**4.4 Radiocarbon dating of the Iceman Ötzi with**

**accelerator mass spectrometry**

Walter Kutschera

VERA Laboratory, Institute for Isotope Research and Nuclear Physics

University of Vienna, Währinger Strasse 17, A-1090 Vienna, Austria

**The discovery of the Iceman**

On 19 September 1991 an extraordinary archaeological discovery was made at a high-altitude

mountain pass (Tisenjoch, 3210 m) of the Ötztal Alps near the Austrian-Italian border. Two

mountain hikers from Nürnberg, Erika and Helmut Simon, after having scaled the Finail Peak

(3516 m) that day were on their way back to the Similaun mountain hut (3019 m) located at

the lowest part of a mountain ridge connecting the Finail Peak with the Similaun (3607). This

ridge forms the border between Austria (to the north) and Italy (to the south). As the hikers

approached a shallow ice-filled depression along the ridge, they were startled by seeing the

body of a man sticking half-way out from the ice. Unusual climatic conditions in the summer

of 1991 (including dust from Sahara resulting in enhanced melting of snow) had partly freed

the body from his icy grave. The Iceman was later nicknamed “Ötzi”, after the mountain

range where he was found. Two days after the first discovery, Hans Kammerlander and

Reinhold Messner, two famous mountain climbers from South Tyrol happened to arrive at the

site, and the photo of figure 1 shows them watching the Iceman. Messner made a first guess at

the age of the man and thought he might have died some 500 years ago. Another two days

later (on 23 September 1991) the body was recovered from the ice by Rainer Henn from the

Institute of Forensic Medicine at the University of Innsbruck, and was flown to his institute

by helicopter. Next day, when Konrad Spindler from the Institute of Pre- and Protohistory of

the University of Innsbruck saw the unusual pieces of equipment found together with the

body (in particluar an ax with a bronze-like blade), he estimated a very old age (~4000 years)

of the find. This immediately created great excitement for both scientists and the public,

resulting in many “colorful” events in the ensuing weeks.

One of the more serious events was the determination of the exact location of the finding

place as it was very close to the Austrian-Italian border. According to the Treaty of Saint

Germain from 1919, the border was supposed to run along the water divide between the river

Inn to the north and the river Etsch (Adige) to the south. After an official remeasuring of the

border line it was established that the Iceman had been found 92 m inside Italian territory.

According to international regulations, the Iceman therefore belonged to Italy, even though

the meltwater from the discovery site was now draining towards the Inn. When the border was

fixed originally, the site was filled with ice and snow, and it was not possible to determine the

exact location of the water divide. However, the Iceman remained more than 6 years at the

University of Innsbruck, from where most of the scientific investigations were organized. In

January 1998, Ötzi was brought to his final home at the newly established Archaeological

Museum in Bolzano, South Tyrol, Italy, where he is on display for the public. There he is

safely stored in a glass vitrine with controlled temperature (-6C) and humidity (98%) at

glacier-like conditions. In addition, an impressive display of his clothing and equipment can

be visited. Popular write-ups of the Iceman story are available in German [1] and in English

[2]. Scientific investigations of the Iceman are published in a series of monographs, with the

latest one concentrating on paleobotanical results [3].

2

Fig. 1. The partly freed body of the Iceman as watched by two famous mountain climbers from South Tyrol,

Hans Kammerlander (left) and Reinhold Messner (right). The picture was taken by K. Fritz (Photo Paul

Hanny). Kammerlander holds part of a wooden structure later identified as a carrying support of Ötzi. In

the right upper corner the bow can be seen, its lower part stuck in the ice and the upper one leaning

against the rocks. Just below the tip of the ski pole held by Messner one can see the smashed remains of

a container made of bark from a birch-tree, probably used to carry equipment for making fire.

**14C dating of the Iceman**

The AMS laboratories in Zürich and Oxford performed the first 14C measurements on

milligram amounts of bone and tissue from the Iceman [4, 5]. In Figure 2 the determination of

the calibrated date from the measured radiocarbon age is depicted. Although this procedure

looks complicated, it is well established among the international radiocarbon community. It is

apparent that the calibrated date covers a much larger time range than the uncalibrated

radiocarbon age, which is obtained directly from the results of the AMS measurements. This

is due to the “wiggles” in the calibration curve, which results in a 95.4% (2) confidence

range of 3370 to 3100 BC (For more details on the calibration issue see the section on ‘The

radiocarbon dating method’ below). Nevertheless, the 14C dating result unambiguously

established that the Iceman lived before the Bronze Age (2400 – 800 BC), at the end of the

Neolithic period. Besides the body of the Iceman itself, a lot of equipment and other material

was recovered from the finding place, apparently belonging to the Iceman as evidenced from

14C dating at the AMS facilities of Uppsala, Gif-sur-Yvette, and Vienna [6]. In addition, some

500 kg of sediments were collected from the discovery site, and botanical and other remains

were extracted by the Institute of Botany of the University of Innsbruck for 14C dating at the

Vienna Environmental Research Accelerator (VERA).

3

Fig. 2. The determination of the age of the Iceman from 14C measurements at the AMS laboratories of Zürich [4] and Oxford [5].

The combined radiocarbon age from these measurements is 4550 19 years BP (Before Present = 1950 AD). The error is the

68.2% (1) confidence value. The uncalibrated age is translated into a calibrated age with the help of the computer program

OxCal using the INTCAL98 tree-ring calibration curve [12]. (a) Calibration curve from 4000 to 2000 BC (Before Christ). The

straight line at 45indicates a 1:1 transformation of the radiocarbon age into an uncalibrated calendar date. The intersection of

the radiocarbon age with this line and the tree-ring calibration curve shows that the calibrated date is approximately 650 years

older. (b) The enlarged “wiggly” section of the calibration curve leads to three different solutions for the calendar date spanning

250 years. The small rectangular brackets beneath the peaks indicate the distribution of the 68.2% (1) confidence ranges into

three sections of 3360-3300 BC (29.3%), 3210-3190 BC (19.8%), and 3160-3130 BC (19.1%). The large brackets indicate the

95.4% (2) confidence ranges of 3370-3320 BC (34.3%), and 3230-3100 BC (61.1%).

4

**14C dating of various materials from the Ötzi finding place**

There exist strong evidence that early in the Holocene (which covers the last 10,000 years

since the end of the last ice age) there were periods considerably warmer than today. Such

changes in temperature can be most sensitively traced at high altitudes, where the vegetation

reaches its limit of existence. For example, tree logs set free by the rapidly receeding Pasterze

Glacier of the Grossglockner, the highest mountain in the Austrian Alps, have been 14C-dated

to the period between 8000 and 6900 BC [7]. These finds indicate that trees must have grown

during that time at locations still covered by glaciers today. Similarly, one might expect that

the high-altitude pass where Ötzi was found may have enjoyed ice-free periods also at other

times. Figure 3 summarizes the results of 64 14C measurements, most of them performed at

VERA [8].

