Rendiconti
Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL
Memorie e Rendiconti di Chimica, Fisica, Matematica e Scienze Naturali
140° (2022), Vol. III, fasc. 1, pp. 97-103
ISSN 0392-4130 • ISBN 978-88-98075-51-5

La sicurezza nell'industria chimica passa anche attraverso la sua storia: il caso dell'oro fulminante

IACOPO CIABATTI

TCA|Precious Metal Refining, Capolona, Arezzo.
E.mail: i.ciabatti@tcaspa.com

Abstract – This account is focused on the historical development concerning the synthesis and characterization of fulminating gold with a particular attention on its explosive properties. Despite the huge development of the spectroscopic and crystallographic techniques of the last decades, its fully characterization remains an illusion. Even today, the unconscious fulminating gold synthesis represents the cause of industrial and laboratory accidents.

Keywords: fulminating gold, explosive properties, risk assessment, gold nanoparticles

Riassunto – Tramite questo contributo vengono ripercorse le tappe storiche concernenti la sintesi e la caratterizzazione dell'oro fulminante rivolgendo particolare attenzione alle sue proprietà detonanti. Nonostante le rilevanti evoluzioni delle tecniche spettroscopiche e cristallografiche registrate negli ultimi decenni, la sua completa caratterizzazione strutturale rimane una chimera. Ancora oggi l'inconsapevole sintesi di questo prodotto rappresenta la causa di gravi incidenti sia su scala di laboratorio che industriale.

Parole chiave: oro fulminante, proprietà esplosive, valutazione del rischio, nanoparticelle d'oro

Fra i temi sociali che interessano l'industria chimica vi è quello del complicato equilibrio fra produzione, tutela della sicurezza dei lavoratori e salvaguardia dell'ambiente. Nel corso della storia, l'opinione pubblica inerente alla chimica ha registrato fasi altalenanti di gradimento, passando attraverso periodi di grande popolarità a cui si sono susseguiti momenti di disaffezione. I disastri ambientali come quello di Seveso rappresentano paradigmi negativi della sicurezza degli impianti chimici attraverso i quali sono stati portati alla luce gli inerenti limiti di conoscenza ed esperienza. Di contro a quelli che sono stati gli effetti sull'opinione pubblica, questi eventi rappresentano delle vere e proprie pietre miliari per la cultura della sicurezza chimica, attraverso la quale la comunità scientifica si è nuovamente messa in discussione imponendosi nuove regole e limitazioni.

Questo percorso di crescita rappresenta un patrimonio prezioso che non sempre è stato adeguatamente utilizzato. Ne sono un esempio alcune di quelle

reazioni che portano alla sintesi indiretta o involontaria di prodotti, generalmente di nessun interesse industriale, le cui informazioni concernenti la sicurezza non sono univocamente relazionabili. La storia inerente agli incidenti legati alla sintesi e caratterizzazione dell'oro fulminante, verificatosi sia su scala di laboratorio che industriale, rappresenta un emblema di questa categoria.

Sintesi dell'oro fulminante: il grande contributo degli alchimisti tedeschi del XVI-XVII secolo

La prima citazione dell'oro fulminante (*aurum fulminans*) apparsa in letteratura è avvenuta per opera dell'alchimista tedesco *Sebald Schwaertzer* (1552-1598) nel manoscritto *Chrysopoeia Scwertzeriana* risalente al 1585 [13]. Nel testo, *Schwaertzer* fa riferimento al monaco benedettino *Basilius Valentinus*[1] del XV secolo, i cui testi alchemici, pubblicati solo nel 1590 da *Johan Thölde*, riportano una preparativa semplificata dell'oro fulminante. Non è quindi possibile sapere con certezza se e chi dei due si sia ispirato all'altro [15].

