



Elfutó elektronok szimulációja tokamak diszrupciókban

Ph.D. tézisleírás

Olasz Soma

Témavezető: Dr. Pokol Gergő

Budapest

2024

Bevezető

Magfúzió során könnyű atommagok egyesítése révén termelünk nukleáris energiát. A jövőbeli fúziós berendezések többsége a hidrogén két izotópjának, a deutériumnak és a tríciumnak az egyesítését tervezi hasznosítani erre a célra [1]. Ahhoz, hogy ez a reakció lejátsszódjon, nagyjából 25 keV vagy 200 millió K hőmérsékletre van szükség, annak érdekében, hogy az ütközésben résztvevő részecskék a Coulomb taszítást leküzdve elég közel kerüljenek egymáshoz [2]. Ezen a hőmérsékleten az üzemanyag halmazállapota teljesen ionizált plazma lesz, melyben az elektronok leszakadnak az atommagokról. A forró fúziós plazmát mágneses terekkel tudjuk egyben tartani úgy, hogy a plazma és a berendezés fala közti érintkezést elkerüljük. Két fő berendezéstípus létezik, amelyek ezt a mágneses összetartást meg tudják valósítani: a tokamak és a sztellarátor. A jelen dolgozat a tokamakban előforduló jelenségekre fókuszál.

Plazmákban az ütközések dinamikája lehetővé teszi egy nagy energiájú részecskepopuláció kialakulását, melyet elfutó elektronoknak nevezünk [3]. Ennek oka a következő: a negatívan töltött elektronok és a pozitív töltésű atommagok közötti kölcsönhatás fő módja a Coulomb ütközés, mely nagy távolságokon át is érvényesül. Ez a Coulomb ütközés alapvetően különbözik a kinetikus gázelméletben tapasztalt ütközésektől. A nagy hatótávú kölcsönhatások eredménye sok kis szögű szórás sebességtérben, melynek együttes hatása egy véletlen bolyongás [4]. Ebben az esetben akkor beszélünk egy ütközésről, amikor a sebesség eltérülésének nagysága összehasonlítható a részecske kezdeti sebességével. A közegellenállás a plazmákban emiatt nem növekszik monoton módon az ütköző részecske energiájával, hanem egy termikus sebességnél található maximum után csökkenni kezd. A termikus sebességnél gyorsabban haladó részecskék ütközések miatti lassulása kisebb lesz, mint a lassabb részecskéké. Ezt fizikailag úgy lehet megmagyarázni, hogy a gyorsabb részecskék kevesebb időt töltenek a többi részecske Coulomb terében, emiatt a véletlen bolyongás kevesebb valószínűséggel jut el egy jelentős sebességváltozásig. Amennyiben egy megfelelően nagy gyorsító erő hat a plazmában található részecskékre, például egy indukált elektromos tér, a részecskepopuláció nagyenergiás része gyorsulva gyorsulhat relativisztikus energiáig, ahol a sugárzási lassulás megállítja a további gyorsulást [4].

A fúziós berendezésekre jelentett jelentős veszély miatt az elfutó elektronokat kiterjedten modellezték [5, 6]. Két fő modellezési megközelítés létezik: a kinetikus modellezés és az úgynevezett folyadék megközelítés. A kinetikus modellezés során az ütközéseket a Fokker-Planck egyenlet megoldásával számoljuk [4], ami a részecskepopuláció eloszlásának evolúcióját írja le külső elektromos ($\mathbf{E}$) és mágneses ($\mathbf{B}$) terek és egyéb részecskékkal történő ütközések hatására. Utóbbi leírását egy úgynevezett ütközési operátorba sűrítjük ($C_a(f_a)$), melyet az alábbi egyenlet jobb oldalán találunk:

$$\frac{\partial f_a}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla f_a + \frac{q_a}{m_a} (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \frac{\partial f_a}{\partial \mathbf{v}} = C_a(f_a), \quad (1)$$

ahol f_a az eloszlásfüggvény, q_a és m_a a töltése és tömege az a részecskepopulációnak. A kinetikus modellezés pontosabb, de nagyobb számításigényű, mint a folyadék megközelítés, ahol az eloszlásfüggvényt nem számoljuk, csak úgynevezett folyadék mennyiségeket – innen a folyadék elnevezés –, mint sűrűség és áramsűrűség. Erre a plazma egyéb mennyiségeit, mint hőmérséklet

és részecskesűrűség, és kvázi stacioner analitikus elfutó elektron keletkezési kifejezéseket használunk [7, 8]. A folyadék modellezés gyorsabb és kevésbé számításgényes a kinetikus modellezésnél, de kevésbé pontos eredményeket adhat bizonyos körülmények között.

Célkitűzés

Elfutó elektronok komoly veszélyt jelentenek a tokamak típusú berendezésekre, amelyekben plazmaáramot hajtunk a szükséges mágneses tér kialakítására. Diszrupciók során, amikor a plazmaenergia ms időskálán elveszik, és a plazmaáram csökken, nagy elektromos tér indukálódik. Ez a tér képes nagy mennyiségű elfutó elektront létrehozni, amely képes kárt okozni a berendezés plazma oldali falában, vagy akár a hűtőrendszerekben a fal mögött [9]. Emiatt az elfutó elektronok modellezése és előrejelzése kritikus fontosságú.

Az integrált modellezés fő célja a tokamak kisülések teljes körű modellezése különböző fizikai modellek összekapcsolása révén egy közös keretrendszerben. A különböző kódok egy munkafolyamatba vannak integrálva, amely lehetővé teszi a modellek közötti kommunikációt egy standardizált adatbázis segítségével. Az integrált modellezési megközelítés két különböző verzióját használtam a munkám során. Az első az European Integrated Modeling Framework (EU-IM) amelyben úgynevezett Consistent Physical Object-ek (CPO) [10] tartalmazzák a fizikai adatokat a szimulációkhoz, míg a frissebb ITER Modeling and Analysis Suite (IMAS) [11], melyben Interface Data Structure-ök (IDS) hordozzák az adatokat. Az egyes fizikai folyamatokat, mint például plazmafűtés, áramhajtás, vagy elfutó elektron modellezés, több különböző modellel tudjuk szimulálni a munkafolyamaton belül. A fő előnye ennek a megközelítésnek a nagyfokú modularitás, mely lehetővé teszi a különböző folyamatok más kódokkal történő szimulálását egy rendszeren belül. A fizikai konzisztencia azonban nem garantált, tehát a modellek kiválasztását és beállítását körültekintően kell végezni.

A doktorim egyik fő célja az integrált modellezés elfutó elektron szimulálásának fejlesztése, többek között az Európai Transzport Szimulátorban (European Transport Simulator (ETS)) [12], ahol egyedül folyadék modellezési kód volt implementálva, kizárólag a CPO keretrendszerbe. Ezek után az ETS munkafolyamatot használtam tokamak diszrupció szimulálására és kísérleti eredményekhez való összehasonlításra.

Egy másik fontos alkalmazása az elfutó elektron modellezésnek az elfutó elektronok sugárzásának megjósolása és felhasználása. A fő sugárzás, amely elfutó elektronokból származik az úgynevezett szinkrotron sugárzás, amely relativisztikus részecskék sebességvektorára merőleges gyorsulás során keletkezik. A szinkrotron sugárzást fel lehet használni elfutó elektronok detektálására és potenciálisan információszerezésre az elektron energia eloszlásfüggvényről [13]. Bizonyos modelleket fel lehet használni a kamerák elfutó elektron detektálásának javítására, azáltal hogy megjósoljuk a várható sugárzási képet tokamak diszrupciók során.

Módszertani háttér

A PhD munkám során az integrált modellezés elfutó elektron modellezésének fejlesztésével foglalkoztam, annak érdekében, hogy tokamak diszrupciók során keletkező elfutó elektronokat vizsgálhassam, és kísérleti eredményekkel összevethessem. Ezen felül egy sugárzási modellt is

használtam annak érdekében, hogy megvizsgáljam a várható elfutó elektron sugárzási képet a JT-60SA tokamakon. Erre a következő modelleket használtam:

- **Runaway Fluid** egy elfutó elektron modell az ETS CPO verziójában, amit a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Nukleáris Technikai Intézetében fejlesztettek. Egy folyadék modell, amely az elfutó elektron sűrűséget és áramsűrűséget számolja analitikus keletkezési képletekből és a plazma más kódok által számolt evolúciójából.
- **NORSE** (NOn-linear Relativistic Solver for Electrons) [14] egy kinetikus modell a svéd Chalmers University of Technology-ról, amely az elektron ütközések leírására nemlineáris megközelítést használ. Emiatt egyedülálló módon alkalmas az úgynevezett elcsúszási események modellezésére, amikor a teljes elektron populáció eltorzul egy nagy elektromos tér hatására.
- **ETS** (European Transport Simulator) [12] egy integrált modellezési munkafolyamat, melynek célja teljes körű tokamak kisülések modellezése. Több különböző modellel rendelkezik a különböző fizikai folyamatok, mint például elektron és ion fűtés, részecske transzport, áramhajtás, plazma szennyezők számolása és elfutó elektron modellezés számolására. Utóbbiért a Runaway Fluid felelős.
- **DREAM** (Disruption and Runaway Electron Analysis Model) [15] egy modell a Chalmers University of Technology fejlesztésében, amelyet diszrupciók szimulálására és elemzésre írtak. Képes a háttérplazma önkonzisztens számolására és ennek segítségével az elfutó elektron populáció modellezésére. DREAM egy sokoldalú modell, mely képes felbontani a lendület teret, amelyben az elektron eloszlást számolja, és a különböző tartományokat kinetikusan vagy folyadék megközelítéssel modellezni, mindezt egyszerű analitikus vagy realisztikus mágneses geometriában.
- **SOFT** (Synchrotron-detecting Orbit Following Toolkit) [16] egy újabb modell a Chalmers University of Technology-ról, amelyet a várható szinkrotron sugárzás számolására fejlesztettek. Ehhez szüksége van egy elektron eloszlás függvényre és egy adott diagnosztika paramétereire. Az DREAM által számolt eloszlást képes inherens módon használni.

A fenti modellek, az ETS kivételével, mind nyilvánosan elérhető tárolókban vannak verziókövetve. A munkám során ezeket a verziókövető programokat használtam, hogy a kódok integrált modellezési keretrendszerbe történő integrálását megvalósítsam. A Runaway Fluid esetében egy automatizált tesztelést implementáltam, amely az új fejlesztéseket automatikusan letesztelte a kód github tárolójában. Továbbá a különböző kódokat verifikáltam egy dedikált munkafolyamat segítségével, ahol a különböző modelleket össze tudtam hasonlítani. Az ETS munkafolyamatot egy másik integrált modellezési eszközhöz, az ASTRA-STRAHL modellhez és kísérleti adatokhoz validáltam.

Új tudományos eredmények

Az elfutó elektron modellezés során elért új tudományos eredményeimet a következő tézispontokban ismertetem:

- T 1.** Létrehoztam egy munkafolyamatot az Európai Integrált Modellezési keretrendszerben (EU-IM), hogy az elektromos tér ugrása miatti hatásokat vizsgáljam az elfutó elektronok Dreicer keletkezésében. A munkafolyamatba egy nemlineáris kinetikus megoldót (NORSE) és egy analitikus, kvázi stacioner modellt (Runaway Fluid) integráltam. Az integrált modellezési eredményeket egy lineáris kinetikus megoldó (DREAM) és egy pálya átlagolt kinetikus megoldó (LUKE) eredményeivel egészítettem ki [P4]. Numerikusan meghatároztam azt a időskálát, mely során az analitikus megoldók nem használhatók és szükséges a kinetikus megoldók alkalmazása. Ezt az időskálát az elektronok kritikus sebességével vett ütközési idejeként azonosítottam [P2].
- T 2.** Integrált modellezési keretrendszerben az elfutó elektronok kinetikus modellezését fejlesztettem. A NORSE nemlineáris kinetikus kódot integráltam az EU-IM modellezési keretrendszerbe [P1] egy benchmark munkafolyamat segítségével és eredményes szimulációkat futtattam. [P2, P4]. A DREAM kinetikus kódot az ITER modellezési keretrendszerébe (IMAS) integráltam, és a TCV berendezésből származó kísérleti adatokkal futásokat végeztem. A DREAM modell közvetlenül kísérleti adatokkal történő futtatását lehetővé tettem.
- T 3.** Az Európai Transzport Szimulátor (ETS) munkafolyamat elfutó elektron modellezését felhasználva masszív anyagbefecskendezéses (MMI) önkonzisztens diszrupció szimulációkat végeztem. Az ETS munkafolyamatban összeállítottam egy fizikai modellt, mellyel a diszrupció kísérletek több eredményét reprodukáltam. Az ETS Európai Integrált Modellezési keretrendszerben (EU-IM) fejlesztett verziójával fizikailag releváns eredményeket kaptam [P4]. További szimulációkat végeztem az ETS új, ITER modellezési keretrendszerében (IMAS) fejlesztett verziójával, melynek eredményeit egy másik integrált modellezési eszközhöz (ASTRA-STRAHL) és kísérleti eredményekhez részben sikerrel validáltam [P5].
- T 4.** A DREAM elfutó elektron modellező eszközzel egy potenciális diszrupciót szimuláltam a JT60-SA tokamakra, és a keletkezett elfutó elektronok sugárzását a SOFT szinkrotron sugárzást számoló kóddal modelleztem. Az eredményeket a JT60-SA diagnosztikájának, az EDICAM látható fény kamerának paramétereivel számoltam, hogy becslést tudjak adni a kamera által látott sugárzási képre egy diszrupció során [P3, P6]. Azt találtam, hogy az EDICAM kamerarendszer alkalmas elfutó elektronok detektálására egy esetleges diszrupció során. Később valóban megtalálták a kameraképeken az elfutó elektronok szinkrotron sugárzásának jeleit [P7].

Irodalomjegyzék

- [1]. G. H. Miley, H. Towner, and N. Ivich, „Fusion cross sections and reactivities” Technical Report **COO-2218-17**, Illinois University, Urbana-Champaign (USA), (1974), DOI: <https://doi.org/10.2172/4014032>
- [2]. J.D. Lawson, „Some Criteria for a Power Producing Thermonuclear Reactor” Proceedings of the Physical Society. Section B **70** (1), p. 6-10 (1957), DOI: <https://doi.org/10.1088%2F0370-1301%2F70%2F1%2F303>
- [3]. H. Dreicer, „Electron and Ion Runaway in a Fully Ionized Gas. I,” Physical Review, vol. **115**, p. 238-249, (1959), DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.115.238>
- [4]. P. Helander and D. J. Sigmar, „Collisional Transport in Magnetized Plasmas” Cambridge University Press, (2002)
- [5]. A.H. Boozer „Runaway electrons and ITER” Nuclear Fusion vol **57**, p. 056018 (2017), DOI: <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa6355>
- [6]. M. Lehnen, K. Aleynikova, P.B. Aleynikov, D.J. Campbell, P. Drewelow, N.W. Eidietis, Yu. Gasparyan, R.S. Granetz, Y. Gribov, N. Hartmann, E.M. Hollmann, V.A. Izzo, S. Jachmich, S.-H. Kim, M. Kočan, H.R. Koslowski, D. Kovalenko, U. Kruezi, A. Loarte, S. Maruyama, P.C. de Vries, „Disruptions in ITER and strategies for their control and mitigation” Journal of Nuclear Materials, vol **463**, p. 39–48 (2015), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2014.10.075>
- [7]. J.W. Connor and R. J. Hastie „Relativistic limitations on runaway electrons” Nuclear Fusion, vol **15**, p. 415–24 (1975), DOI: <https://doi.org/10.1088/0029-5515/15/3/007>
- [8]. H. Dreicer „Electron and ion runaway in a fully ionized gas II”, Physical Review, vol **117**, p. 329–42 (1960), DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.117.329>
- [9]. H.W. Bartels, „Impact of runaway electrons” Fusion Engineering and Design, vol **23**, 4, p. 323-328, (1994), DOI: [https://doi.org/10.1016/0920-3796\(94\)90016-7](https://doi.org/10.1016/0920-3796(94)90016-7)
- [10]. F. Imbeaux, J. Lister, G. Huijsmans, W. Zwingmann, M. Airaj, L. Appel, V. Basiuk, D. Coster, L.-G. Eriksson, B. Guillerminet, D. Kalupin, C. Tsironis, G. Manduchi, M. Ottaviani, G. Pereverzev, Y. Peysson, O. Sauter, J. Signoret, P. Strand, „A generic data structure for integrated modelling of tokamak physics and subsystems” Computer Physics Communications, vol. **181**, p. 987-998, (2010), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2010.02.001>
- [11]. F. Imbeaux, S. Pinches, J. Lister, Y. Buravand, T. Casper, B. Duval, B. Guillerminet, M. Hosokawa, W. Houlberg, P. Huynh, S. Kim, G. Manduchi, M. Owsiak, B. Palak, M. Plociennik, G. Rouault, O. Sauter, P. Strand, „Design and first applications of the ITER integrated modelling and analysis suite” Nuclear Fusion, vol. **55**, p. 123006, (2015), DOI: <https://doi.org/10.1088/0029-5515/55/12/123006>
- [12]. D. Kalupin, I. Ivanova-Stanik, I. Voitsekhovitch, J. Ferreira, D. Coster, L. Alves, T. Aniel, J. Artaud, V. Basiuk, J. P. Bizarro, R. Coelho, A. Czarnecka, P. Huynh, A. Figueiredo, J. Garcia, L. Garzotti, F. Imbeaux, F. Köchl, M. Nave, G. Pereverzev, O. Sauter, B. Scott, R. Stankiewicz, P. Strand, ITM-TF contributors, and JET-EFDA Contributors, „Numerical analysis of JET discharges with the European Transport

- Simulator” *Nuclear Fusion*, vol. **53**, p. 123007, (2013), DOI: <https://doi.org/10.1088/0029-5515/53/12/123007>
- [13]. T. Wijkamp, A. Perek, J. Decker, B. Duval, M. Hoppe, G. Papp, U. Sheikh, I. Classen, R. Jaspers, the TCV Team, the EUROfusion, MST1 Team, „Tomographic reconstruction of the runaway distribution function in TCV using multispectral synchrotron images” *Nuclear Fusion*, vol. **61**, p. 046044, (2021), DOI: <https://doi.org/10.1088/1741-4326/abe8af>
- [14]. A. Stahl, M. Landreman, O. Embréus, and T. Fülöp, „NORSE: A solver for the relativistic non-linear Fokker-Planck equation for electrons in a homogeneous plasma” *Computer Physics Communications*, vol. **212**, p. 269-279, (2016), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2016.10.024>
- [15]. M. Hoppe, O. Embréus, and T. Fülöp, „DREAM: A fluid-kinetic framework for tokamak disruption runaway electron simulations,” *Computer Physics Communications*, vol. **268**, p. 108098, (2021), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2021.108098>
- [16]. M. Hoppe, O. Embréus, R. Tinguely, R. Granetz, A. Stahl, and T. Fülöp, „SOFT: a synthetic synchrotron diagnostic for runaway electrons” *Nuclear Fusion*, vol. **58**, p. 026032, (2018), DOI: <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa9abb>

Tézispontokat alátámasztó folyóirat publikációk:

- [P1]. G. I. Pokol, **S. Olasz**, B. Erdos, G. Papp, M. Aradi, M. Hoppe, T. Johnson, J. Ferreira, D. Coster, Y. Peysson, J. Decker, P. Strand, D. Yadikin, D. Kalupin and the EUROfusion-IM Team, „Runaway electron modelling in the self-consistent core European Transport Simulator, ETS” *Nuclear Fusion*, Vol **59**, p 076024, (2019) [K2, Q1] DOI: <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab13da>
- [P2]. **S. Olasz**, O. Embreus, M. Hoppe, M. Aradi, D. Por, T. Jonsson, D. Yadikin, G.I. Pokol, EU-IM Team, „Validity of models for Dreicer generation of runaway electrons in dynamic scenarios” *Nuclear Fusion*, Vol **61**, p 066010, (2021). [K2, Q1] DOI: <https://doi.org/10.1088/1741-4326/abf0de>
- [P3]. **S. Olasz**, M. Hoppe, T. Szepesi, K. Kamiya, P. Balazs, G. Pokol, „Feasibility of the EDICAM camera for runaway electron detection in JT-60SA disruptions” *Fusion Engineering and Design*, Vol **195**, p 113940, (2023) [K2, Q2] DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2023.113940>

