

APOLLON

SÆRTRYKK AV FORSKNINGSMAGASINET FRA UNIVERSITETET I OSLO 2024

KJERNE-
FYSIKK

Endrer
fremtiden
vår



14 Underkommune 36 sider forskningsnyheter fra kjernefysikkens verden 19 Angler vitamin B12

UNIVERSITETET
I OSLO

APOLLON

FORSKNINGSMAGASIN FRA UNIVERSITETET I OSLO
www.apollon.uio.no

Apollon redigeres etter Redaktørplakaten.

Denne utgaven er et særtrykk av temadelen i Apollon 3/2024: Kjernefysikk.
Ansvarlig redaktør har inngått avtale med Fysisk institutt, UiO for dette særtrykket.

ADRESSE:
Apollon, Postboks 1076 Blindern, 0316 Oslo

**Apollon utgis 4 ganger i året.
TEGN ET GRATIS ABONNEMENT**
apollon@admin.uio.no

ABONNEMENTSANSVARLIG:
Kristin Kjolstad • 22 85 57 96

ANSVARLIG REDAKTØR:
Trine Nickelsen
trine.nickelsen@apollon.uio.no
22 85 41 33 / 948 63 233

JOURNALIST:
Yngve Vogt
yngve.vogt@apollon.uio.no
22 85 40 31 / 905 66 483

GRAFISK DESIGN:
Hanne Utigard

SPRÅKKONSULENT:
Alv Reidar Dale

TRYKK: Aksell

FORSIDE: Hanne Utigard



Det store i det lille

Få forskningsfelt fascinerer som fysikken. Dette er vitenskapen om 'alt' – om naturen, universets elementære byggesteiner og de fundamentale kreftene som virker mellom dem. Fysikken favner det aller største og det aller minste – fra gigantiske galakser til ørsmå partikler.

Ørsmå partikler, ja: I dag vet vi at absolutt alt er bygd opp av ufattelig små og udelelige partikler, fra sola på himmelen til lufta vi puster inn. Ideen om en slik minste stoffmengde som ikke lar seg dele i noe enda mindre, er langt fra ny. Demokrit var blant filosofene i det antikke Hellas som snakket om *atomos*, gresk for udelelig. Men det var likevel først på 1800-tallet at det kom bevis på at atomene faktisk finnes.

I 1911 skjer det et vitenskapelig gjennombrudd. Da fant den britiske fysikeren Ernest Rutherford ut at atomet likevel ikke er udelelig. Han oppdaget at hvert atom har en kjerne, og at denne kjernen er bygd opp av tett sammenpakkete protoner og nøytroner, omringet av ørsmå elektroner. Da ble det også klart at atomet nesten bare er tomt rom. Forstørrer vi atomet slik at kjernen er så stor som en ert, er de nærmeste elektronene én kilometer unna.

Det er nå godt over hundre år siden kjernefysikken ble grunnlagt – den delen av fysikken som studerer forholdene i atomkjernen. I dette særtrykket om kjernefysikk, spenner temaet vidt: Vi får en historisk innføring i fagområdet, vi får sjansen til å bli kjent med den nye storsatsingen Norsk nukleært forskningssenter; vi kan dessuten hive oss på en tur ut i verdensrommet eller kikke inn i atomkjernen. Det er verdt å legge merke til alle kvinnene på Universitetet i Oslo som har kjernefysikk som sitt fagfelt. I denne delen av fysikkfaget er kjønnsbalansen perfekt. Kvinnene står i en fin tradisjon etter landets første spesialist i radioaktivitet, professor Ellen Gleditsch – utdannet hos Marie Curie og ved La Sorbonne i Paris.

Kjernen i et atom er uforståelig liten, men med potensielt enorm kraft og mange muligheter for å kunne tjene mennesker og miljø, som dette særtrykket av Apollon gir flere eksempler på.

Denne aller minste verdenen fortsetter å fascinere, overraske og inspirere til nye innsikter og til teknologisk utvikling. I grunnforskningen er faktisk det minste det aller største.

Trine Nickelsen
Trine Nickelsen, ansvarlig redaktør



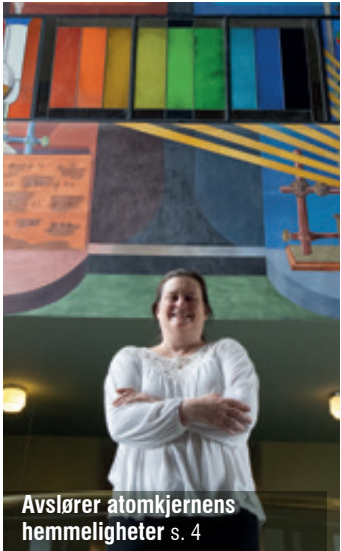
Kjernefysikk på 2–2–3
s. 6



Det store karbon-mysteriet
s. 10



Store uløste problemer
s. 20



Avslører atomkjernens hemmeligheter s. 4

INNHold

- | | |
|---|---|
| 4 AVSLØRER ATOMKJERNEN
Forskere kommer fra hele verden | 22 FEMTI MILLIONER GANGER MER ENERGI
Ett gram uran tilsvarer fire tonn kull |
| 6 KJERNEFYSIKK PÅ 1-2-3
Fra Demokrit til Einstein | 24 NORSK DEPONI FOR ATOMAVFALL
Sikkert i minst 100 000 år |
| 10 DET STORE KARBONMYSTERIET
Finberegner skapelsesberetningen | 26 PROTONTERAPIEN KOMMER TIL NORGE
Svært moderne stråleterapi |
| 16 GRUNNSTOFF-FABRIKKENE
Kollisjoner mellom nøytronstjerner | 30 RADIOAKTIV MEDISIN
Angriper kreftcellene innenifra |
| 20 STORE, ULØSTE PROBLEMER ETTER 85 ÅR
Overraskende funn i atomer | 32 NØYTRONKANONEN ER KOMMET
Viktig for industrien |

Avslører atomkjernens hemmeligheter

Kjernefysikere valfarter fra hele verden til kjelleren på Fysisk institutt for å utforske ukjente egenskaper i atomkjernen.

Tekst og foto: Yngve Vogt

Norsk nukleært forskningssenter, som ble åpnet i august i fjor, har fått 200 millioner kroner av regjeringen for å øke den nukleære kunnskapen i landet.

– Selv om Norge bestemmer seg for ikke å satse på kjernekraft, har vi likevel et stort behov for slik kompetanse. Her snakker vi om alt fra å kunne designe nye radiofarmasøytiske legemidler og analysere radioaktive stoffer i miljøet til å sørge for god atomberedskap og kunne håndtere det radioaktive avfallet fra de nedlagte atomreaktorene på Kjeller og i Halden. Industrien sliter i dag med å få tak i nok folk. Vi kan nå utdanne mange nye masterstudenter og doktorgradskandidater. Halvparten av de stipendiatene vi ansetter nå, skal jobbe med medisinske anvendelser, forteller lederen for senteret, professor *Sunniva Siem* på Fysisk institutt ved UiO.

Senteret hennes er et samarbeid mellom kjernefysikere, kjernekjemikere og radiofarmasøyter på Universitetet i Oslo, Institutt for energiteknikk og Norges miljø- og biovitenskapelige universitet på Ås. De har også et tett samarbeid med nukleærindustrien i Norge og en rekke utenlandske universiteter.

Internasjonalt trekkplaster. Det store trekkplasteret deres er *syklotronen* i kjelleren på Fysisk institutt.

– Forskere fra USA og Sør-Afrika, ja fra hele verden, kommer til syklotronen vår. Det er morsomt. Her har vi et unikt oppsett av detektorer.

En av dem, kalt OSCAR, som ble kjøpt inn i 2018, kostet den gang ikke mindre enn 26 millioner kroner.

– OSCAR gjør det mulig å se langt flere detaljer i atomkjernen enn hva som tidligere har vært mulig.

Hele verden som arena. Norge er ikke alene. Mange land har syklotroner. Syklotroner brukes til å avsløre ulike detaljer i atomkjerner. For å komme til bunns i atomkjernens hemmeligheter gjennomfører de norske forskerne også en rekke kjernefysiske eksperimenter i andre land, slik som IJCLab Orsay i Frankrike, University of California, Berkeley, sørafrikanske iThemba LABS og de to japanske laboratoriene RIKEN i Tokyo og Research Center for Nuclear Physics i Osaka.

– Der forskes det på eksotiske kjerner. Eksotiske kjerner er kortlivete kjerner som ikke finnes naturlig. Slike kjerner brukes blant annet til medisinsk behandling, forklarer Sunniva Siem.

Høy kvinneandel. Mange tror at kjernefysikk er et mannsdominert miljø. Slik er det ikke i Oslo.

– Kvinneandelen vår er mye større enn i vanlig fysikk. Her er det like mange kvinner som menn.

– Hva er trikket deres?

– Vi har et veldig godt arbeidsmiljø. Alle spiller på lag og hjelper hverandre. Slikt burde tiltrekke både kvinner og menn. Vi har dessuten noen gode rollemodeller, slik som Madam Curie. Det kommer godt med. ●

200 MILLIONER: Nukleært forskningssenter har fått 200 millioner kroner av regjeringen for å utdanne flere eksperter i kjernefysikk, kjernekjemi og radiofarmasi. Kvinneandelen er her mye høyere enn i vanlig fysikk. – Her er det like mange kvinner som menn, forteller senterleder Sunniva Siem foran Per Krohgs store veggmaleri i foajeen i Fysikkbygningen på Blindern.

Kjernefysikk på 1-2-3!

Lyst på en rask innføring i kjernefysikk?
Nå har du sjansen!

Tekst: Yngve Vogt

Et av de store spørsmålene i menneskehetens historie er hva materie er bygd opp av. For mer enn to tusen år siden lanserte den greske filosofen *Demokrit* (460 til 370 f.Kr.) atomteorien. Han mente alt kunne deles inn i mindre biter inntil man nådde en nedre grense og kalte den minste biten for et *atom*.

Først på 1700- og 1800-tallet fikk vitenskapen en større forståelse av materiens fascinerende verden.

– Kjemikerne skjønte at de ulike grunnstoffene kunne settes sammen og bli til noe annet, slik som at hydrogen og oksygen blir til vann og at natrium og klor blir til salt, forteller professor i kjernefysikk *Andreas Görgen* på Fysisk institutt ved UiO.

Kjemikerne oppdaget at noen grunnstoffer hadde felles egenskaper og reagerte likt med andre grunnstoffer. Alle disse egenskapene ble oppdaget gjennom kjemiske eksperimenter.

Opphavsmannen til det periodiske systemet, den russiske kjemikeren *Dmitrij Mendelejev*

MARIE CURIE slo fast at radioaktiv stråling skyldtes en egenskap ved atomet. Hun oppdaget også de radioaktive grunnstoffene polonium og radium.

(1834–1907), organiserte grunnstoffene systematisk. Den gangen kjente kjemikerne til 63 grunnstoffer. Takket være den systematiske oversikten, kunne Mendelejev forutsi en rekke ukjente grunnstoffer. – I dag kjenner vi til 118 grunnstoffer.

Uran, grunnstoff nummer 92, er det tyngste grunnstoffet som finnes naturlig på Jorda. Alle de andre grunnstoffene som er tyngre enn uran, er menneskeskapte.

– Akkurat som kjemikere kan sette sammen molekyler med ulike atomer, kan vi kjernefysikere bygge opp atomkjerner med elementære byggesteiner, forteller Andreas Görgen.

For å kunne forstå hvordan atomene er bygd opp,

er fysikerne nødt til å studere kjernereaksjoner. – Ved å se på de ustabile stoffene og hvordan de endrer seg, kan vi forstå strukturen i grunnstoffer.

Vitenskapshistorien. La oss først ta et historisk overblikk.

Da den franske fysikeren *Henri Becquerel* (1852–1908) jobbet med uran-forbindelser, oppdaget han radioaktivitet.

– Selv om Becquerel fikk æren av oppdagelsen, skjønte han ikke mye av hva det var.

Den første som avslørte radioaktiviteten, var den polskfødte fysikeren *Marie Curie* (1867–1934), for øvrig den eneste som er blitt tildelt nobelprisen i både fysikk og kjemi. Hun slo fast at strålingen skyldtes en egenskap ved uran-atomet.

– Frem til da tenkte man at atomet var den minste byggesteinen. Hvis det kom stråling fra atomet, kunne ikke atomet være den minste byggesteinen. Atomt måtte ha en indre struktur.

Etter at radioaktiviteten ble oppdaget, begynte forskerne å forstå hvordan grunnstoffene er satt sammen.

Marie Curie oppdaget også stoffer som sendte ut mye mer stråling enn det som kunne komme fra uran. Det måtte derfor finnes andre radioaktive stoffer enn uran. Hun oppdaget *polonium*, oppkalt etter hjemlandet hennes, Polen, og *radium*, oppkalt etter ordet radius, som betyr stråle på latin.

Tre typer stråling. En annen viktig og banebrytende vitenskapsmann er den britiske fysikeren *Ernest Rutherford* (1871–1937). Han regnes som grunnleggeren av den eksperimentelle kjernefysikken.

