

CONTRIBUTI DEL PALEOMAGNETISMO ALLA STRATIGRAFIA DEL PLEISTOCENE MEDIO-SUPERIORE (BRUNHES CHRON)

Leonardo Sagnotti

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia - Roma
e-mail <sagnotti@ingv.it>

ABSTRACT: L. Sagnotti, The contribute of paleomagnetism to the stratigraphy of the middle- late Pleistocene (Brunhes Chron). This manuscript presents an updated summary on the contribute brought by paleomagnetism to the definition of a high-resolution magnetic stratigraphy for the middle-late Pleistocene. The middle-late Pleistocene spans a time intervals during which the Earth magnetic field held predominantly a stable normal polarity and includes the whole normal polarity Brunhes Chron. In absence of full reversals of the geomagnetic field, magnetic stratigraphy is based upon (a) the record of geomagnetic paleosecular variations (PSV), as documented in archaeological or volcanic material and in lacustrine and marine sedimentary sequences for the last few ka, (b) the variation of geomagnetic paleointensity and (c) the occurrence of geomagnetic excursions. With regards to Europe, archeomagnetic PSV curves were reconstructed back to 8 ka (i.e., ca. 6000 BC), whereas continuous PSV records based on paleomagnetism of sediments extend back to the last 10-12 ka. The variation in intensity of the earth magnetic field has been reconstructed in the detail at a global scale for the last 800 ka. Relative paleointensity curves reconstructed in sedimentary sequences provide original correlation and dating tools and are particularly valuable to establish high-resolution age models in sequences that may lack other valuable stratigraphic proxies, such as those deposited in the carbonate-corrosive waters of peri-Antarctic margins. Finally, the recognition and the dating of geomagnetic excursions, defined as sharp, short-lived and wide geomagnetic variations, during which the earth magnetic field has departed from its usual near-axial configuration but did not give rise to complete reversals, is providing the basis for the establishment of a Geomagnetic Instability Time Scale (GITS) that extends back to the last 2.2 Ma.

Parole chiave: Stratigrafia paleomagnetica, Pleistocene medio-superiore.

Keywords: Paleomagnetic stratigraphy, middle-late Pleistocene.

INTRODUZIONE

Sin dagli anni '60, quando sono state messe a punto le prime versioni della scala temporale delle polarità magnetiche, la classica applicazione delle ricerche di paleomagnetismo negli studi di stratigrafia è stata quella dell'uso delle inversioni di polarità del campo magnetico terrestre (cmt) identificate in successioni stratigrafiche quale elemento geofisico di correlazione a scala globale di sequenze laviche e sedimentarie, terrestri e marine.

Negli ultimi decenni si sono progressivamente raffinate le conoscenze, e l'inquadramento cronologico, sulle variazioni del cmt a diversa scala temporale. Queste conoscenze hanno portato allo sviluppo di potenzialità originali per l'uso del paleomagnetismo a fini stratigrafici anche durante le epoche (Chron) a polarità magnetica costante. I risultati ottenuti hanno significativamente ampliato, in particolare modo, le possibili applicazioni stratigrafiche del paleomagnetismo nello studio di successioni rocciose formatesi durante l'attuale epoca di polarità magnetica normale (Brunhes Chron), che copre gli ultimi 780 ka circa (si rimanda a SINGER *et al.*, 2005 per una dettagliata discussione della cronologia relativa alla dinamica del cmt a ridosso dell'ultima inversione di polarità del campo).

Nello specifico, le conoscenze progressivamente acquisite su (a) i cambiamenti locali di direzione del cmt legati alla paleovariatione secolare, sulle variazioni di intensità del cmt (b) e sulla presenza di escursioni geomagnetiche (c) forniscono originali elementi stratigrafici

che possono permettere di correlare e datare ad alta risoluzione sequenze stratigrafiche dell'Olocene e del Pleistocene medio-superiore. Nel seguito, verranno sinteticamente esposti gli elementi fondamentali che caratterizzano queste variazioni del cmt ed alcuni esempi di applicazione a fini stratigrafici delle relative registrazioni paleomagnetiche.

LA PALEOVARIAZIONE SECOLARE

L'esecuzione di sistematiche osservazioni dirette sulla direzione del cmt è limitata, nei casi più favorevoli, agli ultimi 4 secoli. Queste osservazioni hanno comunque permesso di riconoscere l'esistenza di una variazione secolare del cmt e di definire delle curve locali di variazione della declinazione ed inclinazione del campo a partire dal XVII secolo (per le principali capitali europee). Per una breve rassegna della storia delle osservazioni e misure dirette del cmt si rimanda al recente articolo di JONKERS (2007) e, per la storia delle misure geomagnetiche in Italia in particolare, alle sintesi di CAFARELLA *et al.*, 1992 e LANZA *et al.*, 2005a.

