

f Fysikaktuell

NR 2 • MAJ 2016



Tema – Livets fysik

ISSN 0283-9148

Medicinsk avbildning
Tjerenkovstrålning

Sid 6

Porträtt:
Thomas Laurell

Sid 10

Avhandlingen:
DNA i tunna
kanaler

Sid 26

Svenska Fysikersamfundet

Fysikaktuellt ges ut av Svenska Fysikersamfundet som har till uppgift att främja undervisning och forskning inom fysiken och dess tillämpningar, att föra fysikens talan i kontakter med myndigheter och utbildningsansvariga instanser, att vara kontaktorgan mellan fysiker å ena sidan och näringsliv, massmedia och samhälle å andra sidan, samt att främja internationell samverkan inom fysiken.

Ordförande: Anne-Sofie Mårtensson,
anne-sofie.martensson@hb.se

Sekreterare: Joakim Cederkäll,
joakim.cederkall@nuclear.lu.se

Skattmästare: Lage Hedin, lage.hedin@physics.uu.se

Adress: Svenska Fysikersamfundet,
Institutionen för fysik och astronomi,
Uppsala universitet,
Box 516, 751 20 Uppsala

Postgiro: 2683-1

E-post: styrelsen@fysikersamfundet.se

För medlemsfrågor, kontakta Lena Jirberg Jonsson, 08-411 52 80
eller medlemsregistret@fysikersamfundet.se

Sektioner

Inom Fysikersamfundet finns ett antal sektioner som bland annat ordnar möten och konferenser, se www.fysikersamfundet.se för mer information.

Kosmos

Fysikersamfundet ger ut årsskriften Kosmos. Redaktör är Leif Karlsson, leif.karlsson@fysik.uu.se.

Fysikaktuellt

Fysikaktuellt utkommer med fyra nummer per år, och distribueras till samfundets medlemmar samt till alla gymnasieskolor med naturvetenskapligt eller tekniskt program. Redaktionen består av: Sören Holst, Margareta Kesselberg, Johan Mauritsson, Dan Kiselman och Elisabeth Rachlew.

Ansvarig utgivare är Anne-Sofie Mårtensson.

Kontakta redaktionen via: fysikaktuellt@fysikersamfundet.se

För insänt, ej beställt material ansvaras ej.

Medlemskap

Svenska Fysikersamfundet har ca 800 individuella medlemmar samt stödjande medlemmar (företag och organisationer) och stödjande institutioner.

Årsavgiften är 400 kr, dock 250 kr för pensionärer och forskarstuderande, samt 100 kr för grundutbildningsstudenter.

Stödjande medlemskap, vilket ger rabatterat pris på annonser i Fysikaktuellt, kostar 4000 kr per år.

Bli medlem genom ansökan på: <http://www.fysikersamfundet.se/formular.html>

Omslagsbild: Humla som flyger. Foto: Johan Mauritsson.

Layout: Göran Durgé

Tryck: Trydells, Laholm 2016

Utgivningsdatum för Fysikaktuellt

Nr 3 – 2016, manusstopp 4 sept. Hos läsaren 26 sept.

Nr 4 – 2016, manusstopp 10 nov. Hos läsaren 5 dec.

Stödjande medlemmar

- ALEGA Skolmateriel AB
www.alega.se
- Gamdata Instrument AB
www.gamdata.net
- Gleerups Utbildning AB
www.gleerups.se
- Laser 2000
www.laser2000.se
- Myfab
www.myfab.se
- VWR International AB
www.vwr.com

Stödjande institutioner

- Chalmers tekniska högskola – Institutionen för fysik
- Chalmers tekniska högskola – Institutionen för rymd- och geovetenskap
- Chalmers tekniska högskola – Institutionen för mikroteknologi och nanovetenskap – MC2
- Göteborgs universitet – Institutionen för fysik
- Högskolan i Halmstad – IDE-sektionen
- Institutet för rymdfysik, Kiruna
- Karlstads universitet – Institutionen för ingenjörsvetenskap och fysik
- Kungliga tekniska högskolan – Institutionen för fysik
- Kungliga tekniska högskolan – Institutionen för teoretisk fysik
- Kungliga tekniska högskolan – Institutionen för tillämpad fysik
- Linköpings universitet – Institutionen för fysik, kemi och biologi (IFM)
- Linköpings universitet – Institutionen för naturvetenskap och teknik (ITN)
- Lunds universitet – Fysiska institutionen
- Lunds universitet – Institutionen för astronomi och teoretisk fysik
- Mittuniversitetet – Institutionen för naturvetenskap, teknik och matematik
- Nordita, Nordic Institute of Theoretical Physics
- Stockholms universitet – Fysikum
- Uppsala universitet – Institutionen för fysik och astronomi

Glöm inte att anmäla adressändring till
medlemsregistret@fysikersamfundet.se

Innehåll

Tema – livets fysik

- 3 SIGNERAT
Jonathan Weidow
- 4-5 AKTUELLT/NOTISER
- 6-8 TJERENKOVSTRÅLNING
MEDICINSK AVBILDNING
Johan Axelsson
- 9 ANNONS
GLEERUPS
- 10-11 PORTRÄTT AV
THOMAS LAURELL
Margareta Kesselberg
- 12-13 BILDSTYRD CANCER-
BEHANDLING
*Mikael Karlsson
Patrik Brynolfsson*
- 14-16 BIOFLUIDMEKANIK
Anders Eklund
- 17-19 PET
Christian Bohm
- 20-21 PROTONSTRÅLNING
Svante Jonsell
- 22-24 STRÅLRISKER
*Lennart Johansson
och Jonna Wilen*
- 25 INTERVJU AV FYSIK-
STUDENT FRÅN UMEÅ
- 25 ANNONS
FYSIKDAGARNA
27-29 OKTOBER 2016
- 26-27 AVHANDLINGEN
DNA I TUNNA KANALER
Erik Werner
- 28-29 INTERVJU ERIK WERNER
Margareta Kesselberg
- 29 ANNONS
NATUR&KULTUR
- 30-31 WALLENBERGS FYSIKPRIS
FINALEN
- 32-34 VARDAGENS FYSIK
"EN PLATS I SOLEN"
Max Kesselberg
- 35 FYSIKALISKA LEKSAKER
EKVIVALENSPRINCIPEN
Per-Olof Nilsson

Tallinnorientering!

Sedan 2013 har finalen i Wallenbergs fysikpris, den svenska uttagningen till den internationella fysikolympiaden (IPhO), arrangerats av Fysikcentrum Göteborg, och genomförts i två etapper. I den första har finalisterna efter tre dagar med föreläsningar, laborationer och studiebesök utfört fem experimentella uppgifter. I den andra etappen har de fått lösa fem teoretiska uppgifter. Den sammanlagda poängen har sedan avgjort vilka som erbjudits att representera Sverige vid IPhO. Eleverna har bött ihop i en stugby och vi har ordnat olika kvällsaktiviteter och haft fokus på att upplevelsen ska bli positiv och skapa lust till fortsatt fysiklärande.

Nytt för i år var att alla våra finalister blev inbjudna att delta i den öppna finsk-estniska fysikolympiaden. Denna är kvalificeringstävling till IPhO för, förutom Finland och Estland, även Lettland. Olympiaden hålls på Tallinns tekniska universitet och består av två dagars tävlande och en dag med studiebesök och avslutningsceremoni. Att ersätta vår egen teoriapp med denna olympiad, och låta våra finalister få chansen att umgås och tävla med sina motsvarigheter på andra sidan Östersjön var mycket lockande, men samtidigt lite skrämmande. Svenska elever uppvisar generellt sett sämre kunskaper i såväl matematik som naturvetenskap än vad finska, estniska och lettiska elever gör. Vi gjorde därför en kompromiss och lät våra finalister delta i hela olympiaden, men vi tog bara med resultatet från den andra dagens teoriuppgifter i vår finaltävling och fick möjlighet att styra så att inte de allra svåraste frågorna skulle komma under den andra dagen. Av de 15 elever som tävlade i Göteborg var det 13 som åkte med till Tallinn och ytterligare en elev deltog på distans.

Totalt tävlade 67 elever i Tallinn. I överlägsen topp kom två ester följda av två finländare som alla föräddes med varsin guldmedalj. Till vår stora glädje återfanns två svenska elever (Aletta Csapo och Joakim Blikstad) bland de åtta silver-



medaljörerna, och hela fyra bland de 12 bronsmedaljörerna. Det var alltså tydligt att de svenska gymnasister som är bäst på fysik står sig väl jämfört med de i våra grannländer kring Östersjön. Arrangemanget i övrigt var mycket trevligt. Eleverna fick göra en stadsrundvandring och ett studiebesök på ett forskningslaboratorium och medaljceremonin hölls i rådhuset. Ett annat inslag var en orienteringstävling. Vid varje kontroll skulle de tävlande kombinera en graf med någon av de minst sagt besvärliga matematiska funktioner de hade fått ut på papper och varje fel gav ett tidstillägg. Trots ett ihärdigt regnande tyckte eleverna att det var mycket roligt.

Som ledare är jag mycket nöjd med det upplägg som Wallenbergs fysikpris hade i år. Att jag engagerar mig i tävlingen grundas inte i en önskan om att våra svenska elever ska prestera bättre än något annat lands deltagare på IPhO utan i en vilja att öka intresset för fysik med förhoppning om att detta omsätts i framtida studier. En tidig utvärdering visar att även våra elever är mycket nöjda. Veckan i Göteborg fyller en viktig funktion både socialt och som förberedelse för såväl experimentella som teoretiska uppgifter. Som en tävlande spontant uttryckte det till en kamrat: "Hemma ses jag som lite konstig och ingen förstår vad jag gör, men här är alla precis som jag".

Jonathan Weidow

JONATHAN WEIDOW, CHALMERS
STYRELSELEDAMOT I FYSIKERSAMFUNDET



Lärarfortbildning

Den svenska lärarkursen på CERN 2016 genomförs söndag 30 oktober till fredag 4 november 2016. På programmet står föreläsningar, studiebesök och hands-on workshops som ger deltagarna en introduktion till partikelfysik, kosmologi m.m. Kursen är gratis, deltagarnas skolor får stå för resa (bokas individuellt) och kost och logi (är förbokad för deltagarna på CERN hostel). Max 30 deltagare. Anmälan via resurscentrum@fysik.lu.se. Läs mer: <http://www.fysik.org/resurser/gymnasiet/cern/>

Anmäl din gymnasieskola till Lise Meitnerdagarna 2016!

Den 25-26 november 2016 kommer Lise Meitnerdagarna att hållas på AlbaNova i Stockholm och på agendan står föreläsningar, utställning och experiment på Vetenskapens Hus. Band annat kommer astrofysikern Rahman Amanullah att berätta om universums expansion och mörk energi och författaren Hedvig Hedqvist kommer berätta om kvinnan som står bakom namnet till dessa dagar; Lise Meitner och problematiken att vara kvinnlig fysiker i en mansdominerad sfär. På kvällen kommer det även att anordnas en festlig middag där elever får samtala med inbjudna personer från fysikens värld!

På vår hemsida www.lisemeitnerdagarna.se kan man fortfarande anmäla sig – fram till den 17 juni så se till att göra det snart! Platserna är begränsade och det är först till kvarn som gäller!

OBS! Har du ett projekt/event som du vill ställa ut och visa för de gymnasieelever som deltar kan du anmäla dig via hemsidan.



Vänligen,
Arrangörgruppen

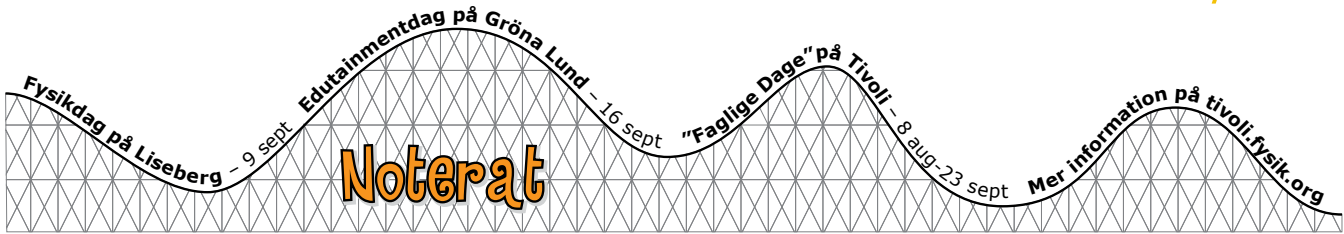
International Physicists' Tournament

För tredje året i rad deltog ett lag från Chalmers i International Physicists' Tournament (IPT). Denna gång gick tävlingen av stapeln i Paris 17/4-22/4. Laget, bestående av Carl-Joar Karlsson, Åke Andersson, Hampus Lane, Oskar Larsson, Magdalena Eriksson och Torbjörn Nilsson, slutade på en 9:e plats. Vinnare blev Ecole Normale Supérieure Lyon (Frankrike), följda av studenter från University of Warsaw (Polen), och Voronezh State University (Ryssland). Nästa år kommer IPT att arrangeras i



Göteborg strax före påsk. Vi välkomnar andra svenska universitet och högskolor att delta i en nationell uttagning som avges under hösten 2016. Mer informa-

tion kommer snart på hemsidan <http://iptnet.info>. Intresserade uppmanas kontakta sweden@iptnet.info.



Den 27-29 oktober kommer "Fysikdagarna 2016" att äga rum vid Chalmers och Göteborgs universitet

FA får tillfälle att under en kaffepaus samtala med prefekten för Institutionen för fysik vid Chalmers, professor Peter Apell, för att höra hur det går med planeringen inför höstens möte.

Hur löper det på med planeringen?

– Det är full fart, berättar Peter Apell för FA (mars 2016). Vi är redan tre personer som jobbar regelbundet och periodvis ganska intensivt med planeringen.

Finns det några särskilda ämnen ni tänker lyfta?

– Vi vill att alla ämnen skall få plats och konceptet är att främst unga forskare skall lära sig mer om andra fysikområden än deras eget, berättar Peter.

Hur tänker ni skapa förutsättningar för det?

– Vi kommer att jobba hårt på att sektionernas program skall ha öppna föreläsningar där alla kan delta om de är

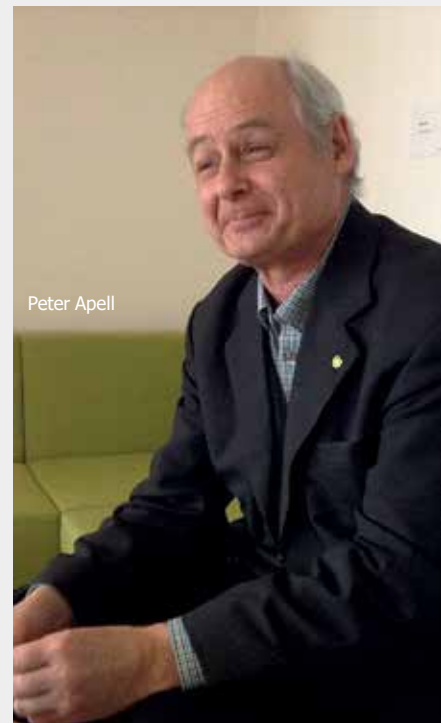
intresserade. Det betyder att vi organisatoriskt måste se till att det finns möjligheter att praktiskt delta vid sektionernas program, säger Peter.

Vi hoppas också skapa förutsättningar för att höstens fysikdagar skall ge unga forskare och doktorander möjligheter till att börja bygga ett personligt nätverk med andra verksamma fysiker i landet. Vi vill ge plats för "broskapande" aktiviteter under höstens fysikdagar.

Dessutom hoppas vi med ett intressant och välmatat program kunna locka många fysiker till Göteborg.

Hur kan man uppdatera sig och få fort-löpande information?

– Gå in på Fysikdagarnas hemsida fysikdagarna.se eller beställ nyhetsbrevet till din mejladress hälsar Peter och avslutar med att önska alla hjärtligt välkomna till Göteborg i oktober.



Peter Apell

Besök samfundets hemsida
www.fysikersamfundet.se



Medicinsk avbildning med hjälp av Tjerenkov-strålning

– ett fenomen med många tillämpningar

”Det råder inget tvivel om att användbarheten av denna strålning kommer att utvidgas snabbt i framtiden”¹. Så avslutade Pavel Tjerenkov sin Nobelföreläsning efter att han dagen innan erhållit Nobelpriset i fysik tillsammans med Ilya Frank och Igor Tamm 1958. Idag, mer än ett halvt sekel efter denna förutsägelse kan man undra om han hade rätt.

När uppstår Tjerenkov-ljus?

Tjerenkov-ljus uppstår då en laddad partikel färdas snabbare än ljusets hastighet i ett dielektriskt medium. Effekten påminner om det som händer då ett flygplan bryter ljudbarriären och en ljudbang uppstår. I fallet med Tjerenkov-ljus är det en laddad partikels hastighet som överstiger ljusets hastighet i mediet varpå en ljusblixt uppstår. För att detta ska ske krävs att partikelns kinetiska energi är mycket hög. Energin som en viss partikel måste ha för att Tjerenkov-ljus ska uppstå brukar kallas för tröskelenergin. Vad denna är beror på brytningsindex i mediet där partikeln färdas och partikelns massa. Tabell 1 anger tröskelenergien i vatten för ett antal olika typer av partiklar.

partikeln passerar förbi och kan därför behandlas som elektriska dipoler.

Om partikeln färdas med en låg hastighet kommer polariseringen i materialet att vara symmetrisk. Detta gör att alla bidrag från dipolerna tar ut varandra vilket makroskopiskt sett får till följd att ingen strålning sänds ut, figur 1A. Om den laddade partikeln å andra sidan rör sig snabbare än ljusets hastighet i det ma-

teriet kommer samma symmetri inte att uppstå, figur 1B. Ljus skickas då ut från dipolerna längs med den bana som partikeln färdas och det utsända ljuset kan interferera konstruktivt. Detta sker i en vinkel där vågfronterna är i fas vilket beror på den laddade partikelns energi, figur 1C.

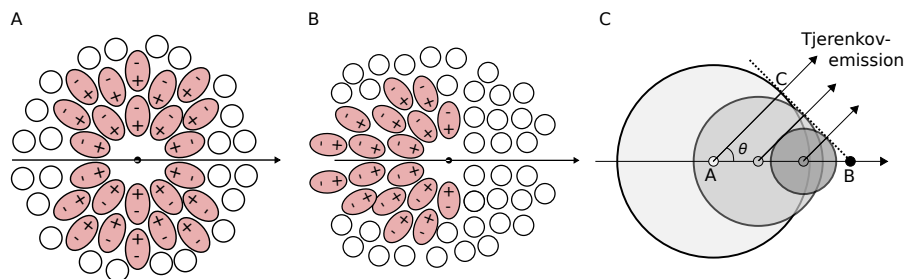
I och med att Tjerenkov-ljuset emitteras i en viss vinkel bildas en kon av ljus

Partikel	Vilomassa (MeV/c ²)	Tröskelenergi för Tjerenkov-emission då $n=1,33$ (MeV)
Elektron	0,511	0,264
Muon	105,7	54,6
Tau	1,777	0,918
Proton	938,3	484,9

Tabell 1. Tröskelenergien för att Tjerenkov-ljus skall uppstå för några partiklar som färdas i vatten.

