b = x + \xi$$

$$b' = x' + \xi' \quad [7]$$

$$\frac{x}{x'} = \frac{a - \xi}{a' - \xi'}$$

Per calcolare ξ e ξ' si parte dalle note leggi del decadimento radioattivo; indicando con c e c' la quantità di ${}_{19}\text{K}^{40}$ presente attualmente nella crosta terrestre e nelle meteoriti, si ha:

$$\xi = c \frac{\lambda_\beta}{\lambda} (e^{\lambda t} - 1) \quad [8]$$

$$\xi' = c' \frac{\lambda_\beta}{\lambda} (e^{\lambda t'} - 1)$$

dove t è il tempo trascorso dalla formazione della crosta terrestre e t' quello trascorso dalla separazione delle fasi meteoriche.

Se si pone — 2^a ipotesi —:

$$t = t'$$

il sistema di equazioni [7] diventa:

$$\begin{aligned} b &= x + c \frac{\lambda_\beta}{\lambda} (e^{\lambda t} - 1) \\ b' &= x' + c' \frac{\lambda_\beta}{\lambda} (e^{\lambda t} - 1) \\ \frac{x}{x'} &= \frac{a - c \frac{\lambda_\beta}{\lambda} (e^{\lambda t} - 1)}{a' - c' \frac{\lambda_\beta}{\lambda} (e^{\lambda t} - 1)} \end{aligned} \quad [9]$$

Allora introducendo nel sistema i valori percentuali ⁽¹⁰⁾ ⁽³⁷⁾ ⁽³⁸⁾:

$$\begin{aligned} a &= 3,65 & a' &= 1,97 \\ b &= 3,54 & b' &= 1,91 \\ c &= 31 \times 10^{-5} & c' &= 2,4 \times 10^{-5} \end{aligned}$$

insieme con le costanti di decadimento ⁽³⁶⁾ del ${}_{19}\text{K}^{40}$:

$$\lambda = 1,97 \times 10^{-9} \text{ a}^{-1}, \quad \lambda_\beta = 0,5 \times 10^{-9} \text{ a}^{-1}$$

e risolvendolo, si ottiene:

$$t = 3,16 \times 10^9 \text{ a}$$

e le percentuali:

$$x = 3,50$$

$$x' = 1,90$$

* * *

L'espressione di t , che si ricava dal sistema [9], è

$$t = \frac{\log \left(\frac{b-x}{c} \frac{\lambda}{\lambda_\beta} + 1 \right)}{\lambda} \quad [10]$$

Essa ci fornisce un valore di t fondato essenzialmente sulle due ipotesi precedentemente avanzate.

La prima, $a = a'$, cioè uguale abbondanza isotopica originaria sulla terra e sulle meteoriti, risulta confermata sperimentalmente dal fatto che le analisi finora eseguite hanno dimostrato che l'abbondanza isotopica terrestre ⁽¹⁰⁾ del ferro, nichel, gallio, ossigeno, silicio, cloro,

e cobalto è identica a quella meteorica e, poiché si tratta di elementi stabili, è presumibile che la composizione isotopica attuale coincida con quella originaria. Questo è tanto più vero in quanto le piccole variazioni nelle composizioni isotopiche, che qualche volta si riscontrano sulla terra (⁴⁸⁻⁵¹) sono per noi trascurabili, perché i nostri valori rappresentano medie di analisi eseguite su numerosi campioni.

Relativamente alla seconda ipotesi, $t = t'$, non esistono sinora prove decisive: si può osservare solamente che le misure di età delle meteoriti effettuate da Paneth e coll. (⁵²), non rivelano alcuna differenza sostanziale fra i valori delle due età, considerate come il tempo trascorso dall'epoca della separazione delle fasi per le meteoriti e rispettivamente per la terra. Si noti a questo proposito che, mentre da un lato sono da scartare i valori più bassi, ottenuti da questi AA., perché il metodo dell'elio dà sistematicamente scarti in tal senso a causa della continua perdita di questo gas nel tempo, d'altro canto anche i valori più elevati sono suscettibili di critica in quanto non è improbabile che nelle meteoriti sia presente un eccesso di elio generato in processi nucleari, originati dall'urto di nucleoni della radiazione cosmica contro la materia meteorica (⁵³⁻⁵⁴). In tal modo si potrebbero spiegare i valori più alti ottenuti da Paneth: del resto se si applica alle meteoriti il metodo seguito per trovare il limite massimo della età della terra dal rapporto ${}_{20}\text{Ca}^{40}/{}_{19}\text{K}^{40}$, si trova un valore massimo dell'età delle meteoriti pari a $6,4 \times 10^9$ anni, che supera solo del 17% il valore massimo pertinente alla terra.