La procedura proposta da *Schwaertzer* [14] si apre con la descrizione concernente l'affinazione dell'oro il quale, dopo solubilizzazione, viene precipitato mediante sua riduzione allo stato elementare. La dissoluzione viene condotta utilizzando cloruro di ammonio (*salmiac*) in ragione di una volta la quantità del peso del metallo coinvolta. Tale dose è 0,92 volte inferiore a quella ricavata ammettendo la sola formazione dell'acido tetracloroaurico:

$$Au + 4NH_4Cl + 5HNO_3 \rightarrow HAuCl_4 + NO + 2H_2O + 4NH_4NO_3$$

L'utilizzo del cloruro di ammonio in alternativa a quello dell'acido cloridrico rappresentava una soluzione di uso comune nelle formulazioni di quel periodo ma, nonostante la cosa possa risultare di poco rilievo ai fine della dissoluzione dell'oro, questa scelta costituisce la chiave per la successiva sintesi dell'oro fulminante. Al fine di verificare se tale quantità di cloruro di ammonio fosse sufficiente a garantire la completa dissoluzione dell'oro, ho condotto uno studio incentrato su attacchi che coinvolgono un eccesso di acido nitrico a differenti concentrazioni[2] verificando gli andamenti con e senza riscaldamento della soluzione. Conducendo tali prove è emerso che, in contrapposizione a quanto denunciato da *Schwaertzer*, occorre garantire almeno un eccesso stechiometrico del 5% per ottenere la completa dissoluzione del metallo.

Per quanto concerne la riduzione dell'oro, *Schwaertzer* indica l'impiego di un solfato misto a base di ferro ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) e rame ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$) fornendo una dose di massima la cui aggiunta, nella fase finale, può essere parzializzata al termine della formazione di opalescenza corpuscolare.[3] Questo primo ciclo di lavorazione rappresenta a tutti gli effetti un trattamento di affinazione dell'oro al termine del quale viene maturata una perdita di peso.[4] L'acidità della soluzione contenente acido tetracloroaurico, derivante dalla successiva dissoluzione della spugna d'oro, viene ridotta attraverso due cicli di concentrazione per evaporazione seguiti dalle rispettive diluizioni con acqua.[5] A conclusione di questo trattamento intermedio, si prosegue con la precipitazione dell'oro fulminante mediante l'aggiunta di una soluzione concentrata di carbonato di potassio (*oleo tartari*). L'intera procedura dura quattro giorni sebbene la sintesi vera e propria venga condotta solo alla fine.

A differenza di quanto proposto da *Schwaertzer*, la ricetta di *Valentinus*, come quelle di altri autori che seguiranno del corso della storia, non coinvolge la riduzione dell'oro quale trattamento preliminare di lavorazione. Tra questi è da ricordare il contributo di *Oswald Croll* (1563-1609) che, nella sua opera magna *Basilica Chymi-*

[1] L'esistenza di Basile Valantine non è certa e il nome, probabilmente, è uno pseudonimo utilizzato da Johan Thölde.

[2] *Schwaertzer* indica un utilizzo dell'acido nitrico (*aquafort*) in dose doppia rispetto al peso dell'oro. A differenza dell'ammonio cloruro la comparazione di questa dose con quella stechiometrica risulta essere meno lineare, in primo luogo perché non è dichiarato il titolo dell'acido inoltre, la reazione che porta alla formazione di NO non è l'unica coinvolta. Si devono quindi prendere in considerazione i contributi pesati delle altre reazioni che portano alla formazione di ossido di azoto con stati di valenza differenti (*e.g.* NO_2) i quali incidono sull'alterazione del rapporto stechiometrico tra l'acido nitrico e l'oro.

[3] Si noti che l'effettivo agente riducente è lo ione Fe(II) che si ossida a Fe(III). L'opalescenza corpuscolare è dovuta all'effetto *Tyndall* e il suo termine si osserva a fine reazione, in concomitanza con la mancata nucleazione di nuovi grani d'oro e alla coagulazione di quelli precedentemente formati.

[4] Sebbene non del tutto chiaro, tale perdita di peso è ascrivibile all'eliminazione dei contaminanti presenti nella lega aurifera sottoposta ad affinazione e non ad un calo di lavorazione intrinseco del trattamento. In quest'ultimo caso infatti la maggior passività a cui si può incorrere è dovuta ad una riduzione non quantitativa dell'oro difficilmente verificabile per mano di una persona con una minima base di esperienza.

