

Marian A. SZURGOT<sup>1</sup>

# Średni ciężar atomowy, średnia objętość i promień atomu chondrytu Creston (L5/6)

Mean atomic weight, mean volume and radius of atom of Creston (L5/6) chondrite

**Abstract:** Mean atomic weight  $A_{mean}$ , mean volume and mean radius of atom of Creston ordinary chondrite (L5/6 S4 W0) felt in 2015 in Creston near Paso Robles, California has been calculated using literature data on chemical composition of the meteorite (Jenniskens et al. 2019). The aim of the studies was to determine  $A_{mean}$ ,  $V_{atom}$ , and  $R_{atom}$  values for this new meteorite, and compare the data with the values obtained for two other ordinary chondrites: Ensisheim (LL6), and Jezersko (H4). Calculations were conducted for the whole rock, for silicates, and for Fe, Ni metal of Creston, and Ensisheim chondrites.

It was shown that the mean atomic weight of the whole rock of Creston chondrite  $A_{mean} = 24.06$ . Creston's silicates revealed the value:  $A_{meansi} = 21.92$ , and Creston's Fe,Ni metal:  $A_{meanmet} = 56.25$ .

It was calculated that the average volume of the Creston's atom  $V_{atom} = 1.111 \cdot 10^{-29} \text{ m}^3$  (sample CR05), and  $1.115 \cdot 10^{-29} \text{ m}^3$  (sample CR06). Average radius of Creston's atom:  $R_{atom} = 138.5 \text{ pm}$ , mean radius of atom of Creston silicates:  $R_{atomsi} = 138 \text{ pm}$ , and mean radius of atom of Creston metal:  $R_{atommet} = 142 \text{ pm}$ .

**Keywords:** Creston chondrite, Ensisheim chondrite, Jezersko chondrite, mean atomic weight, mean volume of atom, mean radius of atom

## Wstęp

Właściwości fizyczne meteorytów są przedmiotem intensywnych badań w wielu ośrodkach naukowych w Polsce i na świecie, i dostarczają ważnych informacji o materii pozaziemskiej. Tematyka prezentująca zagadnienia charakteryzacji różnych grup meteorytów i szczegółowe wyniki badań właściwości fizycznych jest w literaturze naukowej dobrze reprezentowana. Przykładami badaczy, którzy dostarczyli szereg interesujących danych są: Yomogida i Matsui (1983), Wilkison i Robinson (2000), Petrovic (2001), Britt i Consolmagno (2003), Rochette i in. (2003, 2008, 2012), Consolmagno i in. (2006, 2008), Kohout i in. (2008), Beech

<sup>1</sup> Centrum Nauczania Matematyki i Fizyki Politechniki Łódzkiej, Al. Politechniki 11, 90-924 Łódź, [maszurgot@gmail.com](mailto:maszurgot@gmail.com), [mszurgot@p.lodz.pl](mailto:mszurgot@p.lodz.pl)

i in. (2009), Macke (2010), Macke i in. (2010, 2011, 2019), Kiefer i in. (2012), Opeil i in. (2012, 2020), Łuszczek i Wach (2014), Przylibski (2016), Bartoschewitz i in. (2017), Flynn i in. (2018), Ostrowski i Bryson (2019), Soini i in. (2020), Altunayar-Unsalan i in. (2021), Szurgot i in. (2012, 2017, 2020, 2021, 2022), Harvey i in. (2023), oraz Szurgot (2020a, 2021a, b, c, 2023a, b, 2024).

Ciężar atomowy określa szereg właściwości fizycznych materiałów i jest ważnym parametrem fizycznym przydatnym do analizy geochemicznej i geologicznej obiektów kosmicznych, wykorzystywanym do analizy budowy wewnętrznej planet, planetoid i Księżyca (Birch 1961, Ringwood 1966, Anderson i Kovach 1967, Anderson i Jordan 1970, Anderson 1989, Maj 1998, Szurgot 2015a–e, 2016a–d, 2017a–h, 2018a–d, 2019a, b, 2020a, b, 2021a, b, 2022, 2023a, b, Szurgot i in. 2017, 2020).

Ciężar cząsteczkowy, podobnie jak i ciężar atomowy jest wielkością fizyczną, istotną w badaniach materii ziemskiej i pozaziemskiej. Dla bardziej złożonych obiektów w porównaniu z pierwiastkami i związkami chemicznymi, określa się średni ciężar atomowy i średni ciężar cząsteczkowy, a dotyczy to m.in. mieszanin, polimerów i powietrza. Średni ciężar atomowy minerałów i skał ziemskich oraz skał pozaziemskich był i jest nadal przedmiotem zainteresowań badaczy materii pozaziemskiej, także autora.

Analiza materii minerałów i skał planet, planetoid i komet, wymaga znajomości nie tylko średniego ciężaru atomowego tych obiektów, ale także znajomości średniego ciężaru cząsteczkowego, obecnie określanego jako masa molowa. Choć odgrywa on ważną rolę w charakteryzacji materii ziemskiej, trudno znaleźć w literaturze meteorytowej informacje o wartościach ciężaru cząsteczkowego chondrytów zwyczajnych. Nieliczne publikacje poświęcone tej wielkości fizycznej mogą świadczyć o jej niedowartościowaniu, czego wynikiem jest mała reprezentacja w głównym nurcie badań (Opeil i in. 2020; Szurgot 2020b).

Meteoryt Creston należy do nowych, fascynujących skał pozaziemskich. Spadek chondrytu nastąpił w roku 2015 w pobliżu Creston w Kalifornii (Jenniskens i in. 2019). Szczegółowe badania tego meteorytu pozwoliły na jego sklasyfikowanie jako chondrytu zwyczajnego początkowo jako przedstawiciela grupy L6, a następnie jako chondrytu L5/6 o stopniu deformacji uderzeniowej S4 i o zerowym stopniu zwiertzenia W0 (Jenniskens i in. 2019).

