

Anteckningarna i skyttegraven inledde jakten på svarta hål

Bland skyttegravarnas våld och misär upptäckte astronomen Karl Schwarzschild något oväntat – formeln för ett svart hål. Jonas Enander berättar om en mörk tid och en lysande lösning.



Schwarzschilds militära registreringskort. Vid "Yrke" har Schwarzschild skrivit "astronom". I mars 1915 var Schwarzschild stationerad i Namur i Belgien.

FOTO: NIEDERSCHEISCHER STAATS- UND UNIVERSITÄTSBIBLIOTHEK GÖTTINGEN, COD. MS. K. SCHWARZSCHILD 2-2, 13.

Kunskapen om svarta hål växer idag i rask takt. 2019 publicerade Event Horizon Telescope (EHT) bilden av skuggan av ett svart hål, och LIGO – ett observatorium som kan se de gravitationsvågor som uppstår då två svarta hål krockar – delger ständigt nya resultat.

När jag doktorerade i fysik ägnade jag mycket tid åt att studera Einsteins allmänna relativitetsteori. Jag ville förstå hur svarta hål och gravitation fungerar. Samtidigt lurade hela tiden en fråga i bakhuvudet: hur gick det egentligen till när formeln för ett svart hål skrevs ner på ett papper för första gången?

Frågan dök upp på nytt när EHT och LIGO publicerade sina spännande resultat. Jag bestämde mig för att ta reda på svaret och tog tåget ner till staden Göttingen i Tyskland. I ett arkiv i staden förvaras den tyske astronomen Karl Schwarzschilds efterlämnade papper. Hur det gick till när han upptäckte formeln för ett svart hål visade sig vara mycket mer dramatiskt än jag först kunde ana.

Dödens berg

Den 22 december 1915. Franska trupper rycker närmare staden Mulhouse vid gränsen mellan Tyskland och Frankrike. Karl Schwarzschild är stationerad i en villa i staden. Han har tjänstledigt från sina astronomiska uppdrag. Nu är han istället löjtnant vid det tionde Kungliga Preussiska Fotartilleriet och hans ballistiska beräkningar ska förbättra de tyska kanonernas träffsäkerhet.

Schwarzschild ser rök stiga upp från berget Hartmannswillerkopf, som ligger i närheten av staden. Berget blir under första världskriget ett slaktfält där tusen och åter tusen soldater dör av eld och kulor, kyla och hunger, granater, projektiler, infektioner och uttorkning. Tyskarna kallar Hartmannswillerkopf för Dödens berg, fransmännen döper det till Människoätaren och båda slåss under den bistra vintern 1915 om kontrollen över berget.

Artillerielden ekar över staden. Samtidigt som tyska trupper går till motanfall, vilket leder till att nästan två tusen franska soldater stupar, postar Schwarzschild ett brev adresserat till Albert Einstein i Berlin.

”Som ni kan se är kriget vänligt inställt mot mig”, skriver han, ”eftersom det, trots intensiv gevärseld på ett helt igenom jordiskt avstånd, tillåter mig att promenera runt i era idéers rike.”

Medan striderna rasar har Schwarzschild försökt lösa Einsteins nyligen publicerade ekvationer för hur gravitation fungerar. Han lyckas, och vad han upptäcker i närheten av skyttegravarna kommer för alltid att förändra vår syn på vad som döljer sig bland stjärnorna.

I närheten av Dödens berg upptäcker Schwarzschild formeln för ett svart hål.

En anomali i solsystemet

Varken Schwarzschild eller Einstein inser den fulla vidden av formeln. De är framför allt intresserade av ett astronomiskt dilemma. Trots att Schwarzschild bytt ut astronomi mot artilleri får planeterna lika mycket uppmärksamhet som projektilerna.

”För att bli mer förtrogen med er gravitationsteori”, berättar han för Einstein, ”har jag sysselsatt mig med problemet som ni presenterade i ert arbete om Merkurius perihelium”.

