

15. Komplexní interferometrie

Milan Káral

Prakticky okamžitě po zkonstruování a úspěšné demonstraci funkce prvního *laseru* počátkem šedesátých let dvacátého století začali badatelé z nejrůznějších oblastí výzkumu horečně uvažovat o potenciálních aplikacích tohoto převratného vynálezu. Principiální možnost dopravit velké množství energie do malého objemu ve velmi krátkém čase nemohla samozřejmě uniknout pozornosti vědců zabývajících se problematikou **řízené termonukleární reakce** – v té době metodou ohřevu plazmatu udržovaného pohromadě pomocí silných magnetických polí v zařízeních typu **tokamak**. Vzhledem k tomu, že se původně očekávaný rychlý úspěch na tomto poli stále nedostavoval, jevila se idea alternativní cesty k dosažení kýženého cíle využitím laserů jako velice vítaný stimul. Zcela zásadní důležitost tohoto bádání spočívá ve skutečnosti, že v případě jeho úspěšného zvládnutí by lidstvo jednou provždy vyřešilo svůj problém s hledáním prakticky nevyčerpatelných zdrojů energie.

Soustředěný celosvětový výzkum interakce intenzivního laserového záření s pevnolátkovými terčíky, který byl tímto odstartován, postupně odhalil celou řadu různých fyzikálních procesů ovlivňujících účinnost přenosu energie do vnitřních oblastí terčíku. Vzhledem k tomu, že uvnitř terčíků umístěné vhodné palivo (zmrzlé deuterium popř. tritium) je třeba touto z vnějšku dodávanou energií laseru stimulovat k uvolnění energie termonukleárního původu ohřevem na teploty řádově 100 milionu stupňů, bylo nutné co nejlépe těmto procesům porozumět ve snaze minimalizovat jejich negativní dopad. Různé druhy nestabilit zde totiž velmi komplikují dosažení vysokého stupně komprese vzniklého horkého plazmatu, což je nezbytnou podmínkou pro nastartování řetězové reakce.

Potřeba detailního zkoumání dynamiky procesů, které v plazmatu za těchto extrémních podmínek probíhají, si tak vyžádala **vývoj celé řady nových diagnostických metod**. Příkladem diagnostické metody, jejíž vznik byl iniciován studiem laserového plazmatu, je i **metoda komplexní interferometrie**, které je věnována tato kapitola.

Pro doplnění výše uvedeného přehledu pak ještě dodejme, že ani nastoupená alternativní cesta ke zvládnutí řízené termonukleární reakce pomocí laserů v žádném případě neposkytuje procházku růžovou zahradou. Po počátečním nadšení se po celá čtyři uplynulá desetiletí v této badatelské komunitě celkem pravidelně střídala hluboká skepse s mírným optimismem.

Teprve v posledních letech se zdá, že se začíná blýskat na lepší časy v obou nastoupených směrech výzkumu. Dokladem toho jsou i v současnosti probíhající aktivity směřující k budování obrovských experimentálních zařízení, a to jak pro výzkum termonukleární fúze s magnetickým udržením (ITER – ve stadiu příprav), tak pro alternativu tzv. inerciálního udržení, kdy důsledkům enormních hustot energie dopravené do terčíku pomocí laserů čelí pouze síly setrvačnosti (NIF a LMJ – ve stavbě).

Okolnosti vzniku metody, její principy a aplikace

Jeden z pozoruhodných fyzikálních jevů, ke kterým dochází v procesu interakce intenzivního laserového záření s pevnolátkovými terčíky, se v odborném žargonu označuje jako tzv. **efekt fontány**. Určitá část elektronů ve vznikajícím plazmatu je nejprve urychlena ve směru od terčíku. Tyto elektrony se následně působením elektrostatických polí vracejí zpět a pronikají do terčíku, kde dochází ke konverzi jejich kinetické energie mimo jiné také na rentgenové záření. Trajektorie těchto elektronů v plazmatu jsou podstatnou měrou ovlivňovány velmi silným magnetickým polem (~ 100 T), které je spontánně generováno zejména zkříženými gradienty hustoty a teploty plazmatu ($\nabla n \times \nabla T$). Toto magnetické pole má toroidální strukturu s maximem v určité vzdálenosti od osy symetrie plazmatu a je příčinou toho, že se vracející elektrony rozdělí zhruba do dvou skupin. Elektronům první skupiny se jako trychtýřem podaří vrátit do terčíku v blízkosti osy symetrie. Elektrony druhé skupiny jsou vytlačeny od osy až za oblast maxima magnetického pole a dopadají pak na terčík v prstenci určitého poloměru (odtud také plyne název tohoto jevu). Experimentálně se efekt fontány ověřuje detekcí charakteristického rentgenového záření, které vychází ze zadní strany terčíku pokrytého za tímto účelem vrstvou vhodného materiálu.

