

題名	宇宙とそこに在るもの―広域観測を通して理解する
Title	Understanding the Universe and the Things That Live in It Through Astronomical Surveys
著者名	ジェームズ・ガン
Author(s)	James Gunn
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	The Inamori Foundation : Kyoto Prizes & Inamori Grants
受賞回	35
受賞年度	2019
出版者	公益財団法人 稲盛財団
Publisher	The Inamori foundation
発行日 Issue Date	10/31/2019
開始ページ Start page	140
終了ページ End page	179
ISBN	978-4-900663-35-0

宇宙とそこに在るもの—広域観測を通して理解する

ジェームズ・ガン

多くの子供たちがそうであるように、私は初めて見た時から夜空に魅了されました。父は地球物理学者で、幸運なことに天文学にも強い関心を持っていました。私はかなり幼い頃から文字を読むことを覚え、天文学の本を読み、父と一緒に望遠鏡を作って使うようになりました。そして、その道を進んで天文学者を職業とし、60年近くに及ぶキャリアを積んできました。

私の幼少時代と、どのように育ち、どのような教育を受けたのか、そしてこの発表のタイトルが示す主題について少しお話しします。天文学者が天体を研究することは皆様もご存知のとおりですが、その研究の着眼点と方向性は、1つまたは少数の天体について詳細に研究するか(多くの場合、天文学者は単一の天体または少数の天体の集合の研究に一生を費やします)、あるいは包括的な視点で天体全体の研究をする(サーベイ)かのいずれかに分かれます……と言っても、その違いは、人文科学における伝記文学と社会学の違いくらい僅かなものです。私が常にいちばん興味を持っていたのはサーベイだったので、それを行うための特殊な機器を設計し、得られる情報量が最大になるように工夫し、生成された膨大な量のデータの処理と保存に取り組んできました。スローン・デジタル・スカイ・サーベイ(SDSS)は、十分に較正されたデジタルデータを生成するための、光学望遠鏡によるこれまでになく大規模なサーベイであり、私が考案して組織し、長年プロジェクト研究員を務めた事業です。この研究こそが、有り難いことに稲盛財団が京都賞を授与してくださった第一の理由であり、本日私が皆様の前に立っている理由でもあります。

1. 生い立ち

私は1938年に生まれました。ずいぶん昔のことです。母はとても才能のある芸術家でしたが、結婚後は芸術の道を断念しました。父は地球物理学の専門家で、石油会社で油脈やガス鉱床の探査に従事していました。その仕事のため、父は米国南部をあちこち回り、母と私も父と共に一カ所に数カ月から一年ほど住んでは別の場所へと転々としていました。かなり変わった幼少時代でした。私は一人っ子でしたし、親しい友人を作れるほど長く一カ所で暮らすこともありませんでした。父は少人数の探査チームのリーダーで、チームのメンバーの家族には私と年齢が近い子供も何人かいました。しかし、メンバーは頻繁に入れ替わりました。父の仕事は第二次世界大戦の遂行に不可欠とみなされたため、父は戦時中も兵役には就きませんでした。ちょうど、私

Understanding the Universe and the Things That Live in It Through Astronomical Surveys

James Gunn

Like many children, I was fascinated by the night sky from the beginning. I was lucky enough to have a father who was a geophysicist who also had great interest in astronomy, and since I learned to read at a very early age, I began reading books about the subject, and, with my father, began building and using telescopes. I followed that path to become a professional astronomer, and have stayed on it for a career which spans nearly six decades.

I will tell you a bit about my childhood and growing up and education, and about the subject of the title of this presentation. You will see that all astronomers study objects in the heavens, but the emphasis and direction of that study can either be the detailed study of one or a few objects (in many cases astronomers spend their whole careers studying a single object or a small class of objects) or, for the generalists, surveys which deal whole populations...the distinction is a bit, in human studies, like the difference between biography and sociology. I have always been most interested in surveys, designing specialized instruments to perform them, designing them in ways which maximize their information return, and dealing with the processing and storage of the vast amounts of data which they can produce. The first very large optical sky survey producing well-calibrated digital data was the Sloan Digital Sky Survey (SDSS), which I designed and originated, and served as Project Scientist for many years. It was primarily for this work that the Inamori Foundation graciously awarded me this prize, and so was the primary reason I stand before you today.

1. Growing up

I was born in 1938, which was a very long time ago, to a mother who was a very talented artist but who gave up art as soon as she married, and a father who was a geophysicist who worked for an oil company prospecting for new oil and gas deposits. His work carried him all over the southern United States, and my mother and I traveled with him, staying typically in one place for a few months to a year. It was a rather strange childhood; I was an only child, and we did not stay in a place long enough for me to make close friends. My father led a small prospecting group, and there were a few other children close to my age in the group. But we never overlapped very long. My father's work was considered essential to the war effort during World War II, so he did not serve in the military during the war, which was during my early childhood, he was responsible for maintaining the vehicles and instruments necessary for his work, and parts were very difficult to find during and in the few years after the war, so he became an expert

がまだ幼かったころの話です。父は、仕事に必要な車両や機器のメンテナンスを任されていたが、戦争中と戦後数年間は部品を手に入れるのが非常に困難でしたので、機械工としての腕も上がり、私たちはトレーラーに工作室を備え付けて転々と移動しました。この工作室は、私の幼少期において極めて重要な役割を果たしました。私は幼いうちに旋盤、研磨機、ボール盤、溶接機などの工作機械の使い方を習得し、光学や望遠鏡の作り方についても少し学びました。私が最初に読んだ天文学の本は、子供向けの自然シリーズの一冊として書かれた『The Stars for Sam』という美しい小さな本でした。2冊目は父の大学の教科書で、天文学者が実際に何をしているのか初めてほんの少し知りましたが、本当に理解したのはその後何年も経ってからでした。

1950年、私が12歳のとき、父は重い心臓発作によって43歳で亡くなりました。父は私の師であり、案内役であり、また最高かつ無二の親友でしたので、私はすっかり打ちひしがれてしまいました。住んでいたのはアーカンソー州のカムデンという小さな町で、あまり親しい人は居ませんでした。大変な状況の私たちに、周囲の人々がとても力になってくれたのを今でも覚えています。母と私は、母の姉妹がいるテキサス州南部のビービルという小さな町に引っ越しました。私はついに定住し、それまでよりもいくらか普通の子供らしくなっていました。友人を作り、スポーツ(テニス)を楽しみました。私の影響で、私が夢中だった天文学やロケットや模型飛行機に、何人かの親友が興味を持つようになりました。

母は約4年後にとってもすばらしい男性と再婚しました。Billという名で、職業軍人でしたが、戦闘兵ではありませんでした。軍隊で教育に携わり、高校卒業前に軍に入隊した多くの若者の教育を修了させようと尽力していました。しかし、軍人が父親になったことで、再び引っ越し生活が始まり、私たちはニューボストンという町へ引っ越しました。継父が駐留していた基地には軍人とその家族が利用できる大型店舗があり、私は再び本格的に望遠鏡作りを始めました。その後、継父は日本の基地に派遣され、母と私はビービルに戻りました。程なく私は、最も野心的なアマチュア望遠鏡計画として口径200mmのf/5反射望遠鏡の製作に着手しました(Fig. 1)。この計画では、反射鏡を削って磨き、あらゆるマウントやカメラを作製した後、電源から離れていても車のバッテリーで望遠鏡を作動させられるように、固体発振器とモーターの駆動装置を組み込みました。この機器で銀河や星雲の写真の撮影に成功し、1965年には初めて天文学関連の出版物を発表しました(Fig. 1)。高校時代に私にとって重要な

machinist and we carried with us as we moved about a small machine shop built into a trailer. This shop was very much part of my childhood, and I learned to use the tools—lathe, grinder, drill press, welders—when I was quite young, and learned a bit about optics and building telescopes. My first astronomy book was a beautiful little book called “The Stars for Sam” written as part of a nature series for children. My second was my father’s undergraduate textbook, and I learned for the first time a little bit about what astronomers actually do, though I did not really understand that for many years.

In 1950, when I was twelve years old, my father, at age 43, died of a massive heart attack. He was my mentor, guide, best and only good friend, and I was completely devastated. We were in a small town in Arkansas, Camden, and did not know others very well, but I still remember how wonderfully the people around us to support us in this trouble. My mother and I moved to a little town in south Texas, Beeville, where she had a sister. I finally settled down and began to be a somewhat more normal child, with friends and sports (tennis), and interested some close friends in astronomy and rockets and model airplanes, in all of which I was very active.

My mother married again after about four years to a very wonderful man who was a career soldier, but not a fighting soldier; Bill was in military education, attempting to complete the education of many young men who joined the military before finishing high school. But Army meant moving again, and we moved to a town called New Boston. The base where my stepfather was stationed had a large shop which the soldiers and their families could use, and I began again in earnest building telescopes. Then my stepfather was sent to a base in Japan, and my mother and I returned to Beeville. I soon started my most ambitious amateur telescope project, an eight-inch f/5 reflector, for which I ground and polished the mirror, built all of the mount, a camera, and later built a solid state oscillator and drive for the motor so that the telescope could be run from a car battery far from sources of electricity (Fig. 1). I was able to get photographs with this instrument of galaxies and nebulae, and this resulted in my first astronomical publication, in 1965 (Fig. 1). During my high school years I encountered my third important astronomy book, Fred Hoyle’s “Frontiers of Astronomy”, which finally tied my interests in mathematics, physics, and astronomy together and told me a little about what being a professional astronomer was like. It was clear at this point what I would try to do with my life, and I wanted to do all of the three things I knew: theory, observation, and instrument making.

