

Gyengén csatolt laboratóriumi plazmák diagnosztikája spektroszkópai módszerekkel

MTA Doktori Értekezés Tézisei

Veres Gábor



MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont

Plazmafizikai Osztály

Budapest, 2016

Tartalomjegyzék

1. A kutatások előzményei, motiváció.....	2
2. Célkitűzések	3
3. Kutatási módszerek	5
4. Új tudományos eredmények	6
5. A tézispontokhoz kapcsolódó közlemények	7

1. A kutatások előzményei, motiváció

Kutatásaim motivációjának gyökerei az 1990-es évekre nyúlnak vissza, amikor a KFKI RMKI Plazmafizikai Osztályán volt egy igen aktív kutatócsoport, amely atomfizika, lézerek, spektroszkópia, plazmadiagnosztika területeken dolgozott és bár én az akkor még meglévő MT-1M tokamak köré szerveződött, fúziós plazmafizikával foglalkozó csoporthoz csatlakoztam, a motiváció egy jelentős részét ettől a másik, spektroszkópiával foglalkozó csoporttól kaptam és az általam használt módszerek nagy részét is tőlük sajátítottam el.

A plazma, mint közeg nagyon sokrétű. Nem csak kollektív Coulomb-rendszer sajátos, a fizikusok számára érdekes tulajdonságokkal, hanem eszköz is (munkaközeg) más fizikai rendszerek speciális állapotainak eléréséhez. Csak két kiragadott példát említenék meg a teljesség igénye nélkül azokról a területekről, ahol a kutatásaim során tevékenykedtem:

- atomok vagy ionok egyes, különleges gerjesztett állapotai sokszor csak plazmában tanulmányozhatóak az ott elérhető hőmérséklet és sűrűség viszonyoknak köszönhetően;
- és a szabályozott magfúziós kutatások közege is plazma, mert ebben a közegben lehet csak energetikailag kedvező mérleget elérni.

A plazmák diagnosztizálásának, azaz legfontosabb fizikai paramétereinek megmérésének sokféle módszere létezik, melyek többféleképpen is csoportosíthatóak. Egy lehetséges csoportosítás az aktív és a passzív diagnosztikákra való osztás. Az aktív diagnosztikák valamilyen módon beavatkoznak (még ha elhanyagolhatóan is) a mérés során a plazma állapotába, a passzív diagnosztikák ezt nem teszik. Mivel a különböző módszerek közül a legkönnyebben megvalósíthatóak, ezért a legelterjedtebb passzív plazmadiagnosztikai módszerek a plazma által kibocsátott fény detektálásán és analizálásán alapulnak, azaz optikai módszerek. Tovább bontva a módszereket – most már az optikai eljárásokra szűkítve a kört – megkülönböztethetünk spektrálisan felbontott és spektrálisan integrált technikákat. Az első esetben valamilyen diszperzív eszközzel a plazma fényét spektrális összetevőire bontjuk, a másodikban kisebb-nagyobb spektrális tartományon integrált mérést végzünk.

A plazmák fénye sok mindent elárul kibocsátójukról. Megismerhető belőle például a plazma kémiai összetétele, sűrűsége, hőmérséklete, a benne fellépő elektromos és mágneses terek erőssége stb. A mérések interpretációja, a mért mennyiségek kapcsolata a releváns fizikai paraméterekkel azonban nem mindig egyértelmű, illetve egyszerű. Legtöbbször a kiértékelés modellfeltevéseken, közelítéseken alapul, és a feltevések helyességét *a posteriori* lehet csak ellenőrizni, az eredmények koherenciáját, konzisztens voltát vizsgálva.

Kutatásaim magját és keretét egy általánosan, sokoldalúan használható, úgynevezett ütközéses-sugárzásos plazmamodell kidolgozása képezi, amely lehetőséget ad sokféle plazma típus által kibocsátott sugárzás teljesítményének és spektrumának meghatározására, illetve a sugárzással kapcsolatos validáló, vagy kiegészítő számítások elvégzésére.

Ezen ütközéses-sugárzásos plazmamodell és a csatolt, plazmasugárzással kapcsolatos ismeretek és mérési eljárások birtokában egymástól viszonylag távont eső területeken végeztem kutatásokat falstabilizált ívkisüléstől a szilárd test lézerplazmán keresztül a termonukleáris plazmákig.