Celem prezentowanych badań było określenie i zanalizowanie średniego ciężaru atomowego  $A_{mean}$  chondrytu Creston. Innym celem badań było wyznaczenie średniej objętości atomu  $V_{atom}$  i średniego promienia atomu  $R_{atom}$ . Obliczenia przeprowadzono dla całej skały stanowiącej meteoryt Creston oraz jego części krzemianowej i metalicznej. Wyniki porównano z tymi otrzymanymi dla dwóch chondrytów zwyczajnych: chondrytu Jezersko (H4) (Szurgot 2019a, 2020b) i chondrytu Ensisheim (LL6) (Szurgot 2017c), dla którego obliczenia  $V_{atom}$  i  $R_{atom}$  przeprowadzono w niniejszej pracy. Wyniki badań efektywnej masy molowej meteorytów Creston i Ensisheim włączone do pierwszej wersji pracy będą, po uzupełnieniu, prezentowane w oddzielnej publikacji.

## Metody badań

Praca ma profil teoretyczny. Obliczeń średniego ciężaru atomowego  $A_{mean}$  dokonano wykorzystując zależności stosowane przez autora w badaniach meteorytów, planet ziemskich i Księżyca (Szurgot 2015a–d, 2016a–d, 2017a, b, c, 2023a).

Do obliczeń wykorzystano skład tlenkowy meteorytu Creston przeliczony przez autora w oparciu o literaturowe dane eksperymentalne o średnim składzie pierwiastkowym tego chondrytu (Jenniskens i in. 2019). Wyznaczone przez Jenniskensa i innych (2019) wartości gęstości ziaren  $d_{grain}$  tego chondrytu użyto do określenia średniej objętości atomu, a wartości przenikalności magnetycznej, gęstości ziaren i stosunku atomowego  $Fe/Si$  użyto do weryfikacji średniego ciężaru atomowego.

W niniejszej pracy jako synonimy są traktowane średni ciężar atomowy i średnia masa atomowa, i są wyrażone jako wielkości bezwymiarowe. Jednak w przypadku obliczeń średniej objętości atomu meteorytu Creston oraz jego krzemianów i metalu,  $A_{meanmol}$  reprezentuje średnią masę atomową (gramoatom), a to oznacza, że dodanie jednostek  $g/mol$  do wartości liczbowych  $A_{mean}$  jest wymagane.

## Wyniki

W celu określenia wartości  $A_{mean}$  wykorzystano następującą zależność opierając się na średnim składzie pierwiastkowym i tlenkowym meteorytu Creston:

$$A_{mean} = \sum w_i / (\sum w_i / A_i), \quad (1)$$

gdzie  $w_i$  (% wagowy) to część wagi meteorytu pochodząca od  $i$ -go składnika (tlenku, siarczku i pierwiastka) tworzącego chondryt,  $A_i$  to ciężar atomowy/masa atomowa  $i$ -go pierwiastka, i/lub średni ciężar atomowy  $i$ -go tlenku lub siarczku (Szurgot 2015c). Średni ciężar atomowy  $A_i$  pierwiastków i tlenków oraz  $A_{mean}$  meteorytów jest wielkością bezwymiarową, podobnie jak masa atomowa pierwiastków. Gdy zawartość wszystkich pierwiastków i tlenków danego meteorytu jest znana wtedy  $\sum w_i = 1$ , zwykle dane doświadczalne pokazują sumę bliską jedynki, tj. bliską 100% ( $\sum w_i \approx 1$ ), a gdy analizowane są wybrane części składowe meteorytu, np. krzemiany czy część metaliczna chondrytu, wtedy wykorzystywana jest część globalnego składu chemicznego i suma składników  $\sum w_i < 1$ .

Tabela 1 prezentuje średnią zawartość tlenków i pierwiastków w chondrycie L6 Creston (wartości  $w_i$  (% wagowe), wartości  $A_i$ , obliczone dla materii tego chondrytu oraz jego krzemianów i metalu z wykorzystaniem równania (1). Tabela 1 pokazuje, że średni ciężar atomowy  $A_{mean}$  meteorytu Creston wynosi 24,06, średni ciężar atomowy krzemianów  $A_{meansi}$  jest nieco mniejszy i równy 21,92, natomiast średni ciężar atomowy części metalicznej 56,25.

Średnią objętość jednego atomu  $V_{atom}$  meteorytu Creston określono, podobnie jak w przypadku meteorytu Jezersko (Szurgot 2020b), wykorzystując gęstość ziaren meteorytu

$$V_{atom} = A_{mean}^* / (N_A \cdot d_{grain}), \quad (2)$$

gdzie  $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$  to liczba Avogadra, a  $A_{mean}^*$  to masa molowa, w tym przypadku gramoatom meteorytu, liczbowo równy średniemu ciężarowi atomowemu, ale wyrażonemu w g/mol.

Wartości  $d_{sigrain}$  oraz  $d_{metgrain}$  obliczono wykorzystując zależność pomiędzy gęstością ziaren i średnim ciężarem atomowym (Szurgot 2015c, 2017c, 2018d, 2019a)

$$d_{grain} \text{ (g/cm}^3\text{)} = 0,133 \cdot A_{mean} + 0,37. \quad (3)$$

Znajomość objętości jednego atomu  $V_{atom}$  meteorytu pozwala określić średnicę tego atomu  $D_{atom}$  i średni promień atomu  $R_{atom}$ . Przyjmując kulisty kształtu atomów meteorytu Creston prowadzi do wyrażenia na średnicę atomu

$$D_{atom} = 2 \cdot R_{atom} = (V_{atom} \cdot 6)^{1/3} \quad (4)$$

ponieważ objętość kuli o średnicy  $D$  wynosi  $V_{kuli} = (1/6) \cdot D^3$ .

Z równania (4) wynika wzór na średni promień atomu  $R_{atom}$

$$R_{atom} = 0,5 (V_{atom} \cdot 6)^{1/3}, \quad (5)$$

Podstawienie do wzoru (2) wartości liczbowych:  $A_{mean}^* = 24,06 \text{ g/mol}$  oraz  $d_{grain} = 3,597 \text{ g/cm}^3$  (próbka meteorytu oznaczona jako CR05) i  $3,583 \text{ g/cm}^3$  (próbka CR06) (Jenniskens i in. 2019) prowadzi do wartości objętości jednego atomu meteorytu Creston  $V_{atom} = 1,111 \cdot 10^{-29} \text{ m}^3$  (CR05) oraz  $1,115 \cdot 10^{-29} \text{ m}^3$  (CR06) i, jak pokazują te dane obie wartości  $V_{atom}$  są prawie identyczne.

