

# Možná tvorba tepla z jaderné fúze ve vnitřním jádru Země

 [nature.com/articles/srep37740](https://www.nature.com/articles/srep37740)

Mikio Fukuhara

Vědecké zprávy hlasitost 6 , Číslo článku: 37740 ( 2016 ) Citovat tento článek

- 34k přístupů
- 4 Citace
- 73 Altmetric
- Metriky podrobnosti



Oprava k tomuto článku byla zveřejněna 2. května

## Abstraktní

Příčina a zdroj tepla uvolňovaného z nitra Země dosud nebyly stanoveny. Některé výzkumné skupiny navrhovaly, že teplo je dodáváno radioaktivním rozpadem nebo jaderným georeaktorem. Zde předpokládáme, že generování tepla je výsledkem třítělesné jaderné fúze deuteronů uzavřených v šestiúhelníkových FeDx krystalech se středem jádra; reakční rychlost je zvýšena kombinovanými přitažlivými účinky vysokého tlaku (~364 GPa) a vysoké teploty (~5700 K) a fyzikální katalýzou neutrálních pionů:  ${}^2\text{D} + {}^2\text{D} + {}^2\text{D} \rightarrow 2\text{}^1\text{H} + {}^4\text{He} + 2\bar{\nu}_e + 20,85\text{ MeV}$ . Možnou rychlost tvorby tepla lze vypočítat jako  $8,12 \times 10^{12}\text{ J/m}^3$ , na základě předpokladu, že primitivní zásoba tepla Země již byla vyčerpána. Produkované atomy H a He a anti-neutrino  $\bar{\nu}_e$  jsou začleněny jako slitiny na bázi Fe-H v části vnitřního jádra bohaté na H, jsou uvolňovány z nitra Země do vesmíru a procházejí Zemí.

## Úvod

Naše Země je stále mladá planeta se značnými zdroji tepla, které se vyznačují vulkanickou činností a zemětřeseními způsobenými pohybem tektonických desek. Teorie deskové tektoniky úspěšně vysvětluje různé geologické jevy, které se vyskytují na kontinentech a v oceánech Země, ale hnací síla pohybu desek nebyla zcela vyřešena. Pokud jde o původ tepla, současný konsenzus je, že tok tepla z nitra Země na povrch pochází ze dvou hlavních zdrojů: radiogenního tepla a prvotního tepla. Prvotní teplo, které vzniklo při počátečním formování Země, je kinetická energie přenášená na Zemi vnějšími dopady komet a meteoritů a následnými efekty: gravitací řízená akrece,<sup>1</sup>.

Od doby, kdy Kuroda <sup>2</sup> poprvé navrhl, že na Zemi fungovaly přírodní štěpné reaktory asi před dvěma miliardami let, se velká pozornost soustředila na jadernou energii jako hnací sílu pohybu desek. Herndon <sup>3</sup> potvrdil proveditelnost planetocentrických jaderných reaktorů a rozsáhle rozvinul koncepci. Protože je však v železných meteoritech velmi málo U, jaderný reaktor v zemském jádru nebo na jiných terestrických planetách se zdá nepravděpodobný <sup>4</sup> . Meijer a van Westrenen <sup>5</sup> uvedli jaderné štěpení U a Th jako zdroje generování tepla na hranici pláště uvnitř zemského jádra na základě rozložení izotopu Nd v horninách <sup>6</sup> . Bao <sup>7</sup> poznamenali, že ve vápenaté perovskitové nádrži u základny pláště je mnoho prvků produkujících teplo (U a Th).

V letech 2005 a 2007 vědci z Kamioka Liquid-Scintillator Antineutrino Detector (KamLAND) <sup>8</sup> a Borexino <sup>9</sup> detekovali signály antineutrin,  $\bar{\nu}_e$  ( tj ., „geoneutrino“) produkované uvnitř Země, resp. Neutrino, velmi lehké subatomární částice, vznikají jaderným štěpením a rozpadem radioaktivních prvků a také jadernou fúzí, ke které dochází ve Slunci a hvězdách. Vzhledem k tomu, že štěpení probíhá v časovém měřítku zlomku mikrosekundy, je nutné, aby tvorba tepla zahrnovala řetězovou reakci jaderného rozpadu atomů v horninách a minerálech s vysokou koncentrací radioaktivních rozpadajících se atomů. Alfa a beta rozpad jako takový může dodávat teplo v časech srovnatelných

se stářím Země. KamLAND Collaboration oznámila, že teplo z radioaktivního rozpadu radiogenních izotopů, jako je  $^{238}\text{U}$  a  $^{232}\text{Th}$  se podílí asi polovinou, 21 TW, na celkovém tepelném toku Země ( $44,2 \pm 1,0$  TW) a že primární zásoby tepla Země ještě nebyly vyčerpány <sup>10</sup>.

Existují však čtyři nezodpovězené otázky týkající se rozpadu takových radioaktivních izotopů. První otázka se ptá, proč by velká emise jaderné hmoty z radioaktivních prvků primárně soustředěných v mělké kůře nevedla ke smrti mnoha živých bytostí. Ačkoli se věří, že rychlost produkce radiogenního tepla nemůže způsobit poškození živých věcí, viděli jsme příklad samovolného vznícení v důsledku dostatečně vysokých koncentrací radioaktivních prvků v horninách kůry v Oklo v Gabonu, Afrika <sup>11</sup>. V případě samovznícení by se produkty emisí z radioaktivních prvků šířily aktivními sopkami a pohybem horských pásem. Ve skutečnosti netrpíme přirozeným radioaktivním znečištěním. Druhá otázka se týká množství Pb, které existuje v zemské kůře. KamLAND Collaboration <sup>10</sup> uvedlo emisi  $\bar{\nu}_e$  dvěma reakcemi,  $^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb} + 8\alpha + 6e^- + 6\bar{\nu}_e + 51,47\text{ MeV}$  a  $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{208}\text{Pb} + 6\alpha + 4e^- + 4\bar{\nu}_e + 42,7\text{ MeV}$  po šesti, respektive čtyřnásobném  $\beta$  rozpadu. Pokud jsou tyto reakce zodpovědné za pokračující tvorbu tepla v kůře, velké množství Pb by bylo obsaženo v přírodních horninách a rudách. Koncentrace Pb v kůře je však pouze 12,5 ppm <sup>12</sup>. Třetí otázka se týká tepelné nerovnováhy: odhadovaný sklon změny teploty od jádra ke kůře je negativně lineární. Lineární sklon lze vysvětlit pouze tvorbou tepla ve vnitřním jádru Země. Pokud jsou odhadované tepelné příspěvky z pláště (10 TW) a kůry (7,9 TW) <sup>10</sup> správné, teplotní křivka musí mít dva vrcholy, jeden v kůře (6–40 km) a jeden v plášti (410–2900 km) (Doplňkové informace 1). Nehomogenita povrchového tepelného toku v kůře by mohla být odvozena z geologické poruchy v beztlaké oblasti. Pokud jde o čtvrtou otázku, pokud k radioaktivnímu rozpadu dochází také na Venuši, což je sesterská planeta Země s podobnou velikostí a složením, měli bychom pozorovat deskovou tektoniku jako výsledek

