

題名	宇宙物理学・宇宙論の革命 50 年——科学者の目を通して——
Title	50 Years of Continuous Revolution in Astrophysics and Cosmology
著者名	ラシッド・アリエヴィッチ・スニヤエフ
Author(s)	Rashid Alievich Sunyaev
言語 Language	日本語・英語 Japanese, English
書名	稲盛財団：京都賞と助成金
Book title	Inamori Foundation: Kyoto Prize & Inamori Grants
受賞回	27
受賞年度	2011
出版者	公益財団法人 稲盛財団
Publisher	Inamori Foundation
発行日 Issue Date	4/20/2013
開始ページ Start page	154
終了ページ End page	205
ISBN	978-4-900663-27-1

宇宙物理学・宇宙論の革命50年 ～一科学者の目を通して～

ラシッド・アリエヴィッチ・スニヤエフ

1. 子ども時代と家族について

私は、第二次世界大戦中の1943年にタシケントで生まれました。タシケントは、かつてのシルクロード沿いに位置する多民族からなる大都市で、旧ソビエト連邦のウズベク・ソビエト社会主義共和国の首都でした。当時はソ連の人々にとって非常に苦しい時代でした。あらゆる物資が前線で戦う人たちに送られ、一般市民は飢餓と隣り合わせの状態でした。人口が最も集中していた国の西部地域が占領され、多くの人々や工場はウクライナやロシア西部からタシケントなどの東部に移動しました。

戦線がソ連国境を越えた数ヵ月後の1941年10月に、父と母は結婚しました。まもなくして、父は陸軍に動員されました。土木技師だった父は予備役将校でした。当時のソ連では、高度な技術教育を受けた人はだれもが陸軍予備軍の将校でした。父は陸軍に入る前からの経験もあって、中央アジアの鉱山や工場など戦略的に重要な施設を建設するために召集されました。結婚した翌年の1942年は、父がタシケントに帰ることはほとんどなく、帰ってきても1日か2日の滞在で仕事に戻って行ったそうです。

また、ずっと後になって母の同僚や友人から聞いた話では、私が生まれた時、母は母乳が出ず、負傷兵を治療する病院の薬局の責任者として得た給料の大半を使って、コップ2杯の牛乳を毎日手に入れ、私に飲ませたそうです。

第二次世界大戦が終わったのは私が2歳の時でしたから、私は戦争のことをほとんど覚えていません。しかし、戦後の困難な時代は覚えています。パンを求める長蛇の列や、長く欠乏していた砂糖が初めて店頭で並んだ時のこと、そして路上で物乞いをする多くの人たちです。その中には、たくさんの勲章をつけてはいるものの古びた軍服を身にまとった、手や足を失ってしまった人たちもいました。親しい学友の中には、戦争で父親を亡くした者もいました。

1944年から1954年までの期間、私の父は、下士官として、タシケントから130キロメートル離れた半砂漠地に戦略的な水力発電所用のダムを建設するように命令を受けました。この発電所はウラン工場に電力を供給するためのものでした。

50 Years of Continuous Revolution in Astrophysics and Cosmology

Rashid Alievich Sunyaev



Fig. 1 父のアリ・スニヤエフ (1912-1981) と母のサイダ・キリディーワ (1917-2011) と一緒に (1945)
With my parents (1945): father Ali Sunyaev (1912-1981) and mother Saida Kilydeeva (1917-2011)

1. Family and childhood

I was born in the middle of the Second World War in 1943 in Tashkent—a large multi-ethnic city on the former Silk Road, the capital of Uzbek Soviet Socialist Republic in the former Soviet Union. This was a very difficult time for the population of the Soviet Union. All resources were given to the people fighting on the fronts. The civil population was close to the edge of starvation. The Western part of the country, the most populated, was occupied, and a lot of people and industrial factories moved from Ukraine and Western Russia to the East of the country including Tashkent.

My mother and father married in October of 1941, several months after the war crossed the borders of the Soviet Union. Soon, my father was mobilized to the army. He was a civil engineer and an officer in the reserves—everybody with higher technical education was an officer in the army reserves in the Soviet Union at that time. He was drafted to build strategically important objects such as mines and factories in Central Asia, because this was what he was doing before joining the army. He only visited Tashkent several times for a day or two during 1942.

5歳の時に妹が生まれ、私は、タシケントからそれほど遠くない南カザフスタンのカザフ族の小さな村で亡命生活を送っていた母の両親の元に預けられました。6歳の時にタシケントに戻りましたが、私はロシア語をすっかり忘れてしまっていて、カザフ語とタタール語だけをうまく話せる状態でした。今でも、カザフ語の歌を聞いたり、半乾燥地帯の小高い草原を見ると、特別な感情がこみ上げてきます。その風景は南カザフスタンの典型的なものだからです。

祖父が、その後、たびたび馬に乗ってタシケントまでやってきたことを懐かしく思い出します。たいていは、朝遅くにやってきて、まだ日没には十分時間があるのに帰っていきました。その祖父は1951年に亡くなりました。

私たちは、当時2つの地区に分断されていたタシケントの「ヨーロッパ人区」の中心部に住んでいました。人口の過密な旧市街は主に原住民のウズベク族によって占められ、この新市街は、町が1865年に制圧された後、ロシアの総督府によって建設されました。新しいロシア人市街区は古代ローマの軍隊野営地をモデルにして設計されました。後に、タシケントのウルクベク天文研究所にあった新市街区の古い軍用地図を見る機会があり、20年毎にこの新市街区がどのように拡張されてきたかを知ることができ、それは大変興味深いことでした。

私のクラスには40人の生徒がいましたが、ソビエト連邦の広大な領土を構成する多くの民族の中の少なくとも12の民族が集まっていました。すなわち、ロシア人、ウクライナ人、アシュケナージとブハラユダヤ人、ウズベク人、ポーランド人、タタール人、リトアニア人、アルメニア人、アゼルバイジャン人、ドイツ人、それに韓国人がいました。このような多文化環境の中で共に暮らすことは楽しい経験でした。各々が家庭では母国語を話す一方で、4階建ての大きなロシア系の学校に集まってくるのです。ユダヤ人、ウクライナ人とポーランド人の子どもは、国土の西側がドイツ軍に占領された後の戦時中に移ってきました。

タシケントはその当時からずいぶん変わりました。私が卒業する頃には、多くのウズベク人の学生が、近くの工科大学、医科大学や農業工学専門の大学に学びにくるようになりました。70年代には、ヨーロッパ人地区だった新市街は地元民族との融合が

Much later, I was told by colleagues and friends of my mother, that she had no milk when I was born and she was spending most of her whole salary as the head of the pharmacy in the hospital for wounded soldiers to get two glasses of cow milk a day for me.

I hardly remember anything about the Second World War because I was only 2 years old when it finished. However, I remember difficulties of the post war years. The long lines for bread, sugar appearing for the first time in the shops after a long period of scarcity, and many beggars on the streets, often without legs or hands, but with a lot of medals and ribbons on their old military uniforms. Several of my close friends at school lost their fathers during the war.

From 1944 until 1954, my father, as an enlisted officer, was commissioned to build a dam for a strategic hydropower station in the semi-desert 130 kilometers from Tashkent. This power station was required to supply energy for uranium plant.

At the age of 5, when my sister was born, my mother sent me to her parents living in the exile in small Kazakh village in Southern Kazakhstan, not very far from Tashkent. When I returned to Tashkent at the age of 6, I did not remember a word of Russian and was fluent only in Kazakh and Tatar languages. Even now, when I hear Kazakh songs or see the semi-arid hilly grasslands I have some special feelings. This is the typical landscape of Southern Kazakhstan.

I remember warmly how, later, my grandfather would come on a horse to Tashkent, usually in the late morning and left well before the sunset. He died in 1951.

We were living in the central part of the “European” half of Tashkent, which at that time was still divided into 2 parts. The overcrowded old city, which was mainly occupied by the local Uzbek population, and the new city which was built by the Russian colonial administration after the city was conquered in 1865. The new Russian city was planned as a Roman military camp. It was of interest for me to see later, in the Ulugh Beg Astronomical Institute in Tashkent, the old military maps of the new part of the city and how it has expanded every 20 years.

一層進みましたが、逆にロシア人が旧市街に移ったということはほとんど聞きませんでした。

1990年代になると、多数の人たちがタシケントを離れ、ロシア、イスラエル、米国、ドイツ、そしてカナダなどへ移って行きました。

1954年のその日のことを、今でも鮮明に覚えています。1台のトラックが私たちの小さな家の近くに止まると、2人の労働者が父を担架に乗せて運んできました。その時家にいたのは妹と私だけでしたので、彼らは私に説明しました。父はリウマチを突然発症して歩けなくなり、自宅療養することになったのです。ソ連中央アジアの2大河川の1つ、シルダリア川の冬の冷たい水に入る必要がなくなりました。その日から私の日常は一変しました。その晩、眠りにつく前に、父は古代史の話を2、3してくれました。それ以後何年もの間、私は何でも父に質問ができ、父もそのつど、易しく、そして分かりやすく答えてくれたり説明してくれたりしました。私は学校では優等生の1人でしたが、先生の多くは私が質問をするのを嫌がりました。答えることができなかったからです。しかし、私は、夜まで待てば、父がそれらの質問に答えてくれるのが分かっていました。

学校の科目では特に歴史、地理そして文学が好きでした。数学も好きでしたが、父や学校の友人と歴史について話す方がずっと楽しかったのです。それに、数学については、学校の履修内容以上に勉強する環境もありませんでした。15歳になってようやく図書館にたくさんの数学の本があることを知り、モスクワ大学の過去の入試問題を多く解くようになりました。これは学校の数学の先生からアドバイスをいただいたおかげで、今でもその先生には感謝しています。この先生は私たちのクラスを3、4人のグループと30人以上のグループの2つに分けました。少人数のグループにはかなりの難問を与えた上に、残りのクラスの生徒よりもはるかに厳しい評価をしました。しかし、学期の終わりには、私たち全員の最終成績はいつも「優」になりました。この先生は、いろいろな問題の載っている本がどこにいけば手に入るかを教え、それらの問題を簡単に解けるようになれば、良い大学に入れるだろうと繰り返しおっしゃいました。とうとう17歳になって卒業する頃には、私はナッツの殻を割るように簡単に問題を解いていました。

In my class of 40 children, we had representatives of at least 12 different ethnicities from hundreds populating the huge territory of the Soviet Union. It was interesting to live in this multi-cultural environment together with Russian, Ukrainian, Ashkenazi and Bukhara Jews, Uzbek, Polish, Tatar, Lithuanian, Armenian, Azeri, German and Korean, speaking their mother tongues at home, but coming together at the big 4 story Russian school. Many of the Jewish, Ukrainian and Polish children moved to Tashkent during the war, after the Western parts of the country had been occupied.

Tashkent has changed enormously since that time. When I was finishing school, a lot of Uzbeki students were coming to study at the nearby Technical University, Medical University, and the University of Irrigation and Agricultural Machinery. In the 70s, the new city, the European part of the city, integrated with the local population even more, but I hardly know any Russians who moved to the old Uzbek part of the city.

In 1990s, hundreds of thousands of people left Tashkent, mainly for Russia, Israel, USA, Germany and Canada.

That day in 1954 is still fresh in my mind, when a truck came close to our small house and two workers brought my father on a stretcher. They told me, as I was home alone with my sister, that father was unable to walk due to an acute episode of rheumatism and that he would now live at home and would not have to enter cold winter waters of the Syr-Darya River, one of the two largest rivers of Central Asia. My life changed completely on that day. That very evening before I went to sleep, my father told me several stories from the ancient history. For years, I was able to ask him any question and he always knew a simple and understandable answer or explanation. I was one of the best students at school and many of my teachers were unhappy when I asked questions because they were unable to answer them. I knew, however, that in the evening my father would answer these questions.

