

14. Die Kosmische Hintergrundstrahlung

14.1 Wie entdeckt man etwas, wonach man nicht sucht?

Große Durchbrüche in der Wissenschaft ergeben sich manchmal völlig unerwartet und ungeplant. Die Entdeckung der Kosmischen Hintergrundstrahlung durch Arno Penzias und Robert Wilson ist dafür ein gutes Beispiel, und deshalb wollen wir die Geschichte hier berichten.

Penzias und Wilson arbeiteten seit 1963 gemeinsam bei den Bell Laboratories in Holmdel (N.J.) in der Abteilung Radiowellen-Physik. Eine sehr empfindliche Antenne, die ursprünglich für die Kommunikation mit Satelliten gebaut worden war, wollten sie für radioastronomische Untersuchungen unserer Milchstraße einsetzen.

Hier stellt sich zunächst die Frage: Was versteht man unter Radioastronomie?

Lange Zeit waren astronomische Beobachtungen eingeschränkt auf den Bereich des sichtbaren Lichts. Licht kann als elektromagnetische Welle beschrieben werden und ist nur ein winziger Teil aus dem großen elektromagnetischen Spektrum. Was es sonst noch an elektromagnetischen Wellen gibt, zeigt die Abbildung 14.1.

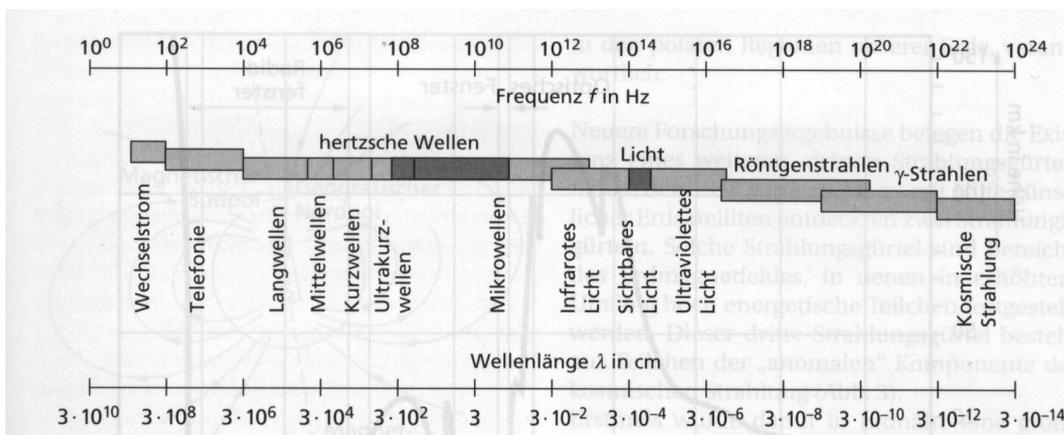


Abb. 14.1: Das Spektrum der elektromagnetischen Wellen. Unten sind die Wellenlängen angegeben, oben die zugehörigen Frequenzen. Das sichtbare Licht liegt etwa in der Mitte.

Diese zunächst so verschiedenen Wellen unterscheiden sich nur durch die Wellenlänge λ bzw. die Frequenz f , mit der sie ausgesandt werden. Zwischen λ und f besteht die einfache Beziehung $\lambda \cdot f = c$ (Lichtgeschwindigkeit). Alle elektromagnetischen Wellen breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus.

Beispiele:

Sichtbares Licht	$\lambda = 600 \text{ nm}$	$f = 5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$
Mikrowellen	$\lambda = 10 \text{ cm}$	$f = 3 \text{ GHz}$
UKW	$\lambda = 3 \text{ m}$	$f = 100 \text{ MHz}$

Während unsere Sonne im wesentlichen sichtbares Licht ausstrahlt, senden viele Sterne und Nebel nicht nur sichtbares Licht, sondern auch andere Arten elektromagnetischer Strahlung aus, z.B. Röntgenstrahlung, Ultraviolett-, Infrarot- und Radiostrahlung.

