

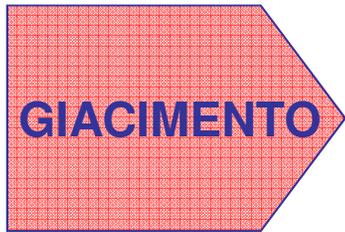
GEOCHIMICA ED ARCHEOLOGIA

Lezione 6

Gianluca Sottili

AA 2022-23

- Prospezioni minerarie
- Estrazione



minerale
grezzo

- Arrostimento dei minerali
- Fusione



metallo
grezzo

- Raffinazione
- Alligazione
- Colatura
- Forgiatura
- Rifusione



Manufatti
metallici

SCORIE

CERAMICA
'TECNICA' (crogioli,
stampi, coppelle, etc.)

LEZIONE DI OGGI

Le leghe metalliche

Il diagramma di fase del bronzo

Dal bronzo arsenicale al bronzo di stagno

Le isole Cassiteridi di Erodoto, le evidenze archeologiche e il paradosso dello stagno

Il problema della tracciabilità geochimica del bronzo: un approccio sperimentale

L'estrazione dell'argento e la coppellazione

L'argento nativo (o “puro”) è una fonte assolutamente marginale nell'estrazione di questo metallo. Di solito l'argento si trova con altri metalli o in minerali che contengono argento.

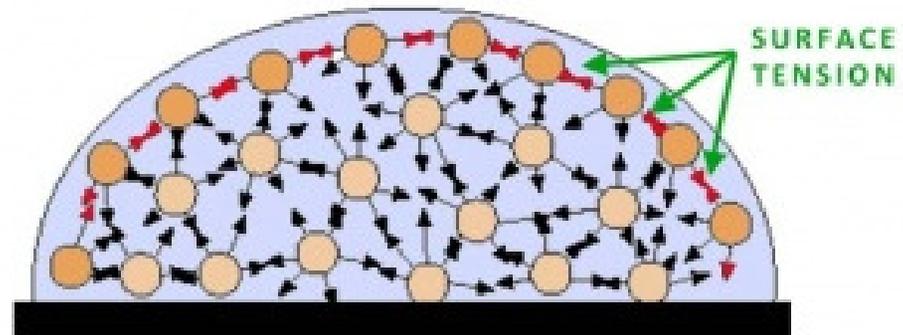
➤ Galena (solfuro di piombo)



➤ Cerussite (carbonato di piombo)



Tensione superficiale



- Proprietà caratteristica dei liquidi che si manifesta lungo le superfici di separazione (interfacce).
- Dipende dalle forze di coesione molecolare.
- Il liquido si comporta come se fosse racchiuso da una membrana elastica che gli permette di variare la forma esterna mantenendo la minima superficie esterna (es. le gocce di acqua).

Tensione superficiale



- Proprietà caratteristica dei liquidi che si manifesta lungo le superfici di separazione (interfacce).
- Dipende dalle forze di coesione molecolare.
- Il liquido si comporta come se fosse racchiuso da una membrana elastica che gli permette di variare la forma esterna mantenendo la minima superficie esterna (es. le gocce di acqua).

Il papiro X di Leida

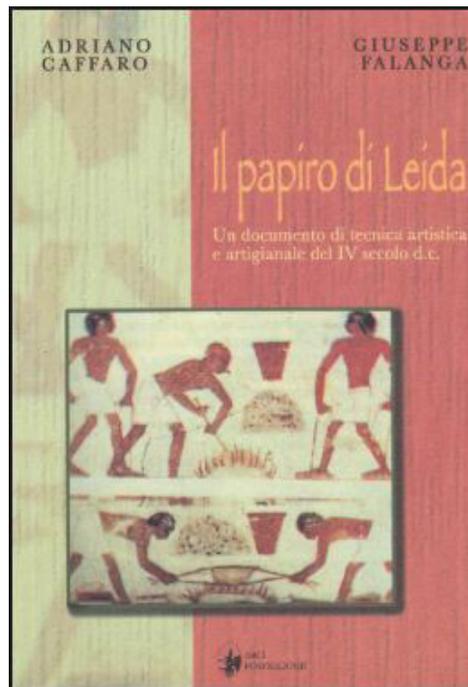


Codice in lingua greca alla (fine del III secolo d.C.) da una sepoltura a Tebe (Egitto) oggi conservato a Leida (Paesi Bassi).

Contiene circa 100 procedimenti chimici (alcuni ripresi dal De materia medica di Dioscoride) per la lavorazione dei metalli e delle leghe di oro e di argento, degli inchiostri metallici, dei coloranti per stoffe.

Il papiro X di Leida

Lo stile di scrittura delle ricette, estremamente sintetico e non comprendente i tradizionali elementi alchemici o filosofici, fa pensare che il testo sia un “promemoria” per artigiani che già conoscevano il processo descritto.



A. Caffaro e G. Falanga, *Il papiro di Leida. Un documento di tecnica artistica e artigianale del IV secolo d.C.*, Salerno, Edizioni Arci Postiglione, 2004.

Il papiro X di Leida e la coppellazione

“Come l’argento viene purificato e fatto brillante. Prendere una parte di argento ed un ugual peso di piombo; adagiarlo in un forno, e mantenere in fusione fino a che il piombo venga consumato; ripetere l’operazione più volte fino a che esso diventerà brillante.”

I minerali da cui viene estratto il piombo possono contenere significative quantità di metalli preziosi, soprattutto argento.

La coppellazione è un **processo metallurgico utilizzato per purificare i metalli nobili, come argento e oro, dai metalli vili.**

La datazione di alcuni resti rinvenuti nelle regioni dell’Anatolia e della Mesopotamia suggeriscono che questa tecnica di affinazione fosse già nota intorno al 4000 a.C. Esiste una data e un “luogo di nascita” di questa tecnica?

In questa “prima fase”, l’utilità del trattamento risiedeva nell’estrazione dei metalli nobili presenti in lega con il fuso di piombo ottenuto mediante metallurgia estrattiva.

In seguito, nel mondo greco e romano, si intuì che l’aggiunta volontaria di piombo permetteva di purificare i metalli nobili presenti in lega con i metalli vili.

La coppellazione

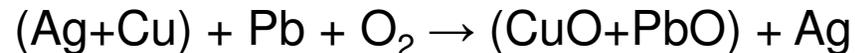
Temperatura di fusione del piombo: 327 °C

Temperatura di fusione dell'argento: 960 °C

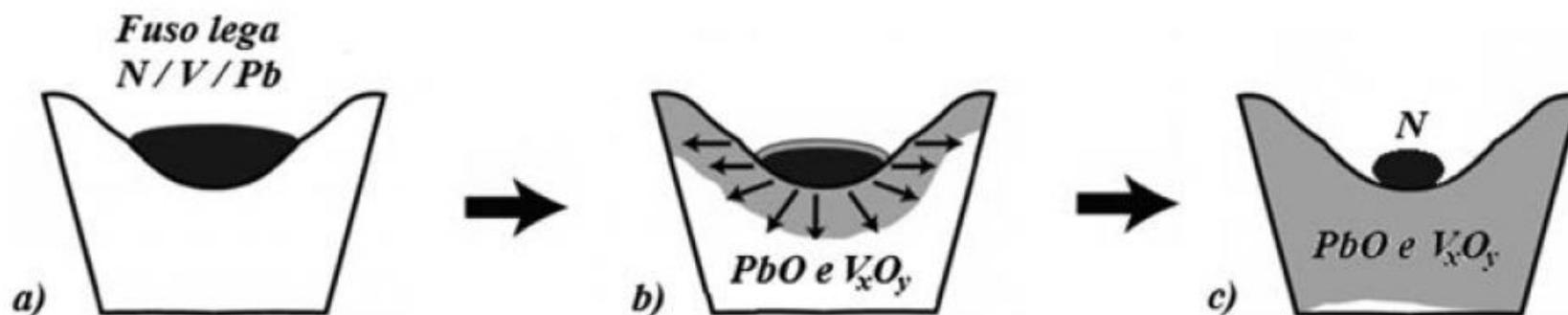
Nei minerali in cui sono presenti argento e piombo (es. galena), la fusione deve avvenire a temperature superiori a 900°C e atmosfera riducente (in scarsità di ossigeno).

Il piombo argentifero prodotto deve essere poi rifuso in un forno in condizioni ossidative (in flusso d'aria).

Il piombo presente si ossida in monossido di piombo (litargirio dal gr. *lithos* + *argyrion*) che produce un fuso con densità maggiore rispetto all'argento stesso [l'argento 'galleggia' nell'amalgama fusa].



Il piombo Pb e gli altri metalli vili (V) vengono ossidati miscelandosi con il litargirio. Per assorbimento capillare l'ossido di piombo e gli ossidi dei metalli vili permeano le porosità del crogiolo (coppella) separandosi dall'argento.



La porosità era data da materiale assorbente costituito da resti di animali come ossa e corni e ceneri e più raramente da argilla.

La coppellazione permetteva di separare, con un singolo trattamento metallurgico, i metalli preziosi dai metalli vili.

L'introduzione della moneta richiese di separare oro e argento che erano legati dal processo di coppellazione. In Lidia, all'età di Creso, fu introdotta la 'cementazione' che consisteva nell'introduzione di pagliuzze in olle di terracotta a strati alternati con una miscela di cloruro di sodio e materiale siliceo.

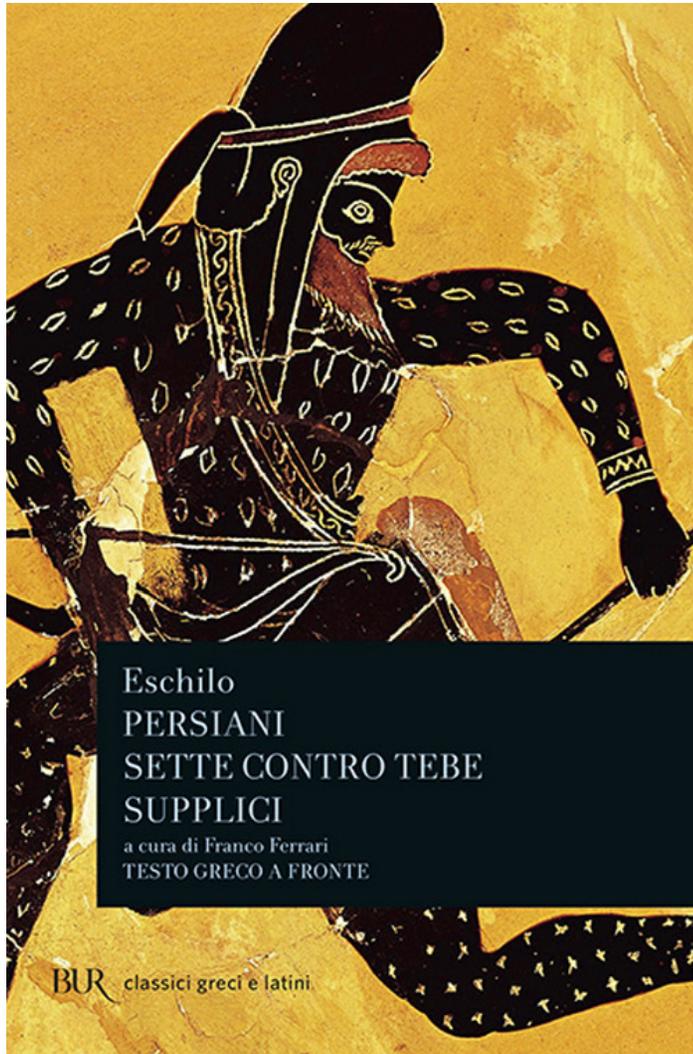
L'oro veniva separato dai sali di argento depositatisi in eccesso rispetto ai Sali di argento assorbiti da materiali porosi.

