

*Daniel Wolf  
Savin,  
Benjamin J.  
McCall e  
Kate Kirby*

# Fare astrofisica in laboratorio

*Non tutti gli astronomi professionisti esercitano la loro attività scrutando il cielo. Alcuni, lavorando nel chiuso dei laboratori, contribuiscono altrettanto efficacemente a svelare i misteri dell'Universo.*

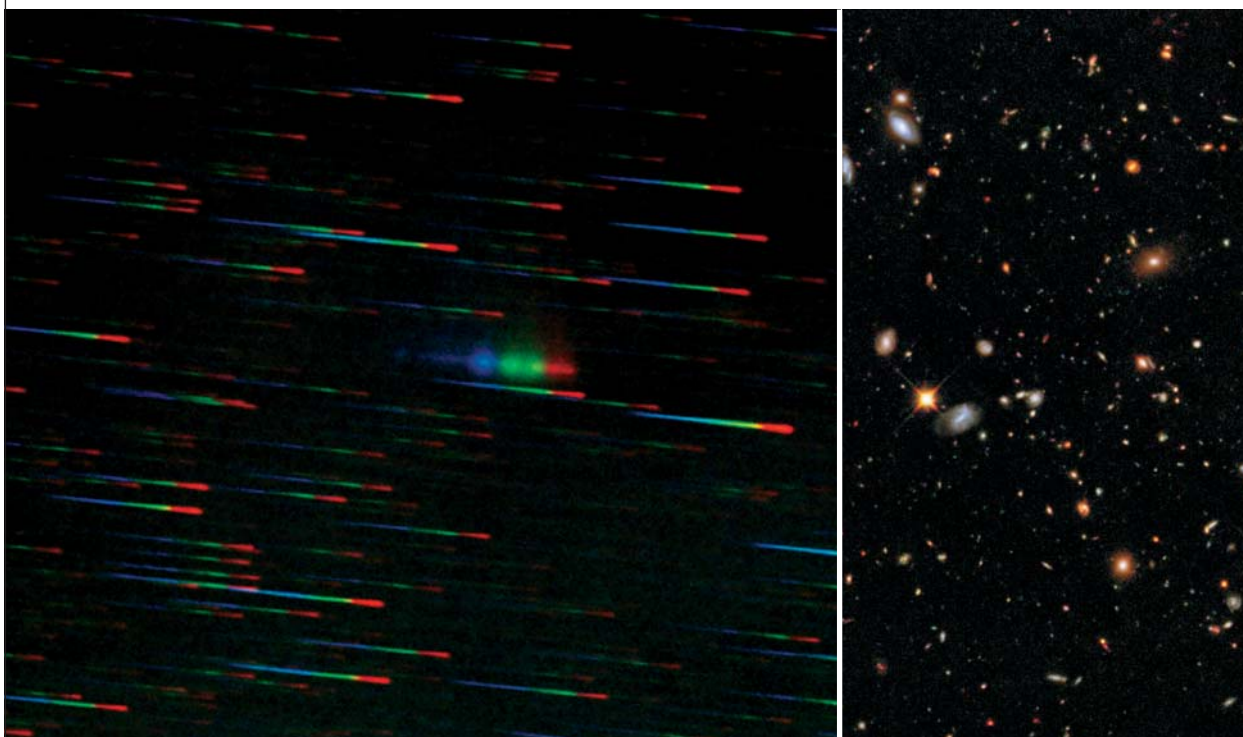
**D**a cosa sono composte le nubi interstellari? Quali sono le proprietà della materia che circonda i buchi neri supermassicci? Perché comete fredde come il ghiaccio emettono raggi X di alta energia? Le risposte a queste domande sono racchiuse negli spettri della luce di questi oggetti. La spettroscopia è infatti lo strumento più potente che abbiamo per esplorare l'Universo al di là del Sistema Solare.

Le leggi della fisica ci dicono che ogni atomo, o molecola, emette o assorbe radiazione a certe lunghezze d'onda caratteristiche. Gli astronomi utilizzano lo spettrometro per scomporre la luce proveniente da una sorgente celeste in tutte le sue componenti cromatiche, esattamente come un prisma disperde la luce solare in un arcobaleno di

colori. Le righe dello spettro risultante possono essere considerate come un'"impronta digitale" unica e inconfondibile, utilizzabile per identificare particolari atomi o molecole.