Warum haben die Astronomen nicht schon immer auch diese anderen Strahlungen untersucht?

- Das erste Hindernis war die Durchlässigkeit der Erdatmosphäre für die verschiedenen Strahlungsarten. In Abb. 14.2 sieht man, dass es für gute terrestrische Beobachtungen nur zwei Fenster gibt, das sichtbare und das Radiofenster. In allen anderen Wellenlängenbereichen konnte man erst dann sinnvoll beobachten, nachdem es Satelliten-Observatorien gab.
- Während wir durch unsere Augen für das sichtbare Licht einen natürlichen Empfänger besitzen, benötigte man für die anderen Wellenlängenbereiche die physikalischen Grundlagen und die technischen Hilfsmittel. Die Entwicklung der Radioastronomie setzte gute, rauscharme Empfänger voraus, die man erst nach dem zweiten Weltkrieg (Radar!) zur Verfügung hatte.

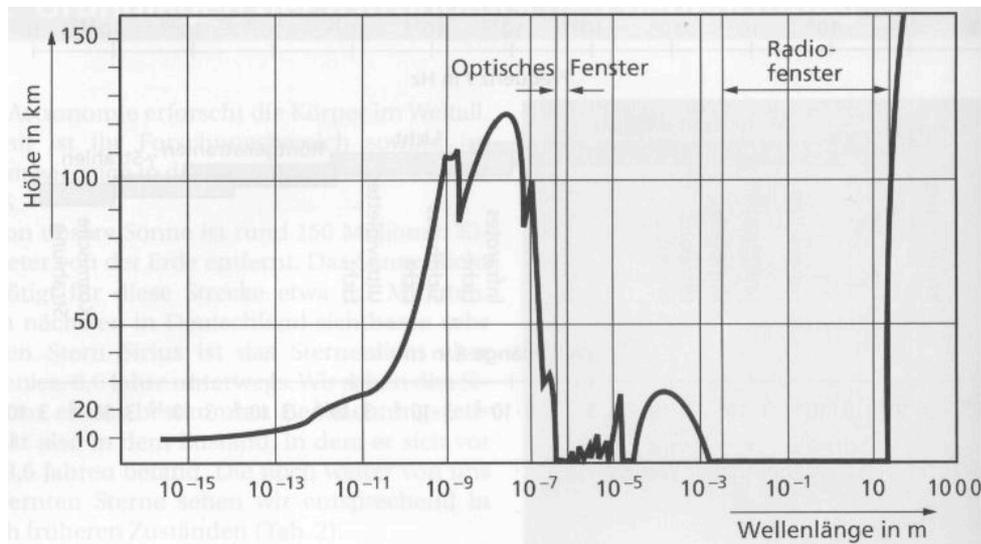


Abb. 14.2: Durchlässigkeit der Erdatmosphäre für elektromagnetische Strahlung in Abhängigkeit von der Wellenlänge. Die Kurve gibt diejenige Höhe an, bei der die einfallende Strahlung auf 10 % ihrer ursprünglichen Intensität abgefallen ist

Heute gibt es zahlreiche Radioteleskope auf der Erde und etliche Röntgen-, IR- und UV-Teleskope, die auf Satelliten montiert sind. Damit kann man heute den Himmel in allen Wellenlängenbereichen untersuchen und auf diese Weise weitere Informationen über die Objekte des Himmels erhalten.