Diodoro Siculo [I sec a.C.]

La polvere d'oro recuperata viene portata a uomini specializzati che la mettono in giare d'argilla insieme ad un pezzo di piombo, grani di sale, un po' di stagno e crusca d'orzo. Chiusi bene i vasi li cuociono nella fornace per cinque giorni, dopo di che, raffreddati, vi si trova solo oro, mentre sono scomparse tutte le altre cose messe assieme.

L'affinamento della tecnica di coppellazione permise in epoca romana di ridurre a circa 50 g/tonnellata il contenuto di metalli nobili rimasti nel litargirio





Una fonte hanno d'argento che tesoro è di lor terra.
Eschilo, Persiani v. 238

LE LEGHE

Una lega è una soluzione o miscela di uno o più metalli con altri elementi.

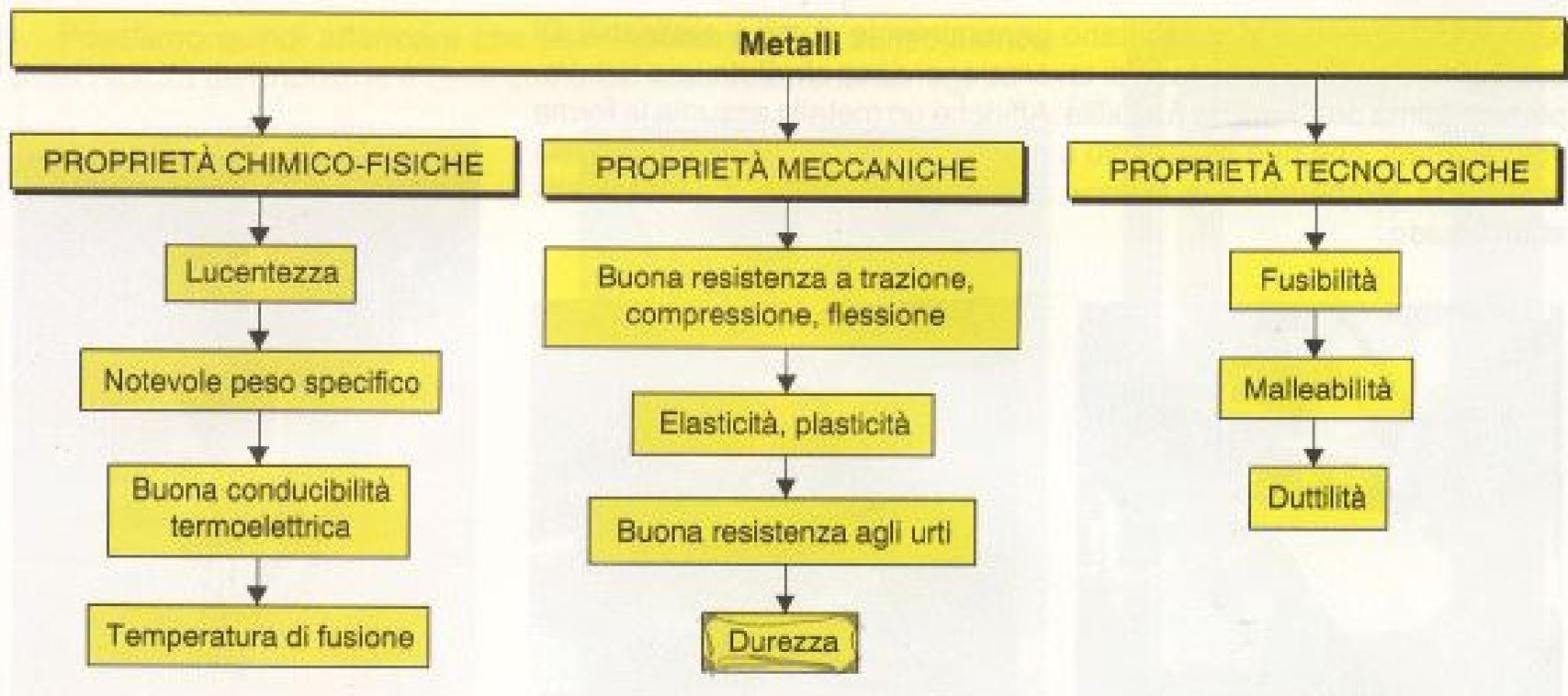
La sostanza che deriva dal processo di **alligazione** ha proprietà differenti (resistenza meccanica, lucentezza etc.) da quelle dei relativi componenti.

L'ottone è un esempio di lega formata da due metalli (Cu + Zn)

L'acciaio è un esempio di lega formata da un metallo (Fe) e un non metallo (C)

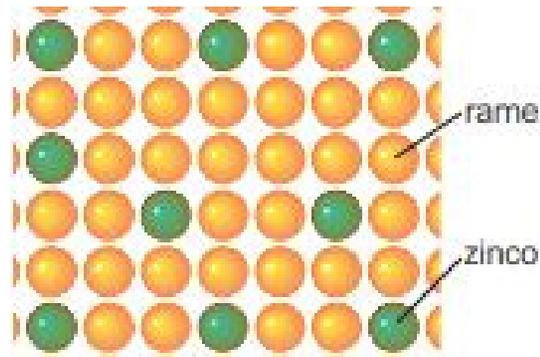
Attraverso la combinazione di due o più metalli si ottiene un gran numero di leghe di proprietà molto differenti. Esistono leghe binarie (due componenti), ternarie etc.

Le proprietà delle leghe dipendono dalla natura dell'interazione tra i metalli costituenti. Spesso i metalli che costituiscono la lega allo stato fuso sono mutualmente solubili e, quindi, formano soluzioni liquide.



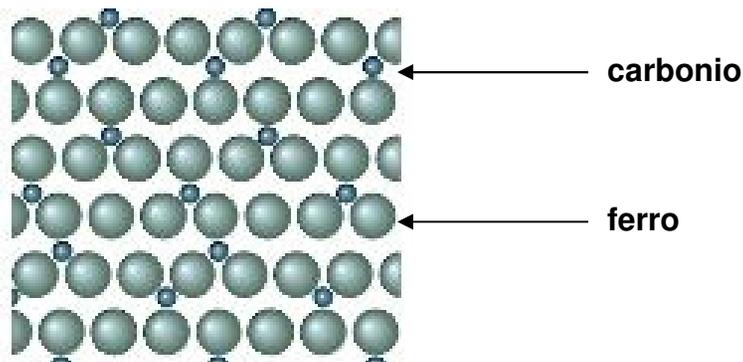
Leghe di sostituzione:

ioni di un altro metallo sostituiscono altrettanti ioni nel reticolo cristallino del metallo principale; perché ciò accada, gli ioni dei due metalli devono avere dimensioni simili (es. ottone - lega rame-zinco)



Leghe interstiziali:

atomi di piccole dimensioni si collocano nelle cavità del reticolo del metallo principale. (Acciaio, una lega in cui tra gli ioni di ferro sono presenti atomi di carbonio, in una percentuale variabile da 0,2% a 1,5%).



Le leghe sono caratterizzate da proprietà meccaniche, elettriche, magnetiche, ecc. fortemente variabili in funzione della composizione.

Tali proprietà possono mostrare variazioni molto grandi e improvvise per variazioni piccole delle proporzioni tra i componenti..

Le leghe caratterizzate da un eutettico hanno un punto di fusione generalmente inferiore a quello dei metalli puri

Generalmente, il punto di fusione avviene in un intervallo di temperatura compreso tra i punti di fusione dei componenti della lega

Preparazione: in genere l'alligazione si ottiene mediante fusione degli elementi componenti secondo le proporzioni desiderate.

Se gli elementi hanno temperature di fusione abbastanza vicine vengono fusi insieme;

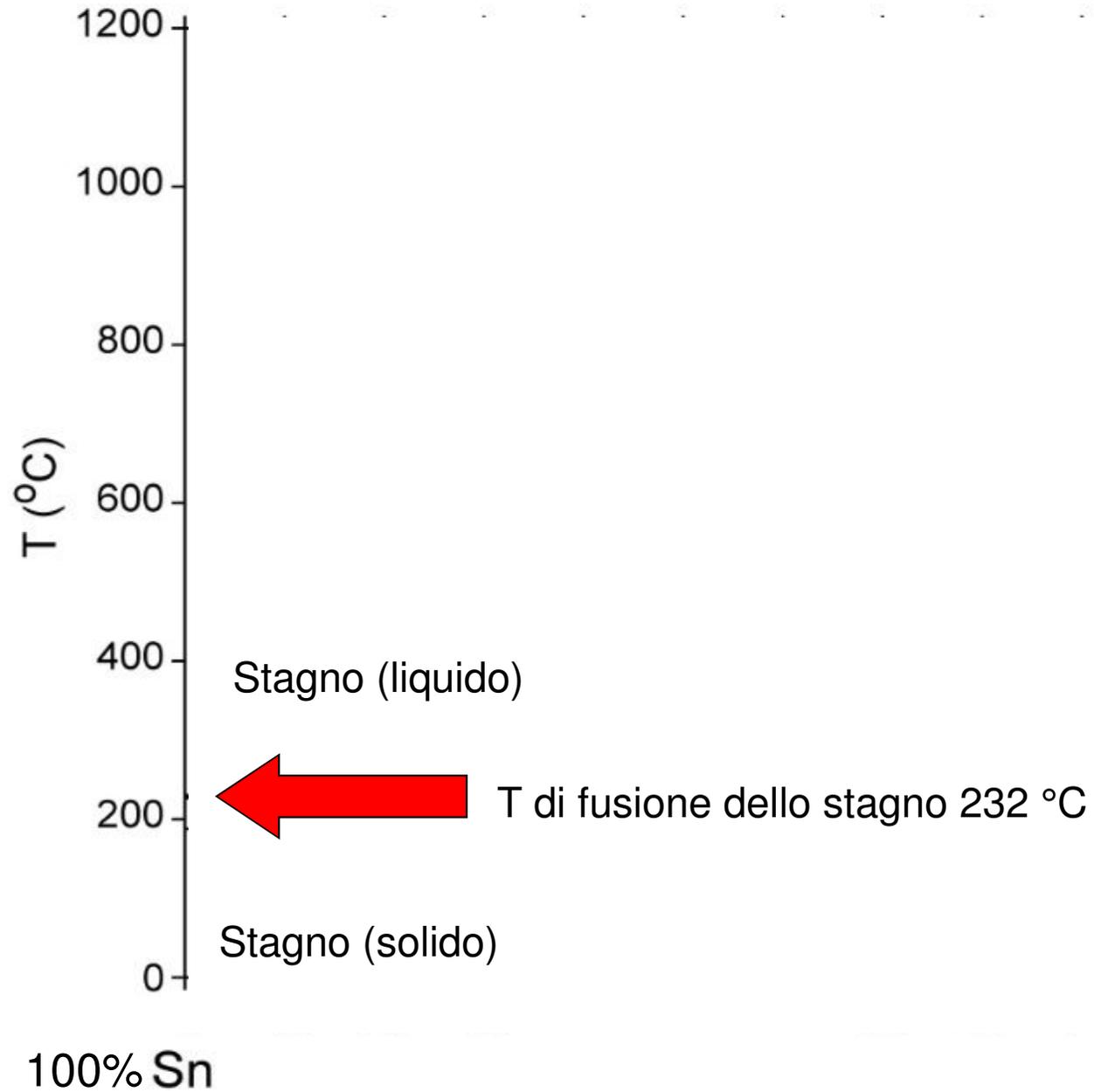
Se gli elementi hanno temperature di fusione molto differenti, in genere viene fuso per primo il componente che fonde a temperatura superiore.