I enjoyed history, geography and literature much more than any other disciplines at school. I liked mathematics too but it was much more interesting for me to speak with my father and school friends about history. Also, I had no place to study mathematics more intensively than the school program provided. Only at

1960年の早春、高校卒業を数ヵ月後に控えて、私は数学オリンピック（若者を対象にした数学の競技会）のいくつかで優勝し、全ソビエト中央アジア・カザフスタン地区数学オリンピックで2人の最優秀者の1人になりました。その結果、全ソビエト連邦オリンピックに出場することになり、モスクワに1週間派遣されましたが、そのオリンピックの成績は芳しくありませんでした。モスクワでは、私たちはモスクワ大学の巨大な中央棟内にある（当時の）新しい学生寮に宿泊しました。私は、モスクワ大学の寮での生活が快適で立派な学生食堂があることに大変感動しました。その時の私のルームメイトは数学科の3年生でしたが、彼は、モスクワ大学もいいが、モスクワ近郊の物理工科大学の方が、科学教育の質はさらに高いと教えてくれました。

オリンピックが終わって家に帰ると、父は、私に歴史研究の専門家になってはならないと話をしました。父は、歴史を知りその教訓をよく学ぶことは素晴らしいことではあるが、親しい友人の中で歴史研究家になった者は全員が逮捕され、命を落とした者もいると言うのです。そして、数学者になって、同時に電気工学などの工学の教育を受けるのが最善であることを私に理解させようとしていました。

私は、中央アジア数学オリンピック勝者として、地元タシケントの大学入学試験を受けるように勧められましたが、モスクワ郊外にある難関大学、モスクワ物理工科大学に挑戦することにしました。6月の中旬には高校の卒業試験のすべてに合格しましたので、両親はモスクワ行きの航空券を買ってくれ、私は、世界制覇に向けて出発しました。1960年6月末のことで、私は17歳でした。

2. モスクワの学生時代

モスクワの衛星都市、ドルゴブルドヌイ市にあるモスクワ物理工科大学の学生寮の住環境はモスクワ大学よりもずっとひどいものでした。受験生は5人一部屋でした。そして、すぐに気づいたのですが、受験生はそれぞれがクラストップの成績の持ち主で、当然ながら全員がこの大学を目指していました。競争率は11.5倍でした。今でも不思議でならないのですが、どういうわけか私はすべての試験に合格し、面接試験に進みました。この面接は、3科目（数学、物理、ロシア語）の筆記試験と数学、物理、外国語（私の場合はドイツ語）の3科目の口述試験の全6科目に合格した者の中

the age of 15 I discovered the library with many math books and started to solve a lot of problems which were used in the entrance examinations to Moscow University. This was the advice of the math teacher at our school and I am still grateful to her. She separated our class into two groups: one of 3 or 4 boys and the other of 30+ children. To the small group she was giving very difficult problem sets and was grading our work much worse than to that of the rest of the class. However, at the end of the term, we all saw that our final grades were always excellent. This teacher told us where we could find books with hundreds of different problems, and repeated many times that we would be able to enter a good university only if we could easily solve any of the problems in these books. Finally, by the time I was finishing school at 17, I was solving the problems as easily as cracking nuts.

During the early spring of 1960, several months before graduating from high school, I won several mathematical Olympiads (competition among young people in mathematics) and got one of the two highest places in the mathematical Olympiad of whole Soviet Central Asia and Kazakhstan. Then I was sent for a week to Moscow to participate in the All Soviet Union Olympiad. I was not very successful at that Olympiad. In Moscow we stayed in the new (at that time) student dormitory in the main giant Moscow University building. I was very impressed by how good the life in that dormitory was and how good the student cafeteria was at Moscow University. My roommate was a student of mathematics in his 3rd year who told me that Moscow University is OK, but at the Institute of Physics and Technology near Moscow, the quality of scientific education is even higher.

When I returned home, my father told me that he was strongly against any attempt on my part to study history and become a professional historian. He told me that it is great to know history and its lessons well, but several of his close friends became scientists in the field of history and all of them were arrested and some of them lost their lives. He tried to explain to me that it would best to become a mathematician and at the same time get an education in some kind of engineering, such as electrical engineering.

As a winner of Central Asia mathematical Olympiad, I was invited to take the entrance exams to the local Tashkent university but decided to try to pass heavy entrance exams to Moscow Institute of Physics and Technology in the suburbs of

から入学者を決定するためのものでした。

この段階でも競争率はまだ2倍以上ありました。私は、1929年にモスクワから400キロメートル離れた中央ロシアのタタール人の村から追放された私の祖父たちの家族の情報がKGBから流れているのではないかと大変心配になりました。1929年と1930年に、スターリンの農業集団化政策によって何百万人もの文化人や善良な市民が亡命へと追いやられました。多くの人たちが、そこに留まれば自分たちの運命はさらに悪くなると考えて、町や村を離れたのです。私の父方の祖父は1929年に捕らえられ、(近くの町で高校生だった父を除く) 家族全員と共に木材伐採労働のためにシルカ川の収容所に送られました。シルカ川は、東シベリアとロシア極東を流れる大アムール川の主要な支流の1つです。私の2人の叔母は、12歳と14歳でしたが、強制労働収容所(ゲーラグ)の囲い地の中で亡くなりました。後に、一家は収容所を脱出し、似た言語が話されているタシケントに逃れました。タシケント当局から私の家族に関する情報がモスクワ物理工科大学に届いたのは、幸いなことにずいぶん後になってからで、その時には私はすでに最優秀の学生の一人になっていました。大変幸運だったのは、私の高校からの推薦状の内容が良かったことでした。

大学では、数学で良い成績を上げ、2年間の一般教育の後、数学専攻の誘いを受けました。私はそのことに大きな誇りを感じましたが、その道には進まず、物理を研究することに決めました。今もこの自分の決定に満足しています。

3. ヤーコフ・ゼルドヴィッチ先生との研究

私の恩師となるヤーコフ・ゼルドヴィッチ先生と最初にお会いしたのは1965年のことでした。それは先生が、多くの物理学者や技術者がソビエトの原子爆弾、水素爆弾の研究をしていた秘密都市、アルザマス16からモスクワに戻られた翌年でした。先生は、その業績により、社会主義労働英雄の金星章を3回受章しておられます。1回の受章でもソ連では非常に重要な功績があると讃えられましたが、ゼルドヴィッチ先生は3回も受章され、当時ではそれ以上の受章はありませんでした。

ゼルドヴィッチ先生との出会いは、私の人生を根本から変えてしまいました。最初

Moscow. In the middle of June, I passed all school exams. My parents bought me a flight ticket to Moscow and I left home to conquer the world. These were the last days of June in 1960. I was 17.

2. Student in Moscow

The living conditions in the dormitories of the Moscow Institute of Physics and Technology in the city of Dolgoprudny were much worse than at Moscow University. The potential future students were living 5 in a room and I immediately realized that everyone was best in their class and they all wanted to enter the university. The number of applicants was 11.5 times higher than the number of places available. I still can not understand how it happened but I passed all exams and was invited to an interview, which was to decide who would be accepted among applicants who had passed all 6 exams, three (mathematics, physics and Russian) were written and the three oral were in mathematics, physics and Foreign language (German in my case).

I heard that at this stage there were still more than 2 applicants per place. I was very afraid that the KGB would have passed the information about the families of my grandfathers who in 1929 were both forced to leave the Tatar villages in Central Russia 400 km south-east of Moscow where they were living. Millions of educated or just doing well people were sent to exile during Stalin "collectivization" in 1929 and 1930. Many left their cities and villages understanding that in the opposite case their fate would be much worse. My paternal grandfather was arrested in 1929 and sent with his whole family (except my father who was a student at the high school in a nearby town) to a camp on Shilka River, one of the key tributaries of the great Amur River in eastern Siberia and the Russian Far East, to cut down trees. Two of my aunts 12 and 14 years old died in that compound which was part of the GULag system. Later the family escaped the compound and fled to Tashkent where people spoke similar language. Fortunately, information about my family from Tashkent authorities reached the Moscow Institute of Physics and Technology much later-after I was already one of the best students there. I was very lucky because the reference letter provided by my high school was excellent.

の出会いから1970年の末までにかけては、最高に楽しく充実した日々でした。ほぼ毎日、先生は朝に電話を掛けてこられました。私がドルゴブルドヌイ市にある大学の寮で夜を過ごした時には私から電話をしました。研究の進み具合を打ち合わせしたり、その日のミーティングの時間を決めたりしていました。先生からの電話は、知り合ってから25年間ずっと続きました。私はたいてい夜遅くまで研究をしていましたが、先生は朝早く起きて、しばしば朝の8時頃には電話を掛けてこられました。

先生に最初にお会いした時のことをよく覚えています。その時、先生は宇宙物理学の問題を解くために一緒に研究をしようとお誘いになりましたが、私は、宇宙物理学の研究はしたくないと答えました。その理由は、学部長が次のように忠告してくれたからでした。「君は優秀な学生なのに、どうして宇宙物理学をやりたいのかね。宇宙物理学は役に立たない科学だよ」。

ゼルドヴィッチ先生は非常に巧妙でした。「2つの小さな問題を解決するために力を貸してほしい。それが終われば場の理論に戻ろう」と言われたのです。これらの2つの問題を解決した後、私は二度と場の理論に戻りたくないと思いました。宇宙物理学のおもしろさとすばらしさに気づいたのです。そして、私は宇宙物理学の分野に人生を捧げることになりました。

私は1965年3月にヤーコフ・ゼルトヴィッチ先生の門下生になりました。先生にとっても、特に天文学全体にとっても幸せな時期でした。多くのロシア人天文学者は、1965年から1968年のモスクワのシュテルンベルク天文研究所で開催されたセミナーを記憶しています。このセミナーは、ゼルドヴィッチ先生と、後にノーベル賞を受賞したヴィタリー・ギンツブルク先生、そしてヨシフ・シクロフスキー先生の3人が共同で運営の指揮を執りました。ソ連の有名な天文学者のほとんどが会場に席を並べ、ユージン・リフシツ先生やアンドレイ・サハロフ先生といった偉大な物理学者がときに顔を見せていました。シュテルンベルク天文研究所の会場は満席となり、席のない聴講者のために両側のドアが開け放たれ、その先には遅れてきた参加者が群がっていたのを覚えています。後にソビエト宇宙物理学の精鋭となる多くの若い研究者も参加していました。



Fig. 2 恩師のヤーコフ・ゼルドヴィッチ先生と私
(1970年代初頭)
Academician Yakov Zel'dovich and Rashid Sunyaev
in early 1970s

At the university I was good in mathematics. Although I was very proud when after two years of general education I was invited to become a student in chair of mathematics, I decided not to do this but to study physics. I am happy with that my decision.

3. Working with Yakov Zel'dovich

I met my future mentor academician Yakov Zel'dovich, in 1965, one year after he returned to Moscow from the classified city of Arzamas-16, where a lot of physicists and engineers were working on the Soviet atomic and hydrogen bombs. For this work he was decorated with three Golden Stars of Hero of Socialistic Labor. A person who had one star was considered enormously important in the Soviet Union. Zel'dovich had three, and this was the absolute maximum at that time.

My meeting with Zel'dovich completely changed my life. From the time I met him to the end of 1970, my life was full of festivity. Nearly every day he called me in the morning or I called him when I spent the night in Dolgoprudnyi, at my university dormitory, to discuss how the project was going or to fix a time for our meeting that day. He did this all 25 years we knew each other. I usually worked very late into the night, but he woke up very early and called me often around 8 in the morning.

残存放射（宇宙マイクロ波背景放射）の発見後に開催された最初のセミナーを思い出します。ゼルドヴィッチ先生は、あたかも自明のごとく、地球の速度を測定する手段としての双極子成分について、また、この放射によって決定されるであろう基準系の存在について講演されました。このセミナーにおいて、先生は、初めて、非等方宇宙の場合の四極子成分についてと背景放射には必然的に角度揺らぎが存在することについて発表されました。それから1年経って、ネイチャー、フィジカル・レビュー・レターズ、アストロフィジカル・ジャーナル・レターズの「最新号」を読み（このころようやくこれらのジャーナルが私たちのところにも届くようになりました。）、研究成果には認知される水準というものがあり、このようなジャーナルに投稿する水準にあるケンブリッジ大学、プリンストン大学、そしてモスクワ大学の宇宙論者は、お互いに遅れをとることなくその成果を把握できることを、ようやく理解しました。そして、その時、ゼルドヴィッチ先生のそばにいること自体が、少なくとも、世界的な水準にあることを初めて認識したのでした。

4. 宇宙物理学の革命

50年代の終わりから60年代初めにかけては、宇宙論と高エネルギー天文学にとって最高と呼べる時代ではありませんでした。天文学を知る人たち、特に若い人たちは、宇宙マイクロ波背景放射が「なかった」と聞けばショックを受けるでしょうが、それが発見されたのは1965年の半ばになってからのことです。ブラックホール、恒星質量ブラックホールや超大質量ブラックホールも、そしてクエーサーも、後に発見されたのです。ガンマ線バーストも知られていませんでした。電波パルサー、ミリ秒パルサー、降着駆動型パルサー、特異パルサー、X線バースター、マグネターなど多様に分類をされ、ありふれた死の星として考えられている中性子星さえ存在していませんでした。つまり観測されていなかったのです。今では近隣恒星周辺で見つかったり太陽系外惑星についても何も分かていませんでした。ライマン α 雲も同様でした。すなわち、この50年で非常に多くのことが発見されたのです。まさにこれは天文学における大革命だと思います。おそらく天文学では直近の50年のようなすばらしい時代はなかったと思います。そして、その50年の始まりの頃に、私はゼルドヴィッチ先生の研究グループに加わったのでした。

I remember our first meeting, when he told me that he would like to solve astrophysical problems with me, and I told him that I would not like to work in astrophysics. The reason was that our department chair advised me: "You are a good student. Why do you wish to go to astrophysics? Astrophysics is a useless science."

Zel'dovich was extremely clever. He said, "Please help me with two small problems and then we will return to the theory of fields." When I solved these two problems, I never again wanted to return to the theory of fields because I recognized how interesting and how great astrophysics is, and then I spent whole my life in the field of astrophysics.

