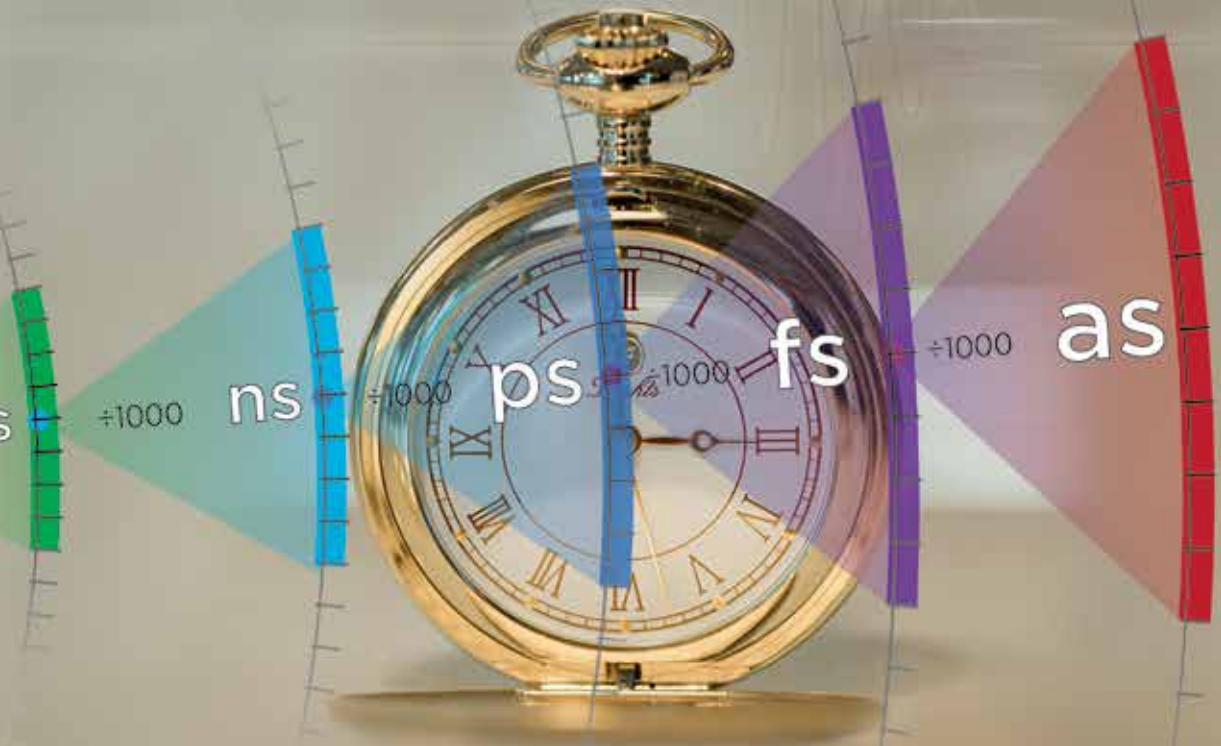


KOSMOS

attofysik

SVENSKA FYSIKERSAMFUNDETS ÅRSBOK 2025



OM TIDSBEGREPPET

© ERIK B. KARLSSON



Artikeln publiceras under Creative Commons-lisensen CC BY-NC-SA 4.0
För bildmaterial med källhänvisning
gäller samma upphovsrättsliga
regler som för källan.

f SVENSKA
FYSIKER
SAMFUNDET

490 f Kr, 330 f Kr, 55 f Kr, 70 f Kr, 1643, 1646,

1859, 1879, 1931, 1955, 1956

*Fugit irreparabile
tempus.*



Erik B. Karlsson

är professor emeritus i fysik vid Uppsala universitet. Han började sin bana som kärnfysiker men har sedan 50 år tillbaka arbetat inom fasta tillståndets fysik med användning av strålning från atomkärnor, särskilt myoner och neutroner. För närvarande intresserar han sig för kvantkoherens under korta tider i system innehållande protoner. Han har varit ordförande i Nobelkommittén för fysik, och bland annat författat en översikt av Nobelprisen i fysik under de första 100 åren – se Kosmos 2002.

Vi vet alla vad som menas med tid. Eller gör vi det? Vad är egentligen tid? Kan svaret på den frågan sökas inom fysikens domäner, eller handlar det om filosofi. Om detta spekulerar Erik B. Karlsson i detta bidrag, in en en artikel som rör såväl filosofi som olika delar av grundläggande fysik.

Bilden: Poeten Vergilius lamenterar att tiden flyr oåterkalleligt.

Om tidsbegreppet

Några personliga reflektioner

Tillåt mig börja med en kort återblick på tidsområden som varit aktuella under min egen tid som forskare:

Under min doktorandtid i slutet på 1950-talet höll jag på med att mäta sekvenser av gammastrålning från exciterade kärnor med hjälp av koincidensteknik. Men denna teknik begränsades av antalet ”tillfälliga koincidenser” från gammastrålning som inte hörde ihop med den sekvens vi undersökte och som ökade med produkten $N_1 N_2 \tau_{\text{app}}$ av intensiteterna N_1 och N_2 i de två inställda energikanalerna, gånger tidsupplösningen τ_{app} . Tidsupplösningen begränsades av hur fort pulserna från detektorerna kunde fortplanta sig i olika kablar och vi studerade flitigt boken *Milli-Microsecond Pulse Techniques* av I.A.D. Lewis *et al.*, 1954 (prefixet nano hade ännu inte börjat användas!) för att minska τ_{app} och minimera denna andel. De första ”snabba pulskablarna” som tillät frekvenser upp till 10^9 Hz hade diametrar på flera cm, vilket ställde till stora praktiska problem vid hanteringen.

Gamma-gamma-koincidenserna som man mätte hade oftast en tydlig vinkelkorrelation $W(\theta)$, dvs. foton nummer två utsändes inte isotropt i förhållande till foton nummer ett. Min uppgift var att mäta hur mycket detta korrelationsmönster försköts om man lade på ett magnetfält B_{ext} , så att kärnans spinn I vred sig en liten vinkel $\Delta\theta = g B_{\text{ext}} \tau_N$ under mellantillståndets livslängd τ_N . På det viset kunde man bestämma kärnans g -faktor, och därmed dess magnetiska moment $\mu = g \times I$. Med hjälp av de (på den tiden) allra kraftigaste magneterna, med en fältstyrka på ca 6 T, kunde vi mäta g -faktorerna för de s.k. deformerade kärnornas rotationstill-

stånd, vars τ_N ligger på ca 1 ns. Deras värden skvallrade om hur protonerna i kärnorna rörde sig i förhållande till neutronerna när kärnor roterar.

Men kärnor som ingår i magnetiska material känner också av inre magnetfält, s.k. hyperfinfält B_{hf} , som kan gå upp till 50 T eller mer. Genom att bygga in radioaktiva kärnor i magnetiska material kunde vi få snurr även på sådana även om deras τ_N var så korta som 10^{-10} s. De allra starkaste magnetfälten, i kT-området, nådde vi genom att låta exciterade kärnor bromsas in i magnetiska folier, där det uppstår tillfälliga, extremt höga fält när inre elektroner slits loss och deras spinn polariseras. Det mest kortlivade kärntillståndet vars magnetiska egenskaper vi lyckades mäta med hjälp av sådana transienta fält på 1970-talet var $I = 2$ -tillståndet vid 1409 keV i ^{54}Fe , som hade en livslängd på $0,97 \times 10^{-12}$ s. Med detta började min resa mot fenomen som uppträdde vid allt kortare tider.