2. Célkitűzések

Mivel egy diagnosztikai módszer, a plazmák optikai megfigyelése állt és áll jelenleg is kutatásaim középpontjában, többféle konkrét tudományos célkitűzést is megfogalmaztam eddigi munkáim során a néhány elektronvolt karakterisztikus energiájú plazmák látható spektrumának analizálásától egészen a több keV-es forró plazmák VUV – lágy röntgen spektrumának vizsgálatáig. Ami a koherenciát a viszonylag szerteágazó kutatásaimban képviseli, az maga a módszer, és az általa megkívánt speciális tudás, ideértve az elméleti plazmafizika és a plazmamodellek alkalmazásának–alkalmaz-hatóságának „titkait” csakúgy, mint a különféle spektrométerek, lézerek és foton detektorok világának ismeretét.

Jelen Tézisekben négy fő területen elért eredményeimet mutatom be részletesen:

- 1) teljesen vagy részben ionizált, közepesen nagy elektronsűrűséggel rendelkező ($\sim 10^{18}$ - 10^{22} m⁻³ plazmák, illetve a bennük jelenlévő szennyezők által kibocsátott fény spektrumának modellezése, valamint a teljes kisugárzott teljesítmény meghatározása mind optikailag ritka, mind optikailag sűrű közegekben;
- 2) atomfizikai állandók, elsősorban gerjesztési energiák és átmeneti valószínűségek meghatározása termonukleáris plazmában, illetve alacsony hőmérsékletű atmoszférikus ívplazma kisülésekben;
- 3) különböző hullámhosszúságú és impulzusidejű ultrarövid lézerimpulzusok és szilárd testek kölcsönhatási dinamikájának vizsgálata;
- 4) tokamak szél és divertor plazma nagy időbeli és térbeli felbontású megfigyelése, és az ott fellépő ELM (= *Edge Localised Mode*, Plazmaszéli módus) instabilitás időbeli lefolyásának tanulmányozása kétféle mágneses konfigurációban: egyszeres X-ponttal rendelkezőben és úgynevezett „hópihe” (*snowflake*), azaz másodrendű nullponttal rendelkezőben;

1. Terület: A plazmában óhatatlanul jelenlévő, illetve oda diagnosztikai, vagy direkt manipulációs céllal bejuttatott szennyezők nagymértékben módosít(hat)ják a plazma sugárzási teljesítményét. Egyes esetekben a kívülről bejuttatott szennyezőkkel az a cél, hogy ne módosítsák a plazma összes sugárzását és diagnosztikai eszközként lehessen használni a szennyezőket; máskor éppen az, hogy a sugárzás szintjét olyan magasra emeljük, hogy azzal a plazmát kioltjuk. Mindkét esetben a pontos predikcióhoz és a mérések értelmezéséhez szükséges a szennyezők által kibocsátott fény spektrumának megfelelő pontosságú ismerete, amiből aztán a plazma teljes kisugárzott teljesítménye (persze újabb feltevések árán) számolható.

Kutatói pályafutásom kezdetekor a plazmák illetve plazmaszennyezők sugárzási teljesítményeinek meghatározására a korona vagy az LTE (= lokális termodinamikai egyensúly, angolul *Local Thermodynamical Equilibrium*) modellek használata volt a legelterjedtebb, azonban az általam tanulmányozott, tanulmányozandó plazmák esetében a korona modell használhatósága megkérdőjelezhető volt, lokális termodinamikai egyensúly viszont több esetben egyértelműen nem állt fenn.

Céлом volt olyan általánosan használható plazmamodell megalkotása, ahol mind a plazmakomponensek ionizáció foka, mind a (szennyező) atomok és ionok gerjesztett állapotainak betöltöttsége önkonzisztens módon, az elektronsűrűség és az elektronthőmérséklet széles

tartományában számolható, valamint a betöltöttségek birtokában a kibocsátott sugárzás teljes spektruma is származtatható az optikai mélységre történő előzetes feltevés nélkül.