Pro studium účinnosti přenosu energie do oblastí hustého plazmatu a samotného terče je velmi důležité porozumět mechanismům, které jsou za efekt fontány zodpovědné. To s sebou přináší mimo jiné potřebu dostatečně detailní znalosti topologie a velikosti spontánně generovaných magnetických polí v pokud možno co největší oblasti plazmatu. Z počítačových simulací totiž vyplývá, že se tato magnetická pole mohou dále šířit dovnitř terčíku (přičemž jejich intenzita vzrůstá i o řád) a významně tak ovlivňovat proces přenosu energie.

S ohledem na **obtížnost experimentálního zjišťování spontánních magnetických polí** v laserovém plazmatu, kdy je třeba změřit profily fyzikálních veličin v objektech s rozměry zlomků milimetru a dobou trvání na

úrovni nanosekund a kratších, daly se do poloviny 80. let minulého století laboratoře, které se o taková měření pokusily, snadno spočítat na prstech jedné ruky. Výsledky těchto měření však byly spíše kvalitativní, prokazující existenci těchto polí, s orientačně stanovenými maximálními hodnotami a bez jakéhokoliv vážnějšího pokusu o získání jejich kvantifikovaného prostorového rozložení. A to pro potřeby výše zmíněné bylo naprosto nedostatečné. Co však bylo hlavní příčinou těchto obtíží?

V převážné většině případů se ke zkoumání přítomnosti magnetického pole v plazmatu využívá **Faradayova jevu** stáčení roviny polarizace testovacího paprsku. Pro úhel rotace θ (ve stupních) platí následující vztah:

$$\theta = 1.51 \lambda_p^2 \int \frac{nB dl}{10^{23} (1 - n/n_{kp})^{1/2}},$$

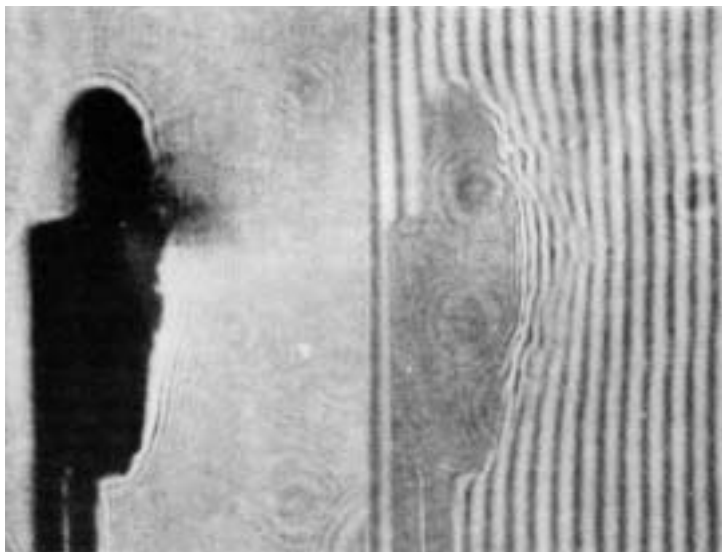
kde λ_p označuje vlnovou délku testovacího paprsku (v μm), B reprezentuje komponentu magnetického pole ve směru šíření paprsku (v teslech), n_{kp} označuje tzv. kritickou hustotu plazmatu pro použitou vlnovou délku (v cm^{-3}) a n pak lokální hodnotu hustoty plazmatu v místech, kudy paprsek procházel (v cm^{-3}).

Z uvedeného vztahu je zřejmé, že získání samotného úhlu rotace není pro rekonstrukci magnetického pole dostačující, neboť při stáčení roviny polarizace hraje důležitou roli také hustota plazmatu, jejíž rozložení je tedy rovněž nutno zjistit. Typicky se k tomu používá metoda interferometrického měření fázového posuvu mezi testovacím a referenčním paprskem. A teprve kombinace těchto dvou měření pak může poskytnout hledané profily magnetického pole. To vše za předpokladu, že zkoumané plazma je osově symetrické, což umožní aplikaci **Abelovy inverzní transformace** pro rekonstrukci hledaných veličin (hustoty plazmatu resp. magnetického pole) z integrálních výrazů (fázový posuv resp. úhel rotace).

Jako příklad typického postupu při hledání profilů magnetického pole uveďme dvojici experimentálně získaných dat (interferogram a polarigram), která v minulosti vždy byla nezbytným základem následných analýz (obr. 43).