[5] *Schwaertzer* giustamente sottolinea l'importanza di non ridurre eccessivamente il volume della soluzione terminando l'evaporazione nel momento in cui la soluzione ha raggiunto la consistenza di una glassa. Infatti, come deducibile dal diagramma di *Pourbaix* [6], l'eccessiva riduzione sia dell'acidità residua che della concentrazione di cloruri inducono il transito di stabilità dalla zona dello ione $[AuCl_4]^-$ a quella dell'oro metallico.

ca [3], fornisce una descrizione dettagliata concernente la preparazione dell'oro fulminante sottolineando l'elevata suscettibilità del composto ad assumere regimi di detonazione inducibili per riscaldamento o per semplice contatto. *Croll* giustifica le caratteristiche detonanti dell'oro fulminante mediante una visione antropomorfica dovuta all'"avversione" del cloruro di ammonio al carbonato di potassio, così come, secondo lo stesso principio, era riconosciuto avvenire tra zolfo e salnitro nel caso della polvere da sparo. Questo concetto è stato condiviso anche da altri alchimisti come *Johannes Hartmann* (1658-1631) il quale, nella sua opera *Praxis Chymiatriae* [9], ascrive invece la *causa fulminis* al solo contributo dell'oro, dell'acido nitrico e del carbonato di potassio non imputando, erroneamente, alcun ruolo al cloruro d'ammonio. Successivamente, *Johann Kunckel von Löwenstern* (1630-1703), riconosce l'utilizzo del cloruro d'ammonio come *conditio sine qua non* ma solo in riferimento alla ricetta di *Schwaertzer* [15]. Lo stesso autore indica infatti come, nel caso in cui la dissoluzione dell'oro venga condotta in acqua regia, sostituendo quindi l'acido cloridrico al cloruro di ammonio, la precipitazione del fulminato di oro può essere garantita utilizzando un'altra fonte ammoniacale quale *spiritus urinae*, sostanza costituita, almeno in larga misura, da carbonato di ammonio.

Dopo il periodo alchemico, gli studi concernenti l'oro fulminante proseguirono incentrandosi principalmente sulla sua caratterizzazione chimico-fisica a discapito dell'ottimizzazione della sua sintesi. In effetti, la semplicità delle ricette già proposte in concomitanza con le rese quantitative a partire da reagenti a loro volta facilmente sintetizzabili rappresentarono un disincentivo di studio. Vanno comunque segnalate le introduzioni di alcune accortezze di sintesi soprattutto in fase di purificazione del prodotto grezzo, prima fra tutte il lavaggio con acqua bollente o con soluzioni contenenti alcali [12]. Oggi, sono molteplici le vie di sintesi tracciate, attraverso le quali è possibile isolare l'oro fulminante [14]. La più semplice rimane quella condotta attraverso la neutralizzazione diretta dell'acqua regia d'oro con ammoniaca sebbene, come successivamente verrà descritto, porta alla formazione di un prodotto di composizione disomogenea.

Studi di caratterizzazione e reattività

Come già accennato, gli studi di *Croll* non furono incentrati esclusivamente sulla sintesi dell'oro fulminante ma anche sulla sua reattività. *Croll* osservò la "solubilizzazione" e conseguente inertizzazione dell'oro fulminante in acido cloridrico (*aqua Salis*) sebbene, più propriamente, quella descritta dall'autore fosse una trasformazione chimica che porta alla formazione di $HAuCl_4$. La carenza di fondamenti necessari per distinguere l'alterazione dello stato fisico di una sostanza ad una vera trasformazione chimica è una mancanza caratteristica del periodo alchemico. A tal riguardo, anche *Valentinus* suggerisce che è possibile eliminare le caratteristiche esplosive dell'oro fulminante sospendendolo in aceto e mantenendo il riscaldamento per 24 ore [17]. Ancora una volta ci troviamo di fronte alla descrizione di una trasformazione chimica la quale, con molta probabilità, costituisce una decomposizione termica controllata con formazione di nanoaggregati d'oro in accordo con la colorazione rosso sangue del prodotto di formazione. Al contrario, il secondo approccio di *Croll* concernente l'inertizzazione dell'oro fulminante attraverso il suo mescolamento con zolfo, rappresenta un vero e proprio trattamento di inertizzazione. Oltre alla miscelazione con prodotti di natura solida, un'alternativa di simile approccio, era quella di bagnare o sospendere l'oro fulminante in acqua [12].

Ulteriori studi, condotti per opera di altri autori, permisero di osservare come la degradazione dell'oro fulminante poteva essere rallentata al tal punto da non manifestarsi più in maniera esplosiva [12]. Tale risultato poteva essere raggiunto mediante un blando riscaldamento rimanendo abbondantemente sotto la temperatura di innesco, il cui valore si aggira intorno a 200-230 °C [14]. In presenza di "un gran calorico" lo stesso risultato poteva essere ottenuto confinando l'esplosione all'interno di un sistema chiuso, ad esempio ponendo l'oro fulminante all'interno di vaso sigillato.