Dla krzemianów meteorytu Creston  $d_{sigrain} = 3,29 \text{ g/cm}^3$  (wzór (3)) i  $A_{simean}^* = 21,92 \text{ g/mol}$ , co daje  $V_{siatom} = 1,106 \cdot 10^{-29} \text{ m}^3$ . Podstawienie wartości  $V_{atom}$  oraz  $V_{siatom}$  do wzoru (4) przewiduje wartość średnicy atomu meteorytu Creston  $D_{atom} = 277 \text{ pm}$  i wartość średnicy atomu krzemianów meteorytu Creston  $D_{siatom} = 276 \text{ pm}$ . Oznacza to, że zgodnie z równaniem (5) promień średniego atomu meteorytu  $R_{atom} = 138,5 \text{ pm}$  i promień średniego atomu krzemianów meteorytu Creston  $R_{simol} = 138 \text{ pm}$ . Jak widać, wartość promienia atomu meteorytu Creston  $R_{atom}$  oraz promienia części krzemianowej meteorytu Creston  $R_{simol}$  jest praktycznie taka sama.

Dla metalu meteorytu Creston  $d_{metgrain} = 7,85 \text{ g/cm}^3$  (wzór (3)) i  $A_{metmean}^* = 56,25 \text{ g/mol}$ , a to daje zgodnie ze wzorem (2) wartość  $V_{metatom} = 1,190 \cdot 10^{-29} \text{ m}^3$ . Podstawienie wartości  $V_{atom}$  oraz  $V_{metatom}$  do wzoru (4) przewiduje wartość średnicy atomu metalu meteorytu Creston  $D_{metatom} = 283,3 \text{ pm}$ , a podstawienie do wzoru (5) prowadzi do wartości promienia średniego atomu metalu meteorytu Creston  $R_{metmol} = 142 \text{ pm}$ . Dane te wskazują, że promień atomów metalu meteorytu Creston jest o około 3% większy niż średni promień atomów krzemianów i średni promień atomu całej skały meteorytu Creston.

Wartości  $A_{mean}$ ,  $V_{atom}$ , oraz  $R_{atom}$ , dla całej skały meteorytu Creston, jego części krzemianowej i metalicznej zebrano w tabeli 2.

Wyniki przedstawione w tabeli 2 pokazują, że krzemiany meteorytu Creston wykazują mniejsze wartości  $A_{mean}$  oraz mniejsze wartości  $V_{atom}$  niż cała skała

**Tabela 1.** Średnia zawartość tlenków i pierwiastków w chondrycie Creston oraz wartości  $A_i$ , oraz  $A_{mean}$  tego chondrytu.

**Table 1.** The average abundance of oxides and elements in the Creston chondrite and the values of  $A_i$ , and  $A_{mean}$  for this chondrite.

Tlenek / pierwiastek / siarczek	$A_i$	Creston	Krzemiany	Metal
		$w_i$ (%wag.)		
SiO <sub>2</sub>	20,028	32,84	32,84	-
TiO <sub>2</sub>	26,363	0,118	-	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20,392	1,78	1,78	-
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	30,399	0,28	-	-
FeO	35,922	11,71	11,71	-
MnO	35,472	0,31	0,31	-
MgO	20,152	20,36	20,36	-
CaO	28,039	1,67	1,67	-
Na <sub>2</sub> O	20,66	0,85	0,85	-
K <sub>2</sub> O	31,397	0,08	0,08	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	20,278	0,34	-	-
Femetal	55,845	6,08	-	6,08
Ni	58,693	1,01	-	1,01
Co	58,933	0,032	-	0,032
FeS	43,954	6,03	-	-
$w_i$		83,49	69,6	7,122
$A_{mean}$		24,06	21,92	56,25

= suma.

meteorytu. Tabela 2 ujawnia, że wartości  $R_{atom}$  krzemianów są porównywalne z wartościami  $R_{atom}$  całej skały.

Metal (Fe, Ni, Co) chondrytu Creston wykazuje większą wartość  $A_{mean}$  w stosunku do całej skały i jej krzemianów, a nieco większą wartość promienia atomowego  $R_{atom}$  niż cała skała i krzemiany.

W celach porównawczych w tabeli 3 zestawiono wartości właściwości fizycznych badanych w niniejszej pracy trzech chondrytów zwyczajnych: chondrytu Ensisheim (LL6), chondrytu Creston (L6) oraz chondrytu Jezersko (H4). Dane dla chondrytu Jezersko wyznaczono w poprzednich pracach autora obejmujących tematykę średniego ciężaru atomowego, średniego ciężaru cząsteczkowego, objętości atomu i cząsteczki oraz średniego promienia atomu i cząsteczki (Szurgot 2019a, 2020b).

Meteoryt Creston reprezentuje materię chondrytów grupy L o typie petrologicznym 5/6, a chondryt Jezersko materię chondrytów grupy H4. Naturalnym krokiem było przeprowadzenie obliczeń dla meteorytu należącego do chondrytów grupy LL. Wybrano chondryt Ensisheim (LL6), którego średni ciężar atomowy został określony przez autora kilka lat wcześniej (Szurgot 2017c) i on właśnie jest reprezentantem grupy LL chondrytów zwyczajnych.

**Tabela 2.** Wartości  $A_{mean}$ ,  $V_{atom}$ ,  $R_{atom}$  dla całej skały meteorytu Creston, jego części krzemianowej i metalicznej. Dwie wartości  $V_{atom}$  odnoszą się do dwóch próbek (CR05 i CR06) chondrytu Creston.

**Table 2.** The values of  $A_{mean}$ ,  $V_{atom}$ , and  $R_{atom}$  for the whole rock of the Creston meteorite, its silicates and Fe, Ni metal. Two  $V_{atom}$  values represent two samples: CR05 and CR06 of Creston chondrite.

Składnik meteorytu/ Wielkość fizyczna	Cała skała	Krzemiany	Metal
$A_{mean}$	24,06	21,92	56,25
$V_{atom}$ ( $10^{-29} m^3$ )	1,111, 1,115	1,106	1,190
$R_{atom}$ (pm)	138,5	138	142

**Tabela 3.** Porównanie wartości  $A_{mean}$  i  $R_{atom}$  dla trzech chondrytów zwyczajnych: Ensisheim (LL6), Creston (L6) oraz Jezersko (Szurgot 2019a, 2020b). Wartości  $A_{mean}$  dla chondrytu Ensisheim (Szurgot 2017c).

