

Ett tjugohundratalersperspektiv som underlag för kurser i elementär fysik

Lorenzo J Curtis

Sammanfattning

Mycket arbete har under många år ägnats åt att reformera undervisningen i fysik. Detta har lett till många nya och fantasifulla framställningar av innehållet och produktionen av material. Stora framsteg har gjorts och innehållet har kontinuerligt kompletterats. Men försök att modernisera den grundläggande strukturen i materialet har mött motstånd, och majoriteten av läroböckerna i grundläggande fysik har idag en allmän struktur som har förändrats mycket lite under de senaste 60 åren. Således, i jämförelse med biologi, kemi, geologi och så vidare, är fysiken unik genom att de inledande kurserna inte ger en översikt av områdets aktuella status. I ett försök att kringgå detta problem på ett lätthanterligt sätt har vi utvecklat en kvalitativ "ända-fram"-kurs utformad för att skapa ett 21:a århundradets perspektiv, som kan bäddas in i början av en inledande standardsekvens av fysikkurser.

1. Inledning

Under det senaste halvsekle har mycket arbete lagts ned på att reformera undervisningen av inledande fysik. Samordnade insatser har gjorts, t.ex. i ett Public School Science Curriculum (PSSC) [1], Feynman Lectures [2], Berkeley Physics Laboratory [3], Introductory University Physics Project (IUPP) [4], National Task Force on Undergraduate Physics [5], International Commission on Physics Education for the International Union of Pure and applied Physics (IUPAP • ICPE) [6], Physics Division of the European Physical Society (EPS • PED) [7] och på många andra ställen. Dessa ansträngningar har lett till många nya och fantasifulla metoder för framställningen av material och innehåll. Men trots många försök att ändra den grundläggande strukturen i presentationen har idag nästan alla populära inledande läroböcker i fysik en struktur som har förändrats lite sedan 1950-talet. Templin [8] har analyserat orsakerna till att strukturen i läroböckerna som publicerades i slutet av andra världskriget har fortsatt att dominera undervisningen i inledande fysik, och varför den har varit så motståndskraftig mot försök

till genomgripande översyn. Om denna struktur och dess motståndskraft uppgav Templin:

Detta utgjorde en heterogen samling av till synes skilda ämnen, nämligen mekanik, värme, ljud, ljus, elektricitet och magnetism, alla med sin egen uppsättning lagar. Ett viktigt mål för fysiker genom större delen av förra århundradet var att försöka förena dessa till synes skilda områden genom att visa att de alla var mekaniska till sin natur. Detta program var inte helt lyckat.

Strukturen tenderar att följa kronologin av de historiska upptäckterna, med 1700-talets mekanik följd av 1800-talets elektrodynamik, ljus, värme och ljud. Framgångsrika försök att delvis modernisera presentationen har gjorts genom att föra in modern fysik som sidofält på olika punkter i läroböcker i enlighet med den traditionella kursens struktur, och genom att lägga ett extra avsnitt i slutet av kursen som beskriver avgörande experiment som fört till en sammanslagning av dessa till synes skilda ämnen. Även om många försök gjorts att utveckla läroböcker med en radikal omändring av den grundläggande strukturen var deras användning kortlivad. Holcomb [9] har noterat följande:

Den nuvarande standardkursplanen återspeglar en världsbild från 1950-talet. Även om standardmodellen har uppdaterats, har det skett genom att nya ämnen helt enkelt draperats över det befintliga skelettet. Denna "klassiska" (ett ord med liten betydelse för dagens fysikstudenter) struktur har i många fall lämnats orörd av evolutionära sätt att tänka om fysikens innehåll eller om fysikundervisning, som har utvecklats under de senaste 60 eller 70 åren... Majoriteten av arbetena inom PER (Physics Education Research) accepterar stillatigande den nuvarande modellen och fokuserar istället på bättre sätt att undervisa inom ramarna för status quo.

Som detta uttalande betonar går kritiken inte ut på att den nuvarande läroplanen i fysik inte innehåller tillräckligt många ämnen inom modern fysik. Problemet är istället att de förenande upptäckterna från 20:e seklet ännu inte har utnyttjats för att optimera och tydliggöra den pedagogiska strukturen i presentationen. Holcomb ger tre exempel på möjliga omstruktureringar: den atomära världen, styrkan hos bevarandelagar och exponentialfunktioner. I överensstämmelse med detta, upphöjde Feynman som det mest framträdande det "atomära faktum" i sitt ofta citerade uttalande [10]:

Om i någon katastrof all vetenskaplig kunskap skulle förstöras, och endast en mening föras vidare till kommande generationer av varelser, vilket uttalande skulle förmedla mest information i minst antal ord? Jag tror att det är den atomära hypotesen (eller det atomära faktum) att alla saker är gjorda av atomer – små

partiklar som befinner sig i evig rörelse, attraherar varandra på avstånd, men stöter bort varandra då de pressas ihop.

Om man accepterar Feynmans påstående att vår nuvarande vetenskapliga kunskap kan återupptäckas snabbt om man börjar med atomerna själva, borde inte då kunskapen upptäckas mer effektivt för första gången av studenterna själva med hjälp av det atomära faktum som en deduktiv utgångspunkt? En förklaring till varför det atomära faktumet förblev oredovisat så länge har givits av Dawkins [11]:

Men om fasta saker mest är tomrum, varför ser vi dem inte som tomma rum? ... Svaret ligger i vår egen evolution... Man tror kanske att våra sinnesorgan skulle formas för att ge oss en "sann" bild av världen som den "verkliga" är. Det är säkrare att anta att de har formats för att ge oss en användbar bild av världen..., utformad för att ge förståelse för de vardagliga detaljerna och överlevnad på afrikanska savannen under stenåldern.

Det verkar uppenbart att vi nu lever i en teknologisk ålder där en "sann" bild av världen är mer användbar för överlevnad än falska illusioner inpräntade av våra sinnen.

Fysiken är unik bland vetenskapliga discipliner genom att den inledande kursen inte ger en översikt över det nuvarande tillståndet på fältet. Istället tillhandahåller den en kronologisk historia av åtgärder genom vilka först olika modeller föreslagits, som sedan genom användning av experimentella metoder visat sig vara ofullständiga. Förvisso har biologi, kemi, geologi och andra vetenskaper genomgått dramatiska nya upptäckter under 20:e seklet, men bara fysiken portionerar ut dem i kurser reserverade för specialister.

Det historiska förhållningssättet till undervisningen har kritiserats av psykologen Bradshaw [12]:

Den enda motiveringen för en historisk behandling är när man måste förklara hur saker och ting blev så trassliga. Många läroböcker introducerar ämnet genom historien. Varför? Därför att det finns ett starkt behov av att förklara hur saker och ting kom att bli så röriga och förvirrade, men människor som inte uppskattar historia kommer inte att förstå situationen.

Vissa delar av fysiken var röriga i slutet av 19:e seklet men blev klargjorda under det första kvartalet av 20:e seklet. Är det klokt att sprida en historisk röra och utesluta samtida klarhet?

Detta tillvägagångssätt med en induktiv "upptäcktsresa" är otillräckligt för att sätta samman en fullständig bild och gör att fysiken verkar bestå av ett stort antal osammanhängande bitar. Moderna begrepp läggs till en ofullständig bild som om de vore paradoxala. Man måste fråga sig om fysiken utgör en kunskapsbas som är användbar för alla bildade personer, eller om den

bara är en “forskningsmetod” som kan demonstreras nöjaktigt genom hänvisning till experiment av Galileo? Som Smolin har sagt [13]:

Inom alla (andra) områden träffar studenter på frågeställningar som är utmanande eftersom de är nya. Det faktum att vi lär ut 300-årig fysik som inledning till fysiken är bara skamligt.