Gli alchimisti del XVI e XVII secolo credevano che l'onda d'urto provocata dall'esplosione dell'oro fulminante si propagasse solo verso il basso. Il mito fu sfatato solo nel 1659 da *Thomas Willis* (1621-1675) il quale dimostrò la presenza di un'azione isotropica verificando la proiezione di una moneta appoggiata sopra ad una carica di oro fulminante indotta a detonazione [15]. *Croll* fornisce un'idea quantitativa della potenza indicando come il boato prodotto dall'esplosione di uno scrupolo (≈ 1,3 g) di oro fulminante fosse superiore a quello generato da mezza libra di polvere da sparo (≈ 230 g). Un indice "più quantitativo" ci viene fornito da *Robinson* in riferimento ad una prova condotta utilizzando 7 grani (≈ 0,45 g) di oro fulminante posti su di una lastra di rame [12]. L'autore asserisce che la detonazione produsse "*una così grande impressione*" parimente a quella ottenuta da 2,5 libre di ferro (≈ 1,1 Kg) posti in caduta alla velocità di 25 piedi al secondo (≈ 7,6 m/s). In letteratura, anche in quella più recente, non compaiono mai dei veri e propri dati quan-

titativi sulle proprietà detonanti dell'oro fulminante. Tale mancanza è dovuta principalmente alla sua natura eterogenea che induce all'acquisizione di dati sperimentali non riproducibili. Infatti, la determinazione dei parametri analitici che governano tali reazioni dipende in maniera severa dalla purezza del composto esaminato [14].

Nel XIX secolo, i tanti punti interrogativi legati alla composizione dell'oro fulminante attrassero l'attenzione di celebri chimici quali *Dumas*, *Lavoisier*, *Scheele, Bergmann* e *Berzelius.* Non verranno qui ricordati tutti i preziosi contributi di ogni singolo autore i cui meriti sono invece ben distinti negli articoli citati da questo contributo [14, 15]. Per la determinazione della composizione elementare vennero studiati e quantificati i prodotti di decomposizione dell'oro fulminante in forma non esplosiva attraverso la miscelazione con solidi inertizzanti. In particolare, *Jean Baptiste Dumas* (1800-1884), studiando la decomposizione termica dell'oro fulminante con ossido rameico, stabilì che il composto esplosivo era costituito da idrogeno e cloro, oltre che da oro e azoto come già noto. La composizione dell'oro fulminante mostrava però una certa variabilità in parte legata anche alle modalità di sintesi. Di fronte a queste evidenze sperimentali *Friedrich Rasching* (1863-1928) intuì che l'oro fulminante era una miscela di più composti. Secondo il chimico tedesco l'insolubilità dell'oro fulminante in acqua escludeva una sua forma come sale di ammonio, la logica imponeva quindi che l'azoto fosse coordinato all'oro. Concluse che il prodotto era una miscela di NH=Au-Cl e NH=Au-NH_2 dove l'azoto è presente sia in forma di ammidica che immidica. Nel XX secolo la messa a punto di nuove vie di sintesi dell'oro fulminante, alternative a quelle classiche, ha portato alla luce come l'idrolisi di $[Au(NH_3)_4](NO_3)_3$ con cloruri porti alla formazione di un prodotto di composizione omogenea. Sulla base di questa osservazione *Ernst Weitz* (1886-1954) ha erroneamente concluso che la formula molecolare del composto fosse $[Cl(NH_2)Au]_2$-NH. La completa insolubilità dell'oro fulminante in qualsiasi solvente e la sua bassa temperatura di decomposizione rappresentano le due principali aggravanti che non hanno permesso una cristallizzazione, a valle della sintesi, in favore di una risoluzione strutturale. In questi contesti sperimentali un valido modo per tentare di ottenere un cristallo singolo è quello di condurre la reazione di formazione all'interfaccia o attraverso la lenta diffusione di due solventi in cui sono solubilizzati i reagenti. Sfortunatamente questa tecnica non ha portato ai risultati sperati, nonostante la grande evoluzione delle tecniche di diffrazione a raggi X, registrata negli ultimi cinquant'anni, permetta oggi una completa caratterizzazione strutturale di cristalli singoli di modeste dimensioni e qualità. Nuove informazioni strutturali sono invece emerse dalle caratterizzazioni spettroscopiche. Si è concluso che l'oro fulminante è una miscela amorfa di composti polimerici contenenti catione tetraamminico (III) planare quadrato collegati tramite ponti μ-NH_2 e μ_3-NH [14].