karbonátového magma-oceánu. Desková tektonika však není na Venuši <sup>13</sup> patrná . Tyto skutečnosti tedy silně omezují možnost, že produkce radiogenního tepla v kůře a plášti produkuje  $\bar{v}_e$  .

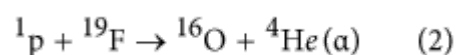
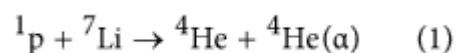
Případně indukčně uvažujeme o možnosti jaderné fúze, při které nevzniká škodlivý radioaktivní odpad, ale vzniká velké množství tepla. Protože nárůst paraeomagnetické velikosti mezi 2,7–2,1 miliardami let naznačuje nukleaci vnitřního kapalného jádra <sup>14</sup> , jaderná fúze by začala asi před 2,2 miliardami let <sup>15</sup> . Naše hypotéza může vysvětlit, proč na Zemi existuje desková tektonika, ale ne na jiných pozemských planetách, jako je Merkur, Venuše, Mars a Měsíc Země. Dalším příkladem jaderné fúze v nitru Země je dále to, že původ N v zemské atmosféře je interpretován jako výsledek endotermické jaderné transmutace <sup>16</sup> , <sup>17</sup> .

### Reakce jaderné fúze bez radioaktivity

---

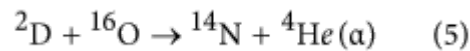
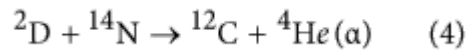
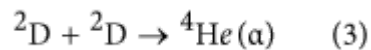
Labaune a kol. <sup>18</sup> demonstroval nízkoenergetickou fúzní reakci protonů a jader <sup>11</sup> B srážkou laserem urychleného paprsku protonů s laserem generovaným B plazmatem. Toto je čistší a méně nebezpečná reakce ve srovnání s horkou jadernou fúzí, která neprodukuje neutrony s vysokou energií. Proto zavádíme nízkoenergetickou jadernou fúzní reakci, která může být zodpovědná za produkci tepelné energie bez smrtící radiace.

Když jsme poprvé zvažovali reakce zprostředkované protony, oblast možných reakcí byla omezena na následující dvě, přičemž se bral v úvahu poměr jader na Zemi ( doplňkové informace 2 ):



Nicméně malá Clarkeova čísla Li a F v zemské kůře činí tyto reakce nepravděpodobnými.

Alternativně, protože reakce zprostředkované deuterony vyžadují stabilní nuklidy, jsou slibné následující reakce ( doplňkové informace 3 ).



Bylo by obtížné, aby reakce (4) dodávala značné množství N do vysokoteplotních a vysokotlakých oblastí potřebných pro jadernou fúzi. Protože tvorba atmosférického O začala asi před 2 miliardami let v důsledku fotosyntetické aktivity organické hmoty <sup>15</sup>, je reakce (5) také omezená. Reakce (3) je tedy nejnadějnější.

### **Koncentrace deuteria v jádru slitiny bohaté na Fe**

---

Místa reakce jaderné fúze na Zemi vyžadují následující podmínky: velké množství atomů deuteria (D) v pevných materiálech, prostředí s vysokou teplotou a vysokým tlakem pro překonání vysoké Coulombovy bariéry fúzní reakce a přítomnost fyzikální katalýzy podporovat reakce. Pravděpodobným místem je tedy zemské slitinové jádro bohaté na Fe s omezeným U a Th <sup>3</sup>. Podle nedávného výzkumu Tatenó *et al.* <sup>19</sup>, hexagonální těsně sbalená (hcp) struktura Fe je stabilní až do 377 GPa a 5700 K, což odpovídá podmínkám vnitřního jádra Země. Axiální poměr c/a struktury hcp Fe při 332 GPa a 4820 K se téměř rovná ideální struktuře hcp.

Zde si všimneme obsahu H ve vnitřním jádru. Vysokoteplotní a trojrozměrné rentgenové mikrotomografické zobrazování odhadlo 0,6 % hmotn. (= 25 at%) H v zemském jádru <sup>20</sup>. To naznačuje, že velké množství H bylo začleněno do kovů z vodnatého oceánu magmatu v době tvorby jádra <sup>21</sup>. Baranowski <sup>22</sup> ukázal, že atomy H mohou migrovat mezi atomy Fe bez vytváření hydridů v podmínkách