**Table 3.** Comparison of the values of  $A_{mean}$  and  $R_{atom}$  for three ordinary chondrites: Ensisheim (LL6), Creston (L6) and Jezersko (Szurgot 2019a, 2020b).  $A_{mean}$  values for Ensisheim chondrite (Szurgot 2017c). EN = Ensisheim, CR = Creston, JE = Jezersko.

Składnik meteorytu /Wielkość fizyczna	Cała skała	Krzemiany	Metal	Meteoryt*/gru pa
$A_{mean}$	23,32	22,19	56,70	EN/ LL
	24,06	21,92	56,25	CR/ L
	24,68	21,77	56,12	JE/ H
$R_{atom}$ (pm)	136	138	142	EN/ LL
	138,5	138	142	CR/ L
	138,5	138	142	JE/ H

\* EN = Ensisheim, CR = Creston, JE = Jezersko.

Wyniki zestawione w tabeli 3 pozwalają na uchwycenie prawidłowości w badanych właściwościach fizycznych trzech grup chemicznych chondrytów zwyczajnych: LL, L oraz H.

Zebrane w tabeli 3 dane pozwalają na dokonanie podsumowania.

i) Średni ciężar atomowy badanych chondrytów zwyczajnych jest zawarty w zakresie wartości  $A_{mean}$ :

- cała skała: 23,32-24,68 (przedział 1,36),
- krzemiany: 21,77-22,19 (przedział 0,42), przy czym dla krzemianów

$$A_{mean_{i_{LL}}} > A_{mean_{i_L}} > A_{mean_{i_H}} \quad (6)$$

- metal: 56,12-56,70 (przedział 0,58), przy czym dla metalu jest spełniona nierówność

$$A_{mean_{met_{LL}}} > A_{mean_{met_L}} > A_{mean_{met_H}} \quad (7)$$

ii) Średni promień atomu jest zawarty w zakresie wartości  $R_{atom}$ :

- cała skała; 136–138,5 pm (przedział 2,5 pm),
- krzemiany: 138 pm (przedział 0 pm). Dla wszystkich trzech meteorytów promień atomu krzemianów jest taki sam.

- metal: 142 pm (przedział 0 pm). Dla wszystkich trzech meteorytów promień atomu metalu jest taki sam.

Głównym pierwiastkiem części metalicznej chondrytów Ensisheim, Creston oraz Jezesko jest żelazo. Dane literaturowe dotyczące czystego ziemskiego pierwiastka żelazo ujawniają następujące wartości:  $A_{mean}^* = 55,845$  g/mol,  $d_{grain} = 7,87$  g/cm<sup>3</sup> oraz promień jonu dwuwartościowego tego pierwiastka  $R_{jonFe^{2+}} = 140$  pm (Parikov i Yurchenko 1985, MatWeb 2024). Zgodnie ze wzorami (2) i (5) dla wyżej wymienionych wartości  $A_{mean}^*$  oraz  $d_{grain}$  otrzymujemy wartość promienia atomu żelaza  $R_{atom} = 141$  pm. Przewidywana przez równanie (5) wartość  $R_{atom}$  dla atomu żelaza ziemskiego (141 pm) jest bardzo bliska wartości promienia jonu ziemskiego żelaza dwuwartościowego (140 pm) i bardzo bliska średniemu promieniowi atomu metalu pozaziemskiego (stopu Fe-Ni-Co) obecnemu w meteorytach Creston, Ensisheim oraz Jezesko (142 pm).

Średni ciężar atomowy meteorytu Creston obliczono wykorzystując skład chemiczny tego chondrytu i równanie (1). Wartość  $A_{mean}$  całej skały chondrytu Creston określona w ten sposób wynosi:  $A_{mean}(skład\ chemiczny) = 24,06$  (tab. 1, 2 i 3). Odkryte przez autora w ostatnich latach zależności  $A_{mean}$  od innych wielkości fizycznych:  $A_{mean}(Fe/Si)$ ,  $A_{mean}(d_{grain})$  oraz  $A_{mean}(\log)$  umożliwiając przewidywanie wartości  $A_{mean}$  lub weryfikację tych wartości (Szurgot 2019a).

Wartości gęstości ziaren  $d_{grain}$  i przenikalności magnetycznej zmierzonych przez Jenniskensa i współpracowników (2019), i stosunku atomowego  $Fe/Si$  wyznaczonego przez autora, zostały użyte do weryfikacji średniego ciężaru atomowego  $A_{mean}(skład\ chemiczny)$  meteorytu Creston obliczonego, wykorzystując skład chemiczny tego chondrytu (Jenniskens i in. 2019). Poniżej prezentowane są zależności użyte do weryfikacji  $A_{mean}(skład\ chemiczny)$ .

Pierwszy związek to zależność pomiędzy średnim ciężarem atomowym  $A_{mean}$  oraz stosunkiem atomowym  $Fe/Si$  dla chondrytów zwyczajnych: LL, L i H (Szurgot 2015c). Zależność tą opisuje równanie:

$$A_{mean}(Fe/Si) = 5,72 \cdot (Fe/Si)_{at} + 20,25, \quad (8)$$

dla którego współczynnik korelacji  $R^2 = 0,996$ , a średni błąd kwadratowy  $RSME = 0,12$ .

Wyniki autora dotyczące badań spadków hiszpańskich chondrytów zwyczajnych pokazały, że zależność  $A_{mean}(Fe/Si)$  dobrze opisuje równanie:

$$A_{mean}(Fe/Si) = 6,25 \cdot (Fe/Si)_{at} + 20,19, \quad (9)$$

dla którego współczynnik korelacji  $R^2 = 0,998$ , a średni błąd kwadratowy  $RSME = 0,05$  (Szurgot 2018a). Oba równania (8) i (9) reprezentują ten sam związek i prowadzą do porównywalnych wartości  $A_{mean}$ .

