

## Kulstof-14 datering i Århus

Universitetet i Århus er nok værd at kigge på. Når du f. eks. går på sightseeing ad Nordre Ringgade og kommer til universitetets aula, vil du oppe på muren over hovedindgangen kunne se et prægtigt relief, et egetræ med mægtige grene og grønne blade. Det har titlen “Videnskabens træ” og er en billedkunstners\*) symbolske fremstilling af videnskabernes forgrenede vækst fra en fælles stamme og rod. En smuk tanke. Men går du videre ad den brede trappe ned i parken, får du øje på en anderledes symbolik. Her ligger universitetets bygninger spredt rundt omkring i det grønne område som adskilte husblokke af forskellig størrelse. Bygningerne har det til fælles, at de alle er bygget som gule murstenshuse med 30 graders taghældning, men bortset herfra er det svært at fornemme nogen fælles stamme og rod. Undersøger man således bygningernes indhold, finder man, at hver bygningsblok rummer et bestemt fag, et *institut*, hvor der forskes og undervises i netop den bestemte videnskab stort set uafhængigt af hvad der foregår på de øvrige institutter. Fagenes navne er skrevet udenpå husene med hvide bogstaver: “FYSIK OG ASTRONOMI”, “KEMI”, “GEOLOGI” o.s.v. Hvert fag sit hus – ligesom et skoleskema, hvor hvert fag har fået tildelt sin time.

Denne tradition for videnskabens opdeling i fag er meget gammel, den er udtænkt af Aristoteles for over 2300 år siden og er utrolig sejlivet. Vi ved selvfølgelig godt, at virkeligheden er mere indviklet end som så. Naturen er ligeglad med skoleskemaet. Når fagopdelingen har overlevet så længe og bruges i hele verden, er det fordi den har vist sig at være uhyre praktisk og effektiv. Vort *Institut for Fysik og Astronomi* er ingen undtagelse; her har vi en lang tradition for at udføre grundforskning inden for fysikkens og astronomiens rammer. I tidligere numre af “Kontakt” er der bragt adskillige eksempler på, hvad det kan føre til af spændende ny viden.

Heldigvis har man forlængst indset, at de stive faggrænser ikke altid er særligt hensigtsmæssige. Fra instituttets side støtter man derfor gerne aktiviteter, der anvender fysikkens resultater og metoder inden for andre videnskaber, uanset om de ligger nok så fjernt fra fysik som grundvidenskab. Det kan typisk dreje sig om opgaver, der kræver komplicerede fysiske måleinstrumenter, hvis drift er afhængig af den særlige ekspertise, som findes på det fysiske institut og kun der.

Et eksempel på en sådan aktivitet er *AMS kulstof-14 dateringslaboratoriet*. Vi kalder det et laboratorium, men ret beset er det en butik, der sælger en bestemt slags fysiske måleresultater, kulstof-14 dateringer af indsendte prøver, til kunder i ind- og udland. Kunderne er for det meste arkæologer, geologer og geofysikere. Bogstaverne AMS står for Accelerator Masse Spektrometri og henviser til målemetoden, der beskrives i det følgende.

Hvad er datering? Vil du vide det, så prøv at gå ud i skoven, find en stub fra et frisk fældet træ, og tæl årringene. Ved at regne baglæns fra indeværende år finder du det årstal, hvor træet startede sin vækst. Så har du foretaget en datering af træet. Når det kan lade sig gøre så simpelt, er det fordi træstubben indeholder en sammenhængende serie af årringe, der spænder over hele træets levetid.

---

\*) Af O. Stær-Nielsen 1949, med tilføjelse af Knud Nellemose 1980.

Men hvad nu, hvis vi står med en lille træsplint, som vi gerne vil datere? Træstykket kan f. eks. tænkes at stamme fra en oldtidsgrav, hvis alder ønskes bestemt. Problemet er bare, at stykket kun indeholder en brøkdel af en årring, måske har vi kun nogle få milligram træ. Her er det, at kulstof-14 metoden kommer ind i billedet. Metoden bygger på en fysisk måling af mængdeforholdet mellem kulstofisotopen kulstof-14 ( $^{14}\text{C}$ ), som er radioaktiv, og de stabile kulstofisotoper ( $^{12}\text{C}$  og  $^{13}\text{C}$ ) i den prøve – her træsplinten – der ønskes dateret. Jo ældre prøven er, desto mindre vil mængden af  $^{14}\text{C}$  være.