I became a student of Yakov Zel'dovich in March of 1965, at a time that was happy for him, and indeed for all astronomy. Many Russian astronomers remember the seminars at the Sternberg Astronomical Institute in Moscow in 1965–1968. The seminar series was led jointly by Zel'dovich, future nobelist Vitaly Ginzburg, and Joseph Shklovskii. Most well known astronomers of the Soviet Union were sitting in the hall and great physicists like Eugene Lifshitz or Andrei Sakharov occasionally appeared. And I remember the conference hall at the Sternberg Astronomical Institute, packed to the limit, with doors open on both sides, behind which clustered the latecomers, for whom there were no seats left. And I remember many young people, who later became the flower of Soviet astrophysics.

I remember the first seminars after the discovery of relict (cosmic microwave background, CMB) radiation, when Zel'dovich talked, as if it were something obvious, about the dipole component as means for measuring the velocity of the Earth, and about the presence of a reference system that could be defined by this radiation. I remember how I first heard from him at these seminars about the quadrupole component in the case of an anisotropic universe, and the unavoidable existence of angular fluctuations of the background. Only a year later, reading "fresh" issues of Nature, Physical Review Letters, and Astrophysical Journal Letters (when they were finally reaching us), did I understand that there existed a level at which these things become evident, and cosmologists of this level in Cambridge, Princeton, and Moscow were able to seize the same ideas simultaneously. And then I realized for the first time that to be alongside Zel'dovich meant, at a minimum, to be at the world-class level.

世界の研究グループの多くがこの革命を起こし始めたのは50年代の終わり頃です。非常に有能で経験豊かな科学者が、原子爆弾の開発、レーダー研究、その他数多くの物理学の軍事応用研究の場から基礎科学研究の場に戻り、中には宇宙物理学、電波天文学や宇宙論の研究の可能性を得た科学者もいました。少なくともモスクワ大学のゼルドヴィッチ先生の研究グループ、ケンブリッジ大学のマーチン・ライル卿の研究グループ、プリンストン大学のロバート・ディッケ博士の研究グループ、そして多くのアメリカの研究グループがそれに該当していました。実験天文学の飛躍の別の理由として、弾道ミサイルの開発やスプートニクやそれに続く最初の簡単な科学観測機器を搭載した人工衛星の打ち上げ、そして超大国間の止むことのない宇宙開発競争なども少しは関係していました。これらの人工衛星によって、天文学者は地球の大気を越えて観測する機会が与えられるようになり、その結果、地球表面からは全く観測することのできなかった電磁スペクトルの新たなスペクトル帯や天体が観測されるようになりました。

正直に認める必要があるのは、当時の天文学者はすでに多くのことを知っていたということです。遠方銀河のスペクトルで観測されるスペクトル線の赤方偏移や宇宙の膨張とハッブルの法則についても熟知していました。科学者たちは、宇宙論的距離の尺度を決めようと、変光星や様々なタイプの銀河までの距離を生涯を掛けて非常に精密に測定していました。当時、宇宙物理学者は、核エネルギーが太陽やその他の恒星のエネルギーであることを知っていました。また、核物理学の急速な発展によって、星の進化の過程で生成されたり、星の死や崩壊を伴う大爆発の時に星間物質に放出されたりする化学元素の実質的にすべての起源について理解し、説明できるようになっていました。天文学者は、拡散星間物質から恒星、惑星、銀河が形成される理論の研究に熱心に取り組んでいました。しかし、その進展は非常にゆっくりとしたものでした。

5. X線天文学とブラックホールへの降着理論

60年代の終わりから70年代初めにかけて、X線検出器を積んだロケットや高高度気球による実験が行われるようになり、天空で最も明るいX線源や等方性X線背景放射の存在が確認されました。しかし、現代X線天文学の幕開けをもたらしたのは、リカ

4. Revolution in astrophysics

The late 50s and early 60s were not greatest times for cosmology and high energy astrophysics. Those who know astronomy, young people especially, will be shocked to hear that there “was no” cosmic microwave background (CMB) at all; it was discovered only in the middle of 1965. There were no black holes, stellar mass black holes, or supermassive black holes, and no quasars. All this was discovered later. No gamma ray bursts. Even neutron stars, which we consider now as trivial dead stars with multiple classes that we can enumerate: radio pulsars, millisecond, accreting and anomalous pulsars, X-ray bursters, and magnetars—none existed yet; nobody was observing them. We did not know anything about exoplanets, which are being discovered now around nearby stars. We didn’t know anything about Lyman alpha clouds. So much came to us during last 50 years, and I really think that this was a great revolution in astronomy. Maybe, astronomy never had such a great time as these 50 years, which started at about the time when I joined the group of Zel’dovich.

In many research groups across the globe the start of this revolution occurred in the late 50s when very strong and experienced scientists working on the atomic bomb program, radar physics, and many other military applications of physics returned to fundamental science and some of them got the possibility to work in astrophysics, radioastronomy, and cosmology. This was exactly the case at least for the Zel’dovich group in Moscow, Martin Ryle group in Cambridge, Robert Dicke group in Princeton and many others in USA. Another reason for the experimental jump was connected partially with the development of ballistic missiles and the launch of Sputnik and next spacecraft with first simple scientific instruments aboard and continuing competition in space between the superpowers. These satellites opened an opportunity for astronomers to begin observations beyond the Earth’s atmosphere, which in turn, opened for them additional spectral bands of electromagnetic spectrum and celestial objects completely impossible to observe from the Earth’s surface.

It is necessary to be honest and admit that astronomers already knew a lot at that time. They knew well about the redshift of the spectral lines in the spectra of distant galaxies, about expansion of the Universe and the Hubble law. Scientists

ルド・ジャコーニ博士率いるグループによる1970年末の天文衛星「ウフル」の打ち上げでした。大気圏外で行われた、こうしたX線検出器による初期の実験は、白色矮星、中性子星、ブラックホールなどのコンパクトな「死の星」や降着のプロセスに対する理論家の関心を集めました。降着というのは、例えば非常に大きな重力ポテンシャルを持った中性子星のようなものの表面に向かって重力キャプチャーが起こったり物質が落下したりすることを言います。中性子星というのは、質量は太陽質量(M_{sun})に近いはずなのに、半径は10km程度しかありません。極端に単純化した近似値で話をするなら、中性子星の表面に物体が動径方向に落下する時、その物体の速度は光速の半分以上を超えるレベルまで加速されます。この時、中性子星の表面近くで放出されるエネルギーは、 m を物体の質量とした時、およそ $0.15mc^2$ に達します。中性子星の表面積は非常に小さいため、激しい降着が起こっている間に放出されるエネルギーはX線の中でしか放射され得ず、表面温度が上昇します。

また、当時、新たな存在として注目を集めていたのが、一般相対性理論や星の進化論に関する予測で最も興味深いものの一つであるブラックホールでした。1970年、モスクワ大学での後輩研究者ニコライ・シャクラと私は、ブラックホールへの降着という問題やこのミステリアスな物体を可視化する方法に関心を抱きました。

2年強、研究に没頭したおかげで、私たちはブラックホールへの降着円盤理論に関する論文を書き上げることができました。この理論の中心となる考え方は至ってシンプルなものです。天文学者は太陽近傍の大多数の近隣恒星は連星、つまりそれぞれの共通重心の周りを軌道運動する二つの星であることを知っていました。そして連星のいずれか一方が死に絶えて中性子星やブラックホールに変わる時、まだ生きている星から死んでしまった星に向かって気体流が発生する可能性が生じるのです。

生きている星からブラックホールに流れていく気体は、大きな角運動量を保持しているため、動径方向にブラックホールへ落下していくことはできません。こうした状況は私たちの地球と非常に似通っています。つまり、地球は秒速30kmに迫る角速度で太陽の周りを回っていますが、太陽に向かう重力が遠心力によってちょうど補償されているため、太陽に向かって落下していくことはありません。太陽系の形成理論から、形成の初期段階において、原始太陽の周りを回る原始惑星円盤が存在し、地球に



Fig. 3 ブラックホール降着円盤理論を研究していた1970年代半ば、ニコライ・シャクラ(左)と。二人はまだ若く、ブラックホールは非常に明るい物体になり得ることを証明しようと懸命に研究を続けていた。当時、ブラックホールと言えば「重力ポテンシャルが強すぎて光が逃げ出すことができないため、その姿を見ることはできないが…」というのが枕詞のようにになっていた。With Nick Shakura (left) in the middle of 1970s. We both were very young when we were working on the theory of disk accretion onto black holes—trying to demonstrate that black holes are able to become very bright objects. At that time every talk about black holes was started with the statement that they are completely invisible because their gravitational potential is so strong that light can not escape.

were spending their lives measuring with high precision the distances to variable stars, to galaxies of different types, trying to build the scale of cosmological distances. Astrophysicists knew at that time that nuclear energy is powering our Sun and other stars. The rapid development of nuclear physics enabled them to understand and explain the origin of practically all chemical elements produced during the evolution of stars and released to interstellar matter during giant explosions accompanying their death and collapse. Astronomers were working actively on the theories of the formation of stars, planets and galaxies from diffuse interstellar matter. But this was a much slower process.

5. X-Ray astronomy and the theory of accretion onto black holes

By the end of the 60s and beginning of the 70s the first flights of rockets and high altitude balloons with X-ray detectors aboard led to the discovery of the brightest X-ray sources on the sky and the existence of isotropic X-ray background radiation. However modern X-ray astronomy began with the launch of the UHURU spacecraft in the end of 1970 by the team lead by Riccardo Giacconi. These first

付加重量を与えている、ということはよく知られていました。この円盤が持つ不安定さが惑星の形成につながり、この円盤が完全に消え去った現在においても、私たちはそうした惑星を観察しているのです。18世紀から19世紀、そして20世紀の前半にかけて活躍した「巨人」たちは、原始太陽系雲形成理論を打ち立て、原始惑星円盤の粘性がこうしたメカニズムの形成につながり、角運動量を円盤の外部境界に伝達し、円盤内の物質が重心に向かって渦巻き状にゆっくりと降下することを可能にしているという理論を提唱しました。ニコライ・シャクラとの連名で発表した論文では、乱流粘性や磁気粘性を記述する無次元パラメータ「アルファ」を使用することによって、厚み、物質の動径速度、内部および表面の温度など、降着円盤の主な特性を見つけることができました。エネルギー放出や降着円盤表面の明るさがブラックホールからの距離に依存していることを表す簡単な公式が見つかったのです。ここで大切なことは、円盤上のすべての地点におけるエネルギー放出が、大規模な不安定さがもたらす乱流運動や磁場の粘性加熱または粘性消散に関係していることです。乱流のエネルギー、そして最終的には降着円盤の光度の源は、降着物質の重力エネルギーだったのです。シュヴァルツシルト計量を持つ非回転ブラックホールの3重力半径に相当する距離に限界安定軌道がありますが、差動回転を行っている円盤の各層間のストレスが、この限界安定軌道近くでゼロにまで減衰するということは重要な意味を持ちます。その結果、最もシンプルなケースでは、限界安定軌道の外では円盤内で放出されたエネルギーしか観察することができません。円盤内で質量 m の物体が無限の空間からこの限界安定軌道に移動する際、 $0.058mc^2$ の物体静止質量エネルギーを放出・放射しますが、流速が \dot{M}_{dot} の場合、円盤の光度は $0.058 \dot{M}_{\text{dot}} c^2$ に相当します。

円盤表面の光度はブラックホールに近づくに従って急速に増します。また、全光度の半分以上が20重力半径未満かつ限界安定軌道の半径を上回る距離で放出されます。

私たちは円盤の光度をエディントン臨界光度へと標準化しました。この限界光度の起源は至ってシンプルです。天体の問題では、放射源からの任意の距離 R における電子への光圧力は、エディントン光度という一つの値に関してのみ、陽子をブラックホールへ引き込む重力の値とまったく等しくなります。これよりも光度が小さければ、重力が光圧力を上回ってしまい、逆に大きければ光圧力の方が勝ってしまいます。「 $L_{\text{edd}}=10^{38}(M/M_{\text{sun}})\text{erg/s}$ 」で表されるエディントン光度の数値は非常に大

experiments with X-ray detectors above the atmosphere attracted the attention of theorists to compact dead stars, like white dwarfs, neutron stars and black holes, and to the process of accretion. Accretion is the gravitational capture and infall of matter onto the surface of, for example, a neutron star having huge gravitational potential. A neutron star has a radius of the order of 10 km when its mass should be close to the solar mass, M_{sun} . In the simplest approximation, the radial fall of a body onto the surface of a neutron star will accelerate this body up to a velocity exceeding half of the speed of light. The energy release near the neutron star surface should reach the value of the order of $0.15 mc^2$, where m is the mass of the body. Due to the very small surface area of the neutron star, the energy released during strong accretion can be radiated only in X-rays, so high is its surface temperature.

Even more exotic objects at that time were black holes, one of the most interesting predictions of the general theory of relativity, and the theory of stellar evolution. In 1970 my younger colleague, Nikolai Shakura, of Moscow University, and I became very interested in the problem of accretion onto black holes and ways to make these mysterious objects visible.