3冊目の天文学の本、Fred Hoyleの『天文学の最前線(Frontiers of Astronomy)』に出会い、ついに私の数学・物理学・天文学への興味が1つに結びつきました。この本を読んで、私は職業としての天文学者とはどういうものなのかを少し理解し、人生で挑戦したいことがこの時はっきりしました。理論・観測・機器製作の3つをすべてやりたいと思ったのです。

2. 教育

私は1961年にライス大学で数学と物理学の学位を取得し、科学計算のごく初期に計算数学に出会いました。

その後、1965年の秋にカルフォルニア工科大学(カルテック)の天体物理学の大学院へ進み、最初の年に「職業として」初めての機器を作りました。自分の望遠鏡計画で固体電子装置について知識がありましたので、その知識を使って、露光させる光の強さに合わせて写真乾板の走査を校正するよう機械を設計して製作することができました。その結果、写真画像とスペクトルの定量的な解釈が可能になりました。写真は当時の天文学者が画像を記録する唯一の方法でしたが、写真媒体は校正が難しく、非線形かつ不均一で、とても非効率的でした。写真をできるだけ上手に使いこなし、その後は写真でできる以上の実績をあげることが、私の研究生活におけるごく初期から、重要なテーマになっていました。

学位論文は宇宙における銀河の統計に関するもので、銀河がどのように分散し集合しているかを研究しました。これが私の初めての観測研究で、パロマー天文台の1.2mシュミット望遠鏡のガラス製特大乾板に効率の良い新たな写真乳剤を使用しました。

博士号を取得した後は兵役に就きましたが、カルテックの学部長であったJesse Greensteinのおかげで、ベトナムには行かずジェット推進研究所(JPL)でNASAとの連絡役を務めることができました。JPL時代には、それ以降の機器に使用することになる光学設計のコードを開発し、非常に優れた0.6m惑星望遠鏡用の機器をいくつか設計・製作しました。

2. My Education

I went to undergraduate school at Rice Institute in 1961, took a degree in mathematics and physics, and was introduced in those very early days of scientific computing to computational mathematics.

Then, in the fall of 1965, to Caltech to graduate school in astrophysics. My first “professional” instrument came in my first year. Since I knew about solid-state electronics from my telescope project, I could use that knowledge to design and build a machine which could calibrate the scans of photographic plates to the intensity of light which exposed the plate, and thus allow quantitative interpretation of photographic images and spectra. Photography was the only way astronomers could record images at the time, and the photographic medium was difficult to calibrate, nonlinear, nonuniform, and very inefficient. Using photography as well as possible, and later, doing better than photography could do has been a major theme of my career since the very beginning.

My dissertation was on the statistics of galaxies in space, how they are distributed and clustered, and was the first survey work I did, using new, more efficient photographic emulsions on very large glass plates for the 1.2-meter Schmidt camera at Palomar.

After obtaining my Ph.D., I had a military obligation, which I was able to serve as a liaison to NASA at the Jet Propulsion Laboratory instead of going to Vietnam, thanks to Jesse Greenstein, chairman of the department at Caltech. During my time at JPL, I developed the optical design code which was to be used for instruments from then on, and designed and built several instruments for their very nice 0.6-meter planetary telescope.

3. Early Career: Princeton and Caltech

Then to Princeton as a junior faculty member, and worked with Jerry Ostriker on the theory of pulsars and Richard Gott on spherical but fully nonlinear perturbations in cosmology, which allowed a number of insights into the just-developing field of the formation of galaxies and giant clusters of galaxies.

In 1970, I returned to Caltech as faculty, and began work with Bev Oke on a photographic survey of distant clusters of galaxies, again with the new photographic emulsions. Bev had developed a 32-channel spectrometer for the 200-inch telescope which was the most sensitive instrument in the world for recording the spectra of faint

3. 初期の経歴：プリンストン大学およびカルテック

その後、准教授としてプリンストン大学に赴任し、パルサー理論についてJerry Ostrikerと、宇宙論における球状かつ完全非線形の摂動についてRichard Gottと、共同で研究を行いました。これによって、銀河や巨大銀河団の形成という、ちょうど成長しつつあった分野に多くの見識がもたらされました。

1970年には教員としてカルテックに戻り、再び新しい写真乳剤を使用してBev Okeと共に遠く離れた銀河団の写真観測に取り組み始めました。Bevは5,080mm望遠鏡用の32チャンネル分光器を開発しました。スペクトル分解能は極めて低いものの、暗い銀河のスペクトルを記録するには、世界で最も感度の高い機器でした。

技術の話：分光法

先ほど触れたスペクトルについて一言添えさせて頂くと、スペクトルは天体物理学や私の仕事において非常に大きな役割を果たしています(Fig. 2)。天体から地球に届く光は、大抵非常に複雑です。例えば、銀河からの光のほとんどは、銀河にある数百億個の恒星や巨大で極めて希薄な高温のガス雲から届きます。太陽の表面温度は約6,000Kで、私たちの目は太陽からの光が「白く」見えるように適応しています。より長い波長の光を放つ低温の星は赤く見え、より短い波長の光を放つ高温の星は青く見えます。しかし、光は単純に知覚される色よりもはるかに複雑です。光を波長によって数百色から数千色に分解すると、個々の化学元素が固有の波長で光を放出または吸収するので、光は温度以外にもはるかに多くのことを教えてくれます。このように、天体の「スペクトル」は、各波長で私たちが受け取るエネルギーの量であり、その天体が何で出来ているかも教えてくれます。数十億光年離れた銀河には、水素、カルシウム、炭素、窒素など、地球上で知られているあらゆる元素を含む星があることが分かっていますが、遠すぎて実際に銀河から物質を採取することはできません。にもかかわらず、さらに多くのことが分かります。天体がある速度で我々に対して近づいたり遠ざかったりしていると、天体から放たれるスペクトルの特性が変わって波長が変化します。これはドップラー効果と呼ばれ、天体が近づくときは青色に(より短い波長)、遠ざかるときは赤色に(より長い波長)変化します。そのため、天体の組成だけでなく、我々のいる方向への天体の速度を測定することができるのです。こうし

galaxies, albeit with fairly low spectral resolution.

Technical Aside: Spectroscopy

A word about spectra, which I have mentioned before, and which play an enormous role in astrophysics and my career (Fig. 2). The light which comes to us from astronomical objects is usually very complex. Most of the light from a galaxy, for instance, comes from tens of billions of stars and large but very tenuous hot gas clouds in the galaxy. The sun has a surface temperature of about 6,000 degrees Kelvin, and our biology has adapted so that we see light from the sun as “white”. Cooler stars, which emit more long-wavelength light, appear red; hotter ones, which emit more short-wavelength light, blue. But the light is much more complicated than just simple perceived color. When the light is broken down into hundreds or thousands of colors by wavelength, the light tells us much more than temperature, because individual chemical elements emit or absorb light at characteristic wavelengths. Thus the *spectrum* of an astronomical object, the amount of energy we receive at each wavelength, also tells us what the object is made of. We can tell that a galaxy billions of light-years away has stars containing hydrogen, calcium, carbon, nitrogen, all of the elements we know on earth, though it is far too distant to actually get material from it. But there is even more. When an object is approaching us or receding from us at some speed, the spectral features from the elements in it are shifted in wavelength by the Doppler effect, to the blue (shorter wavelengths) when approaching, to the red (longer wavelengths) when receding, so we can measure the velocity of an object along the line of sight to it as well as its composition. It is the motion of stars in a galaxy which support the galaxy against its own gravity, just as it is the orbital motion of the planets in the solar system which keeps them from falling into the sun. We can seldom see the individual stars in a galaxy, but we can infer how fast they are moving by looking at the width of these spectral features, because the stars moving away shift to the red, those moving toward us to the blue, and all added together make a wider feature than would be seen from a star at rest. So by analyzing the light from a distant galaxy with a spectrograph, which is the instrument which does this analysis, we can learn many things about it:

- a. The temperature of a star or the mean temperature of a collection of stars, such as a galaxy

た天体の動きがなければ、銀河は自らの重力のためにその構造を保ち続けることができません。これは太陽系の惑星が軌道運動をすることで太陽に落ちていかないのと同じようなことと言えるでしょう。銀河の中の個々の星を見ることはほとんどできませんが、遠ざかる星の波長は赤色に変化すること、近づく星の波長は青色に変化すること、また総合すれば、静止した状態の星を観察した場合よりも多くの特性情報が得られることから、このスペクトルの変動幅を観察することで、星がどれほどの速度で運動しているかを推測できます。したがって、この解析を行う機器である分光器を用いて遠方の銀河からの光を解析すれば、次に示すように銀河について多くを知ることができるのです。

- a. 星の温度、または銀河などの星の集合体の平均温度
- b. 天体の化学組成
- c. ドップラーシフトから推測される、近づくまたは遠ざかる天体のバルク運動
- d. 天体内の内部速度

ですから、分光は天体物理学にとって基本的なツールです。写真からも多くの情報を得ることができますが、実のところ分光を行わなければ、見えている天体の性質について深く知ることはできません。撮像と分光法の両方を利用してこそ、そしてそのうえで、できるだけ広い範囲の波長を網羅して初めて、宇宙について知ることができるのです。地球の大気は、幸いにも太陽エネルギーのほとんどが放射される波長域で透明ですが、超高温の天体を調査するには紫外線が、一部の高エネルギーの天体を調査するにはさらに短い波長が必要であり、X線やガンマ線の波長域では大気は不透明です。超低温の(または超高速で遠ざかる)天体の調査には赤外線が必要ですが、赤外線波長域での大気の透明度は極めて低いうえに、大気自体が強く放射しているため、暗い天体の研究は非常に困難になります。こうした理由に加え、天体の撮像から得られる情報を著しく制限する大気中の乱流があることから、宇宙から行う天文学の必要性が高くなっています。

ここで、分光について非常に重要なことが1つわかります。銀河の画像には、青、

- b. The chemical composition of the object
- c. The bulk motion of the object toward or away from us from the Doppler shift
- d. The internal velocities within an object

So spectroscopy is the fundamental tool for astrophysics. We can learn much from pictures, but we really have not much idea about the nature of objects we see without spectroscopy. We can learn about the universe only by using both imaging and spectroscopy, and at that really only if we cover as much wavelength range as we can. The atmosphere of the Earth (fortunately) is transparent in the wavelength range in which most of the energy from the sun is radiated, but to study very hot objects we need the ultraviolet and for some very energetic objects even shorter wavelengths, in the X- and gamma-ray regions, where the atmosphere is opaque, and for very cool—or very rapidly receding—objects we need the infrared, where the atmosphere is both much less transparent and is itself strongly radiating, which makes working on faint objects very difficult. It is for these reasons, as well as the turbulence in the atmosphere which severely limits the detail we can see in astronomical imaging, which has driven the need for astronomy from space.

Now notice a very important thing about spectroscopy. The image of a galaxy uses light at many wavelengths, even with color filters which select only blue, green, red, or near infrared light. Spectroscopy, on the other hand, splits the light into many, many colors, and the amount of energy in each one is a tiny fraction, a percent or much less, of the total light. So the detectors used in spectroscopy must be much more sensitive than the detectors used in imaging for an astronomical source of a given brightness, or, with a given detector, one can only study objects very much brighter than the faintest ones you can image.