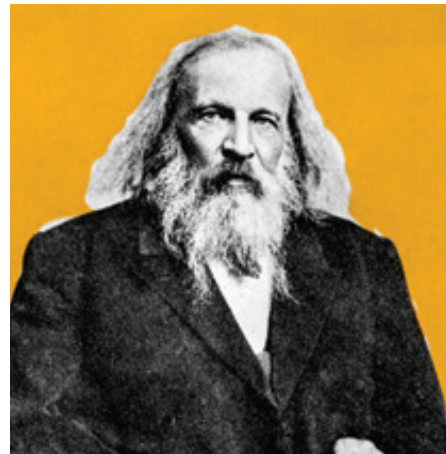
Takket være forsøkene hans kunne han slå fast at det finnes tre ulike typer stråling. Han døpte dem for *alfa*, *beta* og *gamma*, oppkalt etter de tre første bokstavene i det greske alfabetet. Alfa-stråler når ikke langt. De stoppes opp av noe så tynt som papir. Beta-stråler stoppes opp av tynne aluminiumsplater, mens gamma-stråler trenger igjennom det meste. De kan stanses av tykke blyvegger.

Da Rutherford studerte hvordan strålene passerte elektromagnetiske felt, oppdaget han at alfa- og beta-stråler ble avvendt i hver sin retning. På den måten kunne han slå fast at beta-stråler var negativt ladet, mens alfa-stråler var positivt ladet.

– I dag vet vi at alfa-stråler er atomkjerner til helium, at beta-stråler er elektroner og at gamma-stråling er elektromagnetiske bølger med høy energi, forteller Andreas Görgen.

Radioaktivitet var den gangen et nytt fenomen.

– Samtiden trodde på radioaktiviteten. Mange tenkte det var sunt.



DMITRIJ MENDELEJEV organiserte grunnstoffene i det periodiske system og kunne forutsi en rekke ukjente grunnstoffer.



HENRI BECQUEREL oppdaget radioaktivitet da han jobbet med uran-forbindelser.



ERNEST RUTHERFORD slo fast at mesteparten av atommassen er i sentrum av atomet og at elektronene befinner seg i en enorm avstand til atomkjernen.

Folk kjøpte radioaktiv hudkrem og tannkrem med radioaktivitet. Radioaktivt vann skulle være bra for helsen. Noen mente dessuten at radioaktivitet hjalp mot kreft, diabetes og tuberkulose.

– Kvakksalveriet varte i noen år, før folk skjønte at dette ikke var så lurt likevel. En fyr var så overbevist om at radioaktivitet var bra for helsen, at han drakk radioaktivt vann helt til underkjeven hans falt ut.

Atom-modellene. I 1911 kom Rutherfords atommodell. Rutherford slo fast at mesteparten av atommassen er i sentrum av atomet og at elektronene befinner seg i en enorm avstand til atomkjernen. Atomkjernen er positivt ladet, mens elektronene er negativt ladete.

Det er elektronene i baner rundt kjernen som bestemmer de kjemiske egenskapene til et atom.

I 1913 lanserte den danske fysikeren *Niels Bohr* atommodellen sin.

Han slo fast at elektronene i atomer bare kunne bevege seg i bestemte baner med en viss energi.

Du må for all del ikke sammenligne elektronbaner med planetbanene rundt solen. Planetene har ingen begrensninger på hvilke baner de kan følge. Slik er det ikke i den kvantefysiske verden.

– Elektronene må følge helt bestemte baner. Denne egenskapen er ikke mulig å forstå ut ifra klassisk fysikk. Dette ble begynnelsen på kvantefysikken.

Partiklene i atomer. Nå gikk vitenskapen fremover med stormskritt. Den britiske kjemikeren og fysikeren *Francis William Aston* (1877–1945) klarte å måle massen til atomer med høy presisjon. Det var da han oppdaget at atomer til det samme

grunnstoffet kunne ha ulik masse. Neon er et fint eksempel. Hvis vi bruker massen til hydrogen, det letteste grunnstoffet, som én enhet, har de fleste neon-atomene masse 20, mens en del har masse 22 og noen få har masse 21.

Dette kunne forklares ved at det finnes to ulike byggesteiner i atomkjerner: protoner med positiv elektrisk ladning og nøytroner uten ladning. Elektrisk nøytrale atomer har like mange protoner som elektroner.

La oss fortsette med neon som eksempel. Neon er det tiende grunnstoffet i det periodiske systemet.

– Et grunnstoff er definert av antall protoner i kjernen. Atomkjernen til neon har derfor alltid ti protoner. Det betyr at antall nøytroner i neon kan variere mellom 10, 11 og 12. Variasjonene av det samme grunnstoffet kalles for *isotoper*.

– Det er umulig å skille isotoper med kjemiske eksperimenter.

Fellesnavnet for isotopene til alle grunnstoffene kalles for *nuklider*. Én nuklide er altså ett atom med et gitt antall protoner og nøytroner i kjernen.

For å lage moderne kreftmedisiner, forstå hvordan grunnstoffene er dannet i universet og for å kunne forstå hvordan kjernekraft fungerer, er det viktig å kunne skille mellom de ulike nuklidene og hvordan de kan omdannes til andre nuklider.

Kjernefysikerne kjenner i dag til 3000 nuklider. Brorparten av dem er radioaktive. Bare 284 er stabile.

Ustabile nuklider er radioaktive. Det betyr at de etter hvert, og helt spontant, omdannes til andre nuklider. Kjernefysikerne har et eget begrep for dette. De bruker begrepet å *henfalle* til noe annet.

Noen av de radioaktive nuklidene finnes natur-

” Samtiden trodde på radioaktiviteten. Mange tenkte det var sunt.



FRANCIS WILLIAM ASTON oppdaget at atomer til det samme grunnstoffet kunne ha ulik masse. Variasjoner av det samme grunnstoffet kalles for isotoper.



NIELS BOHR slo fast at elektronene i atomer bare kunne bevege seg i bestemte baner med en viss energi.



ALBERT EINSTEIN viste en klar sammenheng mellom masse og energi.

lig rundt oss. De fleste lages i kjernefysiske laboratorier.

Kjernefysikerne har en egen oversikt over egenskapene til alle nuklidene. De er samlet i et *nuklidekart*. Dette er bibelen for kjernefysikere.

En av de viktige egenskapene til radioaktive nuklider er *halveringstiden*. Det er den tiden det tar før halvparten av nukliden har henfalt til noe annet. Noen ganger er halveringstiden så kort som millisekunder. Andre ganger kan det være snakk om flere milliarder år. I nuklidekartet får kjernefysikerne en grei og lettfattelig oversikt både over halveringstiden og hva slags stråling det er snakk om når en nuklide henfaller til en annen nuklide.

De ulike kreftene. Nå begynner det å bli morsomt. Jeg lover! For å skjøne kjernefysikk må du forholde deg til mer enn gravitasjonskraften (som sørger for at masse tiltrekker seg masse) og elektromagnetismen (som sørger for at elementer med like ladninger frastøter hverandre og at elementer med motsatte ladninger tiltrekker hverandre). Begge disse kreftene virker på lang avstand.

Hvis disse to kreftene var de eneste som fantes i universet, ville protonene i atomkjernen – og du husker vel at protoner er positivt ladde partikler? – bli skjøvet fra hverandre. Da hadde alt rundt oss brutt sammen. Takk og lov finnes det enda en svært viktig kraft som holder det hele samlet. Den kalles *den sterke kjernekraften*.

– Selv om den sterke kjernekraften er den sterkeste kraften vi har, når den ikke langt.

Rekkevidden er utrolig nok bare lengden av et proton eller et nøytron.

Hvis et nøytron kommer nær nok atomkjernen, vil det bli fanget inn av den sterke kjernekraften.

Det krever derimot mer energi å dytte et proton inn i atomkjernen. Den elektromagnetiske kraften presser protonet vekk. Hvis protonet derimot sendes inn med høy nok hastighet, vil det klare å passere barrieren.

– Da vil den sterke kjernekraften overvinne den elektromagnetiske kraften og sørge for at protonet blir fanget inn i atomkjernen.

Dette er forklaringen på at kjernefysikere bygger partikkel-akseleratorer. Her kan de akselerere opp farten på protoner og nøytroner slik at de får høy nok hastighet til å overvinne den elektromagnetiske kraften og bli fanget inn av atomkjernen.

Einsteins energilov. For å beregne hvor mye energi som kreves eller frigjøres når en nuklide henfaller til en annen nuklide, må kjernefysikerne forholde seg til den berømte formelen til Einstein som gir en klar sammenheng mellom masse og energi. Hvis en nuklide mister masse, dannes det energi. Og omvendt.

Det er faktisk mulig å skape enorme mengder energi ved å smelte sammen to lette atomkjerner. Denne sammensmeltingen kalles for *fusjon*. Det er også mulig å skape energi ved å dele opp tunge atomkjerner i to lettere atomer. Denne oppsplittingen kalles for *fisjon*.

Det er nettopp oppdagelsen av fisjon og fusjon som har gjort det mulig for menneskeheten å forstå hvordan de lette grunnstoffene forbrennes i solen og hva som skal til for å hente ut energi fra kjernefysiske reaksjoner. Den nye kunnskapen har også vært svært viktig for å kunne lage moderne kreftmedisin – som du kan lese mer om i denne utgaven av Apollon. ●

” Det er umulig å skille isotoper med kjemiske eksperimenter.



KJERNEFYSIKER: – Akkurat som kjemikere kan sette sammen molekyler av ulike atomer, kan vi kjernefysikere bygge opp atomkjerner med elementære byggesteiner, forteller Andreas Görgen.

Det store karbonmysteriet



RÅDYRT EKSPERIMENT: For å kunne beregne hvor fort karbon er blitt dannet i stjerner, må Wanja Paulsen gjennomføre eksperimenter på en detektor som har kostet 27 millioner kroner.



ALLE FOTO: SIMEN KJELLIN, REALFAGSBIBLIOTEKET, UIO

Karbon er grunnlaget for alt liv på Jorda. Likevel var sannsynligheten svært liten for at karbon ble dannet. Nå skal UiO finregne på skapelsesberetningen.

Teks og fotot: Yngve Vogt

De aller fleste av oss tar eksistensen av karbon som en like stor selvfølge som at du kan kjøpe brød og melk i nærbutikken. De færreste tenker på at verken du eller jeg hadde eksistert uten karbon. Karbon er et av de viktigste grunnstoffene på Jorda. Uten karbon, intet liv.

Selv om forskerne har beregnet hvordan karbon ble dannet, er det fortsatt ikke gjennomført et presist nok eksperiment som kan vise hvor fort det skjedde. Med mer presise data kan kjernefysikere gi sikrere beskrivelser av hvor lenge stjernene lever, hvordan de avslutter livet sitt og hvorfor fordelingen av grunnstoffene i universet er som de er.

Kjernefysikere fra mange steder i verden strømmer nå til Universitetet i Oslo for å gjennomføre dette eksperimentet, takket være et nytt og moderne utstyr i kjelleren på Fysisk institutt til ikke mindre enn 27 millioner kroner.

Stjerneenergi. For å forstå det fascinerende eksperimentet må du kjenne til noen grunnleggende prinsipper.

Som du kanskje husker fra ungdomsskolen, er brorparten av atomene i universet hydrogen og helium. Hydrogen og helium er de letteste grunn-

stoffene våre. Hvis du lurar på fordelingen, er 74 prosent av alle atomene i universet hydrogen og 24 prosent helium. De 116 andre grunnstoffene fordeler seg på de to siste prosentene.

Noen av de letteste grunnstoffene ble, og blir fortsatt, dannet i stjerner. Stjernene er spekket med hydrogen-brensel. Her svis det unna i et enormt tempo. Den lille solen vår forbrenner så mye som 700 millioner tonn hydrogen i sekundet. Når hydrogenkjerner smelter sammen til heliumkjerner, frigis energi. Da lyser stjernene.

Hydrogenet varer dessverre ikke evig. Når hydrogenet er brukt opp, slår de litt tyngre grunnstoffene seg sammen, men det går en magisk grense ved jern. Uansett hvor mye du skulle ønske det var mulig, er det overhodet ikke mulig å skape energi ved å slå sammen grunnstoffer som skal bli tyngre enn jern. Alle disse tunge grunnstoffene må ha blitt dannet i enorme stjerneeksplosjoner. Selv om denne skapelsesberetningen fortsatt er et av de store, uløste problemene i vitenskapen, er dette en annen historie. Denne reportasjen handler ene og alene om karbon, det livsnødvendige grunnstoffet som er mange ganger lettere enn jern og som blir dannet den siste tiden før en stjerne utånder og sier takk for seg.

TEKNISK KREVENDE: Fysisk institutt har brukt to år på å sette sammen den nye detektoren på instituttet. Her er professor Magne Guttormsen og forsker Gry Tveten i gang med å klargjøre karboneksperimentet.

Spektakulær teori. Fysikerne klodde seg lenge i hodet over hvordan karbon ble skapt. I 1952 kom den spektakulære teorien. Mange var dypt skeptiske og mente den var tatt ut av løse luften.

Mannen bak teorien var den britiske astrofysikeren *Sir Fred Hoyle* (1915–2001). Først to år senere var det mulig å vise eksperimentelt at teorien stemte. Hoyle blir i dag regnet som en av verdens fremste astrofysikere. Han fant den eneste måten å skape karbon på.

Karbonoppskriften er av det mirakuløse slaget. For det første må stjernen bestå av en helt bestemt blanding av hydrogen og helium. Stjernen må også ha et bestemt trykk og en bestemt temperatur. Så langt, så vel. Det burde være en grei sak å finne en slik cocktailblanding med tanke på de myriadene av stjerner som finnes i universet.