Fig. 3. Comparison of the ages for various

materials collected at the discovery site of

the Iceman, determined from 14C

measurements at the AMS facility VERA in

Vienna [10]. These results indicate that the

site of the Iceman was probably ice-free

also at considerably earlier and later times,

and used as a high-altitude pathway across

the Alps. See text for a more detailed

discussion of the results.

The materials are grouped into

different species. It is apparent that

they are spread over a large time

range from approximately 5000 to

2000 BC. The upper two groups in

figure 3 fall within the time period

determined from body samples of

the Iceman himself [4,5], and are

thus most likely part of his

belongings. The group labeled

“grass” includes several different

species. Those falling within the

Ötzi period are species which cannot

grow at these altitudes and must

have been brought to the place,

probably by Ötzi himself. The

grasses labeled *poa alpina* and *poa*

*laxa* presently grow up to altitudes of 3000 and 3100 m, respectively. Since they apparently

grew also at 3210 m (the Ötzi finding place) indicates that a warmer period than today may

have existed at the respective time period. Mosses are less sensitive indicators of temperature

changes, since they grow at these altitudes at a variety of climatic conditions. The group

labeled “other plants” include *salix herbacea* , which grows in shallow depressions filled with

snow for most of the year, whereas *saxifraga moschata* can be found today up to 50 to 120 m

below the Ötzi finding place. The other two samples are needles from trees which do not

grow at these altitudes, probably blown up by winds across the surface of the glacier. Dates

from animal dung of caprine origin (capricorn, goat, sheep, etc.) spread over a large time

range. It is perhaps not surprising that those remains are found there, as these are typical

mountain animals. The lack of samples from this group during the Ötzi period looks curious,

5

but may be explained by the observation that animals actually prefer to lie down on snow to

cool off in summer time, and do not like bare rock as was probably present during Ötzi’s

time. The group labeled “wood” are samples which must have been brought up by man. The

two samples, ax-1 and bow, clearly belong to the Iceman. Among the older samples, the most

significant find is a piece of charcoal, which indicates that thousand years before the Iceman a

human being may have visited the place making fire right there or having brought remains of

it to the site. The youngest sample, green alder, falls into the Iron Age (Hallstatt period), and

shows signs of being cut and worked on by man. It is the first sample of this period found in

this particular region of the Alps. Finally, two samples of soil have been collected in a spot

close to the Ötzi site by two Italian scientists, and the total organic content of this material

was 14C dated [9]. The older sample came from a somewhat thicker layer of soil, indicating a

possibly warmer climate as compared to the younger one.

The new 14C dates raise hopes that climate indicators are present at this unique site. Combined

with information from other regions in the Alps about climatic changes during the Holocene,

this may allow one to link the presence of the Iceman to some climatic condition which

favored his appearance at this high altitude. Although, at this time, we can only hint at such a

connection, it may be another stone in the puzzle to solve the mystery of the Iceman’s origin,

and his perishing at this lonely site high up in the mountains.

**The radiocarbon dating method**

Carbon forms the basic building blocks of organic compounds and therefore is an essential

part of all life on Earth. As a consequence, the human body with an average weight of 70 kg

contains approximately 16 kg of carbon. Almost all of this carbon is formed by the two stable

isotopes, 12C (98.9%) and 13C (1.1%). However, a minute fraction of the carbon consists of

the long-lived radioisotope 14C (1.2\*10-12), originating from cosmic-ray interaction in the

atmosphere (see below). Since the half-life of 14C is 5730 years, the total 14C activity of our

body is 3700 Becquerel (1 Bq = 1 decay per second). This follows from the basic law of

radioactivity

d (14Ct)/dt = - \* 14Ct = - (ln2)/(t1/2) \* 14Ct (1)

Here, 14Ct denotes the number of radiocarbon atoms present at time t, is the decay constant,

ln2 the natural logarithm of 2 (ln2 = 0.693),and t1/2 the half-life. In our example 14Ct =

9.6\*1014 14C atoms.

When we die, the supply of fresh carbon from the environment stops, and the radioactivity of

the body decreases exponentially with time.

14Ct = 14Co \* e-t (2)

By knowing the initial 14C content, 14Co, and measuring 14Ct, we can determine the time t

from

t = - 1/\* ln(14Ct/14Co) = - (t1/2) /(ln2) \* ln(14Ct/14Co) (3)

Equation (3) is the basis for the age determination by the radiocarbon method developed by

Willard Libby in the late 1940s [10, 11]. This earned him the 1960 Noble Prize in Chemistry

6

“for his method to use carbon-14 for age determination in archaeology, geology, geophysics,

and other branches of science”.

Accelerator mass spectrometry (AMS) measurements of 14Ct in bone and tissue of the Iceman

Ötzi revealed that the original 14C content (14Co) had decreased to 53% [4, 5]. From equation

(3) one then calculates that the Iceman has lived 5200 years ago, i.e. at the end of the stone

age. However, a correct determination of the age requires to know the actual atmospheric 14Co

value at the time when Ötzi lived. In contrast to Libby’s original assumption, the 14C content

of the atmosphere was not constant in time, and thus cannot be inferred for the past by

measuring present-day 14C. We now know that both the earth and the solar magnetic field

change with time. This has a varying shielding effect on the cosmic rays impinging on the

atmosphere, and thus on the 14C production rate. In addition, climatic effects can also change

the atmospheric 14C content by variations in the exchange of 14C between the global reservoirs

of 14C (see below). For the past 12,000 years, a 14Co calibration was obtained by measuring

14Ct in tree rings whose absolute age (calendar year) was determined from dendrochronology

(tree-ring dating) [12]. For earlier times, other objects such as corals, stalagmites, and lake

sediments can be used [12, 13]. It is important to note that the uncalibrated “radiocarbon age”

must not be confused with the calibrated “calendar date”, since there can be considerable time

differences between the two (see figure 2).