Spinn-relaxation uppträder när en kärnas eller annan partikels spinn tappar sin inriktning genom att det påverkas av fluktuerande krafter i dess omgivning. För kärnspinn suddas vanligen spinnriktningen ut inom några millisekunder, men olika fort beroende på i vilken speciell omgivning kärnan sitter; det är ju denna kontrast som ger upphov till bilderna i den kärnspinn-spektroskopi, som nu kallas magnetresonanstomografi eller ”magnet-röntgen”. I en paramagnet har man starka magnetiska krafter och det är elektronspinnfluktuationerna $\{S_i, S_j\}$ i närheten av det observerade kärnspinn I som gör att signalen från kärnspinnnet avtar som $\exp(-\lambda t)$. Här är $\lambda = (gB_{hf})^2 \tau_S$, där τ_S är elektronspinnens typiska fluktuationstid. Vi mätte dämpningen λ och kunde därmed följa hur S -fluktuationstiden gick från ca 10^{-13} s ner mot 10^{-14} s när man avlägsnade sig uppåt från Curiepunkten och de kvarvarande lokala spinnklustren alltmer bröts upp. Särskilt noggranna blev dessa mätningar när vi mot slutet på 1970-talet bytte ut kärnspinnen mot myoners spinn i s.k. MuSR-experiment vid CERN. Myonens g -faktor g_μ i formeln ovan är nämligen ca tio gånger starkare än de flesta kärnors. Detaljer i elektronspindynamiken kunde nu studeras inom femtosekunderområdet och i kvasi-2D magneter kunde vi följa kvarstående spinnkorrelationer ända upp till tio gånger ordningstemperaturen. Andra MuSR experiment gällde villkoren för partiklars tunnling och hur störningar från fononer och elektroner i pikosekunderområdet begränsar denna.

Nästa steg nedåt på tidsskalan blev aktuellt i slutet på 1990-talet. Som nybliven pensionär började jag med neutronexperiment vid Rutherford-Appleton laboratoriet i England. Comptonspridning av neutroner mot protoner och andra lätta kärnor erbjuder nämligen en möjlighet till tidsdifferentiella studier av dekoherensprocesser ner till subfemtosekundskalan. Koherensen i den utgående neutronvågen förstörs här snabbt. Spridningstiden τ_{sc} förkortas genom att lätta partiklars nollpunktsrörelse har en bred naturlig nollpunktsimpulsfördelning Δp . Ju högre impulsöverföring $q = m_n v_1 - m_n v_2$, desto kortare spridningstid: $\tau_{sc} = \hbar m_p / q \Delta p$. Tidsfönstret minskar ned till attosekundskalan när man ökar spridningsvinkeln (dvs. impulsöverföringen q) i ett typiskt experiment på protoner. Man kan också följa hur dekoherenseffekter från växelverkan med partiklarnas omedelbara omgivning verkar under ännu kortare tider, ner under 10^{-16} s.

På 50 år hade alltså tidsskalan för de processer jag intresserat mig för krympt mer än 7 storleksordningar. Detta är en erfarenhet som jag delar med flera fysiker i min generation. Laserutvecklingen har framför allt bidragit. Den har gjort att man detaljerat kunnat följa stegen i olika kemiska processer på femtosekundskalan och senast ännu längre genom de nu aktuella attosekundsexperimenten, men även synkrotronsstrålning arbetar numera med femtosekundspulser. Det är t.ex. möjligt att avmagnetisera magnetiska folier på ca 50 fs och i den s.k. core-hålspektroskopin kan man mäta transfertider för elektroner ner till 1 fs. I kvantoptiken kan man också isolera fåpartikelsystem (t.ex. par av atomer växelverkande med olika bestämda svängningsmoder) från sin omgivning och styra dessa med pulser så korta som 1 fs.

Vi fysiker har alltså krympt de tidsintervall som studeras ända ner till enstaka attosekunder, men har det hjälpt oss att bättre förstå tidens natur? Inte så mycket. Hittills har man i olika kvantoptiska experiment kunnat följa utvecklingen av händelser inom femtosekundsområdet i enkla modellsystem som innehåller endast ett fåtal partiklar. Åtminstone i den icke-relativistiska gränsen kan man då säga sig följa ”tidens gång”, då händelser som orsakas av inre eller yttre påverkan sker en efter en. En fortsättning en bit ner i attosekundsområdet kan möjligen hjälpa oss fortsätta på samma sätt även för lite större partikelsystem, inom vilka olika händelser ligger tätare, och kanske kan man också studera de enstaka händelsernas, dvs. själva kvantövergångarnas, utsträckning i

tiden. Men dessa experiment lär inte ge så mycket mer information om tidens egentliga natur och det är ju fortfarande mycket långt kvar till Plancktiden 10^{-43} s, som anses vara det minsta tidsintervall som man kan tänka sig.

Några av de vanligaste frågorna om tiden är ”Har den en början och ett slut?”, ”Varför går tiden endast i en riktning?”, ”Kan tiden stå still?” och ”Hur upplever vi människor tidens gång?”. Den första frågeställningen leder oss in på kosmologi, den andra på termodynamik och kvantmekanik. Även den tredje har en kvantmekanisk aspekt och när vi kommer till den fjärde hamnar vi inom psykologin och neurovetenskapen.

Vad är då tid?

Den frågan har filosofer ställt sig i alla tider och det finns flera kända citat, från antiken till nutiden, som illustrerar svårigheten med att identifiera detta begrepp. Aristoteles kopplade tiden till rörelse; tiden kan man inte observera direkt utan bara via rörelser. ”Tiden bestämmer rörelsen genom att utgöra dess tal, och rörelsen bestämmer tiden” skriver han i *Fysiken*. Filosofen och kyrkofadern Augustinus skrev i sin bok *Bekännelser* från 300-talet e.Kr.: ”Om ingen frågar mig vet jag vad tiden är, men om jag ska förklara det vet jag det inte”. Albert Einstein nöjde sig med att säga att ”tid är det man mäter med klockor” och en av hans medarbetare, fysikern John Wheeler, sade vid ett tillfälle att ”tid är naturens metod att undgå att allt inte sker på en gång”.

Filosofer frågar sig om rum och tid verkligen existerar eller bara är något vi skapat i våra medvetanden för att få stöd för vårt agerande i en komplicerad värld. Redan när det gäller rumsbegreppet har vi en skillnad mellan *substivalisterna*, som anser att rummet verkligen existerar som egen substans, och *relationisterna* som anser att rummet måste sättas i relation till något materiellt som kan placeras i detta rum. För de senare har det tomma rummet ingen mening. Skillnaderna mellan dessa synsätt har diskuterats sedan Newtons (han var substantivalist) och Leibnitz (som var relationist) dagar och är fortfarande aktuella i filosofisk litteratur.

När det gäller tiden tillkommer en komplikation. Vill vi placera en händelse (som ju motsvarar läget när det gäller rumskoordinater) på en tidsskala kan vi inte göra det hur som helst. Händelser följer i ordning strikt efter varandra och man kan inte gå bakåt i tiden på samma sätt som i rummet. Med vardagligt språk säger vi

att ”tiden går” och det är också så som vi upplever tiden psykologiskt. Och liksom i frågan om den tomma rymden kan man med Leibnitz fråga sig: ”Kan världen sägas vara annorlunda en sekund senare även om ingenting har hänt under denna tid?”

Jag återkommer strax till frågan om tidens pil i såväl klassisk som kvantmekanisk mening, men först en annan aspekt på begreppet tid. Filosofen McTaggart skiljde 1908 på A-tid och B-tid:

- I A-tiden ordnar han händelser efter tidsskeden; *Dåtid*, *Nutid* och *Framtid*. Något viktigt händer i *Nuet* som ändrar verkligheten så att såväl *Dåtiden* som *Framtiden* blir annorlunda än *Nuet*. Det är endast det tillstånd som vi har i *Nuet* som verkligen existerar. Denna inställning kallas *presentism*. Tiden själv anses flöda; det är inte bara det att våra sinnen får den att se ut att göra det.
- I B-tiden sätts alla förändringar i relation till varandra; de är *tidigare*, *samtidiga* eller *senare*. Det är en statisk teori i den meningen att händelser utspelar sig vid vissa lägen på en fast tidsskala (ett antagande som senare givit upphov till begreppet *blocktid*) och kan läggas in punktvis på den, precis som positionerna läggs in på rumsskalan. Dåtid, Nutid och Framtid behandlas lika. Att tiden går är något som vi bara tycker oss uppfatta och som ligger helt inom vår medvetandesfär.