4. Late Caltech, Westphal, CCDs, and Space Telescope

So astronomers are very intent on finding and using the most sensitive detectors possible. The efficiency of such detectors is measured by a quantity called the quantum efficiency or QE, which is the probability that one incoming photon of light produces a measurable signal. Also important is the detector *noise*, which limits how small a signal can be measured. When I began my career, the only detectors used for both imaging

緑、赤、または近赤外光のみを選択するカラーフィルターを通して、なお多くの波長の光が含まれます。一方、分光では光を非常に多くの色に分割しますので、各光のエネルギー量はすべての光のごく一部であり、1 %以下です。そのため、分光で 사용되는検出器は、所定の明るさの天体光源の撮像で 사용되는検出器よりも、はるかに感度が高くなければなりません。そうでなければ、一定の検出器では、撮像できる最も暗い天体よりもはるかに明るい天体しか調べられないことになります。

4. カルテック後期、Westphal、CCD、宇宙望遠鏡

そのため、天文学者は、可能な限り感度の高い検出器を探し出して利用しようと懸命です。こうした検出器の効率は、量子効率またはQEと呼ばれる、単一の入射光子が測定可能な信号を生成する確率を示す量で測られます。また、測定可能な最小信号を制限する検出器「ノイズ」も重要です。私がこの仕事に就いた当初、撮像と分光の両方に利用される唯一の検出器は写真乾板であり、そのQEは1 %未満でした。20%程度のQEを謳った光電子増倍管と呼ばれる検出器がありましたが、光を測定するだけで画像は作成しませんでしたので、カラーフィルターを用いた天体の明るさと色の測定に使用されました。Bev Okeの分光器は、出力に32本の光電子増倍管を使用し、光を32波長で同時に測定できました。

カルテック在任中、私はJim Westphalと出会いました。彼は主に惑星を研究する天文学者で、検出器(およびその他のあらゆる物)にも強い関心を持っていました(彼は本当に素晴らしい人でした)。当時、天文学のような超微光用途向け検出器の開発が非常に盛んでした。開発が進むにつれて、私たちは撮像と分光の両方にこの技術を採用しました。ジェット推進研究所(JPL)はカルテックと密接に連携しており、JPLのJim Janesickは、テキサス・インスツルメンツ社のMorley Bloukeと共同で、ある高性能の検出器の研究に取り組んでいました。この検出器は、電荷結合装置(CCD)と呼ばれるもので、数年前にベル研究所によって発明されました。QEはほぼ1(すなわち、効率100%)で、画像が作成でき、ノイズが小さいために極めて暗い天体の計測も可能でした。NASAは惑星宇宙探査ミッション用としてこの検出器に関心を示しましたが、地上からの天文学にも大変役立つことは明らかでした。私たちはこの研究に関わることができ、世界に類を見ない高感度な5 mハール望遠鏡用機器の製作に成功しました。その頃(1976年)、望遠鏡に搭載するカメラの提案をする機

and spectroscopy were photographic plates, for which the QE is less than one percent. There were detectors called photomultipliers which ad QE of twenty percent or so, but they just measured light and did not make an image; they were used to measure the brightness and colors of objects using colored filters. Bev Oke's spectrometer used 32 of these on the output of a spectrograph, so measured the light at 32 wavelengths simultaneously.

While I was at Caltech I met Jim Westphal, who was an astronomer who mostly studied planets but was also very interested in detectors (and everything else—he was truly amazing), and the development of detectors for very low-light level applications like astronomy was very active. We used this technology as it developed both for imaging and spectroscopy. The Jet Propulsion Laboratory (JPL) was closely associated with Caltech, and Jim Janesick at JPL was working with Morley Blouke at Texas Instruments on a marvelous detector which had been invented a few years before by Bell Laboratories called a charge-coupled device (CCD), which had QEs near unity (i.e., perfect), made images, and had detector noise small enough to allow the measurement of very faint objects. NASA were interested in these for planetary space missions, but it was clear that they would be very useful for astronomy from the ground as well. We were able to become involved in this work, and managed to build instruments for the Hale 5-meter telescope which were very much more sensitive than anything else in the world. At about that time (1976), an opportunity became available to make proposals for the camera aboard what was then just called Space Telescope and is now called the Hubble Space Telescope. Jim and I knew that CCDs would make possible a truly magnificent camera. He and I proposed through JPL and won the competition. We started to design and build the Wide Field/Planetary Camera (WF/PC) for Space Telescope.

5. Back to Princeton, and the Seeds for the Sloan Survey

In 1980 Jill Knapp, soon thereafter to become my wife, and I moved back (for me) to Princeton. I had at Caltech begun the construction of a very large CCD camera and spectrograph for the 5-meter telescope, a kind of ground-based analog of the Space Telescope camera, called four-shooter (Fig. 3). With this instrument we discovered the highest-redshift quasars, the most distant clusters of galaxies, and studied in detail how the populations of these clusters evolved (and the evolution is very strong) over cosmic time from about half the present 13 billion year age to the present.

会に恵まれました。そのカメラが搭載された望遠鏡は、当時は単に宇宙望遠鏡と呼ばれていましたが、現在ではハッブル宇宙望遠鏡と呼ばれています。Jimと私は、CCDを採用すれば本当に素晴らしいカメラができると確信していましたので、JPLを通じて提案したところ、審査に通りました。こうして、宇宙望遠鏡用の広視野惑星カメラ(WF/PC)の設計・製作が始まりました。

5. 再びプリンストン大学へ、そしてスローン・サーベイの種まき

1980年には、その後間もなくして私の妻となるJill Knappと共にプリンストン大学に移り(私の場合は戻り)ました。私はカルテック時代に、4シューターと呼ばれる、宇宙望遠鏡カメラの地上版の一種である5 m望遠鏡の超大型CCDカメラと分光器の製作に取りかかっていた(Fig. 3)。私たちはこの機器を用いて、最遠の銀河団である最大限に赤方偏移したキューサーを発見し、こうした種族の銀河団が、現在の宇宙年齢130億年の約半分から現在に至るまで、宇宙時間の中でどのように進化してきたか(また、その進化がいかに力強い)かを詳細に調査しました。

当時のCCDは、感度は極めて高いものの、あまり大型ではありませんでした。当時大型のものは、私たちが4シューターとWF/PCで使用したものでしたが、画素数は64万ピクセルで大きさは約1 cm四方でした。4シューターでは、これを4枚使いましたので、空の視野約0.15平方度に対し250万ピクセルの画素数でした(現在ではとても少なく思えますね)。このカメラで北天を覆うには100万枚の写真が必要で、5つのフィルターの露光に1分ずつかかりますので、天候が完璧だったとしても完成までに60年かかることになりますが、地球上には完璧な天候の観測所はありませんので、実在の観測所では100年以上もの時間を要することになります。

数年後の1986年、私はカルテックを訪ね、WF/PCの研究を続けることについて、Jim Westphalと話し合っていました。その際、CCDの先生であるMorley Bloukeが、私たちがいる部屋のドアをノックしたのです。彼はオレゴン州のテクトロニクス社に移っていて、そのときはロサンゼルスを訪問中でした。彼は部屋に入ってくると、彼が取り組んでいる面白いものを見せたいと告げました。それは7 cm弱四方で画素数600万ピクセルという、「一枚でできた」大型CCD搭載のシリコンウエハーでした(Fig. 4)。

ついに、サーベイを実現可能にするCCD検出器が現れたのです！

CCDs then were very sensitive but pretty small. The big ones at the time were the ones we used in four-shooter and in the WF/PC, which had 640,000 pixels and were about a centimeter square. Four-shooter used four of these, 2.5 megapixels (seems very small today) with a field on the sky of about 0.15 degrees square. It would require a million pictures with this camera to cover the northern sky, and taking one-minute exposures in five filters would take 60 years to accomplish even with perfect weather, and there are no observatory sites on Earth with perfect weather, so more than 100 years with any real existing site.

A few years later, in 1986, I was visiting at Caltech to meet with Jim Westphal about continuing work on the WF/PC, and Morley Blouke, the CCD *sensei* who meanwhile had moved to Tektronix in Oregon and was visiting in Los Angeles, knocked on the door. He came in and announced to us that he wanted to show us something interesting that he was working on. That something was a silicon wafer with a *single* large CCD built on it which had 6 million pixels and was nearly 7 cm square (Fig. 4).

Finally, here was a CCD detector which would allow a sky survey to be done!

I will pause here for a moment to discuss the state of sky surveys at the time. The standard tool used by astronomers was the Palomar Observatory Sky Survey (POSS), a photographic survey done in the 1950s at Palomar using the 1.2-meter Schmidt telescope with which I had done the cluster survey work in the early 1970s. There were photographs in red light and in blue of the entire northern sky, and when any new object was discovered in other bands, such as the infrared, X-ray, or radio, one would immediately go to the POSS to try to find it and see, perhaps, what it WAS—a star, a galaxy, a nebula, whatever. We are visual creatures, and need to see what a thing looks like so we can identify it. But the POSS was photographic, it did not show very faint objects, and so very little really quantitative information could be obtained. I had dreamed for years about replacing the POSS with a new *electronic, digital* sky survey with quantitative, accurate data, but this was waiting on the big CCDs, which Morley Blouke was developing.

The Challenger disaster occurred in 1986, about this time, and it was not clear whether the Space Shuttle would ever fly again, and so whether the Space Telescope would ever be launched. This was resolved, of course, but was not certain at the time.