**The production of 14C through cosmic rays**

High-energy protons originating from the sun and from outside the solar system continuously

bombard our atmosphere and produce secondary neutrons by smashing atomic nuclei of

nitrogen, oxygen, and argon, the main constituents of the air. The neutrons are slowed down

by elastic collisions with other air nuclei, and are eventually captured by nitrogen producing

14C through the nuclear reaction 14N + n 14C + p. The freshly produced 14C atoms are

chemically very reactive and immediately form carbon monoxide through the reaction 14C +

O2 14CO + O. After an atmospheric residence time of 2 to 6 months, 14CO molecules react

with the extremely aggressive OH radical to form carbon dioxide through the reaction 14CO +

OH 14CO2 + H. After a mean atmospheric residence time of several years, where 14CO2 is

thoroughly mixed with the stable CO2 content of the atmosphere, it exchanges with the

biosphere (through photosynthesis), and with the hydrosphere (dissolution in oceans and other

water systems). It is interesting to note that approximately one fifth of the total atmospheric

CO2 inventory is cycled through these reservoirs per year. As a consequence of these

processes, a well equilibrated distribution of the global 14C inventory is reached, with ~93%

of 14C residing in the ocean, ~5% in the biosphere, and ~2% in the atmosphere.

**Measurement of 14C with accelerator mass spectrometry**

The 14C content of a sample can be measured through decay counting (radioactivity, see eq. 1)

or through atom counting (14C/12C isotope ratio). In the latter measurement one doesn’t have

to wait for the infrequent decays of 14C. Since the archaeologist in general wants to preserve

as much material as possible from a precious find, it is important to use only little material for

the age determination. In this respect, accelerator mass spectrometry (AMS) has an enormous

advantage compared to decay counting. From the example above, one can calculate that one

milligram (10-3 g) of carbon from our body still contains 60 million 14C atoms. However,

because of the long half-life of 14C, the radioactivity of this material is only 2.3x10-4 Bq, or

7

about one decay per hour. On the other hand, with AMS it is possible to measure about 2% of

all 14C atoms in one hour, i.e. 1.2 million. One thus gains a factor of one million in the

detection sensitivity of 14C! This is comparable with the gain in light collecting power of a 5-

m telescope (e.g. on Mount Palomar) as compared to the naked eye which has an aperture of

about 5 mm (the light collecting power is proportional to the square of the diameter). For 14C

measurements this means that instead of using several grams of carbon in several days of beta

counting, an AMS measurement can be performed with 1 milligram of carbon in about one

hour, reaching the same statistical accuracy.

AMS determines the isotopic composition of a sample material by first producing a

negatively-charged ion beam, which is then subjected to a series of extremely selective

filtering procedures in order to find 14C, “the needle in the hay stack”. 14C/12C ratios in the

range of 10-12 to 10-15 can be measured in this way. Details of the measuring procedures,

which at essentially all AMS facilities involves a tandem accelerator, can be found in

references [14, 15, 16].

An important part of 14C dating is the sample preparation, i.e. the extraction of genuine carbon

from the raw sample material. For AMS measurements there are four distinct steps involved:

i) a precleaning procedure aiming at removing all non-indigenous carbon, ii) the complete

combustion of carbon to CO2, iii) the reduction of CO2 to elemental carbon with H2 using Fe

or Co as a catalyst (graphitisation), and iv) the pressing of small pellets containing typically 1

mg of carbon for the use in the Cs-beam sputter source to produce negative ions. At the AMS

facility in Vienna, the Vienna Environmental Research Accelerator (VERA), 40 carbon

samples can be loaded into the ion source, usually 30 unknowns together with 8 calibration

samples of known 14C/12C ratios, and 2 background samples.

With careful consideration of all steps in sample preparation and isotope ratio measurements,

overall uncertainties around 35 years are achieved at VERA for uncalibrated radiocarbon

ages less than about 10,000 years BP. However this uncertainty can increase considerably

through the “wiggliness” of the tree-ring calibration curve (see figure 2). The 14C dating limit

lies at about 50,000 years BP. This limit is not determined by the counting statistics, but by

the finite background correction, which lies in the same time range. It means that the

unavoidable contamination with modern carbon in the sample preparation procedures must be

kept below 1‰ (i.e. 1 μg out of 1 mg). There are many other factors which have to be taken

into account (isotope fractionation, reservoir effects, the ‘old wood’ problem, etc.) in order to

arrive at a reliable date. Altogether it is wise to follow the Libby rule: “ Radiocarbon dating is

something like the discipline of surgery – cleanliness, care, seriousness, and practice”.

**Conclusion**

AMS measurements of 14C in small samples with AMS has grown into an extremely useful

method in a variety of different fields [16]. Besides numerous applications in archaeology,

such diverse fields as oceanography, ground water dating, atmospheric science, forensic

medicine, biomedical science, glaciology, sedimentology, meteoritics, all benefit from the

extreme sensitivity of the method and the smallness of the required sample size. Although

other cosmogenic radionuclides are being measured with AMS, 14C is by far the most used

one. More than 90% of all AMS measurements world-wide are devoted to 14C. The variation

of the atmospheric 14C content with time is a serious problem limiting the achievable

precision of 14C dating, as shown by the example of dating the Iceman. One is well advised

8

not to push the precision beyond the limits set by these natural variations, even though under

certain cirumstances one can improve the precision of the age determination by performing

so-called “wiggle matching” calibrations. This is possible if a series of samples is available,

where a relative chronology of the samples can be deduced from other considerations (e..g.

stratigraphy in an archaeological find). Notwithstanding this *caveat*, 14C is a true gift of nature

to man, allowing us to look at our world in a way not possible by any other means.

**References**

1. Konrad Spindler, Der Mann im Eis, *Goldmann Verlag, München* (1995) 1-406.

2. Brenda Fowler, Iceman - uncovering the life and times of a prehistoric man found in an

alpine glacier, *Random House, New York* (2000), 1-313.

3. Sigmar Bortenschlager and Klaus Oeggl, eds., The Iceman and his Natural Environment,

The Man in the Ice, Vol. 4, *Springer –Verlag, Wien* (2000) 1-166.

4. G. Bonani, S. Ivy, I. Hajdas, T.R. Niklaus, and M. Suter, AMS 14C age determinations

of tissue, bone and grass samples from the Ötztal Ice Man, *Radiocarbon* **36/2** (1994)

247-250.

5. R.E.M. Hedges, R.A. Housley, C.R. Bronk, and G.J. van Klinken, Radiocarbon dates

from the Oxford AMS system: Archaeometry datelist 15, *Archaeometry* **34/2** (1992)

337-357.

6. W. Rom, R. Golser, W. Kutschera, A. Priller, P. Steier, and E.M. WILD, AMS 14C dating

of equipment from the Iceman and of spruce logs from the prehistoric salt mines of

Hallstatt, *Radiocarbon* **41/2** (1999) 183-197.