McTaggarts menade att det som är utmärkande för att tiden går är att händelser ändrar tempus, vilket de gör i A-tiden. Han visade också att A-tid inte kan reduceras till B-tid och därmed blir tiden överklig i den senare, dvs. den finns där bara som en föreställning i vårt medvetande.

Tidens natur har debatterats alltsedan antiken. Det är framför allt två aspekter på tiden som vållat kontroverser. För det första: Existerar tiden som en självständig storhet eller är den bara en hjälpstorhet vid beräkningar? Och för det andra: Kan man säga att ”tiden går” eller är detta bara en illusion? I stora drag kan man illustrera olika tänkares positioner i dessa frågor i ett diagram med två axlar (se figur 1). Flera av deras namn nämns senare i texten.

I ena hörnan finner vi Newton och hans löpande tid (även om denne själv var medveten om att hans tid endast kunde bestämmas indirekt) och i motsatt rindhörna Aristoteles och Lucretius (han med *De rerum naturae*, Om tingens natur). Leibnitz ansåg att ti-



Figur 1: En översikt av olika tänkares inställning till tiden, inspirerad av en artikel i tidskriften *La Recherche* (Jan. 2017).

den inte behövdes som självständig storhet, medan Einstein hamnar i ett mellanläge. Hans tid är inte absolut utan förbunden med rummet i en rumtid. Längst ut på denna ytterkant får vi placera den moderna teoretikern Carlo Rovelli (medan hans ämneskollega Lee Smolin ligger närmare det newtonska hållet). Vad beträffar tidens flöde hamnar Aristoteles, som sade att tiden är ett mått på förändringar, på deras motsatta sida tillsammans med Lucretius, och filosofen och nobelpristagaren i litteratur Henri Bergson, som skrev boken *Durée et simultanéité* (Varaktighet och samtidighet). Före Aristoteles tid hade Zenon, med sina kända paradoxer, hävdade att all förändring var omöjlig, men hans argument vilade på att rummet och tiden sker i diskreta steg och inte kontinuerligt som man nu beskriver dem ned hjälp av infinitesimaler.

Här är det intressant att notera att även om begreppet tid vilar på osäkra filosofiska grunder utgör tiden en hörnsten i vårt SI-system. Tidsenheten 1 sekund definieras separat, som tiden för ett visst antal svängningar hos en viss atom. Med hjälp av sekunden definieras sedan 1 meter, utgående från den sträcka ljuset går under ett visst antal sekunder, med hjälp av Plancks konstant, metern och sekunden definieras 1 kilogram, med utgångspunkt från

elementarladdningen och sekunden definieras 1 Ampere och med hjälp av Boltzmanns konstant, kilogrammet och sekunden temperaturen 1 Kelvin. I praktiken är tiden alltså så viktig att den fått en särställning bland fysikaliska storheter!

Tidmätning

Tidmätning kräver en referens till något regelbundet uppträdande fenomen och var länge baserad på astronomiska observationer. Fram till 1956 definierades sekunden som $1/86400$ av ett medelsoldygn, dvs. genomsnittliga tiden för solpassagen vid Greenwichmeridianen. Men eftersom man vid den tiden hade funnit att jordens rotation inte var konstant, utan saktade ner betydligt under årens lopp, övergick man år 1960 till att i stället basera tiden på jordens omloppstid kring solen och valde då som bas ett bestämt tropiskt år (dvs. jordens omloppstid relativt vårdagjämningspunkten): ”En sekund är $1/31\,556\,925,9747$ av det tropiska året 1900”. Men just vid denna tid hade fysikerna börjat utveckla nya, exakta metoder för tidmätning baserade på atomära periodiska förlopp och redan 1967 lämnade BINP (Bureau International de Poids et Mesures) den astronomiska basen för tidmätning och införde Cs-sekunden: ”En sekund är varaktigheten av $9\,192\,631\,770$ perioder av den strålning som motsvarar övergången mellan de två hyperfinnivåerna i grundtillståndet hos en cesium-133-atom”.

I Kosmos 2020 har Martin Zelan beskrivit modern tidmätning med atomära och optiska klockor. Cs-klockan har sedan 1967 utvecklats och förfinats på flera sätt. Man laserkyler Cs-atomerna ner till μK -temperaturer innan de skickas upp i en atomfontän, där själva resonansen med radiofrekvensfältet observeras under det att atomerna faller ner mycket sakta. Man uppnår ett slutresultat med en relativ statistisk noggrannhet på ca $1:10^{16}$ efter medelvärdesbildning av ett stort antal mätningar. De kvarstående systematiska osäkerheterna på grund av andra ordningens Zeemaneffekt (som förändrar frekvensen beroende på det pålagda magnetfältet) och oönskade spinnutbyten (orsakade av interna kollisioner mellan Cs-atomer) kan man korrigera för enligt kända formler så att de hålls inom samma felområde. För en av de senaste Cs-klockorna, den s.k. NIST-2 uppges följande data (se tabell 1).

Den största korrektionen härrör här från gravitationsskiftet (se mera om detta senare i denna artikel), eftersom sekunddefinitionen avser tiden vid havsnivån och NIST-2 är placerad på en

Fysikalisk effekt	Storlek	Osäkerhet
Relativistiskt frekvensskift	$179,87 \times 10^{-15}$	$0,03 \times 10^{-15}$
Andra ordningens Zeemaneffekt	$286,06 \times 10^{-15}$	$0,02 \times 10^{-15}$
Svartkropsstrålning	$-0,087 \times 10^{-15}$	$0,005 \times 10^{-15}$
Spinbyte genom kollisioner	0	$0,02 \times 10^{-15}$
Mikrovågseffekt	$< 0,01 \times 10^{-15}$	$0,08 \times 10^{-15}$
Totalt		$0,11 \times 10^{-15}$

Tabell 1: Bidrag till relativa systematiska skift i Cs-klockan NIST-2, samt dess osäkerheter (data från Heavner et al. *Metrologia* **51**, 174 [2014]).

höjd av 1800 m. Innan sekunden slutligen fastställs tar man in information från elva liknade anordningar världen över och medelvärdesbildar.

Men under tiden har s.k. optiska klockor snabbt utvecklats, så som beskrivs i Zelans artikel i *Kosmos* 2020. De arbetar med resonanser i det optiska området (flera storleksordningar högre än Cs-klockans) och medger i princip noggrannheter bättre än $1:10^{19}$. I bl.a. isotoperna ^{27}Al , ^{87}Sr och ^{171}Yb finns det "förbjudna" optiska övergångar (med långlivade övre tillstånd och därmed hög energiskärpa) lämpliga för tidmätning. Atomerna, infångade i konventionella jonkällor eller i optiska gitter (de senare medger bättre signal/brus-förhållande), får växelverka med väl definierade laserstrålar, vars frekvensnoggrannhet går ner till 1 Hz. Tidigare fanns inte möjligheter att jämföra klockfrekvenser inom så skilda frekvensområden som de infraröda och det optiska området, men uppfinningen av den s.k. frekvenskammen (Hall och Hänsch, Nobelpris 2005) tillåter nu att jämföra resultaten från olika klockor och kalibrera mot Cs-normalen med god precision.