Lo studio del paleomagnetismo delle sequenze sedimentarie e laviche da l'opportunità di estendere nel tempo geologico le misurazioni dirette sulle variazioni del cmt e al contempo fornisce un originale metodo di datazione delle successioni stratigrafiche (e.g. VEROSUB, 1988). In particolare, i dati paleomagnetici relativi a successioni vulcaniche o a successioni sedimentarie ad alto tasso di deposizione (prevalentemente lacustri) ha

portato alla definizione di curve di riferimento per la ricostruzione della paleovariatione secolare (PSV master curves) del cmt, valide a scala regionale su aree che si estendono per varie decine di gradi in latitudine e longitudine (e.g. HAGSTRUM & CHAMPION, 2002; ST-ONGE *et al.*, 2003; TURNER & THOMPSON, 1981; 1982). Al momento, le PSV master curves disponibili per la regione Europea si estendono a coprire gli ultimi 10-12 kyr (e.g. SNOWBALL *et al.*, 2007) (Fig. 1). I dati di PSV da successioni sedimentarie hanno il vantaggio di fornire una registrazione "continua" delle variazioni del cmt, ma soffrono al contempo dell'effetto di "filtraggio" del segnale geomagnetico primario, legato alla diluizione temporale dei processi di acquisizione di una magnetizzazione rimanente da parte dei sedimenti durante la deposizione, la compattazione e la diagenesi. Questo effetto a sua volta si traduce in una profondità variabile del livello stratigrafico in cui la magnetizzazione naturale risulta effettivamente bloccata e può essere mantenuta per tempi geologici (e.g. BLEIL & VON DOBENECK, 1999; HYODO, 1984; ROBERTS & WINKLHOFER, 2004; SAGNOTTI *et al.*, 2005; SPASSOV *et al.*, 2003; VEROSUB, 1977).

Per quanto riguarda le possibili applicazioni a fini stratigrafici nell'area italiana, i dati paleomagnetici sulla paleovariatione secolare del cmt sono stati recentemente applicati quali originale strumento di datazione ad alta risoluzione in sequenze sedimentarie Oloceniche sia lacustri (e.g. BRANDT *et al.*, 1999) che marine (e.g.; IORIO *et al.*, 2004; ROLPH *et al.*, 2004; VIGLIOTTI, 2006).

D'altra parte, i dati paleomagnetici da sequenze vulcaniche hanno il vantaggio di fornire delle letture "istantanee" ad alta definizione della direzione del cmt all'epoca dell'eruzione, ma soffrono al contempo del limite di essere discontinue a scala temporale. Per cui l'uso di tali dati a fini di stratigrafici è vincolato ad una correlazione (sovente non univoca) dei dati paleomagnetici da distinti corpi vulcanici alle PSV master curves. Le applicazioni dello studio a fini stratigrafici della paleovariatione secolare nei prodotti vulcanici dell'area Mediterranea sono numerose e riguardano tutti i principali vulcani attivi italiani (e.g. HOYE, 1981; INCORONATO *et al.*, 2002; LANZA & ZANELLA, 2003; LANZA *et al.*, 2005a; PRINCIPE *et al.*, 2004; ROLPH *et al.*, 1987; SPERANZA *et al.*, 2004; 2006; TANGUY *et al.*, 2003). Negli ultimi anni si è sviluppato un vivace dibattito specificatamente focalizzato sui limiti di risoluzione cronologica che possono essere raggiunti con metodi paleomagnetici (si veda ARRIGHI *et al.*, 2005; LANZA & ZANELLA, 2006; LANZA *et al.*, 2005b; PRINCIPE *et al.*, 2006; SPERANZA *et al.*, 2005; 2006; TANGUY *et al.*, 2005). E' opinione dello scrivente che le incertezze insite nel metodo implicano che le datazioni originali che possono essere ottenute attraverso lo studio paleomagnetico di corpi vulcanici eruttati nel corso degli ultimi migliaia di anni sono solitamente definite con un'approssimazione alla scala secolare, che può restringersi ad alcuni decenni solo nei casi più favorevoli per i periodi caratterizzati da un elevato rateo di variazione direzionale del cmt.