Sull'origine delle meteoriti sono state avanzate parecchie ipotesi in questi ultimi anni. Secondo Brown (⁵⁵⁻⁵⁷), Suess (⁵⁸) ed altri (¹⁰) esse appartengono al sistema solare: inoltre, Chandrasekhar (²), ter Haar (³), Suess (⁵⁹) e Ramsey (⁶⁰) attribuiscono una origine comune a tutti i pianeti del sistema solare, compreso il sole stesso. Se questo modo di vedere fosse corretto, sarebbe confermata la ipotesi seconda. Infine una prova indiretta di quanto è stato detto può riconoscersi nel fatto che le composizioni isotopiche attuali di elementi radioattivi (⁶¹⁻⁶²) quali l'uranio e il potassio nella terra e sulle meteoriti sono pressoché identiche: ora questo dovrebbe essere vero, partendo dalla 1^a ipotesi, $\alpha = \alpha'$, indipendentemente dai valori di t e t' , solo per gli elementi stabili, mentre per elementi instabili, quali l'uranio e il potassio, esso si verifica solo se, insieme con la prima ipotesi, si accetta anche la seconda, $t = t'$.

I valori sperimentali introdotti nel sistema [9] sono una riel-

borazione dei dati di Clarke e Washington ⁽³⁷⁾, Brown ⁽¹⁰⁾ e di Seaborg e Perlmann ⁽³⁸⁾.

A nostro avviso, essi sono particolarmente attendibili in quanto si tratta di analisi di elementi molto diffusi nel cosmo. Per quanto riguarda le analisi chimiche, si può — volendo fare una sia pur grossolana valutazione degli errori — attribuire a questi dati uno scarto probabile di circa il 15%, di fronte al quale lo scarto delle analisi isotopiche è trascurabile. Aggiungiamo che per le meteoriti sono state prese in considerazione solo le analisi eseguite sulla fase silicea la quale, per i processi di differenziazione subiti, è maggiormente confrontabile con i materiali della crosta terrestre.

In una nota precedente ⁽³⁶⁾ abbiamo trattato il problema delle costanti di decadimento del ${}_{19}\text{K}^{40}$. Seguendo un metodo, già adottato da Ahrens e Evans ⁽³⁰⁾ abbiamo calcolato il valore di λ , basandoci su quello, già noto con sufficiente approssimazione di $\lambda_{\beta} = (0,5 \pm 0,03) \times 10^{-9} \text{ a}^{-1}$. Nel presente lavoro abbiamo assunto per λ il valore di $(1,97 \pm 0,4) \times 10^{-9} \text{ an}^{-1}$, che è la media della nostra determinazione e di quelle riportate nella tabella II del lavoro citato ⁽³⁶⁾.

Introducendo nella [10] gli scarti relativi alle diverse quantità che vi compaiono, si ottiene per l'età della terra il valore di

$$3,16 \pm 0,6 \text{ miliardi di anni,}$$

che è perfettamente coerente con quello calcolato da Holmes ⁽²²⁾.

Roma — Istituto Nazionale di Geofisica — Aprile 1950.

RIASSUNTO

Si espongono i risultati di un metodo per la determinazione dell'età della terra basato sul decadimento del potassio. Sfruttando i dati di analisi eseguiti su materiali della crosta terrestre e della fase silicea delle meteoriti e facendo opportune ipotesi, si trova una età di $3,16 \times 10^9$ anni con una approssimazione di circa il 19%.

BIBLIOGRAFIA

- (1) JEFFREYS H.: *The origin of the solar system* - M. N. R. A. S., 103, 94, 1948.
- (2) CHANDRASEKHAR S.: *On a new theory of Weiszäcker on the origin of the solar system* - Rev. Mod. Phys. 18, 94, 1946.
- (3) TER HAAR D.: *Studies on the origin of the solar system* - Kgl. Danske Vid. Selsk. Mat.-Fys. Medd. 25, n. 3, 1948.