Det förväntas att en optiskt baserad standard kommer att ersätta Cs-normalen någon gång i början av 2030-talet, men BIPM funderar fortfarande över vilka kriterier som bör vara uppfyllda för att välja ut en bestämd optisk övergång för detta ändamål.

Tidens asymmetri

I både A- och B-tiden uppfattar man tiden som asymmetrisk. Till skillnad från förflyttningar i rummet kan man inte förflytta sig bakåt på tidsskalan.

Klassiskt

Vi börjar med att jämföra hur den klassiska fysiken och kvantmekaniken behandlar asymmetrin i tidens riktning i det *icke-relativistiska* fallet. Newton var den förste som introducerade tiden som en parameter i en ekvation, men hans ekvationer (liksom alla inom klassisk mekanik) gäller likafullt även om tiden skulle gå baklänges. Termodynamiken säger något annat. Ett sammansatt system, som en kaffekopp, sätter inte ihop sig själv om den tappas och går sönder.

Att tiden tycks gå i endast en riktning förknippas oftast med termodynamikens andra huvudsats. Arthur Eddington kallade år 1927 denna följd av entropins ständiga ökning i ett slutet system för ”tidens pil”. Även om vissa av hans samtida, särskilt kemisten Gilbert N. Lewis, snart påpekade att entropin i ett slutet system mycket väl kan fluktuera åt båda hållen inom lokala områden, torde denna ensidiga riktning gälla väl i en global betraktelse av stora makroskopiska system (inklusive våra medvetanden).

Andra tankar om tidens pil bygger på asymmetrier i naturlagarna eller på att särskilda begynnelsevillkor förelegat vid vårt universums uppkomst. Det är känt från experiment med K-mesoner att den svaga naturkraften inte är symmetrisk under de kombinerade operationerna C (laddningskonjugation) och P (paritetsbyte). Eftersom man på goda grunder anser att $CPT = 1$ (där T är tidsreversionen) borde gälla för alla samband i naturen, följer att denna kraft även är asymmetrisk med avseende på tiden. Tanken är att sådana tidsasymmetriska processer skulle styra universums utveckling i en bestämd riktning och även ha en indirekt påverkan (via sammanknytningen av den svaga och den elektromagnetiska kraften) på de krafter som bestämmer atomära och molekylära förlopp. Detsamma gäller gravitationen. Med nuvarande tidsriktning leder den till bildandet av svarta hål, medan motsatsen skulle vara en tid som går baklänges med en utströmning av materia ur ”vita hål”. Men så länge gravitationsteorin inte har kunnat inkluderas på ett konsistent sätt i kvantmekaniken kan man knappast yttra sig om dess inverkan på de enskilda atomära händelser som intresserar oss här.

Kvantmekaniskt

Vi betraktar först hur ett kvantmekaniskt tillstånd kan förändras genom yttre störningar. Ett standardexempel är NH_3 -molekylen (som jag diskuterar i en tidigare artikel i Kosmos 2017). N-atomens läge på båda sidor om H_3 -kedjan är likvärdiga och i en förtunnad gas beskrivs molekylen med hjälp av superpositionen,

$$|\Psi_{g,e}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|a\rangle \pm |b\rangle) \quad .$$

Den har ett grundtillstånd g (motsvarande + tecknet) och ett exciterat tillstånd e (– tecknet) och den kan exciteras av radiovågor vid frekvensen 24 GHz, vilket motsvarar den s.k. tunnelsplittringen mellan g - och e -tillstånden. Denna signal försvinner om tillståndet reduceras så att N-atomerna endast sitter på en av sidorna, dvs. till $|a\rangle$ eller $|b\rangle$. Det är känt att detta börjar ske när gastrycket ökas till ca en halv atmosfär.

I ett grundläggande arbete 1985 utredde Joos och Zeh hur fasfaktorer ϕ ($= \pm\pi$ ovan) i en kvantmekanisk superposition successivt suddas ut då ett system med utsträckning $|x-x'|$ utsätts för ν stötar per sekund från en slumpmässigt varierande ström av partiklar (kan också vara fotoner) som infaller med impulsen $\mathbf{p}_i = \hbar\mathbf{k}_i$. Deras våglängd $\lambda = 2\pi/k$ antogs vara mycket större än avståndet $|x-x'|$. För oelastisk spridning med impulsöverföringen $\Delta\mathbf{k}_i = \Delta\mathbf{p}_i/\hbar$ fick de då ett fasskift $\Delta\phi = \mathbf{k}_i \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}')$ mellan rekylerna från punkterna x och x' . Efter ett antal ν av slumpmässiga träffar suddas fasrelationerna mellan de vågfunktioner som representerar lägena x och x' ut (på samma sätt som vid beräkningar på ”*motional narrowing*” i NMR eller vid andra slumpvandringar). Joos och Zeh kunde uttrycka denna koherenstid (oftast kallad dekoherenstid som

$$\tau_{\text{coh}} = \frac{1}{\nu k^2 |\mathbf{x} - \mathbf{x}'|^2} \quad . \quad (1)$$

De uppskattade typiska dekoherenstider för ett antal olika kombinationer av kvantobjekt av olika storlek som utsätts för olika störande omgivningar. För makroskopiska objekt blir tiderna extremt korta, t.ex. 10^{-36} s för ett dammkorn på 10^{-3} cm i luft vid NPT (men också 10^{-30} s för en stor molekyl på 10^{-6} cm = 100 Å). I ett laboratorievakuum på 10^6 partiklar per cm^3 förväntas samma molekyl däremot bevara sin inre koherens upp i attosekundsområdet, 10^{-17} s. För det aktuella fallet med NH_3 -molekylen kan man ur formeln för stöttalet:

$$\nu = \frac{\sqrt{2}\pi d^2 v_{\text{av}} N_A \rho}{M},$$

N-atomens tunnelavstånd $d = |x - x'| = 0,8 \text{ \AA}$, M molmassan.

$$k = \frac{M m_p v_{\text{av}}}{\hbar}$$

och $\rho_{\text{NTP}} = p/RT$ beräkna τ_{coh} vid olika gastryck p . När p ökar till 0,5 at kan man inte längre observera resonansen, eftersom τ_{coh} då blir mindre än 10^{10} s, vilket är kortare än tidsavståndet $2\pi/\omega$ mellan vågtopparna i 24 MHz-strålningen.

I en allmännare beskrivning uttrycker man även den störande omgivningen kvantmekaniskt. Det aktuella systemet S tänks då först vara inbäddat i en närmaste omgivning O_1 som den växelverkar med så att vågfunktionen för systemet $S + O_1$ blir sammansatt av en summa över termer $[c_n(S) c_{m1}(O_1) |S_n\rangle |(O_1)_{m1}\rangle]$.