After more than two years of hard work, we submitted a paper in which we introduced the theory of disk accretion onto black holes. The main idea of this theory was very simple. Astronomers knew that the majority of nearby stars in the solar vicinity are binaries: two stars rotating around the center of their mass. When one of these stars dies and transforms into a neutron star or a black hole, the possibility of the gas flow from a normal star to a dead star arises.

Gas flowing toward a black hole from another star can not fall radially onto a black hole because it has significant angular momentum. This situation is very similar to the case of our Earth, which rotates around our Sun with an angular velocity close to 30 km/sec and does not fall onto the Sun because the gravity attraction toward the Sun is exactly compensated by the centrifugal force. It was well known from the theories of the formation of the Solar System that at the initial stage of formation there was a protoplanetary disk rotating around the protoSun and supplying additional mass to our star. The instabilities in this disk lead to the formation of planets, which we are observing even now when the disk has completely disappeared. The giants in the 18th, 19th and first half of the 20th centuries created

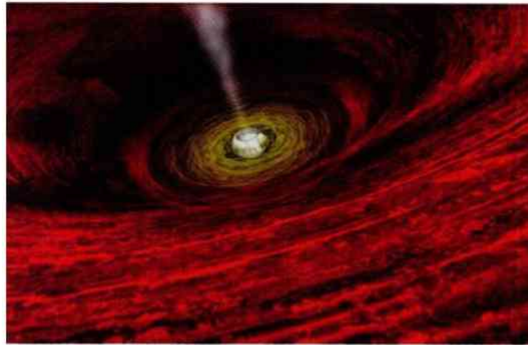


Fig. 4 降着円盤の内部領域 (チャンドラX線天文衛星が捉えたイメージ)。円盤回転軸に沿ってジェット流が見える。
Inner regions of the accretion disk (artist impression. Courtesy Chandra X-Ray Observatory) including the jet along the disk rotation axis.

きなものです。例えば、太陽と同じ質量を持つ物体であれば、その値は太陽光度の3万倍を超えます。

次にニコライ・シャクラと共同で書き上げた1976年の論文では、活動銀河核に存在する超大質量ブラックホールへの降着、そして宇宙で最も明るい物体であるクエーサーにも降着円盤理論が適用できるということを示しました。クエーサー内の降着ブラックホールの質量は、太陽質量の十億倍を超えることもあります。つまり、そのエディントン光度は銀河系全体の光度の数千倍にも達するのです。現在、天文学者は天空に存在するこうした極端に明るい物体を数十万単位で見つけ出すことができます。このような高い光度を保つため、これらの物体は数秒おきに私たちの星、地球の質量と等しい質量を降着しなければならないのです。

ブラックホールの質量と降着率が非常に大きい場合、円盤内の放射圧力は正常プラズマの圧力の何倍もの大きさになり、円盤は放射優勢となります。円盤流の安定性を分析したところ、こうした状況下で様々な不安定が生じ、円盤放射の時間変動につながります。

the theories of formation of protosolar cloud and proposed that viscosity in the protoplanetary disk might lead to the formation of the mechanisms making it possible to transfer the angular momentum toward the outer boundaries of the disk and permitting the slow spiraling of the matter in the disk toward the gravity center. In the paper with Nick Shakura we were able, using the nondimensional parameter *alpha* describing the efficiency of turbulent and magnetic viscosity, to find the key properties of the accretion disk including its thickness, radial velocity of matter, internal and surface temperatures. The simple formulas describing the dependence of the energy release and the surface brightness of the accretion disk on the distance from a black hole were found. It is important to mention that the energy release in every point of the disk was connected with the viscous heating or dissipation of turbulent motions and magnetic fields created by the large scale instabilities. The source of the energy for the turbulence and finally for the luminosity of the accretion disks was the gravitational energy of accreting matter. There is a marginally stable orbit at a distance equal to 3 gravitational radii for a nonrotating black hole having Schwarzschild metrics. It is important that the stress between different layers in the differentially rotating disk diminishes to zero near this marginally stable orbit. As a result, in the simplest cases we could observe only energy released in the disk beyond the marginally stable orbit. A body with mass m moving in the disk from infinity to this marginally stable orbit should release and radiate $0.058mc^2$, where mc^2 is the rest mass energy of a body. For the flow at the rate \dot{M} the luminosity of the disk should be equal to $0.058 \dot{M} c^2$.

The surface brightness of the disk rapidly increases toward the black hole and more than half of the total luminosity is released at distances smaller than 20 gravitational radii but exceeding the radius of the marginally stable orbit.

We normalized the luminosity of the disk to the Eddington critical luminosity. The origin of this limiting luminosity is very simple. In the spherical problem the light pressure force onto an electron at any distance R from the source of radiation is exactly equal to the gravity force of attraction of a proton to the black hole only for one value of the luminosity, which is the Eddington luminosity. At lower luminosities gravity force exceeds the light pressure force. At higher luminosities the light pressure force dominates. The numerical value of the Eddington luminosity $L_{\text{edd}} = 10^{38} (M/M_{\text{sun}}) \text{ erg/s}$ is huge. For example for an object with a mass equal to

私たちはさらに一步踏み出し、降着円盤の外部境界を通して流入する質量が、エディントン光度を生み出すのに必要なエディントン値を超えるケースの検討も行いました。1972年当時、巨大な放射圧力が円盤の内部領域からの激しい物質流出や、相対論的ジェット形成を誘発することは、すでに明らかになっていました。

その後、私は小質量連星系内の中性子星への降着という問題に大きな関心を寄せるようになりました。小質量連星系というのは数十億年前に生まれた非常に古い恒星系で、一方は小さな白色矮星または小質量の普通の星、他方はより大きな質量を持った、半径がわずか10kmほどの中性子星で構成されています。この矮星が中性子星に降着する物質（ガス）を与えています。このガスが中性子星の表面の非常に近い所に降着円盤を形成します。私たちの太陽はこうした連星系全体よりも大きなものとなります。私たちの銀河系の中にこうした連星系が数百個存在することがX線天文学者によって確認されています。

古い中性子星には低磁場（ $<10^8$ ガウス）を持っているものが少なくありません。こうした磁場は、降着円盤が中性子星の表面に到達するのを防ぐことができません。ここで中性子星を極めて丁寧に磨いたビリヤードのボールと考えてみましょう。半径はおよそ10kmです。この場合、降着円盤から落下してくる物質が、光速の半分に近いケプラー速度で中性子星の周りを回ります。この物質というのは粒子ではなく、衝突気体の流れです。中性子星の表面近くの狭い境界層でこのガスが運動エネルギーを失っていく様子は非常に興味深いものです。境界層で放出されるエネルギーが非常に強いので、境界層内の放射圧力は、降着ガスの熱圧力の数百、数千倍大きくなります。

世界には、数千名のX線天文学者や高エネルギー宇宙物理学者がいます。また、数千のX線源を見つけ出し、その性質を理解するために20を超えるX線天文衛星が軌道に打ち上げられました。特に言及すべきは「はくちょう」に始まる日本のX線天文衛星の貢献です。小田稔教授は「小さいことは素晴らしい」と私に常々話して下さいました。アメリカやロシアは巨大な天文衛星の打ち上げに躍起になるなか、日本は小型のものを打ち上げていましたが、見事な仕事をこなし、大変に興味深い科学データを提供してくれました。その後も日本の天文衛星は「ぎんが」、「てんま」、「あすか」、「すざく」が続きました。また、国際宇宙ステーションには日本の全天X線監視装置

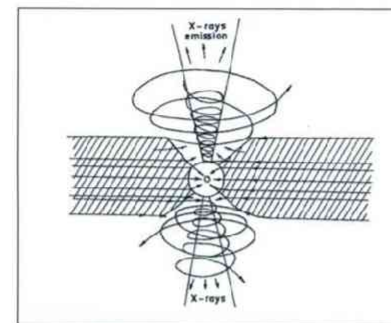


Fig. 5 超エディントン降着率で降着円盤中央領域から流出するガス（シャクラ、スニヤエフ、1973年）
The outflow of gas from central regions of an accretion disk with supereddington accretion rate (Shakura, Sunyaev, 1973)

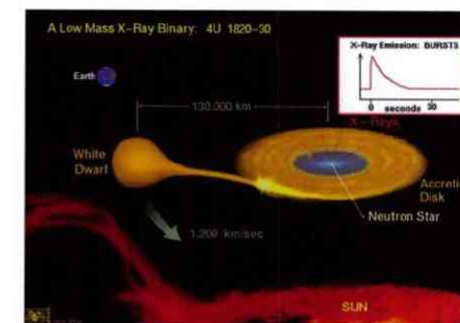


Fig. 6 小質量X線連星（イメージ、NASA提供）
The low mass X-ray binary (artist impression, Courtesy NASA)

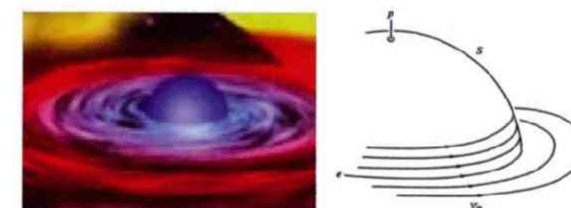


Fig. 7 磁場が弱い中性子星の周りの降着円盤の内部。左図はNASA提供のイメージ。右図はイノガモフとスニヤエフの1999年の論文より。
The inner part of the accretion disk around the neutron star with a weak magnetic field. The left image is an artist impression, courtesy of NASA. The right image is from the paper by Inogamov and Sunyaev, 1999.

the mass of the Sun, it exceeds the solar luminosity 30,000 times.

In the following paper with Nikolai Shakura published in 1976 we demonstrated that the theory of disk accretion is applicable also in the case of accretion onto supermassive black holes in active galactic nuclei and even in the case of the brightest objects in the Universe, quasars. Masses of accreting black holes in quasars often exceed a billion solar masses, i.e. their Eddington luminosities exceed by many thousand times the luminosity of our whole Galaxy. And now astronomers are

「MAXI」が搭載されています。日本の天文衛星NeXTが最先端のX線熱量計を積んで打ち上げられる日を皆が楽しみにしています。

私は日本の高エネルギー宇宙物理学プロジェクトの指導者の方々と出会い、良い関係を築くことができたことを非常に喜ばしく思っています。残念ながらすでに鬼籍に入られた早川幸男先生や小田稔先生との出会いは懐かしい思い出です。優れた科学者でいらっしゃる田中靖郎先生と何度もお話しする機会を持てたのも光栄でした。井上一先生が所長を務めていらっしゃった時代に宇宙科学研究所（ISAS）を何度も訪問したこともよく覚えています。また、ここ京都には小山勝二名誉教授が長年ご指導されていたX線実験グループや、嶺重慎教授と加藤正二名誉教授の指導の下で高エネルギー宇宙物理学理論を研究する、優れたグループが拠点を置いています。世界的にも知られる京都大学基礎物理学研究所の宇宙物理学者の皆さんもいらっしゃいます。

6. 宇宙マイクロ波背景放射

1965年、アーノ・ペンジアスとロバート・ウィルソンが「宇宙マイクロ波背景放射」を発見しました。これは私たちの宇宙を満たしており、ケルビン温度（絶対温度）で2.7度に近い温度を有しています。このすばらしい発見によって宇宙論は一変し、宇宙の歴史に関する貴重な情報が得られるようになりました。

この発見はモスクワの研究者に大きな衝撃を与えましたが、当時のことは今でもよく覚えています。私の恩師、ゼルドヴィッチ先生は、米国で研究活動を行っていたロシア人科学者、ジョージ・ガモフが1940年代末に提唱した「宇宙のホットモデル」に代わるモデルとして、その5年以上前から「宇宙のコールドモデル」の研究を行っていました。ホットモデルは、私たちの宇宙全体を満たす黒体放射の存在を予測していました。

先生は、あらゆる理論は実験によって証明されなければならない、と常々私に語っていました。そのため、先生は宇宙マイクロ波背景放射が発見されると即座に立場を変え、その後はコールドモデルのことは一切口にせず、宇宙マイクロ波背景放射の宇宙論の様々な側面を研究されるようになりました。幸運にも私は宇宙マイクロ波背景

able to detect hundreds of thousands of such extremely luminous objects on the whole sky. To maintain such high luminosity they should accrete, every few seconds, a mass equal to the mass of our Earth.

When the mass of a black hole and its accretion rate are so high, the radiation pressure within the disks exceeds, by many times, the pressure of normal plasma. These disks are radiation dominated. The analysis of the stability of disk flow showed that under these circumstances different instabilities arise, leading to a time variability of the disk radiation.

We were very brave and were even considering the case when the mass inflow through the outer boundary of an accretion disk exceeds the Eddington value necessary to produce the Eddington luminosity. It was already obvious at that time—in 1972—that huge radiation pressure would lead to a strong outflow of matter from the inner regions of the disk and even to the formation of relativistic jets.