7. K. Nicolussi and G. Patzelt, Discovery of early-Holocene wood and peat on the forefield

of the Pasterze Glacier, Eastern Alps, Austria, *The Holocene* **10/2** (2000) 191-199.

8. W. Kutschera, B. Jettmar, R. Golser, A. Priller, S. Puchegger, P. Steier, E.M. Wild,

S. Bortenschlager, K. Oeggl, and W. Rom, Climatic changes at high altitudes from 14C

dating at the site of the Iceman Ötzi, *International Conference on the Study of*

*Environmental Change using Isotope Techniques, International Atomic Energy Agency*

*(IAEA), Vienna,* 23-27 April 2001, Proceedings to be published.

9. C. Baroni and G. Orombelli, The alpine Iceman and the Holcene climate change,

Quaternary Research **46** (1996) 78-83.

10. W.F. Libby, Atmospheric helium three and radiocarbon from cosmic radiation,

*Phys. Rev.* **69** (1946) 671-672.

11. J. Arnold and W.F. Libby, Age determinations by radiocarbon content: checks with

samples of known age, *Science* **110** (1949) 678-680.

12. M. Stuiver, P.J. Reimer, E. Bard, J.W. Beck, G.S. Burr, K.A. Hughen, B. Kromer,

G. MacCormac, J.van der Plicht, and M. Spurk, INTCAL98 radiocarbon age calibration,

9

24,000-0 cal BP, *Radiocarbon*, **40/3** (1998) 1041-1083.

13. J.W. Beck, D.A. Richards, R.L. Edwards, B.W. Silverman, P.L. Smart, D.J. Donahue,

S. Jererra-Osterheld, G.S. Burr, L. Lalsoyas, A.J.T. Jull, and D. Biddulph,

Extremely large variations of atmospheric 14C concentration during the last glacial period,

*Sciencexpress/www.sciencexpress.org/10 May 2001/10.1126/science.1056649.*

14. D. Elmore and F.M. Phillips, Accelerator mass spectrometry for measurement of longlived

isotopes, *Science* **236** (1987) 543-550.

15. C. Tuniz, J.R. Bird, D. Fink, and G.F. Herzog, Accelerator mass spectrometry :

ultrasensitive analysis for global science, *CRC Press, Boca Raton* (1998) 1-371.

