

Teoriopgaverne ved Den Internationale Fysikolympiade i Danmark juli 2013



Af Henrik Bruus, Institut for Fysik, DTU, og Jens Paaske, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

I juli 2013 var Danmark vært for den 44. Internationale Fysikolympiade (IPhO 2013), som tidligere er omtalt i KVANT [1, 2]. Her er historien om tilblivelsen og afviklingen af de teoriopgaver som skulle udfordre 374 toptrænede gymnasieelever fra 81 lande verden over.

Tirsdag morgen den 9. juli 2013 kl. 9:00 stod IPhO-assistent og fysikstuderende Mikkel Bjørn i Rotunden, Østervoldgade, og blæste i en lille trillefløjte. Dette var startsignalet til teoriprøven ved Den Internationale Fysikolympiade, IPhO 2013 [1, 2]. Spændte og nervøse åbnede de 374 tilstedeværende elitegymnasieelever fra 81 lande hver deres brune kuvert med opgavesættet [3], og gik i gang med fem timers hårdt arbejde i kampen om personlig ære og olympiademedaljer, en kulmination på deres lange forberedelse. Her fortæller vi historien om disse teoriopgaver, fra idé og diskussioner, via udvikling og godkendelse, til elevernes besvarelse og ledernes evaluering.

Rammerne for IPhO teoriopgavesættet

Ifølge IPhO-statutterne [4] er værtslandet ansvarlig for at udarbejde ét sæt teoretiske og ét sæt eksperimentelle opgaver. Teorisættet skal bestå af tre opgaver, og der skal endvidere laves en fjerde reserveopgave. Opgaverne skal stiles inden for IPhO pensum, der i store træk svarer til førsteårs universitetspensum [4]: Mekanik (Newtons love, bevarelseslove, stive legemers dynamik), termodynamik (hovedsætningerne og molekylær baggrund), elektromagnetisme (Maxwell's ligninger på integralform), kvantefysik (de Broglie bølger, fotoner, ubestemthedsrelationen), speciel relativitetsteori samt atom- og kernefysik (energiniveauer, henfald, massedefekt). Matematiske metoder omfatter algebra, vektorregning og simple differentialligninger (konstant acceleration, oscillatoren og eksponentiel vækst/henfald).

Under ledelse af Henrik Bruus, næstformand for IPhO 2013, blev der i efteråret 2012 dannet en kommission til udarbejdelse af teoriopgaverne. Fra gymnasieskolerne deltog Niels Hartling, Michael Brix Pedersen, Michael Hallundbæk og Irvin Silberling Svensson; fra KU deltog Jens Paaske, Henning Haack og Christine Schøtt Hvidberg; og fra DTU deltog Erik Both, Andrei Lavrinenko, Andrei Andryieuski og Henrik Bruus. På vores første møde den 30. november 2012 gjorde vi os klart, at man ikke kommer til i IPhO 2013 i København uden at have studeret brintatomet og Bohrs atommodel. Dette indgår oven i købet i det officielle logo for IPhO 2013, allerede præsenteret ved IPhO 2012. Vi besluttede derfor straks at opgaverne *ikke* måtte have noget med hverken atommodellen eller kvantefysik at gøre.

Teoriopgavernes tilblivelse

Opgaverne har traditionelt et lokalt nationalt tilsnit, så hvad rummer den danske fysikskat udover Bohrmodellen? Valget faldt på vores internationalt højt besungne iskerneboringer på Grønlands indlandsis, på den lille beskedne meteorit, som i 2009 drattede ned i Maribo og blev pæredansk, og på DTU's vindervindbil for kørsel i modvind ved *Racing Aeolus 2011* konkurrencen i Holland. Endvidere blev større bredde sikret ved også at vælge tre tekniske emner: den plasmoniske dampgenerator, magnetisk levitation, og PET-skanneren. Med valget af disse seks potentielle IPhO opgaver meldte sig straks spørgsmålet om, hvilke interessante fysikopgaver der gemmer sig i disse emner.