Later I was strongly interested in the problem of accretion onto neutron stars in low mass binary systems. These are very old stellar systems, billions of years old, in which one star is a tiny white dwarf or low mass normal star and the other is a more massive neutron star with a radius of only 10 km. And the dwarf star supplies matter for accretion onto the neutron star. This gas forms an accretion disk which comes very close to the surface of the neutron star. Our Sun is bigger than the whole dimension of such a binary system. X-ray astronomers have detected several hundreds of such systems in our Galaxy.

Old neutron stars often have low magnetic fields ($< 10^8$ Gauss). Such magnetic field can not prevent the accretion disk from reaching the surface of the neutron star. Let us consider a neutron star to be like an extremely carefully polished billiard ball, with a radius on the order of 10 kilometers. In this case matter infalling from the accretion disk rotates around a neutron star with a Keplerian velocity close to half of the speed of light. And these are not particles—this is the flow of collisional gas. It's extremely interesting how this gas loses its kinetic energy in the narrow boundary layer in the vicinity of the neutron star's surface. The energy release in this boundary layer is so strong, that the radiation pressure within the boundary layer is hundreds and thousands of times higher than the thermal pressure of the accreting gas.

放射が発見される少し前にゼルドヴィッチ先生の下で研究を始めており、私が極端な宇宙物理学的条件下での物質の相互作用に関する研究に関心を抱いていたことを先生はご存知でした。

私たちが現在知っている宇宙マイクロ波背景放射は、実質的に等方性を有しています。それは私たちの宇宙を満たしており、銀河間の空間 1 cm^3 毎に400個の宇宙マイクロ波背景放射の光子が存在するのです。原子やバリオン、電子の平均濃度はこれより遥かに小さく、宇宙における光子の密度はその十億倍以上となります。私たちの宇宙は放射優勢なのです。星、その他の既知の放射線源でそれほど大きな量の光子を作り出すことは不可能です。宇宙マイクロ波背景放射とは、私たちの宇宙が持つ固有の性質であると言えます。実質的に等方性を有しているため、その輝度はどの方向から観察しても変わりません。現在、私たちは、あらゆる天体の中でも最高の黒体放射スペクトルを宇宙マイクロ波背景放射が持っていることを知っています。黒体放射スペクトルに関するプランクの放射公式からの逸脱する例はまだ見つかっていません。

私たちの宇宙は膨張しており、放射の現在の温度は2.725 K (ケルビン) という低さです。膨張が続けば、温度が漸熱的に低下していきます。つまり、放射温度は過去の方が高く、赤方偏移と共に上昇します。そのため、赤方偏移が十分に高い時、密度と温度が上昇し、陽子と中性子の原始混合からヘリウムの核融合反応が生じるのです。

今でもよく覚えているのですが、1965年の春、ゼルドヴィッチ先生に師事しました頃、私は後に京都賞を受賞される林忠四郎先生の論文をちょうど読んでいたところでした。その論文は、宇宙ができて僅か数分後の熱い宇宙で放射線場や元素合成と熱力学的平衡を保っているニュートリノや陰陽電子対についてのものでした。ガモフ教授とその後輩研究者であるラルフ・アルファーとロバート・ハーマンが、宇宙膨張が始まってから最初の数分間で、観測可能な化学元素をすべて作り出すことが可能であると当初から考えていたということをここで指摘しておくべきでしょう。彼らは、その当時分類されたすべての核反応に関わる断面積を知らず、3つのヘリウムの核を結合して炭素を生成することが極度に難しいことを知らなかったのです。現在、私たちは私たちの宇宙に存在するヘリウムの大部分、そして事実上すべての重水素、ヘリウ

The community of X-ray astronomers and high energy astrophysicists in the world consists of several thousand scientists. More than 20 X-ray spacecraft were launched into the orbit to help discover thousands of X-ray sources and to understand their nature. I should especially note the contribution of the Japanese series of X-ray spacecraft, starting with HAKUCHO. Prof. Minoru Oda told me several times that “small is beautiful” because Americans and Russians were trying to launch huge spacecraft, while Japan was launching small spacecraft, but they functioned very well and provided extremely interesting science. And there were also GINGA, TENMA, ASCA, SUZAKU. There is the Japanese all-sky monitor MAXI on the International Space Station. We all dream about the time when the Japanese NEXT spacecraft will be in the sky with sophisticated X-ray calorimeters.

I was very happy to meet and have good relations with the leaders of the Japanese high energy astrophysics program. I remember warmly my meetings with Satio Hayakawa and Minoru Oda; unfortunately, they are no longer with us. But I am happy to speak rather often with Yasuo Tanaka, a great scientist. I remember well my frequent visits to ISAS (Institute of Space and Astronautical Science) when Hajime Inoue was the director there. I must add that here in Kyoto you have a successful X-ray experimental group which was led for many years by Prof. Katsuji Koyama, and you have an excellent group of theorists who are working in high energy astrophysics under the leadership of Professors Shin Mineshige and Shoji Kato. There is also a world recognized group of cosmologists in the Yukawa Institute for Theoretical Physics at Kyoto University.

6. Cosmic Microwave Background Radiation (CMB)

In 1965 Arno Penzias and Robert Wilson discovered Cosmic Microwave Background Radiation, which fills our Universe and has a temperature close to 2.7 degrees on the Kelvin scale. This great discovery has completely changed cosmology and provided unique information about the history of our Universe.

I remember well the shock reaction in Moscow connected with this discovery. My mentor, Zel'dovich, had been developing for more than 5 years the “cold model of the Universe” as an alternative to the “hot model of the Universe” proposed by George Gamow, a Russian scientist working in the United States, at the end of the

ム3、そして電池、ノートパソコン、電話などに使われているリチウムでさえもが宇宙膨張の最初の3分間で作り出されたものであることを知っています。炭素より重い元素はすべて、3つのヘリウム核から炭素を作成することを可能にする密度や温度の条件が揃った大質量星で作られました。

6 a. 初期宇宙でのエネルギー放出による宇宙マイクロ波背景放射のスペクトル変形。 私たちの宇宙の黒体光球

1965年のことです。いろいろな断面積を試している時に、私は電子による宇宙マイクロ波背景放射のトムソン散乱が、初期宇宙の不透明度に関わる、最も重要なメカニズムであることに気づきました。ごく簡単な試算を行っていたのですが、制動放射によって、宇宙のロスランド光学的深さが信じられないくらい小さくなってしまっていることに気づき、非常に驚いたのです。宇宙マイクロ波背景放射のスペクトルに影響を与える物理プロセスの詳細を研究する必要があるのは明らかでした。つまり、宇宙が進化を続ける間、黒体放射を作り出すことは一体可能なのか、ということです。

その後、初期宇宙におけるエネルギー注入に関する数多くのメカニズムが理論物理学者や宇宙物理学者によって提唱されました。現在、私たちは、例えば物理実験室では未だ検知されていない、暗黒物質の対消滅や粒子の崩壊によるエネルギー放出を検知することが可能であるか否かということに関心を寄せています。ここで明確な疑問が生じます。それは、「こうしたプロセスは、宇宙マイクロ波背景放射のスペクトル上にどういった種類のスペクトル変形を残すのか」というものです。宇宙物理学者は、トムソン散乱は光子の周波数を変えないため、宇宙マイクロ波背景放射のスペクトルには影響を与えない、と普通は考えます。しかし、大学で講義を聞いた後、私は準相対論的電子によるコンプトン散乱は光子の周波数を変えると共に、光子を作り出す（二重コンプトン）ということを思い出しました。このテーマについて書かれたものとしては、私はアレクサンドル・カンパニエーツが1956年に著した論文をすでに入手しており、アヒエゼールとベレステッキーの共著「Quantum Electrodynamics（量子電磁力学）」も寮の本棚に収まっていた。この本は今でも私のお気に入りの一冊です。カンパニエーツの論文からは多くのことを学びました。熱的（動的）電子によって散乱された光子は、平均するとエネルギーを増していますが、光子のエネル

1940s. Hot model was predicting the existence of the black body radiation filling whole our Universe.

Zel'dovich told me several times that any theory should be proven by experiment. This was the reason why he immediately changed his mind after the discovery of CMB, never again mentioned the cold model and started to work on various aspects of CMB cosmology. I was very lucky because I joined Zel'dovich a little before the discovery of CMB and he already knew that I was interested in the work on interaction of matter with radiation under extreme astrophysical conditions.

Cosmic Microwave Background Radiation, as we know now, is practically isotropic. It fills our Universe, and in every cubic centimeter of the space between galaxies we will find 400 CMB photons. The average density of atoms or baryons and electrons is much lower: the density of photons in the Universe exceeds it by more than a billion times. Our Universe is radiation dominated. It is impossible to create so huge amount of photons in stars or other known sources of radiation. CMB radiation is an intrinsic property of our Universe. Its brightness does not depend on the direction of observation—it is practically isotropic. Today we know that CMB has the best black body spectrum among all celestial objects. No deviations from the Planck formula for the black body spectrum have been detected yet.

Our universe is expanding, and the current temperature of radiation is as low as 2.725K. Expansion should lead to the adiabatic decrease of the temperature. This means that the radiation temperature was higher in the past, i.e. it increases with redshift. Thus, at sufficiently high redshift the density and temperature will be high enough to permit nuclear fusion reactions of helium from the primordial mixture of protons and neutrons.

I remember well that when I'd just become a student of Yakov Zel'dovich in the spring of 1965, I was reading a paper by Prof. Chushiro Hayashi, future Kyoto Prize winner. This paper was about neutrinos and positron-electron pairs in thermodynamical equilibrium with the radiation field and nucleosynthesis in the hot Universe when the Universe was only a few minutes old. It is important to mention that Gamow and his younger colleagues, Ralph Alpher and Robert Herman, thought initially that it would be possible to create, during the first minutes of the Universe

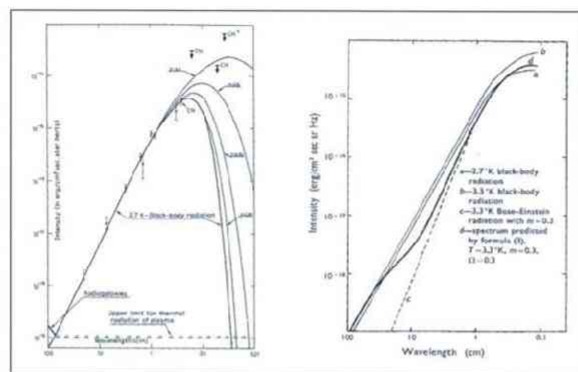


Fig. 8 宇宙マイクロ波背景放射のスペクトルの y -パラメータ変形を左に、 μ -変形を右に示す（スニヤエフとゼルドヴィッチの1970年の論文より）

The y -parameter distortion of the CMBR spectrum is illustrated on the left, and the μ -distortion on the right. (from Sunyaev and Zel'dovich 1970)

ギーが温度の4倍を超えると、反跳効果が優勢になります。その結果、光子は「コンプトン化」と呼ばれるこのプロセスによって周波数上に再分配されます。最終的には、ゼルドヴィッチ先生と私は、初期宇宙に発生した何らかのエネルギー放出に起因する二種類の重要な宇宙マイクロ波背景放射のスペクトル変形を発見することができました。現在、これらは宇宙マイクロ波背景放射のスペクトルの y -タイプとボース=アインシュタイン変形もしくは μ -変形と呼ばれています。自由電子で光子の数を保った散乱を行う時、放射線スペクトルは、非零化学ポテンシャル μ を持ったボソンガスに特有のフォームにまで緩和します。この二種類の変形をFig. 8に示します。

しかし、制動放射（そして二重コンプトン放射）は低周波数で光子を作り出すことができ、その光子はコンプトン化によって高エネルギー化されると同時に μ を下げ、さらには真の黒体スペクトルにまで緩和します。この問題の完全解は、赤方偏移 $z > 2 \times 10^6$ で付与されたエネルギーは、観測残存放射線スペクトルに何ら痕跡を残さないことを示しています。その後（ $10^5 < z < 2 \times 10^6$ ）、エネルギー放出はボース=アインシュタインスペクトル変形につながります。 $z < 10^4$ の場合、エネルギー放出によって y -型のスペクトル変形に至ります（Fig. 9参照）。

expansion, all observable chemical elements. They didn't know cross sections for all nuclear reactions, which were classified at that time, and they did not know that it's extremely difficult to combine three helium nuclei into carbon. Today we know that the bulk of the helium in our Universe and practically all deuterium, helium-3 and even the lithium in our batteries, laptops and telephones were produced during the first three minutes of the expansion of the Universe. All elements heavier than carbon were created in massive stars, where densities and temperatures permitted the crossing of the threshold of carbon formation from three helium nuclei.

6a. CMB spectral distortions due to energy release in the early Universe.

The black body photosphere of our Universe.

In 1965 just playing with different cross sections I recognized that Thomson scattering of CMB photons on electrons is the most important mechanism of opacity in the early Universe. I was very surprised, when making the simplest estimates, how incredibly small the Rosseland optical depth of the Universe was due to bremsstrahlung. It was clear that it was necessary to study in detail the physical processes that could affect the CMBR spectrum: is it at all possible to create the blackbody radiation during the evolution of the universe?