Det historiska tillvägagångssättet ger förvisso insikter om den vetenskapliga forskningsmetodik, som fört oss till vår nuvarande kunskap om arten av den fysiska verkligheten. Men en liknande utveckling har skett som ett resultat av experimentella studier inom både den fysiska naturvetenskapen och samhällsvetenskapen. Endast fysiken offerar aktuell kunskap för att ge ett historiskt perspektiv på forskningsmetoden.

Feynmans parentetiska underrubrik i “den atomära hypotesen (eller atomära faktum)” var ett djärvt steg. Användningen av ordet “atomteorin” kan vara mycket vilseledande för allmänheten. Tack vare instrument såsom sveptunnelmikroskopet (STM) är atomers existens lika säkert påvisbar som existensen av månen, men vad som normalt avses med ordet “teori” är i detta sammanhang en beräkningsmodell. Atomens existens är ett faktum – kvantmekaniken är en teoretisk modell som kan användas för att beskriva detta faktum. Våra studenter möter få fakta som är så säkra som förekomsten av atomen. Det verkar vara riskfritt att införa några “kända fakta” som präglar vår nuvarande världsbild, förutsatt att de metoder genom vilka dessa “fakta” kom att accepteras diskuteras senare i kursen. Kanske borde vi beakta uppmaningen av BBC:s kultfigur Dr. Who [14], “First things first, but not necessarily in that order!”.

Erfarenheten visar tydligt att en modern deduktiv läroplansstruktur inte uppnås genom en störningsprocess, utan att endast en radikal omändring av den inledande fysiken kan åstadkomma detta resultat. Dessutom kan den växande balkaniseringen av de fysikaliska specialområdena hindra dess genomförande genom samförstånd inom hela discipliner. Även om målet uppnås kan en sådan revolutionerande förändring få oavsiktliga konsekvenser. Vårt nuvarande utbildningssystem drivs på alla nivåer genom standardiserade tester på de studerandes prestanda. Till exempel i USA omfattar programmet “No child left behind, American College Test (ACT), Scholastic Aptitude Test (SAT), Medical College Admissions Test (MCAT), Graduate Record Examination (GRE)” och “Advanced Placement (AP) testing”. Sådana tester är anpassade till den traditionella läroplanen och kan ge studenter som ”vet för mycket” en distinkt nackdel. Problemen till följd av dessa instrument har diskuterats av Tobias [15].

Eftersom erfarenheten visar att det är osannolikt att en fullständig omstrukturering av den inledande fysiken kan uppnås inom en snar framtid har vi försökt att utveckla en kort ”ändafram”-kurs, som beskriver det moderna fysiska perspektivet som ett accepterat faktum, och använder deduktion snarare än

induktion för att inpränta en enhetlig och sammanhållen modern världsbild. Denna kan sedan följas av en vanlig inledande fysiksekvens som fungerar som en ingång projicerad på ett nutida perspektiv. Ett antal läroböcker är tillgängliga (t.ex. [16, 17]), som strävar efter att införliva många moderna aspekter men att samtidigt behålla en mer konventionell kursplanstruktur.

2. Berättelser först, räkna senare

Lederman och Bardeen [18, 19] har gått i spetsen för en rörelse att placera “den första fysiken” inom gymnasieutbildningen [20]. Detta innebär en omkastning av den traditionella ordningen av kurser, så att fysiken kommer före kemi och biologin. Om den första fysikkursen avser att förbereda eleverna för 21:a århundradets kemi och biologi blir ett stort paradigmskifte i den inledande fysiken viktigt. Rigden [21] har konstaterat följande:

Förutom i sällsynta fall kommer fysikinstitutioner i kontakt med framtida nationella ledare endast genom inledande fysikkurser. Dessa ekvationsbaserade kurser kan inte, enligt min bedömning, betraktas som en naturvetenskaplig utbildning. Jag anser att värdet av en inledande fysikkurs, sex månader efter examen, är försumbart. Specifikt vågar jag påstå, att vuxna som en gång tagit en algebra- eller kalkylbaserad inledande fysikkurs är oförmögna att diskutera vanliga fysikaliska fenomen, och att de inte uppvisar en bättre förståelse för grundläggande fysikaliska begrepp än de vuxna som aldrig ens sett insidan av ett klassrum för fysik.

Likaså har Carroll [22] föreslagit:

Vad vi behöver göra är att hitta ett nytt sätt att lära ut andan i fysiken. Vad vi gör nu är att späda ut det som professionella fysiker sysslar med och gör ämnet till en torr pussellösning med lite bilder på remskivor och sådant. Vi borde lära eleverna mer om ”Big Bang”, entropi och partiklar. Varje gymnasiestudent bör veta att allt är gjort av en handfull partiklar. Det är ingen svår sak att lära sig, men det är inte vad som betonas.

Ja, det finns en kvantitativ aspekt på vetenskapen som inte ska förnekas, men den kan vara till hjälp för intressanta snarare än tråkiga övningar. Men de vill ändå få veta om universums utbredning, om kul saker i atomfysik och om lasrar, som de finner intressanta och roliga.

Den tunga användningen av räkneuppgifter har länge varit central för undervisningen i inledande fysik. Räkneuppgifter ger tydliga resultat som är lätta att förmedla till avnämare och studenter, enkla att konstruera från lärares provbanker, enkla att studera för studenter, och definitivt att utvärdera, vilket kan vara till belåtenhet för både elever och instruktörer. Men Hewitt [23]

har påvisat slående skillnader i betydelsen av dessa problem som de uppfattas av elever och lärare. Hewitt konstaterade:

Kontrastera professors och studenternas betraktande av problemerna. Professorn klassificerar problem i termer av fysikaliska begrepp, medan studenterna klassificerar dem som situationer. Det är "remskiveproblem", "lutande planet-problem", "remskiva kombinerad med lutande-planetproblem" och så vidare. Eftersom de flesta eleverna inte ser erfarenhet av att lösa sådana problem som något att bygga sina karriärer på (vid den tiden knappast fysik), längtar de till slutet av kursen.

Eleverna hänvisar till dessa övningar som "berättelseproblem", men de flesta av de "historier" vi berättar är mycket gamla, och innehåller subtila dolda missuppfattningar hos våra förfäder. En nyttig kommentar om detta gjordes av Gould [24]:

Vi måste extrahera mening ur förvirringen i världen omkring oss. Vi gör det genom att berätta historier, och genom att titta på mönster. Och när vi ser ett mönster måste vi berätta en historia om det.

I undervisningen i fysik är de flesta av de historier vi berättar formulerade för länge sedan och innehåller både felaktiga antaganden och missförstånd, vilka har korrigerats genom senare experimenterande. Dagens undervisning i fysik visar hur dessa modeller visades vara falska genom tillämpning av den vetenskapliga metoden, men vi saknar alternativa berättelser som präglar vår nuvarande förståelse. Istället för historier med grund hos Newton och Galilei är kanske berättelser som involverar växelverkande gaugebosoner, kvantstatistiska fakta, och resultat av observationer mer användbara än att lära sig bokstavliga formler som beskriver ouppnåeliga idealiserade situationer.