I was still very involved in the Space Telescope camera, which was nearing completion, but became instantly intrigued by this new device, and soon began working on the design of an instrument which could use these new detectors for a sky survey. Various technical considerations, including the nature of the detectors, the size and

ここで少し話を中断して、当時のサーベイの状況について説明します。天文学者が利用していた一般的なツールは、1950年代にパロマー天文台で1.2mシュミット望遠鏡を使って行われた、写真による「パロマー天文台スカイ・サーベイ (POSS)」で、そのデータは私が1970年代初頭に銀河団サーベイを行った際にも使用しました。北天全体の赤と青の可視光の写真があり、赤外線、X線、電波など可視光以外のバンドで新しい天体が発見されると、すぐさまPOSSのデータと照らし合わせて、それが何なのか——ひょっとしたら星か、銀河か、星雲か——を探りだそうとしました。私たちは視覚で物事を捉える生き物ですので、どういう状態なのかを目で見ることで、それが何なのかを識別します。しかし、POSSのデータは写真であり、非常に暗い天体は写っていませんでした、実のところ定量的な情報はほとんど得られませんでした。私は何年もの間、POSSに取って代わる、定量的で正確なデータを備えた新しい「電子的」で「デジタルな」サーベイを夢見ていましたが、その実現には大型CCDの登場を待たねばなりませんでした。それをMorley Bloukeが開発していたのです。

1986年の今頃、チャレンジャー号の大惨事が発生し、スペースシャトルが再び飛ぶかどうかは定かではなかったため、宇宙望遠鏡が打ち上げられるかどうか不明でした。もちろん、この問題は解決されたのですが、当時は分かりませんでした。

私はまだそのときも宇宙望遠鏡カメラに深く関わっていて、カメラが完成間近であつたにもかかわらず、この新しい装置にたちまち興味をそそられ、この新検出器が使えるサーベイ機器の設計にすぐさま取りかかりました。検出器の性質、ピクセルサイズと数、観測条件が良い場合に得られる画質、望遠鏡に適した光学設計などのさまざまな技術的な問題の検討に加え、サーベイにかかる時間や費用、誰が資金を調達するのかといった非技術的な事項も考慮した結果、最終的に機器およびサーベイのほぼ最適な設計に辿りつきました。私は1980年代後半の数年間をこれに費やしました。

宇宙望遠鏡が1990年についに打ち上げられると、望遠鏡には厄介な光学的問題があり、設計どおりのすばらしい画像を撮影できないということがすぐに明らかになりました。私は、ひどい間違いだったのですが、この問題は修正できないと思い込んで、10年以上Jim Westphalと協力して主導してきたチームを去りました。そして代わりに、大型CCDを使ったサーベイの計画に全面的に取り組むことにしました。

新たに改善されたWF/PCをはじめとする新しい宇宙望遠鏡用機器は、望遠鏡の光学系の誤差を内部補償するよう製作され、勇敢な宇宙飛行士たちが設置に成功しました。現在ハッブル宇宙望遠鏡と呼ばれるこのミッションは、地上からではできなかつ

number of their pixels, the image quality obtainable from good observatory sites, possible optical designs for the telescope, and not-so-technical considerations like how long a survey would take, how much it would cost, and who one might persuade to fund it, led finally toward a design which was close to optimal for the instrument and the survey. I worked on this for a number of years in the late 1980s.

When the Space Telescope was finally launched, in 1990, it was very soon clear that there was a terrible optical problem which prevented the telescope from obtaining the wonderful images for which it had been designed. I was convinced, quite incorrectly, that the problem could not be fixed, and left the team Jim Westphal and I had led for more than a decade. I turned instead to fully developing the design for the big CCD survey.

New instruments, including a new, modified WF/PC, were built for Space Telescope which compensated the optical error in the telescope internally. These were successfully installed by a heroic group of astronauts, and the mission, now called the Hubble Space Telescope, has gone on to do really wonderful science that could never have been done from the ground, and we have all been properly impressed by the fantastic Hubble images. But I am not sorry I left the effort, because the survey I was designing and to which I devoted my career thereafter happened, was very, very successful, and is, again, certainly the reason I am speaking to you today.

6. The Sloan Digital Sky Survey

So let us talk a little about it. The optimal size of the telescope turned out to be not very large even by the standards of the day—the 8-meter Japanese Subaru telescope, which we will talk about more later, the 10-meter Keck telescope, the 8-meter Gemini and VLT telescopes were being built and commissioned at about this time. But the best size for this survey telescope was about 2.5-meters (Fig. 5). The optical design had to be very special and new, because I wanted very much to use the big CCDs in a scanning mode which had been developed by the U.S. Air force for reconnaissance satellites and aircraft looking at the *ground*. In this mode the image moves across the CCD and one moves the *electronic* image at exactly the same rate, so the picture comes out as a continuous tapestry of the sky—one never needs to stop, close the shutter, and read the detector, because the detector is reading continuously, and the observing is 100 percent efficient. But this required optics with no distortion and a very flat focal surface, and this required a new kind of optical design, which I was successful in producing—but

た実にすばらしい科学的研究へと発展し、私たちは皆、ハッブルのすばらしい画像にすっかり感銘を受けています。しかし、私はこの研究を離れたことを後悔してはいません。私が構想してその後の研究人生を捧げたサーベイは、極めて大きな成功を収めたからです。繰り返しになりますが、それこそが私が今日皆様にこうしてお話しさせて頂いている理由です。

6. スローン・デジタル・スカイ・サーベイ

さて、少しお話ししておきたいことがあります。今日の基準でも、望遠鏡の最適な大きさは、あまり大きくはないことが分かっています。日本の8 mのすばる望遠鏡——これについては後ほど詳しくお話ししますが——他にも10 mのケック望遠鏡、8 mのジェミニ望遠鏡とVLT望遠鏡などが、この時期に製作され運用開始されています。しかし、このサーベイに最適な望遠鏡の口径は約2.5 mでした (Fig. 5)。大型CCDには、偵察衛星や航空機で「地上」を観測するために米空軍が開発した走査方式を是非採用したかったので、極めて特別で新しい光学設計が必要でした。この方式では、写される対象がCCD上を移動していくと、まったく同じ速度で「電子」画像も動いていくので、空の写真はつながったタペストリーのように出てきます。検出器は継続的に作動しており、観測は完全に無駄なく実施されますので、人がシャッターを止めたり閉めたり、検出器を読み取ったりする必要はありません。ただし、歪みがなく、極めて平坦な焦点面を持つ光学系が必要であり、そのためには新たな光学設計が必要でした。私はその光学設計の実現に成功しましたが、世界にはこのような望遠鏡はありませんでしたので、サーベイを実施するには新しい望遠鏡を製作する必要がありました。カメラは、結局テクトロニクス社の4メガピクセルの新しい大型CCDを30個使用しましたので (Fig. 6)、120メガピクセルになり、視野は2平方度となりましたが、視野を完全に検出器でカバーすることはできませんでした。紫外線から近赤外線までの範囲を網羅するために5つのフィルターを使用することになり、露光時間は約1分でした。フィルターと検出器は縦方向に配置され、走査画像はこの向きに沿って移動するので、5分もかからずにこれらの5色でどんな天体の画像も取得できます。この手法は変光天体の測定に極めて有用であるとわかりました。こうした天体は「通常」、もっと長い時間尺度で変光します。

同じ望遠鏡に、これもまた驚異的新技術である光ファイバーから入力を受ける分光

there were no telescopes like this in the world, so the survey would require making a new telescope. The camera would use thirty of the new big Tektronix CCDs (Fig. 6), which in the end were 4 megapixel devices, so 120 megapixels on the sky, on a field which was 2 degrees square but was not completely filled with detectors. We were to use 5 filters to cover the range from the ultraviolet to the near infrared, with exposure times of about one minute, and since the filters and detectors were arranged in columns and the scanning image moved along those columns, we got images in those five colors of any object within about 5 minutes, which proved very useful for measuring variable objects, which *usually* vary on much longer timescales.

On this same telescope could be permanently mounted two spectrographs fed by another new technological marvel, optical fibers. Each spectrograph could accept the inputs from 320 fibers, so the spectra of 640 stars or galaxies could be obtained at the same time. With exposure times of about one hour (remember that spectra take much longer than images!) we could obtain a million spectra in about 5 years allowing for moonlight and weather. With a conventional single-object spectrograph this survey would take 3,000 years!

The size of the field and the number of fibers balanced nicely—galaxies for which good spectra could be obtained in an hour or so—that is, were of the right *brightness*, were also of about the right number to fill 600 or so fibers, so we would use the full capability of the telescope and instruments.

We had to find money to build it, a site to build it *on*, vendors to supply equipment, and, especially, skilled people to help develop the hardware and software. It was a project unlike any other ground-based astronomy project, though NASA had done a few similar things, most notably the IRAS project, in space. Jerry Ostriker, then department chair at Princeton and later provost of the University, helped organize the project through a consortium of universities called ARC, the Astronomical Research Consortium, to which Princeton belonged and were developing an observatory site called Apache Point in New Mexico. Professor Don York, at the University of Chicago, became director, and I served as Project Scientist.

By the end, more than twenty universities and laboratories joined the project, mostly in the U.S., some from Europe and Latin America, but notably a large group of astronomers from Japan, called the JPG, Japan Promotion Group (Fig. 7). This was a natural step for Princeton, because we had had close ties with Japanese astronomers for a very long time, and two young researchers at the University of Tokyo, Maki Sekiguchi and Mamoru Doi, had been working on multi-CCD cameras for some years. They spent

器2台を恒久的に取り付けることができました。各分光器は320本の光ファイバーからの入力を受け取ることができるので、同時に640個の恒星または銀河のスペクトルを取得できました。約1時間の露光時間で(スペクトルを得るのは画像よりもはるかに長く時間がかかるのです！)、月明かりや天候も考慮しつつ、約5年で100万のスペクトルを得られました。従来の単一の天体分光器では、このサーベイに3,000年かかったでしょう！

使用した視野の広さと光ファイバーの数は銀河のサーベイに最適でした。というのも、1時間程度の露光できれいなスペクトルを得られる銀河は、適度に「明るく」、数も600本程度の光ファイバーを利用するのにちょうど良かったのです。そのため、望遠鏡と機器の能力を最大限に活用することができました。

私たちは、望遠鏡を製作するための資金や場所、機器を供給してくれるメーカー、そして特に、ハードウェアとソフトウェアの開発を手伝ってくれる技術者を探す必要がありました。最も注目すべきIRASプロジェクトなどNASAが宇宙でいくつか同様のプロジェクトを実施してはいましたが、私たちの望遠鏡は、他の地上天文プロジェクトとは一線を画するものでした。プロジェクトの組織化は、当時プリンストン大学で学部長を務め、のちに学長となるJerry Ostrikerが、天体物理学研究連合(ARC)という大学コンソーシアムを通じて支援してくれました。ARCにはプリンストン大学も加わっており、ニューメキシコ州のアパッチポイント天文台を開発していました。シカゴ大学のDon York教授がディレクターに就任し、私はプロジェクト研究員を務めました。

結局、主に米国から、一部はヨーロッパや中南米から、合わせて20を超える大学や研究所がこのプロジェクトに参加しました(Fig. 7)。日本からは日本推進グループ(JPG)という特に大規模な天文学者団が参加しました。プリンストン大学は日本の天文学者と非常に長期にわたり緊密に連携してきましたし、東京大学の関口真木と土居守という2人の若手研究者が何年もマルチCCDカメラの開発に取り組んでいましたから、日本から大規模な学者団が参加したことは、プリンストン大学にとって自然な展開でした。東京大学の2人は、プリンストン大学で多くの時間を過ごし、カメラの開発に決定的な役割を担いました。

このサーベイで、天文学にとっても全く新しい側面は、非常に大がかりなソフトウェア開発作業が必要な点でした。具体的には、この新しいサーベイに適した方式でデータを取得してすべてを記録し、目的に則した分析を行い、分光対象のリストを作

a lot of time in Princeton and were crucial to the development of the camera.

