

Vera C. Rubinobservatoriets store studie af rum og tid

Christa Gall, DARK, Niels Bohr Institutet

Vera C. Rubinobservatoriets “Legacy Survey of Space and Time” (LSST), er et projekt, der starter i 2025 og strækker sig over det kommende årti. Det vil skabe det hidtil bredeste og dybeste billede af universet og gøre det muligt at besvare nogle af de mest presserende spørgsmål om universet.

De store fremskridt i forståelsen af universet er i de seneste århundreder i høj grad blevet muliggjort, men også begrænset, af den teknologiske udvikling af nye redskaber til at udforske, observere samt måle vores univers og alt, der er i det. Nu åbner de hurtige fremskridt inden for informations- og detektorteknologi samt i computernes regnekraft for nye veje til at studere universet. Disse udviklinger gør det muligt at opbygge en ny generation af kraftfulde observationsfaciliteter med meget brede, hurtige og dybe himmelundersøgelser, der vil undersøge stadig større områder af himlen i hele det elektromagnetiske spektrum. Dette vil åbne op for at løse gamle problemer og revolutionere vores grundlæggende forståelse af universets oprindelse og udvikling. Vi står derfor overfor en ny æra inden for astrofysikken.

Næste år starter Vera C. Rubinobservatoriet projektet “Legacy Survey of Space and Time” (LSST), som denne arikel vil se nærmere på.

“Legacy Survey of Space and Time (LSST)”

Figur 1 viser Vera C. Rubinobservatoriet, som er en helt ny astronomisk observationsfacilitet beliggende ved Cerro Pachónryggen i Atacamaørkenen i det nordlige Chile. De første skitser til et teleskop, der kan fremme astrofysikken ud over det nuværende niveau, blev lavet på en serviet af en gruppe forskere i begyndelsen af 1990'erne. Den primære videnskabelige drivkraft var at klarlægge det mystiske mørke stof, som udgør størstedelen af massen i universet, men aldrig er blevet “set” med noget instrument.

I løbet af det efterfølgende årti begyndte idéen at blive til virkelighed, og i 2003 blev LSST Corporation grundlagt som en non-profit organisation til støtte for projektet. Den første udvikling blev støttet af flere amerikanske nationale og private fonde, og der kom også betydelige økonomiske bidrag fra milliardærene Charles Simonyi (der var en af ophavsmændene til Microsoft Word) og Bill Gates (grundlæggeren af Microsoft) til udvikling af teleskopets spejle. Efter næsten et årti blev den traditionelle grundstensnedlæggelse afholdt for at markere den officielle start på projektet på Cerro Pachón i 2015. Samtidig med byggeriet på bjergtoppen, der fortsatte over nogle år, blev flere dele, såsom teleskopets spejle samt stålelementerne til teleskopet og kameraet, bygget på faciliteter og laboratorier rundt om i verden.

På det tidspunkt blev projektet kaldt “Large Synoptic Survey Telescope” (LSST). Det blev designet til at detektere svage astrofysiske objekter, der spænder fra

nærjordiske asteroider, objekter i solsystemet, herunder uopdagede planeter, stjerneeksplosioner i fjerne galakser samt selve de fjerne galakser. Dermed strækker den videnskabelige rækkevidde sig ud over undersøgelsen af mørkt stof og mørk energi, som var (og stadig er) attraktiv for en bred vifte af astrofysikere rundt om i verden.

Ved udgangen af 2019 blev faciliteten og programmet omdøbt. Faciliteten blev navngivet til ære for Vera C. Rubin, en amerikansk astronom og den første, der leverede bevis for eksistensen af mørkt stof [1]. Det er den første offentligt finansierede store astronomiske facilitet i USA, der er opkaldt efter en kvinde. Undersøgelsen selv blev omdøbt til “Legacy Survey of Space and Time” (LSST), og det 8,4-meter store teleskop blev navngivet “Simonyi-teleskopet” efter Charles Simonyi.