Layzer har också betonat språkets betydelse vid förmedling av kvantitativa begrepp [25]:

Det finns en märklig synergi mellan matematik och vanligt språk... De två typerna av diskurs (symboler och ord) stimulerar och förstärker varandra. Utan tillräckligt verbalt stöd tenderar formler och diagram att förlora sin betydelse; utan formler och diagram får orden och fraserna inte någon ny innebörd.

Naturligtvis är våra berättelser endast avsedda att förmedla ett allmänt perspektiv, och försök att göra dem rigoröst korrekta skulle beröva dem deras pedagogiska användbarhet. Haan [26] har diskuterat många exempel på ärevörddiga historier som vi rutinmässigt berättar i inledande kurser, som inte är helt korrekta men omfattar modeller som är nästan korrekta i ett givet sammanhang. För kursen som diskuteras här behövs nya berättelser som överbryggar den skenbara förvirringen i den moderna fysiken. För detta behöver vi liknande spelrum för att

vara nästan rätt, med förbehållet att dessa förenklade modeller är konstruerade för att belysa fenomen som kan förefalla kontingenta. Bohr har, enligt citat i [27] förklarat att "sanning och tydlighet är kompletterande".

Det språk som vi talar när vi undervisar på en inledande fysikkurs har litet överlapp med det språk som vi talar i kurser på högre nivå och med våra kollegor. Här vill jag citera Rukeysers dikt "The Speed of Darkness" [28]:

Tiden kommer in i sammanhanget. Säg det. Säg det. Universum består av berättelser, inte av atomer.

3. Begränsningar i kraftapproximationen

Praktiskt taget alla inledande läroböcker börjar med en ingående gnuggning i Newtons mekanik, och kräver av eleverna att "tänka Newtonskt" innan man går vidare till begrepp som bevarande av energi, rörelsemängd och rörelsemängdsmoment, minsta verkans princip, osv. Försök till annan organisering av materialet har gjorts, men dessa läroböcker har antingen återgått till gängse uppställning i senare utgåvor, eller så har deras användning krympt snabbt.

3.1. Historisk kritik

Wilczek, till exempel, har i en essä [29] påmint om att kraftkonceptet är mer en "kultur" än en algoritm. Han konstaterar att:

Newtons andra rörelselag, $F = ma$, är själen i klassisk mekanik. Lik andra själar är den inte solid. Den högra sidan är produkten av två storheter med djupgående betydelser. Accelerationen är ett rent kinematiskt begrepp definierat i termer av tid och rum. Massan återspeglar ganska direkt grundläggande mätbara egenskaper hos föremål (vikter, rekyllhastigheter). Den vänstra sidan, å andra sidan, har ingen oberoende innebörd.

Han stöder detta uttalande med ett citat av Tait [30] från 1895:

I alla metoder och system som blandar in idén om kraft finns det ett inslag av förkonstling... det finns inget behov av att införa ordet "kraft", inte ens för de känslomässiga idéer som det ursprungligen baserades på.

och ett utopiskt citat av Russell [31] från 1925:

Om folket skulle lära sig att uppfatta världen på ett nytt sätt, utan det gamla begreppet "kraft", skulle det inte bara förändra sin fysiska fantasi, utan sannolikt också sin moral och politik.

Jammer [32] har föreslagit:

Begreppet kraft har nått slutet av sin livscykel... (vilket låter ana) dess utslutning från inventarielistan med grundläggande begrepp i fysiken.

3.2. Statistisk karaktär hos krafter

Användningen av kraftkonceptet leder till en tvivelaktig formulering av interaktioner genom vilka atomer bildar molekyler. Till och med uttalandet av Feynman [10] att atomer "attraherar varandra på avstånd, men repellerar varandra när de pressas ihop" är öppet för feltolkningar av studenter som är obekanta med kvantstatistik och Paulis uteslutningsprincip.

Mullin och Blaylock [33] har tagit upp tendensen hos läroböcker att diskutera en "utbyteskraft" som om det existerar en effektiv repulsion mellan fermioner och en effektiv attraktion mellan bosoner. De manar till försiktighet med detta förfarande och pekar på (med exempel) att förslaget om en "utbyteskraft" är

... ett farligt koncept, speciellt för nybörjare, eftersom det ofta leder till en felaktig fysisk tolkning och ibland felaktiga resultat.

De menar att genom förklaringar med hjälp av kvantstatistik undviks tanken på en effektiv kraft helt, och de förespråkar andra mer lämpliga fysiska insikter som kan ersätta den.

Om det faktum att den yttersta källan till växelverkan finns i impulsivt utbyte av bosoner (som har en makroskopisk analog i impulsöverförande kollisioner som producerar atmosfäriska tryck) skulle poängteras från början, så skulle det faktum att kraftillusionen kräver en begränsad insamlingstid och en avgränsad provyta uppenbaras. Dessutom gör de statistiska begränsningarna för skärpning av en tryckbestämning genom minskning av insamlingstiden eller reduktion av insamlingsytan begreppet *osäkerhet* självklart.

3.3. En minskad roll för linjära kraftproblem

För majoriteten av våra studenter är grundläggande fysik en avslutande kurs, och de får aldrig komma i kontakt med metoderna i den samtida fysiken. Som alla som har undervisat i dessa kurser kan intyga kan den Newtonska kontaktkraften skapa efterhängsna missuppfattningar. Hur många gånger har vi inte hört frågan: "Hur kan en raket fungera i yttre rymden där det inte finns något för kraften att trycka på?" eller "månen faller inte till jorden eftersom centrifugalkraften håller den borta" eller "om vikten är gravitationskraft, och kretsande astronauter är viktlösa, då måste de vara utom räckhåll för gravitationen".

Vår undervisning och våra testmetoder betonar båda bokstavliga formler. De innefattar lineära interaktioner som vi inte skulle applicera på problem i dagens forskning. Till exempel får studenten veta att i projektilrörelser är de horisontella och vertikala rörelserna helt oberoende. I alla realistiska fall på jorden

(till exempel banan för en tennisboll) beror det viskösa motståndet i luften på farten, vilket kopplar vertikala och horisontella komponenter av hastigheten på ett sätt som kräver en numerisk lösning. Dessutom kan aerodynamiken genom Magnuseffekten ge stora effekter vid exempelvis underskriv [34]. En färsk studie [35] har visat att behandling av en elliptisk bana som en parabolisk med hjälp av plana koordinater på jorden (gravitationskraftlinjer betraktas som parallella och oberoende av höjd) är en dålig approximation. Medan läroboksformler som ger felaktiga resultat kan ha pedagogiskt värde måste man fråga sig om inte ett mer modernt sätt kunde hittas som är både enklare och mer noggrant.

4. Förslag: Sätt en kort introduktion till det moderna perspektivet i början av en inledande standardfysikkurs

Av många skäl är en omfattande omstrukturering av de inledande fysikkurserna osannolik just nu. Därför har vi prövat ett mycket enklare sätt där standardkurssekvensen föregås av en kort (2-3 veckor för en kurs med typiskt 4 h per vecka i 30 veckor) kvalitativ introduktion till olika förenande aspekter i det moderna fysiska perspektivet. Denna inledande modul kan sedan anslutas till den vanliga läroplanen för inledande fysik, med de olika traditionella enheterna naturligtvis placerade inom ramen för det moderna perspektivet.