Da quando Joseph Fraunhofer ottenne il primo spettro del nostro Sole, nel 1814, gli astronomi hanno collaborato con teorici e scienziati di laboratorio per decifrare le informazioni codificate negli spettri cosmici. Il loro lavoro ha favorito innumerevoli avanzamenti in molti campi, tra cui la scoperta dell'elio, la comprensione di quali elementi chimici siano stati prodotti nel Big Bang e la spiegazione dei cicli vitali delle stelle. Ogni spettro cosmico contiene un messaggio: per leggere questo messaggio è richiesta la comprensione dei processi sottostanti, atomici, molecola-

*Molte delle nostre conoscenze sull'Universo vengono dallo studio degli spettri degli oggetti astronomici, stelle (a sinistra), galassie (al centro) e comete (a destra). Per identificare le caratteristiche dello spettro (ottenuto con un prisma obiettivo) del campo stellare mostrato a sinistra (che contiene anche una cometa), gli astronomi devono confrontarlo con spettri di laboratorio di atomi e molecole. Senza questo lavoro d'indagine, le righe di assorbimento e d'emissione rivelate negli spettri degli oggetti celesti sarebbero indecifrabili. (C. Schur; R. Williams/HDF Team/NASA; A. Nagler)*



ri, nucleari e di stato solido, che generano la luce. L'astrofisica di laboratorio è la stele di Rosetta che consente agli astronomi di leggere gli spettri. Questa ricerca comprende lavoro sia teorico che sperimentale, essendo l'uno il necessario riferimento per l'altro. La teoria può esplorare condizioni fisiche troppo estreme per essere riprodotte in laboratorio, mentre gli esperimenti possono misurare certe grandezze che sono troppo complesse da calcolare per via teorica. Senza questo lavoro dietro le quinte, gli astronomi non avrebbero alcuno strumento per interpretare gli spettri delle stelle e degli altri oggetti sparsi nel Cosmo. Esaminiamo alcuni esempi del modo in cui le interazioni tra osservazioni, esperimenti e calcoli stanno permettendo agli scienziati di svelare alcuni dei più oscuri enigmi dell'Universo.

### LE BANDE INTERSTELLARI DIFFUSE

Gli spettri stellari contengono molte righe scure, prodotte principalmente dagli atomi delle atmosfere stellari, che assorbono la luce a specifiche lunghezze d'onda. All'inizio del '900, gli astronomi effettuarono una scoperta sorprendente: alcune di quelle righe di assorbimento erano causate non dalle atmosfere stellari, ma da nubi di gas diffuso interposto tra noi e le stelle. Queste nubi interstellari diffuse sono miliardi di miliardi di volte meno dense dell'atmosfera terrestre, ma sono di così enormi dimensioni che le loro masse totali possano raggiungere quella di 10 mila Soli.

Appoggiandosi al lavoro degli spettroscopisti di laboratorio, gli astronomi hanno identificato alcune di queste righe spettrali come provenienti da atomi, quali sodio, potassio e titanio, e da molecole semplici, tra cui CH, CH<sup>+</sup> e CN. In anni recenti gli scienziati hanno rivelato molecole più complesse, come C<sub>3</sub>, H<sub>3</sub><sup>+</sup> e HCO<sup>+</sup>: dopo tali successi, si potrebbe pensare che ormai la struttura delle nubi sia ben compresa.

Invece no: un numero notevole di bande di assorbimento presenti negli spettri stellari rimane non identificato. Mary Lea Heger osservò le prime due bande nel 1919 al Lick Observatory. Sono strutture più larghe delle altre righe e appaiono sfocate o diffuse negli spettri fotografici, quindi sono state denominate bande interstellari diffuse, o DIB (*diffuse interstellar band*).