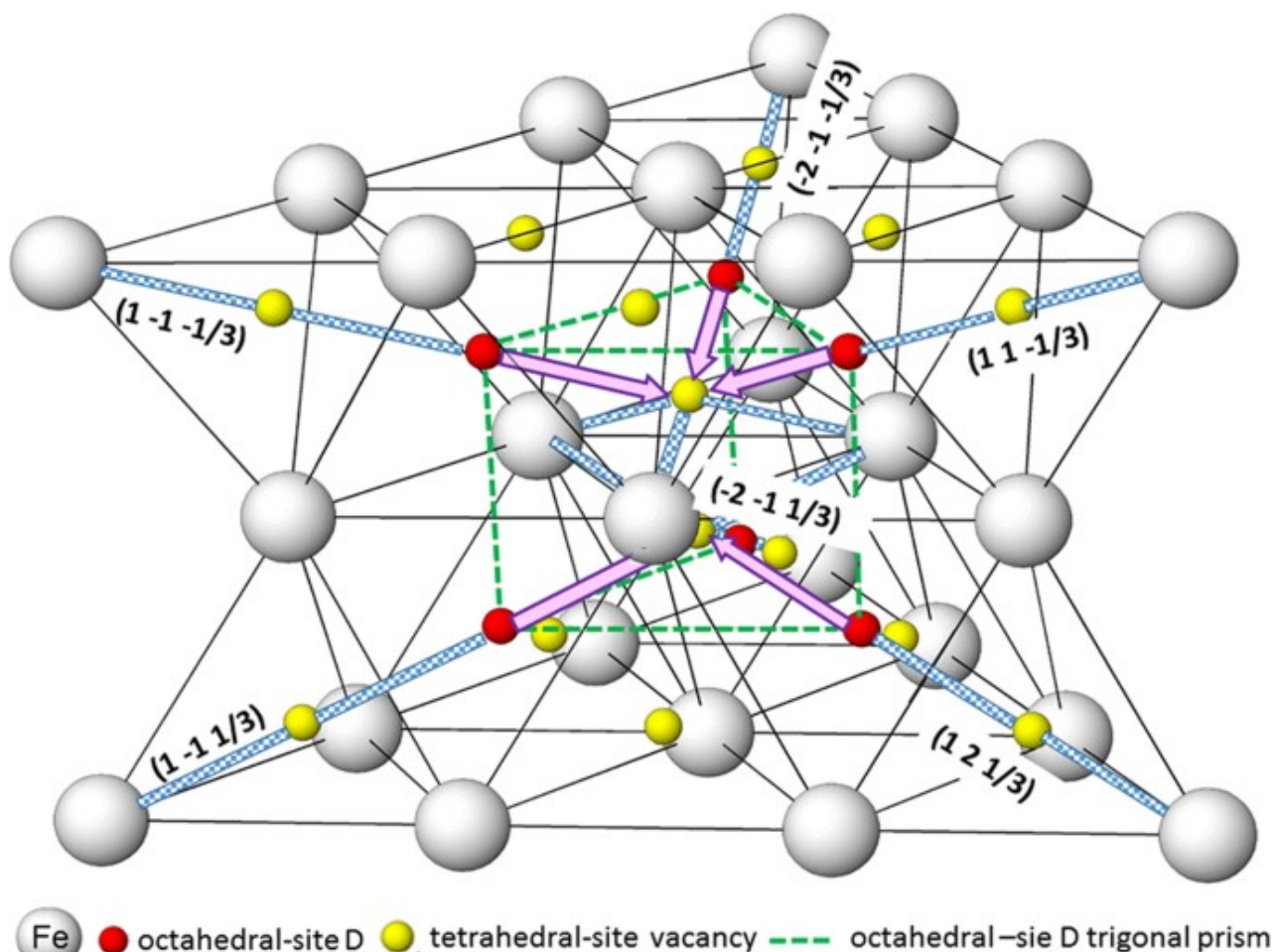
ultravysokého tlaku. V oblastech s vysokou teplotou Fukai <sup>23</sup> odhadl, že atomy H nezůstaly v potenciálních jamkách intersticiálních míst, ale zažily volný pohyb podobný pohybu atomů v plynech.

Na druhou stranu byl přehlížen příspěvek D k možnému výskytu jaderné fúze ve vnitřním pevném jádru, ačkoli bombardování pozdního pláště komet a meteoritů H<sub>2</sub>O a D<sub>2</sub>O pocházejících z Kuiperova pásu na primitivní suchá Země pokračovala 0,2 miliardy let po izolaci sluneční soustavy <sup>24, 25</sup>. Znovu si všimneme obsahu D ve vnitřním pevném jádru, protože D ve vodním ledu nalezeném v kometách <sup>26, 27</sup> nebo meteoritech <sup>28</sup> je obohaceno faktorem 11,6, 92 a 29, v tomto pořadí, vzhledem k D/H poměr (0,0017) mořské vody Země. Tedy objem primitivní těžké vody D<sub>2</sub>O, jak se odhaduje z celkové vody (1,4 miliardy km<sup>3</sup>, včetně podzemních vod Země <sup>29</sup>), bylo přibližně 100 milionů km<sup>3</sup>. Deuteronová voda skutečně existuje jako DHO v přírodní vodě pod okolním tlakem. Hustoty D<sub>2</sub>O a DHO jsou 1,1056 a 1,054 g/cm<sup>3</sup>, v daném pořadí, a jsou poněkud větší než hustota lehké vody H<sub>2</sub>O (0,9982 g/cm<sup>3</sup> při 293 K, 1 atm) <sup>30</sup>. Pokud však DHO klesne do vnitřních oblastí Země, DHO by se během gravitační separace D<sub>2</sub>O a H<sub>2</sub> přeměnilo na D<sub>2</sub>O a poté se rozloží na atomy D a O. A konečně, atomy D by byly začleněny do kovů bohatých na Fe; Nomura a kol. <sup>20</sup> odhadli systém Fe-H-Si bez D jako jadrových pevných kovů. Nicméně, pokud víme, výzkum procesu potápění atomů D nelze v literatuře nalézt.

Dále zvažujeme hnací sílu zodpovědnou za blízkost deuteronů. Protože maximální rozpustnost vodíku slitiny na bázi Fe tvořící středové jádro je 25 při % H<sub>2</sub> · použili jsme model mřížky oktaedrického obsazeného deuterovaného železa FeD<sub>x</sub> (x < 0,25) znázorněné na obr. 1, který bere v úvahu slitina jako Fe. Stabilní struktura slitin kov-vodík za vysokých tlaků a vysokých teplot upřednostňuje intersticiální místa s přebytečnými vakancemi (klastry vakance-vodík) <sup>31</sup>. Měření zachycení defektu D implantovaného do Fe ukazuje, že atom D se přesunul z téměř oktaedrického intersticiálního místa na jiné místo <sup>32</sup>. Atomy v šesti [3 3 · 1] směrech

(modré tlusté čáry) při 332 GPa a 4820 K jsou seřazeny v řetězcích takto: Fe – vakance v tetraedrickém místě – oktaedrické místo D – volné místo v čtyřstěnu – Fe. Intersticiální deuterony v FeDx jsou ponořeny do moře vodivostních elektronů odvozených z atomů Fe. Nestabilita vlny hustoty náboje (CDW) se vyskytuje většinou v materiálech, ve kterých jsou atomy seřazeny do řetězců. Když hexaedrická distorze podmřížkových trojstěnných deuteronů (tečkovaná zelená čára) moduluje přenos náboje v řetězcích (tj. střídavé čtyřstěnné  $D^{+\delta}$ -Fe  $^{8-\delta}$  pole <sup>33</sup>), dochází k přesunu deuteronů podobným dýchacímu režimu podél  $[3\ 3\ \cdot\ 1]$  pokyny ( Doplňkové informace 4 ).