Zurück zu Penzias und Wilson: Sie hatten ein klar definiertes Forschungsprogramm und auch ein Gerät, um das Programm durchzuführen. Bill Bryson [1] schreibt dazu:

"Sie wollten mit einer großen Funkantenne arbeiten, die den Bell Laboratories gehörte und in Holmdel, New Jersey stand. Dabei störte sie aber ein ständiges Hintergrundgeräusch – ein ununterbrochenes Zischen, das jede experimentelle Arbeit unmöglich machte. Es war ein erbarmungsloser unbestimmter Lärm, der

Tag und Nacht, zu allen Jahreszeiten, von allen Stellen des Himmels kam. Ein Jahr lang versuchten die jungen Astronomen alles, was ihnen in den Sinn kam, um die Ursachen des Geräusches ausfindig zu machen und zu beseitigen. Sie überprüften sämtliche elektrischen Geräte. Sie bauten Instrumente um, prüften Stromkreise, spielten mit Kabeln herum, staubten Stecker ab. Sie kletterten in die Antennenschüssel und brachten Klebeband auf allen Schweißnähten und Nieten an. Sie kletterten noch einmal in die Schüssel, dieses Mal mit Besen und Bürsten, und schrubben alles ab, was sie in einem späteren Fachaufsatz als ‚weißes dielektrisches Material‘ bezeichneten, was aber gemeinhin Vogelscheiße genannt wird. Aber was sie auch versuchten, es nützte nichts."

Nachdem Penzias und Wilson alle möglichen Fehlerquellen untersucht und ausgeschlossen hatten, blieb nur ein Schluss übrig: Das beobachtete Signal hatte eine physikalisch reale Ursache. Sandte etwa der "leere Weltraum" Radiostrahlung aus? Sie sprachen mit Kollegen und erfuhren, dass der Physiker George Gamow schon 1949 etwas Ähnliches auf Grund seiner Überlegungen zum heißen Urknall vorausgesagt hatte. Das machte den beiden Entdeckern Penzias und Wilson Mut, ihre Entdeckung zu publizieren. Dreizehn Jahre später wurden sie dafür im Jahre 1978 mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet.

Wir erzählen diese Geschichte, weil sie typisch auch für andere Durchbrüche in der Physik ist. Es geht in der Forschung ja nicht so, dass man den Durchbruch sucht oder dass man nach dem Unbekannten forscht, sondern man beginnt mit einer ganz konkreten Fragestellung, die man untersuchen will. Auf diesem Weg gerät man in Schwierigkeiten, wie hier, wo die Apparatur anscheinend nicht richtig funktionierte. Meist kann man diese Probleme beheben, manchmal umgeht man sie, und manchmal verbirgt sich dahinter etwas ganz Neues, Unerwartetes. Penzias und Wilson wussten natürlich nicht, was der Grund für ihre Probleme war. Wichtig aber war, dass sie nicht aufgaben und nicht versuchten, den Dreckeffekt irgendwie loszuwerden, z.B. indem sie bei anderer Wellenlänge beobachteten, sondern dass sie solange weiter arbeiteten, bis sie sicher waren, dass der Effekt, den die Apparatur zeigte, ein wirklicher Effekt war.

14.2 Der Weltraum hat eine Temperatur von -270°C oder 3 K

Penzias und Wilson haben mit einer Antenne gearbeitet, die auf Radiostrahlen mit einer Wellenlänge von ca. 7 cm, also in etwa im Bereich der Wellenlängen, die heute in der Telekommunikation mit Mobiltelefonen verwendet werden, besonders empfindlich war. Sie haben Strahlung aus dem Weltraum beobachtet und zwar aus solchen Bereichen, in denen kaum Sterne zu sehen sind. Weitere Untersuchungen bestätigten ihr Ergebnis und erweiterten es. Nachdem auch die Stärke der Strahlung bei benachbarten Wellenlängen gemessen worden war, fand man:

Die Radiostrahlung aus dem Weltraum ist eine Wärmestrahlung.

Aus den Ansagen im Flugzeug weiß man, dass es im Weltraum sehr kalt sein muss. Schon bei den üblichen Flughöhen misst man Temperaturen von etwa -50°C . Wie kann es dann aus dem Weltraum Wärmestrahlung geben? Diese Frage ist verknüpft mit einer anderen, nämlich was man unter Wärmestrahlung versteht.