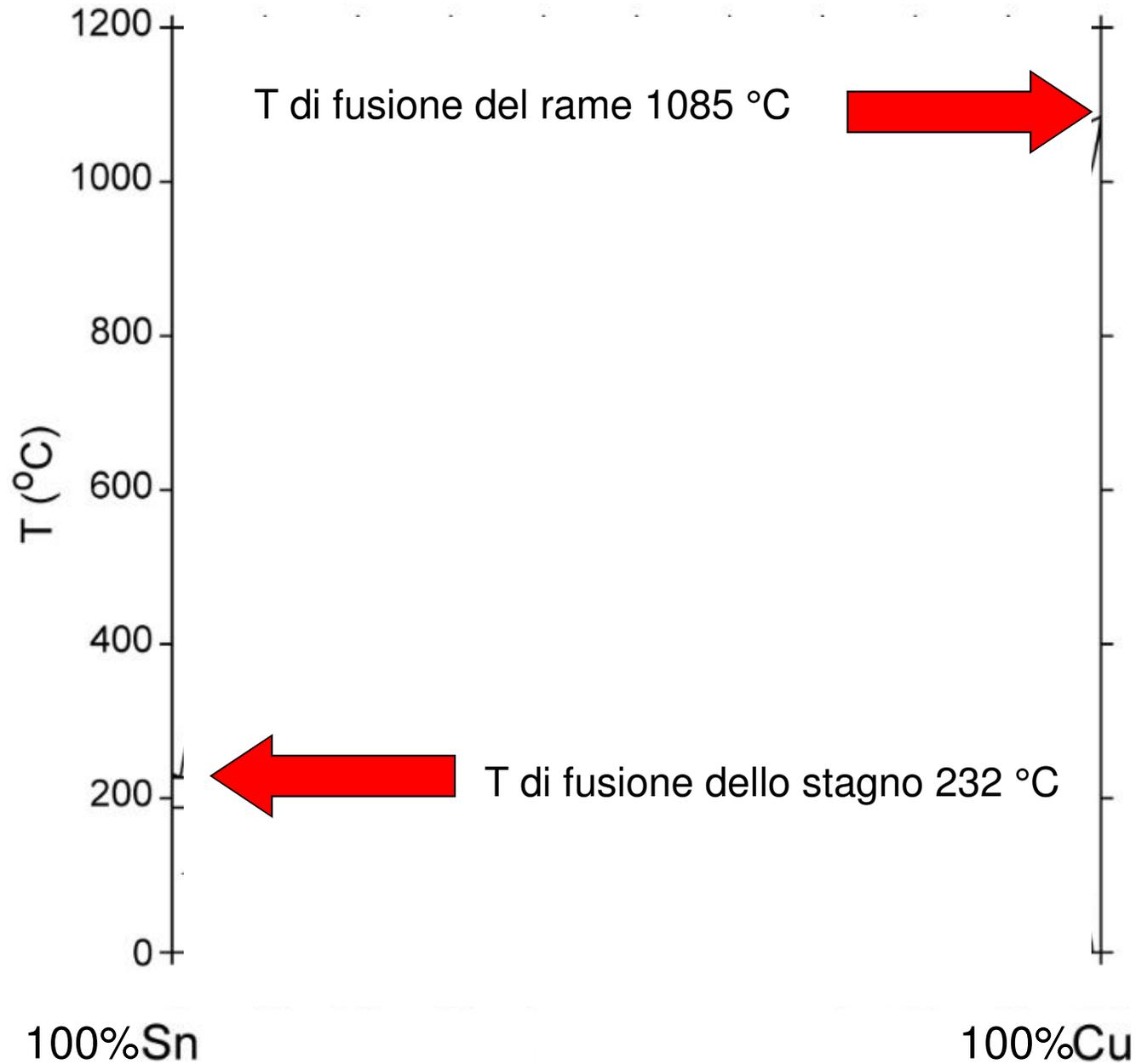
Copyright © 2010 South West Maritime Archaeological Group

Lingotti di rame e stagno, da un relitto dell'età del Bronzo (Devon, Cornovaglia)