Når disse fysiske forholdene er til stede, kan karbon dannes gjennom en sinnrik tretrinnsprosess. I det første trinnet må to helt vanlige heliumkjerner smelte sammen til en berylliumkjerne. Det som er så ufattelig å tenke på, er at levetiden til denne berylliumkjernen bare er 10 opphøyd i minus 17 sekunder. Hvis du skal notere ned dette kryptiske tallet med god gammeldags ungdomsskolenotasjon, er levetiden så kort som 0,000 000 000 000 001 sekunder. Det er én hundretusendel av et trilliardels sekund. Som om dette ikke skulle ta pusten fra hvermannen, er det andre trinnet like imponerende. I løpet av denne magiske, korte levetiden må berylliumkjernen smelte sammen med enda en heliumkjerne. Først da har du en karbonkjerne.

Du er likevel langt fra målet, så her kommer det tredje, forløsende trinnet. Karbonkjernen inneholder så mye energi at den som oftest ikke klarer å holde seg samlet. Da blir den omdannet til helium-

kjerner igjen. Det skjer 99,96 prosent av gangene. Det vil si nesten alltid.

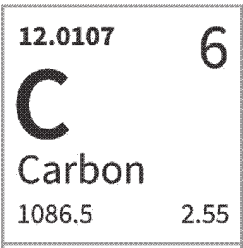
Bare i 0,04 prosent av tilfellene klarer den energispekke karbonkjernen å kvitte seg med energien sin på en slik måte at kjernen overlever og forblir stabil for alltid. For dem som ikke er så glad i prosentregning, betyr dette mirakuløse lille tallet på 0,04 prosent: Bare 1 av 2500 energifylte karbonkjerner overlever det mesterstykket det er å bli omdannet til en helt vanlig karbonkjerne.

Grunnstammen. Mirakelet er enda større enn som så. Uten karbon hadde det ikke vært mulig å danne oksygen, for å nevne et av de aller viktigste grunnstoffene i menneskets tilværelse. Oksygen er dannet ved at karbon har smeltet sammen med helium. Nitrogen, som det finnes mye av i både proteiner og DNA-tråder, er dannet ved at oksygen har gitt fra seg en liten bestanddel i atomkjernen sin.

– Karbon er faktisk grunnstammen i hvordan alle de andre tyngre grunnstoffene i universet ble dannet, påpeker forsker *Ann-Cecilie Larsen* på Fysisk institutt ved Universitetet i Oslo. Hun forsker på atomkjernenens indre liv i gigantiske stjerneeksplosjoner.

Eksperimentene. Selv om kjernefysikere har fått den teoretiske forklaringen på hvordan karbon ble dannet, er det fortsatt ikke gjort gode nok eksperimenter som kan beskrive presist nok, og med minst mulig usikkerhet, hvor stor andel av de energifylte karbonkjernene som blir stabile.

På seksti- og syttitallet ble det gjennomført sju kjernefysiske eksperimenter. De forsøkte alle å finne den nøyaktige prosentandelen. Resultatene fra de første eksperimentene på sekstitallet var ikke gode nok. På syttitallet traff eksperimentene



FAKTA:

Karbon

•Karbon er det sjette letteste grunnstoffet.

• Karbon er nødvendig for alt liv på Jorda.

• Uten karbon hadde det ikke vært mulig å danne tyngre grunnstoffer i universet.

” Atomet er desperat etter å bli kvitt energien sin. Ikke rart at stjerner er et kaotisk sted.

” Den eneste grunnen til at vi eksisterer slik som verden er i dag, er at prosentsatsen er nøyaktig 0,04 prosent.

bedre, men usikkerheten var fortsatt for stor. Så skjedde intet på førti år, før kjernefysikere på Fysisk institutt ved Universitetet i Oslo, sammen med australske forskere, gjennomførte nye eksperimenter på syklotronen sin.

Syklotronen er et kjernefysisk laboratorium, der forskere kan undersøke atomkjerner ved å bombardere dem med partikler. Teknisk sett er syklotronen en såkalt akselerator der partiklene blir akselerert opp ved hjelp av et magnetfelt og et elektrisk felt. Når partiklene har fått den ønskete hastigheten, blir de slynget av gårde mot målet. Når atomkjernene blir bombardert med disse partiklene, blir de veldig stresset. Da sender de ut elektromagnetisk stråling. Strålingen måles av en detektor. Det er nettopp denne strålingen som kan gi svaret på karbongåten.

Nå er stipendiat *Wanja Paulsen* på Fysisk institutt i gang med eksperimentet for å finne hvor ofte de energirike karbonkjernene, som dannes i stjerner, klarer å avgi energien sin for å kunne omdannes til stabile karbonkjerner.

Ettersom det forbausende nok ikke er mulig å gjenskape forholdene i en vaskeekte stjerne, må hun løse det på en annen måte, ved å gå baklengs til verks. Hun tar helt vanlige og stabile karbon-atomer og tilfører dem så mye energi at de får nøyaktig den samme energien som karbonkjernene hadde da de ble skapt inne i en stjerne.

Kvitter seg med energi. For å skjønne hva som skjer når karbonkjernene har så mye energi, må du kunne det helt grunnleggende om oppbyggingen av en atomkjerne.

Atomkjerner består av protoner og nøytroner. Protoner er ladde partikler. Nøytroner er uladde partikler. En karbonkjerne har seks protoner. Karbon defineres derfor som grunnstoff nummer seks i det periodiske systemet.

En atomkjerne er som en ball der protonene og nøytronene holder fast i hverandre. Hvis kjernen har for mye energi, rister hele ballen. Atomkjernen trives best i grunntilstanden, som er den mest behagelige posisjonen for enhver atomkjerne.

Før karbonkjernen kvitter seg med energien, befinner den seg i et eksitert nivå. Da har den så mye energi at den er ukomfortabel. Løsningen er å kvitte seg med energien. Det Fred Hoyle oppdaget, var at når tre heliumkjerner slår seg sammen til en karbonkjerne, har karbonkjernen en helt spesiell energitilstand som kalles *resonanstilstanden*. Da rister atomkjernen på en spesiell måte. Navnet er oppkalt etter resonans, det spesielle fenomenet som kan få en bro til å kollapse om det marsjeres i takt på den.

– Fred Hoyle regnet resonanstilstanden med en fantastisk nøyaktighet. Han slo fast at den var

på nøyaktig 7,65 megaelektronvolt, forteller Wanja Paulsen.

Denne spesielle tilstanden har derfor fått sitt eget navn, «Hoyle-tilstanden». Hvis du har lyst til å lese mer om dette på verdensveven, kan du søke etter det engelske uttrykket «Hoyle state».

Når karbonkjernen i resonanstilstanden skal kvitte seg med energioverskuddet, kan det skje på to måter. Den ene muligheten er å sende ut energirike fotoner som kalles for *gammafotoner*. Det skjer 98 prosent av gangene. Den andre måten er å sende ut både ett elektron og ett positron. Alle elektroner har negativ ladning. Positroner er antimaterie og har positiv ladning. Positroner overlever ikke lenge i en verden med mengder av elektroner. Positroner vil derfor kolliderer med elektroner og omdannes til energi.

– Atomet er desperat etter å bli kvitt energien sin. Ikke rart at stjerner er et kaotisk sted. Hvis karbonkjernen ikke kvitter seg med energien på rett måte, faller den fra hverandre igjen, forteller Wanja Paulsen. Hun skal studere hva som skjer 98 prosent av gangene karbonatomet klarer å bli stabilt, altså hvordan karbonkjernen kvitter seg med gammafotoner.

Denne forskningen er faktisk meget nyttig. Jo sikrere data astrofysikerne har på dannelsen av karbon, desto sikrere kan de også beregne hvor mye som ble dannet av alle de andre tyngre grunnstoffene og hvor lenge stjernene lever.

– Det er derfor viktig å gjennomføre et eksperiment der resultatet blir minst mulig usikkert.

Moderne utstyr. Etter den førti år lange pausen da ingen i verden interesserte seg for eksperimentet, ble det for noen få år siden gjennomført et eksperiment på syklotronen i Oslo. Den gang hadde syklotronen en detektor som ble kalt for Cactus. Resultatene ble bedre enn tidligere, men usikkerheten var fortsatt for stor.

– Du kan sammenligne denne usikkerheten med at du skal måle noe med et svært unøyaktig instrument. Du måler igjen og igjen. Resultatene blir stadig forskjellige. Svaret ditt er derfor befengt med store usikkerheter.

Hele poenget er å redusere denne usikkerheten så mye som mulig.

For fem år siden fikk syklotronen en helt ny detektor, kalt OSCAR. Kjernefysikerne brukte to år på å bygge den.

– Her snakker vi om en detektor med enestående oppløsning. Reaksjonstiden er verdens beste.

Du kan sammenligne OSCAR med å skaffe deg et kamera med mange ganger flere piksler. Da kan du se langt flere detaljer.

– Med OSCAR kan vi regne alt ut med høyere

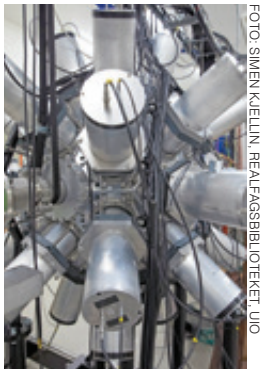


FOTO: SIMEN KJELLIN, REALFAGSBIBLIOTEKET UIO

FAKTA Eksperimentet

• Karbon dannes i slutten av en stjernes liv.

• Sannsynligheten for at karbon blir dannet, er utrolig liten. Først må to heliumkjerner smelte sammen til en berylliumkjerne. Så må berylliumkjernen smelte sammen med en ny heliumkjerne. Dette må skje innenfor en hundretusendel av et trilliontedels sekund.

• De nydannete karbonkjernene får da en bestemt mengde energi som kalles Hoyle-tilstanden.

• Energimengden er så stor at 99,96 av karbonkjernene bryter sammen.

• Bare 0,04 prosent av de energirike karbonkjernene klarer å kvitte seg med energien og bli til stabile karbonkjerner.

• Denne prosentsatsen er beregnet teoretisk. Oslofysikerne skal nå beregne prosentsatsen eksperimentelt.



presisjon. I dag er usikkerhetsmarginen på hvor stor andel av de energirike karbonkjernene som klarer å overleve, tolv prosent. Denne usikkerheten er fortsatt for stor og er derfor en stor begrensning i nøyaktigheten på de modellene som brukes til å beregne hvordan grunnstoffene ble dannet i stjerner. Ønsket vårt er å redusere denne usikkerheten til under fem prosent for å få så nøyaktige beregninger som mulig, forteller Wanja Paulsen.

Valfarter til UiO. Kjernefysikere fra andre steder i verden valfarter nå til Oslo. UiO har allerede fått et meget tett samarbeid med kjernefysikere fra Australia og Sør-Afrika.

Australierne har tatt med seg en folie med rent karbon til forsøket. Poenget er å bombardere karbonfolien med protoner for å øke energinivået slik at karbonatomene havner i Hoyle-tilstanden. De skal altså få karbonatomene til å vibrere på akkurat samme måte som da de ble skapt inne i en stjerne.

Det er ikke lett å tilføre atomene den nøyaktige energien som trengs. I eksperimentet vil atomkjernene i karbonfolien avgi milliarder på milliarder med gammafotoner i sekundet. Forskerne må da lete etter gammafotoner med den helt bestemte energimengden.

– Hvis karbonkjernene sender ut akkurat den energien jeg leter etter, kan det være fra resonanstilstanden, sier Wanja Paulsen.

Eksperimentet varer 24 timer i døgnet i to uker. Rent teoretisk skal det være nok med en uke, men Wanja Paulsen påpeker at slike eksperimenter er en humpete vei å gå. Det er alltid noe som kan gå galt.

Når eksperimentet er over, skal hun lage egne dataprogrammer for å kunne tolke de enorme mengdene med data.

Skikkelig finjustering. Du lurar kanskje på hvorfor kjernefysikerne synes det er så viktig å forske på at bare 0,04 prosent av alle de energifylte karbon-

kjernene i stjernene ble til stabilt karbon? Svaret er enkelt og greit. Denne spesielle prosentraten har alt å si for at vi mennesker eksisterer i dag. Det var en skikkelig finjustering at vi fikk det livet vi fikk.

– Det er utrolig tilfeldig at dette har gått så bra. Bare en liten endring i prosentsatsen, og hele universet hadde sett annerledes ut, forteller Wanja Paulsen.

Selv en så ørliten endring som 0,1 prosentpoeng kunne ha fått vidtrekkende konsekvenser.

– Hvis det hadde vært enklere å danne karbon, ville solen og alle de andre stjernene ha utviklet seg annerledes. Hvis du øker sannsynligheten for å lage karbon, ville stjernene ha brukt opp brennstoffet mye fortere. Da ville stjernene ha dødd ut langt raskere. Poenget er at stjerner bare lever så lenge de har brennstoff, forteller Ann-Cecilie Larsen.

Hvis sannsynligheten for å lage karbon var en ørliten del mindre, ville brennstoffet ha vart mye lenger.

– Da ville det ha vært langt mindre tyngre materie i verdensrommet i dag. Den eneste grunnen til at vi eksisterer slik som verden er i dag, er at prosentsatsen er nøyaktig 0,04 prosent. Dette er helt utrolig. Jeg håper folk skjønner hvor fantastisk spennende fysikk er når de tenker på dette, forteller Wanja Paulsen.

PS. Den nye detektoren skal selvsagt også kunne brukes til en rekke andre eksperimenter.

