

Davide Mazzotti

# Verso una datazione ottica al radiocarbonio

*Towards an optical radiocarbon dating*

INO-CNR



Il Colle di  
Galileo

**Sommario.** È stata dimostrata per la prima volta la rivelazione ottica di radiocarbonio, fino a concentrazioni di circa il 2% dell'abbondanza naturale. Viene descritto l'apparato utilizzato per la misura e vengono delineati i suoi sviluppi futuri.

**Parole chiave.** Radiocarbonio, cavity ring-down, pettine di frequenze ottiche, laser a cascata quantica.

Una ricerca dell' INO-CNR (Istituto Nazionale di Ottica del Consiglio Nazionale delle Ricerche) ha rivelato il valore della più bassa concentrazione di radiocarbonio presente in natura mai misurata con strumenti ottici [Galli, 2011, Zare, 2012]. Il risultato, ottenuto da un gruppo di ricerca che lavora presso il LENS (European Laboratory for Non-linear Spectroscopy) di Sesto Fiorentino, si basa sulla tecnica spettroscopica ad altissima sensibilità SCAR (saturated-absorption cavity ring-down), realizzata appena un anno prima dallo stesso gruppo INO-CNR [Giusfredi, 2010].

**Abstract.** The optical detection of radiocarbon, even at concentrations of as low as 2% of natural abundance, has been demonstrated for the first time. The device used for the measurement is described and potential future developments delineated.

**Keywords.** Radiocarbon, cavity ring-down, optical frequency comb, quantum cascade laser.

Research carried out by the INO-CNR (National Institute of Optics of the National Research Council) has detected the lowest concentration of radiocarbon present in nature ever measured with optical instruments [Galli, 2011, Zare, 2012]. This result, obtained by a research group working at the LENS (European Laboratory for Non-linear Spectroscopy) of Sesto Fiorentino, is based on the SCAR (saturated-absorption cavity ring-down) high-sensitivity spectroscopy technique developed just one year earlier by the same INO-CNR group [Giusfredi, 2010].

La tecnica sfrutta un apparato laser basato sulla luce infrarossa, che è invisibile all'occhio umano, ma viene invece assorbita molto facilmente dal gas, riuscendo così ad "illuminarne" le molecole. Questa luce è prodotta da una sorgente che possiede proprietà spettrali uniche nel suo genere: grazie all'utilizzo di un "pettine di frequenze ottiche" è possibile determinare in modo assoluto la frequenza della radiazione rispetto allo standard degli orologi atomici al cesio, con un'accuratezza di una parte su mille miliardi. La luce, inoltre, riflessa da due specchi tra i quali è posto il campione, attraversa migliaia di volte il gas, riuscendo a evidenziare la presenza di molecole anche in concentrazioni bassissime, fino a poche parti su un milione di miliardi.

All'INO-CNR è stata misurata la concentrazione di radiocarbonio ( $^{14}\text{C}$ ) in un campione di gas di anidride carbonica con una precisione del 2%. La rivelazione della quantità residua di tale sostanza è un ottimo metodo per stabilire l'età di reperti archeologici di origine organica quali legno, carta, ossa e tessuti, ma potrà trovare applicazioni in diversi settori come il monitoraggio ambientale e climatico, la ricerca medica, la rivelazione di sostanze tossiche o pericolose per la sicurezza di porti e aeroporti, ma anche la verifica di alcune attuali teorie di fisica fondamentale.

Il nuovo sistema rappresenta un'alternativa all'AMS (accelerator mass spectrometry), da oltre 30 anni la metodologia più efficiente per la rivelazione del radiocarbonio. Lo strumento SCAR, oltre al vantaggio procedurale dovuto all'uso del laser infrarosso, occupa uno spazio circa 100 volte inferiore ed è circa 10 volte meno costoso di un apparato AMS. D'altra parte, in una collaborazione con

The technique exploits a laser device based on infrared light, which is invisible to the human eye, but is instead very easily absorbed by the gas, thus succeeding in "illuminating" its molecules. This light is produced by a source that possesses unique spectral qualities: through the use of an "optical frequency comb" it is possible to determine in an absolute manner the frequency of the radiation in comparison to the standard of the cesium atomic clock, with an accuracy of one part per trillion. Moreover, the light reflected by two mirrors between which the sample is placed passes through the gas thousands of times, thus succeeding in indicating the presence of molecules even in the very lowest concentrations, down to only a few parts per quadrillion.

At the INO the concentration of radiocarbon ( $^{14}\text{C}$ ) in a sample of carbon dioxide gas was measured with a precision of 2%. The detection of the residual quantity of this substance is an excellent method for establishing the age of archaeological finds of organic origin, such as wood, paper, bone and fabric, but it can also find applications in the most diverse sectors, such as environmental and climate monitoring, medical research, the detection of toxic substances or those that can be hazardous for the safety of ports and airports, and even in the verification of certain current theories of fundamental physics.