Eine uns allen bekannte Quelle von Wärmestrahlung ist die Sonnenoberfläche mit einer Temperatur von 6000 K. Das Spektrum dieser Strahlung haben wir bereits in der 11. Vorlesung kennen gelernt, es hat sein Maximum bei einer Wellenlänge von ca. 500 nm. Ähnliche Verhältnisse liegen bei einer Glühbirne oder einer Herdplatte vor. Doch was passiert, wenn man die Birne bei einer kleineren Spannung betreibt oder die Herdplatte ausschaltet, so dass die Temperatur des Strahlers sinkt. Von einem gewissen Punkt an kann man nichts mehr sehen, aber die Wärme noch fühlen.

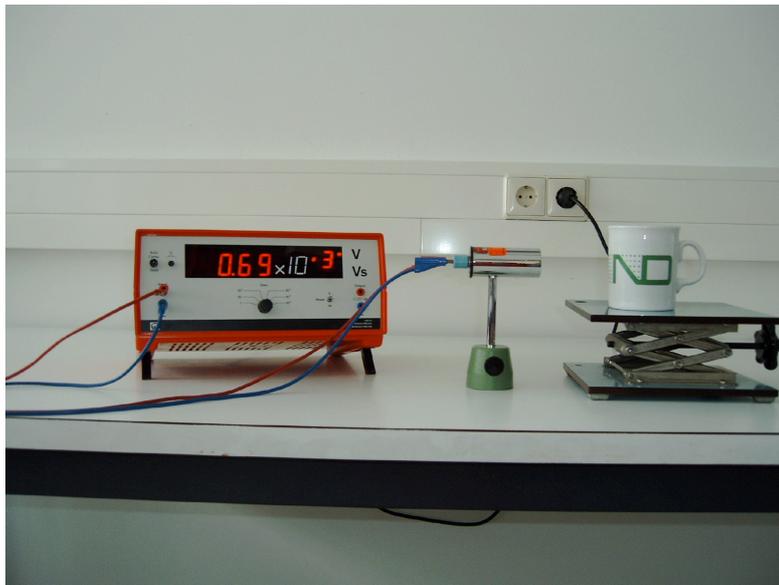


Abb.14.3: Die Wärmestrahlung einer Tasse mit heißem Tee wird durch ein Strahlungsmessgerät (Thermosäule) nachgewiesen, wobei die angezeigte Spannung der auftreffenden Strahlungsintensität proportional ist.

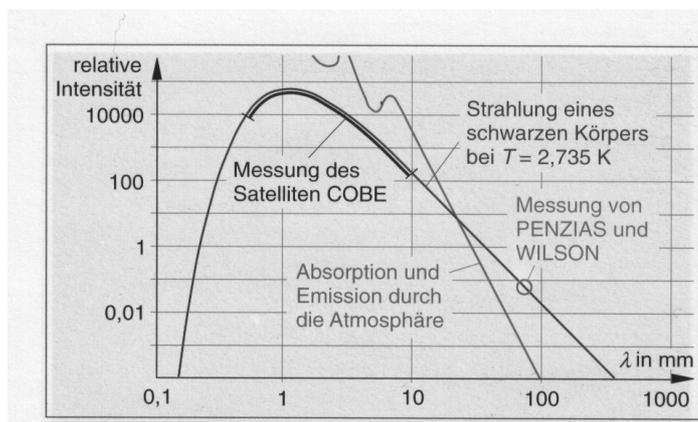


Abb. 14.4: Die Intensitätsverteilung der Kosmischen Hintergrundstrahlung als Funktion der Wellenlänge. Die durchgezogene Linie ist die theoretische Kurve für die Strahlung eines schwarzen Körpers mit der Temperatur 2,735 K. Der Kreis gibt die Wellenlänge an, bei der Penzias und Wilson gemessen haben.