Tézispontokat alátámasztó konferencia kiadványok:

- [P4]. **S. Olasz**, M. Aradi, M. Hoppe, O. Embreus, G. Papp, T. Jonsson, J. Ferreira, D. Coster, P. Strand, D. Yadikin, I. Ivanova-Stanik, M. Poradzinski, G. Pautasso, I. Voitsekhovitch, J. Decker, Y. Peysson, G.I. Pokol, EU-IM Team, EUROfusion-MST1 Team, ASDEX Upgrade Team „Runaway electron modelling in the EU-IM framework”, in 47th EPS Conference on Plasma Physics, European Physical Society (EPS), *ECA* Vol. **45A**, P5.1067, 1 2021. Link: <https://info.fusion.ciemat.es/OCS/EPS2021PAP/pdf/P5.1067.pdf>
- [P5]. **S. Olasz**, T. Jonsson, P. Strand, D. Yadikin, D. Coster, I. Ivanova-Stanik, M. Poradzinski, G. I. Pokol „Massive Material Injection induced disruptions simulated with the European

Transport Simulator” oral presentation in 9th Runaway Electron Modelling (REM) meeting, Garching, Germany 2022

- [P6]. **S. Olasz**, M. Hoppe, T. Szepesi, K. Kamiya, G.I. Pokol, “Feasibility of the EDICAM camera for runaway electron detection in JT-60SA disruptions” poster presentation, in 32nd Symposium on Fusion Technology, Dubrovnik, Croatia 2022
- [P7]. **S. Olasz**, M. Hoppe, T. Szepesi, K. Kamiya, P. Balazs, G. Keszthelyi, G. I. Pokol, „Detection of runaway electron radiation at JT-60SA” oral presentation in Joint Runaway Electron Modelling (REM) and JET SPI Analysis meeting, Lausanne, Switzerland 2024

További publikációk:

- [P8]. **S. Olasz**, G. I. Pokol, M. Aradi, M. Hoppe, EU-IM team, „Runaway electron modeling in the EU-IM framework” oral presentation in 8th Runaway Electron Modelling (REM) meeting, Gothenburg, Sweden 2020
- [P9]. **S. Olasz**, M. Aradi, M. Hoppe, G. Papp, T. Jonsson, J. Ferreira, D. Coster, P. Strand, D. Yadikin, I. Ivanova-Stanik, M. Poradziński, G. Pautasso, I. Voitsekhovitch, G.I. Pokol, EU-IM Team, EUROfusion-MST1 Team, ASDEX Upgrade Team, „Runaway electron modeling in the EU-IM framework” oral presentation in 15th Kudowa Summer School, Virtual Edition 2020
- [P10]. **S. Olasz**, M. Aradi, G. Papp, M. Hoppe, G. I. Pokol, EU-IM team, „Runaway electron modeling in the EU-IM framework” oral presentation in FuseNet PhD Event, Virtual Edition 2020.
- [P11]. E. Nardon, F.J. Artola, V. Bandaru, H. Bergström, J. Decker, I. Ekmark, T. Fülöp, P. Haldestam, M. Hoelzl, M. Hoppe, D. Hu, A. Järvinen, M. Lehnen, **S. Olasz**, G. Papp, Y. Peysson, G.I. Pokol, I. Pusztai, C. Reux, K. Särkimäki, R. Saura, C. Sommariva, O. Vallhagen, C. Wang „Modelling of Runaway Electron Dynamics in Tokamak Disruptions” at 29th IAEA Fusion Energy Conference, London, United Kingdom 2023
- [P12]. **S. Olasz**, M. Hoppe, T. Szepesi, K. Kamiya, G. I. Pokol, „Feasibility of the JT-60SA EDICAM system for runaway electron detection” oral presentation in 10th Runaway Electron Modelling (REM) meeting, Garching, Germany 2023
- [P13]. B.P. Duval, A. Abdolmaleki, M. Agostini, ..., **S. Olasz**, et al. „Experimental research on the TCV tokamak”, *Nuclear Fusion*, Vol **64**, p 112023, (2024), DOI: <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ad8361>