The new system represents an alternative to AMS (accelerator mass spectrometry), which has been adopted as the most efficient method for the detection of radiocarbon for over 30 years. In addition to the procedural advantage deriving from the infrared laser, the SCAR tool occupies about one-hundredth of the space and costs about one-tenth of the AMS equipment. Furthermore, in a collaboration with the LABEC (laboratory of nuclear techniques for the cul-

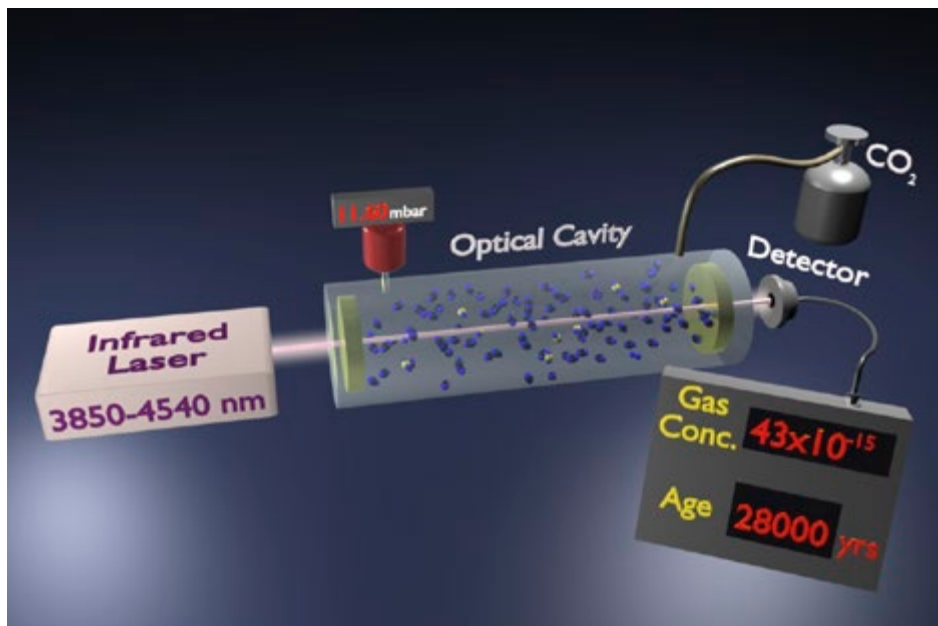


Fig. 1. Schema dell'apparato SCAR per la rivelazione ottica del  $^{14}\text{C}$ .

Fig. 1. Diagram of the SCAR device for the optical detection of  $^{14}\text{C}$ .

tural heritage) of the INFN of Florence led by Prof. Pier Andrea Mandò, the total agreement of the measurements made on identical samples of carbon dioxide using the two different techniques was verified [Galli, 2013].

A version of the SCAR spectrometer designed to be even simpler, more compact (possibly even portable), and less expensive, is currently in the course of development and realization. It will no longer be necessary to use an optical frequency comb or such a complex and cumbersome infrared source, or a cooling system for the cell based on the consumption of dry ice. The first two elements will be replaced by a pair of quantum cascade lasers, one of which will be stabilized in frequency to an appropriate molecular transition close to that of the radiocarbon dioxide, while the other will be phase-locked to the first to perform the recording of the spectrum. A Stirling-cycle cryogenic system will make it possible to cool the cell down to a temperature lower than  $-100\text{ }^\circ\text{C}$ , further reducing the interferences caused by other transitions of carbon dioxide close to the target one.

#### Bibliography

- I. Galli et al. (2011), Phys. Rev. Lett. 107, 270802.
- R. N. Zare (2012), Nature 482, 312.
- G. Giusfredi et al. (2010), Phys. Rev. Lett. 104, 110801.
- I. Galli et al. (2013), Radiocarbon 55, 213.

il LABEC (laboratorio di tecniche nucleari per i beni culturali) dell'INFN di Firenze, guidato dal Prof. Pier Andrea Mandò, è anche stato verificato il perfetto accordo tra le misure fatte su campioni identici di anidride carbonica con le 2 diverse tecniche [Galli, 2013].

Attualmente è in corso di sviluppo e realizzazione una versione dello spettrometro SCAR progettata per essere ancora più semplice, compatta (eventualmente anche trasportabile) e meno costosa. Non sarà più necessario disporre di un pettine di frequenze ottiche, né di una sorgente infrarossa tanto complessa e ingombrante, né di un sistema di raffreddamento della cella di misura basato sul consumo di ghiaccio secco. I primi 2 elementi saranno sostituiti da una coppia di laser a cascata quantica, uno dei quali sarà stabilizzato in frequenza su una transizione molecolare opportuna vicina a quella dell'anidride radiocarbonica, l'altro sarà agganciato in fase al primo per effettuare la registrazione dello spettro. Un sistema criogenico a ciclo Stirling permetterà di raffreddare la cella al di sotto di  $-100$  °C, riducendo ulteriormente le interferenze causate da altre transizioni dell'anidride carbonica vicine a quella bersaglio.

#### Bibliografia

- I. Galli et al. (2011), Phys. Rev. Lett. 107, 270802.
- R. N. Zare (2012), Nature 482, 312.
- G. Giusfredi et al. (2010), Phys. Rev. Lett. 104, 110801.
- I. Galli et al. (2013), Radiocarbon, 55, 213.

*D. Mazzotti* è un ricercatore dell'INO-CNR a partire dal 2003. Gli interessi scientifici e le sue competenze principali sono: la spettroscopia molecolare ad alta sensibilità e risoluzione nel medio infrarosso, l'ottica non-lineare, la caratterizzazione di spettrometri basati su sorgenti coerenti innovative nel medio infrarosso, la metrologia di frequenza ottica.

*D. Mazzotti* has been a researcher at the INO-CNR since 2003. His scientific interests and main areas of expertise are: high-sensitivity/resolution mid-infrared molecular spectroscopy, non-linear optics, characterization of mid-infrared spectrometers based on innovative coherent sources and optical frequency metrology.