2. Terület. A wolfram, elsősorban magas olvadáspontja miatt, a termonukleáris plazmák összetartására szolgáló berendezések szerkezeti elemeinek egyik fontos összetevője. Például a németországi ASDEX Upgrade tokamak minden, a plazmával érintkező szerkezeti eleme wolframból van, és az ITER kísérletben is a divertor kizárólagos alkotója a wolfram lesz. Egy deutérium-trícium plazmában azonban, amint amilyen a fúziós kísérletek munkaközege, a wolfram plazmaszennyező elem, és koncentrációját a plazmában monitorozni, illetve kontrollálni kell. A túl magas wolframkoncentráció ugyanis olyan mértékben megnöveli a plazma teljes kisugárzott teljesítményét, hogy a pozitív mérleg a betáplált és a veszteségi teljesítmény között lehetetlenné válik.

A wolfram spektrális tulajdonságainak ismerete tehát elsőrendű fontosságú, különösen abban a 100-200 eV-os tartományban, amibe az ITER szél plazmájának elektronhőmérséklete esik majd. A KFKI RMKI MT-1M tokamakja központi plazmarégiója a maga 200 eV-os elektronhőmérsékletével ideális közeg volt a hétszeresen ionizált wolfram spektrumának tanulmányozásához.

Egy falstabilizált ívkisülésben pedig alacsony rendszámú elemek átmeneti valószínűségeit határoztam meg.

Az alacsony rendszámú elemek, elsősorban a szén, a nitrogén és az oxigén látható tartománybeli spektrumvonalaihoz tartozó átmeneti valószínűségek ismerete egyaránt fontos mind a laboratóriumi, mind a kozmikus plazmák különböző jellemzőinek meghatározásánál. A spektrumvonalak (relatív vagy abszolút) intenzitásainak megfigyelése többek között az átmeneti valószínűségek birtokában teszi lehetővé bizonyos lokális plazmaparaméterek (pl. elektronsűrűség, elektronhőmérséklet, stb.) meghatározását. Mivel egy kozmikus objektum esetében helyi, pl. szondás mérésre (még) nincs lehetőség, ezért jelenleg a spektroszkópiai eljárások a kizárólagosan alkalmazható módszerek az asztrofizikában.

Céлом volt a szén, nitrogén és oxigén atomjai, illetve egyszeresen ionizált ionjai esetében átmeneti valószínűségek kísérleti meghatározása. Céлом volt még, túl a kísérletileg meghatározott átmeneti valószínűségek adatbázis fejlesztő értékén, annak vizsgálata, hogy mennyire pontosak és megbízhatóak az Opacitás Projekt L-S csatolásban kiszámolt értékei, illetve mennyiben adnak jobb eredményeket közbenső (az L-S és a J-J csatolási sorrendek közé eső) csatolással kiszámolt átmeneti valószínűségek.

3. Terület. A térben és időben koherens, látható-tartományú fénysugárzás, a lézer felfedezése forradalmasította a fizikai kutatásokat. Az új sugárzási források felhasználásával a jelátvitel vagy az anyagvizsgálat/anyagmegmunkálás (csak két példát kiragadva) addig soha nem látott fejlődést éltek meg. Az egyre rövidebb hullámhosszak elérése egyre apróbb mintázatok leképezését illetve felismerését is lehetővé teszik. VUV - lágy-röntgen tartományú fényel például már a sejtek belső szerkezete is tanulmányozható az elektronmikroszkópok okozta roncsolások nélkül.

Az asztali, femtoszekundumos lézerek megjelenése új impulzust adott az ez irányú kutatásoknak. Ezek a lézerek igen nagy intenzitásokra, akár 10^{20} - 10^{24} W/m²-re is lefokuszálhatóak. Ilyen nagy intenzitásoknál az anyaggal való kölcsönhatás már nemlineáris, és a keltett fény spektrumában megjelennek a keltő lézerefény (rövidebb hullámhosszú) felharmonikusai.

Ha a felharmonikusok koherens módon keletkeznek, akkor szuperpozíciójuk a keltő lézerefény impulzushosszával rövidebb impulzusokat is eredményezhet. Ha az eredő impulzushossz az attoszekundumos tartományba esik, lehetőség nyílik igen rövid idejű folyamatok, pl. az atomi kötések kialakulásának vizsgálatára is.