16. W. Kutschera, Accelerator mass spectrometry: analyzing our world atom by atom,

*American Institute of Physics (AIP) Conf. Ser.* **495** (1999) 407-428

**Käännös (englanti > suomi)**



4,4 Radiohiiliajoituksen ja Iceman Ötzi kanssa
kiihdytin massaspektrometria
Walter Kutscheran
VERA laboratorio, laitos Isotope tutkimus-ja ydinfysiikka
Wienin yliopisto, Währinger Strasse 17, A-1090 Wien, Itävalta
Löytö on Iceman
Käytössä 19 syyskuu 1991 ylimääräinen arkeologinen löytö tehtiin korkeilla
vuori pass (Tisenjoch, 3210 m) Ötztalin Alppien lähellä Itävallan ja Italian rajalla. Kaksi
patikoinnin Nürnberg, Erika ja Helmut Simon, sen jälkeen kun skaalattaisiin Finail Peak
(3516 m), joka päivä oli matkalla takaisin Similaun vuoren tupa (3019 m) sijaitsee
alaosa vuoren harjanteelle yhdistää Finail Peak kanssa Similaun (3607). Tämä
harju muodostaa rajan Itävallan (pohjoisessa) ja Italia (etelässä). Kuten vaeltajat
lähestyi matala jäillä täytettyyn masennus pitkin harju, ne hätkähtää nähdessään
elin miehen kiinni puoli-tie ulos jäältä. Epätavallinen ilmasto kesällä
vuodelta 1991 (mukaan lukien pöly Saharan johtavat parempaan lumen sulaminen) oli osittain vapautettu
elin hänen jäinen hauta. The Iceman myöhemmin lempinimen "Ötzi", kun vuori
alue, jossa hän totesi. Kaksi päivää sen jälkeen, kun ensimmäinen löytö, Hans Kammerlander ja
Reinhold Messner, kaksi kuuluisaa vuorikiipeilijää Etelä-Tirolin tapahtui saapuvat
päällä, ja kuva kuvassa 1 osoittaa heille katsomassa Iceman. Messner teki ensimmäisen arvata
ikään miehen ja ajattelin hänen olisi kuollut noin 500 vuotta sitten. Toinen kaksi päivää
myöhemmin (23. syyskuuta 1991) ruumis oli toipunut jään Rainer Henn alkaen
Institute of Forensic Medicine yliopiston Innsbruckin ja oli lentänyt hänen instituutti
helikopterilla. Seuraavana päivänä, kun Konrad Spindler laitokselta Pre-ja Protohistory ja
Innsbruckin yliopiston näki epätavallinen laitteita löytyi yhdessä
(in particluar kirves ja pronssi-kuin terä), hän arvioi hyvin vanhuus (~ 4000 vuotta)
löydöstä. Tämä välittömästi aiheuttanut suurta jännitystä sekä tutkijoiden ja yleisön
syntynyt runsaasti "värikkäitä" tapahtumia seuranneessa viikkoa.
Yksi vakavampi tapahtumia oli määrittämistä tarkka sijainti löytää
paikka, koska se oli hyvin lähellä Itävallan ja Italian rajalla. Mukaan sopimuksen Saint
Germain vuodesta 1919, raja piti juosta pitkin vesi kuilua joen
Inn pohjoiseen ja joen Etsch (Adige) etelään. Kun virkamies arvostamisesta ja
rajaa todettiin, että Iceman oli löytynyt 92 m sisällä Italian alueella.
Kansainvälisten säännösten mukaan Iceman siis kuului Italiaan, vaikka
the sulamisvesien pois löytö sivusto oli jo tyhjennys kohti Inn. Kun raja oli
Kiinteä alun perin, että sivusto on täynnä jäätä ja lunta, ja se ei ollut mahdollista määrittää
tarkka sijainti veden jakaa. Kuitenkin Iceman jäi yli 6 vuotta
Innsbruckin yliopiston, josta suurin osa tieteellisiä tutkimuksia järjestettiin. Vuonna
Tammikuuta 1998 Ötzi tuotiin hänen viimeinen kotiin vasta perustetun arkeologinen
Museo Bolzano, Etelä-Tirolissa, Italiassa, missä hän on näytteillä yleisölle. Siellä hän on
säilytetään turvallisesti lasi vitriini ohjattu lämpötila (-6 ° C) ja kosteus (98%) oli
jäätikkö-olosuhteissa. Lisäksi vaikuttava näyttö hänen vaatteet ja varusteet voivat
on käynyt. Suosittu arvonkorotukset ja Iceman tarina on saatavissa saksaksi [1] ja Englanti
[2]. Tieteelliset tutkimukset ja Iceman on julkaistu sarjassa monografioita, kanssa
Viimeistään keskittyy paleobotanical tuloksista [3].
2
Kuva 1. Osittain vapautti ruumiin Iceman katsotuksi kaksi kuuluisaa vuorikiipeilijää Etelä-Tirolissa
Hans Kammerlander (vas.) ja Reinhold Messner (oikealla). Kuvan otti K. Fritz (Kuva: Paul
Hanny). Kammerlander omistaa osan puurakenteisia myöhemmin todettu kuljettaa tukea Ötzi. Vuonna
oikeassa yläkulmassa keula näkyy, sen alaosa kiinni jään ja ylempi kallistuu
kallioita vasten. Hieman alle kärki suksisauva hallussa Messner näkee kännissä edelleen
Pakkaus on valmistettu kuori siitä koivun, todennäköisesti käytetään kuljettamaan laitteita tulenteko.
14C päivittämistä Iceman
AMS laboratoriot Zürichissä ja Oxford suoritti ensimmäisen 14C mittausten
milligramma määrät luun ja kudosta Jäämies [4, 5]. Kuvassa 2 määrittämisen
kalibroitu päivämäärän mitattu radiohiili ikä on kuvattu. Vaikka tämä menettely
näyttää monimutkaiselta, se on vakiintunut kansainvälinen radiohiili yhteisöä. On
ilmeistä, että kalibroitu päivämäärä kattaa paljon suurempi aikaväli kuin kalibroimattomaan
radiohiili ikä, joka on saatu suoraan tulokset AMS mittauksia. Tämä
johtuu "wiggles" in kalibrointikäyrä, jonka seurauksena 95,4% (2s) luottamus
valikoima 3370-3100 eKr. (Lisätietoja kalibroinnin asiasta katso kohta "
radiohiiliajoitus menetelmä "alla). Kuitenkin 14C dating tulos yksiselitteisesti
todettu, että Iceman asui ennen pronssikauden (2400 - 800 eKr.), vuoden lopussa
Kivikaudelta. Lisäksi itse Jäämies itse paljon laitteita ja muuta materiaalia
oli toipunut löytää paikka, ilmeisesti kuuluu Iceman osoituksena siitä
14C dating klo AMS mukavuudet Uppsalan, Gif-sur-Yvette, ja Wien [6]. Lisäksi jotkin
500 kg sedimenteistä kerättiin löytö sivustolla ja kasvitieteellinen ja toinen on
poimittiin Institute kasvitieteen yliopiston Innsbruckin ja 14C dating klo
Wien Environmental Research Accelerator (VERA).
3
Kuva 2. Määrittäminen ikä Iceman alkaen 14C mittaukset AMS laboratorioissa Zürich [4] ja Oxford [5].
Yhdistetty radiohiili ikä näistä mittauksista on 4550 ± 19 vuotta BP (Before Present = 1950 jKr.) Virhe on
