

$$\frac{A_{O_2}}{4I}$$

Luigi Foschini

Singularità spaziotemporali

*Al di là e al di qua
dell'orizzonte degli eventi*



Copyright © MMVII
ARACNE editrice S.r.l.

www.aracneeditrice.it
info@aracneeditrice.it

via Raffaele Garofalo, 133 a/b
00173 Roma
(06) 93781065

ISBN 978-88-548-1343-4

*I diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica,
di riproduzione e di adattamento anche parziale,
con qualsiasi mezzo, sono riservati per tutti i Paesi.*

*Non sono assolutamente consentite le fotocopie
senza il permesso scritto dell'Editore.*

I edizione: settembre 2007

Indice

0. Prefazione	p. 7
1. Stelle buie	p. 11
2. L'Universo è troppo piccolo	p. 23
3. Intermezzo: la scoperta delle pulsar	p. 35
4. Una nuova finestra sull'Universo	p. 39
5. Digressione: Natura e linguistica	p. 45
6. Spazio, tempo, coordinate	p. 51
7. Simultaneità addio !	p. 57
8. Il problema è grave...	p. 67
9. I buchi neri non sono buchi	p. 75
10. I buchi neri non sono neri	p. 83
11. Effetti sullo spaziotempo circostante	p. 89
12. Nuclei Galattici Attivi	p. 95
13. Tassonomia degli AGN	p. 99
14. Intermezzo: altri effetti controintuitivi della relatività particolare	p. 109
15. Blazars	p. 113
16. Ordine nel caos: i primi modelli unificati	p. 121
17. Evoluzione delle singolarità stellari	p. 127
18. Evoluzione delle singolarità supermassive	p. 133
19. Epilogo: il paradiso di Schwarzschild	p. 141
Glossario	p. 147
Bibliografia	p. 157
Siti web in internet	p. 165

0. Prefazione

Ancora oggi è piuttosto diffusa una certa convinzione secondo cui le parole non sono produttrici di conoscenza, ma solo una maschera che copre la realtà concreta delle cose, la “sostanza”. Negli antichi questa concezione era così forte al punto da credere che perfino la parola avesse sostanza e che per questo fosse in grado di mutare le cose (era l’epoca della parola magica). Per dirla alla Wittgenstein, gli antichi confondevano la sostanza col sostantivo¹. La storia della scienza ci insegna che la conoscenza si è sviluppata proprio quando si è abbandonato l’aspetto mistico e magico, imparando a distinguere tra parola e cosa, sviluppando l’aspetto formale, che nella scienza si è evoluto in un vero e proprio linguaggio: la matematica. Non dimeno, anche nella scienza non si può fare a meno delle parole, che immancabilmente strutturano il modo in cui pensiamo ai

¹ Wittgenstein, *Libro blu e libro marrone*, p. 5.

problemi, determinano le nostre domande e fondano le risposte. Come ebbe a dire il fisico Niels Bohr, «noi siamo sospesi nel linguaggio»².

Anche se è vero che gli oggetti fisici esistono indipendentemente da come li chiamiamo, è anche vero che usare i termini più appropriati facilita lo studio e la comprensione, evitando di perdersi dietro a false domande suggerite da immagini fuorvianti. Come scrisse Poincaré a proposito del calcolo differenziale assoluto proposto da Ricci Curbastro e Levi-Civita, che molti matematici dell'epoca ritenevano una “rifrittura” di cose vecchie³,

...in matematica una buona notazione ha la stessa importanza filosofica di una buona classificazione nelle scienze naturali. Evidentemente e a maggior ragione, lo stesso si può dire dei metodi, poiché è proprio dalla loro scelta che dipende la possibilità di costringere... una moltitudine di fatti senza alcun apparente legame tra loro a raggrupparsi secondo affinità naturali.⁴

“Buco nero” è un termine saltato fuori negli anni sessanta e introdotto da John Archibald Wheeler con un certo intento, di cui parleremo più estesamente nel corso del libro. Come spesso accade in questi casi, la metafora ammiccante divenne di uso così comune da scalzare, perfino in ambito scientifico, l'uso del termine corretto, che invece è *singularità spaziotemporale*.

Lo scopo di questo libro è di apportare un “riassestamento” della terminologia riguardante questi oggetti. Ci si propone di ripercorrere le tappe principali che portarono alla scoperta delle

² Citato in Petersen (1963).