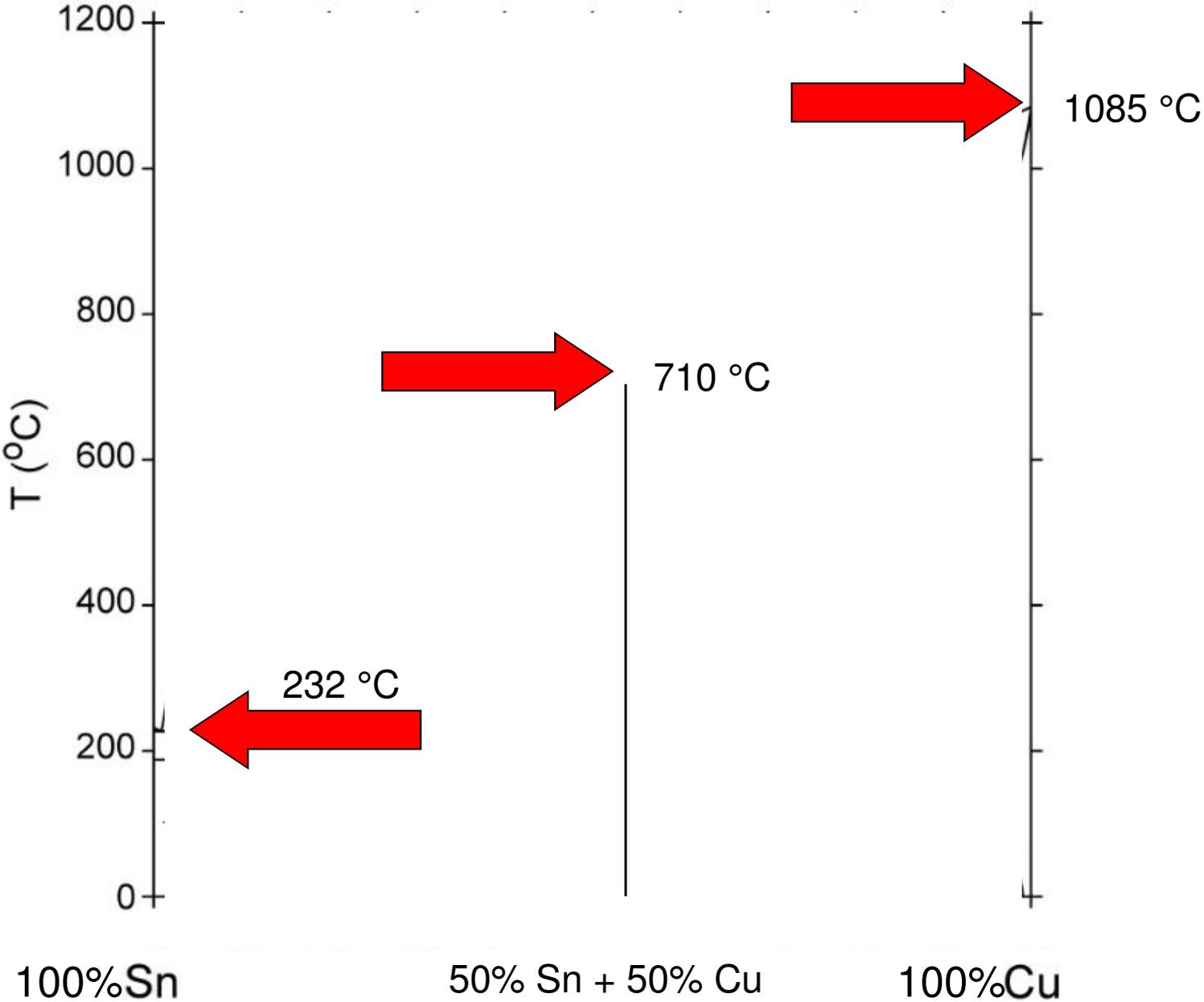
IL DIAGRAMMA DI FASE DEL BRONZO



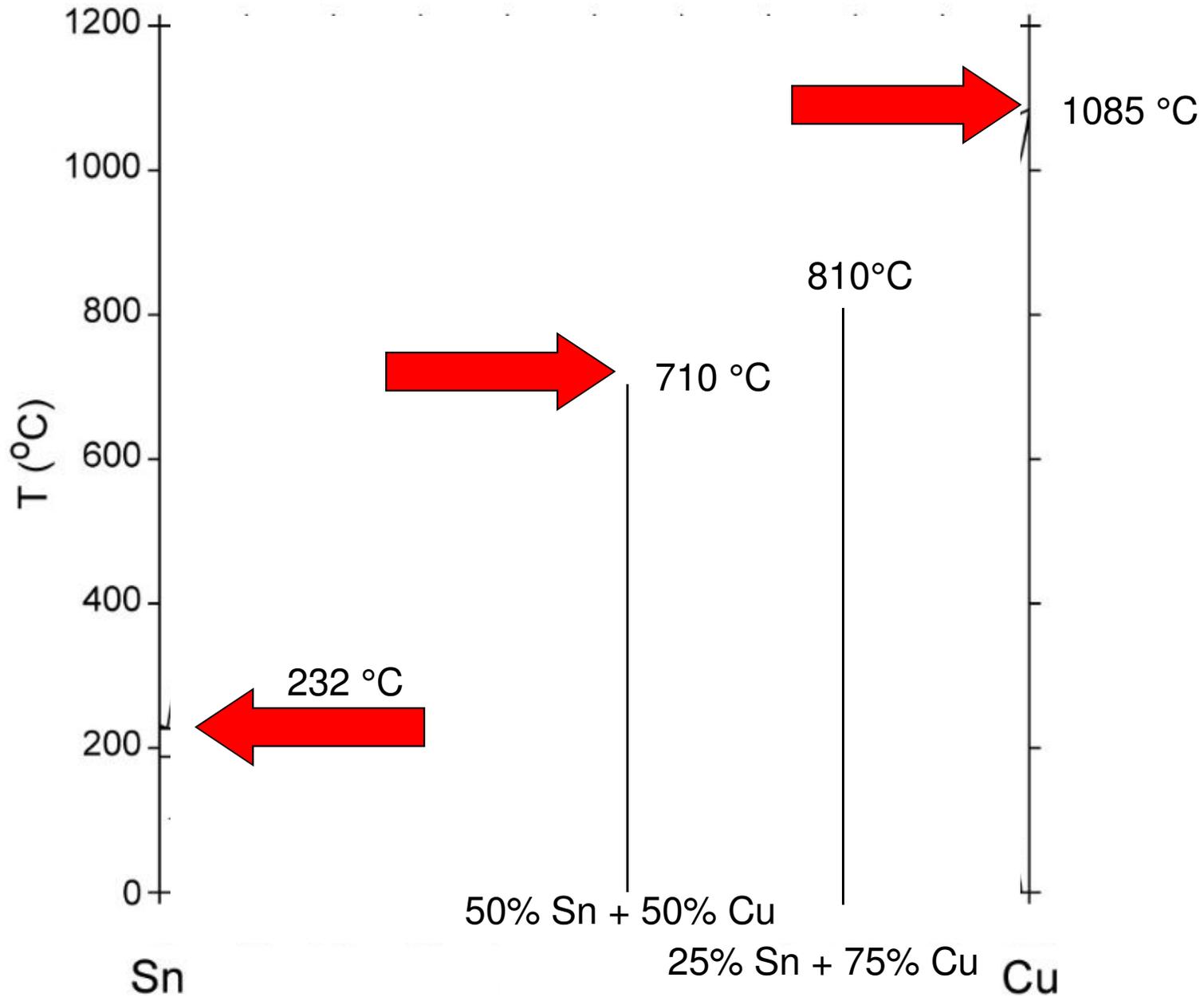
IL DIAGRAMMA DI FASE DEL BRONZO



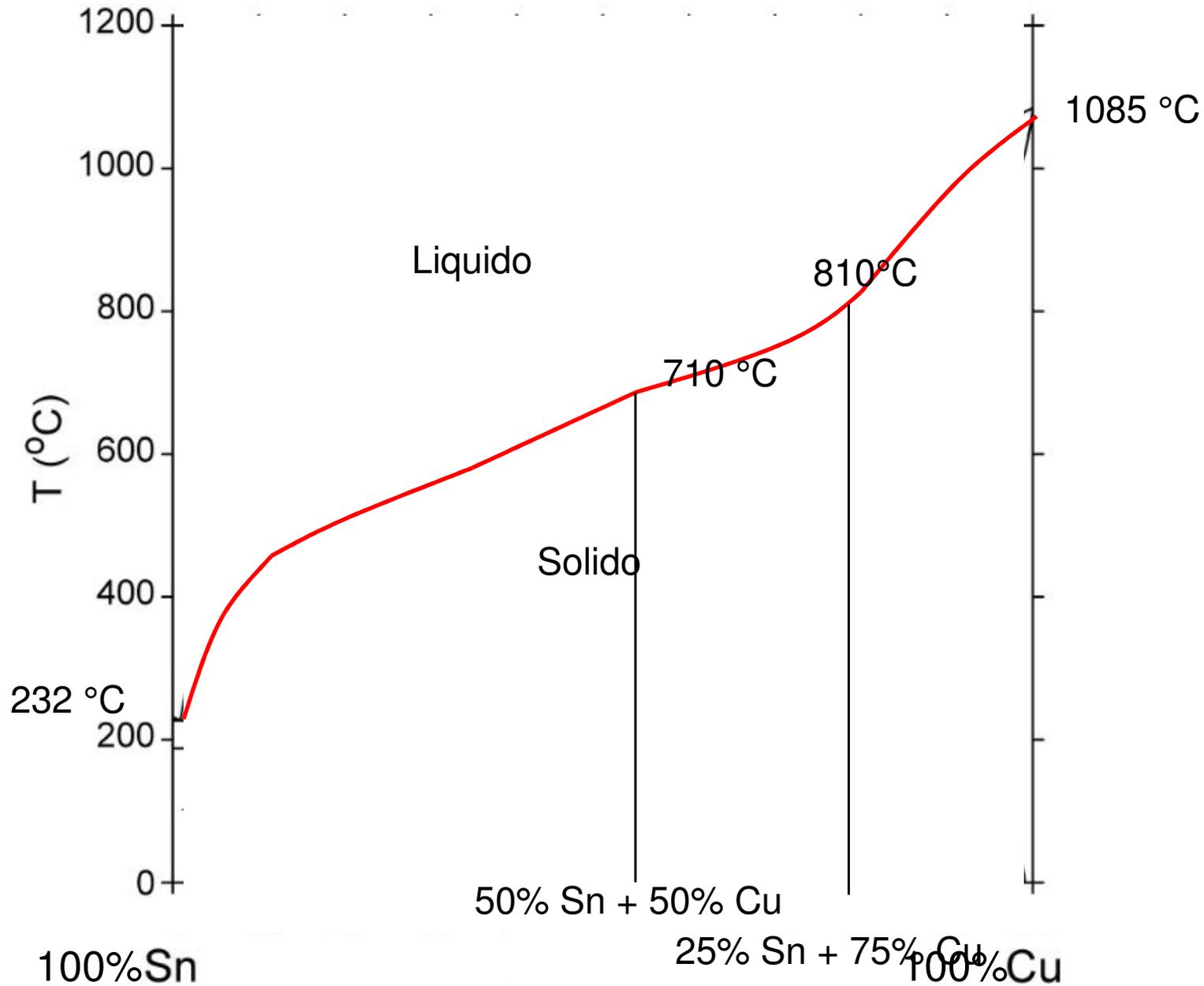
IL DIAGRAMMA DI FASE DEL BRONZO



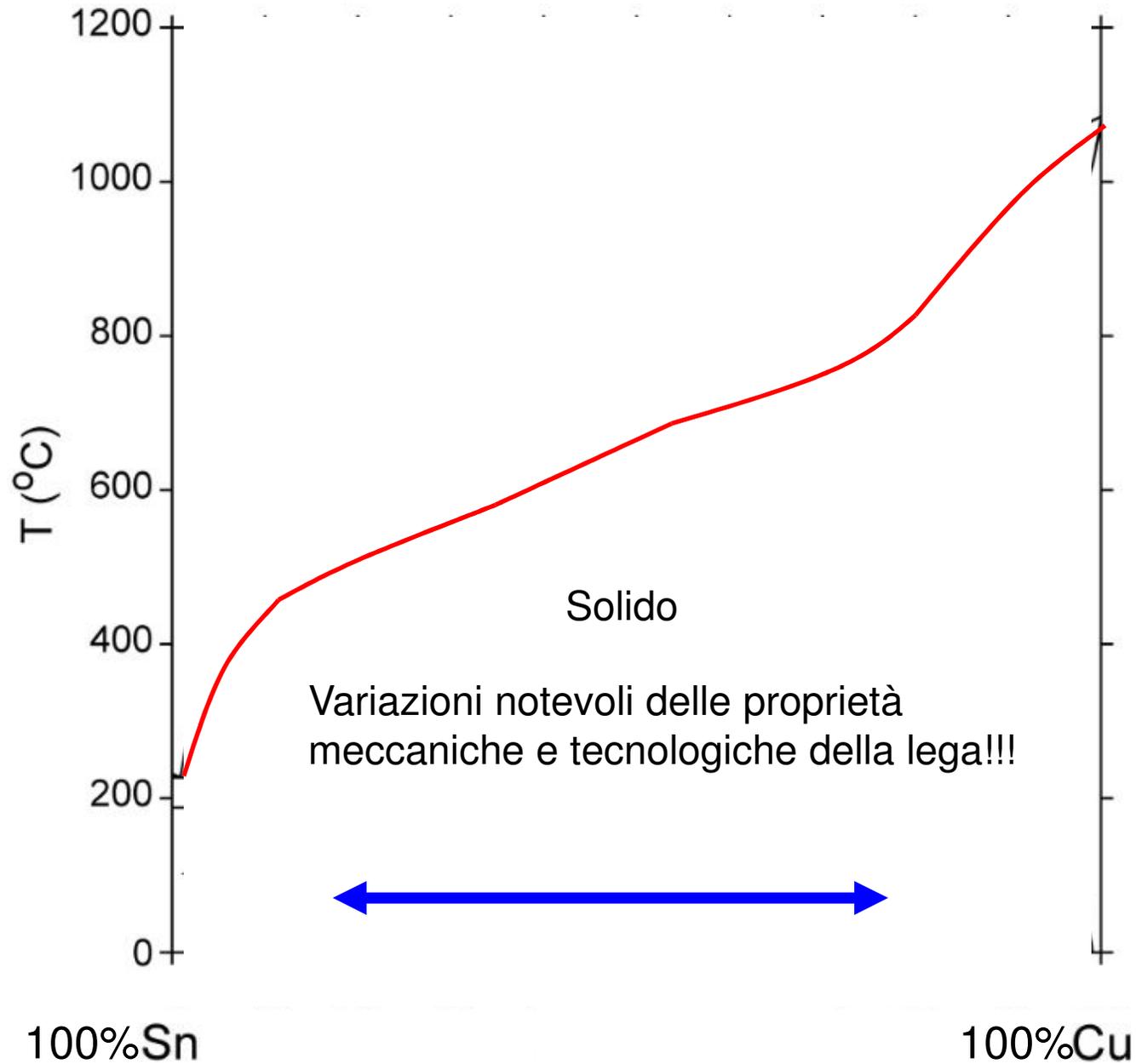
IL DIAGRAMMA DI FASE DEL BRONZO



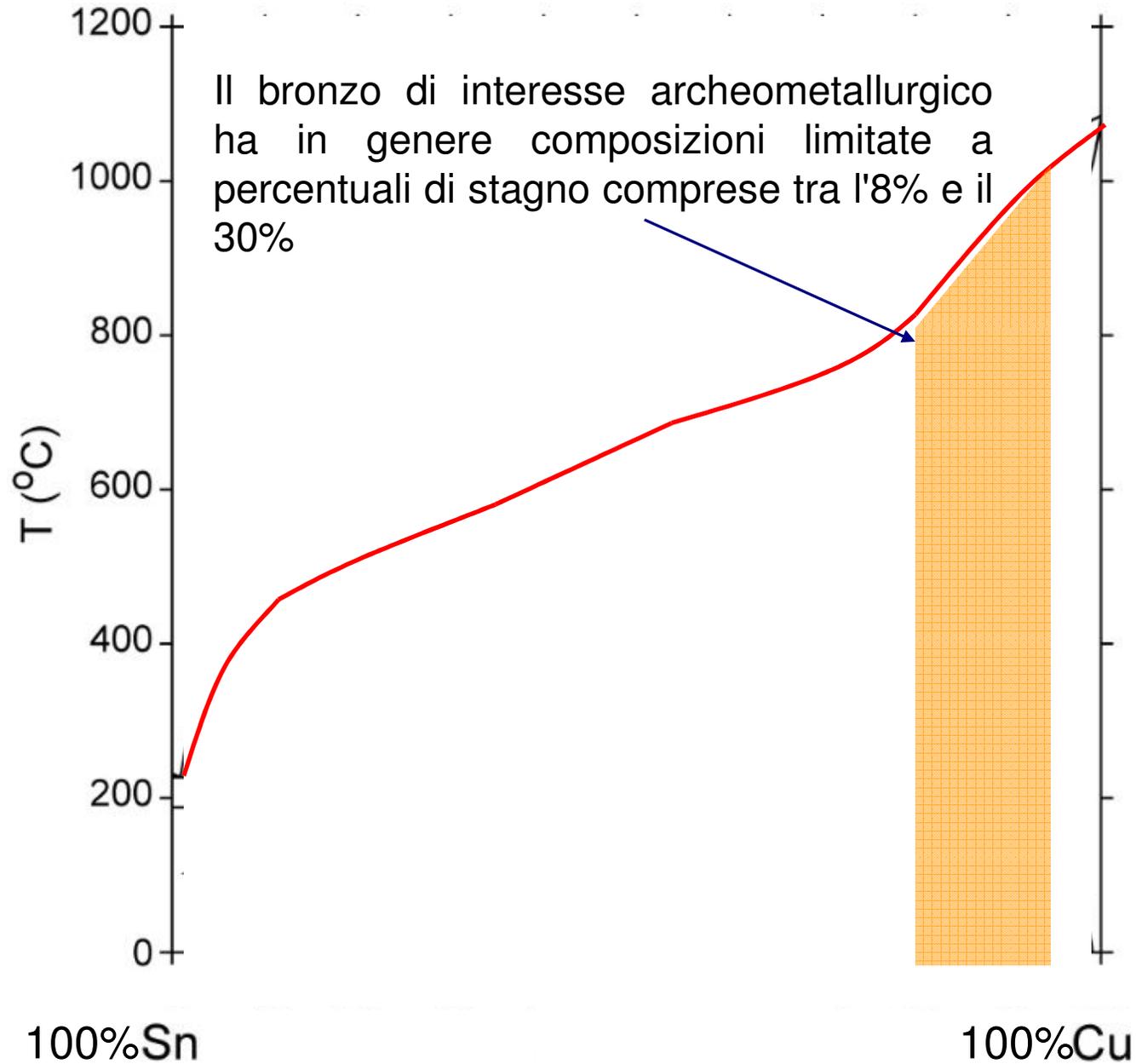
IL DIAGRAMMA DI FASE DEL BRONZO



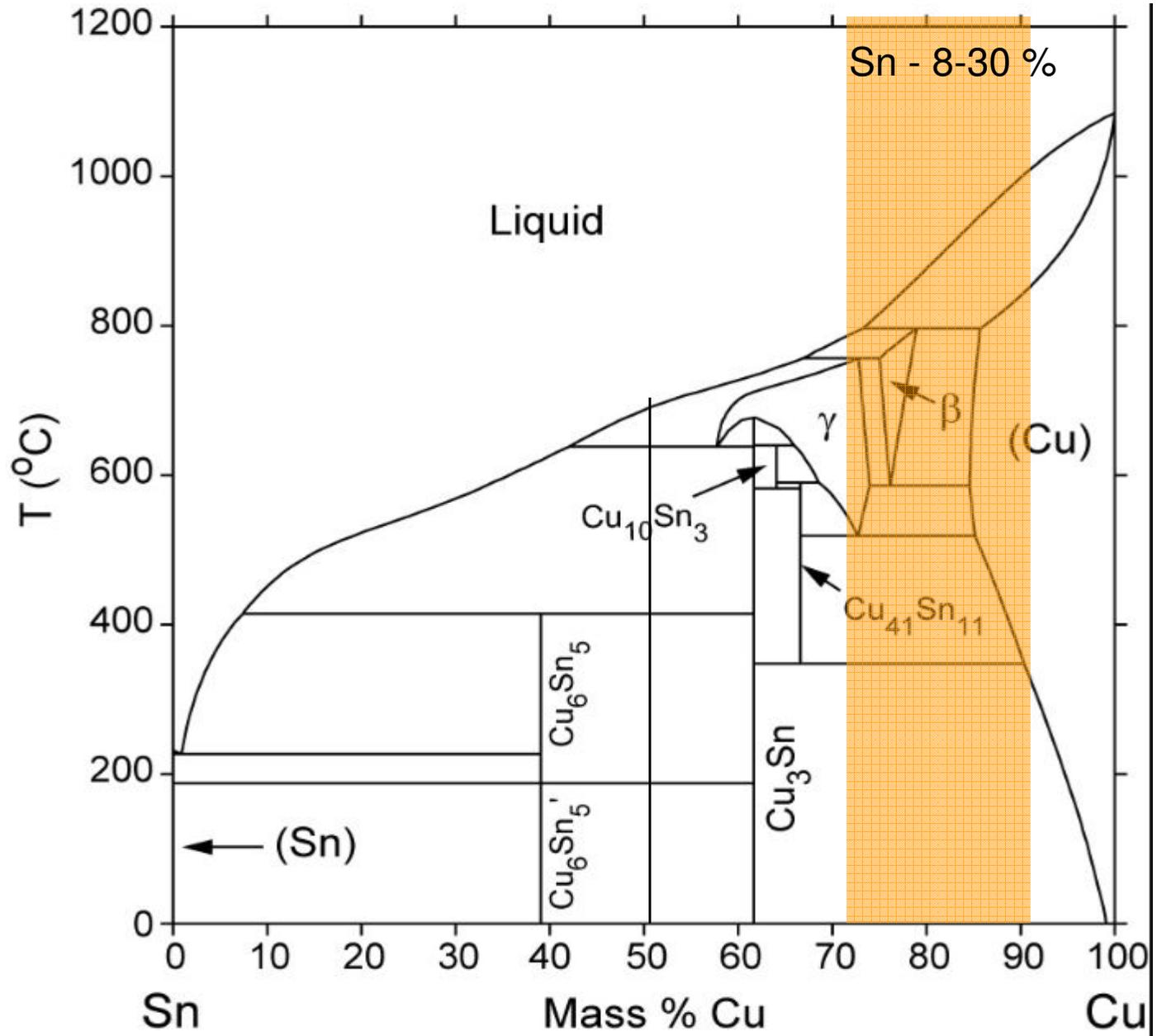
IL DIAGRAMMA DI FASE DEL BRONZO



IL DIAGRAMMA DI FASE DEL BRONZO



IL BRONZO



- fosforo
- arsenico
- piombo
- zinco

L'adozione della tecnologia del bronzo nel tardo quarto - inizio del terzo il millennio a.C. ha avuto un forte impatto sulle società di tutto il mondo Eurasia.

Il bronzo è una lega di rame e altri metalli (arsenico, stagno etc) che ha caratteristiche migliori rispetto al rame puro. Ha una lucentezza dorata e questa caratteristica ha contribuito a rendere il bronzo un indicatore dello stato sociale.



Il paradosso dello stagno:

nonostante i numerosi studi dedicati al cosiddetto "tin problem" e all'individuazione delle fonti di stagno utilizzate per l'ottenimento delle leghe di bronzo in Eurasia non vi è identità di interpretazioni tra archeologi, geologi, e storici che hanno cercato di identificare in vario modo le regioni di produzione e le rotte commerciali attraverso le quali il metallo è stato trasportato.

I primi bronzi noti sono generalmente dal Vicino Oriente, Anatolia e Balcani; tuttavia, in questi aree di consumo di bronzo, c'è una significativa scarsità di aree di estrazione dello stagno.

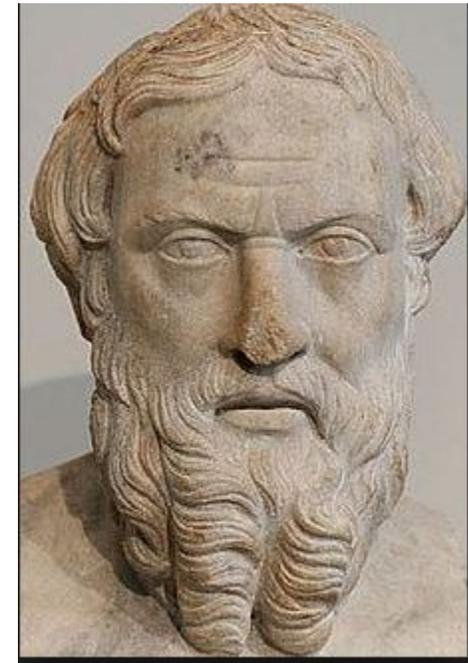
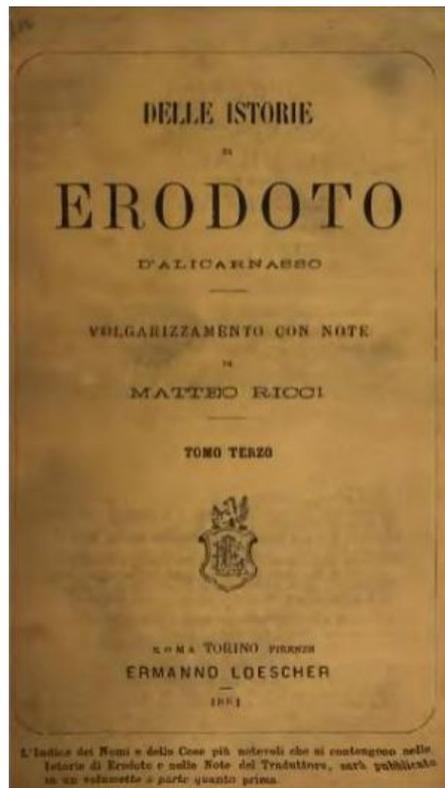
Lo stagno è molto meno abbondante del rame e si trova distribuito irregolarmente in Eurasia, con i maggiori giacimenti in Europa occidentale/centrale e Asia centrale.

Nuove scoperte di minerali di stagno in Iran e nell'Asia centrale occidentale sono state effettuate negli ultimi due decenni (Baroffka et al., 2002; Nezafati et al., 2011; Stöllner et al. 2011); tuttavia, l'utilizzo di questi minerali durante il terzo millennio a.C. deve ancora essere verificato.