A lot of different mechanisms of the energy injection in the early Universe were proposed later by theoretical physicists and cosmologists. Today we all are interested for example in a possibility to detect the energy release due to annihilation of the dark matter or decay of the particles not detected yet in physical labs. Obvious questions arise: what type of spectral distortions will these processes leave on the CMB spectrum. Astrophysicists usually assume that the Thomson scattering does not change the frequency of photons and therefore does not influence the spectrum of CMB radiation. But after listening to lectures at the University I remembered that Compton scattering by near-relativistic electrons changes the photon frequency and creates photons (double Compton). I had already in my hands an article on the subject by Aleksandr Kompaneets (1956), and a book, Quantum Electrodynamics by Akhiezer and Berestetsky, still one of my favorites, on the bookshelf in my dormitory room. I learned a lot from Kompaneets' article. Photons, scattered on the thermal (moving) electrons are on average increasing their energy. When photon energy exceeds four times the temperature, recoil effect starts to dominate. As a result

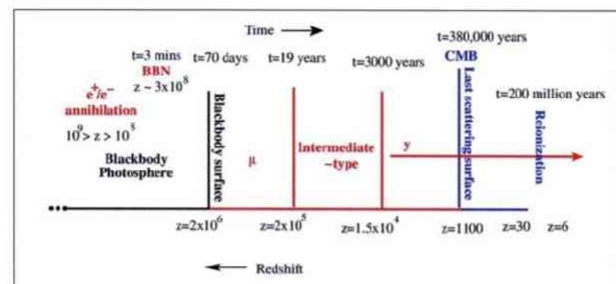


Fig. 9 宇宙マイクロ波背景放射のスペクトル変形の生成・進化に関連する重要な時期（カトリとスニヤエフの2012年の論文より）

Important epochs related to the creation and evolution of the CMB spectral distortions. From Khatry and Sunyaev, 2012.

ここでおさらいしておきますと、二重コンプトンプロセスと制動放射によるゆっくりとした光子の生成、そして周波数軸に沿ったその短時間での再分配により、赤方偏移 2×10^6 よりも早い時期にエネルギー放出が起こった場合、理想的とも言える黒体スペクトルが生成されます。この時期を私たちの宇宙の「黒体面（Blackbody surface）」と定義することができます。

現代の宇宙実験の精度は驚くべきものです。

ジョン・マザーが率いたCobe-Firas（宇宙背景放射探査機・遠赤外絶対分光測光計）実験では、宇宙マイクロ波背景放射のスペクトルの y -変形、 μ -変形のいずれもが非常に低いことが分かりました（Fig. 10に示す実験の上限参照）。NASAに出されたPIXIE提案の発案者は、 10^{-8} 程度の y 、 μ レベルにおいてこうした変形を見つけ出すことを計画していますが、これはなんと宇宙マイクロ波背景放射のエネルギー密度レベル 10^{-8} でのエネルギー放出に相当するのです。今後行われる実験で最も重要となる目的の一つは、他の手法では観測できないような小さなスケールで原始音波のエネルギー散逸と関連するエネルギー放出を検知することです。

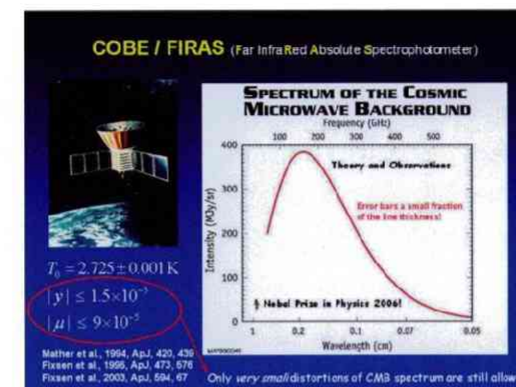


Fig. 10 COBE宇宙船から計測した宇宙マイクロ波背景放射のスペクトル（NASA提供）
The spectrum of the CMB measured by COBE spacecraft (Courtesy of NASA)

photons are redistributed by this process, named Comptonisation, over the frequencies. Finally Zel'dovich and I were able to find two key types of the CMB spectral distortions resulting from the energy release of any nature in the early Universe. These distortions are named now as y -type and Bose-Einstein distortion or μ -distortion of the CMB spectrum. In scattering by free electrons that preserves the number of photons the radiation spectrum relaxes to the form characteristic of a boson gas with nonzero chemical potential μ . Both types of distortions are shown in Figure 8.

However bremsstrahlung (and double-Compton emission) can create photons at low frequencies, which Comptonization can raise to higher energies, lowering μ , and even relaxing back to a true blackbody spectrum. *Full solution of the problem demonstrated that any energy deposited at redshift $z > 2 \times 10^6$ would leave no trace in the observed relict radiation spectrum.* Later ($10^5 < z < 2 \times 10^6$) energy release would lead to a Bose-Einstein spectrum distortion. For $z < 10^4$ any energy release will lead to the y -type spectral distortions (see Fig. 9).

Let us repeat that slow production of photons due to double Compton process and bremsstrahlung and their rapid redistribution along frequency axis permits to create practically ideal black body spectrum if energy release occurred earlier than redshift 2×10^6 . This epoch we can define as *the black body surface* of our Universe.

6 b. 宇宙での水素再結合

宇宙が誕生してからこれまでに最も重要な瞬間の一つと言えるのが、水素が再結合した瞬間です。宇宙膨張は温度の低下をもたらします。宇宙の年齢が40万年近くになった時、放射温度は4,000度レベルにまで下がりましたが、統計物理学の教科書によると、そうした温度では原始完全電離プラズマが再結合し、水素原子を形成します。

1966年9月、私はシュテルンベルク天文研究所で行われた全モスクワ宇宙物理学セミナーで講演を行ったのですが、その時私は、宇宙における水素再結合に言及し、「サハの公式によればそれは赤方偏移 $z \sim 1300$ で起こった」と述べました。セミナーが終わると、当時、大変仲良くしていた友人のディマ・クルトがやってきて私にこう尋ねました。「それでは再結合した原子が放出し、赤方偏移で置き換わったライマン α 光子はどこへいったんだい？」私はすぐさま、再結合原子の密度に対する宇宙マイクロ波背景放射の光子密度の割合が非常に大きいため、ライマン α 光子の量は比較的小さく、その当時では観測できない波長範囲で私たちのところまで届いているのだ、と説明しました。

しかし、彼の質問はその後私の頭の中に残りました。ライマン α 線の光学的深さは非常に大きなものです。宇宙論的赤方偏移により、こうした光子はライマン α 線の長波長ウィングを介して非常にゆっくりとした速度で脱出していきました。驚いたことに、極端に遅い2光子崩壊速度(8.1/秒)は、ライマン α 線のウィングを介するライマン α 光子の脱出よりも発生する確率が高かったのです。2sレベルの寿命やライマン α 線を介したライマン α 光子の脱出の速度が分かっているため、水素再結合プロセスの計算を行うことは難しくはありませんでした。ゼルドヴィッチ先生とクルトの二人と一緒に発表した1968年の論文では、簡略サハ公式と比較して水素の宇宙再結合が大きく遅れることを証明しました (Fig. 11参照)。

再結合が起こる前は、宇宙は光学的に厚い、つまり宇宙マイクロ波背景放射の光子の平均自由行程は、水平線と比べるとかなり小さいものでした。再結合の後、自由電子は事実上ひとつ残らずなくなり、宇宙は透明になりました。その時以来、光子は

The precision of the present day space experiments is enormous.

Cobe-Firas experiment led by John Mather demonstrated that both y and μ -distortions of the CMB spectrum are very low (see experimental upper limits presented on the Fig. 10). Authors of PIXIE proposal submitted to NASA are planning to find these distortions even on the level of y and μ of the order of 10^{-8} . This corresponds to the energy releases on the level of 10^{-8} of the energy density of the CMB! One of the most important goals of future experiments is the detection of the energy release connected with the energy dissipation of the primordial sound waves in small scales unobservable by other methods.

6b. The recombination of hydrogen in the Universe

One of the most important moments in the life of our Universe is the time of hydrogen recombination. The expansion of the Universe leads to the decrease of the temperature. When its age is close to 400,000 years, the radiation temperature drops to the level of 4,000 degrees. At such a temperature, according to the textbooks of statistical physics, primordial fully ionized plasma should recombine and form hydrogen atoms.

In September 1966, I gave a talk at the All Moscow Astrophysics Seminar in the Sternberg Institute where I mentioned hydrogen recombination in the universe, and noted that, according to the Saha equation, it occurred at redshift $z \sim 1300$. Dima Kurt, one of my closest friends at that time, came up to me after the seminar and asked: "And where are the Lyman-alpha line photons emitted by the recombining atom and displaced by the redshift?" I immediately explained that due to huge ratio of CMB photon density to the density of recombining atoms there would be a relatively small amount of the Lyman-alpha photons, and that they come to us in a range of wavelengths that was observationally inaccessible at that time.

But Dima's question sunk into my mind. The optical depth in the Lyman-alpha line is huge. The cosmological redshift caused these photons to very slowly escape through the long wavelength wing of the line. To our surprise, the extremely slow two-photon decay rate (8.1/sec) was more likely to happen than escape of Lyman-alpha photons through the wing of the Lyman-alpha line. Knowing the lifetime of

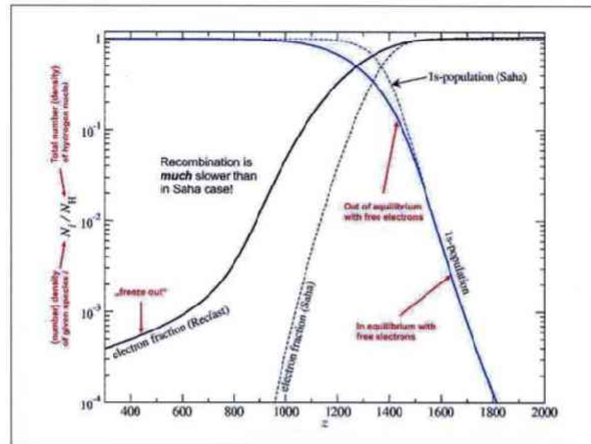


Fig. 11 サハのケースとの比較による、水素再結合の記録の差異。宇宙での水素再結合はライマン α 共鳴やゆっくりとした $2s-1s$ 2光子遷移が作り出す「隘路」により大幅に遅くなる (スニヤエフとシュルバの2009年の論文より)

Illustration of the difference in the hydrogen recombination history in comparison with the Saha case. The recombination of hydrogen in the Universe is strongly delayed due to the 'bottleneck' created in the Lyman α resonance and the slow $2s-1s$ two-photon transition (from R. Sunyaev, J. Chluba, 2009).

私たちのもとに直接伝搬することが可能となりました。従って、水素再結合は、最終散乱面を定義するものです。トムソン散乱視感度関数 $V = \exp(-\tau) \times d\tau/dz$ の重要性は、再結合の近似解析解が見つかった1970年にゼルドヴィッチ先生が発表した論文でもすでに認識されていました。この関数は、最終散乱面の特質を定義します。こうしたすばらしい条件が導入されたのはずっと後になってからのことです。視感度関数の形状をFig. 12に示します。

1975年、ヴィクトル・ドゥプロヴィッチは、水素中の高励起準位間における移行により追加の光子が生まれ、それが赤方偏移の後にcm ν およびdm ν スペクトル帯で私たちの元にたどり着くと指摘しました。この周波数帯は地上から実際にアクセスが可能です。

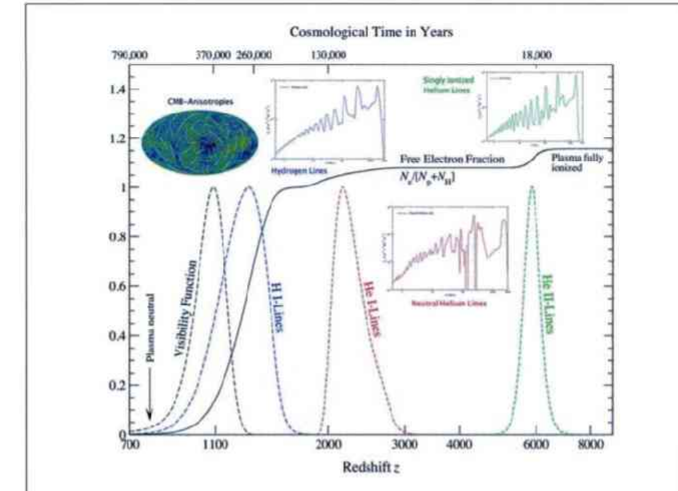


Fig. 12 宇宙のイオン化の経過 (黒実曲線) と異なる宇宙マイクロ波背景放射の信号の起源 (破線、嵌め込み図)

宇宙マイクロ波背景放射の温度における観測温度異質性が、 $z \sim 1089$ 付近のトムソン視感度関数の最大値近くで生成される一方、宇宙水素再結合スペクトル内の光子によって運ばれた直接的な情報は、それより少し前の時代からのものとなる。ヘリウムの二つの再結合に関わる光子は、さらに高い赤方偏移において放出された。宇宙再結合スペクトル内にこれらの信号の痕跡が見つければ、ビッグバンから13万年後と1万8千年後の宇宙の姿を知ることができる。さらに、宇宙再結合放射は、宇宙再結合が終了する前に予期しない出来事 (暗黒物質の粒子の対消滅によるエネルギー放出等) が起こったかどうかを知る術を与えてくれる。(スニヤエフとシュルバの2009年の論文より)

Ionization history of the Universe (solid black curve) and the origin of different CMB signals (dashed lines and inlays).