Opgaverne til en fysikolympiade skal udfordre på alle niveauer. De skal have et rimeligt indgangsniveau, som tillader de fleste at komme i gang med opgaven. Derefter skal sværhedsgraden stige støt gennem opgaven, hvor flid forud for konkurrencen kan belønnes, for til slut at kulminere med en udfordring til selv de mest hårdkogte deltagere. For de fleste er den store udfordring at huske de relevante formler og at anvende dem korrekt, ikke mindst da prøven foregår uden andre hjælpemidler end en ikke-programmerbar lommeregner, papir og blyant. Rigtig interessant og svært bliver det naturligvis, når fysikkens *skalaøvelser* (rutineøvelser) pludselig skal kombineres på nye og overraskende måder. Vores ambition var desuden at lave opgaver baseret på konkrete observationer, og således ikke være konstrueret til lejligheden og derved fremstå som sterile intellektuelle udfordringer.

Endelig var det meget vigtigt at overveje hvorvidt en given opgave kunne rettes på en rimelig entydig og systematisk måde. Dette sidste aspekt sikres blandt andet ved at udlevere detaljerede svarark til hver opgave, således at der mange steder slet og ret bare kan skrives et svar. Dette skal naturligvis også sikre, at svaret kan angives uden sproglige forbistringer. Hvis svaret er korrekt, gives fuldt point, og ellers kigger man i udledningen, som kan vedlægges svararket. Det er interessant i denne forbindelse at bemærke, at Attila Szabó fra Ungarn, som vandt IPhO både i 2012 og i 2013, indleverede et nærmest fejlfrit svarark, vedlagt kun ganske få og sparsomme skitser og uddybende udledninger.

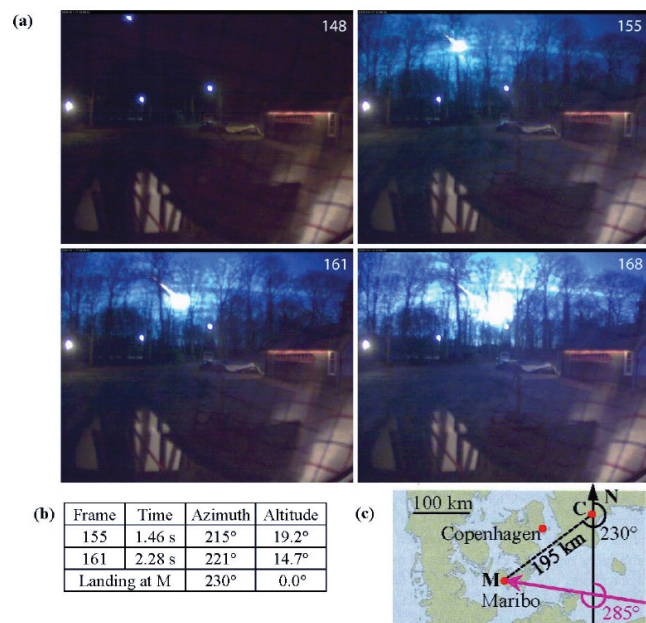
I månederne op til IPhO 2013 snævrede vi opgavefeltet ind. Vindbilen og PET-skanneren blev skrottet, og magnetisk levitation blev til reserveopgaven. I delgrupper lavede vi et utal af iterationer af opgaverne, hvor alverdens små detaljer blev finpudset og justeret. Løsningerne blev skrevet, flere småfejl blev rettet, og alternative løsningsmetoder blev udarbejdet, vendt og drejet og diskuteret endnu engang. Studerende fra KU og DTU testede opgaverne, og i løbet af ugen op til prøven blev opgaverne, som krævet af IPhO, oversat til engelsk, tysk, spansk, fransk og russisk. Endelig blev opgaverne godkendt af alle IPhO-holdlederne under en lang seance i DTUs Oticonsal natten før selve prøven.

Gennemgang af de tre opgaver

Lad os nu tage et nærmere kig på de tre opgaver. Opgaverne med løsninger kan hentes på IPhO 2013 hjemmesiden (<http://ipho2013.dk>), vi skal derfor ikke gå i større tekniske detaljer her, men snarere diskutere ideen bag opgaverne. Det skal bemærkes at deltagerne også fik udleveret et data-ark med en række relevante fysiske størrelser. Det er dog op til deltagerne selv, at finde ud af hvilke konstanter der skal benyttes hvor.