68,2% (1s) luottamuksen arvon. Kalibroimattomaan ikä on käännetty kalibroitu ikä avulla tietokoneohjelman
OxCal käyttäen INTCAL98 puu-rengas kalibrointikäyrä [12]. (A) Kalibrointikäyrä 4000-2000 eKr. (ennen Kristusta).
suora viiva 45 ° ilmaisee 01:01 muunnos radiohiili iässä kalibroimattomaan päättymispäivämäärä. Leikkauspiste
radiohiili ikä tällä kokoonpanolla ja puu-rengas kalibrointikäyrä mukaan kalibroitu päivämäärä on noin 650 vuotta
vanhemmat. (B) Laajentuneessa "wiggly" osa Kalibrointikäyrän johtaa kolmeen eri ratkaisuja päivämäärävalitsinta ulottuen
250 vuotta. Pieni suorakulmainen suluissa alapuolella piikit osoittavat jakamisesta 68,2% (1s) luottamus valikoimat
kolme osaa 3360-3300 BC (29,3%), 3210-3190 BC (19,8%) ja 3160-3130 BC (19,1%). Suuret Suluissa ilmoitetaan
95,4% (2s) luottamus valikoimia 3370-3320 BC (34,3%) ja 3230-3100 BC (61,1%).
4
14C dating eri materiaalien Ötzi löytää paikka
On olemassa vahvaa näyttöä siitä, että varhain holoseenin (joka kattaa viime 10000 vuotta
koska viimeisen jääkauden) kausia huomattavasti lämpimämpi kuin nykyään. Tällaiset
lämpötilan muutokset voidaan herkimmin jäljittää korkealla merenpinnasta, jossa kasvillisuus
mittausalueen rajan olemassaolon. Esimerkiksi puu lokit asettaa ilmaiseksi nopeasti väistymässä Pasterze
Jäätikkö Grossglocknerilla, korkein vuori Itävallan Alpeilla, on 14C-päivänä
välisen ajan 8000 ja 6900 eaa [7]. Nämä toteaa osoittavat, että puita on kasvanut
tuona aikana paikoissa vielä kuulu jäätiköt tänään. Samoin voisi olettaa, että
korkealentokartoituksen pass missä Ötzi löytyi ovat mahdollisesti jää-jaksoja myös muita
kertaa. Kuvassa 3 esitetään yhteenveto 64 14C-mittauksilla, joista suurin osa suoritetaan
VERA [8].
Kuva 3. Vertailu aikojen eri
materiaalit kerätty löytö sivulla
Jäämies, määritetään 14C
mittaukset AMS laitoksen vera
Wien [10]. Nämä tulokset osoittavat, että
sivustolla Iceman oli todennäköisesti sulana
myös huomattavasti aikaisemmin ja myöhemmin kertaa,
ja sitä käytetään korkeilla koulutusjakso koko
Alpeilla. Katso tekstiä tarkemmin
keskustelun tulokset.
Materiaalit on ryhmitelty
eri lajeja. On ilmeistä, että
ne ovat levittäytyneet laajalle aika
vaihtelevat noin 5000 ja
2000 eaa. Ylempi kahteen ryhmään
Kuva 3 kuuluvat ajan
määritetään elin näytteet
Jäämies itse [4,5], ja
Näin todennäköisesti osa hänen
omaisuutensa. Ryhmä merkitty
"Ruoho" sisältää useita eri
lajeja. Nämä kuuluvat
Ötzi aikana ovat lajeja, joita ei
kasvaa näillä korkeuksilla, ja se on
on tuotu paikkaan,
luultavasti Ötzi itse.
ruoho merkitty Poa alpina ja poa
Laxå hetkellä kasvaa jopa korkeudessa 3000 ja 3100 m, vastaavasti. Koska he ilmeisesti
kasvoi myös 3210 m (Ötzi löytää paikka) osoittaa, että lämpimämpi ajanjakso kuin nykyään voi
on olemassa vastaavana ajanjaksona. Sammalet ovat vähemmän herkkiä indikaattoreita lämpötilan
muutoksia, koska ne kasvavat näissä korkeuksissa on erilaisia ilmasto-olosuhteet. Ryhmä
merkintä "muut kasvit" kuuluvat Salix herbacea, joka kasvaa matalassa painaumia täynnä
lumi suurimman osan vuotta, kun taas Saxifraga moschata löytyy nykyään jopa 50-120 m
Alla Ötzi löytää paikka. Kaksi muuta näytettä neulat puita, jotka eivät
kasvaa näillä korkeuksilla, luultavasti räjäytettiin tuulet koko pinta jäätikön. Päivämäärät
eläinten lanta ja vuohista peräisin (Kauris, vuohi, lammas, jne.) levinnyt laajalle aika
alue. Se ei ehkä ole yllättävää, että edelleen löytyy siellä, koska nämä ovat tyypillisiä
vuori eläimiä. Puute näytteet tämän ryhmän aikana Ötzi aikana näyttää utelias,
5
mutta voi selittyä havainto, että eläimet todella mieluummin makaamaan lumen
jäähtyä kesällä, ja pidä paljasta kalliota kuten todennäköisesti läsnä Ötzi n
aika. Ryhmä on merkitty "puu" ovat näytteitä, jotka on tuotu esiin ihmisen.
kaksi näytettä, AX-1 ja kumartaa, kuuluvat selkeästi Iceman. Yksi vanhempi näytteet, joista
merkittävä löytää on pala hiiltä, mikä viittaa siihen, että tuhansia vuosia ennen kuin Iceman
ihmisellä voi olla vieraili paikalla tulenteko oikeassa tai joilla saatetaan edelleen
sen sivuston. Nuorin näyte, vihreä leppä, putoaa rautakaudella (Hallstatt ajan), ja
osoittaa merkkejä se leikataan ja työstetään mies. Se on ensimmäinen näyte tämän kauden löytyy
Tässä nimenomaisessa alueella Alpeilla. Lopuksi kaksi näytettä maaperän on kerätty paikalla
lähellä Ötzi sivuston kahden italialaisen tiedemiesten ja orgaanisen sisällön materiaalia
oli 14C päivätty [9]. Vanhempi näyte tuli hieman paksumpi maaperä, mikä osoittaa
mahdollisesti Ilmaston lämmetessä verrattuna nuorempi.
Uusi 14C päivämäärät nostaa toivoo, että ilmasto indikaattorit ovat läsnä tässä ainutlaatuisessa paikassa. Yhdistetty
tietoja muilta alueilta Alpeilla noin ilmastonmuutokset aikana holoseeni,
Tämän voi sallia yhden linkin läsnäolo Iceman joitakin ilmasto, joka
kannattivat hänen esiintymisensä tällä korkealla. Vaikka tällä hetkellä voimme vain aavistuksen tällaisen
yhteydessä voi olla toinen kivi palapelin ratkaista arvoitusta Jäämies alkuperän,
ja hänen helkkarin tällä yksinäinen sivuston korkealla vuoristossa.
The radiohiiliajoitus menetelmä
Hiili muodostaa perusrakenneosia orgaanisten yhdisteiden ja siksi on tärkeää
osa kaikkea elämää maapallolla. Näin ollen ihmiskehosta keskipaino 70 kg
sisältää noin 16 kg hiiltä. Lähes kaikki hiili on muodostettu kaksi stabiilia
isotooppien 12C (98,9%) ja 13C (1,1%). Kuitenkin hetken osa hiilestä muodostuu
pitkäikäisten isotooppien 14C (1,2 \* 10-12), peräisin kosmisen ray vuorovaikutuksen
ilmakehään (ks. alla). Koska puoliintumisaika 14C on 5730 vuotta, yhteensä 14C toimintaa meidän