Detta tillvägagångssätt kräver mer än ett omordnande av den moderna fysikens material, som vanligtvis är infört i slutet av inledande standardläroböcker. Dessa avsnitt har en tendens att beskriva uppgifter om (nu föråldrade) experiment som först avslöjade kollapsen av den klassiska modellen, och därmed att betona uppenbara paradoxer snarare än att ge enade insikter.

Vid utvecklingen av denna modul, gjordes försök att inkludera olika aspekter av programmet på ett antal akademiska nivåer, både vid University of Toledo [36] i USA och vid Lunds universitet [37] i Sverige. Dessa inkluderade: en doktorandkurs i atomär struktur, en inledande kvantmekanikkurs på hög nivå, en kurs i "modern fysik" på tredje året, algebra- och kalkylbaserade introduktionskurser, en allmänbildningskurs på första året (med både öppna grupper och honnörsgupper), ett uppsökande "Physics Summer Camp"-program för gymnasieelever, och ett samhällsengagerande projektet kallat "lördag förmiddag med fysik" (för elementära och gymnasieelever, föräldrar och lärare). Metoden användes också i en kurs "fysik och teatern", där studenterna analyserade teaterpjäser, som innehåller en komplot mot fysiken. Kursen team-undervisades av en professor i teater och en professor i fysik.

I diskussioner med studenter som tagit dessa kurser framkom några användbara mönster. Hård kritik av standardmodellens kursplan gick ut på att det finns för många icke sammankopplade ämnen. Varje dag ger ett nytt kapitel med en ny uppsättning

formler, och nya "trick" att lösa en smal klass av problem. Det påpekades att reklam för fysiken går ut på att man ger en liten uppsättning grundläggande principer ur vilka alla problem kan lösas genom härledning, vilket ger nya insikter. I stället kommer fysik insvept i flera volymer tjocka läroböcker, och för varje problem finns det ett speciellt trick som måste memoreras.

Som svar på dessa kommentarer försökte vi utveckla en kortfattad berättande introduktion till kursen, som betonar enade snarare än förbryllande aspekter av det samtida fysiska perspektivet. När denna introduktion följdes av en kurs undervisad från en standardlärobok, var det planerat att kopplingar skulle kunna göras mellan de till synes disparata ämnena mekanik, ljus, värme, ljud, elektricitet och magnetism. Exempel på sådana begreppsmässiga kopplingar är: mekanik och el genom den mikroskopiska naturen hos "kontaktkraften", elektricitet och magnetism med hjälp av relativitetsteorin, el och optik via fotonutbytesmodellen osv.

Även om justeringar behövdes för att passa olika målgrupper fanns det vissa breda begrepp som, om de presenterades kvalitativt i den inledande modulen, medförde ökade insikter och sporrade till sammankopplingar i den efterföljande standardmodellens läroplan. Även om Hawthorne-effekten [38] (individer arbetar hårdare när de är deltagare i ett experiment) förutspår att alla pedagogiska experiment är framgångsrika, var inledningsvis resultaten ändå glädjande.

5. En provuppsättning av områden för en kvalitativ introduktion

För att hålla sig inom en snäv tidsram var det nödvändigt att begränsa urvalet av begrepp som infördes. Vi fann att vi fått positiva resultat genom att betona de grundläggande aspekterna av den atomära materiens natur och den elektromagnetiska naturen av vår interaktion med den fysiska världen.

Medan delar av ämnen som kärnstruktur, elementarpartiklar, kosmologi, osv. fångar elevernas intresse, är de mindre viktiga för en förståelse av mekanik, ljus, värme, ljud, elektricitet och magnetism och kan läggas till i slutet av en kurs istället för i början.

Som en illustration av det tillvägagångssättet lät vi följande sex ämnen ingå i vår kvalitativa introduktion:

- (5.1) banor kontra uppehållstid
- (5.2) principen för minsta verkan och konserveringslagar
- (5.3) kvantstatistik
- (5.4) elektromagnetisk växelverkan
- (5.5) relativitetsteori och det magnetiska fältet
- (5.6) interaktioner mellan neutrala atomer.

Ämnena valdes eftersom de innehåller begrepp som vi planerade att återkomma till i undervisningen av standardmodellens

kurser. Korta kvalitativa beskrivningar som illustrerar dessa presentationer ges nedan. Men många möjligheter finns, och man kan hoppas att andra kommer att överväga alternativa metoder.

5.1. Banor kontra uppehållstid

En grundläggande skillnad finns mellan den begreppsmässiga ram som presenteras i de inledande fysikkurserna och den som används i avancerade kurser med fysik som huvudämne. Introduktionskurser använder koncept med krafter och accelerationer som aldrig kommer in i mer avancerade formuleringar. Den inledande strategin karaktäriseras som "klassisk" och de mer avancerade kurserna beskrivs som "kvantmekaniska". Men den främsta skillnaden mellan de två synsätten uppstår inte på grund av kvantisering, utan snarare från en onödig beskrivning av makroskopiska system genom momentanvärden för position, hastighet och acceleration, och mikroskopiska system genom tidsmedelvärden, densiteter, läge och sannolikhet.

Detta är analogt med inspelning av makroskopiska system med rörliga bilder och mikrosystem med tidsexponering av bilder. De två metoderna innehåller samma information: för rörliga bilder genom varieringen av bilder i på varandra följande ramar; för tids-exponeringar genom graden av exponering under en enda bildruta, som anger uppehållstid. De rörliga bilderna använder en differentialkalkyl för att spåra förändringar; tidsexponeringen använder en integralkalkyl för medelvärden. Förvånande nog är det senare mindre krävande matematiskt, eftersom integralen av en kvantitet av en viss komplexitet kan erhållas som det geometriskt området under kurvan (erhålls lätt som en diskret summa av tätt placerade element med de enklaste av datorer).

Anledningen till dessa alternativa metoder är klar eftersom ett makroskopiskt system störs omärkligt när det successivt uttestas med synliga fotoner, medan mikroskopiska system kan förstöras genom växelverkan med en enda foton av kort våglängd. Därför kräver beskrivning av mikroskopiska system överlagring av många på liknande sätt påverkade system. Tyvärr genererar detta en klyfta mellan fysiken som den lärs ut till icke-specialiserade studenter och som den praktiseras.

Satsningar kan göras för att beskriva moderna ämnen i en Newtonsk kontext, men användningen av sådana karakteriseringar misslyckas helt för många elektroniska enheter som används av dagens studenter. "Flashminnet" är ett utmärkt exempel. Dessa enheter finns i flash-enheter, MP3-spelare och många andra produkter. Deras funktion är beroende av kvanttunnlingsteknik, och deras cellstorlekar kan vara mindre än 20 nm. Tunnling är klassiskt förbjudet, och optisk spårning av elektronbanor skulle kräva växelverkan med fotoner av hundratals eV energi.

Däremot är ett betraktande av sannolikhetstätheten för positionen av en elektron i en av dessa enheter analogt med

uppehållstiden vid exponeringen av en pendel upplyst av en stroboskoplampa.

Det hävdas ibland att en inledande användning av Newtons läror är nödvändig, eftersom en kvantmekanisk formulering skulle vara alltför matematiskt krävande. Men problemen som attackeras i elementära läroböcker tenderar att vara enklare än de som behandlas i kvantmekaniska läroböcker. Om man undersöker problem av liknande komplexitet, visar sig en Newtonsk formulering ofta vara mycket mer komplex matematiskt än motsvarande kvantmekaniska lösning. Elementära läroböcker beskriver till exempel Keplers tvådimensionella omloppsbaneproblem, men de är alltid begränsade till specialfallet med en cirkulär bana (och i approximationen med en plan jord till en parabolisk bana).