Applicazione meteore

L'interesse per l'oro fulminante, risiedeva nel concepirlo come una tappa di sintesi per ottenere potenziali prodotti di interesse. Alcuni di questi tentativi hanno aperto la strada alla scoperta di nuovi trattamenti successivamente scomparsi o che si sono evoluti utilizzando derivati alternativi a base di oro che ne miglioravano la gestione e le prestazioni. Per gli alchimisti l'oro fulminante rappresentava un valido precursore sia per la produzione di *aurum potabile*, utilizzato come medicina in iatrochimica, che per quella inerente all'*aurum volatile* richiesto per ottenere la pietra filosofale. In aggiunta, come è stato discusso nel precedente paragrafo, un altro elemento di fascino era legato alle sue peculiari proprietà chimico-fisiche prima fra tutte l'elevato potere brasante per cui, di fatto, rappresenta il primo composto esplosivo conosciuto dall'umanità. Come osservato da *Croll* l'esplosione dell'oro fulminante provoca la formazione di una nube corpuscolare di colore rosso-viola che oggi sappiamo associare alla formazione di un aerosol di nanoparticelle di oro. Tale fenomeno, caratteristico di una esplosione, è il risultato cinetico della scarsa velocità di accrescimento in favore dell'elevata velocità di nucleazione dei cluster di oro formatesi allo stato gassoso. Nel caso in cui l'esplosione venga condotta in uno spazio confinato o in prossimità di un oggetto di natura metallica questi nanoaggregati, termodinamicamente instabili, coagulano in favore di una deposizione superficiale di oro allo stato massivo. Il chimico tedesco *Johann Rudolf Glauber* (1604-1670) ne intravide un'applicazione per la doratura di oggetti secondo quanto descritto nel suo lavoro *Operum Chymicorum* [8]. Il trattamento consisteva nell'immettere dai 100 a 200 mg di oro fulminante all'interno di un primo contenitore connesso, attraverso un tubo, ad un secondo compartimento in cui invece era presente l'oggetto da dorare (figura 1). A seguito dell'esplosione indotta per riscaldamento nel primo vano la nube rossa si propagava anche nel secondo scompartimento. Come è facile immaginare, la deposi-

Fig. 1. Apparato proposto da Glauber per la placcatura di oggetti mediante detonazione di oro fulminante.

zione dell'oro era tutt'altro che quantitativa poiché oltre all'oggetto anche le pareti dei contenitori erano inevitabilmente coinvolte[6].

Come precedentemente visto, l'opportuna miscelazione dell'oro fulminante con altre sostanze permette di controllare la sua riduzione allo stato metallico senza il manifestarsi di una esplosione. Il pittore *Johann Gregorius Höroldt* (1696-1775), direttore della fabbrica di porcellana di Meissen ne intravide una valenza applicativa che portò alla creazione di un nuovo smalto decorativo rosso porpora. Nel capitolo XI del suo ricettario, *Höroldt* riporta la sintesi dell'oro fulminante, praticamente identica a quella proposta da *Valantine* [17]. Il colore del lustro di Meissen è dovuto alla presenza di nanoparticelle di oro (diffusione di Mie) come nel caso della porpora di Cassio ma, a differenza di quest'ultimo è iridescente, caratteristica che lo rendeva unico. Recentemente è stato dimostrato che la differenza risiede nella dimensione delle nanoparticelle [2]. Infatti, nello strato di sovrasmalto di *Meissen*, la presenza di grandi nanoparticelle d'oro sulla superficie favorisce il fenomeno della diffrazione il quale, dipendendo dall'angolo di incidenza, ne crea un effetto iridescente. Poiché le nanoparticelle d'oro negli smalti con porpora di Cassio sono piccole e di dimensioni uniformi, queste variazioni di diffrazione non esistono e lo smalto ha un aspetto opaco.