runko on 3700 becquerel (1 Bq = 1 hajoaminen sekunnissa). Tämä johtuu perustuslain
radioaktiivisuus
d (14Ct) / dt = - l \* 14Ct = - (LN2) / (t1 / 2) \* 14Ct (1)
Täällä 14Ct tarkoittaa määrää radiohiili atomien läsnä hetkellä t, l on hajoamisvakio,
LN2 luonnollinen logaritmi 2 (LN2 = 0,693), ja t1 / 2 puoliintumisaika. Tässä esimerkissä 14Ct =
9,6 \* 1014 14C atomin.
Kun me kuolemme, että raittiin hiiltä ympäristö pysähtyy, ja radioaktiivisuus
elimistössä vähenee eksponentiaalisesti ajan.
14Ct = 14Co \* e-lt (2)
Tuntemalla alkuperäisen 14C-pitoisuus, 14Co ja mittaus 14Ct voimme määrittää aika t
alkaen
t = - 1 / l \* ln (14Ct/14Co) = - (t1 / 2) / (LN2) \* ln (14Ct/14Co) (3)
Yhtälö (3) on perusta iän määrittämiseksi että radiohiili kehittämällä menetelmällä
Willard Libby 1940 [10, 11]. Tämä sai hänet 1960 Noble-palkinnon Kemian
6
"Hänen tapaa käyttää hiili-14 iän määritystä arkeologiassa, geologian, geofysiikan,
ja muiden tieteenalojen ".
Accelerator massaspektrometriaa (AMS) mittaukset 14Ct luun ja kudoksen Iceman
Ötzi paljastui, että alkuperäisen 14C-pitoisuus (14Co) oli laskenut 53% [4, 5]. Yhtälöstä
(3) Yksi sitten laskee, että Jäämies on elänyt 5200 vuotta sitten, eli lopussa kivi
ikä. Kuitenkin oikean iän määrittämiseen tarvitsee tietää todellisen ilmakehän 14Co
arvoon, kun Ötzi asui. Toisin Libby alkuperäiseen oletukseen, että 14C-pitoisuus
Ilmakehän ei vakio ajoissa, ja näin ollen ei voida päätellä, että menneisyydessä
mittaus nykypäivän 14C. Tiedämme nyt, että sekä maan ja auringon magneettikentän
muuttuvat ajan kuluessa. Tämä on eri suojauksen vaikutus kosmisten säteiden puuttumatta
ilmapiiri, ja siten 14C tuotannon määrä. Lisäksi ilmastolliset vaikutukset voivat myös muuttua
ilmakehän 14C-pitoisuus vaihtelun vuoksi vaihtaa 14C välillä maailmanlaajuisen altaat
14C (ks. alla). Viimeisten 12000 vuotta, 14Co kalibrointi saatiin mittaamalla
14Ct Puiden renkaat, joiden absoluuttinen ikä (kalenterivuosi) määritettiin dendrochronology
(Puu-rengas vuodelta) [12]. Aikaisempien kertaa muita esineitä kuten koralleja, stalagmites ja järvi
sedimentit voidaan käyttää [12, 13]. On tärkeää huomata, että kalibroimattomaan "radiohiili ikä"
ei pidä sekoittaa kalibroitu "kalenteripäivänä", koska siellä voi olla paljon aikaa
väliset erot (ks. kuva 2).
Tuotanto 14C kautta kosmisten säteiden
Korkean energian protoneja peräisin auringosta ja ulkopuolelta aurinkokunnan jatkuvasti
pommittaa ilmakehän ja toissijaisten neutronit mennessä Smashing atomien ytimet
typpi, happi ja argon, tärkeimmät ainesosat ilmaa. Neutronit hidastuvat
joustavien yhteentörmäyksiä muiden ilma ytimet, ja on lopulta vangitsi typpeä tuottavien
14C kautta ydinreaktio 14 n + n ® 14C + s. Juuri käyttövalmiiksi valmistettu 14C atomien
kemiallisesti erittäin reaktiivinen ja heti muodostua hiilimonoksidia reagoidessa 14C +
O2 ® 14CO + O. Kun ilmakehän saosaika 2-6 kuukautta, 14CO molekyylit reagoivat
kanssa erittäin aggressiivinen OH radikaaleja muodostuu hiilidioksidin reagoidessa 14CO +
OH ® 14CO2 + H. jälkeen keskimääräinen ilmakehän asuinpaikka aikaa useita vuosia, kun 14CO2 on
sekoittuu vakaa CO2-pitoisuus ilmakehässä, se vaihto
biosfääri (fotosynteesissä), ja hydrosfäärin (purkaminen valtamerissä ja muut
vesistöt). On mielenkiintoista huomata, että noin viidesosa koko ilmakehän
CO2 inventaario pyöräilin läpi nämä altaiden vuodessa. Tämän seurauksena näiden
prosessit, sekä tasapainottavat jakautuminen maailman 14C inventaario on tehty, on ~ 93%
14C asuvat meressä, ~ 5% biosfäärin, ja ~ 2% ilmakehässä.
Mittaus 14C kanssa kiihdytin massaspektrometrian
14C-pitoisuus näytteessä voidaan mitata reikiintymistä ääntenlaskenta (radioaktiivisuus, katso ekv. 1)
tai atomi ääntenlaskenta (14C/12C isotooppisuhde). Jälkimmäisessä mittaus yksi ei ole
odottaa harvoin hajoaa 14C. Koska arkeologi yleensä haluaa säilyttää
niin hyvin kuin mahdollista arvokas löytää, on tärkeää käyttää vain vähän materiaalia
iän määritys. Tältä osin kiihdytin massaspektrometrialla (AMS) on valtava
etua verrattuna rappeutuminen laskenta. Edellä mainitun esimerkin, voidaan laskea, että yksi
milligramma (10-3 g) hiiltä kehomme on vielä 60 miljoonaa 14C atomin. Kuitenkin
koska pitkä puoliintumisaika 14C, radioaktiivisuus tämä materiaali on vain 2.3x10-4 Bq, tai
7
noin rappeutuminen tunnissa. Toisaalta, AMS on mahdollista mitata noin 2%
kaikki 14C atomien tunnin, eli 1,2 miljoonaa euroa. Yksi saa siten tekijä yhden miljoonan
havaitseminen herkkyys 14C! Tämä on verrattavissa saada valossa kerätä teho 5 -
m teleskooppi (esim. Mount Palomar) verrattuna paljaalla silmällä, joka on aukon
noin 5 mm (valo kerätä teho on verrannollinen neliön halkaisijan). Saat 14C
mittauksia tämä tarkoittaa, että sen sijaan käyttää useita grammaa hiiltä useita päiviä beeta
laskennan AMS mittaus voidaan suorittaa 1 milligramma hiiltä noin
tunnin päästä sama tilastollinen tarkkuus.
AMS määrittää isotooppikoostumus näyte ensin tuottaa
negatiivisesti varautuneet ionisuihkun, joka on sitten useita erittäin valikoiva
suodatus menettelyjä löytämiseksi 14C, "neula heinää stack". 14C/12C suhde
välillä 10-12 ja 10-15 voidaan mitata tällä tavalla. Tiedot mittausmenetelmiä,
joka on pääosin kaikki AMS mukavuudet edellyttää tandem kiihdytin, löytyy
viitteet [14, 15, 16].
Tärkeä osa 14C dating on näytteen valmistus, eli louhinta aitoa hiiltä
raaka-näytteenottoon. AMS mittauksia on neljä erillistä vaihetta:
i) precleaning menettely, jolla pyritään poistamaan kaikki Epäluontaisten hiiltä, ii) täydellinen