En klassisk lösning på tredimensionella Keplerproblem i termer av sannolikhetstätheter för läget har presenterats [36, 39, 40] och har tillämpats på elliptiska banor i både ett solsystem med flera planeter [39] och ett flerelektroniskt atomärt system [41]. När makroskopiska och mikroskopiska system båda formuleras med sannolikhetstätheten för läget, blir förståelsen av deras begränsningar tydligare, och betydelsen av kvantisering i mikroskopiska fall kompliceras inte av beräkningsskillnader.

När det klassiska problemet är formulerat i termer av sannolikhetsdensitet för läget, inkluderas tredimensionella elliptiska banor automatiskt [39, 40, 42, 43]. Dessutom kan avvikelser från en ren ”inverse square”-lag ingå som störningar, allt inom ett rent klassiskt ramverk [39, 40, 42-44].

Det är också möjligt att lägga semiklassisk kvantisering direkt till den klassiska lösningen när så önskas [41]. Problem med den gamla Bohr-Sommerfeld-Wilson-kvantiseringen har för länge sedan korrigerats [36, 39-43] av Einstein-Brillouin-Keller-kvantisering genom införande av Maslovindex.

5.2. Minsta verkans princip och konserveringslagar

Taylor har föreslagit i sin essä ”A call to action” att fysik [45] kan läras ut utan $F = ma$ och utan vektorer med hjälp av principen om minsta verkan och har utvecklat en uppsättning av datorbaserade, användarvänliga övningar [46] för att visa dess användning. Till exempel, studenten kan slumpmässigt variera den kinetiska energin T och potentiella energin V på punkter längs en bana i rumtiden och upptäcka att när värdet på $T-V$ vid dessa punkter på banan har ett minimum, är värdet av $E=T+V$ samma vid varje punkt. Ingen matematik behövs.

Det kan hävdas att verkan är den mest grundläggande kvantiteten i fysiken. Verkan är en kvantiserad byggsten i naturen, vars antal enheter bestämmer det statistiska beteendet för grundläggande partiklar, och en Lorentzinvariant som ger bevarande av energi och impulsmoment genom principen för minsta verkan, och den belyser osäkerhetsprincipen.

Trots den centrala rollen i fysiken brukar diskussionen om

verkan i inledande läroböcker uppskjutas tills det uppstår en diskussion om Plancks konstant. Dessutom ges ordet flera betydelser. År 1687 valde Newton ordet *actioni* i sin *Axiomata sive Leges Motus* för att beskriva vad vi nu betecknar som linjär rörelsemängd. Ett par decennier senare ”re-associerades” ordet verkan med en storhet (med enheten för rörelsemängdsmoment, men mer allmänt än det begreppet) av Euler, Leibniz och Maupertuis i ”minsta verkans princip”. Detta skapar förvirring som kan klargöras genom att ersätta Newtons tre retoriska ”lagar” med en framställning byggd på bevarandet av rörelsemängd i växelverkan mellan ett utvalt objekt och resten av universum.

Begreppet verkan har inflytande på många aspekter av den moderna världsbilden, men dess förekomst i elementära läroböcker är i allmänhet begränsad till diskussioner om svartkroppsstrålning och fotoelektriska effekten. För att motverka denna situation har vi placerat verkan som den dominerande mittpunkten i vår kursstruktur. Tillämpad på elementarpartiklar har den följande egenskaper.

1. Verkan existerar endast som heltalsmultipler av en odelbar grundenhet $\hbar/2$.
2. Partiklar med jämnt antal enheter av $\hbar/2$ lyder BE-statistik (samarbetar).
3. Partiklar med udda antal enheter av $\hbar/2$ lyder FD-statistik (tävlar).
4. Fotonen förmedlar EM-interaktioner och definierar andrakvantisering.
5. Den totala verkan av ett system av fermioner definierar förstakvantisering.
6. Sett i rumtiden fortsätter en partikel längs banan som innehåller minst antal verkansenheter (minsta verkans princip).
7. Minsta verkans princip ger lagarna för bevarande av energi och impulsmoment.
8. Verkan är en Lorentzinvariant. Energi (verkan / tid) och rörelsemängd (verkan / längd) är bevarade storheter.
9. Eftersom vägen för minsta verkan innehåller ett helt antal enheter av $\hbar/2$ är den minsta osäkerheten en sådan enhet: därmed osäkerhet i energi-tid och rörelsemängd-längd.
10. Den ”mekaniska verkan” (banrörelsemängdsmoment) är kvantiserad i multipler av $2(\hbar/2)$, och förknippas med ”pariteten” eller höger- eller vänsterhänthet hos ett atomärt tillstånd.

5.3. Kvantstatistik

En av de mest fascinerande aspekterna av inneboende verkan är kopplingen mellan ”spinn” och statistik. Partiklar som har ett udda antal enheter av $\hbar/2$ lyder Fermi-Dirac-statistik (och kallas fermioner) och partiklar med ett jämnt antal enheter av $\hbar/2$ lyder Bose-Einstein-statistik (och kallas bosoner). Det finns ingen

vedertagen elementär förklaring till denna koppling [47] och införandet av teorin ligger utanför ramen för denna presentation. Det är dock möjligt att konstruera en förenklad modell som kan göra olika grunddrag i teorin plausibla.

5.3.1. Konkurrens och samarbete

För att illustrera konsekvenserna av dessa typer av statistik kan man metaforiskt karakterisera fermioner som "konkurrerande" och bosoner som "samarbetande". I denna modell gör två fermioner i närheten av varandra aldrig samma sak på samma gång, medan alla bosoner i närheten av varandra tenderar att göra samma sak på samma gång, kollektivt och i kadens.

Detta ger en makroskopisk analogi till begreppet "dualitet" där fermioner och bosoner ibland uppvisar partikelegenskaper (materiella, rumsligt lokaliserade) och vid andra tillfällen vågegenskaper (oscillerande, rumsligt förlängda). Individuellt är såväl fermioner som bosoner lokaliserade partiklar som också har karaktäristiska oscillerande egenskaper. Eftersom enskilda medlemmar av en ensemble av fermioner inte kan göra samma sak samtidigt är deras individuella identiteter som partiklar uppenbara. Eftersom de enskilda medlemmarna i en ensemble av bosoner har en gemensam kollektiv kadens, härmar den makroskopiska ensemblen beteendet hos de mikroskopiska individerna, och ensemblen tolkas (som för fotoner) som en kontinuerlig våg.

Den populära praxisen bland åskådare på en fotbollsmatch att bilda "vågen" ger en makroskopisk analogi. Utan våg uppfattas åskådarna som individer. Om istället angränsande åskådare sitter och står i en lämplig rullande kadens, blir utseendet (på ett avstånd större än bredden på en plats) ett utsträckt, oscillerande objekt.

5.3.2. Den klädda elektronen

En annan användbar begreppsmodell som kommer med kvantstatistik är den för den "klädda elektronen". Elektroner och positroner har en enhet av $\hbar/2$ och lyder Fermi-Dirac-statistik. Kvantelektrodynamik står för den elektriska växelverkan mellan dessa fermioner genom utbyte av virtuella fotoner, som har två enheter av $\hbar/2$ och är "gauge-bosoner" som förmedlar samspelet. Det finns alltså en oskiljaktig relation mellan elektroner och fotoner, en elektron utan ackompanjemang av den virtuella fotonen skulle inte ha någon elektrisk laddning och således bete sig som en neutrino. När elektroner och positroner (Fermi-Dirac-statistik) observeras makroskopiskt tillsammans med sina absorberade och utstrålade virtuella fotoner (Bose-Einstein statistik) blir den renormaliserade summan av de två fördelningarna klassisk Maxwell-Boltzmann-statistik.