– OSCAR er en kjempeoppgradering av systemet vårt. Vi kan nå se flere detaljer og få en langt dypere forståelse av atomkjernen. Resultatene fra eksperimentene vil ikke bare kunne brukes til grunnforskning, men kan gi oss en bedre forståelse av hvordan grunnstoffene i universet er dannet og føre til bedre reaktorsimuleringer for å kunne designe fremtidens kjernereaktorer, poengterer primus motor for kjernefysikkforskningen ved UiO, professor *Sunniva Siem* på Fysisk institutt. ●

STATSRÅDÅPNING: Daværende forsknings- og høyere utdanningsminister Iselin Nybø (V) åpnet den nye detektoren for fem år siden. Her ble hun flankert av professor Andreas Görge til venstre og daværende instituttleder Jøran Moen til høyre.

» Denne observasjonen kan forklare hvordan de tunge grunnstoffene er dannet i universet.



GRUNNSTOFF-FABRIKK: I 2017 oppdaget astrofysikere denne kollisjonen mellom to nøytronstjerner i galaksen NGC4993, 140 millioner lysår fra Jorda. Ved å studere det røde lyset fra kollisjonen, var det mulig å se fingeravtrykket av tunge grunnstoffer.

De leter etter grunnstoff-fabrikkene i universet

De fleste grunnstoffene på Jorda ble skapt i voldsomme stjerne-kollisjoner. For å forstå hvordan det skjedde gjensker forskere en rekke kjernefysiske reaksjoner i kjelleren på Fysisk institutt.

Tekst og foto: Yngve Vogt

V i vanlige dødelige tar det kanskje for gitt at det finnes 118 grunnstoffer, at livet vårt er avhengig av karbon, at luften rundt oss består av oksygen og nitrogen og at giftingene våre er laget av gull. For *Ann-Cecilie Larsen* er dette ingen selvfølge. Hun er professor i kjernefysikk ved UiO og har brukt forskerkarrieren sin til å prøve å forstå hvordan alle grunnstoffene i universet er blitt dannet. Selv om en del puslespillbrikker er på plass, er det fortsatt mange viktige brikker som mangler.

Astrofysikerne har tidligere antatt at alle de tunge grunnstoffene i universet er dannet i supernovaer. Men nærmere studier har vist at supernovaene ikke klarer å danne så tunge grunnstoffer som uran, bly og platina, grunnstoffer som beviselig finnes på Jorda. Astrofysikerne har derfor måttet lete videre etter grunnstoff-fabrikkene i universet.

Zombie-kollisjoner. Et av scenariene er at halvparten av alle de tunge grunnstoffene på Jorda er dannet i en kollisjon mellom to nøytronstjerner. Nøytronstjernene er «zombiene» i universet. De er restene av supernovaeksplosjoner med en vanvittig tetthet. En sukkerbit av nøytronstjernen ville ha veid én milliard kilo på Jorda.

Bare et fåtall stjerner blir til nøytronstjerner. En *nøytronstjerne* dannes når en svær stjerne brenner opp alt brenselet sitt, eksploderer og omdannes til en *supernova*. En supernova er en gigantisk stjerneeksplosjon som lyser mer opp enn en hel galakse til sammen. En *galakse* er en samling

stjerner. Bare i galaksen vår, Melkeveien, finnes det rundt 300 milliarder stjerner.

Hvis stjernen som blir til en supernova er veldig stor, blir supernovaen etter hvert til et *svart hull*. Hvis den ikke er fullt så stor, men likevel mange ganger større enn solen vår, blir den til en *nøytronstjerne*.

Svært sjeldne kollisjoner. Med tanke på hvor sjeldent stjerner eksploderer, at bare et mindretall av stjerner blir til supernovaer og at bare en brøkdel av dem blir til nøytronstjerner, og at det attpåtil må skje en kollisjon mellom to nøytronstjerner for å skape tunge grunnstoffer, er det ikke så rart å tenke seg at disse astrofysiske hendelsene skjer svært sjeldent. Men for sju år siden, i 2017, klarte astrofysikere, for første gang i verdenshistorien, å måle gravitasjonsbølgene fra en kollisjon mellom to nøytronstjerner.

– Tidligere hadde astrofysikerne klart å måle en kollisjon mellom to svarte hull. Men dette her: En kollisjon mellom to nøytronstjerner!!

Ann-Cecilie Larsen snakker i ekstase.

– Denne observasjonen kan forklare hvordan de tunge grunnstoffene er dannet i universet.

Astrofysikere som måler gravitasjonsbølger, klarte å lokalisere hvor på himmelen nøytronstjerne-kollisjonen skjedde i 2017. De ba sporenstreks kollegaer over hele verden se etter både synlig lys og gammastråling og røntgenstråling.

– Det var utrolig at de greide å måle dette. Det fikk hodet mitt til å eksplodere. Dette var den første astronomiske hendelsen der man målte *både*

FOTO: NASA OG ESA



gravitasjonsbølger og elektromagnetisk stråling, ler Ann-Cecilie Larsen.

– Teleskoper er optimalisert på forskjellige bølgelengder og måler forskjellige ting. Noen målte gammastrålene. Andre målte det synlige lyset.

Det ble samlet inn enorme mengder data. Det første som ble dannet under kollisjonen, var gammastråler. Så ble det dannet blått lys. En halv dag senere endret fargene seg til gult og rødt.

– Det røde lyset var spesielt interessant for oss kjernefysikere. Hvert grunnstoff har sitt karakteristiske fingeravtrykk. Her fikk vi se fingeravtrykket av tunge grunnstoffer. Det var grusomt spennende! Men ut ifra observasjonene kunne vi dessverre ikke tolke hvor mye det ble laget av hvert grunnstoff. Vi kunne heller ikke se om det ble dannet uran eller thorium, to grunnstoffer som er svært nær hverandre i det periodiske systemet.

Fjern galakse. Det er kanskje ikke så rart at observasjonene ikke var gode nok. Kollisjonen mellom de to nøytronstjernene skjedde ikke akkurat i nabolaget vårt, men i en galakse med det lite

sexy navnet *NGC4993*, 140 millioner lysår unna. Selv om kollisjonen skjedde den gangen dinosaurene herjet på Jorda, kom signalene frem til Jorda først for sju år siden.

Kjernefysikerne drømmer om bedre observasjoner. Vi på Jorda skal likevel være glade for at kollisjonen skjedde et stykke unna. Strålingen fra kollisjonen kunne ha svidd vekk livet på null komma niks.

– Kollisjonen var likevel årets store hendelse. Dette var like stort for oss kjernefysikere som da partikkelfysikerne oppdaget *Higgs-partikkelen* på CERN for tolv år siden.

For å forstå hva som skjer prøver Ann-Cecilie Larsen å lage en simuleringsmodell på datamaskinen for å gjenskape de kjernefysiske reaksjonene i nøytronstjerne-kollisjonen.

– Alle de ulike simuleringsmodellene viser at det dannes uran og thorium og andre tunge grunnstoffer i disse kollisjonene. Vi er veldig sikre på at det skjer, men vi vet fortsatt ikke nok om hvordan det skjer.

Forskerne trenger derfor flere observasjoner av

”
Det har vært
opphetete
debatter.

BIBELN TIL KJERNEFYSIKERE: – Vi bruker årevis på å analysere én atomkjerne. Så selv om vi gjennomfører eksperimentene våre døgn-et rundt, er det umulig å komme i mål, forteller Ann-Cecilie Larsen og viser nuklidekartet, som er selve bibelen for kjernefysikere. Her har kjernefysikerne en detaljert oversikt over alle egenskapene, slik som halveringstiden, til alle de kjente variasjonene av grunnstoffene våre.

” Kollisjonen var årets store hendelse.

nøytronstjerne-kollisjoner for å kunne gi bedre svar.

Svimlende avstand. I fjor kom det en ny mulighet. Da dukket det opp enormt mye stråling fra galaksen GRB230307A ufattelige 900 millioner lysår borte. Selv om hendelsen skjedde mens Jorda var i prekambrium, den gangen det bare fantes encellede organismer på Jorda, brukte strålingen så lang tid på ferden at den først nådde frem til Jorda i mars 2023.

– Målingene var ikke like fantastiske som dem i 2017. Denne gangen kunne vi ikke måle gravitasjonsbølger, men vi har likevel stor tro på at det vi så, skyldtes en nøytronstjerne-kollisjon. Lyskilden var rødt. Vi er sikre på at vi har sett grunnstoffet *tellur*. Så nå har vi en og en halv observasjon, ler kjernefysikeren.

Hun håper likevel på flere observasjoner.

– Selv om vi er veldig takknemlige for de observasjonene vi har fått, skulle vi gjerne hatt flere for å kunne si om de er generelle eller bare er spesialtilfeller.

Løser ikke alle problemene. For å gjøre tilværelsen enda vanskeligere viser det seg at nøytronstjerne-kollisjoner ikke er svaret på alt.

– Simuleringsmodellene våre klarer ikke å slå fast hvordan grunnstoffer som molybden, sink og silisium er dannet tidlig i universets historie. Dette er et stort og vanskelig spørsmål. Tenk om vi aldri får et svar på dette? Det er til å bli deprimeret av. Vi tror vi har skjønnet hvordan tunge grunnstoffer som uran og gull er dannet, men vi sliter med mellomstjiktet fra jern til tellur. Her spriker teoriene i alle retninger.

Ett av de store problemene med simuleringsmodellene er at kjernefysikerne ikke vet hvordan atomkjerne oppfører seg i slike ekstreme hendelser som i nøytronstjerne-kollisjoner.

– Det har vært opphetete debatter. Det er ikke mange årene siden de fremste ekspertene mente at uran og thorium ble dannet i supernovaer og ikke i nøytronstjerne-kollisjoner.

Det finnes fortsatt forskere som lanserer forslag om «sære» supernovaer som gjennom sterke magnetfelt og asymmetriske eksplosjoner kanskje kan lage tunge grunnstoffer. Men det er bare ett problem.

– Ingen har noen gang observert disse hypotetiske supernovaene.

Kjernefysiske forsøk i kjelleren. Ettersom det er umulig å eksperimentere med vaskeekte nøytronstjerne-kollisjoner i et laboratorium, er kjernefysikerne nødt til å undersøke de kjernefysiske reaksjonene i mer ordnede forhold.

Kjernefysikerne ved UiO gjennomfører mange av eksperimentene sine i syklotronen i kjelleren på Fysisk institutt. Dette er et sinnrikt kjernefysisk laboratorium som akselererer partikler opp i en enorm hastighet før de skytes på andre partikler. Så kan forskerne studere hva som skjer når partiklene kolliderer.

Der varmer de opp atomkjernen til den samme temperaturen som i stjerne-kollisjoner for å se de kvantemekaniske egenskapene. I kvantemekanikken studerer forskerne oppbygningen og dynamikken til de grunnleggende partiklene i atomkjernen.

Kjernefysikerne bombarderer atomkjernene med *protoner*. Protoner er de ladete partiklene i atomkjernen. Protonene kan kolliderer med atomkjernen på ulike måter.

Denne jobben er enormt stor. Selv om det «bare» finnes 118 ulike grunnstoffer, hvorav 92 er naturlige på Jorda, finnes det et enormt antall ulike variasjoner av alle disse grunnstoffene. Disse variasjonene kalles for *isotoper*.

Kjernefysikerne har klart å måle egenskapene til omtrent 300 av dem. Men det finnes røft regnet 6000 ulike isotoper i nøytronstjerne-kollisjoner. Hver av disse isotopene har sine helt spesielle kvante-egenskaper.

Nitid arbeid. For å kunne simulere alt som foregår, er det nødvendig å mate simuleringsmodellen med presise beregninger av egenskapene til hver enkelt isotop.

– Vi bruker årevis på å analysere én atomkjerne. Så selv om vi gjennomfører eksperimentene våre døgnet rundt, er det umulig å komme i mål.

– *Hvilken praktisk betydning har forskningen deres, foruten at dere kan stille den allmenne nysgjerrigheten om hvor alle grunnstoffene kommer fra?*

– Metodene som vi utvikler for astrofysikk, kan også brukes i reaktor-fysikk. Fysikken er den samme. Bedre kunnskap om kjernefysiske reaksjoner er nyttig for å designe fremtidens atomreaktorer. Fortsatt skjønner vi ikke nok av de kjernefysiske reaksjonene i thorium-drevne reaktorer. Til min store overraskelse bygger ikke dagens simuleringer av slike reaktorer på ordentlige datasett av kjernefysiske reaksjoner. Forklaringen er at det er veldig vanskelig å måle en del av de reaksjonene som er viktige for thorium-drevne reaktorer. Her kan vi komme med viktige bidrag. De egenskapene vi måler i syklotronen, er dessuten viktige for å kunne produsere isotoper til medisinsk behandling. ●

For 85 år siden oppdaget fysikerne at atomkjerner kan spaltes i to. Likevel står de uløste problemene fortsatt i kø.

Store *uløste* problemer i kjernefysikken

Tekst og foto: Yngve Vogt

Når tunge atomkjerner *fisjonerer*, som betyr at de deler seg i to, frigjøres betydelige mengder energi.

– Selv om fisjon ble oppdaget allerede for 85 år siden, vet vi fortsatt ikke nok om fisjon. Fisjon er svært komplisert. Hva skjer når atomkjernen strekkes? undrer forsker i kjernefysikk, *Dorthea Gjestvang* på Fysisk institutt ved UiO.

Hun har de siste årene undersøkt flere av hemmelighetene til fisjon.