I mitten av 1800-talet slog den franske astronomen Urbain Le Verrier fast att något inte stod rätt till i solsystemet. Enligt Newtons gravitationsteori borde Merkurius återvända till en viss punkt efter att ha fullbordat ett varv runt solen. Men det gjorde planeten inte. Le Verrier använde detaljerade observationer och förfinade beräkningsmetoder för att slå fast att Merkurius perihelium – dess kortaste avstånd till solen – uppvisade en anomali som Newtons teori inte kunde förklara.

Han föreslog att det kanske var en planet mellan solen och Merkurius som påverkade Merkurius omloppsbana. Le Verrier döpte den hypotetiska planeten till Vulkan. Astronomerna letade förgäves efter den.

När Einstein efter många års möda skriver ner sina ekvationer för hur gravitation fungerar – sin allmänna relativitetsteori – försöker han omedelbart räkna ut vad de har att säga om Merkurius omloppsbana. Men ekvationerna är komplexa och Einstein använder därför en förenklad version av dem.

Den förenklade versionen förutspår – i motsats till Newtons teori – att Merkurius bör röra sig precis så som planeten faktiskt gör. Istället för Vulkan är det Einsteins allmänna relativitetsteori som löser anomalin i solsystemet!

Einstein blir överlycklig. Men han är osäker på om de förenklade ekvationerna ger en fullständig bild av vad som händer i närheten av en stjärna.

Schwarzschild läser Einsteins artikel och försöker lösa ekvationerna utan att göra några förenklingar. Han lyckas direkt. ”Jag hade inte trott att den exakta lösningen på punktproblemet var så enkel”, svarar Einstein i ett brev.

Med punktproblemet menar Einstein frågan om hur gravitation fungerar kring ett objekt. Det må vara en



Ovan: Karl kastar astronomiska mätinstrument på motståndaren i en teckning av brodern Alfred.

SCHWARZSCHILDS FAMILJ

Släkten Schwarzschild har anor ända till 1500-talets Frankfurt. Namnet Schwarzschild betyder svart sköld. I stadens judiska kvarter användes färgade sköldar istället för gatunummer, och därifrån härstammar familjens efternamn.

Karl Schwarzschild gifte sig med Else Rosenbach 1909. Tillsammans hade de tre barn. Else tog hand om dem medan Karl var vid fronten.

Agathe Schwarzschild (gift Thornton) blev professor i klassisk litteratur vid universitet i Otago på Nya Zeeland. Hon gav bland annat ut en bok med titeln *Universums födelse*, som redogör för maoriernas världsbild.

Martin Schwarzschild blev likt sin far intresserad av stjärnorna. När nazisterna tog makten flydde han till USA och blev professor i astrofysik vid universitetet i Princeton. Han arbetade för den militära underrättelsetjänsten under andra världskriget.

Alfred Schwarzschild stannade kvar i Tyskland och blev mördad av nazisterna under Förintelsen.

Karl hade även en broder som hette Alfred Schwarzschild. Han var en skicklig konstnär. När nazisterna tog makten flydde han till England. Artikelförfattaren har brevväxlat med Alfreds dotter (dvs. Karls brorsdotter) Theo Straker. På hennes sajt alfredschwarzschild.com kan du se många av Alfreds tavlor och teckningar.

stjärna, en planet eller en liten partikel. Schwarzschild bekräftar Einsteins resultat för Merkurius omloppsbana. Anomalin i solsystemet är löst.

Men Schwarzschilds formel innehåller något förbryllande som kommer att sysselsätta forskare i decennier: en singularitet (se ruta på nästa sida).

Från stjärnor till skyttegravar

När kriget bryter ut är Schwarzschild föreståndare för det astronomiska observatoriet i Potsdam utanför Berlin. Han har vikt sitt liv åt astronomin och studerat stjärnorna, utvecklat optiska tekniker, rest till Algeriet för att

BILD: ESD/M. KORNMESSEER

Enligt Schwarzschilds formel är det svarta hålets massa koncentrerad i en enda punkt, singulariteten. Runt singulariteten finns en klotrund horisont vid Schwarzschildradien, som går att räkna ut från massan.