An aspect of the survey which was also very new to astronomy was the very large software effort required to obtain the data with this new survey mode, record it all, analyze it for its own sake and to prepare target lists for the spectrographs, and finally to store it and to serve it in a way that astronomers could use it. The JPG had the task of testing the imaging reduction software being prepared mostly at Princeton by Robert Lupton and managed by Jill Knapp, and Masataka Fukugita, then at Kyoto University, led the testing effort.

It was to take 10 years to prepare all of the pieces of the survey and many administrative, managerial, and financial problems to solve along the way. The project ended up costing many times our initial naive estimate, partly because it took much longer than we initially thought it would because of the technical complexity, and partially because the very large software job, which was very different from anything which had been done before, was enormously more expensive than we had guessed.

The funding came from many sources; the first large grant was from the Sloan Foundation, who were very supportive through the long years of preparation, but the member institutions, the National Science Foundation, and NASA provided the bulk of the nearly 100 million U.S. dollars the survey cost in the end.

All of this has been ably described in a book by the excellent science writer Ann Finkbeiner, called “A Grand and Glorious Thing.” Please go read it if you want to know more.

So what did SDSS accomplish? It was sold to the funding agencies as a telescope and survey which would map the large scale structure of the distribution of galaxies in the universe: clusters, filaments, voids, which we see today. These structures, we believe, formed by the action of their own self-gravity from the tiny tiny lumps in the very early universe which we see in the microwave background radiation, a sea of radio radiation which fills the universe and very accurately represents a cold body at only 2.7 degrees above absolute zero. We accomplished this, but also very much more.

We obtained excellent spectra for a million galaxies, a hundred thousand quasars, of order half a million stars, and performed photometric analyses (brightnesses, sizes, shapes) of about 100 million objects in the northern sky. The smaller part of the southern sky visible from New Mexico in the fall was treated somewhat differently—there a single 2-degree wide strip was imaged over and over again to go about six times fainter to look for and measure even fainter objects, and to discover variable objects like the exploding stars called supernovae.

A short list of the things the survey did of which I am proudest are

成して、最終的にデータを保存して天文学者が使える形でデータを提供するための作業です。画像処理ソフトウェアの試験作業を担当したのはJPGで、主にプリンストン大学でRobert Luptonが作成してJill Knappが運用したソフトウェアを、京都大学の福来正孝が主導して試験しました。

サーベイの全部品の製作と、その途上で解決すべき多くの管理上、運営上、資金上の問題の対策に10年かかると考えられていました。プロジェクトは、最終的には当初の甘い見積もりの何倍もの費用を要しました。技術的な複雑さから最初に考えていたよりもずっと時間がかかったことや、非常に大がかりなソフトウェアの開発作業が過去に実施されたどの作業とも全く異なり、想像していたよりもはるかに費用がかさんだことが、その原因です。

資金は、さまざまな財源から調達されました。最初の大きな助成金は、長年の準備期間にわたり大いに支援してくれたスローン財団からのものでした。しかし、最終的には、加盟機関、全米国立科学財団、NASAが、1億米ドル近いサーベイ費用の大部分を出資してくれました。

この話の全容は、優れた科学作家Ann Finkbeinerの著書『A Grand and Glorious Thing』に分かりやすく説明されていますので、詳しく知りたい方は読んでみてください。

では、SDSS が達成したこととは何でしょうか。SDSSは、私たちが今日目にする銀河の分布を示す宇宙の大規模構造、すなわち銀河団、フィラメント、ボイドを描き出した望遠鏡とサーベイとして、資金提供機関に認められました。こうした構造は、極めて初期の宇宙でごく小さな塊から自己重力作用によって形成されたと私たちは考えています。それについては、絶対温度2.7度という極めて低温で宇宙を一様に満たす電波放射であるマイクロ波背景放射から分かります。私達はこれ以外にも、さらに多くのことを成し遂げました。

100万個の銀河、10万個のクエーサー、50万個の恒星の見事なスペクトルを取得し、北天にある約1億個の天体の測光分析(明るさ、大きさ、形状の分析)を行いました。秋にニューメキシコから見える南天の一部を、多少異なる方法で(幅2度の細長い領域を一カ所につき何度も撮像して明るさを約6倍にし、暗い天体も探し出して測定できるようにした)サーベイを実施し、超新星と呼ばれる爆発している恒星などの変光天体を発見しました。

私がサーベイによる成果で最も誇りに思っているものを簡単にまとめると、次の通

a. Weak gravitational lensing. When light goes by a massive body like a star or galaxy, its path is bent slightly; this is a prediction of General Relativity which has been verified in detail. The angles are very small and the effect is very hard to measure, but is a direct way of measuring masses of distant objects. SDSS was accurate and consistent enough to do this.

b. SDSS found and measured a predicted effect in the distribution of galaxies which result from sound waves in the very early universe formed by the tiny bump which was to become a galaxy. This is called the Baryon Acoustic Oscillation phenomenon. It gives astronomers an accurate meter stick by which the expansion of the universe can be measured.

c. The SDSS not only told us about the distribution of galaxies, but also revolutionized the study of the properties of galaxies—sizes, colors, the population of stars which make them up, their chemistry and ages. The imaging and spectroscopy worked together beautifully for this, and our understanding of the life cycle of galaxies and how they evolve largely is the result of these studies.

d. The SDSS was not conceived at all as a tool for studying the solar system, but we imaged completely serendipitously thousands of asteroids, and our photometry showed clearly that the various asteroid families which had been discovered from earlier, sparser data had clear chemical signatures.

e. Astronomers had been looking for years for stars which are of too low mass to ignite the thermonuclear reactions in their interiors which make the sun and other stars shine. Called “brown dwarfs”, a few of these stars had been found in binary systems and in the field serendipitously, but they appeared in large numbers in the SDSS imaging, bright in the most infrared SDSS band.

f. The large-scale structure results on which the survey had originally been sold. The statistics of the galaxy population emerged with high accuracy, and the sample is large enough that we can say for sure that galaxies of different properties are distributed quite differently. This was known before, but with nothing like the precision which came from the SDSS survey. The survey

りです。

- a. 弱い重力レンズ効果。光が恒星や銀河のような巨大な天体の近くを進む際、その経路がわずかに曲がります。これは、詳細に検証されてきた一般相対性理論による予測です。角度が非常に小さく、影響の測定は極めて困難ですが、遠方の天体の質量を測定する直接的な方法です。SDSSには、これを実現するのに十分な正確さと一貫性がありました。
- b. ごく初期の宇宙におけるわずかな物質密度の揺らぎによって、銀河が形成されたと考えられています。その揺らぎによって生まれた音波に起因した影響が銀河分布に見られると予測されていましたが、SDSSではこの影響を発見し、測定しました。これは、バリオン音響振動現象と呼ばれ、天文学者にとって宇宙の膨張を測定することができる正確な物差しとなっています。
- c. SDSSは銀河の分布を示しただけでなく、銀河の特性(大きさ、色、銀河を構成する星の種族、化学的性質、年齢)の研究に革命を起こしました。撮像と分光が見事にうまく働き、銀河のライフサイクルと銀河の大いなる進化について理解できたことは、こうした研究の成果です。
- d. SDSSは、太陽系を研究するためのツールとしては全く想定されていませんでしたが、全く偶然にも私たちは何千もの小惑星を画像化し、初期の少ないデータから発見されていた様々な小惑星群が明確な化学的特徴を持っていることを、測光によって明らかにしました。
- e. 天文学者は、質量が小さいために太陽や他の恒星を輝かせる内部の熱核反応を引き起こせない星を何年も探していました。「褐色矮星」と呼ばれるもので、こうした星のいくつかは連星系や、思いがけず望遠鏡の視野中に偶然発見されていましたが、SDSSの撮像で多数見つかり、SDSSの最も赤外側のバンドが明るく見られました。
- f. SDSSが元々売りにしていた、大規模構造の観測結果。銀河種族の統計が高精度

shows clearly that the distribution of matter in the universe is very structured into long filaments, clusters at the intersections of these filaments, and vast voids in which there are very few galaxies. All of this is in agreement with large numerical simulations which evolve the tiny bumps we see in the microwave background to the present.

The impact on the field has been quite profound. As of about a month ago, there were 9,299 scientific papers using SDSS data, most of them *not* from SDSS scientists—the data are completely open, which we will talk about in a moment. The number of citations for these papers is about half a million, and a thousand of these papers have been cited a hundred or more times.

But it is not only the beautiful scientific results which have changed the field. It was our intention from the beginning that the data be completely open to the community; not only the data but all of the software used to reduce it, archive it, and serve it. There were no restrictions within the collaboration, either. No-one “owned” any data. Anyone within the collaboration could work on anything, even if it were already being investigated by someone else, even if that someone else was an important, powerful professor at one of our institutions. This was certainly not what astronomers were used to; they were not used to large collaborations, were not used to sharing data, were not used to forming collaborations with people they did not know who might be halfway around the world but had similar interests—this last was not mandatory by any means, but its utility for getting work done and understanding things soon became apparent. There was, of course, opposition to these policies early in the project, and making them the rules by which we lived was not by any means easy, but I think there is almost no one now who has worked with SDSS who thinks this way of doing science is a bad idea.

The openness of the data and tools have also changed the way people do research. You do not need to go to small telescopes for a couple of nights a year to study your galaxy. For many of the things you might want to do, you need only to access the SDSS database; the data are already there.