Detta kommer att diskuteras mer ingående i avsnittet om elektromagnetiska interaktioner.

5.3.3. Klassiska och kvantmekaniska mynt och tärningar

En enkel analogi mellan kvantstatistik och flippande mynt har föreslagits av Chow och Cohen [48]. Om två mynt vänds kan vart och ett resultera i en head (H) eller tail (T) med lika sannolikhet (krona resp. klave på svenska). Således, de möjliga utfallen är (HH, HT, TH, TT) och det är 25% chans för antingen två heads eller två tails, och 50% chans för en head och en tail. Om dessa är oskiljbara "kvantummynt" (dvs de har ingen preexistens, utan kommer bara till stånd när vågfunktionen kollapsar i mätningen), då är det inte möjligt att skilja mellan HT och TH. I det här fallet är alla tre utfall lika sannolika med 33%. Detta symmetriska fall är en analog till Bose-Einstein-distributionen. Om det finns en uteslutningsprincip som hindrar båda mynten från att ha samma head- eller tail-egenskap, då är det enda möjliga resultatet en head och en tail, nu en visshet. Detta antisymmetriska fall är en analog till Fermi-Dirac-statistik. Om Bose-Einstein- och Fermi-Dirac-distributioner medelvärdesbildas, ger det en analog till Maxwell-Boltzmann-fördelningen.

Liknande exempel kan konstrueras med mångsidiga mynt (som tärningar). För ett par sexsidiga klassiska tärningar är det möjligt att erhålla 36 utfall med summorna mellan 2 och 12. Ett utfall 4 kan uppnås med (3,1), (2,2), (1,3), så dess sannolikhet är 3/36. För Bose-Einstein-tärningar är (3,1) ekvivalent med (1,3), vilket minskar det gynnsamma resultatet till 2 och det totala utfallet till 21 med en sannolikhet 2/21. För Fermi-Dirac-tärningar är (2,2) uteslutet, så det återstår bara 1 gynnsamt och totalt 15 resultat, med en sannolikhet på 1/15. Kombinerad och renormalisering av de två kvantmekaniska distributionerna ger tillbaka $21+15 = 36$, och återvinning av Maxwell-Boltzmann-distributionen.

Det kan ge en bra konceptuell insikt om naturen av vår fysiska verklighet att notera att Maxwell-Boltzmanns makroskopiska statistiska beteende som vi observerar i vardagen delas upp på mikroskopisk nivå i Bose-Einstein- och Fermi-Dirac-komponenter.

5.4. Elektromagnetisk växelverkan

Även om elektromagnetiska interaktioner studerades mycket senare än gravitationell växelverkan utgör de grunden för förståelsen av kemi, biologi och många andra discipliner som påverkar våra liv. Medan fysikkurser traditionellt börjar med gravitationen är gravitationella interaktioner mycket svagare, de är rent attraktiva (så de har ingen dipolväxelverkan), och deras förening med andra typer av interaktioner är ofullständig.

Fysikkurser på både de inledande och mellanliggande nivåerna behandlar elektrisk laddning genom differentiella element som innehåller många enskilda laddningskvanta. I de flesta praktiska exempel är detta en mycket god approximation på grund av den ansevärd storleken på Avogadros tal. I denna approximation kan differentialkalkylens lättillgänglig-

het utnyttjas, med summor utförda som integraler och skillnader beskrivna av differentialekvationer. Genom att utvidga den elektrodynamiska "beskrivningen" så att diskretisering av både verkningskvantum och laddningskvantum inkluderas kan insikter om den grundläggande karaktären av elektrodynamiska interaktioner vinnas.

5.4.1. Interaktion genom bosonutbyte

Dessa överväganden kan ge djupare insikter i dynamiska interaktioners ursprung än vad som tillhandahålls av en känslomässigt uppenbar, men begreppsmässigt otydlig verkan-på-avstånd "kraft". Kvalitativt kan den attraherande och repellerande växelverkan mellan laddade partiklar modelleras i termer av det virtuella fotonfält som genomsyrar hela rymden. De laddade fermionerna klädda med bosoner kan ses som två aspekter av en enda storhet, som har en del med en uteslutningsprincip enligt Fermi (Pauli), och en annan del med en Bose-kondensering, som när de kombineras makroskopiskt följer klassisk statistik.

Den traditionella strategin med "frikroppsdiagram" i Newtons fysik kan vara missvisande. Även om den har beräkningsvärde i den Newtonska illusionen, är den i grundläggande konflikt med den aktuella världsbilden. Kvantelektrodynamik speglar Machs princip (lokala fysiska lagar som bestäms av den storskaliga strukturen hos universum), och man kan inte tänka sig interaktioner som inträffar inom ett isolerat system. Massans renormering av kvantelektrodynamik kräver att växelverkan av en elektrisk laddning tar hänsyn till alla de andra elektriska laddningarna i universum, eftersom de alla påverkar varandra genom utbyte av fotoner. Dessutom leder variation av avstånd och rörelsetillstånd hos andra laddningar (och ändlig fotonhastighet) till retardationseffekter och dubbelräkningen av den totala laddningen som uppfattas som magnetism.

Wheeler's berömda förslag till Feynman [49] att "anledningen till att alla elektroner har samma massa är att de är alla samma elektron" inte bara charmar studenter utan innehåller också viktiga insikter om en elegant teori. Wheelers modell antog det faktum att en positron beter sig som en elektron som färdas bakåt i tiden, och tillämpade den på vertex i elektron-positron-pars skapelse- och förintelse-händelser. Genom att koppla en elektron (eller positron) skapad i ett vertex med en positron (eller elektron) förintad i ett annat vertex, och fortsätta denna process, skapade han en sicksack-väg pendlande mellan det förflutna och framtiden, som skulle tolkas som en elektron (eller positron) varje gång den passerar "här-nu".

Även om detta inte är hela sanningen har elever många år senare uppgivit att de minns denna modell och, underförstått, att varje elektron genom det virtuella fotonfältet är ansluten till varje annan elektron i hela universum.

5.5. Relativitetsteori och magnetfältet

Ämnet speciell relativitetsteori presenteras vanligtvis i inledande fysikkurser som en icke intuitiv revidering av Newtons lagar. Men titeln på Einsteins arbete från 1905 [50] om detta ("Angående elektrodynamik för rörliga kroppar") avslöjar en elegant framställning av ursprunget till magnetfält. Detta kan illustreras genom ett enkelt intuitivt pedagogiskt exempel [36].

Tänk dig en koppartråd 1 mm i diameter genom vilken en ström av 1 A passerar.

Under förutsättning av en ledningselektron per kopparatom motsvarar denna ström en drifhastighet $\approx 0,1$ mm/s. Ett av resultaten av speciella relativitetsteorin är det faktum att om två utsträckta föremål rör sig parallellt i förhållande till varandra, underskattar var och en längden på den andra längs rörelseriktningen. Således, för en observatör som står stilla i förhållande till tråden kommer det drivande negativt laddade elektronmolnet att te sig något tätare. Detta är en mycket liten effekt, men den ökar avsevärt för en positiv punktladdning som rör sig med en betydligt större hastighet antingen parallellt eller antiparallellt med de drivande elektronerna.