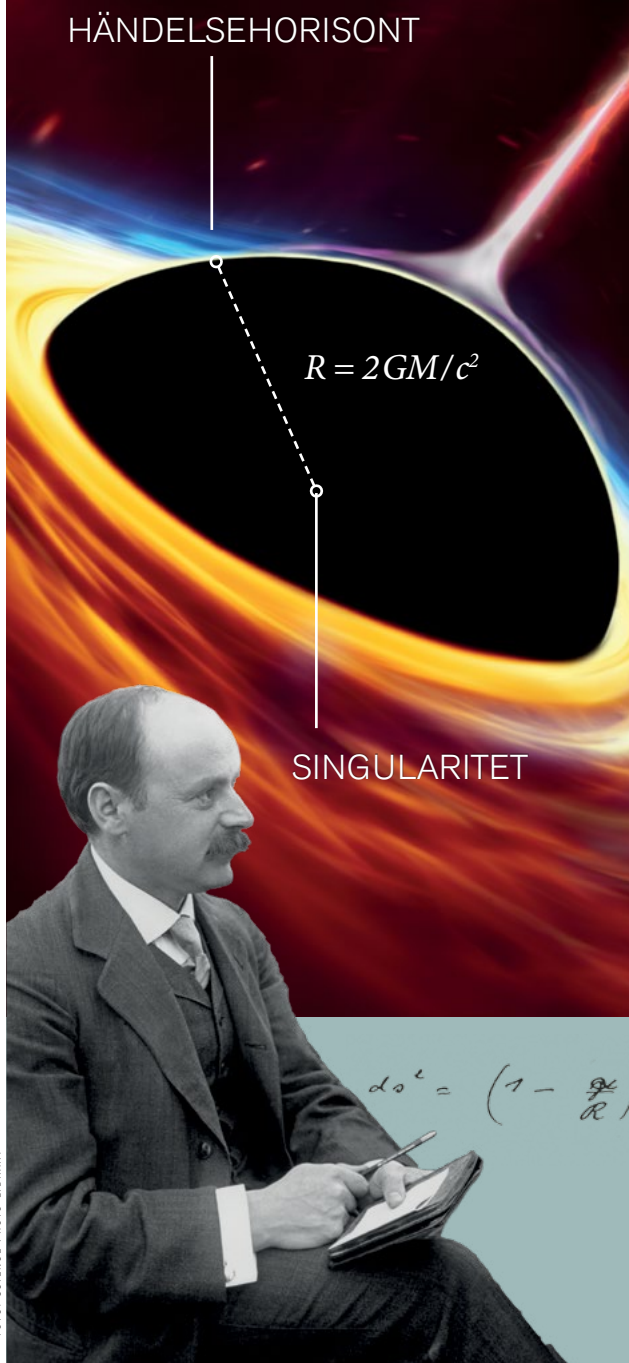


FOTO: SCIENCE PHOTO LIBRARY

EN ENKEL FORMEL FÖR ETT SVART HÅL

Schwarzschilds formel kallas idag för Schwarzschildmetriken. En metrik anger hur rummets och tidens egenskaper förändras på grund av gravitationens verkan. Schwarzschildmetriken beskriver hur gravitationen fungerar runt en stjärna, och utanför och inuti ett svart hål.

Schwarzschildmetriken innehåller två fenomen som är karaktäristiska för svarta hål: en horisont och en singularitet. Horisonten är en yta som bara tillåter ljus, gas, stjärnor, planeter och annan materia och information att passera i en riktning. Det är omöjligt för någonting att åka ut ur horisonten till utsidan.

Horisonten bildar ytan av ett svart hål. Men ytan består inte av någonting. Ett svart hål är ett rent tomrum med enorm gravitationell styrka. Horisonten ligger vid den så kallade Schwarzschildradien. Denna radie är ungefär en centimeter stor för jorden och tre kilometer för solen. Det betyder att om jordens eller solens massa trycks ihop innanför Schwarzschildradien uppstår en horisont. Och omvänt: eftersom jorden och solen är så mycket större än deras Schwarzschildradier går det bra att beskriva hur gravitationen fungerar långt bort från dem med hjälp av Schwarzschildmetriken.