It is obvious from these remarks that I regard this project very highly. Personally, it has been a strange journey. I was a very active scientist before about 1990, when the SDSS planning and construction was beginning in earnest, but since then I have been really only involved in the building, survey planning, and data handling aspect of the project, and, later for other survey projects that we will discuss. In a real way the project

で示されており、サンプル数も十分だったので、異なる特性を持つ銀河の分布は全く異なることがはっきり分かりました。これは以前から知られていましたが、SDSSのサーベイで得られたような精度のものはありませんでした。このサーベイによって、宇宙における物質の分布が、長いフィラメント、こうしたフィラメントの交点にある銀河団、銀河がほとんど無い広大なボイドによって構成されていることが明らかになりました。これはすべて、マイクロ波背景放射に見られる小さなピークを現在まで進化させる大規模な数値シミュレーションの結果と一致しています。

天文学分野への影響は非常に大きなものでした。今から約1カ月前の時点で、SDSSのデータを使用した科学論文は9,299本あり、そのほとんどがSDSSに参加して「いない」科学者が執筆したものでした。この後すぐ触れますが、データは完全に公開されているのです。こうした論文の被引用数は約50万回で、100回以上引用された論文が1,000本あります。

しかし、天文学分野に変化をもたらしたのは、すばらしい科学成果だけではありません。私たちは最初からデータだけでなく、データの処理・保存・提供に使用したすべてのソフトウェアを天文学界に完全に公開するつもりでした。共同研究においても制限はありませんでした。データは誰の「所有」でもありませんでした。共同研究に参加した誰もが、どんなテーマにも取り組むことができました。たとえ既に他の誰かが研究していたとしても、たとえその他の誰かが所属機関の重要で有力な教授であったとしても、です。これは、確かに天文学者がそれまで慣れていた環境とは異なるものでした。天文学者は大規模な共同研究にも、データの共有にも、地球の裏側にいるかもしれないが同じ関心を持つ世界中の知らない人たちと共同研究を立ち上げることに、不慣れでした。最後の項目は決して必須のものではありませんが、仕事を成し遂げ、物事の理解を早めるのに有用であることは、すぐに明らかになりました。もちろん、プロジェクトの初期にはこうした方針への反対もあり、この方針を活動していく上でのルールにすることは決して容易ではありませんでしたが、SDSSで働いた人の中で、この科学のやり方を悪いと考える人は今ではほとんどいないと思います。

データやツールの公開は、人々の研究方法も変えました。対象の銀河を研究するために、年に2、3日、小さな望遠鏡を覗きに行く必要はありません。やりたいことの多くは、SDSSのデータベースにアクセスするだけで済みます。データは既に存在し

was my child, and the wonderful young people who have done most of the science with the survey my children as well. I am enormously proud of them, for staying with the project through its long financial difficulties at a real risk to their careers, and, of course, for all of the truly marvelous science they have done.

7. What Next?

What the SDSS did, as I have remarked before, is to take a complete and accurate census of the objects in the universe as it is today, or was in the immediate past.

Let me amplify on that remark. Light travels at the enormous speed of 300,000 km/sec, and we are not at all aware in everyday experience that it takes time at all to travel. To go across this hall, a photon takes a ten-millionth of a second. But even in the solar system, the light from the sun takes eight minutes to reach the earth, and several hours to reach Neptune. Four years to reach the nearest star, and 60,000 years to travel across the galaxy, two million years to reach the nearest large galaxy in Andromeda. The most distant quasars and galaxies we observe sent the light we observe today only a small fraction of the age of the universe after the Big Bang, and the microwave background photons we see today left when the universe was only about 400,000 years old, to be received by our radio antennas today, 13.7 billion years later.

So when we look out at the universe, we look back in time. The SDSS studied galaxies out to about two billion light years distant, so looked back only about fifteen percent of the age of the universe. Things have not changed much, astronomically speaking, in that time. To study how things form and evolve in their most active time requires that we go *much* deeper, fainter.

We know from small samples that most of the mass of the universe now in stars was formed since about redshift $z=2$, which means that the universe was $1/(1+z)$, a third, of its present size and a little less than a quarter of its present age. Bright galaxies at that time and distance, about ten billion light years, are much too faint to have been recorded by the SDSS. This period of the universe, called its “high noon” is of intense interest, since that was the period that most of what we see in the universe (and, doubtless, in our Galaxy) was formed. The universe today is very much in its old age, winding down (like me.)

Thus the universe provides us with a history book of how it evolved with time, but to read it requires very powerful instruments to study very faint objects. How is this to be done?

ているのです。

こうした発言から、私がこのプロジェクトを非常に高く評価していることは、すぐにお分かり頂けるでしょう。個人的には、奇妙な道のりでした。私はSDSSの企画・構築が本格的に始まった1990年ごろより前は非常に活動的な科学者でしたが、それ以降は、実のところ、このプロジェクトとこれからお話しするその後の他のサーベイプロジェクトの望遠鏡製作、サーベイ計画、データ処理の部分に携わるのみでした。プロジェクトは実質的に私の子供同然であり、サーベイで多くの成果を出したすばらしい若者たちも、同様に私の子供同然でした。自らの研究人生を懸けて、長い資金難の時代もずっとプロジェクトに従事し続けてくれた若者たちを、そしてもちろん、彼らが出してきた本当にすばらしい成果のすべてを、私は大変誇りに思っています。

7. 今後について

SDSSの成果は、これまで述べたように、今日の、あるいは直近の過去の状態の宇宙における天体の完全かつ正確な調査です。

詳しく説明します。光は30万km/秒というものすごい速度で進みますので、私たちは光が進むのに時間がかかるということを、日常の経験では全く意識していません。光子はこのホールを1,000万分の1秒で横切ります。しかし、太陽系では、太陽からの光が地球に到達するまでに8分かかり、海王星に到達するには数時間かかります。最も近い恒星までは4年、銀河系の横断には6万年、最も近い銀河であるアンドロメダ大銀河に到達するには200万年要します。私たちが観測する最も遠方のクエーサーや銀河の今日観測される光は、ビッグバンからほんのわずかしかな経っていないころのものです。今日見られるマイクロ波背景放射の光子は、宇宙がわずか約40万歳のときに放出されたもので、それを137億年後の今、私たちが電波アンテナで受信しています。

ですから、宇宙を眺めるとき、私たちは時間を振り返っていることになります。SDSSでは約20億光年離れた銀河まで調査しましたが、宇宙年齢のたった約15%を振り返ったに過ぎません。天文学的に言えば、宇宙の状態はその頃とあまり変わっていません。最も活発な時期における宇宙の形成・進化を調査するには、「はるかに」遠く、より暗い天体まで対象を広げる必要があります。

現在の宇宙における恒星の質量のほとんどが、赤方偏移 $z=2$ 程度のころから形成

Japan has what is probably the finest really large telescope in the world, Subaru, and had the foresight to design it as the *only* large telescope in the world with a large field of view, so it is a perfect instrument to perform powerful surveys of the sort we need to read the history book.

And such surveys are under way. Maki Sekiguchi's student Satoshi Miyazaki, took up Sekiguchi-san's cause and designed and built a marvelous multi-CCD camera with 440 million pixels for Subaru, HyperSuprimeCam (HSC), and a large imaging survey with this instrument is more than half complete.

I contributed a small amount to the HSC effort (Fig. 8), but have been, since the SDSS, mostly concerned with the spectroscopic part of the same deep survey, which together with the HSC imaging survey is called Sumire. The project was partially funded by the Japanese ministry on a proposal put forward by Hitoshi Murayama, then director of the newly formed Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe (Kavli-IPMU) in Kashiwa, a research branch of the University of Tokyo, and partly by a large consortium of institutes around the world, from Japan, Taiwan, the U.S., France, Germany, and China.

The spectrograph is called simply PFS (Prime Focus Spectrograph), a large, 2,400-fiber spectrograph which uses the same optical setup as HSC at the Subaru Prime Focus (Fig. 9). The instrument and spectroscopic survey is being very ably managed by Naoyuki Tamura at IPMU. The spectroscopic survey is to begin in 2022.

The instrument consists of a machine at the prime focus of Subaru which has 4,800 tiny motors to position the 2,400 fibers, a 50-meter run of 2,400 optical fibers to the spectrographs, which live off the telescope in a room in the Subaru dome. There are 4 large spectrographs in that room, each of which take 600 spectra simultaneously in three bands, one blue, one red, and one near infrared, to cover completely the wavelength range 3,800 nm in the near ultraviolet to 1,260 nm in the near infrared. My colleagues and I at Princeton and Johns Hopkins and the Laboratoire d'Astrophysique in Marseille, France are building the 12 cryogenic cameras and the spectrographs; the prime focus machine is being built at Caltech and at ASIAA in Taiwan, and the fiber system by the Laboratorio Nacional de Astrofisica in Brazil. The software effort is supported by IPMU, Princeton, Caltech, and the Max Planck Institute in Garching, Germany, and the project office is at IPMU. The project is, if anything, even more distributed than the SDSS was, but it is a very productive and happy collaboration, and I am proud to be part of it and contributing to it.

It is worth mentioning in the context of this occasion that the most difficult part of

されたことが、わずかなサンプルから分かっています。これは宇宙の大きさが現在の $1/(1+z)$ つまり 3 分の 1 で、年齢は現在の 4 分の 1 以下であったことを意味します。その当時の約100億光年離れた明るい銀河は、あまりに暗くてSDSSでは記録できませんでした。「全盛期」と呼ばれる宇宙のこの時代は、宇宙に見えるもののほとんど(そして、間違いなく私たちの銀河系)が形成された時期ですので、強い関心が向けられています。今日の宇宙は、(私のように)かなり老齢で、衰退しつつあります。

このように宇宙は、時間とともにどのように進化してきたかについて、1冊の歴史書を与えてくれますが、それを理解するには、非常に暗い天体を調査するための極めて強力な機器が必要です。この問題はどうすれば良いのでしょうか？

日本が所有するすばるは、おそらく世界最高性能の大型望遠鏡です。世界で「唯一」の広視野大型望遠鏡として設計する先見性が日本にあったおかげで、すばるは宇宙の歴史書を読み解くのに欠かせない有力なサーベイの実施に最適な機器となっています。

そして、そのような有力なサーベイが現在進行しています。関口真木の教え子である宮崎聡が、関口のテーマを引き継ぎ、すばる向けに4億4,000万ピクセルのすばらしいモザイクCCDカメラ、ハイパー・シュプリーム・カム(HSC)を設計・製作しました。この機器を使用した大規模撮像サーベイは、半分以上完成しています。

私はHSCの取り組みに多少は貢献しましたが(Fig. 8)、SDSS以来、HSC撮像サーベイと共にすみれ計画と呼ばれる同様の遠方サーベイの分光部分に主に携わっています。このプロジェクトは、当時、東京大学の研究支部として柏に新設されたカブリ数物連携宇宙研究機構(Kavli IPMU)の機構長であった村山斉によって出されたプロポーザルに対して、日本の省庁から一部、そして日本、台湾、米国、フランス、ドイツ、中国など世界中の研究機関による大規模なコンソーシアムから一部、資金提供を受けました。

簡潔にPFS(主焦点分光器)と呼ばれるこの分光器は、2,400本の光ファイバーを備えた大型分光器で(Fig. 9)、すばる主焦点にHSCと同一の光学装置を使用しています。機器と分光サーベイはIPMUの田村直之によって非常にうまく管理されており、分光サーベイは2022年に開始される予定です。

この機器は、すばる望遠鏡の主焦点に設置された機械から成り、2,400本の光ファイバーの位置を調整する4,800個の小型モーターを備えています。望遠鏡からは、すばるドーム内の一室に置かれた分光器まで、およそ50 mにわたって2,400本の光ファイバーケーブルが延びています。その部屋には4台の大型分光器があり、それぞれ

the large spectroscopic cameras was the optical/mechanical structure in the near infrared cameras, and the current design was made possible by a quite wonderful ceramic material called Silicon Carbide made by Kyocera. The HSC camera also used it for the large coldplate which holds the more than 100 CCDs. It is extremely stiff, does not change dimensions when going very cold, conducts heat extremely well, and is very stable. It would have been difficult if not impossible to build these instruments without it.