Daraus wird plausibel, dass auch die Wärmestrahlung eine Form der elektromagnetischen Strahlung ist, die sich vom sichtbaren Licht, der Röntgen- und Radiostrahlung nur durch die Wellenlänge unterscheidet und für die das Wiensche Verschiebungsgesetz gilt: Es besagt, dass die Wellenlänge der ausgesandten Strahlung größer wird, wenn die Temperatur der Quelle sinkt: $\lambda_m T \approx 3000 \mu\text{m K}$. Selbst Körper, die nach unserem Empfinden sehr kalt sind, senden noch Wärmestrahlung aus. Und so ist es auch mit dem Weltraum. Penzias und Wilson haben die Existenz der Wärmestrahlung des Weltalls entdeckt, andere haben dann das Spektrum dieser Strahlung gemessen, das in Abb. 14.4 dargestellt ist. Aus der Lage der maximalen Intensität bei $\lambda_{\text{max}} \approx 1 \text{ mm}$ ergibt sich die Temperatur des Weltalls: 3 K oder $-270 \text{ }^\circ\text{C}$. Aus diesem Grunde spricht man auch von der "3-Kelvin-Strahlung", wenn man die " Kosmische Hintergrundstrahlung" meint.

14.3 Beweis für den heißen Urknall

Wir haben gesehen, dass unser Weltall gleichmäßig von Wärmestrahlung erfüllt ist. Aber wo ist die Quelle dieser Strahlung? Bei der Suche nach einer Antwort auf diese Frage fand man bald heraus, dass die Sterne hierfür nicht in Frage kommen, und schließlich, dass es keine Quelle für diese Strahlung außer dem Weltall selbst gibt. Das Weltall ist wie ein Zimmer, das auch dann noch warm ist, wenn der Ofen bereits nicht mehr brennt. Es ist erfüllt von einer "Nachwärme", die Gamow bereits 1949, also 16 Jahre vor ihrer Entdeckung durch Penzias und Wilson, im Zusammenhang mit dem Urknall - dem sog. Big Bang - vorausgesagt hatte. Er stellte sich den Anfang des Universums als einen heißen explodierenden Feuerball vor, der im Laufe der Zeit expandiert und sich dabei abkühlt. Dann müsste selbst noch heute, so schloss er, etwas von der Nachwärme zu spüren sein. Gamows Voraussage war richtig. Detailliertere Überlegungen führten schließlich zu dem heute akzeptierten Bild:

Als das Universum etwa 300 000 Jahre alt war, hatte es sich auf etwa 3000 K abgekühlt. Bis zu diesem Zeitpunkt war es von "Atombruchstücken", d.h. Atomkernen und Elektronen, und von ganz viel Licht (Photonen), das eine dunkelrote Farbe hatte, erfüllt. Nun konnten sich die Bruchstücke zusammenfinden und neutrale Atome bilden, denn das Licht hatte nicht mehr genügend Energie, um die Atome wieder zu zerstören. Das war auch "gut" für das Licht, denn neutrale Atome sind für das Licht praktisch unsichtbar bzw. durchlässig. Damit trennten sich die Wege von Licht und Materie. In Anlehnung zum Schöpfungsbericht in der Bibel können wir sagen: "300 Tausend Jahre nach der Schöpfung der Welt schied sich das Licht von der Materie". Mit wachsender Zeit dehnte sich das Universum weiter aus, und das Licht kühlte sich weiter ab. Dieses Licht, diese Nachwärme oder dieses Nachglühen, das wir heute als Radiostrahlung beobachten, kann uns etwas über den Zeitpunkt erzählen, als es von der Materie geschieden wurde.