Opgave 1 (9 point): Maribo-meteoritten

Den første opgave omhandlende meteoritten "Maribo" udmærkede sig ved at inddrage store dele af pensum: kinematik, Newtons og Keplers love, varme, SI-enheder, dimensionsanalyse, radioaktivt henfald, stive legemers dynamik, bevarelse af impuls, impulsmoment samt gravitation, energi og arbejde. Faglig garant for opgaven var Lektor Henning Haack fra Geologisk Museum, som kunne redegøre for den spændende historie om fundet af meteoritten, bl.a. ved brug af optagelser fra et svensk overvågningskamera (se figur 1) og adskillige andre fakta om meteoritter.



Figur 1. Data til beregninger af Maribo-meteorittens færd.

Opgaven begynder med en overkommelig øvelse i geometri og kinematik, idet man ud fra billederne

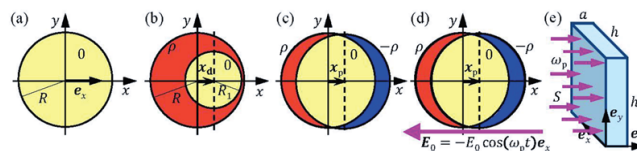
skal beregne Maribos fart. Dernæst skal man beregne hvor hurtigt Maribos fart reduceres med 10 % pga. opbremsning i atmosfære (0,9 s), hvad forholdet er mellem Maribos kinetiske energi og den energi det kræver at smelte den (210). Vi taler her om en sten med radien 13 cm, massen 30 kg, og farten 30 km/s, idet den rammer atmosfæren. Givet at Maribo lægger ud med en temperatur på 200 K og suser gennem atmosfæren med en overfladetemperatur på 1000 K, vil luften omkring den gløde, mens kun den yderste skal af stenen vil smelte. Hvor tyk er mon den skal? En fuld løsning kræver brug af varmeledningsligningen, som ligger uden for pensum. I stedet bad vi om dimensionsanalyse, og for de ca. 5 s turen gennem atmosfæren varer fås en tykkelse på små 1,6 mm.

Næste del omhandler datering af meteoritter ved måling af isotopforhold. Henfaldsprocessen fra $^{87}_{37}\text{Rb}$ til $^{87}_{38}\text{Sr}$ skal opskrives og benyttes til påvisning af en lineær sammenhæng mellem de nutidige forhold $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ og $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ til brug for dateringen ($4,5 \cdot 10^9$ år, kun lidt yngre end Solsystemet). Man mener at den har været en del af kometen Encke, og givet dennes mindste og største afstand fra Solen, skulle Enckes orbitale periode derefter beregnes.

Til sidst spurgte vi, om hvad der ville ske med Jordens rotationsakse, hvis asteroiden som skabte det enorme Chicxulub krater for 65 millioner år siden ramte nordpolen? Hvor meget ville omdrejningstiden ændres, ved direkte nedslag på ækvator, enten radielt eller tangentielt? Hvad er den størst mulige fart med hvilken et objekt bundet til Solen kan ramme Jorden? Især det sidste spørgsmål gav en del hovedbrud, ikke mindst blandt lederne.

Opgave 2 (12 point): Plasmonisk dampgenerator

Dampmaskiner var drivkraften bag den industrielle revolution og udviklingen af termodynamikken. En ny type af slagsen er ved at blive udviklet [5] baseret på bredspektret absorption af sollys i vandige opløsninger af metalliske nanopartikler. Se fx. YouTube videoen på <http://www.youtube.com/watch?v=ved0K5CtmsU>. Faglig garant for denne opgave var lektor Andrei Lavrienko fra DTU Fotonik.



Figur 2. Model for plasmaoscillationen i en nanopartikel.