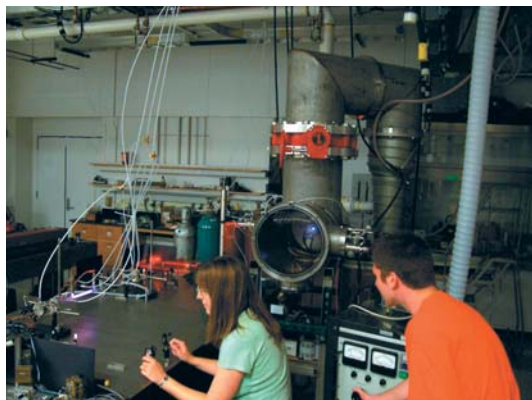
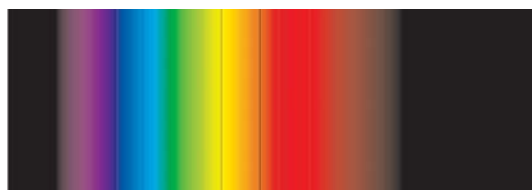
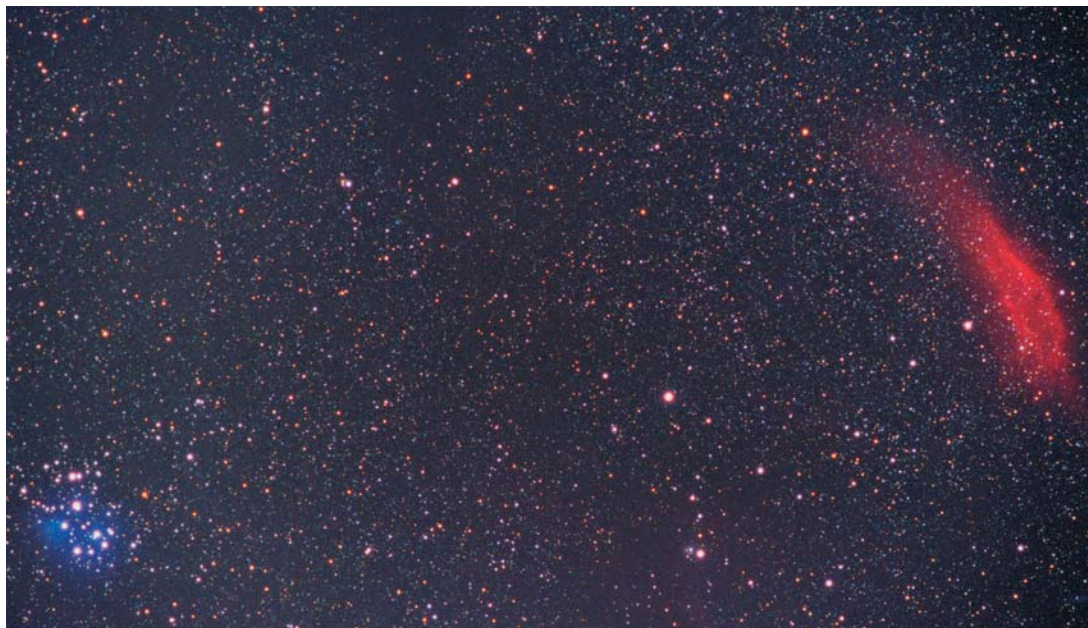
Le osservazioni hanno mostrato che esistono centinaia di DIB, presumibilmente originate da molecole complesse (forse organiche). Ma non abbiamo assolutamente idea di quali siano! È sorprendente che la nostra ignoranza sulle DIB sia durata così a lungo, considerando che a gran parte delle domande che gli astronomi si ponevano ottant'anni fa è stata già data risposta da molto tempo.

Risolvere il mistero è concettualmente semplice: gli scienziati fanno l'ipotesi che una certa molecola possa essere responsabile di una banda interstellare diffusa, ne ottengono lo spettro di laboratorio e verificano se coincide con le DIB osservate negli spettri stellari. Le ipotesi devono





Quando un campo stellare appare più rosso di quanto dovrebbe, come in questo caso, gli astronomi capiscono che l'arrossamento della luce è opera di gas e polveri interposte. Gli spettri stellari, in campi come questo, mostrano centinaia di righe di assorbimento, alcune delle quali prodotte da nubi interstellari. Queste particolari strutture spettrali, chiamate bande interstellari diffuse (DIB), sono ancora poco comprese. All'Università dell'Illinois, i colleghi di B. McCall, coautore di questo articolo, studiano lo spettro di laboratorio del  $C_{60}^+$ , che è ritenuto una possibile sorgente di alcune DIB. Lo spettro nell'immagine mostra come appare una DIB senza la "contaminazione" di righe di assorbimento stellari o atmosferiche. (J. Fernandez Garcia; B. McCall/Univ. of Illinois)



basarsi sulle conoscenze limitate che abbiamo delle condizioni fisiche e chimiche che regnano nelle nubi interstellari diffuse, come pure su ogni altra informazione che possa essere raccolta o calcolata relativamente allo spettro di una molecola. Non è facile indovinare subito l'ipotesi corretta: e per ogni congettura si devono produrre in laboratorio condizioni simili a quelle interstellari. Uno dei gruppi che analizzano gli spettri di potenziali candidati per le DIB è quello di uno degli autori di questo articolo, Benjamin McCall, all'Università dell'Illinois. Tale gruppo sta cercando di ottenere lo spettro della molecola ionizzata del fullerene  $C_{60}^+$  (dalla forma di un pallone

da calcio): questa molecola potrebbe essere responsabile di due bande interstellari diffuse osservate nel vicino infrarosso. Per produrre lo ione, i ricercatori riscaldano in un forno il  $C_{60}$  neutro in forma solida fino a  $650\text{ }^\circ\text{C}$ : la sostanza vaporizza generando un gas che, attraverso una sottile feritoia, si espande in una camera a vuoto. L'espansione provoca il raffreddamento delle molecole fino a  $-243\text{ }^\circ\text{C}$ , una temperatura confrontabile con quelle tipiche interstellari. Mentre il gas si espande, una scarica ad alta tensione (come nelle lampade al neon) lo ionizza per produrre il  $C_{60}^+$ .