Nel corso degli ultimi decenni numerosi dati sono

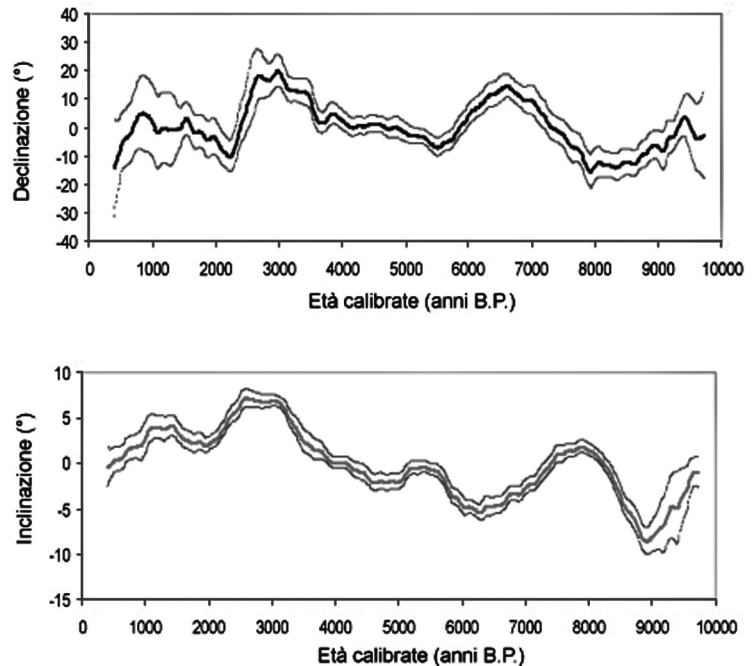


Fig. 1 - La curva di paleovariatione secolare recentemente pubblicata da SNOWBALL *et al.* (2007) per l'Olocene della regione Scandinava (FENNOSTACK). I dati di declinazione ed inclinazione paleomagnetica sono stati filtrati con una finestra mobile di 150 anni. Le curve sottili indicano i limiti superiore ed inferiore di 95% di confidenza associati con le medie mobili.

*The Holocene paleomagnetic secular variation master curve for Fennoscandia (FENNOSTACK) recently published by SNOWBALL *et al.* (2007). The paleomagnetic declination and inclination data were smoothed with a 150-year running window. The thin lines indicate the upper and lower 95% confidence limits associated with each average value.*

stati pubblicati sulla paleovariatione del cmt registrata in materiale archeologico. La mole di dati raccolta ha consentito di mettere a punto varie curve archeomagnetiche di riferimento che si estendono fino a 8 ka (6000 a.C.) circa per le variazioni di direzione ed inclinazione del cmt nell'area Europea, con i dati più estesi, continui ed affidabili relativi alla regione francese, alle isole britanniche ed alla Bulgaria (e.g. BUCUR *et al.*, 1994; GALLET *et al.*, 2002; KOVACHEVA *et al.*, 1998; ZANARINI *et al.*, 2007). Tali curve vengono poi utilizzate quale riferimento per la datazione di materiale archeologico (principalmente fornaci e terrecotte; si veda JORDANOVA *et al.*, 2004 a titolo di esempio).

LE VARIAZIONI DI PALEOINTENSITÀ

Parallelamente alle ricerche sulle variazioni direzionali del cmt si sono progressivamente sviluppate anche le ricerche sulle variazioni di paleointensità del campo. Tali ricerche si articolano prevalentemente su due "filoni": (1) studi volti alla ricostruzione della paleointensità assoluta del campo mediante lo studio paleomagnetico di materiale archeologico (per le ultime migliaia di anni; e.g. AITKEN *et al.*, 1988; GENEVEY & GALLET, 2002), di materiale vulcanico (e.g. HILL & SHAW, 1999), e di inclusioni ferromagnetiche in singoli cristalli (che arrivano a coprire praticamente l'intera storia della Terra; si veda la recente rassegna di TARDUNO *et al.*, 2007), e (2) studi sulla variazione di paleointensità relati-

va registrata in sequenze sedimentarie (e.g. TAUXE, 1993; VALET, 2003; BRACHFELD, 2007). Quest'ultimo filone è senz'altro quello più utile al fine di datare e correlare successioni stratigrafiche. Lo studio di decine di curve di variazione della paleointensità relativa (RPI) del cmt in carote sedimentarie prelevate nei diversi oceani ha portato alla messa a punto di curve sintetiche globali di riferimento che coprono attualmente gli ultimi 800 ka (SINT-200 e SINT-800 di GUYODO & VALET, 1996; 1999) e che forniscono una documentazione continua della variazione RPI del campo (Fig. 2a). Curve regionali a più alta risoluzione sono state successivamente ricostruite per intervalli temporali di più breve durata (quali la NAPIS-75 per l'Atlantico settentrionale, LAJ *et al.*, 2000 e SAPIS per l'Atlantico meridionale; STONER *et al.*, 2002), poi riunite in una curva sintetica globale (GLOPIS-75; LAJ *et al.*, 2004) che si estende per gli ultimi 75 ka.