– Ett av de store uløste problemene innen kjernefysikken er at vi fortsatt ikke har presise og korrekte, teoretiske beskrivelser av hva som skjer når atomkjerner deler seg i to.

Motsatte krefter. Atomkjerner består av *protoner* (positivt ladete partikler) og *nøytroner* (ikke ladete partikler). Selv om alle protonene i atomkjernen har den samme ladningen, klarer atomkjernen overraskende nok å holde seg samlet. Det virker selvmotsigende fordi man skulle tro at protonene ville ha blitt skjøvet fra hverandre. I atomkjernen konkurrerer to krefter: En kraft, som kalles for *Coulomb-kraften*, skyver protonene fra hverandre, mens en annen kraft, *den sterke kjerne-kraften*, prøver å holde dem samlet.

– Når Coulomb-kraften vinner, splittes kjernen i to. Da får vi fisjon. Akkurat hva som skjer, er ikke beskrevet teoretisk. For å forstå dette er vi nødt til å lage bedre teoretiske modeller av fisjon, poengterer Dorthea Gjestvang.

Hun jobber i grenseområdet mellom eksperimentelle, kjernefysiske forsøk og teoretiske simuleringer av kjernefysiske reaksjoner.

Kjernefysikeren bruker simuleringsmodeller på datamaskinen for å kunne forklare hva som skjer.

Da må modellene samsvare med det som skjer i virkeligheten.

Skyter på plutonium. Gjestvang har undersøkt hvordan en variant av grunnstoffet plutonium splittes. Hun gjennomfører forsøkene sine i syklotronen i kjelleren på Fysisk institutt. Syklotronen er et laboratorium der kjernefysikerne kan akselerere partikler opp i en enorm hastighet før de skytes mot atomkjerner.

Når Gjestvang beskytter plutonium med protoner, splittes plutoniumet opp i to mindre atomkjerner. Disse fragmentene kvitter seg med energien sin ved å sende ut nøytroner og gamma-stråler. På syklotronen er det mulig å måle gamma-strålene.

– Vi måler gamma-strålene for å finne ut av om simuleringsmodellen greier å forutsi hva som skjer.

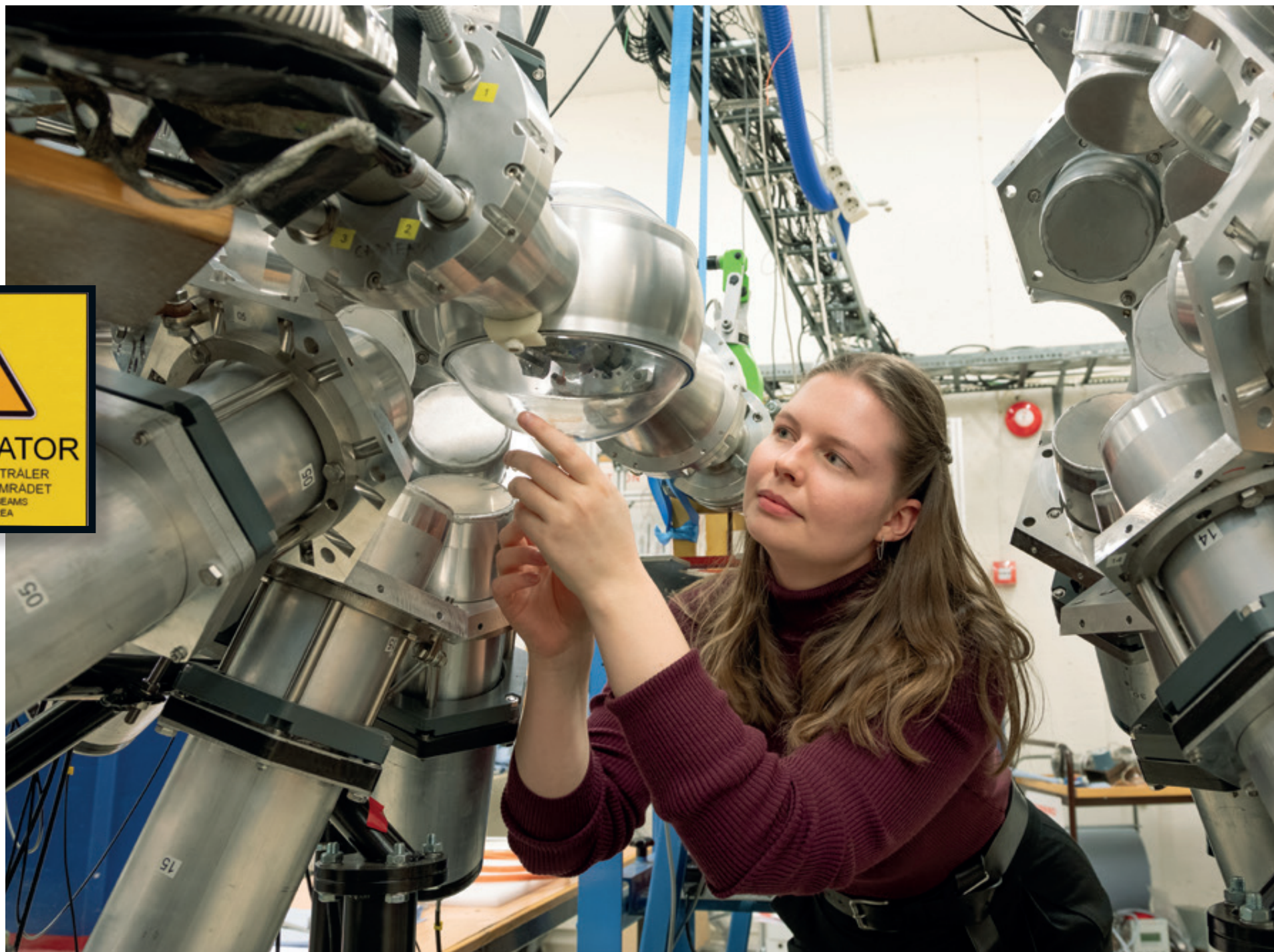
Spørsmålet hennes er:

– Hvis simuleringsmodellen ikke klarer å forutsi fisjonen for plutonium-kjerner, har vi ikke skjont hva som skjer. Da kan ikke modellen vår brukes i mer kompliserte tilfeller, slik som å forutsi hva som skjer når supertunge kjerner fisjonerer.

Modellen hennes klarer seg sånn passe bra. Så langt er alt vel.

– Når vi derimot trenger dypere inn i problemet for å forstå mer av fysikken, er det noe i modellene som ikke stemmer med eksperimentene våre.

Spinnvilt. Et av de uløste problemene i fisjon er det kjernefysikerne kaller for *spinn* og *angulærmomentet* til fisjonsfragmentene. Hold deg fast! Dette er såkalte kvantemekaniske egenskaper i atomære partikler. For kjernefysikerne er spinn og angulærmoment viktige brikker for å kunne forstå hva som skjer når en atomkjerne deler seg i to.



FAKTA:

Fisjon

• Når en atomkjerne deler seg i to, fisjonerer den.

• Når tunge atomkjerner fisjonerer, frigjøres det svært mye energi.

• I de aller fleste kjernekraftverkene i dag skapes det energi ved å fisjonere uran-atomer.

• Kjernefysikerne har fortsatt ikke presise nok beskrivelser av hva som skjer når en atomkjerne fisjonerer.

• Kjernefysikerne bruker eksperimenter og teoretiske modeller for å avsløre mer om fisjon.

MODERNE DETEKTOR: Takket være denne detektoren til 26 millioner kroner, klarer Dorthea Gjestvang å se langt flere detaljer i atomkjernen enn hva som tidligere har vært mulig.

– *Hva i alle dager er spinn og angulærmomentet?*

– Hvis du skal skrive dette populærvitenskapelig, går det fint an å si at kjernen snurrer eller spinner. Selv om det ikke er snakk om klassisk rotasjon, er det likevel en fin analogi.

Gjestvang har allerede vært med på å oppdage en overraskende egenskap i spinn som ikke har latt seg forklare.

– Vi har sett på en kjerne som ikke spinner før den deles. Når kjernen deles, spinner fragmentene uavhengig av hverandre. Det var uventet. Vi trodde det var en sammenheng mellom spinningen til de to fragmentene. Modellene beskriver ikke at frag-

mentene spinner uavhengig av hverandre. Da må modellene forbedres.

Svært puslespill. Det store spørsmålet som leseren kanskje har stilt seg, er hva denne oppdagelsen i spinnets forunderlige verden har å si i praksis.

– Fisjonsmodeller brukes for å simulere varmeutviklingen i reaktorer og for å forstå hva som skjer i nøytronstjerne-kollisjoner. Dette er et svært puslespill. Jeg jobber bare med én brikke. Alle sitter med hver sin lille brikke. Så prøver vi å få brikkene til å passe sammen.

– *Når vet kjernefysikerne alt om fisjon?*

– Vi prøver å løse de kjente problemene som vi fortsatt ikke har svar på. Men hva med alle de problemene som vi fortsatt ikke vet noe om? De er fortsatt ukjente. Det er derfor umulig å svare på spørsmålet ditt. ●

” Alle sitter med hver sin lille brikke. Så prøver vi å få brikkene til å passe sammen.

Femti millioner ganger *mer* energi

Tekst og foto: Yngve Vogt

Ett gram uran kan skape like mye energi som fire tonn kull.

KJEDEREAKSJON: For å sette i gang den kjernefysiske reaksjonen skytes nøytroner inn i brenselet. Så vil den kjernefysiske reaksjonen sørge for at det stadig skytes med nye nøytroner. – Denne kjedereaksjonen er viktig for å kunne lage energi, forteller Sunniva Rose.

Kjernekraft er den mest energitette energiformen vi har. Spalting av uran-atomer avgir femti millioner ganger mer energi enn ved en kjemisk reaksjon, slik som å forbrenne kull. Det er relevant å vite når vi diskuterer kjernekraft i forhold til andre energikilder. Dette handler om energitetthet og derfor også om arealbruk og mengden med avfall per kilowattime, poengterer kjernefysiker *Sunniva Rose*.

Rose er førsteamanuensis 2 på Fysisk institutt ved UiO og kommunikasjonssjef i Norsk Kjernekraft. I vinter underviste hun om kjernekraft og atomavfall i UiO-kurset «Introduksjon til nuklearteknologi».

Historien til denne nye energiformen startet i 1938, rett før andre verdenskrig, da de to fysikerne *Otto Hahn* og *Lise Meitner* oppdaget en helt spesiell egenskap ved atomkjernen.

Da Otto Hahn undersøkte hva som skjedde når han beskjøt uran med nøytroner (ikke-ladete partikler), oppdaget han at uranet delte seg i to mindre atomer. Denne spesielle kjernefysiske reaksjonen kalles for *fisjon*. Samtidig ble det frigjort enorme mengder med energi. Lise Meitner beskrev matematisk hva som skjedde.

Oppdagelsen førte til *Manhattan-prosjektet*.

Under ledelse av fysikeren *J. Robert Oppenheimer* klarte amerikanerne å konstruere atombomben.

440 reaktorer i verden i dag. Fysikerne skjønte også at fisjon kunne brukes til å produsere strøm. Verdens første kjernekraftverk som ble koblet til strømmettet og leverte strøm til sivile formål, var i Obninsk, 100 kilometer sørvest for Moskva. Det ble åpnet i 1954.

I dag finnes det 440 reaktorer i 32 land.

– De produserer ti prosent av all elektrisiteten i verden.

Kjernekraftverkene i USA står for 20 prosent av landets totale strømproduksjon. Andelen i Sør-Korea er på 40 prosent, mens andelen i Frankrike er så høy som 70 prosent.

Sunniva Rose påpeker at energi er langt mer enn bare strøm. Fossilt brensel, slik som bensin og diesel, er også viktig.

I praksis betyr dette at dagens kjernekraft står for fire til fem prosent av den samlede energi-produksjonen i verden.

Anriket uran. De fleste kjernekraftverkene i verden bruker uran som brensel.

I naturlig uran er det 99,3 prosent uran238 og

De fleste kjernekraftverkene i verden bruker uran som brensel.

0,7 prosent uran235. Forskjellene på uran235 og uran238 er antallet nøytroner. Uran235 har tre færre nøytroner enn uran238.

Uran235 er en viktig bestanddel i uran-brenselet. Det er uran235 som fisjonerer og frigjør energi.

For å øke andelen uran235 må uranet anrikes. Anriket uran i kjernereaktorer består vanligvis av mellom tre og fem prosent uran235.

Nøytronene må ha lav energi. For å sette i gang den kjernefysiske reaksjonen skytes nøytroner inn i brenselet. Nøytroner har ingen ladning. Da kan nøytronene «snike seg usett» inn i kjernen. Så vil den kjernefysiske reaksjonen sørge for at det stadig skytes med nye nøytroner.

– Denne kjedereaksjonen er viktig for å kunne lage energi.

Man skulle kanskje tro at effekten blir størst mulig hvis nøytronene har mye energi. Slik er det ikke i den kjernefysiske verden. Sannsynligheten for fisjon øker derimot betraktelig hvis nøytronene har lav energi.

– Dette er det stikk motsatte av hva som er vanlig i den verden vi lever i. Hvis du skal kløyve ved, hjelper det å bruke masse energi.

Utrolig nok er sannsynligheten 10 000 ganger større for fisjon hvis nøytronene har lav energi. Det gjelder derfor å bremse nøytronene så mye som mulig. Nøytronene bremses opp ved å treffe andre atomkjerner.