Céлом volt femtoszekundumos KrF és Ti:Sa lézerimpulzusok és szilárd felületek kölcsönhatásának vizsgálata, és a keletkezett felharmonikusok spektrális analízise.

4. Terület. A mágnesezett, termonukleáris plazmákban fellépő periodikus ELM instabilitások általában két, egymással ellentétes hatással vannak a plazma összetartásának határfokára: egyrészt az instabilitások következtében távozó részecskék és energia lerontja az összetartást,

másrészt ez a lerontás nélkülözhetetlen a plazmaszennyezők plazmában történő felszaporodásának megakadályozásához.

Tokamakok esetében az a két térrész, ahol az összetartás szempontjából elvesző részecskék távoznak a határréteg plazma és a divertor. Sugárzási veszteség természetesen a plazma teljes térfogatából távozik. Vannak módszerek, amikkel a távozó részecskéket közvetlenül is detektálni lehet, azonban a részecskék által kibocsátott sugárzás megfigyelése nyújtja a legsokoldalúbb lehetőségeket, ráadásul a teljes kisugárzott teljesítmény mérésére is lehetőség nyílik, ami kulcsfontosságú a plazma globális energiamérlege szempontjából.

Az ELM instabilitás következtében a divertorban távozó energia egységnyi időre és felületre eső sűrűsége olyan nagy is lehet, hogy az a divertor szerkezeti elemeinek károsodását eredményezheti. Szükség van tehát a divertort érő hőterhelés csökkentésére illetve szabályozására. Ennek egyik módja különböző mágneses konfigurációk alkalmazása lehet, aminek az a lényege, hogy azt a felületet, ahol a mágneses erővonalak a divertorba csapódnak, minél jobban széthúzzuk a divertor lemezek mentén.

Céлом volt egy sokcsatornás (140 látóirány), nagy időfelbontású (1 mikro szekundum) kamerarendszer megfelelő átalakítása és mérésekben való alkalmazása tokamak szél plazmában fellépő ELM instabilitások és a divertor plazma sugárzási tulajdonságainak vizsgálata céljából egyszeres X-ponttal rendelkező és úgynevezett „hópihe” konfigurációkban. Az integrált mérésből tomografikus eljárás használatával kaptam térfelbontott információt és a teljes kisugárzott energiát illetve teljesítményt is a tomografikusan visszaállított mérésből határoztam meg.

3. Kutatási módszerek

A mérések kiértékelésénél, azaz a mért spektrális vonalintenzitások plazmaparaméterekhez (hőmérséklet, sűrűség, stb.) történő csatolásakor a legnagyobb nehézséget az okozza, hogy a plazma állapotát illetően legtöbbször előfeltevéssel kell élni: egyensúlyi plazmáról van-e szó, ha igen, milyen egyensúlyról (teljes termodinamikai, lokális termodinamikai, korona, egyéb.); optikailag sűrűnek vagy ritkának kell-e, lehet-e tekinteni a közeget, stb. Az előfeltevés helyességének (akár utólagos) igazolása sokszor nem egyértelmű, és általában csak szükséges, de nem elégséges feltételek léteznek egy-egy plazmaállapot meglétének igazolására.

A legegyszerűbb és leggyakrabban használt előfeltevés az, hogy vizsgálandó plazmánk optikailag ritka és lokális termodinamikai egyensúlyban van. A lokális termodinamikai egyensúly (LTE) azt jelenti, hogy a gerjesztett állapotok betöltöttsége megfelel a termodinamikai egyensúlyi állapotnak, a betöltöttségeket az elektronütközéses fel- és legerjesztési folyamatok egyensúlya alakítja ki, tehát azok Boltzmann-eloszlást követnek. A foton tér azonban nincs egyensúlyban a plazmát alkotó részecskékkel, azaz a plazma nem fekete testként sugároz.

Egy másik, a betöltöttségek nagyságára vonatkozó előfeltevés az, ha feltesszük, hogy a plazma korona egyensúlyban van. Ekkor a betöltöttségeket az elektronütközéses felgerjesztés és a sugárzásos spontán bomlás egyensúlya alakítja ki.