La ricostruzione di curve RPI e la correlazione alle curve sintetiche globali di riferimento permettono di definire dei modelli di età originali ad alta risoluzione in sequenze sedimentarie che sono difficilmente databili per altra via, come ad esempio le successioni dai bacini marginali peri-Antartici, ove le acque sono corrosive per i microfossili a gusci carbonatico (e.g. BRACHFELD *et al.*, 2003; MACRÌ *et al.*, 2005; 2006; SAGNOTTI *et al.*, 2001).

LE ESCURSIONI DEL CMT

Le escursioni geomagnetiche sono definite come quei casi in cui il cmt si è notevolmente discostato dalla usuale configurazione di campo prevalentemente dipolare, pressoché allineato all'asse di rotazione. Ossia, le escursioni sono state definite come eventi di instabilità geomagnetica in cui il polo geomagnetico virtuale ha avuto una colatitudine $> 45^\circ$. Si tratta di eventi di relativamente breve durata (generalmente < 2 ka) che si concludono senza che si stabilizzi una effettiva inversione di polarità. Per l'effettiva distinzione tra escursioni ed inversioni del cmt si rimanda al fondamentale articolo di GUBBINS (1999).

La definizione del numero e la datazione delle escursioni geomagnetiche effettivamente occorse durante il Brunhes sono tuttora oggetto di revisione (e.g. CHANNELL, 2006; LUND *et al.*, 2006; MACRÌ *et al.*, 2005; ROBERTS & WINKLHOFER, 2004). Un primo tentativo di sintesi è stato proposto nella redazione di una prima scala temporale di

instabilità geomagnetica (GITS) pubblicata da SINGER *et al.* (2002), con ben 14 possibili escursioni nel corso del Chron Brunhes. Nella versione più recente della GITS (SINGER, 2007) il numero di escursioni geomagnetiche nel Chron Brunhes è ridotto a 12, e la loro occorrenza viene posta in relazione alle variazioni di intensità del cmt per gli ultimi 0.8 Ma (Fig. 2b). La GITS di SINGER (2007) è estesa agli ultimi 2.2 Ma ed include anche le escursioni occorse nella parte alta del Chron Matuyama.

La datazione delle escursioni è solitamente basata su datazioni radiometriche in sequenze vulcaniche o sull'interpolazione e sulla calibrazione astronomica di marker isotopici nelle successioni sedimentarie. In ogni caso, l'identificazione di una escursione geomagnetica in una successione rocciosa ha considerevoli potenzialità ai fini di correlazione e di datazione stratigrafica, in quanto la brevità dell'evento può consentire una datazione dei livelli interessati ad altissima risoluzione.