– Du kan sammenligne dette med biljardkuler. De bremses opp når de treffer andre biljardkuler.

I mange kjernekraftverk brukes atomkjernene i hydrogenatomene i vannmolekylene til å bremse opp nøytronene.

Enorm varme. Når atomkjerner fisjonerer, som altså betyr at de deler seg, frigjøres mye energi. Energien brukes til å skyve kjernene fra hverandre. Da skapes det mye varme. Og det er nettopp denne varmen som brukes til å lage strøm. Her er prinsippet det samme som i kullkraftverk. Varmen omdanner vannet til damp. Dampen driver turbinen, og turbinen skaper strøm.

En annen viktig ingrediens i kjernekraftverk er kontrollstavene. De må tåle de ekstreme forholdene i reaktoren og er vanligvis laget av bor, kadmium, sølv, hafnium eller indium.

– Kontrollstavene kan senkes ned for å bremse den kjernefysiske reaksjonen. Når kontrollstavene senkes helt ned, suger de vekk nøytronene og stopper kjedereaksjonene momentant.

Kontrollstavene brukes derfor til å styre hvor mye strøm kraftverket skal produsere.

Fire generasjoner. I dag snakker kjernefysikerne



FOTO: TAPANI KARJANLAHTI/TIVO/AFP PHOTO

FINSK KJERNEKRAFTVERK: Finland har bygd en moderne tredjegenerasjonsreaktor. Den ligger på øya Olkiluoto hundre kilometer nordvest for Turku og er den største av sitt slag i Europa.

om fire generasjoner reaktorer.

De fleste av dagens reaktorer er annengenerasjonsreaktorer. Brorparten er fra 70- og 80-tallet. Den vanligste typen er lettvannsreaktorer.

– De er den store arbeidshesten.

India og Canada har tungtvannsreaktorer. Der brukes tungtvann i stedet for vanlig vann. Da kan brenselet bestå av naturlig uran.

Finland bygger nå tredjegenerasjonsreaktorer.

– Her jobbes det enda mer med sikkerheten.

Det er også laget en rekke prototyper av fjerdegenerasjonsreaktorer.

– Disse reaktorene kan bruke ressursene bedre.

De er dessuten enda sikrere.

Her vil det være mulig å bruke thorium som brensel. Norge har med sine 180 000 tonn verdens fjerde største registrerte forekomst av thorium. Et av de uløste problemene er bruken av flytende bly i reaktoren. En annen mulighet er å spe på med mer thorium i vanlig uranbrensel.

– Thorium er spennende, men du kan betrakte thorium som våt ved og uran som tørr ved. Alle vil ha den tørre veden. Vi trenger fortsatt mer forskning på thorium. Hvis jeg tar på meg hatten som kjernekraftforkjemper: Den største barrieren er å gå fra null til ett kjernekraftanlegg i Norge. Hvis vi skal lykkes, vil den raskeste veien være en lettvannsreaktor med kjent brenselsteknologi, altså uran. Hvis jeg skal ta på meg forskerhatten, håper jeg at det vil bli forsket mer på thorium-teknologi etter at vi har fått de første kjernekraftanleggene i Norge, poengterer Sunniva Rose.

– Hvor stort er et optimalt kjernekraftverk?

– Det er avhengig av hva det skal brukes til. Hvis det er snakk om å bygge et best mulig kjernekraftverk for et privat selskap, slik som kraftkrevende industri, vil en mindre enhet være rimeligere og raskere å bygge enn et stort kraftverk for en hel by. Mindre enheter kan bygges der behovet er. Et typisk lite kraftverk produserer 2,5 TWh per år. Det tilsvarende strøm til 160 000 norske husholdninger. ●

Trenger underjordisk deponi:

Skal sikre det norske atomavfallet i 100 000 år

Uansett om vi skal satse på kjernekraft eller ei, må det bygges et deponi for radioaktivt avfall i Norge.

Tekst og foto: Yngve Vogt

Ingen energiformer gir så lite avfall som kjernekraft. Kravene til hvordan avfallet skal håndteres er dessuten svært strenge, poengterer *Sunniva Rose*. Hun er førsteamanuensis 2 på Fysisk institutt ved UiO og kommunikasjonsdirektør i Norsk Kjernekraft.

Vanligvis utnyttes bare en halv prosent av brenselet i en vanlig atomreaktor, før brenselet ikke lenger fungerer like godt. Brenselet blir da byttet ut. Det skjer som oftest etter tre års bruk. Noen land, som Storbritannia og Frankrike, bruker sinnrike kjemiske metoder for å gjenbruke brenselet.

I dag gjenbrukes avfallet bare en gang. *Gulla Torvund*, stipendiat i kjernefysikk, undersøker nå hvordan de franske kjernekraftverkene kan gjenvinne avfallet mange ganger. Dette kalles *multi-resirkulering*.

– Da kan vi utnytte ressursene bedre samtidig som vi reduserer mengden med plutonium i restavfallet, slår Gulla Torvund fast.

Andre land, slik som Sverige og USA, definerer brenselrestene som avfall.

– Dette handler om prisen på uran. Hvis uran er dyrt, kan det lønne seg å resirkulere avfallet. Hvis ikke, er det billigere å anskaffe nytt brensel. Det handler også om hva politikerne bestemmer seg for, forklarer Sunniva Rose.

Lik stråledosen fra to bananer. Alt radioaktivt avfall må lagres. Finland har bygget et gruve-deponi 500 meter under bakken. Der skal avfallet legges inn i kobberkapsler. Som igjen blir fôret med støpejern.

– Avfallet skal dessuten forsegles med en bestemt type leire som beskytter mot vann. Leiren

skal dessuten tåle bevegelser i fjellet, forteller Sunniva Rose.

Tanken er at deponiet skal fungere i minst 100 000 år. Reglene er strenge. Skulle tønnene likevel lekke ut radioaktive partikler, skal den årlige ekstra stråledosen på bakken være langt mindre enn den naturlige bakgrunnsstrålingen som vi mennesker hele tiden blir utsatt for.

– Hvis mennesker i fremtiden dyrker mat oppå deponiet, vil den ekstra strålingen som de blir utsatt for, ikke tilsvare mer enn den stråledosen du får ved å spise to bananer.

Mellomlager over bakken. Det er ikke lurt å grave ned alt avfallet med en gang. De første ti årene avgir avfallet mye varme. Forklaringen er den sterke radioaktiviteten. Radioaktivitet skaper mye varme. De første ti årene blir avfallet derfor lagt i spesialcontainere i et mellomlager frem til avfallet har kvittet seg med brorparten av over-skuddsvarmen.

– Det er fornuftig. Hvis avfallet skulle ha blitt lagt inn i deponiet med en gang, ville man, grunnet varmen, ha trengt mer plass.

De fleste stoffene i atomavfall har kort halveringstid. Noen har lang. Et eksempel på middels lang tid er plutonium med en halveringstid på 24 000 år. Til sammenligning er halveringstiden til uran nesten 4,5 milliarder år.

– Plutonium er problematisk fordi halveringstiden er kort nok til at det er veldig radioaktivt, samtidig som halveringstiden er lang nok til at det ikke blir mindre radioaktivitet i løpet av levetiden vår. Så plutonium er ikke akkurat helsekost, sier Sunniva Rose og forteller om en forsker på Manhattan-



GJENBRUK: Gulla Torvund undersøker nå hvordan franske kjernekraftverk kan gjenbruke avfallet mange ganger. Da kan ressursene utnyttes bedre samtidig som det blir mindre plutonium i restavfallet.



prosjektet under andre verdenskrig som på slutten av dagen skulle legge en liten bit plutonium inn i skapet. – Han snublet, fikk plutoniumet i munnen og svelget det. Han hadde da mesteparten av datidens plutoniumbeholdning i magen sin, men døde likevel av noe helt annet, forteller Sunniva Rose, og legger til at magen hans ble tømt etter uhellet og at han levde et normalt, langt og friskt liv.

Deponi i Norge. Uansett om Norge ønsker å satse på kjernekraft eller ei, er Norge nødt til å opprette et deponi for radioaktivt avfall.

Forklaringen er svært enkel: Atomreaktorene på Kjeller og i Halden ble nedlagt for fem år siden. Nå må alt avfallet lagres for ettertiden.

– Hele verden kom til Halden for å teste feil i atombrensel. Det var ikke mange andre steder i verden der dette var mulig, forteller *Tomas Kvalheim Eriksen*. Han er forsker på Institutt for energiteknikk (IFE) og førsteamanuensis 2 på Fysisk institutt ved UiO og jobber med håndteringen og lagringen av det radioaktive avfallet på Kjeller og i Halden.

Reaktorene var langt over levetiden sin. Levetiden var satt til 50 år. Reaktorene ble brukt i 60 år. Og for den skeptiske leseren: Sikkerheten var fortsatt topp.

– Alderen tok reaktorene. Det ble dyrere å vedlikeholde dem enn å bygge nye.

Kjeller var en ren forskningsreaktor. Her er brenselet tatt ut av reaktoren. Brenselet er fortsatt inne i Halden-reaktoren.

– Selv om de kjernefysiske reaksjonene er stanset, er avfallet fortsatt radioaktivt. Det vil det være i

NEDLAGT: Atomreaktoren på Kjeller rett utenfor Oslo ble nedlagt for fem år siden. Da den stod ferdig i 1951, fantes det bare atomreaktorer i USA, England, Frankrike, Sovjet og Canada.



SIKKER LAGRING: Tomas Kvalheim Eriksen undersøker hvordan det radioaktive avfallet fra de nedlagte atomreaktorene på Kjeller og i Halden kan lagres sikkert de neste 100 000 år.

mer enn 100 000 år, påpeker Tomas Kvalheim Eriksen.

Grunnet ulik reaktordesign og bruk, er sammensetningen av avfallet fra de to reaktorene noe forskjellig. Da må avfallet håndteres på ulike måter. De to masterstudentene hans, *Tony Valentin Skovli Hansen* og *Sondre Nese Waldron*, simulerer hvilke stoffer som finnes i brenselavfallet fra de to reaktorene på Kjeller. Den første var i drift frem til midten av 60-tallet. Den andre ble nedlagt for fem år siden.

– Beregningene er omfattende og kompliserte. Vi må kjenne til sammensetningen av de radioaktive stoffene for å kunne si noe om hva slags stråling de avgir og for å kunne oppbevare avfallet på best mulig måte.

Til sammen er det snakk om 20 tonn radioaktivt avfall som må lagres sikkert for ettertiden. – Det er svært lite i forhold til hva andre land har.

Egenvekten på avfallet er stort. 20 tonn radioaktivt avfall fyller bare et par kubikkmeter. Men avfallet må ikke lagres tett samlet. Da kan det oppstå kjernefysiske reaksjoner. Leseren kan likevel la seg berolige. Avfallet vil uansett aldri kunne eksplodere.

Norsk nukleær dekommisjonering (NND) har det formelle ansvaret for oppryddingen. Arbeidet kan ta minst tjue år. Hvor deponiet skal legges, er fortsatt ikke bestemt.

– Det er en god idé å bygge flere underjordiske brønner i deponiet i tilfelle Norge skal satse på kjernekraft. Vi må uansett gå gjennom en stor byråkratisk prosess. Da kan vi i samme slengen bygge for fremtiden, mener Tomas Kvalheim Eriksen. ●

Verdens mest moderne stråleterapi

Nå kommer verdens mest moderne strålebehandling til Norge. De første kreftpasientene blir behandlet i mars 2025.

Tekst og foto: Yngve Vogt

Lær deg ordet med en gang: *Protonterapi!* De færreste vet i dag hva protonterapi betyr. Om noen få år vil ordet være allemannseie.

Protonterapi er kort fortalt en svært moderne form for *strålebehandling*. Mens dagens strålebehandling handler om å ødelegge kreftceller med røntgenstråler, skal protonterapien bombardere kreftcellene med raske *protoner*. Og hvis du lurer på hva protoner er: Protoner er de ladete partiklene inne i atomkjerner.

Den klassiske strålebehandlingen, som benytter høyenergi-røntgenstråling, kan til en viss grad skade det friske vevet både foran og bak svulsten. Det er derfor en delikat balanse mellom hvor mye stråling som må til for å drepe kreftcellene samtidig som de friske cellene ikke må bli alvorlig skadd. Det gjelder spesielt hvis svulstene ligger nær kritiske organer.

Konsentrert rundt svulsten. Protonbehandling- en har den spesielle egenskapen at den avsetter mesteparten av energien i det området der strålingen stopper opp. Denne energitoppen kalles for *Braggtoppen*, et fint ord som du kan skilte med neste gang du er hos legen.

– Vi sender protonstrålen inn i pasienten med akkurat så mye energi at strålen stopper opp i svulsten. Strålen avsetter litt dose hele veien, men mesteparten i Braggtoppen. Det er der dosen blir høy. Ved å variere energien i protonstrålen er det mulig å sørge for høy og jevn dose i hele svulsten, forteller seksjonsleder og professor *Eirik Malinen* på Oslo universitetssykehus (OUS) og Fysisk institutt ved UiO.

Det betyr at protonterapien gjør mindre skade på veien gjennom det friske vevet før den går løs på kreftsvulsten. Og det aller viktigste av alt: Protonterapi skader ikke det friske vevet bak svulsten. Malinen forventer derfor færre langtids-skader sammenlignet med vanlig strålebehandling.