14.4 Das "erste Photo des Universums" und die Bildung von Sternsystemen

Mit Hilfe von sehr aufwendigen Apparaturen, die z.T. auf Satelliten montiert sind, hat man die kosmische Radiostrahlung in jeder Himmelsrichtung gemessen und ein

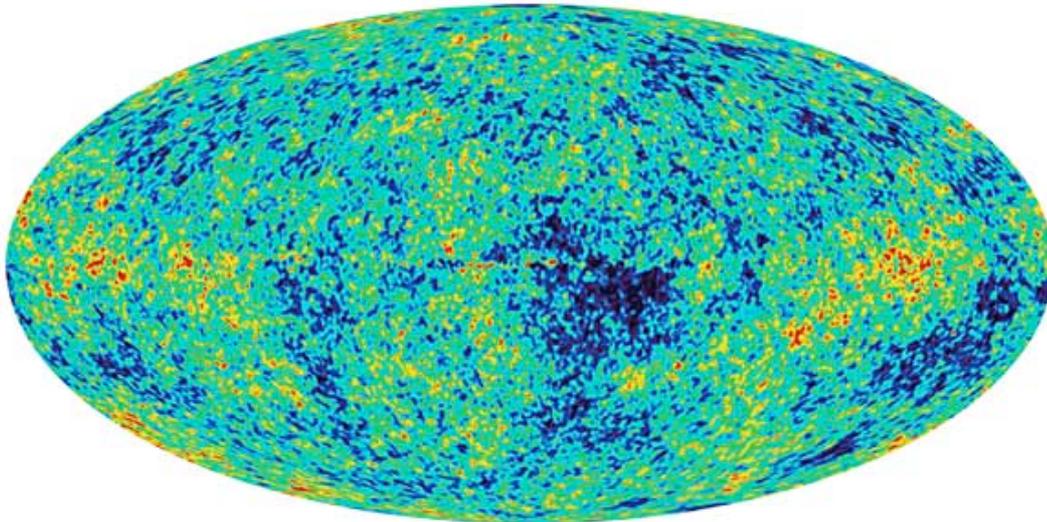


Abb. 14.5: Darstellung der Temperaturen der Kosmischen Hintergrundstrahlung in Abhängigkeit vom Ort am Himmel. Die Farbunterschiede zwischen Rot und Blau entsprechen Temperaturunterschieden von einigen 10^{-5} K (Falschfarbenbild)

"Temperaturbild" des Himmels erstellt (siehe Abb. 14.5). Dabei ergibt sich, dass die Temperatur bis zu einer Genauigkeit von einigen Millionstel Grad überall dieselbe ist. Auf der Erde ist das völlig anders; dort herrschen am Pol Temperaturen von -63°C , während die Temperatur am Äquator $+37^{\circ}\text{C}$ ist. Die erstaunliche Konstanz der Temperatur im Weltall hat zu dem Konzept des "inflationären" Universums" geführt, auf das wir jedoch hier nicht näher eingehen wollen.

Stattdessen wollen wir noch kurz der Frage nachgehen, welche Folgen die geringen Abweichungen der Temperatur vom Mittelwert für unser Universum haben. Auf dem Bild wechseln sich Gebiete mit leicht höherer und solche mit leicht niedrigerer Temperatur ab. Die Verteilung ist "regelmäßig unregelmäßig", d.h. kein Gebiet ist ganz gleich dem anderen, aber in Abstand und Größe ähneln sie sich sehr.

Die Temperaturverteilung, die aus der Hintergrundstrahlung abgeleitet wurde, stellt eine Art "Photo" des Weltalls aus der Zeit 300.000 Jahre nach dem Urknall dar. Ein Photo des heutigen Weltalls sieht allerdings ganz anders aus: Außer einigen hellen Punkten, die entweder Sterne oder Galaxien darstellen, ist das Universum heute schwarz. Offensichtlich hat es sich in den vergangenen 14 Mrd. Jahren kräftig verändert. Ähnliche Unterschiede ergeben sich, wenn man das Bild eines Babys mit dem einer erwachsenen Frau vergleicht. Auch dann sind Ähnlichkeiten häufig erst beim genauen Hinschauen zu erkennen. Und so ist es auch beim Universum.