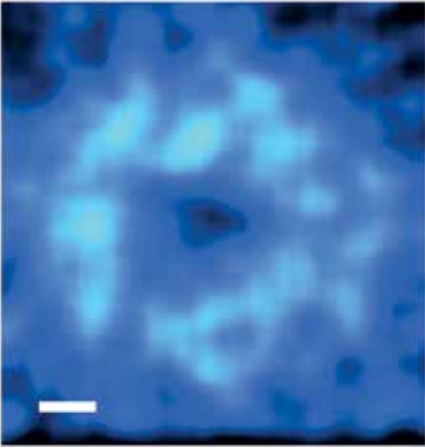
Hur uppstår Tjerenkov-ljus?

När en laddad partikel färdas genom ett dielektriskt material kommer dess laddning att påverka elektronmolnen hos de atomer som ligger nära partikelns bana. Laddningarna i elektronmolnen kommer att repelleras (eller attraheras) av den negativt (eller positivt) laddade partikeln. Detta gör att materialet blir polariserat. Efter att partikeln passerat återgår elektronmolnen till sitt ursprungliga tillstånd. Elektronmolnen kommer med andra ord börja oscillera när den laddade



Figur 1. A) Elektronmolnens symmetri då en laddad partikel färdas med måttlig hastighet i ett medium. B) Elektronmoln i ett dielektriskt medium då en laddad partikel färdas med hastighet högre än ljusets i det givna mediet. C) Ljus upp-

står längs med partikelns bana och vågfronterna för varje ljuspuls kan interferera konstruktivt i en viss vinkel som beror på partikelns kinetiska energi och mediets brytningsindex.



Figur 2. Tjerenkov-ljusets strålkon i genomskärning, detekterat genom att fotografera rakt in i en elektronstråle med ca 18 MeV elektroner (streck indikerar 1 cm)².

centrerad kring partikelns färdriktning. Denna kan man detektera och i figur 2 visas ett exempel där en elektronstråle med medelenergi runt 18 MeV passerar en vattentank. Bilden är tagen med en vanlig kamera genom att titta rakt in i strålen. Även om Tjerenkov-ljuset är svagt ser man tydligt en ring som påvisar strålkonens genomskärning².

Ofta associerar många Tjerenkov-ljus med blått ljus, men egentligen är ljuset bredbandigt och antalet fotoner som sänds ut vid en given våglängd skalar som $1/\lambda^2$. Tjerenkov-ljuset är därför starkast i det blå området men innehåller också ljus med längre våglängder.

Detektion av högenergetiska partiklar med Tjerenkov-ljus

I och med att fotomultiplikatorn gjorde sitt intåg skapades nya förutsättningar för att detektera det svaga Tjerenkov-ljuset. Under 1940-50-talen lades mycket arbete ner på att utveckla instrument för att detektera högenergetiska laddade partiklar med hjälp av Tjerenkov-ljus. Speciellt intressant var att man utnyttjade Tjerenkov-ljusets vinkelberoende för att bestämma partiklarnas kinetiska energi. Partikeldetektion baserat på Tjerenkov-ljus är lika aktuellt idag, särskilt i och med 2015 års nobelpris. I de detektorer som

användes för att upptäcka neutrino-oscillationer fylls jättelika hålrum djupt nere i berget med vatten. När neutriner passerar vattnet genereras myoner och elektroner. Dessa partiklar är laddade och kan avge Tjerenkov-ljus under sin färd genom vattentanken.

Tjerenkov-ljus som förklaring till en del oönskade effekter

Även om Tjerenkov-ljuset är väldigt svagt så kan dessa fotoner faktiskt ses med blotta ögat. Detta insåg man efter att bl.a. Apollo-astronauter rapporterat om att de såg blå och vita ljusblixtar om de blundade under sin färd runt jorden³. Efter gediget experimentellt arbete kunde man till slut dra slutsatsen att det var Tjerenkov-ljus som genererades då högenergetiska partiklar färdades genom ögonkroppen och att ljuset som genererades var tillräckligt starkt för att kunna detekteras av ögats fotoreceptorer.

Samma fenomen har även rapporterats under extern strålbehandling av cancersjuka patienter. Denna behandlingsmetod går ut på att bestråla tumörer med högenergetiska gamma- eller elektronstrålar. En del patienter klagade på ljusblixtar under pågående behandling. Förklaringen som erbjöds patienterna var att strålningen stimulerade nerver som gjorde att man uppfattade detta som blixtar. Newman et al. insåg dock, baserat på studierna kring Apollo-astronauterna, att förklaringen ändå låg i att det var ett fysikaliskt ljusfenomen, dvs. Tjerenkov-ljus³.

Medicinska strålfysiker är idag väl medvetna om Tjerenkov-fenomenet eftersom det är en vanlig bruskälla då gamma- eller elektronstrålarna som används för strålterapi ska kalibreras. Denna kalibrering görs med scintillationsdetektorer som sveps genom strålen för att bestämma vilken dos som levereras. Materialet i detektorn är ofta plast vilket typiskt har ett brytningsindex runt 1.5 som därför ger upphov till Tjerenkov-ljus. Detta ljus lägger sig då som en bakgrund till scintillationerna och kan påverka noggrannheten av dosbestämningen.

Tjerenkov-ljus för medicinsk diagnostik

Att använda Tjerenkov-ljus för medicinsk diagnostik är idag ett nytt och aktivt forskningsfält. Dock finns det rapporter redan från 70-talet där man tagit influenser från partikel-detektorerna och gjort studier på upptag av radionukliden ^{32}P i tumörer i ögat. Det har visats att ^{32}P tas upp till en högre grad i snabbt delande celler jämfört med normala celler. Snabbt delande celler är ett karaktäristiskt drag för tumörer och således användes ^{32}P för att diagnosticera cancer. ^{32}P sönderfaller genom att bl.a. sända ut elektroner med en max-energi på ca 1,7 MeV. Detta är klart över tröskelenergin för att Tjerenkov-ljus skall genereras. Detta insåg Burch som i en kort notis i Nature 1971 rapporterade om att man kunde detektera Tjerenkov-strålningen med hjälp av en fotomultiplikator-detektor kopplad till en optisk fiber i kontakt med ögat⁴.

Medicinsk diagnostik med hjälp av Tjerenkov-ljus fick en pånyttfödelse 2009 då Robertson tillsammans med sina kollegor visade att positron-emitterande kontrastmedel genererar Tjerenkov-ljus i vävnad⁵. Positron-emitterande kontrastmedel används vanligen vid Positron Emissions Tomografi (PET) där den vanligaste radionukliden är ^{18}F . Denna publikation skapade ett stort intresse för Tjerenkov-ljus inom preklinisk avbildning och kort härefter visades det att flera radionuklider, dels sådana som används för PET-avbildning men även sådana som används för radionuklid-terapi, ger upphov till Tjerenkov-ljus.

Många av tillämpningarna idag återfinns inom preklinisk avbildning där försöksdjur som genomgår terapier eller cancerstudier avbildas med hjälp av bl.a. Tjerenkov-ljus. Flera forskare hävdar att fördelen med Tjerenkov-baserad avbildning är att många djur kan avbildas vid samma bildtagning vilket medför högre genomströmning och minskad resursåtgång. Trots detta är det viktigt att inse att Tjerenkov-ljus emitteras i det synliga området och är till hög grad påverkat av vävnadens optiska absorption och spridande egenskaper.

Det finns dock några få kliniska tillämpningar, dvs. detektion av Tjerenkov-ljuset i samband med terapier av cancer hos människor. Forskare i USA har under flera år utvecklat metoder för att avbilda elektron- och gammastrålar i samband med extern strålterapi. Detta dels för att kalibrera terapi-dosen, som komplement till scintillator-baserad kalibrering ovan, men också för att monitorera stråldos på huden hos bröstcancerpatienter. Dessa patienter behandlas genom att bestråla brösttumörer från olika riktningar. En komplikation som kan uppstå är att stråldosen som avges till huden blir för hög och då kan framkalla irritationer. Med hjälp av Tjerenkov-ljuset kan man nu avbilda exakt var strålen bestrålar kroppen och möjligtvis också bedöma om ytdosen är för hög på ett visst ställe. Detta ger ett verktyg för att monitorera strålbehandling i realtid.

Vi har inriktat oss mot behandling av cancer i ögat. Ungefär 100 personer får årligen en typ av cancer som börjar växa i ett av ögats lager. Den vanligaste behandlingsformen är att man placerar radioaktiva små diskar på utsidan av ögat. Dessa

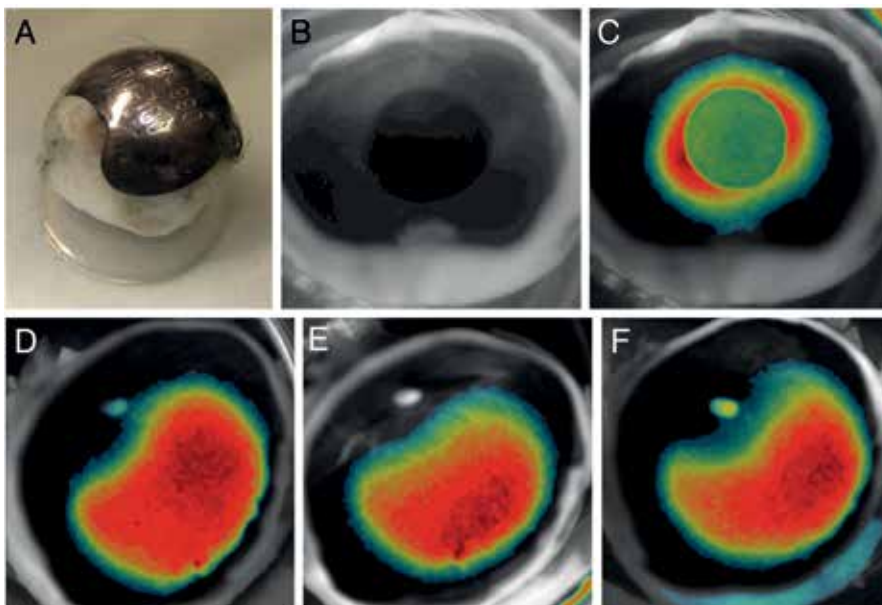
diskar består av frön av radionukliden ^{106}Ru . Diskarna emitterar högenergetiska elektroner från ^{106}Ru 's sönderfallskedja vilka i sin tur bestrålar tumören under ca 3-4 dagar. Eftersom tumörerna ofta sitter på baksidan av ögat är det idag svårt att exakt veta hur disken ska placeras i förhållande till tumören. Alternativ finns som använder t.ex. ultraljud men hjälpmedel som avbildar disken direkt saknas. Eftersom elektronerna som inducerar behandlingseffekten har hög energi (ca 3,5 MeV) färdas elektronerna snabbare än ljusets hastighet i ögonkroppen. Detta utnyttjar vi för att med en kamera detektera Tjerenkov-ljus genom ögats lins och på så sätt avgöra var disken är placerad. I experimentella studier användes grisögon med simulerade tumörer av melanin (vanligt förekommande i melanom). Diskarna placerades precis som i klinik och en känslig kamera detekterar Tjerenkov-ljuset som uppstår i ögonkroppen. Exempel på dessa bilder visas i Figur 3.

Tjerenkov-baserad positionering av radioaktiva diskar under behandling en enkel metod och det enda som egentligen krävs för att detektera ljuset är en känslig

kamera. Vi undersöker nu om Tjerenkov-ljuset kan göra så att diskarna positioneras bättre och i så fall om detta medför att man får en mer effektiv behandling.

Avslutningsvis kan man konstatera att Pavel Tjerenkov's förutsägelse, om att användbarheten av denna strålning skulle utvidgas i framtiden, faktiskt stämde. Det är fascinerande att detta ljus har påträffats inom vitt skilda områden där det ibland setts som något störande men där det också ibland varit avgörande för stora upptäckter. Antalet tillämpningar är stort och de senaste tillskotten är inom cancerbehandling. Den fråga som driver forskningen inom Tjerenkov-baserad medicinsk diagnostik är om det svaga ljuset kan komma patienterna till nytta. Jag är inte lika bra på att förutsäga framtiden som Pavel Tjerenkov, men nog finns det potential!

JOHAN AXELSSON
LUNDS UNIVERSITET



Figur 3. Tjerenkov-baserad guidning av positionering av radioaktiva diskar för behandling av ögon melanom. A) En radioaktiv disk placerad på utsidan av grisöga. B) Vitljusbild tagen in i ögat där linsen tagits bort. C) Tjerenkov-ljus

från den radioaktiva disken där tumören attenuerar det optiska ljuset mer och således skapar en skugga. D-F) Radioaktiv disk vid olika positioner för att testa konceptet att använda Tjerenkov-ljus för guidning av disk-placering⁶.

Referenser

1. Tjerenkov, P. A. Radiation of particles moving at a velocity exceeding that of light, and some of the possibilities for their use in experimental physics. (1958). Nobelprize.org. Nobel Media AB 2014. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1958/Tjerenkov-lecture.html (11 Apr 2016.)
2. Axelsson, J., Davis, S. C., Gladstone, D. J. & Pogue, B. W. Tjerenkov emission induced by external beam radiation stimulates molecular fluorescence. *Medical physics* **38**, 4127–4132 (2011).
3. Newman, F. et al. Visual sensations during megavoltage radiotherapy to the orbit attributable to Tjerenkov radiation. *Medical physics* **35**, 77–77 (2008).
4. Burch, W. M. Tjerenkov light from ^{32}P as an aid to diagnosis of eye tumors. *Nature* **234**, 358–358 (1971).
5. Robertson, R. et al. Optical imaging of Tjerenkov light generation from positron-emitting radiotracers. *Physics in medicine and biology* **54**, N355–65 (2009).
6. Axelsson, J. & Krohn, J. Tjerenkov Luminescence Imaging for Accurate Placement of Radioactive Plaques in Episcleral Brachytherapy of Intraocular Tumors. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* **56**, 7362–7 (2015).

Animeringar och simuleringar gör fysiken levande

Nyhet!



Impuls interaktiv bok 1 och 2 är ett komplett digitalt läromedel i fysik. Här hittar du bland annat pedagogiska filmer som levandegör fysiken.

I de interaktiva böckerna får bilder liv när svåra begrepp förklaras med hjälp av animeringar och simuleringar.

Filmerna introducerar och förklarar nya begrepp. Det öppnar upp för fler pedagogiska sätt att visa hur man kan lösa problem och laborera.



För dig som arbetar med den tryckta boken och vill ha en kompletterande digital tjänst finns Impuls Lärarwebb. Även här hittar du de pedagogiska filmerna samt provföreläsningar, laborationer och lösningsföreläsningar till bokens uppgifter.

Prova interaktiv bok gratis i tio dagar!

Kontakta Gleeerups kundservice, info@gleerups.se, 040-2098 10, för beställning av cirkulationsexemplar, eller läromedelsutvecklare Per-Olof Bergmark, per-olof.bergmark@gleerups.se, 040-20 98 07 om du vill veta mer.

gleerups
I SAMARBETE MED DIG

Professorn som med hjälp av ljudvågor öppnar en ny värld för medicinska tillämpningar

Thomas Laurell, professor vid Lunds universitet och verksam vid både LTH och biomedicinskt centrum i Lund (BMC) har utvecklat nya möjligheter för forskningen genom sitt tvärvetenskapliga förhållningssätt. Vid BMC arbetar han med fysiker från LTH och medicinare inriktat mot kliniska tillämpningar för utvecklingen av nya diagnostiska instrument. Det ligger hårt arbete bakom av många inblandade påpekar Thomas som även är företagare och entreprenör.



Thomas Laurells stora drivkraft genom åren är nyfikenheten på hur saker och ting fungerar och han bär en imponerande mix av flera tunga kunskapsområden i ryggsäcken. Thomas Laurell har även läst ekonomi och gillar att driva företag. Just nu är han styrelseledamot i två mindre forskningsbaserade bolag och trivs med att kunna bidra med kunskaper och stöd till växande verksamheter.

Vad är egentligen "akustofores" som du forskar inom?

Thomas berättar att man sorterar och separerar celler med hjälp av ljudvågor. Tekniken utnyttjar akustiska krafter för att manipulera celler i mikrokanaler. När en cell (eller annan partikel) utsätts för en akustisk stående våg förflyttar den sig med en hastighet som beror på cellens storlek och andra fysikaliska egenskaper. På detta sätt kan olika celltyper skiljas ut ur till exempel blod.

Hur kom du på in på det här spåret?

– Jag var fascinerad av olika metoder att använda ljud, dessutom är jag djupt intresserad av mikroteknologi och mikrosensorer och dess möjligheter, svarar Thomas.

– Det hela började efter ett försök att skapa omrörning med ultraljud i mikrokanaler för att kontrollera kemiska förlopp i mikroskala. Istället för omrörning upptäckte jag att mikropartiklar linjerade upp sig vid vissa ultraljudsfrekvenser. Detta blev startskottet till att istället utnyttja ultraljud för att på ett kontrollerat sätt manipulera celler flödande i mikrokanaler, konstaterar Thomas.

Thomas Laurell har framgångsrikt sedan dess forskat kring möjligheten att med ultraljudsbaserade mikrochips skilja ut t.ex. cancerceller från andra celltyper. Han hoppas att akustofores-tekniken skall bli standard vid cellbaserad diagnostik i framtiden. Tillsammans med Henrik Bruus, professor i fysik vid Danmarks

Tekniska Universitet har han även studerat grundläggande akusto-fysik i mikrochip och utvecklat metoden i kliniska samarbeten inom onkologi, kardiologi och hämatologi.

Thomas berättar om projektet "CellCARE" som blev basen för att kunna bygga upp en kritisk massa kring forskningen om akustofores, som idag engagerar ett 30-tal forskare. Forskningen i CellCARE var inriktad på cellsortering med hjälp av ultraljud i mikro-chipkanaler. Tack vare forskningen inom projektet kan man nu med akustofores sortera fram specifika celltyper ur blod eller cellodlingar. Exempel på användningsområden är möjligheten att sälla fram tumörceller ur en patients blod för att få en bättre cancerdiagnostik eller behandla patienter med leukemi genom att till exempel separera ut blodstamceller ur en donators blod.

– En alternativ akustisk mikrometod som utvecklats går ut på att helt berö-

ringsfritt kunna låsa fast levande celler i vätskeflöden med en ultraljudspincett för att man mycket detaljerat skall kunna undersöka hur cellerna reagerar på olika substanser eller för att anrika celler och mikropartiklar ur ett provflöde. En sådan teknik skulle kunna få stor betydelse för exempelvis läkemedelsforskningen eller inom infektionsdiagnostik genom snabb anrikning av bakterier innan påföljande analys, berättar Thomas Laurell.

Thomas är full av energi och framtidstro, men vet också att det är både med- och motgångar som kan vänta runt hörnet inom forskningen.

– Att söka finansiering till forskningsprojekt tar mycket tid och utfallet är oftare negativt än positivt, konstaterar han. Mycket tid läggs på att söka pengar, berättar Thomas. Samtidigt så tycker han att det är bra att verkligen tvingas att kritiskt granska sina idéer ytterligare, vilket en ansökningsprocess innebär.

Hur kommer det sig att du blev fysiker?

– Det började egentligen med att jag absolut ville ta reda på hur dåtidens miniräknare (typ HP21) fungerade och valde då att studera teknik, avslöjar Thomas. Jag såg tidigt nyttan med de praktiska lösningarna inom fysiken och ville utveckla fler tillämpningar där man utnyttjade fysikens lagar och möjligheter på ett smart sätt, berättar han. Efter gymnasiet blev det elektroteknik i Lund och det har jag aldrig ångrat, en riktigt rolig period i livet, konstaterar Thomas.

Varför blev det medicinska tillämpningar?

Thomas berättar att han har många släktingar som är medicinare.

– Jag har haft en uppväxt präglad av diskussioner om olika medicinska problem vid middagsbordet och det var ganska naturligt att mitt intresse för tillämpad fysik fick en inriktning mot medicin. Mitt examensarbete var inriktat mot teknik för att övervaka blodsocker hos diabetiker och min professor Kjell Lindström blev i det en inspirationskälla att fortsätta och doktorera med en fortsatt medicin-teknisk inriktning. Dessutom är det tilltalande att få arbeta med något som har

till syfte att bidra med konkreta förbättringar av vården och underlätta för både diagnostik och behandling av patienter.

Vad var det som gjorde att du inte blev läkare?

– Jag var mer tekniskt nyfiken och egentligen var det min äldre bror som banade vägen, svarar Thomas. Fredrik var mer teoretiskt lagd och gillade matematik och fysik och var först med att bryta samskarans medicinarlinje.

– Fredrik blev en murbräcka för mig, berättar Thomas, och så var det ju det där med att jag ursprungligen ville lära mig hur en miniräknare fungerade.

Du har även läst ekonomi. Hur ser du på de olika världsbilderna som ekonomi- respektive naturvetenskap oftast ger uttryck för?

– Jag har lärt mig att förstå ekonomers och investerares resonemang, men det är nästan alltid en utmaning att hitta finansierare som är villiga att bygga en verksamhet långsiktigt. Om projektet inte ger vinst på satsningen mer eller mindre direkt är man inte intresserad, berättar Thomas.

– Det är få som är intresserade av att verkligen bygga företag. Det är allt för ofta snabba cash som gäller och det genererar varken företag eller arbetstillfällen.

Thomas Laurell: Född i Lund 1961

Utbildning: Gymnasieskolan Spyken, Lund
Civilingenjör, elektroteknik, LTH, år 1986
Doktorsexamen i vid Lunds tekniska högskola, år 1995

Nuvarande arbete:

Professor i Medicinska och kemiska mikrosensorer vid Institutionen Biomedicinsk Teknik (tidigare Elektrisk Mätteknik), LTH

Familj: Hustru Åsa och tre pojkar

Bor: Villa i Lund

Intressen: Natur, jakt & fiske

Skärgårdstorpet i Roslagen
Grundare och aktiv i AcouSort AB

Förtroendeuppdrag: Styrelseledamot i fem olika bolagsstyrelser

Styrelseledamot LTH

Ingenjörsvetenskapsakademien 2007-

Kungliga Vetenskapsakademien 2010-

Styrelseledamot, Medicon Bridge under perioden 2016-05-01–2017-12-31

President i CBMS 2009-2017

Oftast kräver medicintekniska företags-satsningar 10 år innan man kan börja se en framgångssaga. Det tålamodet har inte finansien, konstaterar han.

Thomas Laurell och hans forskargrupp arbetar bland annat med att kunna sortera olika typer av celler, till exempel cancerceller ur ett vanligt blodprov, med så hög precision att cancercellerna kan räknas och utgöra en bas för att prognostisera sjukdomsstadiet och att även använda metoden för att bedöma hur väl patienten svarar på behandling.

Just nu pågår i gruppen en spännande forskning inom blodkroppars molekyllära signalering via vesiklar, små vätskefyllda blåsor, i nanoskala. Det molekyllära innehållet i dessa vesiklar vid hjärta/kärlsjukdomar är något som Thomas medicinar-kollega, kardiologen David Erlinge, är expert på.

– Vi hoppas tillsammans kunna utveckla ny diagnostik som ger en tidig indikation på sjukdom med hjälp av att den akustiska pincetten kan fånga och anrika dessa vesiklar, berättar Thomas.

Min förhoppning är att framtidens diagnosverktyg blir snabba, säkra, kostnadseffektiva och når ut i vården snabbt, reflekterar Thomas.

Vad gör du när du kopplar av från forskningen?

– Kantarelljakt i skogen på höstarna en av årets höjdpunkter och framför allt att få servera dessa med en egenhändigt ordnad älgstek, berättar Thomas.

Thomas avslöjar att sommarutflykter i Gräsö skärgård med veteransnipan från 30-talet är en stående favorit.

– Mycket gammalt hederligt motor-mekande och båtunderhåll på försom-maren och skärgårdsturer i träsnipan en stilla sommarkväll får vilken ateist som helst att bli religiös.

MARGARETA KESSELBERG
FYSIKAKTUELLT



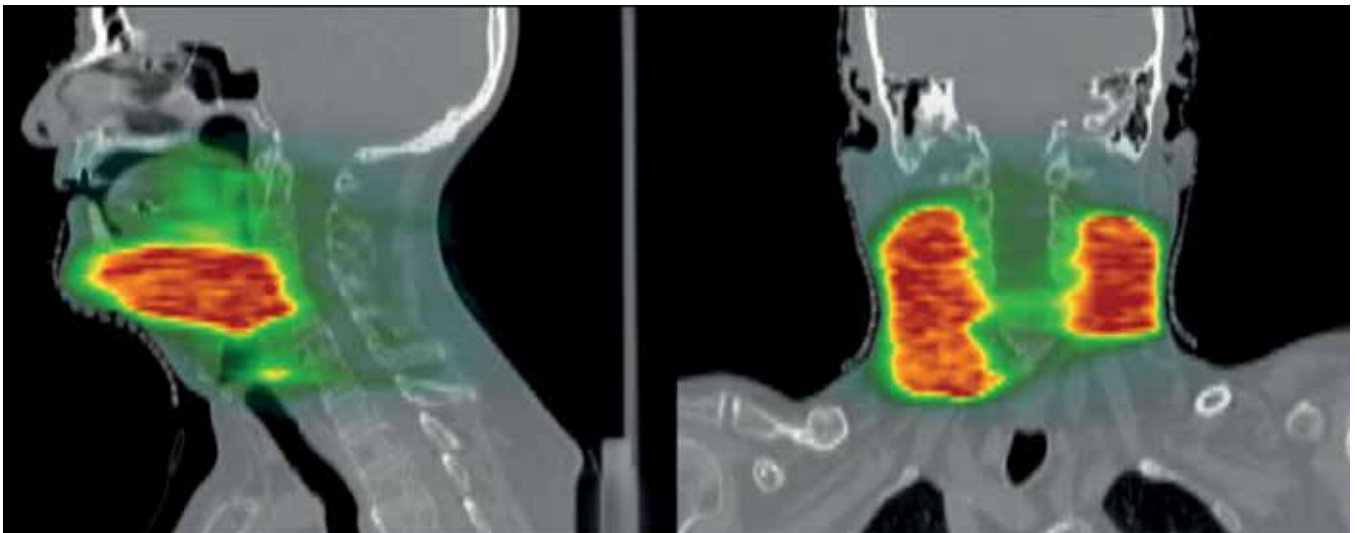
Bildstyrd cancerbehandling – en form av mjuk kirurgi

Begreppen joniserande strålning används för strålning med så hög energi att den kan frigöra elektroner från en atom och därmed förorsaka kemiska förändringar i vävnad. Det kan handla om både fotonstrålning utan massa och partikelstrålning i form av t.ex. protoner, elektroner eller joner. För strålbehandling används oftast fotoner med energier mellan 4 och 20 MeV eller protoner med energi mellan 60 och 250 MeV. För bildtagning används däremot fotoner med betydligt lägre energi, så kallad röntgenstrålning. Även fotonstrålning med så låg energi att den inte joniserar används i kombination med starka magnetfält för kärnspinnresonansavbildning (MRI).

Strålbehandling syftar till att slå ut alla tumörceller hos en patient. För att skona frisk vävnad runt tumören strålar man med låg dos från många vinklar med strålfält som anpassas till tumörens form. Den sammanlagda dosen till tumören blir då hög, samtidigt som den kringliggande friska

vävnaden skonas i största möjliga mån. För att skapa en sådan behandling ordinerar ansvarig läkare en specifik stråldos och markerar tumören samt kritiska organ i bilder av patienten. En dator räknar igenom miljontals strålfält och söker systematiskt fram den kombination av fält som bäst passar den patient som ska be-

handlas. För de mera komplexa fallen tar en legitimerad sjukhusfysiker över för att med datoriserade optimeringsalgoritmer räkna fram en stabil dosplan som sedan godkänns gemensamt av patientansvarig läkare och sjukhusfysiker. Denna dosplan innehåller styrkoder till behandlingsapparaten så att behandlingen kan genom-



Figur 1. Behandlingsplan som visar att stråldosen blir tillräckligt hög i tumören men inte spiller över allt för mycket på omgivande vävnader. Dosplanerna är beräknade med 3-dimensionella CT-bilder som underlag.

föras helt automatiskt under övervakning av specialistutbildade sjuksköterskor.

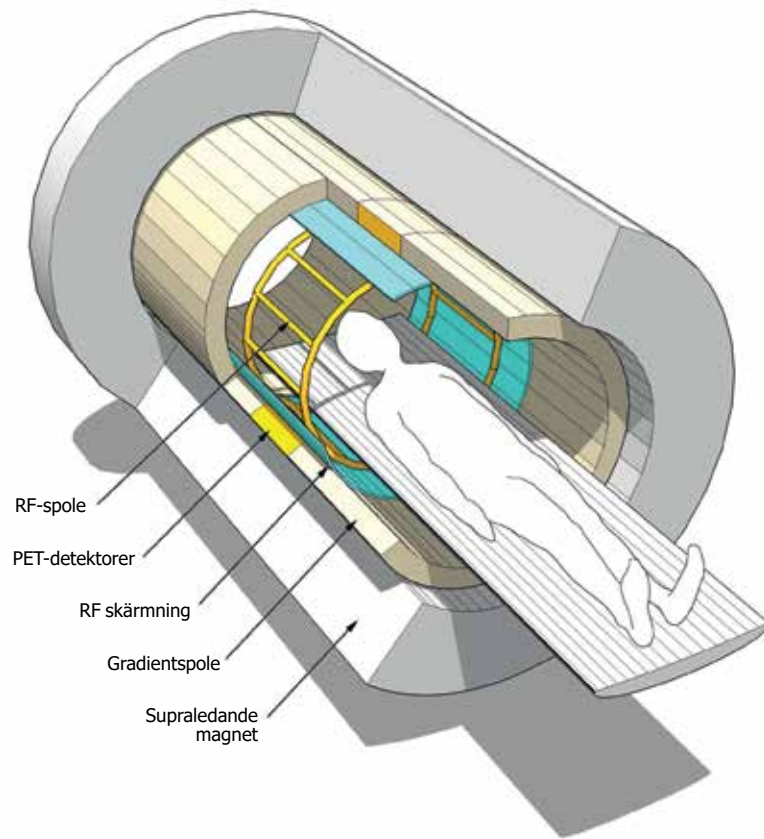
För invasiva tumörer, tumörer som växer in i annan vävnad, måste man dessutom anpassa stråldosen så att vitala organ inte skadas allvarligt. Dosen anges i Gray, där 1 Gray är 1 J/Kg, och beskriver den energi som fotoner eller partikelstrålningen avger till vävnaden. I detta sammanhang kan man notera att den biologiska effekten är helt kemisk då uppvärmningseffekten av dödliga stråldoser bara är en bråkdel av en grad.

Strålbehandling kan närmast beskrivas som en form av ”mjuk kirurgi” i den meningen att strålning kan döda tumörceller som invaderar andra organ om dosen optimeras mycket exakt. Optimering av stråldos bygger på statistiska tumörbiologiska modeller med vilka man kan beräkna vilken dos som krävs för att maximera sannolikheten att slå ut alla cancerceller samtidigt som man minimerar risken för skada på normala celler.

För denna typ av precisionsbehandling förutsätts att både tumörens biologi och utsträckning är känd. Inför planering av en cancerbehandling används flera avbildande tekniker som alla bygger på någon form av strålning. Vanligast är datortomografi (CT) med fotonenergies mellan 50-120 keV. Datortomografi är en röntgenbaserad metod där man tar bilder av patienten i flera projektioner och sedan räknar fram en 3-dimensionell bild (se faktaruta sid 16).

Mera kraftfulla metoder som avbildar både tumörens biologi och morfologi med betydligt högre precision är under stark utveckling. Positronemissionskameran (PET) avbildar positronstrålade atomer som man fäst på målsökande molekyler som är en del av kroppens egen biokemi. Det kan vara t.ex. socker, med vilken man kan avbilda cellers metabolism, eller byggstenar i arvsmassan, med vilka man kan avbilda celldelning (se faktaruta sid 16).

Ytterligare en modalitet med mycket spännande potential är kärnspinnresonanskameran (MRI) som kan avbilda protoner i kroppen samt hur dessa är bundna i molekyler och hur de rör sig i vävnad (se faktaruta sid 16).



Figur 2. För att simultant studera olika aspekter av tumörens biologi finns hybridkameror, sammanbyggda PET/MRI-kameror där man placerat PET-detektorerna inne i MRI-kameran.

Vid Umeå universitet bedrivs forskning inom bildstyrd cancerbehandling. Forskningen går bland annat ut på att analysera komplexa bilddata där man har information från flera olika undersökningsmetoder vid flera olika tillfällen. En PET/MR-utrustning kan samla in bilder som beskriver patientens biologi på flera olika sätt. Man får då en mycket stor mängd bilddata som måste analyseras med statistiska metoder för att kunna extrahera värdefull information som beskriver tumörens biologi. En forskargrupp under ledning av docent Tufve Nyholm utvecklar tillsammans med kemometriker vid kemiska institutionen nya metoder att analysera multidimensionella bilder.

Vi vill bland annat använda dessa bilder för att skapa noggrannare dosplaner. Detta kräver ytterligare beräkningar för att beskriva hur strålningen absorberas och sprids i patienten, något som dospla-

neringssystemet behöver för att kunna optimera dosplanen. Ett forskningsprojekt under ledning av docent Anne Larsson handlar om att öka noggrannheten och generera osäkerhetsuppskattningar för dessa beräkningar med patientbilder i 3D eller 4D från PET/MR.

Datainsamlingen är tidskritisk, ju längre tid en patient kan ligga i PET/MR-kameran, desto mer information kan vi samla in. Anders Garpebring leder en forskargrupp med fokus på smart datainsamling. Med statistiska metoder kan man korta ned undersökningstiden genom att beräkna vilka datapunkter som är nödvändiga för att återskapa den information man behöver. Detta kan innebära både en förbättrad bildkvalitet och kortare insamlingstider.

MIKAEL KARLSSON
PATRIK BRYNOLFSSON
UMEÅ UNIVERSITET

Biofluidmekanik med tillämpning mot hjärna och öga

Forskning för att öka kunskapen kring hur hjärnans biofluidmekanik påverkar uppkomst och förlopp vid folksjukdomar som stroke, vaskulär demens, migrän och hydrocefalus kan skapa nya verktyg för att förbättra diagnos och behandling av dessa neurologiska sjukdomar. Inom denna gren av medicinsk fysik utvecklar och använder vi avancerade mätmetoder och matematiska modeller för att skapa nya kliniska undersökningsmetoder för våra stora folksjukdomar. Vår forskning har också infallsvinklar mot rymdäventyret och vi har stöd från Svenska rymdstyrelsen och NASA för att förstå varför astronauter som är länge i tyngdlöshet får problem med hjärntrycket och nedsatt syn.

När man studerar människans fysiologi, det vill säga funktionen och samspelet hos kroppens organ, till exempel hjärta, kärl, lungor, njurar och hjärna, är mätning och analys av bioelektriska signaler, fysiologiska tryck och medicinsk bildbehandling med flödesbestämning alla viktiga komponenter. Här finns stora utmaningar som relaterar till fysik. Detta område inom medicinteknik handlar om mätfysik med mycket specifika krav på sensorer och mätsystem, modellering på systemnivå som inkluderar kroppens egna dynamiska regelsystem, avancerad bild- och signalanalys samt biofluidmekaniska analyser som ofta utförs med stöd av simuleringar.

Med fokus på hjärnan och övriga nervsystemet har kroppen flera vätskesystem som är av stort intresse. Det mest kända är blodsystemet men vi har också cerebrospinalvätskesystemet (CSF) i och runt hjärna och ryggmärg, som ger centrala nervsystemet dess arbetsmiljö, och kammarvattnet, som har motsvarande funktion för ögat. Dessa system måste både samverka och själva vara i fysiologisk balans med avseende på tryck och flöden för att kroppen skall fungera tillfredställande. Om det blir störningar i balansen så uppstår ofta neurologiska symptom. Stroke, som uppkommer vid

en blödning eller ett stopp i cerebrala blodförsörjningen, är kanske den mest uppenbara, men faktum är att de flesta stora neurologiska sjukdomarna har en fysiologisk orsaksbeskrivning som innehåller komponenter som relaterar till en störning i hjärnans blodförsörjning och/eller tryck. Huvudvärk, balansproblem, inkontinens, och demens är symptom som kan ha sitt ursprung i en störning i tryck och flöden runt hjärnan. För ögat kan ett för högt tryck leda till sjukdomen glaukom (grön start) med synbortfall och i värsta fall blindhet. Med kunskap och mätmetoder för att karakterisera dessa tryck- och flödessystem kan man via

forskning detektera avvikelser (patofysiologi) som relaterar till symptomen och i nästa steg diagnostisera dessa patienter på ett bättre sätt. Förstår man patofysiologin kan man naturligtvis också anta utmaningen att designa nya och smartare behandlingsmetoder för dessa patientgrupper. För tryck- och flödesproblem kan det då ofta handla om att konstruera en ny medicinteknisk produkt i form av ett implantat som justerar systemet.

I Umeå har vi en lång tradition av forskning inom fysiologiska tryck och flöden med inriktning mot neurovetenskap. Vi har byggt upp en stor tvärvetenskaplig forskargrupp med ett nära samarbete mellan forskande fysiker och ingenjörer inom medicinsk teknik och forskande läkare inom neurologi, neurokirurgi, ögon och radiologi. Under åren har vi utvecklat en rad unika mät- och analysmetoder för att karakterisera hjärnans tryck- och flödessystem och är världsledande på området. Bland annat så har vi i Umeå utvecklat apparatur för att invasivt bestämma karaktäristik hos trycksystemet runt hjärnan genom aktiv infusion av artificiell CSF och registrering av tryckresponser (Figur 1). Denna utrustning, kallad Celda, är numera kommersialiserad av företaget Likvor AB och sprids i dagsläget över världen.

Blodflöde i hjärnans artärer och ve-



Figur 1. Infusionsmätningssystem för karakterisering av hjärnans biofluidmekanik. Bild med tillstånd från Likvor AB.

ner studerar vi i Umeå med en ny kraftfull MR-sekvens och till den utvecklar vi framtidens analysmetoder för såväl grundläggande medicinsk forskning som för direkta kliniska tillämpningar. Med den metoden kan vi på tio minuter i MR-kamera få en 3D-bild av huvudet med kvantitativ mätning av blodflöden i hjärnans kärlträd, både medelflöden och det pulsativa flödet under hjärtcykeln (Figur 2). Detta öppnar upp för en kartläggning och analys av arteriella och venösa flöden som inte tidigare varit möjlig. Metoden ger också oöverträffad input till biofluidmekaniska modeller och simuleringar. Vi har vidare utvecklat en ny mätmetod för att bestämma ögontryck som är baserad på resonanssensorteknik (Figur 3). Med denna tonometer (ögontryckssensor), som kallas ART, kan vi mäta ögontryck i olika kroppspositioner, vilket som vi kommer att beskriva nedan har sina fördelar.

Artärer studerar vi för att kartlägga hjärnans sinnrika kärlsystem, framförallt med avseende på dess uppbyggnad med parallell tillförsel av blodflöde från flera kollaterala flödesvägar som kan rekryteras vid behov. Kunskapen ger oss förståelse för hur systemet, via kollateralcirkulationen, i vissa fall kan kompensera för flödeshinder vid stroke och upprätthålla tillräcklig blodförsörjning till vävnad för att undvika skador från syrebrist. Detta öppnar för kliniska applikationer med nya metoder för diagnostisering och behandling i samband med stroke, men även för andra neurologiska tillstånd där man misstänker lokal ischemi. Vener studerar vi för att biofluidmekaniskt beskriva regleringen av det venösa avflödet och det cerebrala ventrycket, speciellt i relation till kroppsposition. I sittande och stående position upprätthålls sannolikt ventrycket i hjärnan primärt genom att de stora halsvenerna på grund av hydrostatiska effekter kollapsar i nackhöjd. Vi har visat att det venösa avflödet och ventrycket styr hjärnans känsliga arbetsmiljö, eftersom hjärntrycket (intrakraniellt tryck) beror direkt på ventrycket. Förutom ventryck så beskrivs hjärntrycket av produktion och absorption av cerebrospinalvätska



Figur 2. Blodflöde i hjärnans stora kärl.

(CSF). Det finns därför behov av att förstå hur dessa system samverkar.

I ett stort projekt arbetar vi med att sammanföra de biofluidmekaniska modeller som vi har för artärsystemet, ven-systemet, CSF-systemet och ögonsystemet, för att skapa en helhetssyn över dessa samverkande system. Den förståelse och de modeller som vi kan generera från dessa studier kan ha praktiska tillämpningar för sjukdomar som till exempel hydrocephalus, migrän, trauma och intrakraniell hypertension. Det finns också indikationer på att den pulsativa stress som artärer och hjärnvävnad utsätts för vid varje hjärtslag kan vara skadlig och det finns en föreslagen vaskulär hypotes för uppkomst av demens och kognitivt åldrande. Som ett led i det projektet har vi just slutfört datainsamlingen i en världsunik studie där protokollet har inkluderat komplett cerebralt blodflödes-



Figur 3. Tonometer för mätning av ögontryck. Bild med tillstånd från Bioresonator Goodeye AB.

data hos 150 strokepatienter. I en parallell studie så har vi i samarbete med en annan forskargrupp i Umeå samlat motsvarande blodflöden hos 180 äldre, som ett första steg i en longitudinell studie av kognition och åldrande. Gemensamt kommer dessa data att ligga till grund för utveckling och utvärdering av nya bildanalytiska metoder, modellbyggande, analys av hjärnans arteriella kollateralcirkulation och venösa avflöden och de pulsativa effekterna på hjärnan. Dessa forskningsstudier är bland annat finansierade av Vetenskapsrådet och Hjärt-lungfonden.

Visual Impairment/Intracranial Pressure (VIIP) är ett syndrom som identifierats hos 70% av astronauter som har haft långtidsuppdrag på den internationella rymdstationen. Den synpåverkan som konstaterats kan orsaka permanenta problem för astronauterna och äventyrar framtida planerad rymdverksamhet som till exempel längre vistelser på rymdstationen eller Marsresor. För de påverkade astronauterna är ögonsymptomen sannolikt förknippade med ett ökat hjärntryck som ger en obalans mot ögontrycket. Vår tvärvetenskapliga forskargrupp inom hydrocefalus har ägnat decennier till utveckling av metoder och modeller för mätning och analys av hjärntryckets variation och CSF-dynamik, eftersom en störning i CSF-dynamiken är den viktigaste patofysiologiska hypotesen i hydrocefalus. Vi har också erfarenhet av tryckmätning och biomekanik hos ögats vätskesystem. Det innebär att vår forskargrupp närmar oss VIIP-problemet med erfarenheter som ger en unik möjlighet att bidra med ny och grundläggande kunskap i detta viktiga rymdrelaterade forskningsområde. Vi är glada att Svenska rymdstyrelsen och NASA visat oss förtroende att utforska den möjligheten.

Genom att beskriva CSF-systemet och det venösa systemet tillsammans, i en gemensam modell, producerar vi en beskrivning av vad som kontrollerar hjärntrycket och identifierar vilka komponenter i den styrningen som länkar till gravitationsfenomen. Preliminära resultat tyder på att en sådan modell kan förutsäga hjärntryck vid olika kroppspositioner.

ner. Vi utvecklar en motsvarande modell för ögonsystemet och utvärderar båda modellerna vid olika kroppshållning. Utvärderingen görs hos patienter med CSF-dynamiska störningar och friska. Genom att klargöra hur dessa system fungerar och hur de påverkas av tyngdkraften kan vi förutse vad som händer i mikrogravitation och därmed föreslå en fysiologiskt baserad förklaring till varför avsaknad av gravitationen kan generera VIIP-symtom.

I studierna genomförs mätning av hjärntryck med Celda och ögontryck med ART, samt kartläggning av halsvenerna med bildgivande ultraljud för bestämning av cerebral venös dränering och venös kollaps med avseende på kroppsposition. Detta för att förstå de venösa utflödesvägarna och hur de kan skilja sig åt mellan enskilda och mellan patientgrupper och hur detta påverkar tryckbalansen mellan öga och hjärna.

VIIP är ett fysiologiskt fenomen som är relaterat till tyngdlöshet. Det är troligt att alla astronauter utvecklar detta, men i olika utsträckning, beroende på egenskaperna hos deras CSF-, ven- och intraokulära system. Som ett yttersta mål strävar vi efter att använda den utvecklade modellen för hur dessa system interagerar för att kunna identifiera kombinationer av egenskaper som sannolikt ger en hjärna och ögon som är känsliga för VIIP. På så sätt hoppas vi kunna utveckla en metod som kan användas för att identifiera astronauter som kan vara i riskzonen.

NASA har beskrivit VIIP som ett av de största medicinska hindren för långtidsvistelse på internationella rymdstationen och för resor till Mars. Vår forskning bidrar till en ökad kunskap om VIIP och till skapandet av en förklaringsmodell som kan testas på den internationella rymdstationen. Vi har precis startat upp ett gemensamt projekt med forskargrupper i Houston, Dallas och Seattle med mål att mäta hjärntrycket på astronauter uppe i rymdstationen. Närmsta motsvarigheten till VIIP på jorden är en sjukdom som kallas idiopatisk intrakraniell hypertension. Forskning om IIH är försummad, och vår forskning kommer san-

nolikt att ge spin-off-effekter som kan hjälpa IIH-patienter, ofta unga och överviktiga kvinnor, att undvika utveckling av blindhet. Forskningen kring balans mellan hjärntryck och ögontryck har även gett oss spinn-off effekter i form av nya hypoteser kring glaukom som vi just nu utforskar.

Sammanfattningsvis studerar vi en mängd olika fysiologiska förlopp och

störningar inom det neurologiska området, och genom att vi parallellt utvecklar nya mät- och analysmetoder och modeller för att beskriva kroppens egna regler-system bygger vi upp en potential för en mängd nya applikationer av medicinteknik.

ANDERS EKLUND
UMEÅ UNIVERSITET

Datortomografi

Datortomografi (Computed Tomography, CT) är en modern variant av vanlig "slätröntgen" och bygger på att man avbildar patienten i flera olika projektioner för att sedan räknar fram en 3-dimensionell bild. Varje projektion är en vanlig röntgenbild i vilken intensiteten bestäms av hur mycket röntgenstrålar absorberats på sin väg genom patienten. För att skapa 3D-bilden ser man intensiteten i varje projektionsbild som summan av pixelvärden i djupled för 3D-bilden. Genom att använda flera olika projektioner kan ett ekvationssystem skapas från vilket alla pixelvärden i den avbildade 3D-volymen kan beräknas.

I CT-bilder beror intensiteten i pixlarna främst på materialens densitet och atomnummer. Material med höga atomnummer absorberar röntgenstrålning mer effektivt vilket gör att ben syns extra tydligt i CT-bilder.

Magnetresonanstomografi

Magnetresonanstomografi (MRT) är en bildtagningsteknik som bygger på spinegenskapen hos väte-kärnor. Att vätekärnorna har spin innebär att de i ett magnetfält beter sig som små roterande magneter. Rotationsfrekvensen, som även kallas resonansfrekvensen, beror linjärt på det magnetfält i vilket kärnorna är placerade. För att skapa en 3-dimensionell bild med en MR-kamera utsätts i ett första steg vätekärnorna för radiovågor med en frekvens som svarar mot deras resonansfrekvens. I en typisk magnetkamera med en magnet på 1,5 Tesla (ca 25 000 gånger starkare än jordens magnetfält) är denna frekvens på cirka 64 MHz. Radiovågorna får väte-kärnorna att uppföra sig som en samling synkroniserade roterande magneter som skapar en mätbar spänning i en mottagarspole. Det här första steget innebär endast att man får en signal men inte att signalen går att lokalisera. För att avgöra var signalen kommer ifrån och på det sättet bygga upp en bild varierar man magnetfältet något under insamlingen av signalen, med hjälp av så kallade gradient-

spolar. Detta gör (något förenklat) att varje position i det avbildade objektet svarar mot en frekvens och genom att analysera frekvensinnehållet i signalen (med Fouriertransformen) kan man skapa en bild.

Det man ser i en MR-bild är främst vävnad med mycket vatten och fett medan ben normalt är osynligt. Till skillnad från exempelvis CT kan MR-bilder se väldigt olika ut beroende på hur timingen för radiopulser och datautläsningen är inställd. Just denna möjlighet att variera vad som framträder tydligt i en MR-bild är en viktig orsak till teknikens popularitet i vården.

Positronemissionstomografi

Positronemissionstomografi (PET) är en bildtagningsteknik med vilken man kan studera hur ett radioaktivt spårämne tas upp i kroppen. Tekniken bygger på att man substituerar atomer i ett spårämne mot radioaktiva isotoper som sönderfaller genom att skicka ut en positron. I exempelvis socker byter man ut en väteatom mot Fluor-18. Det radioaktiva sockret injiceras sedan i en patient (i mycket små mängder) och tas upp av t.ex. tumörer som använder stora mängder socker i sin iver att växa sig större. Positronen som skapas vid sönderfallet är antimateria och kommer snabbt att stöta på en elektron varvid både positronen och elektronen förintas. För att bevara energi och rörelsemängd skapas då två fotoner som färdas i exakt motsatt riktning från varandra. Fotonerna detekteras av PET-kameran och då man vet att de färdas i motsatt riktning kan man lista ut en linje på vilken sönderfallet måste ha skett. Att känna till linjen för sönderfallet liknar situationen inom CT där man vet var fotoner har absorberats så när som på var i djupled. Detta gör att man kan använda liknande tekniker för att skapa en 3D-bild i PET som i CT.

PET är ett mycket värdefullt verktyg inom främst cancervården då det är bra på att upptäcka tumörer. Det är också ett verktyg med stor utvecklingspotential och bredd eftersom bara fantasin sätter gränser för vilka spårämnena som kan användas inom PET.

Tidiga svenska positronkameror

PET kamerorna började utvecklas i början av 70-talet i USA. 1974 startades ett samarbete mellan institutionerna för klinisk neurofysiologi och neuroradiologi vid KI, och Forskningsinstitutet för atomfysik (AFI) för att studera hjärnmetabolism med isotopteknik. 1975 anslöt sig även fysiska institutionen, SU, i projektet. Dåvarande docenten vid fysiska institutionen Lars Eriksson vistades då i Los Angeles och konstruerade där en av de två första positronkamerorna i världen tillsammans med bl.a. den där verksamme svenske fysikern Z H Cho.

1976 på hösten, efter Lars Erikssons återkomst till Sverige, påbörjades konstruktionen av den första svenska positronkameran, som också var den första utanför USA. Projektet stöddes av MFR och STU med anslag till Lars Eriksson, Torgny Greitz (professor i neuroradiologi, KI) och Lennart Widén (professor i neurofysiologi, KI). Denna krets utökades senare med professor Tor Ragnar Gerholm, vid Fysikum, Stockholms Universitet. Kameran (en 1-ringskamera med 95 NaI(Tl) detektorer) byggdes vid fysiska institutionen. Utvecklingsarbetet utfördes på Fysikum av fysiker och ingenjörer därifrån och från Karolinska. 1978 instal-



lerades kameran (se fig. 1) på Karolinska sjukhuset. Upplösningen var omkring 6 mm, vilket var bra vid den tiden. Projektet rönte uppmärksamhet även i dagspress, som ett exempel kan vi se en samtidig Ströyers Dagbok (se fig. 3).

Samma forskare fick också anslag från RMC, Wallenbergstiftelsen och FRN för inköp av en cyklotron från Uppsalaföretaget Scanditronix AB. Med denna skulle systemets användbarhet avsevärt förbättras. Det blev möjligt att använda fler isotoper och fler substanser. 1979 fick gruppen anslag från STU för konstruktion och byggnad av en 4-rings BGO (Vismutgermanat) kamera. Den byggdes tillsammans med Scanditronix under ledning av Lars Eriksson. Installationen på KS ägde rum sommaren 1981.

Totalt satsades c:a 28 milj kr (utan korrektion för förändrat penningvärde) på positronkameraprojekt fram till 1990.

Den nya kameran med sina 4 ringar var mycket effektivare (känsligare) vilket innebar lägre strålbekstrålning för patienterna men med en något sämre spatial upplösning, 7mm. Ett grundläggande problem med ringkamerakonceptet var den grova projektiions-samplingen (se fig 2 i PET artikeln). Den första kameran var därför konstruerad så att hela detektorpaketet kunde "vicka" 1,5° och förflyttas som helhet till 4 närliggande positioner för att på så sätt förbättra samplingen. Den nya kameran löste detta på ett bättre sätt. Man lät kamerans centrum konti-

Fig. 1. Bilder på den första Svenska positronkameran där den utvecklades på Fysikum vid Stockholms Universitet.



Fig. 3. "Senaste nytt är en kamera som visar hur vi tänker." Den senare av två Ströyers dagbok från 1981.



Fig. 2. Två av projektets huvudpersoner Professor Lennart Widén och doc Lars Eriksson. Från KSnytt, nr1-2, 1981.

nuerligt förflyttas kring en liten cirkel, "wobbla" (bidrag från förf.), utan att vicka. Andra positronkameratillverkare valde andra och i vår mening sämre lösningar, "clam shell" eller "dicotomic" rörelser. Moderna kameror behöver dock inte denna typ av rörelser då kristallerna är så mycket mindre.

Scanditronix fortsatte utvecklingen av positronkameror och tillverkade flera generationer av PET-kameror tills man 1989 sålde verksamheten till General Electric, GE, som var sena med att utveckla egna PET-kameror. Numera är det Siemens, GE och Philips som har den största delen av marknaden.

CHRISTIAN BOHM
STOCKHOLMS UNIVERSITET

PET-kameran

Positronkameran eller PET-kameran, där PET står för "Positron Emission Tomography", är en av de olika avbildande medicinska instrument som utvecklats under de sista 50 åren. Dess anatomiska information är inte så noggrann men däremot ger den värdefull information om olika organs tillstånd och funktion. Detta görs genom att följa var vissa utvalda kemiska substanser samlas i kroppen. Substanser som märkts med positronstrålende nuklider kan söka sig till områden för vilka substansen har funktionell relevans, t ex socker söker sig till tumörer. De nuklider som framför allt används är isotoper av syre, kväve, kol och fluor, ^{15}O , ^{13}N , ^{11}C och ^{18}F . Den övervägande kliniska verksamheten är baserad på en analog form av glukos, fluorodeoxyglukos märkt med ^{18}F , (FDG)

Man kan också använda positronkameran för att undersöka den dynamiska fördelningen av substanser som ändrar sig som följd av någon kontrollerad händelse. Genom att följa glukos eller något glukosderivat kan man registrera hjärnans lokala ämnesomsättning och se hur denna förändras om man exempelvis lyssnar på musik. Man kan då se hur olika regioner i hjärnan aktiveras och i vilken ordning detta sker. Man kan också undersöka hjärtats ämnesomsättning före och efter en fysisk ansträngning för att dra slutsatser om förträngningar i blodkärlen. Och mycket annat...

Mätning med en positronkamera är

en invecklad procedur. Först måste man producera en lämplig kortlivad positronstrålende nuklid. Detta görs ofta i en närbelägen cyklotron. Sedan skall isotopen placeras i substansen vars spridning i försökspersonens kropp skall studeras. Detta leder ofta till en komplicerad kemisk syntes. Dessutom skall allt ske snabbt. Ju längre tid processen tar desto större del av positronerna kommer att ha emitterats innan de kan bidra till undersökningen.

Vid själva mätningen placeras försökspersonen på en bänk som förs in i positronkamera så att den del av kroppen som skall undersökas finns inom mätområdet. Mätningen tar från några minuter till någon timme, men oftast någonstans mittemellan. Efteråt rekonstrueras aktivitetsfördelningen från mätdata med hjälp av avancerade algoritmer i snabba datorer. Ofta används grafikprocessorer för att kunna göra beräkningarna inom en rimlig tid.

Positronkamerans funktion bygger på att en positron emitteras när nukliden sönderfaller. Inom kort kolliderar positronen med en elektron och annihileras. När detta sker skickas två 511 keV gammakvanta i diametralt motsatta riktningar. Med hjälp av två motstående gammadetektorer (se fig. 1) som kopplats så att de bara registrerar när två samtidiga gamma träffar var sin detektor kan man detektera positronannihilationer. Detektorparet kommer emellertid bara att registrera en delmängd av de positroner som befinner sig inom volymen mellan

detektorerna (detektionskanalen), nämligen de som skickat ut sina gamma i rätt riktning. Gammadetektorerna består, i sin tur, av en scintillatorkristall och en ljussensor. Kristallen genererar en ljusblxt när den träffas av ett gamma.

En enkel positronkamera består av en ring med ett stort antal gammadetektorer. Dessa är kopplade som detektionskanaler med många av de motstående detektorerna. Alla detektionskanaler i en given riktning registrerar en projektion av positronfördelning vinkelrätt mot denna (se fig 2). Genom att sortera detektionskanalerna efter deras riktning får man också projektionerna vinkelrät mot dessa riktningar. Från projektionerna kan man rekonstruera annihilationsfördelningen i detektorplanet och med detta substansfördelningen, på samma sätt som man kan förstå ett transparent objekts interna struktur om man betraktar det från olika håll.

Det finns många potentiella felkällor: gamma från oberoende annihilationer kan blandas ihop och ett gammakvantum kan ändra riktning innan den registreras, då i felaktig detektionskanal. Många positronannihilationer kommer överhuvudtaget inte registreras då en eller båda gammakvanta absorberas innan de når sin gammadetektor. För att få goda mätresultat måste man korrigera för dessa felkällor. Om man gör detta på ett noggrant sätt kan man uppskatta substans koncentrationerna med en precision kring 5%.

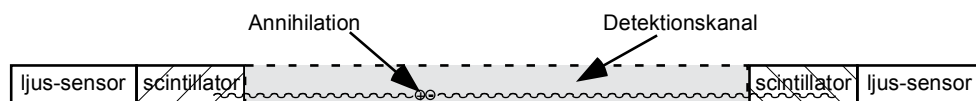


Fig. 1 En detektionskanal för registrering av positronannihilationer.

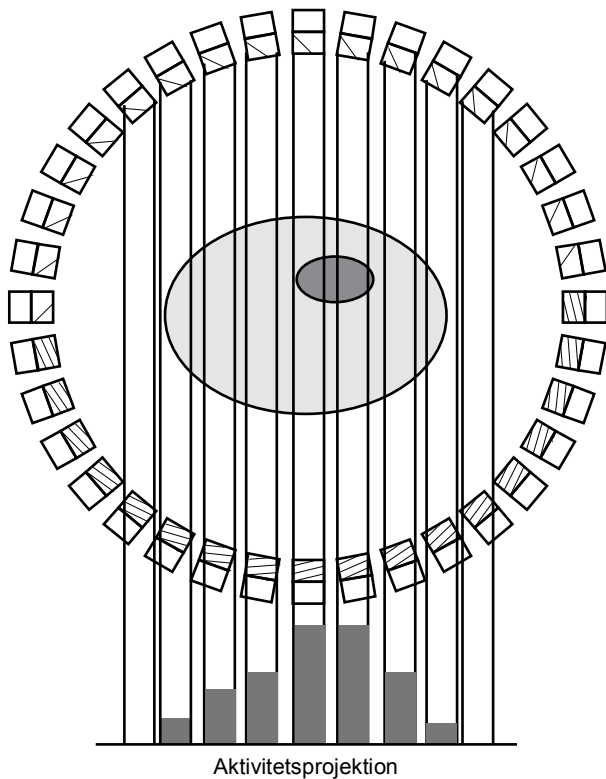


Fig. 2. Genom att sortera data från detektionskanalerna kan man uppskatta projektionerna av aktivitetsfördelningen.

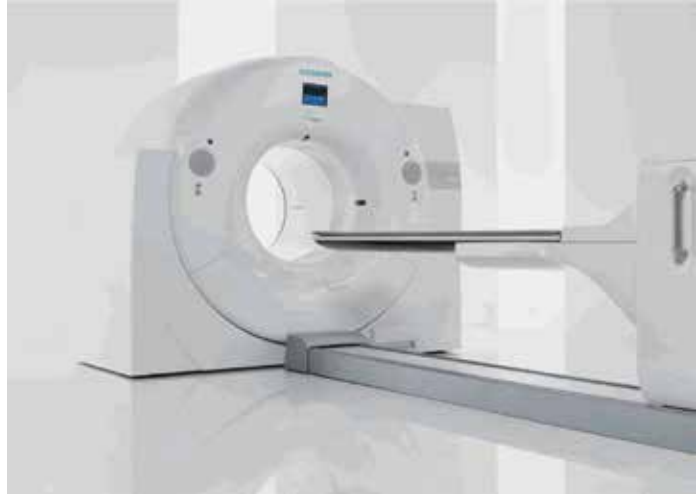


Fig. 3. mCT flow PET kamera från Siemens

En modern positronkamera består av ett stort antal mycket små gammadektorer, dvs. små kristaller för att få så bra rumsupplösning som möjligt. Man kan komma ner till ungefär 1 mm i små system för djurstudier och för humanstudier ca 4-5 mm. Genom att rekonstruera volymen som helhet i stället för en mängd oberoende snitt kan man öka känsligheten avsevärt. Det blir svårare för annihilationskvanta att smita ut ur kameran utan att registreras. Detta gör kameran mer effektiv. Genom att lägga många detektorringar på varandra kan man utsträcka kamerans mätvolym. Man kan också registrera tidsskillnaden mellan gammadetekteringarna och från denna få information om var någonstans längs detektorkanalen som annihilationen skedde. Detta kräver dock mycket god tidsupplösning. Positronkamerans egenskaper styrs i stor utsträckning av valet av scintillator. Man vill ha ett material som stoppar gamma effektivt, genererar mycket ljus och ger snabba pulser för god tidsinformation. Favoritmaterialen är för

närvarande lutetium-orto-silikat (LSO) men även vismuthgermanat (BGO) används.

Det finns olika typer av positronkameror. Man har dedicerade hjärnkameror och helkroppskameror (fig. 3) och man har speciella kameror för små (försöks) djur. Andra kameror är utvecklade för att användas tillsammans med magnetkameror eller med datortomografer (CT). Den kombination av olika datatyper ("sensor fusion") som man då får kan vara mycket värdefull då den kopplar ihop funktion med struktur. Mestadels används PET/CT och 18F-FDG (Fluor-DeoxiGlukos, ett glukosderivat) till att diagnostisera cancer, samt att bestämma tumörspridning (metastaser). Tumörforskning med PET kan dock gå utanför nuvarande FDG teknik. Spårsubstanser har utvecklats för att kunna studera ett flertal fysiologiska förlopp i tumörer. För att kunna göra detta måste ofta dynamiska tekniker (baserade på bildserier) användas, där upptag av spårsubstansen inom både tumör och frisk vävnad studeras.

I en del fall kan PET/CT användas till att först identifiera tumörutbredning och sedan använda den informationen för terapi. T ex kan 124-I användas tillsammans med för 131-I. Med 124-I kan tumörutbredning identifieras och med hjälp av 131-I kan de funna tumörbelastade områden bestrålas med höga stråldoser.

Även om PET-tekniken funnits med ett tag så fortgår utvecklingen mot högre känslighet och bättre spatial upplösning. En fysikalisk begränsning är dock att positronen, beroende på sin utgångsenergi, rör sig en viss sträcka innan den annihileras. Annihilationsfördelningen motsvarar därför inte den exakta substansfördelningen. Fluor är bra i detta avseende eftersom den har låg energi. En praktisk gräns är omkring 1 mm.

Länge användes positronkameror huvudsakligen för forskning men på senare tid har klinisk PET gått om forskningen med god marginal.

CHRISTIAN BOHM
STOCKHOLMS UNIVERSITET

Att bota cancer med protoner

Nordens första klinik för protonterapi, Skandionkliniken, öppnade sommaren 2015 i Uppsala efter drygt 10 års utredning, planering och byggande. Så här långt har ett 60-tal patienter behandlats, men under året kommer ytterligare ett behandlingsrum öppnas och kapaciteten därmed fördubblas, så småningom planeras även ett tredje behandlingsrum. Behovet är nämligen stort, kliniken tar emot patienter från alla Sveriges landsting, och tekniken har, jämfört med vanlig strålbehandling med fotoner visat sig ha flera fördelar, speciellt för tumörer i hjärnan.

Under januari–februari gick jag själv på dagliga behandlingar vid kliniken. Behandlingen delades upp på 30 tillfällen eftersom den totala dosen bör delas upp på så många tillfällen som möjligt för att kroppen ska hinna återhämta sig. Proceduren blev snart rutin, lägga sig på en brits, få huvudet fixerat med hjälp av en formgjuten mask, lite brummande från maskinerna och roterande av britsen, och vips 10-15 minuter senare allt klart för dagen. Trots de imponerande apparaterna var det hela påfallande odramatiskt. Inget som känns, syns eller hörs från strålen. Det enda egentliga tecknet på att något faktiskt hände var en fläck med raskt tilltagande tunnhårighet som började uppstå efter ett par veckor.

Men vad sker egentligen? Jag beslutade mig för att ta reda på mer om fysiken bakom behandlingen.

Håkan Nyström, chefsfysiker och verksamhetschef vid Skandionkliniken svarar på mina frågor om protonterapi.

Vad är det som sker när protonerna träffar tumörcellerna?

Ett stort ämne, värt flera avhandlingar... Den förenklade modellen är att den joniserande strålningen, i huvudsak

via bildandet av fria radikaler, orsakar dubbelsträngsbrott på DNA-spiralen, som är svåra att reparera, varvid cellen inte korrekt kan dela sig och således dör. Detta innebär att snabbt delande cellkulturer, typ tumörer, medan de som har en långsammare celledelning, typ hjärnceller, är strålresistenta.

Vad är fördelarna med protoner jämfört med fotonstrålning?

Det korta svaret är att dosfördelningen kan moduleras också i djupled. Djupdoskurvan för fotoner är (mer eller mindre) given av fotonernas energi och kan inte påverkas; kurvan är mer eller mindre exponentiellt avtagande med lite build-up i början. Protoner har en bestämd räckvidd beroende på deras energi, och avger det mesta av sin energi mot slutet av sin räckvidd. Genom att kombinera olika energier kan man designa djupdoskurvan lite som man vill (se figur). Man kan säga att möjligheterna att modulera sin dosfördelning går från 2D (fotoner) till 3D (protoner).

Konsekvensen blir att man kan minska dosen till frisk vävnad som ligger runt den sjuka volym som man vill ge en hög stråldos. Om man ser på den integraldos som ges till patientens kropp



(minus den volym man vill behandla), ligger den typiskt 50–75 % lägre med protoner än med fotoner. Mindre biverkningar förväntas alltså med protoner. För tumörsjukdomar där man har svårt att nå upp till tumörens utslagsdos (pga för stora risker för oacceptabla biverkningar) kan man tänka sig att höja dosen med protoner och på så sätt öka sannolikheten för bot.

Hur framställs protonerna och vilken energi har de?

Det finns två grundsystem som används med olika för och nackdelar; Synkrotroner eller cyklotroner. Vi har en isokron cyklotron (rumstempererad; finns också supraleadande). Om man vill behandla alla typer av patienter och tumörsjukdomar behöver man energier över 200 MeV. Vi har 230 MeV (vilket innebär att de kan nå ett djup på 32 cm i vatten) som max. Dessutom behöver man ett system för att modulera energin och dessa system skiljer sig åt mellan olika acceleratorsystem. Vi kan gå ner (steglöst) i energi till 60 MeV (ca 3,2 cm djup).

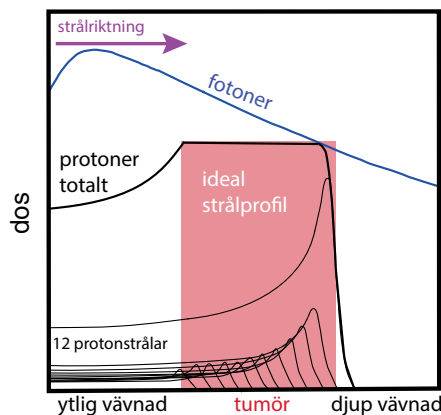
Hur gör man för att träffa på rätt ställe?

Vi har två inbyggda röntgensystem i behandlingshuvudet som ger en stereoskopisk representation av patientens skelettstruktur. Om, målvolymer (typiskt tumören) inte är väl korrelerad till skelettstrukturen, kan man använda inplanterade metallmarkörer (detta är mycket vanligt t.ex. för behandling av prostatacancer) eller andra typer av bilder (t.ex. datortomografi eller magnetresonans).

Kan du säga något om protonterapiens historia?

Man brukar alltid hänvisa till en artikel av Robert Wilson i Radiology 1946 där han för första gången föreslår snabba protoner för strålbehandling.

Första patienten behandlades i Berkeley 1954 och Uppsala (det som blev The Svedberg Lab) blev det andra stället i världen som behandlade patienter med protoner. Jag har en artikel från Teknikens Värld 1959 som handlar om detta!



Schematiskt diagram över dosprofilen för fotonstrålning respektive protonstrålning. En summa av många protonstrålar ger en profil som är koncentrerad till tumören.

Vad är framtiden? Vad forskar man på idag?

Det pågår forskning på massor av fronter; allt från nya typer av accelerators till samverkan mellan cytostatika och strålning. Jag tror själv att de stora förändringarna de kommande åren kommer att vara bättre möjligheter att individualisera behandlingarna. Vad gäller skraddarsydda dosfördelningar har vi kommit långt men när det gäller ordinerade stråldoser är vi fortfarande väldigt

populationsstyrda, dvs om man har en viss typ av tumör med ett visst stadium och histologi, ska alla sådana patienter ha samma dos. I en nära framtid kommer vi att få större möjligheter att ta hänsyn till t.ex. individuell biologi, strålkänslighet, DNA-profil etc. etc.

Finns det andra typer av strålning som skulle kunna överträffa såväl protoner som fotoner?

Här finns två åsikter; en del menar att tyngre joner, t.ex. koljoner (som är ännu dyrare att producera) är framtiden. Den viktigaste grunden för detta är att biologin är helt annorlunda. Koljoners LET (linear energy transfer) är betydligt högre, dvs koljoner ger betydligt tätare jonisering vilket leder till relativt fler dubbelsträngsbrott (svårreparabla) och färre enkelsträngsbrott (reparabla) vilket leder till högre RBE (relative biologic effect). Min egen åsikt om detta är att skillnaden i biologi är till koljonernas nackdel, utom i vissa mycket speciella fall. Vi andra tror att protonerna kan utvecklas mer och tror att den ultimata partikeln för strålbehandling skulle vara helium; ungefär samma biologi men ännu bättre fysik.

SVANTE JONSELL
STOCKHOLMS UNIVERSITET

Strålning – till nytta men ibland också riskfyllt

Inom medicinen använder vi joniserande såväl som icke joniserande strålning för diagnostik och behandling. Diagnostiska metoder som konventionell röntgen, dator-tomografi och PET använder alla joniserande strålning för avbildning medan magnetresonanstomografi nyttjar olika typer av magnetfält. Icke joniserande strålning såsom lågfrekventa magnetfält, radiovågor, infraröd strålning, optisk strålning och ultraljud nyttjas inom sjukvården till bland annat kirurgi och behandling.



Alla dessa metoder har många fördelar och har på olika sätt starkt bidragit till den medicintekniska utvecklingen men det finns också vissa risker förknippade med dessa. Det är ett område som vi forskar om vid Umeå universitet och då framförallt inom joniserande strålning och magnetfälten kring MR-kameran.

Joniserande strålning

Det är väl känt att joniserande strålning påverkar vävnad med levande celler. Flera pionjärer som undersökte strålning från radioaktiva ämnen och röntgenrör i början av 1900-talet fick vad vi idag kallar akuta strålskador i form av sår på huden som inte läkte, och förlust av naglar och hår.

Som en grundläggande storhet för en djupare förståelse av strålningens effekter, har absorberad dos definierats som absorberad energi per massenhet. Denna storhet har sin egen enhet i SI-systemet, gray (Gy) där 1 Gy är 1 J/kg. En helkroppsdos till människa på 5 Gy är dödlig för de flesta av oss. För en person på 70 kg betyder detta en absorberad energi på 350 J, det vill säga 84 cal. Om man antar att kaffe vid drickstemperatur håller ung. 60°C, så inser man att denna energitillförsel är ungefär densamma som tillförs kroppen av cirka 4 ml kaffe. Slutsatsen är att det är strålningens joniserande egenskaper som ger de biologiska effekterna, inte energiinnehållet som sådant.

Olika typer av strålning uppvisar olika jonisationsmönster. En alfapartikel,

som har cirka 8000 gånger högre massa än en betapartikel, joniserar tätare, vilket avsevärt ökar dess förmåga att åstadkomma en skada på DNA. Därför har man infört en biologisk viktning som beror på typ av strålning och som också tar hänsyn till olika vävnaders varierande strålkänslighet. En sådan biologiskt modifierad absorberad dos, kallas ”effektiv dos” och mäts i enheten Sievert (Sv), efter den svenske fysikern Rolf Sievert. De biologiska viktningssfaktorerna som används för beräkning av effektiv dos är empiriskt framtagna, och valda så att man idealiskt sett kan finna ett samband mellan effektiv dos och risk.

Det gränsvärde som gäller för personer som i sitt arbete utsätts för joniserande strålning är 20 mSv/år, och baserar sig på en uppskattning av risk (sannolikhet) för dödlig cancer, 5 %/Sv, som tagits fram genom epidemiologiska studier av de överlevande från atombombarna i Japan 1945. De som utsattes för mellan 0,1–1 Sv under bråkdelen av en sekund hade en signifikant förhöjd risk för cancer. För strålskyddet är man emellertid intresserad av riskerna från en långvarig exponering vid betydligt lägre doser, endast cirka en hundradel av den dos som man kunnat observera effekter av. Detta är också samma storleksordning som den naturliga bakgrundsstrålningen, cirka 1 mSv/år. Ett övergripande mål med stora delar av den strålskyddsforskning som bedrivs i världen är därför att bättre förstå verkan av låga doser och doshastigheter för olika typer av strålning och celler.

Att forska om strålskydd kan ta sig många uttryck. Fysiken möter här flera olika discipliner, särskilt inom naturvetenskap, teknik och medicin. Kunskaper och forskning inom mätteknik och effekterna av joniserande strålning på vävnad är centralt för att kunna förstå och skydda sig mot riskerna. För att utvärdera epidemiologiska studier behövs statistiker. När man sedan vill förstå de risker som är kopplade till strålningen, och särskilt den exponering för joniserande strålning som allmänheten på olika sätt kan komma att utsättas för, behöver dessa risker kommuniceras på ett förtroendefullt sätt. När man forskar om strålningens risker kom-

mer även etiska frågeställningar upp. Ett exempel på detta är när frivilliga försökspersoner låter sig utsättas för strålning i forskningssyfte för att andra i framtiden ska kunna få en säkrare diagnos och behandling av sin sjukdom. Även kärnkraftsfrågan, inklusive hur man förvarar det långlivade använda kärnbränslet, kräver insatser från både samhällsvetare och humanister.

För strålskyddsforskningen, liksom för allt strålskyddsarbete, är dosimetri en grundläggande hörnsten och kunskap inom området är nödvändig för att på ett korrekt sätt mäta och beräkna absorberad dos. Umeå universitet har varit delaktig i utvecklingen av en jonkammare där det känsliga mediet utgörs av en dielektrisk vätska, till skillnad från konventionella jonkammare som bygger på gaser. I en jonkammare mäts den laddning som frigörs när strålningen joniserar det känsliga mediet. I samarbete med universiteten i Århus i Danmark, och i Albuquerque i USA, bedriver vi ett forskningsprojekt för att studera vätskejonkammarens egenskaper. Vi är speciellt intresserade att kunna använda den för mätning av olika typer av strålning, särskilt med tanke på de anläggningar för strålterapi med protoner som idag byggs runtom i Europa. En av de studerade egenskaperna är hur skillnader i jonisationsmönstret från till exempel protoner och fotoner påverkar kammarens känslighet, och hur detta skulle kunna utnyttjas för att på ett enklare och säkrare sätt mäta doser i blandade strålfält.

Dosimetri när strålkällan, i form av en radioaktiv isotop, finns inne i kroppen är ett annat forskningsområde vid universitetet. Då är det praktiskt omöjligt att mäta dos till olika organ, man är därför hänvisad till att beräkna den. Stråldosen till följd av att ett radioaktivt ämne kommit in i kroppen beror på ett flertal fysikaliska och biologiska parametrar. Vi deltar i ett internationellt projekt för att ta fram och kartlägga data för några av dessa parametrar, särskilt för patienter som undergår nuklearmedicinsk diagnostik. Det gäller bl.a. att med användning av bildgivande tekniker, tillsammans med mätning av urin och blodprover fastlägga hur

radionuklider, eller radioaktivt märkta substanser, fördelas i och utsöndras från kroppen.

Ett större utsläpp av radioaktiva ämnen till vår miljö, till exempel efter en terroristattack eller en olycka vid ett kärnkraftverk, kan innebära att snabba beslut angående motåtgärder behöver tas. För att kunna ta dessa beslut måste vi kunna svara på frågor om vad som har hänt och var det är säkert att vara. Ett utsläpp kan leda till interna doser, och man kan också komma att utsättas för externa doser via direktbestrålning från en markbeläggning. Det finns flera metoder för att mäta radioaktiva ämnen för att kunna svara på dessa frågor. En pålitlig och snabb mätmetod för detta kallas *in situ* (på plats) gammaspektrometri som går ut på att man mäter fotoner direkt ovanför marken. Idag används metoden främst för att mäta radioaktiva ämnen som avger högenergetiska fotoner (> 100 keV), vilket görs 1 meter ovanför marken. Ett projekt vid vår institution i samarbete med Totalförsvarets forskningsinstitut och Strålsäkerhetsmyndigheten, där bland andra doktoranden Angelica Hedman ingår, går ut på att med hjälp av *in situ* gammaspektrometri ta fram en metod för att mäta lågenergetiska fotoner från radioaktiva ämnen som vi idag inte mäter med denna metod, för att snabbare kunna svara på de frågor som ställs vid ett större utsläpp. Det är svårt att mäta lågenergetiska fotoner av flera olika anledningar, en av dem är att bakgrundsstrålningen är relativt hög vid dessa energier. Då krävs bland annat att detektorn är anpassad för ändamålet så att inverkan av bakgrundsstrålningen blir så låg som möjligt. För att ta reda på vilken detektor som lämpar sig bäst för ändamålet görs Monte Carlo-simuleringar av hur strålningen transporteras och växelverkar i avancerade modeller av detektor och omgivning.

Icke-joniserande strålning

Det finns många tillämpningar inom sjukvården som nyttjar icke joniserande strålning, till exempel laser som bland annat används kirurgiskt framförallt inom oftalmologi. Laser kan bland an-

nat genom fotokoagulering denaturera protein och nukleinsyror, eller vid korta laserpulser utöva en sprängverkan av vävnaden. UV används främst vid hudbehandlingar av till exempel eksem eller psoriasis men även vid desinfektion. Transkraniell magnetisk stimulering är en annan tillämpning där kraftiga magnetfältspulser används, till exempel för att diagnostisera nervledningssjukdomar. Här skapar man en magnetfältspuls med spolar som genererar en strömpuls över väl bestämda delar av hjärnbarken, vilket leder till nervexcitering över vissa nervbanor. Hälsoeffekterna vid för kraftig exponering varierar beroende på typ av strålning. UV kan både ge skador på huden och ögonen, men även orsaka cancer. Laser kan vid felaktig användning orsaka skador på näthinna och huden. Lågfrekventa magnetfält kan ge upphov till nerv- och hjärtpåverkan, medan radiovågor och mikrovågor kan ge upphov till uppvärmningseffekter. Dessa risker hanteras dagligen inom sjukvården där nyttoaspekten för patienten alltid ska väga över eventuella risker.

Vid undersökningar med MR-kameran används en komplicerad blandning av mycket kraftiga statiska magnetfält, lågfrekventa magnetfält (sk. gradientfält) och radiofrekventa magnetfält för att avbilda vävnader. Vid vissa typer av undersökningar, till exempel då snabba förlopp ska studeras, kan det hända att patienten kan känna milda nervpirningar i ytliga nerver som orsakas av den ström som induceras i kroppen från gradientfältet. Risken för nervexcitation är störst då snabba förlopp ska studeras eftersom man behöver använda snabbt förändrade gradienter till exempel vid funktionell avbildning av hjärnan eller vid strokediagnostik. Uppvärmningseffekter kan inträffa då mängden RF-pulser per tidsenhet är hög, till exempel vid anatomisk avbildning där detaljupplösningen är viktig. Det är viktigt att personal, anhöriga och patienter som befinner sig i undersökningsrummet kontrolleras noggrant så att inte ferromagnetiska föremål följer med in. Det statiska magnetfältet är så starkt att dessa föremål kan dras in i magneten med sådan stor kraft att skador på personer som

råkar vara i vägen kan vara livshotande. I dag kontrolleras magnetfälten i kameran för att skydda mot dessa risker. Även medicinska implantat måste kartläggas då även dessa kan påverkas av fälten kring kameran.

Med ökande antal patienter, däribland barn och unga vuxna, som undersöks med MR-kamera och med utveckling av starkare magnetfält har också frågeställningen om eventuella långsiktiga effekter uppmärksamats. Här saknas epidemiologiska studier på stora patientgrupper som genomgått MR-undersökningar. I ett av våra projekt försöker vi finna metoder för att bestämma exponering för gradientfält och radiofrekventa fält för varje enskild patient som genomgår en MR-undersökning. Detta kan sedan ligga till grund för kommande epidemiologiska undersökningar om eventuella långsiktiga effekter. I projektgruppen finns bland annat Jennifer Frankel som är doktorand och arbetar med att studera hur stor exponeringsvariationen är mellan olika undersökningar och vilka parametrar som påverkar variationen mest. WHO/IARC har klassat både lågfrekventa magnetfält, och radiofrekventa fält som "möjliga cancerframkallare", vilket är den svagaste misstankegraden.

FAKTARUTA "Life span study" (LSS). Överlevande från Hiroshima och Nagasaki.

Forskningsprogram pågår för att följa upp hälsoeffekter hos överlevande efter bombarna i Hiroshima och Nagasaki. Studien omfattar 94 000 exponerade individer, samt en kontrollgrupp på 27 000, som inte fått någon dos. De 17 000 individer som uppskattas ha fått en dos överstigande 100 mSv utgör den viktigaste gruppen för uppskattning av risk, eftersom man för dessa kan observera signifikant ökade risker.

Dosen till de drabbade i de båda japanska städerna kom från extern bestrålning, fotoner och neutroner, under mycket kort tid, bråkdelar av en sekund. Det är känt att hög doshastighet och hög dos har en större biologisk effekt än låga doshastigheter, eftersom cellen då inte "hinner med" att reparera DNA-skadorna i den utsträckning som behövs. Man räknar därför med att den biologiska effekten är större i en sådan situation.

Denna klassificering innebär att med stöd av den forskning som bedrivits inom området, framförallt mobilanvändning och studier av barn boende under kraftledning, kan inte cancerrisken uteslutas men inte heller direkt påvisas. Det är inte känt vilken växelverkansmekanism som skulle kunna ligga bakom den eventuella riskökningen för cancer vilket gör att vi inte har några vedertagna dosmått, som till exempel den effektiva dosen (Sievert) inom den joniserande strålningen. Det radiofrekventa fältet i MR-miljön är kraftigt pulsat och gradientfältet har kraftiga variationer, det vill säga tidsderivatan av fältet (dB/dt) är hög. Det här gör att vi vid sidan om medelvärden över tid av magnetfälten också intresserar oss för mått som pulshöjd för RF fältet och dB/dt för gradientfältet. Det finns ett antal studier där man undersökt påverkan på blodceller efter exponering i MR-kamera. Resultaten är motstridiga; vissa studier har påvisat genotoxiska effekter som till exempel ökad förekomst av dubbelsträngsbrott och mikrokärnor i celler medan andra studier inte funnit några sådana effekter. Mot bakgrund av denna osäkerhet har vi vid Umeå universitet initierat ett projekt där vi tillsammans med institutionen för klinisk immunologi studerar hur humana lymfocytens DNA påverkas av MR-lik radiofrekvent exponering. Det är svårt att utföra försök i en MR kamera då fälten varierar kraftigt på bara någon centimeters avstånd. Vi har därför konstruerat en dedicerad exponeringsutrustning placerad i en cellinkubator där radiofrekventa magnetfältspulser likande dem i MR-miljö kan produceras. Här har vi kontroll över exponeringen och en stabil miljö för cellerna. Vi kan också med numeriska beräkningar bestämma det inducerade elektriska fältet och Specific Absorption Rate (SAR) i provet som ett mått på absorption. Vi kommer också bland annat att undersöka dos-respons och kinetik, det vill säga hur långt efter exponeringen effekter kan ses.

LENNART JOHANSSON
JONNA WILÉN
UMEÅ UNIVERSITET

Varför valde du sjukhusfysik?

Varför valde du sjukhusfysik?

Jag har alltid gillat matte och fysik och upptäckte på gymnasiet ämnet strålningsfysik som kändes extra spännande då det finns så mycket myter kring området. Jag ville ta reda på fakta!

Hur ser du på kombinationen teknisk fysik och sjukhusfysik?

Bra! Teknisk fysik i Umeå är en mycket bra utbildning med bra sammanhållning bland studenterna. Det känns bra att kombinera ingenjörsmässigheten med sjukhusfysik, det ger en bredare grund än om jag hade valt att bara läsa sjukhusfysik. Som student på teknisk fysik i Umeå lär man sig problemlösartänket som jag tycker att jag har stor nytta av inom den medicinska fysiken. Dessutom fick jag en bred bas av matematik och fysikkurser.

Vad tycker du om kurserna inom medicinsk fysik?

Kul och annorlunda mot för tidigare kurser inom programmet. Dels är det roligt att fördjupa sig inom ett specialområde, dels känns kurserna inom medicinsk fysik praktiskt tillämpningsbara. En blandning mellan teori, praktik och klinisk nytta.

Är det något särskilt område som du tycker verkar extra spännande?

Strålskydd och bildoptimering. Många är intresserade av strålning och strålskydd, det är roligt att kunna svara

på frågor och att förmedla kunskap. Bildoptimering för att jag alltid varit intresserad av bilder och bildbehandling och det verkar som ett spännande jobb.

Vad gör du nu?

Jag gör ett examensarbete inom PET där jag tittar på blodinputfunktioner från dynamiska PET-bilder. Vid vissa hjärnsjukdomar vill man undersöka blodflödet till hjärnan men för att göra det med en PET-kamera behöver man veta aktiviteten av radionuklider, som man injicerar i hjärnans blodkärl innan undersökningen, och hur den varierar över tiden (också kallad blodinputfunktionen). För att mäta blodflöde till hjärnan tar man i dag blodprover och mäter aktiviteten i provet. Mitt arbete går ut på att man ska få ut samma information direkt ur bilder istället och på så sätt slippa blodproven, en icke invasiv metod.

Är det roligt?

Ja! Resultatet jag kommer fram till kommer förhoppningsvis att vara användbart inom vården och det är roligt med ett självständigt arbete där jag själv planerar och lägger upp arbetet. Att få prova sig fram och lösa problem allt efter att de kommer upp är roligt.

Vad vill du göra sedan?

Jag vill ut i arbetslivet, gärna på ett sjukhus. Jag kan också tänka mig att ägna mig åt forskning längre fram i karriären.



Namn: **Sofia Jonsson**

Student på civilingenjörsprogrammet i teknisk fysik med inriktning sjukhusfysik



Vid Umeå universitet finns den unika möjligheten att som student på teknisk fysik också läsa medicinsk fysik inom teknisk fysik. Det betyder att man efter tre och ett halvt års studier påbörjar en specialisering med profilkurser inom medicinsk strålningsfysik. Efter fem års studier har man en dubbelexamen som civilingenjör och sjukhusfysiker. Vid sidan av fysik, matematik och medicinsk strålningsfysik har man träning och kunskap inom projektledning och att behandla problem inom ett brett teknikområde med hjälp av modellering och simulering med aktuella metoder och verktyg.

FYSIKDAGARNA 2016

NYA **perspektiv** I FYSIK



FYSIKCENTRUM GÖTEBORG | 27-29 OKTOBER

Kom och lyssna på:

LAWRENCE M. KRAUSS, *Kosmolog, USA*

Behandlar gravitationsvågor, nyligen upptäckta vid forskningsanläggningen LIGO.

ALBERT-LASZLO BARABASI, *Nätverksanalytiker, USA*

Forskar kring hur komplexa system, såsom world wide web och celler i biologiska system, självorganiserar och utvecklas.

JENNY JANSSON, *Lärare, Sverige*

Aktiv och framgångsrik i att utveckla nya undervisningsmetoder i fysik.

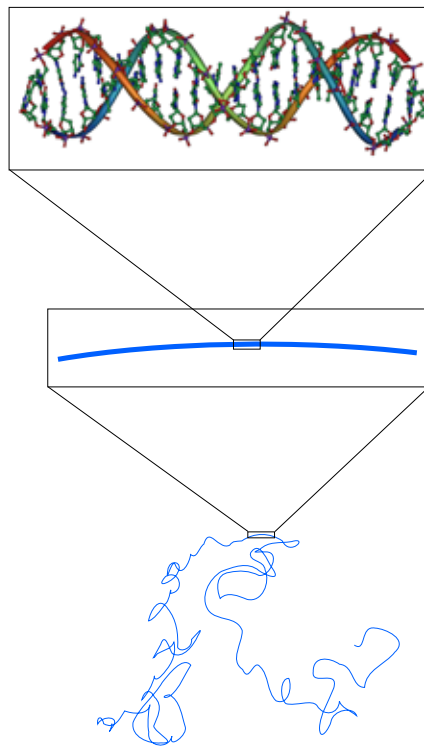
DNA i tunna kanaler

DNA är en väldigt komplex molekyl, med en fascinerande geometrisk struktur – den berömda dubbelspiralen – och avancerade kemiska egenskaper. Men faktum är att flera aspekter av molekylens beteende helt enkelt kommer sig av att den är väldigt lång.

Man kan tänka sig DNA-molekylen som ett långt snöre. Snörets egenskaper, t.ex. dess styvhet och tjocklek, bestäms av den underliggande kemin, men när detta väl är gjort har man fått en rent mekanisk modell. Den gren av fysiken som ägnar sig åt att förstå egenskaperna hos sådana långa molekyler kallas för polymerfysik.

Tänk dig nu att DNA-molekylen (snöret) simmar i en saltlösning. Molekylerna i lösningen kolliderar ständigt med snöret, vilket gör att alla dess delar är i ständig rörelse, och att snöret ändrar form från mikrosekund till mikrosekund. Att exakt beskriva snörets tillstånd och hur det ändrar sig med tiden är hopplöst, istället får man nöja sig med en statistisk beskrivning.

Min forskningsinriktning handlar om att försöka förstå hur den statistiska beskrivningen av DNA-molekylens form påverkas av att man stänger in molekylen i en kanal. Varför behöver man då veta detta? Den direkta motiveringen är att flera forskargrupper experimentellt studerar just sådana system, där DNA-molekyler tvingas in i kanaler etsade ur kisel. Som en följd av att kanalen pressar ihop molekylen sträcks den ut i kanalriktningen, vilket i sin tur är användbart i flera biotekniska experiment. För att kunna tolka resultaten av dessa experiment och utveckla dem vidare krävs det att man förstår den underliggande fysiken. Förutom biotekniska applikatio-



*En DNA-molekyl är som ett långt snöre.
Illustration: Erik Werner. (DNA-spiralen
överst av Michael Ströck, Wikipedia).*

ner kan sådana kanaler också användas som enkla modellsystem för att studera hur DNA påverkas av att vara instängt i trånga utrymmen (som till exempel är fallet i våra cellkärnor).

Det är alltså så att DNA-molekylen

”sträcks ut” i kanalen. Med det menas inte att molekylen blir längre, utan bara att den skrynklar ihop sig på ett sådant sätt att avståndet mellan molekylens två ändar är större än det skulle vara om kanalen inte fanns. En sådan ”sträckt” DNA-molekyl illustreras i figuren på nästa sida.

Vad är det som avgör hur utsträckt molekylen i genomsnitt blir? Det bestäms av en avvägning mellan två motverkande mekanismer: en kraft som strävar efter att minska utsträckningen balanseras mot en kraft som strävar efter att öka den. Den första kraften är rent entropisk, det vill säga att den kommer sig av att det finns fler sätt för molekylen att uppnå en kort utsträckning än en lång. Det är precis samma kraft som får polymererna i ett gummiband att dra ihop sig när man sträcker ut det.

Den andra kraften är ett uttryck för interaktionen mellan olika segment. DNA i lösning är negativt laddat (A:et står för ”acid” som betyder just detta). Om två segment kommer nära varandra kommer de därför repelleras varandra. Ju kortare utsträckning molekylen har, desto större sannolikhet är det att flera segmentpar kommer tillräckligt nära för att interagera, och repulsionen mellan segment tenderar därför att öka utsträckningen.

Om man vill räkna ut molekylens genomsnittliga utsträckning krävs det

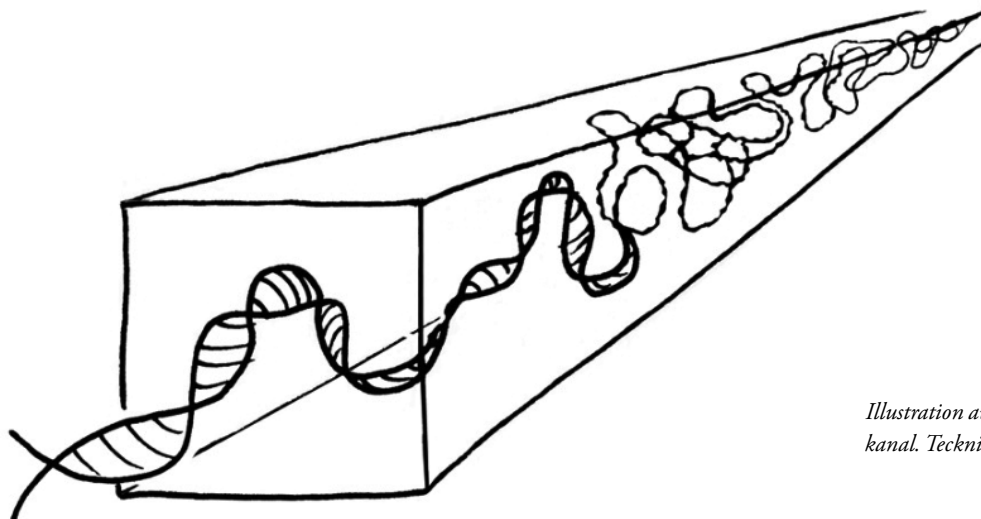


Illustration av en DNA-molekyl i en kanal. Teckning av Karin Hartman.

att man lyckas kvantifiera dessa motverkande krafter. Det visar sig i de flesta fall vara relativt enkelt att få ett exakt uttryck för den entropiska kraften. Metoden för detta är ganska spännande: man visar att molekylen har samma statistiska egenskaper som vägen hos en partikel som utför en slumpvandring (random walk). Att kvantifiera den repulsiva interaktionen mellan olika segment visar sig däremot vara betydligt knivigare. Svårigheten ligger i att det finns så många potentiella interaktioner som alla hänger ihop, på så vis att sannolikheten för att ett givet par kommer tillräckligt nära för att interagera, påverkas av hur de övriga segmenten förhåller sig till varandra. I de flesta fall får man nöja sig med approximativa uttryck som inte är helt tillförlitliga.

Det jag har visat med min forskning är att det under vissa förutsättningar går att förenkla beskrivningen av molekylen statistik, vilket i sin tur gör det möjligt att förutspå molekylen utsträckning. Istället för att specificera tre koordinater för varje segment (tre eftersom molekylen finns i ett tre-dimensionellt rum) räcker det att specificera en koordinat, som anger var i kanalriktningen segmentet befinner sig. Resultatet är en en-dimensionell statistisk modell som inom matematiken benämns "the weakly self-avoiding random walk". Denna modell har en känd lösning, och genom att applicera lösningen på ur-

sprungsproblemet kan man förutsäga inte bara den genomsnittliga utsträckningen, utan hela dess statistiska fördelning.

Dessutom visar modellen att olika experimentella förutsättningar är relaterade till varandra på ett överraskande sätt: Om du är intresserad av hur något mätvärde beror på t.ex. kanalens storlek så räcker det i flera fall att göra mätningar för en enda kanalstorlek – därefter kan man räkna ut vad mätvärdet bör vara för andra kanalstorlekar!

Dessa resultat gäller om kanalstorleken uppfyller två villkor: Å ena sidan måste kanalen vara tillräckligt stor för att molekylen ska ha plats att kröka sig. Å andra sidan måste den vara så liten att interaktioner mellan molekylen och kanalens väggar är vanligare än interaktioner mellan molekylen olika segment. För en DNA-molekyl leder detta till att kanalens storlek bör vara större än cirka 200 nm och mindre än cirka 1000 nm. Lyckligtvis gäller dessa villkor för flera av de experiment med DNA i kiselkanaler som jag nämnde ovan, och resultaten gör därför att vi bättre kan förstå vad som händer i dessa experiment.

Min förhoppning är att detta i förlängningen även kommer leda till en ökad förståelse för DNA-molekylen fysik och hur den påverkas av att stängas in i trånga utrymmen.

ERIK WERNER
GÖTEBORGS UNIVERSITET

- Respondent: Erik Werner
- Avhandlingen framlagd 24 september 2015 vid Institutionen för fysik, Göteborgs universitet
- Titel på avhandlingen: Equilibrium statistics of channel-confined DNA
- ISBN: 978-91-628-9555-6
- Länk till avhandlingen: gupea.ub.gu.se/handle/2077/40087
- Handledare: Bernhard Mehlig, Göteborgs universitet
- Opponent: Klaus Kroy, Leipzigs Universitet
- Examinator: Stellan Östlund, Göteborgs universitet

En kreativ begåvning som gärna djupdyker i roliga ämnen

Erik Werner läste matematik vid Lunds universitet under två år innan nya intryck och miljöer lockade honom vidare från födelsestaden. Först blev det tre terminer som utbytesstudent i Tyskland innan han återvände, nu till fysikstudier vid Göteborgs universitet och en masterexamen samt därefter en doktorsexamen.

Har du några knep för att lyckas med det du ger dig in på?

– Ja, en lutheransk arbetsmoral, svarar Erik med en glimt i ögonvrån. Samtidigt så måste jag erkänna att jag tycker att det mesta som jag gör är väldigt roligt. Något som också underlättar tillvaron och skapar balans är att jag inte så lätt blir uppstressad, något som många tycks må dåligt av idag, konstaterar Erik.

Under vårt samtal framtonar en bild av en mångfasetterad person som kan se och uppskatta saker långt utanför fysikens värld.

Hur går det att hålla fokus när så mycket intresserar?

– Jag är ingen superplanerare av tillvaron, konstaterar Erik.

Något filosofiskt kan han konstatera att varje dag bjuder på glada överraskningar och det är osmart att inte ta till sig alla.

– Livet är kort, mycket kan hända på vägen, säger Erik. Han konstaterar att han är ganska impulsstyrd, men hittills har det varit till hans fördel.

– Jag har haft som målsättning att försöka göra saker som jag både tycker är roliga och som håller så många dörrar som möjligt öppna.



Vad sysslar du med när du kopplar av från forskningen?

– I och med att jag är far till en två-åring så går det mesta av min fritid åt till att ta hand om och leka med honom. Sen försöker jag att läsa så mycket jag hinner. Mest facklitteratur och gamla romaner, även om jag just nu hakat på den senaste trenden och läser Elena Ferrantes Neapel-serie.

Plötsligt börjar samtalet ge en spännande kompletterande bild av DNA-forskaren framför mig.

Vad har du mer för dolda talanger undrar FA nyfiket?

– Jag är faktiskt ganska styv på bordshockey. Sen gillar jag att sjunga och spela musik. Just nu som tenor i en klassisk kör, tidigare har jag också spelat i några band, senast organist i ett reggaeband. Men jag är inte nån särskilt bra musiker, det är bara något jag tycker är väldigt kul.

Hur kommer det sig att det blev fysik som huvudspår?

– Efter gymnasiet började jag läsa matematik vid universitet. Jag visste inte vad jag ville göra på lite längre sikt, men tänkte att matematik har man alltid glädje av. Dessutom hade mina båda storasysstrar gjort likadant och talade sig varma för det. Det visade sig vara fantastiskt roligt. Efter något år började jag för nöjes skull läsa Feynmans "Lectures on Physics", och blev sugen på att blanda in lite av verkligheten i matematiken. Jag lyckades ta del av ett utbytesprogram mellan Lunds och Potsdams universitet och läste där teoretisk fysik i tre terminer.

Erik Werner

- Ålder: 32 år, född i Lund.
- Bor: Lägenhet i Göteborg.
- Familj: Snart gift, 2-årig son.
- Nuvarande arbete: Forskare vid Göteborgs universitet.
- Framtidsplaner: Öppna. Kanske postdoc i USA?
- Fritidsintressen: Läsning, musik och programmering.

Hur ser livet ut idag?

– Jag har en liten familj med en sambo och en tvåårig son som tar det mesta av min tid utanför forskningen. Vi bor i en lägenhet på Guldheden, nära både till universitet, staden och naturen i form av Änggårdssbergens naturreservat. Så jag har det väldigt fint ordnat om jag får säga det själv!

Du gillar att läsa på fritiden, men vad utöver romaner blir det?

– Jag läser gärna populärvetenskaplig biologi och historia.

Under samtalet känns det som att överlag så har Erik snubblat in på olika saker som sedan tyckt intressanta och därför fördjupat sig i. På fritiden har han alltid småprojekt på gång.

– Just nu försöker jag skriva ett program som ska förutspå om det kommer regna den närmsta halvtimmen, så att jag vet om jag behöver ta på regnkläder när jag ska ge mig ut. Dessutom funderar jag på att ge ut en bok som jag själv skulle vilja läsa men inte lyckats hitta. Det ska vara Shakespeares pjäser med originalet på ena sidan och Hagbergs klassiska översättning på den andra.

Hur ser framtiden ut nu efter disputationen?

– Det är högst oklart än så länge. Jag har sökt anslag från Vetenskapsrådet för att möjligtvis göra en postdoc vid Harvards universitet i Boston, det hade förstås varit fantastiskt spännande!

Vad är det för forskning som eventuellt väntar där?

– Det skulle i så fall handla om att använda modeller inspirerade av statistisk fysik för att försöka förstå de genetiska effekterna som följer när en biologisk population expanderar in i ett nytt område. Det finns en forskargrupp där som angriper denna fråga genom en kombination av experiment på mikroorganismer, datorsimuleringar och teoretisk modellering.

När får du reda på om det blir några pengar från VR?

– I juni är det sagt, så det börjar dra ihop sig!

När åker du och din familj i så fall?

– Det blir under hösten, berättar Erik.

Hur tror du det går för din sambo att få jobb?

– Eftersom hon är programmerare så borde hon ha goda möjligheter att hitta något, ifall nu vistelsen blir av, svarar en optimistisk och förväntansfull Erik.

FA önskar lycka till i framtiden!

MARGARETA KESSELBERG
FYSIKAKTUELLT

Heureka!

FYSIK



Ett lysande fysikläromedel!

Förklarar fysiken!

Med Heureka förstår dina elever det naturvetenskapliga arbetssättet. Förklaringar och texter är elevnära och fångar elevens uppmärksamhet. Till böckerna finns även lärarhandledningar som är ett starkt stöd för dig som lärare.

Gratis läxhjälp på Facebook

Nu erbjuder vi gratis läxhjälp till alla Heurekaelever! Där hjälper våra fysiklärare eleverna med svåra frågor, komplicerade förklaringar och uträkningar. Se själv på www.facebook.com/HeurekaLaxhjalp



Natur & Kultur
08-453 87 17
www.nok.se/heureka



Wallenbergs Fysikpris 2016

Final i Göteborg och Tallinn

Finalen i Wallenbergs Fysikpris, den svenska uttagningsstävlingen till fysikolympiaden, består av två delar, en experimentell och en teoretisk. Den experimentella delen genomfördes i mitten av mars under den så kallade "Fysikveckan" vid Chalmers/Göteborgs universitet under ledning av professor Sheila Galt med medarbetare. Mycket uppskattat med studiebesök, föreläsningar och kluriga experiment för gymnasisterna.

Då få tjejer varit med och tävlat i Wallenbergs fysikpris har sedan två år tillbaka sex av de tjejer från årskurs två som varit med i uttagningsstävlingen bjudits in att utan tävlan delta i fysikveckan som VIP-gäster. Målet är att deltagandet ska inspirera till fortsatt satsning på fysik, och satsningen har redan gett effekt. Två av förra årets VIP-tjejer åker i sommar till internationella fysiktävlingar: Julia Järlebark till fysikolympiaden och Phiphi Tran till IYPT, International Young Physicists' Tournament.

Nytt för i år var en inbjudan att låta finalisterna i Wallenbergs fysikpris delta

i den öppna finsk-estniska fysikolympiaden vid Tallinns tekniska universitet. I år ersattes därför vår egen teoridel av deltagandet i denna tävling, och glädjande nog fick våra svenska gymnasister fina placeringar med en sjuätteplats för Aletta Csapo som bäst. Teoridelen från den andra dagen på denna olympiad fick sedan utgöra underlag för kvalificeringen till det svenska olympiadlaget tillsammans med resultatet från den tidigare genomförda experimentella delen under "Finalveckan" i Göteborg.

I år skriver Sverige historia med två tjejer i olympiadlaget

De fem gymnasister som kommer att representera Sverige vid den 47:e internationella fysikolympiaden (IPhO) i Schweiz-Lichtenstein i mitten av juli blir:

Aletta Csapo, Donnergymnasiet, Göteborg
Oskar Vallhagen, Kitaskolas gymnasium, Göteborg
Erik Tegler, Polhemsskolan, Lund
Julia Järlebark, Alléskolan, Hallsberg
Albert Johansson, Åva gymnasiet, Täby

*De svenska deltagarna i Tallinn, Estland.
 Från vänster till höger: Lucas Unnerfelt,
 Oskar Vallhagen, John Olof Hallman,
 Gabriel Malmer, Patrik Hybelius,
 Aletta Csapo, Erik Tegler,
 Ludvig Wemlén, Joakim Blikstad,
 Albert Johansson, Fredrik Hernqvist,
 Emil Grudic och Niklas Mannerskog.
 Utöver dessa medverkade även
 Julia Järlebark från CERN samt
 Daniel Carlsén (deltog inte i
 den teoretiska delen).*

Joakim Blikstad och John Olof Hallman som kom på andra respektive tredje plats i årets upplaga av Wallenbergs fysikpris åker på andra vetenskapsolympiader istället; programmerings- och matematikolympiaden. Man är tvungen att välja!

MARGARETA KESSELBERG
 FYSIKAKTUELLT



Uppgift 3. Friktion – "Häftkraft"

Uppdrag: Mät kraften som krävs för att dra isär två häften inbladade omlott i varandra. Hur beror kraften på överlappet?

Ledtråd: Efter att ha bladat ihop katalogerna löst, skjut ihop försiktigt tills det börjar ta emot. Gör sedan din första mätning.

Utrustning:

- två kataloger med borrhål och snören för upphängning
- ett labstativ med griplö
- ett stort gem
- en tygpåse
- en trave med kataloger och böcker
- en våg



Sheila Galt, projektledare, demonstrerar uppgifterna.

Under den experimentella delen var det lekfulla uppgifter som satte såväl deltagarna som tävlingsjuryn på prov.

Mest annorlunda var nog friktionsexperimentet "Häftkraft". Läs mer om övriga experiment på vår hemsida: www.fysikersamfundet.se

Olympiaddeltagare i stora salen i Tallinns rådhus i samband med prisutdelningen.

En plats i solen

Före industrialiseringen arbetade de flesta utomhus och blev därmed solbrända, vilket fick överklassen att vilja vara ljus i hyn. När sedan många arbeten flyttade inomhus blev det chic att vara solbränd och det anses än idag vara eftersträvarvärt, trots att frekvensen av hudcancer ökat kraftigt. I Sverige drabbas exempelvis över 3 000 personer varje år av malignt melanom.

Povel Ramel skaldade i melodin Naturbarn från 1956 om de första charterturisterna på lata latituder. *Förr så vacker ligga sandstranden; nu turist förstöra utsikten; tycka sig själv så brun och frisk; men ändå se ut som torkad fisk.*

UV-strålning delas ofta in i tre olika våglängdsområden, UVC (100–280 nm), UVB (280–315 nm) och UVA (315–400 nm) se figur 1. Solljusets UVC-strålning absorberas i ozonskiktet och av den strålning (W/m^2) som når jordytan utgör UVB cirka 0,5 procent, UVA cirka 5 procent, det synliga cirka 55 procent och resten är mestadels IRA (780–1400 nm).

- **UVB-strålar** är energirika, men når bara till överhuden och gör hornlagret tjockare. Förtjockningen hindrar UV-strålning med kort våglängd från att tränga in i vävnaderna. UVB stimulerar också nybildningen av pigmentet (melanin) som finns underst i överhuden, men orsakar också erytem (hudrodnad). Vidare innehåller UVB de våglängder mellan 290 och 320 nm, som får kolesterolet i huden att bilda D-vitamin.

- **UVA-strålar** är energifattigare än UVB, men passerar överhuden in i läderhuden och gör att det pigment vi redan har underst i överhuden (basallagret) mörknar, så för ”vacker” solbränna krävs både UVB och UVA. Dessvärre gör UVA huden rynkig och att den åldras i förtid. (Leder dock inte till tidigarelagd pension.)

Både UVB och UVA kan skada DNA och orsaka hudcancer. Basallagret- och skivepitelcancer kommer från de hornbildande cellerna i överhuden, men är lättbehandlad om den inte tillåts växa in i läderhuden. Malignt melanom, bildas i pigmentcellerna (melanocyter) i basallagret och kan sprida sig in i lymf- och blodkärl, vilket är betydligt allvarigare.

Solskyddsfaktor

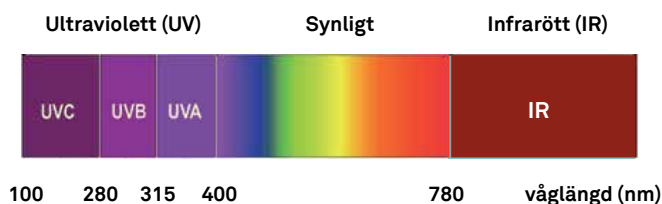
Franz Greiter (1919–1985) växte upp i Tyrolen där han idkade bergsbestigning. Han besvärades ofta av hudrodnad (erytem) och när han 1938 besteg det 3 300 m höga Piz Buin var måttet rågat. Han

började då tillsammans med sin fru, utveckla en Gletscher Crème (glaciärkräm) under namnet Piz Buin. Han införde 1962 solskyddsfaktorer (SPF = Sun Protection Factor) för UVB. SPF 2 blockerar 50 procent, SPF 4 blockerar 75 procent och SPF 50 blockerar 98 procent av UVB strålningen (figur 2). Skillnaden mellan SPF 30 och SPF 50 är omkring 1 procentenhet, men prisskillnaden mellan motsvarande solkrämer kan vara större.

Man mäter den tid man kan vistas i solen utan skydd och multiplicerar med solskyddsfaktorn och får då den tid man kan vistas i solen. I Sverige kan solen högst bli så stark att någon med känslig hud får hudrodnad efter ca 15 min och borde med SPF = 10 kunna sola i 2,5 timmar. Då krävs dock att man verkligen ”krämar in” med rekommenderade 1,5–2 mg/cm^2 och fyller på efter bad och för svettning. Med en kroppsytta på 1,5–2 m^2 kan det gå åt över 30 g, nästan som volymen av en golfboll.

Solkräm

Det finns fysiska och kemiska filter i solskyddsmedel. Fysiska filter, som titandioxid (TiO_2) och zinkoxid (ZnO), består av små partiklar som reflekterar bort UV-strålningen. I kemiska filter, som oktylmetoxycinnamat (OMC) och octocrylene, absorberar molekylerna UV-strålningen och omvandlar den till långvågigare och mindre skadlig strålning. Fabrikanterna blandar olika ämnen för



Figur 1: Indelning av spektrum i och omkring det synliga området.

att så bra som möjligt blockera både UVB och UVA. Somliga ämnen är omstridda och kan, utöver miljöpåverkan, vara hormonstörande och allergiframkallande. I EU:s förordning 1223/2009 listas 28 (ännu) tillåtna ämnen. Provningsmetod för solskyddsfaktorer finns i standarden (ISO 24444:2010). I figur 3 visas absorbansen (A) för ovan nämnda substanser vid olika våglängder. Eftersom elektromagnetisk strålning avtar exponentiellt vid passage av substanser (Beers lag) lämpar sig ett logaritmiskt mått. Transmittansen (T) blir då $T = 10^{-A}$ eller $A = -\lg T$. Ett absorbansvärde på 0 innebär en transmittans på 100 % och ett absorbansvärde på 1 ger en transmittans på 10 %.

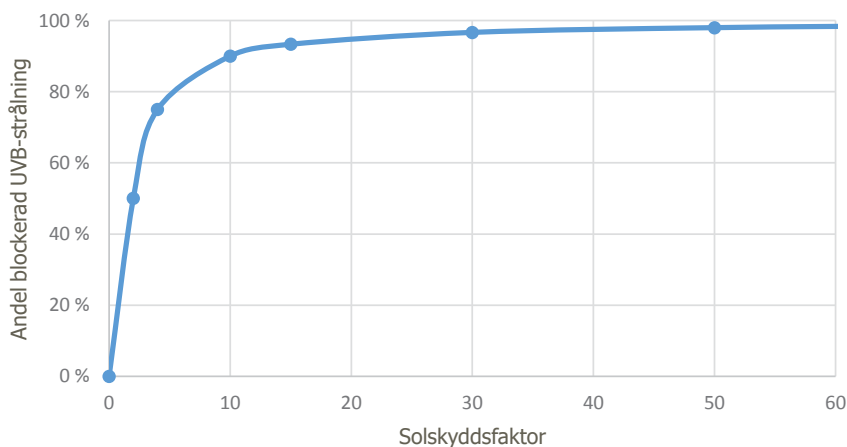
Fabrikanterna laborerar också med olika partikelstorlekar exempelvis på titandioxid (figur 4), men det är inte klarlagt om de pyttesmå partiklarna kan tränga genom huden, vidare in i kapillärblodkärl och kanske bidra till att blodproppar bildas.

UV index

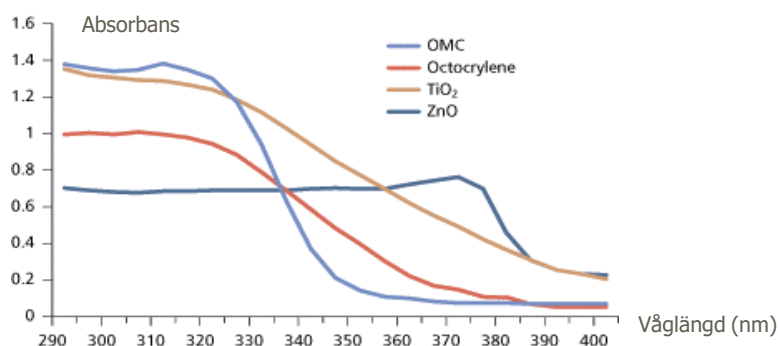
Våra ändrade solvanor sedan 1960-talet har lett till att antalet fall av hudcancer ökat alltmer. När ozonlagrets uttunnning uppmärksammades på 1980-talet ökade myndigheternas oro. Kanada var pionjärland på detta område, och flera andra länder följde efter, med prognoser för riskerna att vistas i solen. Varje land hade sina egna metoder, och resultaten var inte jämförbara.

Världshälsoorganisationen (WHO) tog därför 1994 initiativ till en standard för sammanvägning av mätdata. UVB-strålning ger mer hudrodnad än UVA-strålning och därför har förmågan att orsaka hudrodnad, våglängd för våglängd, fastställts av CIE (Commission Internationale de l'Éclairage) Resultatet kallas aktionsspektrum för erytem och visar hur effektiv den aktuella UV-strålningen är att orsaka hudrodnad. Vi talar om erytemviktad UV-strålning (ISO/CIE 17166:1999). Motsvarande snarlikt aktionsspektrum finns exempelvis för DNA.

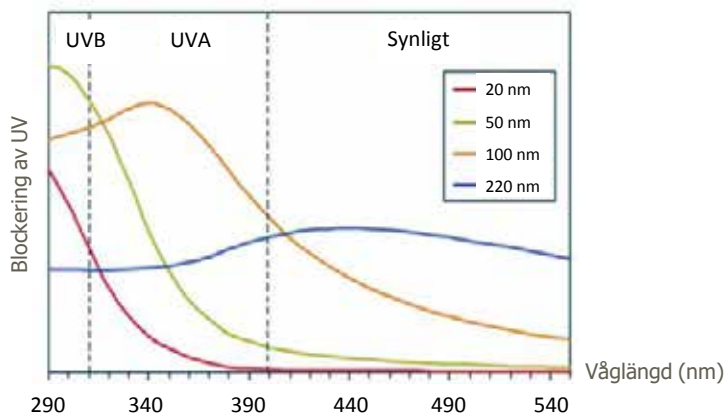
Instrålningen (irradiansen) mäts med en spektroradiometer i enheten Wm^{-2}/nm



Figur 2: Andelen UVB-strålning som blockeras och motsvarande solskyddsfaktor.



Figur 3: En blandning av ZnO och TiO₂ ger bra skydd för både UVB och UVA, men ZnO som användes förr på grund av sin förmåga att blockera UVA finns inte längre med på EU:s lista.

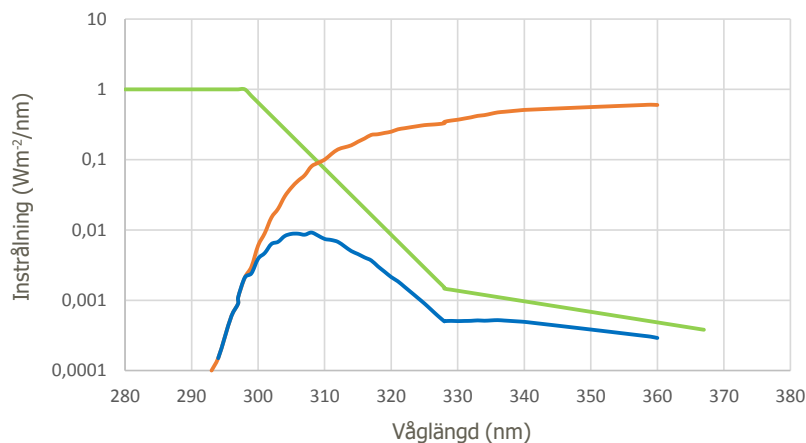


Figur 4: Förmågan att blockera UVA- och UVB-strålning för olika partikelstorlekar hos titandioxid.

och genom att multiplicera med aktionspektrum fås den erytemviktade kurvan (figur 5). Integrerar man sedan över våglängden får man arean under kurvan i enheten Wm^{-2} . Varje enhet är lika med $25 mW/m^2$ och för att göra det mer publikt (lättbegripligare) har detta mått skalts om till ett dimensionslöst UV-index

genom att multiplicera med faktorn $40 W^{-1}m^2$. Index avser klar himmel och mitt på dagen och i Sverige ligger UV-index mellan 0 och 8. SMHI ger dagsprognoser. De högsta värdena på jorden återfinns i bergstrakter närmare ekvatorn, där de kan vara över 20.





Figur 5: Principskiss för beräkning av UV-index. Röd kurva visar den UV-strålning som når jordytan. Grön kurva visar den uppskattade effekten av UV-strålningen på huden i form av aktionskurvan för erytem. Den blå kurvan fås om den röda och den gröna kurvan multipliceras och måttet på UV-index tas som arean under den blå kurvan.

UV-kläder

Ogillar eller oroar man sig för innehållet i solkrämer, ger kläder ett enkelt och effektivt skydd mot solen, speciellt för barn. Textilier absorberar både UVA- och UVB-strålning. Täthet och tjocklek är mest avgörande för graden av UV-skydd. En bomulls-T-shirt kanske släpper igenom 10 procent av UV-strålningen, medan jeans tyg nästan är ogenomträngligt (bortsett från de moderiktiga hål vissa yngre har i sina byxor). Kraftigt färgade textilier skyddar bättre än ofärgade. Om plaggen är torra eller våta, löst sittande, uttänjda, nya eller tvättade har också betydelse.

Australien var det första land som 1996 införde en standard för specifikation och test av kläders UV-skydd. De introducerade begreppet UPF (Ultraviolet Protection Factor), som ett mått på skyddsfaktorer för kläder, efter samma princip som solskyddsmedlens SPF. An-

dra länder följde efter och den europeiska kommittén för standardisering, CEN, tog fram en EU-norm som blev formellt antagen 2003, då den även blev svensk standard (SS EN 13758). Här krävs att UV-skyddskläder har UPF 40+, dvs. en genomsnittlig UVA-transmission på mindre än 2,5 procent. Kravet på UPF 40+ ger ett tillräckligt skydd för extrem UV-exponering överallt på jorden. Det ger även en säkerhetsmarginal för effekter som kan sänka UV-skyddet, som uttänjning eller fukttillstånd. Hos bomull, som är bland de material som påverkas mest av väta, kan skyddet minska till hälften.

Solarier

I England ledde industrialiseringen till urbanisering. Barn och vuxna, som tidigare befunnit sig utomhus och exponerats för solljus under stora delar av dygnet, satt nu inomhus i de mörka och trånga

städerna, vilket ledde till skelettmissbildningar och hjulbenthet. Bristsjukdomen rakitis kallades följaktligen för engelska sjukan. När det blev känt att den orsakades av brist på D-vitamin började kvartslampor användas. Lampans glaskolv är gjord av kvartsglas, därav namnet, som släpper igenom UVB bättre än vanligt glas. Gruvarbetare ordinerades behandlingar när de befunnit sig i underjorden en tid, och barn behandlades förebyggande. Jag var som barn utsatt för denna omsorg.

På 1980-talet slog solarier, med långa lysrör, igenom, vilket medförde att inomhussolande blev populärare. Genom att tillverka rör med mest UVA-strålning marknadsfördes de som "säkra", eftersom man en gång trodde att UVA var mindre farlig än UVB. Solarier har därför inte samma sammansättning av UVA- och UVB-strålning som solen och huden utvecklar därmed inte samma naturliga skydd vid solariesolning, eftersom det är UVB-strålningen som ger den skyddande förtjockningen av hornlagret. UVA-strålningen påverkar dock melaninpigmentet i överhuden, givet att det byggs upp av tidigare UVB-strålning. Även UVA kan orsaka erytem, men enligt figur 5 krävs omkring 1 000 gånger större dos jämfört med UVB. Solarier ger heller inget tillskott av D-vitamin.

Det finns också ett tydligt samband mellan solariesolande i unga år och hudcancer. Strålsäkerhetsmyndigheten har därför tagit fram särskilda regler för solarier. Bland annat får solarier inte ha en högre styrka än tropisk sol. Det betyder dubbelt så stark sol jämfört med svensk sommarsol och motsvarar UV-index 12. Vid en sådan styrka kan en ljushyad person bränna sig redan efter 10–15 minuter.



Figur 6: Exempel på UV-märkning av kläder, här UPF 40+.

Ekvivalensprincipen

På bild 1a ser du en klassisk leksak, ofta daterad till 1500-talet. Den har olika namn världen över, som t ex balero i Spanien. Leksaken består av en kula fäst med en tråd i en trätt, som sitter på en stång. Man kastar kulan och försöker sedan fanga den i trätten, vilket kräver stor skicklighet. Albert Einsteins granne i Princeton, Eric Rogers, överlämnade en variant av baleron till Einstein på hans 76-årsdag. Jag visar den stiliserad på bild 1b. Du kan själv lätt tillverka en enkel balero hemma utan plastsfären och med ett elastiskt snöre istället för fjädern. När Du släpper prylen, så att den faller fritt, hamnar bollen automatiskt i trätten! Einstein insåg omedelbart att experimentet illustrerade hans s. k. ekvivalensprincip, som han introducerat 48 år tidigare.



Bild 1a

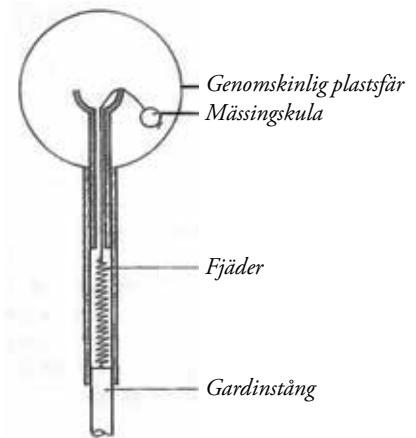


Bild 1b

När baleron är stilla (bild 2a) hänger kulan rakt ner och trädens töjning är ett mått på kulans vikt, den tunga massan m_{tu} . Gravitationskraften G balanseras av sträckkraften S_1 från tråden. När man släpper baleron kommer kulans tröga massa m_{tr} att accelereras p g a gravitationen. Einstein antog nu att den tunga och

tröga massan är lika stora, $m_{tu} = m_{tr}$, vilket leder till att alla kroppar accelereras lika mycket vid fritt fall. Speciellt faller trätten och kulan lika fort. Vi har då bortsett från att kulan under fallet rör sig någon centimeter uppåt relativt baleron. När kulan hamnar i trätten har baleron fallit cirka en meter, så vi kan anse att trätt och kula faller ungefär lika. I det fallande systemet har kulan då ingen tyngd och dras in i trätten av spänningen S_2 i fjädern, se bild 2b.

Under åren har en stor mängd varianter av experimentet konstruerats. Jag nämner här två exempel.

- Man låter en vattenflaska med hål i botten falla fritt. Inget vatten rinner då ut ur hålet.
- Man fäster en liten ballong med en fjäder i botten på en vattenbehållare så att ballongen nätt och jämt flyter. Vid fritt fall dras ballongen ner i vattnet eftersom vattnet då inte har någon lyftkraft.

Resonemangen ovan betyder att acceleration och tyngdkraft är identiska begrepp, den s.k. ekvivalensprincipen. Einstein fick denna plötsliga insikt när han 1907 hörde att en person fallit ner från ett hus i Berlin och beskrivet känslan som om han var utan tyngd. "Den lyckligaste dagen i mitt liv" konstaterade Einstein. Ekvivalensprincipen ledde fram till den allmänna relativitetsteorin, som vi nu 2015/16 firar 100-årsjubileet av. Tänk att man enkelt kan göra experiment hemma på den allmänna relativitetsteorin! Välkomna till Fysikaliska leksaker på Chalmers för att studera detta och andra relativitetsfenomen närmare.

PER-OLOF NILSSON
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

STILLA

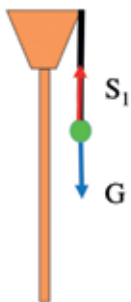


Bild 2a

FALLER

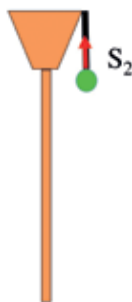


Bild 2b

TRÅDLÖSA SENSORER FRÅN PASCO

Äntligen är det fritt från sladdar och inte heller behövs det något interface. För att göra dataöverföringen enklare och snabbare använder de nya Pasco sensorerna Bluetooth Smart (Low Energy teknologi, BLE). Detta möjliggör direkt, trådlös uppkoppling till din dator, surfplatta eller smartphone med programmen SPARKvue eller Capstone. Sensorerna kan även mäta fristående då de har lagringskapacitet av mätdata.



Sensor	Pris exkl. moms	art nr:
Kraft - Accelerationssensor	1 450 kr	PS-3202
pH sensor	860 kr	PS-3204
Tryck sensor	1 020 kr	PS-3203
Temperatursensor	570 kr	PS-3201

TRÅDLÖST AIRLINK INTERFACE FRÅN PASCO

Med det lilla smidiga AirLink interfacet för inkoppling av en sensorenhet kan du göra om alla dina sensorer så att de blir trådlösa! Det nya AirLink interfacet har möjlighet för både Bluetooth och USB koppling till dator, surfplatta och smartphone.



Pris exkl. moms: 860kr art nr: PS-3200

TRÅDLÖS SMART DYNAMIKVAGN

revolutionerar laborativ mekanik

Den nya Smart Dynamikvagnen som är utrustad med inbyggda sensorer för att mäta kraft, position, hastighet och acceleration är det ultimata verktyget för ditt fysiklab! Du kan använda vagnen på dynamikbana eller direkt på bordet utan att ansluta andra sensorer för dina mätningar.



SMART Dynamikvagn	Pris exkl. moms	art nr:
Röd	2 300 kr	ME-1240
Blå	2 300 kr	ME-1241

CASIO RÄKNARE

Gamdata representerar nu Casio räknare och erbjuder från maj – september kampanjpriser.



Kontakta Gamdata för lärarex eller en visning av Casio räknare på din skola.

ClassWiz serien har snabbare processorer, större minne och bättre upplösning.

Casio grafräknare står för kvalitet och enkel användning till ett mycket bra pris.

KAMPANJPRISER maj – sept	Pris exkl. moms
FX-82EX ClassWiz	175 kr
FX-7400GII Grafräknare	318 kr
FX-9750GII Grafräknare	519 kr

Se fler räknare till Kampanjpris på www.gamdata.net