Undersøgelseskoncept

LSST er en omfattende astrofysisk undersøgelse, der vil kortlægge hele den sydlige halvkugle over 10 år [2]. Konceptet for undersøgelsen er: “Wide-Fast-Deep”. Det betyder, at LSST vil fotografere store områder af himlen (Wide) på kort tid (Fast) med svage størrelsesklasser (Deep). Således vil LSST tage 30-sekunders billeder (2 gange 15-sekunders eksponeringer for at reducere påvirkningen fra kosmisk stråling) hver nat med et synsfelt på 9,6 kvadratgrader over en periode på 10 år. Denne undersøgelse vil blive udført med et kamera på 3200 megapixel, hvilket er det største digitale kamera, der nogensinde er bygget. Billedtagning af himlen vil blive udført med seks forskellige optiske filtre, u, g, r, i, z, y , der dækker et samlet bølglængdeområde fra cirka 320 til 1050 nm. Hver position på himlen vil blive fotograferet 3–4 dage i mindst et af de seks filtre.

Den grundlæggende undersøgelsesstrategi er designet til at optimere synsfeltet og den undersøgte dybde. Den primære Wide-Fast-Deep-undersøgelse vil dække cirka 18.000 kvadratgrader, og hver position på himlen vil i gennemsnit blive besøgt omkring 825 gange over en 10-årig periode. Der vil desuden være “mini-undersøgelser” over mindre himmelområder. Disse inkluderer “Deep Drilling Fields”, som vil have flere besøg end hovedundersøgelsen. Andre mini-undersøgelser, såsom “North Ecliptic Spur”, “Galactic Plane” og “South Celestial Pole”, vil få færre besøg end hovedundersøgelsen.



Figur 1. Vera C. Rubinobservatoriet på toppen af bjerget Cerro Pachón, Chile. Foto: Rubinobservatoriet/ NSF/AURA/H. Stockebrand.

Samlet set vil LSST undersøge et himmelområde på cirka 25.000 ud af 41.253 kvadratgrader og dermed mere end halvdelen af hele himlen. Den forventede 5σ -punktkildedybde af et enkelt besøg (2×15 -sekunders eksponering) i r -båndet er cirka 24,5 mag, og når det kombineres over 10 år, vil det resultere i en 5σ -dybde på $r \sim 27$ mag [3,4]. LSST vil være unik i forhold til at registrere astrofysiske objekter og transiente fænomener, der er svage eller ændrer sig enten i lysstyrke eller position inden for korte tider fra minutter til dage. Dette inkluderer galakser, eksploderende stjerner som supernovaer i fjerne galakser eller asteroider, der kunne udgøre en fare for Jorden.

Videnskabelige hovedformål

LSST er specifikt designet til at tackle de mest presserende videnskabelige spørgsmål inden for disse fire videnskabelige områder:

- Beskaffenheden af mørk energi og mørkt stof
- En kortlægning af solsystemet, fra nærjordiske asteroider til objekter i det ydre solsystem
- Strukturen af Mælkevejen
- Universets udvikling

I øjeblikket er den bedste model, der beskriver vores univers og som matcher observationerne, Λ -CDM- (Cold Dark Matter – koldt mørkt stof)-modellen [5,6]. Dens hovedkomponenter består af en kosmologisk konstant forbundet med mørk energi, koldt mørkt stof og almindeligt stof. Mørk energi er ansvarlig for den accelererede udvidelse af universet og ses fx i Hubble-diagrammet [5,7]. Mørkt stof udgør omkring 80% af stoffet i universet og viser sig gennem den gravitationelle effekt, stoffet har på dannelse og udvikling af galakser og deres fordeling i store skalaer samt i gravitationel lensning. Sidstnævnte er en effekt, hvor lys fra en fjern kilde bliver forvrænget og forstørret af en forgrundskilde, såsom en massiv galakse eller en galaksehob, der begge består af almindeligt og mørkt stof.