Mätning är en händelse som förändrar tillståndet hos ett system. Vid en mätning på S reduceras vågfunktionen $\sum_n c_n(S) |S_n\rangle$ till något av tillstånden $|s_n\rangle$ men ett fasminne $\Delta\phi$ finns kvar mellan två tillstånd $|s_n\rangle$ och $|s'_n\rangle$ i den totala vågfunktion som beskriver $S + O_1$. Om man sedan tänker sig att $S + O_1$ sin tur växelverkar vidare med N utanför liggande omgivningar $O_1, O_2, O_3 \dots O_N$ måste man generalisera till en summa över termer av typen

$$c_n(S) c_{m1}(O_1) c_{m2}(O_2) \dots c_{mN}(O_N) \times \\ |S_n\rangle |(O_1)_{m1}\rangle \dots |(O_N)_{mN}\rangle \quad .$$

I Joos och Zehs exempel med de slumpmässiga kollisionerna verkande på systemet S kan var och en av de spridda partiklarna i störningen O_i beskrivas med sin speciella utgående vågfunktion $|O_i\rangle_{mi} = |\exp(i\mathbf{k}'_i \cdot \mathbf{r}_i) \exp(-i\omega t + \phi_i)\rangle$, karakteriserad av partikelns utgående impuls \mathbf{k}'_i , vinkelfrekvens ω och fas ϕ_i . För låga värden på N (t.ex. $N = 2$) kommer fasskillnaden mellan två tillstånd $|s_n\rangle$ och $|s'_n\rangle$ då och då att tillfälligt återbildas, men man inser att i och med att N blir större kommer tiden mellan sådana ”återkomster” (kallade *Poincaré recurrences*) att öka dramatiskt, nämligen proportionellt mot $N!$ (fakulteten av N). Den temporära vågfunktionsreduktion som man sett i systemet S upplevs då som permanent trots att det (fullt enligt kvantmekanikens regler) aldrig skett någon kollaps och att den information som finns i den

kvantmekaniska faser aldrig gått förlorad. Men man har uppskattat att om alla omgivningars omgivningar ($O_2 + O_3 + \dots$) på detta sätt kopplas på så hinner en sådan plötslig ”hågkomst” knappast att inträffa under vårt universums hela existens.

Detta är dekoherensteorins förklaring till ”tidens pil”. Den gäller utan tvivel för makroskopiska system, men även för mikroskopiska objekt som står i växelverkan med komplicerade omgivningar. Vågfunktioners reduktion gör att saker faktiskt händer och att det som har hänt blir oåterkalleligt. Här kan man spåra ett släktskap mellan kvantmekanikens tidspil och den klassiska fysikens: båda bygger på att det är statistiskt omöjligt att återgå till det ursprungliga läget. Men man kan notera att kvantmekanikens tillstånd förändras flera storleksordningar snabbare än de utbyten mellan olika termiska bad som bestämmer den termodynamiska tiden. Det bör tilläggas att jag här har valt att framhålla dekoherensteorins förklaring till tidens asymmetri, även om inte alla anser den som riktigt heltäckande. Den har fördelen att hålla sig inom kvantmekanikens grundläggande ramar och jag kommer att illustrera dess roll längre fram i texten.

För små och mycket väl isolerade kvantmekaniska system kan tiden mellan händelser som förändrar ett tillstånd bli relativt lång mellan störningarna. Även för en molekyl med 100 Å utsträckning uppskattar man enligt Joos och Zehs tabeller att den interna koherensen — och därmed i princip reversibiliteten — kvarstår ca 10^{-17} s om den är placerad i vanligt laboratorievakuum. Kan man då säga att tiden, ur molekylens lokala perspektiv, står stilla under denna tid? Aristoteles skulle ha nickat ja. För honom gick inte tiden om ingenting förändrades. Men om man betraktar tiden globalt, ur hela det stora öppna systemets perspektiv, blir stegen mellan händelserna täta och förändringarna praktiskt taget kontinuerliga.

Schrödingers orelativistiska tidsberoende vågekvation innehåller, i analogi med Newtons ekvationer, ett tidsberoende som är uttryckt i en fasfaktor $\exp[-i(E_0/\hbar)t]$. Om ingenting händer utvecklas ekvationen ”unitärt” med tiden och reversibiliteten fortsätter att gälla. Enbart ett fasskift leder inte till någon egentlig tillståndsförändring, men en excitation till ett högre energitillstånd E_1 gör det svårare att återkomma till utgångsläget, särskilt om det, i sin tur, leder till förändringar i omgivningen. För små, väl isolerade system har man manipulerat kvanttillstånden i så kallade ”icke-

förstörande- experiment” (*quantum non-demolition*), vilka Vladimir Braginsky introducerade 1995. I dem hindrar man aktivt att ett egentillstånd $|s_n\rangle$ förändras på grund av fluktuationer i omgivningen genom en ständig upprepning av mätningar på detsamma. Men om man betraktar systemet plus dess omgivande styrsystem så händer det ändå något under tiden, som gör att man inte är kvar vid det ursprungliga läget.

Inom vilka tidsområden kan man då se hur kvantmekaniska tillstånd förändras? I experiment på Rydbergatomer (atomer som exciterats till tillstånd med mycket höga kvanttal) har Haroche och medarbetare undersökt hur snabbt störningarna sker. Den närmaste omgivningen utgörs här av ett mindre antal fotoner (< 10) som är instängda i samma optiska fälla som atomerna. Koherensen hos rydbergatomerna bevaras relativt länge och förstörs först inom mikrosekundsområdet (10^{-6} s).

I starkare störande omgivningar sker tillståndsförändringarna mycket snabbare, men under speciella omständigheter har det gått att mäta dekoherensprocesser ända ner i attosekundsområdet. När s.k. epitermiska neutroner (med energier i eV-området) sprids mot protoner sker en Comptonprocess där neutronen för över en impuls q till protonen, som rekylar. Processens tid är kort; den begränsas av den breda fördelningen av rörelsemängden p i protonens nollpunktsrörelse som gör att neutronvågens koherens dör ut efter den s.k. spridningstiden $\tau_{sc} = m_p \hbar / q \Delta p$, (protonens impuls Δp är typiskt fördelad över ca 3 \AA^{-1} med impulsen mätt i enheten $\text{\AA}^{-1} = 1,054 \times 10^{-24} \text{ kgm/s}$). Genom att ändra inkommande neutronenergi — och därmed q — kan man välja ut spridningstider och därmed observationstider i intervallet 0,2–3 fs (10^{-15} s) för att kunna följa hur kvanttillstånd förändras.

Det intressanta när det gäller kvantmekaniken, tiden och dekoherensen, framstår här när man väljer koherensvolymen för spridningen så att varje neutron ”ser” två protoner. De två protonerna blir kvantmekaniskt sammanflätade under växelverkanstiden och det uppträder interferenser i den neutronvåg som sprids från dem. Dessa är destruktiva på grund av protonernas nollpunktsvibrationer och gör att sannolikheten för spridningen reduceras. Denna s.k. protonanomali i tvärsnittet är stor (ca 40 %), men dock inte oberoende av q (dvs. spridningsvinkeln θ), vilket man i första hand skulle vänta sig. Under den korta observationstiden hinner nämligen två-proton-systemet också växelverka med den

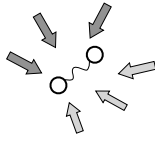
närmaste omgivning som att protoners sammanflätning, och därmed anomalin, suddas ut gradvis när observationstiderna τ_{sc} ökar. Förloppet styrs av dekoherenstiden τ_{coh} i ekvation 1 och i experiment på protonpar i olika omgivningar har man kunnat jämföra data med förutsägelser från Joos-Zeh-ekvationen. För protonpar i vatten är dekoherensen τ_{coh} mer än tio gånger långsammare än för protoner i metallhydrid där τ_{coh} är ca 1 fs (10^{-15} s). Det senare förklaras genom protonernas starka koppling till metallens elektroner. Dessa experiment illustreras i figur 2. För deuteroner sker en störning redan före 0,1 fs, förmodligen på grund av starka rekyleffekter när den tyngre partikeln lämnar sin position.

Ännu längre ner i attosekundsområdet (vid ca 10 as) ligger de transienta elektronprocesser som uppträder i närvaron av starka laserpulser och som beskrivs av Marcus Dalström och Eva Lindroth i detta nummer av Kosmos.

I andra experiment utförs s.k. ”*entanglement swapping*”, där två kvantmekaniskt sammanflätade partiklar återgår (genom påverkan av en yttre signal) till ursprungstillståndet, medan ett par andra i stället flätas samman, något som numera utförs rutinmässigt i kvantoptiska experiment och i kvantdatorer. Detta förutsätter emellertid att tidsskalan för ingreppen ligger inom koherenstiden, $\tau_{control} < \tau_{coh}$. Dagens gränser för $\tau_{control}$ ligger inom fs-området men kan komma att närma sig attosekundsområdet, vilket skulle medge kontrollerade manipulationer inom större system, kanske t.o.m. biomolekyler där koherenstiden är kortare. Sådana fördröjningar av händelser och återskapande av tillstånd är också av intresse i diskussioner om ”tidens gång”.