The observed temperature anisotropies in the CMB temperature are created close to the maximum of the Thomson visibility function around $z \sim 1089$, whereas the direct information carried by the photons in the cosmological hydrogen recombination spectrum is from slightly earlier times. The photons associated with the two recombinations of helium were released at even higher redshifts. Finding the traces of these signals in the cosmological recombination spectrum will therefore allow us to learn about the state of the Universe at $\sim 130,000$ yrs and $\sim 18,000$ yrs after the big bang. Furthermore, the cosmological recombination radiation may offer a way to tell if something unexpected (e.g. energy release due to annihilating dark matter particles) occurred before the end of cosmological recombination (from Sunyaev, Chluba, 2009)

6c. 宇宙での断熱密度摂動、宇宙マイクロ波背景放射の音響ピーク、バリオン音響振動

1946年にユージン・リフシッツが今では古典とされる論文を発表して以来、アインシュタインの一般相対性理論（GR）によっていかにして断熱摂動が宇宙で発生するのかがよく知られるようになりました。しかし、ジーンズ重力不安定性の特性に留意することで、簡易なニュートンのアプローチを用いてこのプロセスを説明することができるのです。

私たちの宇宙は、膨張の初期段階ではユニークな物体でした。音の速度は光の速度に近く、それ故、ジーンズ波長も水平スケールよりごくわずかに小さいものでした。

膨張する宇宙では、（ジーンズ不安定性に影響を受ける他の物体と同様に）ジーンズ波長よりも小さなスケールの密度摂動は、音響波と似た動きをしなくてはなりませんでした。

ごく初期の宇宙では、密度摂動の成長モードのみが存続しました。つまり、すべての音響波が同じ相で始まりました。

急激なデカップリングにより、異なる波長の揺らぎが異なる相で断ち切られています。これは、長さスケール上での再結合後の摂動振幅の準周期依存性という、すばらしい予測へとつながりました。こうした効果は現在では「バリオン音響振動」（暗黒物質の存在がこの図を複雑にしていますが、物理的に本質的なものではありません）と呼ばれています。バリオンや電子の分布中の準周期的挙動およびその速度は、必然的に、宇宙マイクロ波背景放射の温度の角分布の準周期的挙動に反映されます。こうした音響ピークは、ブーメラン、マキシマ-2、WMAP実験で発見されました。

7. 銀河団の高熱ガスと宇宙マイクロ波背景放射

銀河団は、重力によって結合されたものとしては私たちの宇宙では最大の物体となります。質量もとてつもなく大きく、1,000 km/秒に近い速さで銀河団の重力井戸を

the 2s level and the rate of Lyman-alpha photons escape through the wing of the line, it was not hard to calculate the hydrogen recombination process. In the paper published by Zel'dovich, Kurt and me in 1968 we demonstrated that cosmological recombination of hydrogen was delayed strongly relative to the simple Saha formula (see Fig. 11).

The Universe was optically thick before recombination, i.e. the mean free path of CMB photons was much smaller than the horizon. After recombination there were practically no free electrons left and the Universe became transparent; since then photons could propagate directly to us. Thus hydrogen recombination defines the last scattering surface. The importance of the Thomson scattering visibility function $V = \exp(-\tau) \times d\tau/dz$ was recognized already in the paper with Zel'dovich published in 1970, when an approximate analytical solution for recombination was found. This function defines the properties of the last scattering surface. These beautiful terms were introduced much later. The shape of the visibility function is presented in Fig. 12.

In 1975, Victor Dubrovich pointed out that the transitions among highly excited levels in hydrogen are producing additional photons, which after redshifting are reaching us in the cm-and dm-spectral band. This band is actually accessible from the ground.

6c. Growth of adiabatic density perturbations in the Universe, CMB acoustic peaks and baryonic acoustic oscillations

It is well known since the classical paper of Eugene Lifshitz in 1946 how adiabatic perturbations grow in the Universe according to Einstein's theory of general relativity (GR). Nevertheless, it is possible to explain this process using a simple Newtonian approach and remembering the properties of Jeans gravitational instability.

Our universe was a unique object at the early stages of its expansion. The velocity of sound was close to the velocity of light, and therefore a Jeans wavelength was just a bit smaller than the horizon scale.

In the expanding universe (as in any object affected by Jeans' instability) density

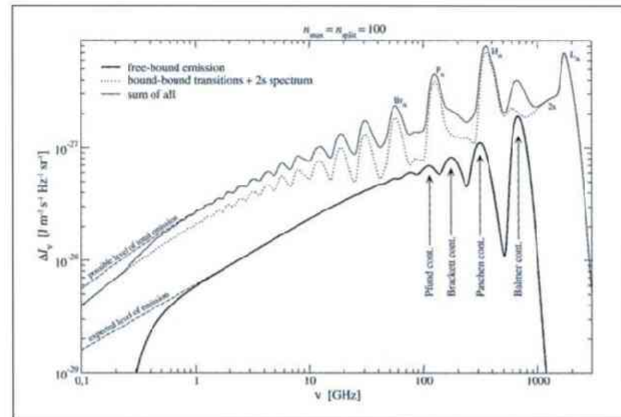


Fig. 13 自由-束縛放射を含む水素再結合フルスペクトル(シュルバとスニヤエフが2006年に発見)。光学スペクトル帯から無線周波数まで、水素原子スペクトルが1,500回赤方偏移しているのが分かる。
The full hydrogen recombination spectrum including the free-bound emission found by J. Chluba and R. Sunyaev (2006). It represents hydrogen atom spectrum redshifted 1,500 times from optical spectral band to radiofrequencies.

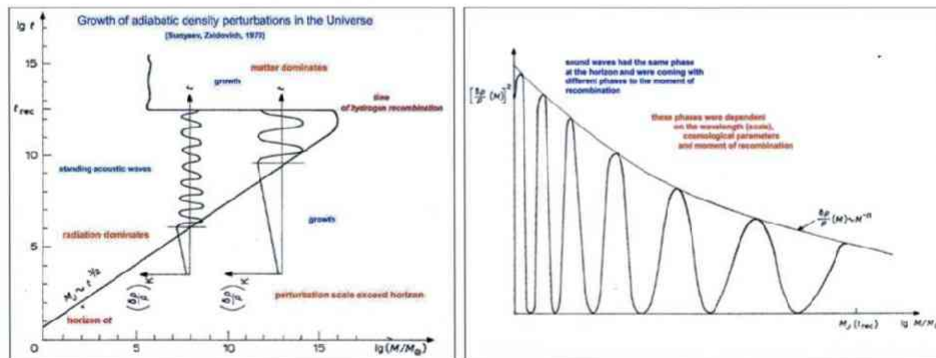


Fig. 14 宇宙で断熱密度摂動が成長する様子(スニヤエフとゼルドヴィッチが1970年頃に作成した図に手を加えたもの)
Illustration for the growth of adiabatic density perturbations in the Universe. The figure was adapted from Sunyaev & Zel'dovich (1970a).



Fig. 15 エイベル2218銀河団
Galaxy cluster Abell 2218.

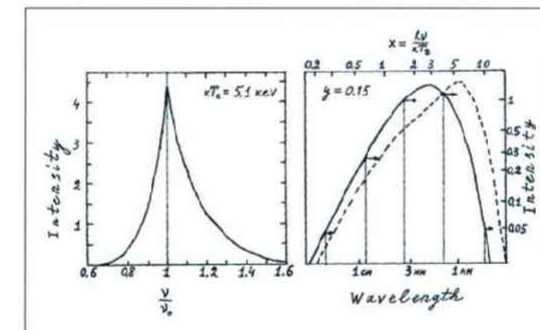


Fig. 16 $kT_e \sim 5\text{KeV}$ 、平均速度 $1/7\ c$ 程度の高温のマクスウェル分布電子による放射の散乱。電子が動き回ることによるドップラー効果がもたらすスペクトル変化。初期の光子は周波数が低く、電子の温度も非常に高いため、重要なのはドップラー効果のみ。曲線の軌跡が広がり、 v/c の2次効果によって実質的に高周波方向に動いている。その結果、強度はスペクトルのレイリー-ジーンズ部分で下降し、ウィーン部分で上昇している！(スニヤエフ、1980年)
SCATTERING OF RADIATION BY HOT MAXWELLIAN ELECTRONS with $kT_e \sim 5\text{ KeV}$ and average velocity of the order of $1/7\ c$. Spectral changes due to doppler-effect on moving electrons. Initial photons have low frequency, electrons are very hot, only Doppler effect is of importance. Line is broadened and effectively shifted toward higher frequencies due to second order effects in v/c . As a result—intensity drops in the Rayleigh-Jeans part of the spectrum and increases in the Wien part ! (from Sunyaev, 1980)

動く、数千もの銀河を含んでいます。また、1千万度から1億度という高温で、X線放射を行っている熱い銀河間ガスで満たされています。今ではX線衛星を使ってこの様子を見ることができます。フリッツ・ツビッキーが銀河団の近くに発見した「ミッシングマス」について私が初めて耳にした1967年には、まだX線衛星は存在していませんでした。そこで「高熱ガスと宇宙マイクロ波背景放射の光子の相互作用を用いて銀河団の高熱ガスを検出する方法はあるのか？」という問題が提起されました。

高温電子上のコンプトン化による光子周波数の変化を検討すると、予想していなかった、すばらしい結果が得られました。銀河団のガスがトムソン散乱の光学的深さを少し持つことが分かったのです。宇宙マイクロ波背景放射の輝度の変化は、銀河団を横切る光子のごく一部がまれに単一散乱することによって定義されていました。

銀河団方向への宇宙マイクロ波背景放射の放射輝度は、センチメートル、ミリメートル波長で減少しましたが、これは全く想定外でした。それに対応してサブミリメートル帯の輝度が上昇したことにピンと来たものは当時、誰もいませんでした。

この効果について私が初めて講演を行った時、一部の物理学者は懐疑の目を向けました。非常に熱いガス雲の方向で電波での天空輝度が減少する、という点が熱力学の法則に反すると彼らは考えたようです。また、私がこの効果の強度とスペクトルは、ある物体への距離を測る測定単位である赤方偏移に依存していない、と発言すると今度は天文学者が疑いの目を私に向けました。なぜならこのことは銀河系外天文学がこれまで積み上げてきたものすべてに矛盾するからです。こうした状況でしたから、科学会の重鎮であるゼルドヴィッチ先生に後見人としてセミナーに来ていただいて非常に助かりました。

その後、私にとってすばらしい瞬間が訪れます。シカゴ在住の電波天文学者であるジョン・カールストロムが彼の同僚と連名で書いた論文に、 $z=0.17$ から $z=0.888$ までの異なる赤方偏移における銀河団方向での効果に関する干渉観測結果が記されていました。この論文は、高い赤方偏移の銀河団は、それよりもずっと小さな赤方偏移の銀河団と同様、「ネガティブな」輝度を中心に持つ、ということを証明していました。

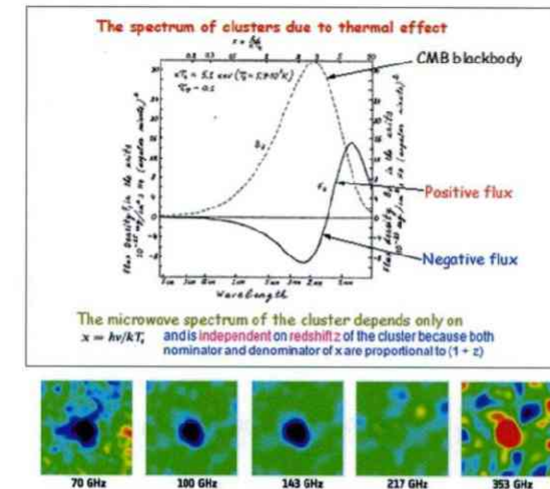


Fig. 17 上プロット：リッチな銀河団方向における宇宙マイクロ波背景放射のスペクトルの変化（予想図、スニヤエフの1980年論文より）。下プロット：銀河団A2319のプランク衛星の観測データ（ESA記者会見から）。プランク衛星の検波器の最初の三つの低周波数チャンネルにマイナス信号が観測されている。217GHz近く（1.5mm近くの波長）の信号は弱すぎて観測できない。予想通り、銀河団からの信号は高周波数チャンネルではポジティブとなっている（ESA記者会見から）

Upper plot: the change of the CMB spectrum in the direction to the rich cluster of galaxies (prediction, from Sunyaev, 1980). Lower plot: Planck spacecraft observational data for the cluster A2319 (ESA press-conference). Negative signal is observed in the first three low frequency channels of the Planck spacecraft detectors. In the vicinity of 217 GHz (wavelength close to 1.5 mm) signal is too weak to be observed. The signal from the cluster is positive in the high frequency channel, exactly as it was predicted. (ESA press-conference)

perturbations on scales smaller than a Jeans wavelength had to behave like acoustic waves.