Per rivelare le righe di assorbimento, il gruppo di McCall utilizza una sofisticata tecnica laser, chiamata spettroscopia a cavità risonante. Due specchi altamente riflettenti rivolti l'uno verso l'altro definiscono una cavità che contiene il potenziale produttore di DIB, nello specifico il  $C_{60}^+$ . Un fascio laser regolabile immesso dalla parte posteriore di uno degli specchi rimbalza avanti e indietro tra di essi, percorrendo diversi chilometri attraverso il gas che si trova nella cavità. I ricercatori possono variare la lunghezza d'onda del fascio laser e misurare come varia il grado di assorbimento della radiazione mentre attraversa il gas, rivelando in tal modo come è strutturato lo spettro di assorbimento del possibile produttore di DIB.

Diversi laboratori nel mondo stanno effettuando esperimenti su potenziali molecole interstellari, ma, nonostante l'enorme impegno profuso, finora la ricerca volta a identificare le molecole che originano le bande interstellari diffuse non ha prodotto risultati sostanziali.

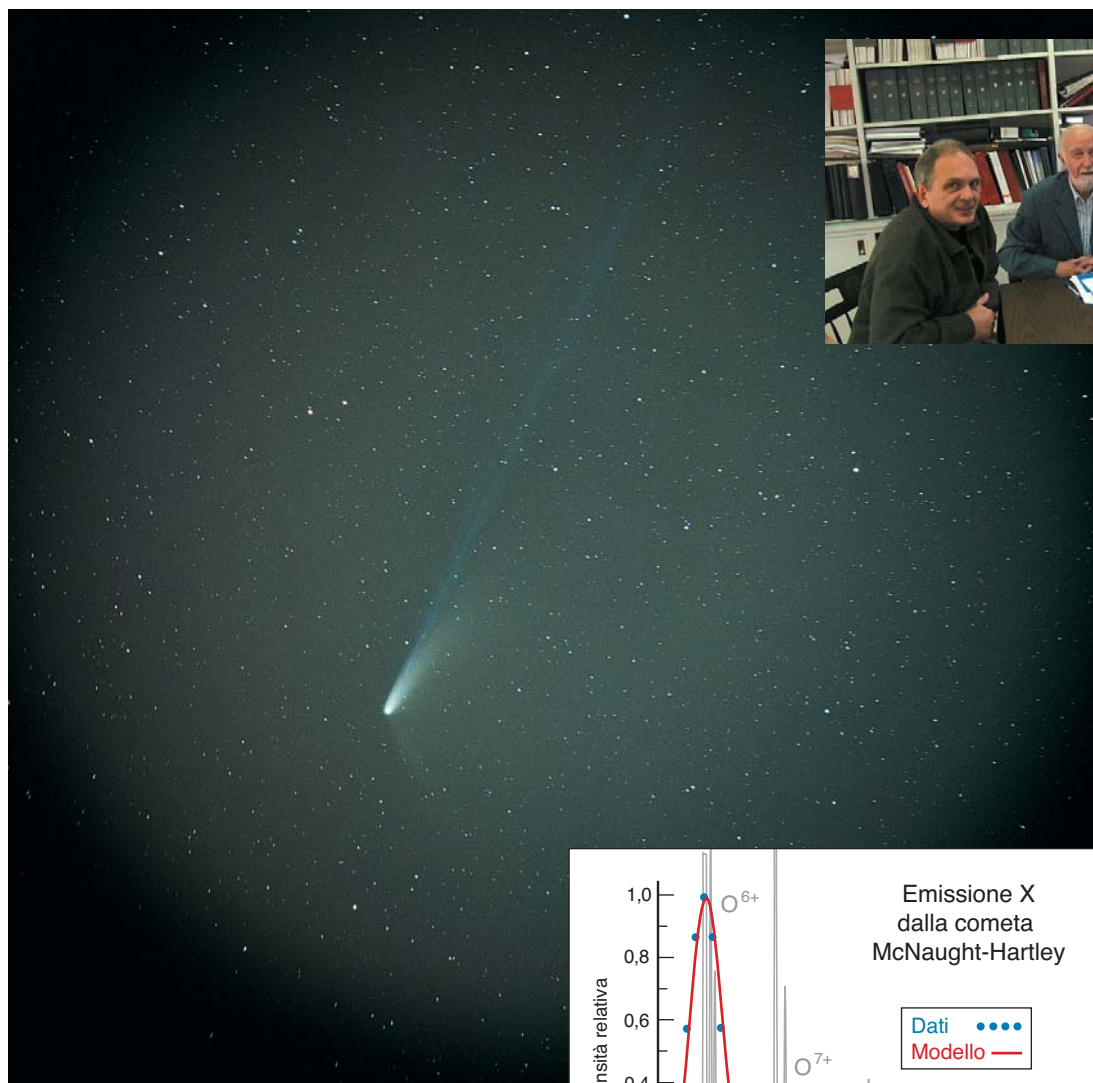
## RAGGI X COMETARI

Il fascino dell'astronomia sta anche nella frequente scoperta di fenomeni imprevisi. Per esempio, sappiamo fin dagli anni '50 che le comete sono oggetti fatti di ghiaccio e polveri in orbita intorno al Sole, che noi vediamo in virtù del fatto che riflettono la luce solare. Nessuno si aspettava che oggetti così freddi emettessero raggi X di alta energia. Invece, questo è proprio quanto Carey Lisse (Università Johns Hopkins) e i suoi collaboratori scoprirono nel 1996, quando il satellite ROSAT rivelò la radiazione X proveniente dalla cometa Hyakutake nel corso del suo passaggio vicino al Sole. Da allora gli astronomi

era molto più intensa di quella attribuibile all'eventuale riflessione di raggi X emessi dal Sole.

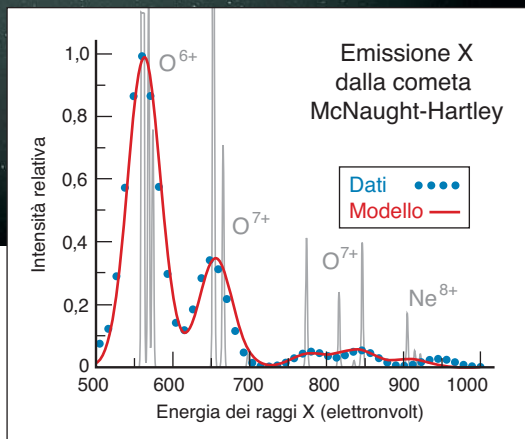
Gli astronomi erano certi che la soluzione del mistero si celava dentro gli spettri X delle comete, ma gli strumenti del ROSAT avevano una scarsa risoluzione spettroscopica e non erano in grado di rilevarli. Utilizzare i dati ROSAT era come cercare di identificare un criminale da un'impronta digitale molto sporca e confusa.

Nel 1997, Tom Cravens (Università del Kansas) suggerì che la causa fosse il vento solare. Esso è composto da elettroni, protoni, particelle alfa e tracce di altri elementi ionizzati come carbonio, azoto e ossigeno, tutti emessi dal Sole. Cravens si rese conto