Míg az LTE nagyobb, a korona egyensúly kisebb elektronsűrűségek esetén játszik szerepet. A két tartomány között pedig nincs más lehetőség, mint hogy egy úgynevezett ütközéses-sugárzásos modell keretében a populációk betöltöttségét részletes, minden, a megoldandó probléma szempontjából lényeges gerjesztett állapotra és folyamat figyelembe vételével explicite ki kell számítani.

Az Értekezés magját, központi részét egy olyan, általam kidolgozott ütközéses-sugárzásos modell ismertetése teszi ki, mely egy csatolt ráta egyenletrendszer segítségével számolja a gerjesztett állapotok betöltöttségét. Ezen túlmenően, mivel a spontán bomlások és más, sugárzás kibocsátásával járó folyamatok következtében keletkezett fotonok – a plazmából való kijutást megelőzően – reabszorpciót szenvedhetnek, kidolgoztam egy eljárást a reabszorpció figyelembe

vételére úgy, hogy nem szükséges az optikai mélység nagyságának előzetes megbecslése. Az Értekezésnek ugyanebben a részében bemutatom a fenti modellem alkalmazását termonukleáris plazmába lőtt szén és neon pelleték ablációs felhői sugárzásának kiszámítására.

A dolgozatom többi részében a további három szűkebb szakterületen elért kísérleteimet és eredményeimet mutatom be.

Elsőként határoztam meg hétszeresen ionizált wolfram néhány gerjesztett állapotának gerjesztési energiáit. A spektrumokat termonukleáris plazmában rögzítettem 13-30 nm-es hullámhossz tartományban, a gerjesztési energiákat pedig analógián alapuló statisztikus módszerrel határoztam meg a Cr^{7+} és Mo^{7+} olyan elektronkonfigurációjú állapotait vizsgálva, amelyek, a főkvantumszámot leszámítva, azonosak a W^{7+} megfelelő állapotaival.

Mértem szén, nitrogén és oxigén atomok és ionok átmeneti valószínűségeit atmoszférikus falstabilizált ívkisülésben a következő módon: először megmértem az egyes multiplettekhez tartozó komponensek (= egyedi spektrumvonalak) intenzitását, majd mértem a multiplett teljes intenzitását is egy abszolút skálán, és végül az így kapott abszolút intenzitásokat viszonyítottam egy jól ismert spektrumvonal megbízható hibájú atomfizikai adatához (= átmeneti valószínűségéhez). Ilyen módon mintegy 200 átmeneti valószínűséget határoztam meg és vettem össze L-S csatolás, illetve közbenső csatolás alkalmazásával készült számítások eredményeivel.

További kísérleteim során módus-szinkronizált Titán-zafír (48 fs, 800 nm, 300 mW) lézer fényét abszorbeáló üvegfelületek felületére fókuszáltam a roncsolási küszöb alatt és mértem a keletkezett harmadik felharmonikus intenzitását az abszorpciós hossz függvényében kvarc, zafír, BK7, S-LAH64 és SF59 üvegekre.

Továbbá kísérleteket végeztem femtoszekundumos KrF lézer (700 fs, 248 nm, 15 mJ) szilárd céltárgyak (polisztirol, alumínium, arany) felületén keltett második és harmadik felharmonikusainak polarizációs tulajdonságai, valamint a keltett lézerplazma tágulási dinamikájának vizsgálata céljából.

Végezetül a svájci TCV tokamak fúziós plazmájában az úgynevezett ELM instabilitás során a plazma megnövekedő sugárzását figyeltem meg nagy idő- és térbeli felbontással. Eszközeim voltak: egy 64 csatornás fólia-bolométer rendszer és egy 140 csatornás, AXUV diódasoron alapuló kamerarendszer. A mért jeleket tomografikus eljárás segítségével analizáltam, és az eredendően térben felintegráló mérésből visszaállítottam a plazma sugárzása időbeli változásának poloidális eloszlását.