Drugi związek to zależność średniego ciężaru atomowego  $A_{mean}$  od gęstości ziaren meteorytów (lub gęstości niesprężonej planet, jeśli przewidywanie dotyczy planet), który jest wyrażony równaniem:

$$A_{mean}(d_{grain}) = 7,51 \cdot d_{grain} - 2,74, \quad (10)$$

dla którego współczynnik korelacji  $R^2 = 0,99$ , a średni błąd kwadratowy  $RMSE = 0,54$  (Szurgot 2015a,b,c). Dla meteorytów gęstość niesprężona to gęstość ziaren w warunkach normalnych. Równanie (10) pozwala określić  $A_{mean}$  znając gęstość ziaren  $d_{grain}$ .

Współzależność  $A_{mean}$  i  $d_{grain}$  prowadzi do związku  $d_{grain}(A_{mean})$ , który został użyty wcześniej (równanie (3)).

Trzeci związek odkryty przez autora (Szurgot 2016a, d) to zależność pomiędzy średnim ciężarem atomowym  $A_{mean}$  i logarytmem podatności magnetycznej meteorytu  $log$ , który jest wyrażony równaniem:

$$A_{mean}(log) = 1,49 \cdot log + 16,6, \quad (11)$$

dla którego współczynnik korelacji wynosi  $R^2 = 0,95$ , a średni błąd kwadratowy wynosi  $RMSE = 0,24$ . Otrzymane z równania (11) wartości  $A_{mean}$  dotyczą składu meteorytów bez  $H_2O$ , ponieważ dla nich zależność  $A_{mean}(log)$  została wyznaczona.

Analiza zawartości żelaza i krzemu w średnim składzie chondrytu Creston (tab. 1) pozwoliła autorowi wyznaczyć stosunek atomowy  $Fe/Si$  dla całej skały chondrytu Creston. Wynosi on  $Fe/Si = 0,623$ . Podstawienie tej wartości do równania (8) prowadzi dla całej skały meteorytu Creston do wartości  $A_{mean}(Fe/Si) = 23,81$ , a podstawienie do równania (9) prowadzi do wartości  $A_{mean}(Fe/Si) = 24,08$ , co daje średnią  $A_{mean}(Fe/Si) = 23,95$  dla całej skały meteorytu Creston.

Podstawienie następujących danych eksperymentalnych:  $d_{grain} = 3,597 \text{ g/cm}^3$  (próbka CR05) oraz  $d_{grain} = 3,583 \text{ g/cm}^3$  (próbka CR06) do równania (10) prowadzi dla całej skały meteorytu Creston do wartości  $A_{mean}(d_{grain}) = 24,27$  dla próbki CR05 oraz do wartości  $A_{mean}(d_{grain}) = 24,17$  dla próbki CR06, co daje średnią  $A_{mean}(d_{grain}) = 24,22$  dla obu próbek reprezentujących całą skałę meteorytu Creston.

Pomiary podatności magnetycznej wykonane przez Jenniskensa i innych (2019) pokazały, że średnia wartość logarytmu naturalnego podatności magnetycznej całej skały meteorytu Creston wynosi  $log = 4,86$ , a zakres  $log$  dla tego chondrytu mieści się w przedziale 4,79–4,93. Podstawienie tych wartości do równania (11) prowadzi dla całej skały meteorytu Creston do wartości  $A_{mean}(log) = 23,84$ , a zakres wartości  $A_{mean}(log)$  wynosi 23,74–23,95.

Podsumowując, zakres przewidywanych wartości  $A_{mean}$  wynosi: 23,84–24,22, a średnia arytmetyczna z tych trzech przewidywań to

$$A_{mean}(\text{przewidywane}) = (A_{mean}(Fe/Si) + A_{mean}(d_{grain}) + A_{mean}(log)) / 3 = (23,95 + 24,22 + 23,84) / 3 = 24,00 \pm 0,20.$$

Prezentowane powyżej dane dla całej skały meteorytu Creston pokazują dobrą zgodność pomiędzy wartościami przewidywanymi w oparciu o zależności  $A_{mean}(Fe/Si)$ ,  $A_{mean}(d_{grain})$  oraz  $A_{mean}(log)$  (średnia z trzech przewidywań  $24,00 \pm 0,20$ , a średnim ciężarem atomowym meteorytu Creston wyznaczonym w oparciu o średni skład chemiczny  $A_{mean}(\text{skład chemiczny}) = 24,06$ ). Dowodzi to, że empiryczne zależności  $A_{mean}(\text{wielkość fizyczna})$  odkryte przez autora dla



chondrytów zwyczajnych (równania (3), (8)–(11)) są użytecznym narzędziem w badaniach meteorytów.

Wyniki badań efektywnej masy molowej ( $MW_{ef}$ ) chondrytu Creston i innych chondrytów zwyczajnych będą prezentowane w oddzielnej pracy. Wstępne dane są podane poniżej. Wykorzystując globalny skład tlenkowy meteorytu Creston i wzory prezentowane przez autora kilka lat wcześniej (Szurgot 2020b) obliczono efektywną masę molową  $MW_{ef}$  dla całej skały chondrytu Creston. Wynosi ona 56,34 g/mol i jest porównywalna z efektywną masą molową całej skały chondrytu Jezersko  $MW_{ef} = 55,58$  g/mol, określonej wcześniej jako średni ciężar cząsteczkowy i wyrażonej bezwymiarowo (Szurgot 2020b).

Zbliżone wartości  $MW_{ef}$  do tych wyżej wymienionych dla dwóch chondrytów zwyczajnych otrzymano dla chondrytu węglistego Murchison (CM2) (Opeil i in. 2020; i obliczenia własne autora). Wyznaczona przez autora w oparciu o skład tlenkowy tego chondrytu wartość  $MW_{ef}$  wynosi 45,04 g/mol, a efektywna masa molowa wyznaczona przez Opeila i współpracowników (2020) dla meteorytu Murchison w oparciu o badania ciepła właściwego wynosi 49,20 g/mol.

## Wnioski

Niniejsza praca prezentuje wyniki badań średniego ciężaru atomowego  $A_{mean}$ , średniej objętości atomu  $V_{atom}$  i średniego promienia atomu  $R_{atom}$  chondrytu zwyczajnego Creston (L5/6, S4, W0).