Imidlertid er de sande egenskaber ikke kendt for hverken mørk energi eller mørkt stof. Da LSST-undersøgelsen er designet til at observere store områder af himlen med svage størrelsesordener, kan der opnås præcise målinger af forskellige kosmologiske parametre, og i kombination vil alle disse målinger gøre det muligt at bestemme de kosmologiske parametre med stor nøjagtighed. Det forventes, at LSST vil observere omkring 20 milliarder galakser over 10 år.

I vores egen omegn vil LSST lave en dybdegående opgørelse af de legemer, der passerer gennem solsystemet, herunder objekter som nærjordiske asteroider, kometer, Kuiperbælte-objekter og endda planeter i mærkelige baner. Sådanne objekter er svage, og omkring 30% af de nærjordiske objekter, der indtil videre er opdaget, er kun omkring 140 m i størrelse, men stadig store nok til at udgøre en fare for os på Jorden, hvis de er på kollisionskurs. Efter de 10-årsundersøgelisesperioder forventes det, at LSST vil have katalogiseret banerne, farverne og variabilitetsoplysningerne for 6 millioner af sådanne legemer i solsystemet.

Den nuværende form og struktur af Mælkevejen er resultatet af gentagen stjernedannelse og sammensmeltning af materiale inden i mindre galakser over omkring 10 milliarder år. Imidlertid ved vi ikke meget om arten af og detaljerne af de mange processer, der styrer Mælkevejens udvikling,. Dertil kommer, at mørkt stof spiller en rolle i dannelsen af strukturer på subgalaktiske skalaer ligeledes er uklare. Mælkevejen er et ideelt astrofysisk laboratorium til at studere en galakses dannelseshistorie ved at kortlægge dens stjerner.

LSST vil derfor observere og måle hastighederne og andre fysiske egenskaber af cirka 17 milliarder stjerner ud til en afstand af 300 kiloparsec.

Tidsskalaerne for dannelse, udvikling og død af astrofysiske objekter kan være lige så lange som hele universets levetid, og ændringer kan således ikke fanges i løbet af et menneskes korte levetid. Nogle forbigående fænomener, såsom de mest energiske gammastråleudbrud, massive stjerner, der eksploderer som supernovaer, eller stjerner, der ødelægges, fordi de kommer for tæt på et sort hul i en galakse, kan dog være så korte, at de varer enkelte sekunder eller dage. Hver nat forekommer i hundredtusindvis af disse forbigående begivenheder i fjerne galakser, men de nuværende undersøgelser og teleskoper kan kun fange en brøkdel af fænomenerne. LSST vil udvide nuværende undersøgelser med en faktor 100, hvilket vil muliggøre opdagelsen af nye fænomener og lette studiet af kendte fænomener. Inden for 60-sekunders observationer vil LSST detektere hvert objekt, der har ændret sig enten i lysstyrke eller position, og vil øjeblikkeligt advare hele det astrofysiske samfund om disse begivenheder, hvilket vil løbe op i cirka 10 millioner advarsler hver eneste nat.

Teleskop- og kameradesign

Figur 2 viser monteringen af det 8,4 m store Simonyi-teleskop. Teleskopet har et unikt tre-spejlsdesign, hvor det indfaldende lys opsamles af et 8,4 m primært spejl. Dette reflekterer lyset til et 3,4 m konvekst sekundært spejl og videre til et 5 m konkavt tertiært spejl, der dirigerer lyset ind i kameraet. Det mest unikke er, at primær- og tertiærspejlene er fremstillet af det samme monolitiske substrat ved hjælp af en helt ny borosilikat-teknologi udviklet af Richard F. Caris Mirror Laboratory ved University of Arizona i Tucson, USA. Teleskopets design resulterer i en åbning på 6,7 m og et bredt synsfelt på himlen på 9,6 kvadratgrader. Dette er cirka 40 gange Månens overflade.



Figur 2. Den massive støttestruktur til teleskopet med den åbne observatoriumskuppel. Foto: Rubinobservatoriet/NSF/AURA/H. Stockebrand.