I opgaven idealiseres det komplekse system som en kugleformet 10-nm-radius sølvnanopartikel indeholdende én fri elektron pr. sølvion. Dernæst beskrives de elektriske egenskaber af denne elektronsky med en effektiv LCR-kreds. Vi opnår dermed en kvalitativ korrekt model inden for IPhO-pensum i elektromagnetisme. Der lægges blødt ud med en beregning af nanopartiklens og elektronskyens masse, densitet, ladning mm. Dernæst beregnes det elektriske felt i et ladningsneutralt område indlejret i en homogent ladet kugle. Dette

resultat leder i næste spørgsmål frem til et udtryk for den genoprettende kraft, som virker på elektronskyen forskudt en lille smule fra sin ligevægtsposition. Så beregnes elektronskyens forskydning i et givet ydre elektrisk felt, og på baggrund heraf og ved brug af elektrostatiske energi, skal den ækvivalente kapacitans C for nanopartiklen bestemmes. Endelig bevirker et tidsharmonisk ydre felt, at systemet bliver dynamisk. Elektronskyens kinetiske energi og den ækvivalente AC-strøm, som sammenholdt med udtrykket for den magnetiske energi i en induktor fører til, at man kan bestemme systemets ækvivalente induktans L .

Næste del omhandler plasmonresonansen i nanopartiklen beskrevet med førnævnte effektive LCR-kreds. Plasmonen eksiteres med en monokromatisk lysstråle, og to dissipationsmekanismer inddrages: Joule-varme via elektron-ion kollisioner, og genudsendelse af spredt lys. Lysspredning ligger uden for pensum, men det klares med dimensionsanalyse af udtrykket for udstrålingen fra en oscillerende elektrisk dipol. Effekten af den absorberede varme kan nu beregnes, og for også at have én kvantemekanisk beregning i opgavesættet, så spørges der om antal plasmonoscillationer per udsendt foton (hele $1,5 \cdot 10^5$).

Sidste del af opgaven omhandler så omdannelsen af lysenergi fra fokuseret lys med intensiteten $1,00 \text{ MW m}^{-2}$ til damp for en koncentration af sølvnanopartikler på $7,3 \cdot 10^{15} \text{ m}^{-3}$ i en rektangulær beholder af størrelsen $10 \times 10 \times 0,1 \text{ cm}^3$. Produktionsraten af damp er $1,9 \text{ g/s}$ og den termodynamiske effektivitet er $0,498$!

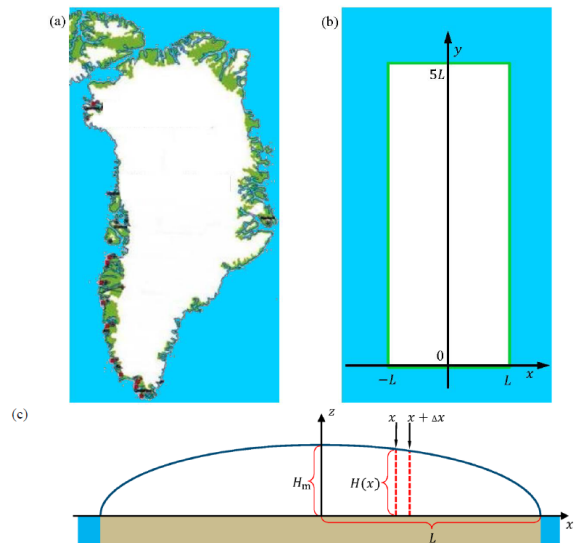
Opgave 3 (9 point): Grønlands iskappe

Baseret på ganske få essentielle ingredienser, skulle man i denne opgave opbygge en model for en simpel rektangulær udgave af Grønlands indlandsis (se figur 3). Under kyndig vejledning fra Christine Schøtt Hvidberg, lektor ved Center for Is og Klima på NBI, var opgaven konstrueret som den mest direkte vej til at forstå princippet bag aldersbestemmelsen af lagene i en af de berømte iskerner, som er blevet boret tæt på indlandsisens midte.

Først betragtes isen som et hydrostatisk system, i hvilket man skulle bestemme trykket, og dernæst den vandrette kraft på et lodret tværsnit, skåret fra syd mod nord. Denne kraft falder med isens højde ud mod østkysten, og ved at balancere en infinitesimal kraftforskel på to nabotværsnit med friktion fra bunden, udtrykt som en kendt spænding ganget på det infinitesimale bundareal, ender man med et udtryk for højdeprofilen, som er vist nederst i figur 3. Man finder at maksimalhøjden midt på isen er proportional med kvadratroden af afstanden ud til kysten, og ved integration findes isvolumenet at være proportionalt med denne afstand i potensen $5/2$.