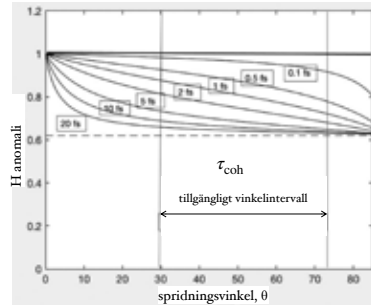
Om prediktion och retrodiktion i kvantmekaniken

I ovanstående exempel illustrerades hur lokala händelser (dvs. förändringar i kvanttillstånd) induceras efter en viss tid på grund av yttre påverkan. Kan man då också förutse kommande händelser (göra prediktioner) eller t.o.m. spåra händelser som skett i förflutna tid (retrodiktion) med utgångspunkt från kvantmekaniska egenskaper observerade vid en viss given tidpunkt? James B. Hartle är en av dem som undersökt hur långt detta är möjligt. Han har använt det schema för ”konsistenta kvanthistorier” som utvecklats av Omnès och Griffiths (se Kosmos 2017), där varje lokal ändring i ett system ger upphov till ett antal logiskt sammanhängande nya möjligheter. Han påpekar att retrodiktion i kvantmekaniken krä-

Störande omgivning

Joos-Zeh:

$$\tau_{\text{coh}} = \frac{1}{\nu k_0^2 (x-x')^2}$$

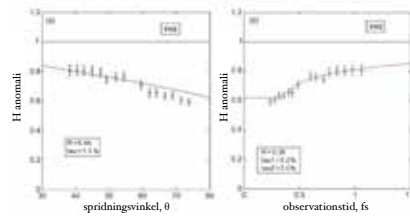
Protonpari H_2O : $\tau_{\text{coh}} = 13 \pm 5$ fs

(vätebindningsfluktuationer)

$$\sigma/\sigma_{\text{H}} = 0,6$$

(nästan oberoende av θ för $\theta > 30^\circ$)i YH_3 : $\tau_{\text{coh}} = 1,5$ fs

(stark koppling till metallens elektroner)

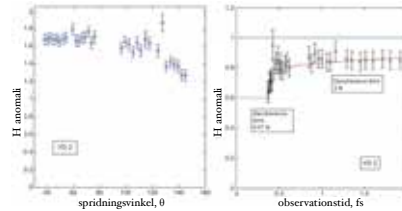
Deutronpari YD_2 :

$$\tau_{\text{coh}}(1) = 0,1$$
 fs

(rekyleffekt)

$$+ \tau_{\text{coh}}(2) = 3$$
 fs

(elektronkoppling)



Figur 2: Observation av kvantmekaniska tillståndändringar under korta tidsperioder med utgångspunkt från neutronspridning (baserad på *Adv. Quantum Chem.* **89**, 1 [2024]).

ver en kännedom om begynnelsestillstånd förutom de nuvarande och att även om detta skulle vara uppfyllt får man fram ett stort antal ömsesidigt inkompatibla historier, varav många upphör att gälla allteftersom nya data samlas in. Hartles slutsats är nej; kvantmekanisk retrodiktion är inte möjlig, även om en blick bakåt kan främja möjligheterna till en viss prediktion av närmast kommande händelser.

Hur mäter man egentligen tid?

Innan vi går vidare är det viktigt att påpeka att tid inte kan mätas i absolut mening; det är endast intervall mellan två händelser som kan mätas. Detta gäller för alla vanliga klockor, liksom i atomfysiken där man registrerar tidsavståndet mellan start- och stopp-pulser från olika detektorer. Tidsskalan bestäms av något väl definierat regelbundet fenomen, numera en atomär svängning inom det infraröda eller det optiska området. Man måste därför inse att den löpande tiden i Newtons ekvationer är en matematisk konstruktion som är oåtkomlig för direkt observation. Dess värde måste alltid härledas efter observationer och beräkningar med utgångspunkt från referensen. Tiden man mäter är relationell snarare än absolut (vilket redan Aristoteles insåg när han skrev att ”rörelsen bestämmer tiden”).

Direkt efter det att Newton hade formulerat sambanden mellan de verkande krafterna och rörelsernas dynamik i sina ekvationer, protesterade hans medtävlare Leibnitz mot Newtons absoluta tidsbegrepp. Han ansåg att tiden bara var ett sätt att ordna tingen och inte någon självständig storhet. Men eftersom Newtons rörelselagar öppnade vägen för exakta beräkningar inom astronomi och mekanik blev dennes linjära tidsberoende och hans sätt att se på tiden accepterade och ingick snart i all utbildning. Vi återkommer senare till Newtons formulering av tidsberoendet i sammanhang med diskussionerna om tidens början.

Många av antikens och medeltidens filosofer ansåg att de verkande krafterna var själva orsaken till tidens gång. I sådana ”kausala” tidsteorier är den bakomliggande tanken denna: för att tiden skall gå måste något hända och det behövs en orsak till händelsen. Men i och med att Newton formulerat sina ekvationer för hur rörelsernas förändring med tiden hänger ihop med de verkande krafterna började man se de kausala tidsteorierna i ett annat ljus. I Newtons ekvationer är tiden en löpande parameter och då blir ju krafterna orsaken till att händelser uppträder, snarare än till att tiden går. Men många framhåller fortfarande kausalitetens direkta roll i tidssammanhang, t.ex. som orsaken till att olika händelser sker i en bestämd följd eller som i Wheeler-DeWitts ekvationer — som nämns här senare — där olika storheter relateras till varandra utan att tiden ingår explicit.

Tiden i relativitetsteorin

Rumtiden i speciella relativitetsteorin

Våra invanda tidsbegrepp ställs inför problem då man kommer till relativitetsteorin. Den newtonska fysiken förutsätter att det finns ett absolut rum och en absolut tid, där en händelse kan placeras på en bestämd punkt på en skala. Men i samband med frågan om rörelser relativt den förmodade ”etern”, blev det aktuellt kring sekelskiftet 1800/1900 att jämföra beskrivningar i olika referenssystem som rörde sig relativt varandra. Ett viktigt villkor var då att symmetrierna i elektromagnetismens lagar alltid bör bevaras i transformationer mellan dessa referenssystem.

I *inertialsystem* rör sig dessa med konstant hastighet relativt varandra och Hendrik Lorenz formulerade 1904 (inspirerad av tidigare arbeten av Poincaré beträffande ljushastigheten) de s.k. Lorenz-transformationerna för övergångar mellan koordinater i sådana system. De ledde till en rad oväntade konsekvenser: Observatörer som rör sig med olika hastigheter kan se sig mäta olika relativa avstånd (kontraktion) och deras tid kan förlängas (dilatation). Vissa av dem kan t.o.m. uppleva att händelser uppträder i omvänd ordning när de ses ur olika rumsperspektiv. Beroende på hastigheten (och den riktning som en viss observatör rör sig med) kommer han att placera en viss händelse på sin tidsskala på sitt eget individuella sätt. Hur skall man då vara överens om vad som är Dåtids, Nutid och Framtid?