Obrázek 1



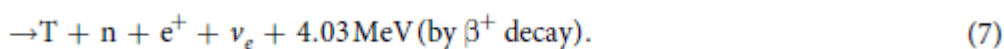
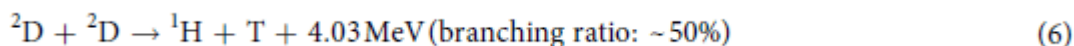
Substechiometrický krystal  $\text{FeD}_x$  se všemi oktaedrickými D místy (malé červené kroužky) a všemi čtyřstěnnými prázdnými místy (malé žluté kroužky) v Fe (velké bílé kroužky) hexagonální těsně sblazené (hcp) mřížce při 332 GPa a 4820 K blízko středu vnitřního jádra .

Modré tlusté čáry představují řetězce (Fe–tetraedrální místo vakance – oktaedrické místo D–tetraedrální místo vakance–Fe) podél  $[3\ 3\ -1]$  směru.

Velikosti atomů nemusí být nutně v měřítku.

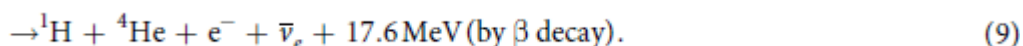
[Obrázek v plné velikosti](#)

Můžeme tedy odvodit následující dynamické jaderné reakce <sup>34</sup>, ve kterých se dva čtyřstěnné atomy deuteronu srazí v oktaedrické vakanci ve slitinách bohatých na Fe ve vnitřním jádru Země:

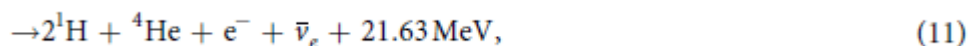
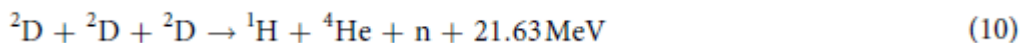


Poté, co se atom H přesune na jiné oktaedrické místo, další deuteron ze sousedního místa se srazí s atomem tritia.





Když se tři deuterony v oktaedrickém místě srazí současně v tetraedrickém prázdném místě, dostaneme následující reakci tří těles,



od rovnic (6) až (11). Proto můžeme měřit antielektronová neutrina  $\bar{\nu}_e$  pomocí Eq. (11). Mohla by to být geoneutrina, která byla detekována KamLAND<sup>10</sup> a Borexino<sup>9</sup>.

Na základě obou pozorování vysokého poměru izotopů He ve vulkanických oblastech<sup>35</sup> a radiace přebytečného tepla, Jones *et al.*<sup>36</sup> naznačují možnost studené jaderné fúze v plášti vodní nádrže Země, stejně jako v jádru Jupiteru<sup>4</sup>.

### Omezení působením vysokého tlaku

---

Elektrony vnějšího obalu atomů D v mřížkách FeDx vnitřního jádra Země se chovají jako volné elektrony<sup>37</sup> a výsledný stínící efekt poskytuje úlevu od Coulombovy odpudivé síly mezi jádry deuteronů. V této studii používáme hexagonální ( $\epsilon$ ) Fe místo mřížky Fe-Si kvůli nedostatku dat krystalové mřížky při vysokých tlacích kolem 364 GPa. Hustotu  $\epsilon$ -Fe při 364 GPa a 5773 K lze odhadnout na 13,357 Mg/m<sup>3</sup> pomocí vztahu hustota-tlak<sup>38</sup>. Můžeme tedy předpokládat, že čtyřstěnný průměr D je  $2 r_1 = 2 \times 0,10395 \times 0,225 \cong 0,0468$  nm (doplňkové informace 5), což je o 37 % menší než rovnovážný průměr ( $2 r_o = 0,074$  nm) atomu D v jeho plynné nebo kapalně fázi<sup>39</sup>. Tato vzdálenost je však stále velká ve srovnání se vzdáleností (0,022 nm)<sup>40</sup> požadovanou pro dynamickou jadernou reakci.

### Omezení působením vysoké teploty

---

Protože teplota v 6378 km pod povrchem je udávána asi 5773 K <sup>19</sup>, uvažovali jsme vliv teploty na reakční rychlost  $k$ . Rychlost lze vyjádřit Arrheniovou rovnicí <sup>41</sup>:

$$k = \frac{k_b T}{h} \frac{f_N^2}{f_c f_0} e^{-E/RT} \quad (12)$$

kde  $f_D$  a  $f_{He}$  jsou rozdělovací funkce  $^2D$  a  $^4He$ , v tomto pořadí, a  $k_B$ ,  $R$  a  $E$  jsou Boltzmannovy a Gasovy konstanty a aktivační energie reakce, v tomto pořadí. Protože  $f_D \doteq f_{He}$ , můžeme zapsat poměr rychlostí při teplotách  $T_0$  a  $T_1$  takto:

$$\frac{k_1}{k_0} = \frac{T_1}{T_0} e^{\frac{E}{R} \left( \frac{T_1 - T_0}{T_0 T_1} \right)}. \quad (13)$$

Při  $T_0 = 300$  K a  $T_1 = 5773$  K dostaneme

$$\frac{k_1}{k_0} = 19.2. \quad (14)$$

Podle prvního principu symetrie síly, která je spojena s vazebnou energií, vyjadřuje odpudivou interakci mezi atomy <sup>42</sup> následující potenciální forma:

$$U(R) = -\frac{B}{r^{12}}, \quad (15)$$

kde  $B$  je empirický parametr. Vezmeme-li v úvahu vliv teploty na rychlost reakce, dostaneme zmenšenou vzdálenost

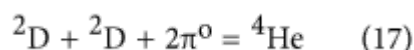
$$\begin{aligned} 2r_2 \cong 2 \times 0.8574r_1 &= 2 \times 0.8574 \times r_0 \\ &= 0.8574 \times 0.0468 \\ &= 0.0401 \text{ nm.} \end{aligned} \quad (16)$$

Tento poloměr je přibližně dvojnásobkem kritické vzdálenosti (0,022 nm).