Den høje hastighed i dataopsamlingen betyder, at der er brug for et stort kamera, og her har SLAC National Accelerator Laboratory i Californien bygget det hidtil største digitale kamera til astrofysisk brug, som vist på figur 3. Det har et 3,2 gigapixel fladt fokusplan, der er belagt med 189 stk $4k \times 4k$ CCD-sensorer, som hver især er opdelt i 16 forstærkere. Den fysiske pixelstørrelse er $10 \mu\text{m}$.

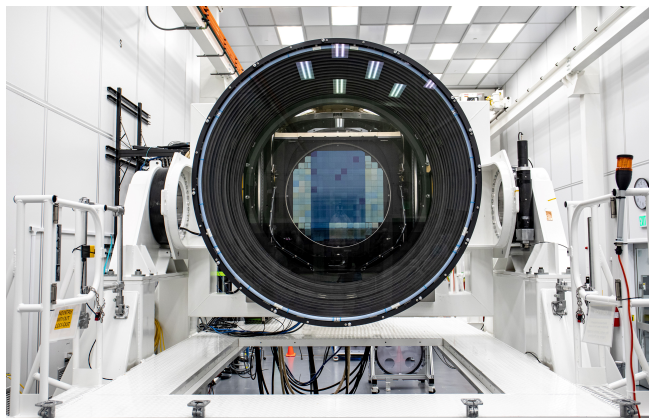
Fokusplanet har en fysisk diameter på 65 cm, og for at begrænse elektronisk og termisk støj er hele fokusplanet med alle dets komponenter indlejret i en vakuumkryostat med et kølesystem, der opretholder en driftstemperatur for CCD'erne på omkring -100°C . Kameraet består af tre linser, hvoraf én er indgangsvinduet til kryostaten. De to andre linser, som er monteret foran kamerahuset, er primært designet til at korrigere for kromatiske aberrationer og for at udbrede fokusplanet over hele bølglængdeområdet. Imponerende nok har den første linse en diameter på 1,55 m og er optaget i Guinness Rekordbog som verdens største linse.

Datastyring

LSST-teleskopet vil skanne hele den sydlige halvkugle og tage cirka 1000 billeder hver nat og dermed hver nat opnå cirka 20 terabyte rådata, der behandles i realtid. Hele det bearbejdede datasæt vil blive frigivet årligt, og den endelige 10-årige datafrigivelse vil omfatte cirka 15 petabyte data. I alt vil LSST levere en kumulativ datamængde på cirka 500 petabyte bestående af billeder og dataprodukter. Disse kan omfatte kataloger og behandlede billeder, som er gjort klar til at blive anvendt af LSST-brugerne. For at forbedre slutbrugerens videnskabelige produktivitet vil datakataloger eller dele af det blive opbevaret i uafhængige datacentre, som er placeret rundt om i verden. Alle datacentre vil dog være underlagt en toårig ejerperiode, hvor de kun kan bruges af forskere, der er LSST-datarettighedshavere.

For at udnytte den usædvanligt store datamængde produceret af LSST og besvare videnskabelige spørgsmål, skal der udvikles automatiserede metoder og værktøjer til behandling og analyse af datamængden. Dette åbner unikke muligheder, ikke kun for astrofysikere,

men også for dataloger, til at udvikle nye metoder inden for kunstig intelligens og maskinlæringsteknikker og -værktøjer på tværs af forskningsområder, der omfatter, men ikke er begrænset til, astronomi, astrofysik og datalogi.



Figur 3. LSST-kameraet med dets 1,5 m brede indgangslinse og det 65 cm brede fokusplan. Foto: Jacqueline Ramseyer Orrell/SLAC National Accelerator Laboratory.

Derudover vil der være en stor mængde højkvalitets offentlige data (fx alle de natlige advarsler og tilhørende data, der frigives inden for 60-sekunder efter eksposering), hvilket vil fremme en rigdom af forskningsmuligheder. Desuden udvikler *Rubin Observatory Education and Public Outreach*-programmet en overflod af open-source-materialer og offentlige aktiviteter for at fremme formidling, uddannelse og borgerforskning.