Oslo og Bergen. Etter årelang dragkamp får Norge sitt første protonterapisenter i mars 2025. Senteret, som blir en del av Radiumhospitalet i Oslo, får to behandlingsrom. Kapasiteten blir på rundt 600 pasienter hvert år. Haukeland sjukehus i Bergen får også et protonterapisenter i 2025. Her blir kapasiteten halvparten så stor.

Mens røntgenstrålene i vanlig strålebehandling er *fotoner* (akkurat som at lys består av fotoner), har protoner masse. Det er teknisk langt mer krevende å skyte med protoner enn med fotoner. En syklotron sørger for at protonene slynges rundt og rundt før de i en svimlende hastighet på opptil 170 000 kilometer i sekundet sendes mot kreftsvulsten.

– Protonterapien må være svært presis. Her snakker vi om millimeterpresisjon.

Malinen ser for seg at strålen leverer en dose med Braggtoppen punkt for punkt inne i svulsten. Hver punktbestråling tar noen mikrosekunder. Be-strålingen av hele svulsten tar sannsynligvis ikke mer enn ti sekunder.

– Det som tar lengst tid med protonbehandlingen, er å plassere pasienten riktig på behandlingsbordet, slik at protonene treffer der vi ønsker. Vi har sikkerhetsmarginer som tar høyde for usikkerheter i posisjoneringen, men vi jobber for at de skal bli så små som mulig.

Færre bivirkninger. Malinen forventer at protonterapi vil gi færre bivirkninger enn klassisk, røntgenbasert strålebehandling.

– Uheldigvis er barn og unge mest følsomme for strålebehandling. Strålebehandling kan føre til langtidskader og skade viktige funksjoner i kroppen. Barn skal leve lenge. Da er det viktig med færrest mulig bivirkninger. Det er det viktigste poenget med protonterapi. For voksne pasienter vil protonterapi først og fremst tilbys der svulstene er vanskelig tilgjengelig og der risikoen for senskader ved vanlig strålebehandling er høy.

FAKTA:

Allsidige fysikere

• Protonterapisenteret trenger fysikere som kan alt fra eksperimentell fysikk og akseleratorfysikk til elektronikk og biofysikk.

• Fysikerne må også kunne informatikk, beregningsalgoritmer og medisinsk avbildning, samt litt medisin, biologi, fysiologi og anatomi.

Protonsentre

• Skandinavia har allerede protonterapisentre i Århus i Danmark og Uppsala i Sverige. USA, Tyskland og Japan har flest protonterapisentre.

• Norge får nå to protonterapisentre. Den ene på Radiumhospitalet i Oslo, den andre på Haukeland i Bergen. De første pasientene kan behandles med protonterapi i mars 2025.

• Et av behandlingsrommene på protonterapisenteret på Radiumhospitalet er forbeholdt forskning på protonterapi. Bergen vil også få muligheter for dette.

BAK KULISSENE: Det første protonterapisenteret i landet åpner på Radiumhospitalet i Oslo i mars. Dette bildet viser hvordan det ser ut bak kulissene på protonterapisenteret til Massachusetts General Hospital i Boston i USA.



PHOTO LAURIE D'IFFENBACH / NTB SCANPIX

Eksempler på sykdommer der protonterapi er standardbehandling, er for noen typer sarkomer (bløtvevskreft og beinkreft) og spesielt resistente svulster.

Nytt forskningssenter. Selv om protonterapi i andre land har vært en kjent behandlingsform i lang tid, er det gjort forbausende lite forskning på hvor bra behandlingen er. Det ønsker Malinen å gjøre noe med.

Protonterapisenteret på Radiumhospitalet får et eget behandlingsrom som er forbeholdt forskning på protonterapi. Senteret skal kunne brukes av forskere fra hele verden.

– Vi har veldig gode simuleringsmodeller for å beregne hvordan røntgenstråler og protonstråler avsetter energi i vevet.

Disse modellene gjør det mulig å beregne stråledoser. Forskerne har også statistiske modeller som de bruker til å forutsi den kliniske effekten av en gitt behandling.

– Modellene peker i retning av at protonbehandling er bedre enn klassisk strålebehandling. Men det er ikke tilstrekkelig at modellene viser dette. Vi må også vise det i pasientstudier. Det er ikke gjort nok randomiserte studier, så vi er fortsatt usikre på hvor god behandlingen egentlig er, poengter Eirik Malinen.

I randomiserte studier kastes det kron og mynt om hvilken behandling pasientene skal få, slik at medisinerne kan få et vitenskapelig bevis på hvilken behandling som fungerer best.

Hvis det er usikkerhet om protonterapi er bedre enn vanlig strålebehandling, må det gjennomføres en studie.

– Vi har hypoteser om at protoner er bedre enn røntgenstråling for mange kreftdiagnoser, men vi ønsker å gjennomføre kontrollerte studier for å teste hypotesene.

I USA er protonbehandlingen ofte betalt av forsikringsselskaper.

– Da blir ikke bevisene sterke nok om behandlingen fungerer bra nok eller ei.

I Europa pågår det nå en rekke studier. Mange av dem er randomiserte.

– Et eksempel på en studie med gode resultater er å bruke protonterapi til å behandle pasienter med lungekreft.

300 000 kroner per pasient. De to norske protonterapisentrene har kostet tre milliarder kroner.

– Protonterapi er en stor investering, men kost-er likevel mindre enn annen moderne kreftbehandling. Selv om studier viser at protonterapi koster tre ganger mer enn vanlig røntgenbehandling, er prisen bare en tredjedel av immunterapi.

Blant de behandlingene forskerne ønsker å studere nærmere, er behandling av kreft i hode- og hals-regionen.

– Protonterapi vil likevel ikke gis til alle med kreft i hode og hals. Hvis svulstene er små og lett tilgjengelige, har vanlig strålebehandling kjempefin effekt.

Internasjonale og egne studier. Norge skal også bli med i internasjonale studier. Forklaringen er enkel. Kreftstudier krever mange pasienter for at resultatene skal være statistisk signifikante.

– Vi trenger ofte hundrevis av pasienter innenfor én enkelt krefttype for å kunne undersøke om protonbehandling er bedre enn vanlig strålebehandling.

Forskerne ønsker også å være med på en internasjonal studie for å studere hvilken stråleterapi som fungerer best mot kreft i spiserøret.

– For en del pasienter vil protonbehandling bare være marginalt bedre. Ressursene er begrenset. Det gjelder derfor å finne de pasientene som har mest nytte av protonterapisenteret.

I en annen studie er målet å finne den beste behandlingen for dem som får tilbakefall og må strålebehandles for annen gang. Da er det ikke mulig å stråle like hardt som første gang.

– Hypotesen vår er at protonbehandlingen vil fungere mer skånsomt, men likevel like effektivt.

Stoppe inne i svulsten. Mens alle disse studiene handler om å redusere bivirkningene, ønsker forskerne også å undersøke om det er mulig å øke effekten av protonterapi.

De vil undersøke om behandlingen blir bedre om man skyter inn et ekstra sett med protoner som stopper opp midt inne i svulsten.

– Vi ønsker å bombardere den sentrale svulsten litt hardere. Da kan protonene gjøre større skader i et område der det garantert ikke er noe friskt vev.

Malinen vil med andre ord bruke protonene mer aggressivt for å øke sannsynligheten for å ta knekken på sykdommen.

– Denne måten å behandle på gjøres det lite av i andre deler av verden.

Kombineres med immunterapi. Førsteamanuensis *Nina Jeppesen Edin* på Fysisk institutt har også i en årrekke forsket på strålebehandling. Nå undersøker hun om det holder å bestråle bare deler av svulsten med protoner og kombinere behandlingen med immunterapi.

– Så langt er resultatene lovende, sier hun og legger til:

– Protonterapi er et spennende felt, men det er vanskelig å finne den optimale dosen.



” Vi sender protonstrålen inn i pasienten med akkurat så mye energi at strålen stopper opp i svulsten.

” Barn skal leve lenge. Da er det viktig med færrest mulig bivirkninger.

Edin sier at de allerede har gjennomført en rekke dyreforsøk i protonterapisenteret i Århus i Danmark.

Hun har i dag tre doktorgradsstudenter som forsker på protonterapi. De skal alle disputere i løpet av året.

– Hele poenget med protonterapi er mindre stråleskader i normalvevet fordi det er mulig å stråle mer presist, men vi har satt en grense på hvor mye normalvevet tåler. I dag er det få gode eksperimentelle studier på bivirkninger etter protonterapi, påpeker Edin.

Ett av forsøkene hennes har vært å sammenligne stråleskader hos forsøksmus som er bestrålt i hode og hals med henholdsvis protoner og røntgenstråling.

– Overraskende nok tålte ikke musene protonbehandlingen like godt.

Det kan bety at de verdiene de bruker for å estimere bivirkningene, ikke er gode nok.

– Vi må kanskje tenke litt annerledes om hvordan vi skal bestråle på best mulig måte.

Edin tar derfor forbehold, fordi resultatene ennå ikke er etterprøvd.

Leseren må ikke la seg forarge over at protonstråledosen ennå ikke er optimalisert. Det tok svært mange år før medisinerne klarte å finne den optimale røntgenbehandlingen.

– Vi trenger mer tid på å optimere protonterapien for å finne den beste balansegangen mellom det å drepe kreftceller samtidig som de friske cellene skal belastes minst mulig, sier Edin.

Sammen med medisinerne og psykologer er de to forskerne også i gang med å se på senskadene etter strålebehandling i hode og hals. ●

ÅPNER I MARS: – Vi ønsker å bombardere den sentrale svulsten litt hardere. Da kan protonene gjøre større skader på kreftcellene i et område der det garantert ikke er noe friskt vev, forteller Eirik Malinen foran den nye bygningen på Radiumhospitalet som skal huse det nye protonterapisenteret.

Hun forsker på nye stoffer som angriper kreftcellene *innenfra*

Radioaktive stoffer kan fraktes til kreftcellene og drepe dem langt mer effektivt enn strålebehandling. Dessuten blir det færre skader på de friske cellene.

Tekst og foto: Yngve Vogt

Nesten 40 000 nordmenn fikk påvist kreft i fjor. De vanligste behandlingsformene er kirurgi, strålebehandling og cellegift.

Strålebehandling og cellegift gis for å ta knekken på kreftceller. Uheldigvis går disse to behandlingene også ut over friske celler.

Nå er forskere i gang med å teste ut en annen type kreftbehandling som angriper kreftcellene uten å skade de friske cellene. Her sprøytes målsøkende, radioaktive stoffer inn i kroppen. Stoffene blir med i blodbanene og skal, hvis alt fungerer etter planen, lete etter kreftcellene og angripe dem uten å skade de friske cellene.

Tanken er ikke ny. Allerede for tretten år siden lanserte UiO-forskere denne metoden for å be-

ULTRAMODERNE: Nina Jeppesen Edin bruker dette helt nye og moderne apparatet til å teste ut hvor mye av den radioaktive medisinen som angriper kreftcellene.

FAKTA:
Radionuklider i kreftbehandling

• Et målsøkende radioaktivt stoff som angriper kreftcellene uten å skade de friske cellene.

• Halveringstiden må være optimal, slik at radionuklidene rekker frem til kreftcellene før de avgir den radioaktive strålingen.

» Stoffene kan trenge inn i kreftcellen eller feste seg utenpå og avgi stråledosen derifra.

handle lymfekreft. Dette ble oppstarten på det biomedisinske selskapet *Nordic Nanovector*. Resultatene var lovende i mange år. Den medisinske uttestingen kom langt. Uheldigvis hadde ikke medisinen den ønskete effekten på en større gruppe pasienter i en fase to-studie. Studien ble derfor avsluttet i 2022. De samme gründerne er nå i gang med å teste ut en tilsvarende medisin mot bein-kreft. Dette skjer gjennom selskapet *Oncoinvent*.

Radionuklider. Fellesnevneren for denne type behandling er at radioaktive stoffer fraktes dit kreftcellene er. De radioaktive stoffene kalles for *radionuklider*. En radionuklid er et ustabilt atom som etter en stund sender ut radioaktiv stråling.

En av universitetets fremste forskere på radionuklider er *Nina Jeppesen Edin*. Hun er førsteamanuensis på Fysisk institutt ved UiO. Da Apollon intervjuet henne for 13 år siden, forsket hun, sammen med professor *Erik Olai Pettersen*, på hvordan kreftcellenes resistens mot strålebehandling og cellegift kunne slås av og på.

Edin er i dag en del av det europeiske medisinske forskningsprogrammet *Prismap*. Her produseres radionuklider i så ren form at de kan brukes i medisinske anvendelser, slik som til indre bestråling av kreftceller.

Utfordringen til Edin er å beregne hvor stor stråledosen blir i de enkelte cellene. Det er ingen enkel sak. Her jobber Edin tett sammen med førsteamanuensis *Asta Juzeniene*, som i en årrekke har forsket på radionuklide-terapi. Juzeniene har klart å koble radioaktive stoffer på målrettede molekyler som finner frem til svulster. Behandlingen hennes brukes i dag på de pasientene med metastatisk prostatakreft som ikke har andre behandlingsmuligheter.

Vanskelig balansegang. En av de mange utfordringene til de to forskerne er at radionuklider er ferskvare. Alle radionuklider har en bestemt halveringstid. Det betyr at halvparten av dem henfaller til noe annet i løpet av halveringstiden. Alle radionuklider har ulik halveringstid. Nøyaktig når hvert enkelt radioaktivt atom henfaller, er helt tilfeldig. Det er umulig å forutsi om det skjer om ett minutt, en time eller en måned. Halveringstiden er bare en statistisk beskrivelse av egenskapen til atomet.