"Queste che ho nominato sono le regioni estreme in Asia e in Libia; per quelle d'Europa, a occidente, non posso dire nulla con sicurezza poiché io non credo che dai Barbari sia chiamato Eridano un fiume che sbocca nel mare settentrionale e dal quale verrebbe l'ambra; come non so che vi siano delle Isole **Cassiteridi** dalle quali ci verrebbe lo stagno...Certo è che lo stagno e l'ambra vengono a noi dagli estremi confini d'Europa."

Erodoto, Storie, III, 115.

stagno in greco: *κασσίτερος*



"Le isole Cassiteridi sono dieci, e giacciono le une vicine alle altre al settentrione del porto degli Artabri; addentro nel mare. Una di queste isole è deserta; le altre sono abitate da uomini che portan mantelli di lana nera, tonache che discendono fino ai talloni, con una cintura intorno al petto, e passeggiano con bastoni; sicché rendono sembianza delle Furie che veggonsi nelle tragedie. Vivono poi, per la maggior parte, delle loro greggi alla maniera dei nomadi. Hanno miniere di stagno e di piombo, e permutando questi metalli ed anche le pelli delle loro pecore, ne ricevono in cambio dai mercanti vasi di terra, sale e utensili di rame."

Strabone, Geografia. III, 5.



Prima dell'adozione delle leghe di rame e stagno, nel vicino oriente numerose comunità hanno utilizzato tecnologie specializzate e risorse locali per la produzione di bronzo ottenuto da rame e arsenico con la produzione di una vasta gamma di oggetti (Lehner e Yener 2014).

Il **bronzo arsenicale** ha una lunga storia di produzione, commercio e consumo in Anatolia, e le sue origini si estendono prima del quarto millennio a.C.

Si conoscono manufatti prodotti con una vasta gamma di contenuto di arsenico (0,5-7 % spesso di più), che suggeriscono come il contenuto di arsenico fosse difficile da controllare.

Le ipotesi, in estrema sintesi, prevedono che possa essere avvenuta la cofusione intenzionale di rame e arsenico oppure la fusione involontaria di minerali di rame ricchi di arsenico, portando così nel bronzo arsenicale impurità di arsenico (Lechtman 1996).