4. Új tudományos eredmények

- 1) Megalkottam egy általánosan használható ráta egyenletrendszer, amely segítségével ütközéses-sugárzásos közelítésben meghatározható a plazma és a plazmaszennyezők által kibocsátott sugárzás spektruma és spektrális teljesítménye. Általános képletet származtattam tetszőleges optikai sűrűséggel rendelkező közegek opacitásainak közelítő számítására. A képlet használatához nem szükséges előfeltevéssel élni a közeg optikai sűrűségét illetően. [1, 2]. A megalkotott ráta egyenletrendszer és az opacitásra vonatkozó összefüggésemet felhasználtam plazmaszennyezők (különösen pelleték) plazmában történő ablációjának vizsgálatára. [3].
- 2) Elsőként határoztam meg a hétszeresen ionizált wolfram néhány gerjesztett állapotának gerjesztési energiáit. A spektrumokat termonukleáris plazmában rögzítettem 13-30 nm-es hullámhossz tartományban, a gerjesztési energiákat pedig egy általam kidolgozott, az elektronszerkezetek analógiáján alapuló statisztikus módszerrel határoztam meg a Cr^{7+} és Mo^{7+} olyan elektronkonfigurációjú állapotait vizsgálva, amelyek, a főkvantumszámot leszámítva, azonosak a W^{7+} megfelelő állapotaival. Eredménynek tekintem nem csak a W

VIII addig nem ismert gerjesztési energiáinak meghatározását, hanem a kidolgozott statisztikus módszert is, amivel – bár korlátozott pontossággal – becslés adható mérésekkel nehezen elérhető gerjesztési energiák nagyságára. [4].

- 3) A szén, oxigén és nitrogén atomjai, illetve egyszeresen ionizált ionjai esetében kísérletileg meghatároztam mintegy 200, asztrofizikai fontosságú spektrális átmenet átmeneti valószínűségét illetve vonalerősségét és összevettem azokat számításokból származó eredményekkel. Megállapítottam, hogy az N I átmenetek és a C I $3s - 3p$ átmeneteihez tartozó átmeneti valószínűségek jó egyezést mutatnak az L-S csatolás alkalmazásával az Opacitás Projekt keretében kiszámított értékekkel, míg a többi átmenet esetében a mért értékek inkább a közbenső csatolással kiszámított valószínűségekhez állnak közelebb. [5, 6, 7].
- 4) Vizsgáltam abszorbeáló közegekben femtoszekundumos lézerpulzus (Ti:Sapphire) hatására megjelenő harmadik felharmonikus keltésének határfokát. Kapcsolatot találtam a harmadik harmonikus frekvenciáján mérhető abszorpciós hossz és a hozzá tartozó harmadrendű szuszceptibilitás nagysága között, ami lehetőséget teremt az utóbbi mennyiség becslésére abszorpciós mérések segítségével. [8].
- 5) Tanulmányoztam femtoszekundumos KrF lézerpulzus által szilárd testek felszínén keltett második és harmadik felharmonikusok spektrális tulajdonságait, valamint a keletkezett lézerplazma tágulási sebességét. Megállapítottam, hogy a keletkezett második és harmadik harmonikusok tükörszerű irányban reflektálódtak és a második harmonikusok polarizációja tiszta S-, vagy P-polarizált keltő lézer esetén is kevert polarizációjú, bár a keltő lézerfény polarizáltsága dominál. Harmadik harmonikus esetén a felharmonikusok polarizáltsága teljesen követi a keltő lézert. Valamint megállapítottam, hogy a keltő lézerfény Doppler-eltolódása a táguló lézerplazmán, az irodalmi várakozásokkal ellentétben, független a céltárgy anyagától. A mérési eredmények magyarázatára analitikus modelleket alkottam. [9, 10].
- 6) A TCV tokamakon végzett méréseim során megállapítottam, hogy egyszeres X-ponttal rendelkező mágneses geometriában az ELM instabilitás az X-pont környéki megnövekedett sugárzással veszi kezdetét, és csak ez után jelenik meg a külső félsík közelében megnövekedett sugárzási aktivitás, ami az ott meginduló részecskekiáramlásra utal. Az ELM-ek magneto-hidrodinamikai modelljei az instabilitás kialakulását egy plazmaszéli mágneses perturbáció megjelenésével hozzák kapcsolatba, nem egy sugárzási eseménnyel a plazma más régióiban, ezért megállapításom hozzájárult az ELM instabilitás kialakulásának jobb megértéséhez. [11, 12]. Továbbá az általam átalakított és továbbfejlesztett AXUV kamerarendszer segítségével kollégáimmal együtt megállapítottam, hogy másodrendű nullponttal rendelkező, „hópihe” konfigurációban az összetartás 15%-kal jobb, az ELM frekvencia 2-3-szor kisebb, az ELM eseményenként a plazmából távozó energia pedig 20-30%-kal magasabb az egyszeres X-ponti geometriában tapasztaltnál. [13, 14, 15].