The survey itself will consist of three main parts. The first is to improve the Baryon Acoustic Oscillation measurements to greater distances in order to better measure the history of the expansion of the universe and use a gravitational probe called redshift space distortion to study the growth of structure in the universe as it expands. The combination of these provide information on the dark energy which is currently causing the expansion of the universe to accelerate and on the correctness of Einstein's General Theory of Relativity on the very largest cosmic scales. The second is to investigate the formation and evolution of galaxies to beyond the universe's high noon. The sample size and sampling in distance (and therefore time) will tell us how galaxies evolve in different environments in the cosmic web and come to be the vast variety of things we see in SDSS at the present time. The third will look at faint, distant, very old stars in our Galaxy and in our immediate neighbor galaxies for chemical and dynamical clues to how the Galaxy and its friends formed. All these are attempts in various ways to read the history book which the universe opens for us to read by looking very faint and very far, but we must learn to read it.

We do not know what it will tell us, but we do know that it will bring us closer to understanding where we came from and, perhaps, where we are going.

が600本のスペクトルを青、赤、近赤外の3つのバンドで同時に取得し、近紫外の380nmから近赤外の1,260nmまでの波長範囲を完全に網羅します。プリンストン大学、ジョンズ・ホプキンス大学、フランスのマルセイユ天文物理研究所の同僚たちと私は、12台の極低温カメラと分光器を製作しています。主焦点装置はカルテックと台湾の中央研究院天文及天文物理研究所(ASIAA)で、光ファイバーシステムはブラジル国立天文台で製作されています。ソフトウェアの開発は、IPMU、プリンストン大学、カルテック、ドイツのガルヒングにあるマックスプランク研究所によって支援されており、プロジェクト事務所はIPMUにあります。プロジェクトは、どちらかといえばSDSSよりもさらに分散していますが、非常に生産的で楽しい共同研究です。私はこれに参加し、貢献していることを誇りに思います。

大型分光カメラで最も難しいのは近赤外線カメラの光学・機械構造であり、現在の設計が京セラ製の炭化ケイ素と呼ばれる非常にすばらしいセラミック素材によって可能になったことは、この機会に触れておくべきことだと思います。HSCカメラでも、100個を超えるCCDを保持する大型冷却板に使用しました。この素材は非常に硬質で、超低温での寸法安定性に優れ、熱伝導性が非常に高く、大変安定しています。この素材無くしてこうした機器を製作することは、不可能ではないにしても、困難だったでしょう。

サーベイ自体は、主に3つの部分で構成されています。1つ目は、宇宙の膨張の歴史をよりよく測定するため、はるか遠方にある天体に対するバリオン音響振動測定を向上させることと、赤方偏移空間歪みと呼ばれる重力プローブを利用して膨張に伴う宇宙の構造の成長を調査することです。これらを組み合わせることによって、現在宇宙の膨張を加速させているダークエネルギーについて、また極めて大きな宇宙規模におけるアインシュタインの一般相対性理論の正しさについて、情報を得ることができます。2つ目は、宇宙の最盛期の前からの銀河の形成と進化を調査することです。このサーベイのサンプルサイズと観測する距離(すなわち遡る時間)であれば、宇宙のネットワーク構造の中にあるさまざまな環境で銀河がどのように進化し、現在SDSSで見られるような膨大な種類の天体がどのように出来てきたかが分かってくるでしょう。3つ目は、私たちの銀河とその近傍の銀河がどのように形成されたかを知る化学的かつ力学的な手がかりを得るため、これらの銀河にある暗くて遠い、非常に老いた星を観測します。これらはすべて、宇宙が開いてくれている歴史書を様々な方法で読み解こうとする試みです。極めて暗く非常に遠方にある天体を観察することが必要で

すが、私たちはこの書の読み方を習得しなければなりません。

この歴史書が何を教えてくれるかは分かりませんが、私たちがどこから来たのか、そしてひょっとしたらどこに向かっているのかについての理解にも、きっと一歩近づけてくれるでしょう。



Fig. 1

望遠鏡と馬頭星雲
左は、高校・大学時代に製作した200mm反射望遠鏡の写真。右は、この望遠鏡で撮影したオリオン座の馬頭星雲の写真。馬の頭に当たる部分は塵雲で、オリオン・アソシエーションの若い高温の星に照らされて輝くガス雲の前にある。

Photos of telescope and horsehead nebula
On the left is the eight-inch (20 cm) photographic reflecting telescope I built in my high school and undergraduate years. On the right is a photograph of the Horsehead Nebula in Orion taken with this instrument. The horse's head is a cloud of dust in front of a glowing gas cloud illuminated by hot, young stars in the Orion association.

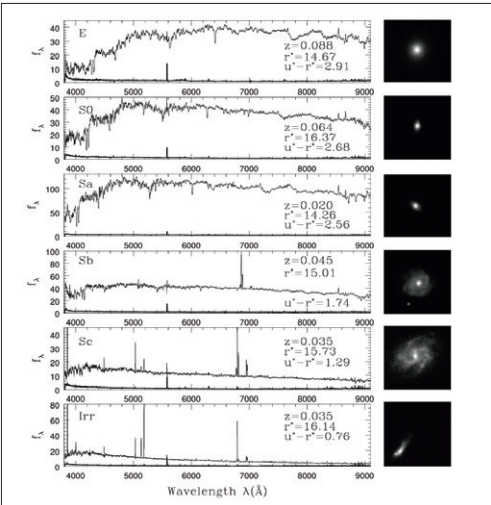


Fig. 2

SDSSによる銀河のスペクトル
Iskra Stratevaの初期のSDSSの論文で示された、種類と距離が異なる銀河のスペクトル。上の方にある図ほど古い恒星種族から成る赤い銀河で、下へ行くにしたがって多数の若い高温の星から成る青い銀河となる。上向きのピークは高温のガス雲内にある元素の輝線であり、下向きのピークは星からの吸収線である。これらの線は、異なる銀河では同じ波長で見られない。これは赤方偏移と呼ばれる効果で、 z として示している。赤方偏移 z とは、銀河が地球から遠ざかる速度の光速に対する割合である。

SDSS spectra of galaxies
A set of spectra of galaxies of several kinds and distances as featured in the classic SDSS paper by Iskra Strateva. The galaxies from top to bottom go from red objects with old stellar populations to blue objects with many young, hot stars. The features which spike up are lines of elements in hot gas clouds; the ones which go down are absorption lines from stars. Notice that the lines do not occur at the same wavelength in different objects. This is the effect of redshift, which is listed (z). The redshift z is the fraction of the velocity of light which the galaxy is receding from us.



Fig. 3

4シューター開発メンバー
4シューターカメラの製作に多大な貢献をしたメンバーの集合写真。カメラを囲んで撮影。奥から、Michael Carr（最近引退したが、1970年代初頭から実質すべての機器プロジェクトで共に研究を行った）、Ernie Lorenz（Jim Westphalの下で働いていた優れた技師）、Richard Lucinio（電子機器設計士）、DeVere Smith（電子技師）、右側がEd Danielson（惑星科学者でNASAの権威）、その前がJim Westphal（惑星科学者、地質学の第一人者、小機器の設計者、ハッブルWF/PCカメラの研究責任者、そしてほとんどの技術的なことでの私の師匠）、最前列がDon Schneider（大学院での教え子）、左側へ行って、Vic Nenow（電子技師、電子機器全般の天才）、私（今よりずっと若いですね）、Barbara Zimmerman（パロマー天文台のCCDと機器すべてのソフトウェアを書いた優秀なコンピュータプログラマー）。

Four-shooter crew photograph
This photograph shows the people who made significant contributions to the construction of the four-shooter camera, here grouped under and around the instrument, including (from back) Michael Carr, a mechanical engineer who recently retired but worked with me for essentially all of my instrument projects since the early 1970s, Ernie Lorenz, a superb technician who worked for Jim Westphal, Richard Lucinio, electronics designer, DeVere Smith, electronics tech, Ed Danielson (on right, planetary scientist and NASA guru, and forward in that group, Jim Westphal, planetary scientist, geological guru, gadgeteer, PI on the Hubble WF/PC camera, and my mentor in most matters technical, and in the foreground Don Schneider while he was my graduate student. Then the group on the left includes Vic Nenow, electronics tech and general electronics genius, me (I was much younger then), and Barbara Zimmerman, superb computer programmer who wrote all the CCD and instrument software for Palomar.

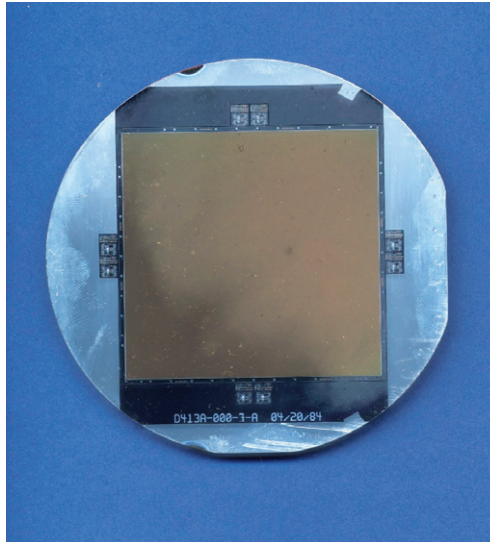


Fig. 4

大型CCDウエハー
Morley Bloukeが1986年にJim Westphalの研究室に持ち込んだ、ウエハーに搭載した超大型CCD。約60mm四方、2,400×2,400の580万ピクセル。当時最大のCCDは約12mm四方だった。

Big CCD Wafer
This is a photograph of the very large CCD on its wafer which Morley Blouke brought to Jim Westphal's office in 1986. It is about 60 mm square, 2,400 × 2,400, 5.8 million pixels. The largest CCD available at that time was about 12 mm square.