Nästa steg togs 1904 av Hermann Minkowski, som introducerade den fyrdimensionella rum-tiden. En händelse som inträffar på en viss plats vid en viss tid representeras av fyra koordinater (x_i, y_i, z_i, t_i) , där t_i skiljer sig från rumskoordinaterna genom att de multipliceras med faktorn $-ic$. Minkowski kunde visa (även han inspirerad av tidigare verk av Poincaré) att alla de oberoende observatörerna då har ett gemensamt, nämligen ett generaliserat ”avstånd” Δs i rumtiden mellan två händelser, kallat rumtidsintervallet. Detta blir detsamma i deras olika koordinatsystem i , definierat av

$$(\Delta s_i)^2 = (c\Delta t_i)^2 - (\Delta x_i)^2 - (\Delta y_i)^2 - (\Delta z_i)^2 .$$

Det är alltså bara koordinatintervallen längs de individuella tidsaxlarna tagna var för sig som är relativa i relativitetsteorin; sett i hela Minkowskis rymd är två händelser väl definierade relativt varandra. För varje enskild observatör kallas avståndet på tidsska-

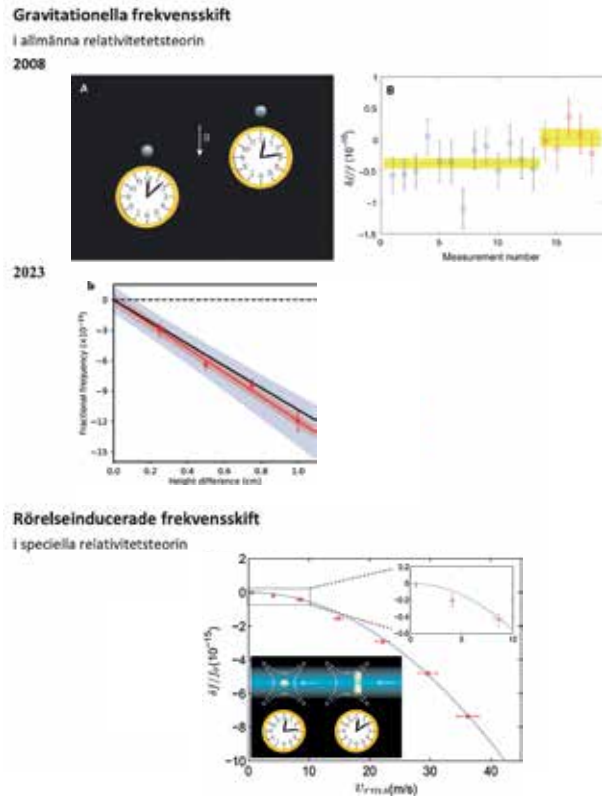
lan mellan händelserna för *egentiden* och serien av händelser blir en historia under vilken observatören säges följa en individuell *världslinje* i den fyrdimensionella rymden. För olika observatörer kan man inte längre tala om *samtidighet* eller att något händer Nu, eftersom projektionen på deras t_i -axlar är olika. Detta förhållande är svårt att förena med någon som helst objektiv föreställning om tidens regelbundna gång, men eftersom den bakomliggande relativitetsteorins riktighet har bekräftats i ett stort antal experiment (två exempel visas i figur 3) anser de flesta filosofer numera att den ”blocktid” som vi definierade tidigare ligger närmast tidens sanna natur. I blocktiden ”går” tiden inte. Men diskussioner pågår fortfarande och olika kompromisser har föreslagits eftersom föreställningen om tidens gång ligger djupt rotad i människors medvetande.

Rumtiden i allmänna relativitetsteorin

När Albert Einstein formulerade sin speciella relativitetsteori 1905 hade han en väl förberedd grund i den formalism som skapats av Lorentz och Minkowski, men de formella svårigheterna blev betydande när han försökte generalisera sin teori till att gälla koordinatsystem som accelererar relativt varandra. Först 1915 hade han med hjälp av Riemann-geometrin, samt arbeten av Hilbert, Grossman och sin vän matematikern Michele Besso, helt lyckats med detta och därmed kunnat inkludera inverkan av gravitationen. I alla accelererade system (som även omfattar de roterande) blir rumtidens koordinatsystem ”krökta” och partiklarnas banor längre.

Ju mer krökta banor, dvs. ju närmare jordytan man befinner sig, desto lägre blir en klockas frekvens enligt formeln $\Delta f/f = g\Delta h/c^2$, där Δh är höjdskillnaden mellan mätpunkterna. Den högre klockan har högre frekvens och går fortare än den lägre. Dessa skift kan nu mätas med mycket hög precision med hjälp av optiska klockor, en utveckling som gått mycket fort framåt de senaste åren. Med den övre bilden i figur 3 visade Wineland och medarbetare år 2008 att det var möjligt att påvisa gravitationseffekter i ett ”*table-top*” experiment och femton år senare ser man skillnader i klockfrekvensen på $1:10^{19}$ per mm (undre bilden). Den svarta linjen är den allmänna relativitetsteorins förutsägelse.

Längst ner i figur 3 visas också ett annat av Winelandgruppens experiment från 2008. Här ses den tidsdilatation som orsakas av att den ena klockan fått röra sig med medelhastigheten v ,



Figur 3: Gravitationella och rörelseinducerade frekvensskift (översta och understa bilden från *Science* **329**, 1630 [2008]), mellanbilden från *Nat. Commun.* **14**, 4886 [2023]).

medan jämförelseklockan var stillastående. Vid låga hastigheter ($v = 0\text{--}40$ m/s) kan den speciella relativitetsteorins frekvensskift approximeras som

$$\frac{\Delta f}{f} = (1 - v^2/c^2)^{1/2} - 1 = -\frac{v^2}{(2c^2)},$$

vilket verifierades med god noggrannhet inom $1:10^{15}$ området. Klockan som rör sig går saktare.

I kosmologiska teorier rör man sig med helt andra hastigheter och gravitationsfält. I extremfallet blir krökningen av rumtiden så stark att man inte längre kan föreställa sig en separat tid. Detta sker vid Plancktiden, dvs. $5,39 \times 10^{-44}$ s, en tid som ofta framhållits som det kortast tänkbara tidsintervallet.

Kan man rent av tänka sig att rum-tiden inte är kontinuerlig på de minsta skalorna utan består av minsta steg (i Zenons anda) och vad skulle detta få för konsekvenser? Detta har studerats av matematikern Alain Connes. Vid första betraktelsen strider en sådan rumslik diskretisering mot den invarianslag för rotation som ligger bakom rörelsemängdsmomentets bevarande, men Connes ersätter de vanliga koordinaterna, som är reella tal, med komplexa tal med vissa icke-kommunikativa egenskaper och visar att om man sedan går över till vår större, överblickbara skala återfås alla det vanliga rummets egenskaper. Man kan alltså rent teoretiskt tänka sig att det finns en underliggande diskret struktur, som suddas ut, liksom av ett skum, när vi ser på den i större skala. Detta gäller även tiden.

Tidens början

En av de frågor vi ställde oss i inledningen var ”Har tiden en början och ett slut?” En vanlig föreställning är att tiden började just under Stora Smällen, *Big Bang*, och att den möjligen kommer att ta slut i den Stora Kraschen, *Big Crunch*. I de enklaste modellerna fortsätter den direkt efter $t = 0$ som en löpande parameter så som den framträder i Newtons ekvationer.

Men om man betänker att tidsintervall mellan olika händelser är det enda man egentligen kan observera kommer saken i ett annat läge. Man måste då fundera över om händelser under de extrema förhållanden som rådde vid universums födelse verkligen skedde vid en väldefinierad tidpunkt; kanske händelserna då var så utsuddade i tiden att deras ordning blandades och tiden förlorade sin mening. I två, delvis liknande scenarios, har Carlo Rovelli i *Om tiden inte finns* och Thomas Herzog i *Om tidens uppkomst* diskuterat processer som i början inte kan beskrivas i termer av tid men som i längden ändå kan leda till en utveckling mot en mera väldefinierad sådan.