hanno osservato raggi X emessi da molte altre comete.

L'origine di tale radiazione restò inizialmente un mistero. I raggi X vengono solitamente assorbiti dalla materia ed è quindi difficile che siano diffusi o riflessi; inoltre, l'emissione X cometaria osservata



*Com'è possibile che una gelida cometa come la Hyakutake o la McNaught-Hartley emetta raggi X di alta energia? Interagendo con gli ioni energetici del vento solare. Lavorando su questa ipotesi, gli astrofisici di laboratorio hanno ottenuto un buon accordo tra lo spettro calcolato dal loro modello e quello acquisito dal satellite "Chandra". V. Kharchenko, A. Dalgarno e la coautrice K. Kirby (nella foto) elaborano modelli teorici presso l'Harvard-Smithsonian Institute for Theoretical Atomic, Molecular and Optical Physics. (Akira Fujii; V. Kharchenko et al./APJ)*



che questi ioni avrebbero potuto catturare un elettrone dalle molecole di vapor d'acqua o di anidride carbonica presenti nella chioma di una cometa. Gli elettroni, catturati su orbitali di alta eccitazione, avrebbero potuto emettere i raggi X decadendo su orbitali di più bassa energia, verso lo stato fondamentale.

Poco tempo dopo, Vasili Kharchenko e Alex Dalgarno (Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics) effettuarono calcoli teorici sui possibili spettri X risultanti dal processo di cattura elettronica da parte del vento solare: in pratica, valutarono su quali orbitali gli elettroni potessero essere catturati, in che modo sarebbero potuti decadere su stati energetici più bassi e quali lunghezze d'onda avrebbero dovuto mostrare i raggi X emessi.

Nel 1999, i lanci dei satelliti "Chandra" e XMM-Newton, insieme ai dati di archivio dell'Extreme Ultraviolet Explorer, contribuirono a svelare il mistero. Questi satelliti avevano spettrometri con risoluzione sufficiente a mostrare nitidamente le righe spettrali. Combinando dati empirici e modelli teorici, fu subito chiaro che i raggi X traevano effettivamente origine dal processo di cattura elettronica da parte del vento solare.

La causa era stata individuata. Rimanevano tuttavia differenze importanti tra gli spettri cometari osservati e quelli simulati dai modelli. Una spiegazione poteva essere che i modelli erano carenti; in tal caso, le discrepanze potevano tornare utili per elaborare modelli più sofisticati e potenzialmente più corretti.

Un'altra spiegazione, però, poteva risiedere nell'ineguatezza dei dati atomici di base.