Om punktladdningen rör sig i samma riktning som elektronerna driver, då är dess hastighet i förhållande till det positiva laddningsmolnet större än dess hastighet i förhållande till det negativa laddningsmolnet. I detta fall kommer det positiva laddningsmolnet att verka vara tätare än det negativa laddningsmolnet, och den positiva punktladdningen kommer att repelleras av tråden.

Om testladdningen rör sig i motsatt riktning mot elektron-driften, då kommer dess hastighet i förhållande till det negativa laddningsmolnet att bli större än dess hastighet i förhållande till det positiva laddningsmolnet. I detta fall kommer det negativa laddningsmolnet att verka vara tätare än det positiva laddningsmolnet, och den positiva punktladdningen kommer att attraheras av tråden.

Observera att den magnetiska växelverkan är antingen attraktiv eller repulsiv, och att införandet av en tvärgående vektor genom "högerhandsregeln" är ett system för val mellan dessa två alternativ.

Genom enkel algebra (och en binomial expansion av relativistiska kvadratrotten) ger denna modell [51] Biot-Savarts lag. Denna enkla modell visar att Biot-Savarts lag är en konsekvens av Coulombs lag och relativitet, och inte ett separat experimentellt faktum.

5.6. Interaktioner mellan neutrala atomer

5.6.1. Mekanismen för "kontaktkrafter"

Illusionen att "fasta föremål" består av kontinuerlig materia i "kontakt" med sin omgivning är förhärskande och vilseledande. Begreppet "vikt" är ett exempel på den förvirring som kan uppstå. Medan en vanlig ordbok definierar vikt som "den kraft

med vilken ett föremål attraheras mot jorden” konstateras det också allmänt att ett föremål i fritt fall är “viktlöst”. En student i fysik på tjugohundratalet bör vara medveten om att begreppet vikt innefattar gravitation, elektrostatik och Paulis uteslutningsprincip.

När jag står på golvet drar den gravitationella växelverkan mellan jorden och min kropp atomerna i sulorna på mina skor närmare atomerna i golvmaterialiet, med påföljd att deras elektronmoln att överlappar. På grund av Fermi-Dirac-statistik, utesluts negativt laddade elektroner från detta gränssnitt, vilket leder till positivt laddade kärnor i skor och golv genom reducerad elektronskärning. Växelverkan mellan de positiva laddningarna leder till en repulsion som kompenserar för gravitationskraften. Det är “växelverkan-på-avstånd” medierad av fotonutbyte men ingen “kontakt”.

Således kan man hävda att “vikt” inte är jordens dragkraft, utan snarare trycket upp från golvet, som uppstår till följd av Paulis uteslutningsprincip.

5.6.2. Dipol-dipol-interaktioner

Eftersom det bara finns en typ av gravitationell massa, och dess interaktioner är uteslutande attraktiva finns det inga “neutrala” gravitationella objekt som samverkar genom dipolmoment. Således saknar den första kursen i en två-terminers inledande fysiksekvens en modell för dipol-dipol-växelverkan, som styr den ultimata elektriska naturen hos materien.

Dessutom börjar den standardiserade introduktionskursen i elektricitetslära med en studie av fria laddningar med hjälp av glasstavar/sidendukar, bärnstensstavar/kattpäls, Wimshurst-maskiner (och deras tekniskt avancerade motsvarigheter) för att dramatiskt “elektrifiera” objekt. Denna betoning på fri laddning ger en symmetri mellan Keplers och Coulombs lagar som kan tillämpas för lösning av hemuppgifter. Det är dock inte ofta man har erfarenhet av fria laddningar i dagliga livet, och denna metod döljer det viktiga fenomenet elektrisk dipol-dipol-interaktion, som styr allt vi rör och känner.

Det elektriska fältet E_1 på en punkt r från en laddning q ges av $E_1 = kq/r^2$. Om två punktladdningar av motsatt tecken är förskjutna från varandra med ett avstånd a , ges det elektriska fältet E_2 längs riktningen av förskjutningen av $E_2 = 2kqa/r^2(1 - a^2/4r^2)$. Om $r \gg a$, blir detta $E_2 \sim 2kqa/r^3$, och ett permanent dipolfält minskar som $1/r^3$. Om fältet kommer från två icke-polära atomer som inducerar dipolmoment i varandra, är energin i interaktionen mellan dem proportionell mot $(E_2)^2$, och den varierar därför som $1/r^6$.

5.6.3. van der Waals-interaktioner

Om den ideala gasekvationen $pV = NkT$ justeras för att inkludera den attraktiva inducerade dipol-dipol-växelverkan och Paulis repulsiva uteslutningsinteraktion, erhålls van der Waals

ekvation $(p + a/V^2)(V - b) = NkT$ [52]. (Här kan “kulturen” med krafter undvikas genom behandling av trycket som energi/volym.) Om faktoriseringen i denna ekvation utökas för konstant T blir resultatet en kubisk ekvation i V som, när den plottas på ett pV -diagram, noggrant beskriver gasfasen, kondensationsprocessen och vätskefasen.

Konstanten b motsvarar den del av volymen som är oåtkomlig på grund av Paulis uteslutningsprincip. Konstanten a står för den attraktion som produceras av den inducerade dipol-dipol-växelverkan. Detta genomsnittliga intra-atomära avstånd r kan relateras till behållarens totala volym V med sambandet $V \sim N(4\pi r^3/3)$, vilket ger $1/r^6 \sim 1/V^2$. Även om van der Waals-växelverkningskraft är mycket svagare än kemisk bindning ger de en användbar och intuitiv introduktion till växelverkan mellan neutrala atomer och molekyler.

6. Slutord

Den ”start-slut”-modul som beskrivs här konstruerades med specifika mål i åtanke för att ge en konceptuell grund för den standardkurs som följer. Den är endast avsedd som ett prov på denna undervisningsfilosofi och vi uppmanar andra att utveckla sin egen lista över grundläggande ämnen, utvalda på grundval av individuell smak, undervisningsstil och pedagogiska mål.

Det betonas att det primära syftet med detta förslag *inte* är att förbättra studentens poäng på tester baserade på standardmodellens läroplan (även om ett sådant resultat är möjligt), utan snarare att studenter, som inte läser flera fysikkurser, ges inblickar i samtida fysik som de inte får för närvarande.

Våra resultat har visat att presentationen av denna korta kvalitativa introduktion gjort att den moderna fysiken verkar mindre abstrakt och motsägelsefull för studenterna, och tillät dem att se tillbaka för att förena och placera standardkursens klassiska ämnen i sitt historiska sammanhang.

För att citera Hartley [53], “Det förflutna är ett främmande land, de gör saker annorlunda där”.