Når et radioaktivt stoff har henfalt til noe annet, kan det nye stoffet også være radioaktivt.

– På den måten får vi en kjede av henfall med ulike halveringstider, forteller Nina Jeppesen Edin.

Det gjelder å finne et stoff med en optimal halveringstid, samtidig som det ikke må skade kroppen.

Hvis halveringstiden er for lang, må man tilføre mer av stoffet for å få høy nok doserate. Da vil stoffet være radioaktivt altfor lenge. Det er ikke bra. Hvis halveringstiden er for kort, rekker ikke stoffet frem til kreftcellene før det avgir den radioaktive strålingen.

Med andre ord gjelder det å finne et stoff der halveringstiden er relativt kort, men likevel lang nok til å kunne brukes. Stoffet er funnet. Det produseres i England og sendes med fly til Norge.

– Det kreves en enorm logistikk for å distribuere de radioaktive stoffene. Gjennom EU-prosjektet som vi er en del av, får vi tilgang til en av nuklidene som kalles for actinium-255. Det er ikke mange syklotroner i Europa som kan produsere dette.

Angriper lokalt. Når det skjer et henfall, sender stoffet ut en radioaktiv strålepartikkel som kalles for *alfa*. Alfa-partikkelen fungerer som en lokal bombe. Gudskjelov har den svært kort rekkevidde. I biologisk vev er det snakk om noen hundredels millimeter. Det betyr at alfa-partikkelen bare klarer å gjøre skade på lokale celler.

De to forskerne undersøker hva som skjer når radionukliden deres kommer frem til cellen.

– Vi ønsker at radionukliden skal sende ut alfa-partikler som treffer selve cellekjernen. Det er der arvematerialet ligger. Og det er nettopp arvematerialet i kreftcellen som må skytes i fillebiter for at kreftcellen ikke lenger skal klare å dele seg, forteller Edin.

Det holder ikke å ta hensyn til halveringstiden til radionukliden. Det er også viktig å ta hensyn til den kjemiske og den biologiske halveringstiden.

– Den biologiske halveringstiden handler om hvor raskt nedbrytingen skjer.

Medisinen må etter hvert brytes ned. Ellers blir den værende i kroppen.

Og hva menes med den kjemiske halveringstiden? Det radioaktive stoffet må festes til de målsøkende molekylerne med et kjemisk stoff. Den kjemiske halveringstiden må være lang nok til at det radioaktive stoffet klarer å henge seg fast på det målsøkende molekylet til det har kommet frem til kreftcellen.

– Hva skjer når stoffet er kommet frem til målet?

– Noen stoffer kommer lettere igjennom celleveggen enn andre. Stoffene kan trenge inn i cellen eller feste seg utenpå og avgi stråledosen derifra.

Det viktigste er at stråledosen når cellekjernen. Cellekjernen ligger inne i cellen. Det er her DNA-et befinner seg. I cellekjerner er det alltid to DNA-tråder.

– Det er viktig at begge trådene ødelegges. Ellers har DNA-trådene muligheten til å reparere seg selv.

Alfa-partiklene er effektive. – De lager skader som er for komplekse til å kunne repareres.

Sjekker effekten. Selv om forskere over hele verden jobber med å lage nye typer radionuklider, er det ikke nok kunnskap om effekten av dem. Det er nettopp dette Edin ønsker å gjøre noe med.

Selv om de lager en medisinsk cocktail med radionuklider og kjenner til radioaktiviteten per milliliter, sier det ikke noe om hvor mye av stoffet som kommer inn til cellene og treffer cellekjernen. Edin er derfor interessert i å vite hvor stor dosen er når medisinen kommer frem og hvilken effekt dette har på kreftcellene. Det er likevel ikke mulig å trekke en direkte parallell fra laboratoriet til hva som skjer inne i menneskekroppen.

– I kroppen konkurrerer alle cellene om næringsmidler og energi. Kreftceller deler seg dessuten forskjellig avhengig av hvor i tumoren de er.

Det er ikke sikkert at radionuklidene kommer helt frem til de kreftcellene som ligger langt fra blodkarene.

– Da virker behandlingen dårligere.

Vanskelighetene. Hvis alfa-partikkelen ikke kommer frem til selve kreftcellen, vil den kunne skade cellene utenfor. Og vel så viktig: Selv om det radioaktive stoffet blir ført frem til kreftcellene, vil det likevel være uunngåelig at noe av det bestråler normalvev. Ikke glem at stoffene trenger noen minutter på å bli fraktet med blodet frem til kreftcellene. Ettersom det er komplett umulig å styre nøyaktig når hver enkelt radionuklide henfaller til noe annet, vil noen av radionuklidene også ta livet av friske celler. Og dessuten: Når medisinen er utskilt igjen fra kroppen, vil det fortsatt være noe radioaktivitet igjen.

Nå kommer enda et problem som forskerne må ta hensyn til. Du husker vel halveringstiden? Dette er altså den tiden det tar før halvparten av stoffet er henfalt til noe annet. De nye stoffene som de henfaller til, vil som oftest også være radioaktive. Noen av disse stoffene vil kunne sende ut radioaktiv stråling med annen rekkevidde.

Tross alle utfordringene: – Radionuklider er målrettet stråleterapi. Det er vanskelig for radionuklidene å trenge inn i solide kreftsvulster, men behandlingen vil være genial for dem som har små svulster eller for dem som har kreft med spredning. En løsning er å operere bort tumoren og behandle spredningen med radionuklider. Det er utrolig at radionuklider allerede er kommet til klinisk bruk for noen pasienter. Disse stoffene kan bli viktige for fremtidens kreftbehandling. ●

Skyter inn i selve atomkjernen: UiO har fått egen nøytronkanon

Tekst og foto: Yngve Vogt

En splitter ny nøytronkanon til halvannen million kroner skal gjøre det mulig for studenter å produsere radioaktive sporstoffer og avsløre om metaller er kjemisk rene eller ei.

For å forstå hva den nye nøytronkanonen på UiO kan brukes til, må vi først bruke en setning på hva *ioniserende stråling* er: Ioniserende stråling inneholder så mye energi at den kan bryte ned kjemiske bindinger.

– Ioniserende stråling er mye brukt både i den medisinske verden og i industrien, forteller *Liv Stavsetra*, seniorforsker på Institutt for energiteknikk (IFE) og førsteamanuensis II på Fysisk institutt ved UiO.

Industrien kan bruke ioniserende stråling til å undersøke strukturen på materialer og hvilke stoffer materialene inneholder uten å måtte ty til kjemiske analyser. Det har sine fordeler. Kjemiske analyser løser opp materialer og ødelegger dem. Takket være teknikken med ioniserende stråling er det mulig å gjennomføre undersøkelsene uten at materialene blir ødelagt.

Et kjent og kjært eksempel på ioniserende stråling er røntgenstråling. Dette er elektromagnetisk stråling. Industrien bruker røntgenstråling for å sjekke tilstanden til materialer. Røntgen er også svært egnet til å sjekke ut om og hvor beinet ditt er brukket. Smart. Da slipper legene å skjære opp beinet ditt for å sjekke hvor bruddet er.

Røntgenundersøkelser har dessverre

en stor svakhet. – Hvis man tar bilde av noe med lav tetthet som ligger inne i et materiale med høy tetthet, er det vanskelig å få et bilde av hvordan materialet ser ut på innsiden.

Foruten røntgen bruker industrien også en helt annen type ioniserende stråling som kan avdekke andre egenskaper i materialer. Dette er ioniserende stråler som består av nøytroner med høy energi. Nøytroner er de uladde partiklene i en atomkjerne.

Omdannes til radioaktivitet. Nå kommer snart det store aha-øyeblikket! Nøytroner kan fanges opp av atomkjerner. Atomkjerner fra det samme grunnstoffet kan ha ulike antall nøytroner. Disse variasjonene av grunnstoffer kalles for *isotoper*. Brorparten av isotopene er radioaktive.

Når en strøm av nøytroner sendes inn i et materiale, kan de stabile grunnstoffene i materialet bli radioaktive. Radioaktive stoffer sender ut stråling.

– Hver av isotopene har sin egen signatur med ulike radioaktive egenskaper. Det betyr at vi kan bruke strålingen fra radioaktive isotoper til å identifisere grunnstoffene og danne oss et bilde av hva materialet består av.

Med denne analysen er det altså mulig

å finne ut av hvor mye det er av de ulike grunnstoffene uten å ødelegge materialet.

Denne teknikken kalles for *nøytronaktiveringsanalyse* og er viktig for industrien når de skal undersøke om det er «fremmede» stoffer i et materiale. Som eksempel kan det være viktig å slå fast at det ikke dukker opp oksygen-forurensning i produksjonen av aluminium, magnesium eller stål.

Radioaktive sporstoffer. Og som om dette ikke er nok, kan nøytronaktivering også brukes til å lage radioaktive sporstoffer. Radioaktive sporstoffer brukes i medisinske undersøkelser, slik som alt fra å måle blodtransporten i kroppen og funksjonen til organer som hjerne, hjerte, lever og nyre til å spore opp kreftsvulster og metastaser. Radioaktive sporstoffer er også viktige for oljeindustrien. Geologene sprøyter sporstoffene inn i de geologiske lagene under havbunnen for å beregne hvor mye olje som er igjen i oljereservoarene.

Nøytronkanonen. IFE og UiO har nettopp installert et splitter nytt nøytronbestrålingslaboratorium i kjelleren på kjernekjemi på Nedre Blindern. Dette er en nøytronkanon som skyter ut nøytron-

er med høy energi.

Nøytronkanonen kostet halvannen million kroner og er klar til bruk for studentene allerede høsten 2024.

– Mengden nøytroner som kan produseres i dette laboratoriet, er betydelig mindre enn det vi kan lage i en kjernereaktor, men mengden er likevel nok til enkle avbildninger og for å produsere radioaktive sporstoffer som kan brukes i undervisningen i kjemilaboratoriet, forteller Liv Stavsetra.

IFE har fått penger til enda en nøytronkanon.

– Denne nøytronkanonen skal kunne brukes av industrien.

Liv Stavsetra ser for seg at nøytronkanonen kan bli viktig for den norske romfartsindustrien. Satellitter som skytes opp i verdensrommet, er utsatt for mer intens stråling enn på landjorda.

En del av denne strålingen kan bestå av den samme energien i nøytronene som nøytronkanonen produserer.

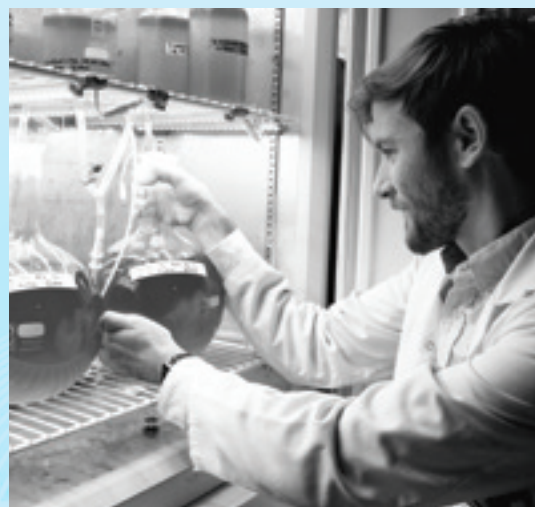
– Ved å bestråle elektronikk i instrumenter med nøytronkanonen kan romfartsindustrien teste om instrumentene tåler strålingen i verdensrommet over lengre tid. ●

HER ER DEN!: Liv Stavsetra viser frem universitetets nye nøytronkanon i strålingssikre omgivelser i kjelleren på Kjemisk institutt.

Ble du inspirert?

3 årig bachelor NMBU:

Radioaktivitet og miljø



Radioaktivitet er både nyttig og potensielt farlig for mennesker og miljø. Vil du være med å utvikle framtidens løsninger for trygg bruk og håndtering av radioaktive stoffer?

Hos oss lærer du om kilder til radioaktivitet i miljøet, måleteknikker for radionuklider, strålevern og atomberedskap.



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet



NUKLEÆRSENTERET



Studér hos oss!

3 årig bachelor UiO:

Kjernefysikk og nukleær teknologi

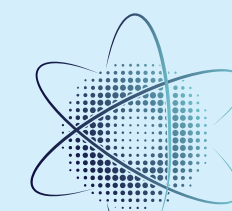


Fra klimavennlig energi til nye metoder for å behandle kreft: Samfunnet trenger kunnskap om kjernefysikk og nukleærteknologi.

Hos oss lærer du om atomkjernen, radioaktivitet og stråling, og hvordan vi kan bruke dette i fremtidens kjernekraft, medisin og teknologi.



UNIVERSITETET
I OSLO



NUKLEÆRSENTERET





NORSK NUKLEÆRT FORSKNINGSSENTER

Norsk nukleært forskningssenter har som mål å øke Norges kompetanse innen kjernefysikk og kjernekjemi. Vårt arbeid inkluderer både forskning på grunnleggende egenskaper ved atomkjernen samt anvendelser innen medisin, energi og beredskap.

Norsk nukleært forskningssenter er et tverrfaglig samarbeidsprosjekt mellom Norges ledende institusjoner innen forskning på kjernefysikk og kjernekjemi: Universitetet i Oslo (UiO), Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU) og Institutt for energiteknologi (IFE). Vi har også et bredt spekter av samarbeidspartnere, inkludert utenlandske universiteter og nukleærindustrien i Norge.

PARTNERE:



UNIVERSITETET
I OSLO