- (4) TER HAAR D.: *Recent theories about the origin of the solar system* - Science, 107, 405, 1948.
- (5) KIENLE H.: *Der Alter der Sterne und die Expansion der Welt* - Naturw., 31, 149, 1943.
- (6) TOLMAN R. C.: *The age of the universe* - Rev. Mod. Phys., 21, 374, 1949.
- (7) GOLDSCHMIDT V. M.: *Geochemische Verteilungsgesetze der Elemente, IX* - Videnskapsakademien, Oslo, 1938.
- (8) SUSS H. E.: *Über kosmische Häufigkeit der chemischen Elemente* - Zs. Naturf., 2a, 311, 1947.
- (9) SUSS H. E.: *Die kosmische Häufigkeit der chemischen Elemente* - Exper., 5, 266, 1949.
- (10) BROWN H.: *A table of relative abundances of nuclear species* - Rev. Mod. Phys., 21, 625, 1949.
- (11) ALPHER R. A., BETHE H. and GAMOW G. A.: *On the origin of chemical elements* - Phys. Rev., 73, 803, 1948.
- (12) ALPHER R. A., HERMANN R. and GAMOW G. A.: *Termonuclear reactions in the expanding universe* - Phys. Rev., 74, 1198, 1948.
- (13) ALPHER R. A.: *A neutron-capture theory of the formation and relative abundance of the elements* - Phys. Rev., 74, 1577, 1948.
- (14) ALPHER R. A. and HERMANN R. C.: *On the relative abundance of the elements* - Phys. Rev., 74, 1737, 1948.
- (15) KNOFF A., SCHUCHERT CH., KOVARIK A. F., HOLMES A. and BROWN F. W.: *The age of the earth* - Physics of the earth IV, Wash., 1931.
- (16) HOLMES A.: *Radioactivity and geological time* - N. R. C. Bull., 80, 220, 1931.
- (17) FESTA C. e SANTANGELO M.: *La radioattività della terra* - Ann. Geofis., 2, 503, 1949.
- (18) KOVARIK A. F.: *Calculating the age of minerals from radioactivity data and principles* - N. R. C. Bull., 80, 72, 1931.
- (19) AHRENS L. H.: *Geological age: the extreme antiquity of pegmatites from Manitoba* - Nature, Lond., 160, 874, 1947.
- (20) HOLMES A.: *An estimate of the age of the earth* - Nature, Lond., 157, 680, 1946.
- (21) NIER A. O., THOMPSON R. W. and MURPHEY B. F.: *The isotopic constitution of lead and the measurement of geological time* - Phys. Rev., 60, 112, 1941.
- (22) HOLMES A.: *A revised estimate of the age of the earth* - Nature, Lond., 159, 127, 1947.
- (23) v. WEISZÄCKER C.: *Über die Möglichkeit eines dualen β -Zerfalls von Kalium* - Phys. Zeits., 38, 623, 1937.
- (24) MÜHLOFF W.: *Aktivität von Kalium und Rubidium gemessenen mit dem Elektronenzählrohr* - Ann. Physik, 7, 205, 1930.
- (25) THOMPSON F. C. and ROWLAND S.: *Dual decay of potassium* - Nature, Lond., 152, 103, 1943.
- (26) BLEULER E. und GABRIEL M.: *Dualer Zerfall des Kalium 40* - Helv. Phys., Acta, 20, 67, 1947.
- (27) GRÁF T.: *On the half-life of K^{40}* - Phys. Rev., 74, 831, 1948.
- (28) BORST L. B. and FLOYD J. J.: *The radioactive decay of K^{40}* - Phys. Rev., 74, 989, 1948.