1. W oparciu o dane literaturowe o składzie chemicznym meteorytu i związki wyprowadzone przez autora otrzymano dla całej skały chondrytu Creston następujące wartości  $A_{mean}$ ,  $V_{atom}$  i  $R_{atom}$ :

i) dla całej skały

$$A_{mean} = 24,06, V_{atom} = 1,111-1,115 \cdot 10^{-29} \text{ m}^3, R_{atom} = 138,5 \text{ pm},$$

ii) dla krzemianów

$$A_{meansi} = 21,92, V_{atomsi} = 1,106 \cdot 10^{-29} \text{ m}^3, R_{atomsi} = 138 \text{ pm},$$

iii) dla metalu

$$A_{meanmet} = 56,25, V_{atommet} = 1,190 \cdot 10^{-29} \text{ m}^3, R_{atommet} = 142 \text{ pm}.$$

2. Pokazano, że średnia objętość atomu  $V_{atom}$  jest określona przez stosunek  $A_{mean}^*/d_{grain}$  oraz liczbę Avogadro  $N_A$  (równanie (2)).

3. Promień atomowy  $R_{atom}$  materii całej skały meteorytu Creston, materii krzemianów oraz materii metalu wyznaczone dla kulistego kształtu atomu (równanie (5), tab. 3) są porównywalne z promieniem atomowym krzemianów oraz metalu dwóch innych chondrytów zwyczajnych: chondrytu Ensisheim oraz chondrytu Jezersko.

4. Równania wprowadzone przez autora dla ilościowego opisu i analizy atomów chondrytów Creston, Jezersko i Ensisheim są użytecznym narzędziem w badaniach meteorytów, które może być użyte do charakterystyki również skał ziemskich.

## Podziękowania

Serdecznie dziękuję żonie mgr farm. Jadwidze Szurgot za jej wsparcie, okazaną pomoc i konsultacje podczas badań. Doktor Agacie Krzesińskiej z Uniwersytetu w Oslo dziękuję za zachętę do prezentacji wyników badań jednego z nowo odkrytych meteorytów w tegorocznym woluminie Rocznika Polskiego Towarzystwa Meteorologicznego. Doktorowi Radosławowi Wachowi z Politechniki Łódzkiej dziękuję za wnikliwą analizę zawartości naukowej pracy i za wszystkie cenne uwagi i sugestie dotyczące prezentacji wyników badań.

## Literatura

- Altunayar-Unsalan C., Unsalan O., Szurgot M. A., Wach R.A., 2021, *Specific heat and thermal history of the Sariçiçek howardite*, *Meteoritics & Planetary Science*, 56, s. 2103–2117.
- Anderson D.L., 1989, *Theory of the Earth*, Blackwell Scientific Publications, London.
- Anderson D.L., Kovach R.L., 1967, *The composition of the terrestrial planets*, *Earth and Planetary Science Letters*, 3, s. 19–24.
- Anderson D.L., Jordan T., 1970, *The composition of lower mantle*, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 3, s. 23–35.
- Bartoschewitz R., Appel P., Barrat J.-A., Bischoff A., Caffee M.W., Franchi, I.A. Gabelica Z., Greenwood R.C., Harir M., Harries D., Hochleitner R., Hopp J., Laubenstein M., Mader B., Marques R., Morlok A., Nolze G., Prudencio M.I., Rochette P., Ruf A., Schmitt-Kopplin P., Seemann E., Szurgot M., Tagle R., Wach R.A., Welten K.C., Weyrauch M., Wimmer K. (The Braunschweig Meteorite Consortium), 2017, *The Braunschweig meteorite – a recent L6 chondrite fall in Germany*, *Geochemistry*, 77, s. 207–224.
- Beech M., Coulson, I.M., Nie, W., McCausland, P., 2009, *The thermal and physical characteristics of the Gao-Guenie (H5) meteorite*, *Planetary and Space Science*, 57, s. 764–770.
- Birch F., 1961, *Composition of the Earth's Mantle*, *Geophysical Journal International*, 4, s. 295–311.
- Britt D.T., Consolmagno, G.J., 2003, *Stony meteorite porosities and densities: a review of the data through 2001*, *Meteoritics & Planetary Science*, 38, s. 1161–118.
- Consolmagno G.J., Macke, R.J., Rochette, P., Britt, D.T., Gattacceca, J., 2006, *Density, magnetic susceptibility, and the characterization of ordinary chondrite falls and showers*, *Meteoritics & Planetary Science*, 41, s. 331–342.
- Consolmagno G.J., Britt D.T., Macke R.J., 2008, *The significance of meteorite density and porosity*, *Chemie der Erde – Geochemistry*, 68, s. 1–29.
- Flynn G.J., Consolmagno G.J., Britt D. T., Brown P., Macke R.J., 2018, *Physical properties of the stone meteorites: Implications for the properties of their parent bodies*, *Chemie der Erde*, 78, s. 269–298.
- Harvey T.A., MacArthur J.L., Joy K.H., Sykes D., Almeida N.V., Jones R.H., 2023, *Non-destructive determination of the physical properties of Antarctic meteorites: Importance for the meteorite—parent body connection*, *Meteoritics & Planetary Science* 58, s. 1707–1746.
- Jenniskens P., Utas J., Yin Q-Z., Matson R.D., Fries M., J. Howell A., Free D., Albers J., Devillepoix H., Bland P., Miller A., Verish R., Garvie L.A., Zolensky M.E., Ziegler K., Sanborn M.E., Verosub K.L., Rowland D.J., Ostrowski D.R., Bryson K., Laubenstein M., Zhou Q., Li Q-L., Li X-H., Liu Y., Tang G-Q., Welten K., Caffee M.W., Meier M.M.M., Plant A.A., Maden C., Busemann H., Granvik M. (The Creston Meteorite Consortium), 2019, *The Creston, California, meteorite fall and the origin of L chondrites*, *Meteoritics & Planetary Science*, 54, s. 699–720.