È curioso osservare come la prima elettrodeposizione dell'oro, avvenuta per opera di *Luigi Brugnatelli* (1761-1818), utilizzava un bagno elettrolitico derivante dalla neutralizzazione di una soluzione di acqua regia d'oro con eccesso di ammoniaca [10]. La specie chimica realmente coinvolta nell'elettrodeposizione è una miscela di composti cloro-sostituiti di formula $[Au(NH_3)_mCl_n]^{(3-n)+}$ ($m+n = 4$) mentre l'oro fulminante costituisce solo un sottoprodotto di reazione che ha contribuito ad ostaco-

[6] La placcatura a seguito della riduzione istantanea dell'oro fulminante è un trattamento peculiare ma non esclusivo. Infatti, anche altri composti a base di oro possono, in condizioni differenti, essere utilizzati per tale scopo. Un esempio su tutti è il trattamento "*bombing*", ancora oggi utilizzato in oreficeria, in cui la decomposizione dell'oro cianuro presente in soluzione viene indotta per reazione con acqua ossigenata in accordo con la seguente stechiometria:

$$2[Au(CN)_2]^- + 5H_2O_2 + 2OH^- \rightarrow 2Au^0 + 4CNO^- + O_2 + 6H_2O$$

larne lo sviluppo [16]. Nel 1840 *John Wright* (1808-1844) ripropose l'esperimento di *Brugnatelli* utilizzando un bagno elettrolitico a base di oro cianuro con risultati nettamente superiori sia in termini di qualità che affidabilità. Tale trattamento è ancora oggi utilizzato.

Incidenti storici e mancati infortuni

L'analisi storica degli incidenti annessi alla manipolazione dell'oro fulminante può essere divisa in due fasi temporali con caratteristiche contrastanti. La prima fase, come è stato discusso, trova l'oro fulminante spesso al centro dell'interesse di una sintesi, caratterizzazione o funzione applicativa dove il rischio di un'esplosione accidentale era noto agli addetti ai lavori [12]. Nonostante questa consapevolezza del pericolo inerente alla manipolazione dell'oro fulminante, specialmente in forma "pura" ed anidra, gli incidenti non sono mancati. Nel 1809 *Jöns Jackob Berzelius* (1779-1848), nell'intenzione di recuperare il metallo prezioso, rimase coinvolto nell'esplosione di 9 g di oro fulminante ferendolo in molteplici parti del suo corpo, tra cui gli occhi, per cui fu costretto a rimanere per mesi bendato in completa assenza di luce. Analizzando questi aspetti in un contesto di più ampio respiro, è opportuno sottolineare come, nel periodo alchemico e in quello pionieristico chimico dei secoli XVIII e XIX, gli incidenti in fase di laboratorio non rappresentarono di certo un'esclusiva dell'oro fulminante. Il profondo desiderio di comprendere la composizione della materia nonché le legge fisiche che la regolavano, è alla base della diffusa accettazione del rischio che si assumevano gli sperimentatori dell'epoca. Come conseguenza, durante gli innumerevoli esperimenti condotti in questi secoli di grandissimo fermento intellettuale, tanti furono gli incidenti ad essi annessi, alcuni dei quali convolsero anche illustri chimici come *Scheele*, *Faraday*, *Liebig* e *Gay-Lussac* [1]. Per l'oro fulminante, l'aggravante aggiuntiva risiedeva nell'intima relazione che intercorre tra la sua purezza e le sue proprietà chimico-fisiche per cui una variabile di sintesi, a priori considerata trascurabile, poteva avere un effetto ingente sul suo potere brasante. Sebbene tali cambiamenti sperimentali richiedessero che la gestione del rischio passasse da un approccio dettato dalle logiche dell'esperienza ad uno prudenziale, la conoscenza della chimica e la cultura della sicurezza ad essa correlata non erano ancora mature per indurre gli sperimentatori a queste tipologie di considerazioni.

Come è stato analizzato nel testo, nel XX secolo l'interesse per l'oro fulminante si va ad esaurire sia dal punto di vista pratico, vista la sostituzione delle sue applicazioni con composti o tecniche più performanti, che di ricerca accademica salvo limitate eccezioni [11, 14]. Oggi (seconda fase), l'elefantiasi quantità di informazioni che gravitano intorno al mondo della chimica non lascia spazio, neanche a livello di formazione universitaria, a composti dimenticati come l'oro fulminante nonostante la sua indubbia valenza didattica. Per quest'ultimo, tale mancanza alimenta l'inconsapevolezza del rischio di incidenti chimici che, a causa della sua facilità di sintesi, sono tutt'altro che improbabili. Infatti, come è stato discusso, l'utilizzo di reagenti di uso comune (*e.g.* ammoniaca) unito alle blande condizioni di reazione e agli innumerevoli percorsi di sintesi rappresentano i principali fattori che alimentano la probabilità che si verifichi un incidente. Un ulteriore aggravante che gravita intorno all'oro fulminante è dovuta alla sua natura polimerica eterogenea che ne impedisce la classificazione come sostanza chimica. Come conseguenza, la mancata associazione con il numero CAS (Chemical Abstracts Service) non ne permette una identificazione univoca ed immediata.