Singulariteten är en punkt bakom horisonten där rummet och tiden upphör att existera i matematisk mening. Det är den allmänna relativitetsteoris sätt att säga "här upphör min giltighet, ni måste använda en ny teori för att förstå vad som händer här". Vad som händer vid singulariteten är en av fysikens stora olösta gåtor. (I Schwarzschilds formel finns det även en singularitet vid horisonten, vilket även Schwarzschild noterade, men efter decennier av matematisk analys insåg fysikerna att den inte är fysikaliskt relevant. Det är singulariteten bakom horisonten som karaktäriserar ett svart hål.)

Förekomsten av en horisont och en singularitet är kännetecknet för ett svart hål. Idag använder astrofysiker en mer avancerad formel för att även ta hänsyn till att svarta hål roterar (precis som solen och jorden). Men Schwarzschilds formel utgör grunden för att förstå hur svarta hål fungerar.

Metriken ovan skrev Schwarzschild ner i ett brev till Einstein den 22 december 1915.

EKVATION: NIEDERSÄCHSISCHE STAATS- UND UNIVERSITÄTSBIBLIOTHEK GÖTTINGEN, COD. MS. K. SCHWARZSCHILD 2.2. 2.

observera en solförmörkelse och även bidragit till beräkningar av atomens inre.

Sina 40 år till trots beslutar sig Schwarzschild för att lämna den trygga positionen vid observatoriet. Han anmäler sig som frivillig till den tyska armén.

Anledningen är hans judiska familjebakgrund. Antisemitismen är närvarande i Schwarzschilds och andra judars liv i Tyskland. Schwarzschild vill bekämpa antisemitismen med patriotism. Genom att visa att han är beredd att

kämpa och dö för nationen hoppas han att de icke-judiska tyskarna ska respektera honom och andra judar.

I armén är hans kunskaper efterfrågade. Astronomiska färdigheter – minutiösa optiska observationer, förutsägelser av komet- och planetbanor, kännedom om atmosfäriska förhållanden på jorden och solen – blir till militära färdigheter: fiendeobservationer, beräkningar av artilleriprojektilers banor, meteorologiska förutsägelser.

Schwarzschild arbetar först vid en militär väderstation

i Belgien. Han vill dock närmare krigets verklighet och ansöker om att få tjänstgöra vid artilleriet. Militärledningen placerar honom i en artillerienhet vid östfronten, bland annat i Litauen.

Han räknar ut hur luftens temperatur, fuktighet och vindar påverkar artilleriprojektilernas banor. I en hemligstämplad rapport skriver han att målet med beräkningarna är att ”reducera [onödig] beskjutning, spara ammunition och att bättre överraska motståndaren ... Det tunga artilleriet måste bli ett precisionsinstrument.”

Schwarzschilds militära arbete är ett typiskt exempel på det nära samarbete mellan astronomi, fysik och militär som kom att fördjupas under 1900-talet.

Hösten 1915 skickar militärledningen Schwarzschild till Mulhouse. Villan i staden som Schwarzschild var stationerad i är döpt efter familjen Koechlin, en familj av inflytelserika franska textilfabrikanter. De flyr till Schweiz när kriget bryter ut och tyska officerare använder villan som bas. Schwarzschild spelar biljard i rökrummet och med all sannolikhet utnyttjar han villans bibliotek när han studerar. Till sin fru Else Schwarzschild skriver han att han har blivit bättre på biljard och att han rider runt i omgivningarna till häst. Större delen av tiden går åt till att räkna.

Schwarzschilds sista strid

Efter att Schwarzschild hittat lösningen för hur gravitationen fungerar utanför en stjärna vill han veta vad ekvationerna har att säga om förhållandena inuti en stjärna. Han hittar en lösning och publicerar den i en artikel. I slutet av artikeln noterar han att det finns en nedre gräns för hur små stjärnor kan vara. De kan inte ha en mindre radie än den radie som vi idag kallar för Schwarzschildradien.