Alt kulstoffet i levende planter og dyr på jordkloden indeholder nemlig en lille smule  $^{14}\text{C}$ . De radioaktive kerner af  $^{14}\text{C}$  dannes til stadighed øverst i jordens atmosfære, idet den kosmiske stråling ude fra rummet uophørligt bombarderer luftens molekyler. Herved omdannes lidt af luftens kvælstof ( $^{14}\text{N}$ ) til  $^{14}\text{C}$ , som hurtigt iltes til kuldioxid ( $^{14}\text{CO}_2$ ) og blandes med den eksisterende  $\text{CO}_2$ -mængde. Noget af blandingen optages i planter, som omdanner  $\text{CO}_2$  til kulhydrat og andet organisk materiale under sollysets medvirken i den kemiske proces, der kaldes fotosyntese. Det radioaktive  $^{14}\text{C}$  forsvinder efterhånden, det omdannes til  $^{14}\text{N}$  med en halveringstid på 5730 år. Men produktion og henfald holder hinanden i ligevægt med det resultat, at der opretholdes en nogenlunde konstant koncentration af  $^{14}\text{C}$  i atmosfæren og i planterne samt i de dyr og mennesker, der lever af planterne – så længe de lever. Men når organismen – dyret, mennesket eller planten – dør, bliver  $^{14}\text{C}$  ikke længer fornyet. Indholdet af  $^{14}\text{C}$  i den døde organisme – dvs. de dele af organismen, som bevares intakte uden at rådne væk – vil derfor aftage gradvis (eksponentielt), således at der efter 5730 års forløb er den halve mængde  $^{14}\text{C}$  tilbage. En måling af mængdeforholdet mellem  $^{14}\text{C}$  og de stabile isotoper  $^{12}\text{C}$  og  $^{13}\text{C}$  i prøven er således et mål for det tidsrum, der er gået siden organismen døde. Dette tidsrum kaldes prøvens alder.

Isotopforholdet mellem  $^{14}\text{C}$  og stabilt kulstof er ekstremt lille, men det kan måles ved hjælp af en speciel teknik. I en “moderne” prøve, f. eks. et blad af en levende plante, findes der blandt et tusind milliarder kulstofatomer kun et enkelt  $^{14}\text{C}$  atom (mængdeforhold = 1:  $10^{12}$ ) – i sandhed en nål i en høstak. For at forsøge at begribe dette tal kan man tænke på et enkelt sandkorn gemt i et vognlæs på 50 tons sand, det er det der sådan cirka skal til for at få  $10^{12}$  enkelte korn.

De tre slags atomer  $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$  og  $^{14}\text{C}$  er isotoper af grundstoffet kulstof. Det betyder, at de har det samme antal protoner (6), men et forskelligt antal neutroner (henholdsvis 6, 7 og 8). Summen af protontal og neutrontal (henholdsvis 12, 13 og 14) er tilnærmelsesvis lig med atomets masse i atommassenheder. Masseforskellene kan udnyttes til at sortere atomerne fra hinanden, hvorefter deres mængde kan måles hver for sig. Teknikken går ud på at give atomerne en elektrisk ladning, accelerere dem, hvorefter de kan separeres ved afbøjning i et magnetfelt. Sorteringsmetoden kaldes i almindelighed for massespektrometri. I de specielle tilfælde, hvor den ene af isotoperne – som her  $^{14}\text{C}$  – er uhyre sjælden, er det nødvendigt at bruge en accelerator, og vi taler derfor om accelerator-massespektrometri (AMS). I Århus benytter vi instituttets tandemaccelerator.