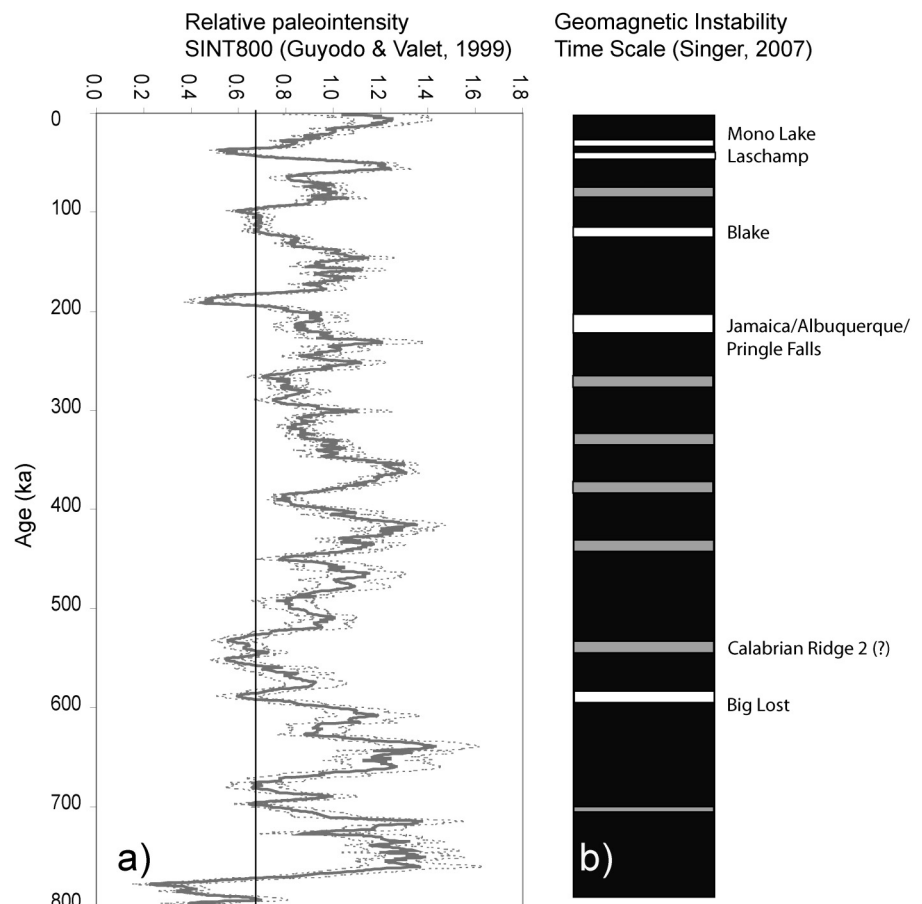


Fig. 2 - a) la curva sintetica globale di variazione di paleointensità relativa per gli ultimi 800000 anni (SINT-800 di GUYODO & VALET, 1999), b) la "Geomagnetic instability time scale" di SINGER (2007) per il Chron di polarità magnetica normale Brunhes. In grigio vengono indicate le escursioni che non sono ancora ritenute precisamente datate o che sono meno definite paleomagnetivamente. In bianco sono indicate le escursioni datate con maggior precisione e ben documentate in diverse successioni stratigrafiche.

a) the global relative paleointensity stack curve for the last 800 ka (SINT-800 of GUYODO and VALET, 1999), b) the Geomagnetic Instability Time Scale of SINGER (2007) for the Brunhes Chron. Grey intervals indicate geomagnetic excursions which are still poorly documented or not yet precisely dated. White intervals indicate the geomagnetic excursions which have been reliably documented in various stratigraphic sequences and are dated with greater accuracy.