³ «Preferisco che con metodi vecchi si trovino risultati nuovi al ritrovamento di risultati vecchi con metodi nuovi» diceva il matematico italiano Bianchi, rifacendosi – sembra – a Kronecker. Citato in Toscano, *Il genio e il gentiluomo*, p. 204. Si veda lo stesso volume (pp. 200-215) per l'ostilità incontrata da Ricci Curbastro nell'espone il suo nuovo metodo.

⁴ Citato in Bottazzini, *Il flauto di Hilbert*, p. 304.

Prefazione

singularità spaziotemporali, di spiegarne i concetti fondamentali, raccontare le evidenze osservative ottenute fino a oggi, l'evoluzione e la formazione, sperando che tutto questo serva a fare comprendere che le singularità spaziotemporali non sono né buchi né neri, ma una porta sullo zero e sull'infinito nell'astrofisica contemporanea.

Prima di tuffarci in questa avventura, desidero ringraziare Silvio Bergia, dell'Università di Bologna, per gli essenziali suggerimenti e commenti al testo e Laura Maraschi, dell'Osservatorio Astronomico di Brera per gli utili consigli. Infine, un ringraziamento a Leonardo Rinaldi, della Casa Editrice Aracne, per la paziente assistenza nel trasformare un manoscritto in un libro.

Bologna, 10 luglio 2007

Luigi Foschini

1. Stelle buie

La storia delle ricerche sulle singolarità spaziotemporali si è sviluppata nel corso dei secoli lungo due direttrici, una di carattere più astronomico-osservativo e l'altra di stampo più fisico-matematico. Entrambe le direttrici si sono poi fuse negli anni sessanta del XX secolo in quella che oggi è la moderna astrofisica.

La direttrice fisico-matematica affonda le sue radici nel XVII secolo, quando lo scienziato inglese Isaac Newton elaborò la prima teoria della gravitazione, in senso scientifico moderno. Nella sua opera principale, i *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (1687), Newton enunciò la legge di gravitazione universale, secondo cui due masse si attraggono reciprocamente con una forza che è inversamente proporzionale al quadrato della loro reciproca distanza. Tra le implicazioni della legge di Newton, c'era il concetto di *velocità di fuga*, cioè la velocità minima sufficiente a sfuggire all'attrazione gravita-

zionale di un corpo. Per esempio, se si lancia un sasso in aria, dopo poco la gravità terrestre avrà la meglio sulla spinta iniziale, e il sasso ricadrà a terra. Se però si avesse un braccio così forte da imprimere una velocità maggiore di 11.2 km/s al sasso, allora questo vincerebbe la gravità terrestre e scapperebbe via. Questa velocità critica è detta velocità di fuga e per la Terra è pari appunto 11.2 km/s, mentre per il Sole è 617 km/s.

Newton compì studi in molti altri campi della fisica¹ e in particolare sviluppò una teoria sulla natura della luce, secondo cui si trattava di un flusso di minuscole particelle che dovevano muoversi con velocità elevatissima, addirittura infinita secondo Keplero, Cartesio, e moltissimi altri studiosi dell'epoca. Altri ricercatori, tra cui Robert Hooke e l'astronomo olandese Christian Huygens sostenevano invece che la luce dovesse essere un'onda, una vibrazione che si propagava in una sostanza eterea e non percepibile dai sensi umani. Newton ebbe delle furibonde dispute con Hooke e Huygens, riuscendo però a far prevalere le sue teorie².

Nel XVII secolo dominò la concezione newtoniana della luce, anche se un importante mutamento venne in seguito alle osservazioni dell'astronomo danese Ole Rømer che, nel 1675, dimostrò, tra lo scalpore e l'incredulità generale, che la luce non aveva velocità infinita. Infatti, era successo che l'astronomo italiano Gian Domenico Cassini aveva osservato che i satelliti di Giove impiegavano tempi differenti ad attraversare il cono d'ombra del pianeta e questi tempi dipendevano dalla distanza dalla Terra. Rømer spiegò queste osservazioni

¹ Newton fu anche il primo a creare un "arcobaleno" artificiale, cioè quello che in termini scientifici è chiamato uno "spettro" (fu proprio Newton a introdurre questo termine tecnico, vedi Gliozzi, *Storia della fisica*, p. 317): impiegando un cristallo a forma di prisma riuscì a scomporre la luce solare nei colori fondamentali. Questo fu il primo rudimentale spettroscopio. Vedi anche la voce in Glossario.