Kulstoffet i den prøve, der ønskes  $^{14}\text{C}$ -dateret, omdannes først til en lille tablet af ren grafit på typisk 1 mg, ofte mindre. Grafitprøven anbringes i et kammer (ionkilden), hvor der hæftes en elektron på kulstofatomerne; det gøres ved en reaktion ved høj temperatur med dampe af cæsium, et alkalimetal, som er det grundstof, der er mest tilbøjeligt til at afgive elektroner. Kulstofatomerne frigøres i den proces som negativt

ladede ioner,  $C^-$ . Derefter sørger tandemacceleratoren for at give ionerne fart på, idet den indeholder en elektrode, som er tilsluttet en positiv elektrisk spændingskilde på 3 millioner volt. De negative kulstofioner tiltrækkes af den positivt ladede elektrode og accelereres til en kinetisk energi på 3 MeV. Når ionerne passerer en kanal gennem elektroden, kolliderer de med molekyler i en luftart (argon), hvorved der fjernes elektroner, så ionerne ender med at blive 3-dobbelt positivt ladede ( $C^{3+}$ ). Nu frastødes ionerne fra elektroden, og når de kommer ud på den anden side af den, får de et ekstra skub, så de forlader acceleratoren med 12 MeV. (Tandemacceleratoren udnytter således spændingen to gange til at accelerere partiklerne – deraf navnet). Ionerne løber under hele denne proces som en stråle gennem et rør, der holdes pumpet lufttomt. Højspændingselektroden på 3 millioner volt er indesluttet i en stor tryktank med 8 atmosfærers tryk for at forhindre gnistdannelse. Ionstrålen afbøjes i feltet fra en elektromagnet (analyse magneten). Da afbøjningsvinklen afhænger af massen (de letteste ioner afbøjes mest), opløses ionstrålen i tre adskilte stråler svarende til de tre kulstofisotoper, som nu kan måles hver for sig. Ionstrålerne af  $^{12}C$  og  $^{13}C$  er så kraftige, at de kan måles som elektriske strømme ved hjælp af et mikroamperemeter, hvorimod de sjældne  $^{14}C$ -ioner må tælles enkeltvis i en partikeldetektor.

Det er afgørende, at strålen af  $^{14}C$ -ioner er fuldstændig ren, når den skal måles. Dette er tandemacceleratoren garant for. Tag f. eks. den stabile kvælstofisotop  $^{14}N$ , hvis tilstedeværelse i ionkilden man aldrig vil kunne undgå, fordi den er hovedbestanddelen af atmosfærisk luft. Da positive  $^{14}N$ -ioner har praktisk talt samme masse som  $^{14}C$ -ioner og derfor afbøjes i samme vinkel i analyse magneten, ville  $^{14}N$  kunne ødelægge  $^{14}C$ -målingen fuldstændigt. Men heldet er med os – tandemacceleratoren accepterer kun input af negative ioner, og den negative kvælstofion  $N^-$  er så ustabil, at den ingen chancer har for at nå frem til acceleratoren.

Det største udbytte af negative kulstofioner fra ionkilden fås med grafit, som er en krystallinsk form for kulstof. Derfor må kulstoffet i enhver dateringsprøve først omdannes til kuldioxid ( $CO_2$ ), som dernæst reduceres til grafit med brint i en katalytisk proces ved høj temperatur. Hvis prøven er træ eller andet organisk materiale, oxideres den til  $CO_2$  ved opvarmning med kobberoxid. Hvis prøven derimod er kalkholdig, som f. eks. muslingeskal, frigøres  $CO_2$  af kalken med fosforsyre. Datering af menneskeknogler har særlig interesse for arkæologer og antropologer. Knoglernes indhold af proteinstoffet kollagen, som er særlig bestandigt overfor nedbrydning, udtrækkes og behandles som andet organisk materiale.