BIBLIOGRAFIA

- AITKEN M., A. ALLSOP G. BUSSELL, and M. WINTER, 1988. Determination of the intensity of the Earth's magnetic field during archaeological times: Reliability of the Thellier technique, *Rev. Geophys.*, **26**, 3-12.
- ARRIGHI S., J.-C. TANGUY V. COURTILLOT and M. LEGOFF 2005. Reply to comment by F. Speranza et al. on "Recent eruptive history of Stromboli (Aeolian Islands, Italy) determined from high-accuracy archeomagnetic dating", *Geophys. Res. Lett.*, **32**(23), L23305, doi:10.1029/2005GL023768.
- BLEIL U. and v. DOBENECK T., 1999. Geomagnetic events and relative paleointensity records - clues to high-resolution paleomagnetic chronostratigraphies of Late Quaternary marine sediments? In: *Use of Proxies in Paleoceanography: Examples from the South Atlantic* (Fischer, G. and Wefer, G., eds.), pp. 635-654. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- BRACHFELD S.A., DOMACK E.W., KISSEL C., LAJ C., LEVENTER A., ISHMAN S.E., GILBERT R., CAMERLENGHI A., EGLINTON L.B., 2003. Holocene History of the Larsen Ice Shelf Constrained by Geomagnetic Paleointensity Dating. *Geology*, **31**: 749-752.
- BRACHFELD S.A., 2007. Paleointensity, relative, in sediments in: *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*; (Editors David Gubbins and Emilio Herrero-Bervera), Springer, 1054 pp., p. 758-765.
- BRANDT U., NOWAKZYK N.R., RAMRATH A., BRAUER A., MINGRAM J., WULF, S. AND NEGENDANK J.F.W., 1999. Paleomagnetism of Holocene and Late Pleistocene sediments from Lago di Mezzano and Lago Grande di Monticchio (Italy): initial results, *Quat. Sci. Rev.*, **18**, 961-976.
- BUCUR I., 1994. The direction of the terrestrial magnetic field in France, during the last 21 centuries: Recent progress, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **87**, 95-109.
- CAFARELLA L., A. DE SANCTIS and A. MELONI 1992. Secular variation in Italy from historical geomagnetic field measurements, *Phys. Earth planet. Int.*, **63**, 206-221.
- CHANNELL J.E.T., 2006. Late Brunhes polarity excursions (Mono Lake, Laschamp, Iceland Basin and Pringle Falls) recorded at ODP Site 919 (Irminger Basin), *Earth Planet. Sci. Lett.*, **244**, 378-393.
- GALLET Y., A. GENEVEY and M. LE GOFF, 2002. Three millennia of directional variation of the earth's magnetic field in western Europe as revealed by archaeological artefacts, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **131**, 81- 89.
- GENEVEY A. and Y. GALLET, 2002. Intensity of the geomagnetic field in western Europe over the past 2000 years: New data from ancient French pottery, *J. Geophys. Res.*, **107**, NO. B11, 2285, doi:10.1029/2001JB000701.
- GUBBINS D., 1999. The distinction between geomagnetic excursions and reversals, *Geophys. J. Int.* **137**, F1-F3.
- GUYODO Y. and VALET J.-P., 1996. Relative variations in geomagnetic intensity from sedimentary records: the past 200,000 years. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **143**: 23-36.
- GUYODO Y. and VALET J.-P., 1999. Global changes in intensity of the Earth's magnetic field during the past 800 kyr. *Nature (London)* **399**: 249-252.
- HAGSTRUM J. T. and D. E. CHAMPION, 2002. A Holocene paleosecular variation record from 14C-dated volcanic rocks in western North America, *J. Geophys. Res.*, **107**(B1), 2025, doi:10.1029/2001JB000524.
- HILL M.J. and J. SHAW, 1999. Palaeointensity results for historic lavas from Mt Etna using microwave demagnetization/remagnetization in a modified Thellier-type experiment, *Geophys. J. Int.* **139** (2), 583-590.
- HYODO M., 1984. Possibility of reconstruction of the past geomagnetic field from homogeneous sediments, *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, **36**, 45-62
- HOYE G. S., 1981. Archaeomagnetic secular variation record of Mount Vesuvius, *Nature*, **291**, 216- 218.
- INCORONATO A., A. ANGELINO R. ROMANO A. FERRANTE R. SAUNA G. VANACORE and C. VECCHIONE, 2002. Retrieving geomagnetic secular variation from lava flows: evidence from Mount Arso, Etna and Vesuvius (Southern Italy), *Geophys. J. Int.*, **149**, 724-730.
- IORIO M., L. SAGNOTTI A. ANGELINO F. BUDILLON B. D'ARGENIO J. DINARÈS-TURELL P. MACRÌ and E. MARSELLA, 2004. High resolution petrophysical and palaeomagnetic study of Late Holocene Shelf Sediments, Salerno Gulf, Tyrrhenian Sea, *The Holocene*, **14**, 417-425.
- JONKERS A.R.T., 2007. History of Geomagnetism, in: *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*; (Editors David Gubbins and Emilio Herrero-Bervera), Springer, 1054 pp., p. 355-360.
- JORDANOVA N., M. KOVACHEVA and M. KOSTADINOVA, 2004. Archaeomagnetic investigation and dating of Neolithic archaeological site (Kovachevo) from Bulgaria, *Phys. Earth Planet. Int.*, **147**, 89-102.
- KOVACHEVA M., N. JORDANOVA and V. KARLOUKOVSKI, 1998. Geomagnetic field variations as determined from Bulgarian archaeological data. Part II: the last 8000 years, *Surv. Geophys.*, **19**, 431-460.
- LAJ C., C. KISSEL, A. MAZAUD J.E.T CHANNELL and J. BEER, 2000. North Atlantic paleointensity stack since 75 ka (NAPIS-75) and the duration of the Laschamp event. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* **358**, 1009-1025.
- LAJ C., C. KISSEL J. BEER, 2004. High resolution global paleointensity stack since 75 kyr (GLOPIS-75) calibrated to absolute values, *Timescales of the Paleomagnetic field*, AGU Geophysical Monograph Series, vol. **145**, pp. 255-265.
- LANZA R. and E. ZANELLA, 2003. Paleomagnetic secular variation at Vulcano (Aeolian Islands) during the last 135 kyr, *Earth planet. Sci. Lett.*, **213**, 321-336.
- LANZA R., A. MELONI and E. TEMA, 2005a, Historical measurements of the Earth's magnetic field compared with remanence directions from lava flows in Italy over the last four centuries, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **148**, 97- 107.
- LANZA R., A. MELONI and E. TEMA, 2005b. Reply to comment on "Historical measurements of the Earth's magnetic field compared with remanence directions from lava flows in Italy over the last four