Analisi di scorie di fusione e di detriti associati alla produzione di bronzo arsenicale ad Arisman (Prima Età del Bronzo, Iran), hanno dimostrato l'introduzione intenzionale di As nella lega . intenzionale processi tecnologici coinvolti nel settore industriale produzione di speiss (un prodotto intermedio composto di arsenide di ferro) esisteva (Rehren, Boscher e Pernicka 2012). Questo materiale è stato successivamente aggiunto come agente di fusione mista o in rame fuso da produrre rame arsenicale intenzionalmente.



Lama lunga e sottile, lavorata mediante martellatura. Punte simili sono state trovate in contesti di sepoltura in Iran. La fluorescenza ai raggi X (XRF) ha evidenziato la presenza di rame, arsenico e tracce di piombo.

Vantaggi del bronzo arsenicale:

- Azione riducente:

in primo luogo, riduce il rischio di formazione di ossido di rame che riduce notevolmente la duttilità del manufatto. Tale azione riducente (de-ossidante) dipende dal fatto che l'arsenico si lega all'ossigeno presente nel metallo fuso per poi vaporizzare.

- Miglioramento delle caratteristiche meccaniche:

la presenza di arsenico aumenta la durezza del metallo (ad esempio se il manufatto è utilizzato per tagliare). La presenza dell'arsenico dello 0,5 - 2% in peso migliora del 10-30% la durezza e la resistenza a trazione.

- Miglioramento della lucentezza della lega:

piccole percentuali di arsenico possono conferire una caratteristica lucentezza argentea ai manufatti.

Svantaggi del bronzo arsenicale:

L'arsenico ha un punto di vaporizzazione relativamente basso (di poco superiore ai 600 °C). L'ossido di arsenico vaporizza dal metallo fuso prima o durante la colata e i fumi provenienti dai processi di estrazione e di lavorazione del minerale possono essere molto pericolosi per gli occhi, per i polmoni e per la pelle .

L'avvelenamento da arsenico cronico porta a malattie degenerative del sistema nervoso periferico, con coinvolgimento e perdita di uso degli arti.



L'esame dei capelli di Ötzi ha messo in evidenza alte concentrazioni di rame e arsenico. Questo dato, insieme alla composizione della lama dell'ascia (99,7% di rame puro con tracce di arsenico), ha fatto supporre che l'individuo fosse coinvolto nel processo di fusione del rame

Tradizionalmente si è ritenuto che le leghe di bronzo di stagno gradualmente **abbiano sostituito le precedenti tecnologie del rame**, come il rame arsenicale, perché l'introduzione dello stagno ha migliorato alcune caratteristiche di lavorabilità.

Eppure lo schema di una sostituzione "tecnologica" del rame arsenicale con il bronzo di stagno è problematico perché **l'adozione dello stagno non fu geograficamente uniforme** (e in alcune regioni non fu mai adottato, come nell'Iran centrale), il che suggerisce una motivazione diversa.

Inoltre, in molte regioni del Vicino oriente il rame arsenicale coesistette con il bronzo di stagno **fino alla tarda Età del ferro**.

Un aspetto essenziale può dipendere dal **colore**, laddove l'arsenico conferisce al bronzo l'aspetto argentato, mentre il bronzo di stagno generalmente appaiono dorati.

Queste due leghe di rame condividono alcuni aspetti tecnologici importanti, ma in realtà rappresentano due distinte tradizioni metallurgiche, e il consumo delle due leghe appare sostanzialmente diverso. Questo risulta chiaro dalle **tradizioni di sepoltura nell'Anatolia centrale**, dove il bronzo di stagno veniva usato insieme all'oro.

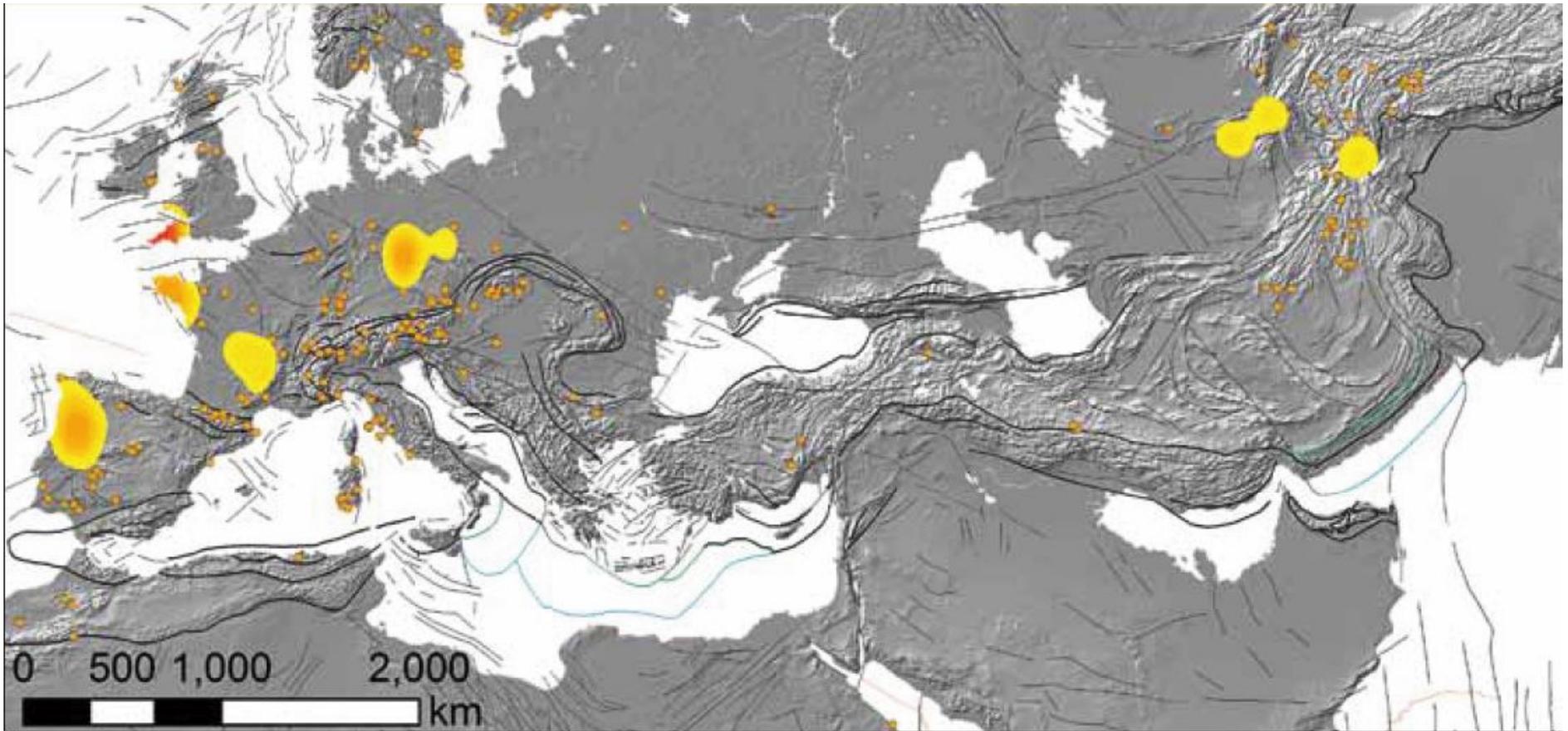
All'inizio del secondo millennio, i rapporti di cambio tra argento, stagno e oro sono vicini all'unità. Questa **sostanziale equivalenza di valore** va collocata **nell'origine "esotica"** dello stagno e nella presenza di fonti di oro locale, essendo questi metalli **beni fondamentali nello scambio a lunga distanza tra l'Anatolia e la Mesopotamia settentrionale**.

Il paradosso del consumo di stagno



I siti più antichi dove è stato attestato il consumo di stagno nelle leghe metalliche.

Il paradosso del consumo di stagno



Le aree euro-asiatiche più importanti di estrazione di stagno



Contents lists available at [ScienceDirect](#)

Journal of Archaeological Science

journal homepage: <http://www.elsevier.com/locate/jas>



Tin ingots from a probable Bronze Age shipwreck off the coast of Salcombe, Devon: Composition and microstructure



Quanyu Wang ^{a,*}, Stanislav Strekopytov ^b, Benjamin W. Roberts ^c, Neil Wilkin ^d

^a Department of Conservation and Scientific Research, the British Museum, Great Russell Street, London, WC1B 3DG, UK

^b Department of Earth Sciences, Natural History Museum, Cromwell Road, London, SW7 5BD, UK

^c Department of Archaeology, Durham University, South Road, Durham, DH1 3LE, UK

^d Department of Britain, Europe and Prehistory, the British Museum, Great Russell Street, London, WC1B 3DG, UK





News Front Page



Africa

Americas

Asia-Pacific

Europe

Middle East

South Asia

UK

England

Northern Ireland

Scotland

Page last updated at 15:36 GMT, Monday, 15 February 2010

E-mail this to a friend

Printable version

Bronze Age shipwreck artefacts found near Salcombe

Experts have said 300 Bronze Age artefacts found in a shipwreck off the Devon coast could prove European trade thrived as far back as 3,000 years.



BBC Devon
Sport, travel, weather, things to do, features and much more

The artefacts, including copper and tin ingots, gold bracelets and a bronze sword, were found near

SEE ALSO



PHOTO OF THE DAY

TV

PERPETUAL PLANET

LATEST STORIES

NATIONAL GEOGRAPHIC EXPEDITIONS

ALASKA

CLOSE ENCOUNTERS OF THE WILD KIND

LEARN MORE

PHOTO GALLERY

Pictures: Shipwreck Discovery Yields Ancient Treasure

The discovery of a 3,000-year-old shipwreck—complete with gold jewelry and raw materials to make bronze—suggests prehistoric Britain had international trade links.



Il sito di un probabile naufragio dell'Età del Bronzo, al largo della costa di Salcombe nel sud-ovest dell'Inghilterra, è stato esplorato tra il 1977 e il 2013.

Sono stati trovati quasi 400 oggetti tra cui lingotti di rame e stagno e manufatti in bronzo e oro.

I lingotti di stagno di Salcombe hanno offerto una straordinaria opportunità per lo studio delle tecniche metallurgiche dello stagno preistorico.

La composizione chimica dei lingotti è stata determinata mediante spettrometria di massa al plasma (ICP-MS) e spettroscopia ad emissione atomica (ICP-AES).

L'analisi microstrutturale è stata condotta su otto lingotti, selezionati per coprire la più ampia varietà di dimensioni, forme e livelli di impurità mediante metallografia e microscopia elettronica (SEM-EDS).

Table 1

Weight and dimensions of the tin ingots studied.