- Kiefer W.S., Macke R.J., Britt D.T., Irving A.J., Consolmagno G.J., 2012, *The density and porosity of lunar rocks*, Geophysical Research Letters, 39, L07201.
- Kohout T., Kletetschka, G., Elbre, T., Adachi, T., Mikula, V., Pesonen, L.J., Schnabl, P., Slechta, S., 2008, *Physical properties of meteorites – applications in space missions to asteroids*, Meteoritics & Planetary Science, 43, s. 1009–1020.
- Łuszczek K., Wach, R.A. 2014. *NWA 6255 meteorite – Thermophysical properties of interior and the crust*, Meteorites, 3, s. 33–44.
- Macke R.J., 2010, *Survey of meteorite physical properties: density, porosity and magnetic susceptibility*, Ph.D. Thesis, University of Central Florida, Orlando.
- Macke R.J., Consolmagno, G.J., Britt, D.T., Hutson, M.L., 2010, *Enstatite chondrite density, magnetic susceptibility, and porosity*, Meteoritics & Planetary Science, 45, s. 1513–1526.
- Macke R.J., Britt, D.T., Consolmagno, G.J., 2011, *Density, porosity, and magnetic susceptibility of achondritic meteorites*, Meteoritics & Planetary Science, 46, s. 311–326.
- Macke R.J., Opeil C. P., Consolmagno, G.J., 2019, *Heat capacities of ordinary chondrite falls below 300 K*, Meteoritics & Planetary Science, 54, s. 2729–2743.
- Maj S., 1998, *Phonon thermal conductivity of geomaterials: Relationship to the density and mean atomic weight*, Acta Geophysica Polonica, 46, s. 415–425.
- Mat Web – Materials Property Database, <https://matweb.com>
- Opeil C.P., Consolmagno G.J., Safarik D.J., Britt D.T., 2012, *Stony meteorite thermal properties and their relationship to meteorite chemical and physical states*, Meteoritics & Planetary Science, 47, s. 319–329.
- Opeil C.P., Britt D.T., Macke, R.J., Consolmagno G.J., 2020, *The surprising thermal properties of CM carbonaceous chondrites*, Meteoritics & Planetary Science, 55, s. E1-E20.
- Ostrowski D., Bryson K., 2019, *The physical properties of meteorites*, Planetary and Space Science. doi:10.1016/j.pss.2018.11.003
- Parikov L.N., Yurchenko Yu. F., *Thermal Properties of Metals and Alloys*, Naukova Dumka, Kiev, 1985, pp. 358, 359 (in Russian).
- Petrovic J.J., 2001, *Review mechanical properties of meteorites and their constituents*, Journal of Materials Science, 36, s. 1579–1583.
- Przylibski T.A., 2016, *Chondryt Soltmany*, Acta Societatis Metheoriticae Polonorum, 7, s. 93–122.
- Rahm M., Hoffmann R., Ashcroft N. W., 2016, *Atomic and Ionic Radii of Elements 1–96*, Chemistry A European Journal, 22, s. 14625–14632.
- Ringwood A.E., 1966, *Chemical evolution of the terrestrial planets*, Geochimica et Cosmochimica Acta, 30, s. 41–104.
- Rochette P., Sagnotti L., Bourot-Denise M., Consolmagno G.J., Folco L., Gattacceca J., Osete L.M., Pesonen L., 2003, *Magnetic classification of stony meteorites: 1. Ordinary chondrites*, Meteoritics & Planetary Science, 38, s. 251–268.
- Rochette P., Gattacceca J., Bonal L., Bourot-Denise M., Chevrier V., Clerc J.P., Consolmagno G.J., Folco L., Gounnelle M., Kohout T., Pesonen L., Quirico E., Sagnotti L., Skripnik A., 2008, *Magnetic classification of stony meteorites: 2. Non-ordinary chondrites*, Meteoritics & Planetary Science, 43, s. 959–980.
- Rochette P., Gattacceca J., Lewandowski M., 2012, *Magnetic classification of meteorites and application to the Soltmany fall*, Meteorites, 2, s. 67–71.
- Soini T.-J., Kukkonen I. T., Kohout T., Luttinen A., 2020, *Thermal and porosity properties of meteorites: A compilation of published data and new measurements*, Meteoritics & Planetary Science, 55, s. 402–425.

- Szurgot M., 2015a, *Mean atomic weight of Earth, Moon, Venus, Mercury and Mars. Effect of mass of cores and density of planets*, Lunar and Planetary Science Conference XXXXVI, #1536.pdf
- Szurgot M., 2015b, *Core mass fraction and mean atomic weight of terrestrial planets, moon, and protoplanet Vesta*, Comparative Tectonics and Geodynamics of Venus, Earth, and Rocky Exoplanets Workshop. #5001.pdf
- Szurgot M., 2015c, *Średni ciężar atomowy chondrytu Soltmany, chondrytów L6 i minerałów pozaziemskich*, Acta Societatis Meteoriticae Polonorum, 6, s. 107–128.
- Szurgot M., 2015d, *Mean atomic weight of Chelyabinsk and Olivenza LL5 chondrites*, Meteoritics & Planetary Science, 50 (S1), #5008.pdf
- Szurgot M., 2015e, *Mean atomic weight of Pultusk meteorite and H chondrites*, Meteoritics & Planetary Science, 50 (S1), #5013.pdf
- Szurgot M., 2016a, *Mean atomic weight of L/LL and H/L intermediate ordinary chondrites*, Lunar and Planetary Science Conference 47<sup>th</sup>, Abstract #2180.
- Szurgot M., 2016b, *Mean atomic weight of ordinary chondrites. Effect of petrologic type*, Meteoritics & Planetary Science, 51(S1), #6021.pdf
- Szurgot M., 2016c, *Mean atomic weight of Białystok eucrite, Łowicz mesosiderite, and Baszkówka chondrite*, Meteoritics & Planetary Science, 51 (S1), #6005.pdf
- Szurgot M., 2016d, *Średni ciężar atomowy chondrytów LL5: Siena, Hautes Fagnes i NWA 7915*, Acta Societatis Meteoriticae Polonorum, 7, s. 133–143.
- Szurgot M., 2017a, *Mean atomic weight of Earth and enstatite chondrites*, Lunar and Planetary Science Conference 48<sup>th</sup>, Abstract #1130.
- Szurgot M., 2017b, *Mean atomic weight of chondrules and matrices in Semarkona, Allende and Sharps meteorites*, LPI Contrib. No. 1963, Workshop on Chondrules and Protoplanetary Disk, Abstract #2002.
- Szurgot M., 2017c, *Średni ciężar atomowy chondrytu Ensishheim (LL6)*, Acta Societatis Meteoriticae Polonorum, 8, s. 110–122.
- Szurgot M., 2017d, *Mean atomic weight of Stubenberg meteorite*, LPI Contrib. No. 2021, Workshop on Modern Analytical Methods Applied to Earth, Planetary, and Material Sciences II 2017, Abstract #6005.
- Szurgot M., 2017e, *Uncompressed density of the Moon, lunar mantle and core*, LPI Contrib. No. 2021, Workshop on Modern Analytical Methods Applied to Earth, Planetary, and Material Sciences II 2017, Abstract #6007.
- Szurgot M., 2017f, *Relationship between density of planetary materials and iron to silicon ratio. Grain density for ordinary chondrites, and uncompressed density for Moon, Earth, Venus, and Mars*, Meteoritics & Planetary Science, 52 (S1), #6008.pdf
- Szurgot M., 2017g, *Dependence of density on iron to silicon ratio for extraterrestrial matter*, 59 Konwersatorium Krystalograficzne, Wrocław, Streszczenia komunikatów, s. 145–146.
- Szurgot M., 2017h, *Relationship between density of chondrules and Fe/Si ratio*, 59 Konwersatorium Krystalograficzne, Wrocław, Streszczenia komunikatów, s. 147–148.
- Szurgot M., 2018a, *Mean atomic weight of ordinary chondrites from Spanish falls*, LPI Contrib. No. 2083, Lunar and Planetary Science Conference 49<sup>th</sup>, Abstract #1039.
- Szurgot M., 2018b, *Mean atomic weight of L'Aigle chondrite*, LPI Contrib. No. 2067, Meteoritics & Planetary Science, 53 (S3), #6001.pdf
- Szurgot M., 2018c, *Mean atomic weight and grain density of Košice chondrite*, LPI Contrib. No. 2067, Meteoritics & Planetary Science, 53 (S1), #6002.pdf
- Szurgot M., 2018d, *Średni ciężar atomowy chondrytu Vicencia (LL3.2)*, Acta Societatis Meteoriticae Polonorum, 9, s. 126–144.