² Vedi Gliozzi, *Storia della fisica*, Capitolo 6.

col fatto che la luce viaggiava a velocità finita e il valore che misurò era di 225'000 km/s, che – tenuto conto dei rudimentali strumenti dell'epoca – era molto vicino al valore odierno di circa 300'000 km/s.

Nel 1783, un altro scienziato inglese, John Michell estese le idee di Newton e i risultati di Rømer sulla gravità e sulla luce a un caso molto particolare: se la luce era composta di corpuscoli (quindi con una massa, anche se minuscola) in moto a velocità finita, allora dovevano essere soggetti alla gravità come tutti gli altri corpi. Questo voleva dire che potevano esistere, da qualche parte nell'Universo, delle stelle in cui la velocità di fuga superava il valore di 225'000 km/s misurato da Rømer. Michell calcolò quali dimensioni dovesse avere una stella della densità del Sole perché la sua attrazione gravitazionale fosse così intensa da non lasciare fuggire neanche la luce. Risultò che era sufficiente allo scopo un raggio pari a 250 volte quello del Sole (quest'ultimo pari a circa 7×10^5 km). Dato che una simile stella non poteva essere osservata, in quanto la luce non aveva velocità sufficiente per sfuggire alla gravità, Michell chiamò questi corpi *dark stars* (stelle buie)³.

Nel 1796, anche lo scienziato francese Pierre-Simon Marchese di Laplace descrisse queste stelle oscure nel suo trattato *Le Systeme du Monde*, ma indipendentemente dal lavoro di Michell. Tuttavia, nella terza edizione del trattato, pubblicata nel 1808, Laplace tolse il riferimento alle stelle scure, probabilmente perché, nel frattempo, gli esperimenti condotti dal geniale medico e fisico inglese Thomas Young⁴ sull'interferenza e diffrazione avevano fatto ritornare la comunità dei fisici verso

³ Vedi Gribbin, *Costruire la macchina del tempo*, p. 9.

⁴ L'eccellente produzione scientifica di Young spazia dall'ottica fisiologica alle costruzioni navali, dalla gravitazione alla fluidodinamica. Diede anche importanti contributi nel campo della linguistica, in particolare alla decifrazione della Stele di Rosetta. Vedi Weiss, *Breve storia della luce*, pp. 65-75.

la natura ondulatoria della luce e, a quel tempo, non si sapeva come un'onda luminosa potesse interagire con la forza gravitazionale. In particolare, per spiegare i fenomeni di interferenza luminosa, Young impiegò l'analogia con le onde nei fluidi: quando si sommano due onde di uguale intensità che hanno le creste in fase, l'onda risultante sarà di ampiezza pari alla somma delle due creste; se invece si somma la cresta di un'onda con la valle dell'altra, l'onda risultante avrà intensità nulla. Spiegare un simile comportamento con dei corpuscoli era un'impresa disperata!

I sostenitori della natura ondulatoria della luce e coloro che invece erano più propensi a pensare alla luce come composta di corpuscoli si diedero battaglia sulle pagine delle riviste scientifiche (e anche sui fogli di furibondi scambi di lettere personali) per molto tempo, ma la teoria ondulatoria rimase in auge per lungo tempo, determinando una chiusura nella breccia aperta da John Michell negli studi sugli effetti della gravitazione sulla luce. Solo nel XX secolo, con lo sviluppo della teoria della relatività e della meccanica quantistica, fu possibile riaccendere l'interesse per questo genere di studi.

Il concetto di *quanto* fu introdotto nel 1900 dal fisico tedesco Max Planck per spiegare certe caratteristiche dell'energia totale emessa da un corpo incandescente, caratteristiche che non si riusciva a comprendere impiegando le teorie classiche. Planck riuscì a spiegare i risultati sperimentali soltanto ipotizzando che l'energia fosse emessa a intervalli discontinui, come se fosse composta di piccoli corpuscoli elementari, che chiamò *quanti* (dal latino *quantum*, che sta per tutto ciò che può essere misurato, che è suscettibile di accrescere o diminuire). I quanti di energia E sono proporzionali alla loro frequenza ν secondo la relazione $E = h\nu$, dove la costante h – oggi chiamata “costante di Planck” in suo onore – vale 6.626×10^{-34} J·s (l'unità di misura si legge “Joule per secondo”).