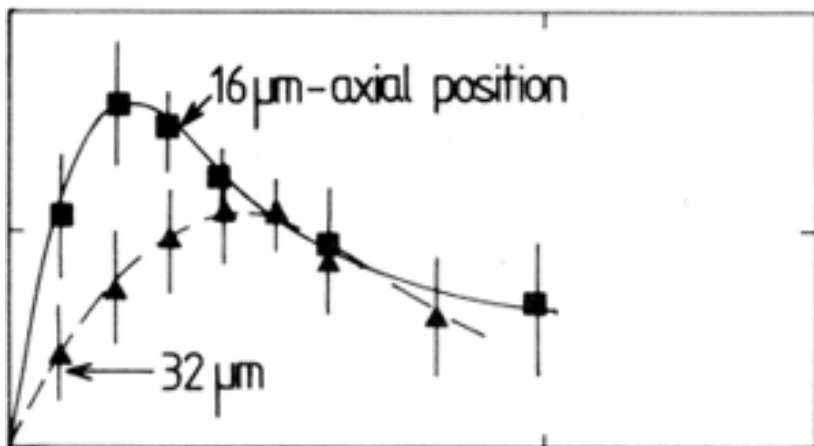
Po rekonstrukci úhlu rotace a fázového posuvu je třeba aplikací Abelovy inverzní transformace nejprve nalézt profily odpovídajících veličin nB a n . Jejich vzájemným dělením v každém bodě prostoru pak dostaneme hledané profily magnetického pole B . Při tomto dělení je samozřejmě velice důležité, aby oba soubory dvourozměrných dat prostorově koincidovaly, tj. aby jednotlivé prvky matic odpovídaly stejným prostorovým souřadnicím,

což vůbec není jednoduchá záležitost. A o nutnosti zachovat v obou měřicích stejnou velikost prostorového zobrazení (zvětšení) ani nemluvě.



Obr. 43: Příklad současně získaného polarogramu a interferogramu [1]

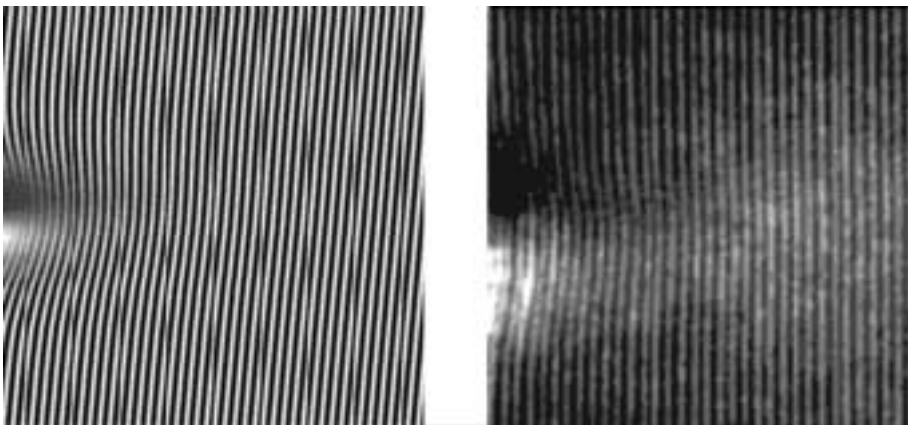
Nelze se tedy celkem divit, že typický rekonstruovaný profil magnetického pole získaný na základě dat uvedených na obr. 43 vypadal následovně.



Obr. 44: Příklad rekonstrukce radiálního rozložení spontánního magnetického pole ve dvou různých průřezích s uvedenými odhady chyb [1]

Je zřejmé, že pro účely výše uvedené jsou data z obr. 44 málo použitelná. V žádném případě se nejedná o potřebné dvourozměrné profily polí v oblasti celého plazmatu. Okolnosti si tedy vyžadovaly navrhnout, otestovat a aplikovat nějakou novou diagnostickou metodu, která by nejenom kvalitativně prokazovala existenci těchto polí, ale zajišťovala i následnou kvantitativní analýzu experimentálních dat s maximálním prostorovým rozlišením v celé oblasti laserového plazmatu, kde budou mít tato pole nezanedbatelnou hodnotu.

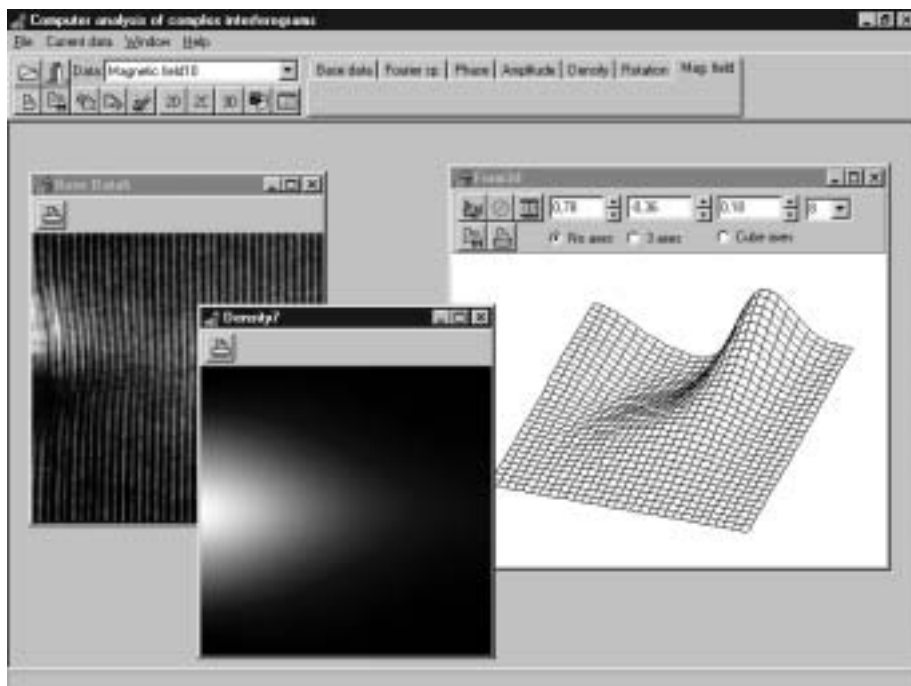
Nemalé úsilí zaměřené naznačeným směrem nakonec vedlo k vyvinutí metody, která dostala název **komplexní interferometrie**. Podrobnosti o tomto procesu hledání lze nalézt v práci [2], popis metody samotné pak v [3] a [4]. Na tomto místě se omezíme pouze na konstatování, že se jedná o zcela *obecnou* diagnostickou metodu, která, na rozdíl od *interferometrie klasické*, chápe **interferogram** nikoliv jako objekt s *jedním* stupněm volnosti (*změna tvaru* interferenčních proužků), ale využívá i *dva další* (dříve vesměs ignorované) stupně volnosti: *změnu intenzity* interferenčních proužků ve směru *podél* těchto proužků a *snížení kontrastu* interferenčních proužků (v případě dynamických procesů). Tím je umožněno zachytit v jediném interferogramu najednou až *tři fyzikální veličiny*, které je pak možné analyzovat. Volbou experimentálního uspořádání je určeno, které fyzikální veličiny budou do jednotlivých stupňů volnosti zakódovány. Příklady počítačově generovaného a experimentálně získaného komplexního interferogramu jsou uvedeny na obr. 45.



Obr. 45: Příklady komplexních interferogramů - počítačem generovaný (vlevo) a získaný z experimentu (vpravo)

Na tomto místě je rovněž vhodné podotknout, že pod názvem *komplexní interferometrie* je třeba chápat nejenom experimentální techniku jako takovou, pro jejíž aplikaci musí být splněna určitá kritéria. Její inherentní součástí jsou i sofistikované algoritmy počítačového zpracování, bez nichž by nebylo možné všechny tři stupně volnosti efektivně využívat. Patří sem i velmi rychlé a potenciálně velmi **přesné numerické metody výpočtu Abelovy inverzní transformace**, která hraje zásadní roli v procesu rekonstrukce fyzikálních veličin do interferogramu zakódovaných [5].

Závěrem lze konstatovat, že právě počáteční nedostupnost potřebného softwarového vybavení způsobila určitý skluz v rozšíření této univerzální diagnostické techniky mezi vědeckou komunitou. V posledních letech se však situace výrazně zlepšila díky převodu programového vybavení na platformu Microsoft Windows. Vzhled uživatelského rozhraní s ukázkami některých analýz je uveden na obr. 46.



Obr. 46: Příklad uživatelského grafického rozhraní programu pro analýzu komplexních interferogramů obsahujícího zobrazení komplexního interferogramu a rekonstruovaných profilů hustoty (2D) a spontánního magnetického pole (3D)

Literatura:

- [1] Burgess, M. D. J. – Luther-Davies, B. – Nugent, K. A.: An experimental study of magnetic fields in plasmas created by high intensity one micron laser radiation. *Physics of Fluids*. Vol. 28, 1985, pp. 2286–2297.
- [2] Kálal, M.: *Komplexní interferometrie*. [Habilitační práce FJFI ČVUT], Praha 1998.
- [3] Kálal, M.: *Complex Interferometry – Its Principles and Applications to Fully Automated On-line Diagnostics*. *Czechoslovak Journal of Physics*. Vol. 41, 1991, pp. 743–748.
- [4] Kálal, M. – Nugent, K. A. – Luther-Davies, B.: *Phase-Amplitude Imaging: The Fully Automated Analysis of Megagauss Magnetic Field Measurements in Laser-Produced Plasmas*. *Journal of Applied Physics*. Vol. 64, 1988, pp. 3845–3850.
- [5] Kálal, M. – Nugent, K. A.: *Abel Inversion Using Fast Fourier Transforms*. *Applied Optics*. Vol.27, 1988, pp.1956–1959.