Status

Konstruktionen af observatoriet på bjergtoppen, som bl.a. inkluderer teleskopets monteringsenhed, servicebygning, vedligeholdelsesfaciliteter og kuppel, blev fuldført i slutningen af 2023. Spejlene er bygget og er allerede ankommet til observatoriet. Konstruktionen og test af kameraet er i den sidste fase og forventes at blive sendt fra SLAC National Accelerator Laboratory, hvor kameraet er bygget, til teleskopet her i 2024.

Systemets *first light* med LSST's kamera forventes at finde sted i starten af 2025, og *Operation Readiness Review* forventes at være færdig i midten af 2025. Den endelige start på måleprogrammet er planlagt til begyndelsen af 2026. Yderligere information og liveopdateringer kan findes på www.lsst.org.

I Danmark er Instrumentcenteret for Dansk Astrofysik anerkendt af LSST, og der er en proces i gang for at få dansk medlemskab af LSST, hvilket vil sikre datarettigheder for en række forskere ved danske institutioner. Til gengæld bidrager vi til driften af observatoriet, og undertegnede leder arbejder med at opbygge et "Object-lite Independent Data Access Center", som vil betjene LSST's "Object Lite Catalog"-dataudgivelser suppleret med en række andre eksterne datakataloger af relevans for det danske astrofysiske samfund. Det vil blive kombineret med omfattende computerkraft og lagerplads for at tillade en bred vifte af maskinlæringsapplikationer, der skal producere de endelige resultater.

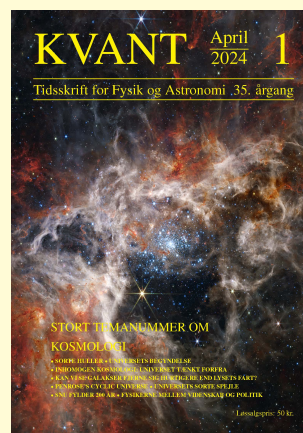
Litteratur

- [1] V.C. Rubin, J.W.K. Ford og N. Thonnard (1980) "Rotational properties of 21 SC galaxies with a large range of luminosities and radii, from NGC 4605 (R=4kpc) to UGC 2885 (R=122kpc)", *ApJ*, bind **238**, side 471–487.
- [2] Ž. Ivezić m.fl. (2019) "LSST: From Science Drivers to Reference Design and Anticipated Data Products", *ApJ*, bind **873**, id 111, ArXiv 0805.2366.
- [3] F.B. Bianco m.fl. (2022) "Optimization of the Observing Cadence for the Rubin Observatory Legacy Survey of Space and Time: A Pioneering Process of Community-focused Experimental Design", *ApJS*, bind **258**, id 1, ArXiv 2108.01683.
- [4] F.B. Bianco, L. Jones, Ž. Ivezić, S. Ritz og the Rubin Project Science Team (2022) "Updated estimates of the Rubin system throughput and expected LSST image depth", <https://pstn-054.lsst.io/>
- [5] S. Perlmutter m.fl. (1999) "Measurements of Ω and Λ from 42 High-Redshift Supernovae", *ApJ*, bind **517**, side 565–586. 1, astro-ph/9812133.
- [6] Planck Collaboration m.fl. (2020) "Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters", *A&A*, bind **641**, side. A6 ArXiv 1807.06209.
- [7] A.G. Riess m.fl. (1998) "Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant", *AJ*, bind **116**, side 1009–1038, astro-ph/9805201.



Christa Gall er lektor ved Niels Bohr Institutet (ansat i 2016) og er Villumfondens "Young Investigator" for projektet "Searching for the Known Unknowns: Lightening up the Dusty Universe".

Læs mere om kosmologi i Kvant



Du kan finde en række artikler om aktuel kosmologi i KVANTs store temanummer om kosmologi, april 2024, nr. 1.