Reg. No	Shape	Weight (g)	Length (mm)	Width (mm)	Thickness (mm)
Salcombe					
2010,8032.295	Round and plano-convex	9166	228	219	114
2010,8032.296	Oval with plano-convex profile	255	92	62	30
2010,8032.297	Irregular	131	87	55	23
2010,8032.298	Irregular	25	37	30	12
2010,8032.299	Irregular, flat	202	93	64	19
2010,8032.300	Oval with plano-convex profile	366	125	64	32
2010,8032.301	Irregular, flat	377	122	92	20
2010,8032.302	Irregular, flat	21	37	24	7
2010,8032.303	Irregular	14	10	22	7
2010,8032.304	Oval	258	108	58	20
2010,8032.305	Irregular	287	96	77	32
2010,8032.306	Folded	329	90	66	46
2010,8032.307	Irregular	16	38	24	10
2010,8032.308	Irregular	37	43	37	11
2010,8032.309	Oval with plano-convex profile	314	105	67	21
2010,8032.310	Irregular with plano-convex profile	359	111	82	17
2010,8032.311	Irregular, flat	196	118	70	7
2010,8032.312	Relatively flat, folded over	517	135	89	31
2010,8032.313	Oval with plano-convex profile	1003	165	98	34
2010,8032.314	Oval with plano-convex profile	184	81	52	23
2010,8032.315	Oval with plano-convex profile	682	129	66	36
2010,8032.316	Oval with plano-convex profile	1257	185	10	25
2010,8032.317	Circular with plano-convex profile	600	95	90	20
2010,8032.318	Oval with plano-convex profile	368	86	72	28
2010,8032.320	Roundish with flat base	1194	160	140	20
2010,8032.321	Roundish with flat base	169	64	50	24
2010,8032.322	Irregular	116	60	56	24
2010,8032.323	Roundish	8	12	8	
2010,8032.329	Possible oval die mark on one side	5	18	14	6
2013,8032.1	Oval with plano-convex profile	645	120	90	20
2013,8032.2	Oval	11	31	21	7
2013,8032.3	Oval, folded over	160	80	45	28
2013,8032.4	Irregular	19	52	34	4
2013,8032.5	Thin, largely corrosion products	4	4	3	4
2013,8032.6	Oval	19	45 (diameter)		5
2013,8032.7	Irregular	97	66	50	16
2013,8032.8	Plano-convex	97	78	45	21
2013,8032.9	Plano-convex	675	112	83	23
2013,8032.10	Relatively flat	136	95	48	8
2013,8032.11	Oval	1147	109	95	67
Erme Estuary					
2013,8031.1	Plano-convex	789	110	120	30
2013,8031.2	Plano-convex	669	135	115	31

Table 2Bulk chemical composition of tin ingots determined by ICP-AES and ICP-MS (wt.% for tin and $\mu\text{g g}^{-1}$ for other elements).

Sample	Sn	S	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Ag	In	Sb	W	Au	Pb	Bi	U	Total %
Salcombe																		
2010,8032.295	94.1	538	4.2	2065	<8	<10	3.5	18.1	7.15	0.16	13.9	6.55	<0.5	2.15	12.0	13.4	<0.07	94.4
2010,8032.296	100.3	<44	<1.8	86.2	<8	<10	7.2	<2	35.0	<0.1	21.6	46.4	<0.5	<0.5	13.8	31.3	<0.07	100.3
2010,8032.297	98.9	<42	3.6	52.1	<8	<10	2.2	<2	19.5	<0.1	30.1	64.0	<0.5	<0.5	26.4	83.2	<0.07	98.9
2010,8032.298	99.4	<113	<1.8	126	<8	<10	<1.2	<6	14.3	<0.1	29.6	90.0	<0.5	<0.5	27.0	79.4	<0.07	99.5
2010,8032.299	99.5	<57	<1.8	88.4	<8	<10	<1.2	<2	17.4	<0.1	31.1	65.2	<0.5	<0.5	26.7	83.2	<0.07	99.5
2010,8032.300	96.0	<42	<1.8	55.3	<8	<10	<1.2	<2	10.1	0.10	9.87	9.13	<0.5	<0.5	7.08	4.50	<0.07	96.0
2010,8032.301	100.8	<54	7.1	99.4	<8	<10	<1.2	<6	16.1	0.43	33.5	76.8	<0.5	<0.5	30.5	76.7	<0.07	100.8
2010,8032.302	100.9	<185	<1.8	31.4	<8	<10	8.1	10.0	8.97	<0.1	17.9	16.6	<0.5	<0.5	8.86	5.78	<0.07	100.9
2010,8032.303	94.6	<113	2.9	68.7	<8	<10	6.7	<6	5.99	<0.1	11.9	12.9	<0.5	<0.5	6.32	4.61	<0.07	94.7
2010,8032.304	97.4	<40	<1.8	80.2	<8	<10	4.4	<2	21.6	<0.1	5.11	4.10	<0.5	<0.5	12.8	32.7	<0.07	97.4
2010,8032.305	96.7	562	6.0	77.2	<8	<10	5.9	<6	19.3	1.34	13.2	6.76	<0.5	<0.5	19.1	33.7	0.11	96.8
2010,8032.306	99.6	<130	<1.8	43.8	<8	<10	<1.2	<6	6.59	<0.1	12.5	12.7	<0.5	<0.5	6.16	4.60	<0.07	99.6
2010,8032.307	97.9	<58	<1.8	79.8	8.1	<10	2.8	<6	81.2	<0.1	33.2	145	<0.5	<0.5	60.7	120	<0.07	97.9
2010,8032.308	99.2	<53	<1.8	87.4	8.1	<10	24.4	<6	86.0	<0.1	36.8	151	<0.5	<0.5	70.4	128	0.09	99.2
2010,8032.309	99.8	<58	<1.8	58.4	<8	<10	83.1	<6	8.50	<0.1	17.3	15.1	<0.5	<0.5	6.77	4.45	<0.07	99.8
2010,8032.310	96.8	<104	16.8	1461	<8	<10	5.3	<6	7.76	<0.1	13.4	15.8	<0.5	<0.5	5.25	4.66	<0.07	97.0
2010,8032.311	99.9	<174	<1.8	70.1	<8	<10	<1.2	<6	6.64	<0.1	15.5	11.07	<0.5	<0.5	5.03	4.97	<0.07	99.9
2010,8032.312	99.2	<36	<1.8	60.7	<8	<10	28.8	<2	9.55	<0.1	11.0	9.15	<0.5	<0.5	5.84	4.56	<0.07	99.2
2010,8032.313	99.2	<95	<1.8	131.2	<8	<10	<1.2	<6	8.17	<0.1	13.9	289	<0.5	<0.5	4.97	3.22	<0.07	99.3
2010,8032.314	100.1	<66	<1.8	188.8	<8	<10	<1.2	<6	8.22	<0.1	16.6	12.0	<0.5	<0.5	8.69	4.48	<0.07	100.1
2010,8032.315	97.9	<41	<1.8	124.8	<8	<10	2.9	<6	11.9	<0.1	10.7	5.55	<0.5	<0.5	11.3	46.0	<0.07	97.9
2010,8032.316	101.1	<44	<1.8	54.5	<8	<10	1.8	19.2	7.53	<0.1	20.2	8.68	<0.5	<0.5	12.8	6.50	<0.07	101.1
2010,8032.317	100.6	<46	<1.8	431	<8	<10	1.8	<6	8.27	<0.1	22.0	277	<0.5	<0.5	8.34	3.20	<0.07	100.7
2010,8032.318	100.0	<64	11.0	113	<8	<10	5.1	13.6	19.3	<0.1	12.7	6.31	<0.5	<0.5	17.0	31.0	<0.07	100.1
2010,8032.320	99.2	<29	<1.8	48.9	<8	<10	<1.2	<6	12.5	<0.1	29.9	233	<0.5	<0.5	8.37	3.60	<0.07	99.2
2010,8032.321	100.0	<30	<1.8	73.4	<8	<10	3.8	<6	8.85	<0.1	14.9	12.2	<0.5	<0.5	10.4	4.32	<0.07	100.0
2010,8032.322	101.4	<44	<1.8	269	9.3	<10	<1.2	<6	34.4	<0.1	40.3	140	<0.5	<0.5	30.0	49.2	<0.07	101.5
2010,8032.323	100.3	<78	<1.8	162	<8	24.0	2742	<6	29.0	0.41	6.71	25.4	<0.5	2.36	87.2	11.5	<0.07	100.6
2010,8032.329	98.6	117	4.0	251	<8	<10	286	18.8	21.6	0.61	34.9	9.69	<0.5	0.70	7.19	15.2	0.18	98.6
2013,8032.1	98.0	<36	4.0	103	<8	<10	19.8	<2	13.2	<0.1	7.08	13.3	<0.5	<0.5	13.4	6.54	<0.07	98.0
2013,8032.2	97.4	<44	<1.8	100	<8	<10	4.7	<2	16.5	<0.1	26.7	66.5	<0.5	<0.5	18.4	83.1	<0.07	97.4
2013,8032.3	96.6	<41	2.0	143	<8	<10	15.7	2.3	9.76	<0.1	11.2	9.73	<0.5	<0.5	92.3	5.17	<0.07	96.7
2013,8032.4	93.0	82	12.4	462	<8	<10	54.5	<2	7.64	0.14	4.47	11.5	<0.5	<0.5	4.99	5.02	0.17	93.1
2013,8032.6	94.1	<46	5.2	575	<8	<10	6.8	<2	7.79	<0.1	5.35	9.72	0.91	<0.5	4.09	5.46	0.11	94.2
2013,8032.7	97.0	60	<1.8	70.3	<8	<10	32.5	<2	11.1	<0.1	4.80	8.35	0.65	<0.5	14.7	5.65	<0.07	97.0
2013,8032.8	97.0	<42	<1.8	122	<8	<10	14.5	<2	58.9	0.15	24.8	79.9	<0.5	<0.5	36.5	65.3	<0.07	97.0
2013,8032.9	97.1	48	<1.8	735	<8	<10	26.9	16.4	45.0	<0.1	14.2	101	<0.5	<0.5	16.7	26.5	<0.07	97.2
2013,8032.10	96.5	92	5.9	538	<8	<10	3.6	<2	9.65	<0.1	11.6	10.8	0.87	<0.5	5.87	4.76	<0.07	96.6
2013,8032.11	98.7	293	<1.8	143	<8	<10	66.2	11.3	17.3	<0.1	25.4	68.6	0.73	<0.5	31.6	75.7	<0.07	98.8
Min	93.0	<29	<1.8	31.4	<8	<10	<1.2	<2	5.99	<0.1	4.47	4.1	<0.5	<0.5	4.09	3.2	<0.07	
Max	101.4	562	16.8	2065	9.3	24.0	2742	19.2	86	1.34	40.3	289	0.91	2.36	92.3	128	0.18	