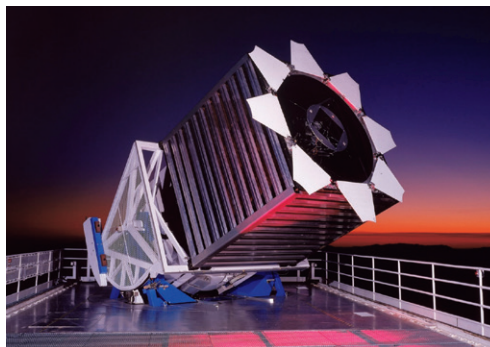


Fig. 5

日没時のSDSS望遠鏡
日没時の2.5mSDSS望遠鏡の美しく印象的な写真。先端部の花びらは、折り畳んで望遠鏡を覆ったり、較正用のスクリーンとして使用されたりする。望遠鏡上部を覆う金属の箱と下の白いフレームは、風と光の調整設備で、望遠鏡と一緒に移動するが接触はしない。ほとんどの天文台の望遠鏡にあるような昔ながらのドームはない。

SDSS telescope at sunset
A dramatic photo of 2.5-meter SDSS telescope at sunset. The flower-petals on the end fold down to cover the telescope and are used as screens for calibration. The metal box covering the top of the telescope and the white frame below are a wind- and light baffle which moves with the telescope but does not touch it. There is no classic dome as most observatory telescopes have.

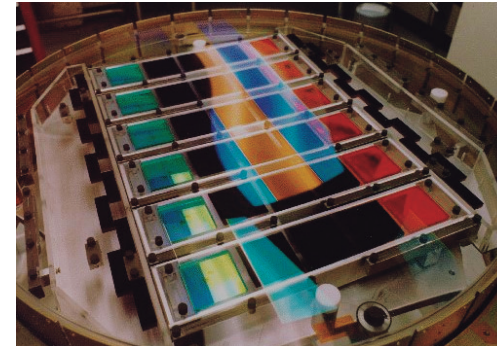


Fig. 6

SDSSカメラの焦点面
SDSSカメラの焦点面の写真。5台ずつ6列に並ぶCCDの前面にフィルターがかかっている。色は上(右)から赤、近赤外線、紫外線、遠赤外線、緑。メインのCCDの上下に11個の小型検出器があり、星の位置測定に使用された。これらはすべて、直径約0.5m、厚さ5cmの石英ガラスの複合光学素子に搭載されている。これは望遠鏡の光学設計の一部であり、写真のとおり、CCDがとりつけられる8台の真空クライオスタットの真空窓が1つ取り付けられている。

SDSS Camera focal plane
Photograph of the focal plane of the SDSS camera, showing the filters in front of the CCDs in six columns of five detectors, from top (right), red, near infrared, ultraviolet, farther infrared, and green. There are 11 smaller detectors above and below the main array which were used to measure the positions of stars. All of this is mounted on a complex optical element of fused silica about a half meter in diameter and 5 cm thick, which is part of the optical design of the telescope and forms the vacuum window for the eight vacuum cryostats seen here in which the CCDs are mounted.



Fig. 7

プリンストン大学SDSSメンバー
プリンストン大学でSDSSのカメラとソフトウェアの開発に取り組んだチームのメンバー。後列で立っているのが、左からConnie Rockosi（当時の学生。カメラとサーベイのほぼすべてのエンジニアリング面で力を貸してくれた）、Xiaohui Fan（当時の学生。SDSSデータの大きく赤方偏移したクエーサーの検出を限界まで押し上げた）、George Pauls（望遠鏡製作におけるカメラプロジェクトマネージャー）、Ernst de Haas（引退した機械技師だが、カメラの開発を手伝うために現役復帰した）、関口真木（国立天文台。CCDと電子機器の専門家で、カメラの設計と製作に多大な貢献をした）、Michael Richmond（カメラのソフトウェア開発に従事）、Fred Harris（ローウェル天文台。カメラの電子機器の設計に協力）、Mike Carr（カメラのチーフ機械技師。長年私と共にさまざまな機器の開発に従事）、Robert Lupton（ソフトウェア科学の第一人者、カメラデータ処理パイプラインソフトウェア並びに多くのサーベイ計画ソフトウェアの主要作成者）。次に、着席またはしゃがんでいるのが、左からRob Simcoe（当時の学生。ソフトウェア開発に従事）、Jill Knapp（ソフトウェア研究のプロジェクトマネージャー。チーム全体の総合コーディネーターで母親代わり）、Brian Elms（機械工。現在はヒロの国立天文台ハワイ観測所に勤務）、私、土居守（当時は東京大学に在籍し、その後国立天文台に勤務。カメラの較正システムを構築したCCDの専門家。おかげで、長年にわたるサーベイの間、機器の健全性と性能の監視が可能になった）。土居守と私の右側には、SDSSカメラの枠の輸送用木箱がある。木箱の上には枠本体があり、望遠鏡に搭載されたカメラの周辺機器を支える。Fred HarrisとMichael Richmondの背後には、カメラ焦点面の実物大の図があり、カメラ内のカラーフィルターと52個のCCDが表示されている。

Princeton SDSS crew

The team of people at Princeton who worked on the SDSS camera and software. Back row, standing, from left: Connie Rockosi, student at the time, who helped me with essentially all engineering aspects of the camera and the survey, Xiaohui Fan, student at the time, who pushed the detection of high-redshift quasars in the SDSS data to the limit, George Pauls, camera project manager during its construction, Ernst de Haas, retired mechanical engineer who came out of retirement to help with the camera, Maki Sekiguchi of NAOJ, CCD and electronics expert who contributed enormously to the design and construction of the camera, Michael Richmond, who worked on the camera software, Fred Harris, from Lowell observatory, who helped design the camera electronics, Mike Carr, chief mechanical engineer for the camera, with whom I had worked for many years and many instruments; Robert Lupton, primary software scientist and primary author of the camera data reduction pipeline as well as much of the survey planning software; Then, seated or kneeling from the left: Rob Simcoe, student at the time, who worked on software, Jill Knapp, project manager for the software effort and general coordinator and mother for the whole team, Brian Elms, machinist (now at Subaru in Hilo), me, and Mamoru Doi, then at the University of Tokyo on his way to NAOJ, CCD expert who built the calibration system for the camera, which allowed us to monitor the health and performance of the instrument through the many years of the survey. To the right of Mamoru and me is the shipping crate for the SDSS camera cradle and, on top of the crate, the cradle itself, which supported the camera peripheral equipment on the telescope. Behind Fred Harris and Michael Richmond is a full-sized image of the camera focal plane, showing the color filters and the 52 CCDs in the camera.

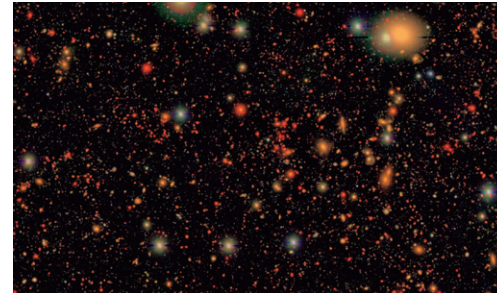


Fig. 8

COSMOSフィールドの極めて遠方にある銀河団のHSC画像
HSCカメラで撮像された遠方の空のごく一部（約13×8分）。写っている天体のほぼすべてが銀河である。中央すぐ右と、中央左やや上方にある極めて赤い銀河の集合2つは、非常に遠方の銀河団で、その光は宇宙の年齢が約半分のときに放出されたものである。赤く見えるのは、赤方偏移しているためと、実に70億歳という非常に老いた星から成る天体のためである。

HSC Image of a very distant cluster in the Cosmos Field

A small piece of sky (about 13 × 8 arcminutes) imaged deeply by the HSC camera. Almost all objects in this picture are galaxies. The two groups of very red galaxies just to the right of center and again to the left and slightly above center are very distant clusters of galaxies, whose light left them about half the age of the universe ago. They are red because of the redshift *and* because they are objects with very old stars even 7 billion years ago.

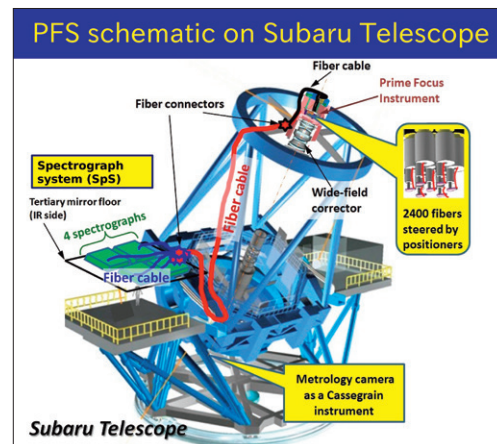


Fig. 9

すばるのPFS図

すばる望遠鏡のPFSシステムの概略図。PFSは、HSCと広視野集光器を共有し、直径1度を超える広視野で優れた画像を提供する予定。HSCは焦点面にCCDを並べているが、PFSは2,400本の光ファイバーを動かす位置制御装置を備えた機器を使用する。位置制御装置それぞれに小型モーターを2台搭載して、焦点面上でスペクトルを取得したい銀河の映像がある所望の位置に光ファイバーを移動させる。光ファイバーの位置は、光ファイバーを見上げる高性能な小型望遠鏡であるメトロロカメラで測定される。光ファイバーに入射した光は、2,400本の光ファイバーから成る長さ55mのケーブルで、望遠鏡からドーム内に取り付けられた4台の分光器へと送られ、各分光器はそれぞれ600本の光ファイバーの光からスペクトルの取得を行う。

Diagram of PFS on Subaru

Schematic diagram of the PFS spectrograph system for the Subaru telescope. PFS will share the wide-field corrector with HSC, providing excellent images over a field larger than a degree in diameter. In place of HSC's focal plane tiled with CCDs, PFS will use a machine with 2,400 fiber positioners, each with 2 tiny motors to move the fibers to the desired location in the focal plane where there is the image of a galaxy whose spectrum is desired. The positions of the fibers are measured by a powerful small telescope, the metrology camera, looking up at the fibers. The light entering the fibers is carried by a 55-meter long cable of 2,400 optical fibers to four bench spectrographs mounted in the dome off the telescope, each of which makes spectra from the light from 600 fibers.

稲盛財団2019——第35回京都賞と助成金

発行 2020年10月31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

Tel: 075-353-7272 Fax: 075-353-7270

E-mail press@inamori-f.or.jp URL <https://www.inamori-f.or.jp>

ISBN978-4-900663-35-0 C0000