Tuttavia, per quanto il risultato del fisico tedesco riuscisse a spiegare molto bene i risultati sperimentali, non fu accolto molto bene, al punto che più tardi, nella sua autobiografia scientifica, Planck scriverà che

...una nuova verità scientifica non trionfa perché i suoi oppositori si convincono e vedono la luce, quanto piuttosto perché alla fine muoiono, e nasce una nuova generazione a cui i nuovi concetti diventano familiari⁵.

Nel disinteresse generale per questi quanti, solo un altro scienziato tedesco, Albert Einstein – che peraltro a quei tempi lavorava come impiegato all'Ufficio Brevetti di Berna, quindi fuori delle istituzioni accademiche – tentò nel 1905 di applicare il concetto di quantizzazione alla luce, per spiegare un altro effetto, quello fotoelettrico. Quando un metallo è colpito da luce può emettere degli elettroni, la cui velocità dipende dalla frequenza della radiazione incidente, con una certa soglia⁶, mentre l'intensità della luce determina il numero di elettroni emessi. Questi fenomeni non si riuscivano a spiegare con la teoria ondulatoria, secondo cui l'energia degli elettroni espulsi dal metallo doveva essere proporzionale all'intensità e, inoltre, non doveva esserci un effetto di soglia.

Einstein invece applicò alla luce la quantizzazione di Planck e tutto funzionò: quando un quanto di luce colpisce con energia sufficiente, cioè, quando supera una certa soglia, un elettrone nel metallo, lo fa uscire dall'orbita intorno al nucleo dell'atomo⁷. Aumentando l'intensità, ma mantenendo costante

⁵ Planck, *La conoscenza del mondo fisico*, p. 22.

⁶ Cioè, se la frequenza supera una certa soglia, sono emessi elettroni; al di sotto di questa soglia non c'è emissione, qualunque sia l'intensità. La frequenza di soglia dipende dal metallo.

⁷ Per questa scoperta Einstein ricevette nel 1922 il premio Nobel per la fisica, mentre non lo ebbe mai per la relatività. È inoltre opportuno sottoli-

l'energia di questi quanti di luce, si aumenta il numero di elettroni emessi.

Più tardi, nel 1926, su suggerimento del fisico G. Lewis⁸, i quanti di luce furono chiamati *fotoni* (dal greco *photòs*, luce). Per avere un'idea di quanto siano minuscoli di questi quanti di luce, si pensi che una comune lampadina emette in 1 secondo circa 300 miliardi di miliardi di fotoni!⁹

Einstein, negli stessi anni in cui sviluppò la teoria sui quanti di luce, impostò anche la teoria della relatività ristretta, dimostrò l'equivalenza di energia e massa, e più tardi, nel 1916, cambiò radicalmente le concezioni sulla gravitazione. A questo punto, che fosse onda o particella, la luce poteva interagire col campo gravitazionale. Il fisico tedesco fece un primo tentativo di calcolare la deflessione della luce da parte del Sole nel 1911, cercando di impiegare al meglio la neonata relatività ristretta e la gravitazione newtoniana. Tuttavia, solo dopo la prima formulazione della nuova teoria della gravitazione – cioè la teoria della relatività generale – avvenuta nel novembre 1916, Einstein fu in grado di trovare il valore corretto, che fu poi osservato da Eddington nel 1919.

Solo un mese dopo la pubblicazione della relatività generale, un altro fisico tedesco, Karl Schwarzschild, propose una soluzione delle equazioni di Einstein per il campo gravitazionale di una stella sferica non rotante. La geometria proposta da Schwarzschild, consentì allo studioso di calcolare il raggio critico per una stella di una data massa, per cui la luce non può più sfuggire, riproponendo le stelle oscure di Michell e Laplace. Tuttavia, anche se il risultato numerico era equivalente a

neare che, a differenza di questo interesse giovanile per i quanti, Einstein rifiutò negli anni della maturità gli sviluppi della meccanica quantistica, giudicandola incompleta.

⁸ Bellone, *Caos e armonia*, p. 351.