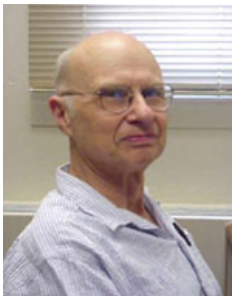
Referenser

- [1] Miner T D 1961 Physical Sciences Study Committee *Am. J. Phys.* **29** 338–9
- [2] Feynman R P 1963 *The Feynman Lectures on Physics* (Reading, MA: Addison-Wesley)
- [3] Portis A M 1964 The Berkeley Physics Laboratory *Am. J. Phys.* **32** 458–64
- [4] Coleman L A, Holcomb D F and Rigden J S 1998 The Introductory Physics Project 1987–1995: What has it accomplished? *Am. J. Phys.* **66** 124–37
- [5] Howes R H and Hilborn R C 2000 Winds of change *Am. J. Phys.* **68** 401–2

- [6] International Newsletter on Physics Education <http://www.physics.umd.edu/ripe/icpe>
- [7] EPS • PD <http://education.epsdivisions.org/introduction/>
- [8] Templin J D 1996 The three-volume Sears – 50 years later *Am. J. Phys.* **64** 369–73
- [9] Holcomb D F 2007 A physics makeover *Interact. Across Phys. Educ.* **37** 38–40
- [10] Feynman R P 1963 *The Feynman Lectures on Physics* (Reading, MA: Addison-Wesley) pp 1–2
- [11] Dawkins R 1963 *A Devil's Chaplain: Reflections on Hope, Lies, Science, and Love* (Boston, MA: Houghton Mifflin) p 46
- [12] Bradshaw G L Department of Psychology, Mississippi State University <http://hawaii.psychology.msstate.edu/Laws.html>
- [13] Smolin L 2005 Quantum leap for schools – creative proposal: teach young minds spooky physics first *Discover Mag.* **26** 48
- [14] Flanagan J and McCulloch A 1980 *Meglos* (part of season 18 of Dr Who, a BBC-produced science fiction television programme)
- [15] Tobias S 2000 From innovation to change: forging a physics education reform agenda for the 21st century *Am. J. Phys.* **68** 103–4
- [16] Chabay R and Sherwood B 2002 *Matter and Interactions* (Hoboken, NJ: Wiley)
- [17] Moore T A 2002 *Six Ideas That Shaped Physics* (New York: McGraw-Hill)
- [18] Lederman L 2001 Revolution in science education: put physics first *Phys. Today* **54** 11–2
- [19] Bardeen M G and Lederman L M 1998 Coherence in science education *Science* **281** (5374) 178–9
- [20] High School Committee of the AAPT 2009 *Physics First: An Informative Guide for Teachers, School Administrators, Parents, Scientists, and the Public* http://www.aapt.org/upload/phys_first.pdf
- [21] Rigden J S 2007 *Phys. Today* **60** 13
- [22] Dreifus C 2010 Sean Carroll talks school science and time travel *New York Times* 19 April 2010
- [23] Hewitt P G 1995 Lessons from Lily on the introductory course *Phys. Today* **48** 85
- [24] Gould S J 1998 Why we can't predict the future: a millennial perspective (talk) <http://reporter-archive.mcgill.ca/Rep/r3105/gould.html>
- [25] Layzer D 1998 The synergy between writing and mathematics *Writing to Learn Mathematics and Science* ed P Connolly and T Vilaridi (New York: Teachers College Press) pp 122–33
- [26] Haan S L 1999 Why I teach my students things that are incorrect *Viewpoint APS Newsletter* August–September 1999 <http://www.aps.org/publications/apsnews/199908/>

- viewpoint.cfm
- [27] Bell J S 1987 *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics* (Cambridge: Cambridge University Press) p 190
- [28] Rukeyser M 1994 *A Muriel Rukeyser Reader* ed J H Levi (New York: Norton) p 228
- [29] Wilczek F 2004 Whence the force of $F = ma$? I: culture shock *Phys. Today* **57** 11
- [30] Tait P G 1895 *Dynamics* (London: Adam and Charles Black)
- [31] Russell B 1997 *The ABC of Relativity* 5th revised edn (London: Routledge) (1st edn in 1925)
- [32] Jammer M 1999 *Concepts of Force* (New York: Dover) preface
- [33] Mullin W J and Blaylock G 2003 Is there an effective fermion repulsion or boson attraction? *Am. J. Phys.* **71** 1223–31
- [34] Sawicki G S, Hubbard M and Stronge W J 2003 How to hit home runs: optimal baseball bat swing parameters for maximum range trajectories *Am. J. Phys.* **71** 1152–62
- [35] Burko L M and Price R H 2005 Ballistic trajectory: parabola, ellipse or what? *Am. J. Phys.* **73** 516–20
- [36] Curtis L J 2003 *Atomic Structure and Lifetimes: A Conceptual Approach* (Cambridge: Cambridge University Press)
- [37] Curtis L J 1990 Probability densities and Newton's laws *Källén Memorial Lecture (Lund, Sweden)* (A Public Lecture Sponsored by the Royal Swedish Physiographic Society)
- [38] Landsberger H A 1958 *Hawthorne Revisited* (Ithaca, NY: Cornell University Press)
- [39] Curtis L J, Haar R R and Kummer M 1987 An expectation value formulation of the perturbed Kepler problem *Am. J. Phys.* **55** 627–31
- [40] Curtis L J and Ellis D G 2006 Probabilities as a bridge between classical and quantum mechanical treatments *Eur. J. Phys.* **27** 485–96
- [41] Curtis L J and Silbar R R 1984 Self-consistent core potentials for complex atoms: a semiclassical approach *J. Phys. B: At. Mol. Phys.* **17** 4087–101
- [42] Larkoski A J, Ellis D G and Curtis L J 2006 Numerical implementation of Einstein–Brillouin–Keller quantization for arbitrary potentials *Am. J. Phys.* **74** 572–7
- [43] Curtis L J and Ellis D G 2004 Use of the Einstein–Brillouin–Keller action quantization *Am. J. Phys.* **72** 1521–3
- [44] Yoder G 2006 Using classical probability functions to illuminate the relation between classical and quantum physics *Am. J. Phys.* **74** 404–11
- [45] Taylor E F 2003 A call to action *Am. J. Phys.* **71** 423–5
- [46] Taylor E F and Tuleja S 2003 Principle of least action

- interactive <http://www.eftaylor.com/software/ActionApplets/LeastAction.html>
- [47] Deck R T and Walker J D 2001 The connection between spin and statistics *Phys. Scr.* **63** 7–14
- [48] Chow C-K and Cohen T D 2000 Quantum coins, dice, and children: probability and quantum statistics *Am. J. Phys.* **68** 829–34
- [49] Feynman R P 1965 The development of the spacetime view of quantum electrodynamics *Nobel Prize Lecture* http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1965/feynman-lecture.html
- [50] Einstein A 1905 Zur Elektrodynamik bewegter Körper *Ann. Phys., Lpz.* **17** 891–921
- [51] Curtis L J 2003 *Atomic Structure and Lifetimes: A Conceptual Approach* (Cambridge: Cambridge University Press) pp 23–4
- [52] van der Waals J D 1873 Over de Continuïteit van den Gasen Vloeïstoofstand *PhD Thesis* http://www.scs.illinois.edu/mainzv/exhibit/large/05_10.gif
- [53] Hartley L P 1953 *The Go-Between* (New York: New York Review of Books)



Lorenzo J. (Larry) Curtis är ”Distinguished University Professor of Physics and Astronomy” vid universitetet i Toledo, Ohio, USA. Han utnämndes till hedersdoktor vid Lunds universitet 1999. Larry Curtis forskning omfattar främst studier av den elektroniska strukturen för högt exciterade och joniserade atomer genom en kombination av experimentella och teoretiska metoder. För experimenten använder han sig bland annat av acceleratörer i Toledo, Lund, Bochum (Tyskland) och Argonne (USA) och arbetar med experimentella data erhållna från både JET (Joint European Torus, England) och Hubbleteleskopet. Han är också mycket engagerad i undervisningen vid sitt universitet i Toledo.