- centuries" by Tanguy J.-C., Principe C., Arrighi S., *Phys. Earth Planet. Inter.*, **152**, 121-124.
- LANZA R., and E. ZANELLA, 2006. Comments on "Chronology of Vesuvius' activity from A. D. 79 to 1631 based on archeomagnetism of lavas and historical sources" by C. Principe et al., *Bull. Volcanol.*, **68**, 394-396.
- LUND S., J.S. STONER J.E.T. CHANNELL and G. ACTON, 2006. A summary of Brunhes paleomagnetic field variability recorded in Ocean Drilling Program cores, *Phys. Earth Planet. Int.*, **156**, 194-204.
- MACRÌ P., L. SAGNOTTI J. DINARÈS-TURELL and A. CABURLOTTO, 2005. A composite record of Late Pleistocene relative geomagnetic paleointensity from the Wilkes Land Basin (Antarctica), *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **151**, 223-242.
- MACRÌ P., L. SAGNOTTI and R.G. LUCCHI, 2006. A stacked record of relative geomagnetic paleointensity for the past 270 kyr from the western continental rise of the Antarctic Peninsula, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **252**, 162-179.
- PRINCIPE C., J.-C. TANGUY S. ARRIGHI, A. PAIOTT, M. LE GOFF and U. ZOPPI, 2004. Chronology of Vesuvius' activity from AD 79 to 1631 based on archeomagnetism of lavas and historical sources, *Bull. Volcanol.*, **66**, 703-724.
- PRINCIPE C., J.-C. TANGUY, S. ARRIGHI and M. LE GOFF, 2006. Reply to the comment on "Chronology of Vesuvius' activity from A. D. 79 to 1631 based on archeomagnetism of lavas and historical sources" by R. Lanza and E. Zanella, *Bull. Volcanol.*, **68**, 397-398.
- ROBERTS A.P. and M. WINKLHOFER, 2004. Why are geomagnetic excursions not always recorded in sediments? Constraints from post-depositional remanent magnetization lock-in modelling, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **227**, 345-359.
- ROLPH T.C., J. SHAW and J.E. GUEST 1987. Geomagnetic field variations as a dating tool: application to Sicilian lavas, *J. Archaeolog. Sci.*, **14**, 215-225.
- ROLPH T.C., L. VIGLIOTTI and F. OLDFIELD, 2004. Mineral magnetism and geomagnetic secular variation of marine and lacustrine sediments from central Italy: timing and nature of local and regional Holocene environmental change, *Quat. Sci. Rev.*, **23**, 1699-1722.
- SAGNOTTI L., P. MACRÌ, A. CAMERLENGHI and M. REBESCO, 2001. Environmental magnetism of Late Pleistocene sediments from the pacific margin of the Antarctic Peninsula and interhemispheric correlation of climatic events. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **192**: 65-80.
- SAGNOTTI L., F. BUDILLON, J. DINARÈS-TURELL, M. IORIO and P. MACRÌ, 2005. Evidence for a variable paleomagnetic lock-in depth in the Holocene sequence from the Salerno Gulf (Italy): implications for "high-resolution" paleomagnetic dating, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, Vol. **6**, N. 11, Q11013, doi:10.1029/2005GC001043.
- SINGER B.S., M.K. RELLE, K.A. HOFFMAN, A. BATTLE, C. LAJ, H. GUILLOU and J.C. CARRACEDO, 2002. Ar/Ar ages from transitionally magnetized lavas on La Palma, Canary Islands, and the geomagnetic instability timescale. *J. Geophys. Res.*, **107**(B11): 2307. doi: 10.1029/2001JB001613.
- SINGER B.S., K.A. HOFFMANN, R.S. COE, L.L. BROWN, B.R. JICHA, M.S. PRINGLE and A. CHAUVIN, 2005. Structural and temporal requirements for geomagnetic field reversal deduced from lava flows, *Nature*, **434**, 633-636.
- SINGER B.S., 2007. Polarity transitions: radioisotopic dating, in: *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*; (Editors David Gubbins and Emilio Herrero-Bervera), Springer, **1054** pp., p. 834-839.
- SNOWBALL I., L. ZILLÉN, A. OJALA, T. SAARINEN and P. SANDGREN, 2007. FENNOSTACK and FENNORPIS: Varve dated Holocene palaeomagnetic secular variation and relative palaeointensity stacks for Fennoscandia, *Earth and Planet. Sci. Lett.*, **255**, 106-116.
- SPASSOV S., F. HELLER, M.E. EVANS, L.P. YUE, T. VON DOBENECK, 2003. A lock-in model for the complex Matuyama-Brunhes boundary record of the loess/palaeosol sequence at Lingtai (Central Chinese Loess Plateau), *Geophys. J. Int.*, **155**, 350-366.
- SPERANZA F., M. POMPILIO and L. SAGNOTTI, 2004. Paleomagnetism of spatter lavas from Stromboli volcano (Aeolian Islands, Italy): Implications for the age of paroxysmal eruptions, *Geophysical Research Letters* **31**, doi: 10.1029/2003GL018944, 2004.
- SPERANZA F., L. SAGNOTTI and A. MELONI, 2005. Comment on "Recent eruptive history of Stromboli (Aeolian Islands, Italy) determined from high-accuracy archeomagnetic dating" by S. Arrighi et al., *Geophysical Research Letters*, **32**, L23306, doi:10.1029/2005GL022590.
- SPERANZA F., S. BRANCA, M. COLTELLI, F. D'AJELLO CARACCILO and L. VIGLIOTTI, 2006. How accurate is "paleomagnetic dating" ? New evidence from historical lavas from Mount Etna, *J. Geophys. Res.*, **111**, B12S33, doi:10.1029/2006JB004496.
- STONER J.S., C. LAJ, J.E.T. CHANNELL and C. KISSEL, 2002. South Atlantic (SAPIS) and North Atlantic (NAPIS) geomagnetic paleointensity stacks (0-80 ka): implications for inter-hemispheric correlation. *Quat. Sci. Rev.*, **21**: 1142-1151.
- ST-ONGE G., J.S. STONER and C. HILLAIRE-MARCEL, 2003. Holocene paleomagnetic records from the St. Lawrence Estuary, eastern Canada: centennial to millennial-scale geomagnetic modulation of cosmogenic isotopes, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **209**, 113-130.
- Tarduno J.A., R.D. Cottrell and A.V. SMIRNOV, 2007. Paleointensity: absolute determinations using single plagioclase crystals, in: *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*; (Editors David Gubbins and Emilio Herrero-Bervera), Springer, 1054 pp., p. 749-753.
- TANGUY J.-C., C. PRINCIPE and S. ARRIGHI, 2005. Comment on "Historical measurements of the Earth's magnetic field compared with remanence directions from lava flows in Italy over the last four centuries" by R. Lanza, A. Meloni, and E. Tema, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **152**, 116-120.
- TANGUY J.-C., M. LE GOFF, C. PRINCIPE, S. ARRIGHI, V. CHILLEMI, A. PAIOTTI, S. LA DELFA and G. PATANÈ, 2003. Archeomagnetic dating of Mediterranean