⁹ Esempio citato in Zeilinger, *Il velo di Einstein*, p. 10.

quello trovato da Michell e Laplace per mezzo delle leggi newtoniane, le nuove leggi proposte da Einstein suggerivano qualcosa di più, qualcosa di sconvolgente: la soluzione proposta consisteva in una singolarità spaziotemporale¹⁰, *horribile visu* per i matematici, non meno che per i fisici e gli astronomi.

Per questo motivo, la soluzione di Schwarzschild fu accolta con un certo scetticismo, perfino dallo stesso Einstein, e fu considerata più come una curiosità matematica, piuttosto che qualcosa di applicabile all'astrofisica. Purtroppo, Schwarzschild non visse abbastanza da proseguire le sue ricerche: infatti, verso la metà del 1916, a pochi mesi dalla sua scoperta, contrasse una malattia sul fronte russo, dove combatteva nelle file dell'esercito tedesco, e morì. Con lui si spensero ancora le ricerche sulle singolarità spaziotemporali e occorre attendere il 1930.

A questo punto, la scena si spostò in Inghilterra, dove un giovane fisico proveniente dall'India era giunto in terra anglosassone per confrontarsi con alcuni tra i migliori fisici e astronomi dell'epoca. Subrahmanyan Chandrasekhar, questo era il suo nome, aveva studiato le fasi finali dell'evoluzione stellare combinando i recenti risultati ottenuti in precedenza da Eddington e Fowler sui gas che componevano le stelle e applicando le recenti teorie della relatività e meccanica quantistica. Aveva fatto una scoperta molto interessante studiando cosa succede a una stella quando esaurisce il combustibile nucleare: difatti, in condizioni normali la pressione di radiazione generata dalle reazioni di fusione termonucleare bilancia la gravità della stella stessa. Quando terminano le reazioni di fusione, la gravità comprime il gas rimasto a tal punto che gli elettroni degli atomi si muovono a velocità relativistiche e degenerano in un gas con proprietà particolari, la cui pressione controbilancia

¹⁰ Più avanti, nel Capitolo 9, si vedrà in dettaglio il tipo di singolarità e le differenze rispetto alla gravitazione newtoniana.

l'autogravità della stella. La massa massima per cui questo avviene è pari a 1.45 volte quella del Sole¹¹. Se questo limite è superato, si prospettano soluzioni che gli studiosi dell'epoca considerarono alquanto bizzarre: la stella sarebbe "scomparsa" sotto il suo stesso peso, finendo in una singolarità!

Fu proprio su questo punto che Chandrasekhar fu attaccato e ridicolizzato da Eddington. Come il fisico indiano ricordò anni dopo¹², Eddington fu probabilmente il solo allora a rendersi conto che quegli studi aprivano la strada alle singolarità spaziotemporali, ma la convinzione – tutt'altro che isolata o atipica in quell'epoca – che l'infinito fosse qualcosa da evitare, un sintomo di qualcosa di sbagliato, impedirono a Eddington *in primis*, e poi a tutti gli altri ricercatori, di cogliere un'enorme scoperta che lo avrebbe portato a precedere molti scienziati di diverse decine d'anni.

L'attacco di Eddington fu virulento a tal punto che il giovane fisico indiano decise, nel 1936, di spostarsi negli Stati Uniti e cambiare settore di ricerca, per potere proseguire la sua carriera scientifica, almeno per il momento. Negli anni settanta e ottanta, rinvigorito dalle scoperte in astrofisica di quasar, stelle di neutroni e singolarità spaziotemporali nella nostra Galassia, Chandrasekhar ritornò ai suoi interessi originari e fu insignito del Premio Nobel per la fisica nel 1983 proprio per i suoi studi di cinquant'anni prima.

Ma ritorniamo agli anni trenta, quando Chandrasekhar era in difficoltà di fronte agli attacchi sferrati da Eddington. Non tutti i ricercatori apprezzarono e si schierarono con il celebre astronomo britannico, anzi diversi studiosi ritennero che Chandrasekhar fosse nel giusto e ampliarono gli studi sugli stadi finali

¹¹ Il valore originario trovato da Chandrasekhar era di 0.91 volte la massa solare e solo più tardi fu ricalcolato nel valore di 1.45, oggi accettato come valido.

¹² Miller, *L'impero delle stelle*, p. 150.

del collasso gravitazionale di una stella. Altri, invece, pur seguendo strade differenti ottennero risultati in accordo con le linee di Chandrasekhar.