- Szurgot M., 2019a, *Średni ciężar atomowy i gęstość ziaren chondrytu Jezersko (H4)*, Acta Societatis Meteoriticae Polonorum, 10, s. 140–159.
- Szurgot M., 2019b, *Relationship between grain density and mean atomic weight for lunar materials. Predicting grain density of lunar meteorites*, LPI Contrib. No. 2132, Lunar and Planetary Science Conference 50<sup>th</sup>, Abstract #1165.
- Szurgot M. A., 2020a, *Ciepło właściwe i ciepło atomowe chondrytu Jezersko*, Przegląd Geologiczny, 68, s. 54–59.
- Szurgot M., 2020b, *Średni ciężar cząsteczkowy chondrytu Jezersko (H4). Promień i objętość atomu i cząsteczki chondrytu*, Acta Societatis Meteoriticae Polonorum, 11, s. 98–109.
- Szurgot M.A., 2021a, *Mean atomic weight, grain density, and porosity of Flensburg unique carbonaceous chondrite*, 84th Annual Meeting of the Meteoritical Society (2021), LPI Contribution No. 2609, Meteoritics & Planetary Science, 56 (S1), #6006.pdf
- Szurgot M.A., 2021b, *Mean atomic weight, grain density, and porosity of Cavezzo chondrite*, 84th Annual Meeting of the Meteoritical Society (2021), LPI Contribution No. 2609, Meteoritics & Planetary Science, 56 (S1), #6009.pdf
- Szurgot M. A., 2021c, *O przewodności cieplnej meteorytu Jezersko*, Nafta-Gaz, nr 1, s. 10–19.
- Szurgot M.A., 2022, *Mean atomic weight and grain density of interior and fusion crust of Alessandria chondrite*, Lunar and Planetary Science Conference 53<sup>rd</sup>, Abstract #2563.
- Szurgot M.A., 2023a, *Modal composition, mean atomic weight, and grain density of Antonin chondrite*, 86th Annual Meeting of the Meteoritical Society (2023), LPI Contribution No. 2990, Meteoritics & Planetary Science, 58 (S1), #6002.pdf
- Szurgot M.A., 2023b, *Prediction of grain density, mean atomic weight, and iron to silicon ratio of Santa Filomena chondrite by magnetic susceptibility*, 86th Annual Meeting of the Meteoritical Society (2023), LPI Contribution No. 2990, Meteoritics & Planetary Science, 58 (S1), #6003.pdf
- Szurgot M. A., 2024, *Effect of porosity on thermal inertia of ordinary chondrites*. Lunar and Planetary Science Conference 55th, Abstract #2562.
- Szurgot M., Wach, R.A., Przylibski, T. 2012. *Thermophysical properties of Soltmany meteorite*, Meteorites 2, s. 53–65.
- Szurgot M., Wach R.A., Bartoschewitz R., 2017, *Mean atomic weight of Braunschweig meteorite*, Meteoritics & Planetary Science, 52 (S1), #6002.pdf.
- Szurgot M., Wach R.A., Unsalan O., Altunayar-Unsalan C., 2020, *Mean atomic weight and thermophysical properties of Çanakkale meteorite*, Lunar and Planetary Science Conference 51<sup>st</sup>, Abstract #1287.
- Szurgot M., Wach R.A., Unsalan O., Altunayar-Unsalan C., 2021, *Mean atomic heat of Sariçiçek howardite and Bursa L6 chondrite*, Lunar and Planetary Science Conference 52<sup>nd</sup>, LPI Contribution No. 2548, Abstract #1108.
- Szurgot M.A., Wach R.A., Unsalan O., Altunayar-Unsalan C., 2022, *The thermal conductivity of Bursa chondrite*, 85th Annual Meeting of the Meteoritical Society (2022), LPI Contribution No. 2695, Meteoritics & Planetary Science, 57 (S1), #6099.pdf
- Wilkison S.L., Robinson, M.S., 2000, *Bulk density of ordinary chondrite meteorites and Implications for asteroidal internal structure*, Meteoritics & Planetary Science, 35, s. 1203–1213.
- Yomogida K., Matsui T., 1983, *Physical properties of ordinary chondrites*, Journal of Geophysical Research Solid Earth, 88, s. 9513–9533.

## Strony internetowe

<https://matweb.com>, Mat Web – Materials Property Database