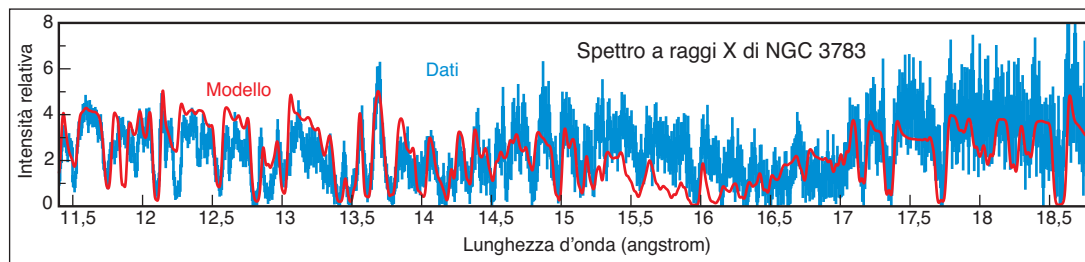
Uno dei gruppi sperimentali che accettò la sfida di verificare i dati atomici di riferimento è quello guidato da Ara Chutjian (Jet Propulsion Laboratory, NASA-Caltech). Gli esperimenti iniziarono con un generatore a microonde, non molto diverso dai forni che usiamo comunemente in cucina, dentro i quali gli ioni vengono portati alle temperature che si stima siano presenti nell'atmosfera solare: è un modo per riprodurre in laboratorio il vento solare.

A questo punto, gli ioni vengono accelerati fino alla velocità tipica del vento solare, diciamo da 300 a 700 km/s. Il fascio risultante attraversa un contenitore di gas contenente acqua o anidride carbonica (due dei principali composti gassosi che evaporano da una cometa). Uno strumento a semiconduttore (germanio) rivela i raggi X creati a seguito del processo di cattura elettronica, fornendo dati preziosi che possono mettere alla prova le teorie e consentono agli astronomi di identificare le righe degli spettri X cometari.

Combinando i calcoli teorici con le misure di laboratorio, gli scienziati hanno elaborato modelli che riproducono ragionevolmente bene gli spettri X delle comete. L'accordo non è ancora perfetto, e rimangono diverse questioni ancora aperte, ma questi metodi inaugurati di recente vengono considerati forieri di nuove scoperte. Per esempio, il meccanismo di cattura elettronica da parte del vento solare

*Buchi neri supermassicci si nascondono nei nuclei delle galassie attive. Molta dell'emissione di alta energia proveniente dagli AGN viene incanalata in getti con direzioni opposte, composti da radiazione e particelle, che producono spettri X estremamente complessi. Un AGN è così luminoso che può superare in splendore le centinaia di miliardi di stelle della galassia che lo ospita. (Casey Reed)*





sembra essere responsabile anche di parte dell'emissione X proveniente da Marte, da Giove e dalla Terra stessa. Il processo, quindi, sembrerebbe più comune di quanto si pensasse e avrebbe luogo un po' dovunque nel Sistema Solare. Con i futuri telescopi a raggi X, con calcoli più accurati e con ulteriori misure di laboratorio, non è escluso che, nel prossimo futuro, gli spettri X cometari possano essere utilizzati per studiare le proprietà del vento solare.

### NUCLEI GALATTICI ATTIVI

L'astrofisica di laboratorio può anche aiutarci a capire la natura dei buchi neri, tra gli oggetti più esotici della natura. I buchi neri incurvano la trama spazio-temporale e generano copiosi raggi X. Le particelle vengono attratte nel vortice gravitazionale del buco nero ed emettono raggi X mentre cadono verso l'interno con un moto a spirale. Il flusso di radiazione investe la materia circostante, strappa gli elettroni dagli atomi e crea un gas di ioni ed elettroni liberi. Per capire l'ambiente intorno a un buco nero si richiede quindi la piena comprensione di come avvengono le interazioni tra elettroni e ioni.

Nei nuclei delle galassie attive, là dove hanno luogo le fenomenologie dei quasar e dei blazar, sono presenti buchi neri super-massicci. La radiazione emessa da questi nuclei galattici attivi (AGN – *Active Galactic Nuclei*) può risultare così intensa ed energetica da superare talvolta il contributo totale delle centinaia di miliardi di stelle della galassia circostante.

Gli Osservatori a raggi X "Chandra" e XMM-Newton hanno fornito agli astronomi indizi importanti sulle condizioni fisiche estreme che si determinano vicino ai "motori" degli AGN. Per esempio, gli spettri raccolti da entrambi i satelliti rivelano la presenza di misteriose strutture nei venti di particelle che emanano dai dintorni del buco nero. Costruire modelli coerenti di questi fenomeni risulta però assai difficile, a causa delle incerte conoscenze che abbiamo sulle proprietà fisiche di queste regioni e sul modo in cui avvengono le collisioni ioni-elettroni che producono gli spettri osservati.