Rovelli utgår från de ekvationer som ställts upp för att försöka att förena den allmänna relativitetsteorin med kvantmekaniken (sådana teorier för kvantgravitation är redan väl utvecklade, men saknar ännu experimentellt stöd). För små, elementära system av växelverkande partiklar väntar man sig en stor spridning i rörelseparametrar under de villkor som man förväntar sig i Begynnelsen, både på grund av klassisk slumpmässighet och på kvantmekanisk

nollpunktsvibration. Man kan då inte tala om ”tid” förrän man betraktar större system och låter deras utveckling fortskrida.

Ett sådant tidlöst tillstånd avspeglas också i de s.k. Wheeler-DeWitt-ekvationerna som ställdes upp redan 1967. Dessa innehåller inte tiden explicit, men förutsäger ändå händelser som kan inträffa när partiklar eller fält påverkar varandra med kända krafter. Sammanhangen ligger i stället gömda i kvantmekaniska fasfaktorer och olika tvångsvillkor.

Herzogs bild av tidens ursprung bygger på de teorier han utvecklade tillsammans med Stephen Hawking strax före dennes bortgång. Eftersom teorier baserade på en enda unik rumtid visat sig leda till en evig inflation av universum föreslås här en start baserad på en superposition av rumtider, vilket gör tidsbegreppet obestämt initialt. Med införande av en extra rumsdimension i en holografisk bild enligt Maldacena kan kvant- och gravitationsaspekterna förenas, en bild som också kan ge en förklaring till ”informationsparadoxen”, dvs. varför informationen inte försvinner när Hawkingstrålning utsänds från svarta hål. En enhetlig rumtid uppträder inte i denna bild förrän universum har utvecklats under längre tid.

I både Rovellis och Herzogs teorier är tiden en ”emergerande” storhet, dvs. en av de oväntade men definierbara storheter som kan dyka upp spontant när små enkla system sammansätts till stora sådana. Sådana egenskaper kan inte förutsägas ur de enklaste systemens egenskaper även om man känner dessa i detalj. I Herzogs bok går man ett steg längre och tänker sig att inte heller gravitationen kanske fanns primärt utan separerades ut som en särskild kraft när rumtiden stabiliserade sig. Det spekuleras vidare om att även fysikaliska lagar, som t.ex. Newtons (som ju inte kan härledas från reduktionistiska principer) kan ha evolverats fram ur begynnelsens oreda på ett darwinistiskt sätt och slutligen resulterat i ett stabilt och ordnat universum. Liknande tankar har också utvecklats av teoretikern Lee Smolin i boken *Time reborn*.

Avslutning

Kort sammanfattning

Att skriva om tidens natur är nästan en övermänsklig uppgift. Som vi hört tvekade redan Augustinus inför detta. Det berör djupa filosofiska frågor om vad som kan sägas existera, hur vi definierar tid i olika sammanhang och hur tid kan ses ur olika perspektiv. För

en fysiker är det viktigt att gå till botten med hur tid mäts och hur tiden kommer in i fysikens viktigaste ekvationer.

I det föregående har jag försökt skildra hur den tidsskala som vi kan överblicka krympt från nanosekunder till attosekunder under min tid som fysiker, hur kvantmekanikens sätt att förklara asymmetrin hos tiden kan förenas med termodynamikens statistiska synsätt, hur relativitetsteorin förändrat vårt sätt att se på tiden och hur olika teoretiker ser på tidens utveckling vid universums begynnelse. Utgångspunkten har varit att tider alltid mäts relativt någon referens och tidsskalan är oberoende av det som händer. Min presentation liknar därmed blocktidens synsätt mer än presentismens, men man skall komma ihåg att när man behandlar tidens natur blir alla framställningar mer eller mindre personliga och det är långt ifrån alla som företräder denna bild.

Är tidens gång en illusion?

I blocktiden tänker man sig att både det som hänt *Tidigare* och det som händer *Nu* läggs ut längs en tidsaxel på lika villkor, med de *Senare* kommande händelserna väntande på sin placering. Tiden själv har inget minne. Att man tycker att tiden går blir för blocktidensanhängaren en illusion som uppstår i människors medvetande.

Det finns goda anledningar till att en sådan illusion har skapats. Vi behöver kunna jämföra det som händer *Nu* med vad som hänt strax innan och vi behöver göra oss en föreställning om vad som kommer att hända i nästa steg. Om vi omedelbart skulle glömma det föregående, skulle vi aldrig kunna njuta av klangföljden i en melodi, kunna tyda ett morsemeddelande eller reagera för den ökande risken för brand när oset från spisen ökar. Men det fordras en fin balans mellan hur mycket och hur länge ett minne kvarstår i vårt medvetande (den s.k. retentionen) och hur mycket man måste glömma för att undvika överbelastning och bereda plats för nytt. Långt före oss har Augustinus, Kant, Husserl och andra tänkt i dessa banor och Marcel Proust har illustrerat hur han upplevt världen i *På spaning efter den tid som flytt*. Den moderna neurovetenskapen hjälper oss nu, åtminstone till en viss del, att förstå hur vi hanterar flöden av händelser. Synapserna i neuronätverken aktiveras inom några hundradels sekunder, minnesbilder skapas genom träning av neuronätverk och under sömnen rensas mycket onödigt bort. Den senaste forskningen har visat att hjärnan bearbetar endast en liten bråkdel av det som tas in från våra sinnen; i stället dominerar utgående signaler med jämförelsematerial från

hjärnan för att man snabbt skall kunna reagera om något yttre har ändrats. Men mycket återstår förvisso innan vi får en fullständig beskrivning av vår upplevelse av hur tiden går.

Jag vill avsluta med ett tack till professor Lars-Göran Johansson i Uppsala för diskussioner av de filosofiska aspekterna på tidsbegreppet och för flera förslag till förbättringar i texten. ❖

Vidare läsning

- Chou, C.W., Hume, D.B., Rosenband, T. & Wineland, D.J. (2010). Optical Clocks and Relativity. *Science*, 329, 174–182.
- Einstein, A. (2017). *Den speciella och allmänna relativitetsteorin* (J. Retzleff, övers., 2:a uppl.). Daidalos. (Originalutgåva publicerad 1920)
- Heavner, T.P., Donley, E.A., Levi, F., Costanzo, G., Parker, T.E., Shirley, J.H., Ashby, N., Barlow, S. & Jefferts, S.R. (2014). First accuracy evaluation of NIST-F2. *Metrologia*, 51, 1630.
- Herzog, T. (2023). *Om tidens uppkomst*. Fri Tanke.
- Joos, E. & Zeh, H.D. (1985). The emergence of classical properties through interaction with the environment. *Z. Phys. B*, 59, 223–243.
- Karlsson, E.B. & Brändas, E. (1998). Nobel Symposium “Modern Studies of Basic Quantum Concepts and Phenomena” [Monografi]. *Physica Scripta*, T76.
- Karlsson, E.B. (2017). Mätproblemet, *Kosmos 2017*, 98–120.
- Karlsson, E.B. (2024). Specific quantum effects in low energy neutron scattering from protons. *Adv. Quant. Chem.*, 89, 1–59.

- Rovelli, C. (2017). *Om tiden inte finns*. Norstedts.
- Smolin, L. (2013). *Time reborn*. Mariner Books.
- Stanford Encyclopedia of Philosophy (2020). *Time*.
<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC116795>.
- Vismarra, F. et al. (2024). Few-femtosecond electron transfer dynamics in photoionized donor- π -acceptor molecules. *Nature Chemistry*, 16, 2017.
- Zelan, M. (2020). Optisk tid – en pågående revolution inom tidmätning, *Kosmos 2020*, 133–146.
- Zheng, X., Dolde, J., Cambria, M.C., Lim, H.M. & Kolkowitz, S. (2023). A lab-based test of the gravitational redshift with a miniature clock network. *Nature Communication*, 14, 4886.