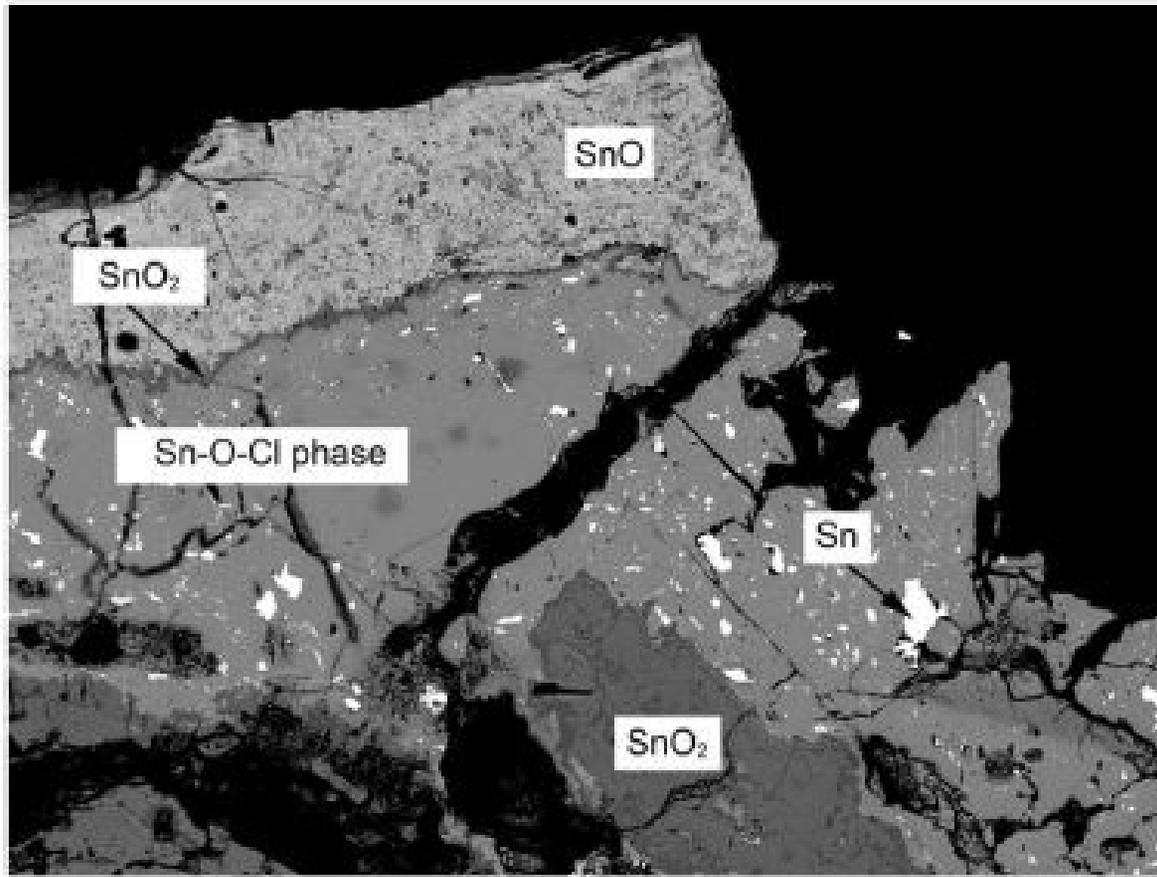


Fig. 5. SEM image of Erme Estuary ingot 2013,803 11, showing surface crust consisting of a mixture of SnO, SnO₂, Sn–O–Cl phases and residual metallic tin.

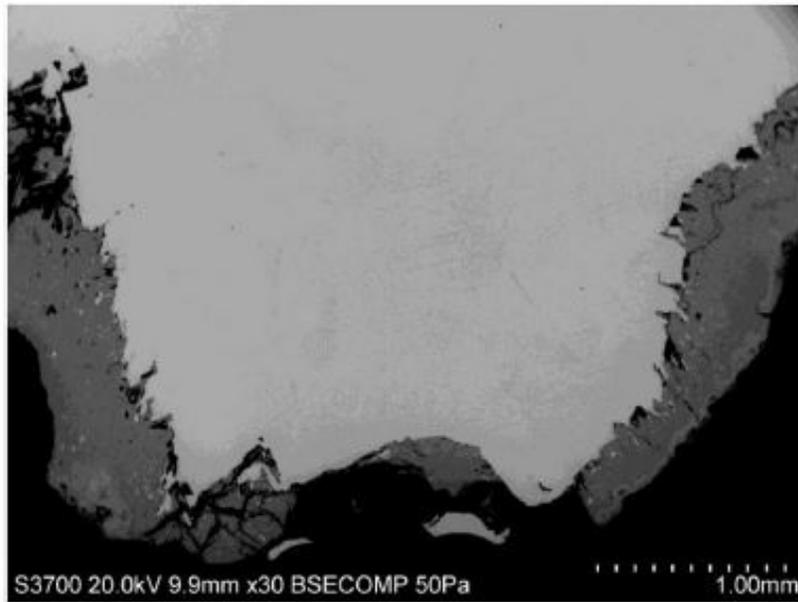


Fig. 4. SEM image of Salcombe tin ingot 2010,8032.311, showing surface oxidation crust and unaltered metal remaining in the centre.

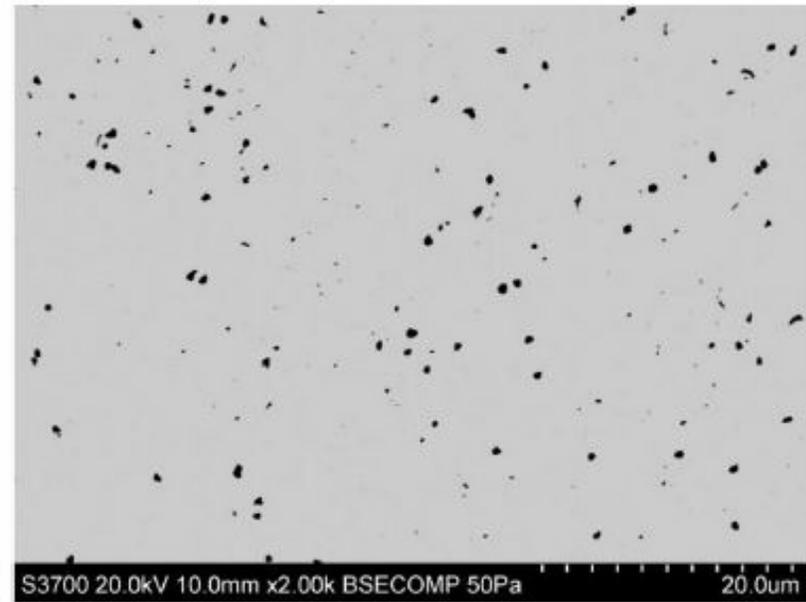


Fig. 6. SEM image of Salcombe ingot 2010,8032.313, showing small pores present in the metal.

Tutti i lingotti di stagno di Salcombe analizzati sembravano essere "puri" con una variazione composizionale limitata (un campione contiene circa lo 0,1% di ferro; un altro campione contiene circa lo 0,1% di rame).

Le composizioni dei lingotti di stagno Salcombe non sembrano essere legati a qualsiasi altro campione di stagno trovato altrove (relikto di Uluburun-Turchia o Sardegna).

Ulteriori studi su questi materiali (analisi **dell'isotopo di piombo e stagno** del lingotti, analisi compositive e isotopiche di campioni di stagno noti e minerali provenienti da diverse regioni, in particolare dalla Cornovaglia e dal Devon) sono necessari per identificare la provenienza dei lingotti di stagno così fornendo un contributo allo studio del commercio di metalli.

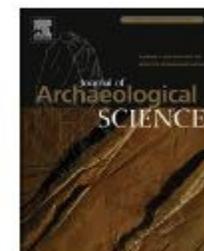


ELSEVIER

Contents lists available at [ScienceDirect](#)

Journal of Archaeological Science

journal homepage: <http://www.elsevier.com/locate/jas>



Tin isotope fractionation during experimental cassiterite smelting and its implication for tracing the tin sources of prehistoric metal artefacts



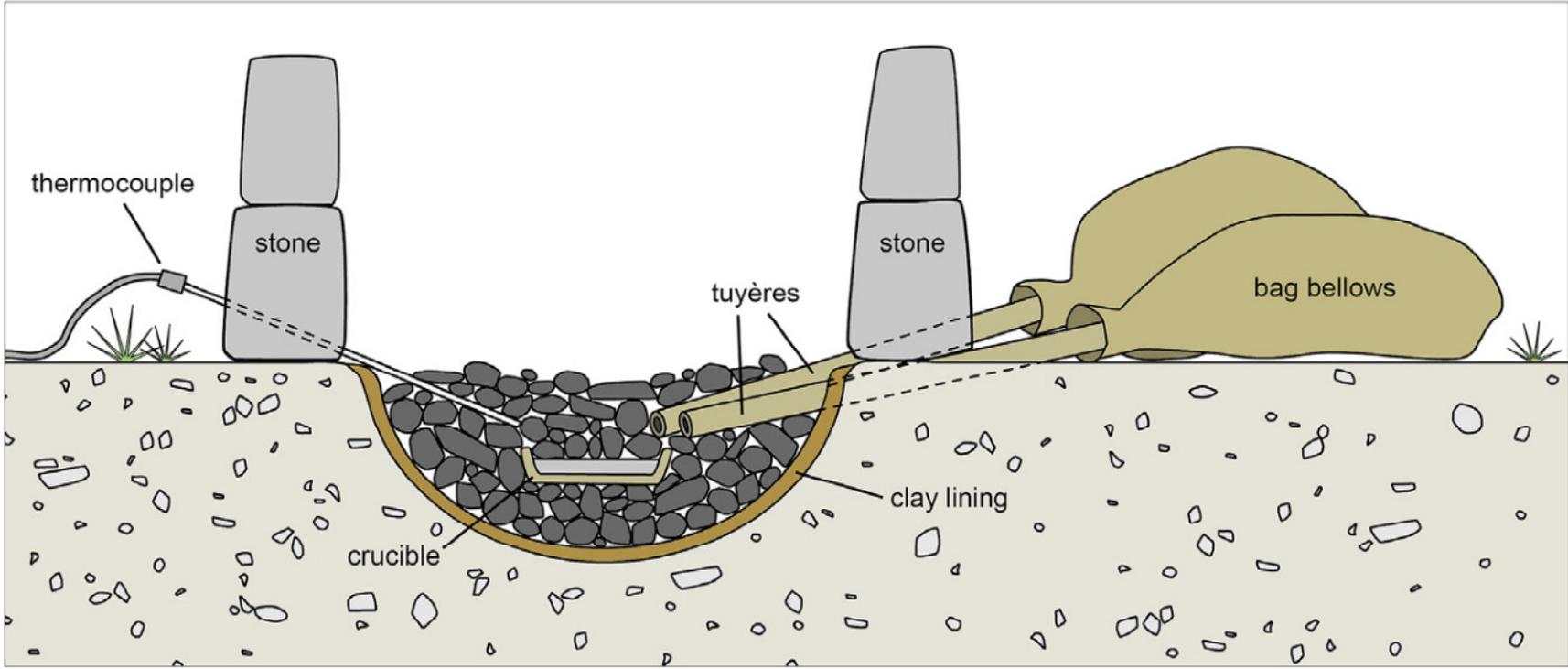
Daniel Berger ^{a, *}, Elin Figueiredo ^{b, c}, Gerhard Brügmann ^a, Ernst Pernicka ^{a, d}

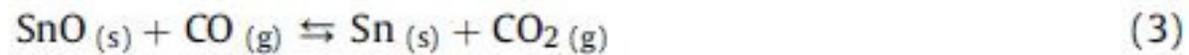
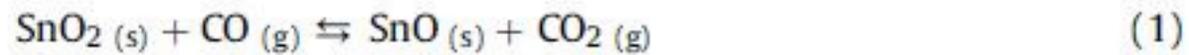
^a Curt-Engelhorn-Zentrum Archäometrie gGmbH, D6, 3, D-68159, Mannheim, Germany

^b CENIMAT/13N, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2829-516, Caparica, Portugal

^c GEAAT, Faculdade de Historia, Universidad de Vigo, Campus de Ourense, s/n, 32004, Spain

^d Institut für Geowissenschaften, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, Im Neuenheimer Feld 234–236, D-69120, Heidelberg, Germany





L'ossido stannoso **altamente volatile** (SnO) è formato come prodotto intermedio durante la riduzione della cassiterite a stagno (recupero di stagno secondo alcuni autori nell'ordine del 50%, secondo altri autori nell'ordine di solo il 12%)