Uno di questi fu Fritz Zwicky, astronomo presso il Caltech, uno di quegli scienziati che è deriso mentre è in vita, ma che poi è considerato un genio dopo che è morto. Zwicky era uno studioso di supernovae, ma era molto attento anche a ciò che accadeva negli altri settori di ricerca della scienza. Mentre studiava le supernovae con W. Baade, fu colpito dalla notizia scoperta del neutrone, per opera di James Chadwick nel 1932, al punto che cercò di applicare i nuovi risultati ai suoi studi. Zwicky pensò che se una stella negli stadi finali della sua evoluzione fosse sufficientemente massiva da implodere su sé stessa per autogravità, allora la stessa forza di gravità potrebbe compattare i protoni e gli elettroni degli atomi al punto da fonderli in neutroni. Questo processo richiede la trasformazione in energia esplosiva di circa il 10% della massa iniziale, che spiegherebbe il fenomeno di supernova osservato dagli astronomi. Quello che rimane è un nucleo formato da soli neutroni, una “stella di neutroni”, come la definirono Zwicky e Baade, anche se quest’ultimo con qualche riserva¹³.

Come accennato poco fa, Zwicky non godeva di grande reputazione, né la collaborazione con Baade poté cambiare questo *status*, collaborazione che fu peraltro piuttosto burrascosa e breve. Così, anche se piacque la spiegazione di supernovae, l’idea di una stella di neutroni fu del tutto rifiutata e rimossa. Robert Oppenheimer¹⁴, anch’egli in forza al Caltech in quegli anni, non si discostò dalla massa dei suoi colleghi nel giudicare

¹³ Si veda un resoconto più dettagliato e completo in Thorne, *Black holes and time warps*, pp. 169-175.

¹⁴ Oppenheimer diventerà poi famoso come direttore del Progetto Manhattan, il progetto militare degli Stati Uniti destinato a produrre le prime bombe atomiche.

balzane le idee di Zwicky, ma nel 1938 giunse qualcosa che gli fece cambiare idea.

La rivista britannica *Nature*, già allora molto prestigiosa, pubblicò nel febbraio 1938 l'articolo di un noto scienziato russo, Lev Landau, molto conosciuto e stimato da Oppenheimer. In quel lavoro, Landau proponeva che un nocciolo di neutroni potesse essere alla base della fonte di energia delle stelle normali. Oggi sappiamo che sono le reazioni di fusione termonucleare la fonte di energia delle stelle, ma negli anni trenta le cose erano diverse e non c'era ancora una teoria affermata. Quello di Landau era appunto uno dei vari tentativi.

Di fronte al lavoro di Landau, Oppenheimer fu quindi portato anche a rivalutare le idee di Zwicky, al punto che iniziò degli studi sulle fasi finali dell'evoluzione stellare in collaborazione con due suoi studenti, Volkoff e Snyder. Nel lavoro col primo¹⁵, pubblicato nel 1939, fu studiata la massa massima per una stella di neutroni, qualcosa di simile a quello che Chandrasekhar aveva fatto per le nane bianche. Con rudimentali conoscenze di fisica nucleare, essi trovarono soluzioni stabili fino a 0.7 masse solari, mentre oggi il valore accettato è compreso tra 1.4 e 3 masse solari, trovato nel 1974 da Rhoades e Ruffini¹⁶. Invece, nel lavoro con Snyder¹⁷, pubblicato anche quello nel 1939, per la prima volta fu studiato il collasso gravitazionale continuato, cioè come una stella nel corso della sua evoluzione si possa contrarre indefinitamente fino a quando non esiste più alcuna forma di interazione con l'Universo perché la gravità è così forte da trattenere qualunque segnale. Proprio gli effetti della gravità sullo spazio circostante rimangono l'ultimo segno osservabile della sua esistenza.

¹⁵ Oppenheimer & Volkoff (1939).

¹⁶ Rhoades & Ruffini (1974).

¹⁷ Oppenheimer & Snyder (1939).

La seconda guerra mondiale interruppe gli studi in questo settore e i fisici furono reclutati per contribuire allo sforzo bellico nei programmi di sviluppo del radar e della bomba atomica. Al termine della guerra, molti di questi fisici e ingegneri, in particolare tra coloro che avevano lavorato al radar, si dedicarono allo sviluppo della radioastronomia, iniziando nel contempo la fusione delle figure dell'astronomo e del fisico.