**Fyzikální katalyzační efekt pro dynamické reakce deuteronových párů**

---

Nakonec musíme zvážit nezbytné podmínky pro možnou nukleonovou reakci (11) následovanou tvorbou  ${}^4\text{He}$ . Deuteron je stav  $np$ , jehož isospinová vlnová funkce je antisymetrická, kde  $n$  a  $p$  jsou neutrony a protony. Jádro He je zprostředkováno kladně a záporně nabitými piony  $\pi^\pm$  a jedním neutrálním pionem  $\pi^0$ . Tvorba jádra He ze dvou deuteronů (fúze) proto vyžaduje přímou sílu způsobenou výměnou dvou neutrálních pionů, které netvoří jádro deuteronu, protože další nevýměnná část zprostředkovaná neutrálním pionem podstatně zmírňuje  $n, p$  síla v jádře He<sup>39</sup>.



Piony jsou zodpovědné za všechny nízkoenergetické jaderné interakce<sup>43</sup> ( doplňkové informace 6 ).

Neutrální pion v rov. (18) je poskytován prostřednictvím základního procesu elektromagnetické interakce:

$$\gamma + \gamma = \pi^0 \quad (18)$$

Na základě isospinové symetrie je foton v rov. (18) je produkován emisí excitovaných elektronů  $e^*$ , které jsou generovány srážkou volných elektronů<sup>44</sup> odvozených z tlakové ionizace ( Doplňkové informace 7 ), a cyklické expanze a kontrakce v důsledku lunární gravitace,

$$e^- \rightarrow e^*, \gamma. \quad (19)$$

V našem předchozím článku<sup>39</sup> jsme uvedli následující vzorec pro fúzi He bez radioaktivity:



Zavedení neutrálních pionů umožňuje pozoruhodně zmenšit mezijadernou vzdálenost mezi deuterony a zvýšit rychlost fúze pro tvorbu He, jak tomu bylo u fyzikální katalýzy<sup>39</sup>.

Podle teorie symetrických mezonů jaderné síly <sup>43</sup> a vazebné energie, která má tendenci shlukovat bosony dohromady, můžeme zaznamenat energii interakce dvou nukleonů při separaci  $r$  takto:

$$U(R) = -\frac{A}{r^4}, \quad (21)$$

kde  $A$  je vazebná konstanta. Protože přidání dvou neutrálních pionů zvýší přitažlivou sílu faktorem 14 při interakční síle 14krát, získáme DD vzdálenost  $2 r_3$ .

$$2r_3 \cong 0.5170 \times 2r_2 = 0.517 \times 0.0401 \cong 0.02075 \text{ nm}. \quad (22)$$

Tato hodnota by vedla k fúzi jader DDD před transformací He.

### Existence vnitřního jádra bohatého na D

---

Rychlost fúze  $R$  pro reakci tří těles bez radioaktivních produktů ( Rov. [11] ) byla vypočtena jako  $5,27 \times 10^9 \text{ fúze /s/ m}^3$ . ( Doplňující informace 8 ). Z rov. (11), získáme množství vyrobeného tepla:

$$\begin{aligned} H &= 5.27 \times 10^9 (\text{fusion/s/m}^3) \times 21.63 \times 10^6 (\text{eV/fusion}) \times 1.6022 \times 10^{-19} (\text{J}) \\ &= 1.826 \times 10^{-2} \text{ J/s/m}^3. \end{aligned} \quad (23)$$

Celková dodávka tepla od nukleace zemského jádra do současnosti (2,2 miliardy let <sup>15</sup>) je dána jako

$$\begin{aligned} H &= 1.826 \times 10^{-2} (\text{J/s/m}^3) \times 2.2 \times 10^9 (\text{year}) \times 365 (\text{day}) \times 24 (\text{hour}) \times 3,600 (\text{s}) \\ &= 1.267 \times 10^{15} \text{ J/m}^3. \end{aligned} \quad (24)$$

Protože se současný celkový tepelný tok ze Země do vesmíru udává  $44,2 \pm 1,0 \text{ TW}$  <sup>45</sup>, je celková dodávka tepla od nukleace zemského jádra do současnosti  $3,07 \times 10^{30} \text{ J}$  ( $=44,2 \times 10^{12} \text{ J/s} \times 6,94 \times 10^{16} \text{ s}$ ), na základě předpokladu, že primitivní zásoba tepla Země již byla vyčerpána. Můžeme tedy vypočítat celkový objem  $D$  potřebný pro výrobu tepla z rov. (24),