In the very early universe only the growing mode of density perturbations survived, meaning all acoustic waves were launched with the same phase.

The sharp decoupling cut off fluctuations of different wavelengths at different phases. This led to a wonderful prediction of the quasiperiodic dependence of the perturbation amplitude after recombination on the length scale. This effect

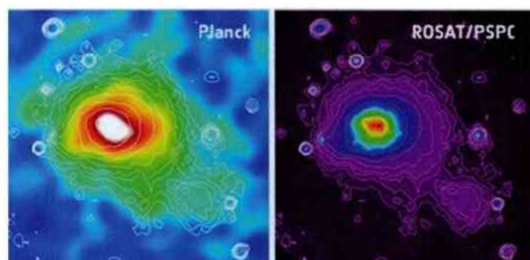


Fig. 18 マイクロ波スペクトル帯（左：大変大きな意味を持つネガティブ信号の検知。プランク衛星観測データ）およびX線（ローザット衛星観測データ）内のかみのけ座銀河団。ESA記者会見より
Coma cluster of galaxies in microwave spectral band (left; Very high significance detection of the negative signal. Planck spacecraft data) and in X-Rays (ROSAT spacecraft). ESA press-conference.

私がこうした効果について語り出した1969年当時は、南極望遠鏡、アタカマ宇宙論望遠鏡、プランク衛星などを使ってそれまでその存在を知られていなかった千以上の銀河団が何もないように見える天空で確認されようとは、夢にも思いませんでした。こうした銀河団の大多数が非常に高い赤方偏移を持ち、その効果によって私たちの宇宙で最も質量の大きな銀河団の探索を行うことができる、ということは大変すばらしいことです。また、その効果によって発見されたこれらの銀河団が今後何十億年も天空で観測され続けるとは信じられない思いがします。ここで非常に大きな疑問が生じます。「今からそんな先の未来にもこの地球上に天文学者というものは存在するのだろうか？」

8. エピローグ

昔、ゼルドヴィッチ先生と書き上げた論文（スニヤエフ、ゼルドヴィッチ、1970年）の抄録で、宇宙マイクロ波背景放射の角度揺らぎの振幅の準周期スケール依存性を観察することの重要性について私が書いた一節を先生に削除されてしまい、憤慨したことを今でも覚えています。先生はそうした効果は大変小さいのではと見えなことではない、と書かれていました。私をなだめようとして、先生は、論文に書かれた現象の物理的特性は美しいものであり、論文は発表すべきである、とおっしゃいました。検出器の技術がこれほどまで急速に進歩し、先生のおっしゃった「ちっぽけで実

now is called the *baryonic acoustic oscillations*. (The presence of dark matter complicates this picture, but not the physical essence.) This quasiperiodic behavior in the distribution of baryons and electrons and their velocities, naturally, had to be reflected in the quasiperiodic behavior of the angular distribution of CMBR temperature. These *acoustic peaks* were discovered by the Boomerang, Maxima-2 and WMAP experiments.

7. Hot gas in clusters of galaxies and CMB

Clusters of galaxies are the biggest gravitationally bound objects in our Universe. Their masses are huge: they contain thousands of galaxies moving in the gravitational well of the cluster with velocities close to 1,000 km/sec. They are filled with hot intergalactic gas having temperatures of 10–100 million degrees and radiating in X-rays, which we detect now using X-ray satellites. In 1967, when I first time heard about the “missing mass” detected by Fritz Zwicky in the nearby clusters of galaxies, there were no X-ray satellites yet. The problem arose: *are there ways to detect hot gas in the clusters of galaxies using interaction of the hot gas with CMB photons?*

A beautiful and unexpected result came when the change of the photon frequency due to Comptonization on the hot electrons was taken into account. Gas in clusters has a small Thomson optical depth. The rare single scatterings of a small fraction of the photons crossing the cluster defined the change of the CMBR brightness.

The CMBR brightness in the directions toward clusters had to decrease at centimeter and millimeter wavelengths. This was absolutely unexpected. The corresponding increase of the brightness in the sub-millimeter band did not excite anybody at the time.

When I was presenting my first talks about the effect, some physicists were skeptical because they thought that the diminution of the sky radio brightness in the direction of a cloud of very hot gas contradicts the laws of thermodynamics. Astronomers were very skeptical when I told them that the strength of the effect and its spectrum don't depend on the redshift, a measure of the distance to an

際には観測不可能な効果」を非常に高い精度で観測できるようになった今の時代に先生がいらっしゃらないことは残念です。

新しい放射検出器や望遠鏡を設計し、あるいは南極望遠鏡で半年単位にわたって観測を行い、幾度となく長い夜を過ごされたすべての方々に感謝の意を表したいと思います。また、マイクロ波放射やX線に敏感で、宇宙論および高エネルギー宇宙物理学の研究を目的とした優れた観測衛星を打ち上げ、あるいは極めて進んだ地上ベースの光学および無線望遠鏡の設計、製作に当たられた方々にも感謝したいと思います。固体物理、極低温技術、新たな放射検知装置の開発が大きく進展したことにより、こうした望遠鏡や宇宙船の感度は飛躍的に向上しました。

科学のプロセスは、どちらか一方の理論的予測が観測によって確認されたからといって終了するわけではありません。私は、ずっと昔に予測されていた効果が現在、天文学者の力となり、私たちの宇宙を満たす物体である暗黒物質や暗黒エネルギーの特性の調査に役立っていることをとても喜ばしく思います（少なくとも4つの独立した手法を用いて行った宇宙物理学の観測結果からこうしたことが分かります）。注意点として、これらの手法のうち、最低3つ（宇宙マイクロ波背景放射の音響ピーク、異なる赤方遷移の銀河団の数、およびバリオン音響振動）は今回の講演で触れた効果に何らかの点で依存しています。これからまだ知られていない物理の法則についての新たな情報が提供されることが期待されます。

ヤーコフ・ゼルドヴィッチ先生は、高エネルギー宇宙物理学と宇宙論の研究へと私を誘って下さいました。私は、当時在籍していた学部の学部長には、宇宙物理学は役に立たない科学だと言われたのですが、先生の申し出を受けました。後に、この決断は非常に幸運なものであったことが分かります。1960年代前半までの天文学の進展は比較的遅いものでしたが、1960年代半ばになると、ほとんど毎年のように大きな発見が続いたのです。過去50年間になされた大きな発見には次のようなものがあります。

1. 宇宙全体を満たす宇宙マイクロ波背景放射。その角度分布や周波数スペクトルには、宇宙全体の基本的性質に関する多くの情報が含まれています。

object. This contradicted all the experience of extragalactic astronomy. It was very important to have so strong scientist as my mentor Yakov Zel'dovich behind me during these seminars.

A great moment for me was when I saw the paper by a radio astronomer from Chicago, John Carlstrom, together with his colleagues, reporting the results of interferometric observations of the effect in the direction of clusters at different redshifts from $z=0.17$ up to $z=0.888$ proving that clusters at high redshift have similar central “negative” brightness as clusters at much smaller redshifts.

It was impossible to even dream in 1969, when I first started to present talks about the effect, that today the South Pole Telescope, the Atacama Cosmology Telescope and the Planck spacecraft would discover more than a thousand previously unknown clusters of galaxies on the blank sky. It's a tremendous feeling to realize that the majority of these clusters have very high redshifts and the effect now permits us to look for the most massive clusters in our Universe. It's also very difficult to imagine that these clusters, discovered due to the effect, will be observed on the sky during the next billions of years. And there is the very big question: Will there still be astronomers on the Earth at such a distant point in time?

8. Epilogue

I remember how upset I was when, in the abstract of our article (Sunyaev and Zel'dovich 1970) Zel'dovich crossed out my words on the importance of observing the quasiperiodic scale-dependence of the amplitude of the CMB angular fluctuations. He wrote that the effect was very small and could hardly be observed. To calm me down he said that the physics of the phenomena described in the paper was beautiful, and the article needed to be published. I regret that Yakov Zel'dovich is not able to witness today how enormously rapid progress of detector technology allowed observing these, according to his words, “tiny and practically unobservable effects” with very high precision.

I am grateful to all the people who were working, designing new detectors of radiation, new telescopes, or spending long nights (with duration of half a year) at the South Pole Telescope. I am grateful to the people launching the excellent

2. 宇宙論的距離にある準恒星状電波源（クエーサー）。あらゆるスペクトル帯で観測される超高輝度放射は、遠方銀河核にある超大質量ブラックホールへの物質降着によるものと、今日私たちは理解しています。
3. 強力な電波銀河とクエーサーの宇宙論的進化の発見。
4. 強い磁場を持ち、高速で自転する中性子星である電波パルサー。
5. 中性子表面での準規則的な核爆発を伴うX線バースターを含む、物質降着する恒星質量ブラックホールと中性子星。
6. 数秒間にわたって天空すべてからの放射総量よりも明るいガンマ線を放射するガンマ線バースト。
7. 太陽系惑星の起源や特異性に関する理解を深める道を開いた太陽系外惑星。
8. 宇宙誕生期のインフレーションの証拠。
9. 暗黒エネルギーと暗黒物質が存在する証拠。ただし、まだ誰も地上実験ではその存在を検知するに至ってはいません。

私、そして私に続く世代の宇宙物理学者は非常に幸運でした。というのも、新たな、魅力的な科学的発見が次々となされ、さらなる研究のための新たな手法が編み出されていくというすばらしい時代にこの学問に足を踏み入れたからです。今や私たちは、宇宙について、そしてその性質やパラメータについて多くのことを知るようになりました。それでも、まだ明らかにされていない多くの疑問が残っています。私が関わっている科学分野、宇宙物理学と宇宙論は、この先少なくとも20年から30年は発展し続けるであろうと期待しています。

cosmology and high energy astrophysics spacecraft, sensitive to microwave radiation and X-rays, and designing and building the most sophisticated ground based optical and radiotelescopes. The great progress of solid state physics, cryogenic technology and development of the new types of detectors of radiation has enormously increased the sensitivity of these telescopes and spacecraft.

Science is not finished when one or the other theoretical prediction is confirmed by the observations. I am very glad that the effects which were predicted long ago are now helping astronomers to go ahead and investigate the properties of the dark matter and dark energy—substances of matter which fill our Universe (we know this from astrophysical observations using at least four independent methods). Of note, at least three of these methods (CMB acoustic peaks, the number counts of the clusters of galaxies at different redshifts and Baryonic Acoustic Oscillations) rely in some way on the effects discussed in this lecture. There is a hope that they will provide us with new information about the yet unknown laws of physics.

Yakov Zel'dovich invited me to do research in high energy astrophysics and cosmology. I accepted this invitation even though my department chief told me that astrophysics is a useless science. This decision later proved to be extremely lucky. Before the early 60s development of the world of astronomy was relatively slow. But in the middle of the 60s giant discoveries were being made practically every year. Among these great observational discoveries made during last 50 years were:

1. cosmic microwave background radiation (CMB), filling the whole Universe. Its angular distribution and frequency spectrum carries a lot of information about key properties of the Universe as a whole.
2. quasistellar radio sources (quasars) at cosmological distances. Today we know that these extremely bright sources of radiation in all spectral bands are accreting supermassive black holes in the nuclei of distant galaxies;
3. discovery of cosmological evolution of the powerful radiogalaxies and quasars;

4. radio pulsars which occurred to be rapidly rotating, strongly magnetized neutron stars;
5. accreting stellar mass black holes and neutron stars including X-ray bursters with quasiregular nuclear explosions on the surface of the neutron star;
6. gamma-ray bursts which for a few seconds appear much brighter in gamma-rays than the whole sky;
7. exoplanets, which opened the way to a better understanding of the origin and uniqueness of the planets in the Solar System;
8. evidence for the inflation of the Universe at its very early stages;
9. evidence for the existence of dark energy and dark matter, which no one was able yet to detect in the ground based physical labs.

Astrophysicists of my and the following generations have been lucky because they entered our science at the great time of new and fascinating discoveries, opening new ways for further research. We know now a lot about our Universe and its properties and parameters. Nevertheless, many open questions remain and I hope that at least for the next 20-30 years my science—astrophysics and cosmology—will continue to glow.

稲盛財団 2011——第27回京都賞と助成金

発 行 2013年4月20日

制 作 公益財団法人 稲盛財団

〒600-8411 京都市下京区烏丸通四条下ル水銀屋町620番地

Phone: 075-353-7272 Fax: 075-353-7270

E-mail admin@inamori-f.or.jp URL <http://www.inamori-f.or.jp/>

ISBN4-900663-27-1 C0000