På længere tidsskalaer betragtes isen bedre som en usammentrykkelig væske. Snefald tæt på midten af isen bliver til is, som flyder ud mod kysten og knækker af som isbjerge. Man bliver bedt om ud fra massebevarelse at bestemme den lodrette hastighed af en ispartikel tæt

på midten af isen, og der spørges til ispartiklens dybde som funktion af afstanden fra midten. Endelig udledes en formel for isens alder i en given dybde, og man bliver ført gennem analysen af målte koncentrationer af iltisotoperne ^{18}O og ^{16}O , og ender med at kunne bestemme temperaturændringen ved overgangen fra istid til interglacial tid.



Figur 3. En simpel model af Grønland og indlandsisen.

Til slut bliver man bedt om at bestemme den gennemsnitlige globale havstigning, som ville resultere fra en total smeltning af indlandsisen, nemlig $8,8 \text{ m}$. Smelter indlandsisen, mister man imidlertid også det relative højvande, som indlandsisens gravitationelle tiltrækning yder på de nærliggende vandmasser [6]. Ved at betragte isen som en punktførmig snebold, kan man beregne dens effekt på potentialfladen og finde frem til det overraskende resultat, at havstanden i København for tiden er hele $4,5 \text{ m}$ højere end hos Grønlands antipoder.

Afvikling af den teoretiske prøve

Tirsdag den 9. juli gik det løs. 374 spændte deltagere mødte op på Gefion Gymnasium i Øster Voldgade, København, og fik hver især anvist sin plads rundt i den imponante rotunde, som i dagens anledning var forvandelt til en 'katedral af fysik', med det smukke Foucault pendul udspændt som fra selveste himmelhvælvet til at holde takten. Bordene var opstillet med tilpas afstand, og deltagere med samme modersmål var adskilt. Ved lyden af Mikkels fløjte åbnedes kuverterne og kort efter sænkede der sig en dyb og 5 timer lang stilhed.

Efter 5 timer lød fløjten atter. Blyanterne blev lagt, og opgaverne samlet ind og kørt til hovedkvarteret ved DTU. Deltagerne fik udleveret en frokost, som de kunne sidde og nyde udenfor i det gode vejr, mens de udvekslede frustrationer over de forbistrede opgaver.

Retning, pointgivning og den store forhandling

Så snart opgaverne var ankommet til hovedkvarteret i Oticonsalen på DTU, blev de alle indskannet, originalen lagt i et sikkert arkiv, og kopier printet ud til rettere og ledere. Retningen foregik i tre hold, ét til hver opgave. Et hold bestod af syv par erfarne studerende, ansatte fra DTU og NBI, samt den ansvarlige for den enkelte

opgave og dennes præsentation for lederne mandag aften. De tidligere omtalte testbesvarelser fungerede dagen før som generalprøve for retterne.

På opgaverne var der angivet hvor mange delpoint hvert spørgsmål var værd. Retterne checkede formler, geometri, trigonometri, fornuftig behandling af tal og grafer, afrunding og fysiske enheder, og foretog passende fradrag for hver enkelt lille fejl. Efter retning af nogle få opgaver sammenlignede man erfaringer og skrev videre på det udkast til en rettevejledning, som allerede forelå. Dette gjorde man nogle gange, hvorefter en version gik videre til hvert lands ledere, så også de kendte vores rettespolitik, altså hvilke delelementer tildeles hvor mange points, og hvilke fradrag laves for hvilke fejl. Efterhånden som vi opdagede nye interessante og uforudsete fejl og genveje, måtte vejledningen atter opdateres, og først da opgave nr. 374 var rettet, var vejledningen komplet, og meget omfattende. Ville et nyt løsningsforslag mon overhovedet kunne eksistere?



Figur 4. Dyb koncentration i rotunden på Østervoldgade.

Retningen af samtlige teoriopgaver tog to meget lange dage. Sideløbende med vores retning, havde lederne rettet deres eget holds opgaver, og torsdag aften udvekslede man så point. Rettehold og ledere havde nu fredagen til at studere hinandens pointtildelinger, og om lørdagen stod så det endelige slag, hvor ledere og rettere mødtes til en forhandling om de endelige point. Hvert lands ledere fik et kvarter med det relevante rettepar, og kun når vi havde givet færre point end dem, var noget åbent for diskussion. Disse tilfælde var der heldigvis ikke så mange af, og som regel kunne man hurtigt henvise til at 'sådan havde vi rettet dem alle'. Ind imellem kunne de dog påpege, at vi havde overset noget, eller forklare hvordan et givent regnestykke nok skulle forstås, givet det der stod skrevet i kladden på eget modersmål. Kun i sjældne tilfælde, og netop der hvor lederne anede, at det kunne gøre en forskel i medaljer, gik bølgerne helt op over kanten, når der blev kæmpet om de sidste brøkdele af et point.

Resultater og lidt statistik

Den endelig pointfordeling for hver eneste deltager blev godkendt af lederne på *IPhO International Board Meeting* søndag formiddag. Topscorer blev Attila Szabó (Ungarn) med 29,5 point ud af 30 mulige (98 %), med

hele 1,6 point ned til andenpladsen, Zhang Chengkai (Kina). Attila blev da også den samlede vinder af IPhO 2013. Hele 35 deltagere scorede 24 point (80 %) eller mere, bl.a. alle 5 fra Kina og Singapore, 3 fra Korea og USA, og 2 fra Ungarn, Rusland, Thailand, Vietnam og Israel. Bedste danske teoretiker scorede 12,2 point (41 %). Fordelt på de tre opgaver kan vi bemærke, at 11 deltagere scorede 90 % eller mere i Opgave 1, 15 deltagere scorede 90 % eller mere i Opgave 2, mens hele 29 deltagere scorede 90 % eller mere i Opgave 3. I det hele taget må deltageres resultater aftvinge respekt. Husk på, at deltagerne kun havde fem timer til rådighed uden adgang til andre hjælpemidler end en lommeregner. Det hører dog med til historien, at ikke alle deltagere var lige stærke: 18 af dem scorede 10 % eller mindre, med sølle 0,2 point som bundskraberen. Det dårligste resultat fra dansk side var en score på 6 point (20 %).

Ud fra en ren statistisk betragtning var teorisættet en succes, da hele pointskalaen kom i brug. Men dertil kommer, at både deltagerne og lederne udtrykte deres begejstring for opgaverne ved afslutningsfesten. Førstnævnte har haft livlige kommentarer til dem på deres IPhO facebookside lige siden, mens sidstnævnte så sent som ved IPhO 2014 i Kazakhstan gentog deres ros overfor de danske holdledere.

For os i teoriopgavekommissionen var det en stor oplevelse at udarbejde teorisættet og se det blive forsøgt løst af 374 elitegymnasieelever fra hele verden. Vi lærte tilmed en del god fysik undervejs.

Litteratur

- [1] Henrik Bruus og Niels Hartling (2013), Den Internationale Fysikolympiade i Danmark 2013, *KVANT* nr. 1, marts 2013
- [2] Henrik Bruus og Niels Hartling (2013), Fysikolympiaden *IPhO 2013* blev en kæmpesucces, *KVANT* nr. 3, september 2013
- [3] IPhO 2013, opgaver og løsninger, <http://www.ipho2013.dk/ipho2013-problems.htm>
- [4] IPhO hjemmesiden, <http://ipho.phy.ntnu.edu.tw/>
- [5] Z. Fang *et al.*, *Nano Letters* **13**, 1736 (2013).
- [6] S. Battersby, *New Scientist* **2915**, 6 May (2013).



Henrik Bruus er professor i teoretisk fysik ved Institut for Fysik, DTU. Han var næstformand for IPhO 2013 og formand for teoriopgavekommissionen.

E-mail: bruus@fysik.dtu.dk.



Jens Paaske er lektor i teoretisk fysik ved Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet. Ved IPhO 2013 var han medlem af styregruppen og teoriopgavekommissionen.

E-mail: paaske@nbi.ku.dk.