5. A tézispontokhoz kapcsolódó közlemények

1. G. Veres and L.L. Lengyel: A Collisional-Radiative Cooling Model for Light Impurity Elements in Hot Plasmas under Non-Equilibrium Conditions; *J. Nucl. Mat.* **250** (1997) 96.
2. G. Veres: Frequency-averaged Opacities for Plasmas with Arbitrary Optical Thickness; *J. Quant. Spectrosc. & Radiat. Transfer* **60** (1998) 657.

3. L.L. Lengyel, K. Büchl, G. Pautasso, L. Ledl, A.A. Ushakov, S. Kálvin and G. Veres: Modelling of Impurity Pellet Ablation in ASDEX Upgrade (neon) and Wendelstein W7-AS (carbon) by Means of a Radiative ('killer') Pellet Code; *Nucl. Fusion* **39** (1999) 791.
4. G. Veres, J.S. Bakos and B. Kardon: Energy Levels and the Vacuum Ultra Violet Spectrum of W VIII; *J. Quant. Spectrosc. & Radiat. Transfer* **56** (1996) 295.
5. J. Musielok, W.L. Wiese and G. Veres: Atomic Transition Probabilities and Tests of the Spectroscopic Coupling Scheme for N I; *Phys. Rev. A* **51** (1995) 3588.
6. G. Veres and W.L. Wiese: Experimental Atomic Transition Probabilities for O II Lines; *Phys. Rev. A* **54** (1996) 1999.
7. J. Musielok, G. Veres and W.L. Wiese: Some Experimental Tests of the Spectroscopic Coupling Scheme of C I; *J. Quant. Spectrosc. & Radiat. Transfer* **57** (1997) 395.
8. G. Veres, S. Matsumoto, Y. Nabekawa and K. Midorikawa: Enhancement of third-harmonic generation in absorbing media; *Appl. Phys. Lett.* **81** (2002) 3714.
9. G. Veres, J.S. Bakos, I.B. Földes, K. Gál, Z. Juhász, G. Kocsis and S. Szatmári: Polarization of Harmonics Generated by Ultrashort KrF-Laser Pulses on Solid Surfaces; *Europhys. Lett.* **48** (1999) 390.
10. G. Veres, G. Kocsis, E. Rácz and S. Szatmári: Doppler shift of femtosecond laser pulses from solid density plasmas; *Appl. Phys. B* **78** (2004) 635.
11. G. Veres, R.A. Pitts, M. Wischmeier, B. Gulejova, J. Horacek and S. Kalvin: Radiation distributions in TCV; *J. Nucl. Mat.* **363-365** (2007) 1104.
12. G. Veres, R.A. Pitts, A. Bencze, J. Márki, B. Tál, R. Tye and TCV Team: Fast radiation dynamics during ELMs on TCV; *J. Nucl. Mat.* **390-391** (2009) 835.
13. F. Piras, S. Coda, ..., G. Veres, ..., C. Zucca: Snowflake divertor experiments on TCV; *Plasma Phys. Control Fusion* **52**:(2010) 124010.
14. F. Piras, S. Coda, ..., G. Veres, ..., C. Zucca: "Snowflake" H Mode in a Tokamak Plasma; *Phys. Rev. Letters* **105** (2010) 155003.
15. B. Tal, B. Labit, D. Nagy, R. Chavan, B. Duval and G. Veres: Plasma radiation dynamics with the upgraded Absolute Extreme Ultraviolet tomographical system in the Tokamak à Configuration Variable; *Rev. Sci. Instrum.* **84** (2013) 123508.