Recenti osservazioni X indicano che nei venti di particelle degli AGN il ferro è meno ionizzato di

quanto si pensasse. La natura, ovviamente, sa bene come determinare il corretto livello di ionizzazione del gas; noi, invece, dobbiamo affidarci a sofisticati modelli di simulazione per cercare di calcolare qual è il giusto equilibrio tra la ionizzazione operata dai raggi X emessi dagli AGN e la ricombinazione ioni-elettroni. Questo equilibrio fissa il livello di ionizzazione medio del gas.

Hagai Netzer (Università di Tel Aviv, Israele) ha suggerito recentemente che del divario tra teoria e osservazioni sia responsabile il tasso teorico di ricombinazione del ferro, che sarebbe troppo basso. Aggiustando un poco verso l'alto questo valore si potrebbero riprodurre meglio i risultati osservativi.

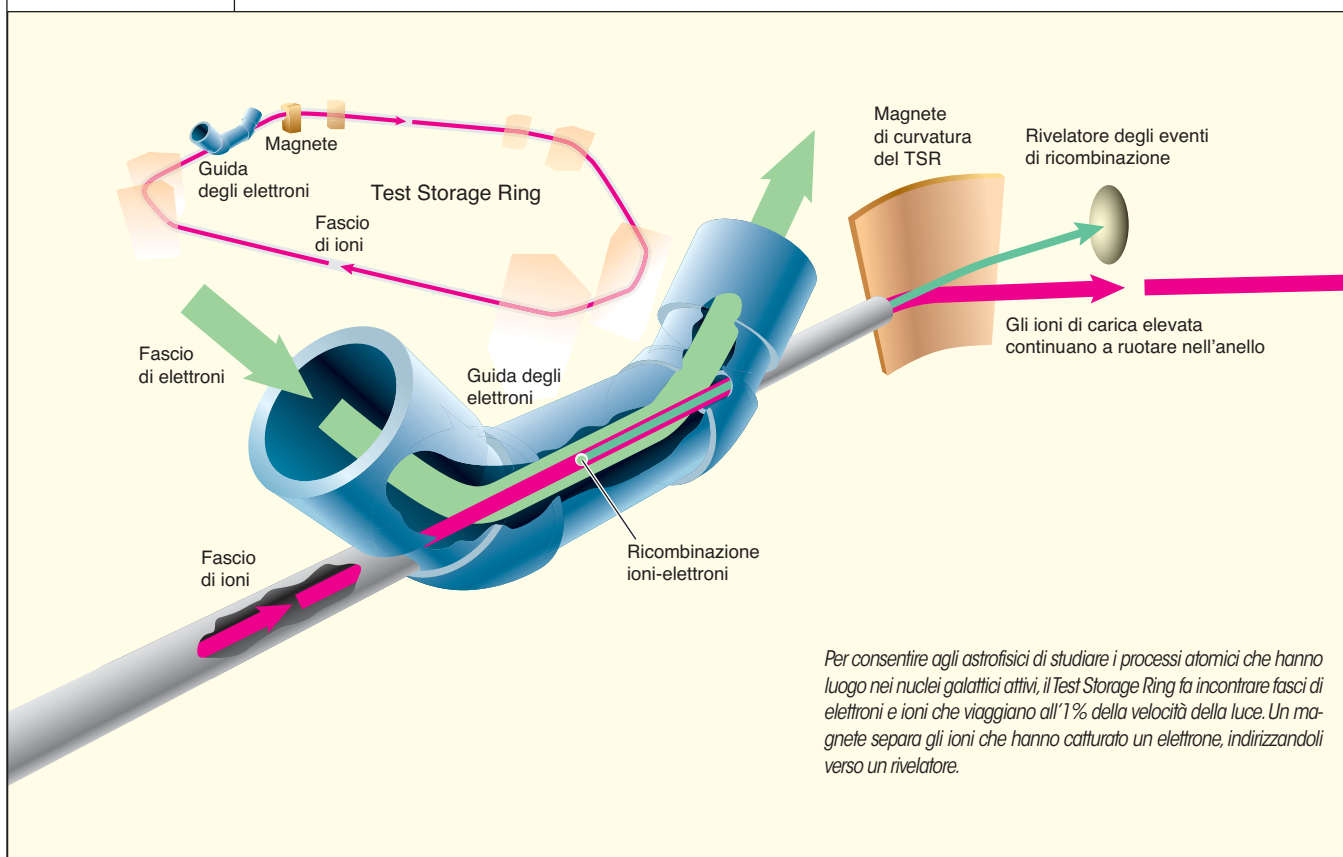
Studi teorici hanno saputo calcolare gran parte dei tassi di ricombinazione. Eppure, più di novant'anni dopo la scoperta della meccanica quantistica, i fisici ancora non sono in grado di descrivere accuratamente molti dei processi di collisione. Questa è una sfida lanciata alla complessità teorica e di calcolo della fisica moderna, ed evidenzia l'importanza di avere precise misure di laboratorio che siano di riferimento per i calcoli dei modelli.

