

PERCORSI

RICORDI DELL'EFFETTO "RIGA NERA"

La fisica atomica italiana deve molto per la sua rinascita nel dopoguerra, e per il suo successivo sviluppo che oggi la vede protagonista sulla scena mondiale, alla figura carismatica di Adriano Gozzini. Tra le molte scoperte realizzate nel suo Laboratorio di Pisa quella della trasparenza elettromagneticamente indotta ha aperto un nuovo campo di ricerca e si sta rivelando di sempre maggior attualità. A venticinque anni dalla scoperta Alzetta, Arimondo e Moi hanno ricevuto il premio Panizza della Società Italiana di Fisica. A loro e a Orriols è stato chiesto di raccontare le origini della famosa "riga nera" e ognuno di essi ha brevemente narrato i suoi ricordi ed ha descritto il proprio coinvolgimento personale nella vicenda. Li ringraziamo della disponibilità e ci auguriamo che questi racconti siano di interesse per tutti i fisici italiani e non soltanto italiani. Il fenomeno della trasparenza elettromagneticamente indotta ha prodotto molte inattese novità (laser senza inversione di polarizzazione, luce lenta, rallentamento di atomi) ma altre ne promette a breve termine. Questa di Alzetta, Arimondo e Moi è un'ulteriore testimonianza della verità del detto latino "parva sunt principia rerum".

G.-F. Bassani

G. Orriols

*Universitat Autònoma de Barcelona,
Bellaterra, Barcelona, Spain*

E. Arimondo

*Dipartimenti di Fisica E. Fermi, Università di
Pisa, via F. Buonarroti 2, I-56127 Pisa*

Ecco come G. Orriols ricorda la riga nera.

I metodi ottici della spettroscopia a radiofrequenza hanno rappresentato il passaggio dal fare spettroscopia della luce a fare spettro-

scopia con la luce, e questo si è andato accentuando via via che si sono sviluppate le diverse tecniche di spettroscopia laser. Il laser, comparso all'inizio degli anni sessanta, è stato il frutto del lavoro di persone dedite allo studio di problemi di interazione radiazione-materia nel dominio del visibile e delle microonde, che ha prodotto quel figlio riconoscente il quale molto ha donato alla sua madre spettroscopia. E questo nonostante la proprietà più intrinseca della luce laser, la coerenza spaziale, non sia stata del tutto sfruttata. In cambio, la buona direzionalità del fascio, la forte densità di energia e la possibilità di una estrema monocromaticità hanno permesso di giocare con gli atomi quasi fossero palle da foot-ball. È un problema però avere una luce laser della lunghezza d'onda necessaria per una transizione determinata d'un atomo determinato. A questo scopo, l'avvento del laser sintonizzabile a colorante al principio degli anni settanta ha rappresentato la luce per gli spettroscopisti. Concretamente, il laser a rodamina permette di sintonizzare sopra le righe gialle del sodio, e per parecchi anni molti laboratori dedicarono sforzi nel fare esperimenti sul vapore di sodio.

In particolare, uno dei primi laboratori europei a disporre di un laser a coloranti fu l'Istituto di Fisica Atomica e Molecolare del CNR, situato qualche strada più in là della Torre di Pisa, dove operava un gruppo dedicato alla spettroscopia laser, diretto da Gerardo Alzetta e Adriano Gozzini, e un gruppo di giovani laureandi, tra i quali mi sono trovato io stesso a partire dall'anno 1975. A quell'epoca il gruppo faceva spettroscopia delle molecole alcaline partendo dalla fluorescenza indotta dal laser e studiava l'influenza dell'orientazione atomica prodotta per pompaggio ottico sul processo di formazione delle molecole, così come le conseguenze delle collisioni tra atomi e molecole in stato eccitato. Inoltre si stava sviluppando un metodo di osservazione diretta dei fenomeni di riso-

nanza magnetica in un vapore di sodio otticamente orientato, una esperienza che ha dato spazio alla mia tesi di dottorato e alle quattro pubblicazioni che stiamo commentando⁽¹⁻⁴⁾. L'idea era molto semplice, ma poteva venire soltanto ad un italiano.

Dobbiamo cominciare spiegando come è fatto un esperimento tipico di pompaggio ottico. Abbiamo un vapore atomico, attraversato da un fascio di luce risonante polarizzata circolarmente e sottoposto ad un campo magnetico statico uniforme. La conservazione del momento angolare implica una eccitazione selettiva che congiuntamente alla ricaduta isotropa dell'emissione spontanea, tende ad accumulare tutti gli atomi in un certo sottolivello Zeeman dello stato fondamentale. Questo sottolivello corrisponde ad una orientazione determinata del momento angolare e gli atomi non possono assorbire la luce circolarmente polarizzata nè generare fluorescenza. In queste condizioni se applichiamo un campo a radiofrequenza e agghustiamo la separazione tra i sottolivelli Zeeman mediante una spazzata del valore del campo magnetico, potremo osservare uno spettro di risonanza magnetica. Le transizioni dal sottolivello popolato a qualsivoglia altro sottolivello provocano un aumento dell'assorbimento della luce e della fluorescenza e, in questo modo, le risonanze si possono osservare otticamente. Per mezzo della luce laser il fenomeno si può osservare ad occhio nudo e su questo il gruppo di Pisa cominciò a lavorare.

L'idea luminosa — non so se di Alzetta o di Gozzini — consisteva nello sbarazzarsi dei campi magnetici uniformi e delle corrispondenti spazzate nel tempo e fare tutto il contrario: applicare un campo magnetico spazialmente variabile in maniera che lo spettro di risonanza magnetica appaia distribuito sopra il cammino fluorescente del fascio laser. D'altra parte, poiché nel centro del fascio laser l'intensità è più elevata che ai lati, la dimensione radiale del fascio mette in evidenza gli effetti radiativi indotti dalla luce sulle risonanze magnetiche. Cioè a dire, il metodo permette di osservare con un colpo d'occhio le caratteristiche delle risonanze di bassa frequenza in funzione delle due variabili distribuite nello spazio: il campo magnetico e la intensità luminosa. La fig. 1 riporta un esempio dei risultati sperimentali osservati sulla fluorescenza indotta nei vapori di sodio dalle risonanze magnetiche fra livelli dello stato fondamentale.

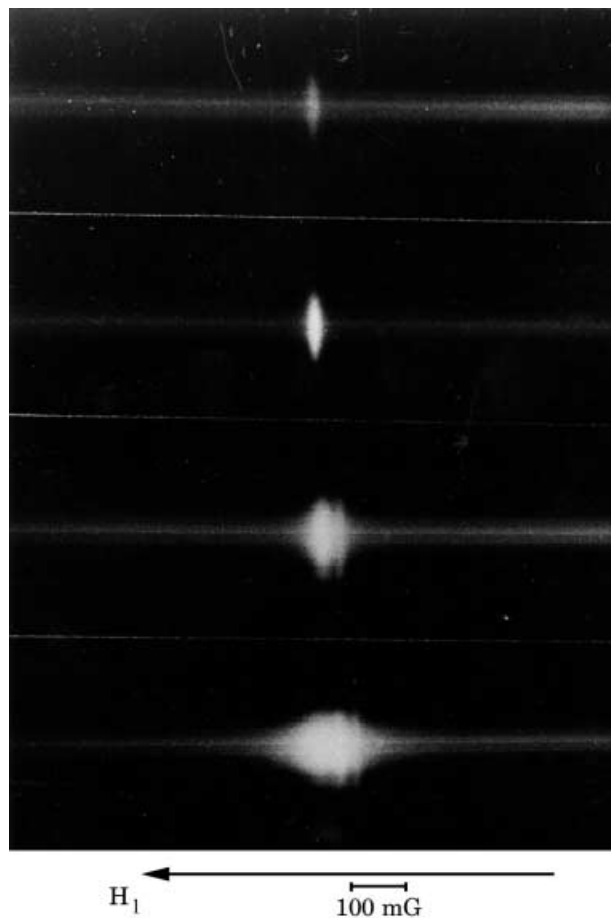


Fig. 1. — Distribuzione spaziale della fluorescenza emessa dai vapori di sodio a causa della risonanza magnetica a radiofrequenza, con transizioni multifotoniche indotte per potenze a radiofrequenza crescenti dall'alto verso il basso. In basso è riportata la scala del campo magnetico longitudinale H_1 , disomogeneo lungo la direzione di propagazione del laser. (Foto cortesemente messa a disposizione da G. Alzetta.)

Il “colpo d'occhio” è molto importante perchè significa che l'osservatore raccoglie molte informazioni e che non solo può lavorare più rapidamente, ma che può anche vedere cose non visibili in altro modo. Non è un metodo per fare misure ma per osservare e, di fatto, per divertirsi. Orbene una prima questione è come deve essere la luce laser per avere una buona eccitazione del vapore. Dobbiamo tenere conto che la transizione ottica di un atomo di sodio ha una larghezza naturale di circa 10 MHz, però, nel gas, l'effetto Doppler e la dispersione delle velocità atomiche spostano le righe di un atomo rispetto a quelle degli altri e ne risulta una larghezza complessiva dell'ordine del GHz. Cioè l'eccitazione globale del vapore richiedeva luce con uno spettro che coprisse il GHz in questione, e come conseguire questo con la luce del laser non è

evidente. Nel nostro caso si usava un laser multimodo che ricopriva una larghezza di banda di 35 GHz, che però mantiene ben determinata la separazione tra i modi per cui questi fluttuano. Il resto dell'esperimento è semplice: una disposizione asimmetrica di bobine che permette di creare il campo magnetico statico con un certo gradiente spaziale e una coppia di bobine che induca il campo a radiofrequenza. Così una risonanza magnetica di radiofrequenza ha l'aspetto di una tacca luminosa di forma lenticolare sospesa sulla traccia della fluorescenza che il fascio laser lascia nel vapore orientato. La convessità della tacca lenticolare aumenta con la potenza laser e, d'altra parte, si trasforma gradualmente in un cono quando la sintonia spettrale tra la luce e la transizione atomica è disintonizzata asimmetricamente. Questi effetti pongono in evidenza l'allargamento e gli *shift* radiativi prodotti dalla luce sui sottolivelli Zeeman della risonanza magnetica. Aumentando la potenza del campo radio, si produce un allargamento globale della tacca luminosa e l'apparire di altre risonanze vicine che corrispondono a due, tre e quattro fotoni. Aggiungendo dei campi a microonde, si possono vedere transizioni di struttura iperfina e con i due campi a bassa frequenza si possono osservare transizioni multifotoniche ibride con un fotone di alta frequenza ed alcuni di bassa frequenza.

Con tutti questi fenomeni, che nel giro di un anno mi ero dedicato ad osservare, pensavo di avere materiale sufficiente per la tesi, e così la proposi ad Alzetta; il quale però, consapevole che quanto proponevo non era ancora del tutto originale, mi disse: "In ogni caso c'è ancora il fenomeno della *riga nera*".

Accidenti, se aveva un segreto! E dalla maniera come lo disse, capii subito che si trattava di un tesoro. In quel giorno mi fu fatto il miglior regalo che abbia mai avuto in vita mia.

Avviene che, utilizzando un fascio laser come quello descritto, sulla traccia della luce di fluorescenza si possono osservare delle righe nere molto più sottili delle forme lenticolari delle risonanze a radiofrequenza, e ciascuna ad un valore ben definito del campo magnetico, come è mostrato in fig. 2.

Si tratta di risonanze magnetiche a bassa frequenza indotte direttamente dal laser. La intensità delle righe dipende dalla direzione del campo magnetico rispetto a quella del fascio laser e ciascuna varia in maniera differente dalle altre.

Avvicinando un magnete in modo che il va-

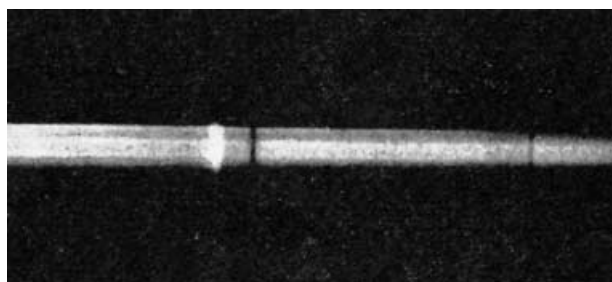


Fig. 2. – Righe nere (ed una brillante dovuta alla risonanza magnetica) osservate sulla traccia di fluorescenza eccitata dal laser a colorante nei vapori di sodio. Come in fig. 1, un campo magnetico disomogeneo è applicato lungo la direzione di propagazione del laser. (Riprodotta dalla figura 12 di ref. (1).)

pore sia sottoposto a campi di centinaia di gauss si può osservare un boschetto di righe, cioè un insieme spettacolare di righe discrete, alcune brillanti e alcune nere e con una struttura complessa, molto sensibile alle condizioni di lavoro dell'oscillatore laser.

Il fenomeno essenziale è la riga nera: una risonanza su una transizione allo stato $3P$ che parte dai sottolivelli dello stato fondamentale, indotta otticamente grazie al fatto che la luce laser è costituita da frequenze ottiche separate dalla frequenza di cui sono separati i sottolivelli di struttura iperfina. La risonanza produce una diminuzione molto pronunciata dell'assorbimento della luce e, in conseguenza, della fluorescenza. La causa è che, in condizione di risonanza, gli atomi si collocano in uno stato di sovrapposizione dei due autostati dell'energia e si comportano come non assorbenti a causa di una interferenza distruttiva delle ampiezze di probabilità di transizione tra i due canali di eccitazione ottica.

Abbiamo uno stato macroscopico coerente nel quale tutti gli atomi evolvono in fase tra loro e in accordo con la fase relativa tra i due campi ottici. È un fenomeno non lineare perché coinvolge due transizioni ottiche, però si può apprezzare anche con potenze molto piccole della luce grazie al fatto che agisce un meccanismo d'accumulazione tipo pompaggio ottico. D'altra parte, la risonanza non è influenzata dall'ampiezza naturale delle transizioni ottiche e, inoltre, è insensibile all'effetto Doppler, poiché i due campi ottici copropagantesi compensano mutuamente i loro effetti.

In definitiva, l'accumulazione degli atomi in uno stato non assorbente o stato nero è un effetto risonante, coerente e non lineare con due peculiarità non molto comuni. Da una parte, è un

fenomeno forte e robusto, dall'altra è un effetto abbastanza generale. Questo ha fatto sì che sia stato oggetto di interesse e continui ad esserlo in relazione a una notevole varietà di tematiche, come per esempio la spettroscopia laser di alta risoluzione, la ionizzazione multifotonica, gli orologi atomici o standard di frequenza, i magnetometri di alta sensibilità, la coniugazione di fase per mescolamento di quattro onde, la bistabilità ottica e alcune altre instabilità dinamiche, la trasparenza indotta elettromagneticamente, gli indici di rifrazione elevati senza assorbimento, l'interferenza atomica, la produzione di luce in stati non classici, il raffreddamento di atomi con laser, l'amplificatore laser senza inversione di popolazione. Di tutte queste applicazioni quella che ha avuto più importanza è stato il raffreddamento degli atomi, che costituì uno dei motivi del premio Nobel per la fisica a Cohen-Tanoudji, nell'anno 1997. Il gruppo di Cohen-Tanoudji usò gli stati non assorbenti per eludere il riscaldamento causato dal rinculo nell'emissione spontanea, che sembrava un limite insormontabile dei metodi di raffreddamento con la luce. L'idea è basata sul produrre lo stato nero con due luci contropropagantesi invece di copropagantesi, in modo che ci sia più sensibilità all'effetto Doppler e si accumulino solo gli atomi che non si muovono nella direzione del fascio laser. Così gli atomi restano intrappolati in uno stato non assorbente e di velocità nulla nella direzione della luce. Un atomo che si muova comincerà ad assorbire e a riemettere luce finché resti in riposo e così, si vanno accumulando tutti gli atomi finché non abbiano raggiunto temperature inferiori a 10^{-6} K.

Per concludere, lasciatemi spiegare che i miei contributi al fenomeno della riga nera consistettero nell'averlo caratterizzato sperimentalmente — assieme a Luigi Moi —, averne intuito una interpretazione fisica in termini di interferenza quantistica tra i due canali di eccitazione — basandomi sulle idee più classiche di Gozzini e Alzetta — e averne sviluppato un modello teorico semiclassico con l'aiuto di Ennio Arimondo e partendo da un suggerimento di Rodolfo Bonifacio. Introdussi anche il nome di risonanze senza assorbimento, che, dopo essere stato utilizzato per alcuni anni, è stato sostituito poco a poco dalla attuale denominazione di intrappolamento coerente di popolazione.

(Traduzione dal catalano di Rosa Garcia (Università di Pisa) rivista da G. Alzetta)

Ecco come E. Arimondo ricorda la riga nera.

Era l'inizio del 1975 quando per la prima volta venni a conoscenza del fenomeno della riga nera osservato da Gerardo Alzetta, Adriano Gozzini, Luigi Moi e Gaspar Orriols nel Laboratorio di Fisica Atomica e Molecolare del CNR diretto da Adriano Gozzini. Obiettivo dell'esperimento era utilizzare per il pompaggio ottico di atomi di sodio, in fase di vapore saturo tenuti in una cella di Pyrex, una nuova sorgente, un laser a colorante rodamina-6G pompato da un laser ad argon, uno dei pochi funzionanti in Italia in quel momento. Poiché la potenza fornita dal laser sulla riga di risonanza del sodio era molto superiore a quella prodotta dalle lampade a scarica di radiofrequenza utilizzate in precedenza, l'uso del laser per il pompaggio ottico doveva produrre un più efficiente pompaggio, cioè una frazione più alta di atomi di sodio in sottolivelli Zeeman dello stato fondamentale corrispondenti ad una polarizzazione magnetica ben definita. Le osservazioni sperimentali di Alzetta e collaboratori avevano invece dimostrato che nelle condizioni dell'esperimento l'aumento di polarizzazione non si verificava, ed anzi si produceva una drastica diminuzione della polarizzazione degli atomi di sodio. Anche se Gozzini ed Alzetta, con cui ogni giorno, secondo l'abitudine pisana, andavo a prendere il caffè, parlavano sempre appassionatamente di questa misteriosa riga nera, ogni informazione più precisa sull'esperimento non circolava al di fuori del gruppo di ricerca direttamente coinvolto.

Il mio coinvolgimento vero iniziò verso l'autunno del 1975 quando Gaspar Orriols cominciò a discutere con me dell'interpretazione del fenomeno. Infatti Gaspar, dovendo scegliere l'argomento della sua tesi di perfezionamento fra la riga nera ed i "doppietti del sodio" (un altro fenomeno scoperto nello stesso Laboratorio nel 1975⁽⁵⁾), aveva deciso di concentrarsi sulla riga nera. Le discussioni con Gaspar mi fornirono una descrizione più precisa delle osservazioni sperimentali. Per caratterizzare la risposta atomica Alzetta aveva applicato agli atomi di sodio eccitati dal laser la tecnica di tomografia spaziale introdotta in quegli anni da Paul Lauterbur per la risonanza magnetica⁽⁶⁾, tecnica che fornendo una precisa risoluzione spaziale è poi diventata la base delle applicazioni biomediche

della risonanza magnetica. Avendo applicato alla cella contenente gli atomi di sodio un campo magnetico disomogeneo lungo la direzione di propagazione della luce laser, nell'esperimento di Alzetta e collaboratori⁽¹⁾ la diminuzione nella polarizzazione atomica appariva localizzata, come una riga nera, in una posizione longitudinale della cella, in corrispondenza ad un valore ben definito del campo magnetico, come mostrato in fig. 1 e 2. Il campo magnetico corrispondente alla posizione spaziale della riga nera dipendeva dalle caratteristiche del laser. Per caratterizzare la emissione del laser utilizzata, Alzetta aveva esaminato la distribuzione spettrale dei modi del laser utilizzando un interferometro Fabry-Pérot. Pertanto aveva scoperto che il laser aveva una emissione a multimodi, con una spaziatura regolare di 290 MHz, determinata dal *free-spectral range* (FSR) della cavità laser, e con un elevato numero di modi emessi, circa trenta. La riga nera nell'emissione di luce dalla cella di sodio era prodotta quando la differenza in frequenza fra due modi dell'emissione laser separati da sei volte il FSR risultava uguale alla separazione di 1.8 GHz fra sottolivelli Zeeman dei due stati iperfini (con momenti angolari totali $F=1$ ed $F=2$) dello stato fondamentale dell'atomo di sodio.

Sulla base di queste informazioni Gaspar ed io cominciammo a sviluppare una adeguata descrizione teorica. Il pompaggio ottico con le tradizionali sorgenti a scarica era descritto sulla base di equazioni di flusso per le popolazioni atomiche. Queste equazioni non erano in grado di spiegare le osservazioni sperimentali. Pertanto era necessario utilizzare una descrizione più completa, quella basata sulle equazioni per la matrice densità ottica degli atomi eccitati dalla radiazione laser. Ero a conoscenza della descrizione basata sulla matrice densità che era stata elaborata l'anno prima da Claude Cohen-Tannoudji per descrivere la risposta di atomi di sodio in un sistema a due livelli eccitato da radiazione laser monocromatica⁽⁷⁾. Seguendo questo approccio, con Gaspar iniziammo una analisi basata sulle equazioni della matrice densità per un sistema a tre livelli nella configurazione denominata Λ interagente con un laser a due modi, schematizzata in fig. 3(a). Il modello era basato su alcune drastiche ipotesi: i) solo tre livelli atomici sono importanti nella produzione della riga nera; ii) la complessità delle eccitazioni del laser a multimodi è irrilevante e solo due modi del laser sono importanti

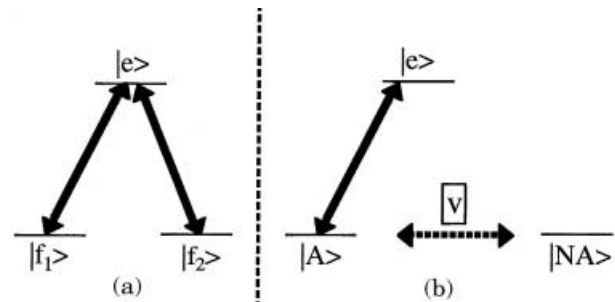


Fig. 3. - In (a) rappresentazione schematica di un sistema a tre livelli, nella base degli stati atomici con due fondamentali $|f_1\rangle$ e $|f_2\rangle$ ed uno eccitato $|e\rangle$, eccitati da due radiazioni laser, indicate dalle righe in grassetto. In (b) rappresentazione schematica della interazione di un sistema a tre livelli nella base degli stati accoppiati $|A\rangle$ e $|NA\rangle$, con solo lo stato $|A\rangle$ eccitato dalla radiazione laser. La linea tratteggiata che congiunge gli stati $|A\rangle$ e $|NA\rangle$ indica l'accoppiamento, proporzionale alla velocità atomica, prodotto dalla energia cinetica nel raffreddamento laser basato sull'intrappolamento coerente delle popolazioni selettivo in velocità prodotto da due laser nella configurazione contropropagante.

nella produzione della riga nera; iii) i due modi del laser rilevanti per la produzione della riga nera sono correlati in fase. È interessante notare che a tutt'oggi queste ipotesi non sono state mai testate con attenzione, ed in particolare la relazione di fase fra i modi di emissione di un laser multimodo è ancora oggi oggetto di investigazione nell'ambito della spettroscopia laser.

All'inizio del 1976 il progresso nell'analisi dell'esperimento ricevette una spinta eccezionale. Infatti Rodolfo Bonifacio dell'Università di Milano fu invitato a Pisa a tenere un seminario sulla bistabilità ottica. In occasione di quella visita, discutendo le proprietà di un sistema atomico a tre livelli, Rodolfo mi segnalò un articolo di Brewer ed Hahn pubblicato l'anno prima, dove il problema della matrice densità di un sistema a tre livelli era stato risolto analiticamente in maniera esatta⁽⁸⁾. Quella soluzione era quanto serviva alla nostra analisi. Appena inserimmo nelle forme Lorentziane di assorbimento e dispersione della soluzione di Brewer ed Hahn i parametri dell'esperimento, ottenemmo la curva di fig. 4 per la popolazione atomica di sodio nello stato eccitato dei tre livelli nella configurazione Λ , quindi l'emissione fluorescente degli atomi di sodio eccitati dai due laser. In tale curva, diventata l'esempio classico del fenomeno, in uno stretto intervallo intorno alla posizione centrale di risonanza appare una diminuzione della popolazione eccitata, quindi una diminuzione della

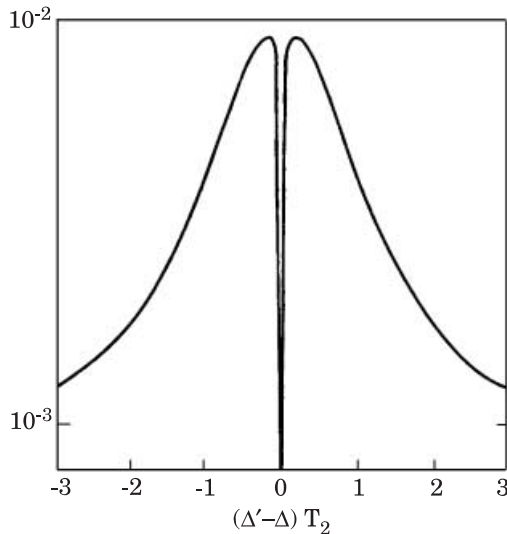


Fig. 4. - Occupazione dello stato eccitato $|e\rangle$ di un sistema a tre livelli come funzione della differenza $(\Delta' - \Delta)$, il disaccordo dei due laser applicati al sistema, disaccordo normalizzato al decadimento T_2 delle coerenze ottiche (riprodotta dalla figura 1 di ref. (2)). Risultato per il caso di $\Delta = 0$ ed altri parametri nella referenza originale.

fluorescenza emessa, corrispondente alla riga nera osservata nell'esperimento.

All'inizio dell'estate del 1976 questa analisi era completata, e dato che la spiegazione del fenomeno come una interferenza nei processi di occupazione dello stato eccitato era per noi chiara, decidemmo di pubblicare i risultati ottenuti. Nel frattempo io mi stavo preparando per un soggiorno di due anni ad Ottawa (Canada), quindi ero interessato a concludere il lavoro di ricerca in corso a Pisa. In questa situazione ritenemmo conveniente sottomettere subito per una pubblicazione i risultati della nostra analisi teorica: il nostro lavoro fu sottomesso alle "Lettere del Nuovo Cimento" in data 30 Agosto 1976 e rapidamente pubblicato il 6 Novembre dello stesso anno⁽²⁾.

A Gaspar avevo suggerito di completare l'analisi teorica basata sulla matrice densità, realizzando l'integrazione Doppler per tener conto della distribuzione delle velocità atomiche. Gaspar arrivò anche ad una interpretazione teorica della riga "bianca", un aumento della fluorescenza atomica osservata nell'esperimento simultaneamente alla riga nera, ma per diverse condizioni di frequenza del laser di eccitazione. Dopo due anni di soggiorno in Canada mi arrivarono ad Ottawa per posta i risultati del lavoro di Gaspar, un gran pacco di fogli contenenti i calcoli analitici e numerici effettuati. Non

avendo per nulla contribuito a questa fase del lavoro, declinai la proposta di Gaspar di completare insieme l'analisi del fenomeno e lo invitai a firmare da solo il lungo lavoro teorico che poi venne pubblicato sul "Nuovo Cimento"⁽⁴⁾.

Il fenomeno può essere spiegato in termini molto semplici usando un cambiamento di base per gli studi atomici. Supponiamo di partire da un sistema tre livelli come quello di fig. 3(a), con due livelli $|f_1\rangle$ e $|f_2\rangle$ di uno stato fondamentale atomico ed un livello eccitato atomico $|e\rangle$, in interazione con due radiazioni laser, una che agisce sulla transizione da $|f_1\rangle$ ad $|e\rangle$, e l'altra sulla transizione da $|f_2\rangle$ ad $|e\rangle$. Supponiamo inoltre che queste interazioni abbiano la stessa ampiezza. La linearità della meccanica quantistica ci permette di applicare una trasformazione di base atomica, ed esaminare la evoluzione atomica dentro la base atomica costituita dallo stato $|NA\rangle = (|f_1\rangle - |f_2\rangle)\sqrt{2}$ nonaccoppiato alle radiazioni laser, o stato nero, e dallo stato ortogonale $|A\rangle = (|f_1\rangle + |f_2\rangle)\sqrt{2}$, fortemente accoppiato alle radiazioni laser, come schematicamente rappresentato in fig. 3b. A causa del pompaggio ottico prodotto dalle radiazioni laser che agiscono sullo stato $|A\rangle$ e dalla presenza della emissione spontanea che trasferisce atomi dallo stato $|e\rangle$ ad ambedue gli stati fondamentali, gli atomi sono pompati nello stato nero $|NA\rangle$. Pertanto nelle condizioni della transizione a due fotoni di $\delta = 0$, la fluorescenza atomica presenta il buco nero delle osservazioni sperimentali di fig. 1 e della simulazione teorica di fig. 4.

Il mio successivo coinvolgimento con la riga nera avvenne all'Università di Rochester, nella città omonima nel nord dello stato di New York, dove tra l'8 ed il 10 giugno del 1977 si svolgevano due Conferenze in parallelo, la Conferenza Internazionale sui *Multiphoton Processes* e la Quarta Conferenza della serie di *Coherence and Quantum Optics*. Partecipavo alla prima Conferenza, per presentare alcuni risultati del lavoro effettuato ad Ottawa, mentre sia Claude Cohen-Tannoudji che Alain Aspect partecipavano alla seconda Conferenza. Un pomeriggio, durante lo svolgimento simultaneo delle due Conferenze, Claude ed Alain mi cercarono affannosamente per chiedermi perché non ero stato presente alla relazione tenuta da Carlos R. Stroud jr. dell'Università di Rochester sulla fluorescenza di risonanza in un sistema a tre livelli⁽⁹⁾ nell'ambito della *Coherence and Quantum Optics*. Dopo che ebbi spiegato di essere a Rochester per seguire l'altra Conferenza, mi

raccontarono che nella sua relazione Stroud aveva presentato osservazioni sperimentali assolutamente identiche a quelle della riga nera ottenute l'anno precedente a Pisa. Pertanto alla fine della relazione di Stroud, Claude Cohen-Tannoudji era intervenuto spiegando sinteticamente i risultati sperimentali e l'analisi teorica effettuati a Pisa. I risultati del gruppo di Rochester furono pubblicati l'anno successivo su "Optics Letters", e nel titolo di quella pubblicazione fu utilizzato per la prima volta il nome di "*coherent population trapping*" (intrappolamento coerente delle popolazioni), quello che resterà successivamente nella letteratura per indicare il fenomeno di interferenza nell'ampiezza di probabilità che avviene in un sistema a tre livelli⁽¹⁰⁾. Per una visione completa dei contributi di Pisa e Rochester, bisogna ricordare che in precedenza, nel 1976, il gruppo di Rochester aveva pubblicato un lavoro teorico sulla risposta di un sistema a tre livelli nella configurazione a cascata eccitato da due radiazioni laser. Le loro simulazioni numeriche avevano ottenuto tutta la fisica della riga nera o dell'intrappolamento coerente delle popolazioni⁽¹¹⁾. Tuttavia in quel lavoro mancava la comprensione fisica del fenomeno, ed il gruppo di Rochester ebbe bisogno di ulteriore lavoro di ricerca per capire la risposta del sistema Λ come l'interferenza dei processi di eccitazione laser.

Negli anni successivi, mentre altri gruppi di ricerca in giro per il mondo cominciarono a studiare il fenomeno utilizzando spesso apparati molto sofisticati per investigare il l'intrappolamento coerente delle popolazioni o la trasparenza elettromagneticamente indotta⁽¹²⁾ (un fenomeno strettamente collegato), Alzetta continuava ad esaminare il fenomeno sulla cella di sodio utilizzando il laser multimodo descritto in precedenza ed il campo magnetico disomogeneo per la tomografia spaziale. Ancora, come nel suo stile, i risultati non venivano divulgati in conferenze od articoli pubblicati, ma restavano accumulati sul suo tavolo. Pertanto era molto difficile essere a conoscenza di cosa veniva man mano scoperto o verificato. Per esempio nel 1980 Claudio Nicolini discusse la sua tesi di laurea svolta sotto la guida di Alzetta. In quel lavoro di tesi, che lessi come controrelatore, sono contenute alcune importanti osservazioni sperimentali sulla larghezza spettrale della riga nera. Una parte di tali osservazioni furono successivamente rielaborate dopo molti anni, per esempio nella tesi di dottorato di Ji Hua Xu presso la

Scuola Normale Superiore nel 1994 sotto la guida di Adriano Gozzini, e successivamente pubblicate. Altre osservazioni, per esempio la dipendenza della larghezza della risonanza della riga nera dalle dimensioni del fascio laser di eccitazione, non sono mai state pubblicate.

Il mio successivo coinvolgimento con il fenomeno dell'intrappolamento coerente delle popolazioni avviene nel 1998 durante la visita all'Ecole Normale Supérieure di Parigi presso il gruppo diretto da Claude Cohen-Tannoudji, di cui faceva parte anche Alain Aspect. Come parte della mia attività, avevo cominciato a collaborare all'esperimento di raffreddamento laser di atomi di elio nello stato metastabile. Il fine dell'esperimento era verificare la temperatura limite raggiungibile applicando all'atomo di elio il meccanismo di raffreddamento Doppler, l'unico meccanismo di raffreddamento conosciuto in quel momento. Durante una breve visita di ritorno a Pisa ebbi l'occasione di incontrare Vladimir Minogin che era a Pisa per un seminario sui processi di raffreddamento laser. In quell'occasione Minogin mi raccontò il suo lavoro sulla applicazione del fenomeno della riga nera al processo di raffreddamento. Quando ritornai a Parigi, iniziai a discutere con Claude ed Alain sulla possibilità di effettuare un raffreddamento laser basato sul fenomeno della riga nera nell'esperimento sull'elio. Tuttavia, il primo punto era controllare la teoria sviluppata da Minogin e collaboratori, e fu subito chiaro che l'analisi sviluppata dal gruppo russo imponeva in maniera implicita che la temperatura raggiunta dagli atomi fosse superiore alla temperatura di rinculo, che rappresenta la temperatura acquisita da un atomo nel processo di assorbimento di un singolo fotone del laser di raffreddamento. Si escludeva quindi che utilizzando la riga nera si potesse arrivare in un regime differente, vicino od addirittura inferiore alla temperatura di rinculo. A quel punto Claude effettuò in gran fretta un calcolo differente, molto semplice a dire la verità, calcolo valido anche a temperature inferiori a quella di rinculo. La base dell'analisi fu l'aggiunta dell'evoluzione quantistica dovuta alla energia cinetica associata al moto dell'atomo nella base atomica $|A\rangle$ e $|NA\rangle$ introdotta in fig. 3(b) per spiegare la schema della riga nera. Nel caso che le due radiazioni laser che agiscono sul sistema atomico di fig. 3(a) siano prodotte da fasci laser contropropaganti nello spazio, l'energia cinetica produce un accoppiamento fra gli stati $|A\rangle$ e $|NA\rangle$ proporzionale alla velocità v

dell'atomo, come schematicamente indicato nella fig. 3(b). Allora il pompaggio ottico nello stato $|NA\rangle$ prodotto dai due laser è perfetto solo per gli atomi con velocità $v = 0$. La fisica della riga nera iniziata dalla fig. 1 veniva arricchita di un nuovo elemento, una perdita controllata associata al moto degli atomi.

Il risultato di questa analisi era che il meccanismo dell'intrappolamento coerente delle popolazioni della riga nera, se reso selettivo in velocità attraverso l'interazione con fasci laser contro-propaganti, poteva produrre atomi in una classe di velocità molto vicina a zero, quindi poteva produrre una temperatura di raffreddamento laser estremamente ridotta, con le sole limitazioni imposte dal pompaggio ottico, quindi di avere un sufficiente tempo di interazione fra i laser e l'atomo. Pertanto si poteva realizzare un meccanismo di raffreddamento laser senza il limite Doppler imposto dall'unico meccanismo noto in quel momento e neanche dalla temperatura di rinculo che si immaginava potesse costituire un altro limite difficilmente superabile dalla interazione atomo-laser. Fu subito chiaro che la realizzazione in laboratorio di questo meccanismo poteva rappresentare un enorme progresso nel raffreddamento laser. Pertanto tutta l'attività di raffreddamento sull'elio fu rivolta alla verifica del nuovo meccanismo previsto. Ed infatti dopo circa sei mesi, la prova sperimentale sullo stato metastabile dell'elio era realizzata⁽¹³⁾.

Da quel momento l'interesse per la riga nera veniva ulteriormente allargato dentro la comunità della fisica atomica e dell'ottica quantistica.

Bibliografia

- (1) G. ALZETTA, A. GOZZINI, L. MOI e G. ORRIOLS, *Il Nuovo Cimento B*, **36** (1976) 5.
- (2) E. ARIMONDO e G. ORRIOLS, *Lettere Nuovo Cimento*, **17** (1976) 333.
- (3) G. ALZETTA, L. MOI e G. ORRIOLS, *Il Nuovo Cimento B*, **52** (1979) 209.
- (4) G. ORRIOLS, *Il Nuovo Cimento B*, **53** (1979) 1.
- (5) M. ALLEGRI, G. ALZETTA, A. KOPYSTINSKA, L. MOI e G. ORRIOLS, *Opt. Commun.*, **19** (1976) 96.
- (6) P.C. LAUTERBUR, *Nature*, **242** (1973) 190.
- (7) C. COHEN-TANNOUDJI, in *Atomic Physics 4*, a cura di G. ZU PULTITZ, E.W. WEBER, A. WINNACKER (Plenum Press, New York and London) 1975 p. 589.
- (8) R.G. BREWER, E.L. HAHN, *Phys. Rev. A*, **11** (1975) 1641.
- (9) C.R. STROUD jr, H.R. GRAY, in *Coherence and Quantum Optics IV*, a cura di L. MANDEL, E. WOLF (Plenum Press, New York and London) 1978 p. 115.
- (10) H.R. GRAY, C.R. STROUD jr, *Opt. Lett.*, **3** (1978) 218.
- (11) R.M. WHITLEY, C.R. STROUD jr, *Phys. Rev. A*, **14** (1976) 1498.
- (12) S. HARRIS, *Physics Today*, **50**, No. 7 (1997) 36.
- (13) A. ASPECT, E. ARIMONDO, R. KAISER, N. VANSTEENDKISTE e C. COHEN-TANNOUDJI, *Phys. Rev. Lett.*, **61** (1988) 826.

L. Moi

*Dipartimento di Fisica, Università di Siena
via Roma 56, I-53100 Siena*

All'inizio degli anni '70 è avvenuta una grande rivoluzione nel campo della spettroscopia atomica e molecolare, l'avvento dei laser a coloranti continui e tunabili. Per chi aveva lavorato fino a quel momento solo con le lampade spettrali, la possibilità di selezionare la riga D₁ o la riga D₂ del sodio ruotando semplicemente una manopola, era assolutamente affascinante e magico. La fisica atomica si trovava alle soglie di una nuova stagione che sarebbe culminata ai giorni nostri con le tecniche del raffreddamento laser, con la condensazione di Bose Einstein e con molto molto altro.

In quegli anni nasceva a Pisa il Laboratorio di Fisica Atomica e Molecolare del CNR (LAFAM), divenuto poi Istituto di Fisica Atomica e Molecolare (IFAM) e, in tempi recentissimi, Istituto di Processi Chimico Fisici (IPCF). Fondatore e allora anche direttore del Laboratorio era Adriano Gozzini.

Il laboratorio aveva trovato una prima sistemazione provvisoria in tre piccole villette non contigue nella immediata periferia di Pisa, in località Gello. Venendo dalla città si imboccava una stretta via che correva nella campagna e che portava ad una prima villetta sulla sinistra della strada stessa e ad altre due sulla destra, spostate un po' più avanti. Nella prima villetta aveva trovato posto, in un capannone in giardino, l'officina meccanica, mentre all'interno c'erano la segreteria, il laboratorio di elettronica e di vetreria e qualche studio. Le altre due palazzine di due piani e divise in due o tre appartamenti erano contigue e ospitavano laboratori e studi. Nell'ultima c'era il gruppo diretto da Giuseppe Fornaca. Nella prima, oltre a Giulio Chella e al gruppo di Pino Salvetti, c'era il nostro gruppo di spettroscopia laser, diretto da Gerardo Alzetta. In quei primi anni hanno fatto parte del gruppo, oltre al sottoscritto, Maria Allegrini, Aleksandra Kopystynska e Gaspar Orriols. Nella foto (fig. 1), scattata probabilmente nel 1976, non compare Maria Allegrini in quel periodo all'estero per studio.

Il Laboratorio aveva avuto al momento della sua istituzione fondi sufficienti per l'acquisto fra l'altro di due laser ad argon di prima generazione e di due laser a coloranti. La potenza massima dei laser ad argon era a quei tempi di



Fig. 1. – Foto del gruppo di Spettroscopia Laser nell'anno '76. Da sinistra Gaspar Orriols, Gerardo Alzetta, Aleksandra Kopystynska e il sottoscritto. La foto è stata scattata sulla terrazza del laboratorio in via del Giardino a Pisa, seconda sede dell'IFAM.

soli 2 W e ricordo giornate intere passate ad allineare e a far funzionare i laser a coloranti che lavoravano molto prossimi alla soglia e non sempre in modo stabile. Avevamo sistemato un laser ad argon con il relativo laser a colorante nella stanza che avrebbe dovuto originariamente essere la sala da pranzo, mentre il secondo argon, con il suo laser a colorante, nella cucina dello stesso appartamento. Nella foto scattata da Alzetta (fig. 2) si vede la sistemazione nella cucina dei laser e dell'apparato per lo studio del pompaggio ottico e della riga nera. Come si vede tutto il montaggio era abbastanza semplice. I nostri studi erano nelle stanze dell'appartamento del secondo piano.

Negli anni '60, una delle attività prevalenti degli spettroscopisti era l'utilizzazione della tecnica del pompaggio ottico, proposta da Kastler, per lo studio dello stato fondamentale degli atomi e delle perturbazioni prodotte da campi e dagli urti con atomi e molecole. Il pompaggio ottico permette di accumulare, utilizzando luce risonante circolarmente polarizzata e in presenza di un opportuno campo magnetico, la popolazione atomica su un solo sottolivello Zeeman, dal quale gli atomi non possono poi venire ulteriormente

eccitati. Questo produce una netta diminuzione della fluorescenza del vapore atomico. Prima del laser usavamo celle di Pyrex sferiche abbastanza grandi, e il pompaggio ottico veniva messo in evidenza modulando il campo magnetico. L'effetto era molto suggestivo, perchè nel buio del laboratorio, la cella mandava dei bagliori che si vedevano bene a occhio nudo, in sincronia con la modulazione del campo stesso. Un altro modo per rivelare il pompaggio ottico era quello di utilizzare un campo a radiofrequenza. Quando la radiofrequenza è in risonanza con una transizione fra due livelli Zeeman o iperfini induce una redistribuzione delle popolazioni atomiche e quindi un aumento della fluorescenza.

Gozzini, in grande amicizia e ricambiata stima con Kastler, Brossel e con il gruppo dei giovani della Ecole Normale Supérieure di Parigi, fra gli altri Cohen-Tannoudji e Serge Haroche, aveva avviato a Pisa molti esperimenti in questo campo, dando un contributo originale e molto importante. Fra le altre esperienze, insieme con Gozzini e Alzetta, avevamo messo in evidenza l'inibizione della formazione delle molecole di potassio per effetto dell'orientamento degli spin elettronici prodotto dal pom-

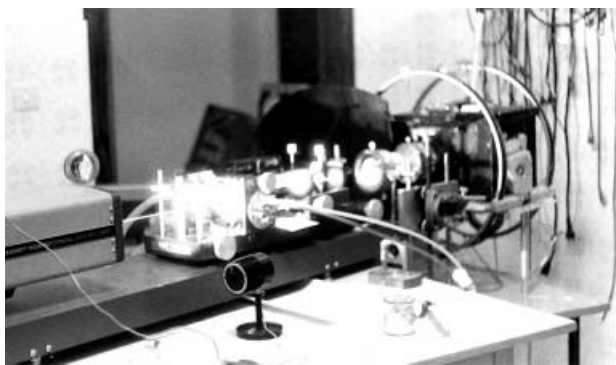


Fig. 2. - Fotografia dell'apparato sperimentale con il quale è stata osservata per la prima volta la riga nera. Sono visibili il laser ad argon, il laser a colorante, le bobine per il campo magnetico e il forno usato per scaldare la cella con il sodio.

paggio ottico, come suggerito da Kastler⁽¹⁾. In questo esperimento il pompaggio veniva fatto utilizzando lampade spettrali, mentre le molecole di potassio venivano eccitate con un laser He-Ne e rivelate attraverso la fluorescenza emessa.

Con l'arrivo dei laser a coloranti, si pensò immediatamente di sostituire le lampade con il laser per fare pompaggio ottico. Il laser, oltre a una intensità più grande rispetto a quella delle lampade, ci dava la possibilità di vedere fluorescenze molto intense e ben localizzate nello spazio, rendendo così molto facile e spettacolare la osservazione dei fenomeni legati al pompaggio ottico. Fu di Alzetta l'idea di mettere un campo magnetico non uniforme in modo da localizzare nello spazio le risonanze a radiofrequenza. Questo non perturbava di fatto le condizioni per il pompaggio ottico, ma produceva una separazione dei sottolivelli Zeeman dipendente dalla posizione e quindi una dipendenza spaziale delle condizioni di risonanza per il campo a radiofrequenza. Risultato finale era la comparsa di righe luminose che attraversavano il fascio laser all'interno della cella in corrispondenza della risonanza. Cambiando la frequenza della radiofrequenza si osservava lo spostamento della macchia luminosa. Aumentando la potenza del campo a radiofrequenza comparivano transizioni a due o a tre fotoni facilmente osservabili a occhio nudo, insieme a molti altri effetti. Il profilo grosso modo Gaussiano del fascio laser produceva un allargamento della risonanza al centro, dove l'intensità è maggiore, dandoci una visione diretta dell'effetto noto come

"power broadening". Un altro effetto, noto come "light shift", si manifestava attraverso la deformazione delle risonanze trasformate in "punte di freccia", diversamente orientate a seconda del segno del "detuning". In fig. 3 è riportato un esempio di quanto ricca fosse la visione diretta della cella.

Fu durante l'osservazione di queste risonanze che fu vista da Alzetta per la prima volta una linea scura che attraversava il fascio laser. Era come se un capello nero fosse entrato nella cella e attraversasse il fascio laser. La sorpresa fu ovviamente notevolissima così come l'eccitazione per la scoperta. La posizione all'interno della cella dipendeva dal valore del campo magnetico, come risultò immediatamente spostando la calamita che produceva il campo non uniforme o cambiando la corrente nelle bobine. Passammo molto tempo a guardare questo effetto chini sul fornello che conteneva la cella di sodio. Furono trovate altre "righe nere", poi si osservò che la "riga nera" diventava per metà "bianca" o completamente "bianca". Insomma un vero rompicapo. In fig. 4 è riportata una foto di una cella capillare contenente vapore di sodio. La cella è in un campo magnetico non uniforme. Una "riga nera" è ben visibile in corrispondenza della freccia

Furono fatte diverse ipotesi sulla effettiva

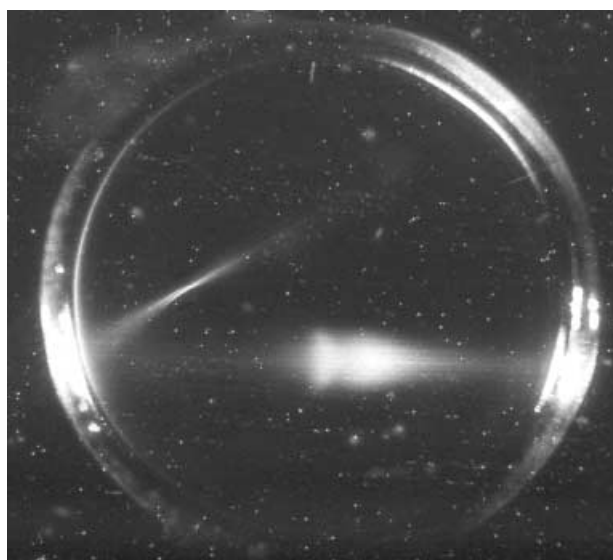


Fig. 3. - Risonanze a radiofrequenza in presenza di un campo magnetico non uniforme. Il vapore di sodio è confinato in una cella cilindrica di cui si vede il bordo circolare. Il laser viene da destra ortogonalmente alla superficie laterale della cella. Si vedono risonanze a radiofrequenza a uno e a due fotoni e il profilo deformato dal light shift.

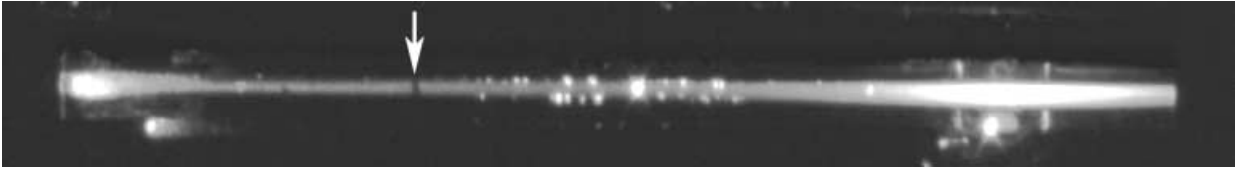


Fig. 4. – Riga nera, indicata dalla freccia, ottenuta in una cella capillare. Il fascio laser proviene da sinistra. La luminosità molto intensa a sinistra è dovuta alla finestra della cella, mentre quella a destra dalla forte fluorescenza in corrispondenza della riserva di sodio.

natura di quel fenomeno soprattutto in termini di pompaggio ottico. Alzetta associava l'effetto a una possibile modulazione della luce laser. Una esperienza con luce modulata e campo magnetico trasverso era stata fatta da Bell e Bloom con le lampade spettrali⁽²⁾. Quando la frequenza di modulazione coincideva con quella di precessione degli atomi si verificava una diminuzione della fluorescenza. Si intuì comunque e si verificò sperimentalmente che l'effetto era legato alla struttura multimodale del laser. Con l'aiuto di un diodo veloce e di un analizzatore di spettro si trovarono battimenti molto intensi e stabili a frequenze che risultavano multipli di $c/2L$ (L lunghezza della cavità del laser a colorante). Il battimento fondamentale era a circa 290 MHz e un suo multiplo cadeva all'incirca ad un valore di 1740 MHz, molto vicino alla separazione iperfina dello stato fondamentale del sodio. Pertanto la riga nera doveva essere prodotta dalla eccitazione contemporanea di due modi del laser, non contigui ma separati dalla giusta frequenza in accordo con lo schema a Λ oggi universalmente noto. Per verificare questa ipotesi suggerii di fare spettroscopia modificando la lunghezza della cavità del laser stesso. Questo avrebbe cambiato la separazione fra i modi longitudinali del laser e quindi la posizione delle risonanze nel campo magnetico. L'esperimento fu fatto e il risultato fu quello ipotizzato. Furono individuati precisamente quali livelli fossero coinvolti nella formazione delle tre righe nere osservate. Come curiosità, ricordo che utilizzavamo le risonanze a radiofrequenza sovrapponendole alle righe nere per misurare il valore del campo magnetico e l'analizzatore di spettro per misurare la frequenza del battimento. Questi risultati compaiono nelle ref.^(3,4). Mi sembra opportuno sottolineare il fatto che la riga nera è stata osservata con un laser operante in modo completamente libero, senza nessun controllo attivo della sua frequenza, della sua stabilità, in condizioni cioè che avrebbero fatto e farebbero,

ancora di più oggi, storcere il naso a tutti i colleghi. Ma la riga nera è stata proprio un regalo dell'imprevisto e della grandissima capacità di osservazione di Alzetta. Ricordo che Scully e Gibbs, nel 1977, vennero a visitare il laboratorio e videro, fra incredulità e grande interesse, la riga nera. Un commento molto stringato ma efficace di Gibbs fu: "*lucky laser*"!

L'idea di "giocare" con la lunghezza della cavità del laser per variare la struttura modale è stata poi da me utilizzata altre volte. Ho proposto un laser molto lungo e a larga banda per fare raffreddamento laser^(5,6), per mettere in evidenza la pressione di radiazione su vapori di sodio⁽⁷⁾ e per ottenere velocità di diffusione molto grandi nell'effetto di "*light-induced drift*"⁽⁸⁾.

Nel 1990 mi sono trasferito presso l'Università di Siena, ma ho continuato a collaborare con Silvia Gozzini, che si era aggiunta nel frattempo al nostro gruppo all'IFAM. Con lei e con Alzetta abbiamo fatto in tempi recenti altri esperimenti sulla riga nera. Abbiamo monitorato la riga nera attraverso i processi collisionali di "*energy pooling*"⁽⁹⁾, altro effetto osservato per la prima volta dal nostro gruppo⁽¹⁰⁾. Abbiamo studiato l'effetto sulla riga nera delle collisioni con gas nobili e azoto fino a pressioni molto elevate e utilizzando un laser operante in un regime trimodale⁽¹¹⁾.

Più recentemente abbiamo iniziato, nell'ambito di un progetto europeo e in collaborazione con i gruppi di Stefka Cartaleva e di Laurentius Windholz, uno studio per l'applicazione della riga nera alla misura di campi magnetici⁽¹²⁾.

E la storia continua, spero!

Bibliografia

- (1) G. ALZETTA, A. GOZZINI e L. MOI, *C.R. Acad. Sci. Paris*, **274** (1972) 39.
- (2) W.E. BELL e A.L. BLOOM, *Phys. Rev. Lett.*, **6** (1961) 280.
- (3) G. ALZETTA, A. GOZZINI, L. MOI e G. ORRIOLS, *Nuovo Cimento B*, **36** (1976) 5.
- (4) G. ALZETTA, L. MOI e G. ORRIOLS, *Nuovo Cimento B*, **52** (1979) 209.

- (5) L. MOI, *Opt. Commun.*, **50** (1984) 349.
- (6) S. GOZZINI, E. MARIOTTI, C. GABBANINI, A. LUCCHESINI, C. MARINELLI e L. MOI, *Appl. Phys. B*, **54** (1992) 428.
- (7) J.H. XU e L. MOI, *Opt. Commun.*, **67** (1988) 282.
- (8) S. GOZZINI, C. MARINELLI, E. MARIOTTI, C. GABBANINI, A. LUCCHESINI e L. MOI, *Europhysics Lett.*, **17** (1992) 309.
- (9) S. GOZZINI, P. SARTINI, C. GABBANINI, A. LUCCHESINI, C. MARINELLI, L. MOI, J.H. XU e G. ALZETTA, *Opt. Commun.*, **160** (1999) 75.
- (10) M. ALLEGRI, G. ALZETTA, A. KOPYSTYNSKA, L. MOI e G. ORRIOLS, *Opt. Commun.*, **19** (1976) 96.
- (11) S. GOZZINI, P. SARTINI, C. GABBANINI, A. LUCCHESINI, C. MARINELLI, L. MOI, J.H. XU e G. ALZETTA, *Eur. Phys. J. D*, **6** (1999) 1, 127.
- (12) C. ANDREEVA, S. CARTALEVA, Y. DANCHEVA, V. BIANCALANA, A. BURCHIANI, C. MARINELLI, E. MARIOTTI, L. MOI e K. NASYROV, *Phys. Rev. A*, **66** (2002) 012502.

G. Alzetta

*Dipartimento di Fisica, Università di Pisa
Via F. Buonarroti 2, I-56127 Pisa*

Invio questa nota per il Nuovo Saggiatore, nella quale volutamente mi sono limitato alla descrizione di alcuni dettagli sperimentali che di solito non vengono riportati negli scritti ma che, soprattutto all'inizio, sono stati fondamentali.

Di più non mi sono sentito di scrivere. Il ricordo di quelli che nelle esperienze di quegli anni, in un modo od in un altro, sono stati presenti e che non ci sono più sarebbe per me troppo penoso.

La "riga nera" è stata osservata per la prima volta nella primavera del 1975, nei laboratori del CNR, allora denominati LAFAM (Laboratorio di Fisica Atomica e Molecolare), situati a Gello, vicino a Pisa.

La scoperta fu casuale. Una sera, durante il montaggio delle bobine a gradiente di campo per osservare le risonanze magnetiche Zeeman a radiofrequenza, capitò di notare, durante l'aggiustaggio della posizione della bobine, delle sottili interruzioni nella fluorescenza prodotta dal fascio di un *dye-laser* all'interno di una cella contenente sodio. Queste interruzioni, che per contrasto con la forte fluorescenza emessa dal sodio lungo il fascio laser apparivano come rigature nere, sembravano indipendenti dalla radiofrequenza applicata ma solo dipendere dal campo magnetico. La perdita di sintonizzazione del *dye-laser*, quella sera non particolarmente stabile, fece durare l'osservazione meno di un minuto. Tutti i successivi, ripetuti tentativi di rivedere il

fenomeno agendo sulla sintonia del laser, allineando le bobine e spazzando finché possibile i campi magnetici, quella sera furono vani.

Rimase l'unico ricordo delle sottili righe nere la cui posizione dipendeva dal campo magnetico e forse dalla sintonia del laser.

La notte portò consiglio. Gozzini si ricordò di una bella esperienza fatta quindici anni prima sui pompaggi ottici con il metodo di Kastler⁽¹⁾, e ciò fu di grande aiuto per ritrovare il fenomeno. In quella esperienza era stata osservata una diminuzione di fluorescenza in un campo magnetico trasversale usando luce modulata alla frequenza di precessione degli atomi, dell'ordine delle centinaia di kHz.

L'associare la sparizione della fluorescenza osservata la sera prima nelle «righe nere» a quella dell'esperienza di Bell e Bloom, fu cosa immediata. Se la luce del *dye-laser* invece di essere continua, come comunemente si pensava, fosse per qualche motivo modulata in ampiezza sarebbe potuto succedere che, casualmente, fosse stata ripetuta la primitiva esperienza di Bell e Bloom usando un fascio laser invece di una lampada. Dati i deboli campi magnetici che si usavano, la frequenza non avrebbe dovuto superare il megaHertz per cui anche una semplice fotocella ed un oscillografo sarebbero bastati per rivelare la modulazione.

La mattina seguente, riacceso il laser fu subito fatta la prova con un fotodiodo veloce. La risposta fu negativa: nessuna modulazione, che non fosse *noise*, era evidente all'oscillografo. Venne il sospetto che potesse trattarsi di una frequenza al di fuori della banda passante dell'oscillografo. Attaccata la fotocella ad un analizzatore di spettro, apparvero subito, forti, i battimenti tra i modi del laser, il più basso dei quali capitava a 430 MHz. Frequenze così alte richiedevano campi magnetici altissimi per ripetere l'esperienza di Bell e Bloom sulla precessione degli atomi.

Ma... se invece della precessione di tutto l'atomo nel campo magnetico applicato, si fosse trattato solo di precessione dell'elettrone ottico nel campo magnetico del nucleo, cioè di transizioni iperfini dell'atomo, forse la cosa si poteva spiegare facilmente. Occorreva però anche un campo magnetico trasverso mentre le nostre bobine erano state predisposte per avere un campo longitudinale perfettamente parallelo al fascio laser. Ecco perché il fenomeno è apparso solo quando le bobine sono state disallineate!

Immediatamente furono fatte ruotare, di proposito, lentamente, le bobine di pochi gradi, e subito apparve sulla traccia fluorescente del fascio, nitidissima e persistente, una riga nera che seguiva docilmente le variazioni del campo magnetico applicato. In tal modo non solo furono riviste le righe ma anche si trovò il filo conduttore che suggerì le misure da fare sulle transizioni iperfini coinvolte nel fenomeno⁽²⁾.

Nel giugno 1977, in occasione di un convegno della *International School of Quantum Electronics*, tenuto in Versilia, al quale partecipavano Kastler, Chebotaiev, Gibbs, Arecchi, Bonifacio, e molti altri che avevano lavorato a lungo con i laser, Gozzini mi suggerì di tenere una lezione sulla «riga nera». Fu un imprevisto forte stimolo per cercare prove evidenti di quello che avrei dovuto dire. Nelle esperienze fatte con gli sfasamenti dei fasci laser, mi ero formato la convinzione che la luce proveniente dal laser fosse costituita da brevi impulsi, susseguentisi a ritmo costante. Pensavo che provare questo avrebbe facilitato la comprensione della riga nera come effetto alla Bell e Bloom, poiché proprio alla luce impulsata loro due avevano pensato per effettuare l'esperienza sulla precessione degli atomi.

Feci costruire rapidamente in officina dai tecnici Bartalini, Ripoli e Papucci, un interferometro di Michelson con un braccio della lunghezza di un metro, per permettere allo specchio mobile ampi spostamenti. Se la luce era costituita da impulsi, l'interferenza nel Michelson doveva verificarsi solo per opportune distanze degli specchi.

L'esperienza, condotta pochi giorni prima dell'inizio della conferenza, fu subito fortunata. Lo specchio mobile doveva essere spostato proprio delle quantità previste per vedere le frange di interferenza riapparire nitide, dopo che erano sparite per tutte le posizioni intermedie a causa della mancata sovrapposizione degli impulsi riflessi dai due specchi del Michelson. E gli impulsi si succedevano inoltre in sincronia con la prevista precessione dell'elettone attorno al nucleo.

La certezza avuta che la radiazione del *dye-laser* fosse costituita da impulsi rassicurò nello scrivere la lezione da tenere alla Scuola⁽³⁾.

Fortuna volle che alla conferenza fosse presente Scully che in un lavoro di qualche anno prima aveva predetto la naturale tendenza del laser a lavorare in regime impulsato. Si interessò

all'esperienza, la venne a vedere personalmente assieme a Gibbs. Anche se la dimostrazione sperimentale non fu delle migliori per la instabile sintonizzazione del laser, Scully si ricordò della lezione. Negli anni successivi, nel divulgare le sue meditazioni su possibili conseguenze e applicazioni delle *dark resonances*, dette anche quella pubblicità, che noi non avevamo dato, a quel piccolo fenomeno osservato diversi anni prima, in un piccolo laboratorio alla periferia di Pisa.

Bibliografia

- (1) W. E. BELL e A. L. BLOOM, *Optically driven spin precession*, *Phys. Rev. Lett.*, **6** (1961), 280.
- (2) G. ALZETTA, A. GOZZINI, L. MOI e G. ORRIOLS, *An experimental method for the observation of R.F. transitions and laser beat resonances in oriented Na vapour*, *Nuovo Cimento B*, **36** (1976) 5.
- (3) G. ALZETTA, *Magnetic Resonances in Sodium Vapours oriented by a c.w. Dye Laser*, in: *Coherence in Spectroscopy and Modern Physics*, edited by F. T. Arecchi, E. Bonifacio and M. O. Scully (New York, N.Y.) 1978.

Errata Corrige

Nel precedente numero del Nuovo Saggiatore (Vol. 18, 5-6 (2002) p. 36-41) la bibliografia dell'articolo di A. Rubbino, «Evoluzione della Fisica a Catania; isotopi e isotoni per termometri nucleari» contiene alcuni errori; il terzo autore delle citazioni (3), (4), (5) deve essere S. PIRRONE e non E. COSTANZO come erroneamente appare.

Pubblichiamo qui di seguito i 3 riferimenti corretti, scusandoci con i lettori.

- (3) S. ALBERGO, S. COSTA, S. PIRRONE and A. RUBBINO, *A possible solution of controversies between measured and expected entropy production in heavy-ion collisions at intermediate energies*. *Nuovo Cimento A*, **98** (1987) 503.
 - (4) S. ALBERGO, S. COSTA, S. PIRRONE and A. RUBBINO, *Search of quantum and fragment decay effects on observable emission yields of isotopically resolved fragments*. *Nuovo Cimento A*, **101** (1989) 815.
 - (5) S. ALBERGO, S. COSTA, S. PIRRONE and A. RUBBINO, *Observed changes of the neutron to proton ratio from the initial to final stage of nuclear reactions. A possible interpretation and some deduced information*. *Nuovo Cimento A*, **102** (1989) 1117; S. ALBERGO, S. COSTA, S. PIRRONE and A. RUBBINO, *Nuovo Cimento A*, **101** (1989) 815.
-