- (29) MEYER H. A., SCHWACHEIM G. and DE SOUZA SANTOS M. D.: *Decay of K^{40}* - Phys. Rev., 71, 908, 1947.
- (30) AHRENS L. H. and EVANS R. D.: *The radioactive decay constants of K^{40} as determined from the accumulation of Ca^{40} in ancient minerals* - Phys. Rev., 74, 279, 1948.
- (31) GRÁF T.: *On the totale half-life period of K^{40}* - Phys. Rev., 74, 1199, 1948.
- (32) SUESS H. E.: *On the radioactivity of K^{40}* - Phys. Rev., 74, 1209, 1948.
- (33) HIRZEL O. and WAFFLER H.: *On the radioactivity of K^{40}* - Phys. Rev., 74, 1553, 1948.
- (34) STOUT R. W.: *Radioactivity of K^{40}* - Phys. Rev., 75, 1107, 1949.
- (35) FIREMAN E. L.: *On the decay of K^{40}* - Phys. Rev., 75, 1447, 1949.
- (36) FESTA C. e SANTANGELO M.: *Sul decadimento del K^{40}* - Ann. Geofis., 3, 95, 1950.
- (37) CLARKE F. W. and WASHINGTON H. S.: *The composition of the earth crust* - U. S. Geol. Survey Prof. Papers, n. 127, 1924.
- (38) SEABORG G. T. and PERLMANN I.: *Table of isotopes* - Rev. Mod. Phys., 20, 585, 1948.
- (39) JEFFREYS H.: *The earth, its origin, history and physical constitution* - Cambridge University Press, Lond., 1929.
- (40) BROWN E. W.: *The age of the earth from astronomical data* - N. R. C. 80, 460, 1931.
- (41) MAYER M. G.: *On closed shells in nuclei* - Phys. Rev., 74, 235, 1948.
- (42) CHANDRASEKHAR S.: *An introduction to the study of stellar structure* - University of Chicago Press, Chicago, 1939.
- (43) HARTECK P. und SUESS H.: *Der Argongehalt Kalihaltiger Minerale und die Frage des dualen Zerfalls von K^{40}* - Naturw., 34, 212, 1947.
- (44) ALDRICH L. T. and NIER A. O.: *Argon 40 in potassium minerals* - Phys. Rev., 74, 876, 1948.
- (45) SUESS H. E.: *Die Häufigkeit der Edelgase auf der Erde und im Kosmos* - J. Geol., 57, 600, 1949.
- (46) BROWN H.: *The atmosphere of the earth and planets* - G. Kuiper, ed., University of Chicago Press, Chicago, 1948, p. 260.
- (47) BROWN H. and PATTERSON C.: *The composition of meteoritic matter, I* - J. Geol., 55, 405, 1947.
- (48) THODE M. G., MAC NAMARA J., LOSSING F. P. and COLLINS C. B.: *Natural variations in the isotopic content of boron and its chemical atomic weight* - J. Am. Chem. Soc., 70, 3008, 1948.
- (49) RANKAMA K.: *Note on original isotopic composition of terrestrial carbon* - J. Geol., 56, 199, 1948.
- (50) UREY H. C.: *Oxygen isotopes in nature and in the laboratory* - Science, 108, 489, 1948.
- (51) THODE M. G., MAC-NAMARA J. and COLLINS C. B.: *Natural variations in the isotopic content of sulphur and their significance* - Can. J. Res. B., 27, 361, 1949.
- (52) ARROL W. J., JACOBI B. B. and PANETH F.: *Meteorites and the age of the solar system* - Nature, Lond., 149, 235, 1942.
- (53) BAUER C. A.: *Absorption of cosmic rays in meteorites* - Phys. Rev., 74, 225, 1948.

- (54) BAUER C. A.: *Rate of production of helium in meteorites by cosmic rays* - Phys. Rev., 74, 501, 1948.
- (55) BROWN H. and PATTERSON C.: *The composition of meteoritic matter, III* - J. Geol., 56, 85, 1948.
- (56) BROWN H.: *Meteorites, relative abundances and planets structures* - Scient. Monthly, 67, 383, 1948.
- (57) BROWN H.: *The composition of meteoritic matter and the origin of meteorites* - Science, 109, 251, 1949.
- (58) SUESS H. E.: *Die Radioaktivität des Kaliums als mittel zur Bestimmung des relativen Alters der Elemente in Meteorites* - Naturw., 27, 702, 1939.
- (59) SUESS H. E.: *Zur Chemie der Planeten- und Meteoritenbildung* - Zs. Elektroch., 53, 237, 1949.
- (60) RAMSEY W. H.: *On the constitution of terrestrial planets* - M. N. R. A. S., 108, 406, 1948.
- (61) SCHUMB W. C., EVANS R. D. and HASTINGS J. L.: *Determination of Pa in siliceous, terrestrial and meteoritic material* - J. Am. Chem. Soc., 61, 3451, 1939.
- (62) SCHUMB W. C., EVANS R. D. and LEADERS W. M.: *Radioactive determination of relative abundance of the isotope K^{40} in terrestrial and meteoritic K* - J. Am. Chem. Soc., 63, 1203, 1941.