poltto hiilen CO2, iii) vähentää CO2 alkuaine hiili H2 käyttämällä Fe
tai CO katalysaattori (hiilettämällä), ja iv) painamalla pieniä pellettejä sisältää tyypillisesti 1
mg hiiltä käytetään Cs-palkki paukahdella lähde tuottaa negatiivisia ioneja. Vuoden AMS
laitoksen Wienissä, Wienin Environmental Research Accelerator (Vera), 40 hiiltä
Näytteet voidaan ladataan ionilähde, yleensä 30 tuntematonta yhdessä 8 kalibrointi
näytteitä tiedossa 14C/12C suhde, ja 2 taustakohinanäytteet.
Tarkoin huomioon kaikki näytteen esikäsittelyn vaiheet ja isotooppisuhde mittausten
yleinen epävarmuus noin ± 35 vuotta saavutetaan Vera ja kalibroimattomaan radiohiili
ikäiset alle noin 10000 vuotta BP. Kuitenkin tämä epävarmuus voi lisätä huomattavasti
kautta "wiggliness" puun-rengas kalibrointikäyrä (ks. kuva 2). 14C dating raja
sijaitsee noin 50000 vuotta BP. Tämä raja ei määräydy laskemalla tilastoja, mutta
äärellinen taustakorjausta, joka sijaitsee samalla alueella. Se tarkoittaa, että
kuvaa saastumista, modernit hiili näytteidenvalmistusmenettelyitä on
pysyy alle 1 ‰ (eli 1 ug ulos 1 mg). On olemassa monia muita tekijöitä, jotka on otettava
huomioon (isotoopit, säiliö vaikutuksia, "vanha puu" ongelma, jne.), jotta
saapuvat luotettava mennessä. Kaiken kaikkiaan se on viisasta noudattaa Libby sääntö: "Radiohiiliajoituksen on
jotain kuria kirurgia - puhtaus, hoito, vakavuus ja käytäntö ".
Tekemisestä
AMS mittaukset 14C pienissä näytteet AMS on kasvanut erittäin hyödyllinen
menetelmää erilaisia aloja [16]. Lisäksi lukuisat sovellukset arkeologiassa,
esimerkiksi eri aloilla kuten merentutkimus, pohjavesi dating, ilmakehän tieteen, oikeuslääketieteen
lääketiede, biolääketieteen, Glasiologia, sedimentology, meteoritics, kaikki hyötyvät
äärimmäisen menetelmän herkkyys ja pieni koko vaaditun otoskoko. Vaikka
muut cosmogenic radionuklideja mitataan AMS, 14C on ylivoimaisesti eniten käytetty
yksi. Yli 90% kaikista AMS mittausten maailmassa on omistettu 14C. Vaihtelun
ilmakehän 14C sisältöä aika on vakava ongelma rajoittaa saavutettavissa
tarkkuus 14C vuodelta, mikä näkyy esimerkiksi päiväämällä Iceman. Yksi on hyvin suositeltavaa
8
ei työnnä tarkkuus ylittää asetettuja rajoja näiden luonnollinen vaihtelu, vaikka alle
Tiettyjen cirumstances voi parantaa tarkkuutta iän määritys tekemällä
niin sanottu "kiemurrella matching" kalibroinneista. Tämä on mahdollista, jos näytesarja on saatavilla,
jossa suhteellinen kronologia näytteet voidaan päätellä muista seikoista (e.. g.
stratigrafia on arkeologinen löytö). Tästä huolimatta varoitus, 14C on todellinen lahja luonnosta
ihmiselle, jonka avulla voimme tarkastella omaa maailmaamme tavalla ei ole mahdollista muulla tavoin.
Viitteet
1. Konrad pedot, Der Mann im Eis, Goldmann Verlag, München (1995) 1-406.
2. Brenda Fowler, Iceman - paljastamiseksi elämää ja ajat esihistoriallisen ihmisen löytyy
Alppien jäätikkö, Random House, New York (2000), 1-313.
3. Sigmar Bortenschlager ja Klaus Oeggl, toim. The Iceman ja hänen luonnollisessa ympäristössä,
Mies on Ice, Vol. 4, Springer-Verlag, Wien (2000) 1-166.
4. G. Bonani, S. Ivy, I. Hajdas, T.R. Niklaus ja M. Suter, AMS 14C iän määrityksen
kudosten, luun ja ruoho näytteitä Ötztalin Ice Man, radiohiili 36 / 2 (1994)
247-250.
5. R.E.M. Hedges, R.A. Housley, C. R. Bronk ja G.J. van Klinken, radiohiili päivämäärät
Oxford AMS-järjestelmä: Archaeometry datelist 15, Archaeometry 34 / 2 (1992)
337-357.
6. W. Rom, R. Golser, W. Kutscheran, A. Priller, P. Steier ja EM WILD, AMS 14C dating
Laitteiden The Iceman ja kuusitukin alkaen esihistoriallisista suola kaivoksissa
Hallstatt, radiohiili 41 / 2 (1999) 183-197.
7. K. Nicolussi ja G. Patzelt, Discovery varhaisen Holocene puuta ja turvetta forefield
ja Pasterze Glacier, Itä-Alpit, Itävalta, Holocene 10 / 2 (2000) 191-199.
8. W. Kutscheran, B. Jettmar, R. Golser, A. Priller, S. Puchegger, P. Steier, EM Wild,
S. Bortenschlager, K. Oeggl ja W. Rom, ilmastomuutokset suurissa korkeuksissa alkaen 14C
dating tällä sivustolla Jäämies Ötzi, kansainvälinen konferenssi tutkimus
Environmental Change käyttäen Isotope tekniikoita, Kansainvälinen atomienergiajärjestö
(IAEA), Wien, 23-27 4, 01, menettely voidaan julkaista.
9. C. Baroni ja G. Orombelli, Alppien jäämies ja Holcene ilmastonmuutoksen
Kvaternaariset Research 46 (1996) 78-83.
10. W.F. Libby, ilmakehän helium kolme ja radiohiili kosmisen säteilyn
Phys. Ilm. 69 (1946) 671-672.
11. J. Arnold ja W.F. Libby, Ikä määrityksiin radiohiili sisältö: tarkastuksia
näytteitä tunnettu ikä, Science 110 (1949) 678-680.
12. M. Stuiver, P. J. Reimer, E. Bard, J.W. Beck, G. S. Burr, K.A. Hughen, B. Kromer,
G. MacCormac, J.van der Plicht ja M. Spurk, INTCAL98 radiohiiliajoitusten ikä kalibrointi
9
24,000-0 cal BP, radiohiiliajoitusten, 40 / 3 (1998) 1041-1083.
13. J.W. Beck, D.A. Richards, R. L. Edwards, B.W. Silverman, P.L. Smart, D.J. Donahue,
S. Jererra-Osterheld, GS Burr, L. Lalsoyas, AJT Jull ja D. Biddulph,
Erittäin suuret vaihtelut ilmakehässä 14C keskittyminen viimeisen jääkauden aikana,
Sciencexpress/www.sciencexpress.org/10 toukokuuta 2001/10.1126/science.1056649.
14. D. Elmore ja F.M. Phillips, Accelerator massaspektrometria mittaus longlived
isotoopit, Science 236 (1987) 543-550.
15. C. Tuniz, J. R. Bird, D. Fink ja G.F. Herzog, Accelerator massaspektrometrialla:
herkällä analyysin Global Science, CRC Press, Boca Raton (1998) 1-371.
16. W. Kutscheran, Accelerator massaspektrometrialla: analysointi maailmassa atomi,
American Institute of Physics (AIP) Conf. Ser. 495 (1999) 407-428

Kuuntele

Lue foneettisesti