Die leichten Ungleichmäßigkeiten, die man in der Temperaturverteilung der Hintergrundstrahlung sieht, waren der Beginn einer Entwicklung, die schließlich

zu den Galaxien und Sternen geführt hat. Die ursprünglich geringen Temperaturunterschiede sind mit Unterschieden in der Dichteverteilung der Materie im Universums zu diesem Zeitpunkt verknüpft. Bei der weiteren Expansion haben sich diese Unterschiede unter dem Einfluss der Schwerkraft verstärkt. Man sagt auch, die Materie habe geklumpt, vielleicht ähnlich wie in einer Sauce, die man vergisst zu rühren.

Natürlich braucht das Klumpen Zeit. Die Frage ist, wie viel Zeit?

Die ersten stellaren Objekte sind vermutlich nach 1 Milliarde Jahre entstanden, vielleicht schon etwas früher. Soweit uns bekannt ist, ist die Entwicklung der heutigen Verteilung von Galaxien und Galaxienhaufen aus den Inhomogenitäten in der Hintergrundstrahlung noch nicht vollständig quantitativ verstanden, denn auch hier kommen wieder die Probleme mit der Dunklen Materie ins Spiel. Wenn es keine Dunkle Materie gäbe, wären die Kräfte, die zum Klumpen führen, zu schwach für die Bildung von Sternen innerhalb einer Zeitspanne von ca. 1 Milliarde Jahren.

Aus der genauen Analyse der Verteilung der Flecken auf dem ersten Photo des Universums erhält man Werte für die Anteile der Dunklen Materie und der Dunklen Energie. Man kann außerdem daraus lernen, dass unser Universum "flach" ist, d.h. dass dort die Euklidische Geometrie gilt, was jedoch in dieser Vorlesung nicht näher ausgeführt werden soll.

14.5 Biographien Arno Penzias und Robert Wilson

Arno Penzias wurde 1933 in München als Sohn jüdischer Eltern polnischer Abstammung geboren. Um dem Regime des Nationalsozialismus zu entgehen, wanderte die Familie 1939 über England in die Vereinigten Staaten aus. Ihre neue Heimat wurde New York, wo Arno die Schule besuchte und danach an der Columbia Universität Physik studierte. Nach dem Masterexamen 1954 folgte 1958 die Promotion über ein experimentelles Thema aus der Radioastronomie. 1961 trat Penzias in die Dienste der Bell Laboratories, zunächst nur, um seine radioastronomischen Messungen besser als an der Universität durchführen zu können. Er blieb jedoch dieser Firma treu bis zu seiner Pensionierung im Jahre 1998.



Robert Wilson stammt aus Texas, er wurde 1936 in Houston geboren und ist der Sohn eines Chemikers, der in der Ölindustrie arbeitete. Schon in jungen Jahren interessierte er sich sehr für Elektronik, so dass er schließlich an der Rice University ein Physikstudium begann. Nachdem er 1957 sein Bachelor-Examen abgelegt hatte, wechselte er an das California Institute of Technology (CalTec). Dort promovierte er im Jahre 1962 mit einer Arbeit, in der er einen

radioastronomischen Atlas der Milchstraße zusammengestellt hatte. Nach einer kurzen Zeit als Postdoc am CalTec trat er 1963 bei Bell ein, wo bald seine Zusammenarbeit mit Penzias begann.

Die beiden Wissenschaftler entdeckten 1965 die kosmische Hintergrundstrahlung, zunächst ohne zu wissen, worum es sich dabei handelte. Das Bild zeigt Penzias (rechts) und Wilson vor der großen Hornantenne, mit der sie die Experimente durchgeführt haben. Für die Entdeckung der Kosmischen Mikrowellen Hintergrundstrahlung erhielten sie 1978 den Nobelpreis für Physik.

Quellen:

<http://www.bell-labs.com/project/feature/archives/cosmology/>

http://map.gsfc.nasa.gov/m_uni/uni_101bbtest3.html