

Jan Mlynář

Padesát let Lawsonových kritérií

*Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, Vol. 51 (2006), No. 3, 231--235

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/141319>

## Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2006

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

# Padesát let Lawsonových kritérií

Jan Mlynář

*Rok 2005 byl, alespoň z hlediska výzkumu termojaderné fúze, výjimečný. 28. června 2005 bylo rozhodnuto o umístění tokamaku ITER do lokality navržené Evropskou unií — do výzkumného střediska Cadarache na jihu Francie. Na projektu se vedle EU podílí Japonsko, Rusko, USA, Čína, Jižní Korea a od prosince 2005 též Indie<sup>1</sup>). Pozitivně zareagovala i Česká republika: Dlouhodobá snaha řady našich odborníků o modernizaci české vědecké základny dosáhla významného úspěchu 2. listopadu 2005, kdy vláda ČR rozhodla o finanční podpoře převodu tokamaku COMPASS-D z anglického Culhamu do Ústavu fyziky plazmatu AV ČR. Tato rozhodnutí mají přímý vliv i na rozšiřování studijních možností: V Evropské unií se v rámci programu Erasmus Mundus právě otevírá společný MSc. kurz „Nuclear Fusion Science and Engineering Physics“, na národní úrovni nové studijní zaměření „Fyzika a technika termojaderné fúze“ otevírá FJFI ČVUT. Zároveň na sklonku loňského roku uplynulo i symbolické půlstoletí od okamžiku, kdy světlo světa spatřila Lawsonova kritéria — vlastně nejprve spatřila tmou řádně uzamčených šuplíků, neboť příslušná zpráva byla původně vydána jako důvěrná.*

V prosinci 1955 sepsal mladý inženýr John D. Lawson z britského výzkumného střediska pro atomovou energii A. E. R. E. v Harwellu krátkou a poměrně jednoduchou zprávu „Některá kritéria pro užitečný termonukleární reaktor“ [1]. Uvedl v ní dvě podmínky nutné k dosažení termonukleární fúze s kladnou energetickou bilancí: minimální teplotu a minimální součin hustoty a času<sup>2</sup>). V původní zprávě lze najít i následující řádky:

„V pozemském reaktoru zvládnutelné velikosti (...) zřejmě nebude možné udržet neutrony, ale lze si představit, že se vhodnými elektrickými a magnetickými poli podaří udržet nabitě částice. (...) Minimální teplotu, při které může takový systém pracovat, lze najít položením rovnosti mezi ten díl energie reakce, který nesou nabitě částice, a ztráty zářením. Tato teplota je  $3 \times 10^8$  stupňů pro D-D reakci a  $5 \times 10^7$  stupňů pro T-D reakci.

Nyní definujeme důležitý parametr  $R$  jako poměr mezi energií uvolněnou v horkém plynu a energií dodanou. (...)  $R$  je funkcí  $T$  a  $nt$ . (...) Je vidět, že pro užitečný

---

<sup>1</sup>) Detailní smlouva byla inicializována všemi sedmi partnery dne 24. května 2006 v Bruselu.

<sup>2</sup>) Řada fyziků mluví o jediném „Lawsonově kritériu“ a míní tím druhé, stěžejní kritérium pro součin hustoty a času.

---

RNDr. JAN MLYNÁŘ, Ph.D. (1966), EFDA JET, Culham Science Centre, Abingdon, OX143DB Oxfordshire, Velká Británie / Ústav fyziky plazmatu AV ČR, Za Slovankou 3, 182 21 Praha 8; e-mail: [jan.mlynar@jet.efda.org](mailto:jan.mlynar@jet.efda.org)

reaktor musí  $T$  překročit  $10^8$  stupňů a  $nt$  musí překročit  $10^{16}$ . Tyto podmínky jsou velmi tvrdé. Podmínky pro T-D-Li<sup>6</sup> jsou příznivější, ale stále tvrdé. Odpovídající hodnoty teploty a  $nt$  jsou  $T = 3 \times 10^8$  stupňů,  $nt = 10^{14}$ . Závěrem zdůrazňujeme, že tyto podmínky, ač nutné, nejsou zdaleka postačující.“



Obr. 1. Tokamak Compass-D. (S laskavým svolením UKAEA.)

Během nedávného rozhovoru s Johnem D. Lawsonem (viz dále) se ukázalo, že hlavní motivací k odvození kritérií, která dnes nesou jeho jméno, byl pro něj pocit povinnosti inženýra „uzemnit“ naprosto nereálná očekávání jeho nadšených kolegů přírodovědeckého vzdělání. Pro dokreslení, fúzní odborníci dnes skutečně považují za překvapivé, že se „natolik základní myšlenka objevila tak pozdě“, a vysvětlují to zpravidla právě tím, že na principiálních otázkách pracovalo od počátku příliš málo inženýrů.

Ve své původní zprávě, kterou zde citujeme, uvažoval Lawson velmi krátké výboje s ideálním udržením plazmatu. Od té doby se výzkum termonukleární fúze s magnetickým udržením posunul ke stabilním výbojům, ve kterých je nutné uvažovat nedokonalé udržení plazmatu. Tam, kde Lawson zavádí  $t$  pro dobu trvání výboje, se proto dnes používá „doba udržení energie“  $\tau_E$ , která je dána poměrem celkové tepelné energie (rovnovážného) plazmatu k celkovému výkonu jeho energetických ztrát. Podobně Lawson zavádí pro energetický zisk faktor  $R$  jako poměr vstupní a výstupní energie, kdežto dnes je „fúzní zisk“  $Q$  definován jako poměr fúzního výkonu

k celkovému příkonu plazmatu zvnějšku. Pro velmi krátké výboje není energetická rovnováha plazmatu důležitá, proto Lawson vůbec nemluví o zapálení fúze (viz níže), místo toho určuje požadovanou hodnotu  $R$  pomocí odhadu celkové účinnosti cyklu. Konečně poznamenejme, že hustoty se v původní zprávě uvádějí v počtu částic na centimetr krychlový (nikoli na metr krychlový, jak je tomu zpravidla dnes). Konkrétní definice použitých veličin mají samozřejmě vliv na číselné hodnoty v Lawsonových kritériích, nic ale nemění na základním principu, který má stále svůj hluboký význam.



Obr. 2. N. S. Chruščov, I. V. Kurčatov a N. A. Bulganin v Harwellu 25. 4. 1956. Čelem k nim stojí tehdejší ředitel Harwellu J. D. Cockcroft, nositel Nobelovy ceny za fyziku 1951. (S laskavým svolením UKAEA.)

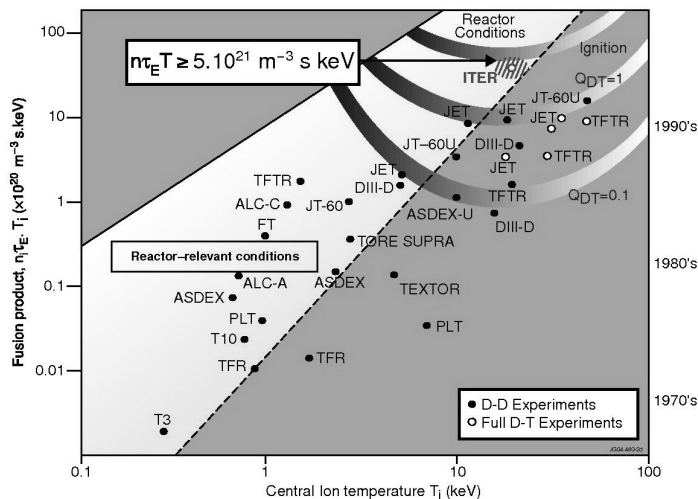
Lawsonova zpráva byla vydána v prosinci 1955 jako důvěrný dokument tehdy utajovaného britského výzkumu v době, kdy ještě nebylo zřejmé, že termonukleární fúze s magnetickým udržením nemá z hlediska vývoje zbraní význam. Prvním jasným signálem k postupnému odtajňování byla návštěva N. S. Chruščova, N. A. Bulganina a I. V. Kurčatova přímo v Harwellu v dubnu 1956, kde posledně jmenovaný přednesl vynikající a překvapivou přednášku „O možnosti dosažení termonukleárních reakcí ve výboji v plynu“ [2]. V říjnu 1956 pak na sympoziu Mezinárodní astronomické unie ve Stockholmu v přednášce L. A. Arcimoviče [3] okrajově zazněl i motiv velmi blízký druhému Lawsonovu kritériu:

„(. . .) Za určitých zjednodušujících předpokladů lze veličinu, popisující energetický výtěžek termonukleárního systému, vyjádřit jako

$$\tau n \cdot \bar{v} \sigma \cdot \frac{W}{kT},$$

kde  $\tau$  je střední doba života rychlých iontů v systému,  $n$  hustota iontů,  $\overline{\sigma}$  střední hodnota součinu tepelné rychlosti a účinného průřezu jaderné reakce a  $W$  energie, která se uvolní při jednotlivé reakci. Je třeba zdůraznit, že při dané teplotě je tepelný výtěžek systému dán součinem  $\tau n$ . Součin dalších faktorů je pouze funkcí teploty, která při určité hodnotě teploty dosahuje maxima — pro DD reakci při teplotě  $T \sim 5 \times 10^8$ . Při této »optimální« teplotě je tedy energetický výtěžek pro deuterium řádově  $\sim 10^{15} \tau n$ . Aby byl výtěžek dostatečně velký, je třeba dbát na co nejlepší udržení rychlých iontů v systému.“

Namátkou konzultování odborníci (včetně Lawsona samotného) nevěří, že by tato zmínka dokládala jakoukoli špionáž, neboť „vzorec bylo snadné nezávisle odvodit“. V Arcimovičově přednášce navíc není formulována kritická mez. Je zato použita definice doby udržení  $\tau$ , která je mnohem bližší dnešnímu  $\tau_E$  než prostá doba výboje. Zřejmě v reakci na sovětské iniciativy povoluje v listopadu 1956 Harwell publikovat jen mírně vylepšenou Lawsonovu zprávu [4] a nálepka na původním dokumentu [1] je památkou na odtajnění celého britského fúzního programu na počátku roku 1957. Konečně v září 1958 v Ženevě probíhá Druhá konference Spojených národů o mírovém využívání atomové energie ve znamení úplného odkrytí výzkumu termonukleární fúze pomocí magnetického udržení — včetně rozsáhlé tematické výstavy připravené USA.



Obr. 3. Historie tokamaků: dosažené hodnoty trojného součinu jako funkce dosažené teploty (1 keV je přibližně 10 milionů kelvinů). (S laskavým svolením EFDA JET.)

V dnešních prezentacích se spíše než s Lawsonovými kritérii setkáváme s tzv. „trojným součinem“ (někdy nazývaným také „fúzním součinem“)  $n\tau_E T$ . Ten sice platí pouze v úzkém rozsahu teplot, ve kterém je v dobrém přiblížení velikost kritického součinu  $n\tau_E$  nepřímo úměrná teplotě  $T$ , ale právě tato oblast je z hlediska budoucích reaktorů zajímavá. Pro nejsnadnější termonukleární reakci deuteria s tritiem (D-T) jde o teploty 100 až 200 milionů kelvinů a odpovídající kritický trojný součin vypočtený

pro ITER je

$$n\tau_E T > 5 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s} \cdot \text{K}.$$

V okamžiku jeho dosažení se tepelný příkon plazmatu od fúzních produktů vyrovnává s výkonem tepelných ztrát plazmatu, tj. dochází k zapálení termojaderné fúze (plazma přestává potřebovat příkon zvnějšku,  $Q \rightarrow \infty$ ). Pro úplnost, hodnota kritického součinu hustoty a doby udržení  $n\tau_E$  dosahuje minima přibližně při 300 milionech stupňů, kde je ovšem provoz reaktoru těžší vzhledem k tomu, že s rostoucí teplotou klesá doba udržení energie a roste tlak plazmatu. Podrobnější pojednání o problematice termojaderné fúze v tokamacích zveřejnily PMFA v roce 2004 (ročník 49, str. 129–150).

#### L i t e r a t u r a

Všechny čtyři historické reference jsou (alespoň z podstatné části) k dispozici v pdf formátu jako odkazy v článku o Lawsonově výročí, který jsem připravil pro webové stránky tokamaku JET: <http://www.jet.efda.org/pages/content/news/2005/yop/index.html>

- [1] LAWSON, J. D.: *Some Criteria for a Useful Thermonuclear Reactor*. A. E. R. E. Report GP/R 1807, Harwell, Berks, December 1955.
- [2] KURCHATOV, I. V.: *On the Possibility of Producing Thermonuclear Reactions in a Gas Discharge*. Moscow 1956.
- [3] ARTSIMOVICH, L. A.: *Untersuchungen über Impulsentladungen im Zusammenhang mit der Möglichkeit von Kontrollierbaren Thermonuklearen Reaktionen*. International Astronomical Union Symposium No. 6, Stockholm, August 1956, Electromagnetic Phenomena in Cosmical Physics, ed. by B. LEHNERT, Cambridge University Press 1958 (Paper 47, p. 451).
- [4] LAWSON, J. D.: *Some Criteria for a Power Producing Thermonuclear Reactor*. Proc. Phys. Soc. B, vol. 70 (p. 6), January 1957.

Z hlediska aktuálních informací doporučuji <http://www.iter.org>,  
<http://www.em-master-fusion.org/>, <http://fttf.fjfi.cvut.cz>

Byl jsem ve správný čas na správném místě

*John D. Lawson*

*Následující vzpomínky Johna D. Lawsona, které otiskujeme s laskavým svolením UKAEA Fusion, byly zaznamenány paní Jennifer Hay a paní Ninou Morgan na základě jejich dvou obsáhlých rozhovorů s J. D. Lawsonem v jeho bydlišti v Abingdonu, Oxfordshire, Velká Británie v říjnu a listopadu 2005.*

JOHN DAVID LAWSON (\* 4. dubna 1923, člen Královské společnosti od roku 1983) vystudoval inženýrství a ke zrodu výzkumu fúze se dostal jen díky řadě náhod.

---

Přeložil RNDr. JAN MLYNÁŘ, Ph.D. Některé důležité otázky do rozhovoru byly zaslány Ing. MILANEM ŘÍPOU, CSc., z ÚFP AV ČR, kterému překladatel tímto děkuje.