Nu vil arkæologerne helst bevare deres kostbare fund så vidt muligt intakt. De vil derfor gerne vide, hvor lidt materiale man kan nøjes med ofre på en  $^{14}C$ -datering. AMS-metoden kan klare sig med meget lidt, et milligram kulstof er i reglen nok. Det er et spørgsmål om statistik. I en prøve på 0,01 mg "moderne" kulstof er der 500,000  $^{14}C$ -atomer. AMS-metoden kan dog kun udnytte ca. 2% heraf, eller 10,000 atomer, som bliver talt i partikeltælleren. Den statistiske usikkerhed på de 10,000 atomer er 1%. Jo flere atomer man tæller, desto lavere usikkerhed og højere præcision. Det er her ligesom med meningsmålinger – præcisionen vokser med stikprøvens størrelse.

De fleste  $^{14}C$ -dateringer i Århus foretages med en usikkerhed på omkring  $\pm 50$  år, i visse tilfælde er det muligt at komme ned på  $\pm 30$  år. Grænsen for, hvor langt tilbage man kan datere ligger på ca. 40,000 år.

Ved hjælp af AMS-målingen bestemmes prøvens indhold af  $^{14}C$  i forhold til de stabile isotoper. Jo højere alder, desto mindre  $^{14}C$  er der tilbage. Alderen bestemmer

man ved sammenligning med  $^{14}\text{C}$  målt i træers årringe, der som bekendt kan dateres ved en simpel tælling. Man har hertil bl. a. valgt træ af en meget langsomtvoksende art, børstekoglefyr, der gror i Californiens tørreste bjergegne, hvor de kan blive op til 4000 år gamle. Ved at bruge fossile træstammer kan træeringsmålingen udstrækkes til ca. 10,000 år før nu. Metoden kaldes træerings-kalibrering. Træeringsmålingerne afslører, at  $^{14}\text{C}$  ikke aftager jævnt (eksponentielt) med stigende alder, som man skulle forvente. Afvigelserne fra en eksponentiel kurve viser, at atmosfærens  $^{14}\text{C}$  indhold har varieret gennem tiderne, faktisk med op til 10%.

I  $^{14}\text{C}$ -dateringens barndom for ca. 50 år siden gik man ud fra, at atmosfærens  $^{14}\text{C}$ -indhold altid havde haft samme værdi, og at det derfor var tilladeligt at bruge den eksponentielle henfaldslov til at udregne alderen, en størrelse, som man senere kaldte "den konventionelle  $^{14}\text{C}$ -alder" for at skelne den fra den sande alder, som benævnes "kalenderalderen" eller "kalibreret alder". Skønt " $^{14}\text{C}$ -alderen" er en ren regnestørrelse, der kan afvige betydeligt fra den sande alder og i reglen skaber forvirring og misforståelser, bruges den desværre endnu.

AMS  $^{14}\text{C}$  laboratoriet i Århus daterer hvert år ca. 1000 prøver. Laboratoriet råder over et kemilaboratorium, hvor to laboranter forbehandler dateringsprøver og fremstiller grafitprøver til acceleratoren. I kælderens under instituttets parkeringsplads ved Langelandsgade befinder tandemacceleratoren og måleudstyret sig. Mange gymnasieklasser har haft lejlighed til at besøge tandemacceleratoren, hvor eleverne har undret sig over den enorme tryktank, de tykke betonmure, der afskærmer mod røntgenstrålingen fra acceleratoren samt kontrolrummet med de mange røde og grønne lamper på kontrolpanelet, hvor man godt kan føle sig hensat til en 50'er-film. Selve acceleratoren er da også konstrueret i 1958 (til Niels Bohrs institut) og blev i 1973 flyttet til Århus. En så gammel maskine stiller – lige som en veteranbil – store krav til de teknikere, der skal holde den kørende. Den kører upåklageligt – men på lånt tid, for vi er kommet i den kedelige situation, at nogle af de vigtigste reservedele til acceleratoren simpelthen ikke laves mere. Laboratoriet planlægger derfor en udskiftning med en moderne og mere effektiv tandemaccelerator, som kun fylder en brøkdel af den nuværende samt giver langt mindre farlig stråling fra sig. Med en sådan maskine vil laboratoriet i Århus stå stærkt rustet til at møde den stadigt stigende efterspørgsel efter  $^{14}\text{C}$ -dateringer.

*Jan Heinemeier og Henrik Loft Nielsen*