Recentemente, un timido grido di allarme è stato lanciato da tecnici di settore a seguito di mancati infortuni registrati nell'ambito dell'affinazione chimica nonché della sintesi di nanoparticelle e di catalizzatori a base di oro [7, 4]. Nonostante ciò, ancora oggi nella letteratura scientifica non è una rarità imbattersi in articoli e brevetti che argomentano riguardo a percorsi di sintesi in cui vi è utilizzo di un sale di Au(III) e ammoniaca senza un richiamo che allarmi della possibilità di sintetizzare l'oro fulminante. A conclusione di questo percorso sull'oro fulminante, possiamo sicuramente affermare come la corretta analisi del rischio chimico di una generica reazione, anche la più semplice, non possa non prescindere dalla rigorosa consultazione di manuali specifici dedicati specificamente alla sicurezza.

BIBLIOGRAFIA

[1] CARDILLO Paolo, 2001. Some historical accidental explosions. Journal of Loss Prevention in the process industries, 14, 69-76.

[2] CHARI Celia S. *et al.*, 2022. Nanoscale engineering of gold particles in 18th century Böttger lusters and glazes. PNAS, 119(18), 1-9.

[3] CROLL Oswald, Basilicum Chymicum, edizione postuma di Michaelis J. and Hartmanno G.E., Chouet C., Ginevra, 1658.

[4] CUSUMANO J.A., 1974. Safety in the preparation of multimetallic catalysts, Nature, 247, 456.

[5] FABRIZZI Luigi, 2019. Strange Case of signor Volta and Mister Nicholson: How Electrochemistry Developed as a Consequence of an Editorial Misconduct. Angewandte Chemie International Edition, 58(18), 2-11.

[6] FINKELSTEIN N.P. *et al.*, 1974. A New Approach to the Chemistry of Gold, Gold Bulletin, 7, 72-77.

[7] FISCHER Janet M., 2003. Letter to the Editor, Fulminating Gold, Gold Bulletin, 34(4), 155.

[8] GLAUBER Johann Rudolf, Operum Chymicorum, Bucher und… Francoforte, 1659.

[9] HARTMANN Johannes, Praxis Chymiatriae, edizione postuma di Michaelis J. and Hartmanno G.E., Grossi G., Lipsia, 1633.

[10] HUNT L.B., 1973. The early history of gold plating. Gold Bulletin, 6(1), 16-27.

[11] MACASKIE L.E. *et al.*, 2007. A New Approach for the Recovery of Precious Metals from Solution and From Leachates Derived from Electronic Scrap. Biotechnology and Bioengineering, 96(4), 631-639.

[12] POZZI Giovanni, Dizionario di fisica e chimica applicata alle arti, 1827 Milano editore Fanfani, Tomo VII, 289-294.

[13] SCHWAERTZER Sebal, Chrysopoeia Schwaertzeriana, 1585. Copia pubblicata da Samuel Heil, Amburgo, 1718: https://reader.digitale-sammlungen.de/de/fs1/object/display/bsb10253002 00014.html.

[14] STEINHAUSER Georg *et al.*, 2008. A review on fulminating gold (Knallgold). Gold Bulletin, 41(4), 305-317.

[15] WENTRUP Curt, 2019. Fulminating Gold and Silver. Angewandte Chemie International Edition, 58, 2-11.

[16] WENTRUP Curt, 2019. Nitrogen- and Sulfur-Containing Energetic Compounds. 64 Years of Fascinating Chemistry. Australian Journal of Chemistry 72, 585-594.

[17] ZUMBULYADIS Nicholas, 2014. Decorating with explosives: the use of aurum fulminans as a purple pigment. Bulletin for the History of Chemistry, 39(1), 7-17.