



Francesco Neve

Dipartimento di Chimica e Tecnologie Chimiche

Università della Calabria

f.neve@unical.it

ELEMENTI NOBILI: UN AGGIORNAMENTO

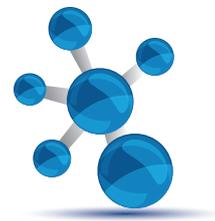
Determinare le caratteristiche degli elementi transattinidi, in particolare di quelli superpesanti, è oggi diventato praticabile abbinando esperimenti su singoli atomi a calcoli teorici sempre più sofisticati e precisi. La frontiera più avanzata di questa ricerca è rappresentata dalla verifica della rottura della periodicità (soprattutto di gruppo) per come è stata finora definita e coniugata. La ricerca attuale sembra concorde nel riconoscere che questa rottura è un tratto caratteristico degli elementi p del 7° periodo, in particolare di quelli con $Z = 112$ (Cn), 114 (Fl), e 118 (Og). Che questo determini un comportamento da gas nobile non è ancora completamente chiaro.

	IE(eV)	EA(eV)
 elio He 2	24,58	-2,70
neon Ne 10	21,57	-4,88
argon Ar 18	15,76	-3,14
cripton Kr 36	14,00	-2,41
xenon Xe 54	12,13	-1,76
radon Rn 86	10,75	-1,27
oganesson Og 118	8,84	+0,06

Nella chimica pre-moderna, e ancora prima nell'alchimia, il termine nobile connotava il comportamento chimico di alcuni metalli come l'oro o il platino, noti per essere riluttanti a dare reazioni chimiche (in particolare di ossidazione). Ma mentre la denominazione di metalli nobili resiste ancora nell'uso generale nell'accezione di elementi dal comportamento opposto a quello dei metalli vili, nella classificazione chimica più accettata i cosiddetti metalli nobili sono circoscritti a otto elementi (Ru, Rh, Pd, Ag, Os, Ir, Pt, Au), che di fatto - e con la sola eccezione dell'argento - rappresentano la quasi totalità dei metalli più rari presenti sulla Terra. Una definizione più adeguata e precisa di metallo nobile andrebbe in ogni caso cercata nella descrizione della struttura elettronica a bande di questi elementi metallici.

Gas nobili

Il termine nobile ha però trovato un'altra, e più duratura, strada per filtrare nella terminologia chimica in abbinamento con altri attributi rivelatisi non particolarmente precisi. "Nobili, inerti e rari", è così che Primo Levi nel primo capitolo de *Il Sistema Periodico* descrive le principali caratteristiche dei suoi antenati di discendenza ebraica in analogia con quel gruppo di elementi chimici che tuttora identifichiamo come *gas nobili* [1]. Ma se la loro rarità è in parte contraddetta dalle evidenze (l'elio è stimato il secondo elemento più abbondante nell'universo conosciuto, l'argon è meno raro sulla Terra di tanti metalli), l'inerzia quasi assoluta è una caratteristica effettiva solo di pochi (Ne, sopra tutti) almeno in condizioni normobariche. Ciò nonostante, il termine inerte



resiste ancora (in abbinamento con nobile) a quasi sessant'anni dai primi successi nella preparazione di composti fluorurati di xenon da parte di Neil Bartlett [2] (a cui Levi nello stesso capitolo *Argon* erroneamente attribuisce un premio Nobel mai assegnatogli) e, ancora prima, dal riconoscimento delle proprietà anestetiche dello xenon indice di capacità di deformarsi e interagire con specifiche molecole biologiche [3]. In un libro apparso recentemente, altrimenti godibilissimo per l'alto livello di scrittura e il cui sottotitolo farebbe pensare ad una storia di questi elementi, la chimica dei gas nobili continua ad essere ignorata, e anzi è considerata completamente assente [4].

Oganesson, l'ultimo arrivato

Nel 2016 la IUPAC ha assegnato il nuovo elemento 118 al gruppo 18 della tavola periodica nel suo attuale formato [5], quello che da più di un secolo continua ad essere il gruppo dei gas nobili. Come tutti sanno, a questo elemento, scoperto nel 2002 da una collaborazione russo-americana [6] dopo i fallimentari e fraudolenti tentativi di Victor Ninov di accreditarsi come lo scopritore nel 1999 [7], è stato dato il nome di Oganesson, in onore di Yuri Oganessian, e il simbolo Og.

Ma se la sua collocazione lascia poco spazio al dubbio, ai chimici interesserebbe molto sapere se Og non è solo formalmente un gas nobile del 7° periodo come da configurazione (nel caso specifico $[\text{Rn}]5f^{14}6d^{10}7s^27p^6$), quanto piuttosto se si comporta fisicamente e chimicamente come tale. In un lavoro recente di Klaus Roth questa domanda è risuonata molto chiaramente nel titolo (*Ist das Element 118 ein Edelgas?*) [8], un'eco di altri interrogativi emersi già vari decenni fa quando i postulati teorici della fisica lasciavano intravedere la possibilità di esistenza di nuclei molto più pesanti di quelli degli attinidi ma ancora non c'era tutta la tecnologia necessaria per poter preparare elementi dal numero atomico ben oltre 100. Infatti, nel 1975 Kenneth Pitzer si chiedeva '*Are elements 112, 114, and 118 relatively inert gases?*' [9], una domanda a cui idealmente cercava di rispondere Clinton Nash trent'anni dopo [10], quando le suggestioni di Pitzer erano diventate ormai oggetto di possibili verifiche sperimentali in seguito allo straordinario

sviluppo nella preparazione degli *elementi superpesanti* (*superheavy elements* o SHEs), quelli con $Z \geq 104$. Occorre però aggiungere che negli anni Settanta Pitzer non era certo il solo a porsi domande di quel tipo (uno su tutti Burkhard Fricke [11]), e che in ogni caso la possibilità di una risposta era affidata a calcoli teorici la cui difficoltà era enormemente aumentata dalla necessità di introdurre gli effetti relativistici nella descrizione della configurazione elettronica degli elementi pesanti e di tutte le proprietà atomiche misurabili.

Che la necessità di considerare gli effetti relativistici per gli elementi del periodo 7 non sia più eludibile è testimoniato dal fatto che le conseguenze degli effetti della relatività sono indispensabili per spiegare peculiarità e singolarità di molti elementi stabili del periodo 6 (Au, Hg, Pb, ecc.). La necessità diventa ancora più impellente se si considera che gli effetti relativistici aumentano con Z^2 e vanno ad impattare tutte le configurazioni incluse quelle a guscio di valenza pieno (*closed-shell*) come nei gas nobili. Come ci spiega molto chiaramente Matthias Schädel in un suo lavoro abbastanza recente [12], gli effetti dell'introduzione dell'approssimazione relativistica (R) sulla classica configurazione di valenza non-relativistica (NR) sono di tre tipi, e sono di entità comparabile.

In generale, il primo effetto relativistico è quello derivante dall'incremento significativo di velocità degli elettroni negli atomi con Z elevato (per contrastare l'enorme attrazione nucleare) e del conseguente aumento del rapporto m/m_0 (dove m è la massa relativistica dell'elettrone e m_0 quella a riposo). Questo rapporto è 1,000027 per l'idrogeno ($Z=1$) ed è previsto a 1,95 per l'oganesson ($Z=118$). La conseguenza più rilevante di questo effetto (noto come *effetto relativistico diretto*) è la contrazione degli orbitali s e $p_{1/2}$ e la loro stabilizzazione (rispetto alla condizione non-relativistica) anche nei livelli più lontani dal nucleo, incluso quello di valenza. Il secondo effetto relativistico (noto come *effetto relativistico indiretto*) riguarda l'espansione degli orbitali d e f , e conseguente loro destabilizzazione. La combinazione dell'effetto relativistico diretto e di quello indiretto porta alcuni elementi del blocco d nel settimo periodo ad avere elettroni $7s$ probabilmente più stabili di quelli $6d$.

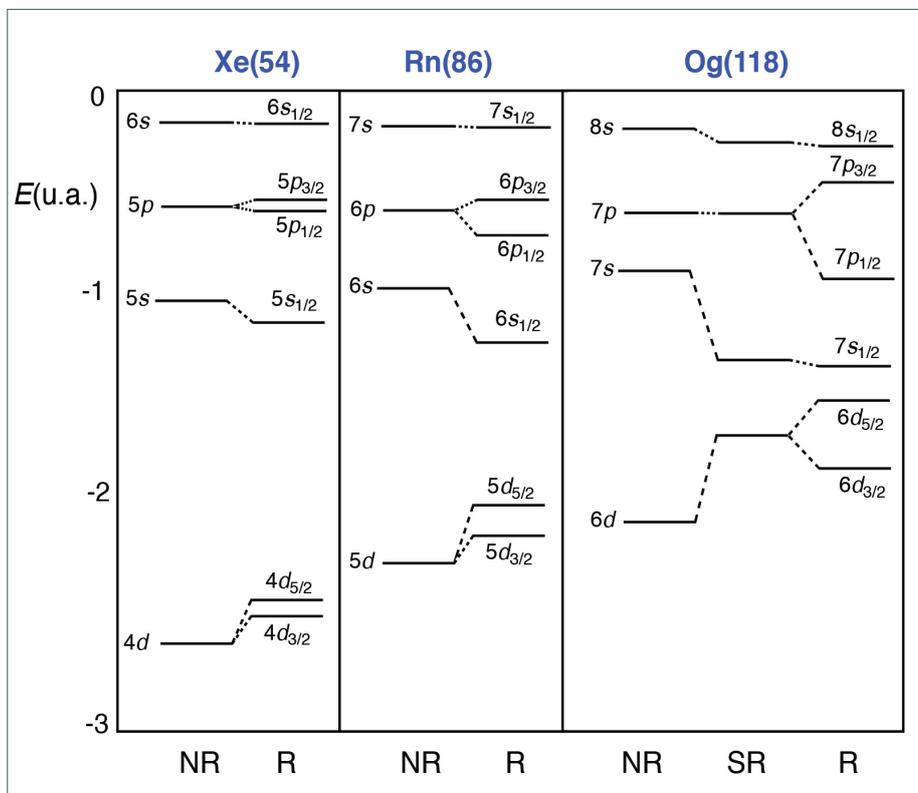


Fig. 1 - Livelli di energia degli orbitali di valenza degli elementi Xe, Rn e Og calcolati a livello Hartree-Fock non-relativistico (NR), scalare-relativistico (SR), e Dirac-Hartree-Fock relativistico (R) (adattata da [13])

Il terzo effetto relativistico (o di Dirac) deriva dallo splitting spin-orbita dei livelli con $l > 0$ (orbitali p , d , f , $g...$) in livelli con $j = l \pm 1/2$. Come si può vedere in Fig. 1, lo splitting spin-orbita negli elementi del gruppo 18 è presente in lieve entità già nel quinto periodo (Xe, $Z=54$), diventa marcato nel sesto (Rn, $Z=86$), e cresce notevolmente nel settimo periodo, concluso proprio da Og. Secondo un calcolo molto recente [13] lo splitting spin-orbita per gli elettroni $7p$ di valenza di Og ammonta a ~ 10 eV, determinando una destabilizzazione complessiva degli elettroni $7p_{3/2}$ nell'approssimazione relativistica. Questo risultato, insieme alla corrispondente contrazione dell'orbitale vuoto a più bassa energia $8s_{1/2}$, potrebbe essere all'origine del valore positivo di affinità elettronica pari a 0,06 eV calcolato per Og [14]. Come già anticipato da Pyykkö [15], l'oganesson dunque, probabilmente anche a causa di effetti di quantizzazione elettrodinamica (QED), sarebbe l'unico tra tutti i gas nobili ad avere un'affinità elettronica, o meglio ad avere un valore di af-

finità di segno opposto a quello degli altri elementi del suo gruppo [16]. Specularmente, il valore calcolato dell'energia di prima ionizzazione (per elettroni $7p_{3/2}$) di soli 8,84 eV [13], un valore molto prossimo a quello di metalli nobili come Ir, Pt e Au, ha fatto pensare all'Og come a un metalloide.

L'oganesson non è un gas

Per la gran parte degli elementi il modello che descrive la distribuzione degli elettroni intorno ai nuclei prevede che questi siano distribuiti in gusci separati da bande di bassa densità elettronica. Tuttavia se il numero degli elettroni cresce è previsto che si passi da una forte localizzazione degli elettroni ad una distribuzione che tende a somigliare a quella di un cosiddetto gas di Thomas-Fermi. Quest'ultimo è un

sistema ideale costituito da un gas di elettroni a densità uniforme associato a un modello quantomeccanico di accoppiamento di fermioni.

Il risultato più importante dei calcoli riportati in [13] è certamente quello di aver ottenuto una conferma del fatto che nel caso dell'oganesson la sua distribuzione elettronica perde la connotazione a gusci per cominciare ad acquisire quella di un gas di Thomas-Fermi (soprattutto nel livello di valenza) (Fig. 2). Il risultato, confermato da altri calcoli sulla struttura del nucleo di Og, ha del clamoroso, e certamente questo rappresenta il primo caso di elemento superpesante in cui c'è evidenza di una transizione dalla struttura a gusci (sia elettronica che nucleare) verso un regime di gas uniforme. Lo studio è ancora più importante se si considera che i risultati ottenuti per l'oganesson confermano che solo il trattamento relativistico mette in evidenza il fenomeno, e che, nel confronto con gli altri gas nobili più leggeri, questa è una peculiarità del solo oganesson.

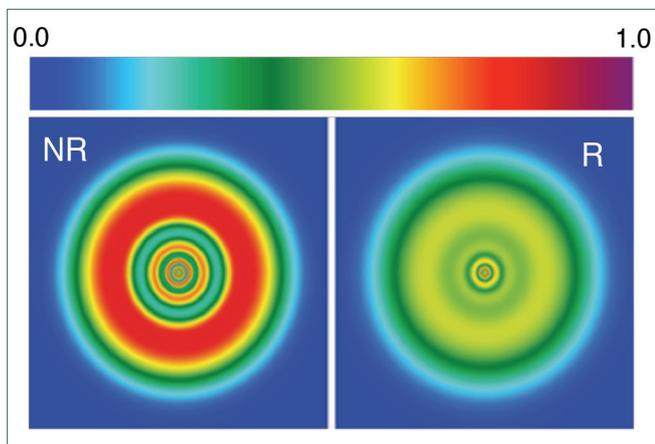


Fig. 2 - Mappe di funzioni di localizzazione degli elettroni (ELF) di Og ottenute mediante calcoli nonrelativistici (a sinistra) e relativistici (a destra) (adattata da Fig. 1 di [13])

Connessa alla difficoltà di confermare una definizione (quella di gas nobile), per l'oganesson c'è una difficoltà ancora più evidente che limita l'ottenimento di informazioni sperimentali. Da quando il primo nucleo dell'elemento è stato ottenuto sparando un proiettile di Ca-48 su un target di Cf-249, si è formato il prodotto di fusione, e la sua natura è stata interpretata attraverso il suo percorso di decadimento a Cn-282 [6], meno di 10 atomi di Og sono stati finora complessivamente prodotti, e nessuno studio è stato possibile a causa del tempo di emivita inferiore al millisecondo per l'unico isotopo osservato (Og-294).

Dunque non restano che i calcoli teorici per analizzare altre caratteristiche dell'oganesson (inclusa la sua capacità di legarsi), e verificare quanto l'elemento sia simile o dissimile dagli altri gas nobili. Ma prima di passare a considerare livelli di legame di ordine superiore (come nel bulk o in veri e propri composti), un terreno di elezione per valutare la capacità di un elemento a legarsi ad altri atomi è quello di considerare dimeri E_2 (dove E è un generico elemento) e ottenere così distanze ed energie di dissociazione del legame. Già i calcoli di Nash prevedevano per Og_2 un'energia di dissociazione di 0,062 eV, decisamente più elevata di quella di Rn_2 (0,016 eV) e prossima a quella di Hg_2 (0,072 eV) [10]. E se calcoli successivi [17] hanno confermato la netta differenza di energia di dissociazione di Og_2 rispetto a Rn_2 (0,078 vs. 0,033 eV), quelli più recenti e più accurati [18] confermano sostanzial-

mente questo dato. Inoltre, nonostante per i valori di raggio sia previsto un andamento crescente nell'ordine $Xe < Rn < Og$, ad una interazione più forte nei dimeri di Og_2 corrisponde effettivamente una distanza calcolata più corta (431 pm) sia rispetto a Rn_2 (446 pm) che a Xe_2 (436 pm).

Per completare la valutazione dell'energia di coesione in una situazione a molti atomi, è stata recentemente calcolata la struttura di banda dei gas nobili nella loro forma solida dal Ne all'Og [19]. Il calcolo ha permesso di confermare il valore sperimentale del *band-gap* dei gas nobili solidi già noti (da Ne a Xe) e di prevedere quello per i solidi sconosciuti di Rn e Og. E se il nuovo valore calcolato per Rn (7,1 eV) è in linea con le variazioni periodiche del gruppo - facendo del Rn solido un isolante alla stregua degli altri congeneri più leggeri - il band gap dell'oganesson di bulk (1,5 eV) non lascia spazio a dubbi: l'Og solido non può che essere un semiconduttore relativistico. A questa previsione si aggiunga l'altra osservazione che mentre il band-gap ottico dei gas-nobili solidi più leggeri (sia quello elettronico E_g che quello ottico O_g) sembra mantenersi molto simile a quello atomico (cioè alla più bassa energia di eccitazione elettronica), nel caso dell'Og (e in misura minore nel caso del Rn) c'è una forte differenza tra stato atomico e stato condensato probabilmente a causa della molto pronunciata polarizzabilità atomica

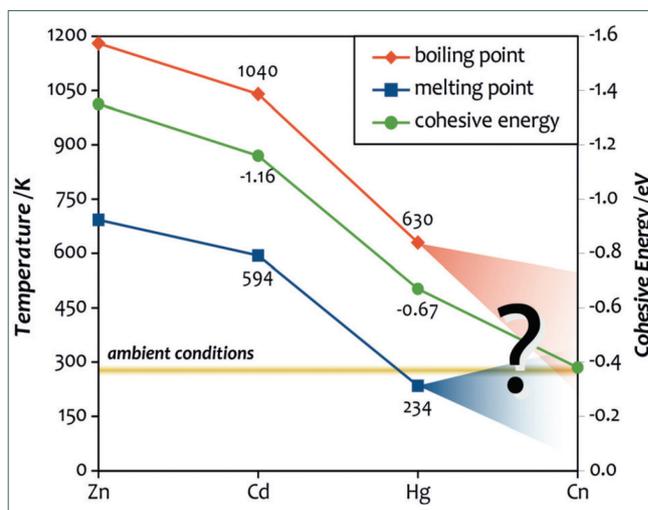


Fig. 3 - Andamento dell'energia di coesione negli elementi del gruppo 12 (Fig. 1 di [20] - Creative Commons Attribution License)

dell'Og e di una marcata delocalizzazione degli eccitoni per effetto relativistico [19].

Ora, mentre sembra profilarsi la conclusione che Og è il meno nobile degli elementi del gruppo 18, è tuttavia presto per dire se Og è un liquido volatile a T e P ordinarie (come ipotizzato da Pitzer nel 1975), o addirittura un solido come

sembrano suggerire gli studi teorici più recenti [13, 18, 19]. Ma forse è meglio tornare indietro e occuparsi prima di copernicio.

Copernicio: un liquido nobile?

Il copernicio (Cn, $Z=112$), ultimo elemento assegnato al gruppo 12 (Zn, Cd, Hg) con configurazione *closed-shell* [Rn]5f¹⁴6d¹⁰7s², è anche uno dei più stabili tra gli elementi superpesanti. Infatti, un $t_{1/2}$ di 29 s per l'isotopo Cn-285 rende possibili esperimenti su singoli atomi di Cn (*atom-at-a-time*), i quali vengono prodotti negli esperimenti di fusione e poi rapidamente testati per determinarne le proprietà periodiche.

D'altronde, se si guardasse alle caratteristiche degli elementi di questo gruppo (dove già si registrano importanti effetti relativistici che spiegano lo stato liquido del mercurio a T ambiente) senza considerare la correzione relativistica, difficilmente si potrebbero prevedere correttamente le caratteristiche fisiche di Cn. Nello specifico, gli studi più recenti [20] cominciano a fare luce su una situazione molto particolare per Cn, determinata principalmente dal contributo scalare-relativistico (e poco dagli effetti spin-orbita). Il fattore più importante sembra essere la contrazione dell'orbitale 7s e, in misura minore, la destabilizzazione degli orbitali 6d_{5/2}, con possibile inversione dell'energia di questi due livelli di valenza. La conseguenza prevista è un maggiore carattere d dell'elemento (rispetto agli altri elementi nel gruppo) e della sua chimica.

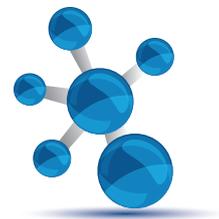
Ma la conseguenza più importante per Cn degli effetti relativistici complessivi sembra risiedere nel

gruppo 12		gruppo 14				Gas Nobili gruppo 18	
5d ¹⁰ 6s ²		6s ² 6p ²				6s ² 6p ⁶	
mercurio Hg 80		piombo Pb 82				radon Rn 86	
copernicio Cn 112	nihonio Nh 113	flerovio Fl 114	moscovio Mc 115	livermorio Lv 116	tennesso Ts 117	oganesson Og 118	
6d _{3/2} ⁴ 6d _{5/2} ⁶ 7s _{1/2} ²		7s _{1/2} ² 7p _{1/2} ²				7s _{1/2} ² 7p _{1/2} ² 7p _{3/2} ⁴	

Fig. 4

basso valore della sua energia di coesione che è stata inizialmente stimata da esperimenti di assorbimento di singoli atomi di Cn su una superficie di oro [21]. L'aspettativa era che un'eventuale interazione intermetallica, indicativa del carattere metallico di Cn, sarebbe stata facilmente distinguibile dal più debole fenomeno di adsorbimento fisico. Gli esperimenti hanno messo chiaramente in evidenza il debole adsorbimento sulla superficie di Au, confermando il previsto significativo aumento di inerzia di Cn. Calcoli DFT successivi [20] hanno confermato che l'energia di coesione di Cn ($E_{\text{coh}} = -0,38$ eV) risulta essere notevolmente inferiore sia a quella di Hg (-0,67 eV) che di Zn (-1,16 eV), e molto diversa da quella calcolata (-1,33 eV) nel limite nonrelativistico. È singolare però che il valore per Cn risulti anche più piccolo di quello calcolato per Og (-0,45 eV), considerato un candidato gas-nobile, e non molto più grande di quello del Rn (-0,23 eV) che è un gas-nobile effettivo [20]. Basterebbe solo questo per cominciare a considerare Cn alla stregua di un gas-nobile, come peraltro previsto da Pitzer [9].

Un'ulteriore conferma della peculiare situazione di Cn deriva dal calcolo della sua struttura di banda elettronica e delle temperature di fusione/ebollizione [20]. Il valore del *band-gap* calcolato (6,4 eV) colloca il Cn solido nel campo degli isolanti, escludendo, quindi, un seppur ridotto carattere metallico previsto da altri calcoli [22], e lo avvicina a quello già citato del Rn (7,1 eV). Per quanto riguarda le temperature di fusione/ebollizione la previsione è appena più sfumata e si attesta a 283 ± 11 K per T_{fus} e 340 ± 10 K per T_{eb} . Ma se i



dati al momento sono compatibili con la probabile natura di liquido volatile del copernicio e meno con quella metallica, molto chiara sembra essere l'origine relativistica del comportamento anomalo dell'elemento più pesante del gruppo 12. I calcoli dei medesimi parametri nel limite nonrelativistico danno risultati tutti molto diversi da quelli sopra illustrati, supportando la previsione di un Cn pienamente metallico e altofondente come un "regolare" membro del gruppo 12 [20].

Concludendo, anche se il carattere inerte e da gas-nobile (*noble gas-like*) dovrà essere confermato attraverso studi sul legame chimico di Cn con elementi elettropositivi ed elettronegativi, lo stato dell'arte attuale sembra suggerire (anche se non tutti sono d'accordo) la presenza di una sorta di "gas-nobile" clandestino nel gruppo 12 (Fig. 4).

Flerovio, l'outsider

Gli elementi nihonio ($Z=113$) e flerovio ($Z=114$) segnano l'inizio degli elementi $7p$ e, a causa dei forti effetti spin-orbita relativistici sugli orbitali $7p$, per questi metalli sono previste caratteristiche di

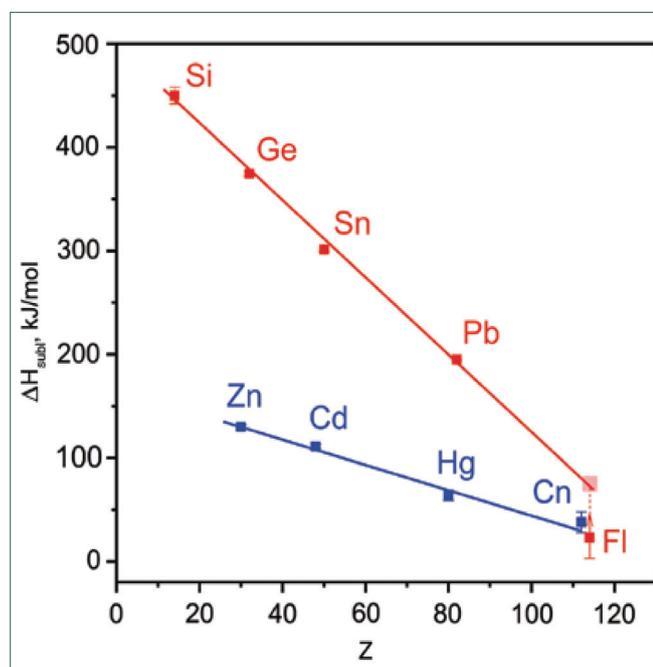


Fig. 5 - La volatilità macroscopica degli elementi del gruppo 12 e 14 può essere stimata a partire dal valore dell'entalpia standard di sublimazione (ΔH_{sub}^0) (adattamento da Fig. 7 di [24]). Le rette indicano il trend periodico suggerito dalla tavola periodica

volatilità più pronunciate rispetto ai loro analoghi di gruppo più leggeri. Ma mentre il nihonio è certamente una specie *open-shell*, nel caso del flerovio si completa il riempimento dello spinore $7p_{1/2}$, (dove $j = l + s = 1/2$), stabilizzato di circa 4 eV rispetto all'altro spinore $7p_{3/2}$ (che rimane vuoto) del sottolivello $7p$. E poiché questa situazione dà origine a una configurazione di valenza *quasi closed-shell* $7s_{1/2}^2 7p_{1/2}^2$ nello stato fondamentale del Fl, sorge spontanea la domanda se questo abbia conseguenze chimiche simili a quelle derivanti dal riempimento completo del livello $7p$ (come nel caso di Og) o $7s$ (come nel caso di Cn). In altri termini, già da molto tempo ci si è cominciati a chiedere se si possa avere rottura della periodicità verticale (di gruppo), e quali conseguenze questo avrebbe sul sistema periodico degli elementi per come lo conosciamo.

La ricerca sul flerovio, supportata dalla più favorevole circostanza dell'esistenza di un nuclide (Fl-289) con tempo di emivita di circa 2 s, ha permesso di stimare volatilità e reattività di questo elemento. In un famoso esperimento di gas-cromatografia il comportamento di Fl è stato studiato simultaneamente a quello di Cn (figlia del decadimento α di Fl) e degli omologhi di gruppo più leggeri Pb e Hg [23]. I risultati sono stati utilizzati per supportare la conclusione che il flerovio è innanzitutto un metallo con una reattività enormemente più modesta di quella del piombo. Per quanto riguarda la volatilità macroscopica del Fl questa è significativamente più alta di quella di Hg secondo alcuni (Fig. 5) ma anche molto simile a quella di Cn [24]. Calcoli teorici recenti hanno confermato per Fl un valore di energia di coesione molto simile a quello di Cn e Og [22].

Conclusioni e prospettive

Complessivamente, i risultati sperimentali presentati e i calcoli teorici più accurati sembrano puntare alla conclusione che Og è un elemento relativamente inerte, eppure sorprendentemente reattivo per un gas-nobile, con una tendenza a legarsi più marcata rispetto a Cn e paragonabile a quella di Fl. Mentre resta da approfondire ulteriormente il ruolo della dispersione (forze di London) nell'adsorbimento e nella stabilizzazione del bulk, ciò che

risulta abbastanza evidente è che gli effetti relativistici sono fattori determinanti per il ruolo anti-periodico che ciascuno di questi elementi esercita nel proprio gruppo di appartenenza contribuendo a rompere la classica periodicità nel 7° periodo. Ciò che oggi non si può dire con sufficiente certezza è quale sarebbe lo stato fisico di questi elementi se riuscissimo ad averne delle quantità sufficienti, né se mai riusciremo a riprodurre (in particolare per Og) la grande varietà di composti dello Xe che vanno da XeF_4 , a $[\text{Xe}_2]^+$ (l'unico composto stabile con un legame Xe-Xe) [25], a $[\text{AuXe}_4]^{2-}$ (un composto in cui Xe è un legante) [26]. Un ulteriore, e decisivo, contributo a una sempre maggiore comprensione degli aspetti fisici e del comportamento chimico degli elementi superpesanti dovrebbe derivare innanzitutto dalla realizzazione di nuovi processi di fusione (possibilmente con ridotta perdita di neutroni) che possano consentire di avvicinarsi alla zona con $N=184$, cioè a quella regione di nuclidi (come Fl-302 e Og-302) considerati molto più stabili e di cui poter disporre per esperimenti oggi largamente inaccessibili [27]. Ma anche per tentare di esplorare ulteriormente i limiti della tavola periodica.

BIBLIOGRAFIA

- [1] P. Levi, *Il sistema periodico*, Einaudi, Torino, 1975.
- [2] C.O. Christe, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2001, **40**, 1419; *Chem. Commun.*, 2013, **49**, 4588.
- [3] S.C. Cullen, E.G. Gross, *Science*, 1951, **113**, 580.
- [4] D.E. Fisher, *Much Ado About (Practically) Nothing. A History of the Noble Gases*, Oxford University Press, New York, 2010.
- [5] L. Ohrstrom, J. Reedijk, *Pure Appl. Chem.*, 2016, **88**, 1225.
- [6] Y.T. Oganessian *et al.*, *Phys. Rev. C*, 2006, **74**, 044602.
- [7] V. Ninov *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **89**, 039901.
- [8] K. Roth, *Chem. Unserer Zeit*, 2017, **51**, 418.
- [9] K.S.J. Pitzer, *Chem. Phys.*, 1975, **63**, 1032.
- [10] C.S. Nash, *J. Phys. Chem. A*, 2005, **109**, 3493.
- [11] B. Fricke, *Struct. Bonding*, 1975, **21**, 89.
- [12] M. Schädel, *Phil. Trans. Royal Soc. A*, 2015, **373**, 20140191.
- [13] P. Jerabek *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 2018, **120**, 053001.
- [14] E. Eliav *et al.*, *Nucl. Phys.*, 2015, **A944**, 518.
- [15] E. Eliav *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **77**, 5350.
- [16] J. Furtado *et al.*, *J. Phys. Chem. A*, 2015, **119**, 1339.
- [17] A. Shee, *et al.*, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2015, **17**, 10978.
- [18] P. Jerabek *et al.*, *J. Phys. Chem. A*, 2019, **123**, 4201.
- [19] J.-M. Mewes *et al.*, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2019, **58**, 14260.
- [20] J.-M. Mewes *et al.*, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2019, **58**, 17964, articolo open access a <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/anie.201906966>
- [21] R. Eichler *et al.*, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2008, **47**, 3262.
- [22] L. Trombach *et al.*, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2019, **21**, 18048.
- [23] A. Yakushev *et al.*, *Inorg. Chem.*, 2014, **53**, 1624.
- [24] R. Eichler, *Radiochim. Acta*, 2019, **107**, 865.
- [25] T. Drews, K. Seppelt, *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, 1997, **36**, 273.
- [26] S. Seidel, K. Seppelt, *Science*, 2000, **290**, 117.
- [27] S.A. Giuliani *et al.*, *Rev. Mod. Phys.*, 2019, **91**, 011001.

Noble Gas-Like Elements. An update

Atom-by-atom experiments coupled to increasingly sophisticated and more reliable theoretical calculations are making feasible the study of the fundamental properties of superheavy elements. Cutting-edge research is thus contributing to answer old questions about periodic trends and noble gas-like character of some s and p elements across the 7th period. The emerging picture is one that certifies the breaking of periodicity we used to know, especially for those elements such as Cn ($Z = 112$), Fl ($Z = 114$), and Og ($Z = 118$).