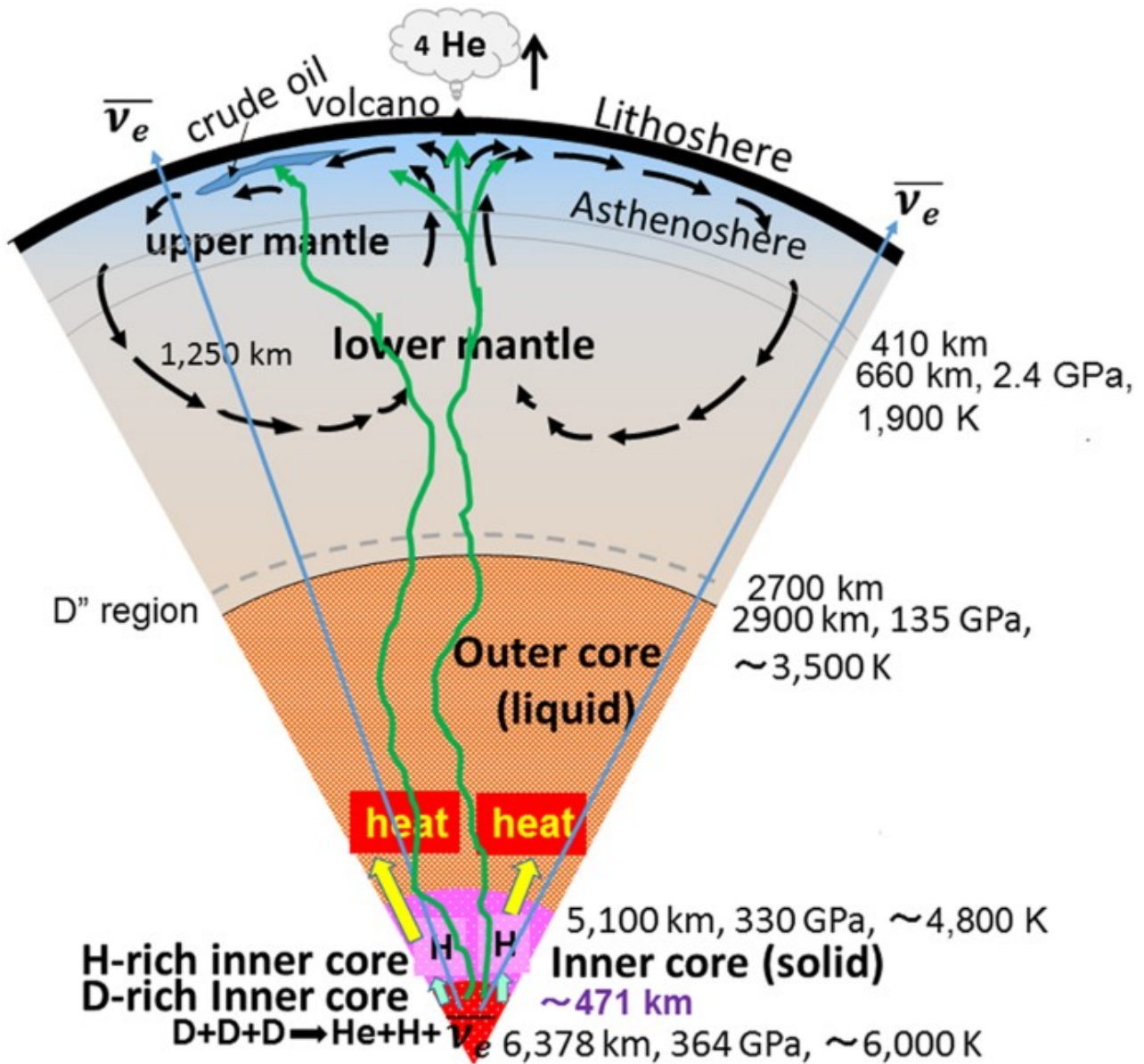
$$(3.07 \times 10^{30} (\text{J})) / (1.267 \times 10^{15} (\text{J/m}^3)) = 2.42 \times 10^{15} \text{ m}^3 \quad (25)$$

Protože objemy  $\epsilon$ -Fe a D v krystalu Fe-0,6 hm. % D (100 g) v blízkosti vnitřního jádra lze odhadnout na  $7,44 \text{ cm}^3$  ( $\approx 99,4 \text{ g}/13,357 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) a  $0,3 \text{ cm}^3$  ( $\approx 0,6 \text{ g}/2 \text{ g/cm}^3$ ), respektive objem krystalů Fe-D, které přispěly k tvorbě tepla až do současnosti, je

$$2.42 \times 10^{15} \text{ m}^3 \times 7.44/0.3 = 6.00 \times 10^{16} \text{ m}^3. \quad (26)$$

Na druhou stranu, protože začleněná hrubá hmotnost D od vytvoření zemského jádra do současnosti se odhaduje na  $6,67 \times 10^{21} \text{ kg}$  ( $=100 \text{ Mkm}^3 \times 2 \text{ Mg/m}^3 \times 4/20 \times 1/0,006$ ), objem krystalů Fe-D až do současnosti je  $4,99 \times 10^{17} \text{ m}^3$  ( $6,67 \times 10^{21} /13,36 [\text{Mg/m}^3]$ ), což vede k objemu nezreagovaného (Fe-D) krystalu  $4,37 \times 10^{17} \text{ m}^3$  ( $=4,99 \times 10^{17} - 6,23 \times 10^{16}$ ). Můžeme tedy odhadnout 471 km (0,08 obj. % vnitřního jádra) jako poloměr vnitřního jádra bohatého na D na obr. 2. Vzniklé teplo je transportováno z vnitřního do vnějšího jádra a poté vytváří proudění pláště procházející přechodovou zónou jádro-plášť. Není však jasné, jak se teplo z vnitřního jádra může dostat k plášti kvůli jeho elastické anizotropii<sup>46</sup> a jeho prostorově proměnným tepelným ztrátám<sup>47</sup>. Dále zbývá vyřešit, zda má tepelná cirkulace pláště celoplášťovou nebo vrstvenou konfiguraci<sup>47</sup>. Těkavé a neaktivní plyny He by mohly být vypuštěny hydrotermálními a vulkanickými aktivitami a poté uvolněny ze zemské atmosféry do vesmíru. Současně mohou být H plyny začleněny jako slitiny Fe-H, čímž se zvětší vnitřní jádro bohaté na H. Navíc, protože Merkur, Mars a Měsíc Země nemají vnitřní jádra s vysokým tlakem  $\sim 364 \text{ GPa}$  a Venuše nemá dostatek H<sup>13</sup> nebo D, tyto pozemské planety nepodporují jadernou fúzi, což nemá za následek žádný důkaz deskové tektoniky.

## Obrázek 2



Zemský řez zobrazující kůru, horní a spodní plášť a vnější a vnitřní jádra.

Vnitřní jádro obsahuje jádro bohaté na H a jádro bohaté na D. Podstatné množství tepla je generováno jadernou dynamickou fúzí deuteronů stlačených ve vysoce stlačené hexagonální těsně sblazené (hcp) krystalové mřížce bohaté na Fe poblíž středu vnitřního jádra.  $\bar{\nu}_e$  Produkované atomy H a He a anti-neutrino jsou začleněny jako slitiny na bázi Fe-H do vnitřního jádra bohatého na H, jsou uvolňovány z nitra Země do vesmíru a procházejí Zemí.

[Obrázek v plné velikosti >](#)

## Závěry

Poskytujeme možný model pro vznik tepelné energie z nitra Země bez škodlivých radioaktivních odpadů, ve kterých je tvorba tepla výsledkem třítělesové jaderné fúze deuteronů uzavřených v

šestiúhelníkových krystalech FeDx s jádrem a středem:  $2 \text{ D} + 2 \text{ D} + 2 \text{ D} \rightarrow 2 \text{ }^1\text{H} + \text{ }^4\text{He} + 2 \bar{\nu}_e + 20,85 \text{ MeV}$ . KamLAND Collaboration byla schopna pozorovat anti-neutrína jadernou fúzí ve vnitřním jádru bohatém na D za předpokladu, že vědci z KamLANDu mohli jaderné fúzi uvěřit.

## dodatečné informace

---

**Jak citovat tento článek** : Fukuhara, M. Možná tvorba tepla z jaderné fúze ve vnitřním jádru Země. *Sci. Rep.* **6** , 37740; doi: 10.1038/srep37740 (2016).

**Poznámka vydavatele:** Springer Nature zůstává neutrální, pokud jde o jurisdikční nároky v publikovaných mapách a institucionálních přidruženích.

## Reference

---

- Turcotte, DL & Schubert, G. *Geodynamics* (Cambridge University Press 2003).
- Kuroda, PK K jaderné fyzikální stabilitě uranových minerálů. *J. Chem. Phys.* 25, 1295–1296 (1956).

[Článek](#) [ADS](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

- Herndon, JM Jaderné štěpné reaktory jako zdroje energie pro obří vnější planety. *Naturwissenschaften.* 79, 7-14 (1992).

[Článek](#) [ADS](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

- Manuel, OK Komentáře v Jsou v jádru Země jaderné reaktory? od Ball P. *Nature News*, 15. května, doi: 10.1038/news822 (2008).
- de Meijer, RJ & van Westrenen. W. Proveditelnost a důsledky jaderných georeaktorů v oblasti hranice jádra a pláště Země. *Jihoafričan J. Sci.* 104, 111-118 (2008).

[CAS](#) [Google Scholar](#)

- Carlson, RW, Boyet, M. & Horan, M. Chondrite Baryum, neodým a samarium Izotopová heterogenita a zemská diferenciace. Věda. 316, 1175–1178 (2007).

[Článek](#) [ADS](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

- Bao, X. Distribuce U a Th a jejich jaderné štěpení ve vnějším jádru Země a jejich vliv na geodynamiku. Geo. Rev. 45 (Sup), 82-92 (1999).

[Google Scholar](#)

- Araki, T. a kol. Experimentální výzkum geologicky vyrobených antineutrin s KamLAND. Nature 436, 499–503 (2005).

[Článek](#) [ADS](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

- Bellini, G. a kol. Měření geo-neutrin z 1353 dnů Borexina. Phys. Lett. B. 687, 299–304 (2010).

[Článek](#) [ADS](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

- KamLAND Collaboration. Částečný model radiogenního tepla pro Zemi odhalený měřeními geoneutrin. Nat. Geosci. 4, 647–651 (2011).
- Kuroda, PK Jaderné štěpení v rané historii Země. Příroda 187, 36–38 (1960).

[Článek](#) [ADS](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

- Taylor, S. R. Abundance of chemical elements in continental crust: a new table. Geochim. Cosmochim. Acta. 28, 1273–1285 (1964).

[Article](#) [ADS](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

- Bullock, M. A. & Grinspoon, D. H. Global climate change on Venus. Sci. Am. 34–41 (1999).



- Hale, C. J. Palaeomagnetic data suggest link between the Archaean-Proterozoic boundary and inner-core nucleation. *Nature* 329, 233–37 (1987).

[Article](#) [ADS](#) [Google Scholar](#)

- Stevenson, D. J., Spohn, T. & Schubert, G. Magnetism and thermal evolution of the terrestrial planets. *Icarus* 54, 466–489 (1983).

[Article](#) [ADS](#) [Google Scholar](#)

- Fukuhara, M. Possible origin of nitrogen in the Earth's atmosphere. *Nuovo Cimento*. 27C, 99–113 (2004).

[ADS](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

- Fukuhara, M. Nitrogen Discharged from the Earth's Interior Regions. *J. Mod. Phys.* 5, 75–81 (2014).

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

- Labaune, C. et al. Fusion reactions initiated by laser-accelerated particle beams in a laser-produced plasma. *Nat. Commun.* 4, 2506 (2013).

[Article](#) [ADS](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

- Tateno, S., Hirose, K., Ohishi, Y. & Tatsumi, Y. The Structure of Iron in Earth's Inner Core. *Science* 330, 359–361 (2010).

[Article](#) [ADS](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

- Nomura, R. et al. Low Core-Mantle Boundary Temperature Inferred from the Solidus of Pyrolite. *Science* 343, 522–525 (2014).

[Article](#) [ADS](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

- Okuchi, T. Hydrogen partitioning into molten iron at high pressure: implications for Earth's core. *Science* 278, 1781–1784 (1997).

[Article](#) [ADS](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

- Baranowski, B. Metal-Hydrogen Systems at High Hydrogen Pressures. *Hydrogen in Metals II*, eds, by Alefeld, G. & Völkl, J. 182, (Springer-Verlag, New York, 1978).
- Fukai, Y. *The Metal-Hydrogen System*. 213 (Springer-Verlag, Tokyo, 1993).

[Chapter](#) [Google Scholar](#)

- Albarède, F. Volatile accretion history of the terrestrial planets and dynamic implications. *Nature* 461, 1227–1233 (2009).

[Article](#) [ADS](#) [Google Scholar](#)

- Robert, F. The origin of water on Earth. *Science* 293, 1055–1058 (2001).

[Article](#) [Google Scholar](#)

- Bockelée-Morvan, D. et al. Deuterated water in comet C/1996 B2 (Hyakutake) and its implications for the origin of comets. *ICARUS*. 133, 147–162 (1998).