Utilizzando strutture come il Test Storage Ring (TSR) a ioni pesanti del Max Planck Institute for Nuclear Physics (MPI-K) di Heidelberg, in Germania, gli astrofisici di laboratorio possono studiare qui sulla Terra le stesse collisioni che si verificano negli AGN. La ricerca al TSR è frutto di una collaborazione internazionale che com-



*Questo spettro a raggi X del "Chandra" della galassia attiva NGC 3783 è ricco di righe di assorbimento prodotte dall'ossigeno, dal neon, dal magnesio e dal ferro ionizzati. Lo spettro di assorbimento che si osserva (in blu) è ben riprodotto dal modello di laboratorio (in rosso), con l'eccezione della regione sopra i 14,5 angstrom, dove il modello è ancora incerto. (H. Netzer/Tel Aviv Univ.)*

*Il Test Storage Ring del Max Planck Institute for Nuclear Physics di Heidelberg, in Germania, è il laboratorio ideale per simulare le collisioni tra particelle negli AGN. Per studiare la ricombinazione elettrone-ione a bassa energia, gli ioni vengono immessi nell'anello nella zona visibile in basso a destra, e quindi accelerati lungo i 55 m della sua circonferenza. I magneti curvano il fascio e lo focalizzano. Nella piattaforma visibile a sinistra il fascio elettronico si miscchia con gli ioni. (Max Planck Institute for Nuclear Physics)*



Per consentire agli astrofisici di studiare i processi atomici che hanno luogo nei nuclei galattici attivi, il Test Storage Ring fa incontrare fasci di elettroni e ioni che viaggiano all'1% della velocità della luce. Un magnete separa gli ioni che hanno catturato un elettrone, indirizzandoli verso un rivelatore.

prende i gruppi di Andreas Wolf (MPI-K), di Alfred Müller (Università di Giessen, Germania) e di Daniel Wolf Savin (Università di Columbia), coautore di questo articolo.

L'esperimento consiste nell'accelerare un fascio di ioni di ferro, inizialmente con carica negativa, facendolo passare attraverso una lamina sottile. Le collisioni all'interno della lamina sottraggono elettroni, creando un fascio di ioni con carica positiva. Quanti più elettroni vengono strappati via, tanto più elevato è il livello di ionizzazione del ferro.

Il fascio viene quindi immesso nel TSR, che ha una circonferenza di 55 m, e gli ioni sfrecciano dentro l'anello a un centesimo della velocità della luce. In una certa sezione dell'anello essi si mischiano con un fascio di elettroni e si spostano insieme ad essi per circa 1,5 m. In questo breve tratto, i fasci simulano le collisioni ioni-elettroni che avvengono negli AGN.

Utilizzando il TSR, gli scienziati stanno misurando i tassi di ricombinazione ioni-elettroni per gli ioni del ferro. I risultati più recenti indicano che i tassi teorici pubblicati sono effettivamente troppo bassi. Correggendo con questi nuovi dati i modelli, gli astrofisici potranno capire meglio i venti degli AGN e le proprietà della materia che circonda i loro buchi neri centrali.

## IL FUTURO IN QUESTO CAMPO

Ogni generazione assiste a significativi avanzamenti nella risoluzione spaziale e spettrale di nuovi telescopi e rivelatori. Parallelamente a questi progressi, giunge la richiesta di una comprensione sempre più estesa e sempre più precisa dei processi fisici che producono gli spettri osservati.

L'astrofisica di laboratorio è un campo interdisciplinare che abbraccia e attraversa la fisica, la chimica e l'astronomia.

In un certo senso, è a fondamento di gran parte della scienza astronomica. Sfortunatamente, i tagli di bilancio della NASA hanno ridotto drasticamente i fondi, compromettendo questa ricerca trasversale e cruciale.

In futuro ci troveremo ad affrontare ancora molti misteri cosmici, perché la nostra visione dell'Universo va sempre più espandendosi grazie a nuovi Osservatori terrestri e spaziali. Solo se non verranno meno le risorse per l'astrofisica di laboratorio gli astronomi saranno in grado di svelare questi misteri e, comunque, di far fruttare al meglio le proprie osservazioni. ■

Tratto da *Sky & Telescope*. © 2007 Sky Publishing Corp. Traduzione di Ester Giannuzzo ed Emiliano Ricci

### GLI AUTORI

**Daniel Wolf Savin** è un fisico dell'Università della Columbia.

**Benjamin J. McCall** è un chimico e astronomo dell'Università dell'Illinois.

**Kate Kirby** è una fisica teorica dell'Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics.