INNFØRING I FYSIKK



REIDUN RENSTRØM
THERESE RENSTRØM

VINNER AV
Universitetsforlagets pris for beste lærebokidé

UNIVERSITETSFORLAGET

INNFØRING I FYSIKK

Reidun Renstrøm
Therese Renstrøm

INNFØRING I FYSIKK

Universitetsforlaget

© Universitetsforlaget, Oslo, 2020
ISBN: 9788215041247
1. utgave, 1. versjon, Universitetsforlaget, 2020
E-utgaven baserer seg på 1. trykte utgave, Universitetsforlaget 2020

Elektronisk tilrettelegging: Universitetsforlaget
Omslagsdesign: Mette Gundersen
Sats/design: AiT Bjerch AS, Arnvid Moholt

Illustrasjoner:
Tekniske illustrasjoner er gjort av Arnvid Moholt, med unntak av følgende figurer: 10.24, 10.27, 10.31, 10.33, 11.6, 11.16 og 15.6, som er gjort av Bjørn Norheim.
Alle håndtegninger er gjort av Therese Renstrøm. Reidun Renstrøm har tatt følgende foto: 7.27, 10.6, 19.9b

Øvrige foto og illustrasjoner krediteres:
7.28: Fotokvadrat/Shutterstock.com, 7.34: Yeongsik Im / Shutterstock.com, 7.38: wavebreakmedia/ Shutterstock.com, 8.6: rayjunk/Shutterstock.com, 8.13: lassedeignen/Shutterstock.com, 8.15: Kucher Serhii / Shutterstock.com, 9.36: bzzup/Shutterstock.com, 10.16: Josep Suria / Shutterstock.com, 11.25: Inspiring/ Shutterstock.com, 11.26: Andrey Yurlov / Shutterstock.com, 13.3: Ingolfson / Wikimedia commons, 13.34: Dmitry Gritsenko / Shutterstock.com, 14.5: siam.pukkato/Shutterstock.com, 14.19: Simona Jurasova / Shutterstock.com 18.15: Drop of Light / Shutterstock.com, 18.20: winui/Shutterstock.com, 18.41: wadstock/ Shutterstock.com, 20.1: Kostenko Maxim / Shutterstock.com, 20.2b: Belozersky/ Shutterstock.com, 20.25: Doug McLean / Shutterstock.com, 21.48: Patrick Daxenbichler, 26.12: Triff/ Shutterstock.com.

Foto og illustrasjoner som ikke er nevnt her, er publisert under Public domain.

Forfatteren har mottatt støtte fra Det faglitterære fond.
Boken er utgitt med støtte fra Kunnskapsdepartementet ved Lærebokutvalget for høyere utdanning.

Materialet i denne publikasjonen er omfattet av åndsverklovens bestemmelser. Uten særskilt avtale med Universitetsforlaget er enhver eksemplarfremstilling og tilgjengeliggjøring bare tillatt i den utstrekning det er hjemlet i lov eller tillatt gjennom avtale med Kopinor, interesseorgan for rettighetshavere til åndsverk.

www.universitetsforlaget.no
post@universitetsforlaget.no

Innhold

Forord 17
Forfatternes forord 19

Kapittel 1
Det første vitenskapelige verdensbildet 21
1.1 **Fra mytologi til kosmologi** 21
1.2 **Fysikkens språk er matematikk** 22
1.3 **Hvilken form har jorda, og hvor stor er den?** 23
Eratosthenes' oppmåling av jordas omkrets 23
Aristarkos måler avstander i universet 25
1.4 **Er jorda eller sola i ro i universets sentrum?** 26
Manglende stjerneparallakse 26
Tre prinsipper for verden 27
Aristarkos' heliosentriske verdensbilde 28
1.5 **Stjernenes, solas, månens og planetenes bevegelser sett fra jorda** 28
Fiksstjernenes bevegelse sett fra jorda 29
Solas daglige og årlige bevegelse sett fra jorda 29
Planetenes bevegelser sett fra jorda 30
1.6 **Aristoteles' bevegelseslære – naturlige og tvungne bevegelser** 31
Tvungen bevegelse krever en ytre kraft 32
1.7 **Et viktig mellomspill i middelalderen** 33
1.8 **Oppgaver** 34

Kapittel 2
Den kopernikanske revolusjonen 35
2.1 **Kopernikus setter sola i sentrum** 35
Den lille kommentar 36
Forklaringen på planetenes «sløyfebevegelse» er jordas bevegelse 38

2.2 Kopernikus' vei til verket Om himmelsfærenes rotasjoner 38
Kirkens menn heier på Kopernikus 39
Mottakelsen av det heliosentriske systemet 41
2.3 Tycho Brahe måler opp himmelen på nytt 41
Det tychoniske verdensbildet – et kompromiss 42
2.4 Kepler oppdager at planetenes baner likevel ikke er sirkler 44
Prinsippet for de regulære mangekantene 44
Keplers 2. og 1. lov 45
Keplers 3. lov 46
2.5 Oppgaver 48

Kapittel 3
Galileos kamp mot det aristoteliske verdensbildet 49
3.1 Galileo ser verden i kikkerten 49
Månen har fjell og daler, og Jupiter har mange måner 51
3.2 Det kreves bevis for jordas rotasjon 52
3.3 Galileos treghetslov – jevn fart trenger ingen kraft 52
3.4 Tyngdeakslerasjonen er konstant 55
3.5 Oppgaver 56

Kapittel 4
Matematisk beskrivelse av bevegelser 57
4.1 Forflytning og fart 57
Forflytning 57
Gjennomsnittsfart 59
Konstant fart 61
Momentanfart 63
4.2 Akselerasjon 63
Gjennomsnittsakselerasjon 64
Konstant akselerasjon 67
4.3 Fire likninger for bevegelser med konstant akselerasjon 68
Merton-matematikernes utledning av fire bevegelseslikninger 71
4.4 Galileo bruker likningene til å beskrive fritt fall 73
4.5 Galileos relativitetsprinsipp og transformasjonslikninger 79
Treghetssystemer 80
Likninger som oversetter bevegelser mellom treghetssystemer 81
4.6 Oppgaver 83

Kapittel 5
Skrått kast 85
5.1 Uavhengighetsprinsippet og treghetsloven 85
5.2 Skrått kast – fritt fall i vertikal og horisontal retning 88
Horisontal utgangsfart 88
Skrå utgangsfart 92
5.3 Oppgaver 97

Kapittel 6
Newton forklarer bevegelser i hele verden 99
6.1 **Annus mirabilis – 1665–1666** 99
Sentripetalakselerasjonen – akselerasjonen inn mot sirkelens sentrum 100
Hovedtrekkene i Newtons utledning av uttrykket for sentripetalakselerasjonen .. 102
Newton beregner månens sentripetalakselerasjon mot jordas sentrum 102
Sentripetalakselerasjonen ved jordas ekvator 103
6.2 **Hvilken kraft holder månen i sin bane rundt jorda** 104
6.3 **Newtons bevegelseslover** 106
Hvilken kraft holder planetene i sine baner, Newton? 107
Newtons tre bevegelseslover 108
Newtons 1. lov – treghetsloven 108
Newtons 2. lov – kraft, masse og akselerasjon 110
Tyngdekraften og sentripetalkraften 112
Newtons 3. lov – kraft er en vekselvirkning mellom to legemer 112
6.4 **Hovedtrekkene i Newtons utledning av gravitasjonsloven** 114
Noen konsekvenser av gravitasjonloven 116
Keplers 3. lov blir en naturlov 116
Sol–jord–måne 117
Halleys komet 117
Jordas form 117
6.5 **Gravitasjonslovens mottakelse** 118
6.6 **Oppgaver** 119

Kapittel 7
Anvendelser av Newtons lover 121
7.1 **ΣF – hvordan summere krefter?** 121
7.2 **Tyngdekraft og normalkraft** 122
To teknikker i vertikal sats 126
7.3 **Å dekomponere en kraft** 135
7.4 **Normalkraft og tyngdekraft på skråplan** 137
7.5 **Kinetisk og statisk friksjon** 139
Statisk friksjon 140
Friksjonskoeffisienter 140
Snordraget 145
7.6 **Luftmotstand** 146
7.7 **Sentripetalkraft** 149
7.8 **Oppgaver** 154

Kapittel 8
Kraftstøt og bevegelsesmengde 157
8.1 **Kraftstøt og forandring i bevegelsesmengde** 157
Betydningen av tiden for forandring i farten 158
Kraftstøt og bevegelsesmengde 158

8.2 Kortvarige sammenstøt ... 160
Rettlinjet støt ... 160
Skjevt støt ... 163
8.3 Loven om bevaring av bevegelsesmengde ... 168
Støt der legemene hekter seg sammen ... 171
Når bevegelsesmengden før støtet er null ... 171
Bevaring av bevegelsesmengde i et skjevt støt ... 174
8.4 Oppgaver ... 176

Kapittel 9
Arbeid, kinetisk og potensiell energi ... 179
9.1 Arbeid i fysikken ... 179
9.2 Totalt arbeid er lik forandring i kinetisk energi ... 183
Noen krefter utfører ikke arbeid og endrer derfor ikke legemets kinetiske energi 184
9.3 Tyngdekraftens arbeid ... 186
Tyngdekraftens arbeid og kinetisk energi ... 187
9.4 Arbeid utført av krefter i vertikal retning ... 196
9.5 Fjærkraftens arbeid ... 198
9.6 Tyngdekraftens arbeid og potensiell energi ... 204
Elastisk potensiell energi ... 207
9.7 Effekt ... 207
9.8 Oppgaver ... 208

Kapittel 10
Kraftmoment og likevekt ... 211
10.1 Tyngdepunkt og støtteflate ... 211
Tyngdepunktet til noen symmetriske legemer ... 214
10.2 Likevekt ... 214
10.3 Kraftmoment – kraftens evne til å sette et legeme i rotasjon ... 216
Likningene for likevekt ... 218
Musklers kraftmomenter om ledd i kroppen ... 222
10.4 Oppgaver ... 228

Kapittel 11
Rotasjon ... 231
11.1 Vinkelforandring ... 231
Grader og radianer ... 232
11.2 Vinkelfart ... 233
Vinkelfart og fart ... 234
Sentripetalakselerasjon ... 237
11.3 Vinkelakselerasjon ... 238
Vinkelakselerasjon og akselerasjon ... 238

11.4 Newtons 2. lov for rotasjon 239
Treghetsmomentet om en akse 239
Treghetsmoment til noen legemer 240
Anvendelser av Newtons 2. lov for rotasjon 242
Fysisk pendel 245
11.5 Spinnbevaring 248
Delspinn kan utlikne hverandre 251
11.6 Oppgaver 252

Kapittel 12
Periodiske bevegelser 253
12.1 Periodisk bevegelse 253
12.2 Amplitude, periode og frekvens til en svingende fjær 255
Amplitude 255
12.3 Kraft, akselerasjon og fart 259
12.4 Fjærer er harmoniske oscillatorer 261
Vertikal harmonisk oscillator 262
12.5 Pendelsvingninger 264
12.6 Bølger 267
12.7 Stående bølger – et resultat av bølger som overlapper 270
12.8 Lydbølger – effekt og intensitet 271
Bølgens intensitet avtar med kvadratet av avstanden fra kilden 272
12.9 Doppler-effekt – relativ frekvens og bølgelengde 274
12.10 Oppgaver 277

Kapittel 13
Stoffer i fast-, væske- og gassform 279
13.1 Massetetthet 279
13.2 Egenskaper til stoffer i fast form 282
Termisk ekspansjon 282
13.3 Egenskaper til stoffer i væskeform 285
Overflatespenning 285
Termisk ekspansjon 286
13.4 Egenskaper til stoffer i gassform 287
Atmosfæren – luftlaget som omgir jorda 287
13.5 Trykk i fluider i likevekt 288
13.6 Atmosfæretrykket ved havoverflaten og høyere opp 289
Overtrykk 291
13.7 Trykk i væsker 292
Måling av trykk 296
13.8 Pascals lov – trykket på overflaten transporteres til hele væsken 298
Anvendelser av Pascals lov 298
Barometer og manometer måler trykk 302

13.9 Oppdrift – Arkimedes' prinsipp 304
Oppdriften – når trykket er større på undersiden enn på oversiden 304
Oppdrift kan brukes til å bestemme tettheten til en ukjent væske 308
Arkimedes og kongens krone 310
13.10 Oppgaver 311

Kapittel 14
Fluider i flyt 313
14.1 Strømlinjet flyt – partiklene følger strømlinjer 313
14.2 Masseflyten er konstant 314
14.3 Trykkforskjell gir kraft 318
Hvordan måle farten til en væske i et rør? 319
Noen hverdagserfaringer som Bernoullis likning kan forklare 322
14.4 Bernoullis likning 324
14.5 Oppgaver 326

Kapittel 15
Elektrisitet og (litt) magnetisme 329
15.1 Ladninger tiltrekker og frastøter hverandre 329
Ladninger forsvinner ikke – de flytter bare på seg 331
15.2 En moderne modell for elektrifisering 331
15.3 Elektrifisering ved kontakt, induksjon og polarisasjon 332
Kontakt 332
Induksjon 333
Polarisasjon 333
Elektroskopet – instrumentet som kan bestemme fortegnet til ladningen 334
15.4 Coulombs lov – elektrisitetens gravitasjonslov 335
Platekondensator – motsatt ladde metallplater 338
15.5 Elektriske feltlinjer og feltstyrke 340
Kraft og akselerasjon mellom kondensatorplater 346
15.6 Arbeid, potensiell energi og potensial 348
Elektrisk arbeid og forandring i kinetisk energi 351
Potensiell energi omkring en ladning 352
15.7 Ekvipotensialflater 356
Kapasitans 356
15.8 Kort om magnetisme og magnetiske feltlinjer 357
15.9 Oppgaver 359

Kapittel 16
Elektrisk strøm – elektroner i bevegelse 361
16.1 Elektroner flyter i metaller 361
16.2 Elektronstrøm 363
16.3 Ladningsstrøm – eller bare strøm 366
16.4 Batteriet er energikilden 369
16.5 Resistivitet og resistans 371

16.6 Spenning, resistans og strøm ... 373
Kretsdiagram ... 374
16.7 Elektrisk effekt ... 375
16.8 Oppgaver ... 376

Kapittel 17
Elektriske strømkretser ... 379
17.1 Ekvivalentresistans og strøm i en seriekobling ... 379
Amperemeter – strømmåler ... 382
17.2 Batteriers indre resistans ... 383
17.3 Ekvivalentresistans og strøm i en parallellkobling ... 385
17.4 Kretser med både serie- og parallellkoblinger ... 390
Voltmeter ... 396
17.5 Kretser med batterier i serie og parallell ... 397
17.6 Oppgaver ... 399

Kapittel 18
Refleksjon og speilbilder ... 401
18.1 Refleksjonsloven ... 401
18.2 Refleksjonsloven og enkelhetsprinsippet ... 405
Herons metode anvendes til å bestemme strålegangen ... 406
Diffus refleksjon – lysstråler i alle retninger ... 408
18.3 Speilbilder i plane speil ... 410
Virtuelt bilde – et bilde som ikke finnes ... 410
18.4 Speilbilder i konkave speil ... 413
Speilbildets avhengighet av objektets posisjon ... 418
Objektet er mellom F og V ... 419
Speilbilde fra konvekst speil ... 420
Parabolske speil ... 420
18.5 Oppgaver ... 422

Kapittel 19
Brytning og totalrefleksjon ... 423
19.1 Brytningsloven ... 423
Den magiske mynten ... 426
19.2 Brytningsloven og enkelhetsprinsippet ... 428
19.3 Rømer oppdager at «lyset tøver, nøler» ... 429
19.4 Grensevinkel og totalrefleksjon ... 431
Totalrefleksjon kan fange lys og frakte det over store avstander ... 432
Luftspeiling ... 435
19.5 Oppgaver ... 437

Kapittel 20
Kampen om lysets natur 439
20.1 Newtons eksperimenter med sollys og prismer 439
20.2 Experimentum crusis 441
20.3 Newtons partikkelmodell for lys 443
Newtons lyspartikler følger refleksjons- og brytningsloven 443
20.4 Huygens' prinsipp 445
Hva skjer når en bølgefront møter en hindring? 447
Bølgefronter blir reflektert fra en vegg 449
Bølgefronter endrer retning når de endrer fart 450
20.5 Youngs superposisjonsprinsipp 452
Youngs dobbeltspalteeksperiment 454
Interferens i oljeflak og såpebobler 457
20.6 Fresnel entrer scenen og legger partikkelmodellen i grus 458
Young løser problemet med polarisasjon 460
20.7 Oppgaver 462

Kapittel 21
Elektromagnetisme – fra Ørsted til Maxwell 463
21.1 Ørsted oppdager elektromagnetismen 463
Ørsteds eksperiment og høyrehåndsregler 464
Ørsteds revansj 469
21.2 Faraday oppdager elektromotoren 470
Ampères oppdagelse 473
21.3 Elektromotorens virkemåte og anvendelse 474
Kommutatorens rolle 474
Hvorfor roterer sløyfen? 474
21.4 Faraday oppdager generatoren: strøm uten batterier! 480
21.5 Faradays induksjonslov 482
Indusert spenning og strøm 483
Generator: Kinetisk energi omformes til elektrisk energi 485
Arbeid + generator = strøm 485
21.6 Transformatoren 489
21.7 Er lys også et elektromagnetisk fenomen? 490
21.8 Oppgaver 493

Kapittel 22
Termodynamikk, spektroskopi og energikvanter 495
22.1 Temperatur og kinetisk energi 495
Den mest sannsynlige fordeling 497
Varme 498
22.2 Indre energi og varmekapasitet 498
Varmekapasitet 498
Energien til et system er bevart 499

22.3 Termodynamikkens 1. lov 500
Likefordelingsprinsippet 500
22.4 Termodynamikkens 2. lov og entropi 501
Boltzmanns statistiske tolkning av entropi 502
Varmeledning og varmestrøm 503
22.5 Spektroskopi 503
Spektrene avslører hvilke gasser sola omgir seg med 504
Absorpsjons- og emisjonsspekter 504
22.6 «Svarte» legemers emisjon og absorbsjon av stråling 506
22.7 Stefan-Boltzmanns lov for den totale strålingsenergien 507
Emissiviteten til overflater 508
22.8 Stefan-Boltzmanns lov anvendt på solstrålingen 509
Årstidene 510
22.9 Wiens forskyvningslov 512
Wiens strålingslov 513
22.10 Max Planck introduserer energikvanter i fysikken 513
Planck lyktes i første omgang, men gleden ble kortvarig 514
22.11 Energien til vibrerende atomer endres i kvantesprang 516
Einstein: Energien til vibrerende ladninger endres faktisk diskontinuerlig 518
22.12 Oppgaver 519

Kapittel 23
Einsteins omkamp om lysets natur 521
23.1 Et kort portrett av Albert Einstein 521
23.2 Lysets fart er *ikke relativ*, men absolutt 524
23.3 Samtidig for deg, men ikke for meg 525
23.4 Den spesielle relativitetsteorien 527
Transformasjonslikningen for tid 527
Transformasjonslikningen for lengde 531
Transformasjonslikningen for bevegelsesmengde og kinetisk energi 533
23.5 Masse og energi er koblet sammen 534
23.6 Den generelle relativitetsteorien 535
Romtiden krummer rundt tunge legemer 535
Solformørkelsen som gjorde Einstein til en verdensstjerne 538
23.7 Einsteins «absurde» lyskvanter (fotoner) 540
Lyskvantenes mottakelse 541
Likningen for fotoelektrisk effekt 542
Likningen for fotoelektrisk effekt blir bekreftet 544
23.8 Lyskvantene får bevegelsesmengde og blir akseptert 544
23.9 Hvordan lyskvantene dukket opp i Einsteins entropilikning 546
23.10 Oppgaver 548

Kapittel 24
Oppdagelsen av elektronet, røntgenstråler, radioaktivitet og en kvanteteori for hydrogenatomet 549
24.1 Det første atomet 549
Er atomet udelelig? 550
24.2 Utforskningen av strålingen i et katoderør 551
Er strålingen negativt ladde partikler eller elektromagnetisk stråling? 551
24.3 Röntgen oppdager en ny type stråling 552
24.4 Becquerels uranstråler 553
24.5 Curie oppdager nye radioaktive stoffer 554
Katodestrålen er en strøm av elektroner 555
24.6 Tre ulike stråler fra radioaktive stoffer 556
24.7 Atommodeller med elektroner 557
Thomsons atommodell 557
Nagaokas planetmodell 558
24.8 Rutherfords eksperiment og kjernemodell 559
24.9 Bohrs vei til en kvantemodell for atomet 560
Bohr blir interessert i atomets oppbygning 562
Bohr utleder en formel for energien til atomenes grunntilstand 564
Strålingen fra atomer skyldes ikke elektronvibrasjoner 566
Lys emitteres når atomet foretar et kvantesprang 568
24.10 Atomteoriens mottakelse 570
24.11 Røntgenspekteret 571
24.12 Oppgaver 572

Kapittel 25
Atomet i kvantemekanikkens lys 573
25.1 Werner Heisenberg: Sirkelbanene må ut av atomet 573
25.2 Erwin Schrödinger: Kvantesprangene må ut av atomene 575
25.3 Elektronenes bølgefunksjon 576
Elektroner og interferensmønster 578
25.4 Uskarphetsrelasjonene 579
Den fysiske tolkningen av uskarphetsrelasjonen 580
25.5 Kvantetall 581
25.6 Elektronstrukturen i atomer med mange elektroner 582
Paulis utelukkelsesprinsipp 583
25.7 Bohr vs. Einstein om tolkningen av kvantemekanikken 584
Likheter og ulikheter mellom Bohr og Einstein 584
Einsteins tankeeksperiment som skulle felle kvantemekanikken 585
Er kvantemekanikken fullstendig? 587
25.8 Oppgaver 588

Kapittel 26
Atomkjernen, radioaktivitet, fisjon og fusjon 589
26.1 Rutherfords første kjernemodell 589
Det må være elektroner i atomkjernen 590
Kjernene har ikke så mange protoner som modellen krever 590

26.2 Endelig dukker nøytronet opp ... **591**
En sterk kjernekraft er limet mellom nukleonene ... 591
26.3 Atomkjernens nukleoner ... **592**
Atommasseenheten u ... 593
26.4 Atomkjernens form og tetthet ... **593**
26.5 Massedefekt, bindingsenergi og stabilitet ... **594**
Bindingsenergi per nukleon og stabilitet ... 596
26.6 Radioaktivitetens natur ... **597**
α-henfall ... 597
β-henfall ... 598
β^+-henfall ... 599
γ-henfall ... 600
26.7 Halveringstid og aktivitet ... **601**
Fra N_0 til N radioaktive kjerner etter en tid t ... 602
Karbon 14-datering ... 602
Radioaktive stoffer i naturen – naturlig bakgrunnsstråling ... 603
26.8 Fisjon og fusjon ... **604**
Kjernefisjon ... 604
Kjernefusjon ... 605
Fusjon fra hydrogen til helium i solas indre ... 606
Hvor lenge vil sola skinne? ... 607
26.9 Oppgaver ... **607**

Kapittel 27
Kosmologiens og universets historie ... **609**
27.1 Himmelen er full av stjerner ... **610**
Newtons statiske univers ... 610
27.2 Ny og bedre kikkert ... **611**
Astronomen Herschel oppdager en ukjent planet ... 611
Herschel måler den relative avstanden til stjerner ... 611
27.3 Endelig ble en stjerneparallaksevinkel målt ... **612**
Hensiktsmessige måleenheter for avstander i universet ... 613
27.4 Leavitt og lyset fra kefeidene ... **615**
Melkeveien er *vår* galakse ... 618
27.5 Fysikken gjør sitt inntog i astronomien ... **618**
27.6 Hubbles lov ... **619**
27.7 Har universet en begynnelse? ... **620**
Fra kosmos til kaos ... 621
Universets alder ... 622
27.8 Hvor kommer alle grunnstoffene fra? ... **622**
Big Bang-teoriens seier over Steady State-modellen ... 623
27.9 Universets historie: fra ingenting til allting ... **624**
En stjerne blir født ... 625
Supernova og sorte hull ... 627
27.10 Oppgaver ... **628**

Litteraturliste 629

Appendiks A 633
A1 Likninger 633
A2 Løse opp parenteser 634
A3 Andregradslikning 635

Appendiks B – trigonometri 636
B1 Pytagoras' setning 636
B2 De trigonometriske funksjonene sinus, cosinus og tangens 636
B3 Motstående og hosliggende kateter 637
B4 Inverse trigonometriske funksjoner 639

Appendiks C 641
C1 Skalare størrelser 641
C2 Vektorstørrelser 641

Appendiks D – taballer 643
D1 Fundamentale SI-enheter 643
D2 Fysiske størrelser og avledede SI-enheter 643
D3 Fundamentale fysiske konstanter 644
D4 Astronomiske data 644
D5 Tallprefikser 645
D6 Deler av det greske alfabetet 645

Fasit 647

Register 655

Forord

Sovjetunionens opsendelse af verdens første satellit, Sputnik, i 1957 og en række andre rumsuccesser i de følgende år blev startskuddet til gennemgribende reformer af undervisningen i naturvidenskab på alle niveauer i de fleste vestlige lande. Den østlige supermagts teknologiske succes blev for en stor del tilskrevet, at fysik og kemi havde en langt stærkere placering i sovjetiske skoler, end disse fag havde på tilsvarende niveauer i vesten. Nu skulle der rettes op på denne skævhed. Ikke nødvendigvis ved at afsætte lige så mange timer til undervisning i disse fag, men ved at gennemtænke fagene på ny og udarbejde nyt og spændende undervisningsmateriale, der skulle få de unge i vesten til at elske naturvidenskab.

Med USA som epicenter rullede en bølge af naturvidenskabelige undervisningsprojekter derfor hen over Europa i 1960'erne og 1970'erne. I enkelte af disse, først og fremmest det amerikanske *Project Physics* fra 1970, forsøgte kendte videnskabsfolk og videnskabshistorikere at bygge undervisningsmateriale i fysik og kemi op omkring en kerne, der beskrev den historiske udvikling af fagene i forenklet form. Men det var undtagelsen. I langt de fleste projekter var det den rene naturvidenskab, der blev sat i hovedsædet. Eleverne skulle ikke spilde tiden med historiske og filosofiske studier, der ville vise, hvordan fortidens videnskabsfolk ofte havde været på vildspor. Det gjaldt tværtimod om at lægge undervisningen således til rette, at eleverne indså, hvor elegant og rationelt den *moderne* naturvidenskab er i stand til at beskrive fænomener i naturen.

Desværre viste undersøgelser, der i 1970'erne og 1980'erne blev udført i mange lande, også i Norge, at resultaterne ikke stod mål med forventningerne. En stor del af eleverne, specielt dem der ikke havde fysik på højt niveau, fandt fysik temmelig uinteressant i sig selv. De pågældende elever fik heller ikke et tilfredsstillende udbytte af den videnskabscentrerede undervisning, de blev udsat for. Og endelig viste undersøgelserne, at kønsforskellene var meget signifikante, og at pigerne gennemgående var mere negative over for fysikundervisningen end drengene.

Den nye krise i fysikundervisningen, der aftegnede sig med stadig større tydelighed i løbet af 1980'erne, blev starten på en række nye forsøg på at reformere fysikundervisningen, både i grundskolen, den videregående skole og i læreruddannelsen. I en årrække har jeg selv været aktivt involveret i bestræbelserne på at sikre, at fysikundervisningen i det danske gymnasium blev mere relevant for alle elever ved at inddrage stof til belysning af fagets teknologiske, kulturelle, historiske og filosofiske dimensioner. Det er derfor med glæde, jeg har sagt ja tak til at skrive forord til Reidun og Therese Renstrøms nye fysikbog, der er målrettet lærer- og lektoruddannelsen i naturfag og fysik i norsk skole.

I Renstrøms bog indtager den historiske udvikling af faget fysik en vigtig rolle. Ikke fordi alle kapitler er bygget op omkring en historisk kerne, det er de nemlig ikke. Men i de kapitler, hvor de behandler afgørende brud i vores forståelse og beskrivelse af naturen, findes der grundig og kompetent diskussion af den historiske baggrund og udvikling. På de punkter repræsenterer deres bog et kvantespring i forhold til næsten alle andre lærebøger i fysik på samme niveau. De nøjes aldrig med at servere en historisk anekdote eller citere et eller andet upålideligt sekundært værk. Tværtimod har de formået at sætte sig så grundigt ind i førstehåndskilder og gode sekundære kilder, at de er i stand til at fremlægge pålidelige, spændende, grundige og velskrevne beretninger om så forskellige emner som Galileis undersøgelser af det frie fald, Keplers love for planeterne, den naturvidenskabelige revolution i 1600-tallet, Ørsteds opdagelse af elektromagnetismen, Einsteins relativitetsteori og meget mere. Det er imponerende.

Jeg ønsker vort skandinaviske broderland tillykke med, at det har fået en bog af denne kaliber!

Henry Nielsen, associate professor emeritus, Aarhus Universitet.

Forfatternes forord

Denne læreboken har tittelen *Innføring i fysikk* fordi den er tilegnet studenter som har valgt et studium der fysikk inngår, men som ikke krever fordypning i fysikk og matematikk fra videregående skole. Eksempler på slike studier er lærer- og lektorutdanninger i naturfag og utdanninger i kjemi og biologi. Vi har underveis i dette bokprosjektet valgt å se på oss selv som trenere for studenter som har meldt seg på et fysikklag uten å ha drevet med fysikk før. Når vi beundrer fotballspilleren som scorer fra corner eller pianisten som fyller rommet med fantastisk musikk, vet vi at det er et resultat av utallige timer med terping og øving på oppgaver designet av gode trenere som vet hva som skal til for å lykkes. Det er den treningsvillige studenten som leser teksten flere ganger, tar egne notater og tester sin forståelse i samtaler og diskusjoner med andre studenter, og som bruker bokens læringsressurser på nettsiden, vi har hatt i fokus når vi har designet innholdet i denne boken. Vi har selv studert fysikk og vet at det noen ganger kan være svært frustrerende fordi man ikke oppdager sammenhengene mellom teoriene. Det er som å være omgitt av tåke som hindrer utsikt og innsikt. Men vi vet også at dersom man fortsetter å øve, vil tåken lette og et vakkert landskap komme til syne. Gleden over å mestre fysikkens teorier til for eksempel å forklare hvorfor det faktisk er mulig å score fra corner, beregne energien i strålene fra et røntgenrør eller hvor stor masse som omdannes til energi i solens indre hvert sekund, ved å bruke Einsteins likning $E = mc^2$, er strevet verdt.

Det som er karakteristisk for naturvitenskapen fysikk, er at alle dens teorier er uttrykt som matematiske relasjoner mellom fysiske størrelser og begreper. Galileo Galileis måte å uttrykke dette på var å si at fysikkens språk er matematikk. Et eksempel er teorien vi kaller for Newtons andre lov, $F = ma$. Den er en relasjon mellom kraft (F), akselerasjon (a) og masse (m). Dersom to av størrelsene er kjent, kan vi bruke likningen til å beregne den tredje, altså løse likningen med hensyn til den ukjente størrelsen. Vi har erfart at mange studenter har glemt den algebraen og geometrien de en gang kunne. For å bøte på dette problemet har vi laget en video kalt «SOS-matematikk», som er et repetisjonskurs i matematikk, og som fins på nettsiden til boken.

I dag har fysikken teorier som beskriver fenomener på hele naturens skala, fra de minste partiklene til de største galaksene. Sammen kan teoriene beskrive utviklingen av universet fra det var noen sekunder gammelt, og frem til i dag. Universets historie er et mysterium, men det er teorienes historie også. Vi har valgt å formidle de store teorienes historie først og fremst fordi de gjør det mulig å oppnå god og hensiktsmessig forståelse av begrepene som inngår i dem. I tillegg avslører historiene at det ikke fantes noen oppskrift eller metode fysikerne kunne følge

i utviklingen av teoriene fordi den alltid inneholder en kreativ prosess. Derfor er det få fellestrekk fra den ene til den andre utviklingen. Vi har i flere tilfeller latt fysikerne komme til orde og selv fortelle om viktige begivenheter og episoder både fordi de best kan få frem detaljene og spenningen som var til stede, men også for å vise deres evne til å formidle og begrunne sine oppdagelser på en velformulert måte. Vi får også innsikt i betydningen av fysikkens utvikling for vårt samfunn. I år er det 200 år siden Hans Christian Ørsted oppdaget at strøm i en leder omgir seg med et magnetfelt. Det er kanskje den viktigste oppdagelsen noensinne fordi den ble begynnelsen på den elektrifiseringen som i dag er fundamentet for det moderne samfunnet.

Store deler av boken *Innføring i fysikk* har foreligget som forelesningsnotater og i noen år blitt brukt som pensum i lærer- og lektorutdanninger i naturfag og fysikk ved Universitetet i Agder. Takk til dere alle for de viktige tilbakemeldingene dere har gitt, og takk til kollega Nils-Erik Bomark for de mange innsiktsfulle diskusjonene om ulike temaer. Vi takker Margrethe Renstrøm for alle hennes kritiske kommentarer og konstruktive forslag som har vært uvurderlige helt fra prosjektet ble påbegynt og frem til publikasjon. Vi har hatt stor nytte av tilbakemeldinger fra førsteamanuensis Idar Mestad, førsteamanuensis Jonas Persson ved NTNU og formand for Danmarks Fysik- og Kemilærerforening Erland Andersen. Vi har også mottatt nyttige innspill fra lærerstudent David Tørre Asprusten ved OsloMet. En stor takk til redaktør Jannicke Bærheim for å ha sørget for at forelesningsnotatene nå er samlet og omgjort til en bok. Det må også nevnes at bokprosjektet ble tildelt Universitetsforlagets lærebokpris i 2015, og at Norges faglitterære forfatterforening har støttet prosjektet med stipend. Endelig bør det nevnes at i perioder har hele vår nærmeste familie vært engasjert i dette bokprosjektet.

Juni 2020

Forfatterne

Kapittel 1

Det første vitenskapelige verdensbildet

1.1 Fra mytologi til kosmologi
1.2 Fysikkens språk er matematikk
1.3 Hvilken form har jorda, og hvor stor er den?
1.4 Er jorda eller sola i ro i universets sentrum?
1.5 Stjernenes, solas, månens og planetenes bevegelser sett fra jorda
1.6 Aristoteles bevegelseslære – naturlige og tvungne bevegelser
1.7 Et viktig mellomspill i middelalderen
1.8 Oppgaver

Fysikkens historie begynner omkring 600 f.Kr. da noen greske filosofer tok et oppgjør med en tradisjon som hadde utviklet seg over flere tusen år. I denne tradisjonen ble alle naturfenomener forklart som et resultat av frie guders viljestyrte handlinger. Denne forståelse av verden kalles et mytologisk verdensbilde. De opprørske filosofene erstattet gudenes gjøren og laden med lover i naturen selv, kalt naturlover, som forklaring på fenomenene. Omtrent 800 år etter denne radikale omveltningen i forståelsen av verden forelå det matematiske modeller som kunne beskrive månens, solas og planetenes daglige og årlige bevegelse på himmelen sett fra jorda. Dette første vitenskapelige verdensbildet, som ble kalt det jordsentrerte eller geosentriske verdensbildet, var nå på plass. I antikken og i middelalderen hadde astronomene solsystemet i fokus, og det var først på 1700-tallet de begynte å interessere seg for de fjerne delene av universet. I de første kapitlene skal vi følge utviklingen fra bruddet med mytologien og frem til det solsentrerte eller heliosentriske verdensbildet. I bokas siste kapittel ser vi på Big Bang-modellen for universets utvikling.

I dette kapittelet tar vi for oss utviklingen fra bruddet med mytologien til det geosentriske verdensbildet forelå.

1.1 Fra mytologi til kosmologi

I det mytologiske verdensbildet ble solas, månens og planetenes bevegelser på himmelen styrt av gudene med størst makt over livet på jorda. Personer, kalt astronomer, med stor anseelse ble derfor satt til å holde disse himmellegemene under konstant overvåkning. Dersom deres posisjoner i forhold til hverandre kunne tolkes som varsler om krig, pest, uår eller liknende, ble kongen advart og tiltak som kunne påvirke gudene igangsatt. Sol- og måneformørkelser var tydelige varsler om store katastrofer for kongen og landet. Denne spioneringen av gudenes hensikter ble kalt for astrologi. Astronomene oppdaget imidlertid at sola, månen og planetene gjentok sine bevegelser over himmelen etter bestemte perioder. Solas periode var omtrent

365 dager og månens periode omtrent 27 dager. Solas daglige bane over horisonten kunne beskrives ut fra matematiske modeller og dermed danne grunnlag for en kalender. For de greske filosofene var den observerte lovmessigheten i himmelrommet ikke i overensstemmelse med troen på at himmellegemene var styrt av frie guder. Sola kom nok ikke høyere på himmelen om sommeren fordi solguden bestemte seg for det, men fordi sola var tvunget til det. Den verden som ble observert var ikke uforutsigbar og kaotisk. Tvert imot var den forutsigbar og velordnet, altså et *kosmos*. Ordet kosmologi (læren om universet) er satt sammen av ordene kosmos og logos, som betyr ordnet tale og ordentlig tenkning, og det gjenspeiler troen på at universet er velordnet og derfor kan beskrives rasjonelt. Hvis universet ikke er velordnet, vil det ikke kunne beskrives rasjonelt. Men i mer enn 2500 år har universet blitt beskrevet ut fra rasjonelle teorier og det er derfor god grunn til å tro at det er velordnet.

1.2 Fysikkens språk er matematikk

I fortsettelsen vil vi kalle naturfilosofene som forklarte naturfenomener naturalistisk, for *fysikere* og deres fagområde for fysikk, selv om dette ble vanlige betegnelser først på 1600-tallet. Den største utfordringen de første fysikerne møtte, var mangel på ord for å formulere sine nye innsikter. Ordene i dagligspråket var opptatt, de hadde sin bestemte mening. Men midt opp i denne språkkrisen dukket det opp et alternativ fra en filosofisk skole grunnlagt av Pytagoras omkring 531 f.Kr på øya Samos. Pytagoreeren var overbevist om at verden var skapt ut fra bestemte matematiske regler. Først kom matematikken, deretter kom verden. Ifølge Pytagoras gjenspeilte naturen tallmessige forhold eller harmonier. Denne troen synes vilkårlig, men i en noe mer sofistikert form har den fortsatt stor betydning i den moderne teoretiske fysikk. For Pytagoras var det i alle fall opplagt at lovene og reglene som styrte naturen finnes i matematikkens verden. Matematikken har evne til å frembringe sanne relasjoner mellom observerte fysiske størrelser, helt uavhengig av relasjonenes årsak.

Det matematiske språket måtte imidlertid kjempe hardt for å overleve blant filosofer som var overbevist om at visdom om verden kun vinnes ved å avsløre *årsakene* til fenomenene.

Blant disse filosofene finner vi Aristoteles. Han mente at det er *årsaken* til et fenomen som gir kunnskap om fenomenet, og at matematikkens strenge regler ikke kan romme mangfoldigheten i naturen. Aristoteles satset derfor på å gi en kvalitativ beskrivelse av fysiske fenomener. Her var han på kollisjonskurs med sin læremester, filosofen Platons oppfatning. Platon ivret etter å redusere all fysikk til matematikk, i den pytagoreiske ånd. Ofte blir også Arkimedes plassert i den pytagoreiske tradisjonen. Men han dannet en ny tradisjon. I denne tradisjonen har naturfenomenene som beskrives ved matematiske sammenhenger mellom fysiske størrelser, en empirisk opprinnelse. Et eksempel på anvendelse av matematikk på målte data i denne tradisjonen er en fysikklærer som deler ut fire ulike stykker bly som elevene skal bestemme massen og volumet til. Resultatene av disse målingene er vist i tabell 1.1.

Tabell 1.1 Målinger av masse og volum til fire blystykker

Masse målt i gram	Volum målt i cm^3
43,4	3,8
57,2	5,0
65,0	5,7
74,0	6,4

Ut fra disse måleresultatene er det ikke lett å oppdage noen sammenheng mellom massen og volumet til bly. Elevene får i oppdrag å bruke tallene i en matematisk analyse begrenset av de fire regneartene (addisjon, subtraksjon, multiplikasjon og divisjon). Resultatene er gitt i tabell 1.2.

Tabell 1.2 Beregninger av masse og volum til de fire blystykkene

Sum (masse + volum)	Differanse (masse – volum)	Produkt (masse · volum)	Forhold (masse/volum)
47,2	39,6	165	11,4
62,2	52,2	286	11,4
70,7	59,3	371	11,6
80,4	67,6	474	11,4

Elevene har oppdaget at det eneste som skaper orden i materialet, er forholdet mellom masse og volum, som er tettheten til blystykkene. Alle blystykkene har (nesten) samme verdi for tettheten, som dermed kan betraktes som en egenskap til bly.

Dette eksemplet viser hvordan Arkimedes brukte matematikkens språk til å bestemme relasjoner mellom fysiske størrelser.

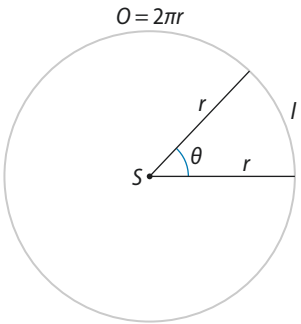
1.3 Hvilken form har jorda, og hvor stor er den?

Pytagoras var den første som hevdet at jorda ikke er flat som ei skive, men har kuleform. Selv om Pytagoras forbød sine elever å røpe skolens lære, tok det ikke lang tid før ideen om en rund jord var alminnelig kjent og akseptert. I Aristoteles hovedverk, *De caelo* (Om himmelen), begrunner han jordas kuleform både teoretisk og empirisk. Blant de teoretiske argumentene finner vi kulens symmetriegenskaper, og at jorda må ha et sentrum som alle stoffer kan bevege seg inn mot. Det viktigste empiriske «beviset» var at vi ved måneformørkelser kan se en *sirkelformet* skygge av jorda på månens skive. Med disse begrunnelsene fra Aristoteles er saken om jordas form avgjort. Jorda er ikke flat, men rund, og det har den vært siden. Likevel er det en utbredt myte at kirken i middelalderen innførte et før-vitenskapelig verdensbilde ved å hevde at jorda er flat. Men det stemmer ikke.

Eratosthenes' oppmåling av jordas omkrets

At jorda er kulerund hadde vært akseptert i mer enn hundre år da sjefsbibliotekaren ved det berømte biblioteket i Alexandria, Eratosthenes på 200-tallet f.Kr., oppdaget hvordan han kunne bestemme jordas omkrets. Oppdagelsen var et resultat av en genial måte å anvende kunnskaper om sirkelens geometri på. Han trengte kun to målte data: lengden av skyggen en søyle kastet ved middagstid den dagen sola stod høyest på himmelen, altså ved sommersolverv, og avstanden fra Alexandria til byen Syene.

For å forstå Eratosthenes' beregninger ser vi først på hvilke egenskaper ved en sirkel han benyttet. I sirkelen i figur 1.1 er det tegnet inn en sirkelsektor med bue l og vinkel θ. Sirkelens radius er r, og omkretsen er $O = 2\pi r$.



Figur 1.1. Figuren viser en sirkel med radius r og en innskrevet sirkelsektor med vinkel θ og buelengde l. Omkretsen til sirkelen er $O = 2\pi r$.

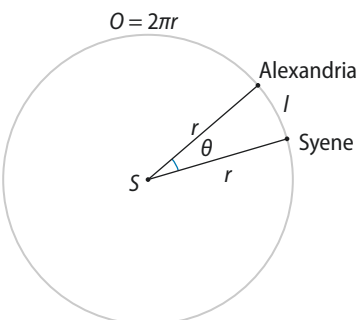
Sirkelens geometri gir at forholdet mellom buelengden l og omkretsen O er det samme som forholdet mellom vinklene θ og $360°$:

$$\frac{l}{O} = \frac{\theta}{360°}$$

Ved å løse denne likningen med hensyn på sirkelens omkrets får vi:

$$O = \frac{l \cdot 360°}{\theta}$$

Det er altså mulig å beregne en sirkels omkrets når buelengden l og vinkelen θ er kjent. Dersom jorda har kuleform, gjelder det samme for den. Utfordringen for Eratosthenes var altså å bestemme avstanden l mellom to steder på samme lengdegrad på jorda og vinkelen i den tilhørende sirkelsektoren. Det ene stedet Eratosthenes valgte, var hans hjemby Alexandria, og den andre var byen Syene, som ligger omtrent på samme lengdegrad, se figur 1.2.

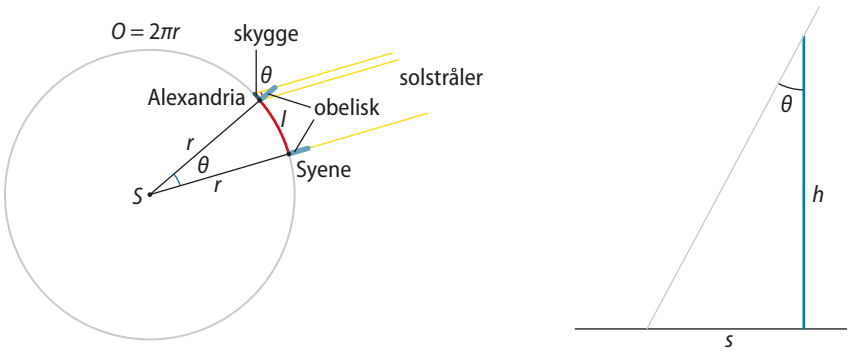


Figur 1.2. Dersom jorda er kulerund med radius r, er det mulig å beregne omkretsen til jorda dersom lengden l mellom to steder på samme lengdegrad og vinkelen θ mellom radiene fra sentrum til disse stedene er kjent.

Det var ikke et tilfeldig valg. En dag i året, ved sommersolverv, står nemlig sola på sitt høyeste rett over Syene. Sola står altså i senit midt på dagen, og verken mennesker eller gjenstander i byen kaster skygge. Vi skal se hvordan Eratosthenes kunne bruke dette fenomenet til å bestemme vinkelen θ.

Det var flere måter å måle avstanden fra Alexandria til Syene på den gang. En av dem var å la soldater marsjere med jevne skritt mellom byene. Ved å telle antall skritt, som man kjente gjennomsnittslengden til, ble avstanden mellom de to byene målt til 5000 stadier som tilsvarer omtrent 745 km.

Målingene Eratosthenes trengte for å kunne beregne vinkelen θ, ble foretatt ved middagstid den dagen sola stod høyest på himmelen, altså ved sommersolverv. I Syene har solstrålene retning inn mot jordas sentrum på det tidspunktet. I Alexandria heller strålene en vinkel θ i forhold en retning vinkelrett på bakken, se figur 1.3 a). Denne vinkelen kunne Eratosthenes beregne ved å måle skyggen som en søyle med kjent høyde kaster, slik figur 1.3 b) viser. Vinkelen han beregnet er den samme som vinkelen mellom de to radiene fra byene inn mot sentrum, altså vinkelen θ.



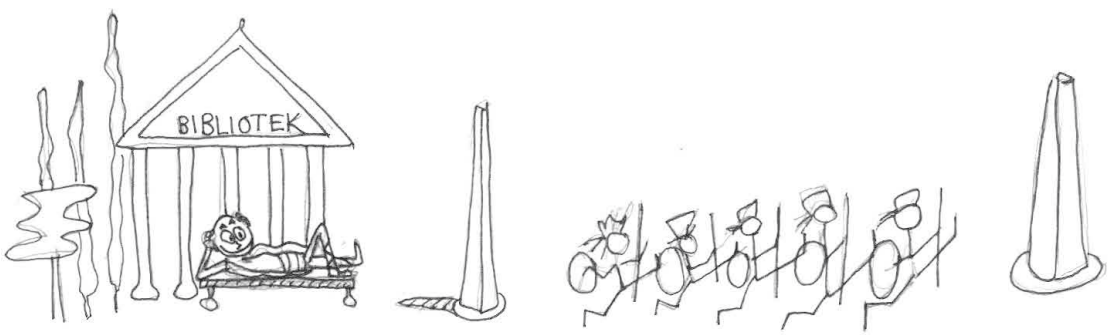
Figur 1.3. a) Byene Alexandria og Syene ligger omtrent på samme lengdegrad. Derfor står sola høyest på himmelen på samme tid på dagen. Solstrålene som treffer de to byene, kan vi anta er parallelle fordi avstanden til sola er så mye større enn avstanden mellom de to byene. Vinkelen θ mellom solstrålene og en søyle i Alexandria er derfor den samme som sirkelsektorens vinkel. b) Ved å måle høyden h av søylen og lengden l av skyggen kan Eratosthens bestemme vinkelen θ ut fra geometriske beregninger.

Målingene og beregningene gav vinkelen $\theta = 7{,}2°$. Nå kunne Eratosthenes sette tallene inn i formelen:

$$O = \frac{l \cdot 360°}{\theta} = \frac{745\ \text{km} \cdot 360°}{7{,}2°} = 37\,250\ \text{km}$$

Denne verdien for jordas omkrets ligger forbløffende nært den riktige på omtrent 40 000 km.

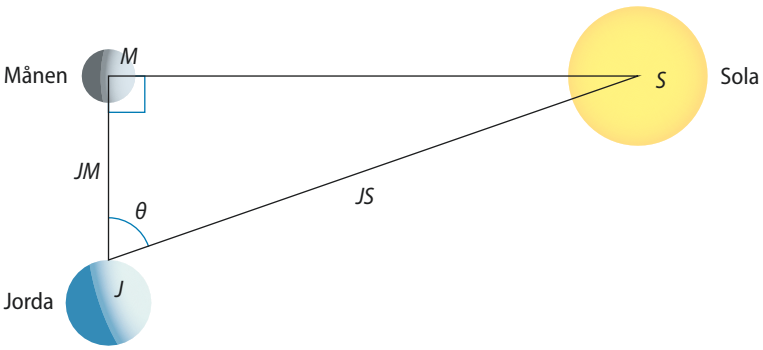
Allerede på 200-tallet f.Kr. visste man altså at jorda har kuleform og omtrent hvor stor omkrets denne kula har.



Figur 1.4. Eratosthenes har selv målt den korteste skyggen obelisken kaster i Alexandria den dagen sola står høyest på himmelen, ved sommersolverv. Soldatene får en litt mer krevende oppgave, nemlig å måle opp avstanden mellom Alexandria og Syene.

Aristarkos måler avstander i universet

Eratosthenes' vellykkede bruk av matematikk på oppmålte data inspirerte Aristarkos til å beregne forholdet mellom avstanden fra jorda til sola og avstanden fra jorda til månen. Aristarkos var sannsynligvis også sjefbibliotekar ved biblioteket i Alexandria da han utførte denne beregningen. Aristarkos målte vinkelen mellom siktelinjen til sola og siktelinjen til månen fra Alexandria «akkurat» når man fra jorda kun ser halve månen, slik figur 1.5 viser.



Figur 1.5. Ved halvmåne er det 90° mellom katetene *JM* og *MS*.

Aristarkos målte vinkelen θ mellom siktelinjene *JM* og *JS* i figuren til 87°. Trekantberegninger gir at avstanden fra jorda til sola (*JS*) er 19 ganger så stor som avstanden fra jorda til månen (*JM*). Dette resultatet er ganske langt unna den riktige verdien for forholdet, som er 390. Den matematiske metoden Aristarkos brukte, var riktig, men vinkelen θ er 89,85°, ikke 87°.

Vi skal se at Aristarkos' resultat faktisk ble bekreftet i senere beregninger av andre astronomer og kom derfor til å prege forestillingen om universets størrelse i lang tid.

1.4 Er jorda eller sola i ro i universets sentrum?

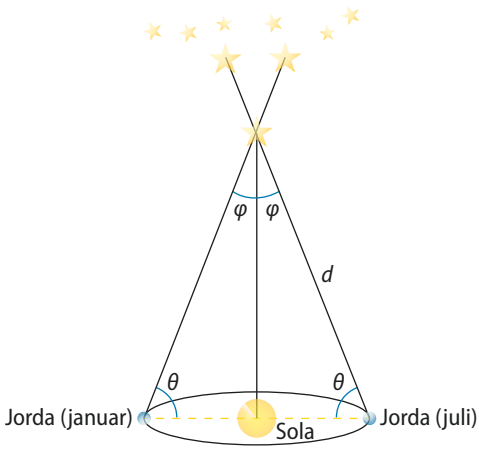
Pytagoreerne var antakelig de første som foreslo at hele universet har kuleform med et sentrum som falt sammen med jordas sentrum. Altså et geosentrisk (jordsentrert) verdensbilde. For pytagoreerne var det opplagt at den eneste geometriske formen som kunne gjenspeile stjernenes, solas og månens tilsynelatende *uforanderlige* og *evige* bevegelser på himmelen, var *sirkelen*. Jorda var altså i ro og i sentrum for *alle* himmellegemenes sirkelbevegelser. Denne ideen falt i god jord og ble i løpet av kort tid allment anerkjent.

I motsetning til ideen om at jorda har kuleform, var det imidlertid ikke mulig å fremlegge empiriske bevis for jordas sentrale plass i universet. Men i boka *Om himmelen* begrunner Arisoteles det geosentriske verdensbildet ut fra observasjoner av bevegelser på jorda. Dersom jorda hadde vært i bevegelse, skrev Aristoteles, ville en stein som ble kastet rett til værs, ikke lande i hendene på den som kastet steinen, for jorda ville ført han langt av sted mens steinen var i lufta. Andre gode argumenter han fremsatte for at jorda måtte stå stille, var at løse gjenstander på jordas overflate ville falle av dersom den var i bevegelse, og at månen ikke ville klare å kretse rundt en jord i stor fart.

Alternativet til det geosentriske verdensbildet var at sola er i sentrum for jordas, planetenes og stjernenes sirkelbevegelse, altså et heliosentrisk (solsentrert) verdensbilde.

Manglende stjerneparallakse

Det viktigste argumentet Aristoteles kunne føre i pennen for at jorda ikke er i bevegelse rundt sola, kom fra astronomene. De kunne fortelle at dersom jorda var i sirkelbevegelse rundt sola, ville vi se at en stjerne endret posisjon blant de andre stjernene i løpet av året, slik figur 1.6 illustrerer. Dette fenomenet kalles stjerneparallakse. Parallakse er den tilsynelatende forandringen i posisjonen til en gjenstand når den som observerer gjenstanden flytter seg fra et sted til et annet.



Figur 1.6. Dersom jorda beveget seg i en bane rundt sola, ville siktelinjen *d* til en stjerne endre retning i løpet av året, og stjernen på himmelen vil endre posisjon blant de andre stjernene. Det er vinkelen θ mellom siktelinjen og linjen inn til sola som blir målt. Vinkelen ϕ kalles parallaksevinkelen. Denne vinkelen er svært liten fordi avstanden fra jorda til stjernene er mye større enn avstanden fra jorda til sola.

Dersom jorda er i bevegelse rundt sola, vil siktelinja til en bestemt stjerne endre retning i løpet av året, og stjernens plass blant de andre stjernene på himmelen endres. Men astronomene observerte ingen parallakse, for siktelinjen til stjernene var den samme hele året. De var klar over at forklaringen på manglende synlig parallakse selvfølgelig kunne være at avstanden til stjernen var «uendelig» mye større enn diameteren i jordas bane rundt sola. Men ingenting tydet på at universet hadde store områder med tomt rom. Det hadde blant annet beregningene til Aristarkos vist. Når et enormt tomrom mellom den ytterste planeten og stjernenes område var erkjent usannsynlig, måtte forklaringen på manglende parallakse være at jorda stod i samme posisjon hele tiden. Det geosentriske verdensbildet var altså er resultat av teoretiske og empiriske argumenter.

Avstandene fra jorda til stjernene er ufattelig stor. Den nærmeste stjerna er 4,3 lysår = 41 300 milliarder km unna. Det var først i 1838 at astronomenes instrumenter var så gode at de kunne registrere en årlig parallakse til de nærmeste stjernene. Den begivenheten blir omtalt i bokas siste kapittel.

Oppgave 1.1

Hold en utstrakt pekefinger foran ansiktet. Forklar hva som skjer når du lukker og åpner øynene vekselvis. Varier avstanden mellom ansiktet og fingeren. Hva skjer etter hvert som avstanden øker?

Tre prinsipper for verden

Alle observasjoner av himmelrommet tydet på at der var alt uforanderlig. Ingenting oppstod eller gikk til grunne. Himmelen syntes å være evig og uforanderlig. Stjernene, planetene, sola og månen gjentok sine baner over himmelen med faste perioder. Den eneste geometriske formen som kunne gjenspeile disse gjentakelsene, var *sirkelen.* Jorda ble derfor sentrum for alle himmellegemenes sirkelbevegelser med konstant fart. Denne hypotesen om sirkelbevegelser på himmelen endret seg etter hvert til et sant *prinsipp*, kalt sirkelprinsippet, om verden.

Siden verden fremstod som et velordnet kosmos, var det også rimelig å anta at alle naturfenomenene foregår så enkelt som mulig. Dette prinsippet ble kalt for *enkelhetsprinsippet*, og det ble en ledestjerne til å forstå lovene som styrer naturen.

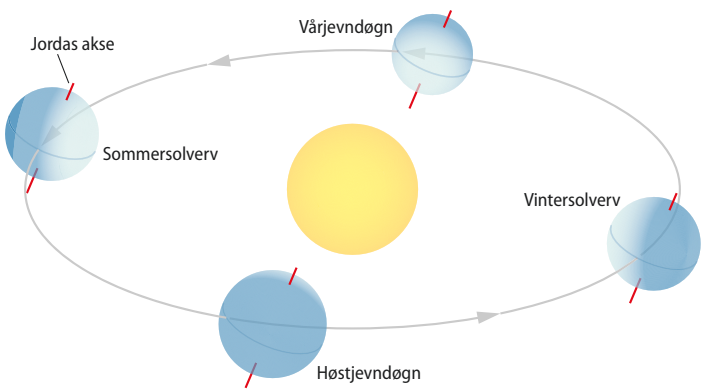
Et tredje prinsipp for naturen som virket naturlig å anta, var at alle prosesser i naturen skjer *kontinuerlig* eller *jevnt*. Naturen foretar ingen sprang, het det.

Før vi fortsetter med å forklare himmellegemenes bevegelser ut fra det geosentriske verdensbildet, altså sett fra jorda, vil vi presentere det eneste alternative verdensbildet som ble foreslått i antikken, nemlig et *heliosentrisk* system. I det heliosentriske systemet er det sola som er i ro og i sentrum for jordas og de andre planetenes sirkelbevegelser.

Aristarkos' heliosentriske verdensbilde

På tross av alle de overbevisende argumentene for det geosentriske verdensbildet hevdet Aristarkos at det brøt med enkelhetsprinsippet. Både dag og natt og årstidene kunne forklares på en enklere måte dersom sola var i sentrum for jordas sirkelbevegelse, hevdet han. I det geosentriske bildet må sola bevege seg en gang rundt jorda for at det skal bli dag og natt overalt på jorda. I det heliosentriske bilde blir det dag og natt overalt på jorda i løpet av et døgn ved å la jorda rotere en gang rundt sin egen akse. Den bevegelsen er mye enklere enn solas bevegelse rundt jorda i løpet av samme tid. Ved å la jordaksen helle med en konstant vinkel i forhold til det planet jorda beveger seg i, vil årstider oppstå, se figur 1.7. Energien i strålene er større per kvadratmeter om sommeren enn om vinteren fordi sola står høyere på himmelen om sommeren enn om vinteren. Den effekten kommer vi tilbake til i kapittel 22.

Det var ingen tvil om at både dag og natt og årstidene kunne forklares enklere i det heliosentriske verdensbildet enn i det geosentriske. Argumentene mot jordas bevegelse var likevel så overbevisende at Aristarkos' forslag ikke ble tatt seriøst.



Figur 1.7. Ved å la jorda rotere én gang i løpet av et døgn blir det dag og natt overalt på jorda. Ved å la jordaksen helle omkring 23 grader vil solas høyde over horisonten variere i løpet av året alle steder på jorda. På den nordlige halvkule vil sola stå lavest på himmelen ved vintersolverv og høyest ved sommersolverv. Ved vår- og høstjevndøgn vil dag og natt bli like lange overalt på jorda.

1.5 Stjernenes, solas, månens og planetenes bevegelser sett fra jorda

I 150 e.Kr. presenterte den store matematikeren og astronomen Klaudios Ptolemaios i boka *Almagest* en komplisert matematisk teori som beskriver planetenes, solas, stjernenes og månenes bevegelse sett fra jorda. Den eneste geometriske figuren han kunne bruke, var sirkelen. Det var selvfølgelig ikke mulig å beskrive noen av himmellegemenes bevegelse sett fra jorda med en enkel sirkelbane. Ptolemaios lyktes imidlertid i å beskrive bevegelsen til himmellegemene ved å *kombinere* sirkler. På denne måten oppfylte han det sanne prinsippet om at alle bevegelser på himmelrommet er sirkulære. Resultatet ble et komplisert matematisk system av sirkler på sirkler, men til sammen fikk de frem alle banene til himmellegemene.