Schwarzschild räknar ut Schwarzschildradien för solen: tre kilometer. Men han dristar sig inte till att fråga vad som händer om solen trycks ihop till en mindre radie än så.

Några månader efter att han publicerar sin formel börjar bölder och blåsor täcka hans hud. Han har drabbats av pemfigus vulgaris, en plågsam hudsjukdom. Förhållandena vid fronten har eventuellt förvärrat sjukdomen.

Sjukdomen går inte att bota med dåtidens medicinska kunskaper. Schwarzschild får ledigt från militären och flyttar hem till Potsdam. Han fortsätter att räkna och skriva. Hans sista artikel heter Angående kvanthypotesen och bidrar till den nya kvantmekaniken. Efter att han har skickat artikeln för publikation blir han inlagd på sjukhus. Den 11 maj 1916 dör han.

Gulnade papper: beräkningar som Schwarzschild utförde när han löste Einsteins allmänna relativitetsteori bevaras i universitetsbibliotelets arkiv i Göttingen.

EINSTEINS ALLMÄNNA RELATIVITETSTEORI

I slutet av november 1915 presenterade Einstein sina nyfunna ekvationer för hur gravitation fungerar för Preussiska Vetenskapsakademien. Ekvationerna uttrycker Einsteins vision om att gravitation inte är en kraft som verkar mellan objekt, utan en förändring av rummets och tidens egenskaper. Det betyder att till exempel solen förändrar rummets och tidens egenskaper runt omkring sig, vilket får planeterna att röra sig i sina banor runt solen.

Förutsägelserna från Einsteins ekvationer har testats med stor precision i solsystemet, och ekvationerna är en av grundpelarna i studiet av universums utveckling. De är även nödvändiga för att GPS-systemet ska fungera. Klockorna ombord på GPS-satelliterna tickar nämligen i en annan takt än klockor på jorden, och Einsteins ekvationer anger hur stor den skillnaden är.

Schwarzschilds aska strös över Göttingens kyrkogård. Det var i Göttingen han började sin astronomiska karriär. Idag förvarar stadens universitetsbibliotek hans manuskript och brev i ett arkiv. I en mapp i arkivet ligger brevet där han på en rad skrev ner formeln som blev portalen in i de svarta hållens fascinerande värld.

Schwarzschilds arv

Schwarzschilds formel är en av 1900-talets stora fysikaliska upptäckter. Efter Schwarzschilds död fortsatte flera fysiker att analysera den. Eftersom ekvationerna är komplexa och svarta hål inte påminner om något vi känner till på jorden tog det flera decennier att reda ut vad formeln egentligen innebär. När krutröken lagt sig var forskarna överens om att formeln beskriver sluttillståndet för en väldigt tung stjärna som kollapsar efter att ha fått slut på bränsle. Singulariteten i mitten av det svarta hålet signalerar att en ny teori – som förenar kvantmekanikens insikter om de allra minsta beståndsdelarna i naturen med Einsteins allmänna relativitetsteori – behövs för att förstå vad som händer med den stjärnmateria som har kollapsat till en punkt.

Einstein motsatte sig länge att svarta hål verkligen finns. Men idag är inte bara matematiken kring Schwarzschilds formel för svarta hål i huvudsak utredd. Vi vet också att svarta hål tunga som miljarder eller miljarder solar ruvar i mitten av varje galax och att flera av galaxernas stjärnor slutar sina liv som svarta hål.

Vem kunde ha anat, under striderna vid Hartmannswillerkopf, vilken ny värld som dolde sig i brevet som Schwarzschild postade den 22 december 1915? ★

JONAS ENANDER är doktor i fysik och skriver en bok om svarta hål. Han driver den nystartade bloggen Rymdskrift (www.rymdskrift.se). Artikeln bygger på efterforskningar i Schwarzschilds kvarlätningsarkiv som förvaras i ett arkiv i Göttingens universitetsbibliotek. Tack till den nederländske astronomen dr A. I. Raap som har bistått med information.