- volcanics of the last 2100 years: validity and limits, *Earth planet. Sci. Lett.*, **211**, 111-124.
- TAUXE L., 1993. Sedimentary records of relative paleointensity of the geomagnetic field: theory and practice, *Rev. Geophys.*, **31**, 319-354.
- TURNER G.M. and R. THOMPSON, 1981. Lake sediment record of the geomagnetic secular variation in Britain during Holocene times, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **65**, 703-725.
- TURNER G.M. and R. THOMPSON, 1982. Detransformation of the British geomagnetic secular variation record for Holocene times, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **70**, 789-792.
- VALET J.P., 2003. Time Variations in geomagnetic intensity. *Rev. Geophys.*, **41**, 1004, doi:10.1029/2001RG000104.
- VEROSUB K.L., 1977. Depositional and post-depositional processes in the magnetization of sediments. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, **15**, 129-143.
- VEROSUB K.L., 1988. Geomagnetic secular variation and the dating of Quaternary sediments, *Geol. Soc. of America. Spec. Paper*, **227**, 123-138.
- VIGLIOTTI L., 2006. Secular variation record of the Earth's magnetic field in Italy during the Holocene: constraints for the construction of a master curve, *Geophys. J. Int.*, **165**, 414-429.
- ZANANIRI I., C.M. BATT, PH. LANOS, D.H. TARLING and P. LINFORD, 2007. Archaeomagnetic secular variation in the UK during the past 4000 years and its application to archaeomagnetic dating, *Phys. Earth Planet. Int.*, **160**, 97-107.

Ms. ricevuto il 2 aprile 2008
Testo definitivo ricevuto il 17 aprile 2008

Ms. received: April 2, 2008
Final text received: April 17, 2008