[Article](#) [ADS](#) [Google Scholar](#)

- Meier, R. et al. A determination of the HDO/H<sub>2</sub>O Ratio in comet C/1995 O1 (Hale-Bopp). *Science*. 279, 842–844 (1998).

[Article](#) [ADS](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

- Deloule, E. & Robert, F. Interstellar water in meteorites? *Geochim. Cosmochim. Acta*. 59, 4695–4706 (1995).

[Article](#) [ADS](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

- Gleeson, T. et al. The global volume and distribution of modern groundwater. Nat. Geosci. 16 November 2015, doi: 10.1038/ngeo2590 (2015).

[Article](#) [ADS](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

- Chaplin, M. Water properties: Water structure and science, 26/02 [http://www.1.lsbu.ac.uk/water/water\\_properties.html](http://www.1.lsbu.ac.uk/water/water_properties.html) (2016).
- Fukai, Y. The metal-hydrogen alloys: phase diagrams and super-abundant vacancy formation. J. Inst. Sci. & Eng. Chuo Univ. 8, 1–9 (2003).

[Google Scholar](#)

- Myers, S. M., Picraux, S. T. & Stoltz, R. E. Defect trapping of ion-implanted deuterium in Fe. J. Appl. Phys. 50, 5710–5719 (1979).

[Article](#) [ADS](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

- Brown, S. & Grüner, G. Charge and spin density waves. Sci. Am. 50–56 (1994).
- Allis, W. P. Nuclear Fusion, 1 (D. Van Nostrand Company, Princeton, 1960).
- Craig, H., Lupton, J. E., Welhan, J. A. & Poreda, R. Helium isotope ratios in Yellowstone and Lassen Park volcanic gasses. Geophys. Res. Lett. 5, 897–900 (1978).

[Article](#) [ADS](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

- Jones, S. E. et al. Observation of cold nuclear fusion in condensed matter. Nature. 338, 737–740 (1989).

[Article](#) [ADS](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

- Zel'dovich, Ya. B. & Novikov, I. D. Relativistic Astrophysics. Vol. 1, 161 (Chicago University Press, 1971).

[ADS](#) [Google Scholar](#)

- Dubrovinsky, L. S., Saxena, S. K. Tutti, F. & Rekh, S. *In situ* X-ray study of thermal expansion and phase transition of iron at multimegabar pressure. Phys. Rev. Lett. 84, 1720–1723 (2000).

[Article](#) [ADS](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

- Fukuhara, M. Neutral pion-catalyzed fusion in palladium lattice. Fus. Sci. Tech. 43, 128–133 (2003).

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

- Koonin, S. E. & Nauenberg, M. Calculated fusion rates in isotopic hydrogen molecules. Nature. 339, 690–691 (1989).

[Article](#) [ADS](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

- Kittel, C. Introduction to Solid State Physics, sixth ed. 62 (John Wiley & Sons, New York, 1986).

- Bush, R. T. & Eagleton, R. D. “Cold nuclear fusion”: A hypothetical model to probe on elusive phenomenon. J. Fus. Ener. 9, 397–408 (1990).

[Article](#) [ADS](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

- Measday, D. F. & Miller, G. A. Hopes and realities for the (p,  $\pi$ ) reaction. Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 29, 121–160 (1983).

[Article](#) [ADS](#) [Google Scholar](#)

- Feynman, R. P. The theory of fundamental processes, 37–41 (Benjamin/Cummings Publishing Company, London, 1961).

- Pollack, H. N. Hurter, S. J. & Johnson, J. R. Heat flow from the Earth's interior: analysis of the global data set. *Rev. Geophys.* 31, 267–280 (1993).

[Article](#) [ADS](#) [Google Scholar](#)

- Stixrude, L. & Cohen, R. E. High-Pressure elasticity of iron and anisotropy of Earth's inner core. *Science* 267, 1972–1075 (1995).

[Article](#) [ADS](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

- Lay, T. et al. Studies of the Earth's deep interior: Goals and trends. *Phys. Today*. Oct. 44–52 (1990).

[Article](#) [Google Scholar](#)

[Download references](#) ↓

## Acknowledgements

---

We would like to thank Prof. N. Fujima, Shizuoka University, for help of crystal model construction and Editage ([www.editage.jp](http://www.editage.jp)) for English language editing.

## Author information

---

### Authors and Affiliations

---

1. New Industry Creation Hatchery Centre, Tohoku University, Sendai, 980-8579, Japan

Mikio Fukuhara

2. Waseda University Research Organization for Nano & Life Innovation, Green Device Laboratory, Tokyo, Japan

Mikio Fukuhara

## Ethics declarations

---

## Competing interests

---

The author declares no competing financial interests.

## Electronic supplementary material

---

### Supplementary Information

---

## Rights and permissions

---

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons license, unless indicated otherwise in the credit line; if the material is not included under the Creative Commons license, users will need to obtain permission from the license holder to reproduce the material. To view a copy of this license, visit

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

## Reprints and Permissions

## About this article

---



Check for  
updates

## Cite this article

---

Fukuhara, M. Possible generation of heat from nuclear fusion in Earth's inner core. *Sci Rep* **6**, 37740 (2016).

<https://doi.org/10.1038/srep37740>

### Download citation ↓

- Received 18 February 2016
- Accepted 01 November 2016
- Published 23 November 2016

- [DOI \(identifikátor digitálních objektů\)https://doi.org/10.1038/srep37740](https://doi.org/10.1038/srep37740)

### **Sdílejte tento článek**

---

Každý, s kým sdělíte následující odkaz, bude moci číst tento obsah:

Poskytuje iniciativa Springer Nature SharedIt pro sdílení obsahu

### **Tento článek je citován**

---

#### **Ariel – okno ke vzniku života na rané Zemi?**

- Martin Ferus
- Vojtěch Adam
- Vladislav Černov

*Experimentální astronomie (2022)*

### **Komentáře**

---

Odesláním komentáře souhlasíte s tím, že se budete řídit našimi Podmínkami a Pokyny pro komunitu . Pokud najdete něco urážlivého nebo co není v souladu s našimi podmínkami nebo pokyny, označte to jako nevhodné.